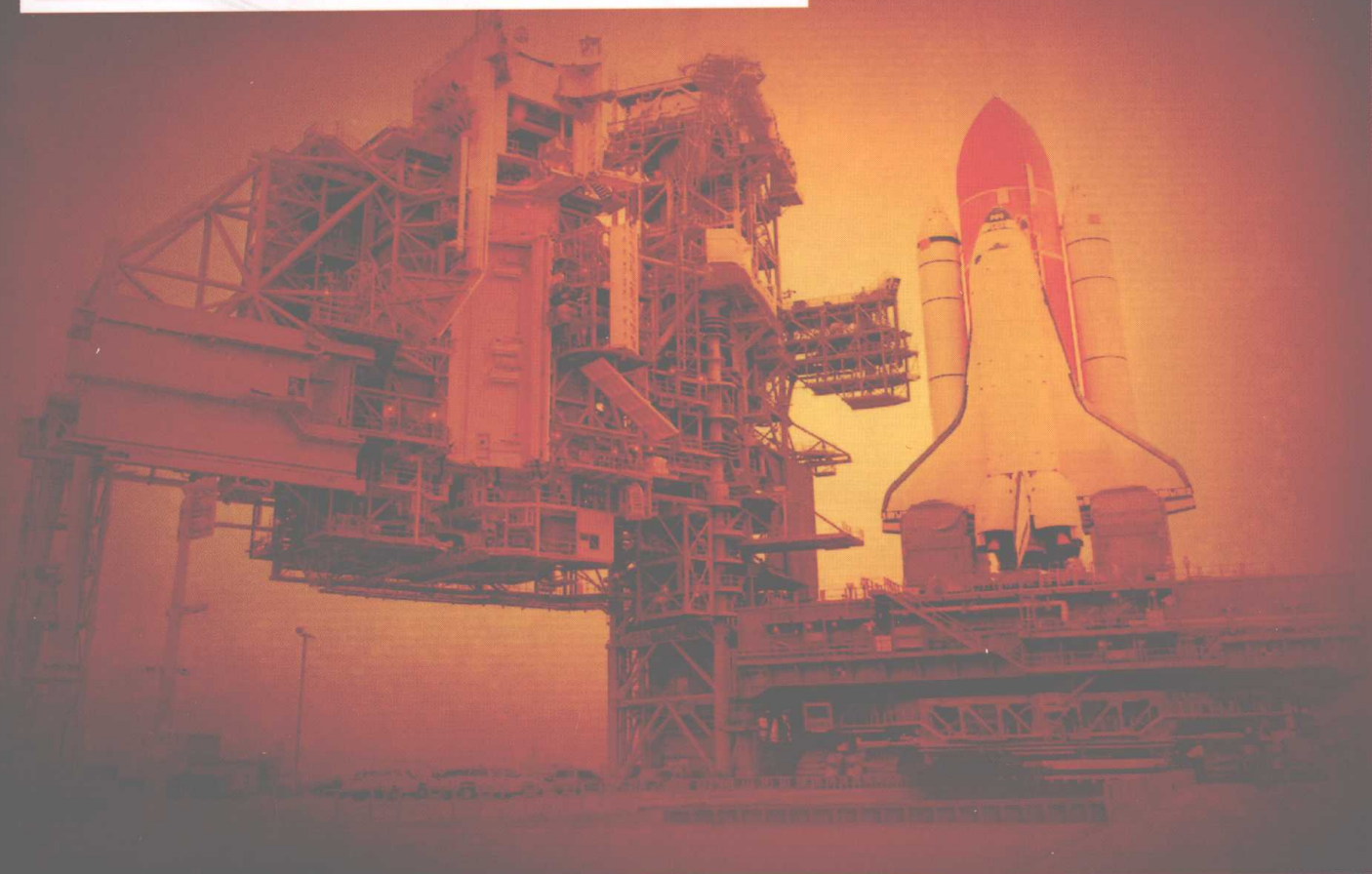


**Modern Non-destructive
Testing & Evaluation**

李国华 吴淼 编著

现代无损检测与评价



化学工业出版社

Modern Non-destructive
Testing & Evaluation

现代无损检测与评价

本书是关于无损检测与评价的一本理论与实践并重、入门与提高相结合的著作，既注重基础知识和基本理论的介绍，又照顾实践的需要，同时还关注本学科的最新发展。

全书共分十章，第一章简要介绍了无损检测与评价的含义、特点、意义、现状与发展；第二章集中讨论了材料与构件中的各种常见缺陷；第三至第十章，分别讨论了超声、射线、磁粉、渗透、涡流、声发射、红外与激光全息这八种无损检测与评价的方法，包括它们的物理基础、基本原理、设备、技术与工艺、特点与典型应用等内容，对超声、射线等五种常规方法，还分别介绍了它们的最新进展。

读者通过本书的学习，将对无损检测与评价的学科体系、现状与发展等方面有比较全面的了解，对超声、射线等无损检测与评价方法有比较深入的认识，为从事无损检测与评价的研究与实践打下比较坚实的基础。

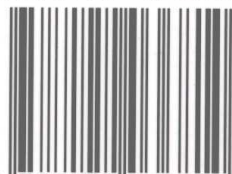
本书既可用作有关专业的大学生和研究生学习无损检测与评价相关课程的教材或教学参考书，也可供工矿企业和科研院所从事无损检测研究与实践的广大工程技术人员学习参考。



www.cip.com.cn
读科技图书 上化工社网

销售分类建议：机械/检测技术

ISBN 978-7-122-03681-0



9 787122 036810 >

定 价：45.00元

Modern Non-destructive Testing & Evaluation

李国华 吴淼 编著

现代无损检测与评价



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

现代无损检测与评价/李国华, 吴森编著. —北京: 化学工业出版社, 2008.10
ISBN 978-7-122-03681-0

I. 现… II. ①李…②吴… III. 无损检验 IV. TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 136083 号

责任编辑: 周 红
责任校对: 郑 捷

装帧设计: 史利平

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 20 字数 488 千字 2009 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 45.00 元

版权所有 违者必究

前言

无损检测与评价的技术体系庞大,全世界业已报道的无损检测与评价方法不下 70 种,其发展日新月异,新理论、新技术和新设备在源源不断地涌现。因此,要想用一本篇幅并不大的书籍反映无损检测与评价的全貌实非易事。本书的内容体系,是笔者在多年从事无损检测与评价的教学与科研的基础上,参考了国内外大量同类和相关著作后确定的。

撰写本书的构想大约萌生于 2002 年,但因笔者杂事较多而迟迟没有动笔,也正因为这几年的拖延,使本书有机会补充这段时间内的国内外最新进展。但有关无损检测与评价的最新文献可谓浩如烟海,虽想竭尽全力将其收集齐全,终因心有余而力不足未能如愿。因此,最新、最好的文献还有待读者自己去查阅、去选择,希望本书所列的信息资源能为读者查阅最新资讯提供一点方便。

全书共分十章,第一章是绪论部分,简要介绍无损检测与评价的含义、特点、现状与发展;第二章集中讨论材料与构件中的各种常见缺陷;第三章~第十章,分别讨论超声、射线、磁粉、渗透、涡流、声发射、红外与激光全息八种无损检测与评价方法,包括它们的物理基础、基本原理、设备、技术与工艺、特点与典型应用等内容。希望通过学习本书,读者能对无损检测与评价的学科体系、现状与发展等方面有一个比较全面而基本的了解,对超声、射线等无损检测与评价方法有比较深入的认识,为进行无损检测与评价的实践打下比较坚实的基础。应该说明,无损检测与评价既有较强的理论性,更有很强的实践性,现有的各类无损检测标准与规范是从事无损检测与评价实践的指南,但更多、更有效的检测技巧还需要大家在实践中学习、总结和提高。

本书得到了中国矿业大学(北京)2006 年教材建设的重点立项资助,为此,本书编者感谢中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院副院长钱旭教授,材料科学与工程系主任陈华辉教授和副主任马向东教授,学校教务处常维亚处长、丁钢副处长和戚鹏老师,校教材建设委员会以及副校长范迅教授等有关领导和专家的大力支持。

在资料收集过程中,笔者得到了本校图书馆的陈征和管向东老师、清华大学图书馆的王红和王蓉老师、新加坡国立大学的宋志刚博士和陈余峰博士、英国剑桥大学工程系的徐彦猛博士和材料科学与冶金系的王棒柱博士、北京交通大学曾凡仔博士等许多人的无私帮助,任玉锁博士为笔者提供了珍贵的射线探伤实例照片,材料科学与工程专业 2001 级本科生吕晓畅同学为查对有关无损检测与评价的最新标准付出了辛勤劳动,研究生于小川、宁华荣、马保全、温庆丰、聂锋、邓凡宇、黄永玲、曹党超、闫敏、刘国正在有关材料的特性数据的查找、收集、整理、翻译、校对和录入排版等方面给予了帮助,编者在此一并致谢。

书中不妥之处,敬请各位读者批评指正。

编著者

目 录

第一章 绪论	1
第一节 无损检测与评价概述	1
一、无损检测与评价的含义	1
二、无损检测与评价的特点	1
三、开展无损检测与评价研究与实践的意义	1
四、无损检测与评价的发展历程	2
五、无损检测与评价的学术组织和主要出版物	3
六、无损检测与评价在各国的发展	4
第二节 无损检测与评价的主要技术体系及各自特点	4
一、超声检测	4
二、射线检测	5
三、磁粉检测	5
四、渗透检测	6
五、涡流检测	6
六、声发射检测	6
七、红外检测	7
八、激光全息检测	7
第三节 无损检测与评价的发展趋势	7
复习思考题	9
参考文献	9
第二章 常见缺陷的分类描述	11
第一节 金属材料与构件中的常见缺陷现象	11
一、铸件中的常见缺陷现象	11
二、锻件中的常见缺陷现象	13
三、焊缝中的常见缺陷现象	15
四、金属型材中的常见缺陷现象	15
五、热处理中的常见缺陷现象	16
六、使用与维修过程中的常见缺陷现象	17
第二节 无机非金属材料与构件中的常见缺陷现象	18

一、钢筋混凝土结构中的常见缺陷现象	18
二、陶瓷材料中的常见缺陷现象	20
第三节 橡胶与塑料制品中的常见缺陷现象	22
一、橡胶制品中的常见缺陷现象	22
二、塑料制品中的常见缺陷现象	23
第四节 复合材料中的常见缺陷现象	23
一、树脂基纤维增强叠层结构复合材料中的常见缺陷现象	23
二、金属蜂窝胶接结构中的常见缺陷现象	24
参考文献	25

第三章 超声检测 27

第一节 超声检测的基本原理	27
一、机械振动与机械波	27
二、超声波基础	28
三、超声波的传播特性	34
第二节 超声检测设备	45
一、超声波检测仪	45
二、超声波探头	47
三、试块	50
四、耦合剂	52
第三节 超声检测技术	53
一、超声波检测方法的分类	53
二、探测条件的选择	54
三、超声检测的缺陷定位、定量与定性	56
第四节 超声检测的应用	60
一、金属板材的超声波检测	60
二、锻件的超声波检测	61
三、金属焊缝的超声波检测	62
四、非金属材料的超声波检测	63
五、小型压力容器壳体的超声波检测	63
六、超声波检测的其他应用	64
第五节 超声检测的新近进展	65
一、激光超声	65
二、电磁超声	68
三、相控阵超声	69
复习思考题	71
参考文献	71

第四章 射线检测 74

第一节 概述	74
--------------	----

一、射线及其种类	74
二、射线的发现	75
三、射线检测的基本原理、特点及应用	75
第二节 射线检测的物理基础	76
一、射线的产生	76
二、射线的特性	78
三、射线与物质的相互作用和衰减	78
第三节 射线检测方法	81
一、照相法	81
二、电离检测法	82
三、荧光屏直接观察法	82
四、电视观察法	83
第四节 射线照相检测设备	83
一、射线探伤机	83
二、透度计	86
三、增感屏	90
四、胶片	91
五、暗室设备	94
第五节 射线透照工艺	94
一、典型工件的透照方法	94
二、曝光参数的选择	98
第六节 评片技术	101
一、概述	101
二、射线照相底片的质量指标及要求	102
三、常见缺陷的影像特征	102
四、伪缺陷的出现与处理	105
五、缺陷位置和大小的确定	106
第七节 中子射线检测简介	107
一、中子射线的发现	107
二、中子的基本性质	107
三、中子的主要类型	108
四、中子与物质的相互作用	108
五、中子射线的产生及中子源	109
六、中子射线通过物质时的衰减	109
七、中子射线照相检测原理及特点	110
八、中子射线照相检测的应用	111
第八节 射线的防护	111
一、射线对人体的危害	112
二、射线防护的有关法令	112
三、辐射量及其单位	112

四、射线防护原则	114
五、射线防护方法	115
六、中子射线防护	116
第九节 射线检测的新近进展	116
一、工业射线 CT 的发展历程	117
二、工业射线 CT 技术的工作原理	117
三、工业射线 CT 的系统组成	118
四、工业射线 CT 的主要技术指标	119
五、工业射线 CT 技术的特点	119
六、工业射线 CT 技术的应用	120
参考文献	120

第五章 磁粉检测 122

第一节 概述	122
一、磁粉检测发展简史	122
二、磁粉检测的特点及应用	123
第二节 磁粉检测的基本原理	123
一、磁场及其特征参量	123
二、介质的磁特性及其影响因素	126
三、典型电流的磁场强度	128
四、漏磁场及其影响因素	130
第三节 磁粉检测设备与器材	131
一、磁粉探伤机	131
二、磁粉和磁悬液	133
三、人工缺陷试块	133
第四节 磁粉检测技术与工艺	137
一、磁化方法	137
二、磁化电流	141
三、磁化规范	142
四、检测方法	143
第五节 磁粉检测的基本步骤	144
一、预处理	144
二、磁化	144
三、施加磁粉或磁悬液	145
四、磁痕的观察、分析与记录	145
五、后处理	147
第六节 磁粉检测的应用	148
一、轴、杆类工件的检测	148
二、管类工件的检测	148
三、盘类工件的检测	149

四、环形工件的检测	149
五、焊接件的检测	149
六、弹簧的检测	150
七、钢制压力容器的检测	150
八、内燃机活塞销的磁粉探伤	151
九、起重机吊钩的磁粉检测	151
第七节 磁粉检测的新近进展	152
复习思考题	152
参考文献	153

第六章 渗透检测 155

第一节 概述	155
一、渗透检测的发展简史	155
二、渗透检测的特点	155
三、渗透检测的应用	156
第二节 渗透检测的理论基础	156
一、表面张力	156
二、润湿现象	157
三、毛细现象	158
四、表面活性和表面活性剂	159
五、乳化作用和乳化剂	159
六、光学基础知识	160
第三节 渗透检测材料与设备	161
一、渗透检测材料	161
二、渗透检测设备	166
第四节 渗透检测技术	169
一、渗透检测方法的分类	169
二、渗透检测的基本步骤	170
三、常见缺陷的显像特征	172
四、虚假显像	173
五、影响渗透检测灵敏度的因素	173
第五节 渗透检测的应用及新近进展	174
一、渗透检测的应用	174
二、渗透检测的新近发展	174
复习思考题	175
参考文献	175

第七章 涡流检测 176

第一节 涡流检测概述	176
一、涡流检测的发展简史	176

二、涡流检测的特点	176
三、涡流检测的应用	177
第二节 涡流检测的基本原理	177
一、涡流及其趋肤效应	177
二、检测线圈的阻抗分析	179
三、有效磁导率	180
四、特征频率	181
五、涡流检测的相似律	182
六、填充系数	182
七、影响线圈阻抗的因素	183
第三节 涡流检测设备	185
一、传感器	185
二、涡流检测仪器主机	186
三、参考试样	187
四、其他辅助设施	188
第四节 涡流检测技术	189
一、检测线圈的使用方式	189
二、涡流检测的一般程序	190
三、抗干扰措施	191
第五节 涡流检测的应用	192
一、涡流探伤	192
二、材质检验	193
三、涡流测厚	194
第六节 涡流检测的新近进展	195
一、远场涡流检测概述	195
二、远场涡流技术的检测原理	196
三、远场涡流和常规涡流技术的简要对比	196
四、远场涡流应用中的主要问题	197
复习思考题	197
参考文献	197

第八章 声发射检测..... 200

第一节 声发射检测的理论基础	200
一、声发射的产生	200
二、声发射的传播	201
三、声发射检测的基本原理	202
四、声发射检测的特点	202
第二节 声发射检测的技术基础	204
一、声发射信号的表征	204
二、声发射源定位	206

三、提高信噪比的措施	208
第三节 声发射检测设备	209
第四节 声发射检测的应用	213
一、在材料研究中的应用	213
二、焊接过程监测和焊缝质量的检测与评定	216
三、切削加工过程的在线监测	219
四、在泄漏检测中的应用	220
五、压力容器的结构完整性监测与评价	221
六、其他应用	223
第五节 声发射检测的新近进展	224
一、模态声发射的基本理论	224
二、模态声发射的技术特点	226
三、模态声发射技术的典型应用	226
复习思考题	227
参考文献	227
第九章 红外无损检测	231
第一节 红外无损检测概述	231
第二节 红外检测的物理基础	232
一、红外辐射的基本概念	232
二、红外辐射的基本定律	234
三、红外辐射的传输与衰减	237
第三节 红外检测设备	237
一、红外探测器	237
二、红外检测仪器	240
第四节 红外无损检测技术	243
一、检测方式	243
二、激励源和激励方式	244
三、红外辐射能的获取	244
四、缺陷的定性、定位与定量	244
第五节 红外无损检测的应用	244
一、红外无损检测在电力工业的应用	245
二、红外无损检测在石油化工中的应用	245
三、材料和构件的红外无损检测与评价	245
四、红外无损检测在机械领域的应用	245
五、构(建)物的红外无损检测与评价	246
六、红外无损检测在自动测试方面的应用	246
七、红外热像技术在灾害防治方面的应用	246
八、医学红外热像诊断	247
九、红外泄漏检测	247

十、红外无损检测的其他应用	247
复习思考题	248
参考文献	248
第十章 激光全息检测	252
第一节 概述	252
一、全息术及其特点	252
二、全息术的发展历程	253
三、激光全息无损检测及其特点	254
四、激光全息无损检测的典型应用	255
第二节 激光全息检测的基本原理	255
第三节 激光全息检测设备	258
一、激光光源	258
二、工作台	260
三、记录介质	261
四、漫射照明设备	264
第四节 激光全息检测技术	264
一、激光全息照相操作过程	264
二、物体表面微差位移的观察方法	265
三、激光全息检测的加载方法	267
第五节 激光全息检测的应用	268
复习思考题	272
参考文献	273
附录 1 国内部分无损检测标准目录	275
一、超声检测	275
二、射线检测	277
三、磁粉检测	279
四、渗透检测	280
五、涡流检测	280
六、声发射检测	281
七、红外检测	281
八、激光全息检验	281
九、其他	281
参考文献	282
附录 2 部分材料的声学特性	283
附录 3 常用钢种的磁特性参数表	284
参考文献	288

附录 4 部分材料的光谱发射率数据	289
参考文献	292
附录 5 部分材料的热物性和电阻率数据	293
附表 1 常用钢铁材料的热物性和电阻率数据	293
附表 2 常用铝及铝合金的热物性和电阻率数据	297
附表 3 常用镁合金的热物性和电阻率数据	299
附表 4 常用钛合金的热物性和电阻率数据	299
附表 5 其他常用金属材料的热物性和电阻率数据	300
附表 6 部分非金属材料的热物性数据	301
参考文献	301
附录 6 无损检测的信息资源	303
一、国内外部分无损检测专业期刊	303
二、国内外部分无损检测专业网址	303

第一章

绪论

第一节 无损检测与评价概述

一、无损检测与评价的含义

所谓无损检测与评价 (NDT & E: Non-destructive Testing and Evaluation), 就是利用物质的声、光、磁和电等特性, 在不损害或不影响被检对象使用性能的前提下, 检测被检对象中是否存在缺陷或不均匀性, 给出缺陷的大小、位置、性质和数量等信息, 进而判定被检对象所处技术状态 (如合格与否、剩余寿命等) 的所有技术手段的总称。

二、无损检测与评价的特点

与破坏性检测相比, 无损检测与评价具有以下显著特点。

(1) 非破坏性 检测不会损害被检对象的使用性能, 因此, 无损检测又称非破坏性检测。

(2) 全面性 由于检测是非破坏性的, 因此必要时可对被检对象进行 100% 的全面检测, 这是破坏性检测所办不到的。

(3) 全程性 破坏性检测一般只适用于对原材料进行检测, 如机械工程中普遍采用的拉伸、压缩、弯曲、疲劳等破坏性检验都是针对制造用原材料进行的, 对于产成品和在用品, 除非不准备让其继续服役, 否则是不能进行破坏性检测的。而无损检测因不损坏被检对象的使用性能, 所以, 不仅可对制造用原材料、各中间工艺环节、直至最终的产成品进行全程检测, 也可对服役中的设备进行检测, 如桥梁、房屋建筑、各类输送管道、机械零部件及成套设备、汽车、机车、飞机、轮船、核反应堆、宇航设备及电力设备等, 都可进行无损检测。

(4) 可靠性问题 目前还没有一种对所有材料或缺陷都可靠的无损检测方法, 无损检测结论的正确与否还有待其他手段 (如解体检测) 的检验, 其可靠性还有待提高。

三、开展无损检测与评价研究与实践的意义

无损检测与评价技术是工业发展必不可少的有效工具, 在一定程度上反映了一个国家的工业发展水平, 其重要性已得到公认。

美国为保持它在世界上科技方面的领先地位, 在 1979 年的一次政府工作报告中提出要成立六大技术中心, 其中之一就是无损检测技术中心。1981 年, 美国前总统里根在给美国无损检测学会成立 40 周年大会的贺信中说: “你们能够给飞机和空间飞行器、发电厂、船舶、汽车和建筑物等带来更大程度的可靠性, 没有无损检测, 我们就不能享有目前在这些领域和其他领域的领先地位”。

在我国,无损检测与评价也得到了国家有关部门的高度重视,不仅成立了专门的学术组织,还设立了专门从事无损检测与评价的研究机构。在“973”、“863”和国家自然科学基金等高水平的科研计划中,都列有无损检测与评价的专门课题。

开展无损检测与评价的研究与实践的意义是多方面的,主要表现在以下几个方面。

(1) 改进生产工艺 采用无损检测方法对制造用原材料直至最终的产成品进行全程检测,可以发现某些工艺环节的不足之处,为改进工艺提供指导,从而也在一定程度上保证了最终产品的质量。

例如,汽缸体在使用过程中开裂,一般认为是铸造应力造成的,应进行热处理消除。但通过残余应力测定表明,缸体表面存在的是压应力,对缸体使用有好处,说明缸体开裂不是应力所致,用热处理来消除此应力,反而增加开裂危险,所以应从改进缸体设计、增加铸件危险断面的厚度等方面来解决。

(2) 提高产品质量 无损检测可对制造产品的原材料、各中间工艺环节直至最终的产成品实行全过程检测,为保证最终产品的质量奠定了基础。

以汽车连杆为例,第一、第二汽车制造厂在未采用无损检测前,连杆断裂事故经常发生,采用无损检测后,连杆断裂事故比以前下降了90%以上。第二汽车制造厂的球墨铸铁曲轴采用100%无损检测后,近百万件曲轴未发现因球化不合格而发生断裂事故。日本小汽车中30%的零件采用无损检测后,质量迅速超过美国。德国奔驰汽车公司对汽车的几千个零件全部进行无损检测后,运行公里数增加了一倍,大大提高了在国际市场上的竞争能力。

(3) 降低生产成本 在产品的设计制造阶段,通过无损检测,将存有缺陷的工件及时清理出去,可免除后续无效的加工环节,减小原材料和能源的消耗,节约工时,降低生产成本。

(4) 保障设备的安全运行 由于破坏性检测只能是抽样检测,不可能进行100%的全面检测,所得的检测结论只反映同类被检对象的平均质量水平。

由于生产工艺的分散性,即使经破坏性检验为100%的合格品,也不能完全排除其中有不合格品存在。退一步讲,即使所有刚投入运行的设备100%都是完好的,但由于磨损、疲劳和腐蚀等不可避免的因素的作用,设备在使用过程中,也可能发生各种各样的缺陷,如磨损、疲劳损伤、腐蚀、裂纹、断裂等,危及设备的安全运行。如何保障在用设备的安全运行,是摆在我们面前的一个重要课题,对危及人们的生命财产安全的设备(如飞机、火车、轮船、核反应堆等)来说尤其如此。

显然,在这方面破坏性检测是无能为力的。目前,无损检测技术在保障设备的安全完好运行方面,起着举足轻重的作用。

此外,无损检测与评价技术在农作物优种和病虫害防治、自然灾害监测与预防、文物保护、资源勘探、军事侦察、科学研究、新材料研究、新工艺开发、新产品研制等诸多方面都大有其用武之地,“现代工业是建立在无损检测技术基础之上的”并非言过其实。

四、无损检测与评价的发展历程

无损检测与评价起源于何时目前难以考证,历史上著名的阿基米德(Archimedes,约公元前287~212年)利用液体浮力原理评判“真假金皇冠案”大概可算作无损检测的一个实例。无损检测由最初的个别实践逐渐发展成为一门学科,大致经历了无损探伤(NDI: Non-destructive Inspection)、无损检测(NDT: Non-destructive Testing)、无损评价

(NDE: Non-destructive Evaluation) 几个发展阶段, 各阶段之间没有绝对明确的时间界限, 它们之间既有继承与发展, 又有各自不同的研究重点。

(1) 无损探伤 在无损检测发展的初期阶段 (20 世纪 50 年代), 主要是利用超声、射线等技术手段来推断被检对象中是否存在缺陷 (或异常), 缺陷的检出是当时最为关心的问题。在无损探伤发展阶段, 研究的重点是如何检出被检对象中的缺陷, 其基本任务是将被检对象区分为有缺陷和无缺陷两大类。

(2) 无损检测 随着生产和科技的发展, 人们不再满足于仅仅探测出被检件中是否存在缺陷, 而是对无损检测提出了更高的要求。在这个发展阶段中, 不仅要回答被检件中是否存在缺陷, 还希望进一步提供有关缺陷的性质 (类型)、位置等方面的信息, 这个阶段称为无损检测阶段。对工业发达国家来说, 无损检测发展阶段大致始于 20 世纪 70 年代末 80 年代初。

(3) 无损评价 目前, 无损检测已进入无损评价发展阶段, 在这个阶段中, 不仅要对缺陷的有无、性质、位置等进行检测, 还要进一步评价缺陷的大小及其对被检件性能指标 (如强度、寿命) 的影响。

为及时反映无损检测的这种变化趋势, 20 世纪 70 年代末 80 年代初, 美国无损检测学会把其会刊刊名由 “Materials Testing” 改为 “Materials Evaluation”, 无损检测领域的国际期刊 “NDT International” 改名为 “NDT & E International”。

对压力容器、输送管道等在役设备来说, 无损评价比无损探伤或无损检测要重要得多, 当然, 相应的技术难度也大得多。

五、无损检测与评价的学术组织和主要出版物

在世界各国广大无损检测工作者的共同努力下, 无损检测与评价技术受到越来越广泛的关注, 从业队伍不断壮大, 各种学术组织相继建立, 积极开展学术活动, 并有正式的专门出版物, 为推动无损检测与评价技术的发展做出了重要贡献。

在我国, 1978 年 11 月成立了全国性的无损检测学术组织——中国机械工程学会无损检测分会。此外, 冶金、电力、石油化工、船舶、宇航等行业还成立了各自的无损检测学会或协会; 部分省、自治区、直辖市和地级市成立了省 (市) 级、地市级无损检测学会或协会; 东北、华东、西南等区域还各自成立了区域性的无损检测学会或协会。

世界各主要工业先进国家也有类似的组织, 如美国无损检测学会 (ASNT: The American Society for Nondestructive Testing, 成立于 1941 年)、英国无损检测学会 (BINDT: The British Institute of Non-Destructive Testing, 1954 年成立)、加拿大无损检测学会 (CINDE: Canadian Institute for NDE, 1976 年 12 月成立)、德国无损检测学会 (DGZfP: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V., 1933 年成立)、法国无损检测学会 (COFREND: the “Comité Français d’Etudes des Essais Non-Destructifs”)、日本非破坏性检查协会 (JSNDI: the Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 1952 年 10 月 25 日成立, 1955 年取名 JSNDI)、俄罗斯无损检测与技术诊断学会 (RSNTTD: Russia Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics, 1957 年成立)、澳大利亚无损检测学会 (Australian Institute for Non-Destructive Testing, 1963 年成立) 等。

除国家内的学术组织外, 在世界范围内还成立了区域性的学术组织, 如无损检测国际委员会 (ICNDT: The International Committee for Non Destructive Testing)、欧洲无损检测联盟 (EFNDT: European Federation for Non-Destructive Testing, 成立于 1998 年)、亚太

地区无损检测委员会 (APCNDT: Asian Pacific Committee on Non Destructive Testing, 1976 年 3 月 15 日在日本东京成立) 等。

以上学术组织都定期、不定期地开展学术活动, 如无损检测国际委员会每三、四年召开一次世界无损检测大会 (WCNDT: World Conference on NDT), 亚太地区无损检测委员会每两年召开一次亚太地区无损检测会议 (Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing)。欧洲无损检测联盟也开展经常性的学术交流活动。

有关无损检测与评价的专门期刊, 除前面已经提到的 “Materials Evaluation” 和 “NDT&E International” 外, 影响比较大的还有 “The ICNDT Journal” (无损检测国际委员会会刊)、“Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring” (英国无损检测学会会刊)、“非破坏检查” (日本无损检测协会会刊)、“Non-Destructive Testing-Australia” (澳大利亚无损检测学会会刊)、“ZFP-ZEITUNG” (德国、奥地利、瑞士三国无损检测学会联合会刊)、“CINDE Journal” (加拿大无损检测学会会刊), 以及中国无损检测学会会刊 “无损检测”。在我国, 除 “无损检测” 外, 还有辽宁省无损检测学会主办的专门期刊 “无损探伤”。

六、无损检测与评价在各国的发展

无损检测与评价在世界各国的发展极不平衡。

由于政府的高度重视和多渠道的大量资金支持, 使美国在无损检测的基础理论研究、高新设备的研发以及无损检测标准化等诸多方面都保持世界领先地位, 是公认的当今世界无损检测最先进的国家。

德国是世界上最早成立无损检测学会的国家, 目前, 在超声和声发射的基础理论研究、仪器设备研制方面保持世界领先地位, 其中 K.K 公司的产品代表超声检测设备的世界最高水平。

俄罗斯在电磁检测和声显微镜方面处于世界领先地位。

英国在超声相控阵和红外检测方面具有一定的优势。

在无损检测的基础理论研究和仪器设备开发方面, 我国与世界先进国家之间还有较大差距, 特别是在红外、声发射等高新技术检测设备方面更是如此。

第二节 无损检测与评价的主要技术体系及各自特点

据不完全统计, 世界各国业已报道的无损检测与评价方法不下几十种, 其中, 理论基础比较成熟、应用比较广泛的无损检测与评价方法主要有: 超声 (UT: Ultrasonic Testing)、射线 (RT: Radiographic Testing)、磁粉 (MT: Magnetic Particle Testing)、渗透 (PT: Penetrant Testing)、涡流 (ET: Eddy Current Testing) 这五大常规技术, 以及声发射 (AE: Acoustic Emission)、红外检测 (IR: Infrared)、激光全息检测 (HNT: Holographic Nondestructive Testing) 等几种比较新的无损检测方法。现将以上各检测方法的简要工作原理、性能特点及主要应用分述如下。

一、超声检测

超声检测的基本原理是: 利用超声波在界面 (声阻抗不同的两种介质的结合面) 处的反

射和折射以及超声波在介质中传播过程中的衰减,由发射探头向被检件发射超声波,由接收探头接收从界面(缺陷或本底)处反射回来的超声波(反射法)或透过被检件后的透射波(透射法),以此检测被检件内部是否存在缺陷,并对缺陷进行定位、定性与定量。

超声检测的优点如下。

①检测成本低;②设备轻便,操作安全;③适用对象广,金属、非金属(塑料、橡胶、木材)、复合材料(混凝土、陶瓷)均可检测;④对平面型缺陷比较敏感;⑤缺陷定位比较准确;⑥可进行单面检测。

超声检测的局限性如下。

①存在检测盲区;②检测效率较低;③缺陷定性还有待深入研究,缺陷定量也不够直观、方便(目前主要采用当量法);④对粗晶材料的检测比较困难;⑤一般需要耦合剂。

超声检测主要应用于对金属板材、管材和棒材,铸件、锻件和焊缝以及桥梁、房屋建筑等混凝土构件的检测。

二、射线检测

射线检测的基本原理是:利用射线(X射线、 γ 射线和中子射线)在介质中传播时的衰减特性,当将强度均匀的射线从被检件的一面注入其中时,由于缺陷与被检件基体材料对射线的衰减特性不同,透过被检件后的射线强度将会不均匀,用胶片照相、荧光屏直接观测等方法在其对面检测透过被检件后的射线强度,即可判断被检件表面或内部是否存在缺陷(异质点)。

射线检测的优点主要如下。

①检测结果直观;②缺陷定性比较容易,定量、定位也比较方便;③检测结果可以保存;④适用对象广(金属、非金属、复合材料均可)。

射线检测的局限性如下。

①检测成本较高;②存在安全隐患,应注意射线防护;③对体积型缺陷的检测灵敏度较高,对平面型缺陷的检测灵敏度较低;④须利用双面法检测;⑤照相法的检测效率较低;⑥射线透照方向的被检件尺寸不能太大。

目前,射线检测主要应用于机械、兵器、造船、电子、航空航天、石油化工等领域中的铸件、焊缝等的检测。

三、磁粉检测

磁粉检测的基本原理是:由于缺陷与基体材料的磁特性(磁阻)不同,穿过基体的磁力线在缺陷处将产生弯曲并可能逸出基体表面,形成漏磁场。若缺陷漏磁场的强度足以吸附磁性颗粒,则将在缺陷对应处形成尺寸比缺陷本身更大、对比度也更高的磁痕,从而指示缺陷的存在。

磁粉检测的主要优点如下。

①能直观地显示缺陷的位置、形状、大小,并可大致确定缺陷的性质;②检测灵敏度较高,目前可检出的最小缺陷宽度约为 $0.1\mu\text{m}$;③几乎不受试件大小和形状的限制;④检测速度快;⑤检测工艺简单;⑥检测费用低。

磁粉检测的局限性如下。

①只能检测铁磁性材料,不能检测非铁磁性材料(如铜、铝等有色金属,奥氏体不锈钢,非金属);②只能检测表面或近表面缺陷,可探测的缺陷深度一般在 $1\sim 2\text{mm}$ 以内;

③对缺陷的取向有一定的限制，一般要求磁化场的方向与缺陷主平面的夹角大于 20° ；④对试件表面的质量要求较高；⑤深度方向的缺陷定量与定位困难。

目前，磁粉检测主要应用于金属铸件、锻件和焊缝的检测。

四、渗透检测

渗透检测的基本原理是：利用毛细管现象和渗透液对缺陷内壁的浸润作用，使渗透液进入缺陷中，将多余的渗透液除去后，残留缺陷内的渗透液能吸附显像剂，从而形成对比度更高、尺寸放大的缺陷显像，有利于人眼的观测。

渗透检测的主要优点如下。

①不受试件形状、大小、化学成分、组织结构的限制，也不受缺陷方位的限制，且一次操作可同时检出所有的表面开口缺陷；②检测设备及工艺过程简单；③对人员的要求不高；④缺陷显示直观；⑤检测灵敏度较高。

渗透检测的局限性如下。

①只能检测表面开口缺陷；②对多孔性材料的检测困难；③检测结果受检测人员的影响较大。

目前，渗透检测主要应用于有色金属和黑色金属材料的铸件、锻件、焊接件、粉末冶金件以及陶瓷、塑料和玻璃制品的检测。

五、涡流检测

涡流检测的基本原理是：将交变磁场靠近导体（被检件）时，由于电磁感应，在导体中将感生出密闭的环状电流，此即涡流。该涡流受激励磁场（电流强度、频率）、导体的电导率和磁导率、缺陷（性质、大小、位置等）等许多因素的影响，并反作用于原激发磁场，使其阻抗等特性参数发生改变，从而指示缺陷的存在与否。

涡流检测的主要优点如下。

①检测速度快，检测效率高；②便于实现自动化；③非接触。

涡流检测的局限性如下。

①只能检测导电材料；②影响因素众多，信号解释困难，检测结果不够直观；③只能检测表面或近表面缺陷；④对形状复杂的试件检测有困难；⑤一般只能给出缺陷的有无，缺陷定性、定位、定量都比较困难。

目前，涡流检测主要应用于导电管材、棒材、线材的探伤和材料分选。

六、声发射检测

声发射检测的基本原理是：利用材料内部因局部能量的快速释放（缺陷扩展、应力松弛、摩擦、泄漏、磁畴壁运动等）而产生的弹性波，用声发射传感器及二次仪表测取该弹性波，从而对试样的结构完整性进行检测与评价。

声发射检测的主要优点如下。

①能给出缺陷的危害程度信息；②对众多的缺陷能一次检出，检测效率高；③适应对象广，对试件的材料种类几乎没有限制；④灵敏度较高；⑤缺陷定位比较准确；⑥非接触检测。

声发射检测的局限性如下。

①存在 Kaiser 效应,一般需对试样加载,因而检测对试样有一定的损害;②设备昂贵;③噪声干扰较大,信号解释困难;④缺陷定性比较困难。

目前,声发射检测主要应用于锅炉、压力容器、焊缝等试件中的裂纹检测;隧道、涵洞、桥梁、大坝、边坡、房屋建筑等的在役检(监)测。

七、红外检测

红外检测的基本原理是:用红外点温仪、红外热像仪等设备,测取目标物体表面的红外辐射能,并将其转变为直观形象的温度场,通过观察该温度场的均匀与否,来推断目标物体表面或内部是否有缺陷。

红外检测的主要优点如下。

①检测结果直观形象且便于保存;②大面积快速,检测效率高;③适应对象广,对试件的材料种类几乎没有限制;④灵敏度较高;⑤缺陷定位比较准确;⑥远距离非接触检测;⑦操作安全。

红外检测的局限性如下。

①设备昂贵,检测费用很高;②对表面缺陷敏感、对内部缺陷的检测有困难;③对低发射率材料的检测有困难;④对导热快的材料检测有困难。

目前,红外检测主要应用于电力设备、石化设备、机械加工过程监测、火灾监测、农作物优种、材料与构件中的缺陷无损检测。

八、激光全息检测

激光全息检测是利用激光全息照相来检验物体表面和内部的缺陷。它是将物体表面和内部的缺陷,通过外界加载的方法,使其在相应的物体表面造成局部的变形,用激光全息照相来观察和比较这种变形,然后判断出物体内部的缺陷。

与其他无损检验方法相比较,激光全息检验具有以下显著优点。

①检验灵敏度很高;②检验效率高;③适应对象广,对试件的材料种类几乎没有限制;④直观感强;⑤非接触检测;⑥检验结果便于保存等。

激光全息检测的局限性如下。

①对内部缺陷的检测灵敏度有待提高;②对工作环境要求很高,一般应在暗室中进行,并需要采用严格的隔振措施,因此不利于现场检测。

第三节 无损检测与评价的发展趋势

综观国内外的研究与应用进展,可以看出无损检测与评价呈以下发展趋势。

1. 检测设备的小型化、数字化和智能化

随着新型传感技术、微电子技术和计算机软硬件技术的发展,体积更小、重量更轻、性能更高、功能更强的检测设备不断投放市场,例如超声波探伤仪已由最初的体积比较庞大、重达十几公斤的模拟式发展成现在只有 1 千克左右重、笔记本大小的数字式,非常便于携带,检测结果可以保存成数据文件,便于传输和资料的积累。而且,现代检测设备一般都带有 RS232、485、USB 等接口,可与计算机进行通信,与计算机进行数据交换,接受计算机的控制,实现不同检测设备间的协同工作。

2. 检测过程自动化

比如超声波检测,除传统的单通道手工检测外,用于板材检测的超声波自动探伤系统,可以实现多达 256 甚至更多通道的自动检测,以提高检测效率,减轻检测人员的劳动强度。

3. 检测结果评定智能化和网络化

借助现代信号处理技术、人工智能等学科的研究成果,以及计算机网络技术的发展,人们正在进行超声波检测中对缺陷种类的智能识别、射线检测的网上远程评片和智能评片等方面的探索。通过建立专家系统,集中多名专家的智慧,使评判结果更具权威性。检测结果的智能化评定,可以在一定程度上减少人为因素的影响,提高结论的可靠性。检测结果的网络化评定,可以使处在不同地域的专家共同参与对某一检测结果的评判。由于集中了多名专家的智慧,所以评判结果的可靠性和可信性得到提高,同时也更加经济、高效和快捷。

4. 研究手段不断创新

受有限差分、有限元和边界元等数值方法研究进展的鼓舞,现代无损检测与评价的研究不再仅限于物理实验研究,在超声、电磁、红外等方面,有越来越多的数值仿真研究的报道。与传统的物理实验研究相比,数值仿真研究的主要优势在于研究周期更短、费用更低、更加灵活方便。

5. 新技术、新方法不断涌现

除五大常规方法以及较为成熟的声发射、红外和激光全息检测外,金属磁记忆、剪切散斑、激光超声、电磁超声、相控阵超声、空气耦合超声等新方法也不断涌现。可以预见,未来将会有更多的无损检测新技术和新方法出现。

6. 研究不断深入,要求不断提高

从无损探伤、无损检测到无损评价和无损表征(NDC: Non-destructive Characterization)的方向发展。不仅对缺陷的有无、性质、大小、位置等进行检测,而且还要对被检对象的技术状态给出评判。对于在役设备来说,无损评价比无损检测要重要得多,相应的技术难度也大很多。

7. 检测对象日益广泛,应用领域不断拓展

在无损检测的早期研究与实践活动中,检测对象以金属材料中钢铁材料为主,应用领域集中在机械、船舶、航空航天等少数几个行业。随着无损检测相关技术基础研究的不断深入,以及对产品质量要求和竞争力的不断提高,对产品质量保障体系重要性的认识也不断提高,无损检测受到越来越广泛的关注。目前,无损检测的对象不再局限于金属材料,玻璃、陶瓷、混凝土、橡胶、塑料以及各种类型的复合材料及制品也逐渐成为无损检测的主要对象,其应用领域也不断向石油化工(蒸馏塔、高压反应釜、各种管道等)、冶金(轧制设备的检测、高炉墙体的腐蚀减薄检测/监测等)、电力(变压器、开关、拉杆、高压电避雷器等)、土木工程(桩基、房屋建筑结构本体、装饰层)、农林(作物优种、产品品质检测、森林防火、病虫害防治)、交通(汽车、火车、轮船等交通运输设备的检测)、基础设施(道路、桥梁)、文物保护(具有文物保护价值的古建筑的状态评测)、安全检测(海关、机场、码头、火车站、运动场馆等)等领域拓展。可以说,无损检测与评价几乎已渗透到现代生产和生活的每一个角落。

8. 多层次的合作与交流不断加强

随着全球经济一体化进程的加速发展,无损检测与评价也呈现出国际化发展趋势,国家间、地区间和组织间的合作与交流不断加强,无损检测技术人员的双边和多边资格相互认证

日趋广泛,如我国已与德国、欧盟和美国签订了无损检测人员资格相互认证等合作协议。

1998年7月在美国犹他州雪鸟(Snowbird, Utah)召开的一次国际会议上成立了世界无损检测中心联盟,该联盟由阿根廷、巴西、中国、印度、韩国、俄罗斯、南非、乌克兰、美国等的顶尖无损检测研究中心(所)发起,秘书处设在美国依阿华州立大学无损检测研究中心。

9. 标准化工作不断加强

世界范围内,国际标准化组织(ISO: International Standard Organization)的 TC135 等技术委员会负责制定有关无损检测的国际标准。各工业先进国家都设有专门组织负责制定该国的无损检测标准,如英国(BS)、日本(JIS)、德国(DIN)、欧洲(EN)、美国(ASTM03.03)。

在我国,除国家标准(GB)和国家军用标准(GJB)外,机械(JB)、船舶(CB)、航空(HB)、航天(QJ)、冶金(YB)、电力(DL)、铁路运输(TB)、核工业(EJ)、民用航空(MH)、石油天然气行业(SY)、轻工(QB)、建筑(JG)、化工(HG)、煤炭(MT)等行业还根据各自的行业特点,制定了各自的行业标准,以规范和指导各自行业内的无损检测工作。

10. 资格鉴定标准化、执业证书专业化

除技术和产品标准外,无损检测技术人员的考核和评定也日趋标准化。目前,根据理论知识和实际操作技能的高低,将无损检测从业人员按专业分别化分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ共3个等级,如超声Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级,射线Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级,磁粉Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级,渗透Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级,涡流Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级。Ⅲ级证书要求最高、其持有者权限最大。不同专业的证书互不通用,如拥有超声Ⅲ级证书的人员并不具有从事射线Ⅰ级的检测权限,除非同时持有射线Ⅰ级以上证书。

各等级证书的报考条件应达到的最低要求以及工作权限等内容在有关标准(如 ISO 9712: 1999 Non-destructive testing—Qualification and certification of personnel、GB/T 9445—2005 无损检测—人员资格鉴定与认证)中都有详细规定。

复习思考题

1. 什么是无损检测与评价?开展无损检测与评价有何意义?
2. 无损检测与评价目前主要有哪些技术手段?各有何特点及应用?
3. 简述无损检测的发展历程及未来发展趋势。

参考文献

- [1] [日]石井勇五郎著,吴义,王东江,沐志成译. 无损检测学. 北京:机械工业出版社,1986.
- [2] R Halmshaw. Non-destructive Testing. London: Edward Arnold, 1987.
- [3] 李家伟,陈积懋等. 无损检测手册. 北京:机械工业出版社,2002.
- [4] 李国华,张永忠. 机械故障诊断. 北京:化学工业出版社,1999.
- [5] 张俊哲. 无损检测技术及其应用. 北京:科学出版社,1993.
- [6] 张家骏. 无损检测技术的发展及其对国民经济发展的影响. 无损检测, 1993, 15(2): 31~35.
- [7] Meyendorf N G H, Nagy P B, Rokhlin S I. Nondestructive Materials Characterization. New York: Springer, 2004.

- [8] John J. Burke, Volker Weiss. *Nondestructive Evaluation of materials*. New York: Plenum press, 1979.
- [9] 本书编写组编. 超声波探伤. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [10] 蒋危平, 方京. 超声检测学, 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1991.
- [11] 胡建恺, 张谦琳. 超声检测原理和方法. 合肥: 中国科技大学出版社, 1993.
- [12] 孙万铃. 射线检测. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [13] 中国机械工程学会. 磁粉探伤. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [14] 上海沪东造船厂. 磁粉和渗透探伤技术. 北京: 国防工业出版社, 1983.
- [15] 中国机械工程学会. 国外无损检测技术. 北京: 上海科技文献出版社, 1981.
- [16] 中国无损检测学会. 电磁检测. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [17] 任吉林, 林俊明, 高春法. 电磁检测. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [18] XAVIER P. V. MALDAGUE, *THEORY AND PRACTICE OF INFRARED TECHNOLOGY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING*, New York: John Wiley & Sons, Inc. 2001.
- [19] Xavier P. V. Maldague. *NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF MATERIALS BY INFRARED THERMOGRAPHY*. London: Springer-Verlag Limited, 1993.
- [20] Hongjoon Kim, Kyungyoung Jhang, Minjea Shin, etc. A non-contact NDE method using a laser generated focused-Lamb wave with enhanced defect-detection ability and spatial resolution. *NDT&E International*, 2006, 39: 312~319.
- [21] 耿荣生. 新千年的无损检测技术-从罗马会议看无损检测技术的发展方向. *无损检测*. 2001, 23 (1): 2~5.
- [22] Cornwell I, McNab A. Towards automated interpretation of ultrasonic NDT data. *NDT&E International*, 1999, 32: 101~107.
- [23] 马宏伟, 陈富, 杜功儒. 长输管道无损检测自动化技术的研究进展. *中国机械工程*, 2003, 14 (12): 2066~2070.
- [24] 张海燕, 刘镇清. 人工智能及其在超声无损检测中的应用. *无损检测*, 2001, 23 (08): 356~360.
- [25] 陈建忠, 史耀武. 超声检测过程的数值模拟. *无损检测*, 2001, 23 (05): 198~212.
- [26] Klysz G, Ferrieres X, Balayssac J P, etc. Simulation of direct wave propagation by numerical FDTD for a GPR coupled antenna. *NDT&E International*, 2006, 39: 338~347.
- [27] Bernard Hosten, Michel Castaings. FE modeling of Lamb mode diffraction by defects in anisotropic viscoelastic plates. *NDT&E International*, 2006, 39: 195~204.
- [28] Huang Zuoying, Que Peiwen, Chen Liang. 3D FEM analysis in magnetic flux leakage method. *NDT&E International*, 2006, 39 (1): 61~66.
- [29] 李国华, 赵会友, 朱红秀等. 红外热像检测的数值优化. *煤矿机械*, 2004 (9): 23~24.
- [30] Gros X E. NDT in Civil Engineering on the Net. *INSIGHT*, 1998, 40 (10): 725.
- [31] Hakan Wirdelius, Lars Hammar. Modelling of a high resolution digital radiographic system and development of a filtering technique based on wavelet transforms. *NDT&E International*, 2004, 37: 73~81.
- [32] 李国华, 吴立新, 吴森等. 红外热像技术及其应用的研究进展. *红外与激光工程*, 2004, 33 (3): 227~230.
- [33] 罗雄彪, 陈铁群. 超声无损检测的发展趋势. *无损探伤*. 2004, 28 (3): 1~5.
- [34] 赵明阶, 徐蓉. 超声波 CT 成像技术及其在大型桥梁基桩无损检测中的应用. *重庆交通学院学报*, 2001, 20 (2): 73~86.
- [35] McCann D M, Forde M C. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. *NDT&E International*, 2001, 34: 71~84.
- [36] 何永乐. 碳-碳复合材料的无损检测. *航空工程与维修*, 2001 (04): 22~23.
- [37] 弓乐, 曹康, 吴森. 金属材料超声探伤缺陷分类辅助系统的研究. *仪器仪表学报*, 2005, 26 (10): 1085~1088.
- [38] 刘旭, 夏金东, 弓乐, 吴森. 超声检测缺陷分类中信号处理方法的探讨. *仪器仪表学报*, 2002 (6): 638~641.
- [39] 刘旭, 夏金东, 弓乐, 吴森. 射频信号在超声检测缺陷识别中的应用研究. *机械工程学报*, 2002, 38 (4) 84~87.
- [40] 刘旭, 夏金东, 吴森. 超声检测缺陷分类的降噪及特征提取问题研究. *中国矿业大学学报 (自然科学版)*, 2001, 30 (3): 248~251.
- [41] 吴森, 张海燕, 孙智等. 超声检测缺陷分类的小波分析与神经网络方法. *中国矿业大学学报*, 2003, 29 (3): 239~243.

第二章

常见缺陷的分类描述

无损检测的最初目的是对被检对象中各类缺陷的检测,通过检测被检对象中所含缺陷的种类、大小、数量和位置等,进而达到对被检对象所处技术状态进行评价的最终目的。不同特征的缺陷有不同的最适应的检测方法与之对应,因此,为提高检测效率和检测结果的可靠度,在进行检测之前,应对被检对象中的缺陷情况(常见缺陷的种类、位置、取向等)有大致地了解,以便有针对性地选取相应的检测方法和检测工艺。为此目的,本章对不同材料或构件中的常见的缺陷现象作简要介绍。

第一节 金属材料与构件中的常见缺陷现象

金属材料仍然是目前应用最广泛的工程材料,金属材料及其制品是无损检测与评价的主要对象。

一、铸件中的常见缺陷现象

铸造是工农业生产中一种主要的生产工艺,具有以下特点:①能够制成形状复杂、特别是具有复杂内腔的毛坯;②大小几乎不受限制,重量可从几克到几百吨;③铸造常用的原材料来源广泛,价格比较低廉,铸件的成本较低。

实际生产和生活中,有很多设备和构件都是铸造出来的,如减速器的箱体、设备底座、发电机壳、机床导轨等。现代机器设备中,铸件所占的比重很大。例如,在机床、内燃机中,铸件占机器总重的70%~80%,农业机械中占40%~70%。

铸造生产过程比较复杂,影响铸件质量的因素颇多,废品率一般较高。铸造废品的产生不仅与铸型工艺有关,还与铸型材料、模具、铸造合金、合金的熔炼与浇注等密切相关,而这些因素又不易综合控制。所以,铸件容易产生多种缺陷。

铸件中常见的缺陷现象有气孔(最常见,约占1/3)、缩孔与缩松、夹砂与夹渣,以及裂纹等,分述如下。

(1) 气孔 铸件中的气孔是由于熔化的金属在凝固时,产生的气体来不及逸出而在金属表面或内部产生的圆孔。其中,直径小于2~3mm的叫针孔,直径大于3mm的叫气孔。

气孔破坏了结构的连续性,减少了有效承载面积,引起应力集中,降低力学性能(特别是冲击韧性和疲劳强度显著降低),降低气密性。含有气孔的铸件不能用作重要部件,甚至使铸件报废。

含有气孔的铸件实物照片如图2-1所示。

(2) 缩孔与缩松 这是金属在凝固时,由于收缩而产生的缺陷。其中,缩孔是因金属熔

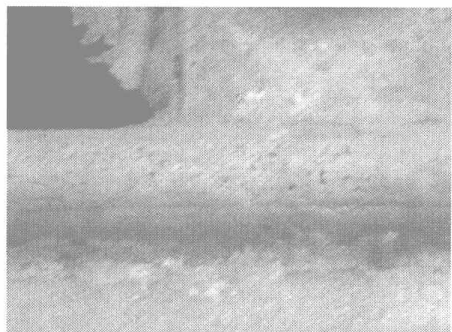


图 2-1 铸件中的气孔

融液不能充分补充到最终凝固部位而产生的较大的空洞。它可能发生在铸件的表面，也可能存在于铸件的内部，其形状也千变万化，但大多是内表面粗糙而呈树枝状的结晶。缩松则是铸件中的多孔疏松部分，或密集的小气孔群。

缩孔与缩松的危害与气孔基本相同，破坏了结构的连续性，减少了有效承载面积，引起应力集中，降低力学性能（特别是冲击韧性和疲劳强度显著降低），降低气密性。

铸件缩孔和缩松的金相照片分别如图 2-2 和图 2-3 所示。



图 2-2 铸件中的缩孔

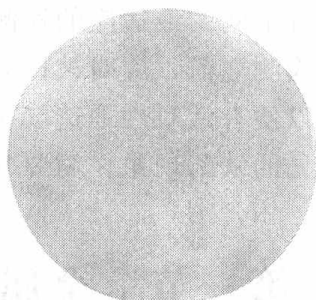


图 2-3 铸件中的缩松

(3) 夹砂与夹渣 夹砂是浇铸时由于型砂受铸液的冲击掺入铸件内部而形成的缺陷，它多半发生在大型铸件和用刮板造型的铸件上。夹渣则是浇铸时由于浇铸液中的溶渣没有与浇铸液分离而进入铸件形成的。

夹砂与夹渣破坏了基体金属的连续性，降低了金属的塑性和强度，导致应力集中，易使金属在经受锻压或其他加工时产生裂纹。

图 2-4 所示是铸件中的夹砂，图 2-5 中颜色较深者即为球墨铸件中的氧化皮夹渣。



图 2-4 铸件中的夹砂



图 2-5 球墨铸件中的夹渣

(4) 裂纹 裂纹是由于铸件各部分的冷却速度不均匀而产生的残余应力超过铸件材料的断裂强度时而产生的一类缺陷。根据其发生的温度不同而分为热裂纹和冷裂纹两种，它们可能发生于铸件的表面，也可能存在于铸件内部。裂纹对铸件的危害很大，它的存在多使铸件报废，是铸件中最需注意的一类缺陷。

图 2-6 所示是铸件上的裂纹照片。

(5) 冷隔和浇不足 主要是由于浇铸温度太低，金属熔液在铸模中不能充分流动而造成的一类缺陷。其中，发生在铸件表面的叫冷隔，因金属熔液未流入而形成缺口的地方叫浇

不足。

(6) 熔敷不良产生的缺陷 是型芯的支撑物遗留在铸件内, 或为增加凝固速度所用的冷铁或内冷铁附着遗留在铸件上而形成的缺陷。

(7) 白点 (发裂) 是钢中主要因氢的析出而引起的缺陷。因其在纵向断面上呈近似圆形或椭圆形的银白色 (有时也为灰色) 斑点, 故称白点。在横断面宏观磨片上, 腐蚀后则呈现为毛细裂纹, 故又称为发裂。

白点的存在使伸长率显著降低, 断面收缩率与冲击韧性降低得更多, 有时可能接近于零。因此, 含有白点的钢材一般是不能使用的。

图 2-7 中黑色细裂纹即为白点。

(8) 鼠尾 铸件表面出现较浅 ($\leq 5\text{mm}$) 的带有锐角的凹痕缺陷。

(9) 偏析 是铸锭内化学成分或组织结构不均匀的现象。

偏析将严重降低铸件质量, 破坏铸件的连续性, 并可能在锻压加工或使用过程中引发新的缺陷或断裂。

图 2-8 中黑色斑点所示为 45 钢中的硫点状偏析。

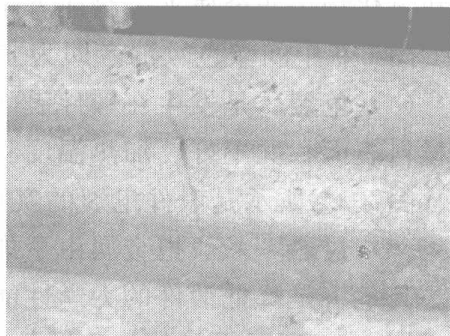


图 2-6 铸件裂纹

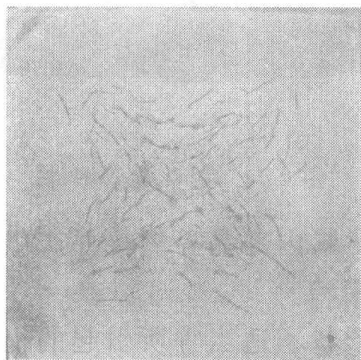


图 2-7 铸件中的白点

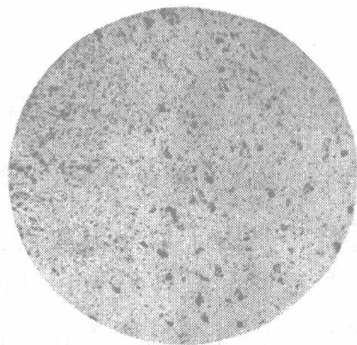


图 2-8 铸件中的偏析

二、锻件中的常见缺陷现象

锻件缺陷多半是铸件遗留下来的, 所以铸件的各种缺陷在锻件中都可能发生。此外, 锻件还可能在锻造过程中发生新的锻造缺陷。

锻件中的缺陷常以砂眼、缩松 (包括气孔) 和显微裂纹为主, 同时也经常发生皱疤、夹层、因过烧及其他原因而造成的巨大裂纹, 如烧裂、骤冷骤热裂纹、延迟裂纹、鳞状折叠和轧制裂纹等。

(1) 夹砂和夹渣 是由于铸锭时熔渣和耐火材料或夹杂物太多, 留在锻件中形成的缺陷。其中, 夹砂的形状较小, 而夹渣的尺寸则较大些。

(2) 缩孔和疏松 缩孔是由于铸锭时因冒口切除不当、铸模设计不良以及铸造条件 (包括温度、浇注速度、浇注方法、熔炼等) 不良而产生的缩孔没有被锻合而遗留下来的缺陷; 疏松则是铸锭中疏松结构因为有细的晶界裂纹或者晶界中产生细微的空隙而使晶粒结合较弱的部分没有充分锻合而遗留下来的缺陷。

(3) 金属和非金属夹杂物 金属夹杂物是由于在铸锭时不小心将混进的外来金属一起被浇铸而产生的缺陷; 而非金属夹杂物则是由于炼钢时熔炼不良以及铸锭不良, 而混进了硫化

物和氧化物等非金属夹杂物或者耐火材料等而造成的缺陷。

图 2-9 中间颜色较深者即为非金属夹杂物。

(4) 龟裂 是发生在锻件表面上较浅的龟壳状裂纹缺陷, 它是由于原材料成分不适当、原材料表面状况不好、加热温度和加热速度不合适等而产生的。

图 2-10 所示是锻件龟裂的实物照片。

(5) 过热 一般把金属由于加热温度过高或保温时间过长, 引起晶粒粗大的现象称为过热。其危害是降低锻件的力学性能。

图 2-11 所示是过热炮管锻件的实物照片。图 2-12 所示是锻件过热引起的开裂。



图 2-9 45 钢中的非金属夹杂物

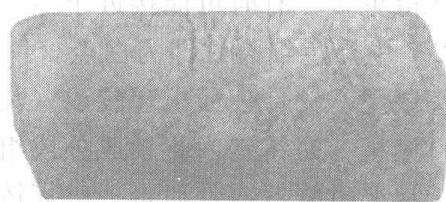


图 2-10 锻件龟裂

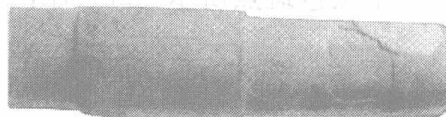


图 2-11 过热炮管锻件

(6) 过烧 是由于加热温度超过始锻温度过多, 使材料内部晶界氧化并产生较大的裂纹, 或者引起显著的晶粒粗大, 其形状与龟裂相同 (图 2-13)。

(7) 烧裂 是由于材质不良、淬火操作不良和工件形状不适当等所引起的很尖锐的缺陷。其形状较简单, 分为骤冷裂纹和骤热裂纹两类。烧裂多使锻件报废。

(8) 折叠 是由于在锻造中因工艺、操作或加热状态不适当, 将坯料已氧化的表层金属汇流贴合在一起, 压入工件而引起的材料重叠现象 (图 2-14)。

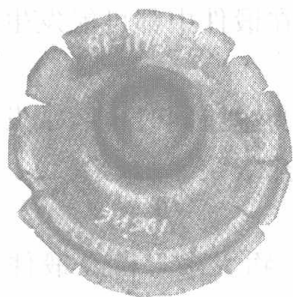


图 2-12 锻件过热开裂

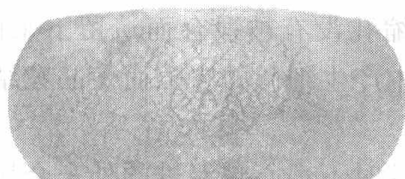


图 2-13 过烧

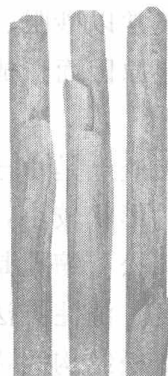


图 2-14 折叠

三、焊缝中的常见缺陷现象

焊接是一种常见的生产工艺,在现代工业生产中具有十分重要的作用,如舰船的船体、高炉炉壳、建筑构架(桥梁)、锅炉与压力容器、车厢与底架、家用电器壳体(冰箱和洗衣机桶体)、起重臂、天车的轨道、飞机机翼等都是经由焊接生产出来的。

在焊接生产中,由于结构设计不当、原材料不符合要求、焊接工艺不合理和焊工操作水平等原因,使焊缝产生各种缺陷。根据生产统计发现,焊缝中常见的缺陷现象主要有裂纹、未焊透、未熔合、夹渣、夹杂、气孔、咬边等,其中,以未焊透和裂纹的危害性最大,它们因此而成为焊缝无损检测的主要对象。

缺陷的存在,不仅会严重影响产品的质量、使用性能和寿命,甚至会危及人们的生命财产安全(如有毒气罐泄漏引起的中毒、建筑结构的塌陷等),因此,焊接质量监控显得非常重要。直至目前,焊缝仍然是无损检测的主要对象。

(1) 裂纹 焊缝中的裂纹情况非常复杂,生成部位不一,造成开裂的因素也很多,如熔敷金属的韧性不良、母材或焊条含硫量过多、焊接规范不当、焊口处理不良、熔敷金属的含氢量过多等。

裂纹按部位可分为焊道裂纹、熔合区裂纹和热影响区裂纹;按方向可分为横向裂纹和纵向裂纹;根据发生时的温度不同,裂纹又可分为热裂纹、冷裂纹和延迟裂纹等几种。裂纹的危害性很大,因而一直是焊缝检测的重点对象。

(2) 未焊透 在有坡口的焊接以及丁字焊时,由于焊条过粗或者焊接电流过低,使电弧不能到达坡口底而产生的缺陷。

(3) 未熔合 焊接界面熔敷金属与母材或各焊层之间没有充分熔合而产生的缺陷。其原因是运条不良、表层没有清理干净和预热不够等。

(4) 夹渣 是由于焊条直径以及电流的选择不当、运条不熟练或前道焊缝的熔渣未清理干净等焊接技术问题而造成的缺陷。

(5) 夹杂 是由焊接冶金反应产生的、焊后残留在焊缝金属中的非金属杂质,如氧化物、硫化物等。

(6) 气孔 是由于焊条不干燥、坡口面生锈、油垢和涂料未清理干净、焊条不合适或熔融中的熔敷金属同外面空气没有完全隔绝而引起的缺陷,分为密集气孔、条虫状气孔和针状气孔等。

(7) 咬边 是在母材与熔敷金属的交界处产生的凹陷。它是由于运条过快、焊接电流过大、电弧过长和各种焊接规范不当等而引起的缺陷。

四、金属型材中的常见缺陷现象

此处所说的型材是指板材、棒材和管材。

1. 板材中的常见缺陷现象

板材分为普通板材和复合板材两大类,普通板材是指由一种材料制成的板材,如钢板、铝板、铜板等;复合板材是指由两种或两种以上不同材料,经轧制、爆炸焊接、堆焊、浇注等工艺复合成一体新型工程材料,其基层主要起承载作用,多为碳素钢或低合金钢,复层主要起耐磨、抗蚀等特殊作用,多为不锈钢、铜、铝、钛、镍等。

普通板材中的常见缺陷主要有分层、夹杂、裂纹、气孔、表面缺陷(如折叠、氧化皮

等), 而对金属复合板材而言, 不同材料、不同工艺生产的复合板材, 其中的缺陷各有差异, 除发生普通板材的各种缺陷外, 还可能发生的最主要的缺陷是脱黏。脱黏对复合板材的性能影响很大, 是评定复合板材质量等级的主要依据。

(1) 分层与夹杂物 是由于钢锭中存在有气孔、缩孔、夹渣等以致压合不紧密而引起的。

(2) 裂纹 钢板中的裂纹千差万别, 包括由于偏析、缩孔、气孔、夹渣、氧化皮等以致压合不紧密而产生的条状小裂纹, 以及由于钢锭中气孔较多、加热条件不适当或钢中含有引起加热脆性的铜等元素较多而在表面发生的龟壳状裂纹, 或在钢板边缘产生的锯齿状裂纹等。见图 2-15。

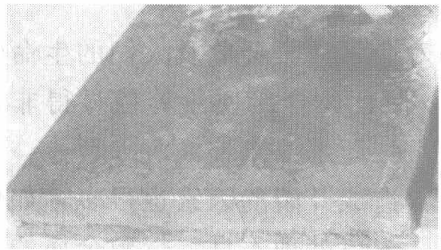


图 2-15 裂纹

(3) 皮下气孔 是存在于表面之内的空洞, 它是由于钢锭中存在的缩孔、气孔等没有被压合而产生的。

(4) 表面缺陷 主要是指由于浇铸钢锭时, 飞溅物和皱纹较多以及存在气孔等而产生的鳞状折叠, 和由于轧辊表面的龟裂状热裂纹周期性地复印在成品钢材表面而产生的龟壳状缺陷。

(5) 脱黏 脱黏是指复合板材中的异种材料在界面处未结合成一整体的现象。

2. 管材中的常见缺陷现象

(1) 外壁折叠 由于圆钢表面夹入杂物、铁屑或有偏折和裂纹时, 在穿孔时产生的缺陷。

(2) 外壁划痕 由于导管和拉模的加工形状不良以及烧伤等而引起的缺陷。

(3) 横向裂纹 由于材料含铜量过多、压延太剧、加热过度等而产生的缺陷, 其方向与管材轴向垂直或近似垂直。

(4) 纵向裂纹 由于加热不良、热处理不良以及加工方法不良等而产生的缺陷, 其方向与管材轴向平行或近似平行。

3. 棒材中常见的缺陷现象

(1) 裂纹 根据其形状和产生原因的不同, 棒钢中的裂纹可分为横向裂纹、纵向裂纹和过烧裂纹三种。其中, 横向裂纹是与压延方向相垂直的横向裂开缺陷, 它是由于材料成分不适宜、加热不妥当或者脱氧不良而产生的; 而纵向裂纹是一种比较深的线状裂纹, 它是由于热应变、时效以及材料性能不良, 尤其是由于有针孔、气孔等原因而产生的; 过烧则会在棒材表面产生小鳞状裂纹, 它是由于加热太强烈使表面脆化, 而后在压延时产生的。

(2) 夹杂 是钢锭中的夹杂物 (如耐火材料) 由于压延和拉伸而造成的缺陷。

(3) 表面缺陷 是由于材料表面粗糙、轧辊调整得不好、孔模不好等原因而引起的表面折叠和皱纹。

五、热处理中的常见缺陷现象

热处理中的常见缺陷现象有过热、过烧、氧化、脱碳、变形和裂纹等, 其中, 裂纹是热处理工艺中最严重的缺陷。

(1) 过热 是钢在加热时, 由于加热温度过高或加热时间过长, 引起奥氏体晶粒粗大的现象。

过热使钢的力学性能降低, 严重影响钢的冲击韧性, 而且还易引起淬火变形和开裂。

图 2-16 所示是 20 钢因过热形成的粗大马氏体组织。

(2) 过烧 是钢在加热时, 由于加热温度过高, 造成晶界氧化或局部熔化的现象。

过热可以通过重新退火或正火来补救, 而过烧是无法挽救的缺陷。

(3) 氧化 氧化是由于铁和空气中的氧等化合形成氧化皮, 从而使工件表面粗糙不平, 影响零件的精度。图 2-17 中, 右边试样未热处理, 左边试样是热处理后发生氧化的情形。

(4) 脱碳 脱碳就是钢件表面层的碳被烧掉, 而使其含碳量降低, 图 2-18 中颜色较浅者即为脱碳区。

脱碳不仅影响热处理后钢件表面的硬度, 还将显著降低零件的疲劳强度, 因而切削工具和一些重要的零件是不允许热处理时发生严重脱碳的。



图 2-16 过热形成的粗大马氏体

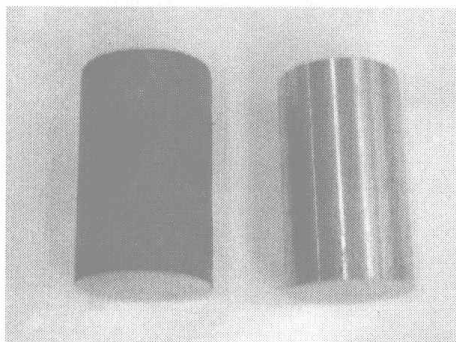


图 2-17 热处理氧化

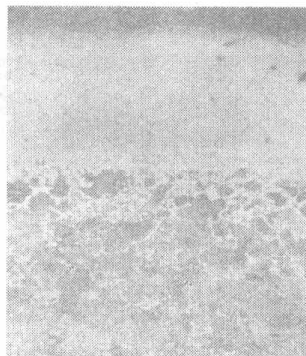


图 2-18 脱碳

(5) 变形 是指因热处理而引起工件的形状或尺寸发生改变的现象。

引起热处理变形的主要原因有: 加热时由于热应力以及高温时材料的强度降低、延性增加和冷却过程中热应力和组织应力的联合作用。图 2-19 所示是淬火变形。

(6) 裂纹 裂纹多在淬火时产生, 含碳量越高, 冷却速度越快, 越容易产生淬火裂纹。裂纹是不允许存在的缺陷, 裂纹的存在将使工件报废。图 2-20 所示是淬火裂纹。

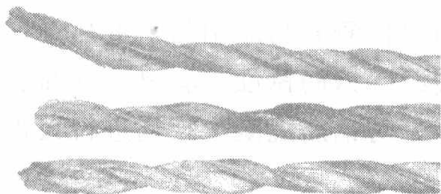


图 2-19 淬火变形

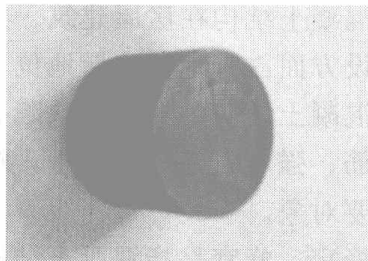


图 2-20 淬火裂纹

六、使用与维修过程中的常见缺陷现象

使用与维修过程中的缺陷现象是千差万别的, 在此只对几种有代表性的典型缺陷现象作简单说明。

(1) 裂纹 裂纹的产生有多种原因。根据产生裂纹的应力状态不同,可将裂纹归结为疲劳裂纹和应力腐蚀裂纹两大类。其中,疲劳裂纹是指单次作用都不足以引起材料破坏的应力反复作用于材料上,由于疲劳损伤累积而最终造成材料破坏(开裂)的一类裂纹,如接触应力疲劳、热应力疲劳以及腐蚀疲劳等。而应力腐蚀裂纹是在处于腐蚀剂中的金属材料表面加上较高的静态拉应力时而产生的裂纹,一般认为这种裂纹与氢脆有关。图 2-21 所示是钢管的应力腐蚀开裂。

(2) 摩擦腐蚀 两接触面处在微小振动和相互摩擦状态时,其微小部分反复进行结合与分离,同时与周围环境发生化学反应,引起摩擦腐蚀。材料发生摩擦腐蚀时,一般都伴随有细小的碎片和微细的粉末发生。

(3) 汽蚀 存在于液体中的气泡破灭时,对材料表面进行冲击而发生汽蚀。汽蚀的表现形式主要是,材料表面局部出现圆形或椭圆形的深浅不同的凹穴和麻点,有的甚至呈蜂窝状,并产生裂纹和剥落。图 2-22 所示是发动机水冷汽缸套的汽蚀照片。

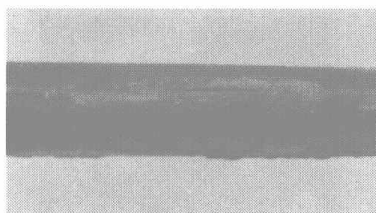


图 2-21 钢管的应力腐蚀开裂

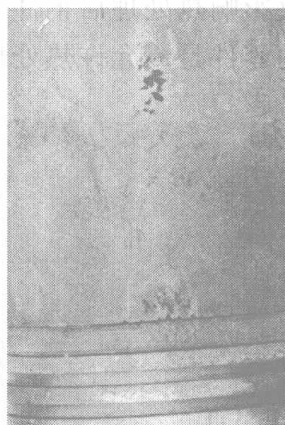


图 2-22 发动机水冷汽缸套的汽蚀

第二节 无机非金属材料与构件中的常见缺陷现象

无机非金属材料主要包括钢筋混凝土和陶瓷材料两大类,它们都已逐渐成为无损检测的主要对象。

一、钢筋混凝土结构中的常见缺陷现象

钢筋混凝土结构在房屋建筑、道路、桥梁、水利水电工程、运动场馆、隧道、涵洞地下工程等建设方面占有绝对主导地位,是现代无损检测与评价研究与应用的新近热点。

钢筋混凝土结构中的常见缺陷有:蜂窝、孔洞、裂缝、钢筋锈蚀、剥离、麻面、表面不平整、露筋、强度不足等。其中,蜂窝、孔洞、裂缝等是对钢筋混凝土结构进行无损检测与评价的主要对象。

(1) 蜂窝 蜂窝是指混凝土结构局部出现酥松、骨料多砂浆少、石子之间形成空隙,类似蜂窝状的窟窿现象。混凝土结构中的蜂窝属严重缺陷。

混凝土结构产生蜂窝的原因主要如下。

①混凝土配合比选配不当、混凝土配料计量不准,造成砂浆少、石子多;②混凝土搅拌时间不够,拌和不均匀,和易性差,振捣不密实;③运输不当或下料过高、过长,造成石子砂浆离析;④混凝土振捣不实,或漏振,或振捣时间不够;⑤模板安装不规范,缝隙过大导

致水泥浆流失,造成骨料多浆少;⑥钢筋布置过密,骨料粒径过大或坍落度过小而导致骨料与水泥浆分离等。

(2) 孔洞 孔洞是指混凝土结构内部有尺寸较大的空隙、局部没有混凝土或蜂窝特别大,钢筋局部或全部裸露的现象。

产生孔洞的原因主要如下。

①在钢筋较密的部位或预留孔洞和预埋件处,混凝土下料被阻隔,未振捣或振捣不够就继续浇筑上层混凝土;②混凝土离析,砂浆分离、石子成堆、严重跑浆,又未进行振捣;③混凝土下料过高,一次下料过多、过厚,振捣器振动不到位,形成松散孔洞;④混凝土内掉入施工器具、木块、泥块等杂物等。

(3) 裂缝 混凝土中的裂缝多起源于其内部的微孔隙、气穴和微裂缝,它们是在混凝土的浇筑过程中,由于施工和混凝土本身变形、约束等一系列问题引起的。微孔隙和微裂缝通常对混凝土的承重、防渗等使用功能不产生危害。但当混凝土受到荷载、温差等作用之后,微孔隙和微裂缝就会不断的扩展、连通,最终形成肉眼可见的宏观裂缝,这就是混凝土工程中常说的裂缝如图 2-23 所示。

混凝土产生裂缝的原因很多,有变形引起的裂缝,如温度变化、收缩、膨胀、不均匀沉陷等原因引起的裂缝;有外载作用引起的裂缝;有养护环境不当和化学作用引起的裂缝等。

0.05mm 宽的裂缝即属严重缺陷,一般不允许存在。

(4) 露筋 露筋是指混凝土内部受力筋、架立筋或箍筋局部裸露在结构件表面的现象。

产生露筋的原因主要如下:

①浇筑混凝土时,钢筋保护层垫块位移、垫块太少、漏放或模板变形、变位,致使钢筋紧贴模板外露;②结构构件截面小,钢筋布置过密,骨料卡在钢筋上,致使水泥砂浆不能充满钢筋周围造成露筋;③混凝土配合比不当,混凝土产生离析,靠模板部位缺浆或模板漏浆致使钢筋外露;④混凝土保护层太小,保护层附近混凝土漏振或振捣不实,振捣棒撞击钢筋或踩踏钢筋致使钢筋位移等造成露筋。

(5) 表面不平整 表面不平整是指混凝土表面凹凸不平,或梁板厚薄不一、表面不平的现象。

产生表面不平整的主要原因如下。

①混凝土浇注后,表面收浆仅用铁锹、拍子抹平,未用抹子找平压光,造成表面粗糙不平;②利用土层做支撑时模板未支承在坚硬土层上,或支撑面不足,或支撑松动、土层泡水,致使混凝土早期养护时发生不均匀下沉造成表面不平整;③未达到规定强度时,在混凝土表面操作或运料,致使表面出现凹陷不平或印痕。

(6) 麻面 麻面是指混凝土局部表面出现缺浆和许多小坑洼、麻点,形成粗糙面,但无钢筋外露现象。

产生麻面的主要原因如下。

①模板表面粗糙或黏附水泥浆渣等杂物未清理干净,拆模时混凝土表面被黏脱成斑点;②模板未浇水湿润或湿润不够,构件表面混凝土的水分被吸去,使混凝土失水过多出现麻面;③模板拼缝不密实,造成局部漏浆;④模板隔离剂涂刷不匀、局部漏刷或失效,导致拆

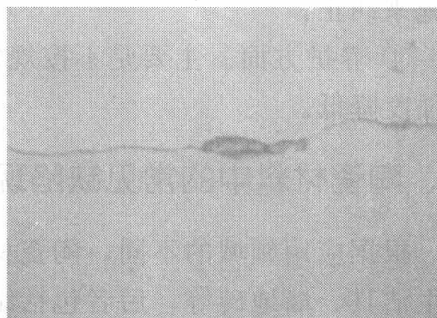


图 2-23 混凝土中的裂缝

模时混凝土表面被黏脱成斑点；⑤混凝土振捣不实，气泡未排出而停留在模板表面形成麻点。

(7) 钢筋锈蚀 是指其内部或外露的钢筋生锈、横截面积减小、强度降低的现象。

钢筋锈蚀是因酸碱反应而造成的，多发生在腐蚀性环境中使用的构件中。

(8) 混凝土强度不足 是指混凝土的强度未达到应有的强度。

造成混凝土强度不足的主要原因有：混凝土配合比设计、制备、现场浇捣和养护 4 个方面。

① 在配合比设计方面。有时不能及时测定水泥的实际活性，影响了混凝土配合比设计的正确性；套用混凝土配合比时选用不当；外加剂用量控制不准等都有可能导致混凝土强度不足。

② 在制备方面。任意增加用水量；配合比以重量折合体积比造成称料不准；搅拌时颠倒加料顺序及搅拌时间过短，造成搅拌不均匀，导致混凝土强度降低。

③ 现场浇捣方面。在施工中振捣不实及发现混凝土有分离现象时，未能及时采取有效措施来纠正。

④ 养护方面。主要是不按规定的方法、时间对混凝土进行妥善的养护，以致造成混凝土强度降低。

二、陶瓷材料中的常见缺陷现象

根据应用领域的不同，陶瓷材料可分为生活日用陶瓷和技术陶瓷两大类，前者如餐具、卫生洁具、墙地砖等，后者包括结构陶瓷、工具陶瓷和功能陶瓷，如氮化硅、碳化硅、氧化铝、氧化锆、氮化硼、碳化硼等。

现代技术陶瓷由于具有高强度、高硬度、耐高温、耐磨、耐蚀、密度小、化学稳定性高以及优良的电性能（具有高频介质损耗小、绝缘电阻大、抗电强度高），而在电力、化工、机械、仪器仪表、核工业、航空航天等领域中获得广泛应用，用于制造燃气轮机、汽车、内燃机、热交换器、精密机械和工具中的各种零部件以取代传统材料。但陶瓷是脆性材料，当其表面或内部存在微小缺陷时，强度即显著降低。例如，碳化硅在承受 $686 \sim 980 \text{ N/mm}^2$ 的负荷应力时，如表面有 $30 \sim 50 \mu\text{m}$ 数量级的缺陷存在，即可遭受破坏。因此，采用无损检测技术，探测其表面或内部是否有微小缺陷存在，并判断其位置、形状、尺寸和性质，对技术陶瓷材料的使用意义重大，现代技术陶瓷已成为无损检测的热点对象。

与此同时，生活日用陶瓷的无损检测与质量评定也受到了无损检测界和陶瓷界人士的广泛关注，已逐渐成为无损检测的主要对象。

这里讨论的陶瓷材料包括生活日用陶瓷和技术陶瓷，它们的缺陷既有共性，又有不同之处，以下分别讨论。

1. 生活日用陶瓷中的常见缺陷现象

陶瓷产品产生缺陷的原因很多、涉及面很广，制粉、混料、烧结及后处理等每个生产环节中都可能产生缺陷。

生活日用陶瓷中的常见缺陷可分为表观平整度、表观色泽、孔洞、起泡、花面图案、形状偏差、多釉少釉等类型，其中，孔洞类和开裂类缺陷是无损检测的主要对象。

根据生产统计发现，生活日用陶瓷中的常见缺陷现象主要有变形、开裂、夹层、气泡、釉层剥离、粘疤、黑点（黑斑）、黑心等。

(1) 变形 变形是指产品的实际形状偏离其设计形状的现象,它的发生有内外两方面的原因。内因主要有原料配比不当、产品结构不合理引起的各部位受力不匀;外因主要有装窑操作不当、烧成制度不合理(升温过快或超温)、窑炉结构不合理等。

(2) 开裂 陶瓷制品的开裂可分为坯体开裂和釉裂两种形式。

陶瓷制品产生坯体开裂的主要原因有:原料配比不当、本烧时急冷急热、坯体在装窑前没有完全干燥、原料的可塑性低或水分过少时成形,压坯压力过大,素烧的冷却速度过快、干燥不均匀、干燥过急、浇注用模或压模的形状不当等。

造成釉裂的主要原因是坯与釉的收缩系数不一致或施釉过厚。图 2-24 所示是含裂纹的餐具。

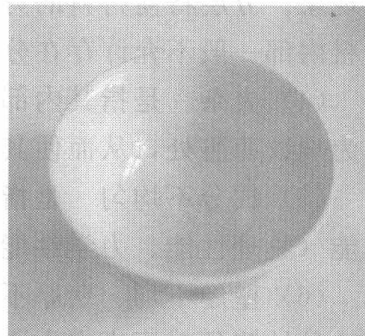


图 2-24 含裂纹的餐具

(3) 夹层 夹层是指压制出的坯体内部有分层现象。其产生原因大致可以分为粉料、压制成型设备(压机、模具)及工艺等几方面。

(4) 釉层剥离 即表面釉层脱落,使坯体外露的缺陷。

产生釉层剥离的主要原因有:①釉与坯不合,即坯的线胀系数远比釉大(坯体中石英含量多,釉中石英含量少);②烧结温度过高;③可溶性盐类集中在局部,瓷化不均;④施釉后,坯体受到轻微的冲击,坯体与釉的结合力减弱。

(5) 粘疤 即坯体与釉面或外物粘接形成的痕迹。

产生粘疤的主要原因有:①因装窑时不注意,坯体与坯体或匣钵接触而出现;②烧成中,坯体间隔的均衡性发生变化;③烧成温度过高,因而附着于渣饼或匣钵上;④釉或坯体的烧成温度低,因而附着于渣饼或匣钵上;⑤釉层过厚,往往会附着于渣饼或匣钵上;⑥烤花时,产品之间不留间隔地装窑,由于过烧而相互粘上。

(6) 黑点(黑斑) 黑点或黑斑就是产品表面局部存在的黑色斑点或斑块。

其形成机理为:在烧成过程的低温阶段,烟气中的 CO 会激烈分解而析出碳。由于在低温阶段坯体的气孔率较高,析出的碳很容易被吸附在坯体气孔的表面,从而形成黑斑缺陷。

(7) 黑心 是指在坯体的烧成过程中,有机物、硫化物、碳化物等因氧化不足而生成碳粒和铁质的还原物,致使坯体中间呈黑色或者灰色、黄色等现象。

黑心缺陷的存在会影响陶瓷产品的强度、吸水率、色泽等性能指标。

2. 技术陶瓷中的常见缺陷现象

技术陶瓷种类繁多,技术性能各异,原材料与制备工艺也不尽相同,因而它们的缺陷也千差万别。总起来讲,技术陶瓷中常见的主要缺陷类型有裂纹、孔隙、内部分层、夹杂、成分不均匀、壁厚不均等。

(1) 裂纹 裂纹是陶瓷产品中最常见、危害最大的缺陷,是对陶瓷产品进行无损检测与评价的重点对象。

裂纹有纵向裂纹、横向裂纹、网状裂纹、径向裂纹、角裂纹等多种形式。

形成裂纹的主要原因是压件脱离阴模时两种相互垂直的力(即压坯的弹性膨胀和阴模的压缩作用)对压件的作用。

阴模工作部分磨损严重,会使压件在脱模时裂纹;压塑粉中的结合剂过多,阻碍粒子间的接触,同样可引起半成品裂纹。

压制品表面的网状裂纹可能因压塑粉中的水分分布不均,成型后收缩不一,形成细小裂

纹而后扩大,以特殊的网状形式存在于制品表面而形成。

沿部件孔口的径向裂纹(丝裂)极为常见,其产生原因为:阳模和脱模器的孔眼不同心导致形成部件孔口的型芯柱弯曲;型芯不直;型芯表面处理精度不高;无型芯锥度和半径(小圆角)等。

(2) 孔隙 孔隙是陶瓷产品中的孔洞类缺陷,其主要形成机理:当烧成过程进入高温阶段后,坯体出现液相,反应所产生的气体无法自由排出坯体外,于是便出现针孔、气泡等孔隙类缺陷。

(3) 内部分层 内部分层是指陶瓷产品内部存在的层状隔离而没有完全融合为一个整体的现象。分层将使材料的力学性能(特别是与分层垂直方向的拉伸性能)降低。因此,陶瓷材料内部一般不允许存在分层缺陷。

(4) 夹杂 是指其内部含有外来杂质。夹杂的存在,破坏了材料的连续性,且比较容易成为裂纹萌生处,从而使其力学性能大大降低,是需要重点检测的一类缺陷。

(5) 成分不均匀 是指陶瓷产品内部各处的成分不一致的现象。成分不均匀将使其使用性能(物理性能、力学性能)降低。

(6) 壁厚不均 壁厚不均缺陷是因压模中阴模和阳模之间的同心度受破坏而引起,要克服这种缺陷须对压模定中心。

第三节 橡胶与塑料制品中的常见缺陷现象

一、橡胶制品中的常见缺陷现象

橡胶制品在汽车和飞机轮胎、密封、减振、运动器械、休闲设备等方面均有应用。目前,世界橡胶制品的消耗量正以3%左右的速度递增。因此,橡胶制品的无损检测也受到越来越多的关注。

基于对制品特性(形状、尺寸、技术质量要求等)和生产成本等方面的考虑,橡胶制品可采用不同的成型工艺(如注射成型、模压成型)进行生产。随制品、原材料和生产工艺的不同,橡胶制品可能产生多种缺陷,归纳起来主要有气泡、裂纹、分层等。

(1) 气泡 气泡问题是橡胶制品加工过程中经常遇到的问题。

橡胶制品产生气泡缺陷主要有配方和工艺两方面的原因。在配方因素方面,胶料中挥发物含量过高、胶料的硫化速度与模腔压力建立时间不匹配等均会引起气泡;在工艺条件方面,胶料分散不匀、胶料混炼时卷入空气、注射筒温度不够高、注射时间过短或过长、硫化温度过高等,都容易产生气泡。

(2) 裂纹 橡胶制品产生裂纹的主要原因:胶料硫化速度过快或已焦烧自硫;硫化温度偏高、时间偏长导致胶料发脆;硫化操作时间过长,致使先摆放的胶料自硫后又升压硫化;胶料中混入熟皮或杂质;胶料间混入过量的隔离剂或脱模剂;胶料粘模、脱模时用力不当等。

(3) 分层 胶料与胶料间硫化后不能有机地黏合在一起,从而产生缝隙的现象称为分层。

产生分层的主要原因有:混炼不均匀、胶料间混有过量的隔离剂或脱模剂、两种胶料不能有效地形成共硫化、硫化操作不当等。

除以上主要缺陷形式外,在汽车和飞机轮胎中还经常发生胎体帘布层间小面积脱空

(黏)、带束层翘起、胎侧钢丝拉链式断裂、钢丝生锈、帘线疲劳松散、冲击损伤、钢丝圈开脱或断股、胎面气泡、混炼不均、欠硫、杂质、疏松、脱层、胎里露线、肩空、肩裂、胎面刺穿、带束层脱空、胎体脱层、胎体或胎圈部不均匀等缺陷。

二、塑料制品中的常见缺陷现象

塑料制品中常见的缺陷现象有气泡、龟裂、熔接痕等。

(1) 气泡 塑料制品产生气泡的原因：原料含水分、原料温度太高、注射压力太小、注射速度不太慢、模具温度太低。

(2) 龟裂 龟裂是塑料制品中较常见的一种缺陷，它主要是由于应力变形所致。塑料制品的应力变形主要包括因填充过剩、脱模推出和金属镶嵌件等造成的残余应力；因设计不合理而造成外部应力集中；因化学药品、吸潮引起的水降解；以及再生料的过多使用引起的外部环境应力。

(3) 熔接痕 熔接痕是由于来自不同方向的熔融树脂前端部分被冷却、在结合处未能完全融合而产生的缺陷。

熔接痕主要影响外观，对涂装、电镀产生影响。熔接痕严重时，对制品强度产生影响；特别是在纤维增强树脂时尤为严重。

塑料制品产生熔接痕缺陷的主要原因：含冷料、原料温度不够高、注射压力太小、注射速度太慢、模具温度太低等。

塑料管材中常见的缺陷现象有光泽不良、表面水纹云纹、内外壁气泡、内壁裂纹、壁厚不均、弯曲等；塑料板材中的常见缺陷现象有断裂、厚度不均匀、气泡、表面斑点、表面粗糙、翘曲等。

第四节 复合材料中的常见缺陷现象

复合材料是由两种或两种以上物理、化学性质不同的物质，经人工组合而得到的多相固体材料。

复合材料有多种分类方法，如根据基体材料的不同，复合材料可分为金属基复合材料、树脂基复合材料和陶瓷基复合材料；根据增强体的形态，复合材料可分为颗粒增强复合材料、纤维增强复合材料、叠层或夹层复合材料、三维编织复合材料。

复合材料由于具有高比强度、高比模量、低线胀系数、防腐耐蚀等诸多优良性能，已在航空航天、汽车、火车、轮船等交通工具、建筑结构、体育制品等领域获得越来越广泛的应用，复合材料的无损检测与评价也相应地得到了越来越广泛的关注。

复合材料在制备过程中由于各种原因，如环境中的杂质、工艺实施不完善等因素造成最终复合材料制品存在不同类型的缺陷。

复合材料因组分、复合类型及复合工艺不同，其中的缺陷（大小、类型、位置、取向、危害）差别很大，以下主要讨论树脂基纤维增强叠层结构复合材料和金属蜂窝胶接结构中的常见缺陷。

一、树脂基纤维增强叠层结构复合材料中的常见缺陷现象

树脂基纤维增强叠层结构复合材料在航空航天（发动机、风扇叶片、外涵道）、兵器、

船舶等军事领域,以及机电工业(压力容器、密封件)、汽车工业(汽车壳体、发动机零部件)、土建工程(复合材料增强混凝土结构、全复合材料结构、纤维增强复合材料夹砂管)、在风力发电机上的应用(叶片)、基础设施补强、气瓶、体育用品、储能飞轮、冶炼工业(电除雾器)等民用领域都有应用。

根据已有的研究和实际应用经验,树脂基纤维增强叠层结构复合材料中常见的缺陷种类有孔隙、分层、夹杂、纤维弯曲、富脂或贫脂。此外,还可能存在裂纹、疏松、纤维体积百分比超差、纤维/基体界面结合不好、铺层或纤维方向的误差、缺层、铺层搭接过多等缺陷。

(1) 孔隙 孔隙是复合材料成型过程中形成的空洞,是复合材料的主要缺陷之一。一般分为延单纤孔隙(包括纤维束内孔隙)与层板间孔隙。当孔隙率小于1.5%时,孔隙为球状,直径为 $5\sim 20\mu\text{m}$;而当孔隙率大于1.5%时,孔隙一般为柱状,其直径更大,孔隙与纤维轴向平行。

产生孔隙缺陷的原因主要有:①树脂与纤维浸润性差,空气难以挤压出去;②稀释树脂使用的溶剂、树脂中的低分子组分在加工过程中的挥发;除此之外,固化过程中树脂的化学反应也有挥发物;③成型工艺不合理,固化压力过低都导致孔隙的产生;孔隙含量的分布与树脂类型及黏度、挥发物组分、固化温度、压力及时间有关。

(2) 分层 分层即层间的脱胶或开裂,是复合材料构件的主要缺陷之一。

形成分层的主要原因有:①增强材料未经过处理;②含胶量过低;③二次成型界面黏结强度太低;④固化工艺不合理,加压点控制不准;⑤基体树脂提前固化或因夹杂物存在;⑥对于大型缠绕零件,如果相邻缠绕层间隔时间过长可能导致分层,特别是树脂固化温度受限制更容易产生分层。

(3) 夹杂 所谓夹杂,即复合材料中含有非设计组分。

夹杂物在各种成型方法中都有可能产生,其原因主要是:①树脂中存在小凝块;②填料中存在夹杂物;③铺叠过程中出现多余物等。

(4) 纤维弯曲 纤维弯曲在热塑性树脂基复合材料中比较严重,如碳纤维/PEEK。首先,碳纤维与基体的热胀系数差别很大,而且半结晶的PEEK的结晶过程导致体积收缩约18%。基体体积的收缩导致纤维周围产生应力区,并且导致纤维弯曲。也可能是因为复合材料的快速固化引起残余应力提高导致纤维弯曲。

(5) 富脂、贫脂 富脂(贫脂)指复合材料中存在树脂含量超过(低于)规定的标准值区域。

二、金属蜂窝胶接结构中的常见缺陷现象

金属蜂窝胶接结构在航空航天及一些民用工业中的应用广泛,其质量控制及工艺标准化研究显得日趋重要,我国在20世纪60年代就开始了金属蜂窝胶接结构无损检测方法的研究。

金属蜂窝胶接结构产生缺陷的原因很复杂,缺陷类型繁多。根据缺陷的性质和特征,可将其缺陷划分为间隙型、紧贴型、弱胶接和芯子缺陷四类。其中,间隙型缺陷是指被黏物与胶层间或胶层中存在间隙的缺陷,包括空洞、气泡和脱黏;紧贴型缺陷(close-fitting defect)是指被黏物间有胶层,胶层与被黏物间无间隙但其强度为零的缺陷,如分层;弱胶接(weak bond)包括胶接强度低于规定值和疏松;芯子缺陷包括节点脱开、芯子断裂、芯子收缩、芯子皱折、芯子压皱等。

- (1) 空洞 是指被黏物间有直径不小于 5mm 的间隙型缺陷。
- (2) 气泡 是指胶层中平均直径小于 5mm、边界圆滑、内含气体的小泡。
- (3) 脱黏 脱黏是指被黏物间有胶黏剂但没黏上, 且有间隙的缺陷。
- (4) 紧贴型缺陷 紧贴型缺陷是指被黏物间有胶层, 胶层与被黏物间无间隙但其强度为零的缺陷, 如分层。
- (5) 疏松 是指胶层中存在密集的微小的多孔性缺陷。
- (6) 芯子断裂 芯子断裂是指蜂窝芯子出现横向或纵向断裂。
- (7) 节点脱开 是指相邻蜂窝格子之间脱节或分离。
- (8) 芯子收缩 是指蜂窝芯子因横向收缩引起的变形。
- (9) 芯子皱折 是指蜂窝芯子因横向和纵向的扭矩作用引起的变形。
- (10) 芯子压皱 是指蜂窝芯子厚度方向的压缩变形。

参考文献

- [1] 李国华, 张永忠. 机械故障诊断. 北京: 化学工业出版社, 1999, 2: 183~186.
- [2] [日] 无损检测协会编, 戴端松译. 无损检测概论. 上海: 上海科技出版社, 1989.
- [3] 本书编写组. 金属材料缺陷金相图谱. 上海: 上海人民出版社, 1975.
- [4] 第三机械工业部三〇一研究所. 航空锻件缺陷图谱. 西安: 西北工业大学出版社, 1978.
- [5] GB 7734—87 复合钢板超声波探伤方法.
- [6] 曾正明. 工程材料手册. 北京: 化学工业出版社, 1999.
- [7] Burke John J, Weiss Volker. Nondestructive Evaluation of materials. New York: Plenum press, 1979.
- [8] Halmshaw R. Non-destructive Testing. London: Edward Arnold, 1987.
- [9] XAVIER P. V. MALDAGUE, THEORY AND PRACTICE OF INFRARED TECHNOLOGY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, New York: John Wiley & Sons, Inc. 2001.
- [10] 谢武. 水工混凝土常见质量缺陷成因及其防治措施. 中国西部科技, 2006 (19): 20~21.
- [11] 王位, 陈捷. 水电站混凝土施工常见质量缺陷产生原因分析及处理技术. 水利水电技术, 2006, 27 (06): 16~19.
- [12] 凌水清. 陶瓷产品缺陷产生的原因及其预防措施. 中国建材科技, 2006 (01): 47~50.
- [13] 梁菁, 史亦韦. 陶瓷及陶瓷基复合材料微缺陷的超声检测. 材料工程, 2003 (04): 31~33.
- [14] 杨力. 墙地砖的几种常见缺陷分析. 陶瓷研究, 2002, 17 (04): 17~19.
- [15] 刘得利. 技术陶瓷静压工艺的缺陷及其克服. 佛山陶瓷, 2004, 14 (9): 14~16.
- [16] 胡亚萍, 徐望辉. 墙地砖生产过程中常见缺陷分析之我见. 陶瓷, 2000 (1): 39~43.
- [17] 顾幸勇, 陈玉清. 陶瓷制品检测及缺陷分析. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [18] 杨威, 赵大钢, 汪玉树. 金刚石复合片主要缺陷及产生的原因讨论. 金刚石与磨料磨具工程, 2001 (3): 24~27.
- [19] 高孝恒. 翻新轮胎的无损检验技术进展. 橡塑技术与装备, 2002, 28 (09): 9~12.
- [20] 黄良平, 刘刚, 崔泽龙等. 注射成型拉杆橡胶圈气泡问题的研究. 橡胶工业, 2004, 51 (12): 750~752.
- [21] 胡海明. 橡胶注射模具制品缺陷及其解决措施. 青岛化工学院学报 (自然科学版), 2001, 22 (03): 297~298.
- [22] 薛小宇. 橡胶外底质量缺陷的产生原因、修整方法及防范措施. 橡胶工业, 2001, 48 (06): 352~360.
- [23] 毛庆文, 李振刚. 全钢载重子午线轮胎生产中几个常见的质量问题. 轮胎工业, 1997, 17 (9): 557~560.
- [24] 张星星, 樊广军. 塑料制品缺陷分析专家系统. 模具工业, 2000 (6): 3~5.
- [25] 杨安, 陈绚. 注射成型塑料制品的常见缺陷及解决办法. 南昌高专学报, 2003 (03): 83~85.
- [26] 高峰, 李海梅, 申长雨. 塑料异型材挤出质量控制及常见异常现象分析与对策. 工程塑料应用, 2003, 31 (10): 57~59.
- [27] 高峰, 李海梅, 申长雨. 塑料管材和板材挤出常见缺陷及对策. 工程塑料应用, 2003, 31 (08): 58~61.
- [28] 陈华辉, 邓海金, 李明等. 现代复合材料. 北京: 中国物资出版社, 1998.
- [29] 张国定, 赵昌正. 金属基复合材料. 上海: 上海交通大学出版社, 1996: 121.

- [30] [美] 肯尼思·G. 克雷德主编, 温仲元, 戴永耀, 于琨等译, 李云盛校. 金属基复合材料. 北京: 国防工业出版社, 1982. 10: 36~99.
- [31] [英] 克莱茵著, 赵昌正译. 金属基复合材料导论. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
- [32] 于田春. 金属基复合材料. 北京: 冶金工业出版社, 1995.
- [33] 赵渠森. 先进复合材料手册. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [34] 张立功, 张佐光. 先进复合材料中主要缺陷分析. 玻璃钢/复合材料, 2001 (2): 42~46.
- [35] Matthews F I, Rawlings R D. COMPOSITE MATERIALS: ENGINEERING AND SCIENCE. London: CHAPMAN & HALL, 1999.
- [36] 周焕明, 王彩凤, 雷衍日. 金属蜂窝胶接结构中的常见缺陷现象. 无损检测, 1993, 15 (7): 191~192.

第三章

超声检测

利用声波从物体外界不损坏地检测其内部情况的方法早已问世。在日常生活中,经常可以看到人们用手拍打西瓜来判断西瓜是否熟了,铁道工人用榔头敲击火车车轮以检查车轮是否开裂或松脱等;都是声波检测的例子。超声检测(UT: Ultrasonic Testing)与上述方法没有本质上的差别,只是由于采用了频率很高的超声波,并且借助仪器设备进行超声波的发射与接收,从而基本消除了因人的经验与水平的差异而造成检测结果的误差,提高了检测结果的可靠性。简单地说,超声检测就是先用发射探头向被检物内部发射超声波,用接收探头接收从缺陷处反射回来(反射法)或穿过被检工件后(穿透法)的超声波,并将其在显示仪表上显示出来,通过观察与分析反射波或透射波的时延与衰减情况,即可获得物体内部是否有缺陷以及缺陷的位置、大小和性质等方面的信息。

1929年, Sokolov(索科罗夫)首次采用超声波方法来探测缺陷。1940年, Firestone(范苏通)首次将声音定位原理用于材料的检测。1945年以后,出于对无损检测日益迫切的需要,超声检测逐渐成为人们普遍接受的实用工具。目前,超声检测已发展成为五种常规无损检测方法之一,在无损检测的整个技术体系中占有极其重要的地位。

与其他常规无损检测方法相比,超声检测具有被检对象广泛、检测深度大、缺陷定位准确、检测灵敏度高、成本低、使用方便、速度快、对人体无害以及便于使用等特点。超声检测几乎渗透到所有的工业部门,如钢铁工业、机器制造业、石化工业、铁路运输业、造船工业、航空航天、核电工业、集成电路工业等。超声检测是目前国内外应用最广泛、使用频度最高且发展较快的一种无损检测技术。美国600家电力公司下属10000多家电厂主要用超声检测控制机组质量,保证电厂正常运转,超声检测的可靠性已达85%。

第一节 超声检测的基本原理

一、机械振动与机械波

1. 机械振动 (Mechanical vibration)

某一个物理量在观测时间内不停地经过极大值和极小值而变化的状态称为振动。如果振动量是一个力学量,如位移、速度或加速度等,则称其为机械振动。如初始扰动下的弹簧-质量系统(图3-1)、单摆等。

描述机械振动的物理量有振幅、周期或频率和初始相位,简谐振动是最简单的振动形式,其振动方程式为:

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0) = A \cos(2\pi f t + \varphi_0) = A \cos(2\pi t/T + \varphi_0) \quad (3-1)$$

式中 A ——振幅;

t ——时间；
 f ——频率；
 T ——周期， $T=1/f$ ；
 ω ——角速度， $\omega=2\pi f$ ；
 φ_0 ——初相位。

2. 机械波 (Mechanical wave)

可以认为物质是由以弹性力保持平衡的各个质点所构成的，这种弹性体的简化模型如图 3-2 所示。当某一质点受到外力作用后，该质点就在其平衡位置附近振动。由于一切质点都是彼此联系着的，振动质点的能量就能够传递给周围的质点而引起周围质点的振动。机械振动在介质中的传播形成机械波。声波是一种重要的机械波。

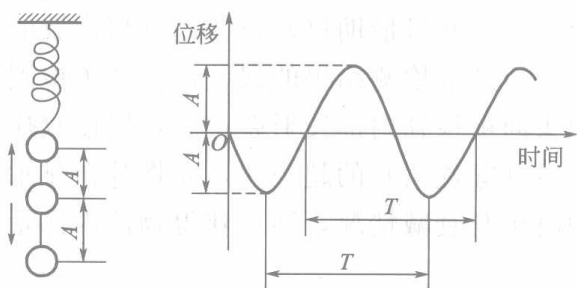


图 3-1 加载弹簧的振动

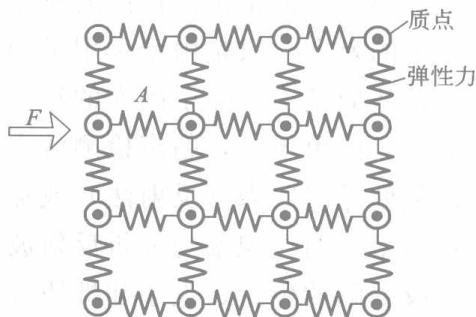


图 3-2 弹性介质模型

描述机械波的物理量有波幅 A 、波速 C 、波长 λ 、周期 T 或频率 f ，它们之间有如下关系式：

$$C = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \quad (3-2)$$

二、超声波基础

(一) 超声波及其特性

1. 超声波的定义

所谓超声波，是一种质点振动频率高于 20kHz 的机械波，因其频率超过人耳所能听见的声频段 (16Hz~20kHz) 而得名超声波。无损检测用的超声波频率范围为 0.2~25MHz，其中最常用的频段为 0.5~10MHz。较高的频率主要用于细晶材料和高灵敏度检测（如检测金属陶瓷等超细材料可选 10~200MHz 频段，甚至更高），而较低的频率则常用于衰减较大和粗晶材料的检测（如检测混凝土结构常选用 1MHz 以下的频率）。

2. 超声波的特性

超声波之所以被广泛地应用于无损检测，是基于其如下特性。

① 指向性好。超声波是一种频率很高、波长很短的机械波，在无损检测中使用的超声波波长为毫米数量级。它像光波一样具有很好的指向性，可以定向发射，犹如一束手电筒灯光可以在黑暗中寻找所需物品一样在被检材料中发现缺陷。

② 穿透能力强。超声波的能量较高，在大多数介质中传播时能量损失小，传播距离远，穿透能力强，在有些金属材料中，其穿透能力可达数米，在钢中一般可达 5~10m。

③ 在界面处会发生反射、折射和波型转换。利用这些特点，可使超声检测具有很大的灵活性（单面、双面，横波、纵波、表面波）。

④ 超声波对人体基本无害，不存在类似射线检测的安全隐患，操作安全。

（二）超声波的分类

与其他机械波一样，超声波也可有多种分类方法，这些分类方法反映了超声波的不同侧面。而且，与这些不同的分类法相对应有不同的名称，如图 3-3 所示。下面简述常用的分类方法。

1. 按质点振动方向分

根据波动传播时介质质点的振动方向与波的传播方向的相互关系的不同，可将超声波分为纵波、横波、表面波和板波等。这是超声检测中最常见的分类方法。

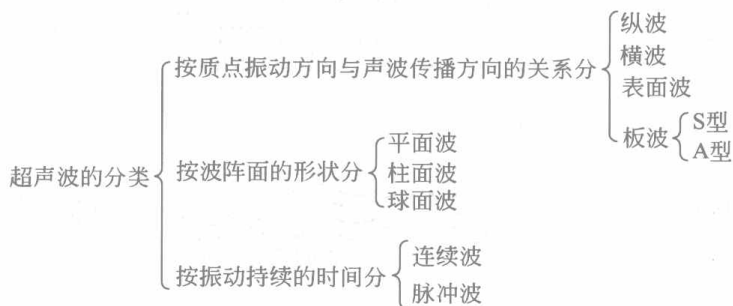


图 3-3 超声波的分类

（1）纵波 L（Longitudinal wave） 纵波是介质质点的振动方向与波的传播方向平行的波，用 L 表示。纵波是当弹性介质的质点受到交变的拉压应力作用时产生的。由于纵波在传播过程中，介质的质点疏密相间，故纵波又称压缩波或疏密波。纵波可在任何弹性介质（固体、液体和气体）中传播。

（2）横波 S（或 T）（Transverse wave/Shear wave） 横波是介质质点的振动方向与波的传播方向互相垂直的波，常用 S 或 T 表示。当介质质点受到交变的剪切应力作用时产生剪切变形，从而形成横波，故横波又称切变波。横波只能在固体介质中传播。

（3）表面波 R 当介质表面受到交变应力作用时，产生沿介质表面传播的波，称为表面波，常用 R 表示。表面波是瑞利（Rayleigh）于 1887 年首先提出来的，因此，表面波又称瑞利波。

表面波在介质表面传播时，介质表面质点作椭圆运动，椭圆的长轴垂直于波的传播方向，短轴平行于波的传播方向。椭圆运动可视为纵向运动与横向运动的合成，即纵波与横波的合成。因此，表面波同横波一样也只能在固体介质中传播，不能在液体或气体介质中传播。

表面波只能在固体表面传播。表面波的能量随距表面深度的增加而迅速减弱。当传播深度超过两倍波长时，其振幅降至最大振幅的 $\frac{1}{e} \approx 0.37$ 倍。因此，通常认为，表面波检测只能发现距工件表面两倍波长深度内的缺陷。

（4）板波（Plate wave） 在厚度与波长相当的弹性薄板中传播的波称为板波。广义上，板波也包括在圆棒、方钢和管材中传播的波，但通常所说的板波仅狭义地指兰姆波（Lamb）。

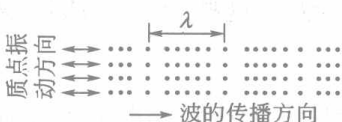
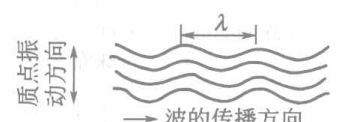
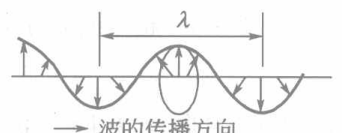
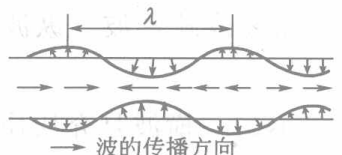
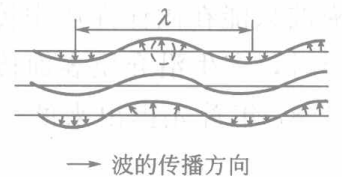
兰姆波又分为对称型（S 型）和非对称型（A 型）两种。其中，对称型兰姆波的特点：薄板中心质点作纵向振动，上下表面质点作相位相反并对称于中心的椭圆振动；而非对称型兰姆波的特点：薄板中心质点作横向振动，上下表面作相位相同的椭圆振动。

上述几种波的比较如表 3-1 所示。

2. 按振动持续时间的长短分

根据波源振动持续时间的长短，可将超声波分为连续波和脉冲波两种，如图 3-4 所示。

表 3-1 纵波、横波、表面波和板波比较

波的类型	简图	质点振动特点	传播介质	应用
纵波 L		质点振动方向平行于波的传播方向	固体、液体、气体	钢板、锻件检测等
横波 S		质点振动方向垂直于波的传播方向	固体	焊缝、钢管检测等
表面波 R		质点作椭圆振动,椭圆长轴垂直于波的传播方向,短轴平行于波的传播方向	固体	钢板、锻件、钢管检测等
板波	对称型(S型) 	上下表面:椭圆振动中心:纵向振动	固体(厚度与波长相当的薄板)	薄板、薄壁钢管($\delta < 6\text{mm}$)
	非对称型(A型) 	上下表面:椭圆振动中心:横向振动	固体(厚度与波长相当的薄板)	薄板、薄壁钢管($\delta < 6\text{mm}$)

(1) 连续波 波源持续不断地振动所辐射的波称为连续波。连续波常用于穿透法检测和共振法测厚，其振动形态如图 3-4(a) 所示。

(2) 脉冲波 波源振动持续时间很短（微秒级）、间歇辐射的波称为脉冲波。目前，超声无损检测中广泛采用的是脉冲波，其振动形态如图 3-4(b) 所示。



图 3-4 连续波和脉冲波

3. 按波形分

此分类方法常用于声波的理论研究，在介绍这种分类法之前，先介绍波阵面、波前和波线等概念，它们各自的意义见图 3-5。

所谓波阵面，是指同一时刻介质中振动相位相同的所有质点所连成的面；而波前则是指某一时刻波动所到达的空间各点所连成的面；波线则是波的传播方向线。

所谓波形,即波阵面的形状。根据波形的不同,通常把不同波源发出的波分为平面波、柱面波和球面波,这三种波的分类描述如下。

(1) 平面波 (Plane wave) 平面波的波阵面为相互平行的平面,其波源为一平面,如图 3-5(a) 所示。平面波的波动方程为:

$$y = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad (3-3)$$

(2) 柱面波 (Cylindrical wave) 波阵面为同轴圆柱的波称为柱面波。柱面波的波源为一条线,如图 3-5(b) 所示,其波动方程为:

$$y = \frac{A}{\sqrt{x}} \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad (3-4)$$

(3) 球面波 (Spherical wave) 波阵面为同心球面的波称为球面波,其波源为一点,如图 3-5(c) 所示。球面波的波动方程为:

$$y = \frac{A}{x} \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad (3-5)$$

式(3-3)~式(3-5)中, y 为声压, A 为波源的声压幅值, x 为波的传播距离, c 为波速。

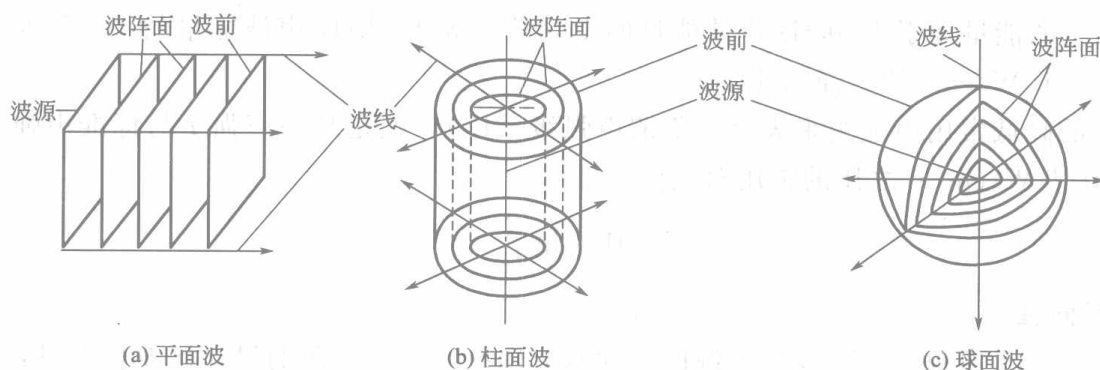


图 3-5 超声波的波形

(三) 超声场

充满超声波的空间或超声振动所涉及的介质部分称为超声场,描述超声场的主要特征参量有声压、声强和指向性等。

1. 声压 p (Sound pressure)

超声场中某一点某一瞬时所具有的压强 p_1 与该点没有超声波存在时的静态压强 p_0 之差称为该点的声压,记为 p ,单位为帕斯卡 (Pa) ($1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$)。

对于平面余弦波,可以证明:

$$p = \rho c A \omega \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) + \frac{\pi}{2} \right] \quad (3-6)$$

式中 ρ ——介质的密度;

c ——介质中的波速;

A ——介质质点的位移振幅;

ω ——介质中质点振动的圆频率, $\omega = 2\pi f$;

t ——时间;

x ——至波源的距离。

可见声压的绝对值与波速 c 、质点振动的速度幅值 $A\omega$ (或角频率 ω) 成正比。因超声波

的频率高, 所以, 超声波比可闻声波的声压大。

2. 声强 I (Intensity of acoustic power)

单位时间内垂直通过单位面积的声能称为声强, 记为 I , 其常用单位为 $\text{erg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ [尔格/(厘米²·秒)] 或 W/cm^2 。

现以纵波在均匀的各向同性的固体介质中的传播为例, 可以证明平面波的声强为:

$$I = \frac{1}{2} \rho c A^2 \omega^2 = \frac{1}{2} p_m^2 \frac{1}{\rho c} = \frac{1}{2} \rho c V_m^2 \quad (3-7)$$

式中 ρ ——介质的密度, kg/m^3 ;

c ——声速, m/s ;

A ——位移振幅, m ;

ω ——角速度, ($^\circ$);

V_m ——速度振幅, m/s ;

p_m ——声压幅值, Pa 。

可见, 超声波的声强正比于质点振动位移幅值的平方, 正比于质点振动角频率的平方。由于超声波的频率高, 其强度(能量)远远大于可闻声波的强度。例如, 在相同的振幅下, 1MHz 声波的能量等于 100kHz 声波能量的 100 倍, 等于 1kHz 声波能量的 100 万倍。在超声检测中, $10\text{W}/\text{cm}^2$ 的声强已非常大。

声强的高低常用声强级来表示。所谓声强级 (IL), 就是某一声强 I 与标准声强 I_0 (闻阈 $I_0 = 10^{-16} \text{W}/\text{cm}^2$) 之比的常用对数值, 即

$$\text{IL} = \lg \frac{I}{I_0} \quad (3-8)$$

3. 指向性

声波为一点声源时, 声波从声源向四面八方辐射。如果声源的尺寸比波长小时, 则声波从声源集中成一波束, 以某一角度扩散出去, 形成主瓣和副瓣声束, 如图 3-6 所示。声波的能量主要集中在主瓣声束内, 这种声束集中向一个方向辐射的性质就是声场的指向性。

声场的指向性好坏常用指向角 (又称扩散角或半扩散角) θ_0 来进行衡量, 其值为:

$$\sin \theta_0 = k \frac{\lambda}{D} \quad (3-9)$$

式中 λ ——传播介质中的声波波长;

D ——声源尺寸, 对圆声源为其直径, 对方声源为其边长;

k ——与晶片形状有关的常数, 对圆声源, $k=1.22$, 对方声源 $k=1.0$ 。

一般而言, 希望 θ_0 值尽量小, 因为 θ_0 越小, 指向性越好, 可以提高对缺陷的检测灵敏度和定位精度; 但在探测形状复杂的工件时, 有时又希望扩散角大一些, 以便利用扩散声束来探测某一区域的缺陷。

4. 近场和远场

声源中心轴线上的声压分布如图 3-7 中实线所示, 图中虚线所示为球面波的声压曲线。图中, 最后一个声压极大值点至声源的距离称为近场区长度, 以 N 表示, 对圆声源, 其值为:

$$N = \frac{D^2 - \lambda}{4\lambda} \approx \frac{D^2}{4\lambda} \quad (\text{当 } D \gg \lambda \text{ 时}) \quad (3-10)$$

式中 λ ——传播介质中的声波波长;

D ——圆声源的直径。

声场中, N 以内的区域称为近场区, N 以远的区域称为远场区。由于声压曲线在近场中有多个极大值和极小值, 超声波对缺陷的检测十分困难, 故一般把近场区称为超声波检测的盲区。

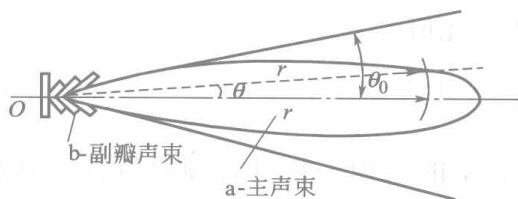


图 3-6 圆盘形声源的声场指向性

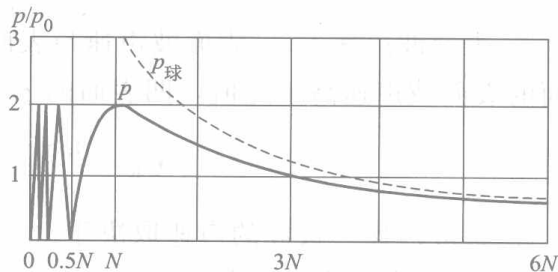


图 3-7 波源轴线上的声压

由图可以看出, 当距离声源 $3N$ 以外时, 圆声源轴线上的声压分布与球面波的声压很接近。因此, 为计算方便, 常用球面波的声压公式来进行近似计算。

(四) 介质的声特性

1. 声速 C (Velocity of sound)

声波在介质中的传播速度称为声速, 常用 C 表示。声速不仅与介质的特性 (如密度、弹性模量等) 有关, 同时还取决于声波的波型。在同一种介质中, 声波的波型不同, 其传播速度也不同。

(1) 气体和液体中的声速 由于气体和液体的剪切模量为零, 因而气体和液体只能传播纵波, 不能传播横波、表面波和板波。

液体中的纵波声速为:

$$C = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\rho\beta}} \quad (3-11)$$

气体中的纵波声速为:

$$C = \sqrt{\frac{YP_0}{\rho}} \quad (3-12)$$

式中 K ——体积弹性模量, Pa;

β ——绝热压缩系数;

ρ ——密度, kg/m^3 ;

P_0 ——静态压力, Pa;

Y ——热容比。

空气中的声速约为 344m/s , 液体中的声速在 $900 \sim 1900\text{m/s}$ 之间, 水的声速约为 1500m/s 。

(2) 固体中的声速

① 纵波声速 C_L

a. 细棒:

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3-13)$$

b. 薄板:

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho(1+\mu^2)}} \quad (3-14)$$

c. 无限大介质:

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (3-15)$$

② 横波声速 C_S

无限大固体介质:

$$C_S = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3-16)$$

③ 表面波声速 C_R 表面波声速与表面曲率有关, 平表面的表面波声速如式(3-17), 凸表面的表面波声速高于此值, 凹表面的表面波声速低于此值。

$$C_R = \frac{0.87 + 1.12\mu}{1+\mu} \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}} \quad (3-17)$$

④ 板波声速 板波的声速取决于薄板的厚度和频率的乘积, 且具有频散特性, 其相速度 C_P 可用双曲函数的形式表示。

$$\text{对称型板波: } C_P = \frac{\tanh \pi f d (R_S / C_P)}{\tanh \pi f d (R_L / C_P)} = \frac{(1 + R_S^2)^2}{4 R_L R_S} \quad (3-18)$$

$$\text{非对称型板波: } C_P = \left[\frac{\tanh \pi f d (R_S / C_P)}{\tanh \pi f d (R_L / C_P)} \right]^{-1} = \frac{4 R_L R_S}{(1 + R_S^2)^2} \quad (3-19)$$

式(3-13)~式(3-19)中 ρ ——密度, kg/m^3 ;

E ——杨氏模量, N/m^2 ;

G ——剪切弹性模量;

μ ——泊松比; 钢 $\mu=0.28$, 铝 $\mu=0.34$, 固体 $\mu=0\sim0.5$;

d ——板厚;

f ——频率;

$$R_S = [1 - C_P / C_S]^{1/2}; R_L = [1 - C_P / C_L]^{1/2}。$$

在固体介质中, 纵波、横波和表面波的波速有如下的关系: $C_R < C_S < C_L$ 。对钢和铝而言, 一般可取 $C_R : C_S : C_L = 0.45 : 0.5 : 1$ 。

2. 声阻抗 Z (Acoustic impedance)

介质中某一点的声压与该处质点的振动速度之比称为声阻抗, 常用 Z 表示, 单位为 $\text{N} \cdot \text{s/m}^3$ 或 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。数值上, 声阻抗等于介质密度 ρ 与声速 c 的乘积, 即 $Z = \rho c$ 。

部分介质的声特性列于附录 2 中, 供参考。

三、超声波的传播特性

(一) 超声波的叠加、干涉和衍射

1. 波的叠加原理 (Principle of superposition)

当几列波 (指质点振动位移振幅远小于波长的波) 在同一介质中传播并相遇时, 相遇处质点的振动是各列波引起分振动的合成, 任一时刻该质点的位移是各列波引起的分位移的矢量和, 而声压则是各声波分别作用时的声压的代数和。相遇后的各列波仍保持它们各自原有的特性 (频率、波长、振动方向等) 不变, 并按照各自原来的传播方向继续前进, 好像在各自的传播过程中没有遇到其他波一样。

2. 波的干涉 (Interference of wave)

两列频率和振动方向相同、相位差恒定的波相遇时, 由于波的叠加作用, 会使某些地方的振动始终相互加强, 而在另一些地方的振动始终相互减弱或完全抵消的现象称为波的干

涉。能产生干涉现象的波称为相干波。相干波的波源称为相干波源。

3. 驻波 (Standing wave)

驻波是干涉现象的特例, 当两列振幅相同的相干波沿相反的方向传播时, 叠加形成驻波, 驻波实际上就是分段的振动现象。

设 p_1 和 p_2 为两列沿相反方向行进的相干波, 它们的声压表达式分别为:

$$p_1 = p_a \cos(\omega t - kx) \quad (3-20)$$

$$p_2 = p_a \cos(\omega t + kx) \quad (3-21)$$

根据叠加原理, 其合成声压为

$$p_s = p_1 + p_2 = p_a \cos(\omega t - kx) + p_a \cos(\omega t + kx) = 2p_a \cos kx \cos \omega t \quad (3-22)$$

由此可见, 合成声压仍是以 ω 为频率的简谐波, 而其振幅则是 $|2p_a \cos kx|$, 其值在 $+2p_a$ 和 $-2p_a$ 之间随 x 值而变化。驻波波形如图 3-8 所示。

4. 波的衍射

波在传播过程中遇到障碍物时能绕过其边缘, 并继续前进的现象称为波的衍射或绕射。

超声波在传播过程中遇到障碍物时, 一方面产生反射和折射, 另一方面产生绕射。绕射本领的大小取决于障碍物尺寸 D_f 和波长 λ 的相对大小, 即:

当 $D_f \ll \lambda$ 时, 几乎只绕射而无反射;

当 $D_f \gg \lambda$ 时, 几乎只反射而无绕射;

当 $D_f \approx \lambda$ 时, 则既反射又绕射。

绕射使反射回波减弱, 因此, 一般认为超声波检测所能探测到的最小缺陷尺寸为 $\lambda/2$ 。

(二) 超声波的反射、折射和波型转换

超声波在传播过程中, 在同一种介质中, 将不改变其方向而一直向前传播, 但当遇到异质界面 (即声阻抗不同的界面) 时, 将会发生反射、折射和波型转换现象。即有一部分超声波在界面上被反射回第一介质, 另有一部分超声波则透过介质交界面进入第二介质, 与此同时, 还可能伴随有纵波、横波、表面波和板波这几种不同波形之间的相互转换。

超声波在异质界面处的传播特性, 与异质界面的几何形状、介质的声阻抗、超声波的入射角以及超声波的波长等因素有关, 以下将对此分别进行讨论。

1. 超声波垂直入射到无限大平界面上的反射和透射

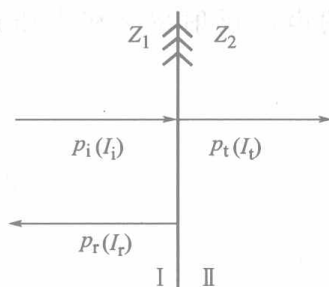


图 3-9 平面波垂直入射到单一平界面

根据超声波波长与板厚的相对尺寸, 超声波垂直入射到平界面又可分为单一平界面和薄层界面两种情形。

(1) 单一平界面 当超声波从声阻抗为 Z_1 的第一介质垂直入射声阻抗为 Z_2 的第二介质, 若第二介质足够厚, 则该界面为单一平界面 (图 3-9)。

超声波在单一平界面的传播特性服从如下的反射和透射规律。

$$\text{声压反射率: } r = \frac{p_r}{p_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (3-23)$$

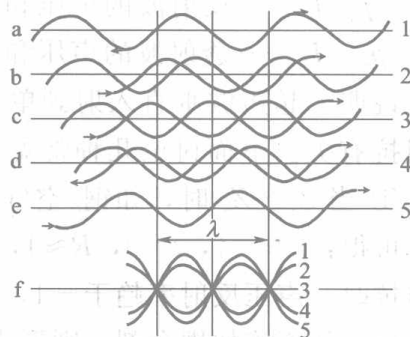


图 3-8 驻波的形成

$$\text{声压透射率: } t = \frac{p_t}{p_i} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (3-24)$$

$$\text{声强反射率: } R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{\frac{1}{2} \frac{p_r^2}{Z_1}}{\frac{1}{2} \frac{p_i^2}{Z_1}} = \frac{p_r^2}{p_i^2} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (3-25)$$

$$\text{声强透射率: } T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{\frac{1}{2} \frac{p_t^2}{Z_2}}{\frac{1}{2} \frac{p_i^2}{Z_1}} = \frac{Z_1}{Z_2} \times \frac{p_t^2}{p_i^2} = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (3-26)$$

式中 p_i, I_i ——入射波的声压和声强;

p_r, I_r ——反射波的声压和声强;

p_t, I_t ——透射波的声压和声强。

以上说明, 超声波垂直入射到单一平界面上时, 声压或声强的分配比例仅与界面两侧介质的声阻抗有关。下面讨论几种常见界面上的声压、声强反射和透射情况。

① 当 $Z_1 \gg Z_2$ 时, 如钢/空气界面, 其中, $Z_{\text{钢}} \approx 4.6 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{s/m}^3$, $Z_{\text{空气}} \approx 447 \text{ N} \cdot \text{s/m}^3$ 。计算可得: $r \approx -1$, $t \approx 0$, $R \approx 1$, $T \approx 0$, 此即说明, 当入射波介质声阻抗远大于透射波介质的声阻抗时, 声压反射率趋于 -1 , 透射率趋于 0 , 即声压几乎全反射而无透射。检测中, 探头和工件间如不施加耦合剂, 则形成固(晶片)/气界面, 超声波将无法进入工件。

② 当 $Z_1 \approx Z_2$ 时, $r \approx 0$, $t \approx 1$ 。如钢的淬火部分与非淬火部分及普通碳素钢焊缝的母材与焊接金属之间的声阻抗相差很小, 一般约为 1% 。设 $Z_1 = 1$, $Z_2 = 0.99$, 则计算可得: $r = -0.005$, $t = 0.995$, $R = 2.5 \times 10^{-5}$, $T = 0.999975$ 。因此, 在焊缝检测中, 若母材与焊接金属结合面间没有任何缺陷, 是会产生界面回波的。

③ 超声波垂直入射到某界面时的声强反射率与从何种介质入射无关。

(2) 薄层界面 在进行超声波检测时, 经常会遇到很薄(介质厚度与超声波波长相当)的耦合层和缺陷薄层, 它们都可归纳为薄层。超声波在薄层界面处的传播特性, 与前述的单一平界面情形不同。由于异质介质层很薄, 进入异质薄层内的超声波会在薄层两侧界面产生多次反射和透射, 形成一系列反射波和透射波。当超声波的脉冲宽度相对于薄层较窄时, 薄层两侧的各次反射波和透射波会相互干涉。所以, 超声波在薄层界面处的声压反射率和透射率的计算比较复杂。

超声波通过异质薄层界面的声压反射率和透射率, 不仅与介质的声阻抗和薄层的声阻抗有关, 而且与薄层厚度与超声波波长之比(d_2/λ_2)有关。

① 均匀介质中的异质薄层 当第一、第三介质为同一介质时, 而第二介质为异质薄层时, 即为均匀介质中的异质薄层。均匀介质中的异质薄层的声压反射率 r 和声压透射率 t 如下。

$$\text{声压反射率: } r = \sqrt{\frac{\frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 \frac{2\pi d_2}{\lambda_2}}{1 + \frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 \frac{2\pi d_2}{\lambda_2}}} \quad (3-27)$$

$$\text{声压透射率: } t = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 \frac{2\pi d_2}{\lambda_2}}} \quad (3-28)$$

式中 d_2 ——异质薄层的厚度；

λ_2 ——超声波在异质薄层中的波长；

m ——两种介质的声阻抗之比， $m = \frac{Z_1}{Z_2}$ 。

由式(3-27)和式(3-28)可知，当 $d_2 = n \frac{\lambda_2}{2}$ ，即薄层厚度为半波长的整数倍时， r 取最小值，而 t 取最大值；当 $d_2 = (2n-1) \frac{\lambda_2}{4}$ ，即薄层厚度为 $1/4$ 波长的奇数倍时， r 取最大值，而 t 取最小值；

式中， n 为自然数。

钢和有机玻璃薄层在水中的透射情况如图 3-10 所示，钢和铝中的空气薄层和水间隙的反射、透射情况如图 3-11 所示。

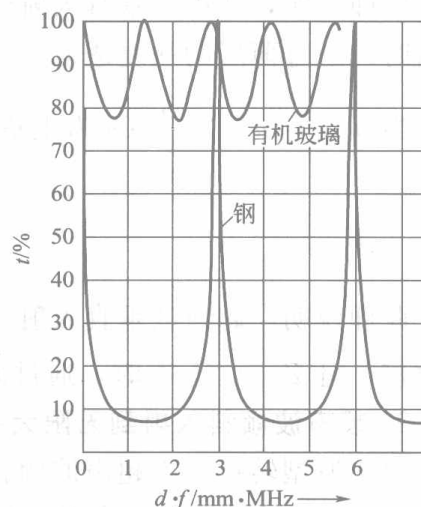


图 3-10 钢和有机玻璃薄层在水中的透射

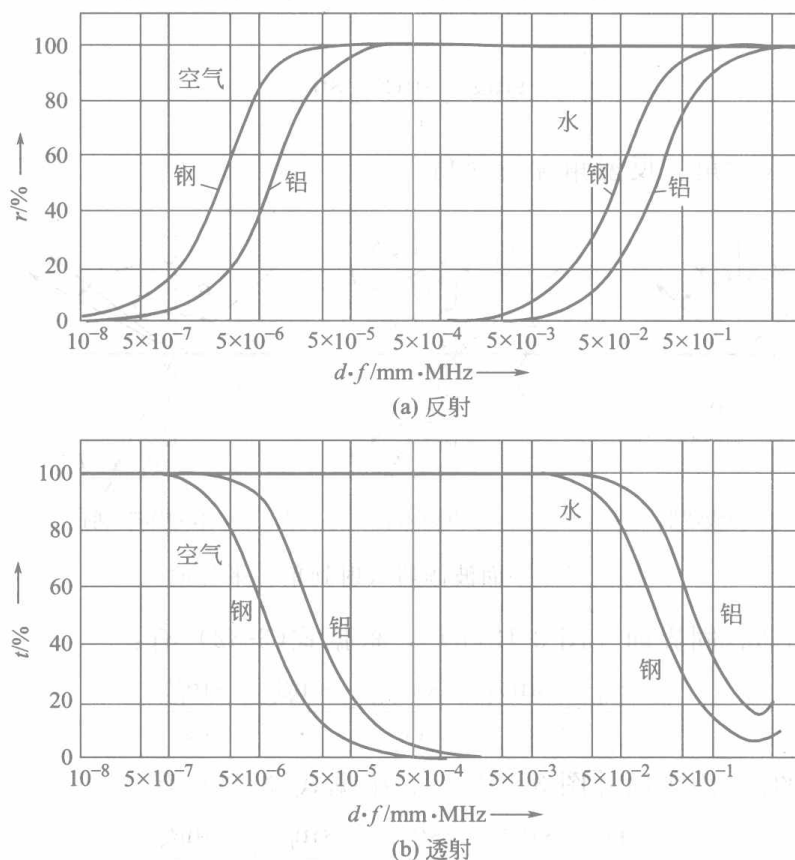


图 3-11 钢和铝中的空气薄层和水间隙的反射、透射

② $Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$ ，即非均匀介质中的薄层，如晶片-保护薄膜-工件，或晶片-耦合剂-工件，此时，声压往复透射率为：

$$T = \frac{4Z_1 Z_3}{(Z_1 + Z_3)^2 \cos^2 \frac{2\pi d_2}{\lambda_2} + (Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_2})^2 \sin^2 \frac{2\pi d_2}{\lambda_2}} \quad (3-29)$$

当 $d_2 = n \frac{\lambda_2}{2}$ (n 为正整数) 时，则有：

$$T = \frac{4Z_1 Z_3}{(Z_1 + Z_3)^2} \quad (3-30)$$

此即说明, 超声波垂直入射到两侧介质声阻抗不同的薄层, 若薄层厚度等于半波长的整数倍时, 通过薄层的往复透射率与薄层的性质无关。

当 $d_2 = (2n-1)\frac{\lambda_2}{4}$ (n 为正整数), 且 $Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3}$ 时, 则有:

$$T = \frac{4Z_1 Z_3}{\left(Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_2}\right)^2} = 1 \quad (3-31)$$

此即说明, 超声波垂直入射到两侧介质声阻抗不同的薄层, 若薄层厚度等于 $1/4$ 波长的奇数倍, 且 $Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3}$ 时, 通过薄层的往复透射率等于 1, 即全透射。

2. 超声波倾斜入射到无限大平界面时的反射、折射和波型转换

(1) 波型转换 当超声波倾斜入射到异质界面时, 除产生与入射波同类型的反射波和折射波之外, 还会产生与入射波不同类型的反射波和折射波, 这种现象称为波型转换。

(2) 反射、折射定律 超声波从传播速度为 c_1 的介质倾斜入射到传播速度为 c_2 的介质时, 如图 3-12(a) 所示, 反射波和折射波的传播方向由反射、折射定律 (又称斯涅尔定律) 来确定, 即

$$\frac{\sin \alpha}{c_1} = \frac{\sin \gamma}{c_1} = \frac{\sin \beta}{c_2} \quad (3-32)$$

式中 α, γ, β ——入射角、反射角和折射角。

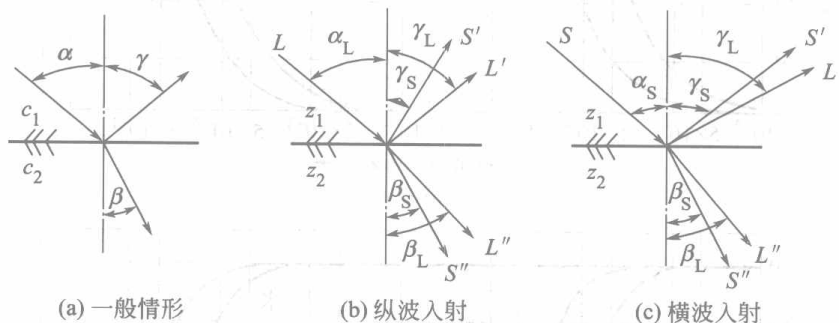


图 3-12 平面波倾斜入射到单一平界面

对于纵波入射的固/固界面 [图 3-12(b)], 根据式(3-32)有:

$$\frac{\sin \alpha_L}{c_{L_1}} = \frac{\sin \gamma_L}{c_{L_1}} = \frac{\sin \gamma_S}{c_{S_1}} = \frac{\sin \beta_L}{c_{L_2}} = \frac{\sin \beta_S}{c_{S_2}} \quad (3-33)$$

对于横波入射的固/固界面 [图 3-12(c)], 根据式(3-32)有:

$$\frac{\sin \alpha_S}{c_{S_1}} = \frac{\sin \gamma_L}{c_{L_1}} = \frac{\sin \gamma_S}{c_{S_1}} = \frac{\sin \beta_L}{c_{L_2}} = \frac{\sin \beta_S}{c_{S_2}} \quad (3-34)$$

(3) 临界角 它描述了超声波倾斜入射到单一平界面时的某种极限传播特性, 与界面两侧介质的声学特性有关。在超声检测中, 常用的临界角有第一临界角、第二临界角和第三临界角, 各自的定义如下。

- ① 第一临界角 α_I 使纵波的折射角 $\beta_L = 90^\circ$ 时的纵波入射角 α_L 的值称为第一临界角, 记为 α_I 。
- ② 第二临界角 α_{II} 使横波的折射角 $\beta_S = 90^\circ$ 时的纵波入射角 α_L 的值称为第二临界角, 记为 α_{II} 。
- ③ 第三临界角 α_{III} 使纵波反射角 $\gamma_L = 90^\circ$ 时的横波入射角 α_S 的值称为第三临界角, 记为 α_{III} 。

由上述临界角的物理意义可知:

- a. 当 $\alpha_L = \alpha_I \sim \alpha_{II}$ 时, 第二介质中只存在有折射横波而没有折射纵波, 这就是常用横波

探头的设计依据;

b. 当 $\alpha_L > \alpha_{II}$ 时, 第二介质中既无折射纵波又无折射横波, 但在第二介质表面形成表面波, 这就是常用表面波探头的设计依据。

(4) 声压反射、透射率 斯涅尔定律只讨论了超声波倾斜入射到界面上时, 各种类型反射波和折射波的传播方向, 而没有涉及它们的声压反射率和透射率。

在倾斜入射情况下, 各种类型的反射波和折射波的声压反射率和透射率, 不仅与界面两侧介质的声阻抗有关, 而且还与入射波的类型以及入射角的大小有关。其理论计算公式比较复杂, 有兴趣的读者可参见文献 [1]。几种常见界面的声压反射率和透射率情况如图 3-13~图 3-18 所示。

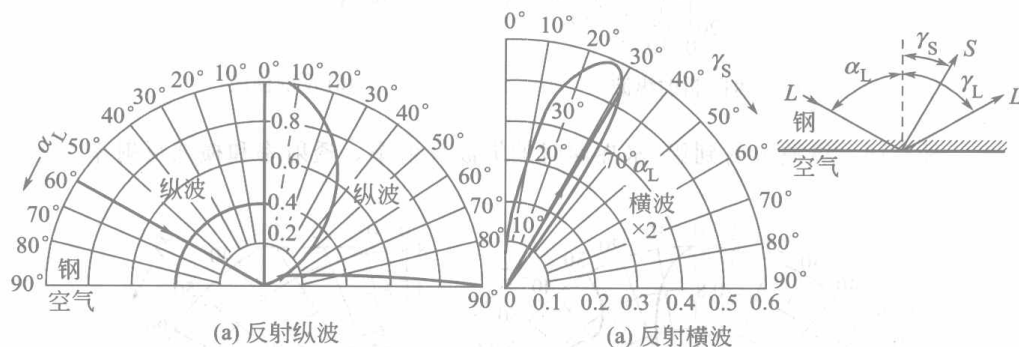


图 3-13 纵波入射到钢/空气界面时的纵波反射率和横波反射率

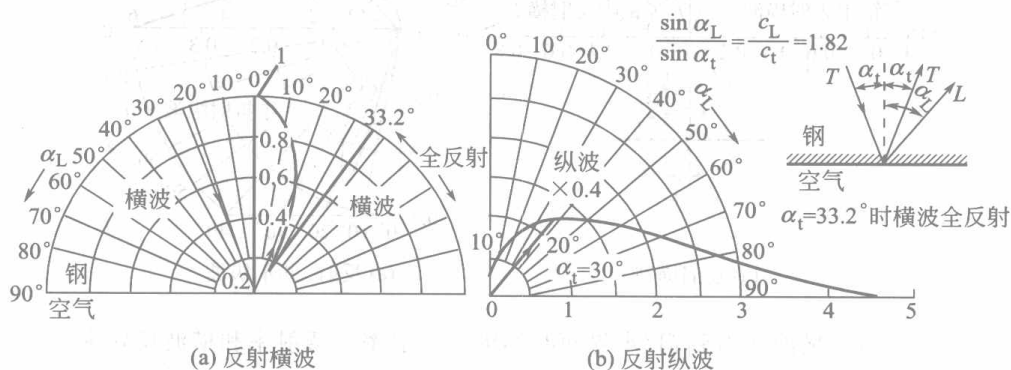


图 3-14 横波入射到钢/空气界面时的横波反射率和纵波反射率

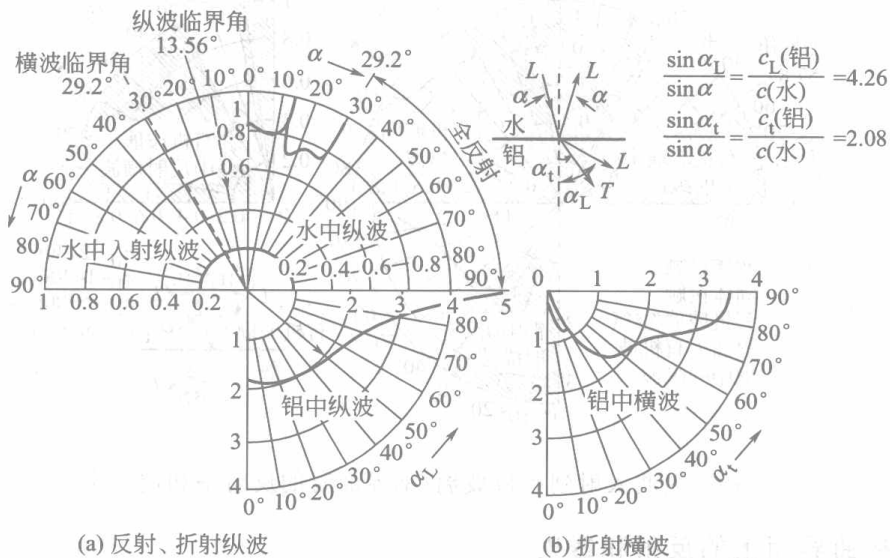


图 3-15 纵波入射到水/铝界面时的纵波反射率、折射率和横波透射率

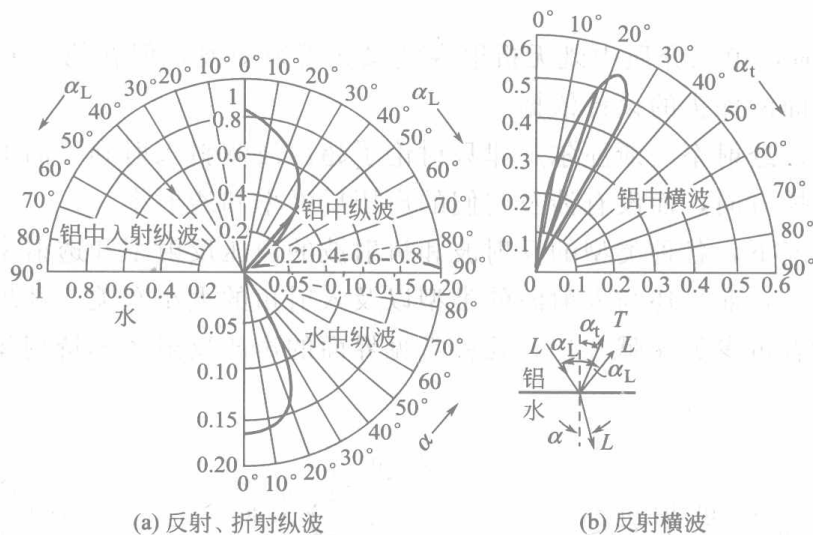


图 3-16 纵波入射到铝/水界面时的纵波反射率、透射率和横波反射率

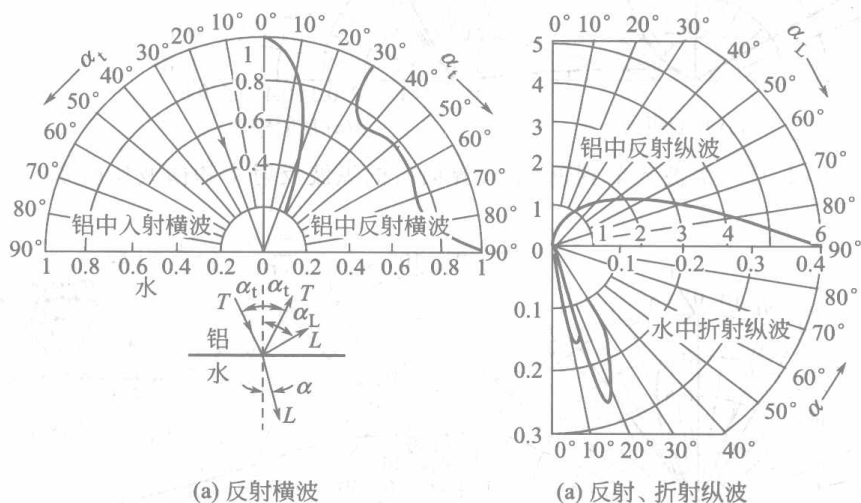


图 3-17 横波入射到铝/水界面时的纵波反射率、透射率和横波反射率

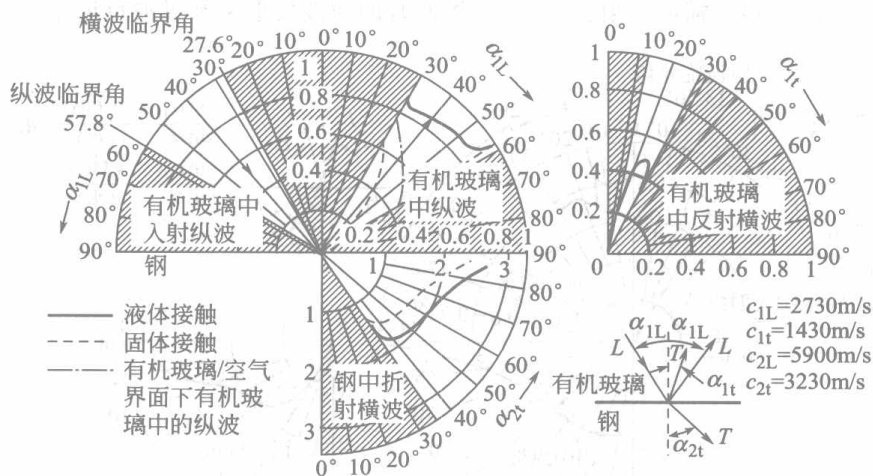


图 3-18 纵波入射到有机玻璃/钢界面时的反射率和透射率

3. 超声波在曲界面上的反射和透射

在此只讨论平面波在曲界面上的反射和透射情况。

(1) 反射波 超声波入射到曲界面时, 凹曲面的反射波聚焦, 凸曲面的反射波发散, 如图 3-19 所示。反射波波阵面的形状取决于曲界面的形状: 球界面具有焦点, 反射波波阵面为球面, 凹球面上的反射波好像从实焦点发出的球面波, 凸球面上的反射波好像是从虚焦点发出的球面波; 柱界面具有焦轴, 反射波波阵面为柱面, 凹柱面上的反射波好像是从实焦轴发出的柱面波, 凸柱面上的反射波好像是从虚焦轴发出的柱面波。

声束中心轴线上, 反射波的声压分别如下。

$$\text{球曲面: } p_x = p_0 \frac{f}{x \pm f} \quad (\text{发散取“+”, 聚焦取“-”}) \quad (3-35)$$

$$\text{柱曲面: } p_x = p_0 \sqrt{\frac{f}{x \pm f}} \quad (\text{发散取“+”, 聚焦取“-”}) \quad (3-36)$$

式中 p_0 ——入射平面波的声压;

f ——焦距 ($f = \frac{r}{2}$);

x ——中心轴线上某点至曲面顶点的距离;

p_x ——中心轴线上 x 点处反射波声压。

(2) 透射波 超声平面波入射到曲界面上时, 其透射波同样会产生聚焦或发散。究竟是聚焦还是发散, 取决于曲界面的 (凹、凸) 曲率以及两种介质的声速大小。

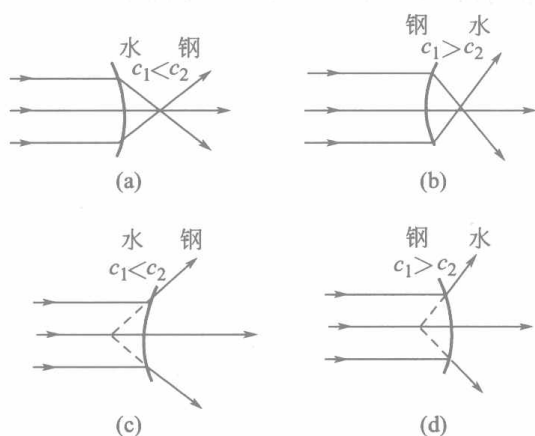


图 3-20 平面波入射到曲界面时的透镜作用

由斯涅耳定律可得, 超声平面波入射到 $c_1 < c_2$ 的凹曲面或 $c_1 > c_2$ 的凸曲面上时, 其透射波将聚焦; 超声平面波入射到 $c_1 < c_2$ 的凸曲面或 $c_1 > c_2$ 的凹曲面上时, 其透射波将发散 (图 3-20)。

透射波波阵面的形状, 取决于曲界面的形状。对球界面, 其透射波波阵面为球面, 透射波好像是从焦点发出的球面波。对柱界面, 透射波好像是从焦轴发出的柱面波。

透射波波束中心轴线上的声压分别如下。

$$\text{球界面: } p_x = t p_0 \frac{f}{x \pm f} \quad (\text{发散取“-”, 聚焦取“+”}) \quad (3-37)$$

$$\text{柱界面: } p_x = t p_0 \sqrt{\frac{f}{x \pm f}} \quad (\text{发散取“-”, 聚焦取“+”}) \quad (3-38)$$

式中 t ——声压透射率, $t = \frac{p_t}{p_0} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$ 。

发散将使声束的指向性变差, 声能损失增加, 中心轴线上的声压降低。聚焦则使声能更为集中, 声束的指向性得到改善, 声束中心轴线上的声压增强, 有利于提高检测灵敏度和检测分辨力。因此在实际检测中, 有时在探头晶片前加装声透镜, 使透过的声束聚焦, 如水浸

聚焦探头。

4. 超声波对规则形状反射体的反射

在前面讨论中, 没有考虑界面的展开尺寸效应, 认为界面是无限延伸的。现在要讨论的规则反射体, 不仅要考虑其形状, 还要考虑其尺寸。规则形状发射体的回波声压, 是超声定量的基础。

(1) 平面反射 如图 3-21(a) 所示, 假设在声波的远场区、距声源 a 处, 有一个与声束轴线垂直、大小为 d (圆形为直径、方形为边长, 且 $d < \frac{0.4\lambda a}{D}$, D 为晶片直径) 的平面反射体, 则在晶片 (晶片直径为 D) 处所发射的声压 p_0 到达 a 处时变是

$$p = p_0 \frac{A}{\lambda a} \quad (3-39)$$

式中 λ ——超声波的波长;

A ——晶片的面积;

a ——平面反射体与声源的距离;

p_0 ——晶片的发射声压;

p ——平面反射体接收到的声压。

晶片接收到从该平面反射体反射回来的声压为:

$$p_r = p \frac{S}{\lambda a} = p_0 \frac{AS}{\lambda^2 a^2} \quad (3-40)$$

式中 S ——平面反射体的面积。

(2) 球面反射体 如图 3-21(b) 所示, 当反射体为球体时, 从该远场球面反射回晶片的声压可用下式近似计算:

$$p_r = p_0 \frac{Ad}{4\lambda a^2} \quad (3-41)$$

式中 d ——球体直径, 且 $d < \frac{0.4\lambda a}{D}$;

A ——晶片的面积;

a ——球面反射体距声源的距离;

p_0 ——晶片的发射声压;

λ ——超声波的波长;

D ——晶片直径。

(3) 圆柱面反射体 如图 3-21(c) 所示, 当超声波发射到处于远场 ($a > 3N$) 的圆柱反射体时, 从该远场圆柱面反射回晶片的声压, 根据圆柱体长度与发射声束的宽度两者的相对大小不同而有不同的近似计算公式。当圆柱体的长度大于发射声束的宽度时称为长圆柱, 当圆柱体的长度小于发射声束的宽度时称为短圆柱。在声束轴线上, 长、短圆柱反射体的回波声压大小分别如式(3-42) 和式(3-43)。

$$\text{长圆柱形反射体:} \quad p_r = p_0 \frac{Ad}{2\sqrt{2}\lambda} \sqrt{\frac{d}{a^3}} \quad (3-42)$$

$$\text{短圆柱形反射体:} \quad p_r = p_0 \frac{AL}{2a^2} \sqrt{\frac{d}{\lambda^3}} \quad (3-43)$$

式中 d ——圆柱体直径, 且 $d < \frac{0.4\lambda a}{D}$;

- A ——晶片的面积；
 a ——圆柱反射体距声源的距离；
 p_0 ——晶片的发射声压；
 λ ——超声波的波长；
 D ——晶片直径。

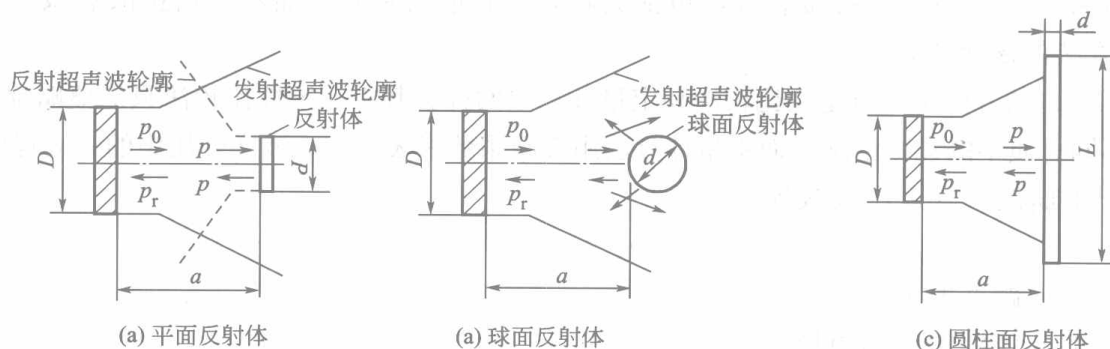


图 3-21 规则反射体对超声波的反射

(4) 大平面的反射 在声束轴线上，远场大平面反射体的回波声压大小为：

$$p_B = p_0 \frac{A}{2\lambda a} \quad (3-44)$$

式中 A ——晶片的面积；

a ——远场大平面反射体距声源的距离， $a > 3N$ ；

p_0 ——晶片的发射声压；

λ ——超声波的波长；

p_B ——晶片接收到的大平面反射体的回波声压。

(三) 超声波的衰减 (Attenuation/Extinction)

超声波在介质中传播时，随着传播距离的增加，超声波的能量逐渐减弱的现象称为超声波的衰减。

1. 衰减的原因

引起超声波衰减的原因很多，主要包括扩散衰减、散射衰减和吸收衰减。

(1) 扩散衰减 超声波在传播过程中，由于波束的扩散引起的衰减称为扩散衰减。扩散衰减主要取决于波阵面的几何形状，而与传播介质的性质无关，并遵从如下的衰减规律。

平面波：不衰减；柱面波： $P_x \propto 1/\sqrt{x}$ ；球面波： $P_x \propto 1/x$ 。

(2) 散射衰减 超声波在传播过程中，由于散射引起的衰减称为散射衰减。

散射是指超声波在传播过程中遇到声阻抗不同的异质界面（如粗大晶粒的界面）时产生的反射、折射和波型转换现象。工件中的密集型缺陷、铸件中的铁素体和石墨颗粒、多晶材料中的晶界和位错等都可能成为散射源，引起散射衰减。当材质晶粒较粗大时，被散射的超声波被探头接收，将在示波屏上出现“草状回波”，如图 3-22 所示。“草状回波”使信噪比下降，这就是超声波检测奥氏体钢困难原因之所在。

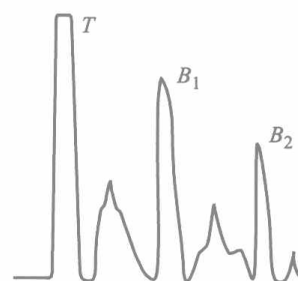


图 3-22 粗晶引起的草状回波

(3) 吸收衰减

超声波在介质中传播时，由于介质质点间的内摩擦和热传导引起的衰减称为吸收衰减，又称黏滞衰减。

对于固体介质，吸收衰减相对于散射衰减几乎可以略而不计；而对于液体介质，吸收衰减则是主要的。

应该指出的是，超声波检测中所谓的衰减仅指介质对声波的衰减作用，即与介质有关的、表征介质声学特性的材质衰减，包括吸收衰减和散射衰减，而不包括扩散衰减。

2. 衰减的表示方法

表示衰减的方法主要有定性比较法和定量计算法两种。其中，定性比较法只能概略地比较超声波在不同材质中的衰减情况，而定量计算法用衰减系数来表示超声波在介质中的衰减程度。

对于平面波，其声压衰减规律为：

$$p_x = p_0 e^{-\alpha x} \tag{3-45}$$

式中 p_x ——距波源为 x 处的声压；
 p_0 ——波源的起始声压；
 x ——至波源的距离；
 α ——介质的衰减系数。

介质的材质衰减系数 α 为散射衰减系数 (α_s) 和吸收衰减系数 (α_a) 之和，即 $\alpha = \alpha_s + \alpha_a$

其中，

吸收衰减系数 $\alpha_a = c_1 f \tag{3-46}$

散射衰减系数
$$\alpha_s = \begin{cases} c_2 F d^3 f^4, & \text{当 } d \ll \lambda \text{ 时} \\ c_3 F d f^2, & \text{当 } d \approx \lambda \text{ 时} \\ c_4 F / d, & \text{当 } d \gg \lambda \text{ 时} \end{cases} \tag{3-47}$$

式中 f ——超声波的频率；
 d ——晶粒直径；
 λ ——超声波的波长；
 F ——各向异性系数；

c_1, c_2, c_3, c_4 ——常数。

水的衰减系数为 1~4dB/m，轻金属和细晶粒钢的衰减系数为 1~3dB/m，灰铸铁的衰减系数为 300dB/m 左右。由于材料的衰减与诸多因素有关，表 3-2 所列部分材料的衰减系数，仅供参考。

表 3-2 部分材料的衰减系数

衰减系数/dB·m ⁻¹	<10	10~100	>100	备注
材料	铸铝、镁的纯金属或微合金,轧制态的钢、铝、镁、镍、银、钛、钨等的纯金属或合金),玻璃、陶瓷	吸收为主		
		塑料(聚苯乙烯、有机玻璃、橡胶、PVC、合成树脂)	填充塑料、橡胶、硫化橡胶、木材	
		散射为主		
		铸铝、镁合金		
		铸钢、微合金高质量铸铁;轧制态的铜、锌、黄铜、青铜、铅、烧结金属	铸钢、高合金低强度铸铁、铸铜、锌、黄铜、青铜、铅、烧结金属;多孔陶瓷、岩石	
可检测的最大厚度/m	1~10	0.1~1	0~0.1	

第二节 超声检测设备

超声检测设备是从事超声检测的工具,通常指超声波检测仪和超声波探头,但由于试块在超声检测中的重要作用,所以也经常将其视为超声检测设备的组成部分。此外,由于目前的超声检测方法多以直接耦合方式将探头与工件接触,故在此对耦合剂也作简要介绍。

一、超声波检测仪

超声波检测仪是超声检测的主体设备,其性能的好坏直接影响到检测结果的可靠性。超声波检测仪的作用是产生电振荡并加于探头,使之发射超声波,同时,还将探头送回的电信号进行滤波、检波和放大等,并以一定的方式将检测结果显示出来,人们以此获得被检工件内部有无缺陷以及缺陷的位置、大小和性质等方面的信息。

实用中的超声波检测仪种类繁多,其性能 and 操作方法也各有差异。因此,要想在实际检测工作中使用好这种仪器,就必须对它的工作原理、性能特点以及操作方法等有比较全面而深入的了解。为此,本书先对超声检测仪的分类情况进行简要的介绍,在此基础上,再重点讨论目前应用最为广泛的 A 型脉冲反射式超声波检测仪,包括它的构造原理、特点和性能指标等内容。至于其详细的使用说明和性能指标的测定等内容,读者可在实际操作前参阅仪器使用说明书和国家机械工业专业标准 JB/T 10061—1999 “A 型脉冲反射式超声波探伤仪通用技术条件”。

(一) 超声波检测仪及其分类

为了更好地选购与使用超声波检测仪,有必要对超声波检测仪进行分类,常见的分类方法及类型如下。

1. 按超声波的连续性分

(1) 脉冲波检测仪 这种仪器通过向工件周期性地发射不连续且频率固定的超声波,根据超声波的传播时间及幅度来判断工件中缺陷的有无、位置、大小及性质等信息,这是目前应用最为广泛的一类超声波检测仪。

(2) 连续波检测仪 这种仪器通过探头向工件中周期性地发射连续且频率不变(或在小范围内周期性变化)的超声波,根据透过工件的超声波的强度变化来判断工件中缺陷的有无及大小、性质等。这种仪器灵敏度低,且不能确定缺陷的位置,因而已大多被脉冲波检测仪所取代,但在超声显像和测厚等方面仍有应用。

(3) 调频波检测仪 这种仪器通过探头向工件中发射连续的、频率周期性变化的超声波,根据发射波与反射波的差频变化情况来判断工件中是否有缺陷。以往的调频式轨检测仪器便采用这种原理,但由于它只适用于检查与探测面平行的缺陷,所以这种仪器也已大多被脉冲波检测仪所取代。

2. 按缺陷显示的方式分

按显示缺陷的方式,可将超声波检测仪分为 A 型、B 型和 C 型显示三种类型。

(1) A 型显示检测仪 A 型显示是一种波形显示,检测仪示波屏的横坐标代表声波的传播时间(或距离),纵坐标代表反射波的幅度。由反射波的位置可以确定缺陷的位置,而由反射波的高度则可估计缺陷的性质和大小。

(2) B 型显示检测仪 B 型显示是一种图像显示,检测仪示波屏的横坐标是靠机械扫描

来代表探头的扫查轨迹，纵坐标是靠电子扫描来代表声波的传播时间（或距离），因而可直观地显示出被探工件任一纵截面上缺陷的分布及缺陷的深度。

(3) C型显示检测仪 C型显示也是一种图像显示，检测仪示波屏的横坐标和纵坐标都是靠机械扫描来代表探头在工件表面的位置。探头接收信号幅度以光点辉度表示，因而当探头在工件表面移动时，示波屏上便显示出工件内部缺陷的平面图像（顶视图），但不能显示缺陷的深度。

三种显示方式的图解说明如图 3-23 所示。

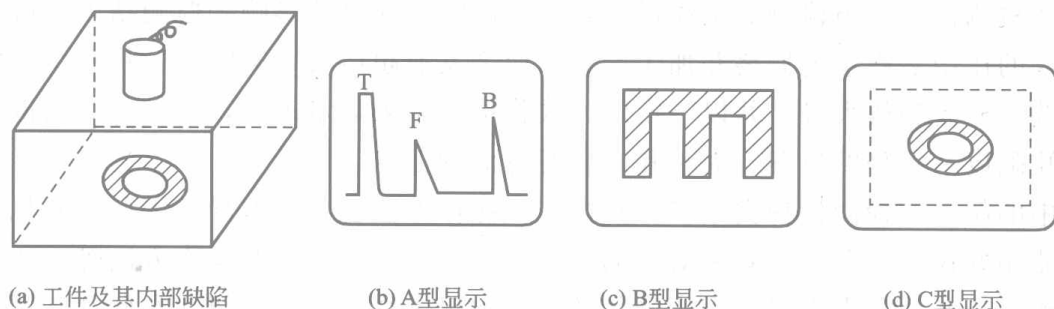


图 3-23 超声波检测仪的显示方式

3. 按超声波的通道数分

根据通道数的多少不同，可将超声波检测仪分为单通道型和多通道型两大类，其中前者应用最为广泛，而后者则主要应用于自动化检测。

目前广泛使用的是 A 型显示脉冲反射式超声波检测仪。

4. 按信号输出的方式分

可以分为模拟式和数字式两大类，其中模拟式输出的是未经采样的模拟射频信号，而数字式输出的经过 A/D 采样后的数字射频信号。一般而言，数字式仪器小巧轻便，操作简单，但有信号损失；而模拟式仪器体积较大，不便于携带，但能获得原始射频信号。目前，两种类型的超声波检测仪均有应用，但可以预见，随着微电子和计算机软硬件技术的发展，数字式超声波检测仪会获得越来越广泛的应用，并将会占据主导地位。

(二) A 型显示脉冲反射式超声波检测仪

1. 仪器构造原理

A 型显示脉冲反射式超声波检测仪主要由同步电路、时基电路（扫描电路）、发射电路、接收电路、显示电路和电源电路等几部分组成，如图 3-24 所示。

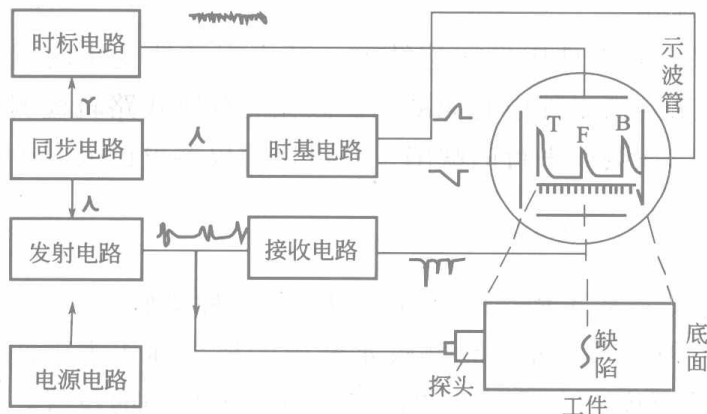


图 3-24 A 型显示脉冲反射式超声波检测仪的电路原理框图

除上述基本组成部分外，实用中的超声波检测仪还有延迟、标距、闸门和深度补偿等辅助电路。

2. 主要性能指标

超声波检测仪的性能指标是多方面的，主要的有水平线性、垂直线性和动态范围等。

(1) 水平线性 也称时基线性或扫描线性，是表征检测仪水平扫描线

扫描速度的均匀程度、也即扫描线上显示的反射波距离与反射体距离成正比的程度的性能指标。水平线性的好坏影响对缺陷的定位。

(2) 垂直线性 也称放大线性,它是描述检测仪示波屏上反射波高度与接收信号电压成正比关系的程度。垂直线性影响对缺陷的定量分析。

(3) 动态范围 是检测仪示波屏上反射波高度从满幅降至消失时仪器衰减器的变化范围。动态范围大,对小缺陷的检出能力强。

3. 性能特点

与其他超声波检测仪相比,脉冲反射式超声波检测仪具有如下的突出优点:

① 在被检工件的一个面上,用单探头脉冲反射法即可检测,这对于诸如容器、管道等一些很难在双面放置探头进行检测的场合,显示出明显的优越性;

② 可以准确地确定缺陷的深度;

③ 灵敏度远高于其他方法;

④ 可以同时探测到不同深度的多个缺陷,分别对它们进行定位、定量和定性;

⑤ 适用范围广;用一台检测仪可进行纵波、横波、表面波和板波检测,而且适用于探测很多种工件,不仅可以检测,而且还可用于测厚、测声速和测量衰减等。

二、超声波探头

超声波检测中,超声波的产生和接收过程是一个能量转换过程,这种转换是通过探头实现的,探头的功能就是将电能转换为超声能(发射探头)和将超声能转换为电能(接收探头)。

探头是超声波检测设备的重要组成部分,其性能的好坏对超声波检测的成功与否起关键性作用。

目前,超声波检测用的探头多为压电型,其作用原理为压电晶体在高频电振荡的激励下产生高频机械振动,并发射超声波(发射探头);或在超声波的作用下产生机械变形,并因此产生电荷(接收探头)。

1. 探头的种类

超声波检测中,由于被检测工件的形状和材质、检测的目的和条件不同而使用不同形式的探头,超声波探头的常用分类方法如下。

(1) 按波型分 按照在被检测工件中产生的波型不同,可将超声波探头分为纵波探头、横波探头、板波(兰姆波)探头和表面波探头四种类型。

(2) 按入射声束方向分 可分为直探头和斜探头两大类。

(3) 按耦合方式分 可分为直接接触式探头(探头通过薄层耦合剂与被探工件表面直接接触)和液浸式探头(探头与被探工件表面之间有一定厚度的液层)。

(4) 按晶片数目分 可分为单晶探头、双晶片探头和多晶片探头等几种。

(5) 按声束形状分 可分为聚焦探头和非聚焦探头两大类。

(6) 按频带分 可分为宽频带探头和窄频带探头。

(7) 按使用环境分 可分为常规探头(通用目的)和特殊用途探头(如机械扫描切换探头、电子扫描阵列探头、高温探头、瓷瓶检测专用扁平探头等)

2. 探头的结构

超声波检测中常用的探头主要有直探头、斜探头、表面波探头、双晶探头、水浸探头和

聚焦探头等。

(1) 直探头 用来发射和接收纵波,多用于手工操作接触法检测,既适宜于单探头反射法,又适宜于双探头穿透法。它主要由压电晶片、阻尼块、壳体、接头和保护膜等基本元件组成,其典型结构如图 3-25(a) 所示。

(2) 斜探头 利用透声契块使声束倾斜于工件表面射入工件的探头称为斜探头。依入射角的不同,斜探头可在工件中产生纵波、横波和表面波,也可在薄板中产生板波。通常所说的斜探头是指横波斜探头,它主要由压电晶片、透声契块、吸声材料、阻尼块、外壳和电气接插件等几部分组成,其典型结构如图 3-25(b) 所示。

横波斜探头的标称方式有如下三种:

- ① 以纵波入射角标称,常用的人射角有 30° 、 45° 、 50° 和 55° ;
- ② 以钢中的横波折射角标称,常用的横波折射角有 40° 、 45° 、 50° 、 60° 、 70° 等;
- ③ 以钢中横波折射角的正切值 (K 值) 标称,常用的 K 值探头有 K1、K1.5、K2、K2.5 和 K3。

(3) 表面波探头 是斜探头的一个特例。当斜探头入射角等于第二临界角时,由波形转换得到沿被测材料表面传播的表面波,这种斜探头称为表面波探头,其结构与横波斜探头完全相同,只是斜契块入射角不同。

表面波探头适于探测工件表面或近表面的缺陷。

(4) 双晶探头 又称联合双探头或分割式 TR 探头,这种探头在同一壳体内装有一发一收两个压电晶片,两个晶片之间用隔声层隔开,以防止发射声波直接进入接收晶片。晶片前面带有机玻璃延迟块,使声波延迟一段时间进入工件,这样大大减小了盲区,有利于近表面缺陷的探测,其典型结构如图 3-25(c) 所示。图 3-26 所示是部分超声波探头的实物照片。

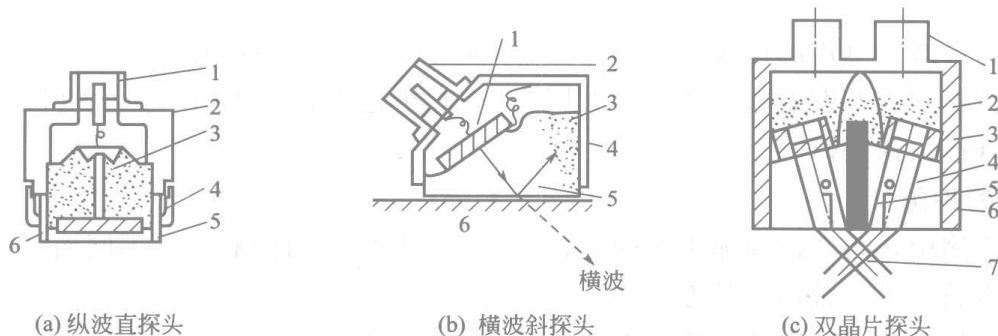


图 3-25 常见超声波探头的典型结构

- (a): 1—接头; 2—壳体; 3—阻尼块; 4—压电晶片; 5—保护膜; 6—接地环
 (b): 1—阻尼块; 2—接头; 3—吸声材料; 4—壳体; 5—透声楔块; 6—压电晶片
 (c): 1—接头; 2—吸声材料; 3—压电晶片; 4—延迟块; 5—隔声层; 6—壳体; 7—探伤区



图 3-26 部分超声波探头的实物照片

3. 探头的主要技术指标及型号

(1) 探头的主要技术指标 描述探头技术性能的指标很多，其中主要的技术指标如表 3-3 所示。

表 3-3 超声波探头的主要技术指标

指标名称	含 义	意 义
晶片尺寸 D 或 $a \times b$	圆晶片为直径 D ，方晶片为长 $\times$ 宽 ($a \times b$)	晶片尺寸对发射声场的形状影响很大
标称频率 f	所有型号相同的探头的平均频率	标称频率影响对反射体(缺陷)的评价
带宽 B	回波脉冲的幅度比其最大幅度下降 6dB 时的频带范围	
近场区长度 N	声源中心轴线上最后一个声压极大值点至声源的距离	对圆声源, 当 $D \gg \lambda$ 时, 有: $N = \frac{D^2 - \lambda}{4\lambda} \approx \frac{D^2}{4\lambda}$
焦距 F	一个小反射体产生最大回波时距探头的距离	聚焦是为了提高对微小缺陷的探测能力
回波宽度 EB	高度为满屏高度的 80% 的底波, 处在近场长度时, 在屏幕高度 20% 处的回波宽度	探头远场分辨率的实际度量
焦点直径 FD_0	回波高度下降 6dB 的焦距处的声场直径	当 $D \gg \lambda$ 时, 有 $FD_0 = \frac{FC}{fD_{\text{eff}}}$

(2) 探头的型号 探头型号的命名，各国不尽相同。在我国，不同厂家的产品也有少许差异。但一般都包括标称频率、晶片材料等项目。常见探头型号的组成项目及其排列顺序如下：



各组成项目的表示方法及含义如下。

基本频率：用阿拉伯数字表示，单位为 MHz；

晶片材料：用化学元素缩写符号表示，其含义见表 3-4；

晶片尺寸：用阿拉伯数字表示，单位为 mm，其中圆形晶片用直径表示，方形晶片用长 $\times$ 宽表示，分割式晶片用分割前的尺寸表示；

表 3-4 晶片材料的代号表示

压电材料	代号	压电材料	代号
锆钛酸铅陶瓷	P	碘酸锂单晶	I
钛酸钡陶瓷	B	石英单晶	Q
钛酸铅陶瓷	T	其他压电材料	N
铌酸锂单晶	L		

表 3-5 探头形式的代号表示

种 类	代号	种 类	代号
直探头	Z	水浸探头	SJ
斜探头(K 值表示)	K	表面波探头	BM
斜探头(折射角表示)	X	可变角探头	KB
分割探头	FG		

探头种类：用汉语拼音缩写字母表示，其含义见表 3-5，其中直探头也可不标出。

探头特征：斜探头钢中横波折射角正切值（K 值）用阿拉伯数字表示；钢中横波折射角用阿拉伯数字表示，单位为（°）；分割探头钢中声束交区深度用阿拉伯数字表示，单位为 mm；水浸探头水中焦距用阿拉伯数字表示，单位为 mm；DJ 表示点聚焦，XJ 表示线聚焦。

4. 探头与仪器的组合性能

探头与仪器的组合性能主要有信噪比、灵敏度余量、始波宽度、盲区大小和分辨力等。

（1）信噪比 是指界面反射波幅与最大杂波幅度之比，要求越大越好。

（2）灵敏度余量 也称综合灵敏度或组合灵敏度，它是指探测一定深度和尺寸的反射体时，当其反射波波幅被调节到检测仪示波屏指定高度时，检测仪所剩余的放大能力，以此时的衰减器读数（dB）表示。

（3）始波宽度 也称始脉冲宽度，它是指发射脉冲的持续时间，以一定灵敏度条件下示波屏水平“0”刻度至始波后沿与垂直线 20% 线交点间的水平距离所相当的超声波传播距离表示。始波宽度大，仪器和探头组合的盲区大，探测近表面缺陷的能力差。

（4）盲区 是探测面附近不能探测缺陷的区域，以探测面到所能探出缺陷的最小距离表示，要求越小越好。

（5）分辨力 是指在声束作用范围内，在检测仪示波屏上能够把两个相邻

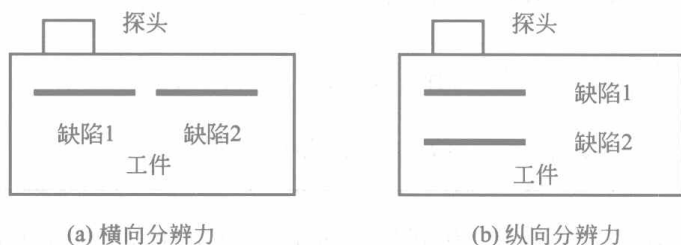


图 3-27 分辨力

缺陷作为两个反射信号区别开来的能力。分辨力分为纵向分辨力和横向分辨力，前者是指区分距探头不同距离深度的两个相邻缺陷的能力，后者是指区分距探头相同距离深度的两个相邻缺陷的能力，分别如图 3-27(a) 和 3-27(b) 所示。

三、试块

按一定的用途设计制作的具有简单形状人工反射体的试件称为试块。

1. 试块的用途

超声波检测中使用的试块种类繁多，用途各异，各种试块的用途归结起来主要如下：

- ① 确定合适的检测方法；
- ② 确定和校验检测灵敏度；
- ③ 测试和校验仪器和探头的性能，如组合灵敏度、垂直线性、水平线性、盲区和分辨力等；
- ④ 调节探测范围，确定缺陷位置；
- ⑤ 评价缺陷大小，对被探工件评级和判废；
- ⑥ 测量材质衰减和确定耦合补偿等。

2. 试块的种类

超声波检测中使用的试块通常分为标准试块和对比试块两大类。

（1）标准试块（STB 试块） 是由国际标准化组织（ISO）等权威机构规定的试块，对试块的材质、形状、尺寸以及表面状况等都作了统一的规定。我国的标准试块分为国家标准（GB）和行业标准两大类，其中行业标准主要有机械工业标准（JB）和航空工业标准（HB）等。

标准试块主要用于测试和校验检测仪和探头的性能，也可用于调整探测范围和确定检测灵敏度。

(2) 对比试块 (RB 试块) 也称参考试块, 它是由各部门按某些具体检测对象规定的试块, 如我国的 CSK-IIA、CSK-IIIA 试块等。

参考试块主要用于调整探测范围、确定检测灵敏度、评价缺陷大小和对工件进行评级判废等。

3. 常用试块

为加深认识, 在此选取国内常用的几种试块进行简要说明。

(1) IIW 试块 是 1958 年国际焊接学会 (International Institute of Welding) 推荐的标准试块 [标准号: ISO 2400—1972(E)], 因为是荷兰代表提出来的, 所以俗称荷兰试块。又由于该试块呈船形, 故又称船形试块。

① 材质 相当于我国的 20 号优质碳素钢, 正火处理, 晶粒度 7~8 级。

② 形状及尺寸 IIW 试块的形状及尺寸如图 3-28 所示。

1963 年原联邦德国对 IIW 试块做了一点修改, 在 R100 圆心处加开 0.5 的沟槽, 用以获得 R100 圆柱面的多次反射, 作为联邦德国的国家标准试块。后来日本工业标准也采用了这种修改后的试块。

我国 JB 4730—94 标准也对 IIW 试块作了三处修改: 一是将 R100 圆柱面改为 R50、R100 阶梯圆柱面, 借以同时获得两次反射波来调整横波扫描速度 (时间扫描线比例); 二是将 $\phi 50$ 孔改为 $\phi 40$ 、 $\phi 44$ 、 $\phi 50$ 台阶孔, 借以测斜探头的分辨力; 三是将折射角改为 K 值, 借以测定斜探头的 K 值, 作为我国标准试块 CSK-I A, 如图 3-29 所示。

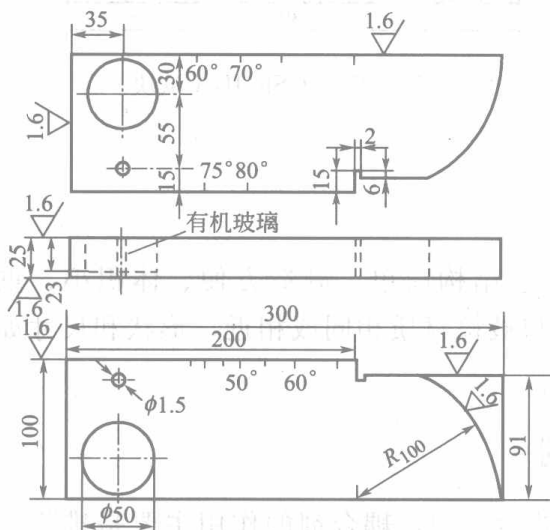


图 3-28 IIW 试块

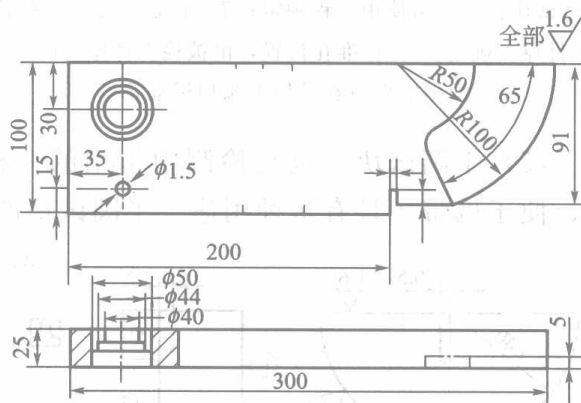


图 3-29 CSK-IA 标准试块

③ 用途 IIW 试块的主要用途如下。

利用厚度尺寸 25 获得检测仪的水平线性、垂直线性和动态范围; 利用厚度尺寸 25 和 100 调节纵波探测范围和扫描速度; 利用尺寸 85、91 和 100 测定直探头的分辨力; 利用 $\phi 50$ 至两侧的距离 5 和 10 估计直探头的盲区范围; 利用 $\phi 50 \times 23$ 有机玻璃块测定检测仪和直探头的穿透能力; 利用 R100 测定检测仪和斜探头的组合灵敏度 (又称灵敏度余量); 利用 91 (纵波声程 91 相当于横波 50) 调节横波 1:1 扫描速度, 配合利用 R100 校正零点; 利用试块直角棱边测定斜探头声束轴线的偏离情况; 测定斜探头声束指向

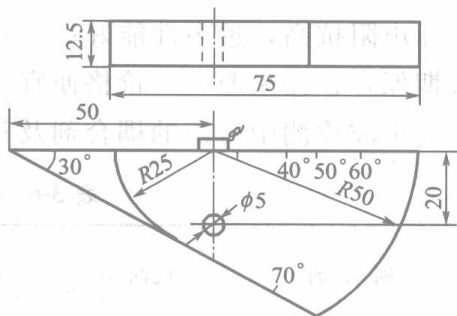


图 3-30 IIW₂ 试块

性；调整检测灵敏度。

(2) IIW₂ 试块 也是荷兰人提出来的，国际焊接学会 1974 年推荐的标准试块。因为该试块外形像牛角，如图 3-30 所示，故又称为牛角试块。

IIW₂ 试块的材质与 IIW 试块相同，其尺寸小、重量轻、成本低，但功能较少。

(3) CSK-IIA 试块 也是 JB 4730—94 规定的标准试块，其外形和尺寸如图 3-31 所示，材质应与被检材质相同或相近。该试块主要用于锅炉和钢制压力容器对焊接缝的横波检测。

(4) CSK-IIIA 试块 也是 JB 4730—94 规定的标准试块，这种试块含有 7 个距探测面不同深度的 $\phi 1 \times 6$ 短横孔。为了克服试块侧面和端面反射的影响，在试块侧面短横孔处加工了两个 R10 的圆弧槽，其外形和尺寸如图 3-32 所示，材质应与被检材质相同或相近，主要用于锅炉和钢制压力容器对焊接缝的横波检测。

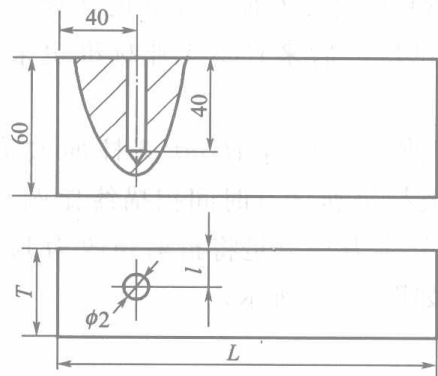


图 3-31 CSK-IIA 试块

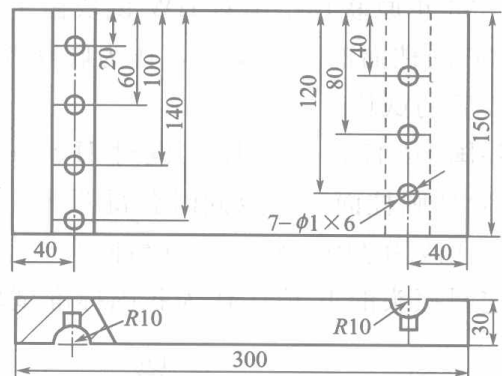


图 3-32 CSK-IIIA 试块

L—试块长度，由使用声程确定；T—试块厚度，由被检工件厚度确定；l—标准孔位置，由被检工件厚度确定；
根据需要可在试块上添加标准孔

(5) 半圆试块 也是检测中常用的一种试块，它结构简单、制造方便、体积小、重量轻、便于携带，且有多种用途。半圆试块的材质应与被检材质相同或相近，形状和尺寸如图 3-33 所示。

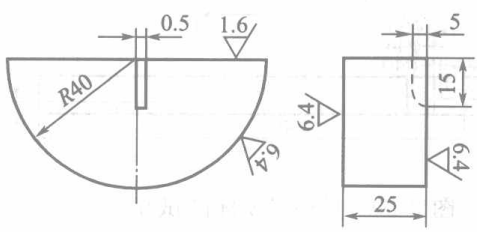


图 3-33 半圆试块

四、耦合剂

在超声波检测中，耦合剂的作用主要是排除探头与工件表面之间的空气，使超声波能有效地传入工件，以便检测。当然，耦合剂也有利于减小探头与工件表面间的摩擦，延长探头的使用寿命。

对耦合剂的一般要求：①能润湿工件和探头表面，流动性、黏度和附着力适当，易于清洗；②声阻抗高，透声性能好；③对工件无腐蚀，对人体无害，不污染环境；④性能稳定，能长期保存；⑤来源广，价格便宜。

超声波检测中常用的耦合剂及其声阻抗如表 3-6 所示。

表 3-6 超声检测中常用耦合剂的声阻抗

耦合剂	机油	水 (20℃)	一号水玻璃(x%体积的水溶液)				甘油(x%体积的水溶液)			
			100	33	20	10	100	33	20	10
声阻抗 kg/(m ² ·s)	1.28	1.48	3.99	2.17	1.82	1.66	2.38	1.80	1.68	1.58

第三节 超声检测技术

超声波检测的方法虽然很多,各种方法的操作也不尽相同,但它们在探测条件、耦合与补偿、仪器的调节、缺陷的定位、定性与定量分析等方面都存在一些相通的技术,掌握这些通用技术,有利于发现并正确评价缺陷。

一、超声波检测方法的分类

超声波检测方法可从多个角度来对其进行分类:按检测原理不同,可分为脉冲反射法、穿透法和共振法等;按超声波的波型不同,可分为纵波法、横波法、表面波法和板波法等;按探头的数目的多少,可分为单探头法、双探头法和多探头法等;按探头与试件的耦合方式的不同,可分为直接接触法和液浸法两大类等。下面简单讨论超声波检测按原理的分类情况。

1. 脉冲反射法

超声波以持续极短的时间发射脉冲到被检试件内,根据反射波来检测试件内有无缺陷的方法称为脉冲反射法。

脉冲反射法的特点如下:

- ① 探测灵敏度高;
- ② 能准确地确定缺陷的位置和深度;
- ③ 可用纵波、横波、表面波和板波进行探测,应用范围广;
- ④ 可自动探测。

根据判断缺陷情况的回波性质的不同,脉冲反射法又可进一步分为缺陷回波法、底面回波高度法和底面多次回波法三种。

(1) 缺陷回波法 是最基本的脉冲反射法,其基本原理为:当试件完好时,超声波可顺利传播到达底面,在底面光滑且与探测面平行的条件下,检测图形中只有表示发射脉冲 T 及底面回波 B 两个信号,如图 3-34(a) 所示。若试件内存在有缺陷,则在检测图形中的底面回波前有表示缺陷 F 的回波,如图 3-34(b) 所示。

(2) 底面回波高度法 其基本原理为:当试件的材质和厚度不变时,底面回波高度应是基本不变的;如果试件中有缺陷,则底面回波高度会下降甚至消失,如图 3-35 所示。

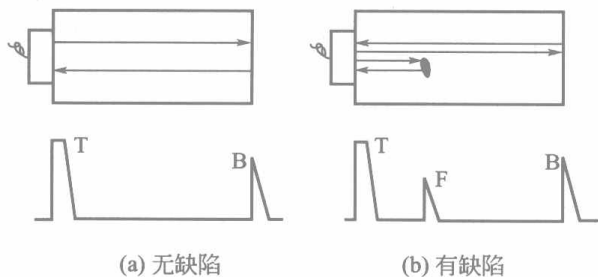


图 3-34 缺陷回波法

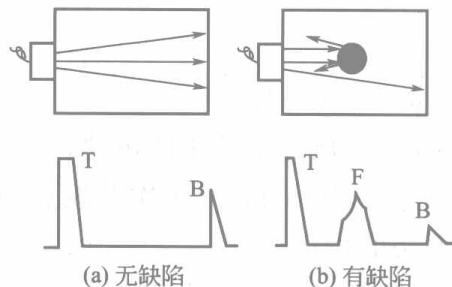


图 3-35 底面回波高度法

(3) 底面多次回波法 当透入试件的超声波能量较大而试件厚度较小时,在试件完好无缺的情况下,超声波可在探测面与底面之间往复传播多次,示波屏上出现多次底面回波 B_1 , B_2 , $B_3 \dots$; 如果试件存在缺陷,则由于缺陷的反射以及散射而增加了声能的损耗,底面回波次数减少,同时也打乱了各次底面回波高度依次按指数衰减的规律,并显示出缺陷回波,如图 3-36 所示。

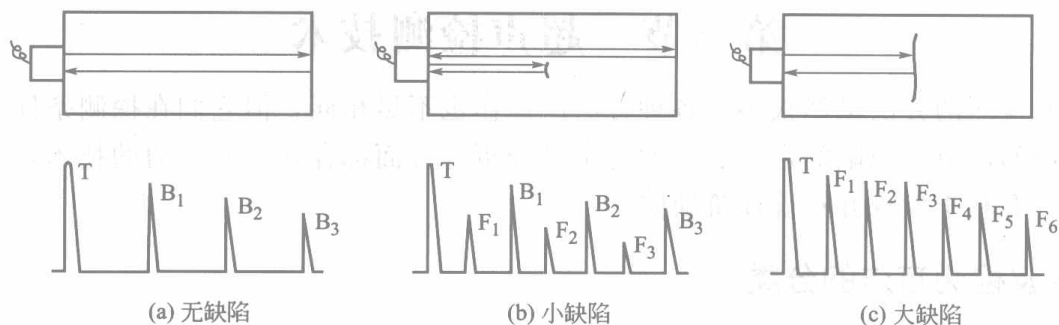


图 3-36 底面多次回波法

底面多次回波法主要用于厚度不大、形状简单、探测面与底面平行的试件检测。

2. 穿透法

依据超声波（连续波或脉冲波）穿透试件之后的能量变化来判断缺陷情况的一种方法。穿透法用两个探头，置于工件的相对两面，一个发射声波，一个接收声波。由于发射波的不同，可分为连续波穿透法和脉冲波穿透法。

穿透法的特点如下：

- ① 探测灵敏度比反射法低，不能发现小缺陷；
- ② 根据能量的变化即可判断缺陷的有无，但不能定位；
- ③ 适宜探测超声波衰减大的材料；
- ④ 可避免盲区，适宜探测薄板；
- ⑤ 指示简单，便于自动探伤；
- ⑥ 对两探头的相对距离和位置要求较高。

穿透法目前应用于混凝土结构等衰减较大的材料或构件的超声波检测。

3. 共振法

根据试件的共振特性来判断缺陷情况的方法称为共振法。其基本原理为：若频率可调的连续超声波在被检试件内传播，当试件的厚度为超声波的半波长的整数倍时，则由于入射波和反射波的相位相同而引起共振，因而仪器可显示出共振频率点，试件的厚度由式(3-48)计算而得：

$$\delta = \frac{c}{2(f_n - f_{n-1})} \quad (3-48)$$

式中 δ ——试件厚度；

c ——被检试件中的声速；

f_n, f_{n-1} ——第 n 和 $n-1$ 次共振点的共振频率。

共振法的特点如下：

- ① 可精确测厚，测量精度可达 0.1mm 甚至 μm 级，特别适宜测量薄板及薄壁管；
- ② 对工件表面粗糙度要求高，否则不能进行测量；
- ③ 探测灵敏度比脉冲反射法低。

共振法目前主要应用于超声波测厚度。

二、探测条件的选择

探测条件的选择一般是指仪器、探头和扫查方式等方面的选择。正确选择探测条件对于

有效地发现缺陷并对其进行定位、定量与定性都是至关重要的。实际检测中一般根据工件结构形状、加工工艺和技术要求来选择探测条件。

1. 检测仪的选择

选择检测仪时应根据探测要求和现场条件,并综合考虑以下几方面的因素:

- ① 定位要求高时,应选择水平线性好的仪器;
- ② 定量要求高时,应选择垂直线性好、衰减器精度高的仪器;
- ③ 大型零件的检测应选择灵敏度余量高、信噪比高和功率大的仪器;
- ④ 为了有效地发现近表面缺陷和区分相邻缺陷,应选择盲区小、分辨力高的仪器;
- ⑤ 室外现场检测,应选择重量轻、示波屏亮度好、抗干扰能力强的便携式仪器。

2. 探头的选择

探头的选择包括探头形式、频率、晶片尺寸等内容。

(1) 探头形式的选择 一般应根据工件的几何形状和可能出现缺陷的部位、方向等来选择探头的形式,使探头的声束轴线尽量与缺陷垂直。

直探头只能发射和接收纵波,波束轴线垂直于探测面,故主要用于探测与探测面平行的缺陷,如锻件、钢板中的夹层、折叠等缺陷。

斜探头主要用于探测与探测面垂直或成一定角度的缺陷,如焊缝中的未焊透、夹渣、未熔合等缺陷。

表面波探头主要用于探测工件表面的缺陷,双晶探头用于探测工件近表面缺陷,聚焦探头用于水浸法探测管材或板材。

(2) 探头频率的选择 选择探头频率时主要应从以下几方面进行考虑:

① 由于波的绕射而使超声波检测的最小缺陷尺寸约为 $\lambda/2$,因此,提高频率有利于发现小缺陷;

- ② 频率高,脉冲宽度小,分辨力高,有利于区分相邻缺陷;
- ③ 频率高,波长短,半扩散角小,声束指向性好,能量集中,有利于发现并定位缺陷;
- ④ 频率高,波长短,近场长度大,对检测不利;
- ⑤ 频率提高,衰减急剧增加,对检测不利;
- ⑥ 表面粗糙时,宜选用低频率;
- ⑦ 裂缝一类的缺陷宜选用低频率,非金属夹杂物宜选用高频率。

综上所述,选取探测频率时,既要考虑穿透能力,又要考虑灵敏度要求。因此,在超声波衰减不大的情况下,频率尽量选择高些。实际中,对于晶粒较细的锻件、轧制件和焊接件等的检测,宜选用较高的频率,常用 $2.5\sim 5.0\text{MHz}$;对于晶粒较粗大的铸件、奥氏体不锈钢等宜选用较低的频率,常用 $0.5\sim 2.5\text{MHz}$ 。探测小型工件,宜选用较高的频率;探测大型工件,宜选用较低的频率。

表 3-7 可供探测不同类型的工件时选取探测频率参考。

(3) 探头晶片尺寸的选择 晶片大小对声束指向性、近场区长度、近距离扫查范围和远距离缺陷检出能力有较大影响。实际检测中,检测面积范围大的工件时,为了提高检测效率,宜选用大晶片探头。检测厚度大的工件时,为了有效地发现远距离缺陷,宜选用大晶片探头。检测小型工件时,为了提高缺陷定位、定量精度,宜选用小晶片探头。检测表面不太平整、曲率较大的工件时,为了减少耦合损失,宜选用小晶片探头。

表 3-7 各种工件(材料)的探测频率/MHz

序号	工件(材料)	探测频率	序号	工件(材料)	探测频率
1	大型锻钢件	1~3	8	钢管(水浸聚焦法)	5~15
2	小型锻钢件	2~5	9	焊缝	1~4
3	大型铸钢件	0.4~3	10	铝及铝合金	3~10
4	小型铸钢件	1.5~5	11	钛合金	1~3
5	铸铁件	0.4~1	12	铜合金	1~3
6	钢板	2~5	13	非金属材料	0.02~1
7	钢管(水浸斜探头法)	2~5			

三、超声检测的缺陷定位、定量与定性

1. 超声波检测的定位

对 A 型脉冲反射式超声波检测而言, 示波屏上的水平刻度值代表缺陷波的时延, 在扫描速度已知时, 即可由此求得缺陷波的声程, 这就是缺陷定位的原始依据。对于不同的检测方法, 经过一定的几何运算即可求得缺陷在工件中的具体位置。下面简要介绍纵波直探头检测和按声程调节扫描速度的横波斜探头检测时的缺陷定位算法。

(1) 纵波直探头检测时的缺陷定位 假定仪器已按 1 : n 调节纵波扫描速度, 并由示波屏可知缺陷波前沿对应的水平刻度值为 τ_f , 则缺陷至探头的垂直距离为 $x_f = n\tau_f$ 。

(2) 按声程调节扫描速度的横波斜探头检测时的缺陷定位 横波斜探头检测时可按声程、水平或深度三种不同的方式来调节扫描速度, 由此而得的缺陷定位算法也有差异。限于篇幅, 此处只简要介绍按声程调节扫描速度的横波斜探头检测时的缺陷定位算法。

假定仪器已按 1 : n 的声程调节好扫描速度, 缺陷波水平刻度值为 τ_f , 则缺陷至入射点的声程为 $x_f = n\tau_f$ 。

一次波检测时 [图 3-37(a)], 缺陷在工件中的水平距离 l_f 和垂直距离 d_f 分别为:

$$\begin{cases} l_f = x_f \sin\beta = n\tau_f \sin\beta \\ d_f = x_f \cos\beta = n\tau_f \cos\beta \end{cases} \quad (3-49)$$

二次波检测时 [图 3-37(b)], 缺陷在工件中的水平距离 l_f 和垂直距离 d_f 分别为:

$$\begin{cases} l_f = x_f \sin\beta = n\tau_f \sin\beta \\ d_f = 2T - x_f \cos\beta = 2T - n\tau_f \cos\beta \end{cases} \quad (3-50)$$

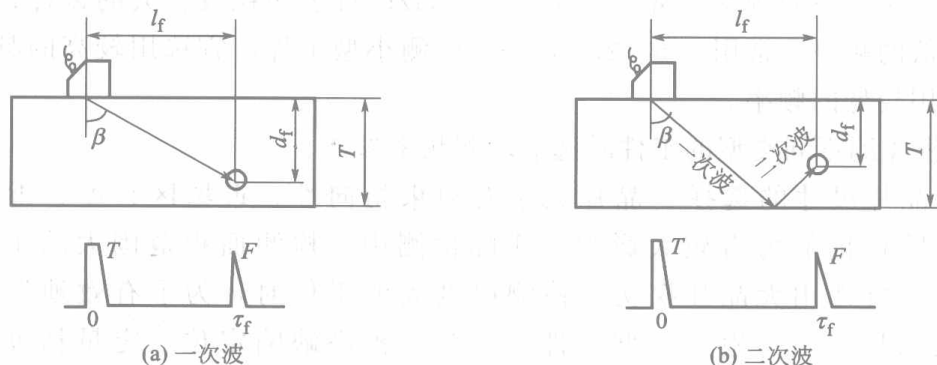


图 3-37 按声程调节扫描速度的横波斜探头检测时的缺陷定位

2. 超声波检测的定量

在超声波检测中,测定缺陷的大小和数量简称定量。对 A 型脉冲反射式超声波检测而言,目前对缺陷的定量方法很多,但均有一定的局限性。较常用的定量方法有当量法、底波高度法和测长法。

(1) 当量法 当缺陷的尺寸小于声束截面时,一般采用当量法来确定缺陷的大小,由此而得的缺陷尺寸称为当量尺寸。常用的当量法有当量试块比较法、当量计算法和当量 AVG 曲线法。其中,当量试块比较法是将缺陷回波与试块上的人工缺陷回波进行比较从而对缺陷定量的方法。当量试块比较法是超声波检测中应用最早的一种定量方法,但因该法需制作大量的试块,操作不便,因此,目前应用不多,仅在 $x < 3N$ (N 表示近场区长度) 时或特别重要零件的精确定量时才用。

当量计算法应用于 $x \geq 3N$ 的场合,其基本原理是利用各种规则反射体的理论回波声压公式,通过计算来确定缺陷的当量尺寸。当量计算法是目前应用较广的一种定量方法,但由于它涉及多种规则反射体的理论回波声压计算公式,故限于篇幅,此处不再详述。下面重点讨论当量 AVG 曲线法。

AVG 曲线法是描述反射体至波源的距离、反射信号的幅度和反射面积的当量大小三者之间相互关系的曲线,又称为距离-波幅-当量曲线。AVG 是德文距离 (Abstand)、增益 (Verstärkung) 和大小 (Größe) 三者的字头,英文为 DGS (Distance-Gain-Size) 曲线。

AVG 曲线的种类很多,一般根据其通用性不同分为通用 AVG 曲线和实用 AVG 曲线;根据波型的不同分为纵波 AVG 曲线和横波 AVG 曲线;根据反射体类型不同分为平底孔 AVG 曲线和长横孔 AVG 曲线等。

AVG 曲线比较直观地反映了各类反射体回波高度与反射体距离和当量大小之间的变化规律,利用 AVG 曲线来调整检测灵敏度和对缺陷定量比较方便。

通用 AVG 曲线 $A \geq 3$ 的区域可以通过有关理论公式计算得到,但 $A < 3$ 的区域只能通过具体探头对某种规则反射体试块进行实测得到。图 3-38 所示是通用平底孔 AVG 曲线。下面简要说明其在缺陷定量分析方面的应用。

例 1: 用 2.5P20Z 探头探测厚度为 400mm 的钢制饼形锻件,已知钢中 $C_L = 5900\text{mm/s}$,灵敏度为 $400/\phi 2$,检测时在 170mm 处发现一缺陷,其回波比底波低 10dB,求此缺陷的当量平底孔尺寸。

解: ① 求近场区长度 N

$$\text{因为} \quad \lambda = \frac{c}{f} = \frac{5900 \times 10^3}{2.5 \times 10^6} = \frac{5.9}{2.5} = 2.36 \text{ (mm)}$$

$$\text{所以} \quad N \approx \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{20^2}{4 \times 2.36} \approx 42.4 \text{ (mm)}$$

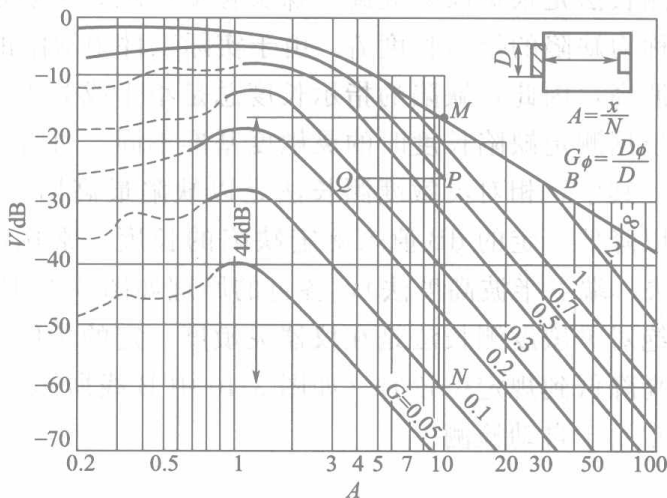


图 3-38 通用平底孔的 AVG 曲线

② 求归一化距离 A_B 、 A_ϕ

$$A_B = \frac{x_B}{N} = \frac{400}{42.4} \approx 9.4, \quad A_\phi = \frac{x_\phi}{N} = \frac{170}{42.4} \approx 4$$

③ 求归一化缺陷尺寸 G_ϕ

查图 3-38 所示的 AVG 曲线, 由横坐标 $A_B = 9.4$ 作垂线交大平底 ∞ 曲线于 M 点, 由 $A_\phi = 4$ 处作垂线与过比 M 点低 10dB 的 P 点所作的水平线交于 Q 点, 则 Q 点的 G 值即为所求 $G_\phi = 0.3$ 。

④ 求缺陷的当量尺寸

$$D_\phi = DG_\phi = 20 \times 0.3 = 6 \text{ (mm)}$$

(2) 底波高度法 利用缺陷波与底波高度之比来衡量缺陷的相对大小。其基本原理为: 当工件中存在缺陷时, 由于缺陷反射使工件底波下降。缺陷越大, 缺陷波越高, 底波就越低, 缺陷波与底波之比就越大。

常用的底波高度法有 F/B 法 (即以缺陷波高与缺陷处底波波高之比来衡量缺陷的相对大小) 和 F/B_G 法 (以缺陷波高与无缺陷处底波波高之比来衡量缺陷的相对大小)。

(3) 测长法 当工件中缺陷尺寸大于声束截面时, 一般采用测长法来确定缺陷的长度。

测长法是根据缺陷波高与探头移动的距离来确定缺陷尺寸的。按规定的方方法测定缺陷的长度称为缺陷的指示长度 l_f 。由于实际工件中缺陷的取向、性质、表面状态等都会影响缺陷的回波高, 因此, 缺陷的指示长度总是小于或等于缺陷的实际长度。

根据测定缺陷长度时的灵敏度基准不同, 可将测长法分为相对灵敏度法和绝对灵敏度法两种。其中, 相对灵敏度测长法是以缺陷最高回波为相对基准、沿缺陷的长度方向移动探头, 以降低一定的 dB 值来测定缺陷的长度, 常用的有 6dB 法 (又称半波高度法) 和端点 6dB 法 (端点半波高度法), 各自的原理如图 3-39 所示。

绝对灵敏度测长法是在仪器灵敏度一定的条件下, 探头沿缺陷长度方向平行移动, 当缺陷波高降低到规定位置时 (如图 3-40 中 B 线所示), 探头移动的距离即为缺陷的指示长度。本法常用于自动检测。

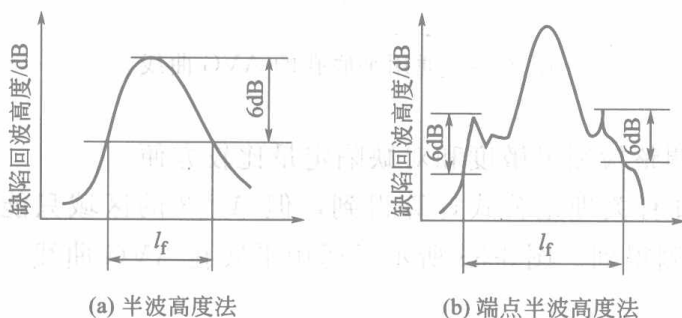


图 3-39 相对灵敏度测长法

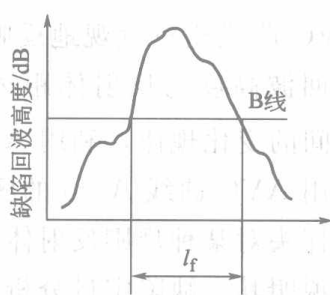


图 3-40 绝对灵敏度测长法

3. 超声波检测的定性

不同性质的缺陷对工件的危害程度不同, 例如裂纹就比气孔、夹渣的危害大得多。因此, 缺陷定性对超声波检测来说十分重要。

缺陷定性是一个非常复杂的问题, 目前的 A 型反射超声波检测仪只能提供缺陷回波的时间和幅度两方面的信息。因此, 对缺陷的精确定性尚有困难, 实际检测中常常根据经验并结合工件的加工工艺、缺陷特性、缺陷波形和底波情况来分析估计缺陷的性质。

(1) 根据缺陷的特征分析缺陷的性质 缺陷特征是指缺陷的形状、大小和密集程度。

对于裂纹、夹层、折叠等平面形缺陷,在不同的方向上探测,其缺陷回波的高度显著不同,当垂直于缺陷方向探测时,缺陷回波高;而当平行于缺陷方向探测时,其缺陷回波低,甚至无缺陷回波。

对于气孔、小夹渣等点状缺陷,在不同方向探测,缺陷回波无明显变化。

对于白点、疏松、密集气孔等密集型缺陷,缺陷波密集且互相彼连,在不同的方向探测,缺陷回波无明显变化。

(2) 根据缺陷波形分析缺陷的性质 缺陷波形分为静态波形和动态波形两大类。静态波形是指探头不动时缺陷波的高度、形状和密集程度,而动态波形是指探头在探测面上移动过程中,缺陷波的变化情况。

① 静态波形 缺陷内含物的声阻抗对缺陷回波的高度影响较大。白点、气孔等内含气体,声阻抗很小,反射回波高,金属或非金属夹杂物的声阻抗较大,反射回波低。此外,不同类型缺陷反射波的形状也有一定的差别,如气孔与夹渣,气孔表面较平滑,界面反射率高,波形陡直尖锐;而夹渣表面粗糙,界面反射率低,同时还有部分声能透入夹渣层,形成多次反射,波形宽并带锯齿。气孔与夹渣的静态波形的简单比较如图 3-41 所示。



图 3-41 气孔与夹渣的静态波形

② 动态波形 超声波入射到不同性质的缺陷上,其动态波形是不同的,为便于分析估计缺陷的性质,常常绘出动态波形图。动态波形图的横坐标为探头移动的距离或旋转的角度,纵坐标为波高。常见缺陷的动态波形如图 3-42 所示。

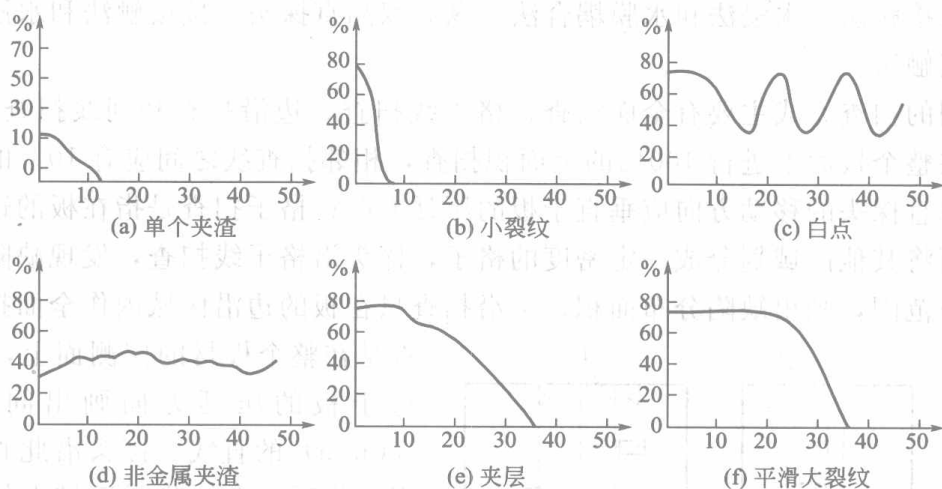


图 3-42 常见缺陷的动态波形

(3) 根据底波的特性分析缺陷的性质 工件内部存在缺陷时,超声波被缺陷反射使射达底面的声能减少,底波高度降低甚至消失。不同性质的缺陷,反射面不同,底波高度也不一样,因此,在某些情况下可以利用底波情况来分析估计缺陷的性质。

当缺陷波很强而底波消失时,可以认为是大面积缺陷,如夹层、裂纹等;

当缺陷波与底波共存时，可以认为是点状缺陷（如气孔、夹渣）或面积较小的其他缺陷；

当缺陷波为互相彼连、高度不同的缺陷波，而底波明显下降时，可以认为是密集缺陷，如白点、疏松、密集气孔或夹渣；

当缺陷波和底波都很低或都消失时，可以认为是大而倾斜的缺陷，或是疏松。若出现“林状回波”，则可以认为是组织粗大。

为了提高对缺陷定性的准确度，近来有研究者探索将频谱分析、小波变换和人工神经网络等非线性技术对超声缺陷回波进行分析，有兴趣的读者可参阅这方面的新近文献，在此不再详述。

第四节 超声检测的应用

超声波检测的应用是多方面的，既可用于铸件、锻件、板材、管材、棒材以及焊缝等的检测，又可用于液位、涂层厚度、硬度以及材料的弹性模量、晶粒度、残余应力等的检测。下面简述超声波检测的几个典型应用实例。

一、金属板材的超声波检测

前已述及，金属板材分为普通板材和复合板材两大类，对这两类板材的超声检测，既有相同之处，又有所差异。

（一）普通金属板材的超声波检测

在超声波检测中，常根据其厚度将普通金属板材分为薄板（ $<4\text{mm}$ ）、中板（ $4\sim40\text{mm}$ ）和厚板（ $>40\text{mm}$ ）三大类。对中厚板的超声波检测，目前主要采用脉冲反射法，而对薄板的检测则主要采用 Lamb 波。

在中厚板的脉冲反射法检测中，根据探头和耦合方式的不同，又可进一步分为纵波单晶直探头的直接接触法、水浸法和水膜耦合法，纵波双晶直探头直接接触法和水浸法，横波单探头的直接接触法。

纵波检测的扫查方式主要有全面扫查、格子线扫查、边沿扫查和列线扫查四种。其中，全面扫查是在整个板面上进行 100% 的全面积扫查，相邻扫查线之间应有 10% 的有效声束覆盖，单晶纵波直探头的移动方向应垂直于板的压延方向；格子扫查是指在板的边沿区域内作全面扫查，而将其他区域划分成一定密度的格子，探头沿格子线扫查，发现缺陷后再在缺陷附近扩大扫查范围，画出缺陷分布面积；边沿扫查只在板的边沿区域内作全面扫查；列线扫查

是在整个板材的探测面上，沿垂直或平行于板的压延方向画出间隔一定（如 100mm）的直线，探头沿此直线扫查，发现缺陷后再在缺陷附近扩大扫查范围，画出缺陷分布面积。实际检测中，究竟采用哪种扫查方式，视所要求的检测质量和检测效率决定。

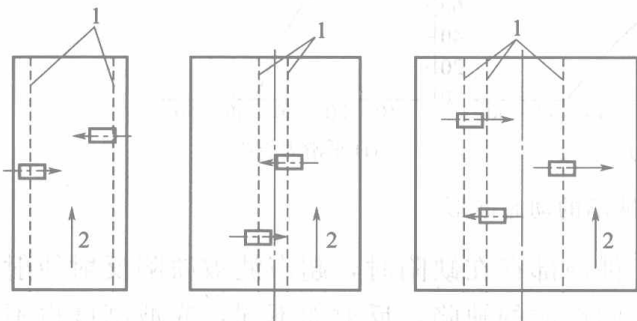


图 3-43 Lamb 波检测薄板时的探头移动方式
1—探头移动线；2—轧制方向

纵波扫查法一般可采用较高的频率，如 2~5MHz，水浸法也可采用 10MHz。

对于厚度较薄、难以用纵波垂直入射检测的板材,可用横波单探头法沿板的一边移动探头即可检测板的整个宽度。

薄板的 Lamb 波检测的扫查方式通常采用列线法,即按有效探伤距离在板上顺压延方向画线,探头从距板边最近的一条线开始,垂直压延方向和侧边沿此线移动,从上至下扫查完毕,再沿相邻的一条线继续扫查。如图 3-43 所示。

(二) 复合钢板的超声波检测

对复合钢板,超声检测的重点是其中的脱黏缺陷。对于厚度较大的平板状工件,可采用直接接触法从较厚的一侧(通常为基材)入射检测;对于较薄的工件或曲面工件,多采用液浸法进行检测。

复合钢板超声检测的困难在于,当其由两种声阻抗相差很大的异种材料(如钛钢复合板)复合而成时,即使界面结合良好,也存在较大的界面反射,此时对结合质量的检测与评判有一定困难。此外,对某些特定厚度的复合板,结合界面回波可能与底面回波重合,此时即使存在脱黏缺陷也不易探测到。

二、锻件的超声波检测

锻件是超声检测实际应用的主要对象之一,由于锻件品种繁多,形状和尺寸各异。最典型的锻件有轴类、饼类(圆盘类)和筒类三大类。

(一) 轴类锻件的超声波检测

对轴类锻件,检测方式以纵波径向和横波周向检测为主,同时为发现各种取向的缺陷,也可辅以纵波和横波的轴向检测(图 3-44)。检测频率对成品常用 2~5MHz,对锻坯常用 1~2MHz。棒材的超声波检测方法与此类似。

(二) 盘类锻件的超声波检测

对盘、轮、盖等盘类锻件,由于其生产工序甚多,生产周期较长,因此,在整个制造过程中,通常至少要进行两次探伤,即锻坯探伤和精坯探伤。

对盘类锻坯的探伤,常采用纵波直探头在端面进行探测。一般盘件采用直接接触法,对重要盘件和小型圆饼件,常采用液浸法检测。探测频率常用 2.5MHz。当工件厚度很大、表面粗糙时,可用 2MHz 以下的频率;而当工件厚度不大,且检测质量要求高时,可用 5MHz 以上的频率。

对盘类精坯(已作最终热处理的饼类锻件),除纵波和横波直探头的端面检测外,必要时还用联合双晶探头垂直法、表面波法进行检测。

(三) 筒类锻件的超声波检测

对筒类锻件,以斜探头进行周向检测和轴向检测为主,如图 3-45 所示。也可采用纵波直探头在端面上进行检测。探测频率常用 2~5MHz,对晶粒粗大的奥氏体钢,可用 2MHz 以下的频率检测。管材的超声波检测方法与此类似。

以下是盲孔锻造液压缸的超声波探伤实例,供参考。

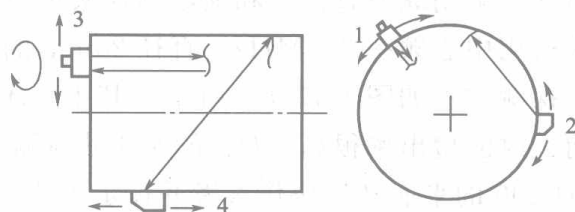


图 3-44 轴类锻件的超声波检测方式

1—纵波直探头径向检测；2—横波斜探头周向检测；3—纵波直探头轴向检测；4—横波斜探头轴向检测

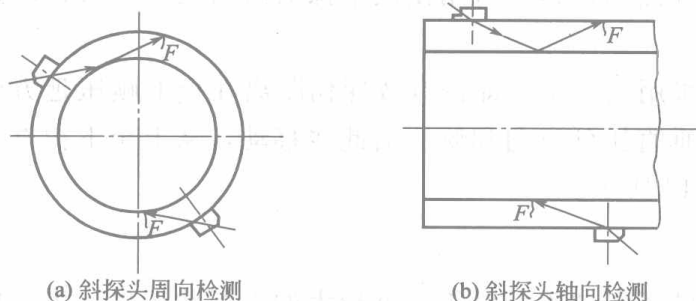


图 3-45 筒类锻件的超声波检测方式

如图 3-46 所示为某厂生产的盲孔锻造液压油缸，其材质为 45 钢，生产工艺为经水压机多次芯棒冲拔锻造成形 [图 3-46(a)]，正火处理后车削加工成最终产品 [图 3-46(b)]。

由于原材料和生产工艺方面的原因，该系列液压缸容易发生裂纹（主要在靠近缸底的内壁产生）、夹层、折叠（主要产生在缸底）、非金属夹杂（大块夹杂物单块或密集地聚集在缸底圆弧角、螺孔连接处）、晶粒粗大等缺陷，严重影响产品的质量和性能。

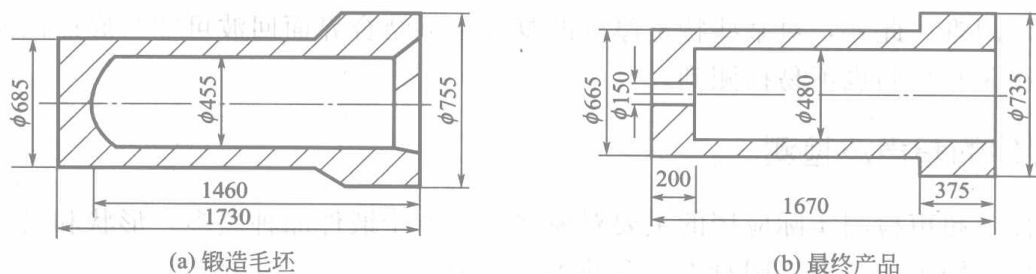


图 3-46 盲孔锻造液压油缸的结构及尺寸

为检出上述缺陷，可采用超声波对其探伤，探测时机可选在粗车之后。为提高对缺陷的检出率，采用纵波直探头和横波斜探头进行联合探测。其中，纵波直探头的探测工艺如下：探头选用中心频率 2.5MHz、直径 20mm 的单直探头，机油耦合，外表面 100% 直接接触探伤，探测位置如图 3-47(a) 所示，其中，A、B、C 为主要探伤位置，对底部夹层、折叠和周向裂纹的检出率很高。D、E 为辅助检测位置，可探测可能出现的其他缺陷。探测灵敏度用 $\phi 3-200$ 的平底孔试块作参考并设定为 $\phi 3-6\text{dB}$ 。

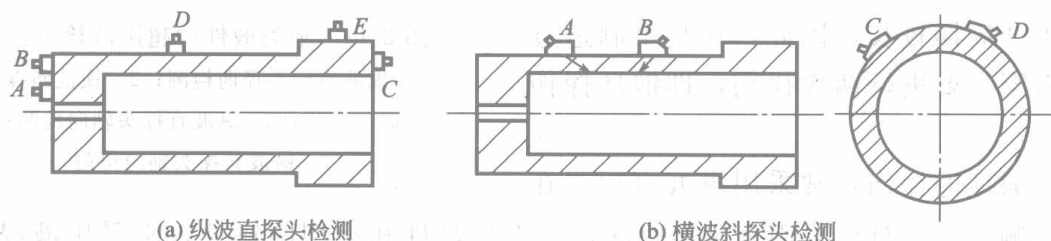


图 3-47 盲孔锻造液压油缸的探测位置

由于粗加工后，内孔壁常有接刀槽甚至台阶，纵波探伤时易与裂纹混淆，因此有必要再采用横波探伤，横波探伤对内外壁裂纹的检出率都很高。横波探伤位置如图 3-47(b) 所示。探头选用中心频率 2.5MHz、晶片尺寸 $13 \times 13\text{mm}$ 的 K1 斜探头。在靠近盲孔底部 200mm 范围内，外圆 100% 扫查。为防止漏检，规定外圆扫查时，沿缸体轴线和圆周方向实行双向扫查。

采用上述工艺探伤取得了较好的效果，经检验合格的产品未发生质量问题。

三、金属焊缝的超声波检测

焊缝是超声波检测的主要对象。根据采用的能源和工艺特点，焊接可分为熔焊和压焊两

大类。其中,熔焊是指将填料或焊接接头加热至熔化状态,不加压力完成焊接的工艺,如手工电弧焊、气体保护焊、埋弧焊、电渣焊、等离子弧焊、氧乙炔焊和激光焊等。作为超声波检测主要对象的是指熔焊焊缝。

焊接接头的形式有对接、搭接、T形接头(丁字接头)和角接等多种,如图3-48所示。

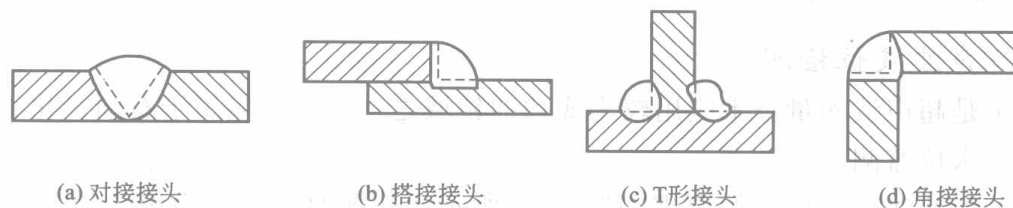


图 3-48 焊接接头形式

接头形式不同的焊缝,其超声波检测略有差异。

对接焊缝的超声波检测,一般采用斜探法,即用横波斜探头在焊缝两侧作直接接触扫查。可用单探头沿焊缝一侧或两侧进行锯齿形扫查[图3-49(a)]和斜平行扫查[图3-49(b)],也可进行焊缝上扫查、交叉扫查、串列扫查和多方向扫查等。采用双面扫查还是单面扫查,主要取决于板厚。无论采用何种扫查方式,检测前都应对扫查路径适当打磨,以获得一定质量的表面。检测频率一般可采用 $1\sim 4\text{MHz}$ 。

对其他接头形式的焊缝超声波检测,可参照对接焊缝进行。所采用的扫查方式应使超声波的发射声束覆盖焊缝的整个横断面,并有利于发现各种可能取向的缺陷。

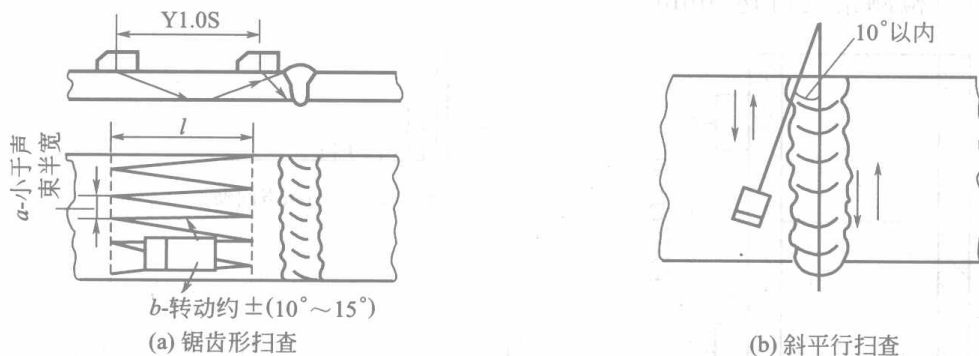


图 3-49 对接焊缝超声波检测的扫查方式

四、非金属材料超声波检测

超声波在非金属材料(塑料、有机玻璃、陶瓷、橡胶、混凝土等)中的衰减一般都比金属大,为了减小衰减而多采用低频检测,一般为 $20\sim 200\text{kHz}$,有的也用 $2\sim 5\text{MHz}$ 。为了获得较窄的声束,常采用较大尺寸的探头。

塑料零件的检测多采用纵波法,探测频率为 $0.5\sim 1\text{MHz}$,使用脉冲反射法。陶瓷材料可用 $0.5\sim 15\text{MHz}$ 的纵波、横波或液浸聚焦探头探测。橡胶检测的频率更低,可用穿透法检测。

五、小型压力容器壳体的超声波检测

小型压力容器壳体是由低碳不锈钢锻造成型的,经机械加工后成半球壳状。对此类锻件进行超声波检测,通常以斜探头横波检测为主,辅以表面波探头检测表面缺陷。检测前必须

将探头透声楔块磨成与工件同曲率的球面，以利于声耦合。通常使用易于磨制的塑料外壳环氧树脂小型 K 值斜探头， K 值可选 1.5~2，频率为 2.5~5MHz，检测时采用直接接触法，用机油耦合。

六、超声波检测的其他应用

(一) 超声波液位检测

液位测量是超声波测量技术应用较为成功的领域之一，广泛应用于石油、化工和水电等部门的油位、水位监测。

超声脉冲回波法检测液位的原理如图 3-50 所示。检测时，将超声纵波直探头与待测液位的容器外壁垂直接触，以使探头发射的超声波垂直入射至容器壁。当探头处在无液体的位置（位置 1）时，由于容器壁的声阻抗比气体的声阻抗大得多，超声探头发射的超声波将在容器内壁界面处几乎全部反射回来。这样，探头将只能接收到容器同侧内壁幅值较高的反射回波 [图 3-50(b)]；当探头移至有液体的部位（位置 2）时，由于液体的声阻抗比气体大，探头发射的超声波将有一部分透入液体中，甚至再从容器对侧内壁和外壁处反射回来，因此，接收探头将接收到同侧内壁的反射回波（幅值比前者低），如图 3-50(c) 所示，还可能接收到对侧内外壁的反射回波，如图 3-50(d) 所示。这样，利用容器内有液体和无液体部位超声回波的差异，通过沿容器高度方向移动探头，即可检测容器内液位的高低。据文献 [64] 报道，在生产实际中，采用超声波脉冲反射法对管径 32mm、壁厚 2mm 的碳素钢管中的热工质的液位检测精度可达 5mm。

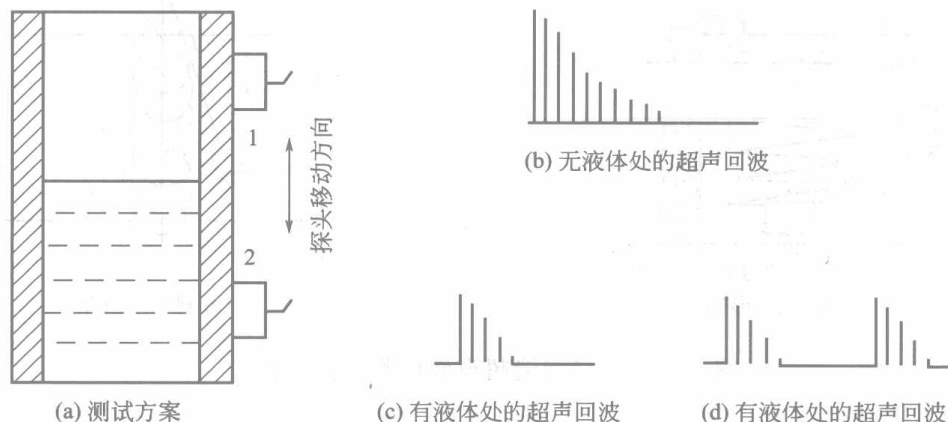


图 3-50 超声波液位检测原理示意

(二) 超声波测厚

目前，超声波测厚的基本原理有脉冲反射法和共振法两种，一般而言，共振法的测量精度高于脉冲反射法，其测量原理如前所述。脉冲反射法测厚，利用了超声波在传播过程中，当碰到声阻抗不同的异质界面时会发生反射的原理，通过测量超声波在被测介质中的往返时间 (t)，在超声波的传播速度 (c) 已知或可测的情况下，根据

$$d = \frac{1}{2}ct \quad (3-51)$$

即可求得介质的厚度 (d) 或超声波在介质中的传播距离 ($2d$)。

目前，脉冲反射法超声波测厚的测量范围一般在 1mm 以上（测量上限取决于材质对超声波的衰减大小，在钢铁材料中，最高可达几米），精度可达 $\pm 0.1\text{mm}$ 甚至更高。

超声波测厚具有设备小巧轻便（可小于 500g）、测量速度快、精度高、抗干扰能力强等诸多优点，已广泛应用于金属、非金属板材和管材制造过程的质量检测与控制，压力容器、输送管道、高炉、工业炉窑、船舶、水工金属结构等设备的在役壁厚检测、腐蚀减薄监测及安全评定、涂层厚度测量等。

除以上应用外，超声波检测还有许多应用，如非接触地在管道外测量管内流体的流速和流量、超声波检漏、组织结构和晶粒尺寸的超声表征等，有兴趣的读者可参阅其他相关文献资料，此处不再详述。

第五节 超声检测的新近进展

传统超声检测的一个主要局限是接触式检测，对于直接接触检测，需要在被检工件表面施加耦合剂；对于液浸法检测，需要将被检件置于水槽中或在工件与探头之间喷水流，因此在有些场合应用不方便。为了克服传统超声检测的不足，人们开始探索非接触式超声检测，业已提出的非接触式超声检测方法有激光超声、电磁超声、空气耦合超声等，其中前两者较为成熟。此外，为提高检测效率，还发展了相控阵超声检测。在此，仅对激光超声、电磁超声和相控阵超声进行简要介绍，其他超声检测新方法请参见国内外的最新文献，此处不再赘述。

一、激光超声

（一）激光超声检测的主要特点

激光超声技术的研究始于 20 世纪 60 年代，它是利用激光来激发和检测超声的一门新兴的技术，目前已逐渐成为材料无损检测的一种重要手段。

1. 激光超声检测的主要优点

与传统的压电超声技术相比，激光超声检测的主要优点如下。

① 非接触检测。无需耦合剂，从而避免了耦合剂对测量范围和测量精度的严重影响，也避免了耦合剂对被检件和环境的污染。

② 抗干扰能力强。激光超声波场具有极强的抗干扰能力。

③ 可以远距离激发和接收，易于实现自动化。

④ 适用范围广。可以在各种材料（金属、非金属）中直接激发出超声波，也可以检测几何形状复杂的表面及操作受限的场合。

⑤ 可同时产生纵波、横波和表面波，因此激光超声不仅可用来检测体缺陷，还可检测表面缺陷。

⑥ 空间分辨高。探测激光束可被聚焦成非常小的点（ $10\mu\text{m}$ ），因而可实现数微米的空间分辨率，从而使得基于超声波衍射方法的缺陷检测具有检测微小缺陷和裂纹的潜力。

⑦ 由于激光超声波的激发和接收都是瞬间完成的，能够实现快速实时检测。

2. 激光超声检测的不足

激光超声检测的不足之处如下。

① 灵敏度低。尽管激光激励的超声波的振幅与一般宽带压电换能器所激发的超声波相当（或略小一些），但激光干涉仪的接收灵敏度比传统的超声波检测系统差很多。在超声频率范围内，典型的压电换能器的探测极限为 $0.01\sim 1\text{pm}$ 之间，而多数实验室使用的干涉仪，

一般最小可测位移为 100pm 左右。

② 完整的检测系统复杂, 体积庞大, 造价昂贵。

③ 工作场地需采取严格的防护措施。

(二) 激光超声检测的基本原理

1. 超声波的激光生成机制

激光超声波的生成机制主要有热膨胀机制(热弹机制)、汽化机制(融蚀机制)和光击穿机制等, 其他如电致伸缩、辐射压力、光化学等激励机制产生的超声波很微弱或只在某些特殊情况下才起明显的作用。

热弹性机制的作用原理: 激光脉冲投射到样品表面上, 部分激光能量被材料吸收引起局部温度升高, 由材料热膨胀带动和单位面积动量变化引起压力变化产生表面运动。

汽化和光击穿机制的作用原理: 光功率密度超过某一阈值时, 表面温度升高, 部分样品被蒸发形成气体或被电离成为等离子体, 同时对表面有一个反作用压力, 产生超声波。

由于热弹性机制对表面无损伤, 且产生的波形较容易控制, 重复性好, 在检测中得到广泛应用。

2. 超声波的激光激发技术

激光产生超声波的方法可分为直接式和间接式两大类。直接式是使激光与被测材料直接作用, 通过热弹性效应或融蚀作用等激发出超声波; 间接式是利用被测材料周围的其他物质(如表面涂层)作为介质来产生超声波。

(1) 直接式 当脉冲激光照射到金属表面时, 一部分被反射掉, 另一部分则被吸收并转化为热能(吸收仅发生在表层下数微米的范围内)。被吸收的热能很快产生几十到几百摄氏度的温升, 并通过热弹效应形成应变和应力场。当金属表面处于自由状态时, 主要的应力平行于材料的表面, 并形成如图 3-51 所示的压缩超声波远场分布。

当光脉冲的密度大于数十兆瓦每平方厘米时, 金属表面将有一薄层金属(厚度约数微米)被烧蚀, 部分原子脱离金属表面附近形成等离子体, 产生很强的垂直于表面的反作用力脉冲, 并产生如图 3-52 所示的超声波纵波远场分布。从图 3-51、图 3-52 可以看出: 工作在烧蚀区的波源所产生的纵波主要集中在被测件表面的法线方向上; 而热弹区激发出的超声波主要沿以法线为对称轴的一个锥型面传播。两者光脉冲的宽度一般都小于 100nm。

随着激光脉冲宽度的进一步压缩(压缩至亚 ps 量级、ps 量级甚至 fs 量级)及激光探针技术的发展, 在毫微秒脉冲激光激发超声波的基础上, 形成了一些新的超声波产生方法, 如热栅法激发、热应变激发、电子应变激发以及非热机制——反压电效应激发等方法, 进而产生了一些新的全光学无损检测系统。

(2) 间接式 在材料的表面上涂一层其他介质, 入射激光通过对涂层的烧蚀, 也可形成如图 3-52 所示的超声波远场分布, 而被检材料表面无任何损伤。

3. 超声波的激光检测技术

检测激光超声波的技术有多种, 从理论上说, 凡是能检测振动的方法均可用于检测超声波, 但受频响、分辨率、灵敏度、对被检件表面和应用环境等影响, 常用的方法有压电换能器检测法和光学检测方法。其中压电换能器检测法比较经典, 灵敏度较高、频响较宽, 但需耦合剂, 对样品表面也有比较严格的要求, 多在实验室应用。光学检测方法利用连续检测激光照射到样品表面, 接收表面的反射光, 并从反射光的振幅、相位、频率等的变化中得出激

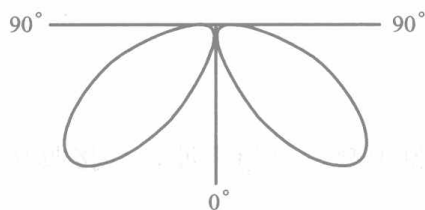


图 3-51 基于热弹效应的
激光超声波远场分布

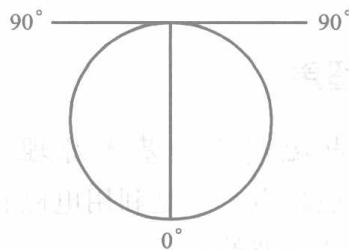


图 3-52 基于熔蚀效应的
激光超声波远场分布

光超声信号。气体和液体中的激光超声波信号检测主要采用光学检测法，而固体中的激光超声波信号主要采用换能器法和光学法检测。

目前，可与脉冲激光产生声相匹配组成全光学系统的激光探针有两种类型，即非干涉仪技术型和干涉仪技术型。其中，非干涉仪技术型主要包括刀刃技术（探测器偏转技术）、表面栅格衍射技术、反射率技术及超声多普勒-光吸收谱技术等多种类型；而干涉仪技术型可分为光外差（或零拍）干涉仪技术、差分干涉仪技术及速度（或时延）干涉仪技术等几类。

（三）激光超声技术在无损检测领域的应用

利用激光在固体中产生大振幅窄脉宽的声脉冲，再用激光接收声的激光探针技术，有其自己突出的优点，已在许多领域获得了初步应用，如在特殊环境下（如高温、真空等环境下）对材料进行远距离检测和质量监控；对加工或运行过程中的部件进行裂缝检测；在生产过程中对产品的参数（如厚度、温度等）及微结构参数进行监测、利用激光进行瞬态 Lamb 测厚、激光超声测量中的衍射校正以及对常规超声检测手段无法工作的区域进行检测等方面，但在无损检测领域，目前仍主要处于理论研究和实验探索阶段。具体地讲，激光超声在无损检测领域最有望于以下几个方面获得应用。

1. 高精度的无损检测

如测量复合材料、纳米材料的声学 and 力学性能，研究复合涂层表面的性能，检测固体中数十微米量级的缺陷、微裂纹。与扫描探针显微镜相结合，还可开展纳米尺度的材料物性研究；可用于飞机的引擎、进气管道、机翼、核设施中的关键零部件的早期失效所产生的微裂纹的实时检测。

2. 恶劣环境下的材料特性测量

激光超声的非接触式激发与接收以及无损、非侵入性等特点，使其特别适合于在恶劣的环境下（如高温高压、高湿、有毒、酸、碱及检测环境或被测工件存在核辐射、强腐蚀性和化学反应等），对工件进行在线检测。这方面的应用研究较多，如德国的 Keck 等利用准分子激光作为超声波的激发源，利用 Nd: YAG 激光接收，在热轧无缝钢管（管长 5.5~12m，温度 1230℃，延伸速度 2m/s）生产线上成功地进行了管坯壁厚均匀性的在线检测；德国的 M. Paul 等利用激光超声实现了对铝、陶瓷和钢在高温下（温度达 1400℃）的材料特性测定等。

3. 残余应力检测和粘接质量评估

同济大学的潘永东、钱梦騄等，采用激光在铝合金试样中激发出表面超声波，通过测量表面波相对声速的变化，对铝合金材料的残余应力分布进行了检测，取得了较满意的结果。此外，还有人对复合材料的粘接质量进行了激光超声的无损检测与评估的

探索。

二、电磁超声

(一) 电磁超声的基本原理

所谓电磁超声,就是利用电磁感应原理,在被检对象中激发出超声波,并接收从被检对象返回来的超声波的技术。

在电磁超声波检测中,超声波的激发和接收都是由电磁超声换能器(EMAT: Electro-Magnetic Acoustic Transducer)来实现的。

EMAT 激发超声波的作用机理主要有洛伦兹(Lorentz)力式和磁致伸缩式两种。对一般导电材料,只有洛伦兹力作用机理;对铁磁性材料,除洛伦兹力作用外,还有磁致伸缩效应,且一般以后者的效应为主。

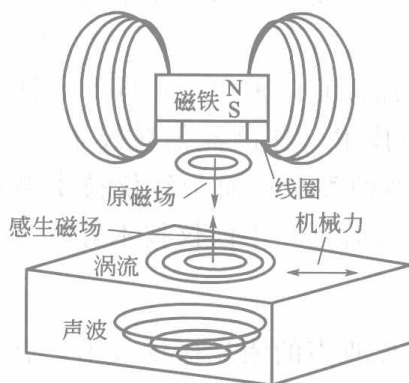


图 3-53 洛伦兹力式 EMAT 的工作原理

图 3-53 所示是洛伦兹力式 EMAT 的工作原理:当把通有高频电流的线圈放置在金属物体(被检对象)附近时,由于电磁感应效应,在金属物体表层内将感生出旋涡状电流,此即涡流。如同时在该金属物体附近施加一稳定外磁场,则该稳定外磁场将与感生涡流相互作用,产生交变的洛伦兹力。金属原子在交变洛伦兹力的作用下将产生往复振动,并以一定方式传播出去,就可产生超声波。该过程的逆效应过程就是利用 EMAT 接收超声的原理。

通过改变外加偏转磁场的大小和方向、高频电流的大小和频率、线圈的形状和尺寸等参量,可以控制 EMAT 产生超声的类型、强弱、频率及传播方向等参数。同时也可改变接收超声 EMAT 的工作带宽等参数。

(二) 电磁超声检测的主要特点

与传统的超声波检测相比,电磁超声的主要优点如下:

- ① 非接触测量,不仅避免了探头的磨损,降低了对被测对象的表面质量要求,还大大拓宽了其应用场合,如高温、高速运动物体的检测;
- ② 检测效率高,对钢管等环形工件的检测只要在相互垂直的两个位置进行检测即可完成。

目前,电磁超声的主要不足在于:

- ① 只能应用于导电材料或铁磁性材料的检测;
- ② 对形状复杂的工件检测有困难;
- ③ 只能检测工件表面和近表面缺陷,对内部缺陷的检测有困难;
- ④ 与传统的超声波检测设备相比,电磁超声的设备比较庞大,价格也比较高;
- ⑤ 由于工作过程中温升较大,电磁超声设备的连续工作时间还不够长,除非采取特殊的降温措施;
- ⑥ 转换效率低,所激发和接收到的超声波信号幅值小;
- ⑦ 对周围环境噪声敏感,接收信号常被噪声所淹没。

(三) 电磁超声的典型应用

目前,电磁超声已获得广泛应用,如金属板材、管材的厚度测量和表面、近表面缺陷检测,焊缝、钢棒中的缺陷检测,铁轨、车轮的在役检测,以及残余应力测量等。

三、相控阵超声

所谓相控阵超声,就是通过相位延迟,调节超声探头阵列中各单元的工作(激发和接收超声波)次序,以获得所需要的辐射声场,并进行选区接收的技术。

对相控阵超声技术的研究始于20世纪60年代,在20世纪80年代初,相控阵超声技术已广泛应用于医学超声成像领域。近年来,由于压电复合材料、微电子技术和计算机技术等多种高新技术的快速发展,使得相控阵超声检测技术得以快速发展,已逐渐应用于工业无损检测,取得了较好的效果。在我国西气东输工程中,相控阵超声发挥了很大作用,采用相控阵超声对管道环焊缝进行检测,大大提高了检测效率。

(一) 相控阵超声的基本原理

相控阵超声检测的关键是所需要特定声场的获得,其关键是探头及其配套的控制电路。

1. 相控阵探头

相控阵超声探头是把若干个独立的压电晶片单元按照一定的组合方式排成一个阵列,通过控制压电晶片的激励顺序和信号延时,达到对声束方向、焦点位置与大小等声场特性控制的目的。

为满足不同场合的需要,超声相控阵探头可有不同的组合形式。按其阵元排列方式可分为一维线形阵列、一维环形阵列、二维矩形阵列(面形)、二维分段交错环形阵列(扇形)和筒形阵列五种形式,如图3-54所示。其中,线形阵列由于加工比较容易,发射、接收延迟控制电路比较简单等优点,而在实际应用中使用较多。环形阵列由于不能进行声束偏转控制,大多应用在医学成像和脉冲多普勒体积流量计中。二维分段交错环形阵列比较特殊,专门用于棒材检测。由于目前加工工艺限制及电路复杂和制作成本高,使二维矩形阵列仍主要应用于医用B超上,工业上很少使用。筒形阵列主要用于检测管子的内外壁缺陷。

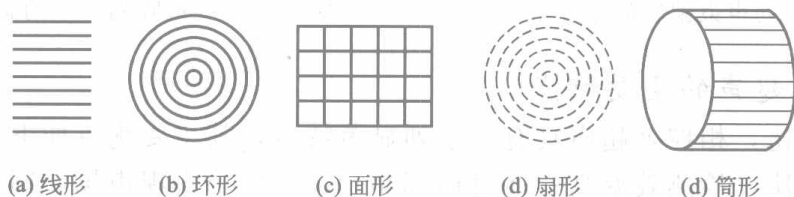


图 3-54 相控阵探头阵元几何排列示意图

2. 特定声场的获得

这里以线形阵列为例,说明特定声场的获得,即声束的移动、偏转和动态聚焦原理。

(1) 声束的平移 如图3-55所示,对阵元晶片平行排列的线形探头,以相同的时延,按照1~N的次序依次激发各阵元,即可实现声束由位置1到位置N的平行移动。

为实现声束的平移,也可将几个相邻的晶片分成一组,按顺序依次触发各晶片组。

(2) 声束的偏转 相控阵超声声束偏转的实现可由波的叠加和惠更斯原理加以解释,合成声束的波前是各阵元波前的包络,如图3-56所示。每个阵元被相同脉冲所触发,通过控制超声相控阵中的每个阵元的激发延迟时间,即可控制声束的偏转角度。

(3) 动态聚焦 多晶片同时工作时, 声场中任一位置的声波是各阵元发射声波作用的叠加, 其中声束集中、声压最强的位置即形成焦点。改变对各阵元的激励方式即可改变焦点的位置。因此, 为了实现快速动态聚焦, 只要使超声相控阵系统的发射器按波束聚焦定理向每个阵元发射激励信号即可。

在接收过程中, 根据互易原理, 相控阵接收时的方向控制也用延迟来达到。各阵元回波信号经延迟后叠加, 即可获得某方向上目标的反射回波。

动态聚焦的原理示意如图 3-57 所示。

依靠软件控制各阵元的触发时机, 实现声束的平移、偏转和动态聚焦, 即可实现对给定范围内任意区域的快速扫描检测。

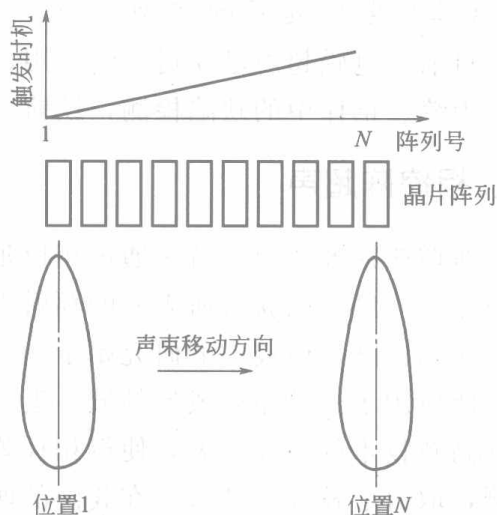


图 3-55 线形阵列声束平移的原理示意

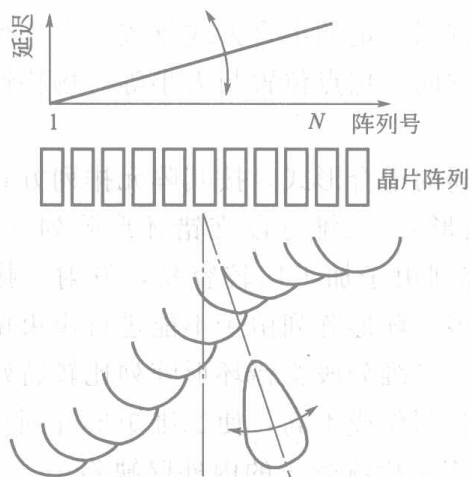


图 3-56 线形阵列声束偏转的原理示意

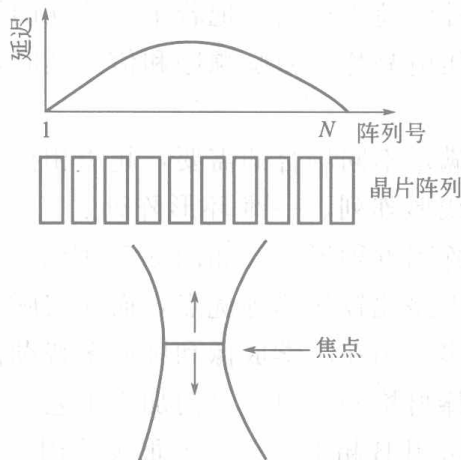


图 3-57 线形阵列声束动态聚焦的原理示意

(二) 相控阵超声的主要特点

与传统超声相比, 相控阵超声具有一系列显著特点, 其主要优点如下。

(1) 检测速度快, 检测效率高。通过局部晶片单元组合实现声场控制, 可实现高速电子扫描, 配置机械夹具, 不需要大范围移动探头, 即可对试件进行全方位和多角度的高速检测。

(2) 缺陷的检出能力有所提高。由于可对声束角度、焦柱位置、焦点尺寸及位置等参数进行精确的动态控制, 从而提高了对复杂结构件和盲区位置的缺陷的检出能力。

(3) 检测灵敏度有所提高。由于相控阵超声的实际声场强度远大于常规的超声波检测技术, 因此, 对声衰减特性相同的材料可以使用较高的检测频率, 从而有利于对微小缺陷的检出。

(4) 适应能力强。在不改动或较少改动的情况下, 同一组探头可以适应不同管径、不同壁厚工件检测的需要。

(5) 一台相控阵设备即可以实现传统超声的 B 扫描和 C 成像检测, 检测结果形象直观,

且便于保存。

相控阵超声目前的主要不足在于：

(1) 设备价格较高；

(2) 设备操作比较复杂，对人员要求更高。设置检测参数时，需要对结构提出完整的检测算法，要求检测人员对探头声场特性有深入的理解。

(三) 相控阵超声的典型应用

除医学成像检测应用外，相控阵超声在工业检测领域也获得了越来越广泛的应用，如石油天然气管道环焊缝、汽轮机叶片（根部）、涡轮圆盘、火车轮轴等，在压力容器、核电站设施、海洋钻井平台结构和航空材料的检测等领域也具有广阔的应用前景。

复习思考题

1. 简要论述超声波检测的基本原理、主要特点和适用范围。
2. 超声波检测的基本任务是什么？
3. 选定探测频率主要应考虑哪些因素？
4. 超声波检测的定量方法有哪些？各有何特点及应用？
5. 影响超声波回波大小的因素有哪些？
6. 已知超声波在有机玻璃中的 $C_L = 2730\text{m/s}$ ，钢中 $C_s = 3230\text{m/s}$ ，求探测钢的有机玻璃 K2 横波斜探头的纵波入射角。

参考文献

- [1] Krautkrämer J, Krautkrämer H. Ultrasonic Testing of Materials. (the Third Edition) New York: Springer-Verlag, 1983.
- [2] 张家骏. 超声检测技术的某些新进展. 无损检测, 1993, 15 (11): 324~327.
- [3] 李家伟, 陈积懋主编. 无损检测手册. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [4] 李国华, 张永忠. 机械故障诊断. 北京: 化学工业出版社, 1999: 186~206.
- [5] 蒋危平, 方京. 超声检测学. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1991.
- [6] 胡建恺, 张谦琳编著. 超声检测原理和方法. 合肥: 中国科技大学出版社, 1993.
- [7] Halmshaw R. Non-destructive Testing. Edward Arnold Ltd, 41 Bedford Square, London WC1B 3DQ, 1987: 108~215.
- [8] [日] 石井勇五郎著, 吴义, 王东江, 沐志成译. 无损检测学. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [9] 张俊哲. 无损检测技术及其应用. 北京: 科学出版社, 1993.
- [10] 张家骏编著. 无损检测概论. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [11] 中国机械工程学会无损检测学会编. 超声波探伤. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [12] 云庆华主编. 锅炉、压力容器无损探伤技术. 天津: 天津科技出版社, 1985.
- [13] 北京市技术交流站编. 超声波探伤原理及其应用. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [14] 《超声波探伤》编写组编著. 超声波探伤. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [15] 《超声波探伤技术及探伤仪》编写组编. 超声波探伤技术及探伤仪. 北京: 国防工业出版社, 1977.
- [16] 全国锅炉压力容器无损检测人员资格鉴定考核委员会组织编写. 超声波探伤. 北京: 劳动人事出版社, 1989.
- [17] Green Robert E, Jr., Djordjevic B Boro, Manfred P, Hentsche (Eds.). Nondestructive Characterization of Materials XI, Berlin, Germany, June 24~28, 2002, Springer-Verlag, Berlin, 2003.
- [18] Meyendorf N G H, Nagy P B, Rokhlin S I (Eds.). Nondestructive Materials Characterization with Application to

Aerospace Materials, Springer-Verlag, Berlin, 2004.

- [19] 沈建中, 黎连修. 超声无损检测的进展-学会成立 20 周年回顾. 无损检测, 1998, 20 (2): 31~38.
- [20] 刘清坤, 阙沛文, 郭华伟等. 基于支持向量机和特征选择的超声缺陷识别方法研究. 中国机械工程, 2006, 17: 9~12.
- [21] 弓乐, 曹康, 吴森. 金属材料超声探伤缺陷分类辅助系统的研究. 仪器仪表学报, 2005, 26 (10): 1085~1088.
- [22] 帅家盛. 航空制造业质量控制的创新——飞机部件智能超声检测系统. 航空制造技术, 2004 (10): 110~112.
- [23] 罗雄彪, 陈铁群. 超声无损检测的发展趋势. 无损探伤, 2004, 28 (03): 1~5.
- [24] 蒋危平, 田建新, 王子诚. 数字化超声波探伤仪十五年技术进展. 无损检测, 2004, 26 (03): 145~148.
- [25] 张辉. 混凝土结构火灾损伤超声波检测试验研究. 混凝土与水泥制品, 2004 (4): 48~49.
- [26] 关卫和, 阎长周, 陈文虎等. 高温环境下超声波横波检测技术. 压力容器, 2004, 21 (02): 4~6, 26.
- [27] 成善宝, 姚进, 蔡鹏. 超声波检测技术在硬度测量中的应用. 中国测试技术, 2004 (01): 11~13.
- [28] 陈振富. 混凝土构件裂缝深度超声波检测中钢筋影响的判辨. 无损检测, 2004, 26 (02): 72~73, 76.
- [29] 陈汉明, 李晓红, 丁杰等. 联箱管座角焊缝超声检测专家系统的开发. 压力容器, 2003 (10): 57~59.
- [30] 黄小南, 马小峰, 陶国夫等. 对接钢焊缝超声波检测中缺陷的波型概述. 无损探伤, 2003, 27 (04): 45~45.
- [31] 张伟志, 刚铁, 王军. 超声波检测计算机模拟和仿真的研究及应用现状. 应用声学, 2003, 22 (3): 39~44, 32.
- [32] 王元亮. 弹簧无损检测的新方法——超声波探伤. 计量技术, 2001 (3): 25~26.
- [33] 郝艳捧, 王国利, 谢恒等. 大电机定子绝缘的超声波衰减系数的研究. 高电压技术, 2001, 27 (5): 3~5, 12.
- [34] 刘保元, 高金生. 车轴内缩管缺陷的超声波检测. 机车车辆工艺, 2000 (6): 38~41.
- [35] 王明泉, 史步青, 李建华. 超声检测信号的特征分析. 华北工学院学报, Vol. 19, 1998 (2): 121~123.
- [36] 叶明亮, 邹义怀. 原岩应力超声波检测及应力场分析. 岩土工程学报, Vol. 20, 1998 (5): 31~36.
- [37] 刘玲, 张博明, 王殿富等. 聚合物基复合材料中孔隙率及层间剪切性能的实验表征. 航空材料学报, 2006, 26 (4): 115~118.
- [38] 张志国, 彭华, 马寅生等. 超声波无损探伤检测在现代出土石质文物保护中的应用. 地质力学学报, 2005, 11 (03): 278~285, 244.
- [39] 彭光俊, 王春麟, 刘祖林. 玻璃钢管道管壁厚度在线超声检测技术. 无损检测, 1998, 20 (7): 196~201.
- [40] 杨友松, 李淑俊, 崔大福等. 高炉炉墙厚度测量系统的超声传感器. 传感器技术, 2003, 22 (11): 54~56.
- [41] 林莉, 李喜孟, 张俊善等. 超声波无损评价 40Cr 钢显微组织的探讨. 无损检测, 2000 (4): 28~32.
- [42] Gur C Hakan, Tuncer B Orkun. Characterization of microstructural phases of steels by sound velocity measurement. Materials Characterization, 2005, 55: 160~166.
- [43] Robert E. Green Jr. Non-contact ultrasonic techniques. Ultrasonics, 2004, 42: 9~16.
- [44] 刘镇清, 刘骁. 超声无损检测的若干新进展. 无损检测, 2002, 22 (9): 403~405.
- [45] 罗雄彪, 陈铁群. 超声无损检测的发展趋势. 无损探伤, 2004, 28 (3): 1~5.
- [46] [美] 西拉德 J 主编, 陈积懋, 余南廷译. 超声检测新技术. 北京: 科学出版社, 1991.
- [47] 李晓春, 孙培懋, 金国藩. 激光超声及其在无损检测中的应用. 光电子技术, 1997, 17 (1): 37~44.
- [48] 陈清明, 蔡虎, 程祖海. 激光超声技术及其在无损检测中的应用. 激光与光电子学进展, 2005, 42 (4): 53~57.
- [49] 曾宪林, 徐良法. 激光超声技术及其在无损检测中的应用. 激光与红外, 2002, 32 (4): 224~227.
- [50] 施德恒, 陈玉科, 孙金锋等. 激光超声技术及其在无损检测中的应用概况. 激光杂志, 2004, 25 (5): 1~4.
- [51] 孔令剑, 徐军, 闫夷升等. 激光激发超声波的新方法研究. 光子学报, 2006, 35 (9): 21~23.
- [52] 郑中兴. 激光超声检测技术在材料评价上的应用与发展. 无损探伤, 2002 (1): 1~5.
- [53] Paul M, Haberer B, Arnold W. Materials characterization at high temperatures using laser ultrasound. Materials Science and Engineering, 1993, A168 (1): 87~92.
- [54] 潘永东, 钱梦霖, 徐卫疆等. 激光超声检测铝合金材料的残余应力分布. 声学学报 (中文版), 2004, 29 (03): 254~257.
- [55] 韩庆邦, 王军. 基于激光超声手段的粘接质量评估. 重庆教育学院学报, 2003, 16 (06): 19~23.
- [56] 王淑娟, 康磊, 赵再新等. 电磁超声换能器的研究进展综述. 仪表技术与传感器, 2006 (5): 47~50.
- [57] 何存富, 孙雅欣, 刘增华等. 弯管缺陷超声导波检测的有限元分析. 北京工业大学学报, 2006, 32 (4): 289~294.

- [58] 罗元国, 王保良, 黄志尧等. 空气耦合式超声波无损检测技术的发展及展望. 仪器仪表学报 2005, 26 (S2): 742~744.
- [59] 刘艳华, 杨思乾. 超声波测定摩擦焊接头残余应力. 焊接学报, 2000, 21 (9): 55~58.
- [60] 李永河, 张俊平. 超声波无损检测技术在桥梁工程中的应用. 铁道建筑, 2003 (12): 11~13.
- [61] 李明轩. 粘接质量超声检测研究. 应用声学, 2002, 21 (1): 7~12.
- [62] David R. Lide (Editor-in-Chief). CRC Handbook of Chemistry and Physics (84th Edition). New York: CRC Press LLC, 2003.
- [63] 吴建初. 盲孔锻造液压缸的超声波探伤. 无损检测, 1993, 15 (17): 185~187.
- [64] 陈建光. 热管工质的智能化超声检测仪. 无损检测, 1998, 20 (9): 252~253.
- [65] 张淑仪. 激光超声与材料无损评价. 应用声学, 1992, 11 (4): 1~6.
- [66] 刘旭, 夏金东, 弓乐, 吴森. 超声检测缺陷分类中信号处理方法的探讨. 仪器仪表学报, 2002 (6): 638~641.
- [67] 刘旭, 夏金东, 吴森. 超声检测缺陷分类的降噪及特征提取问题研究. 中国矿业大学学报 (自然科学版), 2001, 30 (3): 248~251.
- [68] 吴森, 张海燕, 孙智等. 超声检测缺陷分类的小波分析与神经网络方法. 中国矿业大学学报, 2000, 29 (3): 239~243.
- [69] Dale W. Fitting, Laszlo Adler. Ultrasonic Spectral Analysis for Nondestructive Evaluation. New York and London: Plenum Press, 1981.
- [70] 朱红秀, 吴森, 刘卓然. 电磁超声传感器机理的理论研究. 无损检测, 2005, 27 (5): 231~234.
- [71] 张勇, 陈强, 孙振国等. 用于无损检测的电磁超声换能器研究进展. 无损检测, 2004, 26 (6): 275~279.
- [72] 张建卫. ASTM E1774-96 电磁超声换能器 (EMAT) 标准导则. 无损探伤, 2003, 27 (1): 18~23.
- [73] 罗瑞灵, 陈立功, 刘毅萍. 电磁超声换能器在残余应力超声测量中的应用. 无损检测, 1998, 20 (11): 316~319.
- [74] 单宝华, 喻言, 欧进萍. 超声相控阵检测技术及其应用. 无损检测, 2004, 26 (5): 235~238.
- [75] 莫瑕琳. 超声环形相控阵换能器在锻件探伤中的应用. 无损检测, Vol. 28, 2006 (2): 81~83.
- [76] 李衍. 管道环焊缝相控阵超声探伤技术的应用. 无损检测, 2002, 24 (9): 386~390.
- [77] 周琦, 刘方军, 李志军等. 超声相控阵成像技术与应用. 兵器材料科学与工程, 2002, 25 (3): 34~37.
- [78] Macovski A. Ultrasonic imaging using arrays. Proceedings of IEEE, 1979, 67 (4): 484~495.
- [79] Lawrence Azar, Shi-Chang Wooh. Experimental characterization of ultrasonic phased arrays for the nondestructive evaluation of concrete structures. Materials Evaluation, 1999, 57 (2): 134~140.
- [80] Song Sung-Jin, Hyeon Jae Shin, You Hyun Jang. Calculations of radiation field of phased array transducers using boundary diffraction wave model [A]. 15th World Conference on Non-Destructive Testing [C]. Roma. 2000-10, 15.
- [81] 钟志民, 梅德松. 超声相控阵技术的发展及应用. 无损检测, 2002, 24 (5): 69~71.
- [82] 赵斌. 全自动超声波检测技术在西气东输管道工程中的应用. 石油工程建设, 2004, 30 (04): 10~13.

第四章

射线检测

射线检测的历史最早可以追溯至 1895 年 X 射线的发现, 1911 年德国 Müller (米勒) 博士发明了世界上第一 X 射线管, 为 X 射线检测的应用创造了物质条件。

在 X 射线被发现的初期, 射线检测主要应用于医学领域。射线检测工业应用的探索大约开始于 20 世纪 20 年代, 但射线无损检测的重要性直到第二次世界大战期间才获得真正广泛的认识, 并自此掀开了射线检测的新篇章。

目前, 射线检测已发展成为五种常规的无损检测方法之一, 与超声检测共同占据无损检测的主导地位, 在石油、化工、电力、机械、冶金、核工业等工业部门, 以及航空、航天等领域获得广泛应用。射线检测在提高产品质量、降低生产成本、保障设备的安全运行等诸多方面做出了重要贡献。在我国, 射线检测已有较长的历史, 并形成了一支庞大的技术队伍, 是目前工业生产和科学研究中应用最广泛的无损检测方法之一。

第一节 概 述

一、射线及其种类

所谓射线, 是指波长较短的电磁波, 或运动速度高、能量大的粒子流。

射线有多种类型, 如微波、红外线、阴极射线、 β 射线、 α 射线和质子射线、X 射线、 γ 射线及中子射线等, 图 4-1 所示是简单的电磁波谱。

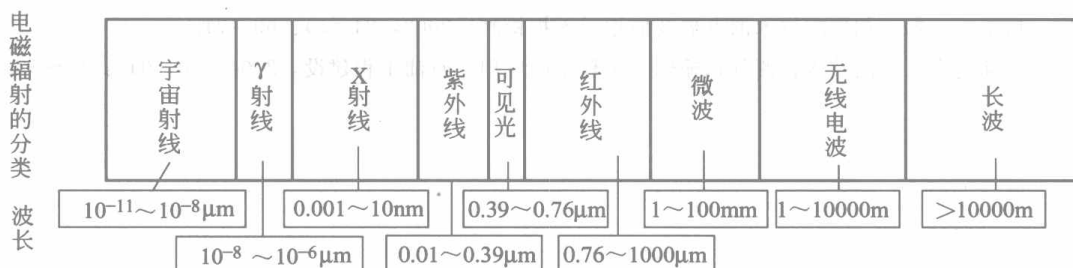


图 4-1 电磁波谱

阴极射线、 β 射线、 α 射线和质子射线等是直接电离辐射所产生带电离子, 由于它们带有电荷, 所以在与物质发生作用时, 要受原子库仑场的作用而发生偏转。还会以物质中原子激发、电离或本身产生场致辐射的方式损失其能量, 故其穿透本领较差, 因而一般不直接用于无损检测。

微波和红外线的能量很低, 不足以引起物质发生电离。利用微波、红外进行无损检测的技术分别称为微波检测和红外检测, 对红外检测将在后面第九章中进行讨论。

X 射线、 γ 射线及中子射线等是间接电离辐射所产生的不带电的离子。由于它们都

属于电中性，不会受到库仑场的影响而发生偏转，且贯穿物质的本领较强，故被广泛地用于无损检测。通常所说的射线检测就是指 X 射线、 γ 射线及中子射线检测。本章主要讨论 X 射线和 γ 射线检测，对中子射线检测只进行简要介绍。由于 X 射线检测和 γ 射线检测有很多相似之处，所以，如不特别说明，对 X 射线检测的有关讨论也同样适合于 γ 射线检测。

二、射线的发现

1. X 射线的发现

1895 年 11 月 8 日，德国维尔茨堡大学教授、物理学家威廉·康拉德·伦琴 (Wilhelm·Konrad Röntgen; 1845. 3. 27~1923. 2. 10) 在进行阴极射线实验时，发现了一种能穿透物质并使荧光屏闪光的射线，因对该种射线的本质一时还不清楚，故取名为“X 射线”，后人为纪念伦琴的这一伟大发现，又将 X 射线命名为伦琴射线。伦琴因发现 X 射线而于 1901 年荣获首届诺贝尔物理学奖。

2. γ 射线的发现

1896 年 2~5 月间，出身于科学世家的法国科学家安东尼·亨利·贝克勒耳 (Antoine Henri Becquere; 1852. 12. 15~1908. 8. 25) 发现了金属铀的天然放射性现象，并且发现所放射出来的射线的强度与试样中的含铀量有关，这标志着原子核物理学的开端。科学界为了表彰他的杰出贡献，将放射性物质的射线定名为“贝克勒耳射线”。后经居里夫妇等的努力，发现钍、钋、镭都会放射这种射线，从而把这种现象定名为放射性，把放射性物质所发出的射线命名为“ γ 射线”。贝克勒耳和居里夫妇因此共同荣获 1903 年的诺贝尔物理学奖。

三、射线检测的基本原理、特点及应用

1. 射线检测的基本原理

射线在穿过物质的过程中将发生衰减而使其强度降低，衰减的程度取决于被检材料的种类、射线种类以及所穿透的距离。当把强度均匀的射线照射到物体（如平板）上一个侧面时，由于各部位对入射射线的衰减不同，透射射线的强度分布将不均匀。这样，采用照相、荧光屏观察等手段，通过在物体的另一侧检测射线在穿过物体后的强度分布，就可检测出物体表面或内部的缺陷，包括缺陷的种类、大小和分布状况。射线检测的基本原理如图 4-2 所示。

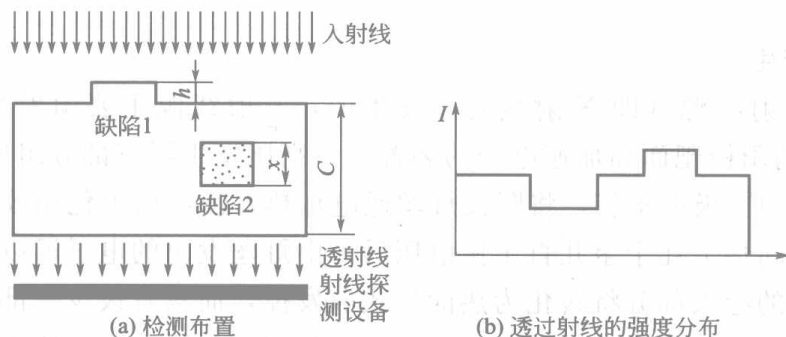


图 4-2 射线检测的基本原理

2. 射线检测的特点

与其他检测方法相比，射线检测的主要优点如下。

① 检测结果直观。射线检测输出的是图像信息,该图像与试样(包括其中缺陷)有比较好的对应,两者之间近似几何投影关系,因此,对检测结果的解析比较容易。

② 缺陷定性比较容易,定量、定位也比较方便。射线检测能比较直观地判别气孔、夹杂、裂纹等缺陷类型及其大小(射线投影方向的平面尺寸),缺陷水平位置的确定很容易,垂直位置(深度方向的位置)的确定也不难。

③ 检测结果可以保存。射线检测结果可以制成胶片或生成数据文件,可以长期保存。

④ 适用对象广,对材料的种类(金属、非金属、复合材料)及工件的形状几乎没有限制。

射线检测的局限性如下。

① 检测成本较高。射线检测不仅有 X 射线探伤机等设备的损耗费用,还有胶片等物品的消耗,因而检测费用比较高。

② 对体积型缺陷的检测灵敏度较高,对平面型缺陷的检测灵敏度较低,如当射线方向与平面缺陷(如裂纹)垂直时就很难检测出来,只有当裂纹与射线方向平行时才能够对其进行有效的检测。

③ 需双面法检测。常规射线检测的入射和出射分别在被检件的相对两侧,这使某些条件下的射线检测很不方便。

④ 存在安全隐患,应注意射线防护。无论哪种射线,都能对生物造成伤害,对 X 射线而言,只要 X 射线机在工作,在其附近的人员就有受辐射伤害的危险;而同位素射线(如 γ 射线)是源源不断地发生射线的,所以其辐射危险时时存在。而且,射线不只是笔直地向前辐射,它还可通过被检物、周围的墙壁、地板以及天花板等障碍物进行反射与透射传播,从而增大了其危害性。因此,射线检测中的安全防护工作特别重要。

3. 射线检测的应用

射线检测目前主要应用于机械、兵器、造船、电子、石油化工、土木工程、航空航天等领域中的铸件和焊缝的检测,以及机场、车站、码头、海关等的安全检查。也可用来测量材料的厚度。可以相信,随着研究的深入,射线检测的应用领域将不断扩大,所能检测的材料种类将会越来越多,检测试样的尺寸范围也将不断扩展。

第二节 射线检测的物理基础

一、射线的产生

1. X 射线的产生

X 射线是由 X 射线源(即 X 射线管)发生的,X 射线源主要由发射电子的灯丝(阴极)、受电子轰击的阳极靶面和加速电子的装置——高压发生器三部分组成,如图 4-3 所示。

X 射线管是一种二极电子管,将阴极灯丝通电加热,使之白炽化而放出电子。在管的两极(灯丝与靶)之间加上几十至几百千伏电压后,由灯丝发出的电子即以很高的速度撞击靶面,此时电子能量的绝大部分将转化为热能形式散发掉,而只有极少一部分(1%~3%)以 X 射线的形式辐射出来,其波长为 0.001~10nm。如图 4-4 所示是钨靶的 X 射线谱,由图可见,它是一种混合线,由连续 X 射线和标识 X 射线两部分组成。

连续 X 射线,其波长在长波方向可扩展至 ∞ ,短波方向存在最小值 $\lambda_{\min}$,该最短波长 $\lambda_{\min}$ 取决于管电压:

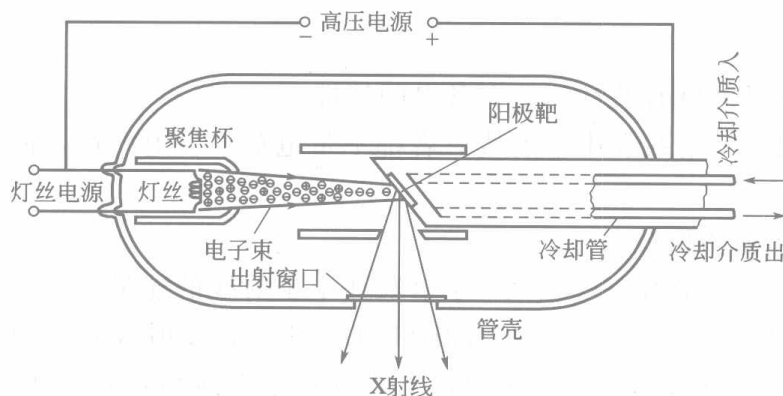


图 4-3 X 射线的产生示意

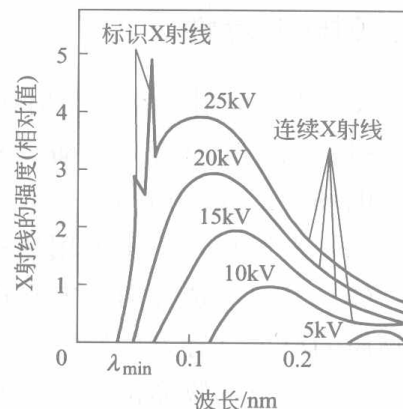


图 4-4 钼靶的 X 射线谱

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eV} = \frac{1239.5}{V} \text{ (nm)} \quad (4-1)$$

式中 h ——普朗克常数，其值为 $6.6256 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ；

c ——光的传播速度，其值为 $2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ ；

e ——电子电荷，其值为 $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ ；

V ——管电压，V。

产生连续 X 射线的原因主要有：

① 由于加在 X 射线管两端的高压不是恒定的，因此电子获得的能量有大有小，能量大的产生的 X 射线波长短，能量小的产生的 X 射线波长长；

② 飞向阳极的电子，在与阳极靶碰撞时的能量消耗也不完全相同，少数电子能与阳极靶的原子核直接碰撞，使其运动被立即阻止，能量全部转换为光能，产生的 X 射线波长短；其他大部分电子打入阳极靶的内部，其能量的消耗较慢，产生的 X 射线波长长；还有一部分电子可能撞击不到阳极靶，而是撞击阳极的其他部位，造成极柄辐射。阴极柄与阳极靶的材料不同，产生的 X 射线自然就不相同。

标识 X 射线是阳极靶的电子在其能级之间跃迁产生的。当管电压超过某一临界值时，电子能量增高到足以使原子中的核外电子激发或脱离原子时，原子在低能级处于稳定态的核外电子向高能级升迁或被击出，从而在低能级处造成一个空穴，使原子处于不稳定状态。邻近高能级层中的核外电子就会跃至低能级，更远的高能级层中的核外电子也可能跃至较低能级空穴。这样，当一个内层电子被激发，就可能引起一系列外层电子的跃迁。外层高能级上的电子向内层低能级跃迁将释放出多余能量，而以 X 射线形式呈现，其能量或波长是确定的，这样就形成了标识 X 射线，也称特征 X 射线。每种元素都有其特定的标识 X 射线。

在工业射线检测中所获得的 X 射线谱中既有连续谱，也有标识谱，但起主要作用的是连续谱，因为，与连续射线相比，标识射线的能量要小得多。

2. γ 射线的产生

γ 射线是放射性同位素（人工的、天然的）的原子核在自然衰变过程产生的，它也是一种电磁波。由于镭-226、铀-235 等天然放射性同位素，不仅价格高，而且还不能制成体积小而辐射能量高的射线源，因此射线探伤中使用的 γ 射线源是由核反应制成的人工放射线源，应用较广的 γ 射线源有钴-60、铱-192、铯-137、铪-170、钇-169 等。

二、射线的特性

X 射线、 γ 射线和中子射线三者之间既有共性，又有各自的特性。

(1) 以光速沿直线传播 X 射线、 γ 射线和中子射线三者都不带电荷，呈电中性，故均不受电场和磁场的作用。

(2) 不可见，也不能用透镜聚光或用棱镜分光。

(3) 具有穿透能力，能穿透不透明的物质 X 射线、 γ 射线和中子射线的能量都随被穿透物质的厚度（穿透的距离）的增加而衰减，但它们的作用机制不同。对 X 射线和 γ 射线而言，被穿透的物质的原子序数越大，衰减越严重，所以，X 射线和 γ 射线很容易穿透氢、硼等轻元素（即原子序数小的元素），而不易穿透铅等重金属。中子射线则不然，其衰减系数的大小与原子序数之间没有简单的对应关系，氢、硼等轻元素对中子射线吸收系数特别大，而铁、铅等重元素对中子的吸收系数反而小。此外，同一元素的不同同位素，中子的质量吸收系数也差别很大。正是由于这些吸收系数的差异，使中子射线具有不同于 X 射线和 γ 射线检测的某些特点，从而三者之间相互补充。

(4) 具有波粒二象性 X 射线、 γ 射线和中子射线在材料传播的过程中，可以产生折射、反射、干涉和衍射等现象，但不同于可见光在传播时的折射、反射、干涉和衍射。

(5) 具有光化作用 X 射线、 γ 射线和中子射线都能使某些物质起光化学反应，使某些物质产生荧光现象，能使 X 光胶片感光，但中子对 X 光胶片的作用效率较低。

(6) 具有生物效应，能杀伤或杀死有生命的细胞 因射线具有一定能量，当穿过某些气体时与其分子发生作用而电离，能产生生物效应，杀死有生命的细胞，特别是中子射线，它具有比 X 射线和 γ 射线更强的杀伤力。因此，射线检测中存在安全隐患，应特别注意安全防护。

(7) 具有荧光效应 射线能使某些材料发出荧光，荧光屏就是利用荧光效应将某些射线转换为光的。

(8) 具有电离性质 X 射线和 γ 射线能排斥原子层中的电子，使气体电离，也能影响液体或固体的电特性。

(9) X 射线束是具有混合波长的连续光谱，而 γ 射线是单一或窄束波谱。

三、射线与物质的相互作用和衰减

X 射线和 γ 射线穿过物质时，将与物质中的原子发生撞击、发生能量转换，并引发上述物理效应，造成射线能量的衰减。

1. 射线与物质的相互作用

X 射线和 γ 射线在穿过物质的过程中，主要与物质发生光电效应、康普顿效应、汤姆森散射和电子对的产生等相互作用，并因此引起射线的衰减。

(1) 光电效应 指射线光子透过物质时，与原子壳层电子作用，将其所有能量传给电子，使电子脱离轨道而成为自由电子，而光子本身消失的现象。

当射线光子能量小时，只和原子外层电子作用；当射线光子能量大，加之与被检物质内层电子的相互作用，除产生上述光电现象外，还伴随次级标识 X 射线的产生，如图 4-5(a) 所示。

(2) 康普顿效应 当 X 射线的入射光子与被检物质的一个壳层电子碰撞时，光子的一

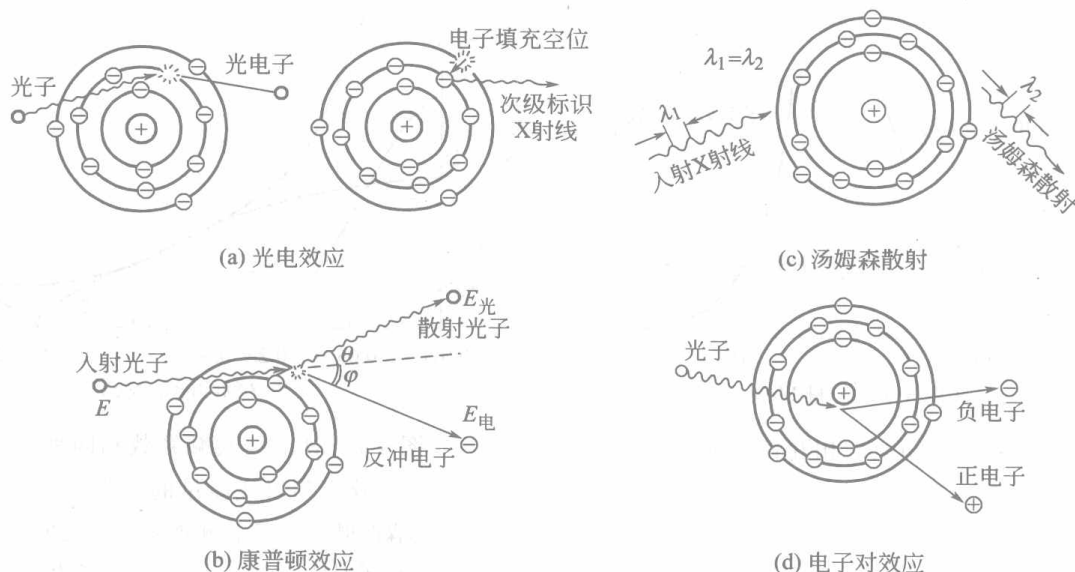


图 4-5 射线与物质的相互作用类型

部分能量传给电子并将其打出轨道（该电子称为康普顿电子），光子本身能量减少并改变传播方向，成为散射光子，这种现象叫做康普顿效应，也称康普顿散射，如图 4-5(b) 所示。

康普顿效应是由美国物理学家阿瑟·亨利·康普顿（Arthur Holly Compton, 1892.9.10~1962.3.15）教授研究发现的，康普顿效应宣布于 1923 年，确证于 1926 年。康普顿因此与英国物理学家威尔逊同获 1927 年的诺贝尔物理学奖。

康普顿效应导致射线强度的减弱，并产生波长较长和辐射方向不定的散射线危害，造成底片灰雾度增加、清晰度下降的不良影响。所以，在射线检验工作中应设法尽量减少这种危害。

(3) 汤姆森散射 射线与物质中带电粒子相互作用，产生与入射波长相同的散射线的现象叫汤姆森散射，如图 4-5(c) 所示。

这种散射线可以产生干涉，只有当射线的能量很低（ $<0.1\text{MeV}$ ）时才起作用，且能量衰减十分微小。

(4) 电子对效应 光子在原子核场的作用下，转化成一正、负电子，而光子则完全消失，这种现象叫做电子对的产生，也称电子对效应，如图 4-5(d) 所示。

电子对效应的发生存在一个最低能量极限 1.02MeV ，只有当射线光子的能量大于 1.02MeV 时，电子对效应才可能发生。

光电效应、康普顿效应、汤姆森散射和电子对效应是射线与物质相互作用的四种主要形式，它们的相对强弱，与射线的能量大小和被透射物质的种类有关，如图 4-6 所示。图 4-7 所示是铁的线衰减系数和四种效应随射线能量的变化情况。由图可见，光电效应和康普顿效应随射线能量的增加而减弱，而电子对效应则随射线能量的增加而增强。它们的共同结果是使射线在穿过物质的过程中产生衰减。

2. 射线穿过物质时的衰减

X 射线和 γ 射线穿过物质过程的衰减是由于射线光子与物质发生光电效应、康普顿效应、汤姆森散射和电子对效应，使射线被吸收或散射而引起的。衰减的规律可表示如下。

对单色平行射线有：

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad (4-2)$$

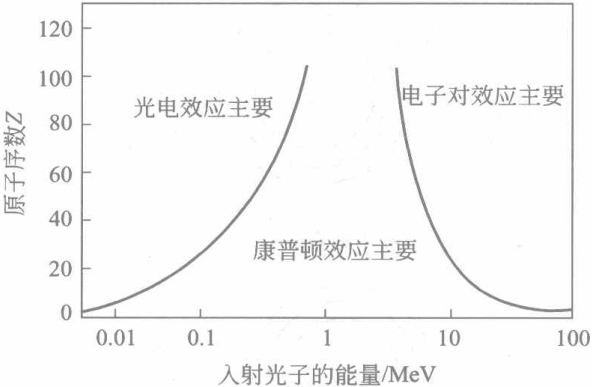


图 4-6 射线与物质的相互作用强度

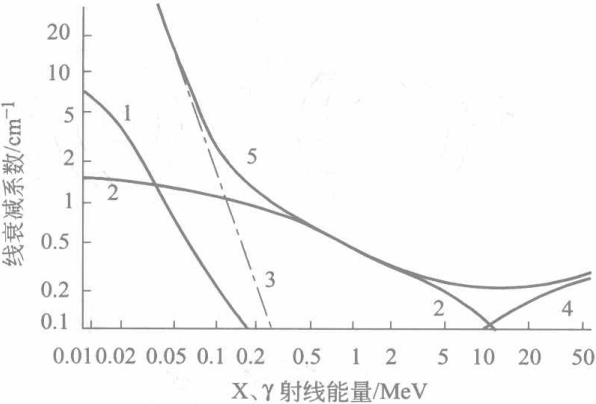


图 4-7 铁的线衰减系数和四种效应随射线能量的变化

1—汤姆森散射；2—康普顿效应；3—光电效应；
4—电子对效应；5—总的线衰减系数 μ

对实际上的锥体形射线束有：
$$I=I_0\left(\frac{H}{H+d}\right)^2e^{-\mu d} \tag{4-3}$$

式中 I_0 ， I ——分别为入射线和透射线的强度；
 d ——射线在被测物质中所穿越的距离，cm；
 H ——物体被透照表面至射线源的距离，cm；
 μ ——线衰减系数， cm^{-1} 。对 X 射线和 γ 射线，其值为

$$\mu=K\lambda^3Z^3 \tag{4-4}$$

其中 K ——比例系数；
 λ ——射线波长；
 Z ——被透物质的原子序数。

表 4-1 所示是几种常见材料的线衰减系数，供参考。

表 4-1 几种常见材料的线衰减系数 μ/cm^{-1}

射线能量 /MeV	H ₂ O	C	Al	Fe	Cu	Pb	射线能量 /MeV	H ₂ O	C	Al	Fe	Cu	Pb
0.25	0.124	0.260	0.290		0.910	2.70	3.50	0.033	0.078	0.095	0.260	0.310	0.42
0.50	0.095	0.200	0.220	0.665	0.700	1.80	4.00	0.032	0.069	0.086	0.250	0.300	0.46
0.75	0.078	0.170	0.190	0.544	0.580	1.06	4.50	0.031	0.068	0.078	0.245	0.280	0.47
1.00	0.069	0.150	0.160	0.469	0.500	0.80	5.00	0.030	0.067	0.075	0.244	0.270	0.48
1.25	0.063	0.130	0.146	0.413	0.450	0.62	6.00	0.026	0.064	0.071	0.232	0.280	0.50
1.50	0.058	0.120	0.132	0.370	0.410	0.58	7.00	0.025	0.061	0.068	0.233	0.300	0.53
1.75	0.052	0.110	0.122	0.337	0.380	0.55	8.00	0.024	0.059	0.065	0.233	0.300	0.55
2.00	0.050	0.100	0.150	0.313	0.350	0.48	9.00	0.023	0.057	0.063	0.214	0.310	0.58
2.50	0.043	0.087	0.105	0.280	0.330	0.44	10.00	0.022	0.054	0.061	0.214	0.310	0.60
3.00	0.041	0.083	0.100	0.270	0.320	0.42							

由于射线的衰减可分解为吸收和散射两部分，所以线衰减系数 μ 为吸收系数和散射系数之和，即有

$$\mu = \tau + \sigma \quad (4-5)$$

式中 τ ——线吸收系数;

σ ——线散射系数。

因为物质的密度越大,射线在物质中传播时碰到的原子越多,其衰减也越大。为方便比较,通常采用质量衰减系数。所谓质量衰减系数,即线衰减系数与物质密度的比值,记为 μ_ρ , 即有

$$\mu_\rho = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho} = \tau_\rho + \sigma_\rho \quad (4-6)$$

式中 ρ ——物质的密度, kg/m^3 ;

μ_ρ ——质量衰减系数, m^2/kg ;

τ_ρ ——质量吸收系数, m^2/kg ;

σ_ρ ——质量散射系数, m^2/kg 。

X 射线和 γ 射线的质量吸收系数和质量散射系数分别为:

$$\tau_\rho = \frac{C}{A} Z^4 \lambda^3 \quad (4-7)$$

$$\sigma_\rho = 0.4 \frac{Z}{A} \quad (4-8)$$

式中 C ——常数;

A ——元素的原子数;

Z ——元素的原子序数;

λ ——射线的波长, nm 。

图 4-8 所示是铅、铁、铝和水的质量衰减系数随射线能量的变化曲线,可见,随射线能量的增加,它们的质量衰减系数呈下降趋势。

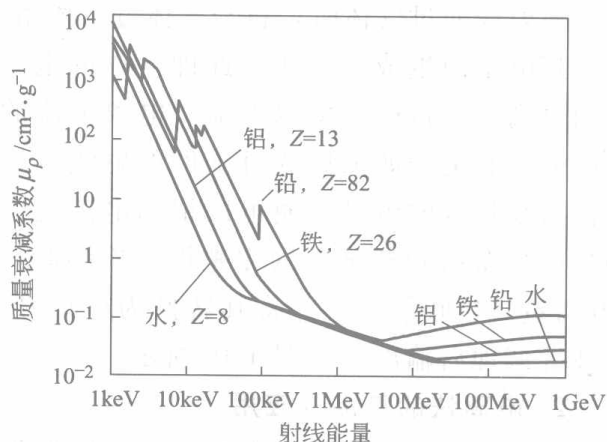


图 4-8 几种物质的质量衰减系数随射线能量的变化

第三节 射线检测方法

强度均匀的射线透过被检工件后,对其强度的检测有多种方法,如胶片照相法、荧光屏直接观察法、电视观察法、电离检测法等传统方法,以及目前正逐步兴起的射线 CT (Computed Tomography)、直接数字成像 (DR: Digital Radiography) 和射线实时成像 (RTR: Real-time Radiography) 等方法,本节只简要介绍胶片照相法、电离检测法、荧光屏直接观察法和电视观察法,对射线 CT 将列单节进行讨论,对直接数字成像和射线实时成像,请读者参阅其他文献,本书不予讨论。

一、照相法

目前,射线检测的照相法有胶片照相法和 CCD 直接成像等多种,它们之间的主要差别源于检测射线的介质不同,因此在检测速度和检测灵敏度等方面也有所差异,这里只讨论胶片照相法。

1. 胶片照相检测法的原理

将感光材料 (胶片) 置于被检测试件后面,用来接收透过试件后的射线,如图 4-9 所

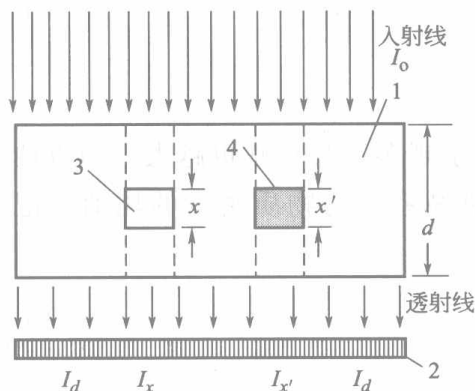


图 4-9 射线照相检测原理示意
1—被透照试件；2—射线感光胶片；
3—气孔；4—夹渣

示。因为胶片乳剂的摄影作用与感受到的射线强度有直接的关系，经过暗室处理后，就会得到被检物的结构影像。根据底片上影像的形状和黑度的不均匀情况来评定材料中有无缺陷及缺陷的性质、形状、大小和位置。

2. 胶片照相检测法的特点及应用

照相法的优点是灵敏度高、结果直观、重复性好、检测结果可长期保存等；其不足之处在于检测过程比较慢，且有胶片的消耗，因而检测费用相对较高。

照相法是目前最常用的射线检测方法之一，在工农业生产、基础设施建设和科学研究中应用非常广泛。

二、电离检测法

1. 电离检测法的工作原理

当射线通过气体时，将与气体分子撞击使其失去电子而电离，生成正离子，有的气体分子得到电子而生成负离子，此即气体的电离效应。气体的电离效应将产生电离电流，电离电流的大小与射线的强度有关。如果让透过试件的射线再通过电离室进行射线强度的测量，便可以根据电离室内电离电流的强度分布来判断试件的完整性。检测时，可用探头（电离室）接收射线，并将其转换为电信号，经放大、滤波等调理后输出，如图 4-10 所示。

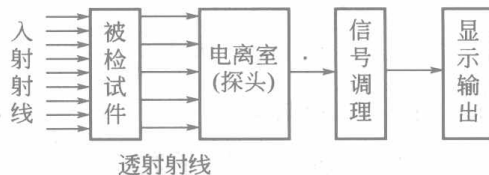


图 4-10 电离法检测原理示意

2. 电离法的特点及应用

电离检测法的自动化程度高，可对被检件进行自动、连续检测，检测成本低，但只适用于形状简单、表面平整的工件，缺陷定性比较困难。因此在探伤方面应用较少，但可制成专用设备，如用于自动检测弹壳的 X 射线装置。德国塞福特公司研制的 X 射线子弹壳分选设备，每小时可检测 7200 个子弹壳。

三、荧光屏直接观察法

将透过试件的射线投射到涂有荧光物质（如 ZnS/CaS）的荧光屏上时，在荧光屏上会激发出荧光来，成为可见影像，由此直接辨认被检件中是否存在缺陷，如图 4-11 所示是荧光屏直接观察法的检测原理示意。

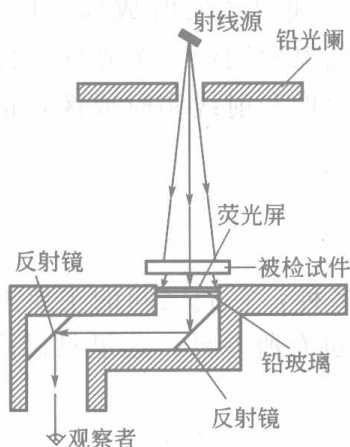


图 4-11 荧光观察法示意

普通荧光屏直接观察法的相对检测灵敏度约为 7%，采用电子聚焦荧光辉度倍增管配合小焦点的 X 射线机，使荧光屏上的亮度、清晰度增加，检测灵敏度可达 2%~3%。

从荧光屏上观察到的缺陷等影像，如果需要，可用照相机等设备拍摄下来。

荧光屏直接观察法具有成本低、效率高、可连续检测等优点，适应于形状简单、要求不严格的产品检测。

四、电视观察法

电视观察法是荧光屏直接观察法的发展,就是将荧光屏上的可见影像通过光电倍增管增强图像,再通过电视设备显示。这种方法自动化程度高,可观察静态或动态情况,但检测灵敏度比胶片照相法低,对形状复杂的零件检查较困难。

第四节 射线照相检测设备

射线照相检测设备主要包括 X 或 γ 射线探伤机、透度计、增感屏、感光胶片、观片灯、射线强度检测设备和暗室设备等,除此之外,根据检测工作的需要,还可能有试样传送、标志工具等其他辅助设施。这里简要介绍射线探伤机、透度计(像质指示计)、增感屏和感光胶片。

一、射线探伤机

射线探伤机是射线检测中的关键设备,根据其产生射线的方式不同,可分为 X 射线探伤机和 γ 射线探伤机两大类。

(一) X 射线探伤机

X 射线探伤机是 X 射线检测的主体设备,主要由 X 射线管、高压发生电路、冷却系统和控制系统等部分构成,其核心是 X 射线管。X 射线管有玻璃管、金属管、陶瓷管,定向辐射、周向辐射,普通焦点、微焦点等种类。

1. X 射线探伤机的主要类型

可以根据 X 射线探伤机的大小或重量、辐射方式、穿透能力、焦点大小、制冷方式等对其进行分类,不同的分类标准有不同的种类名称。

(1) 按体积或重量分 可将 X 射线探伤机分为固定式、移动式和便携式三种主要类型。固定式 X 射线探伤机因其体积较大、重,故一般只能固定在室内使用;便携式 X 射线探伤机因小巧轻便,便于携带至检测现场使用,在工业检测中应用较多,图 4-12 是某便携式 X 射线探伤机;移动式的体积和重量界于前两者之间,图 4-13 是某移动式 X 射线探伤机。图 4-14 是专门用于工业管道(输油管道、输气管道、供水管道等)射线检测的 X 射线管道爬行器。

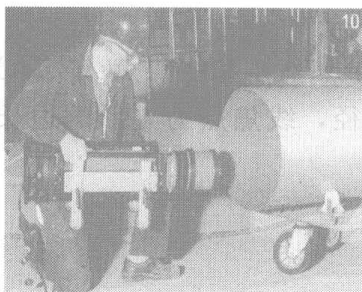


图 4-12 便携式 X 射线探伤机

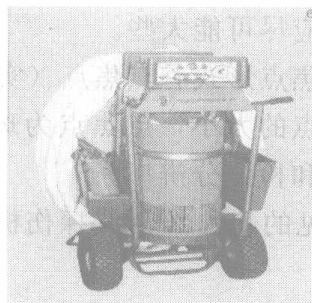


图 4-13 移动式 X 射线探伤机

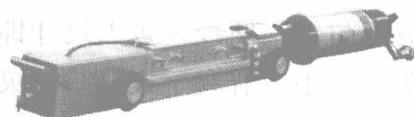


图 4-14 X 射线管道爬行器

(2) 按辐射方向分 可将 X 射线探伤机分为定向辐射和周向辐射两种。其中定向辐射是指在某个固定的角度范围内(一般为 $40^\circ \pm 1^\circ$)发射 X 射线;而周向辐射则是 360° 范围内

发射 X 射线。定向辐射和周向辐射的示意如图 4-15 所示。周向辐射 X 射线探伤机主要用于管道等环形工件的内部检测。

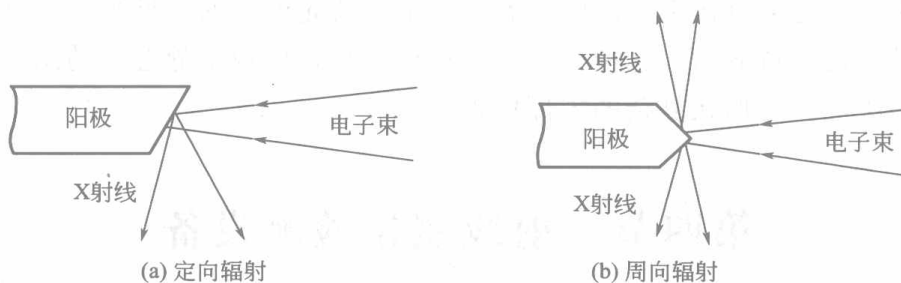


图 4-15 定向辐射和周向辐射的示意

(3) 按穿透能力分 可将 X 射线探伤机分为软 X 射线探伤机、硬 X 射线探伤机和高能 X 射线探伤机三种。

软 X 射线探伤机一般采用较低的管电压（通常在 $0 \sim 100\text{kV}$ ），射线由铍窗口直接辐射出来，因而可以得到波长较长的 X 射线。它主要应用于非金属材料 and 轻金属等重量轻、密度小的材料的 X 射线检测。

硬 X 射线探伤机一般采用较高的管电压（通常为 $100 \sim 460\text{kV}$ ），有较大的穿透能力。

高能 X 射线探伤机则是采用加速器产生的 X 射线，其能量可高达数十兆电子伏，因而具有更大的穿透能力（可超过 γ 射线探伤机），主要用于厚大件的检测。

(4) 按焦点大小分 可将 X 射线探伤机分为普通焦点 X 射线探伤机、细焦点 X 射线探伤机、极细焦点 X 射线探伤机和微焦点 X 射线探伤机几种。焦点越细，检测灵敏度和检测分辨率都越高。目前，微焦点 X 射线探伤机的焦点可达 $3\mu\text{m}$ ，甚至更小。

(5) 按制冷方式分 根据对阳极靶的冷却方式，可将 X 射线探伤机分为循环水冷、循环油冷和强制风冷三种类型。

2. X 射线探伤机的主要技术指标

X 射线探伤机的主要技术指标有：管电压、管电流、焦点形式及尺寸、辐射角大小以及体积、重量等。

(1) 管电压 它决定 X 射线探伤机的穿透能力，管电压越高，其穿透能力越强，可检测的工件越厚。实际检测中，在满足穿透能力的前提下，尽量选用较低的管电压，以减少散射影响、提高清晰度。

(2) 管电流 它影响检测时的曝光时间的长短，在其他条件不变的情况下，管电流越大，曝光时间越短。因此，管电流应尽可能大些。

(3) 焦点形式及尺寸 常见的焦点形式有点焦点（实际为圆形焦点）和线焦点（实际为方形焦点）两种，焦点尺寸即为焦点的大小，点焦点为斑点的直径，线焦点为方形的边长。焦点减小，有利于提高检测灵敏度和检测分辨率。

表 4-2 所示是目前国内比较常见的几种 X 射线探伤机。

(二) γ 射线探伤机

1. γ 射线探伤机的主要类型

γ 射线探伤机可按结构和放射源的种类进行分类。

(1) 按结构分 γ 射线探伤机按结构可分为移动式和携带式两种。

移动式 γ 射线探伤机具有较大的放射性活度 A [通常在 $3.7 \times 10^{10} \text{Bq}$ (贝可) 以上]，

表 4-2 几种常见的 X 射线探伤机

型 号	管电压 /kV	管电流 /mA	焦点 /mm	辐射角 /(°)	尺寸/mm		质量/kg		电源/kW	厂家
					发生器	控制器	发生器	控制器		
300EG-S3	160~300	5	2.5×2.5		737×320×320	420×395×245	38.5	25	2.3	Rigaku
250EG-S3	110~250	5	2.0×2.0		632×320×320	355×345×240	29	17	3.6	Rigaku
200EG-S3	70~200	5	2.0×2.0		607×262×262	355×345×240	21	17	2.4	Rigaku
200EG-SP2	90~200	3	2.0×2.0		535×196×196	355×345×240	15.5	17	16	Rigaku
100GS-B	20~100	5	1.0×1.0		572×262×262	425×395×245	21.5	22	16	Rigaku
300EG-B2-F	200~300	5	1.0×2.5		785×356×356	420×395×245	54	25	2.4	Rigaku
250EG-B2-F	160~250	5	1.0×2.4		698×320×320	420×395×245	33	22	1.8	Rigaku
200EG-B1-C	120~200	5	1.0×3.5		630×262×262	420×395×245	21	22	1.4	Rigaku
Y. TU/450-D02	60~450	2/10	2.5/5.5 ^①	40			95		0.9/4.5	YXLON
Y. TU/450-D05	20~450	3.3/10	2.0/6.3 ^①	40			114		1.5/4.5	YXLON
Y. TU/450-D05	20~450	2.1/4.9	1.9/3.6 ^①	40×30			114		1.5/4.5	YXLON
MG103/4.5	5~100	0.5~60		40	375×335×625	483×133×300	80	12.5	4.5	YXLON
MG165/2.25	7.5~160	0~22.5		40	375×335×625	483×133×300	80	12.5	2.25	YXLON
MG165/4.5	7.5~160	0~45		40	375×335×625	483×133×300	80	12.5	4.5	YXLON
MG226/2.25	10~225	1~15		40	514×364×624	483×133×300	125	12.5	2.25	YXLON
MG226/4.5	10~225	0~30		40	514×364×624	483×133×300	125	12.5	2.25	YXLON
MG325	15~320	0~22.5		40	375×335×625	483×133×300	80	12.5	2.25	YXLON
MG452	20~450	0~15		40	514×364×624	483×133×300	125	12.5	2.25	YXLON
160E/0.4	10~160	2.0~6.0	1.0 ^①	40×55	667×284	444×352×166	23.0	10.5	0.64	YXLON
160E/1.5	10~160	2.0~6.0	3.0 ^①	40×55	667×284	444×342×166	23.0	10.5	0.96	YXLON
160W	10~160	2.0~6.0	1.0 ^①	40×40	606×295	444×352×166	21.5	11.3	0.64	YXLON
200	60~200	0.5~4.5	3.0 ^①	40×55	670×295	444×352×166	26.5	11.3	0.9	YXLON
200E	60~200	0.5~4.5	3.0 ^①	40×40	665×284	444×342×166	23.0	10.5	0.9	YXLON
XXQ-1005	20~100		0.8×0.8	40	Φ135×555	280×280×170	8.5	10	1.2	丹东
XXQ-1605	40~160		0.8×0.8	40	Φ195×610	280×280×170	16	10	1.5	丹东
XXQ-2005	100~200		1.5×1.5	40+5	Φ275×665	365×280×170	20	13.5	2.0	丹东
XXQ-2505	150~250		2.0×2.0	40+5	320×320×730	365×310×225	37	19.5	2.5	丹东
XXQ-3005	170~300		2.3×2.3	40+5	340×340×830	365×310×225	44	21.5	3.0	丹东
XXH-1005	20~100		1.0×3.5	周 向 辐 射,锥靶 30+5, 平靶 25 +5	Φ135×555	280×280×170	8.5	10	1.2	丹东
XXH-1605	40~160		1.0×3.5		Φ195×610	280×280×170	16	10	1.5	丹东
XXH-2005	100~200		1.0×3.5		Φ275×665	365×280×170	20	13.5	2.0	丹东
XXH-2505	150~250		1.0×2.4		320×320×730	365×310×225	37	19.5	2.5	丹东
XXH-3005	170~300		1.0×2.3		340×340×830	365×310×225	44	21.5	3.0	丹东

① 据 EN12543 测定。

需用较厚的防护屏蔽层,因而整机的体积较大、重量较重、不易搬动。大多把主机装在一个可移动的小车上,在平整的地面移动。主要用于车间或实验室等固定场所对厚大物体进行 γ

射线检验。

携带式 γ 射线探伤机的放射性活度 A 一般较小 [通常在 3.7×10^{10} Bq (贝可) 以下], 可用较薄的屏蔽防护层, 因而整机的体积小、重量轻、移动性好。其主要用于高空、地下、水下野外等现场的 γ 射线检验。图 4-16 所示是携带式 γ 射线机。

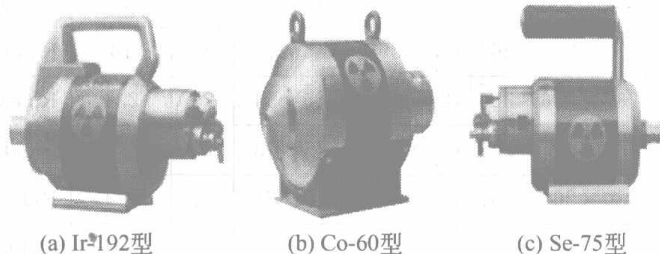


图 4-16 携带式 γ 射线探伤机

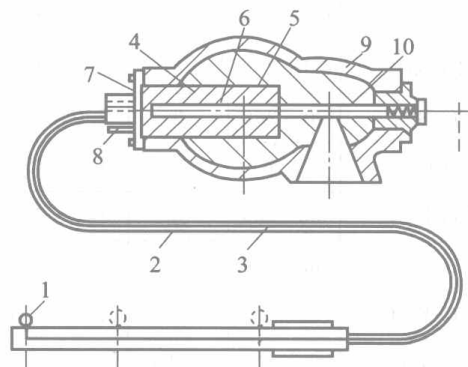


图 4-17 γ 射线探伤机的结构简图

1—闸把; 2—软管; 3—钢线; 4—保护套; 5—套筒;
6—放射源; 7—法兰; 8—连接支柱;
9—防护套; 10—圆柱形沟

如图 4-17 所示是某型 γ 射线探伤机的结构示意图。

(2) 按放射源的种类分 放射性同位素的种类很多, 但常用于 γ 射线检验的有钴 (^{60}Co)、铱 (^{192}Ir)、钇 (^{169}Yb)、铯 (^{137}Cs)、硒 (^{75}Se)、铪 (^{170}Tm) 等几种, 它们的特性如下。

① 钴 (^{60}Co) 半衰期适中, 光子能量较大, 是应用较广泛的放射性同位素。

② 铱 (^{192}Ir) 制造容易, 成本低, 特性稳定, 不易污染。虽然半衰期短, 但它可制成很小的体积, 以提高底片的清晰度, 且其光子能量较小, 可透照中薄材料, 因此应用范围很广。

③ 钇 (^{169}Yb) 光子能量适中, 价格很贵, 但可获得体积较小的射线源 (如直径为 0.3mm 的源, 强度为 1Ci 的源直径仅为 0.6mm), 适用于薄壁管道焊缝的检测。

④ 铯 (^{137}Cs) 半衰期很长, 光子能量适中, 适于透照中厚材料, 但制造较为困难, 且易于污染。

⑤ 硒 (^{75}Se) 光子的平均能量低于 ^{192}Ir , 可以获得高质量的图像, 适用于检测厚度在 4~30mm 范围的在役管线、压力容器和长输管线。

⑥ 铪 (^{170}Tm) 光子能量低, 相当于 30~150kV 的 X 射线光子能量, 所以特别适用于轻金属和较薄钢铁材料的 γ 射线检验。

表 4-3 为常用 γ 射线源的性能对比。

2. γ 射线探伤机的主要技术指标

γ 射线探伤机的主要技术指标有最大装源强度、透照范围、体积和重量等。

二、透度计

(一) 照相法的灵敏度

射线检测的灵敏度是指检测所能发现最小缺陷的能力, 是评定检测质量的主要标志。射线检测的灵敏度通常有两种计算和表示方法, 即绝对灵敏度和相对灵敏度。

表 4-3 常用 γ 射线源的性能对比

γ 射线源的种类		钴 (Co)	铱 (Ir)	铪 (Yb)	铯 (Cs)	铥 (Tm)	硒 (Se)
特性							
同位素		⁶⁰ Co	¹⁹² Ir	¹⁶⁹ Yb	¹³³ Cs	¹⁷⁰ Tm	⁷⁵ Se
γ 射线能量/MeV		1.17, 1.33	0.30~0.61 (平均 0.35)	0.063~0.308	0.662	0.084, 0.052	平均 0.206
当量能(相应的 X 射线能量)/kV		2000~3000 峰值	150~800 峰值	150~250 峰值	600~1500 峰值	30~150 峰值	100~400 峰值
半衰期		5.3 年	74.4 天	31 天	30 年	127 天	118 天
放射性活度为 3.7×10 ¹⁰ Bq 时, 1m 处每小时的照射量/C·kg ⁻¹		3.41×10 ⁻⁴	1.42×10 ⁻⁴	3.55×10 ⁻⁵	1.01×10 ⁻⁴	7.74×10 ⁻⁷	
适于检测的厚度/mm	钢	25~170	6~75		25~75	~12	4~30
	铝	—	25~100		30~120	4~50	
体积		小	很小	小	较大	小	小
相对重量		重	较重	较轻	较轻	轻	轻
相对价格		低	较低	贵	中	高	中

(1) 绝对灵敏度 是指在射线底片上能发现被检件中与射线平行方向的最小缺陷尺寸。

采用射线照相时, 对不同厚度的工件所能发现的缺陷的最小尺寸不同, 较薄的工件容易发现细小缺陷, 较厚的工件则只能发现尺寸稍大一些的缺陷, 所以采用绝对灵敏度往往不能反映对不同厚度的工件的透照质量。

(2) 相对灵敏度 是指在射线底片上能发现被检件中与射线平行方向的最小缺陷尺寸占缺陷处试件厚度的百分数, 用 K 来表示, 即有

$$K = \frac{X}{d} \times 100\% \tag{4-9}$$

式中 X ——平行射线方向的最小缺陷尺寸;

d ——缺陷处的工件厚度。

目前, 一般所说的射线照相灵敏度都是指相对灵敏度。

(二) 透度计的功能、主要类型及选用

1. 透度计的主要功能

由前面的讨论可知, 射线检测的灵敏度有绝对灵敏度和相对灵敏度两种评价指标, 它们都需要知道被检件中可检测的最小缺陷尺寸。但实际被检件中可检测的最小缺陷尺寸事先并不确知。那么, 被检件中可检测的最小缺陷尺寸如何确定呢? 一般采用带有人工缺陷的试块。透度计 (Penetrameter) 或称像质计、像质指示计 (IQI: Imaging Quality Indicator) 就是用来评定透照灵敏度、含有人工缺陷的一种标准试块。由透度计测得的灵敏度称为透度计灵敏度, 常用来表示底片的影像质量。透度计也常用来确定射线检验的透照参数。

2. 透度计的主要类型

目前, 射线检测用透度计各国不尽相同, 如金属丝式、槽式、阶梯板孔式、板式、双金属丝等, 我国采用金属丝式和槽式两种。

(1) 金属丝透度计

这种透度计是以一套 (7~11 根) 直径不同 (0.1~4.0mm) 的金属丝平行地排在粘紧

着的两块橡皮板或塑料板之间而构成的,如图 4-18 所示。金属丝可用钢、铁、铜、铝等材料制作,其灵敏度为:

$$K = \frac{b}{A} \times 100\% \quad (4-10)$$

式中 b ——在底片上可见的最小金属丝的直径, mm;

A ——工件沿射线透照方向的厚度, mm。

(2) 槽式透度计

槽式透度计是在一定厚度的金属板上加工出不同深度的槽而制成的,如图 4-19 所示。槽深一般为 0.1~6mm,用这种透度计计算的灵敏度为:

$$K = \frac{h}{T+d} \times 100\% \quad (4-11)$$

式中 h ——在底片上显示出来的透度计最浅槽的深度, mm;

T ——透度计处被检工件厚度, mm;

d ——透度计的厚度, mm。

槽式透度计的主要尺寸规格如表 4-4 所示。

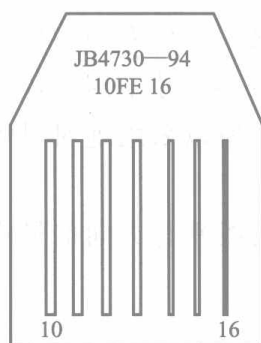


图 4-18 金属丝式透度计

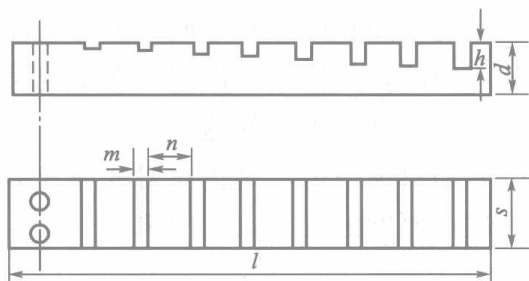


图 4-19 槽式透度计

表 4-4 槽式透度计的规格尺寸

规格尺寸 型号	外形尺寸			孔		槽		槽深 h /mm
	长 l /mm	宽 s /mm	厚 d /mm	孔数	孔径/mm	m	n	
1	26	10	2	1	1.5	2.5	5.0	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
2	52	15	3.5	2	2.0	2.5	5.0	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8
3	47	15	3.5	2	2.0	2.5	5.0	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0
4	50	15	8	3	2.0	2.5	5.0	1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0

(3) 其他透度计

图 4-20(a) 所示的台阶孔型透度计由法国人设计,被法国、英国和 ISO 采用,在每级台阶上钻有一两个直径与该级板厚相同的孔,孔径或板厚在 0.125~3.2mm 的范围内按 1.25 的比例递增,灵敏度的评定用最小可分辨的孔径表示,使用方法与金属丝透度计相同。

图 4-20(b) 所示板式透度计在美国获得广泛应用,其特点:材质与被透工件相同或相近,板厚 T 应为工件厚度的 2%,每块板上钻有直径为 T 、 $2T$ 和 $4T$ 的三个孔。灵敏度的评定方法有多种:用 2-2 T 、1-2 T 、2-1 T 等灵敏度等级表示,其中 2-2 T 表示 2%板厚上直径为 2 T 的孔可以分辨。用表 4-5 所示的等效灵敏度表示。

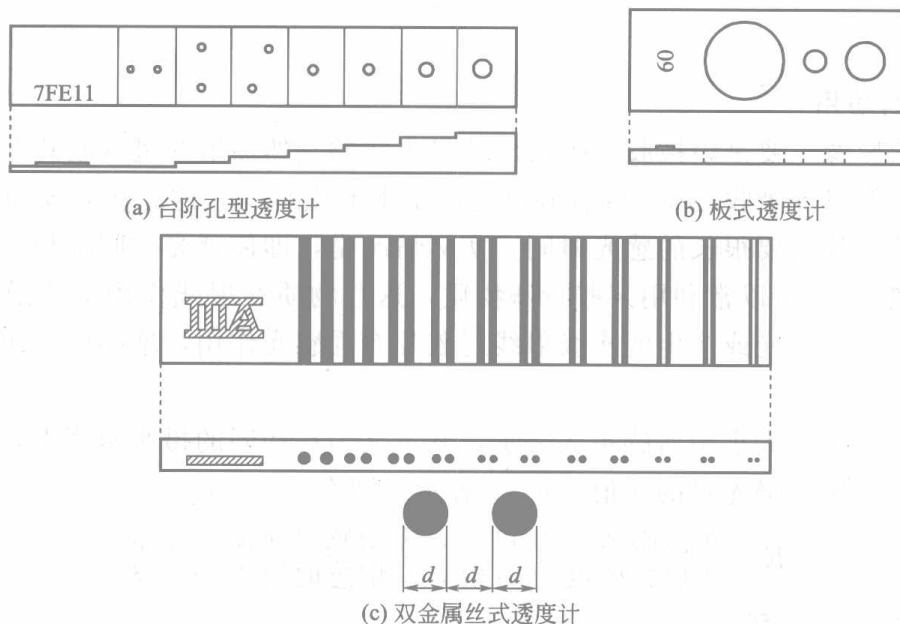


图 4-20 其他透度计

表 4-5 等效灵敏度等级

等 级	1-1T	1-2T	2-1T	2-2T	2-4T	4-2T
等效灵敏度	0.7	1.0	1.4	2.0	2.8	4.0

图 4-20(c) 所示双金属丝式透度计是英国标准 BS3971 推荐的透度计，其特点是：金属丝的直径范围为 0.05~1.6mm，每个尺寸都采用间距与其直径相同的双金属丝，可用检测的直径最小的金属丝作为评定灵敏度的依据。

3. 透度计的选用

(1) 透度计的选择 应根据被检件的材质、尺寸和灵敏度要求选择合适的类型，透度计的材质尽量与被检件的材质一致。

(2) 透度计的使用 除正确选择透度计类型及尺寸规格外，透度计在使用时的摆放位置也直接影响着检测灵敏度。原则上，应将透度计摆放在透照灵敏度最低的位置。为此，透度计应放在工件靠近射线源的一侧，并靠近透照场透度计边缘的表面上，让透度计上浅槽的一端或直径小的一侧远离射线中心。槽式和金属丝式透度计的摆放如图 4-21 所示。若选用金属丝式透度计，则应将其放在焊缝上，如图 4-21(b) 所示。原则上，每张底片上都必须要有透度计。

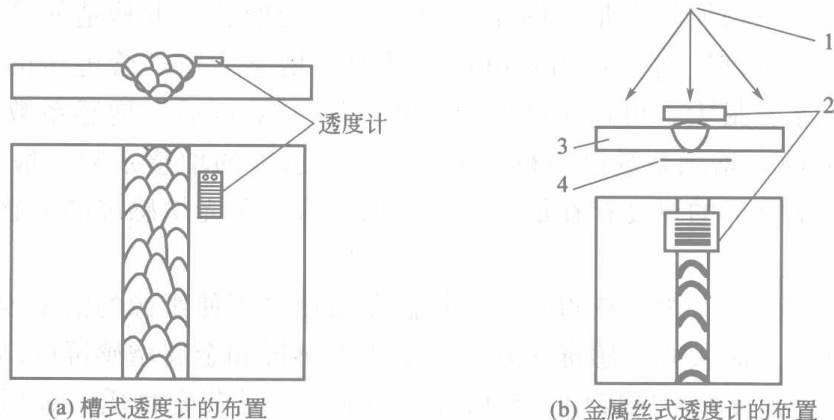


图 4-21 透度计的正确布置

1—射线源；2—透度计；3—被检工件；4—胶片

三、增感屏

1. 增感屏的功用

射线照相的影像主要是由被胶片吸收的能量决定的，然而射线进入胶片并被吸收的效率又是很低的，一般只能吸收约 1% 的有效射线能量来形成影像，这意味着要得到一张清晰的具有一定黑度的底片需要很长的感光时间。实际情况是，即使感光时间很长，往往也得不到满意的效果（黑度）。所以常利用某些特殊物质，这些物质在射线作用下能激发荧光或产生次级射线。激发出的荧光或产生的次级射线对胶片有强感光作用，增感屏是用这种特殊的物质制造的。

增感屏的增感效果大小用增感系数表示，其定义为在相同的摄影密度下，无增感时所需曝光量与有增感时所需曝光量的比值，用 K 表示，即有

$$K = \frac{\text{在摄影密度为 } D \text{ 时，无增感时所需曝光量}}{\text{在摄影密度为 } D \text{ 时，有增感时所需曝光量}} \quad (4-12)$$

2. 增感屏的主要类型

增感屏主要有金属增感屏、荧光增感屏和金属荧光增感屏三种类型。

(1) 金属增感屏 它是利用铅、锡等材料在射线作用下产生的二次射线来增加胶片感光量的，其构造如图 4-22(a) 所示。

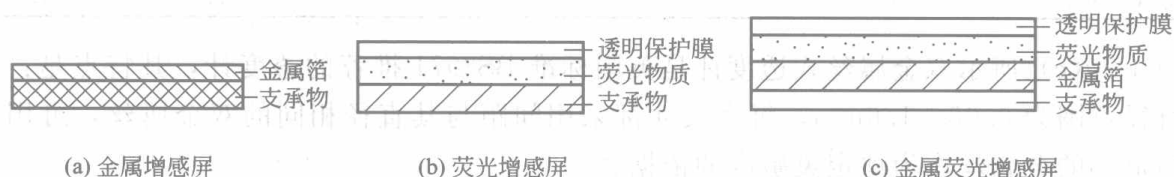


图 4-22 增感屏的构造

需要说明的是，金属增感屏的增感效果与射线能量有关，如果射线不能使金属原子电离或激发，则金属增感屏不仅不能增感，反而要吸收一部分射线。就 X 射线而言，若管电压低于 70kV 时，铅屏将无增感作用。前屏不能过厚，以免过多地吸收 X 射线和二次射线，铅屏一般为 0.02~0.10mm，后屏则可适当增厚。

金属增感屏不仅有增感的效果，还有吸收散射线的作用，因而影像清晰度较高。

相比较而言，金属增感屏的增感系数小，一般只有 2~7，但影像清晰度较高。

(2) 荧光增感屏 主要是靠荧光物质 [常用钨酸钙 (CaWO_4)、氟化钙 (CaF_2) 等] 在射线作用下发出荧光来增加曝光量，图 4-22(b) 是荧光增感屏的构造示意。荧光增感屏的增感系数与射线的“硬度”有关：当管电压较低时，增感系数随管电压的升高而增大；在 200kV 左右，增感系数最大，可达 100 以上；超过 200kV 以后，增感系数随管电压的升高而减小；到 400kV 时，增感系数已经很小了。荧光增感屏的增感系数一般为 10~60，当管电压一定时，荧光增感屏的厚度存在最佳值。一般而言，荧光增感屏的增感系数大，但影像清晰度较差。

(3) 金属荧光增感屏 为了获得较大的增感系数而又不使影像的清晰度降低太多而开发了金属荧光增感屏，金属荧光增感屏实际上是荧光增感屏和金属增感屏的结合，其结构如图 4-22(c) 所示。在金属荧光增感屏中，起增感作用的主要是荧光物质，金属箔主要起吸收散射射线的作用，以提高影像的清晰度。金属荧光增感屏的增感效果介于前两者之间，增感系数大小接近荧光增感屏，影像清晰度与金属增感屏接近。

3. 增感屏的选用

选择增感屏时,要考虑产品质量要求、射线能量、胶片特性以及检测效率(速度)等方面的因素。检测灵敏度要求高时,优先选用金属增感屏或不用增感屏,检测速度要求快且对影像质量要求不很高时,可考虑选用荧光增感屏或金属荧光增感屏。

照相时,通常是在胶片的一面或两面紧贴增感屏,以缩短曝光时间。

使用增感屏时应注意以下几个方面的问题。

① 对于荧光增感屏,要注意荧光物质的粒度大小。通常荧光物质粒度越粗,则所发荧光强度越高,增感系数也越大,但影像也越模糊。对于工业射线照相而言,建议尽可能采用较细粒度的荧光增感屏,以确保底片的影像质量。

② 鉴于荧光物质多有余辉,故使用者应通过试验掌握其余辉的持续时间,以免在连续使用时,影响下次透照时射线底片的影像质量。目前工业射线照相已基本不采用荧光增感屏。

③ 严防荧光屏在使用中折裂而在底片上产生假象,故曲率过大的工件不宜采用。

④ 荧光屏表面要保持清洁、光滑和平整,不宜用有机溶剂(如酒精、丙酮等)擦拭荧光屏的保护膜,而应该使用绸布或脱脂棉等柔软物质蘸肥皂水轻轻擦拭,以免屏面变暗。

⑤ 荧光屏应避免光保存,并尽量远离化学试剂。其光敏面切忌划伤或留下指迹。切勿让荧光屏直接接受一次射线的照射,以免使其因为褪色而损坏。

⑥ 金属增感屏的增感系数大小与射线软硬、屏的成分、厚度以及胶片的特性有关。一般来说,射线越硬,增感因素越明显。当采用 γ 射线照相时,由于散射线严重,必须采用金属增感屏增感。铅增感屏的厚度可参照表4-6选择。

表 4-6 国际焊接学会推荐的铅增感屏厚度/mm

射线源 屏别	高至 400kV 的 X 射线	γ 射线			感应加速器	
		^{192}Ir	^{137}Cs	^{60}Co	15MeV	25MeV
前屏	0.02~0.10	0.02~0.10	0.10~0.15	0.10~0.15	1.5	2~3
后屏	0.02~0.10	0.02~0.10	0.15~0.50	0.15~0.50	0.05~1.0	0.05~1.0
双胶片	前屏		0.1	0	1.5	2
	中屏		0.1	0.1	0.5	0.5
	后屏		0.2	0.2	1	1

四、胶片

胶片是射线照相法检测的重要组成部分,其质量的高低对射线检测起决定性影响。

1. 胶片的基本构造

射线照相法检测中,常用双层乳剂的射线胶片,其结构如图4-23所示。采用双面乳剂胶片,主要是为了缩短曝光时间,提高影像的衬度。

感光胶片的乳剂由卤化银、明胶和色素等物质组成,其中,卤化银起感光作用,明胶主要起分散作用,色素主要用来扩大卤化银的感色范围。X射线胶片的感光乳剂一般为溴化银。

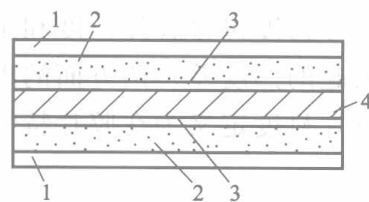


图 4-23 射线照相检测用感光胶片的结构

1—保护膜; 2—感光乳剂;
3—结合膜; 4—片基

片基是乳剂的载体,由透明的赛璐珞等材料制成,其厚度约为 $150\mu\text{m}$ 。赛璐珞可分为硝酸纤维和醋酸纤维两种,前者易燃,制成的胶片称为“不安全胶片”,后者称为“安全胶片”。我国近来大都采用涤纶作片基。

2. 胶片的特性曲线

胶片的曝光量 (E) 与其摄影密度 (又称黑度,用 D 表示) 的关系曲线称为胶片的特性曲线,通常曝光量用其对数表示,即有 $D-\lg E$ 。典型胶片的特性曲线如图 4-24 所示。一般将此特性曲线分为未曝光区 (AB 段)、曝光不足区 (BC 段)、曝光正确区 (CD 段)、曝光过度区 (DE 段) 和反转区 (EF 段)。

摄影密度的定义如下。

设入射到胶片的光强为 i_0 , 透过胶片的光强 i , 则透过率为:

$$T = \frac{i}{i_0} \quad (4-13)$$

式中 i ——透过光强;

i_0 ——入射光强。

透过率的倒数的常用对数值即为胶片的黑度 (底片的摄影密度), 记为 D , 即

$$D = \lg \left(\frac{1}{T} \right) \quad (4-14)$$

不同牌号或性能的胶片有不同的特性曲线,即使同一胶片,经不同的暗室处理,所得特性曲线也不相同。因此,胶片的特性不仅表示胶片的性能,同时也表示暗室处理条件。

3. 胶片的主要特性参数

描述射线检测用胶片的主要特性参数有灰雾度、衬度、感光度、颗粒度等,其中灰雾度、衬度、感光度特性参数都可借助特性曲线进行说明。

(1) 胶片的灰雾度 即使未经曝光的胶片,在显影过程中也会产生一些被还原出来的黑色金属银,使底片具有一定的黑度,这一未经曝光的原始黑度称为胶片的灰雾度,用 D_0 表示,如图 4-24 中 AB 线段对应的黑度值 D_0 。

灰雾度又称化学雾翳,以区别于由射线引起的黑度。胶片的灰雾度影响底片图像的衬度和清晰度,降低检测的灵敏度。

(2) 胶片的衬度 所谓衬度,即反差、对比度或黑度差。

射线底片影像中,明亮部分与阴暗部分的黑度差,称为底片的衬度 (反差、对比度)。

底片衬度包含胶片衬度和主因衬度 (即射线穿过被检物后,各部位因接收的射线强度不同而引起的黑度差) 两方面的因素。

胶片衬度定义为在胶片特性曲线上某一点处的斜率,用 γ 表示。即

$$\gamma = \frac{\partial D}{\partial \lg E} \quad (4-15)$$

可见,胶片的衬度沿特性曲线是不断变化的,为此提出衬度系数的概念。所谓衬度系数,即胶片特征曲线上,近似直线的部分两点间连线的延长线与横轴夹角的正切,记为 G 。

即

$$G = \tan \theta \quad (4-16)$$

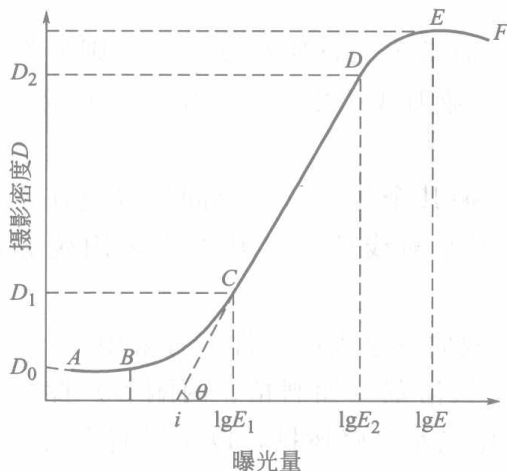


图 4-24 感光胶片的特性曲线

胶片衬度高,说明曝光量的较小变化可以导致底片黑度的较大变化,有利于提高检测灵敏度。

(3) 胶片的感光度 即胶片对射线的敏感程度,用 S 表示。胶片的感光度也就是胶片的感光速度,即使胶片达到规定黑度所需的时间长短(或快慢程度)。即

$$S = \frac{K}{E_i} \quad (4-17)$$

式中 S ——感光度;

K ——常数,各标准取值不统一,有的取 10,也有取 34 等;

E_i ——曝光量, $\text{mA} \cdot \text{s}$ 。

感光度高的胶片,只需较少的曝光量(较短的时间)就可使胶片达到一定的黑度值。

实践中经常采用相对感光度概念,即把某一已知胶片的感光速度定为 100% (或 1),其他胶片与该基准胶片的感光速度的比值定义为其相对感光度。

(4) 胶片的颗粒度 胶片的颗粒度即胶片感光颗粒的大小。

影响胶片颗粒度的因素主要有胶片的类型、射线波长(波长越短、颗粒越大)和暗室工艺(显影液配方、显影温度、显影时间等)。

颗粒度影响底片的清晰度和分辨率。胶片的颗粒越细,其解像力越高,得到的底片越清晰,越有利于发现细小的缺陷。

胶片的颗粒度与感光度之间有一定的关系,一般而言,胶片颗粒大,感光速度高;颗粒细,感光速度慢。

(5) 胶片的曝光宽容度 胶片按正比关系正确记录被透照物质厚度或黑度差异的曝光量范围,实际上是指在胶片特性曲线上接近直线部分的起点和终点范围,即图 4-24 中的 CD 段。

胶片的曝光宽容度用 L 表示,即

$$L = \lg E_2 - \lg E_1 \quad (4-18)$$

从简化透照工艺的角度考虑,希望胶片的曝光宽容度大些,但曝光宽容度大的胶片其衬度必然低,对检测灵敏度不利。

4. 胶片的摄影作用

胶片曝光后必须经过显影、定影等处理才能得到可见的影像。胶片在曝光阶段已在其上形成了一个看不见的影像,称为潜影,其形成过程如下。

乳剂中的卤化银(溴化银)在 X 光的照射下因光化作用,分解为银和溴。光化作用遵守这样的规则,即光化反应所生成的物质质量 m 与被吸收的光的能量成正比,即

$$m = KEt \quad (4-19)$$

式中 K ——比例常数;

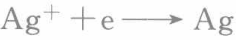
E ——被吸收的光能;

t ——曝光时间。

光化作用是按照光的微粒性质进行的,感光物质的一个分子只能接受一个光子的能量 $h\nu$ (h 为普朗克常数, ν 为光的频率)的作用,且只有当光子的能量 $h\nu$ 大于或等于这个分子变化所需要的功时才能发生光化作用。一个光子的能量 $h\nu$ 只能对一个溴离子发生作用,使它还原,放出电子,即



放出的电子成为自由电子后，遇到银离子就与它中和，还原出银，即



被还原出来的银便成为潜影。

银的析出遵循光化作用的一般规律，光照强的地方析出的银较多，形成所谓的“潜影中心”。由潜影中心的卤化银颗粒所组成的像称为“潜像”，潜像只有经过显影作用，才能形成可见的影像。

胶片感光后，未被显影而仍具有感光性的卤化银颗粒，要用定影液溶解掉，这个过程称为定影。

5. 胶片的主要类型及选用

工业射线照相检测的胶片分为增感型和非增感型（直接型）两种类型，增感型胶片适宜与荧光增感屏配合使用，非增感型胶片适宜与金属增感屏配合使用或不用增感屏而直接单独使用。

目前国际市场上有多个厂家生产射线检测用胶片，如美国 Kodak（柯达）、德国 Agfa（爱克发）、日本 Fuji（富士）、我国天津等，为了更好地选择和使用，通常将胶片进行分类。但不同的标准有不同的分类方法和相应的类型，我国的有关标准将射线胶片分为四种类型，如表 4-7 所示。

表 4-7 射线胶片的分类

胶片类型	粒度/ μm	感光度 S		衬度		主要特点	适用场合	产品举例
		要求	相对值	D=2.0	D=4.0			
G1	0.1~0.3	很低	7.0	>4.0	>8.0	超微粒、高衬度	灵敏度要求极高	柯达 DR 型、M 型，爱克发 D2，富士 IX25
G2	0.3~0.5	低	3.0	>3.7	>7.5	微粒、高衬度	灵敏度要求高	柯达 AA 型、爱克发 D4，富士 IX80，天津 IV
G3	0.5~0.7	中	1.0	>3.5	>6.8	细颗粒、中速	灵敏度、速度要求适中	柯达 T 型、爱克发 D7，天津 III
G4	0.7~1.1	高	0.5	>3.0	>6.0	粗颗粒、快速	灵敏度要求一般、要求速度快	柯达 CX 型，爱克发 D8，富士 IX400，天津 II

五、暗室设备

暗室设备主要有冲洗设备（显影、停影、定影药剂及设备）、裁切设备和观测设备（放大设备、观片灯、密度计、标准密度片等）。

第五节 射线透照工艺

透照工艺包括透照方向、焦距及曝光参数等方面的内容，透照工艺的确定是射线检测的关键环节，对检测结果有很大影响。

一、典型工件的透照方法

透照方向的确定，应考虑以下几方面的因素：被检件的特性（材质、形状和尺寸）、预计的缺陷特性（形状、取向）、对检测的质量要求以及检测效率等。其一般原则：尽量使透照方向与被检件的尺寸最小、而与其中预计的缺陷厚度最大的方向一致，以提高检测灵敏度；尽量使一次透照能发现其中的多个缺陷，以提高检测效率。

(一) 平板型工件的透照方法

平板型工件是指一般工件的平面部分以及曲率半径很大的弧面部分,如扁平铸件、对接焊缝等。

对平板型工件的透照方法比较简单,一般是将胶片放置在被检查部位的背面,让射线从被检面的前方垂直照射,如图 4-25 所示。

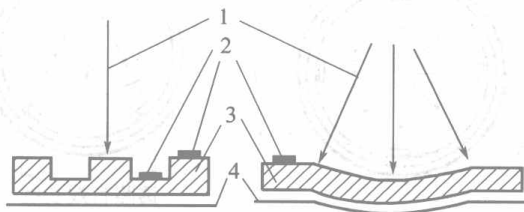


图 4-25 平板型工件的透照方法

检测平头对接焊缝、单 U 形和双 U 形对接焊缝时,可按图 4-26(a)、(b) 所示的方向进行透照。1—射线入射方向;2—透度计;3—工件;4—胶片检查 V 形坡口对焊的焊缝和 X 形坡口对接焊缝时,除了从垂直方向透照外,还要依坡口的斜面方向进行照射,以便对未熔合等缺陷进行有效的检测,如图 4-26(c) 所示。

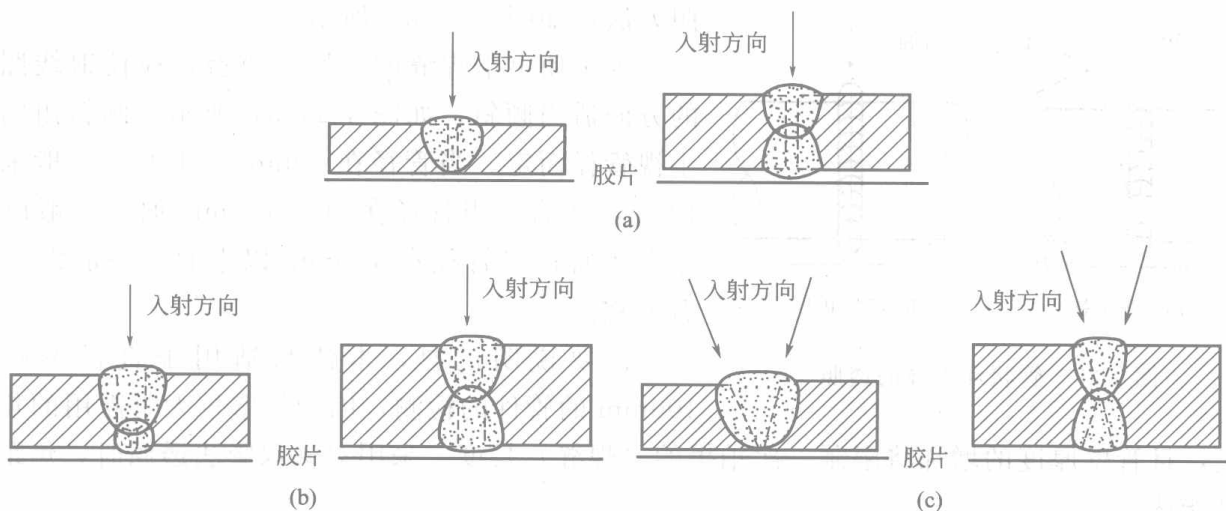


图 4-26 平板对接焊缝的透照方法

(二) 圆筒型工件的透照方法

此处所说的圆筒型工件,包括一般的管子、圆筒和曲率半径较小的弧形工件。

透照圆筒型工件,须特别注意使胶片与被检部位紧密贴合,并使锥形辐射的中心线与被检区域中心的切面相互垂直。

根据圆筒形工件的结构、尺寸和可接近性以及射线探伤机的性能来选择透照方法。

1. 内透法

胶片在外、射线由里向外照射的透照方法称为内透法,如图 4-27 所示。若管径较小,最好采用周向辐射的射线源,这样可一次曝光完成整个圆周的透照,如图 4-27(a) 所示;若管径较大,或采用定向辐射的射线源时,则需进行分段局部曝光透照,如图 4-27(b) 所示。此时,应注意各分段之间有一定的重叠,搭接长度一般为 10~20mm,以免漏检。

2. 外透法

射线由外向里照射的透照方法称为外透法,如图 4-28 所示。

当管径较大,胶片可以内贴管壁时,可以按如图 4-28(a) 所示的方式进行分段曝光透照;若管径较小,胶片不能内贴管壁时,可以按如图 4-28(b) 所示的方式将胶片外置,进行分段曝光透照。所分的段数主要是根据管径的大小、壁厚以及焦距而定。

当采用胶片在外的外透法时,依管径和壁厚的不同,可分别采用双壁双影法和双壁单影

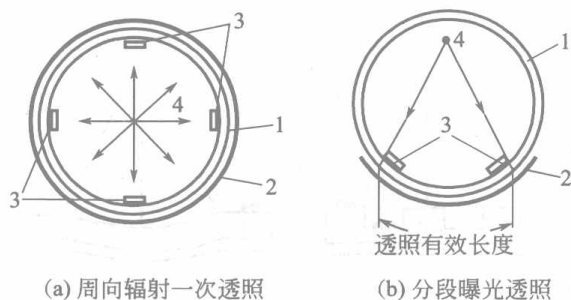


图 4-27 圆筒形工件的内透法

1—工件；2—胶片；3—像质计；4—射线源

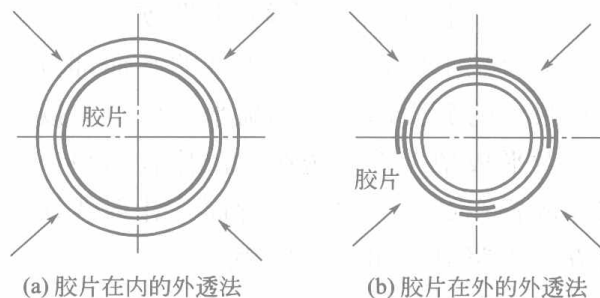


图 4-28 圆筒形工件的外透法

法。双壁双影法和双壁单影法主要应用于管状环焊缝的检测。

(1) 双壁双影法 射线穿越上、下两层壁厚，并将工件的上、下壁都投影到胶片上的透照方法，如图 4-29(a) 所示。

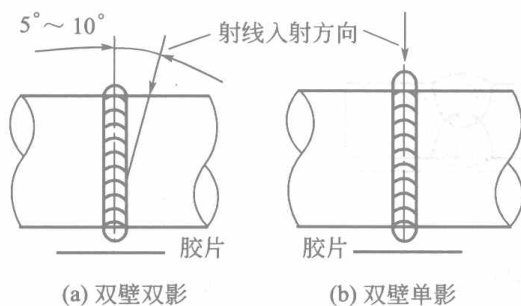


图 4-29 管状环焊缝的透照

为了使上下焊缝的投影不重叠，应使射线照射的方向适当倾斜，如图 4-29(a) 所示。倾斜角的大小视管径而定。当管径在 50mm 以下时，一般采用 10° 左右为宜；当管径在 50~100mm 时，一般以 7° 左右为宜；当管径在 100mm 以上时，一般以 5° 左右为宜。

需要说明的是，本法只适用于直径不超过 100mm 的管件的检测，因为管壁较大时需用的焦距太大，且管壁厚度的增加将限制一次拍摄的（焊缝）长度。采用双壁双影法透照时，焦距应尽可能选大些。

(2) 双壁单影法 射线穿越上、下两层壁厚，但只将工件的下壁投影到胶片上的透照方法，如图 4-29(b) 所示。

双壁单影法是通过缩小焦距的办法，使射线源接近上层管壁。这样可使上层管壁中的缺陷在底片上的影像变得模糊。如有可能，射线源可和被检管子相接触，使射线穿过焊缝附近的母材金属。胶片应放在远离射线源一侧被检部位的外表面上，并注意贴紧。

此法对于直径大于 100mm、内部不能接近的管状件能获得最好的检测效果。可用于直径不大于 900mm 的管状件的透照，超过此值后，由于焦距将变得过大而影响检测效果。

(三) 角形工件的透照方法

角形工件包括铸件转角、肋板的根部和凸缘部，由角焊、丁字焊、十字焊、卷边接等焊接工艺焊接的工件等。

在检验角形工件时，射线多以其角的二等分线的方向入射，如图 4-30 所示。

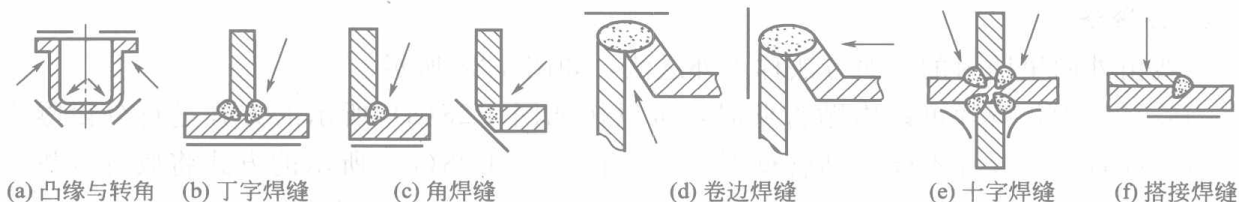


图 4-30 角形工件的透照

对于内焊的角形焊、迭焊以及丁字焊的焊缝等,除上述透照法外,还需沿坡口方向透照。

(四) 管接头焊缝的透照方法

管接头焊缝的透照方法参见图 4-31。

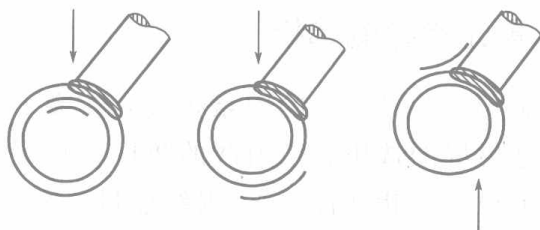


图 4-31 管接头焊缝的射线透照

(五) 圆柱体的透照方法

圆柱体包括轴、棒、钢索等圆形或椭圆形断面的工件,以及壁厚而内径很小的圆管形部件等。这一类物体因其断面呈圆形,在射线方向的厚度差很大,因此,在选择透照方法时,主要应考虑设法减小厚度差对影像质量的影响。对于批量大的工件进行射线检测时,可以考虑制作专用的托座或夹具,如图 4-32 所示。当不具备这种条件时,采用 X 射线源时,简单而有效的办法就是使用滤波板。滤波板一般安装在 X 射线管保护罩的窗口上,其作用如下。

- ① 提高辐射束的平均能量,降低主因衬度,增加其宽容度。
- ② 滤掉软射线,削弱散射线的有害影响,提高影像的清晰度。

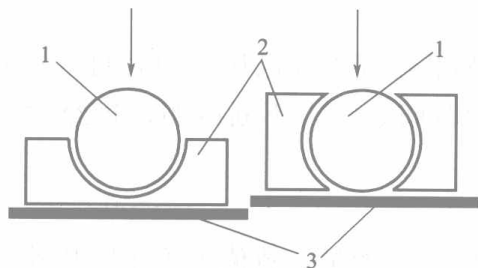


图 4-32 圆柱形工件的透照方法

1—工件; 2—夹具; 3—胶片

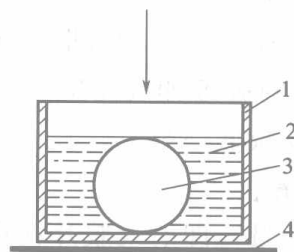


图 4-33 球形工件的透照方法

1—容器; 2—补偿液; 3—工件; 4—胶片

(六) 球形工件的透照方法

对小型球形工件,透照时必须采用补偿措施,否则,由于厚度差和散射线的影响,底片的清晰度极低,甚至无法观察。

因其形状复杂,采用液体补偿法为宜,如图 4-33 所示。透照时,任意转动 90° ,分两次曝光即可。

(七) 厚度变化剧烈的物体的透照方法

当透照厚度变化大的物体时,为避免发生厚度大的部位曝光不足、薄的部位曝光过度的现象,可采用以下措施予以解决。

- ① 将两种或两种以上感光度不同的胶片同时放在试件下进行曝光透照,用感光度较高的胶片拍摄工件较厚的部位,感光度较低的胶片拍摄工件较薄的部位。
- ② 如果只有一种型号的胶片,则可按材料厚薄分别进行单独曝光。
- ③ 采用补偿措施,依被检工件的材质、形状和尺寸,补偿物可从固体补偿块、粉末、膏状物或液体中选择。经补偿处理后,可一次透照成功。需要注意的是,当使用液体或膏状物作补偿介质时,要防止它们在被检物体表面形成气泡,因为这些气泡可在底片上造成假缺陷的影像。
- ④ 利用铜、铅或锡等重金属作成金属增感屏。
- ⑤ 将原考虑采用荧光增感屏的胶片直接进行不增感曝光。

二、曝光参数的选择

影响检测灵敏度的因素很多,主要有射线探伤机的性能、胶片的质量及其暗室处理条件、增感屏的选用、散射线的防护、被检件特性(材质、形状与几何尺寸)、缺陷特性(大小、方位、形状和性质)、射线能量、曝光量和焦距等。对X射线检测而言,管电压、管电流、曝光时间和焦距是决定检测效果的四要素。

1. 射线能量的选择

射线能量的选择对检测结果的影响很大,需要认真考虑。

对X射线而言,X射线的能量取决于管电压的高低和管电流的大小。在其他条件不变的情况下,管电压越高,X射线的能量越大,其穿透能力也越强;在X射线检测中,通常根据管电压的高低,将X射线分为软X射线和硬X射线等类型,软硬X射线之间并没有明确的界限,一般将60kV以下管电压所产生的X射线称为软X射线。

分析表明,管电压的高低还将影响缺陷显现的灵敏度。在其他条件相同时,管电压越高,缺陷显现的灵敏度越低。因此,在满足工件最大透照厚度的前提下,应尽量选用较低的管电压,以提高检测灵敏度。

对 γ 射线而言,其能量取决于放射源的种类、初始装源强度和已历经的时间。几种常用 γ 射线源的相对强度如表4-3所示。 γ 射线源的强度随时间始终在不断减弱,每经过一个半衰期,其强度减低一半。

2. 曝光量

所谓曝光量,即射线胶片在检测过程中所接收到的射线能量,数值上等于胶片处的射线强度和曝光时间的乘积,即

$$E = It \quad (4-20)$$

式中 E ——曝光量, $\text{mCi} \cdot \text{h}$;

I ——射线强度, mCi ;

t ——曝光时间, h 。

(1) X射线的曝光量 对X射线而言,其强度为

$$I = kiZU^2 \quad (4-21)$$

式中 I ——X射线强度, mCi ;

k ——与X射线管有关的常数;

i ——管电流, mA ;

Z ——阳极靶材的原子序数;

U ——管电压, V 。

当管电压 U 、原子序数 Z 等因素一定时,X射线的强度与管电流成正比,因此,X射线的曝光量通常用管电流与曝光时间的乘积来表示,即

$$E = it \quad (4-22)$$

式中 E ——曝光量, $\text{mA} \cdot \text{min}$ 或 $\text{mA} \cdot \text{s}$;

i ——管电流, mA ;

t ——曝光时间, min 或 s 。

X射线检测中,尽量选用大的管电流,以缩短曝光时间,这不仅能提高检测效率,还有利于减少散射线的影晌,提高检测灵敏度。

(2) γ 射线的曝光量 取决于放射性源的活度和曝光时间, 即

$$E = At \quad (4-23)$$

式中 E ——曝光量, $Bq \cdot \min$ 或 $Bq \cdot h$;

A ——放射性源的活度, Bq ;

t ——曝光时间, $\min$ 或 h 。

3. 焦距的确定

所谓焦距, 即射线源 (指 X 射线管的焦点或同位素源) 至 X 射线胶片 (或其他记录图像的器件) 间的距离, 用 F 表示。焦距影响底片的几何不清晰度和检测效率等。

(1) 焦距与曝光系数 (感光量) 为了客观地表示焦距、曝光量和胶片所得到的实际感光量之间的关系, 引入曝光系数的概念, 用 H 表示。当曝光量一定时, 曝光系数与焦点的平方成正比, 即

$$\text{X 射线的曝光系数} \quad H = \frac{it}{F^2} \quad (4-24)$$

$$\gamma \text{ 射线的曝光系数} \quad H = \frac{At}{F^2} \quad (4-25)$$

式(4-24)、式(4-25)中 H ——曝光系数;

i ——管电流, mA ;

t ——曝光时间, $\min$ 或 s ;

A ——放射性源的活度, Bq ;

F ——焦距。

曝光系数在射线透照中经常用, 只要使每次曝光的胶片均能得到相同的曝光系数, 在胶片及暗室处理条件不变的情况下, 冲洗出来的底片都能保持同一黑度。

(2) 焦距与几何不清晰度的形成 即是由几何半影造成的不清晰度, 用 U_g 表示。图 4-34 是几何不清晰度的形成示意。

几何不清晰度的存在, 给射线检测带来了不利影响, 它使图像边缘模糊, 降低了底片的清晰度, 进而影响了射线检测的灵敏度。因此, 应尽量把它控制在最小范围内。

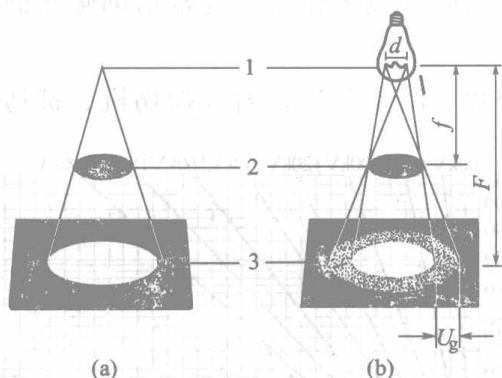


图 4-34 几何不清晰度的形成图

1—焦点; 2—工件; 3—胶片; d —焦点尺寸; F —焦距;
 f —焦点至工件上表面的距离; U_g —几何不清晰度

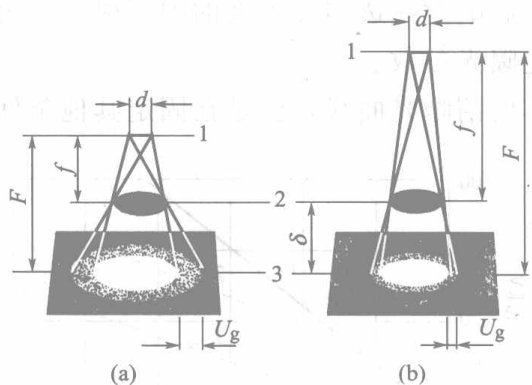


图 4-35 焦距与几何不清晰度的关系

1—焦点; 2—工件; 3—胶片; d —焦点尺寸; F —焦距;
 f —焦点至工件上表面的距离; δ —工件厚度;
 U_g —几何不清晰度

焦距与几何不清晰度的关系如图 4-35 所示, 由简单的几何关系可以推知, 几何不清晰度的大小, 与射线源焦点尺寸、工件上表面至胶片的距离及焦距之间有如下关系式:

$$U_g = \frac{d}{f} \delta \quad \text{或} \quad U_g = \frac{d\delta}{F-\delta} \quad (4-26)$$

式中 d ——焦点尺寸, mm;

f ——焦点至工件上表面的距离, mm;

F ——焦距, mm;

δ ——工件厚度 (对于双壁双投影的空心零件或与胶片不能紧贴的零件是指工件上表面至胶片的距离), mm。

由此可见, 其他条件不变时, 焦距 F 越大, 几何不清晰度 U_g 越小。

(3) 焦距与散射线 为了得到黑度符合要求的射线底片, 应使曝光系数不变, 因此提高焦距, 必然要相应地增加曝光时间。由于曝光时间的增加, 除降低工作效率外, 也相应地增长了散射线对胶片的作用时间, 从而降低底片的清晰度。

(4) 焦距的选用原则 通过以上分析, 可以看出, 焦距与灵敏度的关系比较复杂: 一方面提高焦距, 有利于减小几何不清晰度, 缩小工件沿射线方向的厚度变化; 但同时也增加了散射线对胶片的作用时间, 降低了检测效率。因此, 选用焦距应综合考虑上述各种因素, 以下给出的选用焦距的原则, 供实际工作参考。

① 按射线机的焦点尺寸。如果使用的射线源焦点较大时, 可选用较大的焦距。

② 按源的射线强度和胶片的感光度。如源的射线强度较大, 或选用的 X 射线胶片感光度也较大时, 可以选用较大的焦距。

③ 按被检工件的数量、形状和尺寸。若每次透照零件的形状和尺寸相同, 且数量较多时, 可选用较大的焦距, 以增大透照场面积, 达到增加每次透照工件数量的目的; 在透照较大的工件时, 为搞清相互关系和尺寸, 可提高焦距, 以增大透照面积, 或尽可能一次透照完成, 以保持工件各部位相互关系的准确性; 在分段透照圆筒 (环形工件) 时, 为尽量减少沿工件圆周方向的分段次数, 可适当增大焦距, 以增大每次透照的有效长度。

总之, 选用焦距时应满足最小焦距要求, 至于采用的最大焦距, 应根据工作中的具体情况进行综合分析, 以满足灵敏度要求为原则。

4. 曝光曲线

影响射线透照灵敏度的因素很多, 为简便起见, 实际检测工作中, 通常借助曝光曲线来确定曝光参数。

所谓曝光曲线, 就是在固定其他条件 (如射线胶片、暗室处理、射线探伤机、被透照物

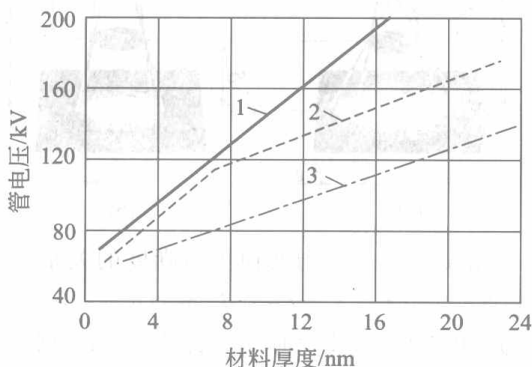


图 4-36 钢材厚度与管电压的关系曲线

1—无增感; 2—铅增感; 3—荧光增感

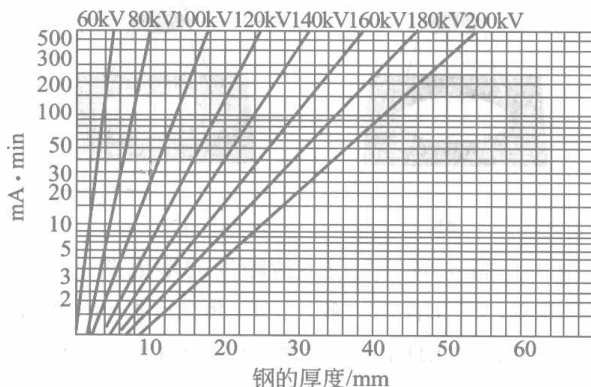


图 4-37 钢材厚度与曝光量的关系曲线

质种类等)下,只改变主要影响因素(如管电压、管电流、工件厚度等)得到的管电压、管电流曝光量与工件厚度之间的关系曲线。曝光曲线是正确制定射线检测工艺的依据。

曝光曲线有多种形式,常用的是工件厚度和管电压曲线(图4-36)、厚度和曝光量($T-E$)曲线(图4-37)等。这种曲线是通过改变曝光参量,透照由不同厚度组成的阶梯试块,根据给定的冲洗条件洗出的底片所达到的基准黑度值来制作的。

第六节 评片技术

一、概述

为正确识别射线照片上的影像,对缺陷进行分类和评级等,首先要求评片者对被检对象有一定的了解,如工件的材质特性、所采取的加工工艺、其中常见缺陷的形成机理、存在部位及特征等,其次还要求评片者全面了解底片的拍摄过程及细节,如射线源的种类及参数(γ 射线机的种类及强度,X射线机的型号、管电压、管电流、焦点形状及尺寸等)、透照布置(入射方向、焦距)、胶片特性及曝光参数等,否则,仅通过观察底片,很难作出正确的评判。

在此基础上,再根据试件和其中异常的影像特征(几何形状、大小、位置、分布及黑度差等),对射线照片进行分析和判断。

不同性质的缺陷具有不同的几何形状和空间分布特点,如气孔一般呈球形,裂纹多为宽度很小且有变化的缝隙等。影像的几何形状常常是判断缺陷性质的最重要依据。判断一个影像是否有缺陷,是什么性质的缺陷,一般先根据影像的形状作出初步判断,然后,再从其他方面进行进一步的分析和论证。

影像的几何形状包括以下几方面的内容:

- ① 单个或局部影像的基本形状;
- ② 多个或整体影像的分布情况;
- ③ 影像轮廓线的特点。

不同性质的缺陷,其影像的几何形状在上述三方面可能产生差异。

由于射线照片上缺陷的影像是缺陷的几何形状按照一定规律在平面上投影形成的图形,因此,射线照片上缺陷影像的形状与缺陷的几何形状及射线的照射方向密切相关。不同的透照布置(特别是不同的照射方向),同一缺陷在射线照片上形成的影像的几何形状将发生变化。例如,球形可能变成椭圆形;裂纹可能呈现为鲜明的细线,也可能呈现为模糊的片状影像等。

影像的黑度分布是判断影像性质的另一个重要依据。不同性质的缺陷,对射线的衰减强弱不同,形成的缺陷影像黑度也就不同。如气孔内含气体,对射线的衰减一般比基体弱,所得影像相对较黑,而夹杂物如果对射线的衰减比基体强,则所得影像灰度相对较浅。

在分析影像黑度特点时应考虑:

- ① 缺陷影像与被检件基体的相对黑度高低;
- ② 缺陷影像自身各部分的黑度分布特点。在缺陷具有相同或相近的几何形状时,黑度分布的特点是判断影像性质的重要依据。

缺陷影像在射线照片上的位置,是判断影像缺陷性质的另一个重要依据,因为缺陷影像

在射线照片上的位置,是缺陷在工件中位置的反映。

缺陷在工件中出现的位置常具有一定的规律,因此影像所在位置也与缺陷性质相关。某些性质的缺陷只能出现在工件的特定位置,对这类缺陷,影像的位置就是识别缺陷的重要依据。例如,焊缝中的根部未焊透一般只能出现在焊缝的中心线上,铸件中的缩孔常出现在壁厚变化较大的部位等。

实际评片时,应从以上几方面综合考虑,并结合相关标准,对缺陷类型及质量等级等作出判断。

总之,为正确评定射线底片(识别真假缺陷、对真缺陷定性、定位、定量等),要求评片者要有较好的材料和工艺方面的理论知识、了解被检件的生产工艺过程,以及实践中积累的丰富经验。必要的时候,还得对被检部件进行解剖,掌握工件内部缺陷的形态与底片上的影像之间的联系,取得可靠的第一手资料。

二、射线照相底片的质量指标及要求

质量符合要求的底片是正确评片的前提,如果底片本身的质量不合乎最低要求,就根本谈不上对被检件的质量或技术状态做出正确的评判。

1. 射线照相底片的质量指标

描述射线照相底片质量高低的指标主要有底片黑度、底片清晰度、底片对比度及灵敏度等。其中底片黑度、底片对比度及灵敏度的含义如前所述,底片清晰度是对底片图像细节清晰(或模糊)的程度的定性描述。

2. 对射线照相底片的质量要求

对射线照相底片的质量要求如下。

① 底片的透照部位应完整、标记齐全。工件应检查的部位在底片上应有完整的反应,不允许有残缺不全的现象,或遗漏部位;底片上应有被检工件的编号(名称)、底片编号、定位标志、透度计编号等标志,它们应与被检工件的永久性标志相符。

② 灵敏度应达到规定的最低要求。每张底片上应能清晰地显示出规定的最细的金属丝(金属丝式透度计)、或最浅的槽(槽式透度计)等表示检测灵敏度的最小人工缺陷。

③ 黑度值应在有关标准规定的范围之内,具体数值查阅相关标准。

④ 底片上不应有划痕、脱膜、伪缺陷(如静电感光、漏光等)。

三、常见缺陷的影像特征

为使读者对常见缺陷的影像特征有基本的认识,在此简要介绍铸件和焊缝中的常见缺陷影像,供参考。

1. 铸件中常见缺陷的影像特征

(1) 气孔 气孔主要是由于在铸造过程中,部分未排出的气体造成的。气孔大部分都接近于表面,在底片上呈圆形、椭圆形、长形或梨形的黑斑,边界清晰,中间较边缘黑些,分布有单个的、有密集的或呈链状分布,如图 4-38 所示。

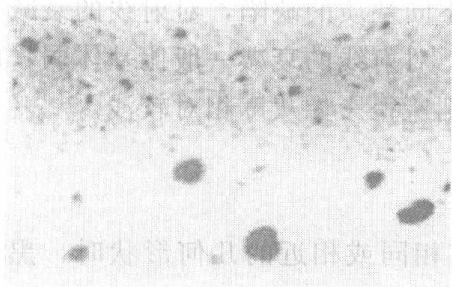


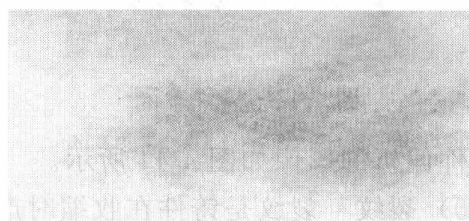
图 4-38 铸件气孔

(2) 疏松 疏松是由于在铸造过程中,因局部偏差过大,在金属收缩过程中邻近金属补缩不良造成的。疏

松多产生在冒口的根部、厚大部位的厚薄交界处和面积较大的薄壁处，其形貌一般分为羽毛状和海绵状两种。前者在底片上呈类似羽毛或层条状的暗色影像 [图 4-39(a)]，而后者则呈现为海绵状或云状的暗色团块 [图 4-39(b)]。



(a) 层状疏松



(b) 海绵状疏松

图 4-39 铸件疏松

(3) 缩孔 铸件的缩孔在底片上呈树枝状、细丝或锯齿状的黑色影像，如图 4-40 所示。

(4) 针孔 铸件中的针孔一般分为圆形和长形针孔两种。前者在底片上呈近似圆形的暗点，而后者则呈现为长形暗色影像，它们属于铸件内部的细小孔洞，呈局部或大面积分布，如图 4-41 所示。

(5) 夹渣 分为熔剂夹渣和氧化夹渣，其中，熔剂夹渣是在铸造过程中，镁合金所特有的缺陷，在底片上呈白色斑点或雪花状，有的还呈蘑菇云状。

氧化夹渣是在铸造过程中，熔化了了的氧化物在冷却时来不及浮出表面，停留在铸件内部而形成的。在底片上呈形状不定而轮廓清晰的黑斑，有单个的，有密集的。如图 4-42 所示。

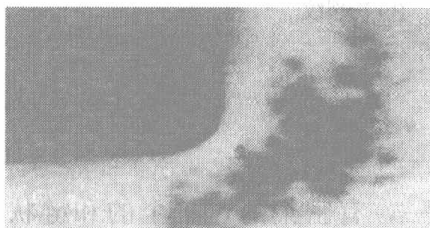


图 4-40 铸件缩孔

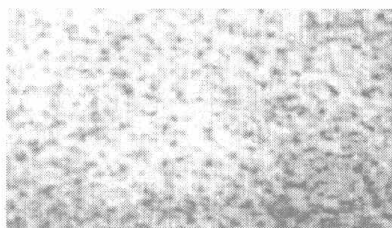


图 4-41 铸件针孔



图 4-42 铸件夹渣

(6) 夹砂 夹砂是在铸造过程中，部分砂型在浇铸时被破坏造成的。对于镁、铝等轻金属合金铸件，夹砂在底片上呈近白色的斑点；对于黑色金属，夹砂呈黑色斑点，边界比较清晰，形状不规则，影像密度不均匀。

(7) 金属夹杂物 铸件中的金属夹杂物比铸件金属密度大的呈明亮影像，反之呈黑色影像，轮廓一般较明晰，形状不一。

(8) 冷隔 铸件中的冷隔是由于在浇铸时，因温度偏低，两股金属液体虽流到一起但没有真正融合而形成的，常出现在远离浇口的薄截面处。在底片上呈很明显的似断似续的黑色条纹，形状不规则，边缘模糊不清。这种缺陷多半在铸件表面上也有痕迹，呈未能熔合的带有圆角或卷边的缝隙或凹痕，如图 4-43 所示。

(9) 偏析 铸件中的偏析在底片上呈现为摄影密度变化的区域。按生成的原因可分为比重偏析和共晶偏析两大类。

比重偏析是在液化线以上所沉淀的颗粒聚集而造成的，在底片上呈现为亮的斑点或云状。共晶偏析是在铸件固化时，某些缺陷或不连续处被临近的剩余共晶液体所填充，形成高密度的富集区。在底片上多呈亮的影像，其形状可因被填充的缺陷形状而变化，如原缺陷为疏松，则呈现为亮暗相反的影像，此为疏松型共晶偏析。

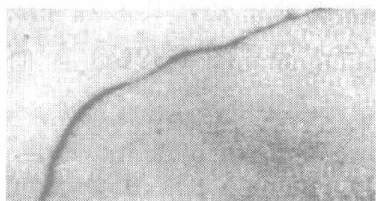


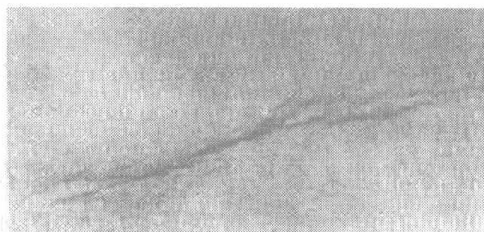
图 4-43 铸件冷隔



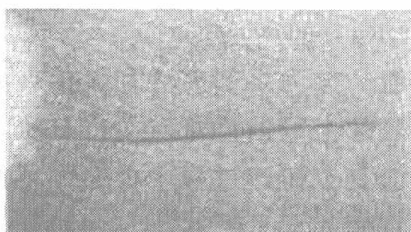
图 4-44 铸件偏析

铸件偏析的影像如图 4-44 所示。

(10) 裂纹 裂纹是铸件在收缩时产生的，多产生在铸件厚度变化的转接处或表面曲率变化大的地方。在底片上呈黑色的曲线或直线，两端尖细而密度渐小，有时带有分叉。如果裂纹是发生在工件边缘，且方向垂直于工件的端面，则裂纹在工件端面处较宽，向另一端变细。至于裂纹的清晰度随裂纹的宽度、深度和破裂面同射线的夹角的大小而不同，有的清晰，有的极难辨认。破裂面若同射线垂直，则一般的裂纹是不会有在底片上留下影像的。铸件裂纹的影像如图 4-45 所示。



(a) 热裂纹

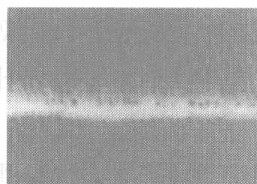


(b) 冷裂纹

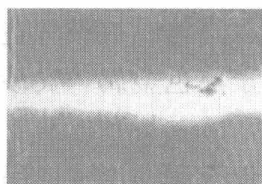
图 4-45 铸件裂纹

2. 焊件中常见缺陷的影像特征

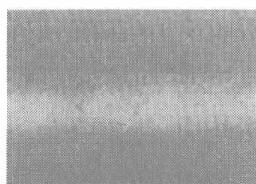
(1) 气孔 底片上的影像与铸件的基本相同，分布情况不一，有密集的，单个的和链状的，如图 4-46 所示。



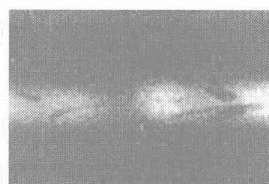
(a)



(b)



(c)



(d)

图 4-46 焊接气孔

(2) 夹渣 是在熔焊过程中产生的金属氧化物或非金属夹杂物来不及浮出表面，停留在焊缝内部而形成的缺陷，故分为非金属夹渣和金属夹渣两种。前者在底片上呈不规则的黑色块状、条状和点状，影像密度较均匀；后者是钨极氧弧焊中产生的钨夹渣等，在底片上呈白色的斑点，如图 4-47 所示。

(3) 未焊透 分根部未焊透和中间未焊透两种。前者产生于单面焊缝的根部，如直边对接单面焊缝，V 形坡口单面焊缝和直边角焊缝的根部。后者产生于双面焊缝的中间直边部分。如直边双面焊缝、X 形坡口双面焊缝和丁字双面焊缝等。未焊透内部常有夹渣。未焊透在底片上呈平行于焊缝方向的连续的或间断的黑线，还可能呈断续点状，黑度深浅不一。未

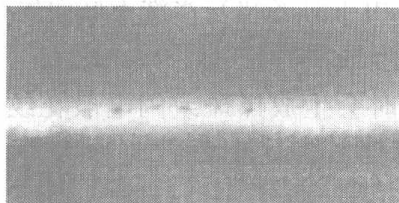


图 4-47 焊缝夹渣

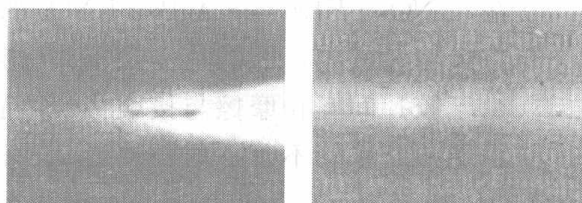


图 4-48 未焊透

焊透的影像如图 4-48 所示。

(4) 未熔合 分边缘(坡口)未熔合和层间未熔合两种。前者是母材与焊条材料之间未熔合,其间形成缝隙或夹渣。在底片上呈直线状的黑色条纹,位置偏离焊缝中心,靠近坡口边缘一边的密度较大且直。对于 V 形坡口,沿坡口方向透照较易发现。未熔合在底片上呈黑色条纹,但不很长,有时与非金属夹渣相似,如图 4-49 所示。

(5) 裂纹 主要是在熔焊冷却时因热应力和相变应力而产生的,也有在校正或疲劳过程中产生的,是危险性最大的一种缺陷。焊件裂纹在底片上的影像与铸件的基本相同,其分布区域自然是在焊缝上及其附近的热影响区,尤以起弧处、收弧处及接头处最易产生。方向可以是横向的、纵向的或任意方向的,如图 4-50 所示。

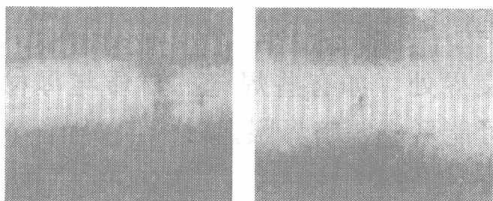


图 4-49 未熔合

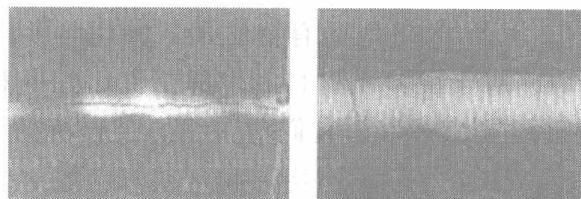


图 4-50 焊接裂纹

3. 表面缺陷

射线检测主要是检查工件的内部缺陷。裂纹虽然大部分产生于表面,但目视极难发现,所以也可作为内部缺陷。有些工件因结构的关系,某些部分的表面并不能直接观察,这些部分的表面缺陷也需透照检查。各种表面缺陷,如表面气孔(砂眼)、表面夹渣、焊件的咬边和烧穿等,它在底片上的影像和内部缺陷的影像没有什么区别。除了某些特殊透照方向外,从底片上是不能判断它是内部缺陷还是表面缺陷的。因此,在底片上发现缺陷影像后,应与工件表面仔细对照,以确定其是否属于内部缺陷。

四、伪缺陷的出现与处理

所谓伪缺陷,即底片上的虚假缺陷。正确识别伪缺陷,在射线检测中非常重要,它关系到对被检件质量的正确评定。

1. 底片上伪缺陷产生的原因

底片上的伪缺陷形式多种多样,产生原因也各不相同,归纳起来主要有以下几方面。

(1) 由于胶片在生产与运输过程中产生的

- ① 涂乳胶之前,片基受摩擦或划伤。
- ② 在乳胶涂布与干燥过程中,因厂房空气灰尘多,而使底片形成黑点或多处麻点。
- ③ 在乳胶涂布后的干燥过程中,因温度过高,乳胶收缩不匀而龟裂。
- ④ 因乳胶涂布不均而产生了纵向黑白边。

- ⑤ 在 $\text{AgNO}_3 + \text{KBr} \rightarrow \text{AgBr} + \text{KNO}_3$ 的反应过程中, 由于对 KNO_3 水洗不好而生花斑。
- ⑥ 在运输过程中, 因胶片受挤压并引起局部增感, 形成黑白斑。
- ⑦ 由于胶片间互相摩擦与接触将产生静电, 在放电时会生成黑斑或闪电般花纹。
- ⑧ 由于片基保管不善, 局部变形; 或因生产工艺条件不佳, 涂布后乳胶不匀, 以及所加增感剂搅拌不匀, 产生沉积现象, 形成黑斑。

(2) 透照工作及暗室处理不慎造成

- ① 胶片在切割、包装时, 因被折叠而形成月牙形痕迹。
- ② 因工作台不清洁, 台上的砂粒、灰尘与胶片间摩擦造成划伤, 经冲洗呈细微黑道。
- ③ 透照时, 工件对胶片的压力过大, 使其局部感光生成黑斑。
- ④ 显影时, 胶片与药液接触不良, 或有气泡附于胶片上, 或温度不匀, 或胶片相互叠压, 而产生斑块。
- ⑤ 底片的最后水洗不彻底; 晾干后形成水点或药液失效变质而呈珍珠色斑痕。
- ⑥ 洗相时, 因操作不良而划伤胶膜产生条纹。
- ⑦ 胶片保管不善而发霉, 则有霉点生成。
- ⑧ 对于刚使用过的荧光增感屏, 若未等其余辉消失就装上胶片, 则胶片会因余辉的作用而感光, 出现上一次底片的影像。

(3) 因 X 射线固有特性及工件几何形状所生

- ① 对于由异质材料制作的工件, 在两种材质的交界处 (如有些焊缝的材质与母材的材质相差过大), 鉴于它们对射线的吸收情况不同, 而可能形成明暗界限。
- ② 因工件厚度不均匀和 (或) 内散射线的影响。
- ③ 由于 X 射线的衍射现象, 加之几何形状影响, 可能形成劳埃斑点。

2. 伪缺陷的辨认

凭多年经验积累, 一般无损检测人员均能对大部分缺陷进行有效的识别。例如, 从底片两侧观察此迹象是否表面反光, 或为表面划伤。有时, 可用 30 倍放大镜作局部观察。如胶片被划伤, 则放大后其伤痕连续, 而真缺陷则是一点一点连接起来的。

此外, 在有怀疑时, 不妨查看一下工件表面状态与增感屏情况, 必要时再重照一次进行复验。但对偶然出现在钢模铝铸件上的劳埃斑点则需慎重分析处理。

五、缺陷位置和大小的确定

1. 缺陷定位

缺陷位置包括水平位置和垂直位置两个方面, 其中, 缺陷在工件中的水平位置的确定比较简便, 根据简单的几何投影关系即可以确定。

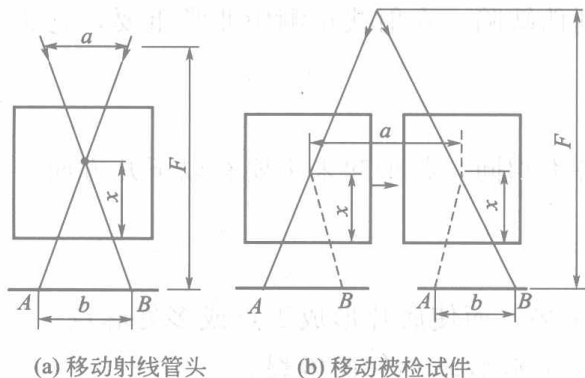


图 4-51 二次曝光法

较简便, 根据简单的几何投影关系即可以确定。

为了确定缺陷的深度, 必须进行两次不同方向的照射。两次透照时焦距 F 应保持不变, 或移动射线机, 或移动被测试件, 如图 4-51 所示。

对于一些薄、小且规则的工件, 也可以将工件转 90° 进行第二次透照, 将两次透照后的胶片进行比较, 便能看出埋藏深度, 如图 4-52 所示。

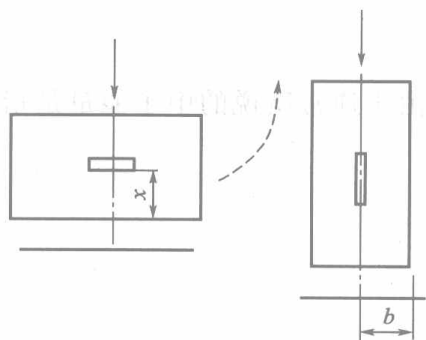


图 4-52 工件转向透照

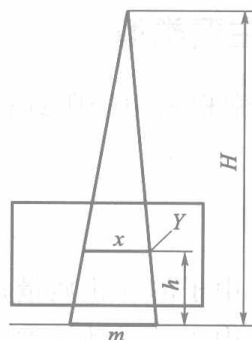


图 4-53 缺陷平面尺寸的确定

2. 缺陷定量

缺陷定位后，也可以粗略求出垂直于射线束方向的缺陷平面尺寸大小，如图 4-53 所示。假如此缺陷在垂直于射线方向的平面坐标上的真正长度为 x ，而投影到底片上的影像坐标长度为 m ，则有：

$$x = \frac{H-h}{H}m \quad (4-27)$$

为确定缺陷的厚度（即平行于射线束方向的缺陷尺寸），需要将工件旋转 90° 后再次透照，采用前述平面尺寸的确定方法完成。

第七节 中子射线检测简介

由于中子射线在穿越物质过程中，与物质的作用机理和衰减规律与 X 射线和 γ 射线完全不同，而使其成为 X 射线和 γ 射线检测的重要补充。但由于中子射线源不易获得，中子射线检测成本很高，而使其在常规工业检测中并不常用，因此本书对中子射线检测仅作简要讨论，有兴趣的读者可参阅有关中子检测的专门论著和文献。

一、中子射线的发现

1930 年，德国物理学家玻特（W. Bothe）和贝开尔（H. Becker）在用天然放射性元素发射的 α 粒子轰击铍（Be）、锂（Li）时，发现了一种连铅也不容易吸收的辐射，这种辐射具有强大的贯穿本领。起初以为它是高能射线，直到 1932 年查德威克（J. Chadwick）通过实验分析，证实这是一种不直接产生电离的、所带电荷基本为零的粒子，因此称它为中子。查德威克和玻特因此分别获 1935 年和 1954 年诺贝尔物理学奖。

二、中子的基本性质

中子是组成原子核的基本粒子之一，呈电中性，其静止质量为 $1.6748 \times 10^{-24} \text{ g}$ ，比质子和电子的质量之和还大。

中子具有 β 衰变，即它能放出一个电子而成为质子。中子的半衰期约为 $(11.7 \pm 0.3) \text{ s}$ ，因此，自由中子在自然界中很难存在。

中子具有波粒二象性，在穿越物质的过程，与物质的原子核发生作用而衰减。

中子能使胶片感光。

三、中子的主要类型

实践中,常根据中子所具有的能量对其进行分类,由于通常所说的中子能量是指它的动能,即

$$E_n = \frac{1}{2} m_n V^2 \quad (4-28)$$

式中 m_n ——中子的静止质量;

V ——中子的运动速度。

因此,常将中子分为慢中子和快中子等类型,如表 4-8 所示。

表 4-8 中子的分类

中子类型	中子能量	主要作用过程	中子类型	中子能量	主要作用过程
冷中子	$<0.01\text{eV}$		快中子	$10\text{keV}\sim 2.0\text{MeV}$	弹性散射
热中子	$0.01\sim 0.5\text{eV}$	辐射俘获	相对论中子	$>2.0\text{MeV}$	弹性散射、非弹性散射
慢中子	$0.5\text{eV}\sim 10\text{keV}$	弹性散射、辐射俘获			

四、中子与物质的相互作用

中子在穿越物质的过程,将与被穿越物质发生相互作用,其作用机理与 X 射线和 γ 射线不同。X 射线和 γ 射线与物质的相互作用是它们的光子与物质原子的电子或原子核的相互作用,中子与被穿越物质的相互作用主要是它与物质的原子核通过核力的相互作用。

中子与原子核的作用机制主要如下。

(1) 弹性散射 (n, n) 弹性散射的前后,整个系统保持动能和动量守恒。对中能中子,弹性散射是其损失能量的主要作用过程。

(2) 非弹性散射 (n, n') 中子把动能的一部分传给原子核作为原子核的激发能,激发了的原子核通过放出一个或多个光子(如 γ 射线)释放激发能而回到基态。在每次相互作用过程中,中子损失的能量很少。

非弹性散射只有在中子能量高于靶核的第一激发能级时才能发生。重核的第一激发能级在基态以上 100keV ,轻核的第一激发能级在基态以上约为 $3\sim 4\text{MeV}$,因此,快中子与重核相互作用时,非弹性散射占优势。

(3) 放出带电粒子的核反应 (n, p)、(n, α) 等 这实际上是中子源反应 (p, n)、(α, n) 的逆过程。

对于慢中子,只有在轻核情况下才能发生 (n, p) 和 (n, α) 反应,当中子能量较高时,还可能发生放出几个中子的核反应,如 ($n, 2n$)、($n, 3n$) …。

(4) 核裂变 (n, f) 中子与重核相互作用时,引起核的裂变。

有些重核在任何中子能量下都能裂变,而有些重核则只有在较高能量的中子作用下才能裂变。

(5) 辐射俘获 (n, γ) 中子与原子核作用,被原子核吸收,而形成激发态的复合核,然后放出一个或几个 γ 光子而回到基态。辐射俘获的结果是生成比原来的原子核大一个质量数的同位素,生成的新核往往还是放射性的。

任何能量的中子几乎都能与靶核发生辐射俘获,反应截面仅与中子能量有关。

五、中子射线的产生及中子源

除普通的氢核之外（氢核只有一个质子），其他任何原子都含有中子。如果对这些原子施加强大的作用，当给予原子核的能量超过中子的结合能时，中子便释放出来。任何能使原子核受到强烈激发的方式都可以用来获得中子，如用质子、氘核、 α 粒子和其他带电粒子以及 γ 射线来轰击原子核。

产生中子的装置称为中子源，目前常用的中子源有同位素中子源、加速器中子源和反应堆中子源三大类。

（1）同位素中子源 它利用天然放射性同位素（如镭、钋等）核裂变放出的具有一定能量的射线去轰击某些靶（如铍），引起核反应而产生中子。

这种中子源体积小、可以移动，使用方便，但中子的强度较低。表 4-9 所列是几种同位素中子源。

表 4-9 几种同位素中子源

中子源	反应方式	半衰期	中子平均能量 / MeV	中子产额 / $n \cdot (g \cdot s)^{-1}$	中子源	反应方式	半衰期	中子平均能量 / MeV	中子产额 / $n \cdot (g \cdot s)^{-1}$
$^{238}\text{Pu}-\text{Be}$	(α, n)	89 年	≈ 4	4.7×10^7	^{252}Cf	自发裂变	2.65 年	2.3	3×10^{12}
$^{241}\text{Am}-\text{Be}$	(α, n)	458 年	≈ 4	1×10^7	$^{210}\text{Po}-\text{Be}$	(α, n)	138 天	4.3	1.28×10^{10}
$^{241}\text{Am}-^{242}\text{Cm}-\text{Be}$	(α, n)	163 天	≈ 4	1.2×10^9	$^{124}\text{Sb}-\text{Be}$	(γ, n)	60 天	0.024	2.7×10^9
$^{244}\text{Cm}-\text{Be}$	(α, n)	18.1 年	≈ 4	2.4×10^8					

（2）加速器中子源 用被加速的带电粒子去轰击适当的靶，可以产生各种能量的中子，其强度比普通同位素中子源要高出好几个数量级。

（3）反应堆中子源 利用重核裂变，在反应堆内形成链式反应，不断地产生大量的中子，反应堆中子源是目前能量最大的中子源。但由于它不能移动，用于中子射线照相有很大的局限性。

以上三种中子源的简要对比如表 4-10 所示。

表 4-10 三种常见的中子源

中子源类型	源强度 / $n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	能谱	空间分辨率	曝光时间
同位素中子源	$10 \sim 10^4$	多能, 快中子	中	长
加速器中子源	$10^3 \sim 10^6$	单能, 快中子	中	中
反应堆中子源	$10^5 \sim 10^8$	连续, 快中子	高	短

六、中子射线通过物质时的衰减

中子是一种呈电中性的微粒子流，具有巨大的速度和贯穿能力。中子射线在被测物质中的衰减主要取决于材料对中子的捕获能力，其能量衰减规律为

$$I = I_0 e^{-\mu d} = I_0 e^{-N\sigma_t d} \quad (4-29)$$

式中 I_0 , I ——分别为入射线和透射线的强度；

d ——射线在被测物质中所穿越的距离，mm；

σ_t ——中子与被检物质中发生核相互作用的全截面（等于吸收截面和散射截面之和）；

N ——单位体积内核的数目，则吸收系数 $\mu=N\sigma_t$ 。

七、中子射线照相检测原理及特点

原理上，中子射线照相检测与 X 射线照相检测和 γ 射线照相检测相类似，都是利用射线对物体有很强的穿透能力，以及不同物质对穿越其中的射线的衰减系数不同，实现对物体的无损检测。

用于中子射线照相检测的通常为热中子（因其能量与分子、原子晶格处于热运动平衡的能量相当而得名），而中子源所发射的多为快中子，快中子不易被物质吸收，需要对其进行慢化处理。热中子经慢化处理后的运动方向杂乱无章，射线束发散，需要对其进行准直，以便使其集中定向发射。热中子本身几乎不能使 X 光胶片感光，因此必须采用转换屏。转换屏在中子的照射下可以发射 α 、 β 或 γ 射线，其强度与照射的中子射线强度成正比例，所以利用转换屏所发射的射线使射线胶片曝光，可以真实地记录中子射线图像。

表 4-11 所示是热中子照相常用的转换屏材料。其中，锂（Li）、硼（B）、镉（Cd）、钷（Qd）、钐（Sm）等为瞬时屏，因为它们所发射粒子的寿命几乎为零（瞬时的），其余反应产物的半衰期有一定时长的称为活化屏。

表 4-11 热中子照相常用的转换屏

转换屏	热中子截面/barn	发射粒子	反应产物的半衰期	发射粒子的最大能量/MeV
锂(Li)	935	α	瞬时	4.7
硼(B)	3837	α	瞬时	2.3
镉(Cd)	20000	γ	瞬时	9
钷(Qd)	58000	e	瞬时	0.14
	240000	e	瞬时	0.13
钐(Sm)	41500	γ	瞬时	—
	210	β	46.7 小时	0.8,0.1
铈(Rh)	144	γ	43 秒	2.41
	11	γ	4.4 分	0.5
	144	X	57 分	0.02
铟(In)	154	β	54 分	0.42
	45	β	14 秒	3.3
镝(Dy)	800	β	2.35 小时	1.29,0.095
	2200	β	1.26 分	1.04,1.108
银(Ag)	44	β	2.4 分	1.64,0.48
	110	β	24.5 秒	2.87
	3	β	254 天	1.5,0.66
金(Au)	98.8	β	2.69 天	0.412

注：1barn（靶恩）= 10^{-24} cm²。

按照所选用的转换屏，可以将中子射线照相分为直接曝光法（采用瞬时屏）和间接曝光

法（采用活化屏）两种，它们的工作原理分别如图 4-54(a)、(b) 所示。

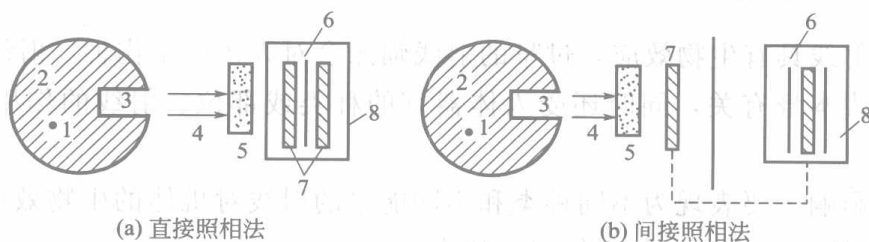


图 4-54 中子射线照相检测工作原理

1—中子源；2—慢化剂；3—准直器；4—中子流；5—被检件；6—X 光胶片；7—转换屏；8—暗盒

在直接曝光法中，胶片与转换屏同时装入暗盒，并一同置于透过被检件后的中子射线束中，胶片即时接收转换屏在中子束照射下所产生的射线，从而瞬时获得透过被检件后的中子射线图像。

在间接曝光法中，先用转换屏接收透过被检件后的中子射线，转换屏因中子射线的作用而活化，在其中形成被检件的放射性影像。再将胶片与转换屏一同装入暗盒，使胶片在转换屏的照射下感光，形成被检件的射线照相影像。

直接曝光法可以在低通量下进行长期曝光，完成射线照相，但胶片将同时受到从被检件及其周围物体所产生的 γ 射线照射，导致影像质量降低。间接曝光法避免了周围环境所产生的 γ 射线照射干扰，但照相速度较慢，只适用于活化屏，并要求中子源的强度足够。

在直接曝光法中，最常用的是钽屏，因为用钽屏不仅能获得较好的分辨率（最好值约为 $10\mu\text{m}$ ），且照相速度也比较快。在间接曝光法中，最常用的是铟屏和镅屏。

八、中子射线照相检测的应用

直至目前，中子射线检测作为 X 射线和 γ 射线检测的补充手段，主要应用于航空航天、兵器工业和原子能领域，在常规工业中应用并不多见。

世界范围内已有报道的中子射线检测实践有：检查陶瓷中的含水情况；检查 ^{235}U 等核燃料；检查含氢、硼、锂的物质与重金属组合成的物质，如检查金属结构中的橡皮、塑料、石蜡等含氢物质，如法国用中子照相法拍照出铅罐里装有石蜡的清晰照片。检查子弹壳内的炸药、固体火箭发动机内的填料；检测原子序数相近或同一元素的不同同位素等。

有理由相信，随着研究的深入，价格相对低廉而又比较安全可靠的新中子源的获得，以及新材料、新工艺研究开发的需要，中子射线检测将会获得越来越广泛的应用，并有可能逐渐成为一种比较常见的无损检测方法。

第八节 射线的防护

人类关于射线对人体危害的认识由来已久，对射线的防护也历经反复。在早期，出于快速拓展射线检测领域的迫切需要，人们没太在意射线的防护工作。后来，射线对人体所造成的伤害事件的陆续报道，又使人们对射线一度陷入恐慌之中。近年来，随着人们对射线生物效应研究的不断深入，对射线的危害也有了更加客观的认识，射线防护工作也日趋理性、科学。可以说，只要采取有效的防护措施，严格遵守相关法规、条例的规定，射线对人体造成的危害一定能够得到控制。

一、射线对人体的危害

前已述及,射线具有生物效应,过量的射线辐照会对人体产生伤害。射线对人体的伤害大小,不仅与射线本身有关,同时还受人体器官的种类或部位、射线的作用方式等因素的影响。

辐射性质的影响主要表现为不同种类和不同能量的射线对机体的生物效应(RBE: Relative Biological Effectiveness)各不相同,如表 4-12 所示。

表 4-12 不同辐射的相对生物效应

辐射类型	X, γ , β 射线	热能中子	质子	快中子 ($\leq 20\text{MeV}$)	快中子 ($> 20\text{MeV}$)	α 粒子
相对生物效应 RBE 值	1	5	10	10	20	20

就人体部位而言,眼晶体和性器官对射线辐射较为敏感;就辐射方式而言,在射线辐照总量相同的情况下,一般而言,单次集中辐射比多次分散辐射所造成的伤害更大。人体的各个器官究竟能承受多大的射线辐射,目前还没有完整的资料的积累。有研究表明,1 希(沃特)(Sv)的急性照射,有 15% 的人将出现临床症状;2 希(沃特)(Sv)的急性照射,几乎 100% 出现临床症状并可能死亡;而 4~5 希(沃特)(Sv)的急性照射,100% 死亡。

二、射线防护的有关法令

为了减少射线对人体造成的危害,以使射线检测更加安全、有序地开展,一些国际组织和政府部门相继颁布实施了一系列有关射线防护的政令、法规、条例或标准。其中,国际放射性防护委员会(ICRP: The International Commission on Radiological Protection)所颁布实施的有关法规、标准和条例,对世界各国的射线防护工作具有重要的指导意义,是各国制定本国射线防护法规、条例、标准的重要参考文献。

在我国,有关射线防护的法规、条例、标准等由卫生部、核安全局等单位负责制定。先后颁布实施的有关法令有:①“放射性工作卫生防护暂行规定”(1960 年);②GB J8—74“放射防护规定”(1974 年)③GB 4792—84“放射卫生防护基本标准”;④GB 8703—88“辐射防护规定”(国家环境部门 1988 年发布);⑤GB 11924—89“辐射安全培训规定”(1989 年);⑥GB 16387—1996“放射工作人员的健康标准”(1996 年);⑦GB/T 11806“放射性物质安全运输规定”;⑧国务院 1989 年第 44 号令“放射性同位素与射线装置放射防护条例”(1989 年 10 月 24 日);⑨1997 年卫生部第 52 号令“放射工作人员健康管理规定”(1997 年 6 月 5 日)等。

三、辐射量及其单位

定义辐射量及其单位的权威组织是国际放射单位与计量委员会 ICRU (International Commission on Radiological Units and Measurements),历年来,ICRU 发表了许多报告,提出了一系列建议,对辐射量及其单位给出了严格的定义。与射线检测有关的辐射量及单位列于表 4-13。

1. 照射量 X

照射量用 X 表示,只适用于 X 射线和 γ 射线,是对辐射场的一种度量。其定义为致电

表 4-13 ICRU 定义的部分辐射量及单位

辐射量名称	国际单位(SI)		专用单位		备 注
	名称	代号	名称	代号	
放射性强度	贝可[勒尔]	Bq	居里	Ci	$1\text{Bq}=1\text{S}^{-1}\approx 2.703\times 10^{-11}\text{Ci}$, $1\text{Ci}=3.7\times 10^{10}\text{Bq}$
照射量	库仑每千克	C/kg	伦琴	R	$1\text{R}=2.58\times 10^{-4}\text{C/kg}$, $1\text{C/kg}\approx 3.877\times 10^3\text{R}$
吸收剂量	戈[瑞]	Gy	拉德	rad	$1\text{Gy}=1\text{J/kg}=100\text{rad}$, $1\text{rad}=10^{-2}\text{Gy}$
剂量当量	希[沃特]	Sv	雷姆	rem	

离辐射在单位质量空气中释放出来的所有电子被空气完全阻止时在空气中产生的正或负离子总电荷的绝对值。即

$$X=\frac{dQ}{dm} \quad (4-30)$$

式中 Q ——致电离辐射在空气中所激发的正(或负)离子总电荷的绝对值, C;
 m ——被电离的空气质量, kg。

照射量的专用单位是伦琴(R), 其国际单位(SI)是库/千克(C/kg), 两者之间的换算关系如下:

$$1\text{R}=2.58\times 10^{-4}\text{C/kg} \quad (4-31)$$

单位时间内的照射量称为照射率, 用 $\dot{X}$ 表示, 即

$$\dot{X}=\frac{dX}{dt} \quad (4-32)$$

照射率的单位是库/千克·秒(C/kg·s)。

2. 吸收剂量 D

吸收剂量用 D 表示, 是电离辐射传给某体积内单位质量被照射物质的能量, 即

$$D=\frac{dE}{dm} \quad (4-33)$$

式中 E ——电离辐射传给某体积内单物质的能量, J;
 m ——该体积内的物质质量, kg。

吸收剂量的专用单位是拉德(rad或rd), 国际单位(SI)是戈(瑞)(Gy), 它们之间的换算关系如下:

$$1\text{Gy}=1\text{J/kg}=100\text{rad} \quad (4-34)$$

单位时间内的吸收剂量称为吸收剂量率, 用 $\dot{D}$ 表示, 即

$$\dot{D}=\frac{dD}{dt} \quad (4-35)$$

吸收剂量与照射量是两个意义完全不同的辐射量, 照射量只能作为 X 射线或 γ 射线辐射场的度量, 只反映射线在空气中的电离本领, 与被照射物的性质无关; 而吸收剂量不但适用于任何类型的电离辐射, 而且也可反映不同性质的物质吸收辐射能量的程度。电离辐射引起的生物效应主要取决于吸收剂量和吸收剂量率的大小。

3. 剂量当量 H

剂量当量以 H 表示, 是从射线的生物效应角度考虑的吸收剂量, 定义为组织内被研究的某一点上的吸收剂量 D 、品质因素 Q 和其他修正系数 N 三者的乘积, 即

$$H=DQN \quad (4-36)$$

剂量当量的专用单位是雷姆 (rem)，国际单位 (SI) 是希 (沃特) (Sv)，它们之间的换算关系如下：

$$1\text{Sv}=1\text{J/kg}=100\text{rem} \tag{4-37}$$

4. 最大允许剂量

最大允许剂量是为了保障射线操作者及附近人员的人身安全而提出的个人吸收剂量上限值，根据辐射方式，具体分为单次辐射、一定时期内辐射 [如每个工作日 (周、月、年等)] 和终生总的吸收剂量三种。各种辐射方式下的最大允许剂量限值由有关组织或部门制定，且处在不断的发展和完善之中。1977 年 8 月 ICRP 出版的第 26 号出版物建议的年吸收剂量当量极限如表 4-14 所示，我国国家标准 GB 4792—84 规定的吸收剂量当量限值列于表 4-15 中。

表 4-14 ICRP 建议的年吸收最大允许剂量/(Sv/年)

生物效应类别		放射性职业工作者	一般公众人员
非随机效应		眼晶体:0.3;其他组织:0.5	0.05
随机效应	全身均匀外照射	0.05	0.005
	全身非均匀外照射	$H_E \leq 0.05$	$H_E \leq 0.005$

- 注：1. 随机效应是指效应的发生概率与剂量有关，而效应的严重程度与剂量无关的效应，如遗传效应和致癌效应；
2. 非随机效应是指效应的严重程度随剂量而变化的效应，如白内障。
3. $H_E = \sum_T W_T H_T$ ，称为有效剂量当量。

表 4-15 GB 4792—84 规定的吸收剂量当量限值

生物效应类别	照射对象或方式	年剂量当量限值/mSv		连续三个月的剂量当量限值/mSv
		放射性职业工作者	一般公众人员	
非随机效应	眼晶体	150	50	75
	其他单个器官或组织	500	50	250
随机效应	全身均匀外照射	50	5	25
	全身非均匀外照射	$H_E \leq 50$	$H_E \leq 5$	$H_E \leq 25$

注： $H_E = \sum_T W_T H_T$ 称为有效剂量当量。

表 4-14 和表 4-15 中，有效剂量当量中的权重因子 W_T 的取值如表 4-16 所示。

表 4-16 有效剂量当量中的权重因子 W_T 的取值

组织 T	性腺	乳腺	红骨髓	肺	甲状腺	骨表面	其余组织
W_T	0.25	0.15	0.12	0.12	0.03	0.03	0.3 ^①

① 选取其余 5 个受照射最多的器官或组织 (不包括手、臂、足、皮肤和眼晶体)，各取 0.06，剩下的其他器官可不予考虑。当胃肠道受照射时，胃、小肠、大肠上段、大肠下段当作 4 个独立的器官计算。

四、射线防护原则

射线防护的目的是防止发生有害的非随机效应，将随机效应的发生率限制在可以接受的水平之内，从而尽量降低辐射可能造成的危害，为此，在射线防护中应遵守正当化、最优化和限值化三原则。

(1) 正当化原则 所谓正当化原则,就是要求在任何包含电离辐射的实践中,应保证这种实践对人群和环境产生的危害小于给其带来的利益,即收益大于代价的原则。

(2) 最优化原则 最优化原则要求应避免一切不必要的照射,在符合正当化原则的前提下,在与射线有关的任何实践中,应设法使受辐射的水平降为最低。

(3) 限值化原则 限值化原则要求,在符合正当化和最优化原则的前提下所进行的与射线有关的任何实践中,应保证个人所受到的吸收剂量当量不超过规定的限值。

五、射线防护方法

射线防护是通过采取适当措施,减少射线对工作人员和其他人员的照射剂量,把射线剂量控制在国家规定的允许剂量标准以下,以避免超剂量照射,减少射线对人体的影响。

X射线和 γ 射线的防护方法

目前,对X射线和 γ 射线的防护主要有时间防护、距离防护和屏蔽防护三种方法。

1. 时间防护法

时间防护是指通过缩短接触射线的时间,达到减少受射线辐射的方法。因为,在其他条件不变的情况下,人体所受到的射线辐射随时间的增长而增加。对X射线而言,辐射量与时间成正比。

2. 距离防护法

距离防护的原理是基于射线检测中的平方反比定律,即若离射线源 R_1 处的剂量率为 P_1 ,则在同一方向距射线源 R_2 处的剂量率 P_2 为:

$$P_2 = P_1 \frac{R_1^2}{R_2^2} \quad (4-38)$$

计算可得,当 $R_2 = 2R_1$ 时, P_2 仅为 P_1 的0.25倍,显见,增大与射线源的距离,可显著降低受射线的辐射。

距离防护法是在无防护或防护层不够时一种特别有用的防护方法,也是进行野外或流动性射线检测时非常经济有效的方法。

表4-17所示是不同管电压和管电流时,对直接一次射线的防护距离,仅供参考。在X射线检测中,当人体处在管壳窗口背面、两端和偏离射线束中心轴线 45° 以外时,可近似按表中数值的1/10估算实际防护距离。

表 4-17 对直接一次射线的防护距离/m

管电压/kV 管电流/mA								管电压/kV 管电流/mA							
	50	75	100	150	200	250	400		50	75	100	150	200	250	400
0.005	8.0	10.6	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	2.0	60.8	92.3	116.2	118.8	134.6	142.5	142.5
0.01	10.6	13.2	15.8	15.8	18.5	18.5	18.5	2.5	63.4	97.7	124.0	129.4	142.5	150.5	155.7
0.025	15.8	21.1	23.7	23.7	26.3	29.1	29.1	5.0	74.0	116.2	147.7	155.7	174.2	184.8	190.0
0.05	21.1	26.3	31.7	31.7	34.3	36.9	36.9	10.0	84.5	132.0	174.2	184.8	206.0	221.7	
0.1	26.3	36.9	42.3	42.3	47.5	50.2	50.2	15.0	92.3	142.5	187.4	206.0	227.1	242.8	
0.25	36.9	50.2	60.8	60.8	66.0	71.2	71.2	20.0	97.7	153.1	200.6	216.5	242.8	258.8	
0.5	45.0	60.8	76.6	76.6	87.1	89.7	89.7	25.0	102.9	158.3	206.0	221.7	253.4	269.2	
1.0	52.8	76.6	95.1	97.7	108.3	113.5	113.5								

3. 屏蔽防护法

所谓屏蔽防护法,就是在放射源与人体之间放置能有效吸收射线的屏蔽材料,以减弱或消除辐射对人体的伤害。屏蔽防护法是外照射防护的主要方法。

屏蔽材料的选择及其厚度的确定,取决于辐射的性质以及对防护的要求。对 X 射线和 γ 射线的防护,屏蔽材料以密度大的物质为好,如贫化铀、铅、铁、重混凝土、铅玻璃等。实际工作中,为经济、方便计,也可采用混凝土、岩石、砖、土、水等普通材料作屏蔽材料。

在防护结构设计方面,不仅要注意直接辐射的防护,还要注意反射辐射等间接辐射的防护。

探伤室的门缝及孔道的泄漏,是实际工作中比较普遍存在的问题,应注意进行妥善处理。原则上不留直缝、直孔,可采用阶梯结构或迷宫式结构。对阶梯结构,级数不宜太多,一般采用二阶即可。阶梯的阶宽不得小于孔径的二倍,但也不必太大。若采用迷宫式防护,也可照此原则处理。采用砖作屏蔽材料时,如处理不当容易产生泄漏,因此,凡用来屏蔽直接射线的砖墙,砌砖时一定要用水泥砂浆将砖缝填满、砖墙两侧要有 2cm 的 70~100 号水泥砂浆抹面。

屏蔽结构的厚度主要取决于射线的最大原始强度,以及操作处所要达到的射线强度水平,可查阅有关屏蔽材料的线吸收系数或半值厚度,根据计算确定。

六、中子射线防护

中子对人体危害很大,所以要特别注意防护。前述的时间防护、距离防护和屏蔽防护也适用于对中子射线的防护。此外,中子射线的防护还有其特殊性,中子防护可归结为快中子的减速和热中子的吸收两个方面,在选择屏蔽材料时需加以考虑。

(1) 快中子的减速 快中子的减速作用主要依靠中子和原子核的弹性碰撞。因此,较好的中子减速剂是含氢多的物质,如石蜡、塑料、水、油等,它们作为减速剂使用性能效果好,价格便宜,是比较理想的防护材料。

(2) 热中子的吸收 对于吸收剂,要求它在俘获慢中子时放出来的 γ 射线能量要小,而且对中子是易吸收的。锂和硼较为适合,因为它们对热中子的吸收截面大,分别为 935barn 和 3837barn。锂俘获中子时放出 γ 射线很少,可以忽略;而硼俘获的中子 95% 放出 0.7MeV 的软 γ 射线,较易吸收,因此常选含硼物或硼砂、硼酸作吸收剂。

在设置中子防护层时,总是把减速剂和吸收剂同时考虑,如含 2% 的硼砂(质量分数,下同)、石蜡、砖或装有 2% 硼酸水溶液的玻璃(或有机玻璃)水箱堆置即可,要特别注意防止中子泄漏。

第九节 射线检测的新近进展

借助现代信息传感技术、计算机及通讯技术、信号处理技术、人工智能等学科的新近成果,在广大射线检测科技工作者的共同努力下,射线检测也在不断发展中。传统的射线检测技术不断完善,新的检测技术不断涌现,如高能 X 射线、射线实时成像、射线 CT、智能评片、网上远程评片等。此处只对工业射线 CT 技术进行简要讨论,对射线检测其他方面的新近进展,有兴趣的读者可参阅最新文献资料,此处不再赘述。

一、工业射线 CT 的发展历程

所谓 CT，即计算机层析成像 (Computerised tomography)，也即借助计算机强大的数据处理功能，通过映射、变换、建模、图像增强、特征抽取等一系列运算操作，最终可获得表征物体内部构造的三维立体图像。

有多种途径可获得 CT，如超声 CT、微波 CT 和射线 CT。其中，射线 CT 最为成熟，应用也最为广泛。

1972 年，世界上第一台医用射线 CT 在英国 EMI 公司诞生，20 世纪 80 年代初期，美国开始工业射线 CT 的研究，1981 年 10 月，美国莱特-派特森空军基地航空系统部资助美国的 ARACOR 和喷气战略推进公司共同研制了用于导弹和固体火箭发动机部件检测的工业 CT 系统，项目总经费达 460 万美元。研制成功了 AF/ACTS I 和 AF/ACTS II 两套系统，其中 AF/ACTS I 采用 420keV 的 X 射线源，可检测直径 1m 的物体，于 1983 年 3 月安装，是世界上第一套严格用于无损检测并安装在现场的工业 CT 系统；AF/ACTS II 于 1985 年 2 月安装使用，采用 16keV 直线加速器，可检测直径 2.4m，长 5.1m，重达 50t 的物体。直至目前，CT 机的扫描方式已发展到第五代，各代的扫描运动方式如图 4-57 所示，工业射线 CT 机主要采用第二、第三代扫描方式。

二、工业射线 CT 技术的工作原理

工业射线 CT 技术的工作原理如图 4-55 所示。将射线（束）投射到被检件的一侧，在被透照物体的对侧用探测器（阵列）检测穿透物体后的射线强度。通过移动被检件或射线源，以改变射线投射的方向，把从不同方向透过被检物体后的射线收集起来，再经计算机处理，就可以获得物体在该横截面的二维 CT 图像。使射线束相对物体上下移动，就可以获得不同截面的二维 CT 图像。必要时，可以由不同截面的二维 CT 图像数据，重建得到物体的三维 CT 图像。

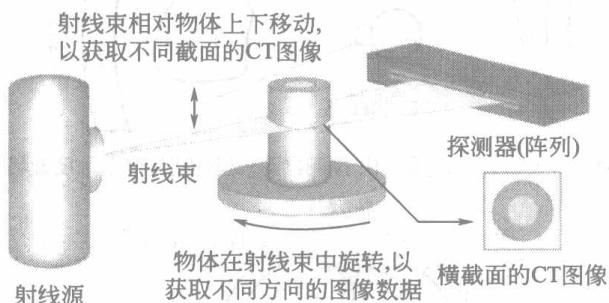


图 4-55 射线 CT 的工作原理

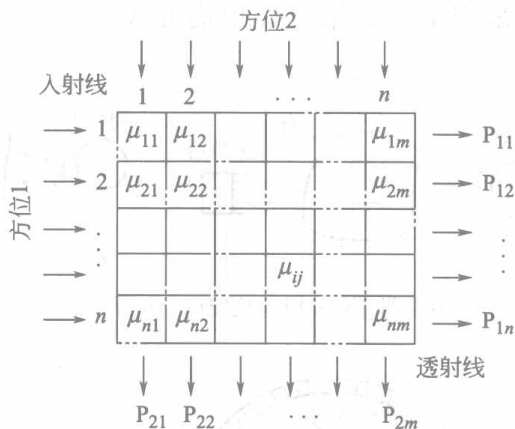


图 4-56 射线 CT 的数学原理

射线 CT 的数学原理可由图 4-56 加以说明。设将被检物体的某一个截面划分为边长为 1 的若干个小区域，在每个小区域内，物体对射线的衰减特性是均匀一致的，分别记为 μ_{11} ， μ_{12} ， $\dots$ ， μ_{ij} 。物体对射线的衰减是各个单元共同作用的结果。

当射线从方向 1 透照物体时，可以得到：

$$\begin{cases} \mu_{11} + \mu_{12} + \cdots + \mu_{1m} = p_{11} \\ \mu_{21} + \mu_{22} + \cdots + \mu_{2m} = p_{12} \\ \vdots \\ \mu_{n1} + \mu_{n2} + \cdots + \mu_{nm} = p_{1n} \end{cases} \quad (4-39)$$

当射线从方向 2 透照物体时, 同理可以得到:

$$\begin{cases} \mu_{11} + \mu_{21} + \cdots + \mu_{n1} = p_{21} \\ \mu_{12} + \mu_{22} + \cdots + \mu_{n2} = p_{22} \\ \vdots \\ \mu_{1m} + \mu_{2m} + \cdots + \mu_{nm} = p_{2m} \end{cases} \quad (4-40)$$

每改变一次射线的透照方向, 都可获得一组新数据, 得到一组新的方程。把从不同方向透照所得到的方程联立起来求解, 即可解出 $\mu_{11}, \mu_{12}, \cdots, \mu_{ij}$ 等数据, 即可得到各单元的衰减系数, 以图形的方式将其显示输出, 就可获得物体的 CT 图像。

三、工业射线 CT 的系统组成

工业射线 CT 系统一般由射线源、射线探测器 (阵列)、运动控制系统、数据采集与处理系统等几部分组成。

射线源主要为 X 射线源或 γ 射线源, 也有中子射线源, 究竟选用何种射线源, 主要取决于检测对象的衰减特性及其几何尺寸大小。

射线探测器主要分为闪烁体光电倍增管、闪烁体光电二极管和气体电离探测器三种类型, 其中闪烁体光电二极管探测在工业射线 CT 中应用最为普遍, 性能最为先进。探测器的组成形式则有单元、多元线阵列、多元面阵列三种, 其中, 单元探测器目前在射线 CT 机上已基本不用。

运动控制系统的主要功能是提供机械扫描和物体位置的精确控制, 由机械传动部件、驱动部件和控制指令等单元组成。各代 CT 机的扫描运动方式如图 4-57 所示, 工业射线 CT 机主要采用第二、第三代扫描方式。

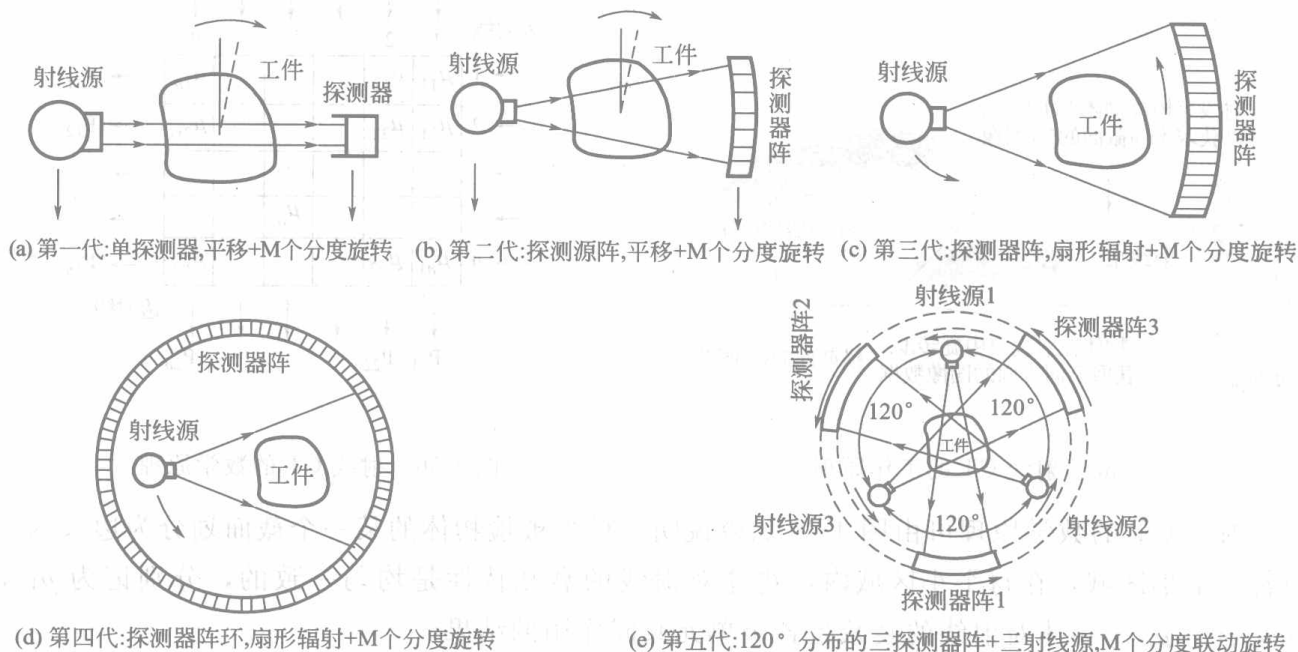


图 4-57 射线 CT 的扫描方式

数据采集与处理系统的主要功能是获取物体的断层扫描的原始数据,对原始数据进行 A/D 转换、滤波、降噪、变换等处理,将结果以图像方式显示输出等,核心组成是 A/D 转换板(卡)及软件系统。

图 4-58 所示是某型工业射线 CT 机的射线源及机械操控部分的实物照片。

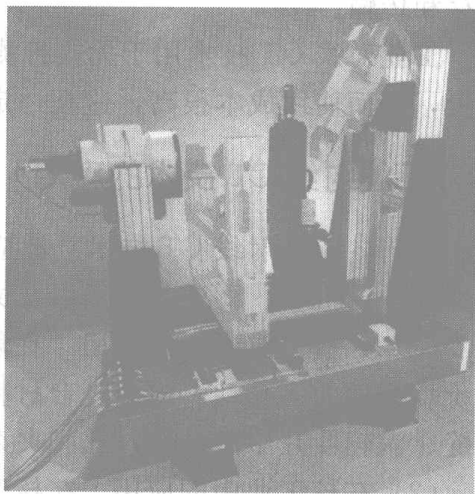


图 4-58 工业射线 CT

四、工业射线 CT 的主要技术指标

工业射线 CT 的技术指标是多方面的,如检测范围(工件的种类、尺寸、重量)、扫描时间、计算时间、测量孔径、断层厚度、几何分辨率、密度分辨率、摄影频率等,其中最重要的技术指标如下。

(1) 空间分辨率 指断层面上的几何分辨率,也即显示最小物体的能力。目前,性能良好的工业射线 CT 机,其空间分辨率可达 $50\mu\text{m}$,可检出陶瓷材料中 $10\mu\text{m}$ 的微裂纹。

(2) 断层厚度 医学上称切片厚度,它是层析摄影的重要指标。工业精密检测对断层厚度的要求比医学上要高得多。断层厚度与空间分辨率密切相关,断层厚度越薄,空间分辨率越高。目前,工业 CT 的断层厚度为 $1\sim 4\text{mm}$,最薄可达 0.1mm 。

(3) 密度分辨率 又称对比度分辨率,也称 CT 系统灵敏度,表示区别密度差异的能力,常用百分数表示。目前最好的 CT 密度分辨率为 $0.2\%\sim 0.5\%$ 。

在剂量一定的条件下,密度分辨率越高,空间分辨率越低,两者之积为一常数,称为对比细节常数,以 $\text{mm}(\%)$ 表示。

(4) 伪像 又称假像,是指 CT 图像中与被检物体的物体参数分布没有对应关系的部分。

(5) 均匀度 是指同一断面不同位置上相同组织或缺陷成像所得到的 CT 值的一致性,在图像定量评价中非常重要。

(6) 重复性 是指一定的误差范围内,同一物体在同样的测量参数下重复测量,各次测量所得 CT 图像的一致性。

(7) 时间分辨率 指前后两幅 CT 图像之间的最小时间差,与照相时间和摄影频率有关,在动态连续 CT 测量中具有重要意义。

五、工业射线 CT 技术的特点

与传统的射线检测相比,工业射线 CT 技术具有以下优点。

① 工业射线 CT 可以得到表征物体内部构造的三维图像,从而可以避免传统的射线检测以二维平面图像来表征三维立体结构而可能存在的前后缺陷的重叠。

② 检测范围更大。工业射线 CT 一般采用高能 X 射线或 γ 射线源,它们比传统的射线检测具有更大的穿透能力和更大检测范围,可检测厚达几米的钢结构。

③ 检测灵敏度和检测分辨率高。采用工业射线 CT 可以检测出 μm 量级的微裂纹。

④ 检测结果直观,且便于传输、保存。工业射线 CT 可以获得每个断面的二维图和三维重建立体图,结果直观。由于其检测结果是以图像和电子数据文件的方式输出,因而便于

保存和传输。

工业射线 CT 技术用于无损检测的主要不足是检测费用高。目前,工业射线 CT 机价格昂贵,因而使用成本很高,这在一定程度上限制了其应用。

六、工业射线 CT 技术的应用

目前,工业射线 CT 技术广泛应用于航空航天、核工业、石油、矿产普查与地质勘探、岩石力学、机械、陶瓷、电子以及文物鉴定等领域,并不断探索其新的应用领域。

(1) 在航空航天中的应用 在航空航天领域,CT 技术用来检测精密铸件的内部缺陷、评价烧结件的多孔性、检测复合材料的结构,以及火箭发动机的电子束焊缝、飞机机翼的铝焊缝、涡轮叶片中的细小气孔和夹杂物。

(2) 在核工业中的应用 在核工业领域,CT 技术用来检测反应堆燃料元件的密度和缺陷,确定包壳管内芯体的位置,检测核动力装置及其零部件的质量等。

(3) 在冶金工业中的应用 在冶金工业领域,CT 技术用来分析矿石的成分和含量,以及冶金产品的质量检测与监控。

(4) 在机械工业中的应用 在机械工业领域,CT 技术主要用来检测和评价铸件和焊接结构质量,可以检测其中的微小气孔、缩孔、夹杂和微裂纹等缺陷,也可用于精确的尺寸测量。

(5) 在陶瓷工业中的应用 在陶瓷工业领域,CT 技术主要用来检测碳化硅、氧化锆、氮化硅、三氧化二铝等先进陶瓷材料与结构中的微裂纹,可以准确检测出其中 $10\sim 100\mu\text{m}$ 大小的缺陷和极微小的密度分布。

(6) 在电子工业中的应用 在电子工业领域,CT 技术主要用来检测电子元器件以及 PCB 板内部的微小缺陷。

(7) 在矿产普查与地质勘探中的应用 在矿产普查与地质勘探领域,CT 技术主要用来分析地质构造、测定矿物成分和结构。

(8) 在岩石力学中的应用 在岩石力学领域,CT 技术主要用来观察岩石在各种载荷作用下的形变和断裂过程,研究其破坏机理等。

参考文献

- [1] 中国机械工程学会无损检测分会编. 射线检测. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [2] Halmshaw R. Non-destructive Testing. London: Edward Arnold, 1987.
- [3] [日]日本无损检测协会编. 李衍译. 郑中兴校. 射线探伤 A. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [4] [日]日本无损检测协会编. 李衍译. 肖蔚彬校. 射线探伤 B. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [5] 中国机械工程学会无损检测学会编. 无损检测概论. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [6] 李家伟, 陈积懋主编. 无损检测手册. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [7] 孙万铃编著. X 射线检验问答. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [8] 中国机械工程学会无损检测学会编. 射线检测. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [9] [日]石井勇五郎著, 吴义, 王东江, 沐志成译. 无损检测学. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [10] Meyendorf N G H, Nagy P B, Rokhlin S I. Nondestructive Materials Characterization. New York: Springer, 2004.
- [11] 云庆华主编. 锅炉、压力容器无损探伤技术. 天津: 天津科学技术出版社, 1985.
- [12] 李喜孟. 无损检测. 北京: 机械工业出版社, 2000.

- [13] 刘福顺, 汤明. 无损检测基础. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [14] 美国无损检测学会编. 美国无损检测手册编审委员会译. 美国无损检测手册-射线卷. 上海: 世界图书出版公司, 1992.
- [15] 孙万铃, 潘炳勋, 杨新荣编著. 射线检测. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [16] 郑世才. 射线检测基础讲座——第五讲 评片技术 (II). 无损检测, 2000, 22 (5): 229~236.
- [17] 郑世才. 射线检测基础讲座——第八讲 中子射线照相检验技术. 无损检测, 2000, 22 (8): 376~380.
- [18] 郑世才. 射线检测基础讲座——第十一讲 辐射防护. 无损检测, 2000, 22 (11): 516~521.
- [19] [美]CHARLES J. HELLIER 著, 戴光, 徐彦廷, 李伟等译. 无损检测与评价手册. 北京: 中国石化出版社, 2006.
- [20] 王功庆, 曾寄萍. γ 射线无损检测炮弹体内炸药密度. 核技术, 1998, 21 (3): 151~156.
- [21] YXLON (依科视朗) 公司资料.
- [22] GE 公司资料.
- [23] BIR 公司资料.
- [24] 丹东射线仪器 (集团) 股份有限公司资料.
- [25] 奥龙射线仪器有限公司网上资料. <http://www.cn-ndt.com>.
- [26] 曾祥昭. 无损检测新技术-X 射线数字成像研究与应用. 压力容器, 1997 (6): 37~46.
- [27] 郑世才. 射线检测基础讲座——第七讲 射线实时成像检验技术. 无损检测, 2000, 22 (7): 328~336.
- [28] 郑世才. 射线检测基础讲座——第四讲 评片技术 (I). 无损检测, 2000, 22 (4): 182~188.
- [29] 郑世才. 射线检测基础讲座——第一讲 射线照相检验技术的基础. 无损检测, 2000, 22 (1): 42~47.
- [30] 郑世才. 射线检测基础讲座——第二讲 射线照相检验基本技术的基础. 无损检测, 2000, 22 (2): 84~88.
- [31] 郑世才. 射线检测基础讲座——第三讲 典型工件的射线照相技术. 无损检测, 2000, 22 (3): 125~133.
- [32] 郑世才. 射线检测基础讲座——第六讲 射线照相检验标准与射线照相检验质量控制. 无损检测, 2000, 22 (6): 279~284.
- [33] 郑世才. 射线检测基础讲座——第九讲 CT 技术和康普顿散射成像检测技术. 无损检测, 2000, 22 (9): 423~428.

第五章

磁粉检测

第一节 概 述

所谓磁粉检测 (MT: Magnetic Particle Testing), 就是利用磁粉在缺陷漏磁场处的聚集, 得到放大且对比度更高的缺陷磁痕, 以显示试件表面与近表面缺陷的无损检测方法。

一、磁粉检测发展简史

关于磁粉检测的历史, 最早可以追溯至 19 世纪。1868 年, 英国 ENGINEERING (工程) 杂志首先发表了利用罗盘仪探查磁通以检测枪管上的不连续性的报告。1874 年, Hering (贺玲) 利用罗盘仪检查钢轨的不连续性获美国专利。

1922 年, 美国人 Hoke (霍克) 在切削钢件的时候, 发现铁屑在工件上的裂纹区域聚集, 并由此提出磁粉检测的设想。但由于受磁化技术与设备的限制, 他的设想直到 1929 年才付诸实施。

1928 年, Forest (富勒斯特) 为解决油井钻杆断裂问题研制了周向磁化, 并使用了尺寸和形状受控的磁粉, 获得了可靠的检测结果。1930 年, Forest 和 Doane (豆恩) 将研制出的干磁粉成功地应用于焊缝及各种工件上的探伤。1934 年, Forest 和 Doane 创办专门生产磁粉探伤设备和材料的 Magnaflux (美国磁通) 公司, 对磁粉检测的应用和发展起了很大的推动作用。

20 世纪 30 年代, 固定式、移动式和便携式磁化设备相继研制成功, 湿法检测技术也得到应用, 退磁问题也得以解决。

1938 年, 德国出版了《无损检测论文集》, 对磁粉检测的基本原理和装置进行了讨论。1940 年, 美国出版了《磁通检测原理》教科书。

二战以后, 磁粉检测在各方面都得到迅速发展, 不同的磁化方法和专用检测设备不断问世, 在航空、航天、钢铁、汽车等行业, 磁粉检测方法不仅用于产品检验, 还用于预防性维修。

1941 年, 荧光磁粉投入使用, 提高了磁粉检测的灵敏度和可靠性。

值得特别一提的是, 前苏联全苏航空材料研究院的瑞加德罗, 他毕生致力于磁粉探伤的研究和应用, 为磁粉检测的发展作出了卓越的贡献。20 世纪 50 年代初, 他系统地研究了各种因素对探伤灵敏度的影响, 在大量试验基础上制定的充磁规范, 在全世界影响广泛, 被许多国家采用, 我国各工业部门也大都以此为依据。他首创的用于评价磁粉质量的磁性称量法和酒精沉淀法我国也一直沿用至今。

20 世纪 60 年代, 磁粉检测向轻便式系统方向发展, 并出现了磁场强度测量、磁化指示试块 (试片) 等专用检测器材。

目前, 由于新型的传感技术、电子计算机软硬件技术和自动控制技术等相关学科的发展, 使磁粉检测技术与设备也得到了很大的发展, 半自动、自动和专用磁粉检测设备相继问世, 大大提高了磁粉检测的效率和可靠性。磁痕的观察与评定也由单纯依靠人眼的观察评定, 发展为橡胶铸型、CCD 摄像以及计算机自动分类、识别等多种记录、分析手段, 这不仅减轻了劳动强度, 提高了工作效率, 也提高了检测结论的可靠性, 还有利于磁痕的保存。

二、磁粉检测的特点及应用

与其他无损检测方法相比较, 磁粉检测的主要优点如下:

- ① 可以直观地显示出缺陷的形状、位置与大小, 并能大致确定缺陷的性质;
- ② 检测灵敏度较高, 可检出宽度仅为 $0.1\mu\text{m}$ 的表面裂纹;
- ③ 应用范围广, 几乎不受被检件大小及几何形状的限制;
- ④ 工艺简单, 检测速度快, 费用低廉。

磁粉检测的局限性在于:

- ① 只能检测铁磁性材料, 不能检测非铁磁性材料 (如奥氏体不锈钢, 铜、铝、镁等有色金属, 非金属);
- ② 只能检测表面或近表面缺陷, 可探测的缺陷深度一般在 $1\sim 2\text{mm}$ 以内;
- ③ 对缺陷的取向有一定的限制, 一般要求磁化场的方向与缺陷主平面的夹角大于 20° ;
- ④ 对试件表面的质量要求较高;
- ⑤ 深度方向的缺陷定量与定位困难。

磁粉检测技术早期主要应用于航空航天、汽车和铁路部门, 用来检测发动机、车轮轴等部件上的裂纹。目前已发展成为五种常规的无损检测方法之一, 广泛应用于航空航天、交通运输、石油化工、原子能等领域, 对钢铁原材料 (板材、型材、管材、铸件及锻造毛坯等)、半成品和制成品的表面与近表面缺陷进行检测, 也可以用于压力容器、石油化工设备以及重要的机械设备的定期检查和预防性维修。

第二节 磁粉检测的基本原理

一、磁场及其特征参量

所谓磁场 (magnetic field), 就是产生磁力的场, 也就是磁力的作用空间。

描述磁场和磁介质特征的物理量有磁场强度、磁感应强度、磁化强度、磁力线、磁通量。

1. 磁场强度 H (Magnetic field intensity)

磁场强度是描述磁场强弱的物理量, 用符号 H 表示, 它是一个矢量, 既有大小, 又有方向。磁场强度的 SI 制单位是安/米 (A/m), 工程单位是奥斯特 (Oe), 它们之间的换算关系如下:

$$1\text{A/m}=4\pi\times 10^{-3}\text{Oe}\approx 0.0125\text{Oe} \quad (5-1)$$

2. 磁感应强度 B (magnetic induction/magnetic flux density)

磁介质在磁场的作用下, 会被磁化, 并在其内部产生一定强度的磁场, 这个磁场的强度称为磁感应强度, 用符号 B 表示, 它也是一个矢量, 既有大小, 又有方向。

磁感应强度又称磁通密度，即与磁力线垂直的单位面积上的磁通量。

磁感应强度的 SI 制单位是特（斯拉），记为 T。其工程单位是高斯，记为 Gs。特（斯拉）和高斯两者之间有如下的换算关系：

$$1\text{T}=10^4\text{Gs} \quad (5-2)$$

数值上，磁感应强度 B 与磁场强度 H 之间存在如下关系：

$$H=\frac{B}{\mu}=\frac{B}{\mu_r\mu_0} \quad (5-3)$$

或

$$B=\mu_0\mu_r H \quad (5-4)$$

式中 μ ——介质的磁导率（permeability）；

μ_0 ——真空中的磁导率， $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}\text{N/m}^2=4\pi\times 10^{-7}\text{H/m}$ ；

μ_r ——介质的相对磁导率（relative permeability）。

3. 磁化强度 M

磁感应强度是介质在磁场的磁化作用下产生的，换句话说，磁场的磁化作用使原磁场在介质中发生了变化。因此，磁感应强度也可以表述为原磁场强度和附加磁场强度（磁化磁场强度）的叠加，即

$$B=\mu_0(H+M) \quad (5-5)$$

将式(5-4)代入式(5-5)，有

$$\mu_0\mu_r H=\mu_0(H+M)$$

可得磁化强度

$$M=(\mu_r-1)H=\chi H \quad (5-6)$$

式中 χ ——磁化率。

根据相对磁导率 μ_r 的数值大小，可将介质分为抗磁性物质（简称抗磁质）、顺磁性物质（简称顺磁质）和铁磁性物质（简称铁磁质）三大类。

抗磁质的相对磁导率 μ_r 略小于 1，磁化强度 M 为负值（即与原磁场方向相反），磁化的结果使原磁场在介质中的强度减弱。属于抗磁质的物质有铜、金、银、锌、铅、水银、铋、锑以及非金属中除石墨和氧以外的物质。

顺磁质的相对磁导率 μ_r 略大于 1，磁化的结果使原磁场在介质中的强度略有增大。属于顺磁质的物质有铝、锰、铬、钛、铂、钨、奥氏体合金钢，以及碱金属锂、钠、钾、氮、氧等。

抗磁质和顺磁质的相对磁导率 μ_r 都接近于 1，介质磁化后的附加磁场对原磁场的影响很小，故统称为非磁质。

铁磁质的相对磁导率 μ_r 远大于 1，磁化的结果使原磁场在介质中的强度增大很多。属于铁磁质的物质有铁、钴、镍以及它们的合金。

对铁磁质而言，其相对磁导率 μ_r 不是固定不变的，它将随外磁场强度和温度等因素的变化而变化。当温度等其他条件一定时，铁磁质的相对磁导率 μ_r 随外磁场强度的变化而变化并会出现最大值，如图 5-2(a) 所示，相对磁导率的最大取值称为铁磁质的最大相对磁导率，记为 μ_m 。随着温度的升高，铁磁质的相对磁导率 μ_r 将逐渐减小，并最终趋近于 1，铁磁质由铁磁性转化为顺磁性。发生这种转变的临界温度称为铁磁质的（磁性）居里点。不同铁磁质的居里点温度各不相同，工业纯铁的磁性居里点温度为 770°C ，热轧硅钢的磁性居里点温度为 690°C 。

表 5-1 所示是几种常见物质的相对磁导率 μ_r 数值，不同的资料来源，表中数值略有差异。

表 5-1 几种常见物质的相对磁导率 μ_r

材料名称	相对磁导率 μ_r	分类	材料名称	相对磁导率 μ_r	分类
铋	0.99983	抗磁性物质	钛	1.000181	顺磁性物质
水银(293K)	0.999971		铂(293K)	1.00026	
银	0.99998		铬	1.000313	
氢(气体)	0.99996		钯	1.0008	
铅	0.999983		2-81 坡莫合金 (2Mo,81Ni)	130	铁磁性物质
铜(293K)	0.999991		钴	250	
水	0.999991		镍	600	
氧化铝	0.9999819		锰锌铁淦氧 3	1500	
金	0.9999656		软钢(0.2C)	2000	
硅	0.999959		铁(0.2 杂质)	5000	
锌	0.9999844		硅钢(4Si)	7000	
空气	1.0000004	顺磁性物质	78 坡莫合金	100000	
钠	1.00000848		纯铁(0.05 杂质)	200000	
铝(293K)	1.0000207		导磁合金(5Mo, 79Ni)	1000000	
锆	1.000109				

4. 磁力线

为了形象地描述磁场强度和磁感应强度在磁场中的分布情况而引入磁力线概念，磁场强度和磁感应强度的大小用穿过单位面积的磁力线的多少或磁力线的密集程度来描述。如图 5-1 所示是条形磁铁的磁力线，可见，在条形磁铁的两端，磁力线的密度较大，磁场强度较高，而其他区域的磁力线的密度较小，磁场强度较低。条形磁铁这两个磁力线密度较大的端点称为磁极，分别记为 N（称为北极）和 S（称为南极），任何磁体的磁极都是成对出现的，称为磁偶极，不存在单独的 N 极或 S 极。

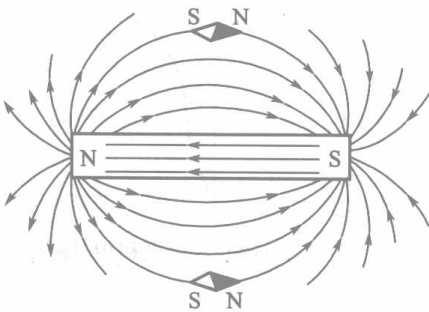


图 5-1 条形磁铁的磁力线

磁力线具有以下特性。

- (1) 磁力线具有方向性。磁场中的磁力线上的每一点都只有一个确定的方向。人为规定，在磁铁的外部，磁力线由 N 极指向 S 极。
- (2) 磁力线互不相交地贯穿于整个磁场。

5. 磁通量 Φ

磁通量也是磁学中经常用到的一个物理量，用来描述穿过某横截面的磁力线的多少，用符号 Φ 表示。

磁通量的 SI 制单位是韦（伯），记为 Wb，工程单位是麦克斯韦，记为 Mx，两者之间的换算关系如下：

$$1\text{Wb}=1\text{T}\cdot\text{m}^2=10^8\text{Mx}$$

(5-7)

二、介质的磁特性及其影响因素

介质的磁特性是其在与外磁场的相互作用过程中表现出来的, 前述的抗磁性、顺磁性和铁磁性即是介质磁特性的一个方面。

由于在磁粉检测中, 只对铁磁性材料感兴趣, 故在此只讨论铁磁性材料的磁特性及其影响因素。

1. 铁磁性材料的磁特性

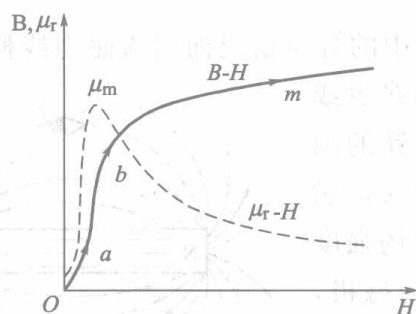
描述铁磁性材料磁特性的参量有磁导率、相对磁导率、矫顽力、剩余磁感应强度和居里点温度等。居里点温度如前所述, 而相对磁导率和矫顽力等可借助磁化曲线和磁滞回线进行说明。

所谓磁化, 也就是介质在外磁场作用下产生感应磁场的过程。磁化曲线是描述磁化过程中磁感应强度随外加磁场强度变化的关系曲线, 也即 $B-H$ 曲线。

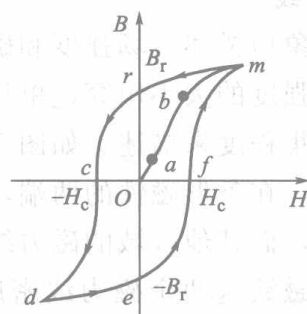
磁滞回线是铁磁性介质在外加磁场的磁化—消磁—反向磁化—反向消磁的循环中, 所形成的封闭 $B-H$ 关系曲线。

典型铁磁性材料的磁化曲线、相对磁导率随外加磁场强度的变化和磁滞回线如图 5-2 所示, 其中, 图 5-2(a) 是典型铁磁性的磁感应强度和相对磁导率随外加磁场强度的变化曲线, 图 5-2(b) 是磁化曲线和磁滞回线。

在图 5-2 中, 假定介质处在图中的 O 点, 即初始磁感应强度和外加磁场强度都为零。从 O 点开始, 逐步增大外加磁场强度 H , 随 H 的增大, 磁感应强度 B 也将增大, $B-H$ 沿曲线 $Oabm$ 变化, 这就是该介质的起始磁化曲线。



(a) 磁感应强度和相对磁导率随外磁场的变化曲线



(b) 磁化曲线和磁滞回线

图 5-2 磁化、相对磁导率和磁滞回线

到达 m 点以后, 如果此时逐步减小外加磁场 H 的强度, 则 $B-H$ 不是沿原来的路径 $mbaO$ 曲线返回, 而是沿 mrc 曲线下降。当 H 降为零时, 磁感应强度 B 的值不为零而有剩磁。要想消除剩磁, 则须继续外加反向磁场, 直至 c 点磁感应强度 B 才降为 0。

c 点之后, 继续增大外加反向磁场的强度, 则介质进入反向磁化阶段, 直至 d 点反向磁化达到饱和。此后, 若减小外加反向磁场的强度, 则介质的磁感应强度沿 def 曲线变化。当外加反向磁场强度降为零时 (e 点), 反向磁感应强度仍有剩余。要消除反向剩磁, 须外加正向磁场, 直至 f 点, 反向剩余磁感应强度才降为 0。继续增大外加磁场强度, 磁感应强度也随着增大, 直至 m 点达到饱和, 至此完成一个循环, 形成一个封闭的曲线, 称为磁滞回线。

磁滞回线表明磁感应强度的变化总是滞后于外加磁场的变化, 介质在磁化—消磁—磁化

的过程中有能量的损耗,磁滞回线所包围的面积表征了在一个循环过程中的能量损耗的多少。

(1) 饱和磁感应强度 B_s (saturation magnetic flux density) 即外加磁场强度 H 足够大,磁感应强度 B 随 H 的变化曲线接近水平,此时,即使再增大外加磁场强度 H ,磁感应强度 B 也不再随外加磁场强度 H 的增大而明显增大,与此对应的磁感应强度称为饱和磁感应强度,记为 B_s ,如图 5-2(b) 中的 m 点对应的磁感应强度。与饱和磁感应强度对应的外加磁场强度称为饱和磁场强度,记为 H_m 。

(2) 剩余磁感应强度 B_r (remanence) 即介质被强烈磁化以后,再将外加磁场完全撤除(即使外加磁场的值降为零)时,所剩余的磁感应强度称为剩余磁感应强度,简称剩磁,记为 B_r 。如图 5-2(b) 中的 r 点对应的磁感应强度。

(3) 最大相对磁导率 μ_m 如图 5-2 所示,起始磁化曲线 $Oabm$ 的变化速率不是恒定不变的,在 Oa 段,当 H 增加时, B 增大得比较缓慢;在 ab 段,随 H 的增加, B 很快增大;从 b 点开始直至 m 点的 bm 段, B 随 H 的增大又趋于缓慢;在 m 点以后,即使 H 再增大, B 也几乎不变。磁介质的相对磁导率随外加磁场强度的变化如图 5-2(a) 所示,相对磁导率的最大值 μ_m 即称为最大相对磁导率。

(4) 矫顽力 (coercivity) 为消除剩磁,所须继续施加的外加反向磁场强度,称为矫顽力,记为 H_c ,如图 5-2(b) 中 c 点所示。矫顽力的大小表征了消除剩磁的难易程度,其值越大,说明剩磁越难以消除。

实践中,常根据矫顽力 H_c 值的大小,将磁性材料分为软磁性材料 ($H_c < 10^2 \text{ A/m}$)、硬磁性材料 ($H_c > 10^4 \text{ A/m}$) 和半硬磁性材料 [$10^4 > H_c > 10^2 (\text{A/m})$],三者的磁滞回线比较如图 5-3 所示。

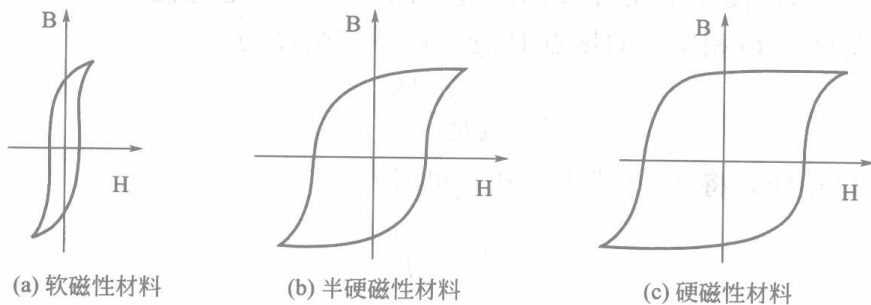


图 5-3 软磁性材料、硬磁性材料和半硬磁性材料的磁滞回线

2. 影响铁磁性材料磁特性的主要因素

铁磁性材料的磁特性不是恒定不变的,它会受其晶格结构、化学成分、组织、冷热变形等因素的影响。

(1) 晶格结构的影响 铁磁性材料的晶格结构不同,其磁特性会有显著变化。在常温下,面心立方晶格的铁是非磁性材料,而体心立方晶格的铁则是铁磁性材料。

(2) 化学成分的影响 随着含碳量的增加,碳钢的矫顽力几乎呈线性增大,而最大相对磁导率却随之下降。合金化将增大钢材的矫顽力,使其磁性硬化。例如,正火状态的 40 钢和 40Cr 钢的矫顽力分别为 584 A/m 和 1256 A/m 。

(3) 冷变形的影响 钢材的矫顽力和剩磁将随压缩变形率的增加而增加。

(4) 热处理的影响 一般而言,退火和正火使钢材的磁特性改变不大,而淬火则可以提高钢材的矫顽力。随着淬火以后回火温度的提高,矫顽力又有所降低。

(5) 晶粒大小的影响 晶粒越粗, 钢材的磁导率越大, 而矫顽力越小。

三、典型电流的磁场强度

这里简要讨论与后续磁化有关的几种典型电流的磁场强度及其分布特征, 为简便计, 直接引用有关结论, 至于其推导过程, 有兴趣的读者请参阅《电磁学》等专门论著。

1. 载流直导线的磁场

如图 5-4(a) 所示, 设在一段有限长 L 的直导线 AB 上通有恒定电流 I , 则在与导线相距 r 的 P 点处的磁感应强度为:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \quad (5-8)$$

式中 μ_0 ——真空中的磁导率 ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$);

I ——电流强度, A。

当导线长度 $L \rightarrow \infty$ 时, 则为无限长恒流直导线, 此时, 令式(5-8)中 $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = \pi$, 则可得无限长恒流直导线的磁感应强度为:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (5-9)$$

磁感应强度的方向符合右手定则, 其磁力线如图 5-4(b) 所示。

2. 圆电流的磁场

如图 5-5(a) 所示, 设在半径为 R 的圆形线圈中通以恒定电流 I (习惯上称为圆电流), 则其中心轴线上与圆心 O 相距 r 的场点 P 处的磁感应强度为

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + r^2)^{3/2}} \quad (5-10)$$

在圆环中心 O 点处, 将 $r=0$ 代入上式, 可得

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (5-11)$$

圆电流的磁场分布如图 5-5(b) 所示。

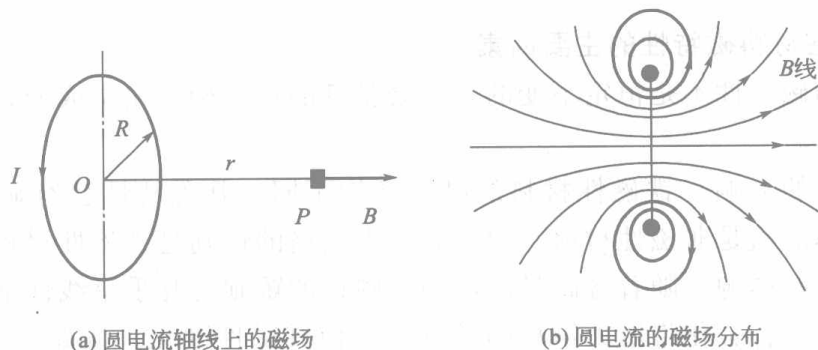


图 5-5 圆电流的磁场

3. 均匀密绕载流直螺线管轴线上的磁场

在磁粉检测中, 通电螺线管常用来对被检件进行纵向磁化。

如图 5-6 所示, 设长度为 L 的均匀密绕直螺线管线圈中通有恒定电流 I , 则在其中中心轴上的 P 点处 [图 5-6(b)] 的磁感应强度 B 为

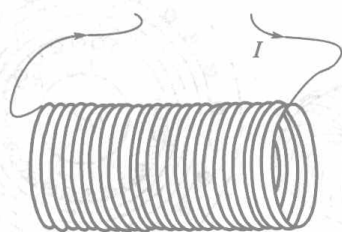
$$B = \frac{\mu_0 n I}{2} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \quad (5-12)$$

式中 μ_0 ——真空中的磁导率 ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$);

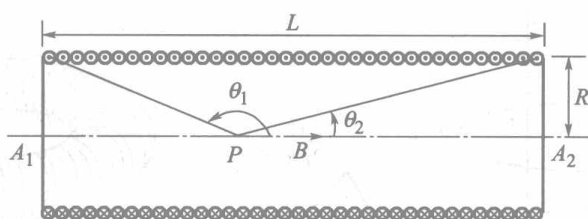
I ——电流强度, A;

n ——单位长度内线圈的匝数。

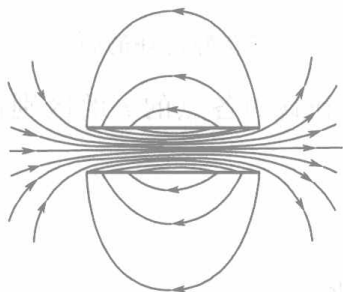
通有恒定电流 I 的均匀密绕直螺线管线圈中的磁力线和磁感应强度的分布分别如图 5-6(c)、(d) 所示, 可见, 对有限长均匀密绕通电直螺线管线圈而言, 其端点处的磁感应强度约为轴线中点处的磁感应强度的一半。磁感应强度的方向遵守右手螺旋定则。



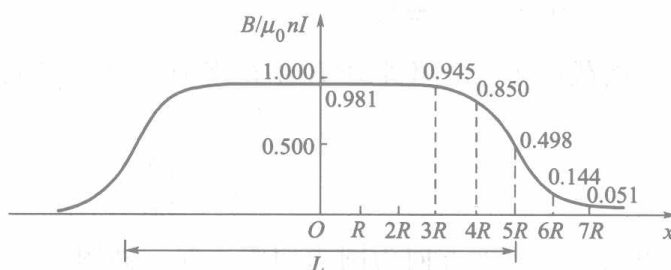
(a) 均匀密绕直螺线管



(b) 均匀密绕载流直螺线管轴线上的磁场



(c) 均匀密绕载流直螺线管的磁力线



(d) 均匀密绕载流直螺线管的磁场分布

图 5-6 均匀密绕载流直螺线管的磁场

当螺线管长度 $L \rightarrow \infty$ 时, 则为均匀密绕无限长直螺线管线圈, 此时, 令式 (5-12) 中 $\theta_1 = \pi$, $\theta_2 = 0$, 则可得均匀密绕无限长直螺线管线圈中心轴线上的磁感应强度 B 为:

$$B = \mu_0 n I \quad (5-13)$$

均匀密绕无限长通电直螺线管线圈内的磁感应强度处处相同, 磁力线平行于轴线分布, 而管外无磁场。

4. 无限长均匀载流直圆柱体 (柱形电流) 的磁场

柱形电流的磁场是芯杆法磁化的理论依据。

如图 5-7 所示, 设半径为 R 的柱形导体中通有均匀的恒定电流 I , 则其磁感应强度大小为:

在圆柱体外

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (5-14)$$

在圆柱体内

$$B = \frac{\mu_0 I r}{2\pi R^2} \quad (5-15)$$

- 式(5-14)和式(5-15)中 μ_0 ——真空中的磁导率 ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$);
 I ——电流强度, A;
 R ——柱形导体的半径, m;
 r ——场点与圆柱形导体中心轴线的距离, m。

磁感应强度的方向遵守右手定则。

5. 通电均匀密绕螺绕环的磁场分布

如图 5-8 所示, 设环管的轴线半径为 R , 环上均匀密绕 N 匝线圈, 线圈中通有恒定电流 I , 则环管内的磁感应强度大小为

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r} \quad (5-16)$$

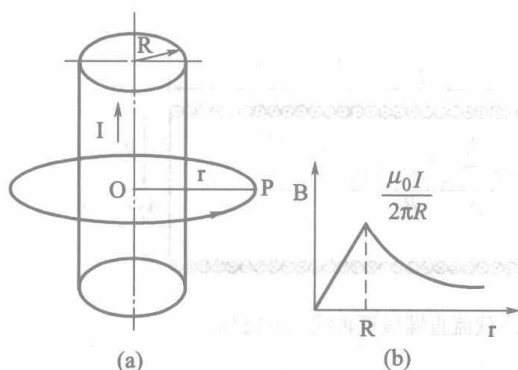


图 5-7 柱形电流的磁场

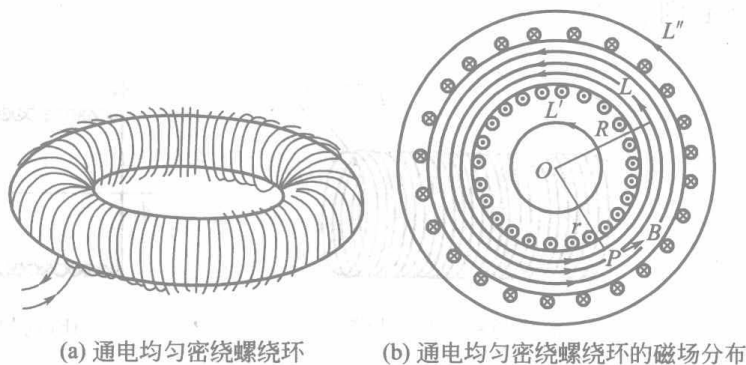


图 5-8 通电均匀密绕螺绕环的磁场

当环管横截面半径比环半径 R 小得多时, 可忽略从环心到管内各点的 r 的区别而取 $r = R$, 由此可得

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r} = \mu_0 nI \quad (5-17)$$

管内的磁感应强度方向为圆周切线方向, 如图 5-8(b) 所示。

环管外的磁感应强度为零, 即通电密绕螺线环的磁场集中在管内。

四、漏磁场及其影响因素

1. 漏磁场

所谓漏磁场, 是指被磁化的物体内部的磁力线在缺陷或磁路截面发生突变的部位逸出物体表面所形成的磁场。

漏磁场的形成起因于磁导率在缺陷处的突变。设有一被磁化的工件上存在缺陷, 由于缺陷内含物质的磁导率一般远低于铁磁性材料的磁导率, 因此, 磁力线在缺陷附近弯曲和压缩。如果该缺陷位于工件的表面或近表面, 则工件内部的部分磁力线就会在缺陷处逸出工件表面进入空气, 绕过缺陷后再折回工件, 由此形成了漏磁场, 如图 5-9(a) 所示。

而当缺陷较深时, 虽然磁力线在缺陷处仍会弯曲, 但不能逸出工件, 也就不能形成漏磁场, 如图 5-9(b) 所示。

当在工件的漏磁场处施加磁导率较高的磁性颗粒 (磁粉或磁悬液) 时, 磁性颗粒将会在漏磁场处聚集, 形成比缺陷本身的尺寸大很多倍的显示 (称为磁痕), 由此指示缺陷的存在, 如图 5-10 所示。

为进一步提高缺陷的显现能力, 使磁痕更易于观察, 通常采用着色磁粉或磁悬液, 以增

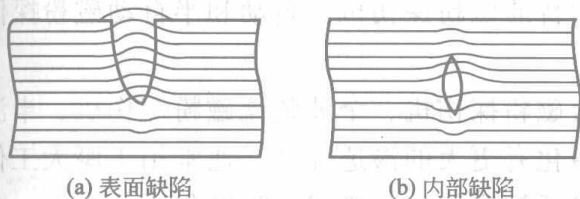


图 5-9 缺陷漏磁场

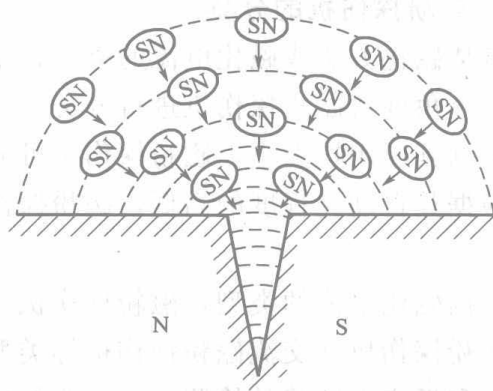


图 5-10 磁粉在缺陷漏磁场的聚集

大磁痕与被检件表面的反差。也可采用荧光磁粉或磁悬液, 荧光物质在特定波长的灯光(黑光灯)照射下会发出人眼最为敏感的黄绿色光, 有利于缺陷的检出。

磁粉检测的基本原理就是利用缺陷漏磁场对外加磁粉或磁悬液中的磁性颗粒的聚集, 得到尺寸更大、对比度更高的磁痕, 以此显示缺陷的存在。

由于较深的缺陷不能形成漏磁场, 也就不能被检出。因此磁粉检测只能检测表面或近表面缺陷。

2. 影响漏磁场强度的主要因素

磁粉检测的灵敏度与漏磁场强度有关。在实际检测过程中, 影响缺陷漏磁场强度的因素主要有外加磁场强度、缺陷特征(类型、位置、尺寸、形状、取向、磁导率等)、基体材料的状态、被检表面的状态(油污、覆层等)。

(1) 外加磁场强度的影响 缺陷漏磁场强度的大小与工件被磁化的程度有关。一般而言, 如果外加磁场能使被检件的磁感应强度达到其饱和值的 80% 以上, 缺陷漏磁场的强度就会显著增加。

(2) 缺陷特征的影响 缺陷的类型、位置、尺寸、形状、取向、磁导率都会对漏磁场产生影响。当其他条件不变时, 缺陷越大, 漏磁场也越大; 缺陷与基体的磁导率相差越大, 漏磁场也越大; 浅缺陷的漏磁场大于深缺陷; 缺陷切割磁力线的角度越接近正交(90°), 其漏磁场强度越大。事实上, 磁粉检测很难检出与被检表面所夹角度小于 20° 的夹层。此外, 在其他条件不变的情况下, 表面缺陷的漏磁场强度随着其深、宽比的增加而增加。

(3) 被检件表面状况的影响 表面油污和覆层(如涂料)等会降低缺陷漏磁场的强度。

(4) 基体材料的状态 基体材料的成分、组织、冷变形及热处理状态的改变均会影响材料的磁特性, 进而影响缺陷的漏磁场。

第三节 磁粉检测设备与器材

磁粉检测用设备与器材主要有磁粉探伤机、磁粉或磁悬液、磁场指示器、灵敏度试块(试片)等。

一、磁粉探伤机

磁粉探伤机是磁粉检测的关键设备, 其主要功能是对被检件进行磁化。有的磁粉探伤机还有磁粉喷洒、磁痕观察等辅助功能。

1. 磁粉探伤机的分类

可从磁化方法或磁化电流的类型、重量或移动性大小、通用性大小以及自动化程度的高低等多个角度对磁粉探伤机进行分类。

根据其通用性大小，磁粉探伤机可分为通用型和专用型两大类。

根据其自动化程度的高低，磁粉探伤机可分为普通磁粉探伤机、自动和半自动磁粉探伤机等类型。

根据磁化电流的类型，磁粉探伤机可分为直流磁粉探伤机、全波整流磁粉探伤机、半波整流磁粉探伤机和交流磁粉探伤机等类型。直流磁化有更大的渗透深度，通常用于厚大工件的表面和近表面缺陷的检测；交流磁粉探伤机的渗透深度较浅，磁感应强度集中在表面，对表面缺陷有更高的检测灵敏度，常用于检测尺寸较小的薄壁件或厚大工件的表面缺陷。

根据其重量或移动性大小，磁粉探伤机可分为固定式、移动式和携带式三种，这是磁粉探伤机最常见的分类方法。

一般而言，固定式磁粉探伤机的质量较大、体积较大，多安装在固定场所。携带式磁粉探伤机质量较小、体积较小，一般可以由单人携带至现场甚至高空使用；移动式磁粉探伤机的质量和体积居于前两者之间，借助搬运小车或自带滚轮，可以在地面上一定的范围内移动。在最大磁化电流方面，固定式磁粉探伤机所能提供的最大磁化电流大，可达 15000A（甚至更大），携带式磁粉探伤机以磁轭法为主，也有用支杆触头法的，所能提供的最大磁化电流最小，一般不超过 1000A；移动式的最大磁化电流居于前两者之间。如图 5-11 所示是三种典型的磁粉探伤机。

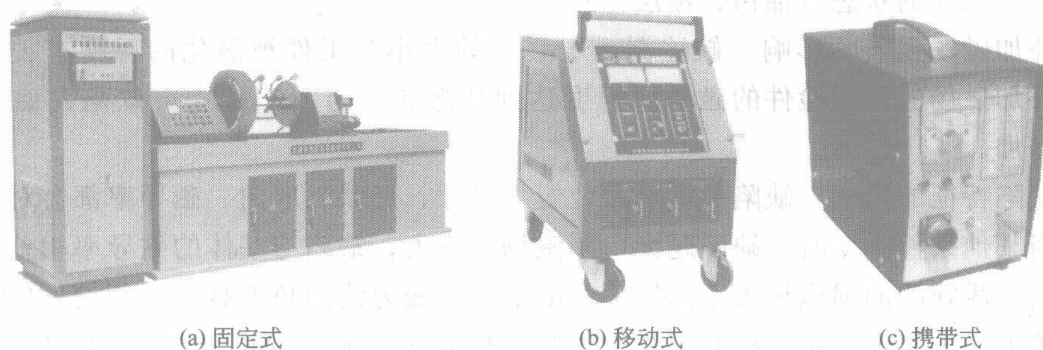
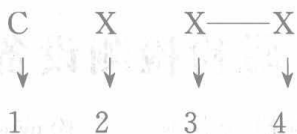


图 5-11 固定式、移动式和携带式磁粉探伤机

2. 磁粉探伤机的命名方法

在我国，磁粉探伤机的命名遵循“JB/T 10059 试验机与无损检测仪器型号编制方法”的有关规定，具体命名方法如下：



第 1 部分：C 表示磁粉探伤机；

第 2 部分：字母，表示磁粉探伤机的磁化方式，具体含义参见表 5-2；

第 3 部分：字母，表示磁粉探伤机的结构形式，具体含义参见表 5-2；

第 4 部分：数字或字母，表示磁粉探伤机的最大磁化电流或探头形式，具体含义参见表 5-2。

表 5-2 磁粉探伤机的命名参数

第 2 部分——字母:含义	第 3 部分——字母:含义	第 4 部分——数字或字母
J:交流	X:携带式	如 4000:最大磁化电流 4000A
D:多功能	D:移动式	
E:交直流	W:固定式	
Z:直流	E:磁轭式	
X:旋转磁场	G:荧光磁粉探伤	
B:半波脉冲直流	Q:超低频退磁	
Q:全波脉冲直流		

例如: CJW-9000 为交流固定式磁粉探伤机, 最大磁化电流 9000A; CEW-15000 为交直流固定式磁粉探伤机, 最大磁化电流 15000A; CDG-6000A 为多功能荧光磁粉探伤机, 最大周向磁化电流 6000A; CDX-4 为携带式交流磁粉探伤机。

3. 磁粉探伤机的主要特性参数

磁粉探伤机的主要特性参数有磁化方式、最大磁化电流大小、电源、尺寸、重量、可检测的工件尺寸等。

二、磁粉和磁悬液

磁粉或磁悬液是磁粉检测的必备材料, 其性能的高低对磁粉检测的灵敏度影响很大。

1. 磁粉的分类

所谓磁粉, 是指以铁磁性物质为主要成分制成的颗粒状物质。磁悬液是把干磁粉调制在煤油或水等载液中制成的, 一般以膏状或糊状供应并使用。以干磁粉直接作为缺陷显现介质的检测方法称为干法; 以磁悬液作为缺陷显现介质的检测方法称为湿法。

在磁粉检测中, 一般将磁粉分为荧光磁粉和非荧光磁粉两大类。

荧光磁粉是在磁性氧化铁粉 (Fe_3O_4 、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) 或工业纯铁粉等颗粒的外面包裹一层荧光物质制成的, 检测时需要在紫外线灯 (又称黑光灯) 下观察磁痕。在我国, 荧光磁粉多用于湿法检测。

非荧光磁粉是一种在可见光 (白光) 下观察磁痕的磁粉, 其主要成分是黑色的 Fe_3O_4 或褐色的 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 及工业纯铁粉。为了提高与被检表面的对比度, 多将表面染成黑、红、蓝、黄等颜色。非荧光磁粉既可用于湿法, 也可用于干法检测。

一般而言, 荧光磁粉的检测灵敏度高于非荧光磁粉。

2. 磁粉的主要性能指标

评价磁粉质量高低的主要性能指标有磁性、粒度及粒度分布、形状 (条形、椭球形、球形或不规则形状等)、密度、流动性、识别度 (包括磁粉的颜色、荧光亮度、与被检件表面的对比度) 等, 对荧光磁粉还包括磁粉与荧光染料的剥离度。

3. 磁粉质量的检测与评定

在磁粉检测实践中, 对磁粉的质量检测与评定多采用磁性称量法和酒精沉淀法。具体检测评价方法可参见 “JB/T 6063—1992 磁粉探伤用磁粉技术条件”, 此处不再赘述。

三、人工缺陷试块

由于影响磁粉检测灵敏度的因素众多, 影响规律复杂, 因此在磁粉检测中, 通常采用带

有人工缺陷的试块或试片，来评定某一具体检测条件下所能达到的灵敏度，或用来检验检测工艺（如磁化规范）是否符合要求。

目前，世界各国的人工缺陷标准试块或试片不尽相同，在此选取几种常见的人工缺陷标准试块进行简要介绍，供选用时参考。

1. 环型标准试块

环形标准试块用于穿棒法和直接通电法检查，如检查轴类或管状零件的磁粉探伤系统的综合性能。在机械工业行业标准 JB/T 6066—1992 中规定了 B 型和 E 型两种标准缺陷试块，分别用于直流和交流磁化检测。

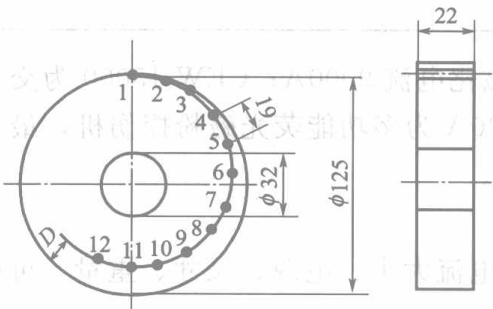


图 5-12 B 型标准人工缺陷试块（Betz 环）

(1) B 型直流标准缺陷试块（Betz 环） 又称 Betz 环，其形状和几何尺寸如图 5-12 所示，它最初是由美国 ASME 标准提出来的。

试环的材料为 9CrWMn 冷作模具钢，硬度为 90~95HRC。试板上依次排列着 12 个 $\phi 1.8\text{mm}$ 的通孔，其中第一个通孔中心至试环外缘的距离（ D ）为 1.8mm，其他各孔中心至试环外缘的距离以 1.8mm 递增，即第 2 孔的 D 为 3.6mm，第 3 孔的 D 为 5.4mm。依此类推，第 12 孔的 D 为 21.6mm。

Betz 环用来比较和评定用中心导体法及直流或全波整流励磁检测时，磁粉材料与检测系统的灵敏度。使用时，用直径约为 32mm 的铜质中心导体对试环作周向磁化。在不同的磁化电流下，试环外缘上应显示的最小磁痕数目见表 5-3 和表 5-4。若磁痕数目达不到表中的规定值，就应校正所采用的检测系统。

表 5-3 湿磁粉试环的磁痕显示

磁悬液类型	全波整流或直流磁化的电流值/A	近表面孔显示的最小数目
荧光或非荧光	1400	3
	2500	5
	3400	6

表 5-4 干磁粉试环的磁痕显示

全波整流或直流磁化的电流值/A	近表面孔显示的最小数目	全波整流或直流磁化的电流值/A	近表面孔显示的最小数目
500	4	2500	6
900	4	3400	7
1400	4		

(2) E 型交流标准缺陷试块 是个组合件，由低碳钢环、铜棒和胶木垫片组成，其中低碳钢环是经退火处理、晶粒度不低于 4 级的 10 锻钢件。在低碳钢环上开有 3 个直径为 1mm 的通孔作为人工缺陷，孔中心距环的边缘分别为 1.5mm、2.0mm 和 2.5mm。形状和尺寸如图 5-13 所示。

使用时，将标准试块的铜棒夹于探伤机的两极之间，通以峰值 800~1000A 的交流电，用湿连续法检查，应清楚显示一个以上的缺陷磁痕，否则说明磁粉探伤系统的综合灵敏度不够。

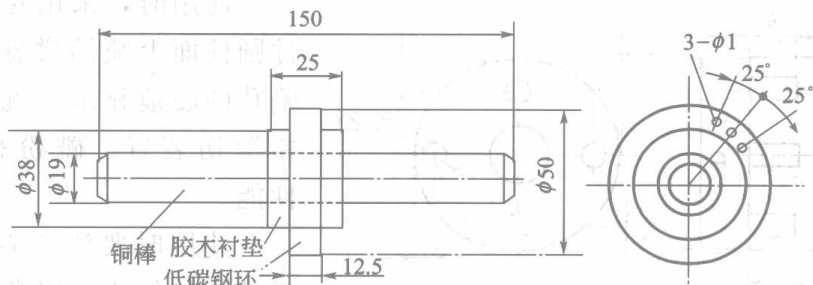


图 5-13 E 型交流标准环形试块

2. 标准试片

磁粉检测标准试片又称磁粉探伤灵敏度试片，最初是由日本提出来的，目前在我国、美国和日本都有采用。

在纯铁薄片（基片）上单面刻槽作为人工缺陷，刻槽的形式各国不尽相同，多数是在试片深度方向刻 U 形或近 U 形，平面方向为圆、十字线或直线等。

我国使用的标准试片，根据刻槽的形状、基片的大小和厚度，分为 A、C、D 型等多种。C 型试片是在 10×30 薄片中心沿长度方向刻有一条槽，并将其分割（不截断）为 6 个 10×5 薄片；D 型试片是在 10mm 见方的薄片上刻有 3mm 十字槽加直径为 5mm 的圆形槽；A 型试片是在 20mm 见方的薄片上刻有十字形加圆形、十字形和圆形等不同外形的槽，并根据刻槽外形的不同，分为 A1 型、A2 型、A3 型三种，其中 A1 型为十字加圆形刻槽、A2 型为十字刻槽、A3 型为圆形刻槽。三种标准试片的外形和尺寸如图 5-14 所示，刻槽深度和基片厚度等参数如表 5-5 所示。槽深为 $7 \sim 15 \mu\text{m}$ 的试片适用于高灵敏度检测；槽深为 $30 \mu\text{m}$ 和 $60 \mu\text{m}$ 的试片分别适用于中等灵敏度和低灵敏度检测。

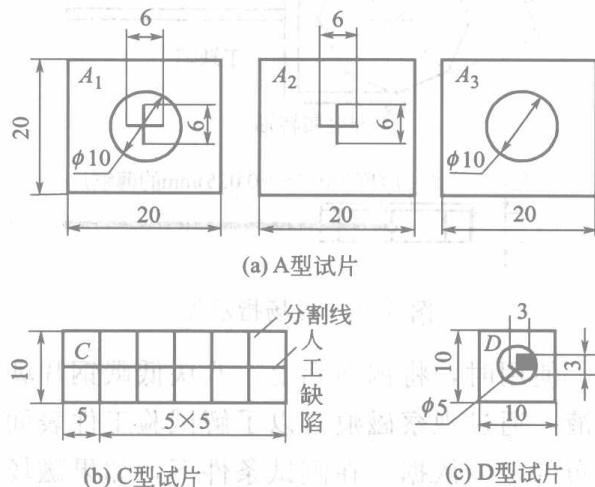


图 5-14 磁粉检测标准试片

表 5-5 A 型灵敏度试片规格/ μm

试片种类	试片型号	厚度规格	备 注	试片种类	试片型号	厚度规格	备 注
A 型	A-7/50	7/50	根据刻槽外形, A 型试片分为 A1 型、A2 型、A3 型三种	C 型	C-8/50	8/50	
	A-15/50	15/50			C-15/50	15/50	
	A-30/50	30/50		D 型	D-7/50	7/50	
	A-15/100	15/100			D-15/50	15/50	
	A-30/100	30/100					
	A-60/100	60/100					

注：分数的分子为槽深，分母为试片厚度，单位 μm 。

我国机械工业行业标准“JB/T 6065—1992 磁粉探伤用标准试片”中对三种试片的技术要求和使用方法等作了规定。

3. B 型对比试块

B 型对比试块采用电磁软铁或与试件相同的材料制成，其几何尺寸如图 5-15 所示。

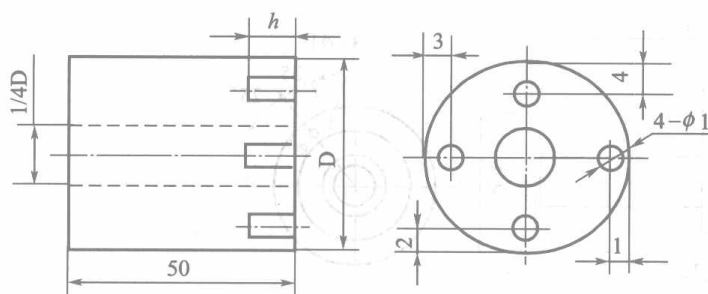


图 5-15 B 型对比试块

4. 磁场指示器（八角试块）

磁场指示器又称八角试块，它是将八块低碳钢片焊接在铜片上制成的，用八块低碳钢片之间的缝隙来模拟缺陷，其形状和尺寸如图 5-16 所示。

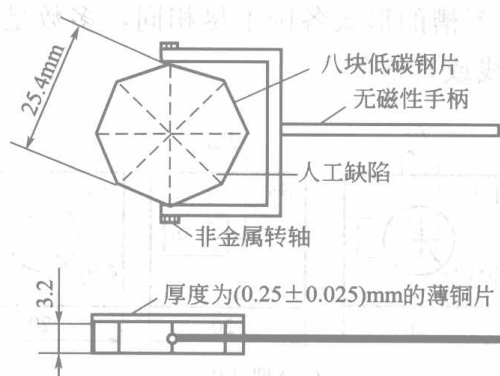


图 5-16 磁场指示器

使用时，将铜面朝上，八块低碳钢片朝下紧贴被检件，采用连续法给指示器铜面施加磁悬液，通过观察磁痕可以了解试验工件表面上的磁场方向，但不能作为磁场强度大小及磁场分布的定量依据。在测试条件下，如果磁场指示器上没有形成磁痕或没有在所需的方向上形成磁痕，就应考虑修改磁化规范或改换磁化方法。

5. 灵敏度试板

如图 5-17 所示的灵敏度试板，用于磁轭法或触头法检测时比较和评定磁粉材料与检测系统的灵敏度。

试板的厚度、宽度和长度可以根据实际需要而变。试板材料应与被检材料相同或相近。被检材料厚度在 19mm 以下时，试板厚度应在 6.4mm 以内；被检材料厚度在 19mm 以上时，试板厚度取为 19mm。试板上的 10 个小槽用电火花切割机床加工，每个槽长 3mm，槽宽 (0.125 ± 0.025) mm。第一个槽深 0.125mm，其余各槽按 0.125mm 的增量依次递增，第十个槽深 1.25mm。小槽内用环氧树脂一类的电绝缘材料填满。

6. 其他标准缺陷试样

为评价采用橡胶铸型法对歼五、歼六等飞机机翼大梁螺栓孔内疲劳裂纹进行磁粉探伤的综合灵敏度，文献 [18] 研制了一种人工缺陷标准样件，其材质为 30CrMnSiA，外形尺寸为 $100 \times 30 \times 15$ mm，其上加工了 3 个孔径为 $\phi 8$ mm、间距 30mm 的孔，并在 3 个孔的内壁上分别加工了一条裂纹，裂纹的尺寸（长×宽×深）分别为 $1 \times 0.12 \times 0.5$ mm、 $2 \times 0.12 \times 2$ mm、 $3 \times 0.12 \times 2$ mm，分别作为高灵敏度、中灵敏度和低灵敏度的评定依据。

除以上设备与器材外，在磁粉检测中还经常用到磁强计、测光仪器、黑光灯，以及用来

使用时，采用穿棒连续法，在试件圆柱面上喷洒磁悬液，根据人工缺陷孔的磁痕显示情况，检查和评价磁粉探伤装置、磁粉和磁悬液的综合性能。

使用时要注意避免中心导体和 B 型试件的偏心，以免给检测结果带来误差。

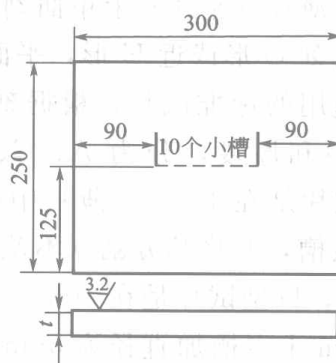


图 5-17 磁粉检测系统性能测试板

评定磁粉和磁悬液性能的磁粉粒度测量、磁性称量装置和梨形沉淀管装置等,限于篇幅,此处不予讨论。

第四节 磁粉检测技术与工艺

一、磁化方法

磁化被检工件是磁粉检测的关键步骤,对检测灵敏度和检测效率等影响很大。选择磁化方法时应综合考虑被检工件的特性(磁特性、形状、尺寸、数量)、缺陷特性(种类、位置、取向)以及设备条件等因素,尽可能使被检工件中的磁场方向与预计的缺陷取向垂直,以获得尽可能强的缺陷漏磁场;尽可能使被检工件的磁场方向与检测面平行,以避免产生无关显示。

可从多个角度对磁化方法进行分类:根据磁化能量的来源不同,可将磁化方法分为交流磁化、直流磁化和永久磁铁磁化三种;根据被检工件中的磁力线方向,磁化方法可分为周向磁化、纵向磁化和复合磁化。以下分别进行讨论。

(一) 周向磁化

所谓周向磁化,是指磁化后被检工件中的磁力线沿工件周向(即垂直于工件轴向)分布的磁化方法。

周向磁化用来探测取向与工件轴向平行的缺陷。

根据被检工件的形状与大小,周向磁化方法又可进一步划分为直接通电法、芯杆法、触头法和平行电缆法等多种。

1. 直接通电法

直接通电法周向磁化的工作原理如图 5-18 所示,将被检工件夹持在两电极之间,并对被检工件直接通电,以产生周向磁场。

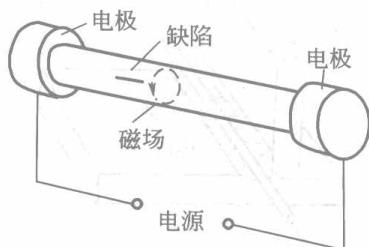


图 5-18 直接通电法周向磁化

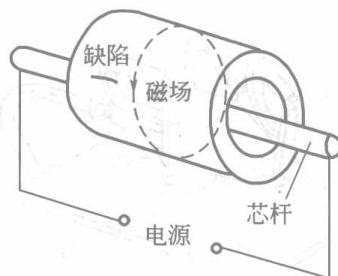


图 5-19 芯杆法周向磁化

直接通电法周向磁化具有以下优点:

- ① 一次通电,可对被检工件进行整体磁化,工艺简单,检测效率较高;
- ② 磁场主要集中在被检工件的表面和近表面;对表面和近表面缺陷有较高的检测灵敏度;
- ③ 不产生退磁场;
- ④ 磁化规范容易计算;
- ⑤ 无论简单或复杂的工件,都可实施磁化。

直接通电法的不足之处在于:

① 夹头与工件接触不良时会产生电弧烧伤工件，为了避免工件在与电极接触时灼伤，通常在工件与电极接触处铺设铜等质地较软的电的良导体，以减少接触电阻。

② 不能检测空心工件内表面的缺陷；

③ 夹持细长工件时，易使工件变形。

直接通电法是固定式磁粉探伤机检测中小工件的常用磁化方法，多用于杆状和棒状工件的磁粉探伤。

2. 芯杆法

芯杆法又称穿棒法或中心导体法，将通电芯杆从被检工件的内孔穿过，以在被检工件表面和内部产生周向磁场，芯杆法周向磁化的工作原理如图 5-19 所示。

芯杆法周向磁化的优点如下：

① 可对被检工件进行整体磁化；

② 工件中无电流通过，避免了直接通电法对被检工件的可能灼伤；

③ 工艺简单；

④ 对小型工件，可同时磁化多个工件，检测效率高；

⑤ 检测灵敏度较高。

其不足之处在于：

① 只能检测中空的工件；

② 对工件外表面缺陷的检测灵敏度比内表面低很多，对于厚壁工件更是如此；

③ 对于孔径较大的工件，需将芯杆偏离孔中心放置，并转动工件进行多次磁化和检验。

芯杆法周向磁化多用于管状（如管道、螺母、轴承圈等）工件的磁粉探伤。

3. 支杆法

用两个电极触头将磁化电流导入被检工件进行局部磁化的方法称为支杆法，又称触头法、尖锥法、手持电极法，如图 5-20 所示。

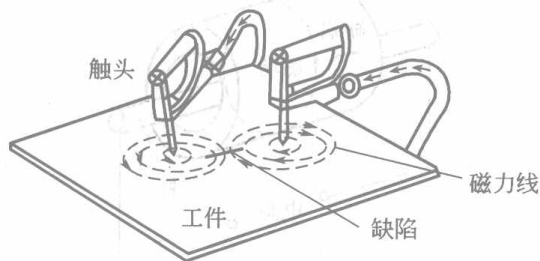


图 5-20 触头法检测

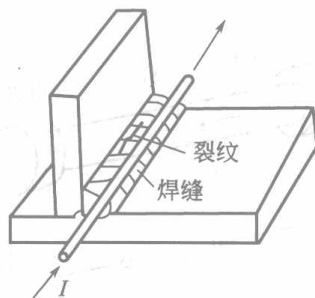


图 5-21 平行电缆法检测焊缝

支杆法磁化设备轻巧、可现场检测、灵活方便，但一次磁化只能检测一个较小的区域，检测效率较低，且接触不良时可能烧伤工件。

采用支杆法作局部检测时，应根据被测部位的实际情况及灵敏度要求确定触点间距和电流大小。为避免因缺陷取向不利造成漏检，对同一被检部位应通过改变支杆连线方位的方法，至少进行两次相互垂直的检测。为保证人身安全，支杆法检测的开路电压不应超过 24V。支杆在接触和离开被检工件表面时，必须先通过支杆手柄上的遥控开关断电，以避免因起弧烧伤触点部位。

支杆法常用于大型平板、平焊缝等工件的磁粉检测。

4. 平行电缆法

如图 5-21 所示的平行电缆法常用来对焊缝作周向磁化，用以检验该区域内存在的纵向裂纹。为避免有效磁场被干扰，采用这种方法磁化工件时，应注意让返回的电缆尽可能远离被检区域，至少应大于被检区域宽度的 10 倍。

平行电缆法的优点是可以用 300~500A 的交流弧焊机替代专用的磁粉检测电源，但每次通电时间不宜超过 2~3s，观察磁痕显示也应在断电后进行。

(二) 纵向磁化

所谓纵向磁化，是指在被检工件中建立起沿其轴向分布的纵向磁场的磁化方法。其目的是为了探测取向基本与工件轴向垂直的缺陷。

对被检工件作纵向磁化的方法有线圈法、磁轭法和永久磁铁法等多种，其中较常用的是线圈法和磁轭法。

1. 线圈法

用线圈对被检工件作纵向磁化的方法称为线圈法。线圈法可进一步分为固定线圈法和缠绕线圈法。固定线圈法纵向磁化如图 5-22 所示，主要应用于管材和棒材的横向缺陷探测；缠绕线圈法纵向磁化如图 5-23 所示，主要应用于管道环焊缝中的纵向裂纹探测。

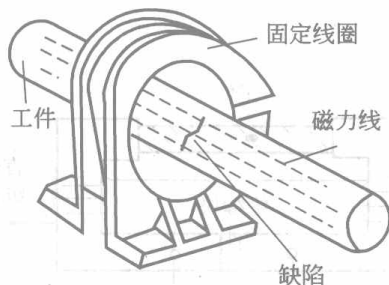


图 5-22 固定线圈纵向磁化

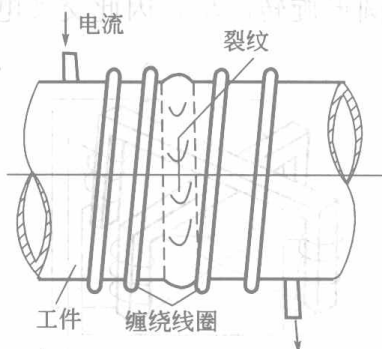


图 5-23 缠绕线圈纵向磁化

2. 磁轭法

磁轭法分为固定磁轭整体磁化和便携磁轭局部磁化两种，分别如图 5-24 和图 5-25 所示。

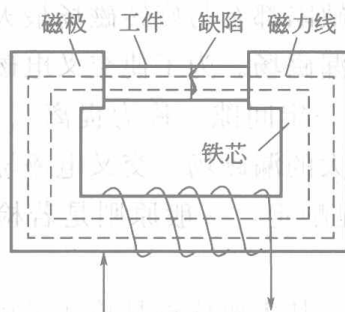


图 5-24 磁轭整体纵向磁化

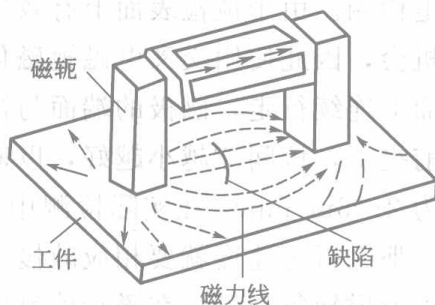


图 5-25 磁轭局部磁化

用电磁轭对被检工件作局部磁化时，磁轭两极间的磁力线大致与两极的连线平行，可以检出取向与两极连线基本垂直的缺陷。磁轭的有效检测范围与设备性能、检测条件及工件的形状有关，一般情况下是以两极连线为短轴的椭圆形。

便携式交流电磁轭设备简单，操作方便，被广泛用于大型结构件的磁粉检测。在检测过

程中,磁极间距应该控制在 $50\sim 200\text{mm}$ 以内。检测区域应限制在磁极连线两侧相当于 $1/4$ 最大磁极间距的范围内。为了能检出各种取向的缺陷,在同一被检部位必须至少作两次方位相互垂直的检测。移动磁轭时,有效磁化区域应至少重叠 25mm 以上,以避免漏检缺陷。

(三) 复合磁化

由于实际工件中可能存在各种取向的缺陷,为避免缺陷的漏检,需要至少在两个相互垂直的方向上磁化被检工件。采用前述的周向磁化或纵向磁化方法对工件实施磁化需要分两次进行,降低了检测速度。复合磁化可将两个方向的磁化过程合二为一,可提高检测效率。

所谓复合磁化,就是在一次磁化过程中,对工件实施两个或两个以上不同方向的磁化,以探测取向不同的多个缺陷。

对被检工件实施复合磁化有多种方法,如交叉电磁轭法、直流电磁轭与交流通电法、直流线圈与交流通电法等,其中,交叉电磁轭、直流电磁轭与交流通电法复合磁化应用较广。

1. 交叉电磁轭法复合磁化

交叉电磁轭复合磁化的工作原理示意如图 5-26 所示。将两个参数相同的单磁轭以一定角度(一般为 90°)交叉放置,用幅值相等、相位相差恒定(如 120°)的交流电分别对两个单磁轭励磁。由磁场的矢量叠加原理可知,在四个磁极包围的被检表面上将产生方向随时间变化的椭圆形旋转磁场,因此交叉电磁轭复合磁化又称旋转磁场磁化。

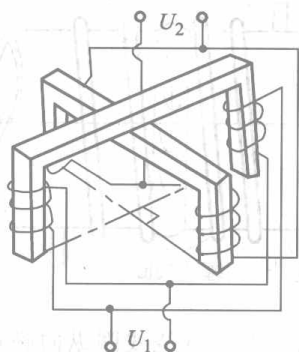


图 5-26 旋转磁场复合磁化

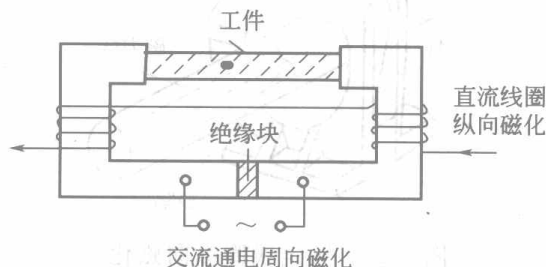


图 5-27 直流电磁轭与交流通电法复合磁化

与前述磁化方法的固定位置的检测方式不同,使用交叉电磁轭时通常是在被检表面上作连续行走检测。由于被检表面上有效磁化场内任意取向的缺陷都有与旋转磁场最大幅值方向正交的机会,因此使用交叉电磁轭磁化能获得最强的缺陷漏磁场。为了使交叉电磁轭能够在被检表面上连续行走,磁极的端面与被检表面之间要留有一定间隙(称为提离)。在不妨碍行走的前提下,该间隙越小越好,以避免在间隙处产生过大的漏磁场。交叉电磁轭的行走速度一般为 $2\sim 3\text{m/min}$ 。在实际检测中,可以根据具体情况酌定,一般原则是若检测灵敏度要求高,那么行走速度就要相应减慢。

交叉电磁轭复合磁化在磁粉检测中得到了广泛的应用,其主要优点是检测灵敏度和检测效率均较高。

2. 直流电磁轭与交流通电法复合磁化

如图 5-27 所示,用直流电磁轭在被检工件中建立稳定的纵向磁场,用交流通电法在被检工件中建立变化的周向磁场,两者的合成磁场则是大小和方向不断变化,有利于探测各种取向的缺陷。

二、磁化电流

磁粉检测使用的磁化电流有交流电、整流电（单相半波整流、单相全波整流、三相半波整流、三相全波整流）、直流电和冲击电流等几种。

（1）交流磁化 所谓交流磁化，就是用大小和方向呈周期性变化的交流电对被检工件实施磁化。

交流磁化由于具有以下优点而在磁粉检测中应用最为广泛。

① 对表面缺陷的检测灵敏度较高。由于趋肤效应，在磁化电流大小相同的情况下，交流磁化在工件表面产生的缺陷漏磁场强度较高，提高了对表面缺陷的检测灵敏度。

② 只有使用交流电才能在被检工件上建立起方向随时间变化的磁场，实现复合磁化。

③ 与直流磁化相比，交流磁场在被检工件截面变化部位的分布较为均匀，更有利于对这些部位缺陷的检测。

④ 交流电的不断换向有利于磁粉在被检工件表面上的迁移，提高检测的灵敏度。

⑤ 交流磁化的磁场浅，容易退磁。

⑥ 电源设备结构简单，维修方便，价格便宜。

交流磁化的不足之处在于：

① 由于趋肤效应，交流磁化对近表面缺陷的检出能力不如直流磁化强，对于钢件中 $\phi 1\text{mm}$ 的人工孔缺陷，剩磁法的探测深度约为 1mm ，连续法的探测深度约为 2mm 。

② 交流磁化后被检工件上的剩磁不稳定，因此用剩磁法检测时，一般需在交流探伤机上加配断电相位控制器，以保证获得稳定的剩磁。

（2）整流电磁化 整流电有单相半波整流、单相全波整流、三相半波整流和三相全波整流四种类型，其中单相半波整流和三相全波整流应用较多。

在这几种整流电中，随着电流波型脉动程度的减小，其磁场的渗透能力增强，可检出缺陷的埋藏深度也随之增大。

总括而言，整流电磁化的优点如下：

① 兼具直流的高渗透性和交流的脉动性，既可检测表面缺陷，又可检测表面以下一定埋藏深度的缺陷；

② 剩磁稳定；

③ 有利于磁粉的迁移。

整流电磁化的不足之处在于：

① 退磁比较困难，彻底退磁需要使用专用的超低频退磁设备；

② 在被检工件的截面突变部位，容易出现磁化不足或磁化过量现象，从而造成这些部位缺陷的漏检。

（3）直流磁化 用直流电对被检工件实施磁化的方法称为直流磁化，直流磁化在磁粉检测中应用最早，其主要优点如下：

① 磁场渗入深度大，有利于近表面缺陷的检测；

② 剩磁稳定，对磁痕的评定有利。

直流磁化的不足之处在于：

① 退磁困难；

② 不适用于干法检测；

③ 退磁场大；

④ 工序间需要退磁。

(4) 冲击电流磁化 冲击电流一般是由电容器充放电获得的，一般只有在需要的磁化电流特别大，而常规设备不能满足时才使用冲击电流磁化。

冲击电流磁化的优点是探伤机可以做得很小，但输出的电流却可以很大。其局限性是只适用于剩磁法检测。

三、磁化规范

在磁粉检测中，为获得一定的检测灵敏度，除选择正确的磁化方法和磁化电流类型之外，对磁化电流的取值或磁场强度的大小也应作相应的规定，这就是磁化规范所要涉及的内容。

根据检测灵敏度的由高到低，磁化规范分为严格磁化规范、标准磁化规范和宽磁化规范三个等级，分别适用于重要的工件或场合、一般的工件或场合和不重要的工件或场合。

磁化规范的制定应综合考虑工件的特性（磁特性、形状、尺寸、表面状态、热处理状态）、预计的缺陷特性（性质、位置、形状、大小）、磁化方法、检测方法、所要求的检测灵敏度、检测效率以及检测设备条件等因素，一般要求被检工件表面有 $2400 \sim 4800 \text{ A/m}$ 的磁场强度。实际工作中可采用经验公式计算法、标准试块（片）法等确定磁化规范。以下给出磁粉检测中一些常见的磁化方法的磁化规范，仅供参考。

1. 直接通电法和中心导体法的磁化规范

直接通电法和中心导体法的磁化规范参照表 5-6，其中交流电的大小为其有效值。

表 5-6 直接通电法和中心导体法的磁化规范

检测方法	磁化电流 I/A		检测方法	磁化电流 I/A	
	交流	直流		交流	直流
连续法	$I=(8 \sim 15)D$	$I=(12 \sim 32)D$	剩磁法	$I=(25 \sim 45)D$	$I=(25 \sim 45)D$

注：D——工件等效直径，mm，对非圆形工件， $D=\text{周长}/\pi$ 。

2. 触头法的磁化规范

采用触头法进行连续法检测时，电极间距控制在 $75 \sim 200 \text{ mm}$ 之间，此时推荐使用的磁化电流可参照表 5-7。

表 5-7 触头法的磁化规范

工件厚度 t/mm	磁化电流值(交流有效值、直流)/A	工件厚度 t/mm	磁化电流值(交流有效值、直流)/A
$t < 19$	$(3.5 \sim 4.5)L$	$t \geq 19$	$(4 \sim 5)L$

注：L——两电极间距，mm。

3. 线圈法的磁化规范

采用线圈法磁化进行连续法检测的磁化规范参照表 5-8，表中，线圈填充系数 r 是工件横截面积与线圈横截面积的比值。中填充系数 ($0.5 > r > 0.1$) 的线圈安匝数计算公式的 $(NI)_L$ 为低填充系数 ($r \leq 0.1$) 的线圈安匝数， $(NI)_h$ 为高填充系数 ($r \geq 0.5$) 的线圈安匝数。表 5-8 中的经验公式适用于三相全波整流电，使用其他电流时应进行换算。

表 5-8 线圈法磁化、连续法检测的线圈安匝数

线圈填充系数 r		线圈安匝数 NI	线圈填充系数 r	线圈安匝数 NI
低填充系数 ($r \leq 0.1$)	工件紧贴线圈内壁放置	$NI = \frac{45000}{L/D}$	高填充系数 ($r \geq 0.5$)	$NI = \frac{35000}{(L/D)+2}$
	工件置于线圈中心	$NI = \frac{1690R}{(6L/D)-5}$	中填充系数 ($0.5 > r > 0.1$)	$NI = (NI)_h \frac{10-r}{8} + (NI)_L \frac{r-2}{8}$

注: L ——工件的长度, mm;

D ——工件直径或横截面上任意两点间的最大距离, mm。

采用线圈法磁化进行剩磁法检测时的磁化规范参见表 5-9, 应使空载线圈中心的磁场强度不小于表中的推荐数值。

表 5-9 线圈法磁化、剩磁法检测的磁化规范

L/D	空载线圈中心的磁场强度/ $kA \cdot m^{-1}$	L/D	空载线圈中心的磁场强度/ $kA \cdot m^{-1}$
圆盘形工件	36	$10 \geq L/D > 5$	16
$5 \geq L/D > 2$	24	> 10	12

4. 磁轭法的磁化规范

采用磁轭法进行磁化时, 两磁极之间的距离一般应控制在 75~200mm 之间, 前后两次磁化间应有至少不小于 15mm 的磁化重叠区。

被磁化区域的磁场强度是否满足要求可以通过测量其提升力来进行判断, 当两磁极间距在 75~200mm 时, 永久磁铁和直流电磁轭的提升力至少应为 177N。交流电磁轭的磁极间距不超过 300mm 时, 其提升力至少应为 44N。

5. 缠绕电缆法纵向磁化规范

使用直流或整流励磁的缠绕电缆法作纵向磁化检验管道环焊缝时 (图 5-23), 推荐的安匝数 (NI) 可按式估算:

$$NI = \frac{35000}{\frac{L}{D} + 2} (\pm 10\%), \quad \frac{L}{D} \geq 3 \quad (5-18)$$

式中 I ——电流, A;

N ——匝数;

L ——被检管道的长度, mm;

D ——管道直径, mm。

当 $L/D > 15$ 时, 式(5-18)中的 L/D 比值一律取 15。式(5-18)的有效检测范围为缠绕电缆区域的两端再各加上一个管道半径的长度。

用交流励磁的缠绕电缆法检测时, 实际需要的安匝数 (NI) 要使用人工缺陷试板或磁场指示器测定。

四、检测方法

在磁粉检测中, 常根据磁化工件与施加磁粉的相对时机, 将检测方法分为连续法和剩磁法两种。

1. 连续法

所谓连续法, 即是在被检工件有外加磁场作用的同时向被检工件表面施加磁粉或磁悬液

的检测方法。

连续法检测几乎适用于所有的钢铁零件。矫顽力小的工件,如低碳钢、所有退火状态或经过热变形的钢材,以及复合磁化只能采用连续法检测;一些结构复杂的大型构件也常采用连续法检测。

在连续法检测中,磁痕的观察既可在外加磁场作用时,也可在撤去外加磁场以后进行。

连续法既可用于干法,也可用于湿法检测。

连续法检测的特点:灵敏度较高,但检测效率较低,而且易出现干扰缺陷评定的杂乱显示。

2. 剩磁法

所谓剩磁法,即是先对被检工件进行磁化,待撤除外加磁场后再利用被检工件上的剩磁进行磁粉检测的方法。

在经过热处理的高碳钢或合金钢中,凡剩余磁感应强度在 0.8T 以上、矫顽力在 800A/m 以上的材料均可用剩磁法检测。剩磁法检测一般不使用干粉。

剩磁法检测的特点:效率高,其磁痕易于辨别,并有足够的检测灵敏度。

连续法和剩磁法的工艺流程分别如图 5-28(a)、(b) 所示。

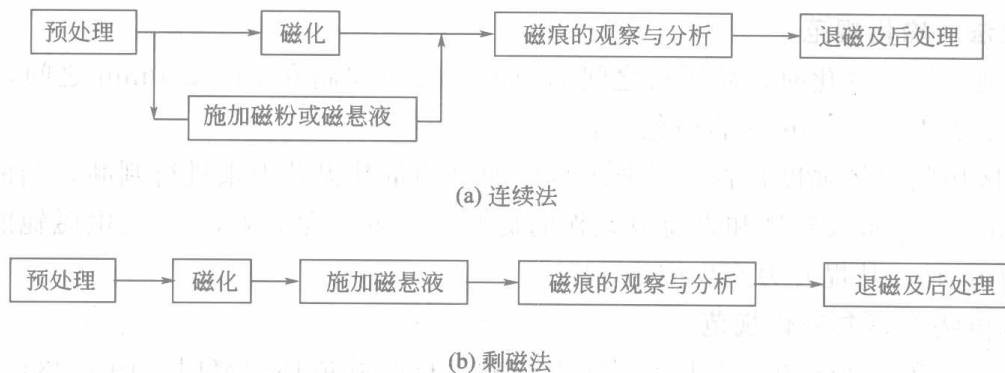


图 5-28 连续法和剩磁法磁粉检测的工艺流程

第五节 磁粉检测的基本步骤

磁粉检测一般包括以下基本步骤:预处理、磁化、施加磁粉、观察与记录、后处理。

一、预处理

被检工件的表面状态对磁粉检测的灵敏度影响很大,光滑的表面有助于磁粉的迁移,而锈蚀或油污的表面则不利于磁粉的迁移。为能获得所需的检测灵敏度,检测前应对被检表面作以下几方面的预处理。

(1) 用化学或机械方法彻底清除被检表面上的油污、锈斑、氧化皮、毛刺、焊渣等表面附着物;

(2) 采用直接通电法检测带有非导电涂层的工件时,应预先彻底清除掉导电部位的局部涂料,以避免因触点接触不良而产生电弧,烧伤被检表面;

(3) 采用干法检测时应使被检工件表面充分干燥。

二、磁化

前已述及,磁化是磁粉检测的关键步骤。实际工作中,应根据被检工件的几何形状、尺

寸大小,以及预计的缺陷种类、大小、位置和取向等特征,选取合适的磁化方法和工艺参数,对被检工件进行磁化。

三、施加磁粉或磁悬液

在磁粉检测中,根据所施加的磁痕显示介质是干磁粉还是磁悬液,分为干法和湿法两种。

1. 干法

所谓干法,就是使用干燥磁粉显示缺陷磁痕的检测方法。

干法常与电磁轭或电极触头配合,广泛用于大型铸件、锻件毛坯及大型结构件焊缝的局部磁粉检测。

用干法检测时,磁粉与被检工件表面先要充分干燥,然后用喷粉器或其他工具将呈雾状的干燥磁粉施于被检工件表面,形成薄而均匀的磁粉覆盖层,同时用干燥的压缩空气吹去局部堆积的多余磁粉。操作时应注意控制好风压、风量及风口距离,不能干扰真正的缺陷磁痕。观察磁痕应与喷粉和去除多余磁粉的操作同时进行,观察完磁痕后再撤除外磁场。

2. 湿法

所谓湿法,就是将干磁粉(粒度范围以 $1\sim 10\mu\text{m}$ 为宜)调配在油、水或其他载体中,制成悬浮状溶液作为磁痕显示介质的磁粉检测方法。

与干法相比较,湿法具有更高的检测灵敏度,适合于检测如疲劳裂纹一类的细微缺陷。

湿法检测时,施加磁悬液可采用浇、浸或喷等方法。浇磁悬浮液的液流不要太强;浸磁悬浮液要掌握好浸没时间。

使用水磁悬液时,若施加在被检工件表面上的磁悬液薄膜能保持连续并覆盖上全部被检表面,这表明水中已含有足够的润湿剂。反之,需要在水中加入更多的润湿剂,但注意不能让磁悬液的pH值超过10.5。

四、磁痕的观察、分析与记录

磁粉或磁悬液在被检表面上聚集形成的图像称为磁痕。磁痕的观察与分析是磁粉检测的中心环节。

(一) 磁痕观察

观察磁痕应在适当的工作环境条件下进行:应使用2~10倍的放大镜。观察非荧光磁粉的磁痕时,要求被检表面上的白光照度达到 1500l x 以上;观察荧光磁粉的磁痕时,要求被检表面上的紫外线(黑光)照度不低于 970l x ,且白光照度不大于 10l x 。

(二) 磁痕分析

在磁粉检测中,根据其产生的原因或机理,常将磁痕分为假磁痕、无关显示和相关显示三大类。

所谓假磁痕,即不是漏磁场引起的磁痕显示,如被检表面上残留的氧化皮与锈蚀或涂料斑点的边缘、焊缝熔合线上的咬边、粗糙的机加工表面等部位都可能会滞留磁粉,形成磁痕。假磁痕在干粉检测中较为多见。

所谓无关显示,就是因缺陷以外的漏磁场对磁粉的积聚引起的磁痕显示,如被检工件表面上存在的金相组织不均匀、异种材料的界面、加工硬化与非加工硬化的界面、非金属夹杂

物、偏析、残余应力或应力应变集中区等磁导率发生变化或几何形状发生突变的部位,磁化后这些部位的漏磁场也能不同程度地吸附磁粉形成磁痕。因这些磁痕与缺陷无关,故称为无关显示。

相关显示即因缺陷引起的磁痕,这是磁粉检测的根本目标。

分析磁痕时,首先要判明它属假磁痕、无关显示和相关显示三大类中的哪一类。在此基础上,再对相关显示进行仔细分析,以进一步判明其属于何种缺陷的磁痕。

要正确识别磁痕,不仅要求分析者对被检工件的材质和加工工艺有全面的了解,同时还要求有较丰富的实践经验。对初学者而言,可参照“GJB 2029—1994 磁粉检验图谱”等资料,但应注意收集典型缺陷的磁痕,在实际工作中积累经验。

以下简要讨论磁粉检测中的一些常见相关显示磁痕及其特征,仅供参考。

(1) 铸造裂纹 铸造裂纹有热裂和冷裂两种。

热裂的磁痕特征是:多呈连续、半连续的曲折网状,起始部位较宽,尾端纤细;有时呈断续条状或树杈状,粗细均匀,显示强烈,磁粉聚集浓密,轮廓清晰,重现性好。

冷裂的磁痕特征:多呈较规则的微弯曲线状,起始部位较宽,随延伸方向逐渐变细,有时贯穿整个铸件,边界通常较整齐。显示强烈,磁粉积聚浓密,轮廓清晰。重现性好,抹除磁粉一般肉眼可见。

(2) 气孔 气孔的磁痕特征是:呈圆形或椭圆形,显示不太清晰,其浓度与气孔的深度有关。埋藏气孔一般要使用直流磁化才能检测出来。

(3) 缩孔与缩松 缩孔的磁痕特征是:磁粉堆积浓密,外形极不规则,多呈云霞状。

缩松的磁痕特征是:呈短线状或点状,磁粉聚集分散,显示方向随磁化方向的变化而变化。

(4) 冷隔 冷隔的磁痕特征是:呈长条状,两端圆秃,磁粉聚集较少,浅淡而较松软。

(5) 锻造裂纹 锻造裂纹的磁痕大多呈无规则线状,显示强烈,磁粉聚集浓密,轮廓清晰,重复性好。

(6) 折叠 折叠的磁痕特征是:多与工件表面成一定角度,常出现在工件尺寸突变处或易过热部位;磁痕有的类似淬火裂纹,有的呈较宽的沟状,有的呈鳞片状;磁粉聚集的多少随折叠的深浅而异。

(7) 焊接裂纹 焊接裂纹产生在焊缝金属或热影响区内。其长度可为几毫米至数百毫米,深度较浅的为几毫米,较深的可穿透整个焊缝或母材。

焊接裂纹的磁痕呈纵向、横向直线或曲线状、树枝状或星形放射状,磁粉聚集浓密,轮廓清晰,重现性好。

(8) 夹渣 夹渣的磁痕特征是:磁粉沉积为点状(椭圆形)或粗短线条状,磁粉堆积不紧密,比较平直,条状两端不尖细。

(9) 淬火裂纹 淬火裂纹的磁痕特征是:磁粉聚集浓密,轮廓清晰。一般淬火裂纹呈细直的线状、网状或树枝状,尾端尖细,棱角较多。渗碳淬火裂纹的边缘呈锯齿形。工件锐角处的淬火裂纹呈弧形。

(10) 磨削裂纹 磨削裂纹的磁痕特征是:呈网状或辐射状、相互平行的短曲线条,显示强烈,磁粉聚集紧密而集中,但磁粉堆积不高,磁痕细而尖,轮廓较清晰,重现性好,出现数量也较多,常与磨削方向垂直。

(11) 疲劳裂纹 疲劳裂纹的磁痕特征是:呈直线或曲线状,随延伸方向逐渐变细,中

部聚集的磁粉较多,两端磁粉逐渐减少,显示清晰,常成群出现。除去磁粉后,一般有肉眼可见的细纹痕迹。

(12) 发纹 发纹的磁痕特征是:呈细而直的线状或断续点状,有时微弯曲,端部呈尖形,沿金属纤维方向分布;均匀而不浓密。擦去磁痕后,用肉眼一般看不见发纹。

(13) 非金属夹杂物 非金属夹杂物的磁痕特征:沿纤维状分布,呈短直线或断续线状,两端不尖锐,显示不太清晰,抹去磁粉后一般看不出痕迹。

(14) 白点 白点的磁痕特征是:在横断面上呈锯齿状或短曲线状,形似幼虫。磁粉积聚浓密,轮廓清晰,中部粗大,两端尖细略呈辐射状分布。在纵截面上,磁痕沿轴向分布,类似发纹,但磁痕略弯,磁粉积聚浓密,轮廓清晰。

(15) 分层 钢板切割下料的端面上若有分层,经磁粉探伤后就会出现呈长条状或断续分布的,浓而清晰的磁痕。

(16) 原材料裂纹 原材料裂纹的磁痕一般呈直线或一根接一根的短线状,磁粉聚集较浓且显示清晰,多与金属的纤维方向一致。

(三) 磁痕记录

对磁粉探伤中发现的相关磁痕有时要作永久性记录保存,常用的记录磁痕的方法有照相、用透明胶带贴印、涂层剥离或画出磁痕草图、橡胶铸型等几种。

五、后处理

磁粉检测以后,应进行退磁、清理被检表面上残留的磁粉或磁悬液、标志等后处理。

1. 退磁

大多数情况下,被检工件中过强的剩磁是有害的,因此需要对其进行退磁。所谓退磁,就是采用专门工艺使工件中的剩余磁场强度减小到足够低(不影响其正常使用)的程度。退磁原理如图 5-29 所示。

常用的退磁方法有交流退磁和直流退磁两种。交流退磁方法简便,实施比较容易,但退磁效果一般不如直流退磁。

(1) 交流退磁 是用交流电对被检工件实施退磁。常用的交流退磁方法有交流线圈法、交流电磁轭法和触头法等。

常用的交流线圈退磁操作是,将被检工件从一个通有交流电的线圈中通过,并沿轴向逐步撤出线圈外 1.5m 以远,然后断电。或将被检工件放在线圈中不

动,逐渐将电流幅值降为零也可以收到同样的退磁效果。用交流电磁轭退磁时,先把电磁轭放在被检表面上,然后在励磁的同时将电磁轭缓慢移开,直至被检工件表面完全脱离电磁轭磁场的有效范围。用触头法检测后,可再将触头放回原处,然后让励磁的交变电流逐渐衰减为零即可实现退磁。

(2) 直流退磁 在需要退磁的被检工件上通以低频换向、幅值逐渐递减为零的直流电,可以更为有效地去除工件内部的剩磁。

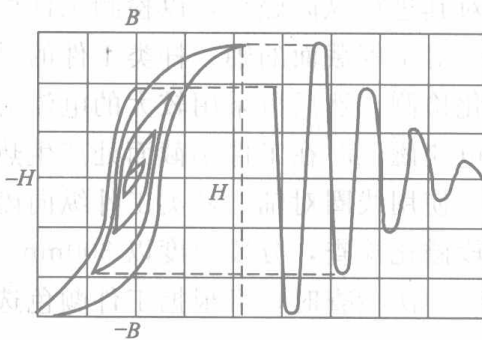


图 5-29 退磁原理

退磁效果可用磁强计进行测定。退磁指标视产品性能要求而定。例如,航空导航系统零件的剩磁要求小于 0.1mT ;内燃机的曲轴、凸轮和连杆的剩磁要求小于 0.2mT ;压力容器退磁以后的剩磁不能超过 0.3mT 。

2. 清理被检表面

退磁之后,应清理被检表面,除去残留的磁粉或磁悬液。

干磁粉可以直接用压缩空气清除;油磁悬液可用汽油等溶剂清除;水磁悬液应先用水进行清洗,然后干燥。此外,如有必要,可在被检表面上涂覆防护油。

3. 标志

磁粉检测后,应对被检工件进行合格与否标志,对含有缺陷的工件应标志出缺陷部位,以便对其进行修复等处理。

第六节 磁粉检测的应用

目前,磁粉检测仍然是铁磁性材料及其制品表面裂纹最灵敏的检测方法,广泛应用于汽车、摩托车制造、冶金、石油化工、机械、铁路、航空航天等领域,小到螺栓、螺母,大到海上钻井平台、 2000m^3 以上的高压储罐等,磁粉检测都有其用武之地。

以下简要讨论一些典型工件的磁粉检测方法,供参考。实际工作中,针对具体的检测要求,在参考有关标准的前提下,可灵活应用这些检测方法。

一、轴、杆类工件的检测

轴、杆类工件是指长度与其横向尺寸的比值较大的一类工件,如传动轴、丝杆、活塞杆等。

轴、杆类工件在整个机械制品中占了很大的比例,常以压延拉制或锻造成型。在锻制成型过程中,钢锭中的气泡、夹杂物等一般都被拉长变细,折叠、拉痕等也多沿轴向延伸呈纵向分布。因此,对这类工件的磁粉检测,以直接通电法周向磁化为主,辅以线圈法或磁轭法等对其进行纵向磁化,以检测工件可能存在的横向缺陷(如淬火裂纹、磨削裂纹等)。

对不等截面的轴、杆类工件的磁粉检测,应先用较小的电流对横向尺寸较小的部位进行磁化检测,然后再采用较大的电流对工件横向尺寸较大的部位进行磁化检查。并应注意防止大电流磁化时在工件小截面处产生热损伤。

使用线圈对轴、杆类工件纵向磁化时,若 L/D (长/径) 值较大且零件较长时,要进行分段磁化检查,分段长度以 300mm 左右为宜。

湿法检查时,可根据工件颜色选用普通磁粉或荧光磁粉。对螺栓最好采用荧光磁粉。

二、管类工件的检测

管类工件是指长度与其横向尺寸的比值较大、且存在内孔的一类工件,如油缸(液压缸)、套筒、钢管等。

对管类工件的磁粉检测,多采用芯杆法进行磁化。芯杆宜采用导电良好的铜棒或铝棒,直径约为工件内径的四分之一到二分之一,以保证其有良好的承载能力。

为提高检测效率、减小反磁场的影响,对短小的管类工件的磁粉检测,可同时将多个工件串联在芯杆上进行磁化。工件之间要留有足够的间隙,以便工件的每个部位上都能浸润到

磁粉或磁悬液。

对一端封闭的管形零件,除用通电法外,也可用芯棒和工件接触的方法磁化。通电时,应保证导电芯棒与封头的端面有良好的接触,并且注意使工件不接触到磁化设备上接地的任何部分。

湿法检查时,可根据工件颜色选用普通磁粉或荧光磁粉。对管内壁最好采用荧光磁粉。

三、盘类工件的检测

盘类工件也是常见的机械制品,如联轴器、压盖、端盖、法兰盘、管接头等。

盘类工件的主体大多由回转体组成,在轴线上有内孔或内腔结构,盘上布有各种连接孔、螺栓孔、螺孔等。

盘类工件常由铸造或锻造而成,尺寸大小不等,其检查方法也不一样。尺寸较小的可在固定式磁粉探伤机上用通电和充磁方法进行检查,尺寸较大的则可用触头法进行局部通电磁化检查,或用便携式磁轭分块磁化检查。盘件上的各孔可用中心导体法进行磁化检查,要注意其内部及孔周围的缺陷。

四、环形工件的检测

环形工件是指轴向尺寸与其横向尺寸的比值较小的有孔工件,如垫圈、轴承套圈等。

对环形工件两壁及内外表面轴向缺陷的磁粉检测,可采用局部缠绕电缆的方法、或用平行磁化法进行磁化。检查时先观察绕电缆附近的部位,然后缓慢移动所缠绕的电缆,逐步进行观察。

对周向缺陷的检查,可采用沿工件弧面局部通电的方法磁化,或采用磁轭对环两壁进行磁化观察。

五、焊接件的检测

焊接技术的应用十分广泛,焊接件是磁粉检测的主要应用对象。

对焊接件检测包括对坡口的检测、对焊接过程的检测和对焊缝的检测三个阶段。

对坡口的检测是检查焊件母材的质量,检测部位是坡口和钝边,可能发生的缺陷有分层和裂纹。分层平行于钢板表面,在板厚中心附近。裂纹可能出现于分层端部或火焰切割时产生。对坡口的检测常采用触头法进行磁化,应注意防止电流过大烧伤触头与工件的接触面。

用交叉电磁轭的旋转磁场检测坡口缺陷时,把交叉电磁轭放在靠近坡口的钢板表面上,沿着坡口连续行走,用磁轭外侧磁化坡口。

为控制检测灵敏度,通常在背离交叉磁轭一侧的坡口面上贴附 A 型灵敏度试片,以验证磁化规范是否合理。

将 A 型试片开槽的一面贴在坡口面上用胶带纸粘牢。检测过程中,试片的另一面应出现清晰的磁痕。检测厚度小于 50mm 钢板的坡口时,一般情况下可达到 30/100 试片的灵敏度。对于更厚的钢板,为保证有足够的检测灵敏度,可在坡口的两面各进行一次检测。

对焊接过程中的检查主要应用于多层钢板的包扎焊接或大厚度钢板的多层焊接。它在焊接过程的中间阶段,即焊缝隆起只有一定厚度时进行检查,发现缺陷后将其除掉。由于工件温度较高,不能采用湿法,应采用高温磁粉进行干法检测,且最好采用半波整流电磁化。

对焊缝的检测是在焊接过程结束后进行的。采用自动电弧焊的焊缝表面较平滑,可直接

进行检测；手工电弧焊的焊缝比较粗糙，应进行表面清理后再进行检查。由于一般高强度钢的焊接裂纹有延迟效应（即延时开裂），焊接后不能马上检测。通常放置两、三天后再进行检测。焊缝检测范围应包括整个热影响区，焊缝检测的主要方法是磁轭法和触头法，磁轭法可采用普通交直流磁轭或十字交叉旋转磁轭，有时还可采用永久磁铁制作的磁轭。对直径不太大的管道也可采用线圈或电缆缠绕方法对焊缝进行辅助磁化。

对大型焊接件多采用电磁轭（直流、交流和永久）或触头法等进行局部磁化、分段（分区）检测，此时应注意各分区间的重叠。

六、弹簧的检测

弹簧是常见的机械零件，它能发生大量的弹性变形，以吸收冲击能量、缓和冲击与振动。弹簧缺陷会导致大的机械事故，所以弹簧检测极为重要。

弹簧主要有压缩弹簧、拉伸弹簧和扭转弹簧三种类型，其材质一般为高碳钢或高合金弹簧钢，热处理后的硬度和剩磁都较高。

弹簧的常见缺陷有淬火裂纹、表面拉伤、夹杂物、发纹等，弹簧在运行中还可能出现疲劳裂纹。

对弹簧的磁粉检测，常用通电法或极间磁轭法进行磁化，有时也采用中心导体法。

检测压簧时，常将其套在一个长度略短于弹簧的绝缘棒（塑料或胶木棒）上，用夹头夹住通电或通磁，这样可检查弹簧的纵横方向缺陷。也可以用检测机上的附加电缆装上夹钳进行检测。

检测拉簧时，由于拉簧一圈一圈紧挨着，相当于一根钢管，因此可采用中心导体法进行磁化，以发现钢丝上的横向缺陷。而对其纵向缺陷的检测，应在弹簧圈与圈之间加塞绝缘片后进行通电磁化。

弹簧检测采用湿法、剩磁法检查效果较好。弹簧检测后应进行退磁。用线圈法退磁时，应边转动边拉出弹簧。

七、钢制压力容器的检测

压力容器在使用过程中，由于疲劳、腐蚀等原因易产生表面裂纹，如果不及时采取措施而任裂纹发展，则最终会导致压力容器的爆裂，进而引发爆炸、有害介质泄漏、造成环境污染，危及人身安全等严重后果。因此，在役压力容器是无损检测的重点对象之一。

对钢制压力容器的无损检测可采用超声、射线、磁粉和声发射等方法，这里只讨论磁粉检测方法。

对于钢制在役压力容器，检测的重点部位是各焊缝、特别是易产生应力集中的部位，其次是母材区域。

检查前，应将要检查的部位进行分区编号，如纵 1、纵 2、横 3、横 4 等，并标注在压力容器的展开图上。预处理时将焊缝表面的焊接波纹及热影响区表面上的飞溅物用砂轮打磨平整，不得有凹凸不平和浮锈。

根据被检部位的结构及可能存在的缺陷情况，选取合适的磁化方法和磁化规范。对于角焊缝，可采取平行电缆法进行磁化，对对接焊缝和母材区域，可采用触头法进行局部磁化。为避免漏检，对同一部位应至少进行相互垂直的两个方向的检测。局部磁化时要注意使各分区间有一定量（如 15mm）的重叠。采用磁轭法进行检测时，为保证足够的检测灵敏度，

除控制检测设备的提升力外（交流提升力不小于 44N，直流提升力不小于 177N），还要求用灵敏度试片进行实际测试。根据被检件的材质及所要求的检测灵敏度等级，选取灵敏度试片，一般可选用 A-30/100 中等灵敏度试片。使用时，将灵敏度试片放置在被检部位或其边沿的平整光滑部位、刻槽向内紧贴被检件。要求出现清晰的磁痕显示。此外，还应注意使磁极端面与工件表面之间保持一定间隙，以使磁轭能在工件上移动行走又不会产生较大的漏磁场为宜，一般不超过 1.5mm。在通入磁化电流时，应同时施加磁悬液。磁化电流每次持续时间为 0.5~2s，间歇时间不超过 1s，停施磁悬液至少 1s 后才可停止磁化。磁轭行走速度应均匀，通常为 2~3m/min。

磁痕显示可采用荧光磁粉、湿法显示，磁悬液的施加采用喷施。

当检查纵缝时，方向应自上而下，以免浇磁悬液时冲掉已形成的磁痕。

对磁痕的分析和评定，应按照相关标准的规定及按照验收技术文件进行记录和发放检测报告。

八、内燃机活塞销的磁粉探伤

对内燃机活塞销的磁粉检测，可采用中心导体法进行交流周向磁化，磁化规范 $I=(10\sim15)D$ ；连续法检测，每次通电时间 1~3s，通电两次。中心导体（铜管）的外径应大于活塞内径的 50%，一般以活塞直径的 2/3 为宜。磁粉选用黑色磁粉，平均粒度为 5~10 μm ，最大粒度为 50 μm ，且具有较高的磁导率和低矫顽力。磁悬液由磁粉和混合油（煤油：变压器油=3：1）配置而成，磁粉含量为 15~20g/L。

检测前，活塞销外表面要清洗干净，不允许存在油污等。检测之后要进行退磁等后处理。

九、起重机吊钩的磁粉检测

起重机吊钩在长期的使用过程中易产生疲劳裂纹，存在着较大的安全隐患，吊钩断裂造成人员伤亡事故时有发生，因此，对在役吊钩的磁粉检验受到越来越广泛的重视。

对在役吊钩的磁粉检验，应重点检查其螺牙、颈根部和弯曲部位。

根据在役吊钩的检验重点，采用线圈法和磁轭法相结合进行纵向磁化检查，能较好地发现裂纹。线圈法可发现与线圈轴垂直的缺陷，吊钩在线圈中是否容易被磁化与吊钩长度和直径之比 L/D 有密切关系，一般控制在 3~15 之间。 L/D 越小，越难磁化，这是由于工件两端产生的退磁场较大的缘故，为削弱退磁场的影响，工件轴一定要与线圈轴平行，吊钩的颈部和螺牙部分可采用线圈法探伤。用磁轭法检查颈部和弯曲部位，磁轭沿平行于轴的方向分段磁化，可以发现吊钩上横向或呈一定角度的缺陷。

具体检测步骤如下。

①用煤油清洗吊钩，除去油污和锈斑等脏物；②用线圈检验吊钩螺牙、颈部及弯曲部位，用磁轭检验颈根部以下至弯曲部位。采用连续法通电磁化，磁悬液在通电期间施加完毕，通电时间 13s，停施磁悬液至少 1s 后方可停止磁化。为了保证磁化效果，至少进行两次以上的反复磁化。探伤时应设定每一次操作的有效范围，线圈法为 250mm，磁轭法为 100mm，然后把探伤面适当分割成二至三个区域，其边缘应有一定的重叠，重叠部分不少于分段检测长度的 10%。选用 A-30/100 型灵敏度试片测试，磁悬液为煤油+磁粉，磁粉浓度为 10~20g/L。

大量的检测实践表明,应用磁粉检测技术,可有效地检测在役吊钩的表面、近表面缺陷和疲劳损伤,从而保证吊钩的安全使用。

第七节 磁粉检测的新近进展

磁粉检测虽然已有较长的发展历史,理论相对比较成熟,应用也非常广泛,但仍处在不断的发展之中。综观国内外的新近成果,可以看出磁粉检测将在以下几方面得到进一步的发展。

1. 高性能磁痕显示介质的研制

研制检测灵敏度更高、更加环保和价廉的新型磁粉和磁悬液,是磁粉检测领域的一个长久的奋斗目标。

文献[35]研制了一种以丙三醇为增稠剂、亚硝酸钠为防锈剂的新型水剂磁悬液,经实际应用表明,该新型水基磁悬液能满足轴承表面细微裂纹检测的需要,且无环境污染、价格低廉。

2. 小型、轻便、全自动磁粉探伤设备的研制

磁粉探伤设备小型、轻便化:用现代电子技术(如晶闸管)的最新成果对磁粉探伤设备进行改造,使磁粉探伤设备日趋小巧、轻便。

磁粉探伤设备自动化:借助现代电子技术、计算机软硬件技术的进步,研制自动化程度更高的磁粉探伤设备。如针对汽车连杆、凸轮轴等特定对象的全自动荧光磁粉探伤系统,可以实现磁粉检测全过程(包括工件的入位、装夹、磁化、施加磁粉或磁悬液、磁痕的观察、评定与记录、退磁和后处理)的自动化,这样不仅降低了检测人员的劳动强度,提高了检测效率,同时也提高的检测结果的一致性(重复性),而且还将检测结果数字化,使之可长期保存。

德国 KL 和 Tiede 公司针对汽车齿轮、轴、销和螺栓等工件以及原材料钢材研究开发的荧光磁粉全自动探伤设备已在德国大众汽车公司等企业获得应用。在美国通用汽车公司获得应用的汽车连杆荧光磁粉全自动探伤机的检测速度可达 1200 件/小时。我国也有部分高等院校、科研单位和工厂企业从事这方面的研究开发,并取得了一定的研究成果。

3. 磁痕评定的智能化

通过 CCD 设备摄取磁痕原始图像,采用图像灰度化、区域分割、边缘检测与增强等数字图像处理技术,对原始磁痕进行处理,利用模式识别、专家系统等人工智能技术对处理后的磁痕图像进行分类、识别,使磁痕评定智能化。

4. 检测灵敏度的理论模型

采用物理实验和数值仿真等方法,研究一些典型缺陷在不同磁化方法和磁化规范下的漏磁特性,建立检测灵敏度的理论模型,以指导磁粉检测实践。

复习思考题

1. 简述磁粉检测的基本原理、主要特点及典型应用。
2. 简述磁化方法的分类及其选择依据。
3. 简述磁粉检测的基本步骤及其工作内容。

4. 简述磁粉检测灵敏度的评价方法。
5. 简述影响磁粉检测灵敏度的主要因素及作用规律。
6. 分析交叉电磁轭旋转磁场探伤仪的工作原理。

参考文献

- [1] 中国机械工程学会无损检测学会编. 磁粉探伤. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [2] Halmshaw R. Non-destructive Testing. London: Edward Arnold, 1987.
- [3] 叶代平, 苏李广. 磁粉检测. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [4] 陈健生, 王海民, 付洋. 磁粉检测 20 年回顾. 无损检测, 1998, 20 (4): 91~95.
- [5] 张三慧. 电磁学 (第二版). 北京: 清华大学出版社, 1999. 12.
- [6] 吴其胜, 蔡安兰, 杨亚群. 材料物理性能. 上海: 华东理工大学出版社, 2006.
- [7] 吴前驱, 贺潜源, 丁伟. 表面无损检测. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [8] 冶金工业信息标准研究院标准化研究所, 中国标准出版社第二编辑室编. 金属材料物理试验方法标准汇编 (下) (第二版). 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [9] 《金属材料无损检测方法标准汇编》汇编组编. 金属材料无损检测方法标准汇编. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [10] 任吉林, 林俊明, 高春法. 电磁检测. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [11] 范吕慧, 姚力. 不同标准磁轭技术指标的比较和讨论. 无损探伤, 2003, 27 (5): 27~29.
- [12] 宋志哲, 安明辉. 磁粉检验用标准试块的研制. 无损检测, 2002, 24 (5): 194~195.
- [13] GB/T 12604. 5—90 无损检测术语—磁粉检测.
- [14] GB/T 9444—88 铸钢件磁粉探伤及质量评级方法.
- [15] GB/T 10121—88 钢材塔形发纹磁粉检验方法.
- [16] GB/T 15822—1995 磁粉探伤方法.
- [17] GJB 2028—94 磁粉检验.
- [18] [美] Charles J. Hellier 著, 戴光, 徐延廷, 李伟等译. 无损检测与评价手册. 北京: 中国石化出版社, 2006.
- [19] 陈健生. 磁粉探伤磁化技术与磁化设备. 无损检测, 2002, 24 (7): 298~301, 306.
- [20] 郭海鸥. MT-RC 标准缺陷样件. 无损探伤, 1998 (3): 39~40.
- [21] 郭海鸥. MT-RC 标准样件的研制与应用. 无损检测, 1999, 21 (12): 565~566.
- [22] 金宇飞. 磁粉检测试片的分类与应用. 无损检测, 2007, 29 (2): 96~99.
- [23] 徐长业, 郑立农. 氨合成塔进出物料换热器的荧光磁粉检测. 无损探伤, 2000 (6): 41~42.
- [24] 仲维畅. 磁化场方向影响磁粉显现缺陷的理论. 无损检测, 1995, 17 (5): 138~143.
- [25] 朱德金, 袁惠清. 双回路交流磁化方法. 无损检测, 1996, 18 (10): 276~277.
- [26] 陈健生. 磁粉探伤中的磁导率概念及多向磁化技术的应用与发展. 无损检测, 1995, 17 (10): 291~295.
- [27] 陶旺斌. 论磁化电流. 无损检测, 1995, 17 (3): 81~85.
- [28] 袁斌. 磁粉探伤中电流取值两公式的探讨. 无损检测, 1996, 18 (10): 283~284.
- [29] 潘荣宝, 范宇. 压力容器磁粉探伤技术. 无损检测, 1995, 17 (2): 51~54.
- [30] 吴成芸. 超高强度 300M 钢的磁粉检验. 无损检测, 1994, 16 (8): 216~218.
- [31] 陈至宝. 尿素合成塔主螺栓的磁粉检测. 无损检测, 1994, 16 (2): 48~49.
- [32] 石振锋. 航空钢纯洁度的磁粉检验. 无损检测, 1994, 16 (7): 193~195.
- [33] 谢广庆. 轴承零件表面裂纹磁粉探伤. 无损检测, 1995, 17 (9): 265~270.
- [34] 张花锐, 贾静, 彭彩欣. 活塞销磁粉探伤探讨. 内燃机配件, 1999 (1): 6~8.
- [35] 李建成. 在役起重机吊钩的磁粉检测. 无损检测, 2001, 23 (12): 541~544.
- [36] 刘金源, 高元安. 新型水剂磁悬液的应用. 轴承, 2002 (11): 40.
- [37] 周锦鑫, 马紫峰, 黄永昌等. 探伤用荧光磁粉制造工艺研究. 新技术新工艺, 2000 (9): 38~39.
- [38] 魏桂生. 小型电磁轭的研制与应用. 无损检测, 2004, 26 (2): 66~67, 71.
- [39] 刘磊, 刘秀兰, 俞庠. 全自动荧光磁粉检测系统的研究. 机械工程与自动化, 2004 (6): 26~32.

- [40] 程伟, 黄曙荣, 陈健生. 全自动荧光磁粉检测系统. 无损检测, 2000, 22 (11): 505~508.
- [41] 程志虎, 王怡之. 水下磁粉检测技术. 无损检测, 1998, 20 (3): 87~90.
- [42] 黄松岭. 管道磁化的有限元优化设计. 清华大学学报, 2000, 40 (2): 67~69.
- [43] 李路明, 黄松岭, 李振星等. 铸铁件的漏磁检测方法. 清华大学学报 (自然科学版), 2002, 42 (4): 474~476.
- [44] 兵器工业部新技术推广所. 常用钢种磁特性曲线汇编. 北京: 兵器工业出版社, 1982.
- [45] Yong Li, John Wilson, Gui Yun Tian. Experiment and simulation study of 3D magnetic field sensing for magnetic flux leakage defect characterization. NDT&E International, 2007, 40: 179~184.
- [46] Mitsuaki Katoh, Noritaka Masumoto, Kazumasa Nishio, et al. Modeling of the yoke-magnetization in MFL-testing by finite elements. NDT&E International, 2003, 36: 479~486.
- [47] M Katoh, Nishio K, Yamaguchi T. FEM study on the influence of air gap and specimen thickness on the detectability of flaw in the yoke method. NDT&E International, 2000, 33: 333~339.

第六章

渗透检测

第一节 概 述

一、渗透检测的发展简史

渗透检测 (PT: Penetrant Testing) 是用黄绿色的荧光渗透液或者红色的着色渗透液来显示放大的缺陷痕迹, 从而能够用肉眼观察到试件表面开口缺陷的一种无损检测方法。

渗透检测是除目视检查外应用最早的无损检测方法, 目前已发展成为五种常规无损检测方法之一。

渗透检测的工业应用始于 19 世纪末、20 世纪初, 当时是以油—白垩为基础、主要用来检测铁路零部件。20 世纪 30 年代初, 磁粉检测的广泛应用以及它在探测非表面开口缺陷方面的优势, 使渗透检测一度限于发展的低谷。20 世纪 30 年代中期, 以铝为典型代表的非铁磁性材料被越来越广泛的应用, 为渗透检测提供了新的发展机会。1941 年, 罗伯特 (Robert Switzer) 发明的荧光渗透剂被授予专利。1942 年 6 月, 首次出现了水洗型渗透材料和相关装置, 并于 1945 年 7 月获专利。1944 年末、1945 年初开始采用湿显像剂。1946 年 9 月 18 日, 美国发布渗透检测军用技术规范 MIL-I-8474 “铝合金及铝部件检测的阳极氧化方法”; 1949 年 3 月, 着色渗透剂申请专利。1952 年, 后乳化渗透检测技术问世。20 世纪 60、70 年代, 渗透检测迎来了新的发展高峰, 性能更高、价格更低的渗透探伤剂新品种和探伤新工艺不断问世, 理论研究日趋深入, 标准体系和技术规范不断完善, 应用领域不断拓展。特别是近年来, 由于过滤性微粒型渗透剂的出现, 使渗透检测的应用扩展到多孔性材料。

在我国, 渗透检测起步于 20 世纪 50 年代, 当时主要是引进前苏联的技术、材料和设备, 在航空航天和原子能领域开展渗透检测实践。20 世纪 60 年代中期, 我国许多国有大型企业和科研院所纷纷自行研制渗透液, 开发数十种渗透液, 供本单位使用。20 世纪 70 年代后期, 我国在渗透探伤剂方面取得两项重大突破: 沪东造船厂的陈时宗研制出可检测宽零点几微米的表面裂纹且基本无毒无害的着色探伤剂, 中科院上海有机化学研究所等单位成功地研制了新型荧光染料及基本无毒害的荧光探伤剂。这两项成果的取得, 缩短了渗透检测材料的国内外差距, 并推动了渗透检测在国内的发展。

二、渗透检测的特点

与其他无损检测方法相比, 渗透检测的主要优点如下:

①不受试件形状、大小、化学成分、组织结构的限制, 也不受缺陷方位的限制; ②检测设备及工艺过程简单, 检测费用低; ③对人员的要求不高; ④缺陷显示直观; ⑤检测灵敏度

较高；⑥一次操作可同时检出所有的表面开口缺陷，检测效率较高。

渗透检测的局限性在于：

① 只能检测表面开口缺陷；②对多孔性材料的检测困难；③检测结果受检测人员的影响较大。

三、渗透检测的应用

目前，渗透检测在航空航天、原子能、机械、化工、船舶等领域获得广泛应用，主要用于检测有色金属和黑色金属材料的铸件、锻件、焊接件、粉末冶金件以及陶瓷、塑料和玻璃制品的表面开口缺陷。

第二节 渗透检测的理论基础

渗透检测的基本原理：渗透液在毛细现象的作用下进入表面开口的缺陷，去除被检试件表面多余的渗透液后，残留于缺陷中的渗透液随后被显像剂吸附和显像，形成对比度更高、尺寸被放大的缺陷显示痕迹，从而使原缺陷更易于被观察到。图 6-1 所示为渗透检测原理示意。

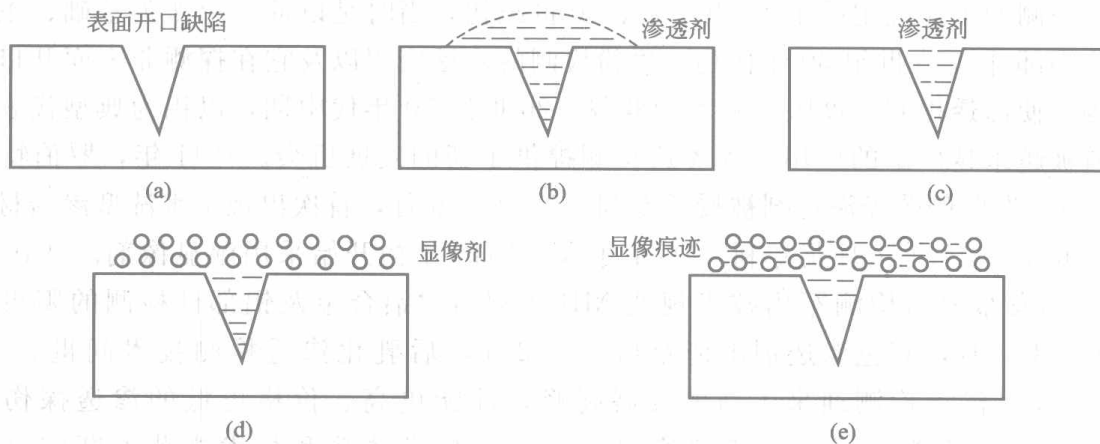


图 6-1 渗透检测原理示意

渗透检测包含渗透、清洗、显像、观察等多个环节，检测效果受检测材料设备、检测工艺和环境条件等诸多因素的影响，涉及表面张力、润湿、毛细现象、表面活性、乳化作用等诸多理论。为更好地理解渗透检测的原理，优化检测工艺，提高检测灵敏度和检测效率，在此对渗透检测所涉及的有关理论知识进行简要讨论。

一、表面张力

液体的表面张力是发生在两个共存相之间的一种界面现象，是力图使液体表面向其内部收缩以减小液体表面积之力。

液体表面层中的分子受到来自液体内部分子和相邻气体分子两方面的吸引，前一吸引力称为内聚力。由于后一种力比内聚力小，因而液体表面层中的分子有被拉进液体内部的趋势，由此产生了表面张力。

单位长度液面边界线上的表面张力称为表面张力系数，记为 σ ，单位为 N/m 。

液体的表面张力系数大小，既与液体的种类有关，还随温度变化。一般来说，容易

挥发的液体（如丙酮、酒精等）的表面张力系数比不易挥发的液体（如水银等）的表面张力系数小，同一种液体的表面张力系数随温度的升高而减小，含有杂质的液体比纯净的液体的表面张力系数要小。表 6-1 所示是渗透检测中几种常见液体在 20℃ 时的表面张力系数，供参考。

表 6-1 渗透检测中几种常见液体的表面张力系数 σ （在 20℃ 时）

液体种类	表面张力系数 σ /($\times 10^{-3}$ N/m)	液体种类	表面张力系数 σ /($\times 10^{-3}$ N/m)	液体种类	表面张力系数 σ /($\times 10^{-3}$ N/m)
水	72.8	乙醚	20.14@25℃	乙酸乙酯	23.9
苯	28.9	油酸甲酯	31.5	水杨酸甲酯	48.0
煤油	24.0	硝基苯	43.9	苯甲酸甲酯	41.5
甲苯	28.4	油酸	32.5	四氟乙烯	35.6
丙酮	23.7	松节油	28.8	四氯化碳	26.43@25℃
乙醇	22.3				

二、润湿现象

润湿是常见的自然现象，液体和气体对固体都有润湿现象，但通常能观察到的只是液体对固体的润湿。因此，通常所说的润湿，是指液体对固体的润湿。

在固体表面上滴一滴液体，将可能发生两种情况：一种情况是，液体在固体表面完全铺展开来，此时称液体润湿固体；另一种情况是，液体不在固体表面铺展，而是力图收缩成球状，此时称液体不润湿固体。在图 6-2 中，(a) 所示为润湿，(b) 所示为不润湿。

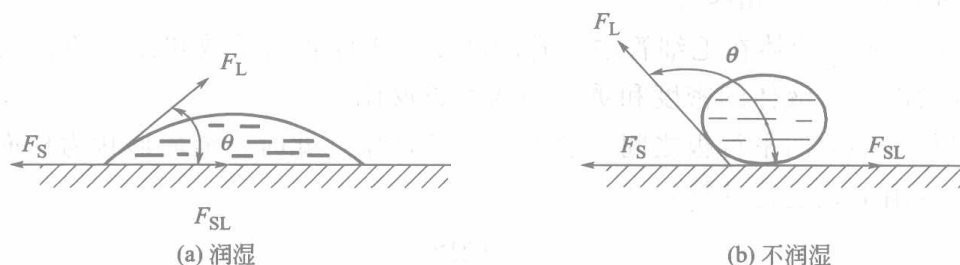


图 6-2 润湿与不润湿示意

事实上，液体在固体表面润湿与否不是绝对的，而只是润湿程度的不同而已。为定量描述液体润湿固体表面的程度，常用接触角 θ 来表示。

所谓接触角，是在气、液、固三相交界处的气-液界面和固-液界面之间的夹角，即图 6-2 中的 θ 角。

接触角越小，说明液体对固体表面的润湿能力越好。一种液体对某种固体的接触角小于 90° ，称该液体对这种固体表面是润湿的。当接触角大于 90° 时，称液体对该固体表面是不润湿的。同一种液体对不同的固体来说，可能是润湿的，也可能是不润湿的。水能润湿无油脂的玻璃，但不能润湿石蜡；水银不能润湿玻璃，但能润湿干净的锌板。

润湿作用与液体的表面张力有关系。液体的表面张力系数越大，其对固体的接触角也越大。表 6-2 列出部分液体与固体接触时的接触角实测值，供参考。

表 6-2 部分液体-固体界面的接触角实测值/ (°)

液体 \ 固体	碳素钢	不锈钢	镁合金	铜	玻璃	液体 \ 固体	碳素钢	不锈钢	镁合金	铜	玻璃
水	51.7	40.7	46.2	25.3	39.5	松节油	4.0	1.1	5.0	1.0	1.5
机油	26.5	17.1	23.0	21.5	19.7	乙二醇乙醚	4.8	12.0	4.5	6.0	17.7

三、毛细现象

将一根很细的管子插入盛有液体的容器中, 如果液体能润湿管子, 那么液体会在管子内上升, 使管内的液面高于容器里的液面。如果液体不能润湿管子, 管内的液面就会低于容器的液面, 如图 6-3 所示。通常将这种润湿管壁的液体在细管中上升, 而不润湿管壁的液体在毛细管中下降的现象称为毛细现象。

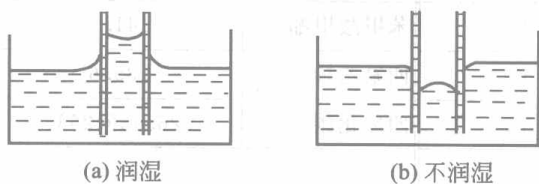


图 6-3 毛细现象

液体在毛细管中上升或下降的高度可用下式计算:

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{r\rho g} \quad (6-1)$$

式中 h ——液体在毛细管中上升或下降的高度, m;

σ ——液体的表面张力系数, N/m;

θ ——液体对固体表面的接触角, (°);

ρ ——液体的密度, kg/m³;

r ——毛细管的内半径, m;

g ——重力加速度, m/s²。

由式(6-1)可知, 液体在毛细管中上升的高度与表面张力系数和接触角余弦的乘积成正比, 与毛细管的内径、液体的密度和重力加速度成反比。

液体在间距很小的两平行板之间也会发生毛细现象, 此时, 液面形状为柱面, 液面上升或下降的高度可用下式进行计算:

$$h = \frac{\sigma \cos\theta}{r\rho g} \quad (6-2)$$

式中 h ——液体在毛细管中上升或下降的高度, m;

σ ——液体的表面张力系数, N/m;

θ ——液体对固体表面的接触角, (°);

ρ ——液体的密度, kg/m³;

r ——平行板之间的间距的 1/2, m;

g ——重力加速度, m/s²。

在渗透检测中, 可将零件表面的开口缺陷看作是毛细管或毛细缝隙。在渗透阶段, 渗透液就是在毛细作用下渗入表面缺陷中去的, 如图 6-1(b)。显像过程也利用了毛细作用的原理, 显像剂是一种细微粉末, 显像剂微粉之间可形成很多半径很小的毛细管, 这种粉末又能被渗透液所润湿, 所以当清洗完零件表面多余的渗透液后, 给零件的表面敷撒一层显像剂, 根据上述的毛细现象, 缺陷中的渗透液就容易被吸出, 在试件表面形成一个放大的缺陷显示, 如图 6-1(e) 所示。

前述式(6-1)和式(6-2)都是两端开口的贯穿型毛细管或毛细缝隙,对于渗透检测中常见的非贯穿型缺陷,渗透剂在缺陷中的渗入深度可用式(6-3)进行计算:

$$h = \frac{2b\sigma\cos\theta}{p_0d + 2\sigma\cos\theta} \quad (6-3)$$

式中 h ——渗透剂在缺陷中的渗入深度, m;

σ ——液体的表面张力系数, N/m;

θ ——液体对固体表面的接触角, ($^\circ$);

d ——缺陷宽度, m;

b ——缺陷深度, m;

p_0 ——大气压强, N/m²。

四、表面活性和表面活性剂

前已述及,渗透剂渗入缺陷的难易,受其表面张力的影响,表面张力系数越小的液体越容易渗入缺陷中。因此,在渗透阶段一般希望渗透剂的表面张力系数尽量小些。表面活性就是使溶剂液体的表面张力系数降低的性质。具有表面活性的物质称为表面活性物质,不具有表面活性的物质称为非表面活性物质。表面活性剂是指这样的物质,它的少量加入,即能使原液体(溶剂)的表面张力系数显著降低,从而产生润湿、乳化、分散等现象。

表面活性剂有阴离子型、阳离子型、阴阳离子两性型、非离子型等多种类型,每种类型中又有亚类及许多品种,目前国内外开发的表面活性剂品种已超过万种,有兴趣的读者可参阅有关表面活性剂的专门文献。渗透检测中使用的主要是非离子型表面活性剂。

五、乳化作用和乳化剂

通过加入表面活性剂,使原本难以互溶的两种液体能互溶而混合在一起的现象称为乳化作用,起乳化作用的表面活性剂称为乳化剂。

乳化剂的乳化作用机理如下:由于乳化剂是具有亲水基和亲油基的两亲基团,其亲水基对水和极性分子有亲和作用,而亲油基则对油和非极性分子具有亲和作用。当把乳化剂加入油-水混合液中时,乳化剂在油-水界面聚集,亲油基与油相连,亲水基与水相连,在油-水之间起到搭桥作用,把本不相溶的油和水连接在一起,形成均匀的乳浊液。这当中乳化剂主要起了以下两方面的关键作用:乳化剂在油-水界面吸附并聚集时,降低界面张力;在分散的液滴表面形成一层具有一定强度的保护膜,阻止液滴之间的重新聚集。

乳化剂的乳化形式一般分为水包油(O/W)和油包水(W/O)两种类型。HLB值在8~18之间的乳化剂的乳化形式为水包油(O/W)型,HLB值在3.6~6之间的乳化剂的乳化形式为油包水(W/O)型。水包油(O/W)型乳化剂也称为亲水型乳化剂,油包水(W/O)型乳化剂也称为亲油型乳化剂。亲油型乳化剂通常按供应状态使用,不需加水稀释;亲水型乳化剂通常以浓缩状态供应,黏度较高,使用时需稀释。表6-3是亲油型乳化剂的典型配方,供参考。后乳化型渗透液的去除多采用水包油(O/W)型乳化剂,其HLB值一般在11~15之间,所形成的乳化液可直接用水冲洗。

表 6-3 亲油型乳化剂的典型配方

成 分	乳化剂 OP-10	工业乙醇	工业丙酮
比例/%	50	40	10
作用	乳化剂	溶剂	溶剂

六、光学基础知识

1. 可见光和紫外线

可见光的波长范围为 400~760nm, 紫外线是波长比可见光中的紫光波长更短的光线, 渗透检测用的紫外线的波长范围一般为 330~390nm。紫外线也称黑光, 荧光渗透检测用的紫外线灯也称为黑光灯。

2. 光致发光

许多原来在白光下不发光的物质, 在紫外线的照射下能够发光, 这种受紫外线激发而发光的现象称为光致发光。能产生光致发光现象的物质称为光致发光物质。光致发光物质分为磷光物质和荧光物质两种。在外界光源停止照射后仍能继续发光的物质称为磷光物质, 而在外界光源停止照射后即停止发光的物质称为荧光物质。荧光渗透液中的荧光染料即属于荧光物质, 它能吸收紫外线的能量发出荧光。

不同的荧光物质发出的荧光颜色不同, 荧光渗透液中的荧光染料, 一般能发出波长范围为 510~550nm 的黄绿色荧光, 一般人眼对这种波长范围的黄绿色荧光最为敏感。

3. 着色强度、荧光强度

显像剂吸附缺陷中的渗透液, 即使数量相同, 仍可能有的缺陷可以看见, 有的缺陷却看不见, 这是由着色强度或荧光强度的差异造成的。

着色强度或荧光强度, 是缺陷内被吸附出来的渗透液在显像后显示色泽的能力。着色强度与渗透液中染料的种类及溶解度有关, 荧光强度不仅与荧光染料的种类及荧光染料在渗透液中的溶解度有关, 还与入射的紫外线的强度有关。

着色强度或荧光强度, 常用吸光度和临界厚度来度量。光线通过有色溶液后, 部分光线被溶液吸收使透射光线减弱的程度, 称为吸光度, 常用消光系数 K 来度量, 其定义为入射光强 I_0 与透射光强 I 之比的常用对数值, 即

$$K = \lg \frac{I_0}{I} = \beta CL \quad (6-4)$$

式中 K ——消光系数;

I_0 ——入射光强;

I ——透射光强;

β ——比例系数;

C ——渗透液中的染料浓度;

L ——光线所透过的液层厚度。

式(6-4)称为郎白-比耳定律。由式(6-4)可知, 提高渗透液中的染料浓度, 可增大其消光值, 从而提高渗透检测的灵敏度。

4. 发光强度、光通量、照度

发光强度简称光强, 是光源向某方向单位立体角发射的光通量, 其国际单位是坎德拉

(cd)。1cd 是给定的单色光源 (该光源发出频率为 540×10^{12} Hz、波长 550nm 的单色辐射) 在给定方向 [在该方向的辐射强度为 $1/683$ (W/Sr) (瓦特/球面度)] 的发光强度。

光通量指人眼所能感觉到的辐射能量, 它等于单位时间内某一波段的辐射能量和该波段的相对视见率的乘积, 单位是流明 (lm), 1lm 是发光强度为 1cd 的光源在单位球面度内的光通量。

照度表示物体被照明的程度, 是指被照物体单位面积上所接受的光通量, 照度的单位是勒克斯 (lx)。1lx 等于被光均匀照射的物体, 在 1m^2 面积上得到的光通量是 1lm 时的照度。

5. 可见度

渗透检测中, 缺陷能否检出, 取决于缺陷显示痕迹能否被观察到。可见度就是用来衡量缺陷显示能否被观察到的指标。可见度越高, 缺陷的检出能力越强。渗透检测中, 缺陷痕迹的可见度与其显示的对比度密切相关。

6. 对比度

对比度是指某显示与其周围背景之间的反差 (亮度高低或颜色深浅) 大小, 常用对比率来定量描述。对比率是某显示与其周围背景的反射光或发射光之比。

黑色染料显示与白色背景的对比率为 9 : 1, 红色染料显示与白色背景的对比率为 6 : 1, 发光的荧光染料与不发光的背景的对比率可达 300 : 1 以上, 甚至高达 1000 : 1。

着色渗透检测的对比率远小于荧光渗透检测的对比率, 因此, 荧光渗透检测的灵敏度一般高于着色渗透检测。

第三节 渗透检测材料与设备

一、渗透检测材料

典型的渗透检测材料包括渗透剂、清洗剂和显像剂。

1. 渗透剂

(1) 渗透剂的作用 渗透剂是在渗透检测中, 用来渗入缺陷中、并被随后施加的显像剂所吸附, 从而显示缺陷的溶液。渗透剂是渗透检测中最为关键的材料, 直接影响渗透检测的灵敏度。

(2) 对渗透剂的性能要求 渗透剂的主要性能指标有: 润湿性 (接触角或表面张力系数)、染料的浓度、黏度、闪点等。

理想的渗透剂应具有以下性能特点:

- ① 渗透性能好, 容易渗入缺陷中去;
- ② 易被清洗, 容易从零件表面清洗干净;
- ③ 对于荧光渗透剂, 要求其荧光辉度高; 对于着色渗透剂, 则要求其色彩艳丽;
- ④ 酸碱度应呈中性, 对被检试件无腐蚀, 对人体无伤害, 对环境无污染;
- ⑤ 闪点高, 不易着火;
- ⑥ 稳定性好, 在光、热等作用下仍能保持其原有性能, 不易分解、不沉淀、不浑浊;
- ⑦ 制造原料来源方便, 价格低廉。

(3) 渗透剂的类型及特点

- ① 按显示方式, 渗透剂主要分为着色渗透剂和荧光渗透剂两种基本类型。一般而言,

荧光渗透剂的检测灵敏度高于着色渗透剂。

② 按清洗方法可分为水洗型渗透剂、后乳化型渗透剂和溶剂去除型渗透剂三种。

水洗型渗透剂可直接用水来清洗,可进一步分为水基型和自乳化型两种。乳化剂含量高时,渗透剂容易清洗,但检测灵敏度低,因为在清洗时容易将宽而浅的缺陷中的渗透剂清洗出来,造成漏检。乳化剂含量低时,难于清洗,但检测灵敏度较高。

后乳化型渗透剂不含有乳化剂,只是在渗透完成后,再给零件的表面渗透剂加乳化剂。所以,使用后乳化型渗透剂进行着色检测时,渗透液保留在缺陷中而不被清洗出来的能力强。

溶剂去除型渗透剂不用乳化剂,而是利用有机溶剂(如汽油、酒精、丙酮等)来清洗零件表面多余的渗透剂,从而达到清洗的目的。

除以上分类方法外,对荧光渗透剂,还可按其灵敏度等级分为最低灵敏度等级(1/2级)、低灵敏度(1级)、中灵敏度(2级)、高灵敏度(3级)和超高灵敏度(4级)。

表 6-4~表 6-10 是几种渗透剂的典型配方,供参考。

表 6-4 水基型着色渗透剂的典型配方

成分	刚果红	KOH	表面活性剂	水
配比(质量)	2.4g/100ml	0.6g/100ml	2.4g/100ml	100ml
作用	染料(酸性)	中和剂	润湿	溶剂

表 6-5 自乳化水洗型着色渗透剂的典型配方

成分	油基红	200# 溶剂汽油	萘	二甲基萘	α -甲基萘	吐温-60	三乙醇胺油酸皂
配比(质量)	1.2g/100ml	52%	1g/100ml	15%	20%	5%	8%
作用	染料	渗透溶剂	助溶剂	溶剂	溶剂	乳化剂	乳化剂

表 6-6 后乳化型着色渗透剂的典型配方

成分	苏丹红 IV	乙酸乙酯	航空煤油	松节油	变压器油	丁酸丁酯
配比(质量)	0.8g/100ml	5%	60%	5%	20%	10%
作用	染料	渗透溶剂	溶剂、渗透溶剂	溶剂、渗透溶剂	增光剂	助溶剂

表 6-7 溶剂去除型着色渗透剂的典型配方

成分	苏丹红 IV	萘	煤油
配比(质量)	1g/100ml	20%	80%
作用	染料	渗透溶剂	溶剂、渗透溶剂

表 6-8 自乳化型荧光渗透剂的典型配方

成分	YJP-43	10# 变压器油	邻苯二甲酸二丁酯	三乙醇胺油酸皂	MOA-3	6502
配比(质量)	0.2g/100ml	66%	17%	2%	9%	6%
作用	荧光染料	渗透溶剂	溶剂	乳化剂	乳化剂	乳化剂

表 6-9 后乳化型荧光渗透剂的典型配方

成分	YJP-15	灯用煤油或 L-AN7 全损耗系统用油	邻苯二甲酸二丁酯	LPE-305	PEB
配比(质量)	0.45g/100ml	25%	65%	10%	2g/100ml
作用	荧光染料	渗透溶剂	互溶剂	润湿剂	增白剂

表 6-10 溶剂去除型荧光渗透剂的典型配方

成分	YJP-1	航空煤油	煤油
配比(质量)	0.25g/100ml	15%	85%
作用	荧光染料	增光剂	溶剂、渗透溶剂

除以上基本类型外,近来还开发出了着色/荧光两用型渗透剂、化学反应型渗透剂和过滤性微粒渗透剂等新品种。

着色/荧光两用型渗透剂不是把荧光染料和着色染料简单地混合在一起,而是采用了特殊的染料,这种染料在白光下呈鲜艳的暗红色,在黑光下发出明亮的荧光,因而具有双重检测灵敏度。

化学反应型渗透剂是将无色或淡黄色的染料溶解在无色的溶剂中制成的,这种无色或淡黄色的渗透液与配套的无色显像剂接触时会发生化学反应,产生鲜艳的颜色,在黑光照射下发出明亮的荧光,因而也具有双重检测灵敏度,且缺陷显示清晰。

过滤性微粒渗透剂是将粒度大于裂纹开口宽度的着色或荧光染料悬浮在溶剂中,制成的一种悬浮液。渗透时,渗透剂渗入缺陷中,染料微粒不能进入其中,而是聚集在缺陷开口处,从而指示缺陷的存在。使用这种渗透液时不需显像,比较适合于检测粉末冶金件、陶瓷制品、石墨制品等多孔疏松性材料,扩大了传统渗透检测的应用对象。

2. 清洗剂、去除剂

在渗透检测中,检测前对被检试件表面进行的预清洗、去除多余的渗透剂,以及检测完成之后的最终清洗,都要用到清洗剂或去除剂。

渗透检测中,可采用的清洗剂有水基清洗剂、溶剂清洗剂、碱性清洗剂等类型,以及酸洗用的硫酸或盐酸。

(1) 水基清洗剂 以表面活性剂和无机助剂为主要成分,并加入一定缓蚀防锈剂和助溶剂配制而成。

水基清洗剂的洗涤作用是借助表面活性剂润湿、渗透、乳化、分散、增溶等性质实现。其去污机理如下:

① 表面活性剂在油污金属表面上发生润湿、渗透作用,使油污在金属表面的附着力减弱或抵消;②通过机械搅拌、振动、刷洗、超声波、加热等机械和物理方法,加速油污脱离金属表面;③油污进入洗液中被乳化、分散、悬浮于其中或增溶于胶束中。

对水基金属清洗剂的基本要求如下:

① 易溶于水,有适中的泡沫,便于清洗,能快速清除金属表面的污垢;②在清洗过程中,污垢不再沉积;③对金属无腐蚀和损伤,清洗后的金属表面清洁光亮;④对金属有缓蚀防锈作用;⑤对人体无害,对环境无污染;⑥原料易得,价格低廉。

水基清洗剂具有清洗性能好、去污力强、不仅能清除金属表面的油污,也能清洗手汗、无机盐类等污垢,还不易燃、无毒,使用安全,以及良好的防腐能力,节约能源,减少环境污染,适用于机械化自动清洗,广泛应用于各工业领域。渗透检测中,用于预清洗的主要是这类清洗剂。

国内外开发了大量的水基清洗剂产品,我国已开发了 200 多个水基金属清洗剂品种。表 6-11 和表 6-12 是部分水基清洗剂的配方,供参考。

表 6-11 水基金属清洗剂的配方 1

成分	烷基苯黄酸钠	磷酸钠	磷酸氢二钠	硅酸钠	水	制法:将水加热至 60℃左右,加入磷酸钠、磷酸氢二钠、硅酸钠、烷基苯黄酸钠,混合均匀
质量/g	7.5	65	25	55	850	

表 6-12 水基金属清洗剂的美国配方

成分	壬基酚聚氯 乙烯(20)醚	油酸	三乙醇胺	硼酸三乙 醇酰胺	乙二醇 单丁醚	硅酮 消泡剂	水	使用时用水稀释成 5% 的溶液,用以清洗钢板,在 55℃、相对湿度 100%下 经 24h 钢板无腐蚀
质量分数/%	8	8	8	8	8	0.2	59.8	

(2) 溶剂基清洗剂 分石油溶剂清洗剂和氯化烃溶剂清洗剂两种类型。

石油溶剂清洗剂的主要成分是汽油、煤油或柴油等,它们有很强的去污能力,很容易洗净金属表面的污垢。但易燃、易挥发,对人体的中枢神经有较强的刺激性,长期接触会引起神经衰弱、皮肤干裂等疾病,易使金属生锈等,造成环境污染。国外已很少使用。

氯化烃溶剂清洗剂的主要成分是三氯乙烯、三氯三氟乙烷或四氯化碳等。它们的清洗能力很强,很容易洗除金属表面的油性污垢,但毒性大,对人体有害,通常用于密闭清洗。

溶剂基清洗剂主要是借助有机溶剂溶解污垢达到清洗目的。溶剂对油垢去污力好,而对水垢去污力差。

表 6-13~表 6-15 是几个溶剂基清洗剂的配方,供参考。

表 6-13 溶剂基金属清洗剂的配方

成 分	烷基酚聚氧乙烯(7)醚	油酸聚氧乙烯酯	汽油、煤油或柴油
质量分数/%	2.5	2.5	95

表 6-14 O/W 型乳状液金属清洗剂配方

成分	壬基酚聚氧乙烯(6)醚	油酸	三乙醇胺	煤油	柠檬酸	水
质量分数/%	12	5	15	27	1.4	39.6

表 6-15 W/O 型乳状液金属清洗剂配方

成 分	2-[α -羟基四(氧乙烯)]乙基油酸酯 $C_{28}H_{54}O_7$	煤 油	水
质量分数/%	1~6	40	54~59

(3) 碱性清洗剂 其主要成分是氢氧化钠、碳酸钠、硅酸钠或磷酸钠等。它们的清洗能力较低,通常用于清洗黑色金属表面的轻度油污和无机盐等污垢。

表 6-16~表 6-18 是几个碱性清洗剂的配方,供参考。

表 6-16 碱性金属清洗剂配方 1

成 分	硅酸钠	碳酸钠	亚硝酸钠	磷酸钛	聚氧乙烯-聚氧丙烯嵌段型聚醚	聚乙二醇衍生物
质量/份	108	54	7	7	1.7	1.7

表 6-17 碱性金属清洗剂配方 2 (联邦德国配方)

成 分	磷酸钠	重铬酸钾或钠	乙二胺四乙酸钠	十三烷醇聚氧乙烯醚
质量分数/%	81.25	12.5	3.125	3.125

表 6-18 碱性金属清洗剂配方 3 (英国配方)

成 分	硅酸钠	偏硼酸钠	二氧化钛	脂肪醇聚氧乙烯醚	壬基酚聚氧乙烯(8~10)醚	壬基酚聚氧乙烯(1~2)醚	备 注
质量/份	616	300	50	10	15	9	使用时将其配成 2~20g/L 的水溶液,清洗金属去污效果良好

3. 显像剂

(1) 显像剂的主要作用 显像剂也是渗透检测中的关键材料,对检测灵敏度和检测效率都有很大的影响。其主要作用如下:

- ① 通过毛细作用将渗入缺陷中的渗透剂吸附至被检试件表面,形成缺陷显示;
- ② 所形成的缺陷显示在被检试件表面横向扩展至足够大,以便肉眼能观察到;
- ③ 形成与本底高反差的缺陷显示,以提高检测灵敏度。

(2) 性能要求 理想的显像剂应具有以下主要特性:

- ① 能在被检试件表面形成均匀的薄层;
- ② 容易被缺陷处的渗透剂润湿,吸湿速度快;
- ③ 与渗透剂有较好的相容性,与荧光渗透剂配套使用的显像剂本身不发荧光,也不含任何减弱荧光亮度的成分;

- ④ 提供高反差本底,以形成足够高的对比度;
- ⑤ 使用方便,容易施加到被检试件上,检测结束后容易清洗掉;
- ⑥ 无毒、无味、不伤害人体、不腐蚀被检试件、不污染环境;
- ⑦ 原料来源广泛,价格低廉。

(3) 主要类型及特性 目前,用于渗透检测的显像剂主要分为干式显像剂和湿式显像剂两大类型。

① 干式显像剂 主要是指干粉显像剂,是一种白色粉末,如氧化镁、碳酸镁、氧化锌和氧化钛等粉末。干粉显像剂一般与荧光渗透剂配套使用,是最常用的显像剂。

干粉显像剂的主要优点是操作简便,施加容易,不腐蚀试件,不挥发有害气体,清除容易。其缺点是会产生严重的粉尘,需有空气净化装置或设备。

② 湿式显像剂 是将显像干粉调和在载液中制成的,根据载液及干粉在载液中存在形式的不同,可将湿式显像剂进一步分为水悬浮型、水溶型、溶剂悬浮型和溶液型四种。

a. 水悬浮型显像剂 是将显像干粉调和在水中制成的,干粉悬浮于水中。为改善其性能,一般还加入分散剂、润湿剂等添加剂。表 6-19 是水悬浮型显像剂的典型配方,供参考。

表 6-19 水悬浮型显像剂的典型配方

成 分	氧化锌	水	表面活性剂	糊精
配比	6g	100ml	0.01~0.1g	0.5~0.7g
作用	吸附剂	悬浮剂	润湿剂	限制剂

水悬浮型显像剂可用于荧光渗透检测和着色渗透检测,要求被检试件表面比较光滑。

由于是悬浮液,故在使用之前须充分搅拌均匀,以得到薄而均匀的显像膜层。

b. 水溶性显像剂 是将显像材料溶于水中配制而成的,为改善其性能,一般还添加润湿剂、助溶剂、防锈剂等成分。

水溶性显像剂是溶液,克服了水悬浮型显像剂易沉淀、不均匀、可能结块等缺点。水分

蒸发后，溶解在水中的显像材料能在试件表面形成一层与试件表面紧密结合的薄层，有利于缺陷的显示。

此外，水溶性显像剂还具有清洗方便、无毒、使用安全等优点。

水溶性显像剂的主要不足是其白色背景不如悬浮型显像剂。

水溶性显像剂不适合于与水洗型荧光渗透检测和着色渗透检测配套使用，对被检试件表面粗糙度要求很高。

c. 溶剂悬浮型湿显像剂 是将显像干粉调和在具有挥发性的有机溶剂中配制而成的。由于有机溶剂挥发快，故又称为快干式显像剂。

常用的有机溶剂有乙醇、丙酮、二甲苯等。

为改善性能，还经常添加限制剂（如醋酸纤维素、火棉胶、过氧乙烯树脂等）、黏度调整剂等成分。表 6-20～表 6-22 是几种溶剂悬浮湿显像剂的典型配方，供参考。

表 6-20 溶剂悬浮型湿显像剂的典型配方 1

成 分	氧化锌	二甲苯	火棉胶(5%)	丙酮	备 注
配比	5g/100ml	20%	70%	10%	喷涂时加入 40~500ml 的丙酮稀释
作用	吸附剂	悬浮剂	限制剂	稀释剂	

表 6-21 溶剂悬浮型湿显像剂的典型配方 2

成 分	氧化锌	醋酸纤维素	丙酮	备 注
配比	5g/100ml	1g/100ml	100%	醋酸纤维素在丙酮完全溶解后再加氧化锌
作用	吸附剂	悬浮剂	稀释剂	

表 6-22 溶剂悬浮型湿显像剂的典型配方 3

成 分	二氧化钛	丙酮	火棉胶(5%)	乙醇
配比	5g/100ml	40%	45%	15%
作用	吸附剂	悬浮剂	限制剂	稀释剂

溶剂悬浮型湿显像剂具有很好的渗透性能，在挥发过程中把缺陷中的渗透液带回试件表面。

由于有机溶剂挥发快，因此形成的缺陷显示扩散小，显示轮廓清晰，是目前渗透检测中灵敏度最高的显像剂之一。

这种显像剂通常装在喷罐中使用。由于是悬浮液，故使用前须充分摇匀，以便得到薄而均匀的显像膜层。此外，由于含有有机溶剂，因此属于有毒或易燃品，使用中应注意安全防护。

d. 溶液型显像剂 是将显像材料溶解在有机溶剂中配制而成的，是一种无色透明溶液。它克服了溶剂悬浮型显像剂容易沉淀的缺点，但目前还主要限于实验室研制阶段，在工业检测中应用不多。

二、渗透检测设备

除上述渗透剂、清洗剂、显像剂等材料外，渗透检测还要用到试块、黑光灯、照度计等设备。

1. 试块

(1) 试块的主要作用 试块又称灵敏度试块，是用来衡量检测灵敏度的、带有人工缺陷

或自然缺陷的试件。

在渗透检测中,试块的主要作用如下。

① 灵敏度评价 用以评价特定渗透检测材料和检测工艺所能达到的灵敏度,以及渗透液的灵敏度等级。

② 确定检测工艺 用以确定渗透检测的工艺参数,如渗透时间和温度、乳化时间和温度、干燥时间和温度等。

③ 比较渗透检测系统的性能 在给定的检测条件下,通过对采用不同的检测材料和工艺的对比试验,以比较不同渗透检测系统的性能相对高低。

(2) 对试块的性能要求 渗透检测中一般要求试块满足以下要求。

① 具有接近渗透检测极限的微细裂纹。一般要求试块工作面上有一部分 $\leq 1\mu\text{m}$ 、深度很浅($0.5\mu\text{m}$ 以下)的微细裂纹。

② 人工缺陷的大小和分布可任意改变。为形象表示不同等级的渗透检测灵敏度和检测人员的不同操作水平,要求试块上的人工缺陷(最常见的是人工裂纹)有不同的大小,几何形状可为条状、辐射状或网状,裂纹间距应控制在显像状态下易辨认。

③ 可形成容易判定和比较的显像花纹。因检测灵敏度最终是根据试块的显像花纹来评估的,因此,要求试块人工缺陷的显像花纹应特征明确,易于辨认和比较,如条纹间距不能过密、辐射裂纹的每组条纹数量不能太多。

④ 可复制。是指采用一定的工艺手段能制出同一种试块,而不是要求同一种试块的任意两块其特征完全相同。事实上,渗透检测中很难获得完全相同的两块试块,这也是渗透检测的独特之处。

⑤ 价格便宜。由于渗透检测试块的重复使用次数有限,尤其是高灵敏度等级的试块,因而渗透检测试块的更换比较频繁,用量较大,因此对其价格较为敏感。

(3) 常用试块 根据其法力效应或应用的广泛性,渗透检测试块可分为标准试块和专用试块两大类,后者适用于某特定的检测对象,前者有更广泛的适用范围。在此只简要介绍几种常用的标准试块。

① 铝合金淬火裂纹试块 又称 A 型对比试块,是目前国际上最为通用的渗透检测标准试块,其外形、尺寸及特征如图 6-4 所示。试样材质为 LY12 硬铝,工作面上的裂纹由淬火获得,分条状分布和网状分布两类。

在试块的 A、B 表面上,应具有宽度 $\leq 3\mu\text{m}$ 、 $> 3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $> 5\mu\text{m}$ 非规则分布的开口裂纹,且宽度 $\leq 3\mu\text{m}$ 的裂纹不得少于两条。

A 型对比试块的制作过程如下。

从厚约为 10mm 的 LY12 铝合金板上截取一块 $50\text{mm} \times 75\text{mm}$ 的试块毛坯,使 75mm 长度方向与轧制方向一致。将表面磨至粗糙度 $< 6.3\mu\text{m}$ 。把试块放在支架上,用气体灯或喷灯在试块下方正中央加热试块至 $500\sim 540^\circ\text{C}$ 后,立即投入水中急冷,使试块中部产生符合前述要求的裂纹。在裂纹面沿 75mm 长度方向中部开一个 $2\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ 的矩形槽,再用刷子清理表面,并用溶剂清洗即可。

A 型对比试块的优点是制作简单,在同一试块上可提供各种尺寸、且形状类似自然裂

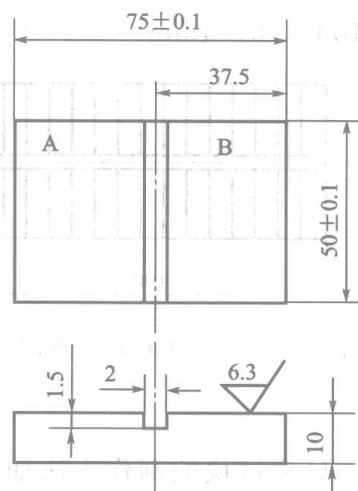


图 6-4 铝合金试块

纹的裂纹。其主要缺点是：裂纹尺寸不能精确控制，且尺寸较大，不适于渗透检测材料的灵敏度鉴别，多次使用后的重现性也较差。

试块使用后应及时清洗。先将试块表面用丙酮清洗干净，用水煮沸 0.5h，清除缺陷内

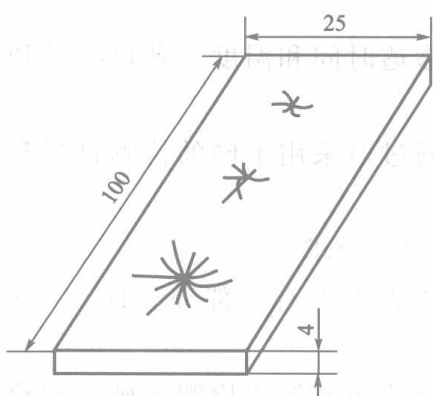


图 6-5 不锈钢镀铬裂纹试块

残留的渗透液，然后在 110°C 下干燥 15min，使裂纹中的水分蒸发干净，再浸泡在 50% 的甲苯和 50% 的三氯乙烯混合溶液中备用，或将表面清洗干净的试块在丙酮中浸泡 24h 以上，干燥后保存在干燥器中备用。

A 型对比试块的用途较广：可进行探伤剂灵敏度对比试验，也可用来检验探伤剂在非理想条件下的性能以及老化试验等。

② 不锈钢镀铬裂纹试块 又称 B 型试块，其外形尺寸如图 6-5 所示。

不锈钢镀铬裂纹试块由单面镀铬的不锈钢（如 1Cr18Ni9Ti 或 Cr17Ni2）制成，推荐尺寸为 $100 \times 25 \times 4\text{mm}$ 。其制作方法如下：先将不锈钢的单面磨光后镀铬，镀铬层厚度约为 $25\mu\text{m}$ ，然后退火，以消除电镀层的应力。再在试块的另一面用直径 10mm 的钢球在布氏硬度机上分别以 750g、1000g 和 1250g 的载荷打三点硬度，这样镀层上就会形成如图 6-5 所示的三处辐射状裂纹。

不锈钢镀铬裂纹试块主要用于校验操作方法与工艺系统的检测灵敏度，不能用于对不同检测材料或工艺的对比。

使用时，先在 B 型试块上按预定工艺进行渗透检测，再把检测结果与标准工艺所得检测结果（或其复制品）进行比对，以评定检测方法的正确性或检测灵敏度。

不锈钢镀铬裂纹试块的制作工艺简单，重复性好，使用方便，其裂纹深度可以由镀层厚度进行控制，而且同一试块上具有不同尺寸的裂纹。

③ 黄铜板镀镍铬裂纹试块 又称 C 型试块，其形状如图 6-6 所示；推荐尺寸为 $100 \times 70 \times 4\text{mm}$ 。

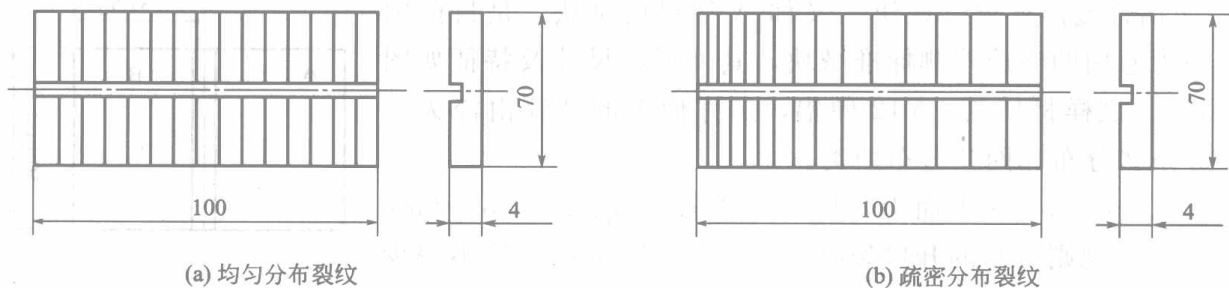


图 6-6 黄铜板镀镍铬裂纹试块

C 型试块的制作方法如下。

在厚 4mm 的黄铜板上截取 $100 \times 70\text{mm}$ 的试块毛坯并磨光，先镀镍，再镀铬，然后在悬臂靠模上反复弯曲，使之形成近似平行分布的疲劳裂纹，再在垂直于裂纹的方向开一切槽，使其分成两半。裂纹分等间距均匀分布和疏密过度的非均匀分布两种，裂纹深度由镀铬层厚度控制，宽度可根据弯曲和校直时试块的变形程度来控制。

采取不同的电镀工艺，在 C 型试块上可得到如下尺寸的裂纹。

宽约 $2\mu\text{m}$ 、深约 $50\mu\text{m}$ 的粗裂纹；宽约 $2\mu\text{m}$ 、深约 $30\mu\text{m}$ 的中等裂纹；宽约 $1\mu\text{m}$ 、深约

10 μm 的细裂纹；宽约 0.5 μm 、深约 2 μm 的微细裂纹。

C 型试块的裂纹尺寸范围与渗透检测的显示极限比较接近，是检测与评定渗透检测系统性能及灵敏度的有效工具，可用于高灵敏度渗透检测材料的性能测试，也可用于不同检测材料或工艺间的性能比较。

C 型试块的裂纹较浅，清洗容易，可多次重复使用。

C 型试块的主要不足在于：镀层表面非常光洁，因此表面多余渗透液非常容易清洗掉，这与实际的检测情况差异较大，因而所得结论与工业实际检测不完全一致。此外，C 型试块的制作比较困难，特别是裂纹尺寸的控制非常困难。

除以上试块外，在渗透检测中还可能采用的试块有不锈钢镀铬五点试块、不锈钢条形裂纹试片等。

2. 黑光灯

黑光灯用于荧光渗透检测，用来照射被检试件。它发出 365nm 左右的黑光束，能使试件上的缺陷显示激发出荧光，以被人眼观察。

3. 照度计

照度计用来检测检测场所的照明是否达到规定的照度，包括自然光和荧光照度。

4. 渗透检测装置

渗透检测装置分便携式和固定式两大类，便携式装置主要由渗透液喷罐、清洗剂喷罐、显像剂喷罐、灯、毛刷、金属刷等组成，用于大型试件的现场检测；固定式装置一般为流水线式，多用于在实验室对大批量生产的中、小型零部件的检测与质量控制。

5. 其他辅助设施

其他辅助设施主要有温度测试设备、试件传送或搬运设施、废水处理设备、标志设施等。其中，理想的废水处理设施应是专门为渗透检测设计建造的，能连续处理渗透检测产生的废水，处理质量应达到国家（或地方）规定的有关废水排放标准，处理能力能满足渗透检测生产的排放量。目前，渗透废水处理方案有多种，应用纳米过滤膜的反渗透技术设备，因其有效、紧凑而被广泛采用。

第四节 渗透检测技术

一、渗透检测方法的分类

渗透检测方法按渗透剂、显像剂和去除剂等材料的类别进行分类。

1. 按渗透剂分类

目前，液体渗透检测主要使用两类渗透剂，即荧光渗透剂（I 类）和着色渗透剂（II 类），对应的检测方法分别称为荧光渗透检测和着色渗透检测。

2. 按显像剂或显像方法分类

用于液体渗透检测的显像剂类型或显像方法有干式显像、湿式显像、快干式显像和无显像剂式显像四种。干式显像法使用干粉显像剂（A 型）、湿式显像法使用水溶性湿显像剂（B 型）或水悬浮型湿显像剂（C 型）、快干式显像法使用非水湿显像剂（包括用于荧光渗透剂的非水湿显像剂（D 型）和用于着色渗透剂的非水湿显像剂（E 型））、无显像剂式显像法不使用显像剂，又称为自显像法等。此外，还有使用特殊显像剂（F 型）的显像法。

3. 按去除剂或清洗方法分类

渗透检测中, 去除多余渗透剂的去除剂或方法有直接用水清洗、溶剂去除型和后乳化型三种。

将以上三种分类方法进行组合即得到各具体的渗透检测方法。

二、渗透检测的基本步骤

不同检测的具体步骤不尽相同, 典型的渗透检测过程一般由预清洗、渗透、清洗、干燥、显像和观察六个基本步骤组成。

1. 预清洗

零件在使用渗透液之前必须进行预清洗, 以去除被检试件表面的油脂、铁屑、铁锈以及各种涂料、氧化皮等, 防止这些污物堵塞缺陷, 以便使渗透液容易渗入缺陷中去。也可防止渗透液被污染、渗透液存留在这些污物上产生虚假显示。

由于被检零件的材质、表面状态以及污染物的种类不同, 去除方法各不相同。常用的预清洗方法如下。

(1) 机械方法 包括吹砂、抛光、钢刷及超声波清洗等。

(2) 化学方法 包括酸洗和碱洗等。

(3) 溶剂清洗法 利用三氯乙烯等化学溶剂来进行蒸气去油或利用酒精、丙酮等进行液体清洗。但预清洗后的零件必须进行充分的干燥。

2. 渗透

渗透是将渗透液覆盖被检试件表面的工艺, 具体方法有喷涂、刷涂、流涂、静电喷涂或浸涂等多种方法。实际工作中, 应根据被检试件的数量、大小、形状以及渗透液的种类来选择具体的渗透方法。

此外还应掌握合适的工艺条件, 渗透剂的使用温度一般为 $15\sim 50^{\circ}\text{C}$, 渗透时间包括浸涂时间和滴落时间, 它的确定应考虑被检试件的表面状态及形态特征、要求发现的缺陷种类、渗透剂的种类以及环境温度等因素, 一般情况下, 渗透时间可取为 $5\sim 20\text{min}$, 温度高时可适当缩短、温度低时则适当延长, 必要时须经试验确定。

对某些试件, 在渗透的同时可给零件加载荷, 使细小的裂缝张开, 有利于渗透剂的渗入, 以便能检测到细微的裂纹。

3. 清洗

在涂覆渗透剂并经适当的时间保持之后, 则应从零件表面去除多余的渗透剂, 即清洗。清洗方法取决于渗透剂的种类。

水洗型渗透剂可直接用水清洗, 水洗方法有搅拌水浸洗、喷枪水冲洗和多喷头集中喷洗几种。应注意控制水洗的温度、时间和水洗的压力大小。

后乳化型渗透剂应先乳化再用水清洗。乳化的时间要适当: 乳化时间太长, 可能过乳化, 此时细小缺陷内部的渗透剂易被乳化而清洗掉; 乳化时间太短, 试件表面的渗透剂乳化不良, 表面清洗不干净。乳化时间应根据乳化剂和渗透剂的性能以及零件的表面粗糙度来决定。

溶剂去除型渗透剂用溶剂予以擦除。

不管采用哪种清洗方法, 均应注意清洗适度, 既不过清洗 (将已渗入缺陷中的渗透剂清洗出来), 也不清洗不足 (试件表面的非缺陷处还残留有渗透剂), 获得最高的检验灵敏度。

4. 干燥

干燥的目的是去除零件表面的水分。溶剂型渗透剂的去除不必进行专门的干燥过程。用水洗的零件,若采用干粉显示或非水湿型显像工艺,在显像前必须进行干燥。若采用含水湿型显像剂,水洗后可直接显像,然后进行干燥处理。

干燥的方法有干净的布擦干、压缩空气吹干、热风吹干、热空气循环烘干等。干燥的温度不能太高,以防止将缺陷中的渗透剂也同时被烘干,致使在显像时渗透剂不能被吸附到零件表面上来,并且应尽量缩短干燥时间。在干燥过程中,如果操作者手上有油污,或零件筐和吊具上有残存的渗透剂等,会对零件表面造成污染,而产生虚假的缺陷显示。这些情况实际操作过程中都应予以避免。

5. 显像

显像就是用显像剂将试件表面缺陷内的渗透剂吸附至试件表面,形成清晰可见的缺陷图像的工艺。

渗透检测的显像法有湿式显像、快干式显像、干式显像和无显像剂式显像四种。

湿式显像法是把白色微细粉末状的显像材料调匀在水中作为湿式显像剂的一种方法,把试件浸渍在显像剂中或者用喷雾器把显像剂喷在试件上,当显像剂干燥时,在试件表面就形成白色显像薄膜,由白色显像薄膜吸出缺陷中的渗透液而形成显示痕迹。这种方法适用于对大批量试件的检测,其中水洗型荧光渗透检测法用得较多。但须注意,缺陷显示痕迹会扩散,故随着时间的推移,其大小和形状都会发生变化。

快干式显像法是把白色微细粉末状的显像材料调匀在高挥发性的有机溶剂中,作为快干式显像剂的一种方法。本方法的操作极为简单,在溶剂去除型荧光或着色渗透检测法中用得较多。与前述湿式显像法相同,快干式显像法的缺点是显示痕迹也会因扩散而发生变化。

干式显像法是直接使用干燥的白色微细粉末状显像材料作为显像剂的一种方法。把试件放在显像剂中或者把试件放在显像装置中再用喷粉的办法来涂敷显像剂,使显像剂附着在试件表面,从缺陷中吸出渗透液而在表面形成固定的显示痕迹。用这种方法,缺陷部位所附着的显像剂粒子全都附在渗透剂上,而没有渗透剂的部分就不附着显像剂。因此,痕迹不会随着时间的推移而发生扩散,从而能显示出鲜明的图像,因此可用于要求获得与缺陷大小相接近的痕迹的检测。这种显像方法在后乳化型荧光渗透检测法和水洗型荧光渗透检测法中用得较多;而着色检测法,因为显示痕迹的识别性能很差,所以不适合用干式显像法。

无显像剂式显像法是在清洗处理之后,不使用显像剂来形成缺陷显示痕迹的一种方法。它在荧光辉度高的水洗型荧光渗透检测法中,或者在把试件加交变应力的同时检测缺陷显示痕迹等方法中使用。这种方法与干式显像法相同,其缺陷显示痕迹也不会扩散。本方法不能用于着色渗透检测法。

零件表面涂敷的显像剂要施加均匀,且一次涂覆完毕,一个部位不允许反复涂覆。

6. 观察

在着色检验时,显像后的零件可在自然光或白光下观察,不需要特别的观察装置。在荧光检验时,则应将显像后的零件放在暗室内,在紫外线的照射下进行观察。对于某些虚假显示,可用干净的布或棉球沾少许酒精擦拭显示部位,擦拭后显示部位仍能显示的为真实缺陷显示,不能再现的为虚假显示。检验时可根据缺陷中渗出渗透剂的多少来粗略估计缺陷的深度。

观察完成后,应及时将零件表面的残留渗透剂和显像剂清洗干净。

三、常见缺陷的显像特征

在渗透检测中,可检出的缺陷种类繁多,常见的有缩裂、热裂、冷裂、锻造裂纹、焊接裂纹、热影响区裂纹、弧坑裂纹、磨削裂纹、淬火裂纹、应力腐蚀裂纹、疲劳裂纹、冷隔、折叠、分层、气孔、夹杂、氧化夹杂、疏松等。

根据缺陷显像特征,真实缺陷大致可分为以下四类。

(1) 连续线状缺陷 包括裂纹、冷隔等缺陷。

(2) 断续线状缺陷 这类缺陷的显像可能是排列在一条直线或曲线上,或是由相近的单个曲线组成,当零件进行磨削、喷丸、吹砂、锻造或机加工时,零件表面的线性缺陷有可能被部分地堵住,渗透检验缺陷的显像表现为断续的线状。

(3) 圆形显像 通常为铸件表面的气孔、针孔、铁豆或疏松等缺陷形成,较深的表面裂纹显像时,由于能吸出较多的渗透剂,也可能显示出圆形的影像。

(4) 小点状显像 是由针孔、显微疏松等产生的影像。

现将以上缺陷的显示特征列于表 6-23 中,供参考。

表 6-23 典型缺陷的显像特征

缺陷显示类型	缺陷名称	显示特征
连续线状缺陷	铸造冷裂纹	多呈较规则的微弯曲的直线状,起始部位较宽,随延伸方向逐渐变细,有时贯穿整个铸件,边界通常较整齐
	铸造热裂纹	多呈连续、半连续的弯曲折线状,起始部位较宽,尾端纤细;有时呈断续条状或树枝状,粗细较均匀或是参差不齐;荧光亮度或色泽取决于裂纹中的渗透液容量
	锻造裂纹	一般呈无规律的线状,抹去显示,缺陷清晰可见
	熔焊裂纹	呈纵、横向线状或树枝状,多出现在焊缝和热影响区
	淬火裂纹	呈线状、树枝状或网状,起始部位较宽,随延伸方向逐渐变细,显示清晰
	磨削裂纹	呈网状或辐射状和相互平行的短曲线,方向与磨削方向垂直
	冷加工裂纹	呈直线状或微弯曲的线状,多发生在变形量大或张力大的部位,一般单个出现
	疲劳裂纹	呈直线或曲线状,随延伸方向逐渐变细,多发生在应力集中区,显示清晰
	线状疏松	呈各种形状的短线状,散乱分布,多成群出现在铸件的孔壁或均匀的板壁上
断续线状缺陷	冷隔	呈较粗大的线状,两端圆秃,时而出现紧密、断续或连续的线状,多出现在铸件的厚薄转角处;擦去显示,缺陷目视可见
	折叠	呈与表面成一定夹角的线状,一般肉眼可见,显示的亮度和色泽随其深浅和夹角大小而异,多发生在锻件的转接部位
圆形显像	非金属夹杂	沿金属纤维方向,呈连续或断续的线状,有时成群分布,显示较清晰,分布无规律,位置不固定
	气孔	显示呈球形或圆形,擦掉显示目视可见
	圆形疏松	多呈长度等于或小于三倍宽度的线条,也呈圆形显示
	缩孔	呈不规则的窝坑,常出现在铸件表面
	大口裂纹	由于截留大量的渗透液,也经常呈圆形显示
小点状显像	大面积缺陷	由于实际缺陷的轮廓不规则,截留的渗透液量大,有时也呈圆形显示
	针孔	呈小点状显示
	收缩空穴	呈显著的羊齿植物状或枝蔓状
弥散状显示	显微疏松	可弥散成一较大区域的微弱显示
	表面疏松	对相关部位重新检验,以排除虚假显示;不可简单仓促地作出评价

四、虚假显像

在试件的表面由于渗透剂污染和清洗不干净而产生的显像称为虚假显像。

产生虚假显像的原因是：操作者手上的渗透剂对被检部件的污染；检验工作台上的渗透剂对被检部件的污染；显像剂受到渗透剂的污染；清洗时，渗透剂飞溅到干净的零件表面上；擦布或棉纱纤维上的渗透剂污染；零件筐、吊具上残存的渗透剂与清洗干净的零件接触而造成的污染；已清洗干净的零件上又有渗透剂渗出，污染了相邻的零件表面。

虚假显像从显像特征分析也很容易辨别：用蘸有酒精的棉球擦拭，虚假的显示容易被擦掉，且不再重新显像。在进行渗透检测时，应尽量避免产生虚假的显像。为此，首先操纵者自己要保持干净（无渗透剂和其他污染物），零件筐、吊具和工作台要始终保持干净，要使用无绒的布擦洗零件。

五、影响渗透检测灵敏度的因素

渗透检测的操作步骤较多，其中每一个环节的工艺因素都可能影响检测灵敏度。此外，缺陷本身的特性也是影响渗透检测灵敏度的主要因素。

1. 渗透剂性能的影响

渗透剂的渗透能力、在缺陷中的保留性能以及着色强度（对着色渗透液）或荧光强度（对荧光渗透液）等性能对渗透检测灵敏度都有影响。

渗透剂的渗透能力越强，保留性能越好，探伤灵敏度就越高。

渗透剂的渗透能力取决于其表面张力系数和黏度大小，保留性能则与其黏度和凝胶现象这两个因素有关。

表面张力越小时，润湿能力就越强，渗透性能越好；渗透液的黏度过高，渗透能力减弱，而且清洗困难，但对渗透液在缺陷中的保留性能有一定好处。黏度很低的液体，虽然易于渗入，但清洗时也易于被洗掉。从综合效果来看，黏度稍高些为好，但要适当延长渗透的时间，以保证探伤灵敏度。

凝胶现象是指在一定的条件下，原来流动性较好的渗透液黏度提高很多而凝结成胶状的现象。凝胶现象的成因，主要是因为非离子型乳化剂与水混合时，其黏度随含水量而变化，即在一定含水量范围内混合物的黏度变得极大，而含水量低于或高于这一范围时黏度均小，尤其是含水量大于这一范围时黏度迅速下降。如工件表面因接触大量的水，乳化剂的含水量远远超过了凝胶区，其黏度变小而被水洗掉。缺陷处因接触水面有限，含水量在凝胶区内，故有凝胶保护现象。

着色强度或荧光强度越强，检测灵敏度越高。荧光渗透液的发光强度越强，缺陷越易被发现，灵敏度越高；着色渗透液的浓度越高，其颜色越深，越便于发现小缺陷。

提高荧光强度可通过提高荧光物质的浓度或提高紫外线光源的功率实现，但应注意：当荧光物质的浓度大于某一值时，由于荧光的自熄灭和内滤现象的作用，使荧光强度不仅不随浓度的增加而增强，反而随浓度的增加而下降。

2. 乳化效果的影响

对于后乳化型渗透检测，乳化效果对检测灵敏度也有较大影响。乳化不足，冲洗不干净，使判伤困难，从而降低灵敏度；乳化过度，可能造成过清洗，从而降低灵敏度。因此，渗透检测中应适度乳化，以获得较高的检测灵敏度。

3. 操作方法的影晌

渗透时间不足，清洗不干净，乳化清洗时间过长，显像涂层不及时、不均匀或太厚等，都会降低探伤灵敏度。

4. 工作环境的影响

温度和压力对渗透检测的灵敏度也有影响。

温度升高，液体的表面张力和黏度减小，渗透性能得到改善，但温度过高，会使渗透剂的性能恶化。也可以把被检工件加热到渗透液允许的温度（即不致使渗透液变质）而后放在渗透液中，由于温度的下降，缺陷内气体收缩，产生负压，使渗透液容易渗入缺陷，也可提高灵敏度。

外界压力 p_0 越小，渗透的深度就越大。如果施加渗透液后，迅速减小外界压力 p_0 ，缺陷中气体的反压强就会大于渗透液的附加压强，气体易于排出，有利于渗透继续进行。所谓液体真空渗透法，就是利用这个原理。如果着色渗透检测按一般操作法只能发现 0.01mm 宽的缺陷，采用真空法灵敏度则可发现 0.005mm 宽的缺陷。

5. 缺陷性质的影响

缺陷的性质不同，被显示的难易程度也不一样。

窄裂纹比宽裂纹更易被检出，因为宽裂纹保留渗透液的能力差；检测灵敏度与缺陷的宽深比（裂纹的宽度和深度的比值）也密切相关：宽深比越小，渗透液在缺陷内的保留能力越强，缺陷越易被发现；贯穿型缺陷的检测灵敏度高于一端封闭的缺陷，因为对贯穿型缺陷，气体易排出，阻力小，渗透液易于渗入。

第五节 渗透检测的应用及新近进展

一、渗透检测的应用

渗透检测可广泛应用于有色金属和黑色金属材料的铸件、锻件、焊接件、粉末冶金件以及陶瓷、塑料和玻璃制品等表面缺陷的检测。渗透检测的适用范围如表 6-24 所示。

表 6-24 渗透检测的适用范围

检测方法 检测对象	水洗型荧光 渗透检测	后乳化型荧光 渗透检测	溶剂去除型荧光 渗透检测	水洗型着色 渗透检测	后乳化型着色 渗透检测	溶剂去除型 着色渗透检测
微细的裂纹、宽而浅的裂纹		√		√		
疲劳、磨削和宽度很窄的裂纹		√	√			
小批量生产的工件的锐角边缘	√					
表面粗糙的试件	√			√		
大型工件和结构物的局部检测			√			√
检测地点遮光有困难的地方				√	√	√
没有自来水和电源的地方						√

二、渗透检测的新近发展

渗透检测的最新研究动向：灵敏度高，环境友好，价格低廉的新型渗透剂、清洗剂 and

显像剂的研制；多功能灵敏度试块（片）的研制；检测过程自动化；检测结果评定的智能化等。

复习思考题

1. 简要论述渗透检测的基本原理、主要特点及典型应用。
2. 渗透剂分为哪几类？对其有何性能要求？
3. 简述渗透检测的六个主要步骤及其主要工作内容。
4. 简述虚假显像产生的原因及避免措施。
5. 简述干粉显像的特点及应用。

参考文献

- [1] [美] Charles J. Hellier 著，戴光，徐延廷，李伟等译. 无损检测与评价手册. 北京：中国石化出版社，2006.
- [2] 云庆华主编. 锅炉、压力容器无损探伤技术. 天津：天津科学技术出版社，1985.
- [3] Halmshaw R. Non-destructive Testing. London: Edward Arnold, 1987.
- [4] 上海沪东造船厂中心试验室编. 磁粉和渗透探伤技术. 北京：国防工业出版社，1982.
- [5] 刘贵民. 无损检测技术. 北京：国防工业出版社，2006.
- [6] 《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会. 无损检测综合知识. 北京：机械工业出版社，2005.
- [7] 陈庆林. 渗透探伤的历史现状和展望. 无损检测，1997，19（1）：21~23.
- [8] 刘福顺，汤明. 无损检测基础. 北京：北京航空航天大学出版社，2002.
- [9] 罗希权，罗毅，王澄华等. 表面活性剂产品手册. 北京：中国轻工业出版社，1997.
- [10] 刘程，江小梅，李宝珍等. 表面活性剂应用大全. 北京：北京工业大学出版社，1992.
- [11] 赵国玺. 表面活性剂物理化学. 北京：北京大学出版社，1984.
- [12] GJB 2367A—2005 渗透检验 国防科学技术工业委员会 2005-04-11 发布，2005-07-01 实施.
- [13] ASTM E1417—1991 液体渗透检验操作方法.
- [14] JIS Z2343—1992 渗透检验方法和缺陷显示的分类.
- [15] 李家伟，陈积懋主编. 无损检测手册. 北京：机械工业出版社，2002.

第七章

涡流检测

第一节 涡流检测概述

一、涡流检测的发展简史

所谓涡流检测 (ECT: Eddy Current Testing), 就是利用电磁感应原理, 通过测定被检导电工件在交变磁场激励作用下所感生的涡流特征, 来无损地检测该试件中有无缺陷或评定其技术状态的无损检测方法。

涡流检测是最古老的无损检测方法之一, 其发展历史可以追溯至 19 世纪。1820 年, 丹麦物理学家奥斯特 (Hans Christian Oersted: 1777. 8. 14~1851. 3. 9) 发现了电流磁效应, 即电流流过导体时会在其周围产生磁场的电磁学现象。1831 年, 英国物理学家法拉第 (Michael Faraday: 1791. 9. 22~1867. 8. 25) 发现了电磁感应现象, 并在实验的基础上提出了电磁感应定律, 即磁场和导体的相对运动会在导体中产生电流。几乎与此同时, 亨利 (Joseph Henry: 1797. 12. 17~1878. 5. 13) 在美国也发现了电磁感应现象。1834 年, 俄国物理学家楞次 (Lenz Heinrich Friedrich Emic: 1804. 2. 24~1865. 2. 10) 提出了确定试件的特性如何反馈到试验系统的楞次定律, 该定律指出, 试件中的感应电流方向应使其产生的磁场与在试件中产生该感应电流的磁场方向相反, 即感应电流的磁场总是抵抗原磁场的变化。1864 年, 英国物理学家麦克斯韦 (James Clerk Maxwell: 1831. 11. 13~1879. 11. 5) 发现了涡流, 并于 1873 年建立了以严谨的数学形式描述电磁感应现象的“麦克斯韦方程组”, 从而奠定了电磁场理论的基础。以上这些巨人们的研究成果, 为涡流检测的发展奠定了坚实的理论基础。

1879 年, 英国人休斯 (D. E. Hughes) 首次将涡流原理应用于冶金分选试验, 揭开了涡流无损检测技术的序幕。1926 年, 世界上首台涡流测厚仪问世, 为涡流检测设备的研制提供了范例。然而, 在很长一段时期内, 涡流检测的研究和应用进展都非常缓慢。

20 世纪 50 年代初, 德国学者福斯特博士 (Friedrich Foerster) 发表了大量有关涡流检测的论文, 并建立了 Foerster 学院, 专门从事涡流检测的理论研究和涡流检测设备的研制开发, 为涡流检测的发展作出了巨大的贡献。他提出的阻抗平面图分析法和相似定律, 发展了涡流检测的理论体系, 对涡流的推广应用起了极大的推动作用。

在我国, 涡流检测技术的研究与应用起始于 20 世纪 60 年代初, 当时, 航空、冶金和有色金属等部门开始采用涡流法来检测成型金属管材、棒材的表面缺陷。20 世纪 90 年代以来, 国内涡流设备专业生产厂家已发展到十多家。全国涡流检测 II 级以上专业证书持有者已达 3000 余人。

二、涡流检测的特点

与其他无损检测方法比较, 涡流检测的主要优点如下。

- ① 对导电材料表面和近表面缺陷的检测灵敏度较高。
- ② 应用范围广, 对影响感生涡流特性的各种物理和工艺因素均能实施检测。
- ③ 在一定条件下, 能反映有关裂纹深度的信息。
- ④ 不需用耦合剂, 易于实现管、棒、线材高速、高效的自动化检测。
- ⑤ 可在高温、薄壁管、细线、零件内孔表面等其他检测方法不适用的场合实施检测。

涡流检测的局限性在于:

①只能检测导电材料; ②影响因素众多; ③信号解释困难, 检测结果不够直观; ④只能检测表面或近表面缺陷; ⑤对形状复杂的试件检测有困难; ⑥一般只能给出缺陷的有无, 缺陷定性、定位、定量都比较困难。

三、涡流检测的应用

目前, 涡流检测的应用领域已扩展到航空、航天、核工业、机械、冶金、石油、化工、电力、有色金属、汽车等行业。检测对象主要是非铁磁性的导电材料制品(管材、线材和棒材), 既可用于大型设备(如航空发动机和机翼、锅炉和压力容器、管道等)使用与维修过程的在役、在线检测, 也可用于金属管材、棒材和线材的生产过程的质量检测与监控等。

除探伤外, 涡流技术还可用于导电材料表面的非导电涂层厚度和导电薄板的厚度测量, 以及材料的分选等。

有理由相信, 随着理论研究的深入, 以及各类新型检测设备的不断推出, 涡流检测的应用领域还将不断拓展。

第二节 涡流检测的基本原理

一、涡流及其趋肤效应

1. 涡流的产生

由电磁感应定律可知, 当导电体靠近变化着的磁场或导体作切割磁力线运动时, 导电体内必然会感生出感应电流。因该感应电流在导电体中呈旋涡状流动, 故得名涡流。

如图 7-1 所示, 当将一通以交变电流的检测线圈靠近导电体时, 在离导体表面的一定深度范围内将感生出涡流。此涡流将产生一感应磁场, 并反作用于原激励磁场, 使检测线圈(激励线圈)的磁场特性发生变化, 其结果是导致检测线圈的复阻抗等参数发生改变。由于导电体内感生涡流的幅值、相位、流动形式及其伴生磁场受导电体的特性(几何形状和尺寸、电磁特性、有无缺陷等)、检测线圈的特性(形状、尺寸、激励波形及频率等)以及导体与检测线圈之间的距离(提离)等诸多因素的影响。因此, 当采用控制手段只让其中某一因素改变而使其他因素保持不变时, 通过监测检测线圈复阻抗的变化, 即可非破坏地评价以上各影响因素的状况, 此即涡流检测的基本原理。

2. 涡流的趋肤效应

当交变电流通过导体时, 分布在导体横截面上的电流密度是不均匀的, 即表层电流密度最大, 越靠近截面的中心电流密度则越小, 这一现象即所谓交变电流分布的趋肤效应(又称集肤效应)。

趋肤效应的存在, 使交变电流激励磁场的强度以及感生涡流的密度从被检材料或工件的

表面到其内部按指数分布规律递减。在涡流检测中，将涡流密度衰减为其表面密度的 1/e (36.8%) 时所对应的深度定义为渗透深度，其数学表达式为：

$$h = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_r \mu_0 \gamma}} \approx \frac{503}{\sqrt{f \mu_r \gamma}} \tag{7-1}$$

式中 h ——渗透深度，m；

μ_0 ——真空中的磁导率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/m}^2 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ；

f ——电流频率，Hz；

μ_r ——相对磁导率；

γ ——电导率，S/m。

渗透深度是反应涡流密度分布与被检材料的电导率、磁导率以及激励频率之间基本关系的特征值。由式(7-1)可知， f 、 μ_r 和 γ 越大，则 h 越小。因此，对于给定的被检材料，应根据检测深度的要求合理选择涡流检测频率。几种典型材料的涡流渗透深度 h 随激励频率 f 的变化关系如图 7-2 所示，表 7-1 所列是几种常见材料在不同频率下的渗透深度。

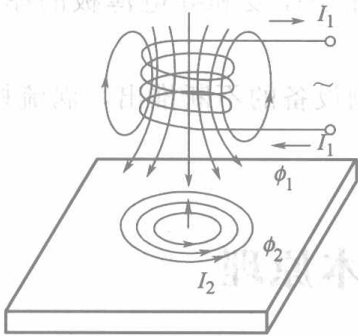


图 7-1 电涡流的产生原理示意

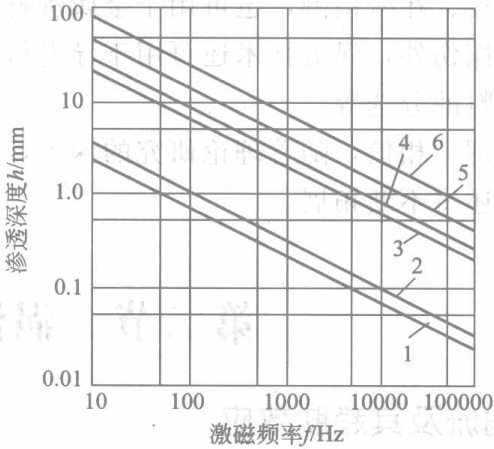


图 7-2 涡流渗透深度与激励频率的关系

1—铁 ($\mu_r = 2000$, $\gamma = 2 \times 10^6 \text{ S/m}$)；

2—铁 ($\mu_r = 200$, $\gamma = 10 \times 10^6 \text{ S/m}$)；

3—铜 ($\gamma = 56 \times 10^6 \text{ S/m}$)；4—铝 ($\gamma = 35 \times 10^6 \text{ S/m}$)；

5—黄铜 ($\gamma = 12 \times 10^6 \text{ S/m}$)；6—铁 ($\mu_r = 2$, $\gamma = 2 \times 10^6 \text{ S/m}$)

表 7-1 几种常见材料的电磁特性及标准渗透深度

材料种类及名称		相对磁导率 μ_r	电导率 $\gamma / \times 10^6 \text{ S/m}$	不同频率激励下的渗透深度 h/mm		
				1kHz	10kHz	50kHz
抗磁性金属 ($\mu_r \approx 1$)	铜	≈ 1	56.46	2.11	0.67	0.30
	金	≈ 1	41.0	2.48	0.79	0.35
	银	≈ 1	63.0	2.00	0.63	0.28
	锌	≈ 1	17.2	3.84	1.21	0.54
	铅	≈ 1	4.5	7.50	2.37	1.06
	铋	≈ 1	0.83	17.46	5.52	2.47
	锑	≈ 1	2.40	10.27	3.25	1.45
	黄铜	≈ 1	14.3	4.21	1.33	0.59

续表

材料种类及名称		相对磁导率 μ_r	电导率 $\gamma/\times 10^6 \text{ S/m}$	不同频率激励下的渗透深度 h/mm		
				1kHz	10kHz	50kHz
顺磁性金属 ($\mu_r \approx > 1$)	铝	≈ 1	35.4	2.67	0.85	0.04
	镁	≈ 1	22.0	3.39	1.07	0.48
	铂	≈ 1	10.0	5.03	1.59	0.71
	钛	≈ 1	1.76	12.00	3.80	1.67
	锆	≈ 1	12.00	3.50	1.90	
铁磁性金属	钴	250 ^①	10.2	0.31	0.10	0.04
	镍	600 ^①	12.8	0.18	0.06	0.03
	GCr15 钢(供应状态)	580 ^①	8.4	0.23	0.07	0.03
	铸钢			0.50	0.15	0.07
石墨		≈ 1		45.00	13.00	6.20
70 : 30 的铜镍合金				10.00	3.15	1.41

①铁磁质的相对磁导率数据是指其最大值。

由于被检工件表面以下 $3h$ 处的涡流密度仅约为其表面密度的 5%，因此通常将 $3h$ 作为实际涡流探伤所能达到的极限深度。

二、检测线圈的阻抗分析

涡流检测以检测线圈的阻抗分析为基础，通过监测检测线圈视在阻抗的变化，进而推断被检工件的技术状态，是涡流检测的基本思路。

1. 检测线圈的视在阻抗

在涡流检测过程中，检测线圈与被检对象之间的电磁联系可以用两个线圈的耦合（被检对象相当于次级线圈）来类比（图 7-3）。

设通以交变电流的初级线圈（检测线圈）的自身阻抗为 Z_0 。当初级线圈与次级线圈（被检对象）相互耦合时，闭合的次级线圈内会因互感作用而感生出电流。此感生电流将反作用于初级线圈，并因此影响到初级线圈中电压与电流的关系。这种影响可以用将次级线圈的阻抗折合到初级线圈上的等效阻抗 Z_e 来描述， Z_0 与 Z_e 之和 Z 称为初级线圈的视在阻抗。

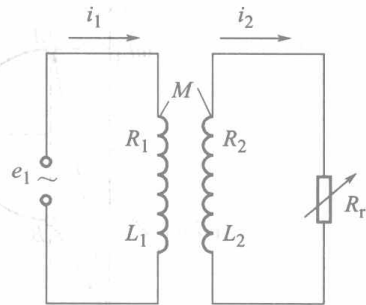


图 7-3 耦合线圈的互感电路

用交流电路的分析方法，可以求得耦合线圈互感电路（图 7-3）中初级线圈的视在阻抗 Z 为：

$$Z = R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{(R_2 + R_r)^2 + \omega^2 L_2^2} (R_2 + R_r) + j \left(\omega L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{(R_2 + R_r)^2 + \omega^2 L_2^2} \omega L_2 \right) = R + jX \quad (7-2)$$

式中 ω ——交变电流的角频率；

M ——耦合系数。

$\{\omega^2 M^2 / [(R_2 + R_r)^2 + \omega^2 L_2^2]\} (R_2 + R_r - j\omega L_2)$ 即为次级线圈通过互感 M 折合到初级线圈上的等效阻抗 Z_e 。

2. 阻抗平面图及其归一化

由式(7-2)可知，检测线圈的视在阻抗受初级和次级线圈的电阻和电抗、激励频率、

耦合状况等诸多因素的影响,其变化规律非常复杂。为直观起见,常将初级线圈的视在阻抗的变化情况描绘在以电阻 R 为横坐标、以感抗 X 为纵坐标的直角坐标上,此即阻抗平面图。

在图 7-3 中,若次级线圈开路(在涡流检测中,这相当于检测线圈还未靠近被检测对象),即 $(R_2 + R_r) \rightarrow \infty$,则由式(7-2)可得初级线圈(检测线圈)的空载阻抗为:

$$Z = Z_0 = R_1 + j\omega L_1 \quad (7-3)$$

若次级线圈的 $(R_2 + R_r) \rightarrow 0$,则由式(7-2)可得

$$Z = R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{\omega M^2}{L_2}\right) \quad (7-4)$$

令 $K^2 = M^2 / (L_1 L_2)$,则有

$$Z = R_1 + j\omega L_1(1 - K^2) \quad (7-5)$$

在 $(R_2 + R_r)$ 由 ∞ 变化为 0 (或 ωL_2 从 0 增至 ∞) 的过程中,视在阻抗 Z 在阻抗平面图上的变化轨迹近似为一个半圆,如图 7-4 所示。视在电抗 X 从 ωL_1 单调递减为 $\omega L_1(1 - K^2)$,而视在电阻 R 则由 R_1 开始增大,经过其极大值 $R_1 + K^2 \omega L_1 / 2$ 以后,再减小为 R_1 。

虽然阻抗平面图直观地反映了被检对象阻抗的变化对初级线圈视在阻抗的影响,但由于 Z 在图 7-4 上的轨迹也随初级线圈自身的 R_1 、 L_1 、互感耦合系数 K 和激励电流频率 f 的改变而改变。为了消除初级线圈自身阻抗的变化对其视在阻抗 Z 的影响,以简化对检测线圈的阻抗分析,需要对图 7-4 所示的阻抗平面图进行归一化处理。归一化处理方法为:先将图 7-4 的坐标向右平移 R_1 距离,再用 ωL_1 去除其 X 和 R 坐标,从而得到如图 7-5 所示的归一化阻抗平面图。

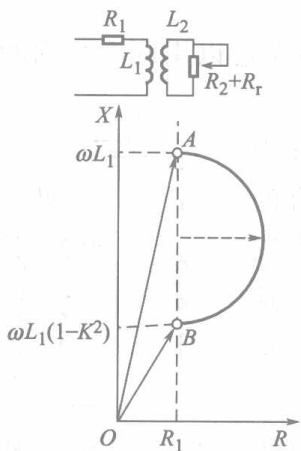


图 7-4 初级线圈的阻抗平面图

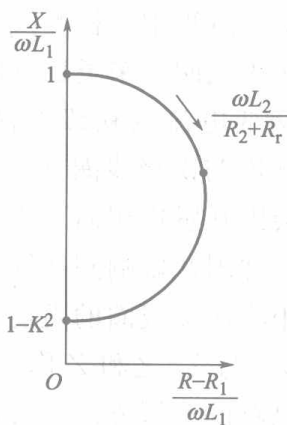


图 7-5 归一化阻抗平面图

归一化阻抗平面图消除了初级线圈自身阻抗变化的影响,在涡流检测中具有通用性。

三、有效磁导率

进行涡流检测时,检测线圈视在阻抗的改变源于磁场的变化,但要从剖析线圈磁场变化的角度着手分析涡流检测中的具体问题则过于复杂。为了简化涡流检测中的阻抗分析,在长期进行涡流检测的理论研究和实践的基础上,德国学者福斯特提出了有效磁导率的概念。尽管学术界对有效磁导率的物理意义及其表现形式有不同的看法,但由于有效磁导率的实际应

用使涡流检测的阻抗分析大为简化, 因此获得广泛应用。

有效磁导率的物理实质是用假定不变的磁场和变化的磁导率来替代了事实上变化的磁场和不变的磁导率, 且使工件中任意横截面上的磁通量在等效前后相等。

对于通以交变电流的无限长螺线管线圈内置一外径充满该线圈的导电圆柱体的情形, 福斯特假定该圆柱体横截面上的磁感应强度不变, 磁导率沿截面径向变化 (图 7-6), 磁通量则等于圆柱体内实际通过的磁通量, 从而用假定不变的磁场和变化的磁导率替代了事实上变化的磁场和不变的磁导率, 并把这一变化的磁导率定义为有效磁导率, 记为 μ_{eff} 。



图 7-6 福斯特的有效磁导率模型

当圆柱体为非铁磁性导电材料时, 可推导得出其有效磁导率 μ_{eff} 为

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{2}{\sqrt{-jkr}} \frac{J_1(\sqrt{-jkr})}{J_0(\sqrt{-jkr})} \quad (7-6)$$

式中 $k = \sqrt{2\pi f \mu \gamma}$

r ——圆柱体半径, m;

γ ——电导率, $\text{m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$;

f ——交流频率, Hz;

$J_0(\sqrt{-jkr})$ ——零阶贝塞尔 (Bessel) 函数;

$J_1(\sqrt{-jkr})$ ——一阶贝塞尔函数。

四、特征频率

引入有效磁导率概念之后, 福斯特将式 (7-6) 中使贝塞尔函数的变量 ($\sqrt{-jkr}$) 的模为 1 的频率定义为涡流检测的特征频率, 用 f_g 表示。

由 $|kr| = 1$ (即 $|\sqrt{2\pi f_g \mu \gamma} r| = 1$) 可得

$$f_g = \frac{1}{2\pi \mu \gamma r^2} = \frac{1}{2\pi \mu_0 \mu_r \gamma r^2} \approx \frac{5066}{\mu_r \gamma d^2} \quad (7-7)$$

式中 d ——圆柱体直径, cm;

γ ——电导率, $\text{m}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$;

μ_0 ——真空中的磁导率, 其值为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$;

μ_r ——相对磁导率。

对于非磁性材料, $\mu_r \approx 1$, 有

$$f_g = \frac{5066}{\gamma d^2} \quad (7-8)$$

特征频率是被检工件的固有特性, 取决于工件的电磁特性和几何尺寸。式 (7-7) 是螺线管线圈中的棒 (线) 材的特征频率计算公式, 管材的特征频率列于表 7-2。

表 7-2 管材的特征频率

序号	线圈形式	圆管壁厚	特征频率计算公式	各参数的含义
1	外穿过式	厚壁	$f_g = \frac{5066}{\mu_r \gamma d_i^2}$	d_i ——厚壁圆管的内径, cm
2	外穿过式	薄壁	$f_g = \frac{5066}{\mu_r \gamma d_i \delta}$	d_i ——薄壁圆管的内径, cm δ ——薄壁圆管的壁厚, cm
3	内插式	薄壁、厚壁	$f_g = \frac{5066}{\mu_r \gamma d_i^2}$	d_i ——薄壁圆管的内径, cm

五、涡流检测的相似律

由式(7-6) 和式(7-7) 可知, μ_{eff} 随 kr 的取值而变, 而 $kr = \sqrt{f/f_g}$, 因此 μ_{eff} 的取值完全取决于频率比 f/f_g 。表 7-3 和图 7-7 是用式(7-6) 计算出的圆柱体工件有效磁导率的实部 (Re) 和虚部 (Im) 随频率比 f/f_g 的变化关系。

表 7-3 μ_{eff} 随 f/f_g 的变化关系

f/f_g	$\mu_{\text{eff}}(\text{Re})$	$\mu_{\text{eff}}(\text{Im})$	f/f_g	$\mu_{\text{eff}}(\text{Re})$	$\mu_{\text{eff}}(\text{Im})$	f/f_g	$\mu_{\text{eff}}(\text{Re})$	$\mu_{\text{eff}}(\text{Im})$
0.00	1.0000	0.0000	6	0.6360	0.3770	50	0.2007	0.1795
0.25	0.9989	0.0311	7	0.5807	0.3757	100	0.1416	0.1313
0.50	0.9948	0.0620	8	0.5361	0.3692	150	0.1156	0.1087
1	0.9798	0.1216	9	0.4990	0.3599	200	0.1001	0.09497
2	0.9264	0.2234	10	0.4678	0.3494	400	0.07073	0.06822
3	0.8525	0.2983	12	0.4202	0.3284	1000	0.04472	0.04372
4	0.7738	0.3449	15	0.3701	0.3004	10000	0.01414	0.01404
5	0.6992	0.3689	20	0.3180	0.2657			

由于 μ_{eff} 反映的是圆柱体内涡流和磁感应强度的分布, 因此可以推论: 对于两个不同的工件, 只要它们的频率比 f/f_g 相同, 则这两个工件内的有效磁导率 μ_{eff} 、涡流密度和磁感应强度的分布相同, 此即所谓涡流检测的相似律。

相似条件为

$$f_1 \mu_1 \gamma_1 d_1^2 = f_2 \mu_2 \gamma_2 d_2^2 \tag{7-9}$$

涡流检测相似律是模型试验的理论基础, 可以通过模型试验来推断实际检测结果, 例如用模型试验测得的 μ_{eff} 的变化与人工缺陷的深度、宽度及所处位置的依从关系可以用作实际涡流检测时评定缺陷的参考。

六、填充系数

在上述关于有效磁导率的讨论中, 实际上作了直径为 d 的导电圆柱体完全充满内径为 D_a 的检测线圈的假定。但事实上, 检测线圈和被检工件之间总要留有空隙以保证工件能快速通过。在线圈充填系数

$$\eta = \left(\frac{d}{D_a}\right)^2 \tag{7-10}$$

小于 1 的情况下, 用电磁学理论可以推导出检测线圈归一化的视在阻抗为

$$\begin{cases} \frac{\omega L}{\omega L_1} = 1 - \eta + \eta \mu_r \mu_{\text{eff}}(\text{Re}) \\ \frac{R - R_1}{\omega L_1} = \eta \mu_r \mu_{\text{eff}}(\text{Im}) \end{cases} \quad (7-11)$$

式中 μ_r ——相对磁导率。

由此可知, 只要 η 和 f/f_g 确定, 即可由式(7-3) 和式(7-11) 求得内含导电圆柱体的圆筒形线圈的归一化阻抗 (图 7-8)。

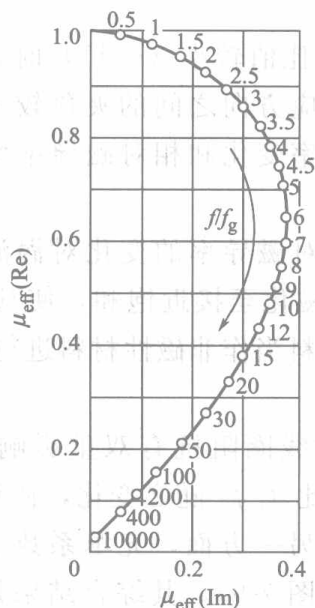


图 7-7 μ_{eff} 随 f/f_g 的变化

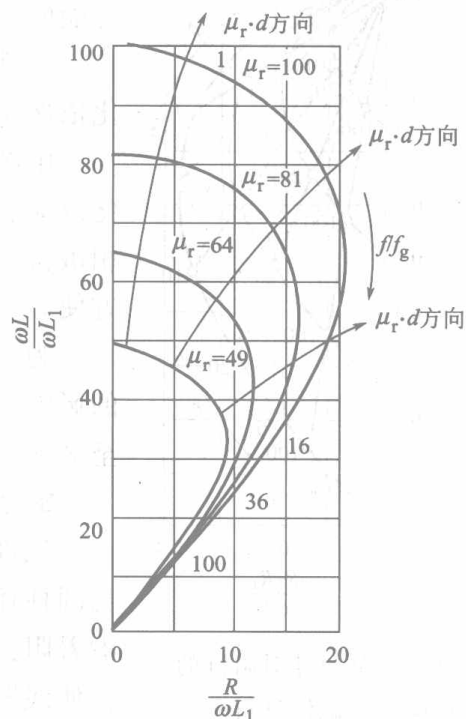


图 7-8 内置铁磁性圆柱体的穿过式线圈的复阻抗平面

七、影响线圈阻抗的因素

影响线圈阻抗的因素众多, 且影响规律比较复杂。这里仅以穿过式线圈检测圆柱导体为例, 简要讨论影响线圈阻抗的各种因素及其影响规律, 其他类型的线圈或试件的涡流检测的阻抗分析请参阅有关专著 [3]。

对穿过式线圈而言, 影响线圈阻抗的主要因素有电导率、相对磁导率、几何尺寸、检测频率等, 以下分别讨论。

1. 电导率 γ 的影响

在其他条件不变的情况下, 由式(7-7)、式(7-11) 和图 7-7 可知, 材料电导率的改变将使检测线圈的阻抗值沿阻抗曲线的切向变化, 即电导率只影响阻抗值在曲线上的位置。当对不同导电材料构成的试件进行涡流检测时, 由于电导率的差异会引起检测线圈的阻抗发生变化, 因此, 可以利用涡流检测进行材质分选。另一方面, 因为材料某些性能 (如成分、热处理状态、显微结构、晶粒度、硬度、强度和残余应力等) 的改变会对电导率产生影响, 所以也可用测定电导率的方法来推断材料某些工艺性能和冶金特性的变化。

2. 相对磁导率 μ_r 的影响

铁磁性材料的相对磁导率 $\mu_r \gg 1$, 其实际数值强烈地依赖于外加磁场的大小。

当填充系数 $\eta=1$ 时, 内置铁磁性材料圆柱体的穿过式线圈的复阻抗平面如图 7-8 所示。可见, 与非铁磁性材料不同, 铁磁性材料的每条曲线的 μ_{eff} (Re) 和 μ_{eff} (Im) 都比非铁磁性材料的情形增大了 μ_r 倍。

由式(7-7)、式(7-11)和图 7-9 可知, μ_r 的改变不但影响 μ_{eff} 的数值, 而且会使阻抗曲线移位。就线圈阻抗的变化方向而言, μ_r 的影响与直径效应相同。这表明, 若不采取特殊措施, 要想用相位来区分 μ_r 和 d 对检测线圈阻抗的效应是不可能的。

在铁磁性材料中, 电导率 γ 的变化所引起的线圈阻抗变化依然是曲线的切线方向。

由图 7-8 可知, 当 f/f_g 比值较小 (<15) 时, 电导率变化效应和相对磁导率变化效应方向之间的夹角较大, 为采用相敏检波技术进行鉴别电导率变化和相对磁导率变化提供了方便。

为了消除铁磁性材料相对磁导率的变化对涡流检测结果的影响, 可以将被检工件先磁化至接近饱和, 使其 μ_r 值降低至 2~3, 此时可把铁磁性材料当作非磁性材料进行检测。

3. 试件几何尺寸的影响

试件几何尺寸的变化对线圈阻抗有双重影响: 一方面, 当圆柱体直径改变时, 频率比 f/f_g 随之变化, 使得线圈阻抗沿着阻抗曲线的切向变动; 另一方面, 充填系数 η 的改变又会使线圈的阻抗曲线移位 (图 7-9), 其综合结果是线圈阻抗将沿图 7-9 上示出的弦向 (d 向虚线) 变化。可见, 试件尺寸

效应与电导率效应的方向不同, 当 f/f_g 比值较大 (>4) 时, 试件尺寸效应与电导率效应的方向之间的夹角较大, 利用相敏检波技术可以较方便地分离试件尺寸效应与电导率效应。

试件尺寸变化对铁磁性和非铁磁性材料的影响是不同的, 试件直径增大一般会使非铁磁性圆柱体的有效磁导率降低, 而使铁磁性圆柱体的有效磁导率增大。且对铁磁性试件而言, 很难区分直径效应和相对磁导率变化效应。

4. 缺陷的影响

缺陷的出现具有不确定性, 缺陷对线圈阻抗的影响可以看作是电导率和几何尺寸两者综合作用的结果, 其影响规律非常复杂。

由于难以从理论上推断缺陷的位置、埋藏深度、种类和形状的变化对线圈阻抗的影响, 所以通常是借助模型试验, 取得各种材料的不同形状、尺寸和位置的缺陷在不同频率下的试验结果, 并制成图表, 为实际缺陷的涡流检测评定提供参考。

当频率比 $f/f_g=15$, 非磁性导电圆柱体内存在不同深、宽比和不同径向位置的裂纹时, 检测线圈阻抗的变化如图 7-10 所示。

在图 7-10 中, A 点代表导电圆柱体上无裂纹时的线圈阻抗。标有 Δd 的线段表明直径变化对线圈阻抗的影响, 线段上的数字代表圆柱体直径减小的百分数。标有 $\Delta \gamma$ 的线段表明材料电导率的变化对线圈阻抗的影响, 线段上的数字代表电导率增大的百分率。图中标有数字

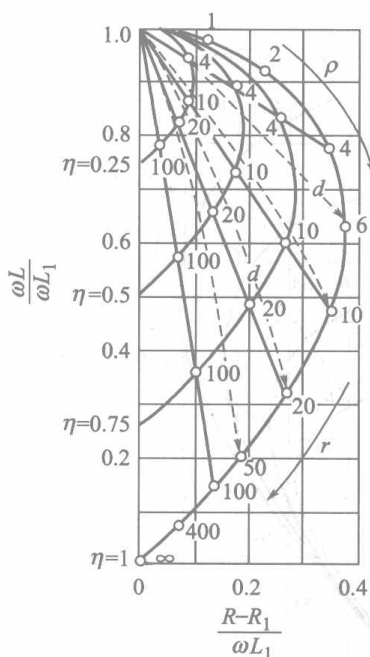


图 7-9 试件尺寸对阻抗的影响 (非磁性材料)

10, 15, ..., 30 的实线表示宽、深比为 1/100 的窄裂纹, 深度分别为圆柱体直径的 10%, 15%, ..., 30% 时, 线圈阻抗的变化规律; 虚线代表裂纹宽、深比为 1/30 的情形。图中最右边曲线旁的数字 10, 6.7, ..., 1 表示埋藏裂纹的上端距圆柱体表面的距离分别为圆柱体直径的 10%, 6.7%, ..., 1%。图中部的 4:1, 2:1 等比例表示裂纹的宽、深比。

由图 7-10 可见, 随着裂纹宽、深比的增大, 线圈阻抗越来越向“直径效应”的方向变化。由此可知, 阻抗图上的“裂纹效应”与“直径效应”曲线之间所夹的角度越大, 裂纹的宽、深比就越小, 裂纹的危害性越大。

5. 检测频率

由式(7-6)可知, 由于有效磁导率 μ_{eff} 以 f/f_g 为参变量, 因而若检测频率变化, 线圈阻抗会沿着阻抗曲线的轨迹发生改变, 即 f 的变化对线圈阻抗的影响与电导率的影响一致。

在涡流检测中, 为了提高检测灵敏度和有效地分离各种影响因素, 应注意选用最佳检测频率。最佳检测频率因检测目的和对象的不同而异, 如发现表面裂纹的最佳检测频率为特征频率的 10~50 倍, 发现皮下裂纹的最佳频率比则在 4~20 之间, 频率比 $f/f_g = 5 \sim 10$ 则是能够兼顾发现表面裂纹和皮下裂纹的可选频段。

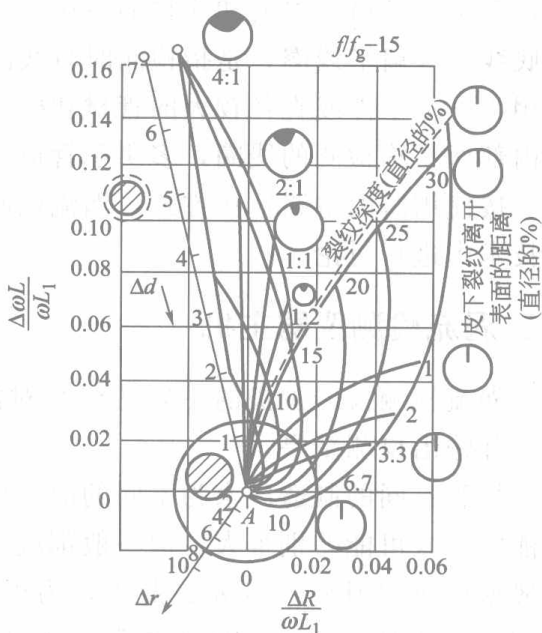


图 7-10 非磁性导电圆柱体上的裂纹对线圈阻抗的影响

第三节 涡流检测设备

一、传感器

涡流检测传感器又称探头, 其主要功能是在被检试件中激发出涡流, 并检测涡流反作用后的原磁场的变化。传感器是涡流检测的关键设备, 其性能的高低对检测结果影响很大。理论上讲, 只要对磁场变化敏感的器件都可用作涡流检测的传感器, 如霍尔元件、磁敏二极管等, 但目前最常用的涡流检测传感器是检测线圈。而且, 为适应不同工件的检测要求, 研制开发了多种形式不同、功能各异的检测线圈, 其主要类型及分类情况如下。

按感应方式, 检测线圈可分为自感式检测线圈和互感式检测线圈两种。其中, 自感式检测线圈由既用作激励、又用作检测的单个线圈构成; 互感式检测线圈通常由两个或两组线圈构成, 其中一个或一组线圈用来在被检试件中激励出涡流, 另一个或一组线圈用来接收涡流

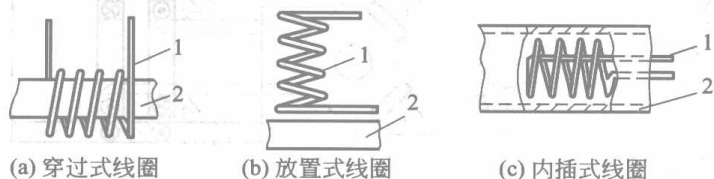


图 7-11 检测线圈与被检工件的相对位置

1—检测线圈; 2—被检试件

反作用后的磁场。

按检测时检测线圈与被检试件的相互位置关系, 涡流检测线圈可分为穿过式、放置式和内插式三种(图 7-11)。其中, 穿过式线圈是指检测时被检试件从检测线圈内孔中穿过的线

圈,多用于管材、棒材和线材的高速、自动检测;放置式线圈又称探头式线圈、表面线圈、平底线圈或扁平线圈,是指检测时将线圈平放在被检工件表面附近以实施涡流检测的线圈,多用于平板工件或直径较大的管材和棒材的检测;内插式线圈是指检测时将线圈插入被检试件内部而实施检测的线圈,多用于管道、钻孔等工件的内表面质量检测。

按使用时的电路连接方式,涡流检测线圈可分为绝对式和差动式两类,对此将在涡流检测技术中进行讨论。

二、涡流检测仪器主机

涡流检测仪器主机的主要功能是对涡流传感器提供电激励,接收来自传感器的反馈信号,并输出检测结果。

尽管不同的制造厂家为不同的应用场合所设计的涡流仪器主机的结构、性能及实现各种功能的方式可能差别很大,但一般都应包含振荡、信号检出、放大、显示输出等基本模块,其典型构成如图 7-12 所示。此外,为提高涡流仪器的抗干扰能力,涡流检测仪一般还包含有同步检波器(又称相敏检波器)、滤波器、幅度鉴别器等模块。

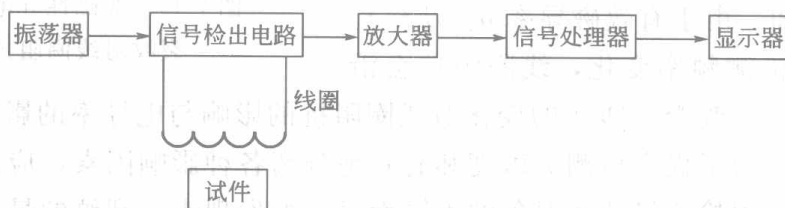


图 7-12 涡流探伤仪的典型构成原理框图

其中,振荡器通常配以功率放大器,用来产生高频振荡,供给试验线圈各种频率和幅度的激励电流,以便在被检工件中感生出所需强度的涡流。原则上可采用符合要求的任意形式的正弦波振荡器,但由于 LC 振荡器具有起振容易、频率范围较宽(从几千赫兹至几十兆赫兹)、频率稳定度高(可达 10^{-4})且调整方便、能够产生较大幅度的正弦振荡等优点,为一般的涡流探伤仪所广泛采用。当频率稳定度要求更高时,可采用晶体振荡器。而当频率较低时,常采用 RC 振荡器。

信号检出电路负责将含有各种待检测信息的试验线圈中电性能的变化转换成电压信号输出。图 7-13(a)中,阻抗的变化量 $\Delta Z = Z_1 - Z_0$ 代表了被检工件上各种因素的影响,经信号检出电路转换成可测量的电压信号 ΔU [图 7-13(b)]。

由于 ΔU 很小,因而通常将检测线圈连接在各种交流电桥中(图 7-14),电桥输出的电压变化量 ΔU 经放大后可供显示和分析。

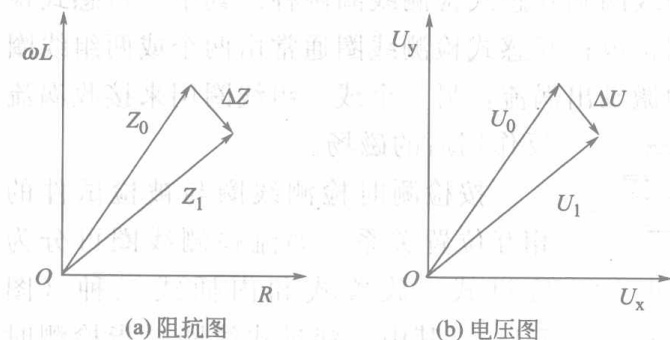


图 7-13 检测线圈的阻抗和电压变化

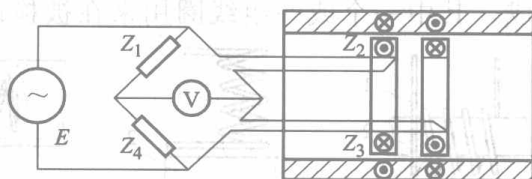


图 7-14 信号检出电桥电路

在图 7-14 中, Z_1 、 Z_4 为仪器内的平衡电阻, Z_2 、 Z_3 为考虑了管壁涡流影响的线圈视在阻抗。根据交流电桥理论, 为能得到最大的电桥信号输出, 除要求线圈的视在阻抗对称、满足电桥平衡条件外, 还必须与 Z_1 、 Z_4 相匹配。当 Z_3 遇到缺陷变为 $Z_3 + \Delta Z_3$ 时, 电桥输出电压为

$$U = \frac{Z_1 \Delta Z_3}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} E \quad (7-12)$$

放大器将微弱的信号加以放大, 以方便其传输; 显示输出模块以数字、图形等方式输出检测结果。

相敏检波又称相位分析法, 相敏检波器就是通过选择相位来抑制干扰、提取有用信号的电路, 其工作原理如图 7-15 所示。图中, $\overline{OA}$ 表示要检测的有用信号, $\overline{OB}$ 表示干扰信号。为了在输出中抑制干扰信号 $\overline{OB}$ 而仅提取有用信号 $\overline{OA}$, 可再引进一个控制信号 $\overline{OT}$, 让 $\overline{OA}$ 和 $\overline{OB}$ 一同输入到同步检波器中, 使信号的输出分别为 $\overline{OA} \cos \theta_1$ 和 $\overline{OB} \cos \theta_2$ 。通过移相器适当调节控制信号 $\overline{OT}$ 的相位, 使 $\overline{OB}$ 和 $\overline{OT}$ 相互垂直, 就可使干扰信号的输出为零, 而输出信号 $\overline{OC} = \overline{OA} \cos \theta_1$ 仅与有用信号 $\overline{OA}$ 有关, 从而达到抑制干扰的目的。

滤波器的基本功能是让不同频段的信号选择性通过, 当有用信号和干扰信号处在不同的频率段时, 可使有用信号的频段处在滤波器的通带、干扰信号处在滤波器的阻带, 这样, 有用信号可通过滤波器, 而干扰信号被滤波器拦截, 从而达到了抑制噪声信号、提取有用信号的目的。滤波属于频率分析方法。

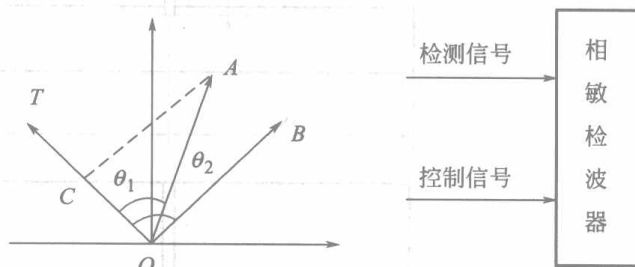


图 7-15 相敏检波器的工作原理

幅度鉴别器就是实现幅度鉴别功能的电路。幅度鉴别的基本原理是: 根据需要设置信号阈值, 幅度大于所设定阈值的信号被看作有用信号并让其通过, 幅度低于阈值的信号则被看作干扰信号并将其过滤掉, 由此可抑制幅值较小的噪声信号、提取幅值较大的有用信号。

三、参考试样

除探头和涡流仪器主机外, 在涡流检测中, 还经常要用到参考试样。

所谓参考试样, 就是含有特定人工缺陷的试件。根据其功能, 参考试样可分为标准试样和对比试样两大类。其中, 标准试样是由各级标准化组织制定的人工缺陷试件, 主要用来检定或调整涡流检测仪器设备的性能, 如灵敏度、分辨率、末端不可检测长度等。对比试样用于特定的检测对象, 用来评价涡流检测系统的性能、估计缺陷的大小、确定验收标准等。

对对比试样的基本要求是: ①对比试样的材质(材料牌号、热处理状态)、尺寸、形状、加工程序、表面粗糙度等应与受检试件相同; ②制作人工缺陷时不允许材质发生变化, 不允许留有残余应力; 制作完毕, 人工缺陷内不允许残存金属粉末; 为防止末端效应, 应使人工缺陷与末端相距 200mm 以上; 人工缺陷有两个以上时, 为防止相互干扰, 间距也应在 200mm 以上; ③人工缺陷的形状、位置和尺寸等特征尽量与被检工件中的实际缺陷一致。图 7-16 所示是几种用于管道或管形工件检测的常见参考试样。图 7-17 和图 7-18 分别是民用航空行业标准 MH/T 3002.5—1997 提出的铝标准试样和孔内表面人工缺陷对比试样。

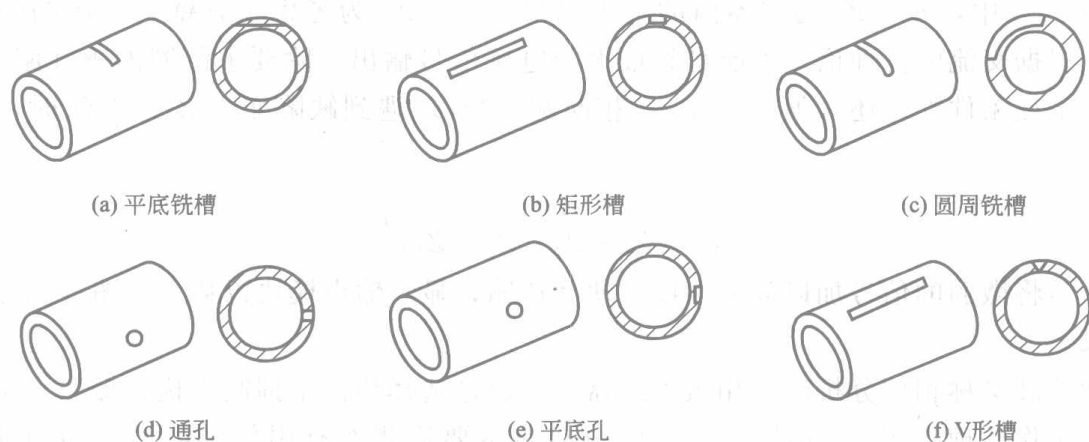


图 7-16 几种常见的参考试样

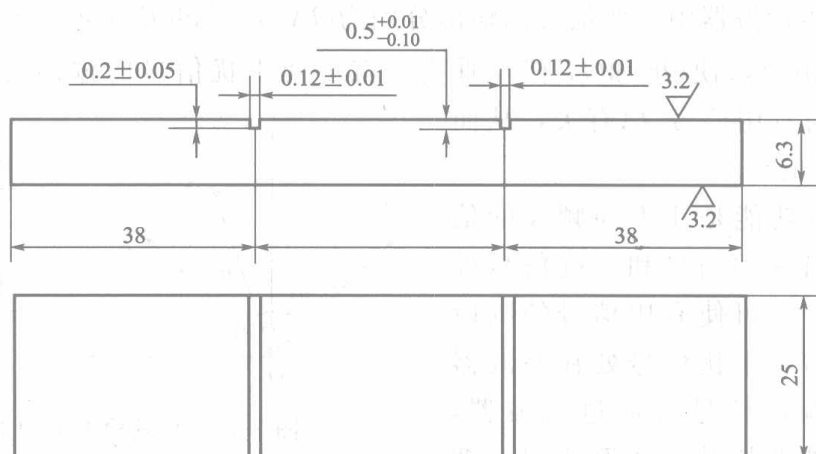


图 7-17 铝标准试样

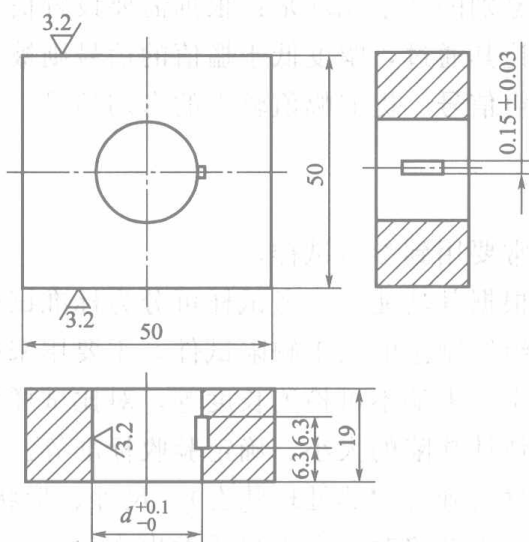


图 7-18 孔内表面人工缺陷对比试样

四、其他辅助设施

要采用涡流检测技术对被检试件进行高效检测，除以上设施外，通常还需一些辅助设施，如自动检测的进给装置、分选装置、磁饱和装置等。

1. 自动进给和分选装置

对进给装置的基本要求是，除实现预定路径的进给功能外，还要求其传送平稳、速度可调，试件在传送过程中保持必要的位置精度，如管、棒、线材与检测线圈的同心度。

分选装置的主要功能是将不同质量等级的被检试件送往不同的分区，便于质量管理。

2. 磁饱和装置

磁饱和装置主要用于铁磁性试件的涡流检测。将被检试件磁化至饱和状态，使其相对磁导率取值最小，以消除试件相对磁导率的变化对检测结果的影响，并增大渗透深度，也有利于试件内部较深区域的检测。

铁磁性材料的相对磁导率大小随磁化程度而变化，金属磁导率的变化会产生噪声信号。

一般来说,磁噪声对线圈阻抗的影响往往远大于缺陷的影响,给缺陷的检出带来困难。此外,铁磁性金属或非铁磁性金属带有磁性后,它的趋肤效应很强,而渗透深度很浅,可探测深度大约只有非铁磁性金属的 $1/100\sim 1/1000$,可见,铁磁性金属大而变化的磁导率对检测不利。

克服铁磁性金属磁导率对探伤影响的措施是对试件进行饱和磁化。铁磁性金属经过饱和磁化后,其磁导率降为最小值(约为 $2\sim 3$),可作为非铁磁性材料对待,既消除了磁导率不均匀的现象,也使涡流的透入深度大为增加。

在涡流检测中常用的磁饱和装置有两类:一类是由通有直流电的线圈构成,典型结构有通过式和磁轭式,前者主要用于穿过式线圈的饱和磁化,后者多用于扇形线圈或放置式线圈的探伤;另一类是由强永久磁铁构成,主要用于不宜通的电线圈型磁饱和装置的场合。

3. 耦合装置

在使用旋转探头对金属管(棒)材进行涡流检测时,由于探头的高速旋转,需要解决探头和涡流仪器之间的信号传输问题,此即耦合问题。涡流检测中常用的耦合方式有电刷耦合、电感耦合和导电液耦合,三者的特性对比列于表 7-4。

表 7-4 三种信号耦合方式的特性比较

耦合方式	耦合系数	频率范围	允许转速范围	信号电平高低	阻抗匹配难易	寿命	成本	制造难易	实现多通道的难易	维护难易	外来干扰大小
电刷耦合	100%	宽	<1500	较高	易	短	低	易	能	易	大
电感耦合	90%	窄	任意	较低	难	长	中	中	能	易	需屏蔽
导电液耦合	>90%	宽	<300	较低	易	中	高	难	能	易	需屏蔽

第四节 涡流检测技术

一、检测线圈的使用方式

1. 绝对式与差动式

按电连接方式的不同,检测线圈有绝对式和差动式两种使用方式,如图 7-19 所示。

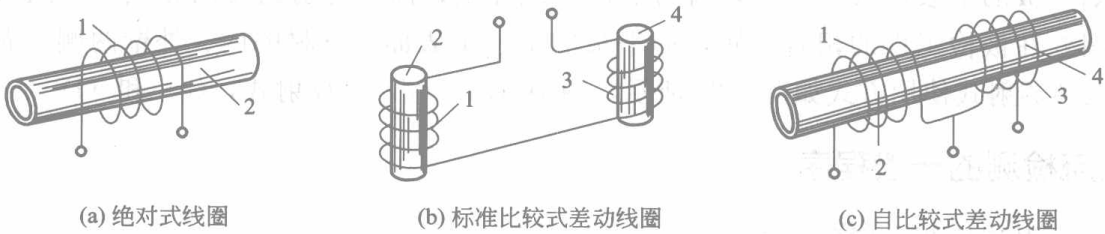


图 7-19 涡流检测线圈的绝对式与差动式使用

1—检测线圈; 2—被检工件; 3—参考线圈; 4—参考试件

绝对式线圈是在没有标样参考或比较的情况下直接进行测量的线圈,它由一个线圈构成。检测时先用无缺陷的标准试样调节仪器,使其输出为零,然后再用调整好的设备检测被检试件,若此时仪器的输出仍为零,则说明被检试件完好,否则,说明被检试件偏离完好状态。绝对式线圈可应用于测量电导率、磁导率、尺寸和硬度等。

将两个线圈反接在一起进行工作的方式称为差动式,即在线圈的差动式使用中,一个线

圈用来检测参考件（称为参考线圈），另一个线圈用来检测试样（称为试样线圈）。当参考线圈和试样线圈的输出相同时，检测线圈输出为零；只有当参考线圈和试样线圈的输出不相同，检测线圈才会有输出。

根据参考试样的不同，差动式使用可进一步分为它比式和自比式两种。其中，它比式线圈多采用标准试样作为参考试样，故又称标准比较式；而自比较式用被检试件的不同部位作为参考。

它比式线圈由两个线圈构成，其中一个线圈用来检测标准试样，另一个线圈用来检测被检试件，线圈输出的是标准试样与被检试件之间的差异。与绝对式线圈相同，它比式线圈也受试样材质、形状及尺寸的影响，因此对试样轧制方向从头到尾深度相等的裂纹都能够检出来。

自比式线圈采用两个相距很近的线圈来检测某一试件的两个部位的差异，也称邻近比较方式的检测线圈。自比式线圈对试件材质和形状的缓慢变化不太灵敏，如对管壁的逐渐减薄、直径或电导率的逐渐变化等都不太敏感，而对小的不连续性缺陷，如裂纹、凹坑和凸起边缘的缺陷比较敏感。

涡流检测线圈的绝对式、标准比较差动式和自比较差动式使用的特性比较如表 7-5 所示。

表 7-5 涡流检测线圈的绝对式、标准比较差动式和自比较差动式使用的特性比较

工 作 方 式	优 点	缺 点
绝对式、标准比较差动式	①对材料性能或形状的突变或缓变均能有所反应 ②较易区分混合信号 ③能显示缺陷全长	①有温度漂移 ②对探头颤动较敏感
自比较差动式	①无温度漂移 ②对探头颤动的敏感性较绝对式探头低	①对缓变不敏感，即可能漏检长而缓变的缺陷 ②只能测出长缺陷的终点和始点 ③可能出现难以解释的信号

为弥补各自的不足，获得更好的检测效果，可将以上三种检测方式组合起来使用。

2. 反射式与透射式

根据激励线圈和检测线圈与被检工件的相对位置关系的不同，可将涡流检测探头放置方式分为反射式和透射式两种。在反射式使用方式中，激励线圈和检测线圈处在被检工件的同一侧，如平板的上表面或下表面，管材的内壁或外壁；而在透射式使用方式中，激励线圈和检测线圈处在被检工件的相对两侧，如平板的上、下表面，管材的内、外壁两侧。涡流检测的反射式和透射式使用方式如图 7-20 所示，图中（a）~（d）是反射式，（e）和（f）是透射式。

二、涡流检测的一般程序

典型的涡流检测一般包括以下基本步骤。

（1）检测前的准备 在对工件正式实施检测前，应做好以下准备工作。

- ① 根据被检工件的材质、形状、尺寸、数量以及检测的目的和要求（灵敏度、效率）等，正确选择涡流检测设备和检测方法、确定检测条件和检测工艺。
- ② 对被检工件进行必要预处理，如去除氧化皮、油脂等表面污染物，校直扰曲严重的管（棒）工件，以免检测线圈在通过工件时被损坏。
- ③ 对仪器设备及辅助设施进行必要的检测、校准。

（2）检测过程 根据在准备阶段确定的检测工艺，对被检工件实施检测。

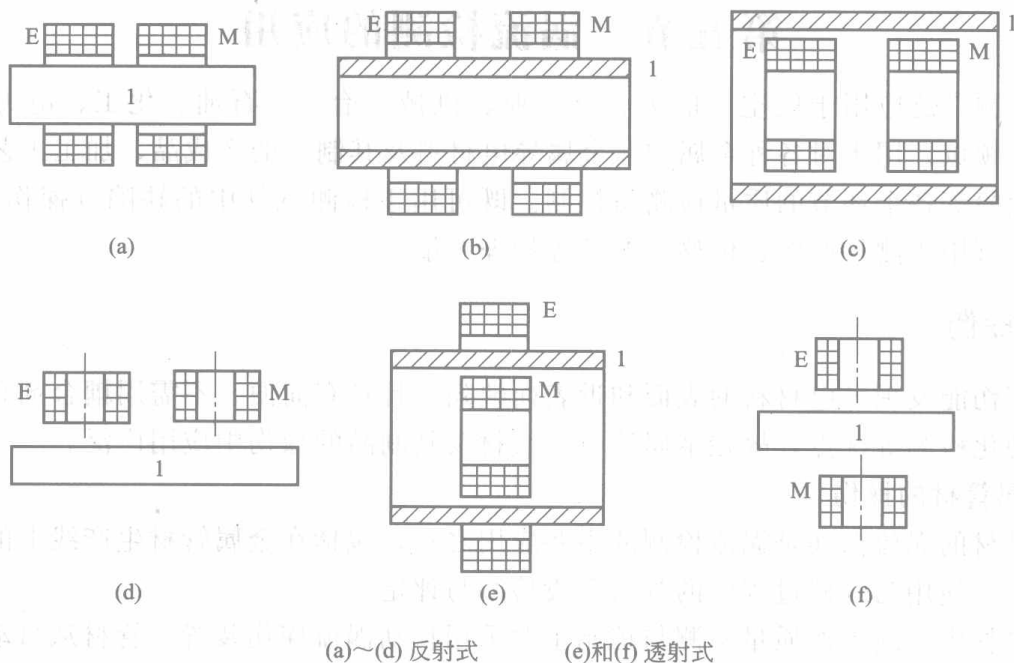


图 7-20 涡流检测线圈的反射式与透射式使用

1—被检工件；E—激励线圈；M—检测线圈

(3) 检测结果及检测报告 对检测结果进行记录、分析处理，并编制检测报告。不同的检测对象，检测报告的内容不完全相同，但一般应包括被检工件的信息（名称、形状、尺寸、材质、加工工艺等）、涡流检测设备的型号、检测所采用的工艺条件、被检工件的技术状态（如有无缺陷、质量等级等）、检测人员等。

(4) 后处理 对检出的缺陷进行标志，根据其质量等级对被检工件进行分装，对经饱和磁化工艺处理的被检工件进行退磁等。

三、抗干扰措施

影响涡流检测的干扰因素众多，如环境温、湿度变化和振动等原因引起的检测设备（探头、仪器）的性能漂移、环境电磁干扰等，抗干扰问题是涡流检测中的一个主要技术难题。针对不同的干扰源应采取不同的抗干扰措施。在前面关于检测设备的论述中，相敏检波、滤波、幅度鉴别以及饱和磁化等都是具体的抗干扰措施，对检测设备的定期进行校验以及每次检测前的标定，也都有利于降低设备噪声的影响。此外，为了提高涡流检测的信噪比，针对特定的检测对象，还发展了小波分析、人工神经网络等方法，限于篇幅，在此不作详细讨论。下面简要讨论提离效应及其噪声抑制。

涡流检测是一种非接触式无损检测方法，检测探头与被检工件之间的距离称为提离（lift-off）。在涡流检测中，即使其他条件不变，提离量的改变也会使涡流检测的输出信号发生改变，这种现象就是所谓的提离效应。

提离效应噪声是涡流检测中的干扰源，必须尽力加以克服。为此，人们发展了多种减小或消除提离噪声的方法。其中，最根本的办法是使提离在整个检测过程中保持恒定的恒提离法。例如，通过采用辅助装置，使探头与被检工件之间的距离保持不变。当提离的变化不可避免时，可预先对提离效应进行标定，获得输出信号随提离距离变化的规律，进而在检测结果中对提离效应加以补偿、以减小甚至消除提离效应的影响。

第五节 涡流检测的应用

涡流检测广泛应用于航空、航天、核工业、机械、冶金、石油、化工、电力、有色金属、汽车等领域，用于对各种金属和非金属导电材料及其制件的产成品、加工工艺过程和使用与维修检验等各个环节的质量检测与控制。既可用于检测试件中的缺陷（探伤）、进行材料分选，还可用于测量厚度、位移、振动等物理参量。

一、涡流探伤

涡流探伤能发现导电材料的表面和近表面缺陷，且具有简便、不需用耦合剂和易于实现高速、自动化检测等优点，故在金属管材、线材及其制品的探伤中应用广泛。

1. 金属管材的探伤

金属管材的涡流探伤是涡流检测的主要应用之一，包括在金属管材生产线上的管材质量检测与控制、使用与维修过程中的管材在役检测与评定。

金属管材生产线上的质量检测与控制主要采用自动涡流探伤装置。管材从自动上料进给装置等速、同心地进入并通过涡流检测线圈之后，分选、下料机构根据涡流检测结果，按质量标准规定，将经过探伤的管材分别送入合格品、次品和废品等料槽，以实现管材质量的自动检测、评定与分级。

用于管材探伤的检测线圈主要有穿过式线圈和探头式线圈两种。

直径 $\phi \leq 75\text{mm}$ 的小直径管材通常采用穿过式线圈（图 7-21），当管材为铁磁性材料时，外层还要加上磁饱和线圈用直流电对管材进行饱和磁化。这种线圈最适宜检测凹坑、锻屑、发裂、折叠和纵向裂纹等缺陷，检测速度一般为 0.5m/s 。

由于穿过式线圈的感生涡流沿管材周向流动，故其对管材表面和近表面的纵向裂纹有良好的检出灵敏度，而对周向裂纹不敏感。此外，对于直径较大的管材，穿过式线圈的检测灵敏度显著降低。因此，当检测管材的周向裂纹或被检管材的直径超过 75mm 时，宜采用小尺寸的探头式线圈，对管材进行周向扫查检测（图 7-22），以探测管材上的短小缺陷。探头数量的多少取决于管径的大小以及所要求的检测效率。与穿过式线圈相比，探头式线圈的检测灵敏度较高而检测效率较低。

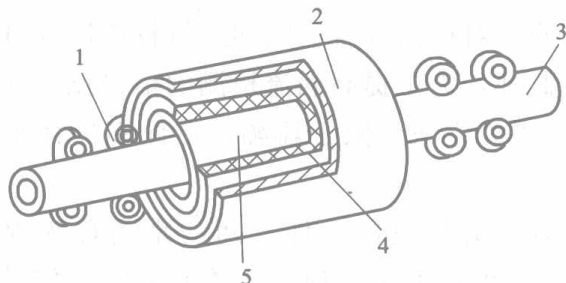


图 7-21 管材的穿过式线圈检测

1—V 形滚轮；2—磁饱和线圈；3—管材；
4—激励线圈；5—测量线圈

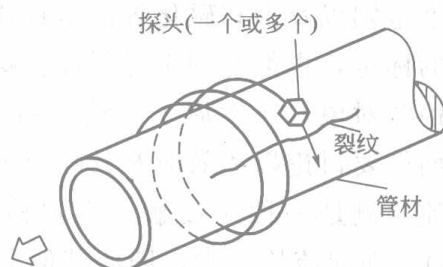


图 7-22 管材的探头式线圈检测

对金属在役管道的应力裂纹和腐蚀壁厚减薄等缺陷的无损检测，涡流法是目前最主要的检测方法之一，其应用对象非常广泛，如管式换热器中的管子、高压锅炉上的管子。

金属管材的涡流探伤频率的选取，与管径大小及壁厚等因素有关，一般选为

25kHz~1MHz。

2. 金属棒材、线材和丝材的探伤

虽然涡流法只能探测金属材料表面和近表面缺陷,但对某些棒材(如磨光的轴承钢棒)、线材和丝材(如钨丝、钼丝、铅丝和弹簧钢丝等)而言,发现它们的表面和近表面缺陷也是十分重要的,因此,涡流在金属棒材、线材和丝材的探伤方面也应用广泛。

对大批量生产的棒材、线材和丝材进行涡流探伤,可采用类似于探测管材的自动探伤装置。但为了检出棒材表面以下较深的缺陷,应选用比同直径的管材探伤低一些的工作频率。而进行金属丝材探伤,所选用的工作频率则要较高(如 Foerster 公司生产的细钨丝、钼丝涡流探伤仪的工作频率高达 120MHz),以获得适当的 f/f_g 值。

3. 设备使用与维修过程中的涡流探伤

服役中的结构件上可能产生各种缺陷,如疲劳裂纹、腐蚀坑或腐蚀减薄等。对金属导电材料结构件上的表面缺陷的检测,涡流法具有很大的优势,因而为航空及其他工业维修部门普遍采用。例如,用专用探头式线圈可检出在机翼大梁、桁条与机身框架连接的紧固件孔周围、发动机叶片、起落架、旋翼和轮毂等部位产生的疲劳裂纹。还可采用涡流法对重要的结构件上的疲劳裂纹的产生与扩展,实现在线、在役监控,以保证设备的安全运行。

除以上应用外,涡流法还可用于探测金属板材、轴承元件(滚动体、套圈)、销钉等零件的表面缺陷。

二、材质检验

用涡流法进行材质检验的实质,是检测材料电导率的变化对检测线圈阻抗的影响。而材料的电导率受其成分、热处理状态等因素的影响。因此,采用涡流方法(涡流电导仪)检测材料的电导率,即可鉴别材料的成分、热处理状态以及混料分选等。这种方法不会损伤零部件的加工表面,且检测过程方便快捷,特别适合现场使用。

1. 材料成分及杂质含量的鉴别

金属的电导率值受其纯度的影响,杂质含量增加,电导率就会降低。在铜的生产中,用测定电导率的方法可以估计铜中杂质的含量(图 7-23)。例如,通过测定电导率可以确定磷铜中磷的含量,而且从提取液态的熔融样品到用涡流电导仪完成电导率的测量只需要很短的时间,充分体现了涡流检测简单、方便、高效的优点。

2. 热处理状态的鉴别

由于相同的材料经过不同的热处理后其电导率不同,因而可以用测量电导率的方法来间接评定合金的热处理状态。

3. 材料力学性能评价

用涡流检测也可以评价某些材料的硬度和强度等力学性能,例如钛合金 Ti6Al4V 的硬度与其电导率之间存在对应关系,通过测定电导率即可评价其强度。时效硬化铝合金的硬度与其电导率之间的关系如图 7-24 所示。通过测量电导率,可以对沉淀硬化材料(如 Al、Ti、Mg 合金)的硬度变化进行准确的跟踪。

4. 混料分选

在工厂、仓库等地可能会发生材料混杂的现象,如果混杂材料或零部件的电导率的分布带不相互重合,就可以用涡流法测出混料的电导率,然后再与已知牌号或状态的材料和零部件的电导率相比较,从而将混料区分开。混料分选实际是前述成分、热处理状态鉴别的具体应用。

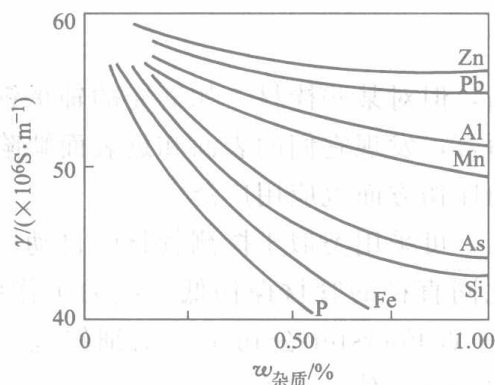


图 7-23 铜中杂质含量与电导率的关系

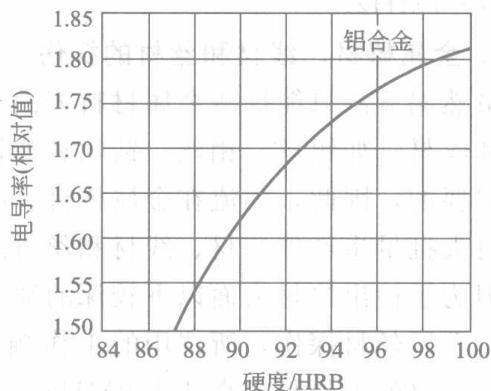


图 7-24 时效硬化铝合金的硬度与电导率的关系

通过涡流方法测量电导率进行混料分选时应注意以下几点。

- ① 试件厚度的影响。当试件厚度小于或等于涡流的渗透深度时，电导率的测量值会受厚度变化的影响，测量误差很大。因此一般要求试件厚度至少应为涡流渗透深度的 3 倍。
- ② 环境温度的影响。温度每变化 1°C ，电导率大约变化 $0.05 \times 10^6 \text{ S/m}$ 。
- ③ 表面状况的影响。表面曲率、粗糙度、涂层厚度和有无缺陷等因素都会对电导率的测定结果产生影响，实际操作时要注意排除这些干扰。

需要指出的是，比较而言，磁性材料的磁特性受材料材质变化影响的程度要比电导率大得多。剩磁、矫顽力等物理量都与材质的状态相关，受材料的组织成分、热处理状态和力学性能变化的影响。利用这种相关关系，即可根据测得材料的磁滞回线参量来推断被检材料的热处理状态，进行混料分选。但由于这种方法的物理基础是电磁感应而非感生涡流，因而严格说来，应称其为材质分选的“电磁方法”。某些钢种分选仪就是这种电磁感应式仪器。

三、涡流测厚

用涡流方法可以测量金属基体上的非导电覆层厚度以及金属薄板的厚度。

1. 覆层厚度的测量

覆层是指覆盖在金属基体表面上，起防护、装饰等功能的涂层、镀层或渗层。常见的覆层/基体组合有如下几种。

- ① 绝缘材料/非磁性金属材料，如铝合金零件表面的阳极化覆膜、涂层，非磁性金属表面的油漆层等。
- ② 非磁性金属材料/非磁性金属材料，如非磁性金属材料表面的铜、铬、锌镀层，奥氏体不锈钢表面的渗氮层。
- ③ 绝缘或顺磁性材料/铁磁性材料，如钢表面的涂层、镀铬层、渗碳层等。

对不同的覆层/基体组合，应采用不同的方法测量其覆层厚度。对①和②两种材料组合的覆膜厚度测定，常用涡流方法；而对第③种材料组合的覆膜厚度的测定，常用电磁感应方法，因为此时材料的磁效应远大于其涡流效应。

用涡流法测定覆膜的厚度利用的是探头式线圈的提离效应。图 7-25 所示是放置的非磁性材料表面上的某探头式线圈的阻抗平面图，图中弦向虚线代表当检测频率和电导率取定值时探头至被检材料表面距离（提离）变化对线圈阻抗产生的影响。由图可见，若其他检测参数不变，探头式线圈的阻抗（感应电压）将随材料表面覆膜厚度的不同而变，通过检测线圈阻抗的变化，即可测得材料表面覆膜的厚度。由涡流法测量的覆层厚度范围一般为几微米至

几百微米，特殊情况下可达几毫米。

在涡流测厚时，提离效应（覆膜厚度效应）是需要检测的变量，而电导率变化和试件太薄都会影响测厚的精度。为了抑制这两种干扰，以适应不同材料（电导率变化）及厚度较薄的试件的测量，涡流测厚时一般采用较高的工作频率（如 25MHz）。

涡流测厚仪可用于测量非磁性材料表面各种绝缘膜的厚度，如铝合金的阳极化层、高温合金的珐琅层及各种漆层的厚度。而对于非磁性金属材料表面的导电覆膜，只有当基体与覆膜之间的电导率相差较大时，才有可能利用提离效应测定其厚度。

2. 金属薄板或箔厚度的测量

用涡流法测量金属薄板厚度的设备简单，检测方便，且板材厚度越薄，测量精度越高。例如，用涡流电导仪可以测量厚度为 0.4mm 左右的铝屏蔽罩的厚度。

用涡流法测量金属薄板的厚度时，检测线圈既可按反射工作方式布置在被检薄板的同一侧，也可按透射工作方式布置在其两侧。但无论哪一种工作方式，都是根据在测量线圈上测得的感应电压值来推算金属薄板的厚度。

除上述单层厚度的测量外，多层厚度的涡流检测技术也正在研究开发中，可望在不久的将来获得实际应用。

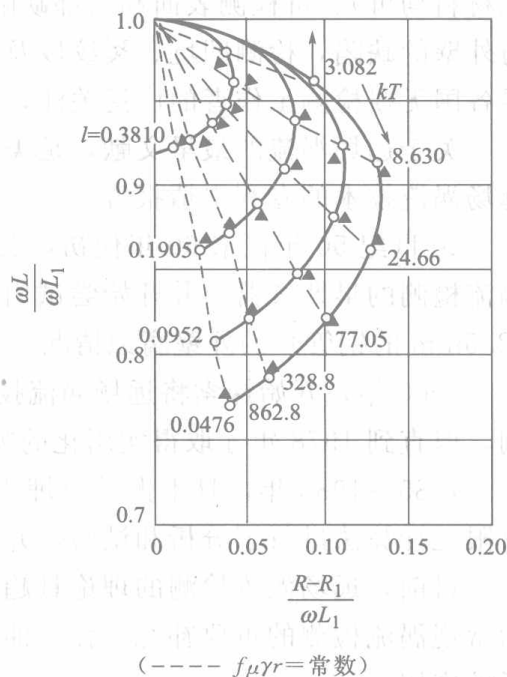


图 7-25 在非磁性材料表面上
某探头式线圈的阻抗图

第六节 涡流检测的新近进展

涡流检测尽管已有一百多年的历史，但至今仍远未成熟，也未停止其发展步伐。应用领域的不断拓展、检测要求的不断提高为其提供了发展的动力，信号分析与处理、传感技术、电子技术及计算机技术等相关学科的发展，则为涡流检测的发展提供了技术基础与物质保障，正是在这种背景下，涡流检测迈入了一个崭新的发展阶段。涡流检测的进展是多方面的：小波分析、人工神经网络等现代信号处理技术相继引入涡流检测领域，为从涡流检测信号中获取更多的有效信息提供了可能；有限元数值仿真方法的引入，则为涡流检测的理论研究和应用基础研究提供了新的思路和新的工具，从而改写了涡流检测研究主要依靠实验研究这种研究方法单一的局面；阻抗 C 扫描、涡流层析成像则结束了涡流检测结果以阻抗平面图输出，既单调、又很不直观的历史；此外，低频涡流、多频涡流、磁光/涡流成像技术等新技术相继提出，检测设备日趋小型化、轻便化和智能化，其灵敏度、精度和稳定性也得到不断提高。有关涡流检测最新进展，请有兴趣的读者查阅国内外的最新文献资料，以下简要讨论远场涡流检测。

一、远场涡流检测概述

所谓远场涡流 RFEC (Remote Field Eddy Current)，是一种特殊的涡流现象。它克服了常规涡流检测的集肤效应所带来的局限性，具有适应材料的种类广（非铁磁性材料和铁磁

性材料均可)、可检测表面和内部缺陷、检测效率高(可以相同的灵敏度同时检测管子内壁与外壁的缺陷,检测凹坑、裂纹以及管壁减薄时不需要更换探头)等诸多优点,因而受到世界各国无损检测工作者的广泛关注,是一种很有发展前途的涡流检测新技术。

关于远场涡流的最早文献,是美国人马科里姆(W. R. Maclean)于1951年首次发表的远场涡流技术的专利申请报告。

20世纪50年代末60年代初,美国壳牌石油公司的T. R. Schmidt教授研制成功了远场涡流检测的早期仪器,并开始尝试用此方法检测石油管道(外径178~203mm,壁厚9.5~12.5mm的钢管)的外壁腐蚀情况。

1960年,开始探索将远场涡流技术用于铁磁性管道及热交换器内小口径管子的在役检测,但直到1978年才取得实用化的突破性进展。

1985~1986年,日本大学对埋设在地下的煤气管道($\phi 50.8 \times 3.8$ mm的碳钢管)采用有限元算法进行了分析和试验,并发表了远场涡流试验方法及基础研究的论文。

目前,远场涡流检测的理论日趋成熟,设备性能不断提高,应用领域也不断拓展,已成为常规涡流检测的重要补充,在石油、化工等领域中的小口径管道的在役检测方面获得了广泛的应用。

二、远场涡流技术的检测原理

远场涡流检测目前主要应用于管道的检测,其基本工作原理可用图7-26加以说明。

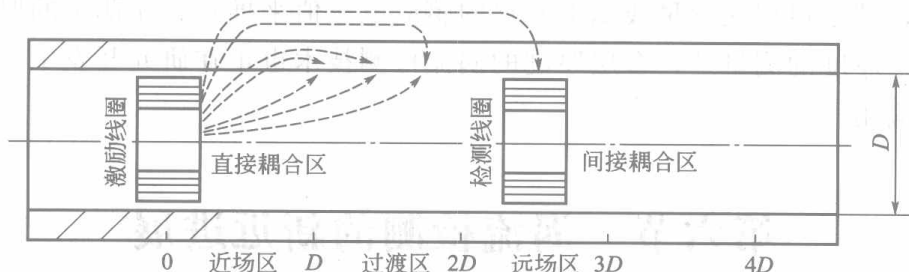


图 7-26 远场涡流检测的基本原理

远场涡流检测探头由两个螺线管线圈组成,其中一个为激励线圈,另一个为检测线圈。在激励线圈中通以低频正弦交流电,在此线圈任一端的电磁场都可划分为三个区域:紧靠激励线圈的直接耦合区、激励线圈较远的间接耦合区以及两者之间的过渡区,(图7-26)。

直接耦合区(又称近场区)紧靠激励线圈,检测线圈上的磁通主要由激励线圈直接耦合过来,磁场较强,检测信号幅值较高,但随着与激励线圈距离的增大,由于管子的屏蔽作用,场强急剧减弱,但相位变化不大。而间接耦合区域(又称远场区域)因离激励线圈较远(通常为管内径的2~3倍以远),检测线圈所接收的磁通信号主要是两次穿越管壁后的信号,幅值很小,通常为几微伏至几十微伏,必须利用高增益的放大器才能检测到这种信号。

在过渡区,感应电势下降、速率减小,有时甚至出现微弱增加现象,相位差发生急剧变化。

三、远场涡流和常规涡流技术的简要对比

远场涡流技术与常规涡流技术的区别主要表现在以下几方面。

(1) 接收线圈的位置 常规涡流技术将检测线圈置于靠近激励线圈的近场区,以直接磁

耦合的形式来拾取传播到管壁又返回的信号,信号较强但衰减很快,相位变化不大;而远场涡流技术则将检测线圈置于距激励线圈 $2\sim 3$ 倍管内径处的远场区,接收的是穿过管壁后在管外沿管轴传播一段距离后再返回到管内的磁场,信号强度很小,但衰减较慢,相位变化较大。

(2) 工作频率及检测范围 常规涡流检测仪的激励频率较高,通常为几十千赫兹至几兆赫兹,在铁磁性材料管道中,磁场被限制在管道的内表面,因此检测外部缺陷非常困难。而远场涡流检测仪的激励频率较低,典型值为 $50\sim 500\text{Hz}$,磁场可以穿过铁磁性材料的管壁,可以以相同的检测灵敏度同时检测管道内外表面的缺陷。

(3) 检测速度 远场涡流的检测速度较慢,通常只有常规涡流检测方法的 $1/3\sim 1/5$,约为 $10\sim 20\text{m/min}$ 。

(4) 适用材料的种类 常规涡流技术一般只适用于检测非铁磁性材料,而远场涡流技术既可检测非铁磁性管道,又能检查壁厚达 25mm 的厚壁铁磁性管道。此外,对大范围壁厚缺损,远场涡流技术的检测灵敏度和精确度较高,精度可以达到 $2\%\sim 5\%$ 。对于如腐蚀凹坑等小体积的缺陷,远场涡流技术的检测灵敏度取决于被测管道的材质、壁厚、磁导率的均匀性、检测频率和探头的拉出速度等因素。

(5) 设备价格 常规涡流检测的设备价格相对较低,约为远场涡流检测设备的 $1/3$ 。

(6) 检测参数及显示输出 常规涡流检测的阻抗,以阻抗平面图显示输出,阻抗的幅度和相位与壁厚的关系较复杂。而远场涡流检测的相位,以条形图显示输出的是相位和幅度的对数,它们都和管材大范围的缺损呈线性关系。

(7) 抗干扰性 常规涡流检测存在较强的提离效应,检测管道时要求探头与管道同心;远场涡流检测的提离效应不明显,检测管道时不要求探头与管道严格同心,检测管道时对填充系数要求低,对有障碍物和凹痕的管子检测效果很好,对探头在管内行走产生的偏心影响比常规涡流小。

四、远场涡流应用中的主要问题

目前,远场涡流技术还主要应用于管道的内外表面及内部缺陷检测,对平板试件的远场涡流检测还只是实验室研究探索阶段。

在管道的远场涡流检测实践中发现了以下问题:一是探头太长,难以通过弯管;二是检测信号的幅值太低,通常为微伏或数十微伏量级,对信号的放大和抗噪声干扰要求很高。

复习思考题

1. 何谓趋肤效应?趋肤效应用什么物理量表示,它与哪些物理参数有关?
2. 用涡流测量非磁性材料表面绝缘膜层厚度与金属薄板厚度时,选择工作频率的原则是否相同?
3. 何谓归一化阻抗?为什么要对检测线圈阻抗进行归一化处理?
4. 何谓涡流检测的相似律?何谓涡流检测线圈的充填系数?何谓检测线圈的提离效应?

参考文献

- [1] 任吉林. 涡流检测. 北京: 国防工业出版社, 1985.

- [2] Halmshaw R. 'Non-destructive Testing'. London: Edward Arnold, 1987.
- [3] 任吉林, 林俊明, 高春法. 电磁检测. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [4] 任吉林. 涡流检测技术近 20 年的进展. 无损检测, 1998, 20 (5): 121~125, 128.
- [5] 李喜孟. 无损检测. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [6] 中国无损检测学会编译. 电磁检测. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [7] [美] Charles J. Hellier 著, 戴光, 徐延廷, 李伟等译. 无损检测与评价手册. 北京: 中国石化出版社, 2006.
- [8] 刘凯. 涡流阻抗图分析. 无损检测, 1996, 18 (2): 50~56.
- [9] 曾祥照. 焊接钢管在生产线上的涡流探伤. 无损探伤, 1997, (6): 39~40.
- [10] 林森. 钢管涡流探伤新技术. 钢管, 1994, (2): 32~34.
- [11] 张荣红. 在役换热器管的涡流检测. 无损检测, 1996, 18 (11): 320~323.
- [12] 刘凯, 张荣红. 在役铁磁性管涡流检测方法与应用. 无损检测, 1996, 18 (12): 345~348.
- [13] 陈开惠. 核电站凝汽器铁管的涡流在役检测. 无损检测, 1995, 17 (3): 79~80.
- [14] 王学民. 飞机结构紧固件涡流探伤简介. 无损检测, 1995, 17 (2): 44~45.
- [15] 李玉奇. 用涡流电导仪测定铝合金的显微组织. 无损检测, 1995, 17 (11): 323~324.
- [16] 严仍春. 涡流测厚无损检测技术及其应用. 无损检测, 1996, 18 (6): 169~172.
- [17] 许万忠. 低频涡流技术的应用. 无损检测, 1996, 18 (8): 227~231.
- [18] Brencea John R, Brown Donald E. Data mining corrosion from eddy current non-destructive tests. Computers & Industrial Engineering, 2002, 43: 821~840.
- [19] Ali Sophian, Gui Yun Tian, David Taylor, John Rudlin. Design of a pulsed eddy current sensor for detection of defects in aircraft lap-joints. Sensors and Actuators A, 2002, 101: 92~98.
- [20] Ali Sophian, Gui Yun Tian, David Taylor et al. A feature extraction technique based on principal component analysis for pulsed Eddy current NDT. NDT&E International, 2003, 36: 37~41.
- [21] 刘涛, 贾慧明, 范弘. 抑制点式涡流探伤提高效应的新方法. 钢铁研究学报, 2004, 16 (5): 68~70.
- [22] 饶贵安, 康宜华, 武新军等. 电涡流方法在输电线损伤检测中的应用. 传感器技术, 2001, 20 (2): 14~16.
- [23] 王德新. 高压锅炉用无缝钢管涡流自动探伤. 锅炉技术, 1997 (1): 25~28.
- [24] 邵泽波, 宋树波, 王海波. 影响涡流检测压力管道质量的主要因素. 吉林化工学院学报, 2004, 21 (1): 101~103.
- [25] 李小亭, 沈功田. 压力容器无损检测——涡流检测技术. 无损检测, 2004, 26 (8): 411~416.
- [26] 杨风, 连靖, 郎文杰. 在涡流探伤中采用相敏检波电路提取裂纹信号. 华北工学院学报, 2003, 24 (1): 21~23.
- [27] 时振堂, 陈德智. 涡流检测信号小波除噪与缺陷特征提取. 无损检测, 2003, 25 (9): 472~476.
- [28] 萨殊利, 肖春燕, 朱衡君等. 电涡流无损检测淬火钢轨踏面硬度定量分析. 铁道学报, 2001, 23 (3): 33~36.
- [29] L. A. N. M. Lopez, D. K. S. Ting, B. R. Upadhyaya. Removing Eddy-Current probe wobble noise from steam generator tubes testing using Wavelet Transform. Progress in Nuclear Energy, 2008, 50 (7): 828~835.
- [30] Zergoug M, Lebaili S, Boudjellal H et al. Relation between mechanical microhardness and impedance variations In eddy current testing. NDT&E international, 2004, 37 (1): 65~72.
- [31] Konoplyuk S, Abe T, Uchimoto T et al. Characterization of ductile cast iron by eddy current method. NDT&E international, 2005, 38: 623~626.
- [32] Khan S H, Farhad Ali, NusairKhan A et al. Pearlite determination in plain carbon by eddy current method. J. Mater. Process. Tech, 2008, 200 (1~3): 316~318.
- [33] 游凤荷. 涡流检测技术的某些新进展. 无损检测, 2001, 23 (2): 70~73.
- [34] 任吉林. 电磁无损检测的新进展. 无损探伤, 2001 (5): 1~4, 28.
- [35] Radtke U, Zielke R, Rademacher H-G et al. Application of magneto-optical method for real-time visualization of eddy currents with high spatial resolution for nondestructive testing. Optics and lasers in Engineering, Vol. 36, 2001 (3): 251~268.
- [36] Fukutomi H, Takagi T, Nishikawa M. Remote field eddy current technique applied to non-magnetic steam generator tubes. NDT&E International, 2001, 34: 17~23.
- [37] Kim D, Udpa L, Udpa S. Remote field eddy current testing for detection of stress corrosion cracks in gas transmis-

- sion pipe lines. Materials Letters, 2004, 58: 2102~2104.
- [38] 廉纪祥, 沈跃. 管道远场涡流检测技术的进展. 油气储运, 2004 (7): 14~16.
- [39] 刘德镇, 刘瑛, 魏星等. 远场涡流技术及国内外进展. 山东工业大学学报, 1998, 28 (2): 191~194.
- [40] 王素菊, 曲民兴. 远场涡流无损检测技术. 无损检测, 1996, 18 (9): 262~266.
- [41] 刘焱, 曲民兴. 远场涡流检测技术研究的发展及现状. 盐城工学院学报 (社会科学版), 1998, 11 (2): 23~25.
- [42] 骆嘉龄. 远场涡流检测技术及研究现状. 试验技术与试验机, 1997 (Z1): 3~6.
- [43] Schmidt T R. History of the remote field eddy current inspection technique. Materials Evaluation, 1989, 47 (1): 14~22.
- [44] 罗世良. 远场涡流检测技术的世界动向. 无损检测, 1998, 20 (5): 146~150.
- [45] 张奇斌, 高飞, 汤代远. 远场涡流检测技术. 油气井测试, 2000, 9 (6): 52~54.
- [46] 黄勇. 在役铁磁性材料换热器管的远场涡流检测. 无损检测, 2000, 22 (4): 154~156.
- [47] 张会云, 严仍春, 楼敏珠. 阻抗平面显示技术在涡流检测信号处理中的应用. 无损检测, 2003, 25 (1): 44~47.

第八章

声发射检测

声发射 (AE: Acoustic Emission) 检测技术是 20 世纪 50 年代初兴起的一种新的无损检测方法。自从 1950 年德国科学家凯塞 (J. Kaiser) 发现了材料的声发射现象以来, 人们对声发射技术的研究热潮先后传遍美国、日本和欧洲一些国家。我国对声发射的研究起步于 20 世纪 70 年代初, 并首先就着眼于应用研究。

几十年来, 声发射技术已经在压力容器的安全性检测与评价、焊接过程的监控和焊缝焊后的完整性检测、核反应堆的安全性监测、断裂力学研究、地应力测量、煤炭开采、边坡稳定等诸多领域都取得了重要进展, 部分研究已进入工业实用化阶段, 成为无损检测技术体系中的一个极其重要的组成部分。

与其他无损检测方法相比, 声发射检测一个最为显著的特点是其动态检测性。一方面, 要对设备或构件实施声发射检测, 首先必须对其施加载荷; 另一方面, 声发射检测的是声发射信号的功率或能量, 因此, 声发射信号与被检件的状态直接相关。即使同样大小的缺陷, 当其所处位置不同时, 所检测到的声发射信号一般也不相同。因此, 声发射技术常用于对设备状态实施在役检测或在线监测。在本章里, 从实用的角度简要地讨论声发射检测技术的一些基础问题。

第一节 声发射检测的理论基础

一、声发射的产生

所谓声发射, 是指材料或结构因受外力或内力作用而产生变形或断裂时, 以弹性波的形式释放出应变能的现象。因此, 声发射也称为应力波发射。

工程实际中有许多机构都可能产生声发射, 成为声发射源, 如复合材料中的纤维断裂、基材开裂、纤维与基材的分离、分层扩展、纤维抽出、颗粒开裂及界面分离、结晶材料中的相变 (如马氏体相变)、机件撞击、摩擦及磨损以及凝固、融化与沸腾, 腐蚀生成物的剥落或摩擦、腐蚀产生的氢气泡的破裂、表面钝化膜的破裂、流体泄漏等。

各种 AE 源所产生的声发射信号形态各异, 强度不等, 频率范围分布也很宽。如脆性材料断裂通常产生持续时间很短 (约 1ms)、强度很高的突发型声发射, 而摩擦、流体泄漏则可能产生持续时间较长的连续型声发射。AE 信号的频带覆盖次声波、声波和超声波波段, 如地震波的声发射频率接近 0Hz, 而裂纹扩展的 AE 信号频率可高达 1MHz。

关于各种声发射源产生声发射信号的机制及其 AE 信号的特性, 将结合具体应用进行讨论, 在此先简要讨论塑性变形、裂纹的形成和扩展的声发射, 因为它们是声发射检测中最为重要的两种声发射源。

1. 塑性变形的声发射

塑性变形主要是通过滑移和孪生两种方式进行的, 其中滑移是最主要的方式, 它的元过程则是位错的运动。它们均会产生声发射, 弯曲金属锡片时出现的“锡鸣”, 就是孪生变形过程产生声发射现象的一个实例。

在实际的材料中, 确实已检测到与位错运动有关的声发射, 为此, 提出了几个产生声发射的位错模型, 每个模型都得到了部分实验结果的支持。

一种模型认为, 位错产生声发射与塞积位错在反向应力作用下使位错源开动和关闭有关。自由位错线的长度和位错滑动的距离有一个低限, 低于此值时将不能检测到声发射。这个下限值取决于检测系统对应变的灵敏度, 即系统能检测到的试样表面的最小位移。

另一种模型则认为, 声发射率与晶体内可动位错的密度变化有关, 声发射计数率与可动位错密度的关系为:

$$\frac{dN}{dt} = 10^{-4} \frac{d\Lambda_m}{dt} \quad (8-1)$$

式中 $\frac{dN}{dt}$ ——声发射计数率;

Λ_m ——可动位错密度, 可用下式进行计算

$$\Lambda_m = m_p \epsilon_p e^{-\frac{H\epsilon_p}{\sigma}} \quad (8-2)$$

其中 ϵ_p ——塑性变形量;

m_p ——位错增殖系数;

H ——硬化系数;

σ ——作用应力的均方值。

2. 裂纹形成和扩展中的声发射

对于无损检测来说, 裂纹的形成和扩展则是一种更为重要的声发射源。裂纹的形成和扩展与材料的塑性变形有关, 一旦裂纹形成, 材料局部地区的应力集中得到卸载, 声发射便产生。

材料的断裂过程大致可分为裂纹成核、裂纹扩展和最终断裂三个阶段, 这三个阶段都可成为强烈的声发射源。关于裂纹的形成已提出了不少模型, 如位错塞积理论、位错反应理论和位错销毁理论等, 它们都得到了部分实验结果的支持。

理论计算表明, 如果在裂纹形成过程中, 多余的能量全部以弹性应力波的形式释放出来, 则裂纹形成所产生的声发射比单个位错移动产生的声发射至少要大两个数量级。

在微观裂纹扩展成为宏观裂纹之前, 需要经过裂纹的缓慢扩展阶段。理论计算指出, 裂纹扩展所需的能量为裂纹形成所需能量的 100~1000 倍。

裂纹扩展是间断进行的, 大多数金属都具有一定的塑性, 裂纹每向前扩展一步, 都将积蓄的能量释放出来, 使裂纹尖端区域卸载。这样, 裂纹扩展产生的声发射很可能比裂纹形成产生的声发射还大得多。当裂纹扩展到接近临界裂纹长度时, 便开始失稳扩展, 成为快速断裂, 此时的声发射强度则更大。

二、声发射的传播

作为应变能以弹性波的形式释放而产生的声发射波, 与前述的超声波有相似的传播规律。

首先,从传播形式上来看,声发射波在固体介质中也会以纵波、横波、瑞利波(表面波)和板波等各种形式向前传播。

其次,声发射波在传播过程中,由于界面(缺陷、晶粒)的反射还会发生各种波型转换。

此外,声发射波在传播过程中,除由于波前扩展而产生的扩散损失外,还会由于内摩擦及组织界面的散射使其在规定方向传播的声能衰减。造成声波在固体中、尤其是在金属中衰减的原因很多,主要的有散射衰减、黏性衰减、位错运动引起的衰减、铁磁性材料的磁畴壁运动以及残余应力和声场紊乱引起的衰减等。此外,还有由于与电子的相互作用引起的衰减及由其他各种内摩擦引起的衰减。理论上的衰减规律同超声波,此处不再赘述。

若在半无限大固体介质中的某一点产生声发射波,当传播到表面上某一点时,纵波、横波和表面波相继到达,因互相干涉而呈现出复杂的模式(图 8-1)。在实际的声发射检测中,能够把检测对象看成半无限大介质的情况很少,经常遇到的情形是像高压容器壁那样的薄钢板。声发射在薄钢板中以所谓导波(Guided Wave)(图 8-2)的形式向前传播,波在传播过程中,在两个界面上会发生多次反射,每次反射都要发生波型转换,即从声源发出单一频率的波以导波的形式传播后而具有复杂的特性。因此,要处理像声发射这样的过渡现象十分困难。导波的视在传播速度大体上与横波的传播速度相当。

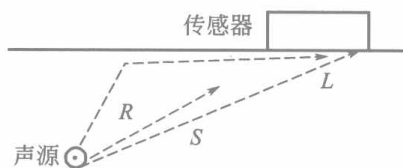


图 8-1 半无限大固体中声发射的传播

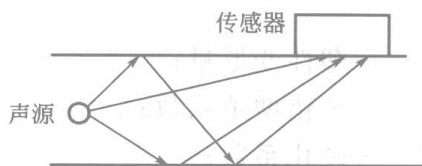


图 8-2 导波的传播

导波传播的另一个特点:频率不同的波因传播速度不同而引起频散现象。假定在声发射源处的波形是一个简单的脉冲,则在有限介质中传播一定距离后,其波形变钝,脉冲变宽并分离为几个脉冲,先后到达表面某一点,如图 8-3 所示。



图 8-3 导波传播引起的波形分离现象

三、声发射检测的基本原理

大多数金属材料的塑性变形和断裂的原始声发射信号一般都很微弱,人耳不能直接听见,需借助灵敏的电子仪器才能检测出来。这种借助电子仪器对声发射信号进行接收、处理、分析显示并以此对声发射源进行定位、定性和定量分析的一系列技术,统称为声发射检测技术。声发射检测的基本原理如图 8-4 所示。

四、声发射检测的特点

与超声、射线、磁粉、渗透和涡流等其他无损检测方法相比,声发射检测具有如下

优点。

① 声发射检测是一种动态无损检测方法。一方面，材料或结构的缺陷本身主动参与了检测过程；另一方面，缺陷只有在外部条件的作用使其内部结构变化的情况下才能被检测到，这是它区别于常规无损检测的最显著的特点。

② 声发射检测可以判断缺陷的严重程度。一个同样大小、同样性

质的缺陷，当它所处的位置和所受的应力状态不同时，其对结构的危害程度也不同，所以，它的声发射特征也有差别。明确了来自缺陷的声发射信号，就可以长期连续地监视缺陷的安全性，这是其他无损检测方法难以办到的。

③ 声发射检测几乎不受材料种类的限制。除极少数材料外，很多金属和非金属材料在一定的条件下都有声发射发生，这就使声发射检测具有广泛的适用性。

④ 声发射检测具有整体性和全局性。检测时不需对被检工件进行扫查，一般也不需要对被检件进行分段、分区检查，而是能对其整体实施大范围的快速检测，检测效率高。一根长达几十、上百米的钢管上的所有缺陷可一次检出。即使对诸如尺寸达 $\phi 20 \times 15\text{m}$ 的压力容器等大型构件的全范围检测，也只需布置若干个 AE 传感器一次完成。

⑤ 检测灵敏度很高。目前可以检测振幅仅为 10^{-14}m 的微小应变，流量仅为 2mL/min 的微小流体泄漏。

⑥ 声发射检测具有全程性和在役性。既可用于检测原材料的性能，也可用于加工过程（如焊接、切削加工过程的刀具破损和工件表面质量的在线监测），以及设备使用与维修过程中的检测。

声发射检测的局限性主要有如下几方面。

① 存在凯塞 (Kaiser) 效应，即在构件所受载荷超过其前次所受载荷之前，该构件不会产生可检测到的声发射信号，也即声发射具有不可逆性。因此，要进行声发射检测，就必须要保证后一次的加载大于前一次加载。这就要求知道构件的受载历史，或在构件第一次受力时就开始进行检测。

应该指出的是，Kaiser 效应并不总是无条件地发生，而是与构件的材料特性、缺陷大小及受载历史等因素有关。在一定条件下，当所加载荷未超过其前次受载时也可能产生声发射，这种现象称为费利西蒂 Felicity 效应，有时也被称作反凯塞效应。重复加载时的声发射起始载荷对原先所加最大载荷之比，称为费利西蒂比。费利西蒂比较好地反映了材料中

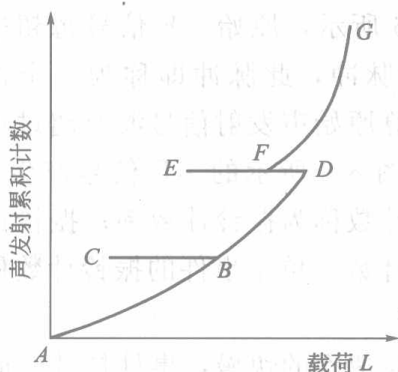


图 8-5 重复加载时的声发射

原先所受损伤或结构缺陷的严重程度，已成为缺陷严重性的重要评定判据。

典型构件在重复加载时的声发射如图 8-5 所示，可见，一般小缺陷在低载荷时表现为凯塞效应，而大缺陷在高载荷时则表现为费利西蒂效应。图中 F 点的载荷与 D 点的载荷大小之比即为其费利西蒂比。

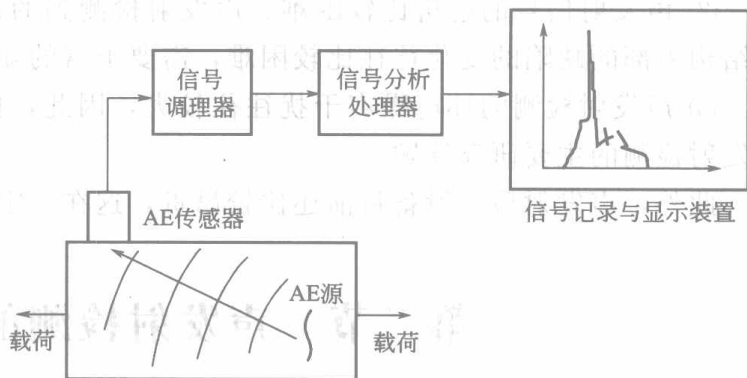


图 8-4 声发射检测的基本原理

② 声发射信号的解析比较困难。声发射检测到的是一些电信号, 根据这些电信号来解释结构内部的缺陷的变化往往比较困难, 需要丰富的知识和其他实验手段的配合。

③ 声发射检测的环境噪声干扰往往较大, 因此, 如何除噪降噪、提高信噪比, 始终是声发射检测的主要研究课题。

此外, 声发射检测设备目前还比较昂贵, 这在一定程度上也限制了其应用。

第二节 声发射检测的技术基础

一、声发射信号的表征

声发射信号是声发射源的信息载体, 检测声发射信号的目的, 就是希望通过声发射信号这个桥梁, 来推断声发射源的部位、性质及其严重程度等方面的信息; 另一方面, 声发射传感器所接收的信号是原始声发射信号经过从声发射源到接收传感器的传播通道的畸变、衰减等而变成的复杂的信号, 如何对这些复杂的信号进行分析处理, 以便得到更多的有用信息, 是信号处理学科研究的重要课题, 也是声发射检测的重要一环。

目前, 对声发射信号的表征方法主要有参数法和谱分析法两种。其中, 参数法表征历史较长, 且已形成标准, 而谱分析法则是近期发展起来的 AE 信号表征新方法。下面对这两种表征方法予以简要讨论, 更详细的论述请参阅声发射或信号处理的专著。

1. 声发射信号的参数法表征

参数法表征是处理突发型信号的经典方法。AE 信号的表征参数主要有事件计数、事件持续时间、振铃计数、上升时间、幅度及幅度分布、峰值振幅、能量及能量分布、有效值电压等 (图 8-6)。

(1) 事件及事件计数 对如图 8-6 所示的脉冲型声发射信号, 经过包络检波 (虚线所示) 后的波形超过阈值电压的部分便形成一个矩形脉冲, 此矩形脉冲即称为一个声发射事件。逐一计数每一个这样的矩形脉冲即为声发射事件计数。单位时间的事件计数称为事件计数率, 其计数的累积则称为事件累积计数, 全部事件计数的总计称为事件总计数。

(2) 振铃及振铃计数 振铃是描述脉冲型 AE 信号的一个特征参量。如图 8-6 所示, 原始 AE 信号每超过一次预置阈值就形成一个脉冲, 此脉冲即称为一个振铃。振铃计数就是逐一计算原始声发射信号波形超过预置阈值电平的脉冲次数。图 8-6 所示的 AE 信号产生 7 个振铃。单位时间的振铃计数称为振铃计数率; 振铃计数的累积称为累积振铃计数。全部振铃计数的总计称为振铃总计数。单个事件的振铃计数称为事件振铃计数或振铃/事件。

(3) 上升时间和事件持续时间 上升时间表征 AE 信号增长速度的快慢, 事件持续时间则表征 AE 信号的历时长短。声发射信号波形包络从超过第一个阈值起到达峰值 (或预置的

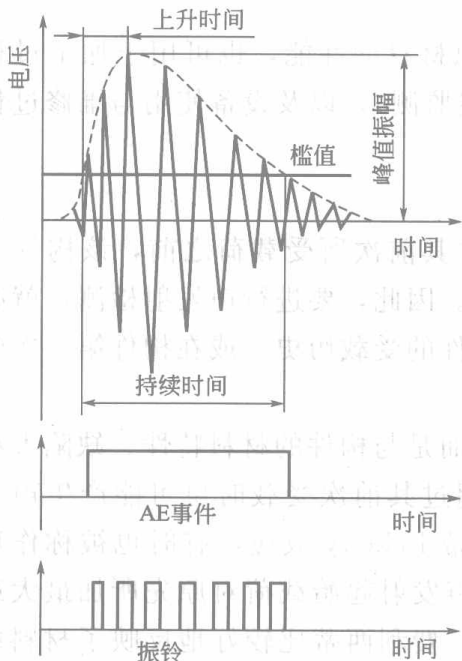


图 8-6 AE 信号的参数法表征

第二个阈值)时的时间间隔称为上升时间。事件持续时间是指单个声发射事件所经历的时间跨度,也就是一个声发射事件信号从第一次超过阈值至最后一次降至阈值的时间。

(4) 幅度及幅度分布 幅度是指声发射信号波形的最大峰值偏移(图 8-6),幅度分布是指事件计数、振铃计数等 AE 信号的特征参量关于幅度的函数分布。幅度及幅度分布被认为是可以更多地反映声发射信息的一种处理方法。

幅度分布有微分型和积分型两种表示方法。图 8-7 所示是指微分型的幅度分布,其一般表达式为:

$$dF(x) = f(x)dx \quad (8-3)$$

式中 $f(x)$ ——幅度分布谱函数。

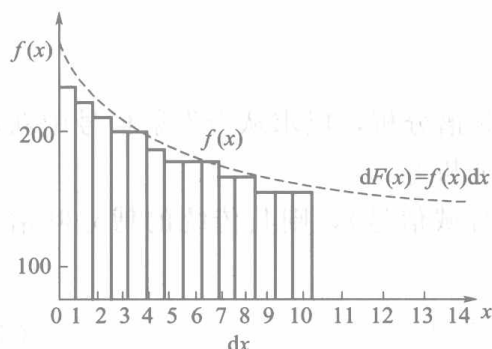


图 8-7 微分型 AE 幅度分布

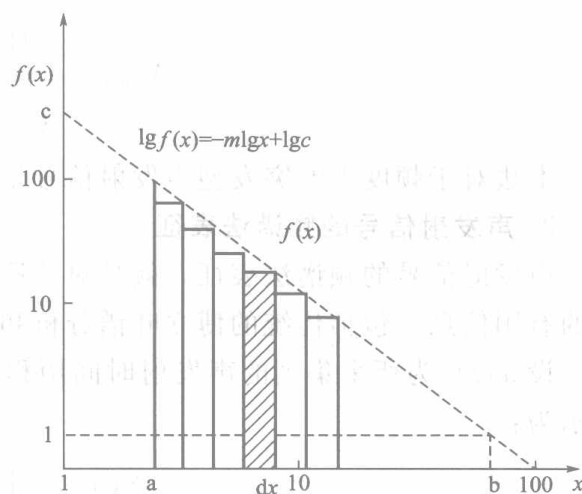


图 8-8 负斜率线性分布谱

试验表明,不同的声发射源具有不同的幅度分布谱,有随幅度增加、计数单调减少的分布谱,但经常遇到的是在比较宽的幅度范围内,以双对数表示为负斜率 m 的线性分布谱,即

$$f(x) = cx^{-m} \quad (8-4)$$

式中, c 和 m 均为常数,用双对数表示式(8-4)即为:

$$\lg f(x) = -m \lg x + \lg c \quad (8-5)$$

该种分布谱的图形如图 8-8 所示。

上述微分型幅度分布在某幅度从 x 到 ∞ 区间的积分称为积分型幅度分布,其定义式为:

$$F(x) = \int_x^{\infty} f(t) dt \quad (8-6)$$

或

$$f(x) = |dF(x)/dx| \quad (8-7)$$

(5) 能量 声发射能量反映声发射源以弹性波的形式所释放的能量,在图 8-6 中,AE 信号包络线与横坐标轴所围区域的面积即表征 AE 信号的能量大小。当然,这里所说的能量仍然是针对仪器的输出信号而言的。瞬态信号的能量定义为:

$$E = \frac{1}{R} \int_0^{\infty} V^2(t) dt \quad (8-8)$$

式中 $V(t)$ ——随时间变化的电压;

R ——电压测量电路的输入阻抗。

如采用数字方法进行计算,则其离散化形式为:

$$E = \frac{\Delta t}{R} \sum_{i=0}^{N-1} V_i^2 \quad (8-9)$$

式中 V_i ——采样点电压；

Δt ——采样的间隔时间；

N ——采样点数。

(6) 有效值电压 有效值电压是表征声发射信号的主要参数之一，它直接与声发射能量相关。由于时间常数大，用普通的交流电压表很难正确地测量声发射信号的有效值电压。但可以由前述的幅度分布来计算有效值电压。若定义以峰值电压为自变量的微分型谱函数为 $N(V_P)$ ，则有效值电压为：

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} V_P^2 N(V_P) dV_P}{\int_0^{\infty} N(V_P) dV_P}} \quad (8-10)$$

本法对于频度大的突发型声发射信号是可行的。

2. 声发射信号的频谱法表征

声发射信号的频谱法表征，就是对 AE 信号进行频谱分析，以求从声发射信号中获取更多的有用信息。包括传统的傅立叶谱分析和现代小波分析等。

设 $x(t)$ 为所采集到的声发射时间历程信号（即时域信号），则其传统的傅立叶谱分析表示为：

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (8-11)$$

由此获得 AE 信号参量随频率变化的二维图形。

当 $x(t) \in L^2(R)$ 时，则 $X(t)$ 的连续小波变换表示为：

$$(W_{\psi})(b, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (8-12)$$

式中， $a, b \in R$ ，且 $a \neq 0$ ， a 称为尺寸因子， b 称为时间因子， $\psi(t)$ 是满足相容性条件的基本小波（母小波）， $\psi(t-b/a)$ 是母小波 $\psi(t)$ 经过平移和伸缩后得到的小波。 $\overline{\psi(t-b/a)}$ 则表示对 $\psi(t-b/a)$ 取复数共轭。

通过式(8-12)的变换运算，由此获得 AE 信号参量随频率和时间变化的三维图形，即 AE 信号的联合时-频分布。关于小波变换的详细讨论，请参阅参考文献 [12]。

二、声发射源定位

确定声发射源的位置是声发射检测中的一项重要工作内容。目前，定位声发射源的方法主要有点定位法和区域定位法两种。它们的本质相同，都是基于声发射源到达不同位置处的 AE 传感器的时间差，当传播速度已知时，进而求得发射源与不同位置处的 AE 传感器的距离差。

1. 点定位法

所谓点定位法，是在被检物表面某一范围内将几个声发射传感器按一定的几何关系布置在固定点上，组成传感器阵列，以便测定出缺陷的所在位置。

测定声发射源发射的声波传播到各个传感器的相对时差（可采用相关分析方法求解，等于互相关函数或互相关系数的峰值所对应的时间 τ 值），将这些相对时差代入满足该阵列几

何关系的一组方程中求解,从而得到该缺陷的位置坐标。

为简化计算,实践中的点定位法通常将传感器按特定的几何图形布置。目前,在声发射检测中,常用的声源点定位法有直线定位法、平面定位法和空间定位法。

(1) 直线定位法(简称线定位)是在一维空间中确定声发射源的位置坐标。

直线定位法的基本原理如图 8-9 所示。设在 A 点处有一个声发射源,为了对这个声发射源进行定位,在 B、C 两点处分别安装传感器 1 和 2,其中传感器 1 距 A 点为 S_1 ,传感器 2 距 A 点为 S_2 。通过相关分析等方法



图 8-9 AE 源直线定位示意

求得信号从声发射源 A 点处分别传向 1、2 两个传感器的时间差 τ_0 ,并假定声发射信号沿直线的传播速度 v 为已知,则有

$$S_2 - S_1 = v\tau_0 \quad (8-13)$$

而 $S_1 + S_2 = S$ 可以直接测量出来,把它与式(8-13)联立求解,即可解得 S_1 、 S_2 的值,这样,即可对声发射源 A 进行较准确的直线定位。

直线定位法常用于对焊缝缺陷的定位、直管道泄漏源的定位等。

(2) 平面定位法是在二维空间(平面)中确定声发射源的位置坐标。

平面定位与前述的直线定位没有本质上的差别,其基本原理是:先通过相关分析等方法求出信号从同一固定的信号源处传播到平面上的不同两点的时间差,在信号的传播速度已知或可测取的情况下,进而求得该信号源到上述两点的距离差,然后再通过一定的数学处理以求得信号源的平面位置。

根据传感器数量和布置方式的不同,平面定位又可进一步细分为三角形定位法、归一化正方形定位法和平面正方形定位法等。

三角形定位法将三个声发射传感器布置成一个三角形,并使声发射源处于该三角形之内。为使计算简便,常将三个传感器布置成正三角形或等腰直角三角形。

归一化正方形定位法将四个传感器置于直角坐标系中的 $(1, 1)$ 、 $(-1, 1)$ 、 $(-1, -1)$ 、 $(1, -1)$ 这四个归一化位置上,来对声源进行定位。本法具有数学表达式简单、对称,易于进行数据处理的特点。

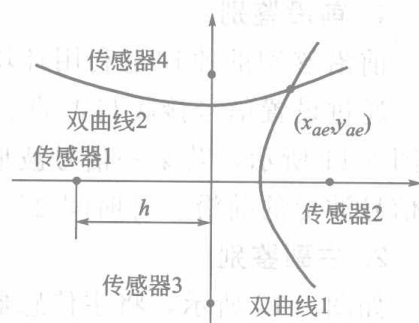


图 8-10 AE 源平面定位示意

平面正方形定位法的原理如图 8-10 所示,将四个传感器布置于直角坐标系中的 $(0, h)$ 、 $(-h, 0)$ 、 $(0, -h)$ 、 $(h, 0)$ 这四个固定点的定位方法。

设声发射源信号到达传感器 1、2 和 3、4 的时间差分别为 Δt_x 和 Δt_y ,当介质的声波传播速度已知为 v 时,则 AE 源到 1、2 及 3、4 距离差分别为:

$$\begin{aligned} \Delta L_x &= \Delta t_x v \\ \Delta L_y &= \Delta t_y v \end{aligned} \quad (8-14)$$

AE 源便为两个双曲线的交点,其位置 (x_{ae}, y_{ae}) 为:

$$x_{ae} = a_1 \sqrt{\frac{(b_1^2 + a_2^2)b_2^2}{d}} \quad (8-15)$$

$$y_{ae} = a_2 \sqrt{\frac{(a_1^2 + b_2^2)b_1^2}{d}} \quad (8-16)$$

式(8-15)和式(8-16)中, $a_1 = \Delta L_x/2$, $a_2 = \Delta L_y/2$, $b_1^2 = h^2 - a_1^2$, $b_2^2 = h^2 - a_2^2$, $d = b_1^2 b_2^2 - a_1^2 a_2^2$

2. 区域定位法

区域定位法又称“查表法”,是将传感器所能覆盖的区域分割成许多正三角形,每个正三角形又分割成六个扇形,每个扇形区域内按已知的时差数据的双曲线分割成许多小区域,并将这些数据存储在计算机中。对于某一未知的声发射源,只要将测得的 AE 信号到达各传感器的时差与计算机内存储的数据相比较,就可以查出声发射源在某三角形中某扇形的某个小区域内。此法的定位精度与点定位法相当。

需要说明的是,点定位法和区域定位法并没有实质上的差别,而且,实际的声发射检测仪中往往已固化有计算程序,操作者只要按指定的步骤进行简单的按键操作即可,所以操作起来还是比较简便快捷的,对操作者的要求也不是很高。

除以上讨论的定位法之外,还有研究人员探索发展了逐次逼近法、人工神经网络等方法,有关这方面的情况,请参阅相关文献资料,此处不再赘述。

三、提高信噪比的措施

声发射检测试验往往是在复杂的环境噪声条件下进行的,因此,如何抑制噪声的影响是声发射检测成功与否的关键所在。在后面将要论及的频域滤波(又称“频率鉴别”)、设置阈值电压(又称“幅度鉴别”)等措施都能在某些情况下有效地抑制噪声的作用,提高信噪比。这些内容将在介绍声发射检测仪的组成时再作讨论,在此先介绍在声发射检测中经常采用的抑制噪声的空间滤波等方法。

所谓空间滤波,就是根据信号与噪声发生源空间位置的关系来抑制噪声的方法,又称空间鉴别。空间滤波的具体措施有前沿鉴别、主副鉴别和符合鉴别等。

1. 前沿鉴别

前沿鉴别的原理是利用环境噪声比一定范围内的声发射信号的前沿上升更缓慢这一特性,通过设置信号接收与否的上升时间控制门,来达到抑制噪声、提高信噪比这一目的。如图 8-11 所示,若某一信号波形的上升时间 $\Delta T \leq \Delta T_0$,则该信号被接收, $Y=1$;反之,若某信号波形的前沿上升时间 $\Delta T > \Delta T_0$,则该信号被拒收, $Y=0$ 。

2. 主副鉴别

如图 8-12 所示,将主传感器 $M_i (i=1, 2, \dots, m)$ 置于要监视的区域内,副传感器 $S_j (j=1, 2, \dots, n)$ 置于要监视的区域外。当副传感器先收到信号时,则将主传感器 M_i 的检测通道门关闭。这样,区域外的噪声即被封闭;若主传感器先接收到信号,则该信号被接收。此即主副鉴别的原理。

3. 符合鉴别

符合鉴别的原理如图 8-13 所示。令声发射源信号传播到传感器 1、2 的时间分别为 T_1 和 T_2 , 设定的符合时间为 ΔT_0 , 当 $|T_1 - T_2| \leq \Delta T_0$ 时,取 $Y=1$,即信号被接收;而若 $|T_1 - T_2| > \Delta T_0$,则取 $Y=0$,即信号被拒收。

4. 载荷控制门

在周期性加载疲劳试验中,除夹头的摩擦噪声外,还有裂纹闭合噪声,即在周期性加载处于低载荷的半周期内裂纹闭合,裂纹面摩擦产生噪声,而疲劳裂纹的扩展往往在高载荷的半周期。所以,为了排除裂纹闭合噪声,检测出裂纹扩展的声发射信号,可使用载荷控制

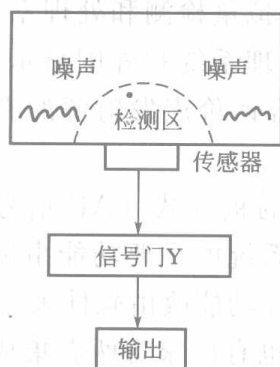


图 8-11 前沿鉴别原理

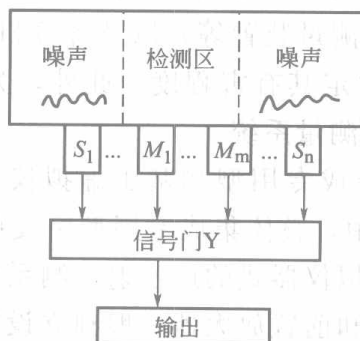


图 8-12 主副鉴别原理

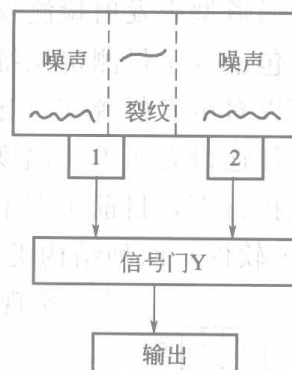


图 8-13 符合鉴别原理

门。把周期性加载信号转换为电信号，用这个周期性电信号的相位控制声发射仪器中的参数计数器的工作，从而达到疲劳裂纹开裂期间测量、闭合期间不测量的目的。

常见噪声抑制方法的原理、特点和适用范围如表 8-1 所示。

表 8-1 噪声抑制方法

方 法	原 理	适 用 范 围
频率鉴别	用频率滤波器限制工作频率范围	低频机械噪声
幅度鉴别	调整固定或浮动检测门槛值	低幅度机电噪声
前沿鉴别	对信号波形设置上升时间滤窗口	来自远区的机械噪声或电脉冲干扰
主副鉴别	用波到达主副传感器的次序及其门电路，排除先到达副传感器的信号，而只采集来自主传感器附近的信号，属空间鉴别	来自特定区域外的机械噪声
符合鉴别	用时差窗口门电路，只采集特定时差范围内的信号，属空间鉴别	来自特定区域外的机械噪声
载荷控制门	用载荷门电路，只采集特定载荷范围内的信号	疲劳试验时的机械噪声
时间门	用时间门电路，只采集特定时间内的信号	点焊时电极或开关噪声
数据滤波	对异常信号设置参数滤波窗口，滤除窗口外的异常数据，包括：前端实时滤波和事后滤波	机械噪声或电磁噪声
其他	差动式传感器、前放一体式传感器、接地、屏蔽、加载销孔预载、隔声材料、示波器观察等	机械噪声或电磁噪声

第三节 声发射检测设备

声发射检测设备是从事声发射检测的工具，分为主要设施和辅助设施两大类。其中，辅助设施主要有模拟声发射源、耦合剂和波导等；而主要设施是指完成 AE 信号的能量转换、并对其采集、分析和处理等任务的功能部件。其中，AE 信号的能量转换由声发射传感器完成，而 AE 信号的采集、分析和处理由前置放大器、滤波器、主放大器和系统主机等功能部件实施。不同的生产厂家，赋予它们不同的形式。

根据同时能采集的 AE 信号通道的多少，声发射检测仪器可分为单通道型和多通道型两类。

单通道型声发射检测仪主要由传感器、前置放大器、滤波器、主放大器、门电路、声发射率计数器、总数计数器以及数模转换器等基本部分组成。此外，根据需要还可增加峰值幅度、有效值电压、能量等功能插件，以及打印、显示输出等接口部件。

多通道型声发射检测仪器，除具有单通道声发射检测仪器的模拟量检测和处理系统外，通常还包括数字量测定系统（时差测量装置等）以及计算机数据处理系统和外围显示系统。系统可以对声发射源实施定位、评定其有害程度。此外，为了综合评价声发射源的有害程度，往往还设有压力、温度等参量测量系统。

主机方面，目前主要有整体集成专用型和基于虚拟仪器概念的板卡式（AE 信号采集板/卡+软件）两种结构类型。其中，整体集成专用型声发射检测系统的主要功能由硬件来实现，而虚拟仪器式的声发射检测系统的很多功能改由软件来完成。

传感器和前置放大器一般独立设置，但也有厂家将两者集成为一体，制成前置放大器内置的声发射传感器，从而大大提高了系统的抗干扰能力。

以下对声发射传感器、前置放大器、滤波器、主放大器、阈值整形电路、模拟声发射源、耦合剂和波导予以简要介绍。

1. 声发射传感器

(1) 声发射传感器的种类 声发射传感器是将声发射能转换为电信号的装置，其工作原理与前述的压电超声波传感器基本相同。

声发射传感器一般由壳体、保护膜、压电元件、阻尼块、连接导线和高频插座等几部分组成，其典型的简化结构如图 8-14 所示。

压电元件通常采用锆钛酸铅、钛酸钡和铌酸锂等。

目前，声发射传感器主要有高灵敏度传感器、宽频带传感器、高温传感器、差动传感器、微型传感器、磁吸附传感器、低频抑制传感器以及电容式传感器等类型。应根据不同的检测目的和使用环境而选用不同的结构和性能的传感器。常见声发射传感器的类型、性能特点和适用范围列于表 8-2，以供选用时参考。

表 8-2 常见声发射传感器的类型、特点和适用范围

类 型	特 点	适 用 范 围
单端谐振式传感器	谐振频率多位于 50~300kHz 内，典型应用为 150kHz，主要取决于晶片的厚度，敏感于位移、速度；响应频带窄，波形畸变大，但灵敏度高，操作简便，价格便宜，适于大量常规检测	大多数材料研究和构件的无损检测
宽频带传感器	响应频率约为 100~1000kHz，取决于晶片的尺寸和结构设计；灵敏度低于谐振式传感器，幅频特性不甚理想，但操作简便，适于多数宽频带检测	频谱分析、波形分析等信号类型或噪声的鉴别
锥型传感器	100~1500kHz 内，频率响应平坦，灵敏度高于宽频带传感器。采用微型晶片和大背衬结构，尺寸大，操作不便，适于位移测量	源波形分析、频谱分析；也作为传感器校准的二级标准
差动传感器	由两个压电晶片的正负极差接而成，输出差动信号；与单端式相比，灵敏度较低，但对共模电干扰信号有好的抑制能力，适于强电磁噪声环境	强电磁干扰环境下，可替代单端式传感器
高温传感器	采用居里点温度高的晶片，如铌酸锂晶片；使用温度可达 540℃	高温环境下的检测，如在线反应容器
电容传感器	一种直流偏置的静电式位移传感器；直到 3MHz，频率响应平坦，物理意义明确，适于表面法向位移的定量测量，但操作不便，灵敏度较低，约为 $1\times 10^{-12}\text{m}$ ，适于特殊应用	波形定量分析或传感器绝对灵敏度校准
光学传感器	属激光干涉计量的一种应用，直到 20MHz，频率响应平坦，并具有非接触、点测量等特点，适于表面垂直位移的定量测量，但操作不便，灵敏度低，约为 $1\times 10^{-11}\text{m}$ ，适于特殊应用	仅用于实验室定量分析，也可作为标准位移传感器

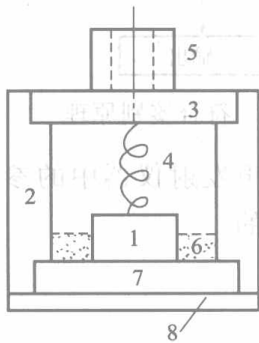


图 8-14 单端谐振式声发射传感器

- 1—压电元件；2—壳体；
- 3—上盖；4—导线；
- 5—高频插座；6—吸收剂；
- 7—底座；8—保护膜

(2) 传感器的安装固定 传感器表面与试件表面之间良好的声耦合为传感器安装的基本要求。试件的表面须平整和清洁,松散的涂层和氧化皮应清除,粗糙表面应打磨,表面油污或多余物要清洗。对半径大于 150mm 的曲面可看成平面,而对小半径曲面应采取适当措施,如可采用转接耦合块或小直径传感器。

对于接触界面,应填充声耦合剂,以保证良好的声传输。耦合剂不宜涂得过多或过少,耦合层应尽可能薄,表面要充分浸湿。耦合剂的类型,对声耦合效果影响甚少,多采用真空脂、凡士林、黄油、快干胶及其他超声耦合剂。对高温检测,也可采用高真空脂、水玻璃及陶瓷等。但是,须考虑耦合剂与试件材料的相容性,即不得腐蚀或损伤试件材料表面。

传感器的固定多用机械压缩来实现。常用固定夹具包括松紧带、胶带、弹簧夹、磁性固定棒、紧固螺钉等。所加之力,应尽可能大一些,约为 0.7MPa。

一些快干式粘接剂,包括快干胶、环氧树脂,既可固定传感器,又起着声耦合作用,适于长期监视的应用,但因安装简便也可用于短期监视。这类耦合剂可使传感器同时接收对表面的垂直和横向振动成分,故其耦合效率高于流体耦合剂。但是,在高应变、高温环境下其脱黏问题应予以注意。

在高温或低温检测中,多采用由金属或陶瓷制成的波导杆转接器。它是通过焊接或加压方式固定于试件表面,可使试件表面高温或低温端的声发射波传输到常温端的传感器。这一结构会引起一定的传输衰减和波形畸变,其接触面为主要的衰减因素。

2. 前置放大器

传感器的输出信号电压有时为微伏数量级,且其输出阻抗较高。若将这样微弱的信号直接经过长距离接至检测仪主机,则必定会降低信噪比,因此,靠近传感器设置前置放大器对传感器的输出信号进行阻抗变换和放大(放大 40~60dB)后,再经高频同轴电缆长距离传输给信号处理单元,这样可大大抑制噪声的干扰,提高检测的信噪比。

传感器的输出信号有时过大,因此要求前置放大器具有抗电冲击和强阻塞恢复的能力,并需具有比较大的输出动态范围。

前置放大器一个最重要的技术指标是它的噪声电平,一般应小于 $10\mu\text{V}$,对于某些特殊用途的前置放大器,要求其噪声电平小于 $2\mu\text{V}$ 。

单端传感器要配用单端前置放大器,差动传感器要配用差动输入前置放大器。后者的抗共模干扰的能力较强。

前置放大器一般采用 50kHz~2MHz 的宽频带放大电路,且要求其在通频带内的增益的变动量不超过 3dB。为抑制噪声还往往插入低通、高通或带通滤波器。这种电路结构的前置放大器适应性强,应用较普遍。但也有采用调谐或电荷放大电路结构的前置放大器。表 8-3 所示为国内外几种前置放大器的主要性能指标。

3. 滤波器

在声发射检测工作中,为了抑制噪声的影响而在整个电路系统的适当位置插入滤波器,用以选择合适的“频率窗口”。滤波器的工作频率要根据环境噪声及材料本身的声发射信号的频率特性来确定,通常在 60~500kHz 范围内选择,并应注意与传感器的谐振频率相匹配。滤波器可为有源也可为无源,且一般都要求阻带衰减大于 -24 分贝/倍频程。

4. 主放大器

主放大器一般要求具有 40~60dB 的增益和 50kHz~2MHz 的工作频带宽度,且在整个工作频带内增益的变化量不超过 $\pm 3\text{dB}$ 。此外,还要求其具有一定的负载能力和较大的动态范围。

表 8-3 几种前置放大器的性能指标

型 号		SAP-1 单端	DAP-1 单端、差动	SF1-1 单端	2367 单端	1801 单端、差动
性 能						
-3dB 带宽		15kHz~2MHz	20kHz~2MHz	70~300kHz	10kHz~2MHz	20kHz~2MHz
增益/dB		40±0.5	40±1	46	40~46	40±1
噪声电平/ μ V	输入短路	<4.5	<5.5	≤5	—	<5
	带传感器	<5.5	<6.5			
输入阻抗		1M Ω /120pF	60k Ω /50pF	500k Ω	50k Ω /29pF	20k Ω /30pF
动态范围		6V _{p-p}	7V _{p-p}	7.8V _{p-p}	±6V	10V _{p-p}
共模抑制比			60dB			60dB

5. 阈值整形器

为剔除背景噪声而设置适当的阈值电压，低于所设置的阈值电压的信号被剔除，高于阈值电压的信号形成振铃脉冲或事件脉冲。

阈值电压有固定阈值和浮动阈值电压两种。对于固定阈值电压，有的仪器只设置一档（一般为 1V），有的仪器设置多挡，在 0.1~3V 范围内可调。浮动的阈值电压随背景噪声的变化而浮动，如图 8-15 所示，使仪器能最大限度地检测到真正有用的声发射信号而基本上不受噪声起伏的影响。

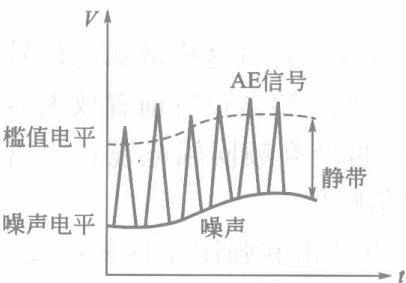


图 8-15 浮动阈值随噪声电平的变化

关于表征参数的计数部分和声发射源定位系统，有兴趣的读者可参考其他有关文献，在此不作更多的讨论。

6. 模拟声发射源

声发射检测中，需要对介质的传播特性、AE 检测系统的特性和检测灵敏度等进行标定，这就要用到模拟声发射源。

关于模拟声发射源目前还没有达成广泛的共识，不同文献先后提出的模拟声发射源可分为噪声源、连续波源和脉冲波源三大类。属于噪声源的有氦气喷射、应力腐蚀和金镉合金相变等；连续波源可以由压电换能器、电磁超声换能器和磁致伸缩换能器等产生；脉冲源可以由电火花、玻璃毛细管破裂、铅笔芯断裂、落球和激光脉冲等产生。

目前，铅芯折断源应用最为普遍，并已进入部分 AE 检测标准（如 ASTM E976—84）中，作为标准的模拟 AE 源。

7. 耦合剂

为了减小传感器与被检工件结合处的 AE 信号能量衰减，在安装 AE 传感器时，除要求安装面有较高的刚度和表面质量（表面粗糙度数值较小）外，还需在传感器与安装表面之间涂抹一定厚度的耦合剂，提高声耦合效果。

8. 波导

当被检部位不易接近或测试环境较恶劣（温度过高、腐蚀等）时，可在传感器与被检部位之间加接波导，用以将工件被检部位的 AE 信号传出。用作波导的声传播介质可以是钢、铝或其他材料制成的丝、棒、板和块体等。

第四节 声发射检测的应用

声发射技术广泛应用于航空、航天、石油化工、交通运输、机械制造、建筑、水利水电工程、矿山开采、电力等行业。并应用于材料性能研究、压力容器检测、金属及复合结构的完整性评估、管道和阀门的泄漏检测、建筑结构（房屋、桥梁、隧道、大坝、矿井、露天边坡等）的稳定性及安全监测、大型变压器局部放电监测、绝缘子压接过程监测、飞机结构疲劳检测、大型机械设备故障诊断、山体滑坡安全监测、地震监测、木材干燥过程监测等领域。随着研究的深入，声发射技术的应用范围还将不断拓展。

一、在材料研究中的应用

声发射技术在材料研究中的应用开展得最早、研究得最多，同时，它也是将这一技术应用于实际工程结构的安全性监测与评价的基础。

1. 影响材料声发射特性的因素

声发射技术的应用均以材料的声发射特性为基础。不同材料的声发射特性差异很大，即使对于同一种材料，影响声发射特性的因素也十分复杂，如热处理状态、组织结构、试样形状、加载方式、受载历史、温度、环境、气氛等。对同一试样作试验，在同样的内部条件和外部条件下，由于试样中的声发射源不同，也表现出不同的声发射特性。因此，对材料声发射特性的全面了解尚需进行大量的研究工作，就已经掌握的情况来看，影响材料声发射信号强度的因素大致如表 8-4 所示。

表 8-4 影响材料声发射信号强度的因素

因素类别	产生高幅度信号的因素	产生低幅度信号的因素
材料特性	高强度材料、各向异性材料、不均匀材料、铸件、粗晶粒、马氏体相变、辐照过的材料	低强度材料、各向同性材料、均匀材料、锻件、细晶、扩散性相变、未辐照过的材料
试验条件	高应变速率、厚断面、高温	低应变速率、薄断面、低温
变形和断裂方式	孪生变形、解理型断裂、有缺陷材料、裂纹扩展、复合材料的纤维断裂	非孪生变形、剪切性断裂、无缺陷材料、塑性变形、复合材料的树脂断裂

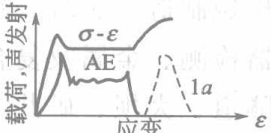
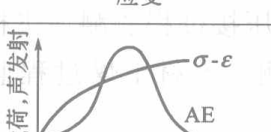
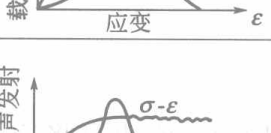
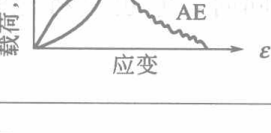
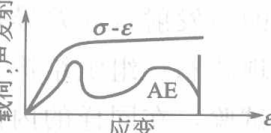
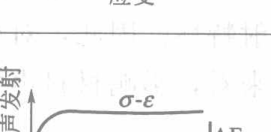
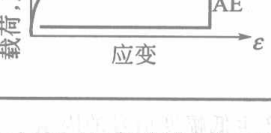
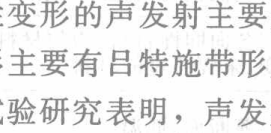
2. 塑性变形的声发射

（1）塑性变形的声发射特性 金属试样在拉伸过程中的塑性变形的声发射通常有两种类型，即连续型声发射和突发型声发射。其中，连续型声发射是幅度低而连续出现、类似背景噪声的声发射，这种类型的声发射在塑性变形量较小时出现。当塑性变形增大时，连续型声发射的幅度也增大，而且，在材料屈服时，连续型声发射的幅度达到最大值。在屈服后，随着应变的增大，连续型声发射的幅度减小，而在接近破坏时，被突发型声发射所取代。突发型声发射是突然地发生且信号幅度一般比连续型声发射高。突发型声发射主要与显微裂纹的形成有关。

金属材料塑性变形机构是各种各样的，而且受材料、热处理、实验条件等各种因素的影响，使得与塑性变形有关的声发射特性也各不相同。上述两种类型的声发射也是相对的，不能截然分开。在实际试验中，往往视不同的塑性变形机构而观察到连续型和突发型分量同时出现。因此，塑性变形的声发射特性必须与塑性变形的机构结合起来研究。

塑性变形的声发射图形可以分为如表 8-5 所示的五种类型。

表 8-5 金属塑性变形的声发射图形

类型		图形	声发射类型	声发射源	典型材料
1	1a		连续	变形带形成和传播	碳钢、工业纯铁
	1b		连续+突发	珠光体中碳化物层断裂	碳钢
2	2a		连续	均匀变形	面心立方金属、高温下的碳钢、铝合金
	2b		突发	孪晶	锡、锌
3			连续	类型 2+变形带形成和传播	黄铜、铝镁合金、铝锌镁合金、高温下的碳钢、镍合金
4	4a		连续	类型 2+微观不均匀变形	铝铜镁和铝锌镁合金、铜合金
	4b			类型 2+孪晶	钛和钛合金
5			脉冲	滑移距离极短	细晶粒钢、冷加工金属、奥氏体钢

塑性变形的声发射主要是局部塑性变形的不均匀性和微观屈服引起的，这种局部快速不均匀变形主要有吕特施带形成、鲍兴格不均匀变形、孪生、硬化型合金中第二相的变形和断裂等。试验研究表明，声发射可确定吕特施带开始形成的部位和布满整个试样时的时机，成为研究金属塑性变形的有力工具。

(2) 凯塞效应及其影响因素 在塑性变形阶段，绝大多数材料都呈现出凯塞效应。但前已指出，凯塞效应只是近似的，其影响因素也很复杂，如材料的合金成分、加载速度、试验温度等。实际中，绝大多数材料的费利西蒂比都小于 1，有的材料在某些试验条件下甚至根本不存在凯塞效应。

3. 断裂分析

断裂力学的观点认为，结构的危险性是由裂纹尖端的应力强度因子 K 所控制的，而 K 是唯一把裂纹尺寸、受力方式和结构形状联系起来的参数。试验研究表明，带裂纹结构的声发射与裂纹尖端的应力强度因子 K 之间存在如下的密切关系：

$$N = AK^m \tag{8-17}$$

式中 N ——声发射总数；

K ——应力强度因子。

需注意的是，以上结论是用试样试验得出的，要将此结论推广到实际的工程结构，目前仍有困难。由于声发射检测的影响因素很多，因此，即使将由一些试样得出的结论推广至另一些试样中也得小心从事。表 8-6 是在压力容器爆破试验中用声发射预报开裂压力和爆破压力的实验结果，从中可以看到预报值与实测值符合得很好。

表 8-6 用声发射预报压力容器的开裂压力和爆破压力

容器编号	材料牌号	外径 /mm	壁厚 /mm	裂缝长 /mm	裂缝深 /mm	开裂压力/kgf·mm ⁻² ①		爆破压力/kgf·mm ⁻²		
						计算值	预报值	计算	预报	实测
1	20 钢	159	6	100	5		137	194	188	196
2	15MnV	200	6	100	6	47	60	126	115	125
3	14MnMoVB	200	6	61.5	6	84	88	202	206	206
4	14MnMoVB	200	6	99.3	6	44	40	140	140	144

① 1kgf/mm²=0.98kPa。

4. 疲劳断裂的监视

构件在交变载荷作用下的破坏是最常见的故障形式。由于交变载荷的作用，裂纹不断扩展。疲劳裂纹的扩展通常有三个阶段：①起始扩展阶段；②减速扩展阶段；③加速扩展阶段。扩展速率（每一个载荷循环中裂纹的扩展量）与作用的应力强度因子 K 之间有如图 8-16 所示的关系。图中， ΔK 为应力强度因子范围， $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ 。 ΔK_{th} 称为疲劳裂纹扩展的门槛值。

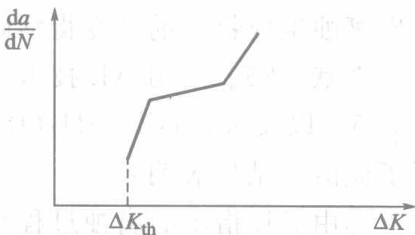


图 8-16 疲劳裂纹扩展速率与应力强度因子范围的关系

有研究表明，用声发射连续监视疲劳裂纹是可行的。在某些情况下，还可用以预测被测构件的剩余寿命。

5. 表面涂层的性能检测与评定

涂层因具有耐磨、抗蚀等特殊性能而在表面工程领域获得了越来越广泛的应用，涂层性能的检测与评定也随之成为材料科学与工程中的研究热点之一。

对涂层的性能检测与评定有多种方法，声发射法因其无损且能实施全过程监测而备受青睐，AE 技术在表面涂层性能（如耐磨性能、脆性等）的检测与表征、涂层与基体的结合强度的检测与评定方面都有应用。

文献 [19] 采用电弧喷涂、火焰喷涂和激光熔覆方法，在低合金钢管基体表面制备了多种涂层，采用四点弯曲试验法评价涂层与基体的黏结强度。用 AE 方法监测四点弯曲试验全过程，并用金相显微镜对四点弯曲试验后的涂层结构进行了分析。结果表明，AE 技术的监测结果与金相显微分析得出的结果符合得很好（表 8-7），说明 AE 技术可用于涂层与基体的结合性能的检测与评定。

表 8-7 涂层与基体结合强度的金相显微分析和 AE 法监测结果对比

涂层材料牌号	成分(wt)/%	涂层制备工艺	金相显微分析结果(剥离数)	AE 监测结果(剥离数)
Amperit526	83%WC,17%Co	HVOF	0	1
Metco3007	80%Cr3C2,%16Ni4Cr	HVOF	2	3
Metcoloy2	Fe12.4Cr0.6Ni0.4Mn0.4Si0.36C	HVOF	3	3
Metcoloy2	Fe12.4Cr0.6Ni0.4Mn0.4Si0.36C	电弧,载气空气	7	7
Metcoloy2	Fe12.4Cr0.6Ni0.4Mn0.4Si0.36C	电弧,载气 N ₂	3	3
80Ni20Al	80%Ni,20%Al	电弧,载气空气	3	3
50%Metcoloy2+50%80Ni20Al		电弧,空气载气	2	2
50%Metcoloy2+50%80Ni20Al		电弧,载气 N ₂	2	2
50%Metcoloy2+50%80Ni20Al		电弧,载气空气	3	3

6. 材料的腐蚀特性表征及腐蚀过程监测

作为材料三大失效方式之一, 腐蚀所造成的危害和损失十分巨大。据有关国家统计, 腐蚀造成的经济损失可能高达其国民生产总值的 4%。因此, 腐蚀的监测与防护成为材料研究领域的一个重要发展方向。AE 技术以其全局监测和全过程监测等诸多优点, 在材料的腐蚀性能评价及腐蚀过程监测等方面也获得了越来越广泛的关注。

腐蚀过程产生 AE 信号的机制是多种多样的: 腐蚀生成物的剥落或摩擦、腐蚀产生的氢气泡的破裂、表面钝化膜的破裂等, 它们都可能产生能够探测到的 AE 信号, 为腐蚀的 AE 法监测创造了条件。

研究表明: 铝合金材料加速腐蚀过程中的 AE 信号, 其频率范围较宽, 在 100~800kHz 的频率范围内都有能量分布, 但其 AE 信号的幅度要远小于断铅所产生的模拟 AE 信号。试验还发现, AE 信号的变化过程与腐蚀的发生和发展过程非常吻合, 且 AE 信号能远在肉眼发现腐蚀生成物之前就变得活跃, 说明 AE 技术能有效地用于腐蚀损伤的早期监测。

文献 [26] 采用 AE 技术, 对 Q235 钢分别在 $w(\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$ 为 10.0%、 $w(\text{NaCl})$ 为 3.5% 以及 $w(\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$ 为 10.8% + $w(\text{NH}_4\text{Cl})$ 为 0.05% 三种溶液中的点蚀过程进行了监测。结果表明:

①由 AE 指示的腐蚀过程与由点蚀的基本原理推证的过程相吻合, 表明声发射技术能及时发现低碳钢的腐蚀损伤; ②点蚀过程由 AE 信号较少的初始腐蚀期、声发射信号增加很快的快速腐蚀期和声发射速率增加变缓的稳定腐蚀期三个阶段组成; ③初始腐蚀期的 AE 信号, 类型 1 占主体, 由单个氢气泡破裂引起, 其幅度主要为 30~40dB, 能量和脉冲计数小。在快速腐蚀期, 信号类型 2 占主体, 信号由多个氢气泡同时发生破裂或者腐蚀生成物的摩擦引起。这种类型信号的幅度主要为 40~50dB, 能量和脉冲计数大。在稳定腐蚀期, 信号类型 3 占主体。信号类型 3 主要由试件表面钝化膜的破裂或者腐蚀生成物的剥离引起, 虽然发生的频率变慢, 但幅度集中在 50dB 以上。图 8-17 所示是 Q235 点蚀过程的典型声发射信号波形。

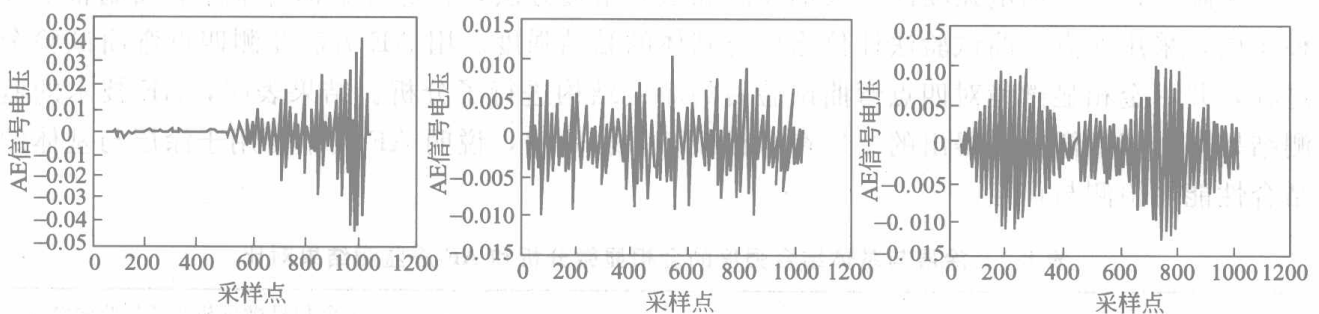


图 8-17 Q235 钢点蚀过程的 AE 信号

二、焊接过程监测和焊缝质量的检测与评定

用声发射监视焊接过程、检测与评价焊缝的质量是声发射技术的重要应用之一。

焊接过程中的电弧燃烧、药皮熔滴和金属材料的受力变形、相变、结晶凝固、位错运动以及裂纹的产生与扩展等事件都伴随着能量的释放, 均会产生声发射信号, 且不同的机理所产生的声发射信号特征不同。因此, 可以通过分析检测到的声发射信号特征来监测焊接质量。

采用声发射技术对焊接过程实施在线监测、实时评价焊接接头的完整性并确定缺陷的位置具有较重要的实用价值。由于在焊接时能及时检查出缺陷, 对某些焊接方法 (如电阻点

焊)还可以反馈控制焊接参数,从而可以避免缺陷产生。在多层熔化焊时,应用声发射实时检验则更有意义。因为,如果最初几道焊缝就有缺陷,而待整条焊缝焊完后再用超声或射线进行检查,则会浪费大量的材料及工时。有些结构尺寸很大,其焊缝可能长达几百米、上千米,如果用超声或其他方法检验,则检验的成本会明显提高(可能占构件总成本的5%)。如果先采用声发射源定位技术,则可以缩小用超声或射线检查的面积,从而可大大降低检测成本。因此,焊接件的质量监控与评价始终是声发射技术的研究重点之一。

此外,焊缝中如果存在裂纹等缺陷,则在焊缝的冷却过程中或当其受到载荷作用时,裂纹等缺陷的扩展也会产生声发射信号,为采用声发射技术检测焊缝焊接后的质量创造了条件。

人们对焊接裂纹的声发射检测进行了广泛的研究,表8-8所示是焊接裂纹的分类和声发射技术的应用进展情况。

1. 焊接质量声发射监控的特点

用声发射技术监控焊接质量具有以下特点:

- ① 焊缝和缺陷本身就是强的声发射源,因而检测过程中不需外部加载;
- ② 焊接过程中存在着强烈的噪声源,因此,如何抑制噪声、提高信噪比是焊接质量声发射监控的一个研究重点,也是声发射检测成败的关键;
- ③ 焊接检测的对象通常处于高温状态,因此,检测时应选用高温传感器或使用波导杆;
- ④ 可把焊缝看成一条线,采用一维线定位即可满足声发射源定位的需要,从而可简化测试仪器。

2. 焊接时的声发射特性

前已述及,大多数焊接方法都存在着强烈的背景噪声,使探测真正来自缺陷的声发射信号比较困难。因此,应用声发射技术检测焊接质量时,其基本任务就是要从强烈的背景噪声中分离出缺陷产生和扩展的有用的声发射信号。为此必须研究焊接时有用的声发射信号和各种噪声的特性,以便更好地排除噪声。表8-9是这方面的研究成果。

表 8-8 焊接裂纹的分类及声发射检测的进展

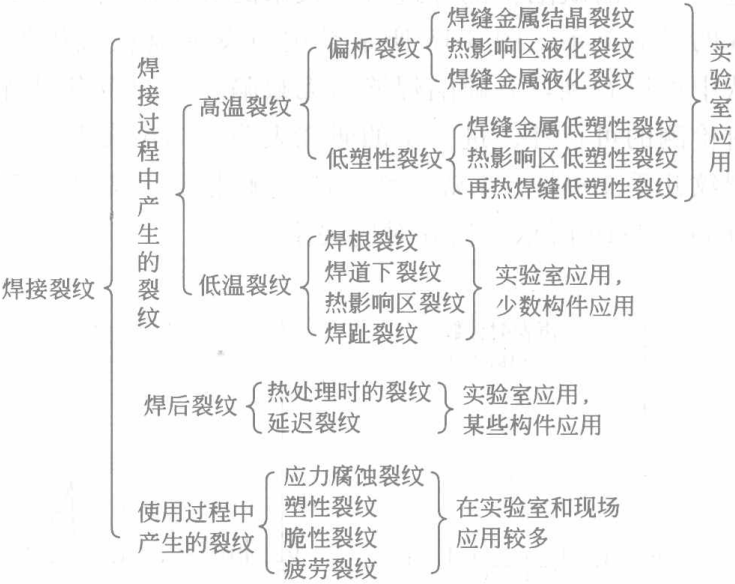


表 8-9 不同焊接方法的噪声和声发射电平

焊接方法或缺陷	信号电平/dB	焊接方法或缺陷	信号电平/dB
保护气流	0~3	用带药皮的焊条焊接	35~40
保护气流及电弧	4~9	熔剂层下焊接	30~40
母材熔化和结晶	15~20	二氧化碳保护气体焊	42~47
母材和填料的熔化和结晶	20~26	生产现场噪声	0~40
焊缝表面形成氧化膜	30~35	缺陷形成	50~52

3. 焊接过程的监视

(1) 氩弧焊 为了探讨用声发射技术监控氩弧焊焊接过程的可行性,人们先后对核反应堆燃料棒封头的焊接质量的监视、汽轮机转子焊接质量的控制、输送管道和其他零件氩弧焊过程产生的缺陷检测等进行了大量的实验研究,结果表明,声发射特性与焊缝质量之间有很好的对应关系。图 8-18 所示是用声发射监视气体保护钨极手工多道焊接过程的实测结果。从中可以看到,有缺陷焊缝与无缺陷焊缝的声发射特性之间有明显的差别,这就说明了声发射检测的可行性。进一步的研究表明,用声发射方法检验氩弧焊中各种缺陷的检出率分别为裂纹几乎 100%、未焊透约 75%、疏松和钨夹渣 $\leq 5\%$,而且,声发射参数与裂纹长度之间有如图 8-19 所示的良好对应关系。

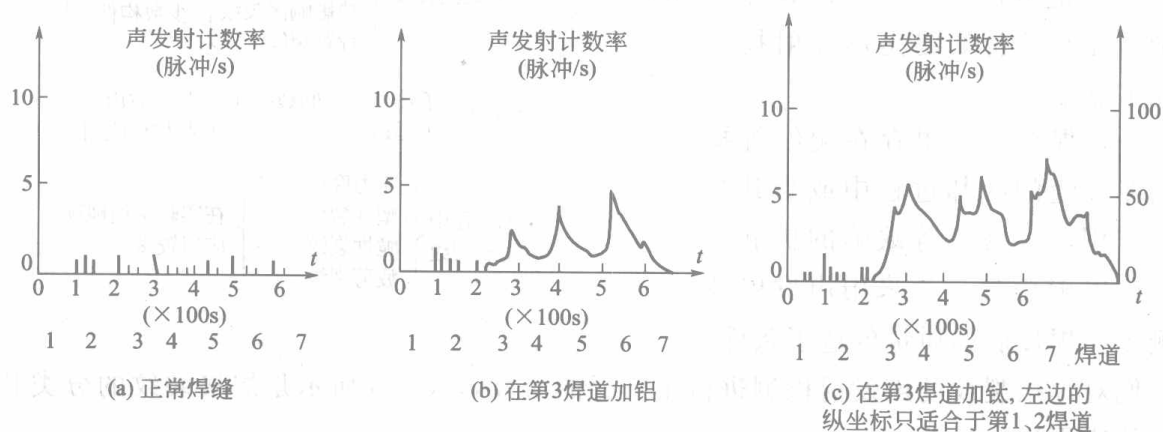


图 8-18 氩弧焊的声发射

(2) 电子束焊接 是在真空箱中进行的,一旦焊成零件,而要在有缺陷的地方进行补焊则比较困难。所以,应用声发射技术实时监视电子束焊接接头中的缺陷具有十分重要的意义。

最早用声发射监视电子束焊接质量的是钼和铌合金的焊接,初步的尝试表明,电子束焊接过程噪声小,易于实现声发射监视。

在工厂生产条件下进一步研究了电子束焊接的声发射监视,结果表明:有缺陷和无缺陷试样的声发射参数差别很大,声发射曲线也存在明显的差异。在焊接开始后约十五分钟,声发射就可判断出焊缝中是否存在裂纹,以便在不打开真空室的条件下采取补救措施。

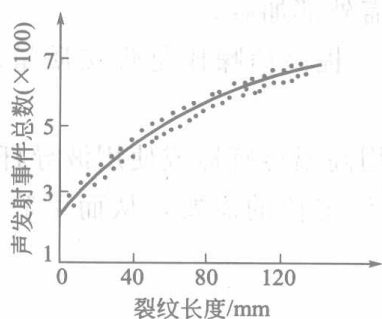


图 8-19 声发射事件总数随裂纹长度的变化

(3) 电阻点焊 是在低电压和高电流强度的脉冲电流作用下使两个零件接触加热而形成焊接金属的熔化焊核,断电后,两极上仍保持焊接压力,使焊接金属冷却凝固的焊接过程。研究结果表明,点焊时的声发射源和干扰源如表 8-10 所示,各自的特性如表 8-11 所示。

表 8-10 点焊时的声发射源和干扰源

声 发 射 源	干 扰 源
塑性变形、焊接熔池的运动、金属飞溅、液态溶核的凝固、热裂纹、相变、冷裂纹	电磁干扰、焊机机械噪声、电气干扰、氧化、渣子、焊接零件之间或零件与把手之间的摩擦、泵和冷却水

表 8-11 电焊时声发射源和噪声源的特性

声 源	特 性
电磁干扰	发生在通断电时,信号频率高、幅度大,对特定的焊机几乎不变
机械干扰和摩擦噪声	在电极运动和加压时产生,低频成分较多,信号幅度大
焊接熔池中液态金属的运动	发生在通电熔化时,是要检测的声发射信号,信号幅度小
焊点和周围金属的塑性变形	熔核冷却凝固时发生,信号幅度小,是要检测的声发射信号
飞溅	发生在焊点熔化和加压时,信号幅度大
熔核中的裂纹	熔核冷却时发生,信号幅度中等
熔核中的相变	熔核冷却时发生,信号幅度大
泵和水流噪声	信号频率低、幅度小

电阻点焊不同于其他焊接方法,为了检测焊点质量,必须了解点焊的整个过程,从而设计控制点焊质量的声发射仪。但至今还没有一个完整的模型能够描述焊点形成的动态过程。根据点焊时塑性变形的声发射很小、而裂纹信号的幅度要比塑性变形大且出现的时间也晚于塑性变形这一特点,为了达到有效地消除噪声的目的,可将频率鉴别和幅度鉴别结合起来应用。

4. 焊后裂纹的监视

与焊接过程相比,焊后裂纹的声发射监视具有更大的优越性,其困难所在是如何区分焊缝本身的裂纹和焊渣的裂纹。因此,对于没有焊渣的焊道或敲掉焊渣后的焊道进行声发射监视更加有效。

焊后裂纹主要包括热处理裂纹和延迟裂纹两种,对这两种裂纹的声发射特性都已进行过研究。将镍基沉淀硬化高温合金 Rene'41 圆形镶片焊接在 304 不锈钢底板上的热处理裂纹的实验研究表明,焊后裂纹的产生和扩展过程可以分为三个阶段:①裂纹开始,即亚临界事件;②裂纹稳定扩展;③裂纹失稳扩展。其中,前两个阶段的声发射特性具有电平低而发射幅度大的特点,而第三个阶段则是高电平的声发射。

人们用插销试验研究氢致延迟裂纹的结果表明,延迟断裂过程可以分为四个阶段:①孕育期,通常从试验开始到出现第一个声发射信号时为止;②裂纹慢扩展期,这一阶段占据试验大部分时间,其时间长短与氢含量有关,从十多分钟到数小时不等;在这一阶段时有声发射发生,每分钟的声发射计数约 10 次;③快速扩展期,在此阶段声发射信号频繁出现,每分钟的声发射计数可达 10^3 ,裂纹扩展速度显著增大;这一阶段只占几分钟;④瞬时拉断,这是一个瞬时发生的过程,此间的声发射计数可达很高的数值。

三、切削加工过程的在线监测

随着切削加工自动化程度和加工精度的提高,加工过程的在线监测受到越来越多的关注。可采用的监测参量有切削力、切削热、振动和声音等,其中,AE 技术以其灵敏、可靠等诸多优点而备受青睐。AE 技术在金属、木材、玻璃等材料的各种精度等级的加工过程中都有应用,在精密与超精加工过程监测方面,AE 技术更是独具优势。

AE 技术用于切削加工过程的监测主要表现在以下两个方面:①对切削刀具磨损状态和破损的监测;②加工工件表面质量(粗糙度)的在线检测。

文献 [37] 和 [38] 提出了一种基于 AE 技术、在线监测磨削表面粗糙度的新方法。该

方法用声发射（AE）传感器拾取探头与磨削表面摩擦产生的 AE 信号，并对所获取的 AE 信号进行滤波、FFT、人工神经网络等分析处理，初步建立了 AE 信号特征与表面粗糙度之间的对应关系。表 8-12 所示是在砂轮旋转线速度 $v_s=35\text{m/s}$ 、工件转速 $v_w=130\text{r/min}$ 、磨削进给 $f_a=0.02\text{mm/r}$ 的磨削工艺参数下，以切入方式磨削 A3 钢、45 钢、40Cr 钢和灰铸铁 4 种试件时，所得磨削表面粗糙度的 AE 法估计值与实测结果的对比。由表可见，磨削表面粗糙度的 AE 法估计值与实测值非常接近，说明 AE 法可用于磨削质量的在线监测。

表 8-12 磨削表面粗糙度 AE 法估计值与实测值对比

材料	AE 法估计值	实测值	相对误差/%	材料	AE 法估计值	实测值	相对误差/%
A3	0.333	0.324	2.72	40Cr	0.316	0.310	1.94
45	0.326	0.318	2.45	HT200	0.304	0.315	3.49

文献 [38] 和 [39] 的实验研究表明：在稳定切削条件下，AE 信号始终保持为连续型，信号能量集中在 100kHz 以下。而刀具破损时则产生突发型 AE 信号，信号能量集中在 100~300kHz。图 8-20 所示是正常切削和刀具破损时声发射信号的小波变换结果，由图可以看出：正常切削与刀具破损的 AE 信号时-频分布特征存在明显的不同。

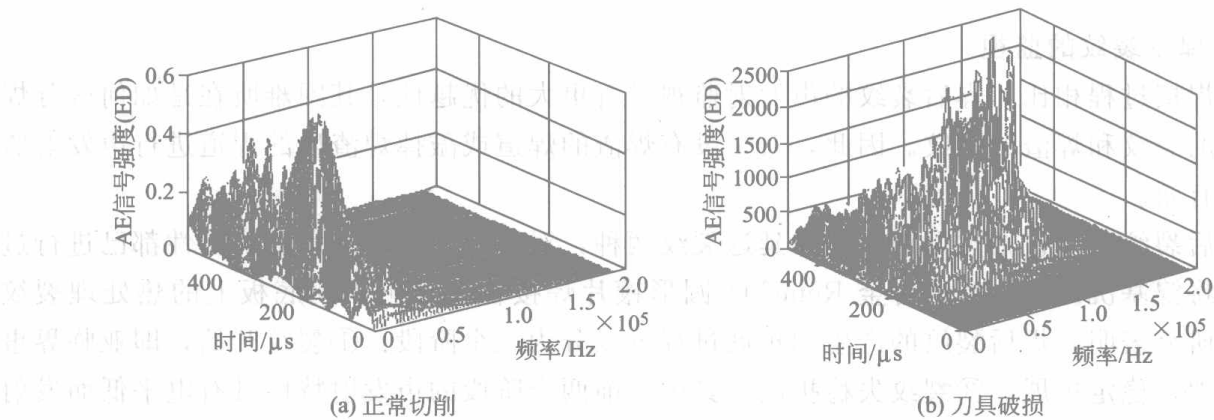


图 8-20 正常切削和刀具破损时的声发射信号的小波变换

四、在泄漏检测中的应用

因管道、储罐、阀门等问题而造成的泄漏事故时有发生，这不仅造成巨大的经济损失（据统计世界各大中城市自来水的泄漏损失率在 20% 左右），而且还可能引发空气、水土等环境污染，甚至直接危及人的生命财产安全。因此，开展管道、储罐等设备的泄漏在线检测与评价研究与实践，具有重要的理论意义和实用价值。

泄漏检测有多种方法，声发射技术因具有检测灵敏度较高、且可对设备实施在线和在役检测而备受关注。

流体在向外泄漏过程中，会在管壁（容器壁）中激发出应力波，产生声发射现象。研究表明：泄漏产生的声发射信号，其频率及幅度受管壁（容器壁）材质、流体压力等多种因素的影响，塑料管道泄漏的声发射信号频率主要集中在 5~50Hz，而铸铁管道泄漏的声发射信号频率主要集中在 1~2kHz 之间。表 8-13 是实验室条件下、用标准声发射测试设备所得的实验结果。目前，在现场条件下，可检测到约 0.0025mL/s 的微小流量的泄漏。

表 8-13 不同泄漏状态下的声发射信号特征

泄漏状态	泄漏率 /mL·s ⁻¹	AE 信号 类型	AE 信号 幅度/dB	泄漏状态	泄漏率 /mL·s ⁻¹	AE 信号 类型	AE 信号 幅度/dB
非紊流, 压力 15psi ^①	约 0.03	突发型	45	紊流, 压力 80psi	约 0.25	连续型	62
非紊流、空气注入, 压力 15psi	约 0.03	突发型	55~65	紊流、空气注入, 压力 80psi	约 0.25	突发型	75~80

① 1psi=6894.76Pa。

五、压力容器的结构完整性监测与评价

压力容器是在石油、化工、钢铁、造纸、医药、食品和城市公用等行业得到广泛使用的设备, 而且与人们的日常生活息息相关。据 2003 年的统计, 我国现有固定式压力容器 133 万多台, 罐车近 16 万辆, 各类气瓶 9800 多万只。压力容器是具有爆炸危险的特种承压设备, 承受着高温、低温、易燃、易爆、剧毒或腐蚀介质的高压力, 一旦发生爆炸或泄漏, 往往并发火灾和中毒等灾难性事故, 造成严重的环境污染, 给社会经济、生产和人民生活带来损失和危害, 直接影响社会安定。

鉴于此, 国内外对压力容器的设计、制造和使用均有严格的规定和要求, 而各种无损检测技术在压力容器的制造和在役定期检验中得到广泛应用。

20 世纪 60 年代初, Green 等首先开始了声发射技术在无损检测领域方面的应用, Dunegan 首次将声发射技术应用于压力容器检测方面的研究; 我国于 20 世纪 70 年代中期由合肥通用机械研究所最早开展了压力容器的声发射检测应用。目前, 我国约有 30 多个专业检验单位、科研院所和大专院校从事压力容器声发射检测技术的研究和应用, 每年采用声发射技术检测大型压力容器三、五百台。

压力容器的声发射检验可分为出厂前检验和使用与维修过程的检测, 各阶段的检测技术都基本成熟, 包括我国在内的许多国家都制定了部分压力容器的声发射检测标准, 为压力容器的声发射检测与评价产生了积极的推动作用。

1. 现场压力容器检测的声发射源

现场压力容器声发射检验可能遇到的典型声发射源有裂纹扩展、焊接缺陷开裂、机械摩擦、焊接残余应力释放、泄漏、氧化皮剥落和电子噪声等, 它们的 AE 信号特征列于表 8-14。

表 8-14 现场压力容器检测的主要声发射源及其特征

AE 源	幅度/dB	能量	计数	上升时间/ μ s	持续时间/ μ s	到峰计数	声发射参数来源
裂纹	40~65	10~50	3~40	10~100	100~300	1~20	定位源事件
焊接缺陷	40~70	10~52	3~41	10~100	100~300	1~20	定位源事件
残余应力	42~80	16~140	1~70	11~200	18~2000	1~30	定位源事件
摩擦	36~71	40~200	10~100	30~200	150~1000	1~37	定位源事件
氧化皮	38~75	2~130	1~120	1~160	1~2200	1~30	定位源事件
泄漏	38~75	3~5E4	3~5E4	1~2000	1~5E5	1~48	通道撞击
电子噪声	40~92	2~2E4	1~5E4	1~1800	1~5E5	1~100	通道撞击

2. 声发射检测的适用范围

在对大型压力容器进行声发射检测之前, 往往要作材料的声发射特性试验, 以此来判别

压力容器试验时是否可以用声发射检测。但由于试样的声发射特性往往不一定与大型压力容器的声发射特性一致,因此,在了解试样的声发射特性之后,常常还用小容器进行模拟试验,然后再过渡到大型压力容器的试验。这样,既费时又费料。为了解决这个问题,近年来,人们开始研究用一种简单的方法,在对压力容器进行声发射检测之前先估计声发射检测的适用性。

研究结果表明:当 $H \leq 2.5$ 时,可以用声发射测量模拟压力容器的开裂点的临界压力值。其中

$$H = \frac{E\delta_c}{\sigma_y a} \quad (8-18)$$

式中 E ——材料的弹性模量, N/m^2 ;

δ_c ——材料的临界裂纹张开位移, m ;

σ_y ——材料的屈服强度, N/m^2 ;

a ——裂纹半长度(制作的人工缺口或用无损检测方法测定的缺口尺寸), m 。

3. 声发射检测的可靠性

除设备条件外,声发射检测实施人员的操作水平、材料的声发射特性、缺陷的类型及其所处位置以及承受应力特性等因素也对声发射检测的可靠性影响很大。所以,历年来,世界各国都广泛地采用大型模拟容器,对声发射检测的可靠性进行研究,并取得了可喜的进展。

压力容器的缺陷主要是在焊接过程中产生的。日本学者渡边哲夫等的实验表明:当容器承受过大的压力之后,明显扩展的裂纹缺陷具有集中频发的声发射信号;而在过大应力下完全没有扩展变化的夹渣、气孔、未熔合、缺口等缺陷,则不发生声发射,或虽发生但只呈现出很低的散发性声发射信号。这说明了采用声发射的方法,可以较可靠地检测裂纹的扩展。

4. 缺陷有害程度的评价及其分类

缺陷的有害度评价是声发射检测技术的一项极其重要的研究内容。目前还只是研究探索阶段,尽管已有标准,但应用这些标准时还有未知因素需要实验确定。下面简述这方面的研究进展,仅供参考。

(1) 按升压过程的声发射频度分类 这是最早提出的分类方法。它只考虑升压过程中的声发射信号出现的频度,而不注意声发射信号的强度,将缺陷有害度分为以下三级。

A级(严重声发射信号):升压过程中声发射信号频繁出现。对这类缺陷应采用其他无损检测方法复检。

B级(重要声发射信号):升压过程中发生频度较低的声发射源。对此类缺陷应作详细的记录和报告,以便再次检测时参考。

C级(无关紧要的声发射信号):升压过程中偶尔发生的声发射源。对此类缺陷不必作进一步的评价。

(2) 按声发射源的活动性和强度分类 本分类法是美国材料试验学会在前述分类法的基础上提出来的。

所谓声发射源的活动性,是指声发射事件计数或振铃计数随压力变化出现的频度。如果随着压力增大,声发射计数以较快的速度连续增大,则此缺陷属于危险性的;如果随着压力增大,声发射计数增大的速度较慢,则此缺陷可看成是活动的;如果变化不大,则表明缺陷是稳定的。缺陷的活动性说明如图 8-21 所示。

所谓声发射强度,是以声发射事件(或每个事件的能量)的平均幅度(或反映幅度的其

他参量)作为声发射源强度的量度。如果是活动缺陷,其强度超过活动性声源的平均强度,则此声源是强的;如果声发射强度随着压力增大而连续增大,则此缺陷是危险的。

(3) 缺陷有害度的综合评定法 上述压力容器缺陷有害度的评价方法都是靠操作者在容器检测之后加以分析评定的,有一定的主观性,不够精确,也不能实时报警。为了克服这些缺点,日本学者渡边哲夫等发展了缺陷有害度综合评定法,这一方法已成为日本高压容器声发射检测对缺陷有害度分类的标准方法。其分类原理如下。

对许多球形压力容器水压试验的声发射监视表明,在容器水压试验时,声发射的产生与压力容器中缺陷所处的状态之间存在如下的对应关系。

① 有害缺陷多出现突发型声发射,且位置集中。

② 缺陷的不稳定性或有害性一般取决于:a. 突发型声发射信号的数量及其集中程度;b. 声源释放的声发射总能量;c. 与突发型声发射产生的时间有关,即在高压下产生声发射的缺陷比低压下频发声发射的缺陷更为有害。

具体分类法如下。

首先,根据传感器阵列中源定位得到的每一组声发射事件数目 n_i 和这一组声发射源位置的分散半径 r_i ,按式(8-19)确定声发射源定位的集中度指数。

$$C_i = \frac{n_i}{\pi r_i^2} \quad (8-19)$$

式中 C_i ——每一组声源中靠近中心位置单位面积内的声发射事件数,数/米²。

其次,根据试验前用模拟声发射源标定得到的信号衰减曲线,由首先接收到信号的传感器测得的信号幅度,换算出信号源的最大幅度 V_0 ,将最大幅度平方作为这个声发射事件的能量,把这一组声源中所有事件的能量相加之和称为能量释放指数,即

$$E_i = \sum_{j=1}^{n_i} (V_{0j})^2 \quad (8-20)$$

根据 C_i 和 E_i 将缺陷不稳定行为的强度等级分为 1、2、3、4 四个等级,如图 8-22 所示。再根据缺陷在加压过程中产生的声发射行为特征而将其分为安全、较安全、不安全和极不安全四类,分别以 I、II、III、IV 表示,如图 8-23 所示。

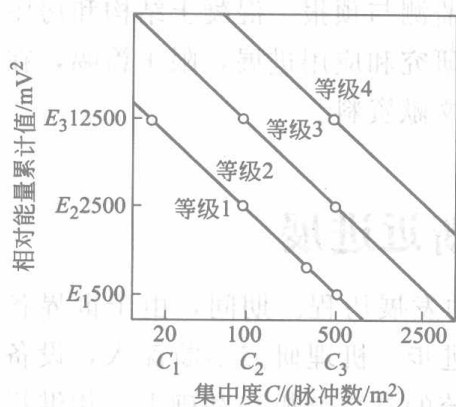


图 8-22 缺陷的不稳定性行为

强度等级的确定方法

最后,根据已定出的声源强度“等级”和缺陷的“类型”,按表 8-15 所示的方法评定出缺陷的有害度,将其分为 A、B、C、D 四级。其中,A、B 是需要注意的缺陷,在容器水压试验后需用其他无损检测方法验证,C、D 是无危险性的缺陷。

六、其他应用

除上述应用外,声发射技术还在轴承、汽缸以及大型机电设备(如露天采矿用大型挖掘机的长臂、大梁、底盘、电力电容器等)、石油钻采设备的状态监测与故障诊断、露天开

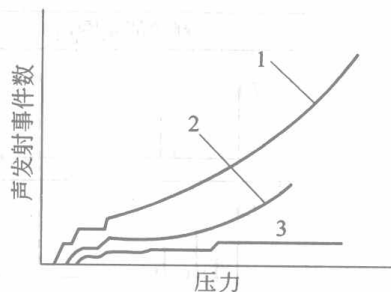


图 8-21 缺陷活动性说明

1—临界活动源; 2—活动源;
3—安静源

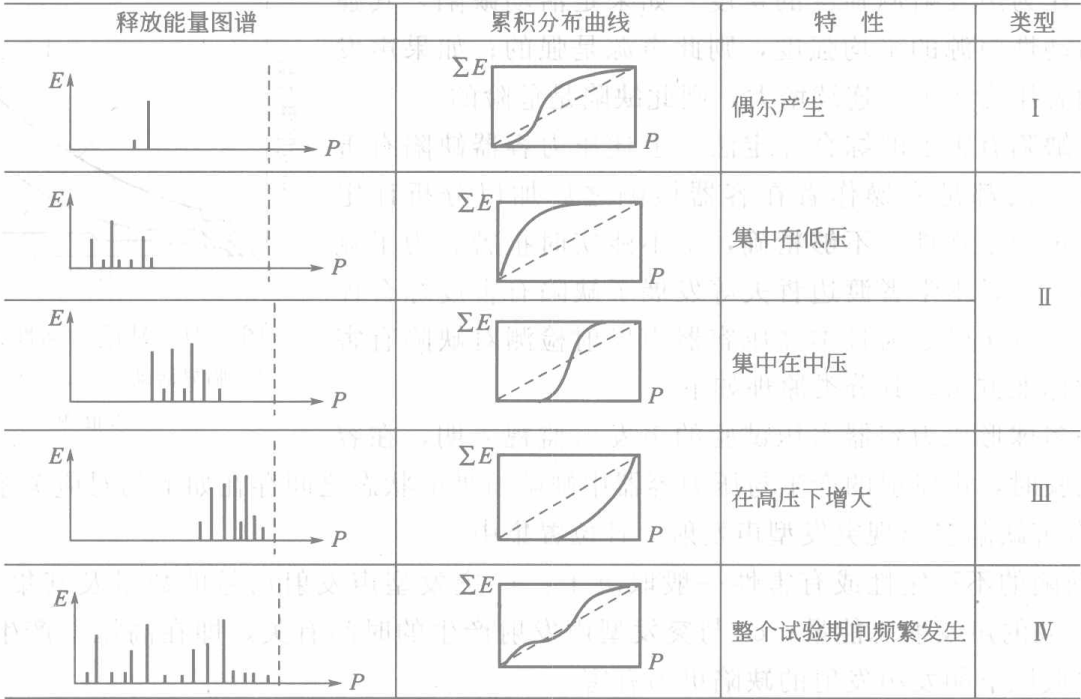


图 8-23 声发射“类型”说明图

表 8-15 缺陷有害度的综合评定

等级					等级				
类型	1	2	3	4	类型	1	2	3	4
I	D	D	C	B	III	D	C	B	A
II	D	C	C	B	IV	C	B	A	A

采的边坡、河岸、隧道、岩体等的稳定性监测、矿井安全监测与预报、混凝土结构和房屋建筑的状态检测等诸多方面都获得了应用，并取得了相当的研究和应用进展，限于篇幅，在此就不一一列举了，有兴趣的读者可参阅有关这方面的最新文献资料。

第五节 声发射检测的新近进展

从 1950 年诞生至今，AE 技术已走过了半个多世纪的发展历程。期间，由于世界各国广大 AE 技术工作者的不懈努力，AE 技术取得了长足的进步。机理研究不断深入，设备性能不断提升，AE 信号的分析与处理方法日趋多样，在传统的参数分析法基础上，相继提出了对 AE 信号的傅立叶谱分析、小波分析和人工神经网络（ANN）分析等方法，为 AE 应用领域的不断拓展起到了积极的推动作用。1991 年，美国学者哥曼（Gorman MR）在美国声学杂志上发表“板波声发射”（Plate wave acoustic emission）一文，标志着模态声发射（MAE: modal acoustic emission）的诞生，AE 技术由此进入了一个新的发展阶段。限于篇幅，本节仅对 MAE 进行简要的介绍，AE 技术其他方面的新近进展，请读者查阅最新的 relevant 文献资料。

一、模态声发射的基本理论

所谓模态声发射（MAE: modal acoustic emission），就是考虑 AE 信号的模态（或模

式)特征的声发射,它是在超声导波理论上发展起来的 AE 检测新技术。

所谓超声导波(或称板波),是指当超声波在特征尺寸(如板厚、壁厚)小于超声波的波长的介质中传播时,由于超声波与传播介质界面的多次反射、折射和波形转换而形成的一种复杂波形。与在无限大介质中以固定模式和恒定速度向前传播的体波(纵波或横波)不同,导波在薄介质(如薄板、薄壁管道等)中传播时,随板厚和频率的不同而可能呈现出多种模式,且各模式一般存在频散现象(即导波波速随频率变化而变化的现象)。

声发射波在薄平板(声波波长 $>$ 板厚)内主要按以下三种模式传播:①零阶扩展波 S_0 [又称零阶压缩波、基频 E (Extensional) 模式、零阶对称 Lamb 波],其特征是质点在板平面内振动,方向与波的传播方向平行[图 8-24(a)];②零阶弯曲波 A_0 [又称 F (Flexure) 模式、零阶反对称 Lamb 波],其特征是质点垂直于板平面方向振动[图 8-24(b)];③水平剪切波 (SH: Shear Horizontal),其特征是质点在板平面内、垂直于波的传播方向振动。其中, S_0 和 A_0 是最主要的 AE 传播模式。

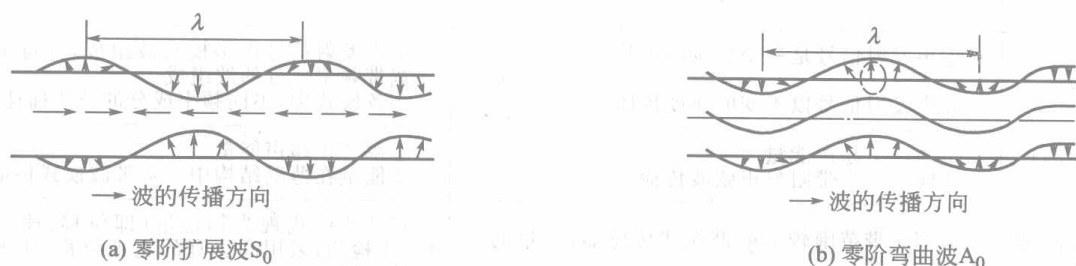


图 8-24 零阶扩展波 S_0 和零阶弯曲波 A_0 的形态

根据经典板波理论可知, E 波的声速 C_E 可表示为:

$$C_E = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}} \quad (8-21)$$

式中 ρ ——被测材料的密度, kg/m^3 ;

μ ——泊松比;

E ——杨氏模量, N/m^2 。

F 波的声速 C_f 可表示为:

$$C_f = \left(\frac{D}{\rho\delta}\right)^{1/4} \sqrt{2\pi f} \quad (8-22)$$

式中 f ——超声波的频率;

$$D = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)}$$

δ ——板厚;

μ ——泊松比。

一般在板状结构中只能检测到扩展波和弯曲波,剪切波是很难检测到的,并且其影响可以忽略不计。扩展波的传播速度最快,且无频散效应,即具有不同频率分量的扩展波按照相同的速度传播;弯曲波的传播速度较慢,且有频散效应,其传播速度与频率的平方根成正比。频率越高的弯曲波,其传播速度越快,但衰减也越严重。

板平面内 (IP: In-Plane) 的声源主要产生扩展波,而平面外 (OOP: Out-of-Plane) 的声源主要产生弯曲波,两种声源都有可能产生 SH 波,而大量的非 AE 源或噪声则没有这种特征。

在薄壁管道或棒（杆）中，沿管（棒、杆）长方向传播的 AE 波主要以纵向轴对称模式 L（0，m）、扭转轴对称模式 T（0，m）和弯曲（非轴对称）模式 F（n，m）等模式向前传播。

二、模态声发射的技术特点

模态声发射以超声导波理论为基础，通过建立简单明确的物理数学模型，将 AE 信号与 AE 的物理过程相联系起来，较好地解决了一直困扰传统声发射推广应用中所面临的诸如源定位不准确、信号解释困难和噪声干扰大等问题，从而在工程应用中的薄板、壳体、薄壁管材和棒材等结构的缺陷检测方面表现出强大的生命力。

模态声发射与传统声发射（或称共振传感器参数声发射 RSPAEC: Resonant Sensor Parameter Acoustic Emission）的简要比较如表 8-16 所示。

表 8-16 模态声发射与传统声发射的简要比较

项目 \ 方法	传统声发射 RSPAEC	模态声发射 MAEC
基本假设	①声发射信号是一个衰减的正弦波 ②声发射信号以不变的速度传播	①声发射信号由多模式波组成，且每个模式由一宽带频率成分的波组成 ②各模式中，不同频率成分的波传播速度不同
AE 信号的产生、传播	①源产生超声能量 ②能量以窄带阻尼正弦波传播	①源产生超声能量 ②能量在薄壁结构中以宽带波模式传播
AE 信号的测试设备要求	采用频带范围较窄的谐振式传感器，测量的量无物理意义	将波的模式视为物理量（即位移、速度或加速度）来检测，采用高保真的宽带位移、速度或加速度传感器
对 AE 信号的分析方法	基于检测到的信号与已知特征条件下的声发射源之间的经验关系，采用计数、幅度、能量等参数法	基于牛顿力学，模式与源特征存在明确的关系，在这些特征理论上可以建模，并且不因仪器设置（如增益）改变而改变；可综合利用声波模式、频率范围、频散和衰减等进行特征识别
典型应用	任意形态的介质，包括块体、薄壁（层）构件等，非常广泛	目前主要局限于波长>特征尺寸的介质，如薄板、薄壁管道等
源定位精度	较低	较高

三、模态声发射技术的典型应用

除对被检构件的特征尺寸有一定要求外，模态声发射的应用与传统 AE 有许多相似之处，它们都是基于对各类 AE 源所激发的 AE 信号的检测，通过分析、比较其特征，来对 AE 源或传播 AE 信号的介质进行检测、诊断。从已查阅到的国内外文献资料来看，模态声发射在（薄壁）管道的腐蚀和泄漏监测、复合材料的结构损伤识别、航空结构件的疲劳裂纹检测等诸多领域都获得了应用，取得了较好的效果。以下简要介绍几个成功的示例，仅供参考。

（1）AE 源的精确定位 声源定位在 AE 检测中占有很重要的地位，时差定位是 AE 源定位的基本方法，其前提条件是材料或构件中的声传播速度 C 已知。

由于 AE 在构件中可能存在多种模式，而不同模式的 AE 信号的传播速度不同（如在航空铝合金结构件中，纵波、横波、表面波、扩展波的传播速度分别是 6370m/s、3110m/s、2910m/s 和 5700m/s），而弯曲波的速度还与频率有关（即频散现象）。因此，如不加区分地采用同一声速来求时差，必定会产生很大的定位误差。模态声发射则以 AE 信号的模式为基础，不仅能将有用的 AE 信号和噪声信号区别开来，剔除噪声的影响。而且，采用同一模式的 AE 波来进行定位，从而消除了不同模式声波速度不同的影响，大大提高了定位精度。有文献报道，MAEC 的最高定位精度可达 2%左右。

(2) 复合材料的损伤识别 复合材料的纤维断裂、基体破裂、分层和开胶等损伤识别,是 AE 技术的重点研究领域之一。对复合材料的损伤识别,过去主要采用参数分析法,即通过分析 AE 信号的振幅、振铃计数和事件计数等参数,来识别复合材料的损伤形式。参数分析法的主要缺点是结果受检测仪器本身参数的影响很大,结果的物理意义不清晰且重复性较差。MAE 技术为识别复合材料的不同损伤源提供了便利条件。

早在 20 世纪 90 年代,不少学者就在这一领域进行了许多富有成效的工作。理论分析和试验研究都表明,对于复合材料,由于纤维的排列一般都是沿板的平面展开,不同层的纤维又在厚度方向通过黏结或其他方式堆积而成,因此,纤维断裂总是在平面内完成,它类似于 IP (In-Plane) 作用力源,因此,伴随纤维断裂的声发射信号总是以扩展波为主。分层故障发生在层与层之间,是沿板厚方向完成的,类似于 OOP (Out Of Plate) 激励源,因此,它所激发出的声波应以弯曲波为主。而基体破裂、开胶等损伤产生的声发射信号其特征应当介于两典型情况之间,即既有扩展波又有弯曲波。而且,纤维断裂的 AE 信号和噪声的主要频率成分相差很大,因此,在实际应用中只要使用不同频段的滤波器即可较容易地将纤维断裂和噪声区分。

复习思考题

1. 何谓凯塞效应? 凯塞效应对声发射检测有何意义?
2. 与其他无损检测方法相比,声发射检测的主要特点何在? 其应用前景如何?

参考文献

- [1] 袁振民, 马羽宽, 何泽云. 声发射技术及其应用. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [2] 刘贵民. 无损检测技术. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [3] [苏] 伊万诺夫 ВИ、别洛夫 ВМ 编著, 吴德惠, 江邦治译, 袁振民校. 焊接和焊接接头的声发射检测. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [4] [日] 胜山邦久编著, 冯夏庭译, 雷兴林校. 声发射 (AE) 技术的应用. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
- [5] 李家伟, 陈积懋. 无损检测手册. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [6] 耿荣生. 声发射技术发展现状. 无损检测, 1998, 20 (6): 151~154, 158.
- [7] 沈功田, 戴光, 刘时风. 中国声发射检测技术进展——学会成立 25 周年纪念. 无损检测, 2003, 25 (6): 302~307.
- [8] 梁家惠, 尹作友. 声发射仪器的发展. 无损检测, 1998, 20 (10): 285~291.
- [9] 秦国栋, 刘志明. 声发射测试系统的发展. 测试技术学报, 2004, 18 (3): 274~279.
- [10] 时书丽, 赵国兴. 声发射传感器技术与应用. 仪表技术与传感器, 1998 (02): 34~37.
- [11] 张平, 施克仁, 耿荣生等. 小波变换在声发射检测中的应用. 无损检测, 2002, 24 (10): 436~442.
- [12] 吴森. 现代工程信号处理及应用. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1997.
- [13] Hamstad M A, McCoolskey J D. Detectability of Slow Crack Growth in Bridge Steels by Acoustic Emission. Material Evaluation, 1999, 57 (11): 1165~1174.
- [14] 张凤林, 韩维, 胡国才等. 声发射技术在航空领域的应用研究. 无损检测, 2000, 22 (4): 157~161.
- [15] 杨盛良, 刘军, 杨德明等. 复合材料损伤过程的声发射研究方法. 无损检测, 2000, 22 (7): 303~306.
- [16] 耿荣生, 景鹏, 付刚强. 声发射波形分析技术在复合材料故障评价中的应用. 无损检测, 1999, 21 (7): 289~296.
- [17] 龚斌, 包日东, 齐辉等. 带缺口塑性材料的声发射特性研究. 声学技术, 2006, 25 (1): 30~34.
- [18] 朱波, 蔡珣, 王成国等. 声发射特性与材料断裂韧性相关性研究. 物理学报, 2003, 52 (8): 1960~1964.
- [19] Anders Hjornhede, Anders Nylund. Adhesion testing of thermally sprayed and laser deposited coatings. Surface and

- Coatings Technology, 2004, 184: 208~218.
- [20] 易茂中, 胡奈赛, 何家文. 涂层压入仪的研制及其应用. 仪器仪表学报, 2000, 21 (2): 180~185.
- [21] 王俊英, 杨启志, 倪新华等. 用声发射技术结合显微硬度法研究镍基合金复合涂层韧性. 新技术新工艺, 2002 (6): 45~46.
- [22] Miguel J M, Guilemany J M, Mellor B G, Xu Y M. Acoustic emission study on WC-Co thermal sprayed coatings. Materials Science and Engineering, 2003, A352: 55~63.
- [23] Belmonte M, Fernandes A J S, Costa F M, Oliveira F J, Silva R F. Adhesion behaviour assessment on diamond coated silicon nitride by acoustic emission. Diamond and Related Materials, 2003, 12: 733~737.
- [24] 朱波, 刘玉军, 钱宇白等. 高强铝合金沿晶断裂声发射研究. 材料热处理学报, 2003, 24 (3): 27~30.
- [25] 耿荣生, 傅刚强. 铝合金材料腐蚀损伤的声发射评价. 声学学报 (中文版), 2004, 29 (1): 6~11.
- [26] 李伟, 方江涛, 秦洋等. 低碳钢点蚀过程声发射监测实验. 大庆石油学院学报, 2007, 31 (4): 59~62.
- [27] Kim Y P, Fregonese M, Mazille H et al. Ability of acoustic emission technique for detection and monitoring of crevice corrosion on 304L austenitic stainless steel. NDT&E International, 2003, 36: 553~562.
- [28] 杨震, 朱永新, 孟丽莉等. 超高强度钢 37SiMnCrNiMoV 应力腐蚀过程中声发射信号的研究. 腐蚀科学与防护技术, 2001, 13 (4): 203~207.
- [29] 李美栓, 辛丽, 李铁藩. 声发射技术在氧化膜破裂监测中的应用. 腐蚀科学与防护技术, 1997, 19 (2): 144~152.
- [30] 张炜, 冷建兴, 张伟. 高强度钢手工焊接后过程的声发射实时监测研究. 应用声学, 2004, 23 (3): 1~6.
- [31] 罗震, 胡绳荪, 单平等. 用时频分析法研究铝合金电阻点焊过程中的声音信号. 焊接学报, 2004, 25 (1): 36~39.
- [32] Ladislav Grad, Janez Grum, Ivan Polajnar et al. Feasibility study of acoustic signals for on-line monitoring in short circuit gas metal arc welding. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44: 555~561.
- [33] 曾浩, 周祖德, 陈幼平等. 激光焊接过程实时监测. 中国激光, 2001, A28 (3): 284~288.
- [34] 秦国梁, 林尚扬, 齐秀滨等. 激光焊接过程实时监测技术的研究现状及其发展. 焊接, 2002 (10): 5~8.
- [35] Chen C hangming, Kovacevic Radovan, Jandgric Dragana. Wavelet transform analysis of acoustic emission in monitoring friction stir welding of 6061 aluminum. International Journal of Machine Tools & Manufacture 2003, 43: 1383~1390.
- [36] Han-Ki Yoon, Yu-Sik Kong, Seon-Jin Kim et al. Mechanical properties of friction welds of RAFs (JLF-1) to SUS304 steels as measured by the acoustic emission technique. Fusion Engineering and Design, 2006, 81: 945~950.
- [37] 刘贵杰, 巩亚东, 王宛山. 基于摩擦声发射信号的磨削表面粗糙度在线检测方法研究. 摩擦学学报, 2003, 23 (3): 236~239.
- [38] Wang Haili, Shao Hua, Chen Ming et al. On-line tool breakage monitoring in turning. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 139: 237~242.
- [39] 姜久兴, 祁恩云, 李振加. 重型车刀破损时声发射信号特征. 哈尔滨理工大学学报, 1997, 2 (6): 8~11.
- [40] Susic E, Grabec I. Application of a neural network to the estimation of surface roughness from AE signals generated by friction process. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1995, 35 (8): 1077~1086.
- [41] Lee D E, Hwang I, Valente C M O et al. Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46: 176~188.
- [42] Arul S, Vijayaraghavan L, Malhotra S K. Online monitoring of acoustic emission for quality control in drilling of polymeric composites. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 185: 184~190.
- [43] Barry J, Byrne G, Lennon D. Observations on chip formation and acoustic emission in machining Ti-6Al-4V alloy. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41: 1055~1070.
- [44] 杨大勇, 王信义, 徐春广等. 加工过程刀具破损监测的声发射传感监测新技术. 仪器仪表学报, 1999, 20 (4): 421~423.
- [45] Guo Y B, Ammula S C. Real-time acoustic emission monitoring for surface damage in hard machining. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45: 1622~1627.
- [46] Jemielniak K, Otman O. Tool failure detection based on analysis of acoustic emission signals. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 76: 192~197.
- [47] 李小康, 姚英学, 袁哲俊等. 自动化加工刀具破损监测系统. 航空工艺技术, 1998 (2): 11~12.
- [48] Jayakumar T, Mukhopadhyay C K, Venugopal S et al. A review of the application of acoustic emission techniques for

- monitoring forming and grinding processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 159: 48~61.
- [49] 焦敬品, 何存富, 吴斌等. 管道声发射泄漏检测技术研究进展. *无损检测*, 2003, 25 (10): 519~523.
- [50] 石志标, 陈向伟, 张学军. 声发射技术在阀门检漏中的应用. *无损检测*, 2004, 26 (8): 391~392, 401.
- [51] 杨进, 文玉梅, 李平. 自来水铸铁管道泄漏声信号频率特征研究. *应用声学*, 2006, 25 (1): 30~37.
- [52] 焦敬品, 李涌, 何存富等. 压力管道泄漏的声发射检测实验研究. *北京工业大学学报*, 2003, 29 (2): 144~146.
- [53] 戴光, 徐彦廷, 李伟等. 声发射技术的应用与研究进展. *大庆石油学院学报*, 2001, 25 (3): 95~98.
- [54] Miller R K, Pollock A A, Watts D J et al. A reference standard for the development of acoustic emission pipeline leak detection techniques. *NDT&E International*, 1999, 32: 1~8.
- [55] 沈功田, 李金海. 压力容器无损检测——声发射检测技术. *无损检测*, 2004, 26 (9): 457~463.
- [56] 戴光, 李善春, 李伟. 储罐的声发射在线检测技术与研究进展. *压力容器*, 2005, 22 (3): 33~35.
- [57] 李家林, 牛树, 马羽宽. 压力容器活性缺陷有害度的新评价方法. *吉林大学学报 (工学版)*, 2002, 32 (2): 83~86.
- [58] 戴光, 徐彦廷, 李伟等. 在役压力容器的动态检测技术与研究进展. *中国安全科学学报*, 1998, 8 (5): 37~40.
- [59] 程青蟾, 石生芳. 用声发射监测 16MnR 乙炔瓶的爆破试验. *无损检测*, 1997, 19 (11): 311~313.
- [60] 张艾萍, 孙伟, 叶荣学. 汽轮发电机组轴承运行状态声发射监测研究. *汽轮机技术*, 1998, 40 (1): 29~32.
- [61] 肖红阳, 刘耀中. 借助振动和声发射诊断滚动轴承的失效. *轴承*, 2000 (6): 39~41.
- [62] 秦萍, 阎兵, 谭达明. 利用声发射诊断滑动轴承接触摩擦故障的研究. *西南交通大学学报*, 2001, 36 (3): 272~274.
- [63] 李家林, 董云朝, 马羽宽. 声发射源特性的神经网络模式识别研究. *无损检测*, 2001, 23 (6): 231~272.
- [64] 沈功田, 段庆儒, 周裕峰等. 压力容器声发射信号人工神经网络模式识别方法的研究. *无损检测*, 2001, 23 (4): 144~146, 149.
- [65] 曹怀祥. 声发射检测在 400m³ 球罐检测中的应用. *无损检测*, 2000, 22 (11): 512~513.
- [66] Kaiser J. *Inspection into Occurrence of Noises in Tensile Tests or study of Acoustic Phenomena in Tensile Tests*, Ph. D. thesis, Munich, Germany: Technische Hochschule München, 1950.
- [67] Tsamtsakis D, Weveers M. Acoustic emission to model the fatigue behaviour of quasi-isotropic carbon-expox laminate composites. *INSIGHT*, 1999, 41 (8): 513~516.
- [68] Gang Qi. Wavelet-based AE characterization of composite materials. *NDT&E international*, 2000, 33: 133~144.
- [69] Surgeon M, Wevers M. Modal analysis of acoustic emission from CFRP laminates. *NDT&E international*, 1999, 32: 311~322.
- [70] 刘怀喜, 张恒, 闫耀辰. 声发射技术在复合材料中的应用及研究进展. *纤维复合材料*, 2002 (04): 50~52.
- [71] Zhang F, Wu G, Guo B, Wang Z. Statistical model and analysis of AE data from aircraft. *INSIGHT*, 2001, 43 (8): 531~536.
- [72] Brown E R, Reuben R L, Neill G D et al. Acoustic Emission Source Discrimination Using a Piezopolymer Based Sensor. *Material Evaluation*, May, 1999: 515~520.
- [73] Bukhala Z A, Nelson J K. Partial Discharge Source Location By Acoustic Emission Analysis in Electric Machine Stators. *Material Evaluation*, Oct. 1999: 1083~1088.
- [74] Anastassopoulos A A, Kourousis D A, Vionis P et al. Acoustic Emission NDE of a wind turbine blade during full-scale testing. *INSIGHT*, 1999, 41 (6): 366~368.
- [75] 李军, 韦红术, 陈勉等. 声发射技术及其在套管损坏实时监测中的应用. *钻采工艺*, 2006, 29 (03): 71~73.
- [76] 戴光, 徐彦廷, 李伟等. 声发射技术的应用与研究进展. *大庆石油学院学报*. 2001, 25 (3): 95~98.
- [77] 徐慧, 薛联凤, 刘云飞. 声发射技术在刨花板力学性能检测中的应用. *林产工业*, 2004, 31 (06): 19~21.
- [78] 黄志鹏, 朱可善, 郭映忠. 岩石裂纹小范围屈服时声发射总数与应力强度因子关系的研究. *重庆建筑大学学报*, 1998, 20 (02): 41~46.
- [79] 李俊平. 岩体稳定性的声发射评价. *中国铝业*, 1997, 21 (06): 19~22.
- [80] Nak-Sam Choi, Tae-Won Kim, Kyoung Y. Rhee. Kaiser effects in acoustic emission from composites during thermal cyclic-loading. *NDT&E International*, 2005, 38: 268~274.
- [81] 徐彦廷, 王亚东, 刘富君等. 声发射技术在探测储罐底板泄漏位置中的应用. *无损检测*, 2007, 29 (9): 506~508.
- [82] 宋明大, 王威强, 李梦丽等. 多层包扎尿素合成塔无损评价方法. *山东大学学报 (工学版)*, 2007, 37 (4): 50~54.
- [83] 刘威, 王宁. 岩体稳定性声发射预测预报新方法. *四川建筑科学研究*, 2006, 32 (1): 102~104, 176.

- [84] 高强, 魏星, 崔鹏程. 声发射技术在绝缘子污秽放电监测中的应用. 高压电器, 2006, 42 (1): 60~62.
- [85] 左婧, 舒乃秋, 孔庆源等. 电晕放电对声发射式绝缘子污秽放电监测影响的研究. 绝缘材料, 2006 (1): 41~45, 64.
- [86] 沈功田, 段庆儒, 周裕峰等. 压力容器声发射信号人工神经网络模式识别方法的研究. 无损检测, 2001, 23 (4): 144~149.
- [87] Boinet M, Verdier S, Maximovitch S et al. Application of acoustic emission technique for in situ study of plasma anodizing. NDT&E International, 2004, 37: 213~219.
- [88] Dunegan H L. Modal analysis of acoustic emission signals. Journal of Acoustic Emission, 1997, 15 (1~4): 53~61.
- [89] Zuluaga-Giraldo C, Mba D, Smart M. Acoustic emission during run-up and run-down of a power generation turbine. Tribology International, 2004, 37: 415~422.
- [90] Yeun-Ho Yu, Jin-Ho Choi, Jin-Hwe Kweon et al. A study on the failure detection of composite materials using an acoustic emission. Composite Structures, 2006, 75: 163~169.
- [91] Reis J M L, Oliveira R de, Ferreira A J M et al. A NDT assessment of fracture mechanics properties of fiber reinforced polymer concrete. Polymer Testing, 2003, 22: 395~401.
- [92] Jayakumar T, Mukhopadhyay C K, Venugopal S et al. A review of the application of acoustic emission techniques for monitoring forming and grinding processes. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 159 (1): 48~61.
- [93] 李耀东, 黄成祥, 侯力等. 疲劳裂纹的声发射信号检测技术. 计算机测量与控制, 2004, 12 (6): 504~506.
- [94] 纪洪广, 裴广文, 单晓云. 混凝土材料声发射技术研究综述. 应用声学, 2002, 21 (04): 1~5.
- [95] 陈兵, 姚武, 吴科如. 声发射技术在混凝土研究中的应用. 无损检测, 2000, 22 (9): 387~390, 396.
- [96] 陈兵, 姚武, 吴科如. 用声发射研究集料尺寸对混凝土受压力学性能的影响. 无损检测, 2001, 23 (5): 194~197.
- [97] 陈兵, 张立新, 刘娟. 混凝土梁三点弯曲负荷下声发射特性研究. 无损检测, 2000, 22 (3): 109~118.
- [98] 沈建中, 李宗津, 张之勇. 土木工程中的无损检测技术及其应用. 无损检测, 2000, 22 (11): 497~500, 504.
- [99] Masayasu Ohtsu. Estimation of Crack and Damage Progression in Concrete by Quantitative Acoustic Emission Analysis. Material Evaluation, 1999: 521~525.
- [100] 纪洪广. 混凝土材料声发射性能研究与应用. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [101] 王秀彦, 王智, 焦敬品等. 超声导波在管中传播的理论分析与试验研究. 机械工程学报, 2004, 40 (1): 11~16.
- [102] Gorman M R. Plate wave acoustic emission. Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 90 (1): 358-64.
- [103] 刘松平, Michael Gorman, 陈积懋. 模态声发射检测技术. 无损检测, 2000, 22 (1): 38~41.
- [104] 陈建萍, 黄葳, 陈积懋. 模态声发射——飞机结构无损检测新方法. 航空制造技术, 2003 (4): 74~77.
- [105] 耿荣生. 利用模态声发射技术监测飞机主结构件的日历损伤. 机械工程学报, 2003, 39 (9): 128~132.
- [106] 耿荣生, 沈功田, 刘时风. 模态声发射基本理论. 无损检测, 2002, 24 (7): 302~306.
- [107] 刘晶, 陈积懋, Steve Ziole. 应用模态声发射进行自动源识别. 无损检测, 2000, 22 (2): 80~83.
- [108] 刘松平, Steve Zio la, 刘晶. 疲劳裂纹的模态声发射检测. 无损检测, 2000, 22 (3): 122~124.
- [109] 焦敬品, 何存富, 吴斌等. 基于导波理论的管道泄漏声发射定位新技术研究. 机械工程学报, 2004, 40 (10): 78~81.
- [110] 张颖, 陈建萍, 陈积懋. 模态声发射的噪声剔除技术. 航空制造技术. 2002 (12): 55~58.
- [111] Surgeon M, Wevers M. One sensor linear location of acoustic emission events using plate wave theories. Materials Science and Engineering A, 1999, 265 (1~2): 254~261.
- [112] Kaoru Matsuoka, David Forrest, Tse Ming-Kai. On-line wear monitoring using acoustic emission. Wear, 1993, 162~164 (Part1): 605~610.
- [113] Surgeon M, Wevers M. Modal analysis of acoustic emission signals from CFRP laminates. NDT & E International, 1999, 32 (6): 311~322.
- [114] Chang H, Han E H, Wang J Q, Ke W. Analysis of modal acoustic emission signals of LY12CZ aluminum alloy at anodic and cathodic polarization. NDT&E International, 2006, 39: 8~12.

第九章

红外无损检测

第一节 红外无损检测概述

红外无损检测,就是利用红外热像设备(红外热电视、红外热像仪等)测取目标物体(被检对象)的表面红外辐射能,将其转换为电信号,并最终以彩色图或灰度图的方式显示目标物体表面的温度场,根据该温度场的均匀与否,来反推被检对象表面或内部是否存在缺陷(热特性异常的区域)的一种无损检测新技术。

和其他无损检测方法相比,红外无损检测的主要优点如下。

(1) 检测结果形象直观且便于保存 采用红外热像仪或热电视,可以以图像的方式,测取被检物表面的温度场,被检物表面各处的温度分布一目了然。此外,检测结果还可以通过录像带或数据文件的格式保存下来,便于管理和分析利用。

(2) 大面积快速,检测效率高 由于红外探测器的响应速度高达纳秒级,所以可迅速采集、处理和显示被检对象的红外辐射,不仅如此,红外检测还可对检测面积进行快速扫描,因而检测效率高。

(3) 适用范围广 任何温度高于绝对零度(0K)的物体都有红外辐射,它几乎不受材料种类和温度范围的限制。因此,红外无损检测具有广泛的适应性。

(4) 检测灵敏度较高 现代红外探测器对红外辐射的探测灵敏度很高,目前的红外无损检测设备可以检测出 0.01°C 的温度差,因此能检测出设备或结构等热状态的细微变化。

(5) 操作安全 由于红外无损检测可以实现远距离的非接触式检测,检测时不需要与被检对象直接接触,也没有类似射线检测的辐射隐患,所以操作十分安全。这对带电设备、转动设备及高空设备等的无损检测显得尤为重要。

红外无损检测的局限性如下。

(1) 检测费用很高 红外无损检测仪器是高技术产品,更新换代迅速,生产批量不大,设备比较昂贵,一套性能较高的热像仪,约需人民币60万元。加之其使用寿命又不长,故检测费用很高。

(2) 对表面缺陷敏感、对内部缺陷的检测有困难 物体的红外辐射主要是其表面的红外辐射,主要反映了表面的热状态,而不可能直接反映出物体内部的热状态。所以,如果不使用红外光纤或窗口作为红外辐射传输的途径,则红外无损检测技术通常只能直接诊断出物体暴露于大气中部分的过热故障或热状态异常。

(3) 对低发射率材料和导热快的材料的检测有一定困难 红外检测获取的是目标物体表面的红外辐射能,它与物体的表面温度和发射率有关。对低发射率材料而言,较小的温度变化不足以引起红外辐射能的明显变化,故对检测有一定的困难。

导热快的材料,其表面温度场的变化较快,对检测设备的采样速率要求更高。

(4) 确定温度值困难 使用红外无损检测技术可以诊断出设备或结构等热状态的微小差异和细微变化, 但很难准确地确定出被检对象上某一点确切的温度值。因为, 被检物体的红外辐射, 除与其温度有关外, 还受其他因素的影响, 如表面状态、测试环境等。

目前, 红外无损检测已在材料与构件中的缺陷检测、电子元器件及设备的质量评定、电力和石化等设备运行状态的监测诊断、房屋建筑的热效率和安全性监测、桥梁和海洋钻井平台等工程结构的状态检测与评价、火灾监测、农作物优种以及医学诊断等诸多方面获得越来越广泛的应用, 是一种非常有发展前景的无损检测新技术。

第二节 红外检测的物理基础

一、红外辐射的基本概念

1. 辐射与红外辐射

辐射是指物体受某种因素的激发而向外发射辐射能的现象。由于物体内部微观粒子的热运动(或说由于物体自身的温度)而使物体向外发射辐射能的现象, 称为热辐射。红外辐射是一种热辐射, 因其处在可见光区的红光波段之外而得名红外辐射或红外线。红外辐射在电磁波谱中的位置如图 9-1 所示, 其波长范围为 $0.76 \sim 1000 \mu\text{m}$ 。

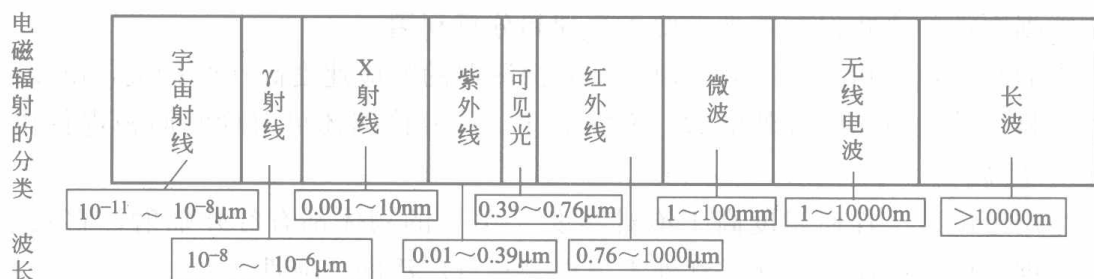


图 9-1 电磁波谱

由于任何温度高于绝对零度的物体都会向外辐射红外辐射能, 同时也吸收来自外界的红外辐射能。因此, 红外辐射是普遍存在的, 这就为红外无损检测创造了十分有利的条件。

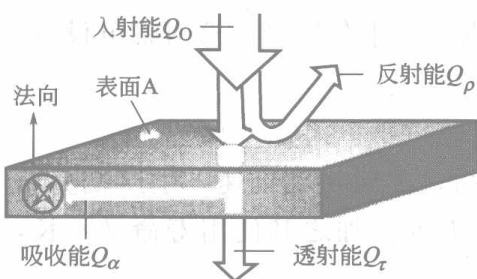


图 9-2 辐射能的反射、吸收与透射示意

2. 吸收、反射与透射

与可见光的情况相似, 当红外辐射能投射到实际物体表面上时, 其总的辐射能将有一部分被反射, 另有一部分被吸收, 其余部分则透过物体, 吸收、反射与透射的情形如图 9-2 所示。它们之间满足如下关系:

$$Q_0 = Q_p + Q_a + Q_r \quad (9-1)$$

或

$$\frac{Q_p}{Q_0} + \frac{Q_a}{Q_0} + \frac{Q_r}{Q_0} = 1 \quad (9-2)$$

式中 Q_0 ——总的辐射能;

Q_p, Q_a, Q_r ——分别为反射能、吸收能和透射能;

$\frac{Q_p}{Q_0}$ ——反射率, 用 ρ 表示;

$\frac{Q_\alpha}{Q_0}$ ——吸收率, 用 α 表示;

$\frac{Q_\tau}{Q_0}$ ——透射率, 用 τ 表示。

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (9-3)$$

3. 黑体、白体、透明体和灰体

根据 ρ 、 α 、 τ 各值的相对变化, 而有黑体、灰体、白体、透明体等概念。

当 $\alpha=1$, 而 $\rho=\tau=0$ 时, 说明入射到物体上的辐射能全部被吸收, 这样的物体称为“绝对黑体”, 简称为“黑体”。

更严格地讲, 黑体是指其辐射特性不随温度和波长而改变、且其吸收率恒等于 1 的一类物体。

当 $\rho=1$, 而 $\alpha=\tau=0$ 时, 说明入射到物体上的辐射能全部被反射, 若反射是有规律的, 则称此物体为“镜体”; 若反射没有规律, 则称此物体为“绝对白体”。

当 $\tau=1$, 而 $\alpha=\rho=0$ 时, 说明入射到物体表面上的辐射能全部被透射出去, 具有这种性质的物体称为“绝对透明体”。

所谓灰体, 是指其辐射特性不随波长的变化而变化 (但与温度有关) 的一类物体。

应该指出的是, 自然界中, 绝对黑体、灰体、绝对白体或绝对透明体都是不存在的, 它们都是为研究问题的方便而提出的理想物体概念。 α 、 ρ 、 τ 的大小取决于物体本身的性质和表面状况, 以及入射光谱的波长和物体的温度等因素。

此外, 由式 (9-3) 可知, 性能良好的反射体或透明体, 必然是性能差的辐射体。在实践中, 增加物体辐射红外线能力的常用方法, 就是使它的表面具有最小反射红外线的能力。

4. 立体角

与平面几何中的平面角相对应, 在空间几何中则定义立体角。立体角是在辐射研究中经常用到的一个概念, 其定义的示意性说明如图 9-3 所示。

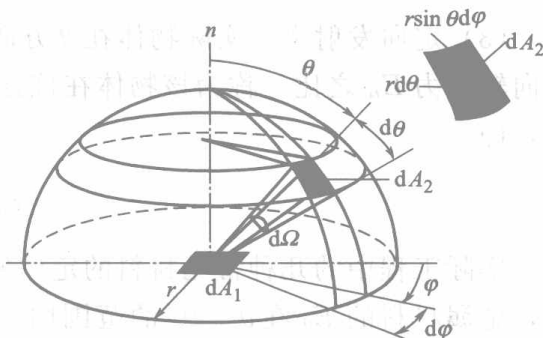


图 9-3 立体角的定义示意

在半径为 r 的球面上, 微元面积 A 所对应的立体角 Ω 为

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (9-4)$$

立体角的单位为球面度, 用 sr 表示。

5. 辐射强度

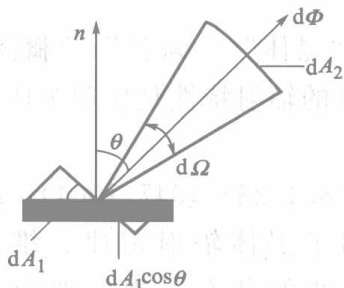


图 9-4 辐射强度的定义

辐射强度是单位时间内从单位面积上所发出的包含在单位立体角内的辐射能。

如图 9-4 所示, 若单位时间内, 微元面 dA_1 向微元面 dA_2 所发射的辐射能为 dQ , dA_1 在 θ 方向的投影面积为 $dA_1 \cos \theta$, 则单位投影面积所发出的包含在单位立体角内的辐射能可表示为:

$$L(\theta, \varphi) = \frac{dQ}{dA_1 \cos \theta d\Omega} \quad (9-5)$$

式中 $L(\theta, \varphi)$ —— dA_1 在 (θ, φ) 方向的辐射强度, 或称为定向辐射强度, $W/(m^2 \cdot sr)$ 。

辐射强度的大小不仅取决于物体的种类、表面性质、温度, 还与方向有关。

6. 辐射力与光谱辐射力

单位时间内、单位面积的物体向半球空间发射的全部波长的辐射能的总和称为该物体表面的辐射力, 用符号 E 表示, 单位为 W/m^2 。

$\lambda \sim \lambda + d\lambda$ 波长范围内, 单位波长辐射能的辐射力称为光谱辐射力, 用符号 E_λ 表示, 单位为 W/m^3 。

单位时间内、单位面积物体表面向某个方向发射的单位立体角内的辐射能, 称为该物体表面在该方向上的定向辐射力, 用符号 E_θ 表示, 单位为 $W/(m^2 \cdot sr)$ 。

7. 发射率、光谱发射率与定向发射率

前已述及, 实际物体的辐射特性与黑体是不同的, 为了说明它们之间的差异而引入发射率、光谱发射率和定向发射率等概念。

(1) 发射率 实际物体的辐射力 E 与同温度下黑体的辐射力 E_b 之比, 称为该物体的发射率, 也称为黑度, 用符号 ϵ 表示, 即

$$\epsilon = \frac{E}{E_b} \quad (9-6)$$

(2) 光谱发射率 实际物体的光谱辐射力 E_λ 与同温度下黑体的光谱辐射力 $E_{b\lambda}$ 之比称为该物体的光谱发射率 (或称光谱黑度), 用符号 ϵ_λ 表示, 即

$$\epsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{b\lambda}} \quad (9-7)$$

(3) 定向发射率 实际物体在 θ 方向上的定向辐射力 E_θ 与同温度下黑体在该方向上的定向辐射力 $E_{b\theta}$ 之比, 称为该物体在该方向上的定向发射率, 或称为定向黑度, 用符号 ϵ_θ 表示, 即

$$\epsilon_\theta = \frac{E_\theta}{E_{b\theta}} = \frac{L(\theta)}{L_b} \quad (9-8)$$

实际工程中的几种常见材料的定向发射率随方向角 θ 的变化情形如图 9-5 所示。由图可见, 金属材料的 E_θ 在 $\theta \leq 40^\circ$ 的范围内几乎不变; 当 $\theta > 40^\circ$ 时, E_θ 随 θ 的增大而迅速增大, 直到 θ 接近于 90° 时, E_θ 又迅速减小, 趋近于零。非金属材料的 E_θ 在 $\theta < 60^\circ$ 的范围内约为常数; 当 $\theta \geq 60^\circ$ 时, E_θ 随 θ 的增大而迅速减小, 并于 θ 接近 90° 时趋近于零。

二、红外辐射的基本定律

红外辐射定律描述了物体的红外辐射能与其热力学温度 (T)、红外线波长 (λ)、物体的表面发射率 (ϵ) 或吸收率 (α) 等参量之间的关系, 是红外无损检测的理论基础。

前已述及, 在红外物理中, 为研究问题的方便而相继提出了“黑体”、“灰体”等概念, 其中, 黑体是被研究得最多的一类物体, 自然界和实际工程中物体的辐射特性是比照黑体进行的。

关于黑体辐射, 普朗克 (Max Karl Ernst Ludwig Planck: 1858. 4. 23~1947. 10. 4)、维恩 (Wien)、玻尔兹曼 (Boltzman) 等伟大的科学家相继提出了黑体辐射定律、维恩位移定律、斯忒番-玻尔兹曼公式等定律, 奠定了红外无损检测的基石, 现简要介绍如下。

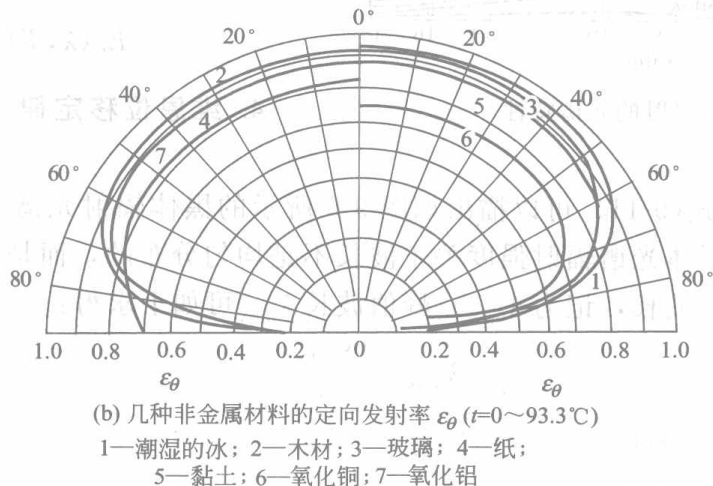
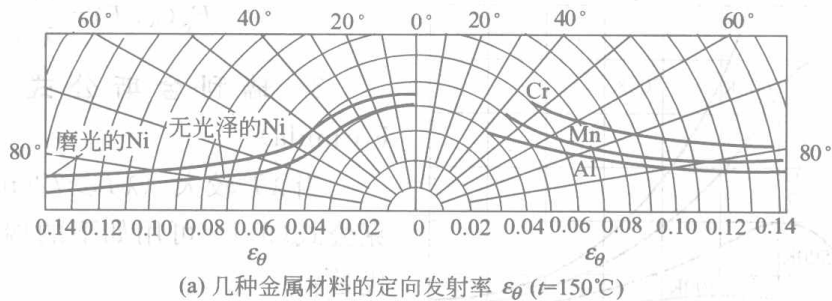


图 9-5 定向发射率随方向角的变化

1. 普朗克定律 (Max Planck Law)

1900 年, 普朗克在量子假设的基础上推导出了与实验结果完全相符的黑体辐射公式, 即单位面积黑体在半球面方向发射的光谱辐射力为波长和温度的函数, 写成数学表达式为:

$$E(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad (9-9)$$

式中 C_1 ——第一辐射常数, $C_1 = 2\pi h C^2 = (3.741832 \pm 0.000020) \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^2$;

C_2 ——第二辐射常数, $C_2 = Ch/k = (1.438786 \pm 0.000045)$, $\text{cm} \cdot \text{K}$;

C ——光速, 等于 $2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$;

λ ——入射波长, μm ;

T ——热力学温度, K ;

h ——普朗克常数, 等于 $6.6256 \times 10^{-34} (\text{W} \cdot \text{s}^2)$;

k ——玻耳兹曼常数, 等于 $1.3805 \times 10^{-23}, \text{ W} \cdot \text{s/K}$ 。

不同温度下黑体的光谱辐射力随波长的变化情形如图 9-6 所示, 由图可以看出, 黑体的光谱辐射特性随波长和温度的变化具有以下特点:

- ① 温度越高, 同一波长下的光谱辐射力越大;
- ② 当温度一定时, 黑体的光谱辐射力随波长连续变化, 并在某一波长处取得最大值;
- ③ 随着温度的升高, 光谱辐射力取得最大值的波长 $\lambda_{\max}$ 越来越短, 即向短波方向移动。

普朗克定律是黑体辐射的基本定律。

2. 维恩公式 (Wien's Formula)

在普朗克公式(9-9)中, 当 λT 的值较小时, 即 $e^{C_2/\lambda T} - 1 \approx e^{C_2/\lambda T}$ 时, 式(9-9)可由如下的维恩公式来代替:

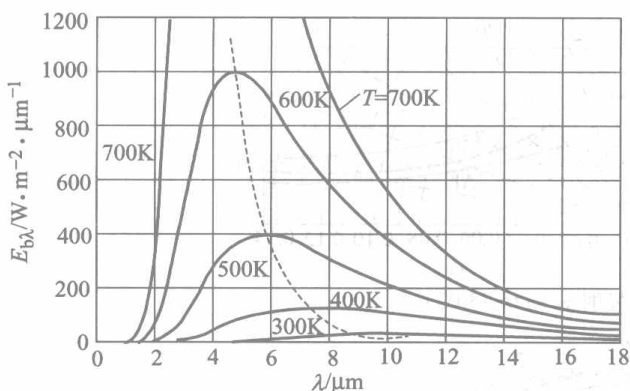


图 9-6 黑体辐射的光谱特性

$$E_b(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T}} \quad (9-10)$$

3. 瑞利-金斯公式 (Rayleigh-Jeans Formula)

当 λT 较大 ($\lambda T \geq 72 \text{ cm} \cdot \text{K}$) 时, 普朗克公式(9-9) 可用如下的瑞利——金斯公式代替:

$$E_b(\lambda, T) = \frac{c_1 T}{c_2 \lambda^4} \quad (9-11)$$

4. 维恩位移定律 (Wien Displacement Law)

Law)

根据式(9-10) 或式(9-11) 可以描出如图 9-6 所示的黑体辐射光谱关于波长的分布特性图。由此可以看出, 黑体光谱辐射强度关于波长不是均匀分布的, 而是有一个极值, 与此极值对应的波长称为峰值波长, 记为 $\lambda_{\max}$ 。峰值波长 $\lambda_{\max}$ 可如下求得:

$$\lambda_{\max} = \frac{2897.6}{T} \quad (9-12)$$

式中 T ——黑体温度, K;

$\lambda_{\max}$ ——峰值波长, μm 。

此即维恩位移定律。

据此可以确定任一温度下黑体的光谱辐射力最大的峰值波长。

由维恩定律可以看出, 在实际可达到的温度下, 峰值波长位于红外区域, 温度为 3000K 时, 峰值波长在可见光谱范围之外, 靠近波长 $\lambda = 0.96 \mu\text{m}$; 当温度为 5000K 时, 峰值波长落到可见光谱的黄绿部分, $\lambda_{\max} = 0.577 \mu\text{m}$ 。可见, 随着温度的升高, 峰值波长变短。

5. 斯忒藩-玻耳兹曼定律 (全辐射定律) (Stefan-Boltzmann Law)

普朗克公式给出的是温度为 T 的绝对黑体的辐射强度随波长的变化情况, 即单色辐射定律, 而斯忒藩-玻耳兹曼定律则描述了绝对黑体的辐射能沿波长从零到无穷大的总和, 即全辐射, 用公式表示为:

$$E(T) = \int_0^{\infty} E(\lambda, T) d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4 \quad (9-13)$$

式中 σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常数, $\sigma = (5.67032 \pm 0.00071) \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}^4$ 。

斯忒藩-玻耳兹曼定律说明, 黑体的辐射力与热力学温度 T 的四次方成正比, 故又称为四次方定律。

6. 基尔霍夫定律 (Kirchhoff's Law)

1860 年, 基尔霍夫研究发现, 物体吸收辐射能的能力与发射辐射能的能力之间存在如下关系:

$$\alpha_\lambda(\theta, \varphi, T) = \epsilon_\lambda(\theta, \varphi, T) \quad (9-14)$$

即任何温度下, 物体在 (θ, φ) 方向上的光谱吸收率在数值上等于该物体在相同温度、相同方向、相同波长下的光谱发射率。

7. 兰贝特定律

普朗克定律阐述了物体沿半球方向辐射的总能量, 而兰贝特定律则指出, 元表面积 dF_1 沿各个方向所辐射的能量是不同的, 随该方向和元表面法线的夹角而变化 (图 9-7)。在法

线方向上 ($\varphi=0$) 的辐射能最大, 当 φ 增大时, 辐射能逐渐减小, 直至 $\varphi=90^\circ$ 时为零止。

兰贝特定律用数学式表达为:

$$E_\varphi(\lambda, T) = E_n(\lambda, T) \cos \varphi \tag{9-15}$$

式中 $E_n(\lambda, T)$ ——元表面沿法线方向在单位时间、单位立体角内的辐射能量, 对于黑体, 其值为 $\sigma T^4/\pi$ 。

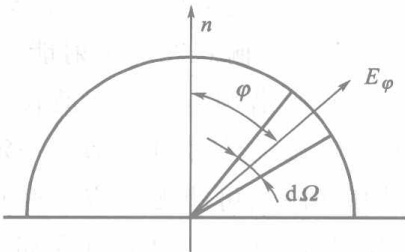


图 9-7 兰贝特定律

因此, 兰贝特定律又称余弦辐射定律。

三、红外辐射的传输与衰减

红外辐射也是一种电磁波, 与其他波长的电磁波一样, 可以在空间和一些介质中传播, 但是在传输方面它还有自己的特点。实验表明, 当红外辐射在大气中传输时, 它的能量由于大气的吸收而衰减。大气对红外辐射的吸收与衰减是有选择性的, 即对某种波长的红外辐射, 大气几乎全部吸收, 就像大气对这种波长的红外辐射完全不透明一样; 相反, 对于另外一些红外辐射, 大气又几乎一点也不吸收, 就像完全透明一样。

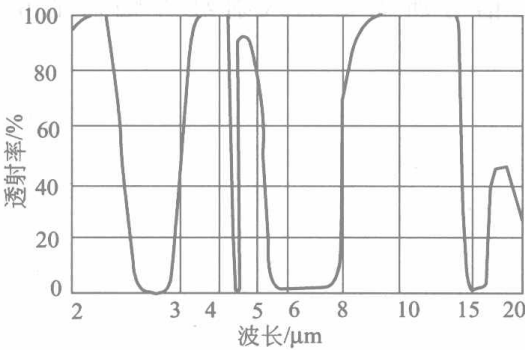


图 9-8 标准大气对红外辐射的选择性吸收

大气对红外辐射的吸收, 实际上是大气中的水蒸气、二氧化碳、臭氧、一氧化碳等气体的分子, 有选择地吸收一定波长的红外辐射。由于上述气体只对一定波长的红外辐射产生吸收, 所以就造成了大气对不同波长的红外辐射具有不同的透过率。标准大气对红外辐射的选择性吸收情况如图 9-8 所示, 由图可见, 能够顺利地透过大气的红外辐射主要有三个波长范围: $1\sim 2.5\mu\text{m}$ 、 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\mu\text{m}$ 。一般将这三个波长范围叫做大气窗口。但是, 即使在这三个波长范围的红外辐射, 在大气中传输时还会有一定的能量衰减, 并且衰减的程度与大气中存在的杂物、水分等有密切的关系。

第三节 红外检测设备

一、红外探测器

能够将红外辐射转换为电信号的器件, 叫做红外探测器。红外探测器是进行红外无损检测的基础和关键器件。

1. 红外探测器的主要性能指标

不同的红外探测器不但工作原理不同, 而且其探测的波长范围、灵敏度和其他主要性能都不同。下面的几个参数常用来衡量各种红外探测器的主要性能。

(1) 响应率 表示红外探测器把红外辐射转换为电信号的能力。它等于输出信号电压与输入红外辐射能之比, 用 R 表示, 即

$$R = U/W \tag{9-16}$$

式中 R ——响应率, V/W ;

U ——输出信号电压, V;

W ——输入红外辐射能, W。

(2) 光谱响应 不同波长的红外辐射射入同一个红外探测器时, 即使输入的红外辐射能相同, 输出的信号电压却不一定相同。这是因为, 同一个红外探测器对某些波长的响应大, 而对其他波长可能无响应。通常将红外探测器对不同波长的响应曲线称为光谱响应曲线。对任何波长的红外辐射响应率都相等的红外探测器, 称为无选择性探测器。如果红外探测器对不同波长的红外辐射响应率不相等, 则称为选择性探测器。选择性探测器的光谱响应曲线有一个峰值响应率 (R_m), 它所对应的波长称为峰值响应波长 (λ_m)。而当光谱响应曲线下降为峰值响应率的一半时, 它所对应的波长, 称为截止波长 (λ_c)。

(3) 等效噪声功率 当红外辐射入射到红外探测器上时, 它将输出一个信号电压, 这个信号电压随着入射的红外辐射变化而变化。此外, 红外探测器除了输出信号电压外, 还同时输出一个与目标红外辐射无关的干扰信号, 称为噪声或杂波。这种干扰信号电压的均方根值, 称为噪声电压。任何红外探测器只能探测到幅度大于本身噪声电压的信号, 除非采用特殊的信号处理技术。所以, 噪声电压成为确定某一探测器最小可探测信号的决定性因素。表示这个特性的参数称为等效噪声功率, 用符号 NEP 表示, 其定义为: 产生与探测器噪声输出大小相等的信号所需要的人射红外辐射能量密度, 可用下式计算。

$$NEP = \frac{\omega A}{U_s / U_n} \quad (9-17)$$

式中 NEP ——等效噪声功率, W 或 MW;

ω ——红外辐射能量密度;

A ——红外探测器的有效面积;

U_s ——红外探测器的输出信号电压;

U_n ——红外探测器的噪声电压。

(4) 探测率 等于等效噪声功率的倒数, 是表示红外探测器灵敏度大小的又一个参数, 即

$$D = \frac{1}{NEP} \quad (9-18)$$

其单位是 $1/W$ 或 $1/\mu W$ 。

从式(9-18)可知, 探测率越大, 其灵敏度就越高。探测率与红外探测器的有效面积 (A) 和频带宽 (Δf) 的平方根成反比。

通常采用归一化探测率, 以消除面积和带宽的影响, 该参数用符号 D^* 表示, 即

$$D^* = D \sqrt{A \Delta f} \quad (9-19)$$

式中 D ——探测率;

A ——红外探测器的有效面积;

Δf ——放大器的频带宽。

(5) 时间常数 它是表示红外探测器对红外辐射的响应速度的一个参数, 其定义为: 当红外探测器加有一理想的矩形脉冲辐射信号时, 它输出的信号幅值由零上升至 63% 时所需要的时间, 其单位是 ms 或 μs 。

红外探测器的时间常数越小, 说明它对红外辐射的响应速度越快。

2. 常用红外探测器

红外探测器一般可分为热电型和光电型两大类,一般而言,热电型探测器的光谱响应宽而均匀、灵敏度较低、响应时间较慢(ms级),室温下工作;而光电型探测器的光谱响应窄、峰值灵敏度较高、响应时间较快(μs 级),需制冷。

(1) 光电探测器

① 光电导型探测器 当红外或其他辐射照射半导体时,其内部的电子接受了能量,处于激发状态,形成了自由电子及空穴载流子,使半导体材料的电导率明显增大,这种现象称为光电导效应。利用光电导效应工作的红外探测器,叫做光电导探测器。常用的此类探测器有碲化铟(InSb)探测器、硫化铅(PbS)、硒化铅(PbSe)探测器及锗(Ge)掺杂质的各种探测器。

光电导型探测器是一种选择性探测器。

当红外辐射或其他辐射照射半导体时,在产生载流子的同时,还存在载流子的复合消失现象。因此,光电导效应只有在辐射照射一段时间后,其电导率才会达到稳定值。当辐射停止时,也有类似现象,称为光效应惰性,它影响了光电导探测器响应时间。一般将光电导上升到90%稳定值所需的时间或光电导下降为10%稳定值所需时间,称为光电导效应的时间常数。

② 光伏型探测器 如果以红外或其他辐射照射某些半导体的PN结,则在PN结两边的P区和N区之间产生一定的电压,这种现象称为光生伏特效应,简称光伏效应。其实际是把光能转换成电能的效应。根据光伏效应制成的红外探测器,叫光伏型探测器,常用的有砷化铟(InAs)、碲镉汞(Hg-Cd-Te)和光伏型碲化铟(InSb)探测器。光伏型探测器和光电导型探测器一样,也是有选择性探测器,并具有确定的波长。光伏型探测器具有一定的时间常数,但是在探测率相同的情况下,光伏型探测器的时间常数可以远小于光电导型探测器。

(2) 热电探测器 是利用某些材料吸收红外辐射后,由于温度变化而引起这些材料物理性能发生变化而制成的。常用的热电探测器有以下几种。

① 热敏电阻红外探测器 对于从X射线到微波波段的辐射都可响应,因此它是一种无选择性探测器,可以在室温环境中工作。它是根据物体受热后电阻会发生变化这一性质制成的红外探测器。因此其工作原理与光电探测器不同。这种探测器的时间常数大,一般在毫秒级,所以只适用于响应速度不高的场合。

② 热释电探测器 这是一种新型探测器,它是利用某些材料的热释电效应制成的。这种效应是指一些铁电材料吸收红外辐射后,温度升高,表面电荷发生明显变化,从而实现对外红外辐射的探测。这种材料有一个很重要的特性,即在它的表面电荷的多少与其本身的温度有关。通常,温度升高,表面电荷减少,利用这个效应,可以制成红外探测器。常用来制作热释电红外探测器的材料有硫酸三甘肽、一氧化物单晶、锆钛酸铅以及以它为基础掺杂改性的陶瓷材料和聚合物等。一般将热释电材料制成薄片,作为红外探测器的敏感元件。当探测器接受红外辐射时,热释电材料被加热,温度上升,表面的电荷将发生变化。这些变化通过电极引出,即输出电压信号。热释电材料在作为探测器时有一个特殊的问题,当热释电材料被稳定不变的红外辐射照射时,其稳定升高到一定数值后,也将稳定不变,此时热释电材料表面的电荷也不再变化,且相应的输出电压信号为零。即采用热释电材料制作的红外探测器,在稳定的红外辐射时将无信号输出。所以,必须将入射的红外辐射进行截光调制,使其产生周期性变化,以保证探测器的输出稳定。

二、红外检测仪器

红外检测仪器是进行红外无损检测的主体设备,其性能的好坏直接影响红外无损检测的成败。根据其工作原理和结构的不同,一般将红外检测仪器分为红外点温仪、红外热像仪和红外热电视等几大类。其中,红外点温仪在某一时刻,只能测取物体表面上某一点(实际为某一区域)的辐射温度(实际为某一区域的平均温度),而红外热像仪和红外热电视能测取物体表面一定区域内的温度场。

以下对红外点温仪、红外热像仪和红外热电视分别予以简要介绍,供设备选型和使用时参考。

(一) 红外点温仪

1. 红外点温仪的主要特点

红外测温仪是用来测量设备、结构、工件等表面的某一局部区域的平均温度。通过特殊的光学系统,可以将目标区域限制在1mm以内甚至更小,因此,有时也将其称为红外点温仪。此类红外测温仪主要是通过测定目标在某一波段内所辐射的红外辐射能量的总和,来确定目标的表面温度。这种红外测温仪的响应时间可以做到小于1s,其测温范围可达0~3000℃。

红外测温仪的不足之处如下:

- (1) 测量精确度受多种因素的影响大,如目标的辐射率和环境条件等;
- (2) 对远距离的小目标测温困难,要实现远距离测温,须使用视场角很小的测温仪,且难以对准目标。

常用的红外测温仪主要有两大类:非致冷型和致冷型,采用致冷的红外探测器可提高探测灵敏度,能适应对低温目标的测量。

2. 红外测温仪的主要技术参数

描述红外测温仪的主要性能指标有测温范围、测温精度、响应速度等。

- (1) 测温范围 即红外测温仪所能正确测量的最高和最低温度区间。
- (2) 工作波段(光谱范围) 指测温仪的工作波长范围,不同的测温仪其范围有较大的差别,如0.9~1.0 μm ; 3.5~4.0 μm ; 8~14 μm ($<500^\circ\text{C}$ 的低温场合)等。一般而言,较高的目标温度优先选用较短的波长,这是因为:

① 适用于较短波长的晶体和玻璃光学系统价格更便宜,货源也更多;② 发射率估计不准确时,所造成的温度误差更小。

- (3) 分辨能力(灵敏度) 指仪器能显示的最小可分辨的温度变化,通常为0.5~2℃。
- (4) 响应速度 通常指从对准目标开始测量起,到显示稳定温度的95%时所需的最短时间。
- (5) 目标尺寸 指距测温仪光学系统焦点处目标的最小尺寸,是表征仪器空间分辨率的参数,主要受视场角的影响。

(6) 距离系数 指目标至测温仪的距离(大于光学系统的焦距时)与目标额定尺寸之比。例如,某测温仪的距离系数为20:1,则在10m处的目标直径必须大于0.5m。否则测量会出现误差。

- (7) 辐射率调整范围 是指红外测温仪允许设置的辐射率数值的范围,通常为0.2~

1.0。使用时必须严格调整测温仪的辐射率值,以保证测量的准确性。

此外,工作环境(常温或需制冷)、供电方式(直流或交流)以及输出方式[模拟、数字、图像(灰度/伪彩色)]等也是实际工作中经常需要考虑的问题。

3. 红外测温仪使用要点

(1) 亮度温度 使用红外测温仪进行测温时,仪器所指示的温度与被测物体的实际温度有一定的偏差,将红外测温仪指示的温度称为亮度温度,这两者之间的偏差就是用红外测温仪进行测量时的误差。因此在实际使用中应注意以下几个影响因素:

① 被测物体的表面辐射率;② 测量环境的噪声;③ 测量系统中的衰减;④ 测温仪自身的稳定性与可靠性。

(2) 辐射率的影响 虽然测温仪上都有辐射率设定装置,但是最大的困难是无法准确地知道被测物体的实际辐射率。物体的辐射率不但与材料、表面状况等因素有关,而且还与物体的温度有关,因此,测量物体的辐射率是非常复杂的。一般采用通过查找资料或对比法来大致确定被测物体在测量条件下的辐射率。

所谓对比法是将一已知辐射率的材料和被测件同时加热,并达到热平衡后两者的温度相同,此时测量两者的辐射能量比,即可算出被测物体的辐射率。

(3) 仪器校正 测温仪使用前后,均需进行校正,以防止发生较大的偏差。

(二) 红外热像仪

红外热像仪是目前世界上最先进的测温仪表,根据其获取物体表面温度场的方式不同,红外热像仪常分为单元二维扫描、一维线阵扫描、焦平面(FPA)以及 SPRITE 等。

1. 红外热像仪的工作原理和特点

由热辐射的基本定律可知,任何温度高于热力学零度的物体,都在不断地向空间进行红外辐射。红外辐射也符合几何光学的一些定律。所以红外辐射通过空间传播到目的地,它首先通过红外扫描单元把来自被测对象的电磁热辐射能量转化为电子视频信号,该信号经过放大、滤波等环节处理后传输到显示屏等处。它显示的是一幅热图,是物体红外辐射能量密度的二维分布图。在显示器上看到的黑白或彩色图像都是由一个个明暗不同或颜色不同的小点(通常称为像素)所构成的。通常一幅图像由几十万或上百万个像素组成,要想将物体的热像显示在监视器上,首先需将热像分解成像素,然后通过红外探测器将其变成电信号,再经过信号综合,在监视器上成像。图像的分解一般采用光学机械扫描方法。目前高速的热像仪可以做到实时显示物体的红外热像。

热像仪的最大特点在于它不仅可以测某一点的温度,而且还可以测量物体的温度场。其输出可以是直接数字温度显示(点温),也可以通过用不同的颜色来形象地表征被测物体的温度分布。早先的热像仪需要制冷装置,从而限制了其使用范围。最近研制成功的热像仪具有体积小、重量轻、测温范围宽、不需冷却装置、交直流供电方式等特点,方便了在野外现场的使用。

红外测温仪所显示的是被测物体的某一局部的平均温度,而红外热像仪除了具有红外测温仪的各种优点外,还具有以下特点。

① 能显示物体的表面温度场,并以图像的形式显示,非常直观。

② 分辨力强,现代热像仪可以分辨 0.1°C 甚至更小的温差。

③ 显示方式灵活多样,温度场的图像可以采用伪彩色显示,也可以通过数字化处理,

采用数字显示各点的温度值。

④ 能与计算机进行数据交换，便于存储和处理。

热像仪的主要不足之处如下。

热像仪一般需要用液氮、氧气或热电致冷，以保证红外探测器在低温下工作。这样使得结构复杂，使用不够方便。此外，光学机械扫描装置结构复杂，操作维修不方便。红外热像仪的价格也非常昂贵。



图 9-9 TVS-8100MK II 型
红外热像系统

2. 红外热像仪的主要技术参数

红外热像仪的技术参数随生产厂家而异，不同的生产厂家有不同的定义方法，即使对同一个指标，不同的生产厂家可能给出完全不同的名称，这在一定程度上，给选用带来了困难甚至混淆。表 9-1 所示是目前国际先进的 TVS-8100MK II 红外热像系统的主要技术指标，该系统的构成如图 9-9 所示，由摄像头和测控系统组成。

表 9-1 TVS-8100MK II 型红外热像系统的主要技术参数

序号	项 目	参 数
1	视场(FOV)	25mm 的标准镜头:13.6°(垂直方向)×18.2°(水平方向)
2	空间分辨率	25mm 的标准镜头:2mrad
3	测量距离	20cm 至无穷远
4	显示帧频	60 帧/秒
5	探测器	120(V)×160(H)二维焦平面阵列(FPA)InSb 探测器
6	探测波段	3.6~4.6μm
7	制冷方式	斯特林(Stirling)循环制冷
8	显示像素	240(V)×320(H)
9	自动室温补偿功能	内建
10	最小探测温差	0.025℃
11	测量范围	-40~300℃,其中标定范围为-20~300℃
12	测量精度	满量程的±4%或±4℃(取其中大者)
13	A/D 转换	12bits
14	显示器	6"LCD 彩色显示器(参见图 9-9)
15	软盘的热图像记录与回放	最高记录帧频:30 帧/秒 记录与回放时间间隔:5s~60min 可选 图像存储格式:MS-DOS 格式 可用软磁盘:3.5"双面高密度软盘
16	摄像头与主机间的传输距离	标准配置 5m,可扩展至 20m
17	外部接口	RS-232C,SCSI-II
18	图像输出信号	(NTSC)输出阻抗:75Ω,输出幅值:1.0Vp-p (RGB)输出阻抗:75Ω,输出幅值:0.7Vp-p
19	使用环境	温度:0~40℃,湿度:<90%,振动 1.5G,10~150Hz,冲击:5G,11ms
20	供电电源	100~120V/220~240V,50/60Hz 交流

(三) 红外热电视 (Pyroelectric Vidicon Thermal Imager)

红外热电视是一种采用电子扫描方式热电探测器的二维红外成像装置。它具有红外热像

仪的基本功能，两者的主要差别在于：红外热电视给出的是定性热图像，而红外热像仪输出的是定量热图像。

红外热电视的主要特点如下。

- ① 采用电子束扫描或电荷耦合器件（CCD）扫描方式，不需要高速运动的光学和机械元件，因此造价低，制作容易。
- ② 由于采用热电探测器，不需致冷，使用维护方便，有利于现场应用。
- ③ 可直接用电视显示、记录或重放等。

红外热电视是近十几年才开发成功的新型红外检测仪器，其灵敏度与其他红外探测器相比，还需进一步提高，温度的测定方法等有待于改善。

第四节 红外无损检测技术

一、检测方式

（一）主动式检测与被动式检测

在红外无损检测中，根据检测时是否需要对被检件施加热（冷）激励，而将其分为主动式检测和被动式检测两大类。

被动式检测利用被检件自身的辐射能而不需对其施加热（冷）激励，多用于运行中的电力设备（如高压电缆、开关等）、石化设备（如反应釜、蒸馏塔等）的在役检测。

主动式检测需在检测时对被检件施加外部热（冷）激励，使其表面温度场发生变化，通过连续获取来自被检面的红外热图像，来对其中有否缺陷进行判断。主动式检测一般为动态检测，缺陷热图像的显现是暂时的，它可能一晃即逝，导热快的材料更是如此，这就是红外对高导热性材料的检测有困难的原因。

无损检测研究一般采用主动式检测。

（二）反射式检测与透射式检测

在主动式检测中，根据检测时激励源、被检件和红外探测设备三者的相互位置关系，分为反射式检测与透射式检测。在反射式检测中，激励源和红外探测设备处在被检件的同一侧面，故又称单面法检测；而在透射式检测中，激励源和红外探测设备处在被检件的相对两侧面，故又称双面法检测。

反射式检测和透射式检测的设备布置如图 9-10 所示。

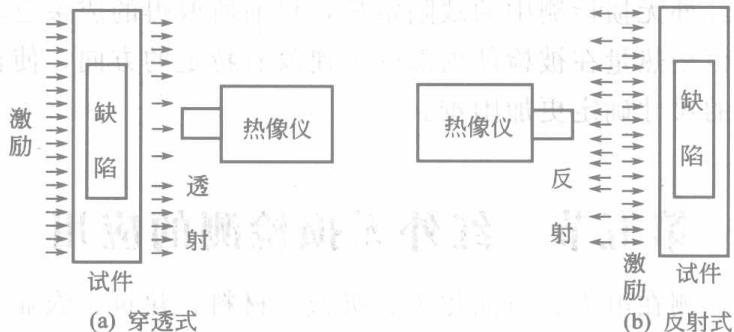


图 9-10 反射式和透射式

二、激励源和激励方式

1. 激励源

在主动式检测中,对被检件的激励有多种方式,其主要目的是在被检件中造成温度场的扰动,使被检件的探测面的温度场在激励的作用下不断变化,通过连续获取目标物体表面的红外辐射能,对被检件进行检测。

根据激励温度与被检件初始温度的相对高低,激励源有热源和冷源之分。所谓热源,是指激励温度高于被检件初始温度的激励源,而冷源则是指激励温度低于被检件初始温度的激励源。

对激励源的基本要求是:激励均匀、激励速度快、操控简便、价格便宜。

常用的热激励源有辐射加热器、聚光灯、热流体(气、液)、摩擦热等,常用的冷源有干冰、冷气等。

2. 激励方式

激励方式有均匀激励和脉冲激励两种,其中均匀激励又可进一步划分为均匀面激励、均匀线激励和均匀点激励三种,而脉冲激励也可分为脉冲面激励、脉冲线激励和脉冲点激励三种。

三、红外辐射能的获取

红外辐射能的获取是红外无损检测的关键,所用设备即是前面介绍过的红外点温仪、红外热像仪或红外热电视。目前,无损检测中常用的红外辐射能探测设备是红外热像仪。

由于红外热像仪的内部存储空间很有限,所以,探测时机的掌握非常重要,以捕获被检物体表面的有效红外热图像。为提高对有效红外热图像的捕捉效率,可采取数值仿真的方法,在实际检测之前先进行模拟计算,计算出最佳检测时机。

四、缺陷的定性、定位与定量

(1) 缺陷定性 在红外无损检测中,一般只能将缺陷分为导热性缺陷和隔热性缺陷,至于对缺陷真实类型的判断,则要有材料和加工工艺方面的知识,结合缺陷热图像的形状来进行。

(2) 缺陷定位 红外无损检测中,缺陷的平面位置(投影方向的位置)比较容易确定,一般情况下可将热图像上的缺陷中心看作实际工件中的缺陷中心。缺陷在深度方向的位置确定目前还不够准确,还有待深入研究。

(3) 缺陷定量 红外无损检测中的缺陷定量,目前所取得的成果也非常有限。就投影方向的缺陷尺寸而言,由于热量在被检件内部的传递没有特定的方向,使得对缺陷边界的判定非常困难,厚度方向的尺寸确定更加困难。

第五节 红外无损检测的应用

目前,红外无损检测在电力、石油化工、机械、材料、建筑、农业(生物优种、果品质量检测)、医学(口腔疾病、皮肤病、乳腺癌)等领域已获得广泛应用,并显示出越来越强大的生命力。

一、红外无损检测在电力工业的应用

电力工业是红外无损检测开展最早、应用范围最广的领域之一。

就世界范围而言,瑞典的国家电力公司最先开展电气设备运行状态的红外无损热检测诊断。目前,英国、美国等许多国家都广泛开展电力设备的红外热像检测研究。

在我国,红外技术已广泛应用于电力设备(如线缆、接头、开关、拉杆、套管、互感器、电容器、变压器等)的热状态的无损检测。有多家高校和科研院所进行了红外无损检测与诊断的技术基础研究,取得了一定的研究成果,全国各大供电公司(局、站、所)则对一些电气设备进行了红外无损检测,积累了大量的原始资料。

为更好地规范和指导红外热像技术在电力工业中的应用,在对一些典型设备的典型故障进行现场实测和模拟试验的基础上,国家经贸委 1999 年颁布实施了“带电设备红外诊断技术应用导则”(DL/T 664—1999),其中包含有 40 幅典型故障的热像图谱。

二、红外无损检测在石油化工中的应用

石化系统也是开展设备运行状态红外热像诊断比较广泛的行业,国内外都有大量的相关研究报道。目前已对石化生产中的催化再生器、乙烯裂解炉、沉降器、加氢反应器、除沫器、物料输送管线等设备运行状态的热诊断与热监测进行了实际红外热像检测,获取了耐腐砖裂纹、冲刷减薄以及局部脱落等石化设备中常见的典型故障形式的红外热像图,对这些故障可以进行初步的定性和定量分析。

三、材料和构件的红外无损检测与评价

在材料的缺陷红外无损检测与评价方面,国内外的许多科技工作者进行了卓有成效的研究工作,取得了一些很有价值的研究成果。目前已能对复合材料中的脱黏、夹杂等缺陷进行有效的检测。

图 9-11 所示是实验获取的金属复合板的热像图,图中清楚地显示了其中的缺陷。

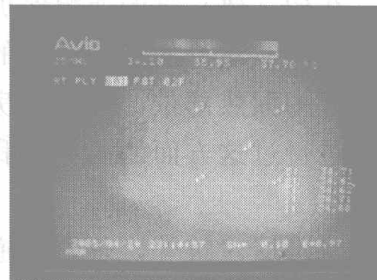


图 9-11 金属板的热像图

四、红外无损检测在机械领域的应用

1. 焊点质量的无损检测

采用外部热源给焊点加热,利用红外热像仪检测焊点的红外热图及其变化情况来判断焊点的质量。无缺陷的焊点,其温度分布是比较均匀的,而有缺陷的点则不然,并且移开热源后,其温度分布的变化过程,与无缺陷焊点将产生较大差异。

2. 压力容器衬套检测

利用红外成像技术进行压力容器衬里脱落或缺陷检测的方法是,利用红外热像仪,从容器表面温度场数据的传热理论分析和用计算机程序的实例计算,推算出容器内衬里层的变化,从而达到对容器内衬里缺陷的定量诊断的目的。

3. 焊接过程检测

在焊接过程中,应用红外检测技术的场合比较多,例如,采用红外测温仪在焊接过程中实时检测焊缝或热影响区某点或多点的温度,进行焊接参数的实时修正。采用红外热像仪检

测焊接过程中的熔池及其附近区域的红外图像,经过分析处理,获得焊缝宽度、焊道的熔透情况等信息,实现焊接过程的质量与焊缝尺寸的实时控制。在自动焊管生产线上,采用红外线阵 CCD 实时检测焊接区的一维温度分布,通过控制焊接电流的大小,保证获得均匀的焊缝成形。

4. 轴承质量检测

被测轴瓦是由两层金属压碾而成,可能存在中间层,或者大的体积状、面状缺陷。由于内部有缺陷处与无缺陷部分传热速度不同,采用对工件反面加热,导致有缺陷处温度低于无缺陷处的表面温度,通过红外摄像可获得缺陷的图像和尺寸。用类似方法也可进行轴承滚子表面裂纹的检测。

五、构(建)物的红外无损检测与评价

构(建)物的红外无损检测与评价主要有健康状态测评和能源保护测评两方面的目的。

在构(建)物的健康状态检测与评价方面,相对于回弹、钻芯取样、声阻抗等常规检测方法,红外(热像)技术有其独特优势,因为红外热像检测不会对被检对象造成损坏,这对具有文物价值的古建筑具有特别重要的意义。国内外有不少研究者从事这方面的研究工作,进行了水泥构件中缺陷的红外无损检测与评定研究,实验研究了水泥砂浆的受伤温度和强度损失与其红外热像图特征之间的关系,初步得出了它们之间的定量关系,为混凝土火灾损伤的检测与评定探索了一条可能的新途径。希腊雅典国立技术大学化学工程系的 A Moropoulou 教授等则用红外热像仪,实际检测了机场跑道的裂纹和剥离缺陷。

在构(建)物的能源保护方面,早在 1966 年,瑞典就在世界上率先采用了红外热像技术从事房屋建筑的保热性能的检测与评价。他们用红外热像仪测取房屋的热像图,以此来发现房屋的漏热部位,为改正房屋的结构和材料提供实测数据。美国、加拿大、德国等许多国家都进行过这方面的研究,我国也有一些单位从事房屋建筑节能的红外热像技术检测与评价工作。

除房屋建筑外,热力管道的保温效果检测与评价,是红外热像技术在能源保护方面的又一个重要应用领域。通过测取管道的红外热像图,可以比较容易地发现管道的漏损点。

六、红外无损检测在自动测试方面的应用

现代电子电路的集成度越来越高,单个芯片的功能日益复杂,而其尺寸及管脚间距日趋缩小,这就给集成电路、PCB 板以及电子仪器整机的故障检测与定位提出了新课题。为应对这种挑战,国内外有许多研究人员,探索采用红外热像技术,对集成电路、PCB 板以及电子仪器整机进行故障检测与定位,研制成功了基于红外热像技术的电路板自动测试系统。

七、红外热像技术在灾害防治方面的应用

矿柱稳定性、顶板跨落、矿爆、岩爆等是困扰矿山安全生产的一个难题。为探索红外热像技术在这方面的应用,中国矿业大学(北京)吴立新教授领导的课题组在多项国家与省部级课题的支持下,进行了“矿山岩石受力的红外辐射规律及其遥感”、“岩石剪切红外成像实验及首都圈地震遥感预报”、“岩石、混凝土应力与灾变遥感遥测的基础理论与实用技术”和“岩石撞击的热辐射特征及其反演问题”等基础研究和攻关,实验研究了岩石在单轴压缩、压剪、纯剪、双剪摩擦滑移、钻进、撞击以及刻划下的红外辐射规律,取得了一批有

价值的定性定量成果。

地震预测预报一直是广受大众关注的问题。基于大地震前的地温异常变化,为探究将红外热像技术应用于地震预测预报方面的可能性,国家地震局地球物理所的耿乃光等进行了热红外震兆成因的模拟实验研究,他们模拟研究了由地壳岩石破裂和断层粘滑失稳两种机制引起的构造地震,并用红外热像仪观测了岩样在加载变形或滑动过程中的红外热像变化。实验发现,在加载过程中,岩样总体为升温过程,但在临破裂前,不同的破裂方式,表现出不同的热像特征。该实验研究表明,红外热像技术在地震预测预报方面将会有所作为。

八、医学红外热像诊断

早在 20 世纪 50 年代 R. N. Lawson 就指出了红外热像技术用于医学诊断的可能性。时至今日,红外热像技术已广泛应用于肿瘤、乳腺疾病、甲状腺疾病、腹胀寒热、腰椎损伤、围产检查、风湿关节炎、软组织损伤、脑血管疾病等临床检查诊断,取得了令人满意的效果。

九、红外泄漏检测

在实际生产中,管束振动、腐蚀、疲劳、断裂等原因将导致换热器壳侧或管侧介质发生泄漏,从而降低产品质量和生产能力,影响生产的正常运行。换热器泄漏的发生及程度的判定,对于保证换热器安全运转、节约能源,充分发挥其传热性能,提高经济效益具有重要意义。除了可根据生产工艺参数进行工况分析外,还可以采用红外测温技术监测换热器的运行情况,及时发现其泄漏的性质和部位。如某化工总厂在生产过程中发现一换热器出现高温报警,遂采用热像仪进行温度测试,获得了换热器的温度分布状况。检测中发现局部温度不正常,通过分析证实了换热器壳侧的氨气已漏入了管侧的冷却水中,造成气液混合,降低了冷却效果,使出口温度不断升高。

十、红外无损检测的其他应用

1. 火车车轮轴承过热的测量

火车车轮轴承座如果出现缺陷(如轴承中有裂纹或润滑不足等),在列车运行中将迅速过热,如不能及时发现,可能导致车轮卡住或轴承损坏,使列车有可能出轨。对于上述问题,可采用红外辐射检测方法解决。在指定地点的钢轨两侧安装红外辐射探测器,使过往列车车轮轴承发射的红外辐射恰好入射至红外探测器的物镜上,监测轮轴超过规定温度标准的过热情况。

2. 太阳能电池质量的红外热像无损检测

为适应太阳能发电的需要,近年来单体硅太阳能电池的尺寸逐渐向大面积方向发展,除了电池的结构材料等因素外,电池内部如 PN 结的不均匀性、电极虚焊、局部短路以及裂纹等缺陷也是影响大面积太阳能电池质量的重要因素。一般测量方法只能得到整个电池总的光电参数,对多片单体电池组成的整个电源,在进行检测时就显得很不方便。采用红外热像技术测量,可发现太阳能电池存在的内部缺陷。这种检测方法的原理是:在太阳能电池外加正、反向偏压时,将有正、反向电流流过 PN 结,并按 $P=IV$ 的关系加热整个电池。这一温度对应着单体电池本身向外发射的红外辐射强度。显然,当流过 PN 的结电流 I_e 不同时,该处的发热功率 P_e 也不同。一般硅太阳能电池的结深很浅(只有 $0.2\sim 0.4\mu\text{m}$),整个电池

的厚度也很小(一般不超过1mm)。因此各种内部缺陷造成正偏压时,发热量的不同能很快并十分准确地反映在电池表面,这对应用红外热像进行无损检测是极为有利的。采用红外热像技术能十分方便、快速、准确地查出是哪个单体电池损坏或质量明显下降。红外无损检测方法可作为一种在线检测方法,与其他检测方法配合,不但能对电池做定性检测,也能做定量检测和分析,以提高单体电池的质量。特别是对太阳能电池电源方阵的无损检测,其优点尤为明显。

复习思考题

简述红外无损检测的基本原理、主要特点和适用范围。

参考文献

- [1] 李国华, 吴立新, 吴森等. 红外热像技术及其应用的研究进展. 红外与激光工程, 2004, 33 (3): 227~230.
- [2] Xavier P. V. Maldague. NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF MATERIALS BY INFRARED THERMOGRAPHY. London: Springer-Verlag Limited, 1993.
- [3] XAVIER P. V. MALDAGUE. THEORY AND PRACTICE OF INFRARED TECHNOLOGY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, New York: John Wiley & Sons, Inc. 2001.
- [4] Herbert Kaplan (Honeyhill Technical Company). Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington, USA, 1993.
- [5] 吴立新, 李国华, 吴焕萍. 热红外成像用于固体撞击瞬态过程监测的实验探索. 科学通报, 2001 (2): 172~176.
- [6] Wu Lixin, Wu Yuhua Liu Shanjun, Li Guohua et al. Infrared radiation of rock impacted at low velocity. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41 (2): 321~327.
- [7] INFRARED TECHNOLOGY: FUNDAMENTALS AND SYSTEMS APPLICATIONS., 1980. ENGINEERING SUMMER CONFERENCES, June 16~20.
- [8] 张维力. 红外诊断技术. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [9] Bentz D P et al. Thermographic imaging of surface finish defects in coating on metal substrates. M. E, 1992, 50 (2): 242.
- [10] 李国华(导师: 吴森教授). 金属及其复合板的红外热像无损检测方法的研究(D). 中国矿业大学(北京)博士学位论文, 2004. 12.
- [11] 李家伟, 陈积懋主编. 无损检测手册. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [12] John J. Burke, Volker Weiss. Nondestructive Evaluation of materials. New York: Plenum press, 1979.
- [13] Massoud Kaviany. Principles of Heat Transfer. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2002.
- [14] Weil Gary J., Rowe Thomas J. Nondestructive testing and repair of the concrete roof shell at the Seattle Kingdom. NDT & E International, 1998, 31 (6): 389~400.
- [15] McCann D M, Forde M C. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. NDT & E International, 2001, 34 (2): 71~84.
- [16] Grinzato E, Bison P G, Marinetti S. Monitoring of ancient building by the thermal method. Journal of Cultural Heritage, 2002 (3): 21~29.
- [17] Wiggenshauser H. Active IR-application in civil engineering. Infrared Physics & Technology, 2002, 43: 233~238.
- [18] Clark M., McCann D M., Forde M C. Infrared thermographic investigation of railway track ballast. NDT and E International 2002, 35 (2): 83~94.
- [19] Wong B S, Tui C G, Bai W, Tan P H, low B S, Tan K S. Thermography evaluation of defects in composite materials. INSIGHT, 1999, 41 (8): 504~509.
- [20] Davor G. Mandic, Richard E. Martin, John H. Hemann. Thermal Imaging Technique to Detect Delaminations in

- CFRP Plated Concrete. SPIE, 3396, 1998: 22~27.
- [21] Daniel Bates, Dawei Lu, Gordon Smith et al. Rapid NDT of composite aircraft components using lock-in ultrasonic and halogen lamp thermography. Proceedings of SPIE, 2000, 3993: 2~13.
- [22] Varis J, Rantala J, Hartikainen J. Infrared line scanning technique for detecting delaminations in carbon fibre tubes. NDT & E International, 1996, 29 (6): 371~377.
- [23] Schroeder J A, Ahmed T, Chaudhry B et al. Non-destructive testing of structural composites and adhesively bonded composite joints: pulsed thermography. Composites Part A: 2002, 33: 1511~1517.
- [24] Avdelidis N P, Hawtin B C, Almond D P. Transient thermography in the assessment of defects, NDT&E international, 2003, 36: 433~439.
- [25] Henrik Berglind, Alexander Dillenz. Detecting glue deficiency in laminated wood _ a thermography method comparison. NDT&E international, 2003, 36: 395~399.
- [26] Gurudutt S. Bangalore. Nondestructive evaluation of FRP composite members using infrared thermography. Master degree thesis. West Virginia University, 2002.
- [27] Moropoulou A, Avdelidis N P, Kouli M et al. An application of thermography for detection of delaminations in airport pavements. NDT and E International, 2001, 34 (5): 329~335.
- [28] Moropoulou A, Kouli M, Avdelidis N P. Infrared thermography as an NDT tool in the evaluation of materials and techniques for the protection of historic monuments. Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2000, 42 (6): 379~383.
- [29] Robert P. Madding (editor). Thermal Infrared Sensing Applied to Energy Conserve in Building Envelopes (Thermosense III), Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), Sept. 2~5, 1980, 254, Minnesota, USA.
- [30] Stephen J Marshall. Detecting moisture in building using infrared thermography, in Robert P. Madding (editor), Thermal Infrared Sensing Applied to Energy Conserve in Building Envelopes (Thermosense III) Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), Minnesota, USA, Sept. 2 ~ 5, 1980, 254: 111~117.
- [31] Garder W E. The current status of Research & Development. INSIGHT, 1999, 41 (12): 755~761.
- [32] Shipp R. NDT in the UK electricity supply industry. INSIGHT, 1999, 41 (12): 762~765.
- [33] Hiscox T. NDT in the UK aerospace industry. INSIGHT, 1999, 41 (12): 767~769.
- [34] Raine G A. The development and the role of non-destructive testing in the UK offshore industry. INSIGHT, 1999, 41 (12): 772~777.
- [35] McNulty A. NDT in the UK petro-chemical industry. INSIGHT, 1999, 41 (12): 778~780.
- [36] Knox T J. NDT in the steel industry. INSIGHT, 1999, 41 (12): 781~783.
- [37] Hills P. Condition management review. INSIGHT, 1999, 41 (12): 784~791.
- [38] Dattoma V, Marcuccio R, Pappalettere C et al. Thermography investigation of sandwich structure made of composite material. NDT& E International, 2001, 34 (8): 515~520.
- [39] Titman D J. Applications of thermography in non-destructive testing of structures. NDT& E International, 2001, 34 (2): 149~154.
- [40] Toshimitsu ISHII, Yoshizo OKAMOTO. Investigation of Qualification, Certification and Reference Testing Methods on Nondestructive Inspection by means of Infrared Thermography. 非破坏检查, 1999, 48 (10): 642~652 (In Japanese).
- [41] Toshimitsu ISHII, Yoshizo OKAMOTO, Norikazu OOKA et al. Nondestructive Detection of Surface Flaws in Materials by Infrared Thermography. 非破坏检查, 1999, 48 (10): 682~686 (In Japanese).
- [42] Mutsuhito YANAI, Juichi KANAMITSU, Takashi MIYAZAKI. Evaluation of Defects on the Thermal Image by Contamination of the Surface of a Tunnel Wall. 非破坏检查, 1999, 48 (10): 667~672 (In Japanese).
- [43] Hideyuki UEMURA. Measurement of Thermal Distribution for Electronic Devices using Infrared Camera. 非破坏检查, 2001, 50 (5): 302~305 (In Japanese).
- [44] Takahide SAKAGAMI, Shiro KUBO. Recent Topics on Nondestructive Testing Techniques Using Infrared Ther-

- mography. 非破坏检查, 1999, 48 (10): 653~660 (In Japanese).
- [45] Shintaro HARADA. Thermography NDI for Ceramics Coated Materials. 非破坏检查, 2000, 49 (9): 612~616 (In Japanese).
- [46] Terumi Inagaki, Toshimitsu Ishii, Toshikatsu Iwamoto. On the NDT and E for diagnosis of defects using infrared thermography. NDT&E International, 1999, 32 (5): 247~257.
- [47] Terumi Inagaki, Yoshizo Okamoto. Diagnosis of the leakage point on a structure using infrared thermography in near ambient conditions. NDT and E International, 2001, 30 (3): 135~142.
- [48] Taketo Uomoto. MAINTENANCE OF CONCRETE STRUCTURES AND APPLICATION OF NON-DESTRUCTIVE INSPECTION IN JAPAN. Non-destructive Testing in Civil Engineering 2000, Tokyo, Japan Apr. 25~27, 2000: 1~11.
- [49] A. -C. Legrand, F. Meriaudeau, P. Gorria. Active infrared non-destructive testing for glue occlusion detection within plastic lids. NDT and E International, 2002, 35 (3): 177~187.
- [50] Giorleo, Giuseppe, Meola, Carosena. Comparison between pulsed and modulated thermography in glass-epoxy laminates. NDT&E International, 2002, 35 (5): 287~292.
- [51] Wawrzynek A, Nowak A J, Bartoszek M et al. Application of direct/inverse analysis to evaluate the structure integrity of concrete. Part I. Formulation for thermo-mechanical properties determination, NDT&E international 36 (2003): 101~110.
- [52] 陈衡. 我国红外诊断技术的现状与展望. 激光与红外, 1998, 28 (05): 292~296.
- [53] 陈衡. 红外扫描测温与热诊断学. 激光与红外, 1996, 26 (12): 67~71.
- [54] 刘国俊. 红外热像技术用于检测接点缺陷. 激光与红外, 1996, 26 (12): 136~138.
- [55] 田志海. 内部电绝缘缺陷的红外热像检测诊断. 激光与红外, 1996, 26 (12): 92~94.
- [56] 曾庆立. 用红外仪检测开关拉杆的绝缘缺陷. 激光与红外, 1996, 26 (12): 95~96.
- [57] 戴锦春, 吴功平, 郭应龙等. 高压输电线破损的红外故障诊断系统. 武汉水利电力大学学报, 1998, 31 (2): 61~64, 69.
- [58] 侯年仓. 红外成像技术在诊断高压电气设备内部故障方面的应用. 热力发电, 1997, 26 (05): 37~42.
- [59] 张维力. 红外热像仪在电力工业中的应用. 激光与红外, 1996, 26 (12): 105~106.
- [60] 胡世征, 申兴忠. 红外热像仪在河北电网中的应用. 激光与红外, 1996, 26 (12): 107~111.
- [61] 江欣. 红外热像仪诊断高压电气设备缺陷. 激光与红外, 1996, 26 (12): 114~116.
- [62] 叶建泗. 红外诊断技术及其在电力系统中的应用. 高电压技术, 2001, 27 (1): 37~38.
- [63] 侯年仓. 高压电气设备内部故障红外成像诊断技术. 红外技术, 1998, 20 (6): 42~46.
- [64] 沈军. 耦合电容器故障红外诊断一例. 高电压技术, 2001, 27 (02): 80~81.
- [65] 杨光玉. 红外诊断技术在六圩 220kV 变电站的应用. 广西电力技术, 1999 (03): 30~32.
- [66] 袁世禄. 红外诊断技术在电气设备状态检修中的应用. 华北电力技术, 2000 (8): 18~19.
- [67] 仲蛭生, 李晓刚, 刘占民. 热设备衬里损伤的红外诊断及特征识别. 激光与红外, 1996, 26 (12): 101~104.
- [68] 付冬梅, 李晓刚. 壁加氢反应器在线红外热像检测与安全评定. 激光与红外, 2001, 31 (4): 230~233.
- [69] 金光照, 徐长山, 岳长进等. 乙醛装置设备内部热故障的红外热像诊断技术. 激光与红外, 1999, 29 (6): 334~335.
- [70] 金光照, 徐长山, 岳长进等. 红外热像技术诊断乙烯裂解炉热故障. 激光与红外, 1999, 29 (5): 308~309.
- [71] 金光照, 岳长进, 于波等. 红外热像技术在重油催化装置设备衬里损伤诊断中的应用. 化工科技, 2001 (1): 48~50.
- [72] 仲蛭生, 李春诚, 任迅. 红外热像技术应用于石化设备的检测诊断. 激光与红外, 1999, 29 (5): 310~314.
- [73] 杨于北, 王翊, 李自强. 热像分析技术在房屋诊断中的应用. 激光与红外, 1996, 26 (12): 122~124.
- [74] 张雄. 建筑物红外检测技术. 无损检测, 1997, 19 (5): 5~8.
- [75] 杜红秀, 张雄, 乔俊莲. 红外热像用于水泥砂浆火灾损伤的检测与评定. 同济大学学报, 1999, 27 (4): 499~502.
- [76] 成永红, 谢恒, 衣立东. 基于热效应的电力电缆及其终端在线检测技术. 高电压技术, 1999, 25 (3): 4~6.
- [77] 陈晓军, 杨立中, 邓志华等. 电气线路红外热像检测和诊断. 红外与毫米波学报, 2000, 19 (6): 463~466.

- [78] 袁宏永, 赵建华, 范维澄. 基于热像技术的电缆火险隐患诊断研究. 中国科学技术大学学报, 2000, 30 (1): 108~112.
- [79] 陈晓军, 袁宏永, 谢辉. 红外热像技术在电气火灾隐患检测中的应用. 红外技术, 1999, 21 (4): 40~43, 47.
- [80] 袁宏永, 赵建华, 范维澄等. 电气线路火险隐患与运行设备故障隐患在线热诊断系统. 火灾科学, 1999, 8: 50~55.
- [81] 赵建华, 袁宏永, 范维澄等. 基于表面温度场的电缆线芯温度在线诊断研究. 中国电机工程学报, 1999, 19 (11): 52~54, 68.
- [82] 曾可令, 吴卫生. 红外热像技术无损检测机理的仿真研究. 激光与红外, 1996, 26 (12): 141~144.
- [83] 曾可令, 吴卫生. 复合材料的红外无损检测. 激光与红外, 1996, 26 (12): 80~84.
- [84] 梅林, 陈自强, 王裕文等. 脉冲加热红外热成像无损检测的有限元模拟及分析. 西安交通大学学报, 2000, 34 (1): 66~70.
- [85] 陈珏. 材料内部脱黏的红外无损检测. 红外技术, 2001, 23 (3): 39~42.
- [86] 陈珏, 耿健. 单面法红外无损检测的数学分析与计算机模拟. 激光与红外, 2001, 31 (3): 173~176.
- [87] 张建新, 宗明成, 刘官元. 脉冲加热红外热成像无损检测技术的研究. 无损检测, 1998, 20 (6): 155~158.
- [88] 汤慧君, 丁铁英, 宗明成. 脉冲加热红外热成像无损检测的模拟研究. 激光与红外, 1999, 29 (1): 46~50.
- [89] 薛书文, 宗明成. 尼龙材料内部缺陷的红外热成像无损检测. 红外技术, 1997, 19 (5): 40~44.
- [90] 王厚亮, 李建保, 孙格靓. 碳纤维树脂内部缺陷的红外检测. 红外技术, 2000, 23 (2): 49~52.
- [91] 孙格靓, 李建保, 王厚亮等. 碳纤维增强混凝土构件破坏过程的动态红外监测. 红外技术, 2001, 23 (1): 39~43.
- [92] 黄松岭, 李路明, 杨海青等. 复合材料胶接缺陷的红外热像检测. 宇航材料工艺, 2002 (6): 43~46.
- [93] 李路明, 黄松岭, 杨海青等. 复合材料分层缺陷的红外热像检测. 航天制造技术, 2002 (2): 19~21.
- [94] 朱德忠, 郑明清, 陈雷. 应用红外热成像技术检测蜂窝结构材料内部缺陷. 上海交通大学学报, 1999, 33 (8): 1036~1038.
- [95] Qin Y. -W, Bao N K. Infrared thermography and its application in the NDT of sandwich structures. Optics and Lasers in Engineering, 1996, 25: 2~3.
- [96] 张广喜. 印刷电路板红外热图的定量分析. 激光与红外, 1996, 26 (12): 129~130.
- [97] 华顺芳, 于胜学, 王卫国. 红外热像技术诊断印刷电路板故障. 激光与红外, 1996, 26 (12): 131~133.
- [98] 陈国顺, 吴国庆, 王格方等. 红外成像技术在自动测试设备中的应用. 红外与激光工程, 1999, 28 (2): 25~27.
- [99] 王立冬, 赵飞宇, 陈映平. 红外热成像技术在印制电路板故障诊断中的利用. 红外技术, 1999, 21 (5): 43~45.
- [100] 王格芳, 陈国顺, 孟亚峰等. 基于红外热成像的集成电路检测与诊断. 红外技术, 1999, 21 (5): 43~45.
- [101] 侯成刚. 印制电路板的智能检测和检测策略优化的研究. 西安交通大学博士学位论文, 1997. 4.

第十章

激光全息检测

第一节 概 述

一、全息术及其特点

全息术或称全息照相 (Holography) 的思想是英国科学家丹尼斯·盖伯 (Dennis Gabor; 1900.6.5~1979.2.9) 于 1948 年首先提出来的, 丹尼斯·盖伯因此而荣获 1971 年的诺贝尔物理学奖。

希腊字全息 (Holos), 即是“完全”或“完整”的意思。所谓全息照相, 即是“完全”地记录被拍摄物体的表面状况。因此, 全息照相需要记录被拍摄物体投射到记录平面上的完整的光波场。即不仅要记录光波波场的振幅, 同时还要记录其位相信息。简言之, 全息照相就是同时记录光波场振幅 (光强) 和相位的照相术。

全息术有多种类型和称谓。

按制作全息图的方法分, 有用物质波 (机械波或电磁波) 制作全息图的全息术和用计算机制作的全息图的全息术两大类, 前者如光全息术、微波全息术、X 射线全息术、声全息术等。后者并不需要对实物进行照射, 因此可以制作并不存在的实物的全息图。

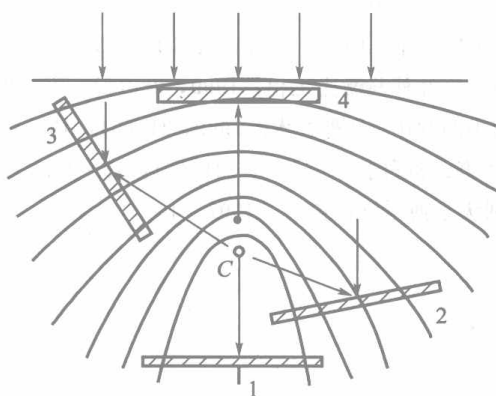


图 10-1 同轴全息图、离轴全息图和反射全息图

在光全息术中, 根据物光束和参考光束的相对方向不同, 可分为同轴全息图、离轴全息图和反射全息图等, 如图 10-1 所示。其中, 同轴全息图 (又称与光束同轴的全息图), 是当参考光束和物体光束的方向在同一直线上 (位置 1) 时制得的; 而拍摄离轴全息图要求物光束与参考光束之间有一定的夹角, 从被拍摄物体的同侧照射物体 (位置 2、3)。

反射全息图则是使物光束与参考光束从物体的前后两侧照射物体 (位置 4)。图中假定由置于 C 点的点光源射出的球面光波为物光束, 由上面入射的非散射光是平面参考波, 位置 1、2、3、4 为照相底版的位置。

此外, 全息图还有振幅全息图和位相全息图等。

全息照相不同于普通照相, 它具有以下特点。

全息照相不同于普通照相, 它具有以下特点。

(1) 全息照片与被摄物无任何相似之处 从全息照片外表看, 只是记录了一些干涉条纹, 根本看不出在照片上记录了一些什么物体, 只有在再现过程中才能看到被摄物的像。

(2) 再现像是立体像 全息照片在再现过程中, 观察者如同观察真实景物一样, 当观察者改变位置时, 可以看到物体后面被挡住的部位, 若看远近不同的物体, 必须重新调焦。图 10-2 是从不同的角度, 观察同一个全息照片, 所得到的再现像。

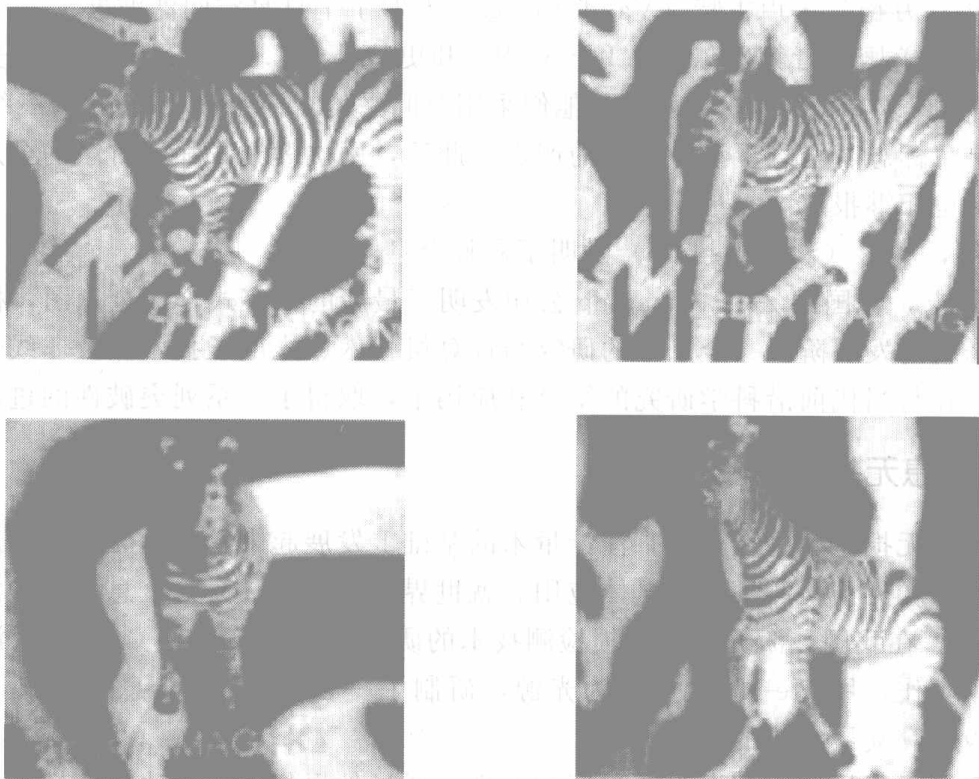


图 10-2 从不同角度观察同一全息图的再现像

(3) 照片具有可分割性 如果把普通照片撕去一块, 就会丢失一部分信息。但全息照片的每一个碎片都能再现出原来物体的完整像。这是由于全息照相不用成像透镜, 所以全息照片上任何一点都接受到物体整个表面漫反射来的光波。因此, 全息照片上任何一小块都可以再现出物体的整个表面光波, 只是像的亮度和清晰度会有所降低、视野稍有不同而已。

(4) 全息胶片可多次记录多个图像 在一张全息胶片上可以进行多次曝光, 从胶片不同的方向记录多个物体的图像。再现时, 每一个物体的像都可以不受其他像的干扰而单独地显示出来。这是由于各个像再现在不同的衍射方向上。因此, 只有在不同的方向上才能看到再现的物体像。

二、全息术的发展历程

自丹尼斯·盖伯 1948 年提出全息术的思想以来, 全息术并未立即得到迅猛的发展, 主要原因就是缺乏理想的相干光源。

1960 年 7 月 7 日, 《纽约时报》首先披露, 美国物理学家西奥多·梅曼 (Theodore Harold Maiman: 1927. 7. 11~2007. 5. 5) 研制成功世界上第一台红宝石激光器。激光器的问世, 为光学全息术的发展注入了新的活力, 激光的高度单色性和相干性为光学全息提供了理想的光源, 从此, 光学全息迈入了新的发展阶段, 其应用领域也不断拓展。

1962 年, 美国密执安大学的雷思 (N. E. Leith) 和乌帕特尼克斯 (J. U patnicks) 提出离轴全息术, 消除了观察全息再现像时共轭像与实像重叠对像质的影响, 提高了全息再现像的清晰度。1964 年, 他们又用漫射照明制作全息图, 成功地获得三维物体的立体再现像,

标志着全息技术的研究与应用进入了一个新的发展阶段。

1962年,前苏联科学家丹尼苏克(Denisyuk)发明了反射式体积全息术,首次实现了全息图的白光再现。

1963年,万德尔·卢古特(Vander Lugt)发明了全息复空间滤波器。

1965年,美国学者鲍威尔(R. I. Powell)和史特孙(K. A. Stetson)在《美国光学学会会刊(J. Opt. Soc. Amer.)》上发表了他们采用时间平均全息照相方法检测三维物体的振动的研究成果,标志着全息干涉计量术的产生。此后,两次曝光法和实时法的全息干涉计量术的研究成果也相继报道。

1969年,本彤(S. A. Benton)发明了彩虹全息图。

20世纪末,美国的Zebra Imaging公司发明了最新的数字式合成全息图,标志着全息术进入了一个新的发展阶段。全息术的研究与计算机技术、光电子技术以及非线性光学技术紧密结合,并在与当代前沿科学研究的结合和应用中,取得了一系列突破性的进展。

三、激光全息无损检测及其特点

激光全息无损检测是在全息干涉计量术的基础上发展起来的一种无损检测新技术,是全息干涉计量术在无损检测领域的具体应用。就世界范围而言,激光全息无损检测大致起始于1970年前后。在我国,激光全息无损检测技术的研究始于1974年。当时,天津大学与南昌洪都机械厂合作,用He-Ne激光器为光源,研制了一台JD-II型全息干涉仪,用于强-5飞机上铝面板蜂窝夹层结构的检测。

激光全息无损检测利用激光全息照相原理,通过外界加载的方法,使缺陷在相应的物体表面造成局部的变形,这种变形与物体是否含有缺陷直接相关。当物体内部不含有缺陷时,这种条纹的形状和间距的变化是宏观的、连续的、与物体外形轮廓的变化同步调的;而当被检物体内部含有缺陷时,在物体受力的情况下,物体内部的缺陷在外部条件(力)的作用下,就在物体表面上表现出异常情况,而与内部缺陷相对应的物体表面所发生的位移则与以前不相同,因而所得到的全息图与不含缺陷的物体的全息图不同。在激光照射下进行图像重现时,所看到的波纹图样在对应与有缺陷的局部区域就会出现不连续的、突然的形状变化和间距变化,根据这些条纹情况,可以分析判断物体的内部是否含有缺陷,以及缺陷的大小和位置等。

与其他无损检验方法(如声学法、热力学法、射线法等)相比较,激光全息无损检测具有以下显著特点。

1. 优点

(1) 检验灵敏度很高 由于激光全息检验是一种干涉计量术,其干涉计量的精度与波长同数量级,其理论检测灵敏度为光源的半波长。因此,极微小(微米数量级)的变形都能被检验出来。

(2) 检验效率高 由于激光的相干长度很大,因此,可以检验大尺寸的物体,只要激光能够充分照射到的物体表面,都能一次检验完毕。目前已有大小不同的“蜂窝夹层结构全息照相分析仪”可以按每分钟300多平方厘米的速度检验平面或曲面零件,检验轮胎的速度已达到每分钟一个。

(3) 适应范围广 激光全息检验对被检对象没有特殊要求,可以对任何材料、任意粗糙的表面进行检验。既能检验金属材料和非金属材料的缺陷,也能检验诸如蜂窝夹层结构、叠层胶

接结构、复合材料结构和橡胶轮胎制品的脱黏缺陷以及薄壁高压容器的焊缝裂纹等缺陷。

(4) 可借助干涉条纹的数量和分布状态来确定缺陷的大小、部位和深度,便于对缺陷进行定量分析。

此外,这种检验方法还有直观感强、非接触检验、检验结果便于保存等特点。

2. 不足

目前,激光全息检测的不足之处主要体现在以下几个方面。

(1) 对内部缺陷的检测灵敏度较低。激光全息检测对物体内部缺陷的检测灵敏度,取决于物体内部的缺陷在外力作用下所造成的物体表面的变形大小。如果物体内部的缺陷过深或过于微小,那么,激光全息照相这种检测方法就无能为力了。对于叠层胶接结构来说,检测其脱黏缺陷的灵敏度取决于脱黏面积和深度的比值,在近表面的脱黏缺陷,即使面积很小也能够检测出来;而对于埋藏得较深的脱黏缺陷,只有在脱黏面积相当大时才能够被检测出来。

(2) 对工作环境要求很高。激光全息检测目前多在暗室中进行,并需要采用严格的隔振措施,因此不利于现场检测。

四、激光全息无损检测的典型应用

作为超声、射线等常规无损检测方法的一种补充,目前,激光全息无损检测主要应用于航空、航天以及军事等领域,对一些常规方法难以检测的零部件进行了检测,如直升机旋翼后段、玻璃纤维胶结中锥雷达罩、碳纤维喇叭内壁纯金镀层、密封橡胶油垫、固体火箭发动机推进火药柱包覆层、运载火箭姿态发动机燃烧室、金属蜂窝结构、层合板、先进复合材料、航空轮胎等的缺陷进行检测。此外,在石油化工、铁路、机械制造、电力电子等领域也获得了越来越广泛的应用,如管道和压力容器的腐蚀和裂纹检测、印刷电路板焊接缺陷的检测、机械构件的疲劳裂纹检测等。

第二节 激光全息检测的基本原理

激光全息无损检测是利用激光全息照相来检测物体表面和内部缺陷的。因为物体在外界载荷作用下会产生变形,这种变形与物体是否含有缺陷直接相关。通过外界加载的方法,激发物体表面的变形,再利用激光全息照相法,把物体表面的变形以明暗相间的条纹形式记录下来,通过观察、分析、比较全息图,从而判断物体表面或内部是否存在缺陷。

全息照相术是两步成像法,由照相记录和再现两步组成,照相记录过程主要应用光的干涉,而在再现过程中主要应用光的衍射。

1. 光的干涉

光波在空间因叠加而形成明暗相间的稳定分布的现象叫做光的干涉。

根据电磁波理论,表示光波中电场 E 的波动方程为:

$$\vec{E} = A_0 \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (10-1)$$

式中 A_0 ——光波的振幅;

ω ——光波振动的圆频率;

φ_0 ——光波振动的初始相位。

波是可以叠加的,假设有两列波长相同的光波相叠加,当它们的相位相同时,叠加后所

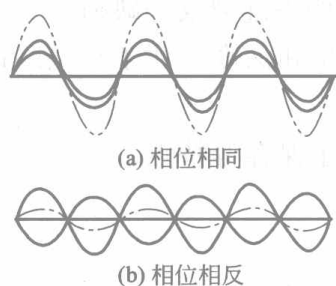


图 10-3 光波的叠加

合成的光波振幅增强,如图 10-3(a) 所示;如果它们的相位相反,则合成的光波的振幅就相互抵消而减弱,如图 10-3(b) 所示。这就是光的干涉现象,能产生干涉现象的两束光波叫相干波。

相干波必需满足以下条件。

① 两束光波具有相同的频率和固定的相位差。

② 两束光波在相遇处所产生的振幅差不应太大,否则与单一光波在该处的振幅没有多大的差别,因而也就没有明显的干涉现象。

③ 两束光波在相遇处的光程差(即两束光波传播到该处的距离差值)不能太大。

因为实际光源所发出的光波是一系列有限长的波列,当两束光波在相遇处的光程差不大时,则两束光波中有固定位相差的波列同时作用于一点,能产生清晰的干涉现象。而当光程差很大时,一束光波的波列已通过,而另一束光波相应的波列尚未到达,两个相应的波列间没有重叠因此产生不了干涉现象。

要进行全息照相,必需要有好的光源,以产生光的干涉现象。激光是由原子受激发射产生的,它之所以能用于全息检验,在于它有以下一系列极为优异的特性。

(1) 相干性 对普通光源来说,同一光源上不同点发出来的光是相互独立的,即没有相干性;而激光器发出的整束激光的不同部分都有很好的相干性。

(2) 单色性 是指光的波长分布范围大小。过去人们制造的最好的单色光源——氪灯,所发出波长为 $6057.8021\text{\AA}$ ($1\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$) 的橙色光,其波长的变化为 $0.0047\text{\AA}$ 。而激光,如氦-氖气体激光器所发出的红色光的波长为 $6328\text{\AA}$,其波长的变化范围可小于 $10^{-7}\text{\AA}$,它的单色性比氪灯提高了约十万倍。

(3) 方向性 一般光源发出的光均匀地向四面八方照射,但是激光却只向一个方向发射,其发射角(光束的散开角度)很小,只有几分,甚至可以小到 $1''$,几乎是一束平行光束。

由于光束极窄,光能量可以高度集中。例如,一台大功率的红宝石激光器,每平方厘米的输出功率可达 10^9W ,其亮度可达 10^{14} 瓦/厘米·立体角,它比高压脉冲氙灯的亮度高 37 亿倍,比太阳的亮度还要高 200 亿倍。

2. 光的衍射

所谓光的衍射,是指光波在传播过程中,当碰到障碍物时能绕过该障碍物的边沿而继续向前传播的现象。

3. 全息照相记录过程

激光全息照相的记录过程原理如图 10-4 所示。

图 10-4 中,从激光器 1 发射出来的激光束,经过分光镜 2 被分成两束光。一束由分光镜表面反射,经过反射镜 6 到达扩束镜 5,将直径为几个毫米的激光束扩大照射到整个物体 7 的表面,再由物体表面漫反射到胶片 8 上,这束光称为物光束。另一束光透过分光镜 2 后,被扩束镜 3 扩大,再经反射镜 4 直接照射到胶片 8 上,这束光称为参考光束。当这两束光波在胶片上叠加后,形成干涉图案。胶片经过显影、定影处理后,干涉图案就以明暗相间的条纹被显示出来,正是这些干涉条纹记录了物体光波的振幅和位相信息。

全息照相记录过程的数学原理如下(图 10-5)。

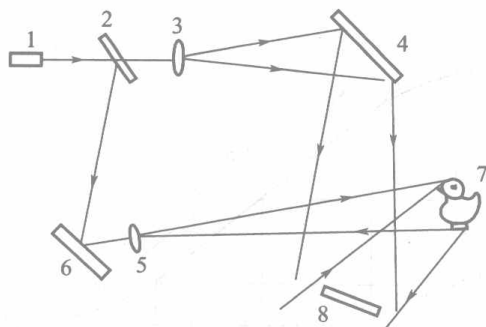


图 10-4 激光全息照相记录过程原理

1—激光器；2—分光镜；3,5—扩束镜；
4,6—反射镜；7—物体；8—胶片

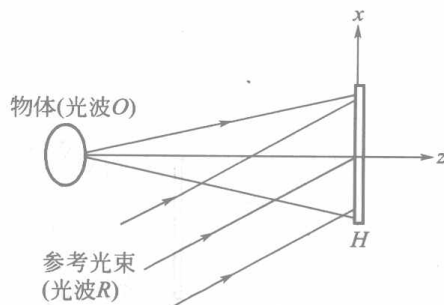


图 10-5 物光与参考光的叠加

设照射到底版 (x, y) 点处、用复振幅表示的物光波为：

$$O(x, y) = O_0(x, y) e^{j\varphi_0(x, y)} \quad (10-2)$$

参考光波为：

$$R(x, y) = R_0(x, y) e^{j\varphi_R(x, y)} \quad (10-3)$$

由于物光波与参考光波相叠加，全息干版上的光强分布为：

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |O(x, y) + R(x, y)|^2 \\ &= O(x, y)O^*(x, y) + R(x, y)R^*(x, y) + O(x, y)R^*(x, y) + O^*(x, y)R(x, y) \\ &= O_0^2(x, y) + R_0^2(x, y) + O_0(x, y)R_0(x, y)e^{j[\varphi_0(x, y) + \varphi_R(x, y)]} + \\ &\quad O_0(x, y)R_0(x, y)e^{-j[\varphi_0(x, y) - \varphi_R(x, y)]} \\ &= O_0^2(x, y) + R_0^2(x, y) + 2O_0(x, y)R_0(x, y)\cos[\varphi_0(x, y) - \varphi_R(x, y)] \end{aligned} \quad (10-4)$$

式(10-4)中，第一、二项分别为物光和参考光的光强，第三项的大小周期变化，说明干涉以后的光强分布按余弦规律变化，形成明暗相间的干涉条纹。

全息干版经过曝光和显影、定影处理后，即是一张全息图（或称全息照片）。

4. 全息相的再现观察

为了看到全息图上记录的物体像，就必须用一束相干光波（也称再现光波）去照射全息图，如图 10-6 所示。由于全息图是由许许多多的明暗相间的干涉条纹组成，当再现光波照射到暗条纹处，光被挡住透射不过去，而照到亮条纹处就能透过。而且干涉条纹分布极其细密，因此，全息图犹如一个极其复杂的光栅，当再现光波照射时，光波就会产生衍射现象，出现许多衍射波。其中沿着再现光波照射方向传播的光波称为零级衍射波，在零级衍射波两侧有两列一级衍射波，此外，还有二级、三级衍射波等，但由于它们的光强度很快被衰减而无法看见。在这两列一级衍射波中，其中一列构成原来物体的初始像（通常称为虚像），另一列构成物体的共轭像（通常称为实像），如果在实像处放置一个屏，就可在屏上直接接受物体的像。

如果再现时所用的相干光波就是原来记录过程中所用的参考光波，那么再现的物体光波（虚像）就出现在原来记录过程中物体所处的位置，再现的物体像也和原来的物体光波完全相同，是一个三维的立体像。

再现过程的数学原理如下。

设再现照明光波为：

$$C(x, y) = C_0(x, y) e^{j\varphi_C(x, y)} \quad (10-5)$$

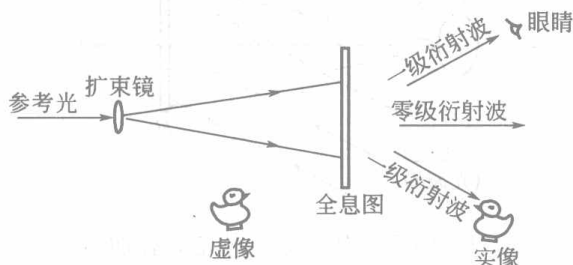
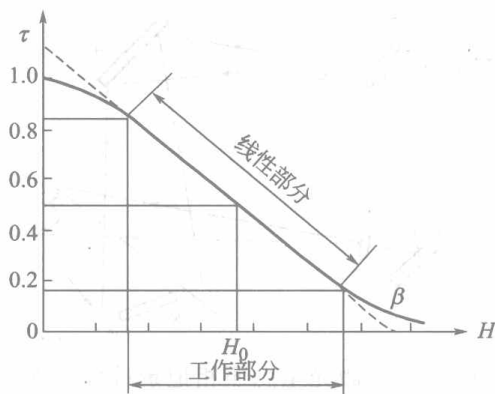


图 10-6 全息照相再现过程原理

图 10-7 全息干版的典型 τ - H 特性曲线

设全息图的复振幅透射率为 $\tau_H(x, y)$ ，在线性记录的条件下，其值为：

$$\begin{aligned}\tau_H(x, y) &= \tau_0 + \beta [O_0^2(x, y) + R_0^2(x, y) + O(x, y)R^*(x, y) + O^*(x, y)R(x, y)] \\ &= \tau_0 + \beta [O_0^2(x, y) + R_0^2(x, y) + 2O_0(x, y)R_0(x, y)\cos(\varphi_0(x, y) - \varphi_R(x, y))] \quad (10-6)\end{aligned}$$

式中 β 是全息干版 τ - H 曲线（复振幅透射率与曝光量的关系曲线）线性部分的斜率（图 10-7），对正片， $\beta > 0$ ；对于负片， $\beta < 0$ 。 H 为曝光量，它等于曝光强度 I 与曝光时间 t 的乘积，即

$$H = It \quad (10-7)$$

透过全息图后的再现出射光波为：

$$\begin{aligned}W(x, y) &= \tau_H(x, y)C(x, y) = \tau_H(x, y)C_0(x, y)e^{j\varphi_C(x, y)} \\ &= C_0(x, y)e^{j\varphi_C(x, y)} \{ \tau_0 + \beta [O_0^2(x, y) + R_0^2(x, y) + O(x, y)R^*(x, y) + O^*(x, y)R(x, y)] \} \\ &= C_0(x, y)e^{j\varphi_C(x, y)} \{ \tau_0 + \beta [O_0^2(x, y) + R_0^2(x, y)] \} + \beta C_0(x, y)R_0(x, y)O(x, y)e^{j[\varphi_C(x, y) - \varphi_R(x, y)]} + \\ &\quad \beta C_0(x, y)R_0(x, y)O^*(x, y)e^{j[\varphi_C(x, y) + \varphi_R(x, y)]} \quad (10-8)\end{aligned}$$

式(10-8)中，第一项与再现照明光波只差一个常数，称为直线光波或零级衍射，第二项带有物光波的信息，称为原始像光波 IO 或 +1 级衍射，第三项带有与物光波共轭的信息，称为共轭像光波 IC 或 -1 级衍射。

第三节 激光全息检测设备

为了摄制一张清晰的全息图，除了需要有一个理想的光源外，还需要有一套比较完善的全息照相装置。全息照相装置一般由以下几部分组成：光源、减振平台、加载装置、光学元件及支架、光强测试仪器、干版架、干版冲洗设备和一些辅助器件（漫射器、光阑、遮光板等）。

一、激光光源

激光器是产生激光的器件，作为激光全息照相的光源，它主要由工作物质、激励能源和谐振腔三部分组成。

激光器的种类很多,按工作物质可分为:气体激光器、固体激光器、半导体激光器和液体激光器等。按激光输出方式可分为:连续输出的激光器和脉冲输出的激光器。激光全息无损检测中常用的激光器列于表 10-1 和表 10-2 中。

表 10-1 激光全息无损检测中常用的气体激光器

名 称	输出方式	输出波长/nm	输出功率/mW	时间相干长度/m	特 点	适用范围
He-Ne 激光器	连续	632.8, 3390.0	1~100	0.45	成本低,寿命长(5000h),稳定性好,防护要求低	制作各种全息图
He-Cd 激光器	连续	441.6, 325.0	1~50	0.30	波 长 高, 寿 命 短(2000h),防护要求高	记录介质为光致抗蚀剂
Ar ⁺ 激光器	连续	476.5, 488.0, 496.5, 514.5	(1~18)×10 ³	0.90	成本高,功率高,防护要求高	适于环境稳定性处、记录大物体
Kr ⁺ 激光器	连续		(1~10)×10 ³	0.90	成本高,功率高,防护要求高	记录真彩色物体

表 10-2 激光全息无损检测中常用的固体激光器

名称及类型		相干长度/m	单脉冲工作能量/J	双脉冲工作每个脉冲能量/J	输出波长/nm	输出脉冲宽度/ns	最大脉冲频率,(脉冲数/s)	模式	双脉冲间隔/ μ s
红宝石激光器	振荡器	0.5~2 5~10	0.040 0.010	0.025 0.007	694.3	15~40	2	TEM ₀₀	1~1000
	振荡器+一级放大器	0.5~2 5~10	1 0.2	0.4 0.2					
	振荡器+两级放大器	0.5~2 5~10	10 4	4 2					
Nd-YAG 激光器	振荡器+两级放大器和倍频器	1	0.040	0.020	1064 532	15~40	5	TEM ₀₀	1~1000
	振荡器+三级放大器和倍频器	1	0.150	0.070					

下面简要介绍在激光全息无损检验中一些常用的激光器。

1. 氦-氖激光器

氦-氖激光器(He-Ne)的工作物质是气压约为 3Torr (1Torr=133.322Pa) 的 5 份氦气(He)、1 份氖气(Ne)的混合气体。

氦-氖激光器可以在可见光和红外光区域里连续输出多种波长的激光,激光束的方向性、单色性和相干性都极好,这种激光器的输出功率和频率控制得很稳定。此外,这种激光器还有寿命长、结构简单、价格低廉和使用方便等优点,所以氦-氖激光器是目前应用最为广泛的一种激光器。

氦-氖激光器一般有内腔式、外腔式、半内腔式三种结构形式,关于它们的详细结构和工作原理,有兴趣的读者可参阅有关书籍,此处不予讨论。

氦-氖激光器的输出功率不大,长度为 10cm 的激光管,其输出功率约为 0.1mW,长度为 50cm 的激光管,输出功率约 10mW。实用上最大输出功率为 100mW。氦-氖激光器属于一种低效率的激光器,其电-光转换效率约为千分之一。

表 10-3 列出部分氦-氖激光器的型号及有关参数。

2. 红宝石激光器

红宝石激光器的工作物质是红宝石晶体。红宝石是含有少量(一般含量为万分之五左

表 10-3 氩-氦激光器型号及参数

型 号	外形尺寸/mm	输出功率 /mW	功率稳定性 (<%)	起辉电压 /kV	工作电压 /kV	最佳工 作电流	模式	光束发射角 /mrad	使用寿命 /年
QJH-26	250×φ40	>1	±5	5	1.8	3~6	单模	2	1
QJH-40	480×φ40	4~9	±10	9	3~4	4~8	单模	2	1
QJHP-50A	580×110×100	7	<±2.5/h			3~6	单模	<1.75	0.5
QJHP-100B	1180×140×105	20	<±2.5/h			12~16	单模	<0.75	0.5
QJHP-150B	1680×130×110	40	<±5%/h			20~30	单模	<0.75	0.5
QJHP-200B	2100×180×150	60	<±5%/h			30~40	单模	<0.5	0.5

右) 氧化铬 (Cr₂O₃) 杂质的氧化铝 (Al₂O₃)。Cr⁺³ 离子在晶体中通常占据 Al⁺³ 的位置, 这些铬离子使晶体呈粉红色, 有时用较高浓度的铬, 则晶体呈红色。在红宝石中, 铬离子提供了形成激光的能级, 相应的波长为 694nm。

大多数红宝石激光器是以脉冲方式工作的, 它所发出的是脉冲激光, 脉冲时间在毫秒数量级, 功率不大。因此, 人们用所谓 Q 开关将激光能量在极短时间释放出来, 以获得功率很大的激光。采用 Q 开关的激光器称为 Q 开关激光器 (也称调 Q 激光器)。

红宝石激光器由于工作物质的光学性能较为优良, 同时红宝石的生产工艺日趋完善, 目前已能制成直径为 20mm、长度为 1m 以上的红宝石棒, 因此红宝石激光器能制成大功率的激光器。红宝石是一种比较便宜的固体激光物质, 所产生的激光波长为 6943Å 的红色可见光, 使用方便, 而且又有很灵敏、高效率的光敏元件作为它的接收器件。所以, 这种激光器在生产、科研和国防上仍被广泛应用。

3. 氩离子激光器

它是利用激光管中气体放电过程, 使氩原子电离并激发, 实现粒子数反转而产生激光的。这种激光器发射出的激光谱线很丰富, 分布在蓝绿区域内, 其中以波长为 5154Å 和 4880Å 的光谱为最强。氩离子激光器是目前在可见光区域内连续输出功率最高的一种激光器, 其连续输出功率一般为几瓦, 最高可达一百多瓦, 并且还可以脉冲工作。这种激光器用途较广, 可用作激光彩色电视、彩色全息照相、水下探测和微型切割等光源。

二、工作台

全息图是记录在全息干版上的一系列干涉条纹。在记录过程中, 如果干涉条纹移动半个条纹宽度, 就无法将条纹记录下来, 不能形成全息图。当条纹移动小于半个条纹宽度时, 全息图可以不损坏, 但亮度却受到影响。显然, 干涉条纹的间距越密, 则在记录过程中条纹的移动所受到的限制就越大。前面曾分析过, 两束相干光波的位相差为 π 的奇数倍 (即相差半个光波波长) 时, 它们叠加后光强就互相抵消; 如果位相差为 π 的偶数倍 (即相差一个波长) 时, 它们叠加后光强就增加为 4 倍 (假定两束光的振幅相等)。或者说, 只要两束光的光程差改变半个波长, 干涉条纹的亮度就会从最暗变成最亮。因此, 在记录过程中, 必须保证物体光束和参考光束之间相对移动的距离小于激光波长的八分之一。

为了减少外界振动的影响, 可以把整个照相系统稳定地安装在减振工作台上, 抑制外界传来的振动, 满足全息照相系统稳定性的要求。

目前全息照相减振工作台多数采用橡皮或泡沫塑料进行减振, 但这类材料在设备重量的长期作用下, 由于压实、老化而降低弹性, 影响减振效果。而空气支柱减振装置由于空气压力

可以调整，所以减振性能比较稳定可靠，如 FH-100 型全息测振仪就是采用空气支柱减振。这类减振器的另一个明显优点是可以使得减振系统具有很低的固有频率。表 10-4 列出几类常见减振器的固有频率，可见空气支柱减振器的减振性能是很好的。

表 10-4 常见减振器的固有频率

减振器类型	负荷条件下垂直方向的固有频率/Hz	减振器类型	负荷条件下垂直方向的固有频率/Hz
金属减振器	10	支柱形减振器	11~13
摩擦阻尼式减振器	15	球面橡皮金属减振器	11~13
等频阻尼减振器	7.5	无阻尼弹簧式减振器	6~7
环形橡皮金属减振器	15~20	空气支柱减振器($P=0.7$ 大气压)	3.33

三、记录介质

全息照相中一个重要的问题是要有理想的记录介质。对记录介质的要求是分辨率、灵敏度和衍射率要高，而且使用要方便。目前，全息记录介质有多种，如卤化银全息干版和胶片、重铬酸盐明胶、光导热塑料、光致抗蚀剂、光致聚合物等，如表 10-5 所示。以下简要介绍卤化银全息干版和胶片、重铬酸盐明胶和光导热塑料。

表 10-5 常用的全息记录介质

记录介质名称	记录过程中的变化	调制方式	可否重复使用性	存储时间
卤化银乳胶	还原为金属银	光密度改变	否	永久
重铬酸盐明胶	光致铰链	折射率改变	否	密封后永久
光导热塑料	形成带电场的静电潜像、产生热塑性变形	表面浮雕	可	永久
光致抗蚀剂	形成有机酸、光致铰链或光致聚合	表面浮雕	否	永久
光致聚合物	光致聚合	折射率改变或表面浮雕	否	永久
光色材料	诱导出新的吸收带	光密度改变	可	几分钟或几个月
光致折射材料	离子(电子)俘获	折射率改变	可	几小时
光致双折射材料		折射率改变	可	几秒或几天
电光材料(如 LiNbO_3 , LiTaO_3)	电光	折射率改变	可	约两周
硫砷玻璃	热分相析晶	折射率改变	可	

1. 卤化银全息干版

卤化银全息干版是用颗粒极细 ($0.03\sim0.09\mu\text{m}$) 的卤化银明胶乳剂涂在玻璃板上制成的。这种干版和普通照相用的胶卷比较，具有极高的反差和解相力(分辨率)。例如，一般照相胶卷只要有 100 条/mm 的分辨率就可以进行人像摄影，而全息照相所用的胶片，其分辨率至少要在 1000 条/mm 以上，一般为 3000~5000 条/mm。卤化银全息干版的结构如图 10-8 所示。

从全息照相的再现过程来看，希望记录介质具有线性记录特性，即冲洗后的记录介质透射率 (τ) 与记录时的光强 (E) 成线性关系，这就要求全息照

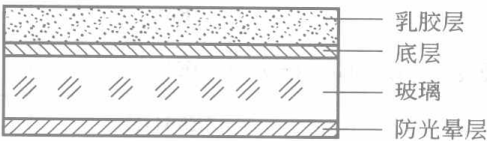


图 10-8 卤化银全息干版的结构

相的曝光选择合适，一般选择在记录介质特性曲线的直线部分的中点（图 10-7）。这样，通过全息照片的光束具有最大衍射，使记录的条纹能现出亮度最大而失真最小的图像。

由于每种干版都有自己的特性 τ - E 曲线，因此，必须根据干版的特性来选择参考光与物光的光强比，以满足上述要求。对于国产全息干版，此比值在（2：1）~（10：1）范围内均可，有时，因各批干版的参数稍有变化，可在上述范围内选择一种光强比来得到满意的结果。

对于分辨率极高的干版，其卤化银颗粒极细，故干版的灵敏度就较低。有时为了提高干版的灵敏度，在不过分降低分辨率的前提下，可以用 5% 的三乙醇胺水溶液浸泡十几秒钟（敏化处理），就可大大提高干版的灵敏度，但敏化后的干版停放时间不要过长，一般应在数小时内使用为宜。

为了提高全息图像的衍射效率，可以将底片进行漂白处理，底片经漂白处理后，其衍射效率可由原来的 6% 提高到 20%。但漂白后的底片，其噪声会相应增大。漂白液的参考配方为：

- ① 重铬酸钾 5g；
- ② 赤血盐 70g；
- ③ 溴化钾 20g；
- ④ 蒸馏水加至 1000mL。

干版定影后，用水洗净，即可放入漂白液中处理，漂白到所需程度取出冲洗，也可用棉花球或彩笔蘸漂白液在底片上进行局部漂白，再用水冲洗干净。

表 10-6 所示是国内生产的几种全息干版及全息胶片，国际上常用的全息干版及全息胶片列于表 10-7 中，供选用参考。

表 10-6 国产全息干版及全息胶片

型号	乳胶厚度/ μm	灵敏波长/nm	曝光量/ $\mu\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$	极限分辨率/cy $\cdot \text{mm}^{-1}$
天津 I 型干版、软片	6~7	630(530~700)	30	3000
天津 II 型	6~7	690(560~780)	38	3000
天津 III 型	6~7	510(440~560)	—	4000
天津 IV 型	6~7	440	—	4000
HP633P	10	633	~300	>4000
CHEP-RA	10	633	—	>4000
高衍射率天津 I 型	10	633(530~660)	—	3000

表 10-7 国际上常用的全息干版及全息胶片

型 号	厚度/ μm		灵敏光谱， 灵敏波长/nm	曝光量 / $\mu\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$ ($\tau=0.5$)	粒度/ μm	极限分辨率 /cy $\cdot \text{mm}^{-1}$
	干版	软片				
爱克发 (Agfa-Gevaert)	Pan300	15		全色		$\gg 2000$
	10E56	7	5	蓝-绿 400-500	0.1	3000
	10E75	7	5	红, 633, 694	0.05	3000
	8E56HD	7	5	蓝-绿 400-500	2.5	5000
	8E75HD	7	5	红, 633, 694	1	5000

续表

型 号		厚度/ μm		灵敏光谱, 灵敏波长/nm	曝光量 $/\mu\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ($\tau=0.5$)	粒度/ μm	极限分辨率 $/\text{cy}\cdot\text{mm}^{-1}$
		干版	软片				
柯达(Eastman-Kodak)	649F	15	6	全色	5	0.06	>3000
	120-01/02 ^① SO-173	6	6	红	5	0.05	>3000
	125-01/02 SO-424	7	3	蓝-绿	0.5	0.65	1250
	131-01/02 SO-253	9	9	红	0.03	0.70	1250

① 01 有增透膜；02 无增透膜。

适合于处理全息片的显影剂配方列于表 10-8 中。

表 10-8 适合于处理全息片的显影剂配方

显影剂	Agfa80	Kodak D-19	显影剂	Agfa80	Kodak D-19
米吐尔(衣仑,硫酸对甲 胺基苯酚)	2.5g	2g	碳酸钾	60g	
			碳酸钠		50g
结晶亚硫酸钠	100g	90g	溴化钾	4g	5g
海得路(儿奴尼,对苯二 酚)	10g	8g	加水至	1000mL	

停显液的配方为：①蒸馏水 1000mL；②冰醋酸 13.5mL。

F-5 定影液的配方：①蒸馏水（50℃）800mL；②硫代硫酸钠 240g；③无水亚硫酸钠 15g；④冰醋酸 13.5mg；⑤硼酸（结晶）7.5g；⑥钾矾 15g；⑦蒸馏水加至 1000mL。

2. 重铬酸盐明胶

重铬酸盐明胶是一种很好的位相记录介质，它具有高衍射率、高分辨率和低噪声等优点，其缺点是怕潮湿，容易消像，需要密封。

重铬酸盐明胶有硬化和未硬化的两种。未硬化的明胶可以制作浮雕型全息图，硬化的明胶适合于制作折射率型的位相全息图。用它制作体积全息图时衍射效率可达 90%。

重铬酸盐明胶的分辨率可达 5000cy/mm，硬化明胶的折射率变化可达 0.08。

3. 光导热塑料

光导热塑料全息片（简称光塑片）是一种浮雕型位相记录介质，其结构如图 10-9。光导热塑料具有衍射效率、分辨率和灵敏度都较高的特点，而且能进行原位显影（不需要长时间地进行显、定影化学处理，而可以用点脉冲加热显影，几乎瞬间即可完成。它对所有可见光都具有较高的光敏性）。这种记录介质还能重复使用。光塑片的不足是分辨率较低，高质量的薄膜制造困难。光塑片和银盐片的简要对比列于表 10-9 中，供参考。

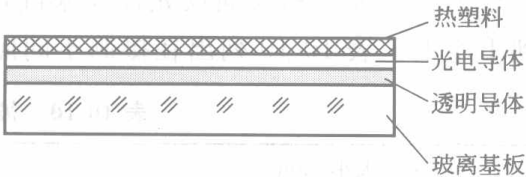


图 10-9 光导热塑料的结构

表 10-9 光塑片与银盐片之比较

种类	成本	重复使用/次	分辨率/条 $\cdot\text{mm}^{-1}$	衍射效率/%	原位显影	反差	噪声
银盐片	高	不能	4000	6	困难	好	低
光塑片	低	>100	1000	30	容易	中等	较高

光塑片使用操作过程分充电（敏化）、曝光录像、再充电、加热显影和消像还原（擦除）五个步骤，如图 10-10 所示。可用 GRQ-光导热塑全息录像仪来实现上述各个步骤。

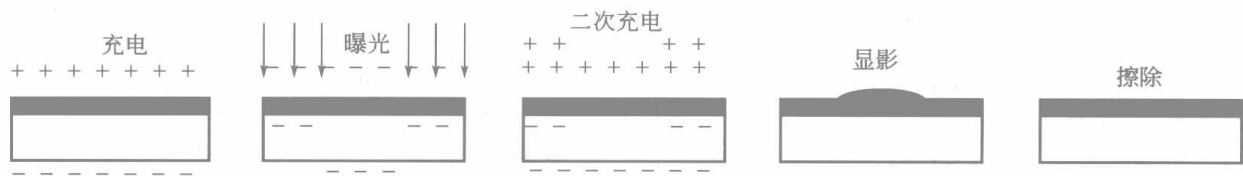


图 10-10 光导热塑料的记录与擦除过程

四、漫射照明设备

漫射照明是将具有特定方向的光束变成向许多方向散射的光束，这是在全息照相中经常采用的一种方法。用磨毛的玻璃片或透明塑料薄膜均可作为漫射器。

采用漫射照明后，可以使物体光波投射到记录介质平面上的光强变得均匀，这就可以降低对记录介质曝光特性的要求，使得反差极大的物体也容易被记录下来。而且采用漫射照明物体，可以使记录介质接受到物体光波的信息大大地丰富。

在全息照相时，要保证只有一条参考光束照射到记录介质上，可用遮光板挡住不必要的杂光。否则，就会在再现像中出现不必要的干涉条纹。

第四节 激光全息检测技术

一、激光全息照相操作过程

激光全息照相过程由光路布置、测量物光和参考光的光强、装夹干版、曝光、冲洗干版、再现观察等几个基本环节组成。

1. 光路布置

采用合适的扩束镜（可用显微物镜或透镜）充分而又均匀地照明被摄物体表面，并使其正确地反射到全息干版（记录介质）上，以便让全息干版接受到丰富的物光信息。

操作者要测量物光束和参考光束的光程（自分光镜处到干版中间的光波传播距离），使两束光的光程大致相等。

根据物体大小和表面反光性能来确定物体与干版之间距离，保证物体各部分的信息都能达到干版上。表 10-10 列出在摄制不同照相面积时，物体与干版之间的距离实例。

表 10-10 被摄物体与干版之间的距离

干版大小/mm	照相尺寸/mm	距离/mm
60×90	200×200	400
60×90	500×500	750
60×90	930×620	1200

根据记录介质的分辨率来确定物光束和参考光束的夹角。一般选择在 45°以内，不宜过大。分光镜、反射镜、扩束镜等光学元件应能方便地调正。

2. 测量物光和参考光的光强

除了保证在记录介质上接收到足够的物体光强外,还必须选择合适的物光和参考光的光强比。根据目前供应的全息干版,应选择在 $(1:2)\sim(1:10)$ 范围内。为了达到这一要求,可以选用合适的分光镜、加衰减器和调正光路等方法来实现。

测量光强的器件可用 2CR 型硅光电池,并在 AC 型直流复射式检流计上读出其电流数值。

3. 装夹干版

装夹干版时不要让药面受到污染(如指纹、灰粒或其他脏物),装夹时药面对着物光传播方向。在摄制静止物体的全息图时,可用简单的干版夹。如用实时法检测物体时,为了使全息图精确放回原位,可以采用特殊设计的干版夹。

4. 曝光

干版装夹完后,需要静待 $1\sim 2\text{min}$,让整个照相系统稳定以后,再打开快门曝光。曝光的时间根据物体光强和胶片的灵敏度进行选择,不宜过长。一般使全息图的黑度不超过 0.7 即可。曝光过程中要严格保证整个照相系统的稳定性,否则将得不到满意的全息图。

5. 冲洗干版

目前国内供应的记录介质多为银盐全息干版,需进行显影、停显和定影湿法处理。操作时应在规定的安全灯下进行。

曝光后的干版可采用 Agfa80 或 D-19 显影液显影,显影时温度为 $(20\pm 0.5)^{\circ}\text{C}$,显影时间不超过 3min,在显影过程中要不断搅动显影液。Agfa80 和 D-19 显影液的配方见表 10-8。

从显影液中取出干版后应用自来水冲洗,将显影液冲洗干净后放入停显液中进行停显 $20\sim 30\text{s}$,停显温度为 $19\sim 20^{\circ}\text{C}$ 。

干版从停显液中取出后,即可放到 F-5 定影液中进行定影。定影液的温度为 $19\sim 20^{\circ}\text{C}$,定影时间为 $2\sim 4\text{min}$,在定影过程中应不断地搅动定影液。

定影后的底片应在 $18\sim 21^{\circ}\text{C}$ 水中洗 $10\sim 20\text{min}$,然后进行干燥。此外,还可以用 50%、75%、90%的乙醇水溶液各浸泡 1min,以便加速底片阴干和提高其清晰度。

在配制上述溶液中,应按次序逐一加入化学药品。一种药品完全溶解后才加入另一种药品。

6. 再现观察

全息图干燥后,即可进行再现,观察记录效果。再现光源按原参考光的方位照射全息图,在原来物体所在部位即可再现出物体像来。如果需要将再现的物体记录下来,可以用普通照相方法对虚像进行反拍,有时为了增大再现像的亮度,可以加强再现光束的光强。

二、物体表面微差位移的观察方法

激光全息照相用于产品的无损检测,采用的是全息干涉计量术,它是激光全息照相干涉计量技术的综合。这种技术的依据是物体内部的缺陷在外力作用下,使它所对应的物体表面产生与其周围不相同的微差位移。然后,用激光全息照相的方法进行比较,从而检测物体内部的缺陷。

对于不透明的物体,光波只能在它的表面上反射,因此只能反映物体表面上的现象。然而,物体的表面与物体的内部是相互联系的,在不使物体受损的条件下,给物体一定的载荷,如能表现为表面的异常,则可实现无损检测。

观察物体表面微差位移的方法有三种：①实时法；②两次曝光法；③时间平均法。

1. 实时法

先拍摄物体在不受力时的全息图，冲洗处理后，把全息图精确地放回到原来拍摄的位置上，并用与拍摄全息图时同样的参考光照射，则全息图就再现出物体三维立体像（物体的虚像），再现的虚像完全重合在物体上。这时对物体加载，物体的表面会产生变形，加载后的物体表面光波和再现的物体虚像之间就形成了微量的光程差。由于这两个光波都是相干光波（来自同一个激光源），并几乎存在于空间的同一位置，因此，这两个光波叠加就会产生干涉条纹。

由于物体的初始状态（再现的虚像）和物体加载状态之间的干涉度量比较是在观察时完成的，所以称这种方法为实时法。这种方法的优点是只需要用一张全息图就能观察到各种不同加载情况下的物体表面状态，从而判断出物体内部是否含有缺陷。因此，这种方法既经济又能迅速而确切地确定出物体所需加载量的大小。

其缺点如下。

① 为了将全息图精确地放回到原来的位置，就需要有一套附加机构，以便使全息图位置的移动不超过几个光波的波长。

② 由于全息干版在冲洗过程中乳胶层不可避免地要产生一些收缩，当全息图放回原位时，虽然物体没有变形，但仍有少量的位移干涉条纹出现。

③ 显示的干涉条纹图样不能长久保留。

2. 两次曝光法

这种方法是将物体在两种不同加载情况下的物体表面光波摄制在同一张全息图上，然后再再现这两个光波，而这两个再现光波叠加时仍然能够产生干涉现象。这时，所看到的再现现象，除了显示出原来物体的全息像外，还产生较为粗大的干涉条纹图样。这种条纹表现在观察方向上的等位移线，两条相邻条纹之间的位移差约为再现光波的半个波长，若用氦-氖激光器作光源，则每条条纹代表大约 $0.316\mu\text{m}$ 的表面位移。从这种干涉条纹的形状和分布来判断物体内部是否有缺陷。

两次曝光法是在一张全息片上进行两次曝光，记录了物体在产生变形之前和之后的表面光波。这不但避免了实时法中全息图复位的困难，而且也避免了感光乳胶层收缩不稳定的影响，因为这时每一个全息图所受到的影响是相同的。其主要缺点是对于每一种加载量都需要摄制一张全息图，无法在一张全息图上看到不同加载情况下物体表面的变形状态，这对于确定加载参数来说是比较费事的。

3. 时间平均法

时间平均全息照相法是美国学者鲍威尔（R. I. Powell）和史特孙（K. A. Stetson）于1965年首先提出来的。

这种方法是在物体振动时摄制全息图。在摄制时所需的曝光时间要比物体振动循环的一个周期长得多，即在整个曝光时间内，物体要能够进行许多个周期的振动。但由于物体是作正弦式周期性振动，因此，把大部分时间消耗在振动的两个端点上，所以，全息图上所记录的状态实际上是物体在振动的两个端点状态的叠加。当再现全息图时，这两个端点状态的像就相干涉而产生干涉条纹，从干涉条纹的图样的形状和分布来判断物体内部是否有缺陷。

这种方法显示的缺陷图案比较清晰，但为了使物体产生振动就需要有一套激励装置。而且，由于物体内部的缺陷大小和深度不一，其激励频率各不相同，所以要求激励振源的频带

要宽,频率要连续可调,其输出功率大小也有一定的要求。同时,还要根据不同产品对象选择合适的换能器来激励物体。

三、激光全息检测的加载方法

用激光全息照相来检测物体内部缺陷的实质是比较物体在不同受载情况下的表面光波,因此需要对物体施加载荷。一般使物体表面产生 $0.2\mu\text{m}$ 的微差位移,就可以使物体内部的缺陷在干涉条纹图样中有所表现。但是,如果缺陷位置过深,在加载时,缺陷反映不到物体表面或反映非常微小时,则无法采用激光全息检测。常用的加载方式有:①内部充气法;②表面真空法;③热加载法;④声振动法。

1. 内部充气法

对于蜂窝结构(有孔蜂窝)、轮胎、压力容器、管道等产品,可以用内部充气法加载。当结构内部充气后,蒙皮在气压作用下向外鼓起。在脱胶处,由于蒙皮和蜂窝夹芯之间没有粘住,因此,该处的蒙皮在气压作用下向外鼓起的量就比周围大,形成脱胶处相对于周围蒙皮有了一个微小变形,根据这个微差位移,就可以用激光全息干涉计量方法来摄制全息图。在全息图中,除了显示出蜂窝的结构形状外,还会在脱胶处出现封闭的环状图案。这种加载方式所摄制的全息图很直观,加载方法很简便,检验效果甚好。

2. 表面真空法

对于无法采用内部充气的结构,如不连通蜂窝、叠层结构、钣金胶接结构等,可以在外表面抽真空加载,造成缺陷处表皮的内外压力差,从而引起缺陷处表皮变形,在干涉条纹图样中会出现干涉条纹的突变或呈现出环状图案。

由于表面抽真空加载所能造成的压力差不超过一个大气压,这就限制了它的应用范围。对于表皮较厚、缺陷较深或较小的结构,这种加载方式就不适用。

3. 热加载法

这种方法是对物体施加一个温度适当的热脉冲,物体因受热而变形。内部有缺陷时,由于传热较慢,该局部区域比缺陷周围的温度要高,因此,造成该处的变形量相应也较大,从而形成缺陷处相对于周围的表面变形有了一个微差位移。用激光全息照相记录时,就要在全息图中显示出突变的干涉条纹图样。

加热的方式可以用碘钨灯或红外线灯在物体表面直接照射加热,也可以用电炉、热风加热物体。这种加载的方式是比较方便的。

由于这种加载方式是对物体施加热脉冲,当加热刚停止时,物体中的温度梯度大。这时,物体内部的缺陷地区所造成的变形也大,最容易显示出缺陷图案来。但是,这时物体的整体变形也很大,因而所显示的干涉条纹之间的距离很小(干涉条纹稠密),不利于对干涉条纹进行观察和分析。只有让物体充分冷却后,使物体的整体变形消失,而物体内部有缺陷地区的变形由于有一些滞后现象,还来不及完全消失时,才能够对干涉条纹进行分析,揭示出缺陷来。这样不但影响了检验的速度,而且对于埋藏较深的缺陷也不易发现,直接影响了检验的灵敏度。为了解决这个问题,可以采用干涉条纹控制技术,使干涉条纹局部得到放大而显示出缺陷来。

加热法加载的主要优点是简单、方便。其缺点是对缺陷的显示不如其他加载方式清楚,也不容易确定缺陷所在的深度。另外,加热法加载时,要防止由于冷热空气的对流而使物体产生过大的振动,这会使得干涉条纹发生移动而影响观察和记录的效果。

4. 声振动法

把一个宽频带的换能器（通常用压电晶体）胶接在试件的表面上，调节驱动电压来改变激振频率，在振动期间使全息干版感光。在缺陷区域，由于表皮的结合松动或者能够完全自由振动，它的振幅就比其他地区大，因而在图像中就显示出一组特殊的干涉条纹，把松动区域的表面轮廓勾画出来。可以调节换能器的频率，使其与缺陷部位表皮形成共振，这样试件的整体振动则可忽略不计。有时为了提高激励能量，可以将换能器的能量通过铝质的实心角柄传到试件表面，角柄按指数方程 $s=s_0e^{-rx}$ 形状制作。 s_0 是角柄原始截面积， s 是在距 s_0 为 x 处的截面积， r 为系数（可取 0.7 左右）。用这种换能器可以在角柄尖角输出端得到约 $10\mu\text{m}$ 的位移，而且不必胶接到试件表面，这就大大简化了操作过程。

声振动法的一个重要特点是它能够提供缺陷大小和深度的一种量度。因为一个脱黏缺陷区域被声信号策动时，它就会像一个鼓似地以它的共振频率（基频）振动，要确定这个共振频率，可用实时法观察，一方面增加策动换能器的频率，另一方面通过全息图进行观察，在达到共振频率时，马上就会出现干涉条纹的异常变化。按照基频振动公式

$$f_0 = 0.9342 \frac{h}{a^2} \sqrt{\frac{r_0}{\rho(1-\mu^2)}} \quad (10-9)$$

式中 h ——脱黏表皮厚度的一半；

a ——脱黏处的半径；

r_0 ——杨氏模量；

ρ ——密度；

μ ——泊松比。

根据实时观察到的脱黏区域，可以确定 a 值大小，从而可以算出 h 值来，即缺陷距表面的深度。

上述几种加载方式各有其特点，但无论采用何种方式，其目的都是将物体内部的缺陷反映到物体表面上来。一般使物体表面产生 $0.2\mu\text{m}$ 的微差位移，就可以使物体内部的缺陷在干涉条纹图样中有所表现。如果缺陷位置过深，在无损加载时，缺陷反映不到物体表面或反映甚微时，那么，激光全息照相检验方法就无能为力了。

第五节 激光全息检测的应用

激光全息无损检测是激光全息最早获得的应用领域，目前已在蜂窝结构、压力容器、汽车轮胎等检测方面获得广泛的应用。

1. 蜂窝结构的检测

蜂窝夹层结构的检测可以采用内部充气、加热以及表面真空等加载方法。例如，飞机机翼，采用两次曝光和实时检测方法都能检测出脱黏、失稳等缺陷。当蒙皮厚度为 0.3mm 时，可检测出直径为 5mm 的缺陷。采用全息照相方法检测蜂窝夹层结构，具有良好的重复性、再现性和灵敏度。图 10-11 所示是某蜂窝结构脱黏区的激光全息照片，图中清楚地显示出脱黏区的大小和位置。

2. 复合材料的检测

以硼或碳高强度纤维本身粘接以及粘接到其他金属基片上的复合材料，是近年来被人们极为重视的一种新材料，它比目前采用的均一材料更具有比强度高优点，是宇航工业中很

有应用前途的一种结构材料。但这种材料在制造和使用过程中会出现纤维、纤维层之间以及与基片之间的脱黏或开裂,使得材料的刚度下降。当脱黏或裂缝增加到一定量时,结构的刚度将大大降低甚至导致损坏。全息照相可以检测出材料的这种缺陷。经试验表明,用超声激励的全息照相是检测这种缺陷的一种有效方法。

图 10-12 所示是采用二次曝光法对黏结板脱黏缺陷的检测结果。



图 10-11 蜂窝结构板脱黏区的激光全息图

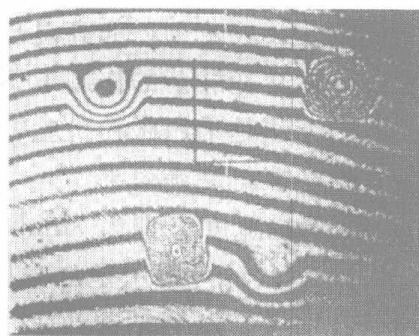


图 10-12 黏结板件的全息摄影无损检测

3. 固体火箭发动机的检验

在固体火箭发动机的外壳、绝热层、包覆层及推进剂药柱各界面之间要求无脱黏缺陷。目前多采用 X 射线检测产品的气泡、夹杂物等缺陷,而对于脱黏探伤却难于检查。超声检测因其探头需要采用耦合剂,而且在曲率较大的部位或棱角处无法接触而形成“死区”,限制了它的应用。采用全息照相检测能有效地克服上述两种检测方法的缺点。

采用抽真空加载方法,当加载量为 98.258kPa 时,可清楚地观察到 $2 \times 2\text{mm}$ 人工缺陷的环形干涉条纹。

4. 药柱质量的检测

激光全息照相也可以用来检测药柱内部的气孔和裂纹。通过加载使药柱在对应于气孔或裂纹的表面产生变形,当变形量达到激光器光波波长的 $1/4$ 时,就可使干涉条纹图样发生畸变。表 10-11 所示是检测药柱内部气孔缺陷的灵敏度数据,可见,对于近表面缺陷,即使很小也能被检查出来;而当缺陷埋藏较深时,只有较大的缺陷才能被检查出来。

表 10-11 激光全息检验药柱内部气孔的灵敏度

气孔深度 H/mm	缺陷直径 D/mm	H/D	气孔深度 H/mm	缺陷直径 D/mm	H/D
2.80	0.965	2.901	19.78	6.909	2.862
6.05	2.080	2.908	23.50	8.164	2.878
8.75	3.093	2.828	26.21	9.049	2.896
11.59	4.067	2.849	30.05	10.173	2.953
14.14	4.974	2.842	32.43	11.047	2.935
19.31	6.55	2.948			

利用全息照相检测药柱不但简便、快速(可多根药柱同时检测)、经济,而且在检测界面没有粘接力的缺陷方面,有其独特的优越性。

5. 印制电路板焊点的检测

由于印制电路板焊点的特点,一般采用热加载方法。有缺陷的焊点,其干涉条纹与正常

焊点有明显的区别 (图 10-13)。为了适应快速自动检测的要求, 可采用计算机图像处理技术对全息干涉图像进行处理和识别, 通过分析条纹的形成等判断焊点的质量, 由计算机控制程序完成整个检测过程。

6. 压力容器的检测

小型压力容器大多数采用高强度合金钢制造。由于高强度钢材的焊接工艺难于掌握, 焊缝和母材往往容易形成裂纹缺陷, 加之容器本身大都需要开孔接管和支撑, 存在着应力集中的部位, 工作条件又较苛刻, 如高温高压、低温高压、介质腐蚀等都促使容器易于产生疲劳裂纹。疲劳裂纹在交变载荷的作用下不断扩展, 最终使容器泄漏或破损, 给安全生产带来威胁。传统的检验方法是采用磁粉检验、射线检验和超声检验, 或者采用高压破损检验。但检测速度较慢, 难于取得完满效果。

图 10-14 所示是宽度分别为 3mm (右侧) 和 1mm (左侧) 的环形焊缝的激光全息图。图 10-15 (a), (b), (c) 所示是加载压差分别为 1.96MPa、3.92MPa、5.88MPa 时所拍摄的畸变干涉条纹图样。左侧是裂纹宽度为 5mm 时所显示的图样, 右侧是裂纹宽度为 7mm 时所显示的图样。图 10-16 所示则为一压力容器的激光全息检测的照片, 其中, (a) 图是合格产品, (b) 图所示是不合格产品的激光全息照片。



图 10-13 PCB 板的激光全息图

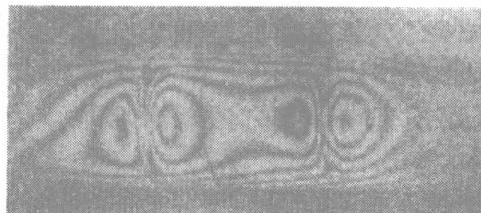
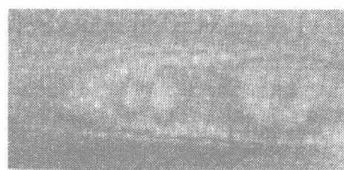
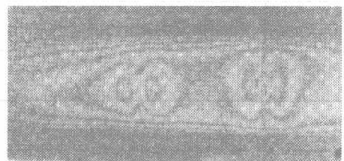


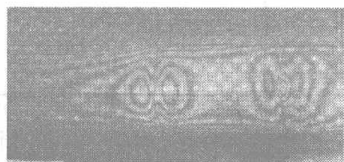
图 10-14 裂纹的激光全息照片



(a) 1.96MPa

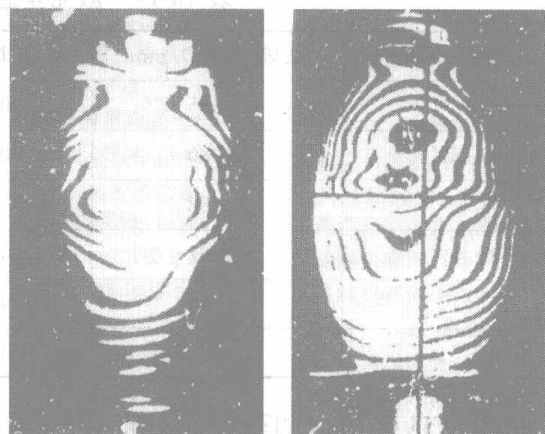


(b) 3.92MPa



(c) 5.88MPa

图 10-15 不同加载压差时所拍摄的畸变干涉条纹



(a) 合格产品

(b) 不合格产品

图 10-16 压力容器激光全息检测照片

由此可以看出,通过对畸变干涉条纹的分析,不但可以得知缺陷的准确位置、缺陷的长度、宽度以及不同变形部位的形变大小相对值,同时也可看出缺陷周围受缺陷影响而引起的波及范围及其性质和相对大小。这种显示全场的分布结果并包含有充分的信息是其他检验方法所不可比拟的。

7. 冲击损伤的检测

激光全息技术也可用于冲击损伤的检测。图 10-17 所示是用 35mW 的 He-Ne 连续波激光器为相干光源,采用 250W 的红外灯对受冲击损伤的石墨/PEEK 复合材料试样进行热加载,所拍摄的激光全息图,由图可以清楚地看出其中的冲击损伤的位置及其大小。

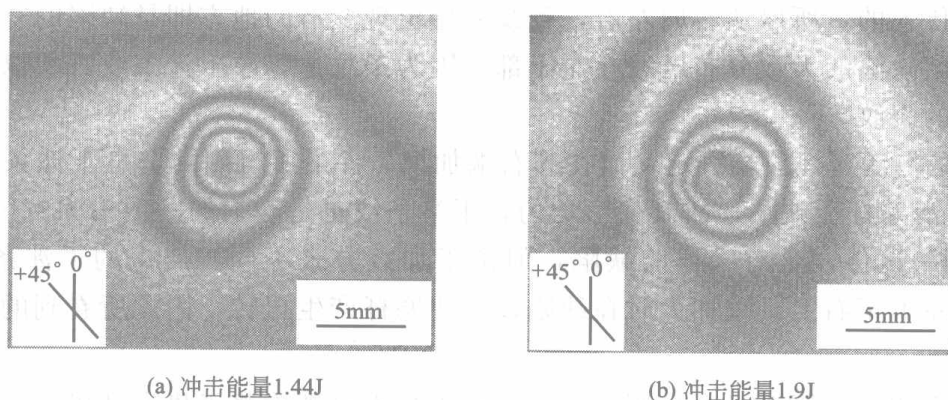


图 10-17 受冲击损伤的石墨/PEEK 试样的激光全息条纹图

8. 飞机发动机活塞杆疲劳的检测

螺旋桨飞机发动机中的活塞杆是发动机中的重要部件,其在长期使用后会出现疲劳、断裂等缺陷。采用激光全息方法,对其进行无损检测很有意义。

它的基本原理是,将活塞杆加力或加热,使之产生微小形变,在缺陷附近,形变就会有异常表现。通过全息技术,将位移分布表现出来,从中观测出缺陷的位置,并定性地判断出缺陷的大小及程度。

图 10-18、图 10-19 是对用外径 20mm、内径 7mm、长 300mm 的铝合金制作的螺旋桨飞机发动机活塞杆的激光全息检测结果。其中,图 10-18 是对活塞杆从右端加热所得到的全息干涉条纹,图 10-18(a) 为无缺陷活塞杆,图 10-18(b) 为有缺陷样件,由图可见,两者之间存在明显的差异:对无缺陷试件,其干涉条纹是平行的,条纹密度的右密左疏是由于右高左低的温度梯度造成的;而有缺陷试样,其左侧干涉条纹有明显变形,说明有缺陷存在。因为

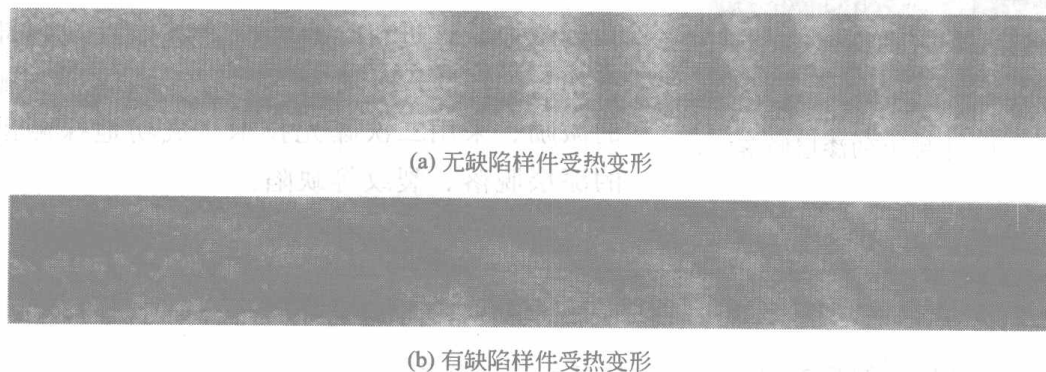


图 10-18 对试件从右端热加载的全息干涉条纹

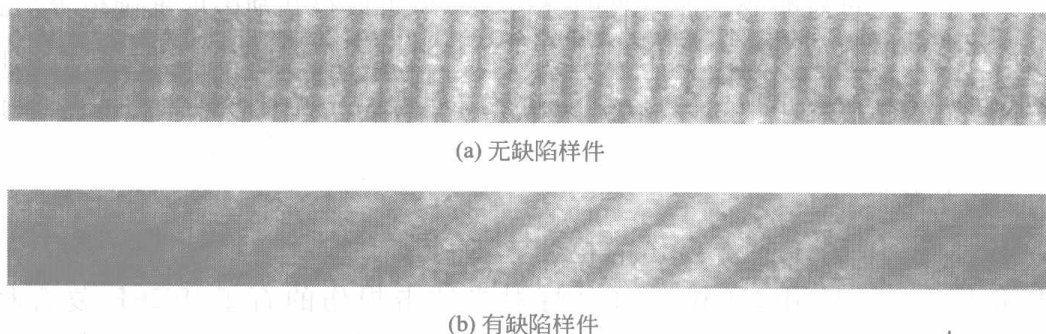


图 10-19 活塞杆左端固定、右端加力的全息干涉条纹

热量是从右侧传入的, 所以从右向左看, 条纹开始出现变形的地方即是缺陷的开始部位。从条纹的分布看出缺陷的大致分布区域在左半部。因为条纹是等厚干涉条纹, 所以判断缺陷是从左下到右上的裂纹。

图 10-19 是将活塞杆左端固定、而在其右端加力条件下所得到的全息干涉条纹。其中图 10-19(a) 因为活塞杆无缺陷, 故其变形均匀, 干涉条纹也是均匀的。图 10-19(b) 与前述图 10-18(b) 为同一试件, 含有同样的缺陷, 但由于加载方式不同, 产生的干涉条纹也不同。由于裂缝是自左下至右上, 故加力时在缺陷以右活塞杆产生扭转, 因此所看到的就是一组平行的斜条纹。

以上结果表明, 利用激光全息照相的二次曝光技术对螺旋桨飞机发动机活塞杆进行无损检测是有效的。

9. 其他方面的检验

激光全息照相也可检验一些加工精度要求较高的零件。例如, 检验汽缸内壁锥孔的质量。可以用拍摄一个已被检验合格的汽缸内壁干涉条纹图样作为标准, 然后把其他汽缸的干涉条纹图样同它进行比较, 便能从比较后的条纹分布状态来评价汽缸内壁锥孔的好坏。

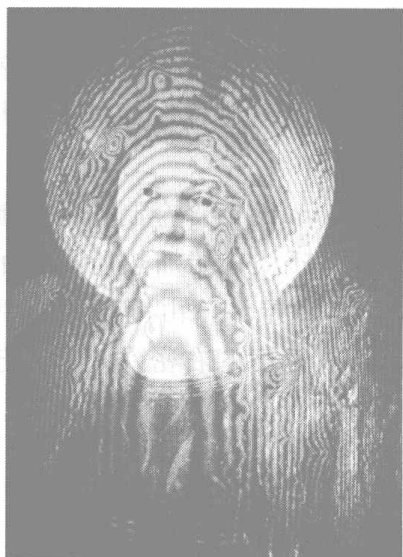


图 10-20 木雕上的漆层脱落

又如用电子束焊接的小直径不锈钢管, 在管内充气增压, 然后泄压至大气, 用二次曝光法记录, 便能发现焊接裂纹、基材的缺陷和管子的薄弱部位。

再如, 全息照相对保存历史文物有实用意义。古代瓷器等文物, 虽然从外表上看完整无瑕, 但将其轻微加载, 进行全息检查, 却能发现内部存在的损伤。如图 10-20 所示, 利用不同温度、湿度环境的激励、采用二次曝光技术, 成功地探测出木雕上的漆层脱落、裂纹等缺陷。

复习思考题

1. 试简述激光全息检验的基本原理、主要特点和适用范围。
2. 简述激光全息检测的基本步骤及其工作内容。

3. 常见的观察物体表面微差位移的方法有哪些? 各有何特点?
4. 简要论述激光全息无损检测的发展前景。

参考文献

- [1] [美] 考尔菲尔德 H. J. 主编, 郑庸, 江铁良, 郑基立, 陶世荃译, 于美文校. 光全息手册. 北京: 科学出版社, 1988.
- [2] [苏] 阿. 格. 久边科著, 李融, 黄高年译, 魏光辉校. 全息术在技术中的应用. 北京: 科学出版社, 1985.
- [3] [美] 厄尔夫 R. K. 主编, 王致新译, 王永昭校. 全息摄影无损检测. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [4] 杨庆余, 拾景忠. 伽柏与全息术的诞生. 物理实验, 2002, 22 (9): 41~44.
- [5] 谢敬辉, 孙萍. 全息术的新进展. 北京理工大学学报, 2003, 23 (2): 133~139, 142.
- [6] 陈积懋. 无损检测新技术 20 年回顾. 无损检测, 1998, 20 (7): 181~185.
- [7] 余拱信. 激光全息无损检测技术的应用现状及发展趋势. 航空科学技术, 1998 (3): 22~23.
- [8] 王永保. 激光全息检验. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [9] 李家伟、陈积懋主编. 无损检测手册. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [10] 《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会编. 全息和散斑检测. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [11] 王永昭. 光学全息. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [12] [美] 科利尔 R J, 伯克哈特 C B, 林 L H 著, 盛尔镇, 孙明经译, 光全息学. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [13] [美] 维斯特 C M 著, 樊雄文, 王玉洪译, 金国藩校. 全息干涉度量学. 北京: 机械工业出版社, 1984.
- [14] Ostrovsky Yu I, Butusov M M, Ostrovskaya G V. Interferometry by Holography. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1980.
- [15] NILS ABRAMSON. The Making and Evaluation of Holograms. ACADEMIC PRESS INC. (LONDON) LTD., 1981.
- [16] Lloyd huff (Editor). HOLOGRAPHY. Proceedings of SPIE, Vol. 532, Los Angeles, California, 1985.
- [17] [美] 杨 M 著, 霍崇儒, 初桂荫, 陈玉玲译. 光学与激光-工程物理方法. 北京: 科学出版社, 1982.
- [18] 史密斯 H M 编, 马春荣, 郑桂泉, 王诚华译. 全息记录材料. 北京: 科学出版社, 1984.
- [19] 于美文, 张静方. 全息显示技术. 北京: 科学出版社, 1989.
- [20] 刘冬梅, 李中林, 余拱信. 激光全息干涉法在岩石裂隙研究中的应用. 南方冶金学院学报, 1997, 18 (3): 175~180.
- [21] 曾启林, 熊显名, 陈金球. 激光全息无损检测技术的应用. 中国橡胶, 1997, 18 (3): 175~180.
- [22] Vivi Tornari, Antonia Bonarou, Vassilis Zafiropoulos et al. Structural evaluation of restoration processes with holographic diagnostic inspection. Journal of Cultural Heritage, 2003, 4: 347~354.
- [23] Ambu R, Aymerich F, Ginesu F, Priolo P. Assessment of NDT interferometric techniques for impact damage detection in composite laminates. Composites Science and Technology, 2006, 66: 199~205.
- [24] J. Teteris, Reinfelde M. Holographic recording in amorphous chalcogenide semiconductor thin. lms. Journal of Non-Crystalline Solids, 2003, 326 & 327: 494~499.
- [25] 耿照新, 王卫宁, 徐春婕. PCB 干涉条纹图像处理的研究. 首都师范大学学报 (自然科学版), 2003, 24 (4): 24~28.
- [26] 王卫宁, 耿照新, 岳伟伟. PCB 热变形的实时干涉测量研究. 电子与封装, 2004, 4 (6): 44~48.
- [27] Lloyd huff (Editor). Applications of Holography. Proceedings of SPIE, Vol. 523, Los Angeles, California, 1985.
- [28] 刘守, 张向苏. 光全息术最新研究动向及应用. 厦门大学学报 (自然科学版), 2001, 40 (2): 277~282.
- [29] [新] Shang H M. 光学无损检测和评定法 (中). 中国设备工程, 2002 (9): 51~53.
- [30] 戴蓉. 激光技术在无损检测领域的应用与发展. 激光与光电子学进展, 2000 (6): 1~4.
- [31] 曾启林, 李文渊, 熊显名. 激光全息轮胎无损检测仪简介. 橡塑技术与装备, 2004, 30 (4): 43~47.
- [32] 李德昌, 张早校, 郁永章. 应用激光全息照相相对压力容器无损探伤的试验研究. 西安交通大学学报, 1998, 32

(1): 107~110.

- [33] 朱晨, 张志津, 徐舟. 用激光全息技术进行飞机发动机活塞杆疲劳检测. 光电子·激光, 2002, 13 (1): 62~64.
- [34] John F Asmus. Non-divestment laser applications in art conservation. Journal of Cultural Heritage, 2003, 4: 289~293.
- [35] 陈桂才, 吴东流, 井立等. 激光全息无损检测的现状与展望. 宇航材料工艺, 2003 (2): 26~28, 43.

附录 1 国内部分无损检测标准目录

一、超声检测

- | | |
|--|--|
| (001) GB/T 12604.1—2005/ISO 5577: 2000 | 无损检测 术语 超声检测 (代替 GB/T 12604.1—90, 2005-12-01 实施) |
| (002) GB/T 1786—90 | 锻制圆饼超声波检验方法 (代替 GB 1786—1979, 1991-01-01 实施) |
| (003) GB/T 2108—80 | 薄钢板兰姆波探伤方法 |
| (004) GB/T 2970—91 | 中厚钢板超声波检验方法 (代替 GB 2970—82, 1992-07-01 实施) |
| (005) GB/T 3310—99 | 铜合金管材超声波探伤方法 |
| (006) GB/T 4162—91 | 锻轧钢棒超声波检验方法 (代替 GB 4162—84, 1992-10-01 实施) |
| (007) GB/T 4163—84 | 不锈钢管超声波探伤方法 |
| (008) GB/T 5193—85 | 钛及钛合金加工产品超声波探伤方法 |
| (009) GB/T 5777—1996 | 无缝钢管超声波探伤检验方法 [代替 GB 4163—84, 等效 ISO 9303—1989 (E), 1997-03-01 实施] |
| (010) GB/T 6402—91 | 钢锻件超声波检验方法 (代替 GB/T 6402—86, 1992-10-01 实施) |
| (011) GB/T 6519—86 | 变形铝合金产品超声波检验方法 |
| (012) GB/T 7233—87 | 铸钢件超声探伤及质量评级方法 |
| (013) GB/T 7734—87 | 复合钢板超声波探伤方法 (冶金部 1987-1903-1913 批准, 1988-03-01 实施) |
| (014) GB/T 7736—2001 | 钢的低倍组织及缺陷超声波检验法 (代替 GB/T 7736—87, 2002-05-01 实施) |
| (015) GB/T 8361—2001 | 冷拉圆钢表面超声波探伤方法 (代替 GB/T 8361—87 轴承钢冷拉圆钢表面超声波探伤方法, 2002-05-01 实施) |
| (016) GB/T 8651—88 | 金属板材超声板波探伤方法 (冶金部 1988-01-18 批准, 1989-02-01 实施) |
| (017) GB/T 8652—88 | 变形高强度钢超声波检验方法 (冶金部 1988-01-18 批准, 1989-02-01 实施) |
| (018) JB/T 10061—1999 | A 型脉冲反射式超声波探伤仪通用技术条件 |
| (019) JB/T 10062—1999 | 超声波探伤用探头性能测试方法 |
| (020) GB/T 11259—1999 | 超声波检验用对比试块的制作与检验方法 (代替 GB/T 11259—89, 2000-08-01 实施) |
| (021) GB/T 11343—89 | 接触式超声波斜射探伤方法 |
| (022) GB/T 11344—89 | 接触式超声波脉冲回波法测厚 |
| (023) GB/T 11345—89 | 钢焊缝手工超声波探伤方法和探伤结果分级 |
| (024) GB/T 12969.1—91 | 钛及钛合金管材超声波检验方法 |
| (025) GB/T 13315—91 | 锻钢冷轧工作辊超声波探伤方法 |

(026) GB/T 13316—91

(027) GB/T 15830—1995

(028) GB/T 18256—2000

(029) JB/T 73671—2000

(030) ZB J74 003—88

(031) ZB N77 001—89

(032) ZB Y344—85

(033) ZB Y345—85

(034) ZB U05 008—90

(035) JB 1151—73

(036) JB/T 1152—81

(037) JB/T 1581—96

(038) JB/T 1582—96

(039) JB/T 3144—82

(040) JB 3963—85

(041) JB/T 4008—1999

(042) JB/T 4009—1999

(043) JB/T 4010—85

(044) JB/T 4125—85

(045) JB/T 4733—1996

(046) JB/T 509391

(047) JB/T 5439—91

(048) JB/T 440—91

(049) JB/T 5441—91

(050) JB/T 6903—93

(051) JB/T 6979—93

(052) JB/T 7522—94

(053) JB/T 7524—94

(054) JB/T 7913—1995

(055) JB/T 8428—1996

(056) JB/T 8467—1996

(057) JB/T 8931—1999

(058) JB/T 9020—1999

(059) JB/T 9045—1999

(060) JB/T 9212—1999

(061) JB/T 9214—1999

铸钢轧辊超声波探伤方法

钢制管道对接环焊缝超声波探伤方法和检验结果的分级 (1996-08-01 实施)

焊接钢管 (埋弧焊除外) 用于确认水压密实性的超声波检测方法 [等效 ISO 10332—1994 《承压无缝钢管或焊接钢管 (埋弧焊除外) - 确认水压密实性的超声波检测》 1997-03-01 实施]

圆柱螺旋压缩弹簧超声波探伤方法

压力容器用钢板超声波探伤

超声测厚仪通用技术条件

超声波探伤用探头型号命名方法

超声探伤仪用刻度板

船用锻钢件超声波探伤

高压无缝钢管超声波探伤

锅炉和钢制压力容器对接焊缝超声波探伤 JB1152—73

汽轮机、汽轮发电机转子和主轴锻件超声探伤方法 (85)

汽轮机叶轮锻件超声探伤方法 (85)

锅炉大口径管座角焊缝超声波探伤

压力容器锻件超声波探伤

液浸式超声纵波直射探伤方法 JB/T 4008—85

接触式超声纵波直射探伤方法 JB/T 4009—85

汽轮发电机用钢制护环超声探伤方法 (JB/ZQ 61 一类)

超声波检验用铝合金参考试块的制造和控制 (2000 作废)

压力容器用爆炸不锈钢复合钢板 (其中包括爆炸复合钢板的超声探伤)

内燃机摩擦焊气门超声波探伤技术条件

压缩机球墨铸铁零件的超声波探伤

压缩机锻钢零件的超声波探伤

压缩机铸钢零件的超声波探伤

阀门锻钢件超声波检查方法

大中型铜质锻制模块 (超声波和夹杂物) 质量分级

材料超声速度的测量方法

建筑钢结构焊缝超声波探伤

超声波检验用钢制对比试块的制作与校验方法 (代替 GB/T H11259—89)

校正钢焊缝超声波检测仪器用标准试块

锻钢件超声波探伤方法

堆焊层超声波探伤方法

大型锻造曲轴超声波检验 ABJ 32004—88

离心机, 分离机锻焊件常规无损探伤技术规范

常压钢质油堆焊缝超声波探伤 ZBH 98001—88

A 型脉冲反射式超声波系统工作性能测试方法 (代替

- ZBJ 04001—87)
- (062) JB/T 9219—1999 球墨铸铁超声声速测定方法 (代替 JB/Z 265—86)
- (063) JB/T 9377—1999 超声硬度计技术条件 (代替 ZBN7I 009—89)
- (064) JB/T 9630.2—1999 汽轮机铸钢件超声波探伤及质量分级方法
- (065) JB/T 9674—1999 超声波探测瓷件内部缺陷 (代替 JB/T 262—86)
- (066) JB/T 10061—1999 A 型脉冲反射式超产探伤仪通用技术条件 (代替 ZBY 230—84、ZBY 232—84)
- (067) JB/T 10062—1999 超声探伤用探头性能测试方法
- (068) JB/T 10063—1999 超声探伤用 1 号标准试块技术条件 (代替 ZBY 232—84)
- (069) JB/T 53070—93 加氢反应器焊缝超声波探伤
- (070) JB/T 53071—93 加氢反应器堆焊层的超声波探伤
- (071) JB/ZQ 6104—84 汽轮机和发电机转子锻件超声波探伤方法
- (072) JB/ZQ 6109—84 铸钢件超声波检测方法
- (073) JB/ZQ 6112—84 汽轮发电机用钢质护环的超声波检验方法
- (074) JB/ZQ 6141—86 超声波检验用钢质对比试块的制作和控制
- (075) JB/ZQ 6142—86 超声波检验用铝合金对比试块的制作和控制
- (076) JB/ZQ 6159—85 奥氏体钢锻件的超声波检验方法
- (077) JG/T 3034.2—1996 螺栓球节点钢网架焊缝超声波探伤及质量分级法
- (078) JG/T 3034.1—1996 焊接球节点钢网架焊缝超声波探伤及质量分级法
- (079) YB/T 144—1996 超声探伤信号幅度误差测量方法 (1998-12-01 实施)
- (080) YB/T 145—1998 钢管探伤对比试样人工缺陷尺寸测量方法
- (081) YB 898—77 钢材低倍缺陷超声波检验法
- (082) YB 951—81 钢轨超声波探伤方法 (冶金部发布, 1981-7-1 试行)
- (083) YB 3209—82 锻钢冷轧工作辊超声波探伤方法
- (084) YB 4082—2000 钢管自动超声探伤系统综合性能测试方法 (代替 YB 4082—1992, 2000-12-01 实施)
- (085) TB 1606—85 球墨铸铁曲轴超声波探伤
- (086) TB 1618—85 机车车辆车轴超声波探伤
- (087) TB 1989—87 机车车辆厂、段修车轴超声波探伤方法
- (088) TB 2046—89 机车新制轮箍超声波探伤方法

二、射线检测

- (089) GB/T 3323—87 钢熔化焊对接接头射线照相和质量分级 (代替 GB 3323-82)
- (090) GB/T 4075—83 密封放射源分级
- (091) GB/T 4076—83 密封放射源一般规定
- (092) GB 4792—84 放射卫生防护基本标准
- (093) GB/T 4835—84 辐射防护携带式 X· γ 辐射剂量率仪和监测仪
- (094) GB/T 5677—85 铸钢件射线照相及底片等级分类方法
- (095) GB/T 9582—1998 工业射线胶片 ISO 感光度和平均斜率的测定 (用 X 和 γ 射线曝光)
- (096) GB 10252—88 钴-60 辐照类装置的辐射防护与安全标准
- (097) GB/T 11346—89 铝合金铸件 X 射线照相检验针孔 (圆形) 分级
- (098) GB/T 11806—89 放射性物质安全运输规定

- (099) GB/T 11851—89 压水堆燃料棒焊缝 X 射线照相检验方法
- (100) GB/T 12604.2—2005/ISO 5576: 1997 无损检测 术语 射线照相检测 (代替 GB/T 12604.2—1990, 2006-04-01 实施)
- (101) GB/T 12604.8—1995 无损检测术语 中子检测 (代替 JB3111—82, 1996-08-01 实施)
- (102) GB/T 12605—90 钢管环缝熔化焊对接接头射线透照工艺和质量分级
- (103) GB/T 17925—1999 气瓶对接焊缝 X 射线实时成像检测
- (104) GB/T 16544—1996 球形储罐 γ 射线全景曝光照相方法 (1997-03-01 实施)
- (105) ZBN78 005—88 变频充气 X 射线探伤机
- (106) JB/T 9404—1999 侧窗荧光分析 X 射线管
- (107) ZBY 203—84 固定式 (移动式) 工业 X 射线探伤机技术条件
- (108) JB/T 5075—91 射线照相用铅增感屏
- (109) JB/T 5453—91 工业 X 射线图像增强器电视系统技术条件
- (110) JB/T 5454—91 周向 X 射线探伤机
- (111) JB/T 5455—91 金属陶瓷 X 射线探伤机
- (112) JB/T 6220—92 射线探伤用黑度计
- (113) JB/T 6221—92 工业 X 射线探伤机电气通用技术条件
- (114) JB/T 6828—93 周向 X 射线管技术条件
- (115) JB/T 6829—93 金属陶瓷 X 射线管技术条件
- (116) JB/T 7260—94 空气分离设备铜焊缝射线照相和质量分级
- (117) JB/T 7412—94 便携式工业 X 射线探伤机 (代替 JB/T 5455—91、ZBY 202—84、ZBY 201—84)
- (118) JB/T 7413—94 固定式 (移动式) 工业 X 射线探伤仪 (代替 JB/T 5454—91、ZBY202—84 ZBY201—84、ZBN 75005—84)
- (119) JB 7788—1995 500kV 以下工业 X 射线探伤机防护规则 (代替 ZBY 315—85)
- (120) B/T 7808—1995 工业 X 射线探伤机主参数系列 (代替 ZBN 78001—86)
- (121) JB/T 8796—1998 同上
- (122) JB/T 7902—1995 线型象质计 (代替 GB/T 5618—85)
- (123) JB/T 7903—1999 工业射线照相底片观片灯 (代替 GB/T 11226—89)
- (124) JB/T 8387—1996 工业探伤 X 射线管主参数 (代替 ZBN 78003—88)
- (125) JB/T 8764—1998 工业探伤用 X 射线管通用技术条件 (代替 ZBN 78002—86 工业探伤 X 射线管主参数、B2385—78×ZBN78003—88 工业 X 射线探伤机主参数系列 ZBN78001—86)
- (126) JB/T 9215—1999 控制射线照相图像质量的方法 (代替 ZBJ 04002—87)
- (127) JB/T 9217—1999 射线照相探伤方法 (代替 ZBJ 04004—87)
- (128) JB/T 9402—1999 工业 X 射线探伤机性能测试方法 (代替 ZBY 316—85)
- (129) JB/T 57110—1999 XXH, XXC 系列便携式工业 X 射线探伤机产品质量分类
- (130) JB/T 57110—1999 XXQ, XXG 系列便携式工业 X 射线探伤机产品质量分类
- (131) JB/T 57114.1—1999 XC 系列工业探伤用 X 射线管产品质量分类

- (132) JB/T 57114.2—1999 XQC系列工业探伤用X射线管 产品质量分类
- (133) JB/T 57114.1—1999 XYY系列X射线探伤机 产品质量分类
- (134) JB/T 57114.2—1999 XYD系列X射线探伤机 产品质量分类
- (135) GB/T 19348.1—2003 无损检测 工业射线照相胶片 第1部分:工业射线照相胶片系统的分类
- (136) GB/T 19348.2—2003 无损检测 工业射线照相胶片 第2部分:用参考值方法控制胶片处理

三、磁粉检测

- (137) GB/T 12604.5—90 无损检测术语 磁粉检测(代替JB 3111—82, 1991-12-01实施)
- (138) GB/T 9444—1988 铸钢件磁粉探伤及质量评级方法
- (139) GB/T 10121—88 钢材塔形发纹磁粉检验方法(冶金部1988-11-25批准, 1990-01-01实施)
- (140) GB/T 15822—1995 磁粉探伤方法(代替ZB H24001—87、ZB J04 006 钢铁材料的磁粉探伤方法)
- (141) GB/T 12606—90 钢管及圆钢棒的漏磁探伤方法
- (142) GB/T 16673—1996 无损检测用黑光源(UV-A)辐射的测量(等效采用BS 4489—84, 1997-07-01实施)
- (143) JB/T 9736—1999 喷油嘴偶件、柱塞偶件、出油阀偶件磁粉探伤方法
- (144) ZJB J10 001—86 航空轴承零件磁粉探伤规范
- (145) JB 3965—85 钢制压力容器磁粉探伤
- (146) JB 4248—86 压力容器锻件磁粉探伤
- (147) JB/T 5391—91 铁路机车车辆滚动轴承零件磁粉探伤规程
- (148) JB/T 5442—91 压缩机重要零件的磁粉探伤
- (149) JB/T 6061—92 焊缝磁粉检验方法和缺陷磁痕的分级
- (150) JB/T 6063—92 磁粉探伤用磁粉技术条件
- (151) JB/T 6065—92 磁粉探伤用标准试片(修订中)
- (152) JB/T 6066—92 磁粉探伤用标准试块(修订中)
- (153) JB/T 6439—92 阀门受压铸钢件磁粉探伤检验
- (154) JB/T 6440—92 阀门受压铸钢件射线照相检验
- (155) JB/T 6719—93 内燃机进、排气门磁粉探伤(代替NJ 437·86)
- (156) JB/T 6722—93 内燃机连杆磁粉探伤
- (157) JB/T 6729—93 内燃机曲轴、凸轮轴磁粉探伤
- (158) JB/T 6870—93 旋转磁场探伤仪技术条件
- (159) JB/T 6912—93 泵产品零件无损检测磁粉探伤
- (160) JB/T 7367—94 圆柱螺旋压缩弹簧磁粉探伤方法
- (161) JB/T 7411—94 电磁轭探伤仪技术条件
- (162) JB/T 8290—1998 磁粉探伤机(代替GB 3721—83)
- (163) JB/T 8468—1996 锻钢件磁粉检验方法
- (164) JB/T 9628—1999 汽轮机叶片磁粉探伤方法
- (165) JB/T 9630.1—1999 汽轮机叶片 磁粉探伤及质量分级方法
- (166) JB/ZQ 6101—85 锻钢件的磁粉检验方法
- (167) JB/ZQ 6105—84 大型曲轴锻件的磁粉检验

- (168) NJ 310—83 内燃机连杆螺栓磁粉探伤技术条件
- (169) NJ 317—84 柴油机锻钢曲轴、凸轮轴磁粉探伤技术条件
- (170) NJ 318—84 柴油机球墨铸铁曲轴、凸轮轴磁粉探伤技术条件
- (171) NJ 319—84 内燃机连杆磁粉探伤技术条件
- (172) NJ 320—84 内燃机零部件磁粉探伤方法
- (173) NJ 327—84 内燃机活塞销磁粉探伤技术条件
- (174) NJ 437—86 内燃机进、排气门磁粉探伤技术条件
- (175) TB 1619—1998 机车车辆车轴磁粉探伤
- (176) TB 1987—2003 机车车辆轮对滚动轴承磁粉探伤方法
- (177) TB 2044—89 TYC_3000 型客货车轮轴荧光磁粉探伤技术条件
- (178) TB/T 2205 货车无轴箱滚动轴承磁粉探伤判废技术条件
- (179) GJB 2028—94 磁粉检验 国防科工委 1994 年发布, 1995-04-01 实施
- (180) GJB 2029—94 磁粉检验显示图谱
- (181) GJB 2028A—2007K 磁粉检验
- (182) GJB 9712—2002 无损检测人员的资格鉴定与认证

四、渗透检测

- (183) GB/T 12604.3—2005/ISO 12706: 2000 无损检测 术语 渗透检测 (代替 GB/T 12604.3—1990, 2005-12-01 实施)
- (184) GB/T 9443—88 铸钢件渗透探伤及缺陷显示痕迹的评级方法
- (185) JB/T 6062—92 焊缝渗透检验方法和缺陷痕迹的分级
- (186) JB/T 6064—92 渗透探伤用镀铬试块技术条件
- (187) JB/T 6902—93 阀门铸钢件液体渗透探伤
- (188) JB/T 7523—94 渗透探伤用材料技术要求
- (189) JB/T 8466—1996 锻钢件液体渗透检验方法
- (190) JB/T 9213—1999 无损检测 渗透检查 A 型对比试块 (代替 ZBH 04001—87)
- (191) JB/T 9216—1999 控制渗透探伤材料质量的方法 (代替 ZBJ 04003—87)
- (192) JB/T 9218—1999 渗透探伤方法 ZBJ04005—87

五、涡流检测

- (193) GB/T 12604.6—90 无损检测术语 涡流检测 (代替 JB 3111—82, 1991-12-01 实施)
- (194) GB/T 5126—85 铝及铝合金冷拉薄壁管材涡流探伤方法
- (195) GB/T 5248—1998 铜及铜合金无缝管涡流探伤方法
- (196) GB/T 4957—85 非磁性金属基体上非导电覆盖层厚度测量涡流方法
- (197) GB/T 7735—1995 钢管涡流探伤检验方法 [代替 GB 7735—87, 等效 ISO 9304: 1989 用于压力目的的无缝钢管和焊接钢管 (埋弧焊钢管除外)——涡流探伤检验, 1996-03-01 实施]
- (198) GB/T 11260—1996 圆钢穿过式涡流检验方法 (等效采用日本标准 JISG 0568—1993 “钢的穿过式涡流探伤检验方法”, 代替 GB/T 11260—89 冷拉圆钢穿过式涡流检验方法, 1997-03-01 实施)
- (199) GB/T 14480—93 涡流探伤系统性能测试方法

- (200) GB/T 17990—1999 圆钢点式(线圈)涡流探伤检验方法(2000-08-01 实施)
- (201) JB/T 5525—91 涡流探伤仪性能测试方法
- (202) GB/T 12969.2—91 钛及钛合金管材涡流检验方法
- (203) JB/T 8393—96 磁性和涡流式覆层厚度测量仪
- (204) YB/T 127—1997 黑色金属电磁(涡流)分选检验方法(冶金部 1997-08-04 批准, 1997-12-01 实施)
- (205) YB/T143—1998 涡流探伤信号幅度误差测量方法(国家冶金工业局 1998-08-25 批准, 1998-12-01 实施)
- (206) YB 4083—2000 钢管自动涡流探伤系统综合性能测试方法(国家冶金工业局 2000-1907-26 批准, 2000-12-01 实施)

六、声发射检测

- (207) GB/T 12604.4—2005/ISO 12716: 2001 无损检测 术语 声发射检测(代替 GB/T 12604.4—90, 2005-12-01 实施)
- (208) GB/T 18182—2000 金属压力容器声发射检测及结果评价方法
- (209) JB/T 5754—91 单通道声发射检测仪技术条件
- (210) JB/T 6916—93 在役高压气瓶声发射检测和评定方法
- (211) JB/T 7667—1995 在役压力容器声发射检测评定方法
- (212) JB/T 8283—95 声发射检测仪性能测试方法(代替 GB 7719—87)
- (213) GJB 2044—94 钛合金压力容器检测方法
- (214) QJ 2914—1996 复合材料构件检测方法

七、红外检测

- (215) GB/T 12604.9—1996 无损检测术语 红外检测(国家技术监督局 1996-04-10 批准, 1996-10-01 实施)

八、激光全息检验

- (216) GJB 579—1988 航空轮胎全息照相检查方法(1989-01-01 实施)
- (217) GJB 3595—1999 药柱包覆层粘接质量激光全息无损检测方法(1999-09-01 实施)
- (218) HB 6625—92 金属蜂窝胶接构件的激光全息无损检验(1992-12-01 实施)
- (219) QJ 2915—1997 蜂窝夹层粘接质量激光全息检测方法(1997-10-05 实施)
- (220) HB 5390—87 激光全息测定非金属结构材料的泊松比试验方法

九、其他

- (221) GB/T 12604.7—1995 无损检测术语 泄漏检测 JB 3111—82
- (222) GB/T 12606—1999 钢管漏磁探伤方法[代替 GB/T 12606—1990 ‘钢管及圆钢棒的漏磁探伤方法’, 等效采用 ISO 9402: 1989 《承压用无缝钢管和焊管(埋弧焊除外)——全圆周磁传感器(漏磁)法检测铁磁性钢管的纵向缺陷》(国家质量技术监督局 1999-11-01 批准, 2000-08-01 实施)]

- (223) B/T 145—1998 钢管探伤对比试样人工缺陷尺寸 (国家冶金工业局 1998-08-25 批准, 1998-12-01 实施)
- (224) JB 4730—2004 锅炉、压力容器及压力管道无损检测 (JB 4730—94 压力容器无损检测)
- (225) JB/T 5000.14—1998 重型机械通用技术条件铸钢件无损探伤
- (226) JB/T 5000.15—1998 重型机械通用技术条件锻钢件无损探伤
- (227) GB/T 9445—2005 无损检测-人员资格鉴定与认证 (代替 GB/T 9445—1999 无损检测人员技术资格鉴定通则)

参考文献

- [1] 材料与测试网 <http://www.mat-test.com.cn>.
- [2] 冶金工业信息标准研究院标准化研究所, 中国标准出版社第二编辑室编. 金属材料物理试验方法标准汇编 (下) (第二版). 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [3] 《金属材料无损检测方法标准汇编》汇编组编. 金属材料无损检测方法标准汇编. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [4] 中国无损检测标准网 <http://www.chinandt.org>.

附录 2 部分材料的声学特性

材料种类	材 料 名 称	密度 $/\times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	声速/(km/s)		声阻抗 $/\times 10^6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
			纵波 c_l	横波 c_t	
金 属	铝	2.7	6.32	3.13	17
	铋	9.8	2.18	1.10	21
	58 黄铜	8.4	4.40	2.20	37
	镉	8.6	2.78	1.50	24
	铸铁	6.9~7.3	3.5~5.8	2.2~3.2	25~42
	康铜	8.8	5.24	2.64	46
	铜	8.9	4.70	2.26	42
	德国银(铜镍锌合金)	8.4	4.76	2.16	40
	金	19.3	3.24	1.20	63
	硬金属(Stellite)	11~15	6.8~7.3	4.0~4.7	77~102
	钢	7.7	5.90	3.23	45
	铅	11.4	2.16	0.70	25
	镁	1.7	5.77	3.05	10
	锰铜	8.4	4.66	2.35	39
	汞	13.6	1.45	—	20
	镍	8.8	5.63	2.96	50
	铂	21.4	3.96	1.67	85
	银	10.5	3.60	1.59	38
	锡	7.3	3.32	1.67	24
	钨	19.1	5.46	2.62	104
	锌	7.1	4.17	2.41	30
非 金 属	氧化铝	3.6~3.95	9~11	5.5~6.5	32~43
	环氧树脂	1.1~1.25	2.4~2.9	1.1	2.7~3.6
	火石(含铅)玻璃	3.6	4.26	2.56	15
	原玻璃	2.5	5.66	3.42	14
	冰	0.9	3.98	1.99	3.6
	石蜡	0.83	2.2	—	1.8
	丙烯酸树脂	1.18	2.73	1.43	3.2
	聚酰胺	1.1~1.2	2.2~2.6	1.1~1.2	2.4~3.1
	聚苯乙烯	1.06	2.35	1.15	2.5
	陶瓷	2.4	5.6~6.2	3.5~3.7	13
	石英玻璃	2.6	5.57	3.52	14.5
	有机玻璃	—	2.73	1.43	—
	软橡胶	0.9	1.48	—	1.4
	热化橡胶	1.2	2.3	—	2.8
	特氟龙(Teflon)	2.2	1.35	0.55	3.0
液 体	甘油	1.26	1.92	—	2.5
	甲碘	3.23	0.98	—	3.2
	柴油	0.80	1.25	—	1.0
	汽车油(SAE 20a. 30)	0.87	1.74	—	1.5
	水(20℃)	1.0	1.483	—	1.5

附录3 常用钢种的磁特性参数表

编号	材 料	试样状态	硬 度	矫顽力 H_c/Oe	剩磁感应 强度 B_r/Gs	最大磁导 率/ μm	最大磁导 率对应的 磁场强度 $H_{\mu m}/Oe$
1	10 钢	冷拉状态		4.5	4600	542	12.0
2	20 钢	冷拉状态	221HB	10.7	6250	381	20.0
3	40 钢	正火	187HB	7.3	10700	712	12.0
4	40 钢	850℃水淬,300℃回火	47HRC	19.0	13050	507	22.0
5	45 钢	850℃水淬,560℃回火	35HRC	14.0	15800	661	18.0
6	50 钢	材料供应状态	179HB	6.2	11000	729	11.5
7	50 钢	840℃水淬,500℃回火	28HRC	12.4	10500	510	20.0
8	D60 钢	材料热轧状态	212HB	8.2	8250	533	11.7
9	D60 钢	850℃水淬,550℃回火	30HRC	14.3	10600	410	21.0
10	50BA 钢	材料供应状态	207HB	8.8	9600	590	12.0
11	50BA 钢	840℃水淬,650℃回火	22.5HRC	12.3	13400	503	22.0
12	20Cr 钢	930℃渗碳,800℃油淬,200℃回火	66HRC	15.5	10000	322	14.0
13	38CrA 钢	材料供应状态	21HRC	13.9	8100	363	19.0
14	38CrA 钢	正火	197HB	10.7	12150	498	19.4
15	38CrA 钢	860℃油淬,550℃回火	33HRC	14.1	19500	661	18.5
16	40Cr 钢	正火	23.5HRC	15.7	8400	301	23.0
17	40Cr 钢	850℃油淬,510℃回火	39.5HRC	18.6	15950	600	20.0
18	45Cr 钢	材料供应状态	204HB	5.7	9850	482	17.0
19	45Cr 钢	840℃油淬,580℃回火	229HB	8.3	12330	585	18.1
20	38CrSi 钢	840℃油淬,580℃回火	33.5HRC	12.4	15480	667	18.0
21	38CrSi 钢	910℃油淬,450℃回火	45HRC	12.8	13700	611	18.0
22	25CrMnSi 钢	材料供应状态	201HB	8.7	11300	735	9.7
23	25CrMnSi 钢	880℃正火,860℃油淬,460℃回火	28.5HRC	12.2	11400	515	20.0
24	30CrMnSiA 钢	材料供应状态	201HB	10.0	12500	650	12.0
25	30CrMnSiA 钢	正火	181HB	3.5	12300	870	11.0
26	30CrMnSiNi2A 钢	材料供应状态	23.5HRC	12.3	14400	706	17.0
27	30CrMnSiNi2A 钢	860℃油淬,290℃回火	49HRC	38.0	7620	144	49.0
28	20CrMo 钢	材料供应状态	170HB	5.6	11000	1025	8.0
29	20CrMo 钢	820℃油淬,200℃回火	30.5HRC	20.0	10100	296	20.0
30	PCrMo 钢	860℃油淬,550℃回火	27HRC	14.3	14300	575	20.0
31	35CrMoA 钢	860℃油淬,260℃回火	49HRC	17.2	11100	407	27.5
32	60Cr2MoA 钢	860℃油淬,440℃回火	50HRC	19.0	11300	432	27.0
33	PCrMoV 钢	材料供应状态	30.7HRC	17.6	9300	300	28.0

续表

编号	材 料	试 样 状 态	硬 度	矫顽力 H_c/Oe	剩磁感应 强度 B_r/Gs	最大磁导 率/ μm	最大磁导 率对应的 磁场强度 $H_{\mu m}/Oe$
34	PCrMoV 钢	正火	30HRC	14.8	9000	309	25.0
35	PCrMoV 钢	880℃正火, 860℃油淬, 600℃回火	38HRC	16.3	15650	605	20.5
36	38CrMoAlA 钢	材料供应状态	21HRC	8.0	8500	471	18.5
37	38CrMoAlA 钢	940℃油淬, 650℃回火	31HRC	11.5	14300	487	25.0
38	38CrMoAlA 钢	930℃热水淬, 650℃回火, 第一次氮化, 510℃, 12h, 第二次氮化, 550℃, 50h		16.8	13600	450	22.0
39	12CrNi2A	930℃渗碳(1mm), 880℃油淬, 200℃回火	33.5HRC	4.0	10700	1000	5.5
40	12CrNi3A	材料供应状态	149HB	4.6	12300	1119	10.0
41	12CrNi3A	930℃渗碳, 800℃油淬, 160℃回火	60HRC	21.8	9600	263	32.0
42	20Cr2Ni4A	材料供应状态	217HB	9.3	12500	642	14.5
43	25CrNi4A	860℃油淬, 600℃回火	37HRC	10.0	13500	664	17.5
44	30CrNi2A	正火	29HRC	16.3	10200	365	18.0
45	30CrNi2A	820℃油淬, 680℃回火	28HRC	13.1	13700	660	20.0
46	40CrNi 钢	860℃油淬, 230℃回火	50HRC	19.0	11500	355	31.5
47	45CrNi 钢	材料供应状态	32HRC	14.2	15500	468	25.5
48	PCrNiMo 钢	材料供应状态	24HRC	13.0	13500	499	23.0
49	PCrNiMo	880℃油淬, 650℃回火	30HRC	13.2	15400	574	23.5
50	PCrNiMo	850℃油淬, 600℃回火	33HRC	15.0	15200	590	20.0
51	40CrNiMoA	材料供应状态	214HB	15.0	14250	693	15.0
52	40CrNiMoA	860℃油淬, 500℃回火	39HRC	14.0	14000	613	20.5
53	60CrNiMo	860℃油淬, 440℃回火	49HRC	20.5	11100	377	30.0
54	ZG37CrNiMo 钢	正火	29HRC	17.2	15000	530	22.0
55	ZG37CrNiMo 钢	880℃油淬, 610℃回火	29.5HRC	17.4	14900	518.5	21.0
56	PCrNi3MoV 钢	材料供应状态	31HRC	18.7	10050	291	32.0
57	PCrNi3MoVA 钢	880℃水冷油淬, 590℃回火	40HRC	17.2	14401	545	22.0
58	45CrNiMoVA 钢	正火	27HRC	10.3	15350	694	17.0
59	45CrNiMoVA 钢	材料供应状态	46HRC	30.0	10500	221	44.0
60	45CrNiMoVA 钢	860℃油淬, 440℃回火	47.5HRC	18.2	13000	529	23.2
61	30CrNi2MoVA	材料供应状态	24HRC	11.8	13450	626	17.0
62	30CrNi2MoVA 钢	860℃正火, 640℃回火	32.5HRC	13	12700	552	20.5
63	30CrNi2MoVA 钢	860℃油淬, 640℃回火	41HRC	14.5	13150	534	21.0
64	20CrNi4VA 钢	材料供应状态	25.5HRC	5.5	12400	773	12.0
65	Cr3NiMo 钢	900℃正火, 680℃回火	207HB	11.0	8400	361	21.0
66	Cr3NiMo 钢	900℃油淬, 680℃回火	23HRC	12.0	14150	541	22.0

续表

编号	材 料	试 样 状 态	硬 度	矫顽力 H_c/Oe	剩磁感应 强度 B_r/Gs	最大磁导 率/ μm	最大磁导 率对应的 磁场强度 $H_{\mu m}/Oe$
67	18CrNiMnMo 钢	830℃油淬,200℃回火	41HRC	23.5	9550	249	39.0
68	18CrNiWA 钢	正火,高温回火	25.5HRC	15.0	10600	426	22.0
69	18CrNiWA 钢	880℃空冷,580℃回火	37HRC	19.8	10530	357	28.0
70	18CrNiWA 钢	880℃油淬,220℃回火	41HRC	22.5	8150	204	39.0
71	18CrNiWA 钢	830℃空冷,170℃回火	45HRC	24.0	7700	182	37.2
72	18CrNiWA 钢	930℃渗碳(1mm),810℃空冷,220℃回火	56HRC	24.3	7900	188	40.0
73	25CrNiWA 钢	860℃正火,640℃回火	27HRC	13.5	12800	517	20.0
74	25CrNiWA 钢	870℃油淬,500℃回火	29.5HRC	18.0	11550	440	23.0
75	30CrNiWA 钢	870℃加热,170℃等温水冷,210℃回火	49HRC	30.1	10600	262	37.1
76	35CrNi2MoV 钢	910℃正火,870℃油淬,570℃回火	45.5HRC	21.8	12450	377	30.5
77	18CrNiMnMo 钢	材料供应状态	163HB	3.5	10500	817	6.7
78	18CrNiMnMo 钢	830℃油淬,200℃回火	41HRC	22.2	9560	254	39.0
79	30CrMnMoTiA 钢	材料供应状态	30.5HRC	17.4	9700	337	24.0
80	30CrMnMoTiA 钢	875℃油淬,440℃回火	42HRC	19.1	12700	473	24.0
81	40Mn2 钢	正火	21HRC	10.5	11700	435	20.5
82	40Mn2 钢	850℃油淬,510℃回火	29HRC	15.0	15800	678	21.0
83	21MnNiMo 钢	原材料锻造退火状态	192HB	9.4	13200	764	14.0
84	21MnNiMo 钢	880℃油淬,650℃回火	196HB	9.6	12980	757	14.0
85	30Cr2Mo 钢	材料供应状态	31HRC	17.7	9550	302	25.0
86	30Cr2Mo 钢	正火	39.5HRC	22.0	8500	215	37.5
87	30Mn2MoV 钢	910℃正火,910℃油淬,610℃回火	38HRC	15.9	13900	538	22.0
88	35CrMnSiA 钢	材料供应状态	220HB	7.8	13100	893	11.0
89	35CrMnSiA 钢	910℃油淬,250℃回火	51HRC	30.1	10070	200	45.0
90	30SiMnMoVA 钢	正火	38.5HRC	26.2	7200	157	38.0
91	30SiMnMoVA 钢	870℃水淬,700℃回火	32HRC	14.7	14800	657	18.0
92	2Cr13 钢	正火	24HRC	15.0	7000	184	17.0
93	2Cr13 钢	1050℃油淬,550℃回火	45HRC	42.5	7400	113	67.0
94	3Cr13 钢	材料供应状态	170HB	7.0	7800	512	13.0
95	3Cr13 钢	1050℃油淬,600℃回火	29HRC	16.8	11000	426	23.5
96	65Mn 钢	材料供应状态	23.5HRC	8.8	8500	463	17.0
97	65Mn 钢	790℃油淬,500℃回火	30HRC	14.0	10850	433	18.0
98	60Si2A 钢	850℃油淬,400℃回火	53HRC	15.0	13900	684	18.0
99	60Si2MnA 钢	材料热轧退火状态	31HRC	10.3	9500	475	14.0
100	65Si2MnA 钢	860℃油淬,420℃回火	54HRC	19.1	12600	465	24.0

续表

编号	材 料	试样状态	硬 度	矫顽力 H_c/Oe	剩磁感应 强度 B_r/Gs	最大磁导 率/ μm	最大磁导 率对应的 磁场强度 $H_{\mu m}/Oe$
101	65Si2MnWA 钢	材料供应状态	25HRC	15.7	14320	680	14.7
102	60Si2MnWA 钢	860℃油淬,560℃回火	46HRC	19.8	15250	631	19.0
103	GCr9	材料供应状态	187HB	13.0	12300	579	17.0
104	GCr9	840℃油淬,160℃回火	62HRC	46.0	8600	129	60.5
105	GCr15	材料供应状态	207HB	11.2	12700	580	16.0
106	GCr15	840℃油淬,360℃回火	57HRC	18.4	12600	443	25.0
107	T7	材料供应状态	170HB	9.2	12100	800	10.5
108	T7	840℃油淬,390℃回火	47HRC	16.9	14450	567	21.0
109	T8	材料供应状态	170HB	11.7	13000	692	13.6
110	T8	790℃油淬,400℃回火	47HRC	17.1	14500	530	23.0
111	T10A	退火状态	170HB	8.8	12500	775	12.0
112	T10A	正火	28.5HRC	13.0	8650	429	15.0
113	T12A	材料供应状态	170HB	10.3	8650	429	15.0
114	T12A	780℃水淬,170℃回火	65HRC	35.3	7760	141	37.0
115	CrW5	材料供应状态	23HRC	12.0	13600	630	19.0
116	CrW5	810℃水淬,140℃回火	65.5HRC	48.8	7000	90	70.0
117	CrWMn	材料供应状态	217HB	9.6	12330	676	14.0
118	CrWMn	820℃油淬,-70~-80℃冷处理,170℃回火,120℃时效	62HRC	34.0	10350	296	46.5
119	Cr12MoV	1050℃油淬,520℃回火	57.4HRC	48.3	9100	136	67.5
120	3Cr2W8V	锻造退火,850℃炉冷	216HB	18.4	13491	499	19.0
121	3Cr2W8V	1150℃油淬,560℃回火 90min,580℃,650℃ 90min	HRC53	27.4	10600	276	38.0
122	3Cr2W8	材料供应状态	22HRC	14.6	13881	480	23.5
123	3CrW8	1060℃油淬,660℃二次回火	50HRC	27.8	11050	268	39.6
124	9CrSi	材料供应状态	217HB	8.4	11000	670	10.0
125	9CrSi	860℃油淬,180℃回火	63HRC	41.2	7050	105	59.0
126	4Cr10Si2Mo	1100℃油淬,710℃回火	35HRC	10.5	12500	582	17.5
127	5CrMnMo	锻造退火状态,850℃炉冷	23HRC	15.9	7700	287	23.0
128	5CrMnMo	830℃油淬,350℃回火	58HRC	44.5	8460	125	57.5
129	W18Cr4V	材料供应状态	21HRC	18.7	9900	375	22.5
130	W18Cr4V	加热 1275℃,560℃硝盐淬火转 280℃硝盐 560℃回火	65HRC	44.2	9700	155	68.0
131	6W6Mo5Cr4V	材料供应状态	25.5HRC	17.8	9500	385	20.5
132	6W6Mo5Cr4V	锻造退火 850℃炉冷	216HB	15.1	11200	470	19.5
133	60Mo5CrNb3W2V	1110℃油淬,560℃二次回火,每次 1h	59.7HRC	38.5	10800	197	56.0
134	50CrVA	850℃油淬,350℃一次回火,400℃二次回火		20.0	14600		

续表

编号	材 料	试 样 状 态	硬 度	矫顽力 H_c/Oe	剩磁感应 强度 B_r/Gs	最大磁导 率/ μm	最大磁导 率对应的 磁场强度 $H_{\mu m}/Oe$
135	50CrVA	850℃炉冷		9.0	6000		
136	GH34(Эн435)	1050℃油淬,680℃回火		16.0	9900		
137	GH34(Эн435)	700℃空冷		10.0	800		
138	GC-4	920℃加热,180℃硝盐槽中等温 1h,260℃回火 6h		31.0	8300		
139	GC-4	920℃正火,700℃回火 4h		9.0	7800		
140	Cr17Ni2	1030℃油淬,530℃回火		27.0	7500		
141	Cr17Ni2	680℃炉冷		18.0	7600		
142	1Cr12Ni2WMoV(Эн961)	中模锻		17.0	6900		
143	1Cr12Ni2WMoV(Эн961)	1000℃油淬,590℃回火		17.6	7551		

参考文献

[1] 中国机械工程学会. 磁粉探伤. 北京: 机械工业出版社, 1986.

[2] 兵器工业部新技术推广所. 常用钢种磁性曲线汇编. 兵器工业出版社, 1982.

[3] 兵器工业无损检测人员技术资格鉴定考核委员会. 磁粉探伤. 兵器工业出版社, 1999.

附录 4 部分材料的光谱发射率数据

序号	材 料	波长 / μm	温度/ $^{\circ}\text{C}$	发射率
1	铝砖 (Alumina brick)	SW ^①	17	0.68
2	严重风化的铝 (Aluminum, heavily weathered)	SW ^①	17	0.83~0.94
3	铝箔 (Aluminum foil)	3	—	0.09
4	明亮的铝箔 (Aluminum foil, bright)	—	—	0.04
5	粗糙的铝盘 (Aluminum disk, roughened)	3	—	0.28
6	石棉板 Asbestos slate (wallboard)	—	—	0.96
7	普通砖 (brick, common)	SW ^①	17	0.81~0.92
8	红面砖 (brick, facing, red)	SW ^①	—	0.92
9	黄面砖 (brick, facing, yellow)	SW ^①	—	0.72
10	砌砖 (Brick, masonry)	5	0	0.94
11	红砖 (brick, red)	—	0	0.90
12	防水砖 (brick, waterproof)	SW ^①	17	0.87
13	未处理的刨花板 (Chipboard, untreated)	SW ^①	—	0.90
14	干混凝土	5	36	0.95
15	粗糙的混凝土	SW ^①	17	0.92~0.97
16	抛光铜	3	—	0.03
17	抛光退火铜	10	—	0.01
18	未处理的硬纤维板	SW ^①	—	0.85
19	未处理的多孔纤维板	SW ^①	—	0.85
20	耐火砖	SW ^①	17	0.68
21	白色填料	SW ^①	—	0.88
22	胶木 Formica	LW ^②	27	0.937
23	冻土	LW ^②	—	0.93
24	部分透明的化学器皿玻璃	5	35	0.97
25	花岗石 (自然表面)	5	36	0.96
26	砂石	LW ^②	—	0.28
27	硬木 (垂直纹理)	SW ^①	17	0.82
28	硬木 (平行纹理)	SW ^①	17	0.68~0.73
29	赫斯式绿色织品 (Hessian fabric)	SW ^①	—	0.88
30	未染色的赫斯式织品 (Hessian fabric)	SW ^①	—	0.87
31	严重生锈的铁	SW ^①	17	0.91~0.96
32	自然表面的石灰石	5	36	0.96
33	砂浆	SW ^①	17	0.87
34	干砂浆	5	36	0.94

续表

序号	材 料		波长 / μm	温度/ $^{\circ}\text{C}$	发射率
35	PVC 漆		SW ^①	17	0.91~0.93
36	油		SW ^①	17	0.87
37		黑色无光泽(black flat)	SW ^①	—	0.94
38		黑色有光泽(black gloss)	SW ^①	—	0.92
39		灰色无光泽(gray flat)	SW ^①	—	0.97
40		灰色有光泽(gray gloss)	SW ^①	—	0.96
41	黑塑料		SW ^①	—	0.95
42	白塑料		SW ^①	—	0.84
43	白纸		SW ^①	17	0.68
44	卡片盒纸		5	—	0.81
45	有机玻璃		SW ^①	17	0.86
46	擦亮的管子		SW ^①	17	0.83
47	石膏(Plaster)		SW ^①	17	0.86~0.90
48	石膏板(未处理)		SW ^①	—	0.90
49	透明丙烯酸塑料		5	36	0.94
50	红塑料纸		SW ^①	—	0.94
51	白塑料纸		SW ^①	—	0.84
52	胶合板(Plywood)		SW ^①	17	0.83~0.98
53	胶合板(商用、光滑、干燥)		5	36	0.82
54	胶合板(未处理)		SW ^①	—	0.83
55	聚丙烯(Polyproplene)		SW ^①	17	0.97
56	红木(已加工 wrought)、未处理		SW ^①	—	0.83
57	红木(未加工 unwrought)、未处理		SW ^①	—	0.84
58	灰色粉刷(Rendering, Gray)		SW ^①	—	0.92
59	屋顶金属(Roofing Metal)	天蓝光滑 Azure blue, smooth	SW ^①	0	0.54
60		天蓝织构 Azure blue, textured	SW ^①	0	0.51
61		打磨铜(光滑)	SW ^①	0	0.54
62		打磨铜(织构)	SW ^①	0	0.56
63		黑青铜(织构)	SW ^①	0	0.70
64		光滑棕色复折屋顶 Mansard brown, smooth	SW ^①	0	0.58
65		光滑暗黑(Matte black, smooth)	SW ^①	0	0.73
66		光滑罗马青铜	SW ^①	0	0.69
67		光滑石板灰(Slate gray, smooth)	SW ^①	0	0.64
68		光滑石头白	SW ^①	0	0.57
69		光滑琉璃砖 Terra Cotta, smooth	SW ^①	0	0.61

续表

序号	材 料		波长 / μm	温度/ $^{\circ}\text{C}$	发射率
70	屋顶板-沥青(陶瓷覆盖的岩石颗粒) Shingles-asphalt (sm, ceramic-coated rock granules)	平均值	SW ^①	0	0.79
71		灰质黏土 Adobe	SW ^①	0	0.77
72		黑	SW ^①	0	0.83
73		亮红	SW ^①	0	0.96
74		栗棕 Chestnut Brown	SW ^①	0	0.67
75		殖民绿 Colonial Green	SW ^①	0	0.83
76		黎明雾 Dawn Mist	SW ^①	0	0.76
77		沙漠 Desert Tan	SW ^①	0	0.74
78		褐霜 Frost Blende	SW ^①	0	0.76
79		草原绿 Meadow Green	SW ^①	0	0.78
80		尼尔黑 Noire Black	SW ^①	0	0.90
81		海绿 Sea Green	SW ^①	0	0.83
82		浅灰 Shadow Gray	SW ^①	0	0.81
83		石板褐 Slate Blende	SW ^①	0	0.65
84		雪白 Snow White	SW ^①	0	0.81
85		契木蓝 Wedgewood Blue	SW ^①	0	0.75
86		木褐 Wood Blende	SW ^①	0	0.75
87	玻璃纤维-沥青(陶瓷覆盖的岩石颗粒)(Fiberglass-Asphalt smceramic-coated rock granules)	平均值	SW ^①	0	0.86
88		褐霜 Frost Blende	SW ^①	0	0.83
89		赤褐色 Mahogany	SW ^①	0	0.84
90		草原雾 Meadow Mist	SW ^①	0	0.98
91		尼尔黑 Noire Black	SW ^①	0	0.93
92		雪白 Snow White	SW ^①	0	0.74
93		木褐 Wood Blende	SW ^①	0	0.81
94	沥青-大陶瓷覆盖的颗粒 (Asphalt-large ceramic-coated granules)	平均值	SW ^①	0	0.88
95		阿斯科特灰 Ascot Gray	SW ^①	0	0.98
96		珍珠黑 Black Pearl	SW ^①	0	0.91
97		峡谷 Canyon	SW ^①	0	0.90
98		卷须褐 Cirrus Blende	SW ^①	0	0.93
99		肉桂棕 Cinnamon Brown	SW ^①	0	0.85
100		深褐 Sable Black	SW ^①	0	0.84
101		石板褐 Slate Blende	SW ^①	0	0.91
102		卷雪白 Snow Flake White	SW ^①	0	0.89
103		茶色 Tawny	SW ^①	0	0.87
104		木褐 Wood Blende	SW ^①	0	0.88
105	黑橡胶制动器		5	35	0.97

续表

序号	材 料	波长/ μm	温度/ $^{\circ}\text{C}$	发射率
106	平均值	SW ^①	0	0.34
107	古典金 Antique gold	SW ^①	0	0.29
108	西班牙绿 Spanish green	SW ^①	0	0.37
109	珍珠灰	SW ^①	0	0.26
110	帝国棕 Imperial brown	SW ^①	0	0.20
111	帝国棕(织构化)Imperial brown, textured	SW ^①	0	0.65
112	打磨蓝 Burnished green	SW ^①	0	0.45
113	丙烯酸珐琅涂层 Acrylic Enamel Coating 珍珠灰 Pearl gray	SW ^①	0	0.26
114	苏格兰红 Scotch red	SW ^①	0	0.27
115	石板蓝 Slate blue	SW ^①	0	0.29
116	白(光滑)White, smooth	SW ^①	0	0.31
117	白(织构)White, textured	SW ^①	0	0.32
118	殖民乳白 Colonial cream	SW ^①	0	0.38
119	百年蓝 Centennial blue	SW ^①	0	0.19
120	鹿皮(羊皮)Buckskin	SW ^①	0	0.26
121	金秋色(织构化)Autumn gold, textured	SW ^①	0	0.79
122	胡桃棕灰色(织构化)Butternut beige, textured	SW ^①	0	0.80
123	列形顿绿(织构化)Lexington green, textured	SW ^①	0	0.86
124	牡蛎白(织构化)Oyster white, textured	SW ^①	0	0.88
125	科克灰(织构化)Quaker gray, textured	SW ^①	0	0.89
126	阳光黄(织构化)Sunshine yellow, textured	SW ^①	0	0.75
127	白(光滑)White, smooth	SW ^①	0	0.93
128	平均值	SW ^①	0	0.84
129	绝缘泡沫聚苯乙烯(Styrofoam)	5	37	0.60
130	电绝缘黑胶带	5	35	0.97
131	浅灰墙纸(浅图案)Wallpaper(Slight pattern)lt. gray	SW ^①	—	0.85
132	红墙纸(浅图案)	SW ^①	—	0.90
133	石棉地砖	5	35	0.94
134	地砖(抛光)	SW ^①	17	0.94

① SW=2~5.6 μm ; ② LW=6.5~20 μm ;

参考文献

- [1] XAVIER P. V. MALDAGUE. THEORY AND PRACTICE OF INFRARED TECHNOLOGY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, New York: John Wiley & Sons, Inc. 2001.
- [2] Herbert Kaplan (Honeyhill Technical Company). Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment (TUTORIAL TEXTS IN OPTICAL ENGINEERING), SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington, USA, 1993.

附录 5 部分材料的热物性和电阻率数据

附表 1 常用钢铁材料的热物性和电阻率数据

序号	材 料 牌 号	密度 ρ /kg·m ⁻³	比热容 C_p /J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹								导热系数 k /W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹							热扩散 系数 α /(×10 ⁻⁶ m ² ·s ⁻¹)	电阻率 ρ /Ω·mm ² ·m ⁻¹
			20℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃	20℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃		
1	08	7830	—	—	—	657(@900℃)		670(@1000℃)		65.31	60.29		54.85		41.03	36.43		0.110	
2	10	7850	461	523	—	607				58.62	54.43	50.24		43.96				0.110	
3	15	7850	461	523	—	—		—		58.62	54.43	50.24						0.115	
4	20	7850	469	523	565	—		—		51.08	50.24	48.15						0.120	
5	25	7850	469	481	536		569		51.08		48.99		42.71					0.122	
6	30	7850	469	481	536		569		—	41.87			37.68	29.31(@900℃)	29.31			0.126	
7	35	7850	481	523	607				50.24	48.57	46.06							0.128	
8	40	7850						620(@900℃)		51.92	50.66	—	45.64		38.10		30.15	0.130	
9	45	7850	461	544	586	—		—		52.34	52.24	46.06		41.87	—	—	31.82	0.122	
10	50	7850	—	481	—	536	—		569	—	—		—	—	—	—	—	0.135	
11	55	7850	—	481	—	536	—		569	—	66.99	—	—	36.43	31.40	—	—	0.125	
12	60	7850	—	490	532	—		—		—	50.24	—	41.87	—	—	33.49	29.31	0.127	
13	65	7850	—	481	486	523		574		—	67.41	52.34	—	—	30.56	—	—	—	
14	70	7850	—	481	486	528		574		—	68.66	—	43.54	—	30.15	—	—	0.132	
15	15Mn	7820	469	—	—	—		—		53.59	51.08		44.38	39.78	—	—	34.75	—	
16	20Mn	7800	469	—	—	—		—		53.59	51.08	—	43.96	—	34.75	—	—	—	
17	30Mn	7810	461	—	—	544	599	—		—	75.36	—	52.34	—	37.97	—	—	0.230	
18	40Mn	7820	461	—	481	490		574		—	59.45	—	—	46.89	23.87	—	—	0.230	
19	50Mn	7820	—	—	—	561	641		703	—	—	—	37.68	35.59	—	34.33	—	—	
20	20Mn2	7850	—	—	—	586(@900℃)		620(@1100℃)		—	46.06	—	42.29	—	37.26	—	30.98	—	
21	50Mn2	7850	461	—	—	—		—		—	40.61	—	37.68	—	35.17	—	—	—	
22	35SiMn	7850	461	—	—	—		—		—	—	45.22	42.71	41.03	—	36.43	—	—	

续表

序号	材 料 牌 号	密度 ρ /kg·m ⁻³	比热容 C_p /J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹								导热系数 k /W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹								热扩散 系数 α /(×10 ⁻⁶ m ² ·s ⁻¹)	电阻率 ρ /Ω·mm ² ·m ⁻¹
			20℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃	20℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃		
23	15Cr	7830	461	—	523	—	—	—	—	—	43.96	41.87	39.78	—	—	—	—	0.160		
24	35Cr	7850	461	—	—	—	—	—	—	—	43.12	—	—	—	—	—	—	—		
25	40Cr	7850	461	—	—	—	—	—	—	—	41.87	40.19	—	33.49	31.82	—	—	0.19		
26	45Cr	7820	461	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.19		
27	38CrSi	7850	461	—	—	—	—	—	—	—	—	—	36.84	35.59	34.75	33.49	—	—		
28	15CrMo	7850	486	—	—	—	—	—	—	—	53.59	51.08	—	44.38	—	34.75	—	—		
29	20CrMo	7850	461	—	—	—	—	—	—	—	43.96	41.87	39.78	—	—	—	—	0.16		
30	35CrMo	7820	461	—	—	—	—	—	—	—	—	40.61	—	38.52	37.26	—	—	0.18		
31	42CrMo	7850	461	—	—	—	—	—	—	—	—	41.87	—	—	—	—	—	0.19		
32	20Cr3MoWVA	7850	628	—	—	—	—	—	—	—	38.52	35.59	—	31.40	—	29.73	28.89	0.34		
33	50CrVA	7850	461	—	—	—	—	—	—	—	46.06	—	—	—	—	—	—	0.10		
34	15CrMn	7850	461	—	—	—	—	—	—	—	41.87	39.78	37.68	—	—	—	—	0.16		
35	20CrMn	7850	461	—	—	—	—	—	—	—	41.87	39.78	37.68	—	—	—	—	0.16		
36	30CrMnSi	7750	473	—	—	582	—	699	—	841	27.63	29.31	—	30.56	—	29.52	27.21	0.21		
37	30CrMnSi	7750	473	—	—	582	—	699	—	841	27.63	29.31	—	30.56	—	29.52	27.21	0.21		
38	40CrNi	7820	—	—	—	—	—	—	—	—	46.06	44.80	—	41.03	39.36	—	—	—		
39	12CrNi2	7880	452(@58℃)	—	—	—	—	691(@490℃)	720(@920℃)	21.77@23.87@135℃	30.15@230℃	30.98@480℃	25.54@760℃	—	—	—	—	—		
40	12CrNi3	7880	—	—	657(@380℃)	645(@425℃)	—	—	—	30.98(@60℃)	—	—	25.54	21.35(@750℃)	—	—	—	—		
41	12Cr2Ni4	7840	—	—	657(@380℃)	645@425℃	—	—	—	30.98@60℃	—	—	25.54	20.93@750℃	—	—	—	—		
42	20CrNi3	7880	—	—	657(@380℃)	645@425℃	—	—	—	30.98(@60℃)	—	—	25.54	21.35(@750℃)	—	—	—	—		
43	30CrNi3	7830	465@34℃	544@204℃	—	641@512℃	—	—	—	—	37.68	36.01	34.75	32.66	—	—	—	—		
44	40CrNiMoA	7850	419	—	—	—	—	—	—	46.06	—	41.87	37.68	—	—	—	—	—		
45	18Cr2Ni4WA	7940	486@70℃	515@230℃	775@530℃	724@900℃	23.86@70℃	25.12@230℃	28.05@530℃	24.28@900℃	—	—	—	—	—	—	—	—		

续表

序号	材 料 牌 号	密度 ρ /kg· m ⁻³	比热容 C_p /J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹								导热系数 k /W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹								热扩散 系数 α ($\times 10^{-6}$ m ² ·s ⁻¹)	电阻率 ρ /Ω· mm ² · m ⁻¹
			20℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃	20℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃		
46	25Cr2Ni4WA	7900	465@70℃	—	—	—	—	754@535℃	825@900℃	700℃	27.21@40℃	25.96	—	—	25.54	23.03@950℃	—	—		
47	W18Cr4V	8700	472@50℃	494	—	—	188@900℃	758	—	27.21	25.95	—	—	—	25.95	—	25.12	0.42		
48	00Cr17Ni14Mo2	7980	502	—	—	—	—	—	—	—	15.1	—	18.4	—	20.9	—	—	0.71		
49	00Cr18Ni14Mo2Cu2	8030	502	—	—	—	—	—	—	—	16.2	—	—	—	21.4	—	—	—		
50	00Cr19Ni11	7930	502	—	—	—	—	—	—	—	14.6	16.3	18.4	—	20.9	—	—	0.73		
51	00Cr19Ni13Mo3	7980	502	—	—	—	—	—	—	—	15.1	—	18.4	—	20.9	—	—	0.65		
52	0Cr17Ni12Mo2	7980	502	—	—	—	—	—	—	—	19.7	20.5	21.4	23.0	24.3	25.1	—	0.75		
53	0Cr18Ni12Mo2Ti	7900	502	—	—	—	—	—	—	—	19.7	20.5	21.4	23.0	24.3	25.1	—	0.75		
54	0Cr19Ni9	7930	502	—	—	—	—	—	—	—	14.6	16.3	—	—	21.4	—	—	0.73		
55	0Cr19Ni13Mo3	8030	461	—	—	—	—	—	—	—	16.3	—	—	—	21.4	—	—	0.74		
56	0Cr23Ni13	8030	502	—	—	—	—	—	—	—	15.5	15.5	—	—	18.8	—	—	0.78		
57	0Cr25Ni20	8030	502	—	—	—	—	—	—	—	12.1	14.2	—	—	18.8	—	—	0.88		
58	1Cr17Mn6Ni5N	7740	490	—	—	—	—	—	—	—	16.3	—	—	—	—	—	—	0.69		
59	1Cr18Mn8Ni5N	7700	490	—	—	—	—	—	—	—	12.6	16.3	—	—	—	—	—	0.65		
60	1Cr18Ni9	7930	502	—	—	—	—	—	—	—	12.1	16.3	—	—	21.4	—	—	0.73		
61	Y1Cr18Ni9	7930	502	—	—	—	—	—	—	—	12.1	16.3	—	—	21.4	—	—	0.73		
62	Y1Cr18Ni9Se	7930	502	—	—	—	—	—	—	—	—	16.3	—	—	21.4	—	—	0.73		
63	1Cr19Ni12	7930	502	—	—	—	—	—	—	—	16.3	16.3	—	—	21.4	—	—	0.72		
64	0Cr18Ni11Ti	8030	461	—	—	—	—	—	—	—	15.9	15.9	—	—	22.2	—	—	0.72		
65	0Cr18Ni11Nb	7980	502	—	—	—	—	—	—	—	15.9	17.6	19.3	20.5	22.2	23.0	—	0.75		
66	0Cr26Ni5Mo2	7800	465@40℃	—	—	—	—	—	—	—	—	20.9	—	—	25.1	—	—	—		
67	0Cr13Al	7750	461	—	—	—	—	—	—	—	26.8	27.8	—	—	—	—	—	—		
68	1Cr12	7750	461	—	—	—	—	—	—	—	24.7	24.9	—	—	—	—	—	0.57		

续表

序号	材料牌号	密度 ρ /kg·m ⁻³	比热容 C_p /J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹								导热系数 k /W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹							热扩散系数 α /(×10 ⁻⁶ m ² ·s ⁻¹)	电阻率 ρ /Ω·mm ² ·m ⁻¹
			20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	
69	1Cr13	7750	461	—	—	—	—	—	—	—	24.7	25.1	26.0	26.8	28.1	28.9	—	—	0.55
70	Y1Cr13	7750	461	—	—	—	—	—	—	—	24.7	25.1	26.0	26.8	28.1	28.9	—	—	0.55
71	1Cr17	7720	461	—	—	—	—	—	—	—	25.1	26.1	—	—	—	—	—	—	0.60
72	Y1Cr17	7720	461	—	—	—	—	—	—	—	—	26.1	—	—	—	26.3	—	—	0.60
73	1Cr17Mo	7750	461	—	—	—	—	—	—	—	25.6	—	—	—	—	—	—	—	0.60
74	1Cr17Ni2	7750	461	—	—	—	—	—	—	—	20.9	21.8	22.6	23.4	24.3	25.1	26.0	—	0.70
75	1Cr18Ni9Ti	7930	502	—	—	—	—	—	—	—	—	16.3	17.6	18.8	21.4	22.2	24.7	26.8	0.73
76	2Cr13	7750	461	—	—	—	—	—	—	—	—	23.0	23.5	24.7	25.5	26.4	—	—	0.55
77	3Cr13	7760	473	—	—	—	—	—	—	—	—	25.1	25.5	25.5	25.5	28.9	—	—	0.55
78	Y3Cr13	7750	473	—	—	—	—	—	—	—	—	25.1	25.5	25.5	25.5	—	—	—	0.55
79	4Cr9Si2	7630	473	—	—	490	—	984@ 900°C	913	858@ 800°C	—	—	—	—	—	—	—	—	①
80	4Cr14Ni14W2Mo	8000	②	—	—	—	—	—	—	—	—	15.9	17.6	19.3	20.5	22.2	23.9	25.5, 27.6@ 800°C, 30.1@ 900°C	—
81	5Cr21Mn9Ni4N	7720	500	—	—	—	—	—	—	—	14.2	—	—	—	—	—	24.7@ 800°C	—	0.079
82	Y5Cr21Mn9Ni4N	7730	500	—	—	—	—	—	—	—	14.2	—	—	—	—	—	24.7@ 800°C	—	0.079
83	2Cr23Ni13	7900	500	—	—	—	—	—	—	—	18.0	—	—	18.8	—	21.8	—	—	0.78
84	2Cr25Ni20	7720	500	—	—	—	—	—	—	—	14.7	—	—	—	—	18.8	—	—	0.95
85	2Cr25N	7500	460	—	—	—	—	—	—	—	18.0	20.9	—	—	—	—	—	—	0.64
86	0Cr15Ni25Ti2MoAlVB	7950	—	—	—	—	—	—	—	—	12.1	14.9	—	—	17.4	23.9@ 900°C	20.1	22.6@ 800°C	—
87	0Cr30Ni70	8110	460	—	—	—	—	—	—	—	12.56	—	—	—	—	—	—	—	1.18

①100°C: 0.88; 200°C: 0.92; 500°C: 1.00; 600°C: 1.05; 800°C: 1.18。②20~300°C: 507; 20~400°C: 0.511; 20~500°C: 0.523。

附表 2 常用铝及铝合金的热物性和电阻率数据

序号	材料牌号	材料状态	密度 ρ /kg·m ⁻³	比热容 C_p /J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹				导热系数 k /W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹						热扩散系数 α /(×10 ⁻⁶ m ² ·s ⁻¹)	电阻率 ρ /Ω·mm ² ·m ⁻¹ (20°C)
				20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	25°C	100°C	200°C	300°C	400°C		
1	纯铝 ^①		2707	896			215	202	204@50°C	206	215	228	249	84.18	
2	L4 L6	退火 冷作硬化	2710		946	962	999	994	226.1 217.7	—	—	—	—		0.0292(0°C)
3	LF2	退火、冷作硬化 半冷作硬化	2680		963	1005	1047	1089	154.9	159.1	163.3	163.3	167.5		0.0476
4	LF3	退火、半冷作硬化	2670		879	921	1005	1047	146.5	150.7	154.9	159.1	159.1		0.0496
5	LF5	退火、半冷作硬化	2650	—	921	—	—	—	121.4	125.6	129.8	138.2	146.5		0.0640
6	LF6	退火	2640	—	921	1005	1047	1089	117.2	121.4	125.6	129.8	138.2		0.0710
7	LF10	退火	2650	—	921	963	1005	1047	117.2	125.6	134.0	142.3	146.5		—
8	LF12		2610	—	—	—	—	—	—	119.3	142.3	134.0	142.3		0.0770
9	LF21	退火、 半冷作硬化 冷作硬化	2740		1089	1172	1298		180.0 163.3 154.9	188.4 159.1 154.9	180.0 — —	184.2 — —	— — 188.4		— 0.034
10	LY1	退火 淬火和自然时效	2760	—	921	1005	1089	1172	163.3 154.9	171.7 —	180.0 —	184.2 —	192.6 —		0.039
11	LY2	淬火和人工时效	2750	—	837	921	921	963	134.0	142.4	150.7	159.1	171.7		0.055
12	LY6	淬火和自然时效	2760	—	879	963	1047	1089	—	138.2	150.7	171.7			0.061
13	LY8、LY11	退火 淬火和自然时效	2800	—	921	963	1005	1047	171.7 117.2	— 129.8	— 150.7	— 171.7			0.054
14	LY10	淬火和自然时效	2800		963	1047	1130	1172	146.5	154.9	163.3	171.7	184.2		0.0504
15	LY12	退火 淬火和自然时效	2780		921	1047	1130	1172	188.4 117.2	— —	— —	— —	— —		0.044 0.073
16	LY16	淬火和人工时效	2840		—	—	—	—	138.2	142.4	146.5	154.9	159.1		0.0610
17	LY17		2840		795	879	963	1005	129.8	138.2	150.7	167.5			0.0540
18	LD2	退火 淬火和人工时效	2700		795	879	963	1089	175.8 154.9	180.0 —	184.2 —	188.4 —	— —		0.048 0.055
19	LD5	淬火和人工时效	2750		837	879	963	1005	175.8	180.0	184.2	184.2	188.4		0.041
20	LD6	淬火和人工时效	2750		837	921	1005	1047	163.3	167.5	171.7	175.8	180.0		0.043
21	LD7	淬火和人工时效	2800		795	837	921	963	142.4	146.5	150.7	159.1	163.3		0.055

续表

序号	材料牌号	材料状态	密度 ρ /kg·m ⁻³	比热容 C_p /J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹					导热系数 k /W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹					热扩散系数 α /($\times 10^{-6}$ m ² ·s ⁻¹)	电阻率 ρ /Ω·mm ² ·m ⁻¹ (20°C)
				20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	25°C	100°C	200°C	300°C	400°C		
22	LD8	退火 淬火和人工时效	2770		837	921	963	1047	180.0 146.5	184.2 150.7	192.6 159.1	201.0 167.5	— 171.7		0.050
23	LD9	退火 淬火和人工时效	2800		754	837	963	1005	188.4 154.9	— 159.1	— 163.3	— 171.7	— 180.8		0.047
24	LD10	退火 淬火和人工时效	2800		837	879	963	1047	196.8 159.1	— 167.5	— 175.8	— 180.0	— 180.0		—
25	LC3	淬火和人工时效	2850		712	21	1047	—	154.9	159.1	163.3	167.5	—		0.044
26	LC4	退火 淬火和人工时效	2850		—	—	—	—	154.9 125.6	159.1 —	163.3 —	163.3 —	159.1 —		— 0.042 (淬火和 自然时效)
27	LT1	冷作硬化	2660						142.4						
28	ZL101		2660		879	921	1005	1047@ 350°C	150.7	154.9	163.3	167.5			0.0457
29	ZL102		2650		837	879	921	1005	154.9	167.5	167.5	167.5			0.0548
30	ZL104		2650		754	795	837	921	146.5	154.9	159.1	159.1	154.9		0.0468
31	ZL105		2680		837	963	1047	1130	159.1	163.3	167.5	175.8	—		0.0462
32	ZL106		2730		963	—	—	—	100.5	—	—	—	—		—
33	ZL108		2680		—	—	—	—	117.2	—	—	—	—		—
34	ZL109		2680		963	—	—	—	117.2	—	—	—	—		0.0594
35	ZL201	淬火	2780		837	963	1047	1130	104.7	117.2	134.0	142.4	—		0.0595
36	ZL201	淬火和时效	2780		837	963	1047	1130	113.0	121.4	134.0	146.5	159.1		0.0595
37	ZL202		2910		963				134.0						0.0522
38	ZL203		2800		837	921	1005	1089	154.9	163.3	171.7	175.8	—		0.0433
39	ZL301		2550		1047	1047	1089	1130	92.1	96.3	100.5	108.9	113.0		0.0912
40	ZL303		2630		963	1005	1047	1130	125.6	129.8	134.0	138.2	138.2		0.0643
41	ZL401		2950		879	—	—	—	—	—	—	—	—		
42	ZL402		2810		963	—	—	—	138.2	—	—	—	—		

① 取自参考文献 [1], 215@-100°C、202@0°C。

附表3 常用镁合金的热物性和电阻率数据

序号	材料 牌号	密度 $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (@20℃)	比热容 $C_p/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$					导热系数 $k/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$					热扩散 系数 α $/(\times 10^{-6}$ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	电阻 率 ρ $/\Omega \cdot \text{mm}^2$ $\cdot \text{m}^{-1}$ (20℃)
			20 ~100℃	100℃	200℃	300℃	400℃	30℃	100℃	200℃	300℃	400℃		
1	纯镁 ^①	1746	1.013					171(20℃)	168	163	157		97.08	
	MB1	1760	1.05	1.01	1.05	1.13	1.17	125.60	125.60	138.68	133.98			0.0513
2	MB2	1780	1.05	1.13	1.17	1.21	1.26	96.3@25℃	100.48	104.67	108.86			0.093
3	MB3	1790	1.05	1.09	1.13	1.21	1.26	96.3	—	—	—	—		0.120
4	MB5	1800	1.05	1.13	1.21	1.26	1.30	69.08	73.27	79.55	79.55			0.153
5	MB6	1840	1.05					—	—	—	67.41			0.196
6	MB7	1820	1.05	1.13	1.21	1.26	1.30	58.62	—	—	75.36			0.162
7	MB8	1780	1.05	—	—	—	—	133.98	133.98	133.98	—			0.0612
8	MB15	1800	1.03	—	—	—	—	117.23	121.42	125.60	125.60			0.0565
9	ZM1	1820	0.963	—	—	—	—	113.04@50℃	117.23	121.42				—
10	ZM2	1850	0.963	—	—	—	—	117.23@50℃	121.42	125.60	125.60			—
11	ZM3	1800	1.047	—	—	—	—	—						—
12	ZM5	1810	1.047	—	—	—	—	77.46						—

① 数据取自参考文献 [1], 178@~100℃, 171@0℃。

附表4 常用钛合金的热物性和电阻率数据

序号	材料 牌号	密度 ρ $/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (20℃)	比热容 $C_p/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$							导热系数 $k/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$							热扩散 系数 α $/(\times 10^{-6}$ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ (20℃) ^①	电阻率 ρ $/\Omega \cdot \text{mm}^2$ $\cdot \text{m}^{-1}$ (20℃)
			20℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	20℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃		
1	TA1~TA3	4500	544	544	628	670	712	754	837	16.33	16.33	16.33	16.75	17.17	18.00	—	6.671	0.47
2	TA4	—	—	—	—	—	—	—	—	10.47	12.14	—	—	—	—	—	—	—
3	TA5	4430	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.26
4	TA6	4400	—	586	670	712	796	879	921	7.54	8.79	10.05	11.72	13.40	15.07	16.75	—	1.08
5	TA7	4460	540	540	569	590	620	653	691	8.79	9.63	10.89	12.14	13.40	14.65	15.91	3.650	1.38
6	TA8	4560	—	502	586	628	628	628	670	7.54	8.37	9.63	10.89	12.14	—	—	—	1.69
7	TB2	4810	540	540	553	569	636	599	862	—	12.14	12.56	12.98	16.33	17.58	18.84	—	1.55
8	TC1	4550	—	574	—	641	699	729@450℃	—	9.63	10.47	11.72	12.14	13.40	14.65	16.33	—	—
9	TC2	4550	—	—	565	628	670	754	—	9.63	—	11.30	12.14	13.40	14.65	—	—	—
10	TC3	4430	—	—	586	628	670	712	—	8.37	8.79	10.05	10.89	12.56	14.24	15.49	—	1.42
11	TC4	4450	—	678	691	703	741	754	879	5.44	6.70	8.79	10.47	12.56	14.24	15.91	—	1.60
12	TC6	4500	—	502	586	670	712	796	—	7.95	8.79	10.05	11.30	12.59	—	—	—	1.36
13	TC7	4400	—	—	—	—	—	—	—	7.12	—	—	—	—	—	—	—	1.60
14	TC9	4520	—	544	—	—	—	—	—	7.54	12.98	11.30	12.14	12.98	13.40@490℃	14.65@575℃	—	1.62
15	TC10	4530	—	540	548	565	557	528	—	—	—	—	10.47	12.14	13.40	—	—	1.87

① 根据 $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ 计算得到。

附表 5 其他常用金属材料的热物性和电阻率数据

序号	材 料	20℃时的特性				不同温度下的导热系数 $k/W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$										
		密度 ρ /kg· m ⁻³	比热容 C_p/kJ · kg ⁻¹ · °C ⁻¹	导热系 数 k/W · m ⁻¹ · °C ⁻¹	热扩散 系数 α /(×10 ⁻⁶ m ² ·s ⁻¹)	温度/℃										
						-100	0	100	200	300	400	600	800	1000	1200	
1	最纯的银	10524	0.2340	419	170.04	419	417	415	412							
2	纯银(99.9%)	10525	0.2340	407	165.63	419	410	415	374	362	360					
3	纯铁	7897	0.452	73	20.34	87	73	67	62	55	48	40	36	35	36	
4	纯锡	7304	0.2265	64	38.84	74	65.9	59	57							
5	纯锌	7144	0.3843	112.2	41.06	114	112	109	106	100	93					
6	铅	11373	0.13	35	23.43	36.9	35.1	33.4	31.5	29.8						
7	纯镍	8906	0.4459	90	22.66	104	93	83	73	64	59					
8	钼	10220	0.251	123	47.90	138	125	118	114	111	109	106	102	99	92	
9	钨	19350	0.1344	163	62.71		166	151	142	133	126	112	76			
10	镁-铝合金(6%~8% Al,~2%Zn)	1810	1.00	66	36.05		52	62	74	83						
11	杜拉铝(94~96% Al,3~5%,痕量Mg)	2787	0.883	164	66.76	126	159	182	194							
12	Al-Si(86.5%Al,1% Cu)	2659	0.867	137	59.33	119	137	144	152	161						
13	Al-Si(78%~80% Al,20%~22%Si)	2627	0.854	161	71.72	144	157	168	175	178						
14	Al-Mg-Si(97%Al, 1%Mg,1%Si,1%Mn)	2707	0.892	177	73.11		175	189	204							
15	镍-铬合金(90%Ni, 10%Cr)	8666	0.444	17	4.44		17.1	18.9	20.9	22.8	24.6					
16	镍-铬合金(80%Ni, 20%Cr)	8314	0.444	12.6	3.43		12.3	13.8	15.6	17.1	18.0	22.5				
17	纯铜	8954	0.381	386	112.34	407	386	379	374	369	363	353				
18	铝青铜(95%Cu,5% Al)	8666	0.410	83	23.30											
19	青铜(75%Cu,25% Sn)	8666	0.343	26	8.59											
20	红黄铜(85%Cu,9% Sn,6%Zn)	8714	0.385	61	18.04		59	71								
21	黄铜(70%Cu,30% Zn)	8522	0.385	111	34.12	88	128	144	147	147						
30	德银(62%Cu,15% Ni,22%Zn)	8618	0.394	24.9	7.33	19.2		31	40	45	48					
31	康铜(60%Cu,40% Ni)	8922	0.410	22.7	6.12	21		22.2	26							

附表6 部分非金属材料的热物性数据

序号	材 料	温度/℃	密度 $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	热导率 $k/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	比热容 $C_p/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	热扩散系数 $\alpha/(\times 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
1	沥青(Asphalt)	20~50		0.74~0.076		
2	普通建筑砖	20	1600	0.69	0.84	0.52
3	铬砖	200	3000	2.32	0.84	0.92
4	铬砖	550	3000	2.47	0.84	0.98
5	铬砖	900	3000	1.99	0.84	0.79
6	耐火砖(2426F 烧)	500	2000	1.04	0.96	0.54
7	耐火砖(2642F 烧)	500	2300	1.28	0.96	0.58
8		800		1.37		
9		1100		1.40		
10	窗玻璃	20	2700	0.78	0.84	0.34
11	石膏墙粉	20	1440	0.48	0.84	0.4
12	花岗岩(granite)	100~300	2640	1.73~3.98	0.82	0.8~1.8
13	石灰石 Limestone		2500	1.26~1.33	0.90	0.56~0.59
14	大理石 Marble		2500~2700	2.07~2.94	0.80	1~1.36
15	砂岩 Sandstone	40	2160~2300	1.83	0.71	1.12~1.19
16	橡木(横断面)	30	540	0.166	2.4	0.128
17	黄松木(横断面)	23	640	0.147	2.8	0.082
18	冷杉木(横断面)	23	420	0.11	2.72	0.096
19	石棉(松散包装)	0	470~570	0.154	0.816	0.33~0.4
20	软木(cork)regranulated	32	45~120	0.045	1.88	0.2~0.53
21	玻璃纤维 1.5lb/ft ²	23	24	0.038	0.7	2.26

参考文献

- [1] XAVIER P. V. MALD GUE. Theory and practice of infrared Technology for Nondestructive Testing. New York: JOHN WILEY & SON, INC. 2001.
- [2] Herbert Kaplan. Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment. SPIE_ The International Society for Optical Engineering, New York; 1993; 133~137.
- [3] 中国机械工程学会热处理专业分会《热处理手册》编委会编. 热处理手册(第3版)第4卷热处理质量控制和检验. 机械工业出版社, 2001. 2: 464~481.
- [4] KAYE G W C, LABY T H. Tables of Physics and Chemical Constants (16th Edition). Long Group Limited, 1995, 世界图书出版公司, 1996. 6.
- [5] David R. Lide (Editor-in-Chief). CRC Handbook of Chemistry and Physics (84th Edition). New York: CRC Press LLC, 2003.
- [6] Massoud Kaviany. Principles of Heat Transfer, New York: John Wiley & Sons, Inc. 2002.
- [7] Lindon C. Thomas. Heat Transfer, PRENTICE HALL, Inc., 1992.
- [8] [美] 罗森诺等编. 齐欣译, 周晓青校. 传热学基础手册(上). 北京: 科学出版社, 1992.
- [9] [美] 罗森诺等编. 齐欣译, 周晓青校. 传热学基础手册(下). 北京: 科学出版社, 1992.
- [10] [美] M. N. 奥齐西克著, 俞昌铭主译. 热传导(M. N. Ozisik. Heat Conduction). 北京: 高等教育出版

社, 1983.

- [11] [美] 皮茨 D, 西索姆 L 著, 葛新石等译. 传热学. 北京: 科学出版社, 麦格劳-希尔教育出版集团, 2002.
- [12] [美] 美国金属学会主编. 金属手册 (案头卷) - 加工工艺与通用资料. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [13] Irwin, F. I., Jr.. Thermophysical Properties in Handbook of Heat Transfer, Third Edition, Rohsenow, W. M., et al., New York: McGraw-Hill, 1998.
- [14] 陈则韶, 葛新石, 顾毓沁. 量热技术和热物性测定. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990.
- [15] Rosenow W M et al. (Editors). Handbook of Heat Transfer (Third Edition). New York: McGraw-Hill, 1998.
- [16] 张学学, 李桂馥. 热工基础. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [17] 张正荣编. 传热学. 北京: 高等教育出版社, 1982.
- [18] 杨世铭编. 传热学 (第二版). 北京: 高等教育出版社, 1987.
- [19] [美] 皮茨 D, 西索姆 L 著. 葛新石译. 传热学. 北京: 科学出版社, 麦格劳-希尔教育出版集团, 2002.

附录6 无损检测的信息资源

一、国内外部分无损检测专业期刊

1. 《无损检测》，中国无损检测学会会刊
2. 《无损探伤》，辽宁省无损检测学会会刊
3. NDT & E International
4. Insight-Non-Destructive Testing& Condition Monitoring (英国无损检测学会会刊)
5. Material Evaluation (美国无损检测学会会刊)
6. Journal of Testing and Evaluation (美国材料与试验学会会刊)
7. Non-destructive testing-Australia (澳大利亚无损检测学会会刊)
8. 非破坏检查 (日本无损检测学会会刊)

二、国内外部分无损检测专业网址

1. 中国无损检测学会网址: <http://www.chsndt.com>
2. 中国无损检测资讯网址: <http://www.ndtinfo.net>
3. 中国无损检测标准网址 <http://www.chinandt.org>
4. 材料与测试网 (中国): <http://www.mat-test.com.cn>
5. 中国特种检验网: <http://www.tejian.org>
6. 国防科技工业无损检测信息网<http://www.dindt.com.cn>
7. 国际无损检测委员会网址 (The International Committee for Non Destructive Testing-ICNDT): <http://www.icndt.org>
8. 国际标准化组织 (International Standard Organization-ISO) 网址: <http://www.iso.org>
9. 美国无损检测学会 (The American Society for Nondestructive Testing): <http://www.asnt.org>
10. 美国焊接学会 American Welding Society <http://www.aws.org>
11. 美国材料与试验学会 (ASTM) <http://www.astm.org>
12. 美国机械工程师学会 (ASME) 网址: <http://www.asme.org>
13. 美国材料研究学会 (MRS: Material Research Society) 网址: <http://www.mrs.org>
14. 美国无损检测在线网址: <http://www.ndt.org>
15. 英国无损检测学会 (RCNDE) 网址: <http://www.bindt.org>
16. 英国无损检测研究中心 (BINDT) 网址: <http://www.bindt.org>
17. 俄罗斯无损检测与技术诊断学会 <http://www.rsnttd.ru>
18. 加拿大无损检测学会 (The Canadian Institute for NDE) 网址: <http://www.csndt.org>
19. 加拿大无损评价协会<http://www.cinde.ca>
20. 德国无损检测学会 (DGZFP: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung

E. V.) 网址: <http://www.dgzfp.de>

21. 法国无损检测学会网址: <http://www.cofrend.com>

22. 欧洲无损检测联盟 (EFNDT: European Federation for Non _ Destructive Testing)

网址: <http://www.efndt.org>

23. 意大利无损检测学会网址: <http://www.aipnd.it>

24. 西班牙无损检测学会网址: <http://www.aend.org>

25. 新西兰无损检测学会 (NDTA: New Zealand Non Destructive Testing Association)

网址: <http://www.winzurf.co.nz>

26. 日本无损检测学会: <http://www.soc.nii.ac.jp>

27. 韩国非破坏检查学会: <http://www.ksnt.or.kr>

Images have been losslessly embedded. Information about the original file can be found in PDF attachments. Some stats (more in the PDF attachments):

```
{
  "filename": "546w5Luj5peg5o2f5qOA5rWL5LiO6K+E5Lu3XzEyMTQyOTgwLnppcA==",
  "filename_decoded": "\u73b0\u4ee3\u65e0\u635f\u68c0\u6d4b\u4e0e\u8bc4\u4ef7_12142980.zip",
  "filesize": 103659062,
  "md5": "b41961f46834a2b9f84f48408f8d3f68",
  "header_md5": "9eb30088f0f56f58de56297c4bc3accc",
  "sha1": "d70ba6c46d6d31d6556ecc6dbce0d8023059e5d7",
  "sha256": "aa4d848e282fa631146c2c51d717d77035e9b1ab93a97e742c3fb71934a72161",
  "crc32": 3362581070,
  "zip_password": "",
  "uncompressed_size": 103535020,
  "pdg_dir_name": "\u2567\u2553\u2524\u00b7\u256c\u2590\u2566\u2261\u255d\u221e\u2593\u0393\u2559\u03b4\u255e\u2514\u255d\u2588_12142980",
  "pdg_main_pages_found": 304,
  "pdg_main_pages_max": 304,
  "total_pages": 318,
  "total_pixels": 1990652736,
  "pdf_generation_missing_pages": false
}
```