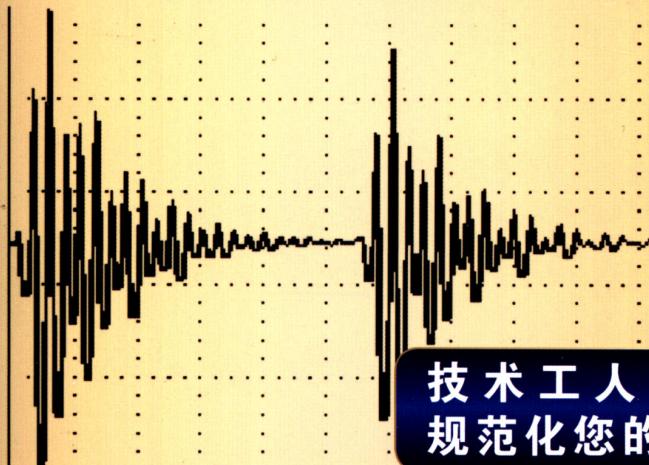


员工岗位手册系列

WUSUN JIANCEYUAN  
GANGWEI SHOUCE

# 无损检测员 岗位手册



技术工人岗位必备  
规范化您的岗位操作

北京京城机电控股有限责任公司工会 编  
赵莹 ◎ 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

员工岗位手册系列

# 无损检测员

岗位手册

北京京城机电控股有限责任公司工会 编

主 编 赵 莹

副主编 李兵赛

参 编 袁世丽 何顺开 张纪周



机 械 工 业 出 版 社

本手册是无损检测人员岗位必备的工具书，依据国家最新的职业技能标准编写，涵盖了无损检测人员岗位必需的基础知识和技能，以及掌握这些知识和技能必备的基础数据资料，同时汇集了大量的生产实践经验。本手册内容丰富、取材先进，具有简明、实用且通俗易懂的特点。

本手册主要由职业道德及岗位规范、承压类特种设备无损检测相关知识、射线检测、超声检测、磁粉检测、渗透检测和涡流检测七篇组成。

本手册非常适合无损检测人员的学习和培训使用，对现场的有关工程技术人员了解无损检测人员岗位知识、指导无损检测人员的工作也有着重要的参考价值。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

无损检测员岗位手册/赵莹主编；北京京城机电控股有限责任公司工会编. —北京：机械工业出版社，2015.5

(员工岗位手册系列)

ISBN 978-7-111-50899-1

I. ①无… II. ①赵… ②北… III. ①无损检验—技术手册  
IV. ①TG115. 28-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 164971 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：何月秋 责任编辑：王彦青 庞 炜

版式设计：霍永明 责任校对：张晓蓉

封面设计：马精明 责任印制：李 洋

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2015 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 26 印张 · 536 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-50899-1

定价：58.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务 网络服务

服务咨询热线：010-88361066

机 工 官 网：[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线：010-68326294

机 工 官 博：[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

010-88379203

金 书 网：[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

策 划 编 辑：010-88379879

教 育 服 务 网：[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

封面无防伪标均为盗版

## 员工岗位手册系列编委会名单

主任 赵 莹

编 委(按姓氏笔画排序)

于 丽	马 军	方咏梅	王 诚	王兆华	王克俭
王连升	王京选	王博全	卢富良	石仲洋	刘 哲
刘运祥	刘海波	孙玉荣	权英姿	阮爱华	吴玉琪
吴伯新	吴振江	张 健	张 维	张文杰	张玉龙
张红秀	李 平	李 英	李洪川	李笑声	杜跃熙
周 强	周纪勇	林乐强	武建军	宣树青	胡德厚
赵晓军	夏增周	徐文秀	爱新觉罗·蕤琪	聂晓溪	
袁新国	常胜武	韩 涌	廉 红	谭秀田	薛俊明

# 序

当前我国正面临千载难逢的战略机遇期，同时，国际金融危机、欧债危机等诸多不稳定因素也将对我国经济发展产生不利影响。在严峻考验面前，创新能力强、结构调整快、职工素质高的企业才能展示出勃勃生机。事实证明：在“做强二产”、实现高端制造的跨越发展中，除了自主创新、提高核心竞争力外，还必须拥有一支高素质的职工队伍，这是现代企业生存发展的必然要求。我国已进入“十二五”时期，转方式、调结构，在由“中国制造”向“中国创造”转变的关键期和提升期，重要环节就是培育一批具有核心竞争力和持续创新能力的创新型企业，造就数以千万的技术创新人才和高素质职工队伍，这是企业在经济增长中谋求地位的战略选择；是深入贯彻科学发展观，加快职工队伍知识化进程，保持工人阶级先进性的重大举措；也是实施科教兴国战略，建设人才战略强国的重要任务。

《2002年中国工会维权蓝皮书》中有段话：“有一个组织叫工会，在任何主角们需要的时候和地方，他们永远是奋不顾身地跑龙套，起承转合，唱念做打……为职工而生，为维权而立。”北京京城机电控股有限责任公司工会从全面落实《北京“十二五”时期职工发展规划》入手，从关注企业和职工共同发展做起，组织编撰完成了涵盖30个职业的“员工岗位手册系列”，很好地诠释了这句话。此套丛书是工会组织发动企业工程技术人员、一线生产技师、职业教师和工会工作者共同参与编著而成的，注重了技术层面的维度和深度，体现了企业特色工艺，涵盖了较强的专业理论知识，具有作业指导书、学习参考书以及专业工具书的特性，是一套独特的技能人才必备的“百科全书”。全书力求实现企业工会让广大职工体验“一书在手，工作无忧”以及好书助推成长的深层次服务。

我们希望，机电行业的每名职工都能够通过“员工岗位手册系列”的帮助，学习新知识，掌握新技术，成为本岗位的行家能手，为“十二五”发展战略目标彰显工人阶级的英雄风采！

中共北京市委常委，市人大常委会副主任、  
党组副书记，市总工会主席

梁伟

# 前　　言

在机械制造过程中，无损检测是一个重要的工种，它涉及的专业面宽，需要的知识面广，在工作中往往要用到较多的专业资料和相关的专业知识。为了给广大生产一线的无损检测人员提供一本专用的工具书，在北京京城机电控股有限责任公司工会的领导下，以实用为原则，以服务一线无损检测工为目的，依照无损检测工岗位的要求，特编写了这本手册。

本手册旨在为提高无损检测人员队伍的专业素养和职业技能提供帮助，确保无损检测人员掌握专业化和标准化的岗位操作规范，不断提高工作效率和工作质量，尽量避免生产中的漏检和误判，以致发生安全事故。本手册充分明确了无损检测岗位的“应知”“应会”内容，以及各工序的操作方法、操作要求、操作步骤及工作原理。同时汇集了大量的生产实践经验，内容丰富，取材先进。本手册编写时力求简明、实用、通俗易懂，使读者易于理解，方便操作。

本手册主要由职业道德及岗位规范、承压类特种设备无损检测相关知识、射线检测、超声检测、磁粉检测、渗透检测和涡流检测七篇组成。第一篇主要内容有：职业道德和无损检测人员岗位规范；第二篇主要内容有：金属材料及热处理、焊接、承压类特种设备的基本知识；第三篇主要内容有：射线检测的物理基础、设备与器材，射线照相质量的影响因素，射线透照工艺，暗室处理技术，射线照相底片的评定，辐射防护，其他射线检测方法和技术，射线检测的质量管理、工艺编制与应用实例；第四篇主要内容有：超声检测的物理基础，超声波发射声场与规则反射体的回波声压，超声检测设备与器材，脉冲反射法超声检测方法的分类与特点，脉冲反射法及超声检测通用技术，板材、管材、锻钢件、铸钢件、焊缝的超声检测，超声检测通用工艺规程和工艺卡，超声检测实例，衍射时差法（TOFD）检测技术；第五篇主要内容有：磁粉检测基础知识、物理基础、设备、器材和标准试片的种类及用途，磁化电流、磁化方法和磁化规范，磁粉检测工艺，磁痕分析及常见缺陷磁痕显示比较，磁粉检测的应用、质量控制与安全防护、通用工艺规程和工艺卡；第六篇主要内容有：渗透检测基础知识、物理化学基础、光学基础，渗透检测剂，渗透检测设备、仪器和试块，渗透检测方法、工艺，显示的解释与缺陷评定，质量控制与安全防护，渗透检测的应用、通用工艺规程和工艺卡；第七篇主要内容有：涡流检测概述，涡流检测设备及涡流检测应用。

本手册由赵莹任主编，李兵赛任副主编，袁世丽、何顺开、张纪周等同志参与了编写工作。

由于编写工作量较大，参加编写人员水平有限，书中难免有不妥和错漏之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

序  
前言

## 第一篇 职业道德及岗位规范

第一章 职业道德 .....	1	第二章 无损检测人员岗位规范 .....	5
一、职业道德的基本概念 .....	1	一、无损检测人员职责 .....	5
二、职业道德的社会作用 .....	2	二、无损检测人员岗位规范 .....	5
三、社会主义职业道德 .....	2	三、无损检测人员上岗条件 .....	6
四、职业守则 .....	4		

## 第二篇 承压类特种设备无损检测相关知识

第一章 金属材料及热处理		一、常用的焊接方法 .....	16
基本知识 .....	8	二、常见焊接接头坡口形式 .....	17
一、金属材料的性能 .....	8	三、常见焊接接头形式 .....	18
二、材料力学的基本知识 .....	8	四、焊接接头的组成 .....	19
三、金属的晶体结构 .....	10	五、焊缝常见的焊接缺陷 .....	19
四、钢常见的金相组织和 性能 .....	11		
五、钢的分类和命名方法 .....	12		
六、常用热处理工艺 .....	14		
第二章 焊接基本知识 .....	16		
		第三章 承压类特种设备基本 知识 .....	21
		一、锅炉的基本知识 .....	21
		二、压力容器的基本知识 .....	23
		三、压力管道的基本知识 .....	27

## 第三篇 射线检测

第一章 射线检测的物理基础 .....	30	第一节 X 射线机 .....	38
一、原子和原子结构 .....	30	一、X 射线机的分类和发展 .....	38
二、射线的种类及性质 .....	32	二、X 射线管 .....	39
三、射线与物质的相互作用 .....	33	三、X 射线机的电气原理 .....	41
四、射线检测方法 .....	36	四、X 射线机的主要技术 条件 .....	42
第二章 射线检测的设备与器材 .....	38		

五、X射线机的使用和维护	43	六、散射线的控制	76
<b>第二节 γ射线机</b>	<b>44</b>	<b>第五章 暗室处理技术</b>	<b>77</b>
一、γ射线源的主要特征		一、暗室基本知识	77
参数	44	二、暗室处理技术	79
二、γ射线检测设备的特点	44	三、自动洗片机	83
三、γ射线检测设备的分类		<b>第六章 射线照相底片的评定</b>	<b>85</b>
与结构	45	一、评片工作的基本要求	85
四、γ射线机的操作	45	二、评片基本知识	88
五、γ射线机的维护和故障		三、底片影像分析	95
排除	46	四、焊接接头的质量等级	
<b>第三节 射线胶片</b>	<b>47</b>	评定	100
一、射线胶片的结构与特点	47	<b>第七章 辐射防护</b>	<b>103</b>
二、潜影	48	一、与射线检测有关的辐射度量	
三、黑度D	48	及其单位	103
四、射线胶片特性	48	二、射线对人体产生的效应	107
五、胶片系统的分类	50	三、辐射防护的基本问题	108
六、胶片的使用和保管	50	四、外照射防护的方法	109
<b>第四节 射线照相辅助器材</b>	<b>51</b>	五、现场射线检测的有关	
一、黑度计	51	规定	110
二、增感屏	52	六、放射性事故及其处理	111
三、像质计	53	七、辐射防护监测	112
四、其他射线照相器材	53	<b>第八章 其他射线检测方法和</b>	
<b>第三章 射线照相质量的影响</b>		技术	116
因素	54	一、高能射线照相	116
一、射线照相灵敏度	54	二、射线实时成像检测技术	117
二、射线照相灵敏度的影响		三、数字化射线成像技术	119
因素	54	四、X射线层析照相	122
<b>第四章 射线透照工艺</b>	<b>57</b>	<b>第九章 射线检测的质量管理与工艺</b>	
一、射线透照工艺的术语和		编制	123
定义	57	一、全面质量管理概念	123
二、透照工艺条件的选择	57	二、射线检测人员的管理	123
三、透照方式的选择和一次		三、射线检测设备和器材的	
透照长度的计算	63	管理	125
四、小径薄壁管的(椭圆成像)		四、射线检测工艺的管理	126
透照技术与工艺	73	五、射线检测报告、底片及原始	
五、曝光曲线的制作及应用	75	记录控制和档案的管理	128

六、射线检测环境的管理	128	二、在用压缩机出口分液罐	
七、放射防护安全管理	128	射线检测	135
<b>第十章 射线检测应用实例</b>	<b>133</b>	三、乙烯裂解炉辐射炉的管对接接	
一、浮头式换热器管箱组件的		头射线检测	137
射线检测	133		

## 第四篇 超声检测

<b>第一章 超声检测的物理基础</b>	<b>140</b>	二、按波形分类	195
一、机械振动与机械波	140	三、按探头数量分类	196
二、次声波、声波和超声波	141	四、按探头接触方式分类	198
三、超声波的特性	141	<b>第五章 脉冲反射法超声检测通用</b>	
四、波的类型	142	技术	200
五、声波的波动特性	143	一、对检测对象的了解与	
六、超声波的传播速度	145	要求	200
七、超声场的特征值	146	二、检测条件的选择	200
八、超声波垂直入射到界面时的		三、纵波直探头检测技术	203
反射和透射	148	四、横波斜探头检测技术	211
九、超声波倾斜入射到界面时的		<b>第六章 板材的超声检测</b>	218
反射和折射	151	一、中厚钢板超声检测	218
十、超声波的聚焦和发散	155	二、复合板的检测	222
十一、超声波的衰减	159	<b>第七章 管材超声检测</b>	225
<b>第二章 超声波发射声场与规则反</b>		一、管材的加工和管材缺陷	225
射体的回波声压	160	二、管材横波检测技术	225
一、纵波发射声场	160	三、大直径薄壁管的接触法	
二、横波发射声场	162	检测	227
三、规则反射体的回波声压	164	<b>第八章 锻钢件的检测</b>	230
四、AVG 曲线	167	一、制造工艺及常见缺陷	230
<b>第三章 超声检测设备与器材</b>	<b>169</b>	二、检测方法的确定和检测	
一、超声检测仪	169	条件的选择	231
二、探头	175	三、缺陷的评定	233
三、试块	180	<b>第九章 铸钢件的检测</b>	235
四、仪器和探头的性能及其		一、铸钢件的特征	235
测试	186	二、铸钢件的常见缺陷	235
<b>第四章 脉冲反射法超声检测方法</b>		三、铸钢件检测的难点	236
的分类与特点	193	四、检测条件的选择	236
一、超声检测方法分类	193	五、距离 - 波幅曲线的测绘与	

灵敏度调整 .....	237	第十二章 超声检测实例 .....	257
六、缺陷的判别与测定 .....	238	一、锻造封头的检测 .....	257
七、铸钢件质量级别的评定 ..	238	二、压力容器用钢板及对接接头 的超声检测 .....	258
<b>第十章 焊缝的超声检测 .....</b>	<b>240</b>	三、对接焊接接头的超声 检测 .....	259
一、平板对接焊缝的检测 .....	240	<b>第十三章 衍射时差法 (TOFD) 检</b>	
二、T形焊接接头的超声 检测 .....	250	测技术 .....	261
三、管座角焊缝超声检测 .....	252	一、TOFD 技术简介和基本 原理 .....	261
<b>第十一章 超声检测通用工艺规程和</b>		二、TOFD 技术的基本知识 .....	262
<b>工艺卡 .....</b>	<b>254</b>	三、TOFD 技术的特点 .....	267
一、超声检测通用工艺规程 .....	254		
二、超声检测工艺卡 .....	255		

## 第五篇 磁粉检测

<b>第一章 磁粉检测基础知识 .....</b>	<b>269</b>	一、磁粉 .....	284
一、磁粉检测 .....	269	二、载液 .....	285
二、磁粉检测的基本原理 .....	269	三、磁悬液 .....	286
三、磁粉检测适用性和 局限性 .....	269	四、反差增强剂 .....	287
<b>第二章 磁粉检测物理基础 .....</b>	<b>271</b>	五、标准试片 .....	287
一、磁粉检测中的相关 物理量 .....	271	六、标准试块 .....	288
二、磁介质 .....	272	<b>第五章 磁化电流、磁化方法和磁化</b>	
三、铁磁性材料 .....	272	规范 .....	290
四、电流与磁场 .....	274	一、磁化电流 .....	290
五、退磁场 .....	276	二、磁化方法 .....	293
六、漏磁场 .....	277	三、磁化规范 .....	297
<b>第三章 磁粉检测设备 .....</b>	<b>280</b>	<b>第六章 磁粉检测工艺 .....</b>	<b>300</b>
一、设备的分类 .....	280	一、预处理 .....	300
二、磁粉检测设备的组成 部分 .....	281	二、磁化、施加磁粉或 磁悬液 .....	301
三、磁粉检测照明 .....	281	三、磁痕观察、记录与缺陷 评定 .....	304
四、常用典型设备 .....	283	四、退磁 .....	304
五、测量仪器 .....	283	五、后处理与合格工件的 标记 .....	306
<b>第四章 磁粉检测器材和标准试片</b>		六、超标缺陷磁痕显示的处理和 复验 .....	307
<b>的种类及用途 .....</b>	<b>284</b>		

七、检测记录和检测报告	307	四、在用特种设备与维修件磁粉检测	318
八、影响磁粉检测灵敏度的主要因素	308	第九章 质量控制与安全防护	319
<b>第七章 磁痕分析及常见缺陷磁痕显示比较</b>	<b>309</b>	一、磁粉检测质量控制	319
一、磁痕分析的意义	309	二、磁粉检测安全防护	320
二、磁痕的分类	309	<b>第十章 磁粉检测通用工艺规程和工艺卡</b>	<b>322</b>
<b>第八章 磁粉检测应用</b>	<b>316</b>	一、磁粉检测通用工艺规程	322
一、焊接件磁粉检测	316	二、磁粉检测工艺卡	322
二、锻钢件磁粉检测	317	三、工作实例	322
三、铸钢件磁粉检测	317		

## 第六篇 渗透检测

<b>第一章 渗透检测基础知识</b>	<b>332</b>	三、显像剂	346
一、渗透检测的定义和作用	332	四、渗透检测剂系统	348
二、渗透检测的基本原理	332	<b>第五章 渗透检测设备、仪器和试块</b>	<b>349</b>
三、渗透检测方法的分类	332	一、便携式设备	349
四、渗透检测的优点和局限性	333	二、固定式设备	349
<b>第二章 渗透检测的物理化学基础</b>	<b>334</b>	三、检验场地及光源	350
一、表面张力与表面张力系数的概念	334	四、测量设备	351
二、润湿现象	335	五、渗透检测试块	351
三、毛细现象	336	<b>第六章 渗透检测方法</b>	<b>354</b>
四、吸附现象	336	一、水洗型渗透检测法	354
五、溶解现象	337	二、后乳化型渗透检测法	355
六、表面活性与表面活性剂	337	三、溶剂去除型渗透检测法	357
<b>第三章 渗透检测的光学基础</b>	<b>339</b>	四、渗透检测方法的选用	358
一、发光及光致发光	339	<b>第七章 渗透检测工艺</b>	<b>359</b>
二、对比度和可见度	340	一、表面准备和预清洗	359
三、缺陷显示及裂纹检出能力	340	二、施加渗透剂	360
<b>第四章 渗透检测剂</b>	<b>342</b>	三、去除多余的渗透剂	361
一、渗透剂	342	四、干燥	361
二、去除剂	345	五、显像	362
		六、观察和评定	363
		七、后清洗及复验	363
		<b>第八章 显示的解释与缺陷评定</b>	<b>364</b>

一、显示的解释和分类	364	二、铸件的渗透检测	376
二、缺陷评定	365	三、锻件的渗透检测	377
三、渗透检测记录和报告	367	<b>第十一章 渗透检测通用工艺规程和</b>	
<b>第九章 质量控制与安全防护</b>	369	<b>工艺卡</b>	379
一、渗透检测质量控制	369	一、渗透检测通用工艺规程	379
二、渗透检测安全防护	374	二、渗透检测工艺卡	380
<b>第十章 渗透检测应用</b>	376	三、工作实例	380
一、焊接件的渗透检测	376		

## 第七篇 涡流检测

<b>第一章 涡流检测概述</b>	386	二、涡流检测系统	391
一、涡流检测基本原理、方法和		<b>第三章 涡流检测应用</b>	395
应用范围	386	一、穿过式线圈涡流检测	395
二、涡流检测的优缺点	388	二、放置式线圈涡流检测	397
<b>第二章 涡流检测设备</b>	389	<b>参考文献</b>	401
一、涡流传感器	389		

# 第一篇 职业道德及岗位规范

## 第一章 | 职业道德

### 一、职业道德的基本概念

职业道德是规范约束从业人员职业活动的行为准则。加强职业道德建设是推动社会主义物质文明和精神文明建设的需要，是促进行业、企业生存和发展的需要，也是提高从业人员素质的需要。掌握职业道德基本知识，树立职业道德观念是对每一个从业人员最基本的要求。

#### 1. 道德与职业道德

道德，就是一定社会、一定阶级向人们提出的处理人和人之间、个人与社会之间、个人与自然之间各种关系的一种特殊行为规范。道德是做人的根本。道德是一个庞大的体系，而职业道德是这个体系中的一个重要部分，它是社会分工发展到一定阶段的产物。所谓职业道德，它是指从事一定职业劳动的人们，在特定的工作和劳动中以其内心信念和特殊社会手段来维持的，以善恶进行评价的心理意识、行为原则和行为规范的总和，它是人们在从事职业的过程中形成的一种内在的、非强制性的约束机制。职业道德的内容包括职业道德意识、职业道德行为规范和职业守则等。职业道德是社会道德在职业行为和职业关系中的具体体现，是整个社会道德的重要组成部分。

#### 2. 职业道德的特征

职业道德的特征有以下三个方面：

1) 范围上的局限性。任何职业道德的适应范围都不是普遍的，而是特定的、有限的。一方面，它主要适用于走上社会岗位的成年人；另一方面，尽管职业道德也有一些共同性的要求，但某一特定行业的职业道德也只适用于专门从事本职业的人。

2) 内容上的稳定性和连续性。由于职业分工有其相对的稳定性，与其相适应

的职业道德也就有较强的稳定性和连续性。

3) 形式上的多样性。因行业而异,一般来说,有多少种不同的行业,就有多少种不同的职业道德。

## 二、职业道德的社会作用

### 1. 职业道德与企业的发展

(1) 职业道德是企业文化的重要组成部分 职工是企业的主体,企业文化必须以企业职工为中介,借助职工的生产、经营和服务行为来实现。

(2) 职业道德是增强企业凝聚力的手段 职业道德是协调职工与同事之间、职工与领导之间以及职工与企业之间关系的法宝。

(3) 职业道德可以提高企业的竞争力 职业道德有利于企业提高产品和服务的质量;有利于降低产品成本,提高劳动生产率和经济效益;有利于企业的技术进步;有利于企业摆脱困难,实现企业阶段性的发展目标;有利于企业树立良好形象,创造著名品牌。

### 2. 职业道德与人自身的发展

(1) 职业道德是事业成功的保证 没有职业道德的人干不好任何工作,每一个成功的人往往都有较高的职业道德。

(2) 职业道德是人格的一面镜子 人的职业道德品质反映着人的整体道德素质,职业道德的提高有利于人思想道德素质的全面提高,提高职业道德水平是人格升华最重要的途径。

## 三、社会主义职业道德

职业道德是社会主义道德体系的重要组成部分。由于每个职业都与国家、人民的利益密切相关,每个工作岗位、每一次职业行为,都包含着如何处理个人与集体、个人与国家利益的关系问题。因此,职业道德是社会主义道德体系的重要组成部分。

职业道德的实质内容是树立全新的社会主义劳动态度,即在社会主义市场经济条件下,约束从业人员的行为,鼓励其通过诚实的劳动,在改善自己生活的同时,增加社会财富,促进国家建设。劳动无疑是个人谋生的手段,也是为社会服务的途径。劳动的双重含义决定了从业人员要有全新的劳动态度和职业道德观念。社会主义职业道德的基本规范包括以下几个方面。

### 1. 爱岗敬业,忠于职守

任何一种道德都是从一定的社会责任出发,在个人履行对社会责任的过程中,培养相应的社会责任感,从长期的良好行为和规范中建立起个人的道德。因此,职业道德首先要从爱岗敬业、忠于职守的职业行为规范开始。

爱岗敬业是对从业人员工作态度的首要要求。爱岗就是热爱自己的工作岗位,

热爱本职工作。敬业就是以一种严肃认真的态度对待工作，工作勤奋努力，精益求精，尽心尽力，尽职尽责。

爱岗与敬业是紧密相连的，不爱岗很难做到敬业，不敬业更谈不上爱岗。如果工作不认真，能混就混，爱岗就会成为一句空话。只有工作责任心强，不辞辛苦，不怕麻烦，精益求精，才是真正的爱岗敬业。

忠于职守，就是要求把自己职业范围内的工作做好，达到工作质量标准和规范要求。如果从业人员都能够做到爱岗敬业、忠于职守，就会有力地促进企业与社会的进步和发展。

## 2. 诚实守信，办事公道

诚实守信、办事公道是做人的基本道德品质，也是职业道德的基本要求。诚实就是人在社会交往中不讲假话，能够忠于事物的本来面目，不歪曲、篡改事实，不隐瞒自己的观点，不掩饰自己的情感，光明磊落，表里如一。守信就是信守诺言，讲信誉、重信用，忠实履行自己应承担的义务。办事公道是指在利益关系中，正确处理好国家、企业、个人及他人的利益关系，不徇私情，不谋私利。在工作中要处理好集体和个人之间的利益关系，做到个人服从集体，保证个人利益和集体利益相统一。

信誉是企业在市场经济中赖以生存的重要依据，而良好的产品质量和服务是建立企业信誉的基础。企业的从业人员必须在职业活动中以诚实守信、办事公道的职业态度，为社会创造和提供质量过硬的产品和服务。

## 3. 遵纪守法，廉洁奉公

任何社会的发展都需要有力的法律、规章制度来维护社会各项活动的正常运行。法律、法规、政策和各种组织制定的规章制度，都是按照事物发展的规律制定出来的，用于约束人们的行为规范。从业人员除了要遵守国家的法律、法规和政策外，还要自觉遵守与职业活动行为有关的制度和纪律，如劳动纪律、安全操作规程、操作程序、工艺文件等，这样才能很好地履行岗位职责，完成本职工作。

廉洁奉公强调的是，要求从业人员公私分明，不损害国家和集体的利益，不利用岗位职权牟取私利。遵纪守法、廉洁奉公，是每个从业人员都应该具备的道德品质。

## 4. 服务群众，奉献社会

服务群众就是为人民服务。一个从业人员既是别人服务的对象，又是为别人服务的主体。每个人都承担着为他人做出职业服务的职责，要做好服务群众就要做到心中有群众、尊重群众、真心对待群众，做什么事都要想到方便群众。

奉献社会是职业道德中的最高境界，同时也是做人的最高境界。奉献社会就是不计个人的名利得失，一心为社会做贡献，是指一种融在一件件具体事情中的高尚人格，就是为社会服务，为他人服务，全心全意为人民服务。从业人员达到了一心为社会做奉献的境界，就与为人民服务的宗旨相吻合了，就必定能做好自己的本职

工作。

#### 四、职业守则

- 1) 遵守国家法律、法规和有关规定。
- 2) 具有高度的责任心，爱岗敬业、团结合作。
- 3) 严格执行相关标准、工作程序与规范、工艺文件和安全操作规程。
- 4) 学习新知识新技能，勇于开拓和创新。
- 5) 爱护设备、系统及工具、夹具、量具。
- 6) 着装整洁，符合规定；保持工作环境清洁有序，文明生产。

## 第二章 无损检测人员岗位规范

### 一、无损检测人员职责

- 1) 无损检测人员必须得到行政技术监督部门和锅炉压力容器安全监察机构颁发的相应的资格证书，方可从事相应方法和级别的无损检测工作。
- 2) 无损检测责任工程师由总经理在Ⅱ级或Ⅱ级以上无损检测人员中任命，全面负责本单位无损检测人员的工作。制订无损检测人员的培训考核计划，指导无损检测的具体工作，制订本单位无损检测的规程和规定，审核无损检测报告，同时对有争议的无损检测结果做出裁决。
- 3) 无损检测Ⅱ级人员应能正确解释产品的技术条件和无损检测标准，协助无损检测工程师拟定规程和工艺，指导Ⅰ级无损检测人员的工作，监督法规、标准及管理程序的实施，编制无损检测综合报告。
- 4) 无损检测Ⅰ级人员应能熟练操作探伤仪器，按工艺检测，做好原始记录，绘制布片图，初步评定无损检测结果。
- 5) 无损检测Ⅲ级人员负责实施或者监督Ⅰ级和Ⅱ级检测人员的工作，负责无损检测工程的技术管理、无损检测装备性能和人员技术的评价，负责编制和审核无损检测的工艺规程，并确定用于特定对象的特殊无损检测方法、技术和工艺规程。无损检测Ⅲ级人员还负责对无损检测结果进行分析、评定或者解释，向Ⅰ级和Ⅱ级检测人员说明规范、标准、技术条件和工艺规程的相关规定，并对Ⅰ级和Ⅱ级检测人员进行技能指导和培训。

### 二、无损检测人员岗位规范

#### 1. 工作任务

- 1) 负责对进厂的生产用原材料、协作件及外购件和生产过程中的毛坯、半成品及成品等进行无损检测，按时完成本岗位的检验任务。
- 2) 执行本岗位无损检测工艺规程，配合新检验方法的试验工作，对检验对象

做好检查记录。

- 3) 遵守操作规程，执行相关管理标准，遵守国家环境保护有关规定。
- 4) 维护并保养检具、量具及检验仪器和设备，使之保持良好状态。
- 5) 贯彻执行质量管理标准。
- 6) 执行班组管理标准。
- 7) 按照工艺文件的要求，对产品进行百分之百的检验。
- 8) 按照设备操作规程的程序和要求来使用和维护设备。
- 9) 按照不合格品控制的程序做好不合格品的隔离、标识及处置。
- 10) 配合技术人员做好新产品的调试工作。
- 11) 按“5S”的要求进行现场管理。
- 12) 按职工培训计划，进行业务知识的学习。
- 13) 积极参加合理化建议活动。
- 14) 执行能源管理标准，节约用电、用水、用气。
- 15) 及时、准确地做好生产中的各种记录。

## 2. 工作责任

- 1) 对所生产的产品质量负责。
- 2) 对所操作设备的维护负责。
- 3) 对所使用的计量器具负责。
- 4) 对所分管的经济指标负责。
- 5) 对所分管的现场负责。
- 6) 有学习、掌握并应用新工艺、新知识的责任。
- 7) 负责不合格品和废品的控制。
- 8) 对相关记录的准确性负责。

## 三、无损检测人员上岗条件

### 1. 文化程度

具有技工学校、职业高中毕业或具有本专业知识的同等水平。

### 2. 岗位培训及工作经历

必须接受上岗前相应知识的培训并取得岗位培训证书，从事本工种工作一年以上。

### 3. 专业知识

- 1) 掌握无损检测技术知识。
- 2) 掌握自用探伤仪的电路方框结构图、检测原理、主要性能、灵敏度、使用范围、操作规程和维护保养知识。
- 3) 掌握常用辅助设备的种类、名称、规格、型号、使用规则及保养方法。
- 4) 掌握常用无损探伤仪的种类和用途。

- 5) 掌握药液配方的名称、性能、主要成分、配制及使用方法。
- 6) 掌握射线对人体的危害及保护知识。
- 7) 掌握无损检测的有关标准、条例和技术规定。
- 8) 掌握有关专业的计算方法。
- 9) 掌握射线检测、超声检测、磁粉检测及渗透检测的操作过程。
- 10) 掌握焊工的基本知识及锅炉、压力容器等专业知识。
- 11) 掌握热处理工艺学。
- 12) 掌握金属材料的种类、牌号及性能。
- 13) 掌握裂纹的种类及产生原因。
- 14) 了解电气知识。
- 15) 了解安全知识。
- 16) 掌握质量管理和质量体系审核的相关知识。

#### 4. 实际操作能力

- 1) 能正确使用和维护保养自用无损探伤仪器。
- 2) 能按照工艺文件的要求去验证设备的能力。
- 3) 能按照工艺要求的参数去调整设备。
- 4) 能判别裂纹的种类。
- 5) 能正确使用及维护保养辅助设备、工具。
- 6) 能识别与配制常用药液。
- 7) 能看懂零件图，正确执行无损检测工艺规程。
- 8) 能独立进行无损检测中的辅助工作及生产准备工作。
- 9) 能按规程、标准和有关技术文件调整仪器和正确地进行射线、磁粉及渗透检测，操作准确，并做好原始记录。
- 10) 能初步评定检测结果。
- 11) 能进行与本工种有关的电工基本操作。
- 12) 能指导学徒工和实习人员进行实习操作。

#### 5. 身体条件

身体健康，矫正视力在 1.0 以上。

## 第二篇 承压类特种设备无损检测 相关知识

### 第一章 金属材料及热处理基本知识

金属材料是制造承压类特种设备最常用的材料，作为承压类特种设备的无损检测人员，应了解金属材料、热处理及焊接方面的相关知识。

#### 一、金属材料的性能

通常金属材料的性能包括以下两个方面：

##### 1. 使用性能

为了保证机械零件、设备、结构件等能正常工作，金属材料所应具备的使用性能有力学性能（强度、硬度、刚度、塑性、韧性等），物理性能（密度、熔点、导热性、热膨胀性等），化学性能（耐蚀性、热稳定性等）。使用性能决定了金属材料的应用范围、使用安全可靠性和使用寿命。

##### 2. 工艺性能

工艺性能即金属材料在被制成机械零件、设备及结构件的过程中适应各种冷、热加工的性能，工艺性能对制造成本、生产效率、产品质量有重要的影响。

#### 二、材料力学的基本知识

材料在加工和使用过程中都要承受不同形式的外力作用，当外力达到或超过某一限度时，材料就会变形甚至断裂。材料在外力作用下所表现的一些性能称为材料的力学性能。材料力学性能的指标主要有强度、硬度、塑性、韧性等。

##### 1. 应力与应变

材料在未受到外力作用时，其内部各质点之间存在相互平衡的力且在相互作用，以保持其固有的形态。当受到外力时，原来的平衡被破坏，材料发生变形，其内部各质点的相对位置发生变化，各质点之间的相互作用力也有所变化。这种内力

的改变，是材料在外力作用下产生的附加内力。内力是指材料内部各部分之间相互作用的力。

物体在外力作用下，其形状、尺寸所发生的相对改变称为应变，物体内某处线段在变形后长度的改变值与线段原长度之比称为线应变。

物体在外力作用下变形时，其内部任一单位面积截面上的内力大小通常称为应力。方向垂直于截面的应力称为正应力，正应力可分为拉应力和压应力两种。如果应力是由于试件在工作中受到外加载荷的作用而产生的，那么该应力称为工作应力。

## 2. 强度

金属的强度是指金属抵抗永久变形和断裂的能力。材料的强度指标可以通过拉伸试验测出。

(1) 抗拉强度 当材料屈服到一定程度后，由于内部晶粒重新排列，其抵抗变形的能力又重新提高，此时变形虽然发展很快，但只能随着应力的提高而提高，直至应力达最大值。此后，材料抵抗变形的能力明显降低，并在最薄弱处发生较大的塑性变形，此处试件截面迅速缩小，出现缩颈现象，直至断裂破坏。材料受拉断裂前的最大应力值称为强度极限或抗拉强度。

(2) 屈服强度 当应力超过弹性极限后，变形增加较快，此时除了产生弹性变形外，还产生部分塑性变形。当应力达到屈服强度后，塑性变形急剧增加，曲线出现一个波动的小平台，这种现象称为屈服。这一阶段的最大应力、最小应力分别称为上屈服强度和下屈服强度。由于下屈服强度的数值较为稳定，因此以它作为材料抗力的指标，称为屈服强度。抗拉强度、屈服强度是评价材料强度性能的两个主要指标。

## 3. 塑性

塑性是指在载荷作用下材料能稳定地发生永久变形而不破坏其完整性能力。评价材料塑性的指标通常有伸长率和断面收缩率。

伸长率  $A$  可用式 (2-1-1) 确定

$$A = [(L_1 - L_0)/L_0] \times 100\% \quad (2-1-1)$$

式中  $L_0$ ——试件的原标距长度；

$L_1$ ——拉断后试件的标距长度。

同一种材料不同长度的试件测定的伸长率不同，所以相同条件的伸长率才能互相比较。

断面收缩率  $\Psi$  可用式 (2-1-2) 确定

$$\Psi = [(A_0 - A_1)/A_0] \times 100\% \quad (2-1-2)$$

式中  $A_0$ ——试件原来的截面积；

$A_1$ ——试件拉断后缩颈处的截面积。

断面收缩率不受试件标距长度的影响，因此能更可靠地反映材料的塑性。

#### 4. 硬度

硬度是材料抵抗局部塑性变形或表面损伤的能力。硬度与强度有一定的关系，一般情况下，硬度较高的材料其强度也较高，所以可以通过测试硬度来估算材料强度。此外，硬度较高的材料耐磨性较好。

工程上常用的硬度试验方法有：布氏硬度 HBW、洛氏硬度 HR、维氏硬度 HV、里氏硬度 HL。

#### 5. 冲击韧度

冲击韧度是指材料在外加冲击载荷作用下断裂时消耗能量大小的特性。冲击韧度通常是在摆锤式冲击试验机上测定的，摆锤冲断带有缺口的试样所消耗的能量称为冲击吸收能量，以  $A_K$  表示，若试样断口处截面积为  $S_N$ ，则冲击韧度  $\alpha_K = A_K / S_N$ 。 $A_K$  或  $\alpha_K$  值越大，材料韧性越好。

### 三、金属的晶体结构

物质是由原子构成的。根据原子在物质内部排列方式不同，可将物质分为晶体和非晶体两大类，所有的固态金属都是晶体。

晶体内部原子的排列方式称为晶体结构，常见的晶体结构有：

(1) 体心立方晶格 如图 2-1-1a 所示，属于此类的金属有  $\alpha$ -Fe、 $\delta$ -Fe、Cr、V、 $\beta$ -Ti 等。

(2) 面心立方晶格 如图 2-1-1b 所示，属于此类的金属有  $\gamma$ -Fe、Al、Cu、Ni 等。

(3) 密排六方晶格 如图 2-1-1c 所示，属于此类的金属有 Mg、Zn、 $\alpha$ -Ti 等。

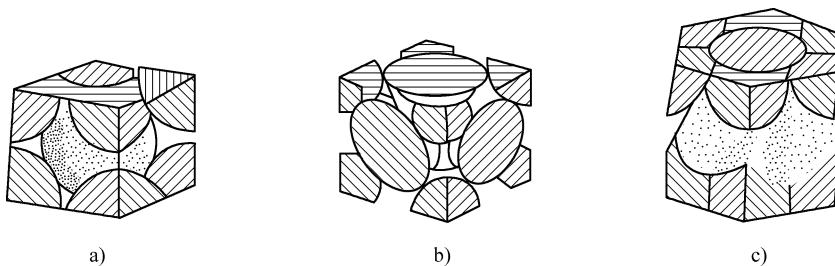


图 2-1-1 三种典型晶格示意图  
a) 体心立方晶格 b) 面心立方晶格 c) 密排六方晶格

实际使用的金属是由许多晶粒组成的，称为多晶体。每一个晶粒相当于一个单晶体，晶粒内的原子排列是相同的，但不同晶粒中原子排列的位向是不同的，如图 2-1-2 所示。晶粒之间的界面称为晶界。

实际晶体的原子排列并非完美无缺，由于各种原因使晶体许多部位的原子排列受到破坏，从而产生不同的缺陷。常见的晶格缺陷有空位、间隙原子、置换原子、位错等。晶格缺陷使材料的物理性质、化学性质发生改变，例如空位、间隙原子、

置代原子的存在会引起周围晶格发生畸变，其结果使金属的屈服强度和抗拉强度增高，而位错的存在则使金属容易产生塑性变形，强度降低。

液态金属冷却转变为固态金属的过程是一个结晶过程，即原子由不规则状态（液态）过渡到规则状态（固态）的过程。结晶过程总是从晶核开始，晶核通常依附于液态金属中的固态微粒杂质而形成。液体中的原子不断向晶核聚集，使晶核长大，同时液体中又不断产生新的晶核，并不断长大，直到所有的晶粒长到相互接触，结晶过程即告结束。

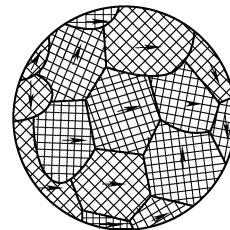


图 2-1-2 晶粒位向晶界示意图

#### 四、钢常见的金相组织和性能

钢的金相组织是在金相显微镜下观察到的，主要有奥氏体、铁素体、渗碳体、珠光体和马氏体等。

(1) 奥氏体 奥氏体是碳在  $\gamma$ -Fe 中的固溶体，在合金钢中是碳和合金元素溶解在  $\gamma$ -Fe 中的固溶体。

奥氏体的塑性很好，硬度和屈服强度较低，布氏硬度值一般为 170 ~ 220HBW，是钢中质量体积最小的组织。奥氏体在 1147℃ 时可溶解碳为 2.11%，在 727℃ 时可溶解碳为 0.77%。奥氏体仍然保持  $\gamma$ -Fe 的面心立方晶格，在金相组织中呈现为规则的多边形。

(2) 铁素体 铁素体是碳与合金元素溶解在  $\alpha$ -Fe 中的固溶体。

铁素体的性能接近纯铁，硬度低 (80 ~ 100HBW)，塑性好。固溶有合金元素的铁素体能提高钢的强度和硬度。在 727℃ 时，碳在铁素体中可溶解 0.022%，在常温下含碳量为 0.008%。铁素体仍然保持  $\alpha$ -Fe 的体心立方晶格，在金相组织中具有典型纯金属的多面体金相特征。

(3) 渗碳体 渗碳体是铁和碳的化合物，又称为碳化铁。常温下铁碳合金中的碳大部分以渗碳体的形式存在。

渗碳体在低温下有弱磁性，当温度高于 217℃ 时磁性消失。渗碳体的熔化温度约为 1600℃，含碳量为 6.67%，硬度很高 (约为 700HBW)，脆性很大，塑性近乎于零。

(4) 珠光体 珠光体是铁素体和渗碳体的混合物，是含碳量为 0.77% 的碳钢共析转变的产物，由铁素体和渗碳体相间排列的片层状组织组成。

珠光体的片间距取决于奥氏体分解时的过冷度，过冷度越大形成的珠光体片间距越小。按片间距的大小，又可分为珠光体、索氏体和托氏体。由于它们没有本质上的区别，统称为珠光体。

粗片状珠光体，是奥氏体在 650 ~ 700℃ 高温分解的产物，硬度为 190 ~

230HBW，用一般金相显微镜能分辨出  $\text{Fe}_3\text{C}$  片。

索氏体，是奥氏体在 600 ~ 650℃ 高温分解的产物，硬度为 240 ~ 320HBW，用高倍金相显微镜放大 1000 倍才能分辨出  $\text{Fe}_3\text{C}$  片。

托氏体，是奥氏体在 550 ~ 600℃ 高温分解的产物，硬度为 330 ~ 400HBW，用电子显微镜放大 10000 倍才能分辨出  $\text{Fe}_3\text{C}$  片。

珠光体在金相组织中，多为铁素体和渗碳体相间排列的片层状组织，片层一般稍弯曲。在一定热处理条件下（球化退火或高温回火），渗碳体以颗粒状分布于铁素体基底之上，即球化组织，也称为粒状珠光体。

（5）马氏体 马氏体是碳在  $\alpha$ -Fe 中的过饱和固溶体。当钢在高温奥氏体化之后，快速冷却至马氏体点以下时，由于  $\gamma$ -Fe 在低温下结构不稳定，便转变为  $\alpha$ -Fe，但冷却速度快，钢中的碳原子来不及扩散，保留了高温时母相奥氏体的成分。因此，马氏体是钢在奥氏体化后快速冷却到马氏体点之下发生无扩散性相变的产物。

马氏体处于亚稳定状态，由于碳在  $\alpha$ -Fe 中过饱和，使  $\alpha$ -Fe 的体心立方晶格发生了畸变，形成了体心正方形晶格。马氏体具有很高的硬度（为 640 ~ 760HBW），很脆，冲击韧性低，断面收缩率和延伸率几乎接近于零。由于过饱和的碳使晶格发生畸变，因此马氏体的质量体积较奥氏体大，钢中马氏体形成时产生很多的相变应力。

马氏体在金相组织中，是互成一定角度的白色针状结构。在正常淬火工艺下，获得的马氏体大部分为细针或隐针状。

并非所有的马氏体组织都是硬而脆的，例如含锰、铬、镍、钼等元素的低合金高强度钢经调质处理后的金相组织为回火低碳马氏体，这种回火低碳马氏体组织具有较高的强度和较好的韧性。

## 五、钢的分类和命名方法

GB/T 13304—2008《钢分类》中规定，钢的分类分为“按化学成分分类”和“按主要质量等级和主要性能及使用特性分类”两部分。

用化学成分分析仪分析后，钢按化学成分可分为非合金钢、低合金钢及合金钢三大类。

### 1. 碳钢的分类和命名

碳钢属于非合金钢范畴。碳钢以铁与碳为两个基本组元，此外还存在少量的其他元素，例如 Mn、Si、S、P、O、N、H 等，这些元素不是为了改善钢的性能而特意加入的，而是在冶炼过程中无法去除，或是由于冶炼工艺的需要而加入的，这些元素在碳钢中被称为杂质元素。

1) 按含碳量分类，碳钢可分为：①低碳钢，含碳量不大于 0.25%；②中碳钢，含碳量为 0.25% ~ 0.6%；③高碳钢，含碳量大于 0.6%。

2) 按钢的质量分类，碳钢可分为：①普通碳素钢，含硫量不大于 0.050%，含

磷量不大于 0.045%；②优质碳素钢，含硫量不大于 0.040%，含磷量不大于 0.040%；③高级优质碳素钢，含硫量不大于 0.030%，含磷量不大于 0.035%。

3) 按钢的用途分类，碳钢可分为：①碳素结构钢，主要用于制作各种工程结构件的机器零件，一般为低碳钢；②碳素工具钢，主要用于制作各种刀具、量具、模具等，一般为高碳钢。

4) 按冶炼时的脱氧程度分类，碳钢可分为：①沸腾钢，浇注前未做脱氧处理，钢液注入锭模后，钢中的氧与碳反应，产生 CO 气泡而引起钢液沸腾，故称沸腾钢，沸腾钢成材率高，材料塑性好，但组织不致密，化学成分偏析大，力学性能不均；②镇静钢，浇注前做充分脱氧处理，浇注时无 CO 气泡产生，锭模内钢液平静，故称镇静钢，镇静钢均匀致密，强度较高，化学成分偏析小，但成材率低，成本高；③半镇静钢，钢液脱氧程度不够充分，浇注时产生轻微沸腾，钢的组织、性能、成材率介于沸腾钢和镇静钢之间。

5) 按冶炼方法和设备分类，碳钢可分为：①平炉钢；②转炉钢；③电炉钢。

上述每种钢因炉衬材料不同分为酸性和碱性两类。

## 2. 碳钢的牌号及表示方法

(1) 碳素结构钢 国家标准《碳素结构钢》(GB/T 700—2006) 中规定，碳素结构钢的牌号由代表屈服强度的字母、屈服强度数值、质量等级符号、脱氧方法四部分按顺序组成。其中“Q”代表屈服强度；屈服强度数值共分 195MPa、215MPa、235MPa 和 275MPa 四种；质量等级以硫、磷等杂质含量由多到少，分别用符号 A、B、C、D 表示；脱氧方法以 F 表示沸腾钢、Z 和 TZ 表示镇静钢和特殊镇静钢，Z 和 TZ 在钢的牌号中予以省略。例如：Q235AF 表示屈服强度为 235MPa 的 A 级沸腾钢。

随着牌号的增大，对钢材屈服强度和抗拉强度的要求增大，对拉长率的要求降低。随着牌号的增大，其含碳量增加，钢材的强度提高，塑性和韧性降低，冷弯性能逐渐变差。同一钢号内质量等级越高，钢材的质量越好，如 Q235C、Q235D 级优于 Q235A、Q235B 级。

(2) 优质碳素结构钢 优质碳素结构钢的牌号用两位数字表示，这两位数字是钢平均含碳量质量的万分比，例如，08 钢表示平均含碳量为 0.08%，20 钢表示平均含碳量为 0.20%。优质碳素结构钢按含锰量的不同分为普通含锰量 (0.08% ~ 0.8%) 和较高含锰量 (0.7% ~ 1.2%) 两组，对含锰量较高的一组，牌号数字后面应附加“Mn”，以示与普通含锰量的区别，如 15Mn、20Mn 等。若为沸腾钢，则在牌号数字后面加“F”，若 08F、15F 等。

(3) 专门用途的碳素钢 专门用途的碳素钢应在牌号尾部加代表用途的符号。制作锅炉或压力容器的专用碳素钢应在牌号后附加“锅炉”的汉语拼音首字母“g”或“容器”的汉语拼音首字母“R”，例如 20g、20R。

碳素工具钢编号是在“碳”字的汉语拼音首字母“T”之后附加数字表示，数

字表示平均含碳量质量的千分比，如T8、T12，分别表示含碳量为0.8%和1.2%的碳素工具钢。如为高级优质碳素工具钢，则在数字后面加A，如T8A、T12A等。

### 3. 合金钢的分类和命名

为了改善钢的性能，在钢中特意加入了除铁和碳以外的其他元素，这一类钢称为合金钢，通常加入的合金元素有锰、铬、镍、钼、铜、铝、硅、钨、钒、铌、锆、钴、钛、硼、氮等。

1) 按合金元素的加入量分类，合金钢可分为：①低合金钢，合金总量不超过5%；②中合金钢，合金总量为5%~10%；③高合金钢，合金总量超过10%。

2) 按用途分类，合金钢可分为：①合金结构钢，专用于制造各种工程结构和机器零件的钢种；②合金工具钢，专用于制造各种工具的钢种；③特殊性能合金钢，具有特殊物理性能、化学性能的钢种，例如耐酸钢、耐热钢、电工钢等。

3) 按组织分类，合金钢可分为珠光体钢、奥氏体钢、铁素体钢、马氏体钢等。

4) 按所含主要合金元素分类，合金钢可分为铬钢、铬镍钢、锰钢、硅锰钢等。

我国合金钢牌号按含碳量、合金元素种类和含量、质量级别和用途来编排。牌号首先用数字表明碳含量，为区别用途，低合金钢、合金结构钢用两位数表示平均含碳量的万分比；高合金钢、不锈耐酸钢、耐热钢用一位数表示平均含碳量的千分比，当平均含碳量小于千分之一时用“0”表示，含碳量小于万分之三时用“00”表示。牌号的第二部分用元素符号表明钢中的主要合金元素，含量由其后数字标明，当平均含量小于1.5%时不标数字；平均含量为1.5%~2.49%时，标数字2；平均含量为2.5%~3.49%时，标数字3等。高级优质合金钢在牌号尾部加A，专门用途的低合金钢、合金结构钢在牌号尾部加代表用途的符号。

例如，16MnR，表明该合金钢平均含碳量为0.16%，平均含锰量小于1.5%，是压力容器专用钢；09MnNiDR，表明该合金钢平均含碳量为0.09%，锰、镍平均含量均小于1.5%，是低温压力容器专用钢；0Cr18Ni9Ti，表明该合金钢属高合金钢，含碳量小于0.1%，含铬量为17.5%~18.49%，含镍量为8.5%~9.49%，含钛量小于1.5%。

## 六、常用热处理工艺

钢在固态下加热到一定温度并保温一定时间，然后以一定的冷却速度冷却到常温，这种加工工艺称为热处理。热处理的目的是为了获得所需要的力学性能和金相组织。钢材常用的热处理工艺有以下几种：

(1) 退火 将钢试件加热到适当温度，保持一段时间后缓慢冷却，以获得接近平衡状态组织热处理工艺，称为退火。各种退火和正火工艺示意图如图2-1-3所示。

根据钢的成分和目的的不同，退火又分为完全退火、不完全退火、消除应力退火、等温退火，球化退火等。

(2) 正火 正火是将工件加热到 $Ac_3$ 或 $Ac_{cm}$ 以上30~50℃，保持一定时间后在

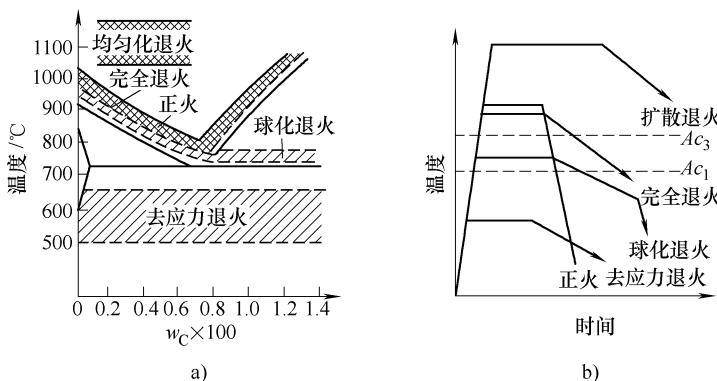


图 2-1-3 各种退火和正火工艺示意图

a) 加热温度范围 b) 工艺曲线

空气中冷却的热处理工艺。正火的目的与退火基本相同，主要是细化晶粒、均匀组织、降低应力。正火与退火的不同之处在于前者的冷却速度较快，过冷度较大，使组织中珠光体的含量增多，且珠光体片层厚度减小。钢正火后的强度、硬度及韧性都较退火后高。

(3) 淬火 淬火是将钢加热到临界温度以上，经过适当保温后快冷，使奥氏体转变为马氏体的过程。材料通过淬火获得马氏体组织，可以提高硬度和强度，这对于轴承、模具之类的工件是有益的。但马氏体硬而脆，韧性很差，内应力很大，容易产生裂纹。

(4) 回火 回火是将经过淬火的钢加热到  $Ac_1$  以下的温度，保持一定时间，然后用符合要求的方法冷却，以获得所需组织和性能的热处理工艺。回火的主要目的是降低材料的应力，提高韧性。通过调整回火温度，可以获得不同的硬度、强度和韧性，以满足所要求的力学性能。此外，回火还可以稳定零件尺寸，改善加工性能。

## 第二章 | 焊接基本知识

焊接在设备制造中占有很重要的地位，焊接质量的好坏直接影响产品质量和使用安全的可靠性。因此，对无损检测人员来说，掌握和了解相关的焊接知识是非常必要的。

### 一、常用的焊接方法

#### 1. 手工电弧焊

手工电弧焊是利用焊条与焊件之间的电弧热，将焊条及部分焊件熔化而形成焊缝的焊接方法。焊接过程中焊条药皮熔化分解生成气体和熔渣，在气体和熔渣的共同保护下，有效地排除了周围空气对熔化金属的有害影响。通过高温下熔化金属与熔渣间的冶金反应，还原并净化焊缝金属，从而得到优质的焊缝。

手工电弧焊的优点是设备简单，便于操作，适用于室内外各种位置的焊接，可以焊接碳钢、低合金钢、耐热钢、不锈钢等各种材料，在设备制造中的应用十分广泛。

手工电弧焊的缺点是生产率低，劳动强度大，对焊工的技术水平及操作要求较高。

#### 2. 自动埋弧焊

电弧被掩埋在焊剂层下面燃烧并实施焊接的方法称为自动埋弧焊，通常简称埋弧焊。自动埋弧焊的优点是：

(1) 生产效率高 自动埋弧焊能采用大的焊接电流，电弧热量集中，熔深大，焊丝可连续送进而不像手工电弧焊那样频频更换焊条。

(2) 焊缝质量高 由于焊剂和熔渣严密包围着焊接区，对焊接熔池的保护较完善，焊接金属中杂质少，只要焊接工艺选择恰当，较易获得高质量的焊缝。

(3) 劳动条件好 自动埋弧焊在施焊中看不到弧光，焊接烟雾也很少，又是机械自动操作，因而劳动强度得到了很大改善。

自动埋弧焊的局限性是：设备比较复杂、昂贵；由于电弧不可见，因而对接头

加工与装配要求严格；焊接位置受到限制，一般是在平焊位置焊接。

### 3. 氩弧焊

氩弧焊是以惰性气体氩气作为保护气体的一种电弧焊接方法。电弧发生在电极与焊件之间，在电弧周围通以氩气，形成连续封闭的气流，保护电弧和熔池不受空气的侵害。由于氩气是惰性气体，即使在高温下，氩气也不与金属发生化学反应，且不溶解于液态金属，因此焊接质量较高。

氩弧焊的优点是：

- 1) 适用于焊接各种钢材、有色金属及合金，焊接质量优良。
- 2) 电弧和熔池有气体保护，清晰可见，便于实现全位置自动化焊接。
- 3) 电弧在保护气流的压缩下燃烧，热量集中，熔池较小，焊接速度较快，热影响区较小，工件焊接变形较小。
- 4) 电弧稳定、飞溅小，焊缝致密、成形美观。

氩弧焊的缺点是：氩气成本较昂贵，氩弧焊的设备和控制系统比较复杂，钨极氩弧焊的生产率较低，且只能焊薄壁工件。

### 4. 二氧化碳气体保护焊

以二氧化碳气体作为保护气体的电弧焊接方法，称为二氧化碳气体保护焊，简称 CO<sub>2</sub> 保护焊。它以焊丝作为一个电极，靠焊丝与工件之间产生的电弧热熔化焊丝和工件，形成焊接接头。

二氧化碳气体保护焊的优点主要有：

- (1) 成本低 用二氧化碳气体保护电弧和熔池，不仅比氩气便宜，也比采用焊剂及焊条药皮保护焊接区便宜。
- (2) 质量好 电弧和熔池都在二氧化碳气体保护下，不易受空气侵害。焊接时电弧加热集中，焊接速度快，焊接热影响区小，特别适宜采用细焊丝小范围来焊接薄壁结构。
- (3) 生产率高 由于焊丝送进自动化，电流密度大，热量集中，所以焊接速度快，又不需要清理焊渣等辅助工作。
- (4) 操作性好 明弧焊接，便于发现和处理问题。具有手工焊接的灵活性，适宜进行全位置焊接。

二氧化碳气体保护焊的缺点是：采用较大电流焊接时，飞溅较大，烟雾较多，弧光强，焊接表面成形不够光滑美观；控制和操作不当时，容易产生气孔；焊接设备比较复杂。

## 二、常见焊接接头坡口形式

常见焊接接头坡口形式主要有：I形坡口、V形坡口、X形坡口、单U形坡口、双U形坡口，如图 2-2-1 所示。

它们的特点如下：

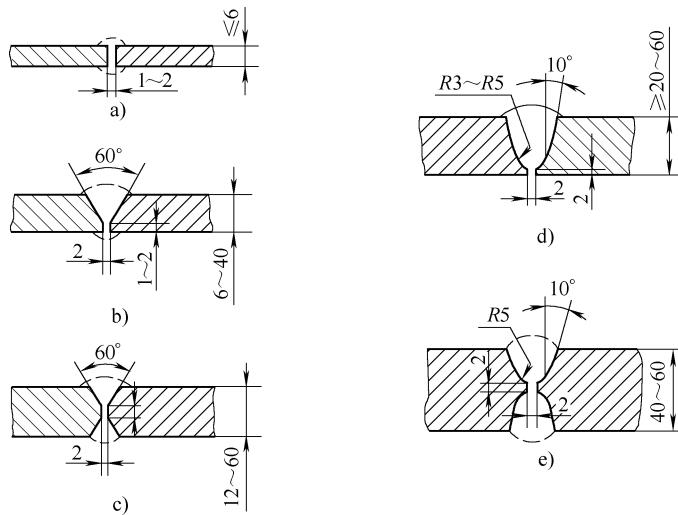


图 2-2-1 坡口基本形式

a) I形坡口 b) V形坡口 c) X形坡口 d) 单U形坡口 e) 双U形坡口

(1) I形坡口 当焊接薄壁结构件时,一般可以不开坡口直接施焊。

(2) V形坡口 加工方便,但对同样厚度的焊件,采用V形坡口比采用X形坡口多耗费近一倍的焊条或焊丝。另外,由于沿厚度焊缝不对称,焊后常造成较大的角变形。管子对接一般用V形坡口。

(3) X形坡口 加工较V形坡口复杂,需从双面施焊。由于焊缝对称,焊后的角变形很小,焊条或焊丝消耗量也小。

(4) U形坡口 焊条或焊丝消耗量较V形小,但在焊后同样会产生较大的角变形;双U形坡口焊条或焊丝消耗量最小,焊后变形也小。与V形和X形坡口相比,U形坡口加工比较复杂,一般在较重要构件和厚度较大的构件中采用。

### 三、常见焊接接头形式

焊接接头形式一般由被焊接两金属件的相互结构位置来决定,通常分为对接接头、角接接头、搭接接头、T字接头,如图2-2-2所示。

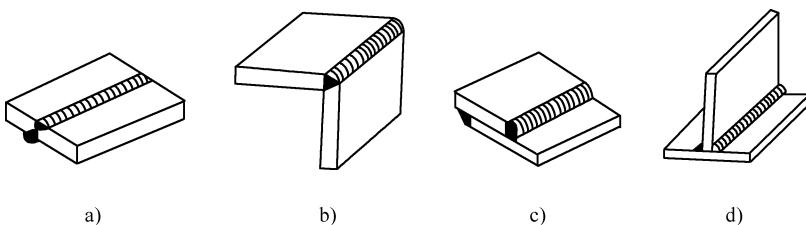


图 2-2-2 焊接接头的基本形式

a) 对接接头 b) 角接接头 c) 搭接接头 d) T字接头

(1) 对接接头 将两金属件放置在同一平面内(或曲面内)并使其边缘相对,沿边缘直线(或曲线)进行焊接的接头叫对接接头。

对接接头是最常见、最合理的接头形式。对接接头处的结构基本上是连续的,承载后应力分布比较均匀。在焊接接头的设计中,应尽量采用对接接头。

(2) 角接接头 两构件成直角或一定角度,而在其连接边缘焊接的接头称角接接头。

(3) 搭接接头 两块板料相叠,而在端部或侧面角焊的接头叫搭接接头。搭接接头不需要开坡口即可施焊,对装配要求也相对宽松些。搭接接头的焊缝属于角焊缝,在接头处结构明显不连续,承载后接头部位的受力情况比较复杂,有附加的剪力及弯矩,应力集中比对接接头严重,因而较少采用。

(4) T字接头 两构件成T字形焊接在一起的接头,称为T字接头。

角接接头和T字接头都形成角焊缝,在接头处的构件结构是不连续的,承载后应力分布比较复杂,应力集中比较严重。

## 四、焊接接头的组成

焊接接头包括:焊缝(*OA*)、熔合区(*AB*)和热影响区(*BC*)三部分,如图2-2-3所示。

(1) 焊缝 焊缝是焊件经焊接后形成的结合部分。通常由熔化的母材和焊材组成,有时全部由熔化的母材组成。

(2) 熔合区 熔合区是焊接接头中焊缝与母材交接的过渡区域。它是刚好加热到熔点与凝固温度区间的部分。

(3) 热影响区 焊接热影响区是在焊接过程中材料因受热的影响(但未熔化)而发生金相组织和力学性能变化的区域。热影响区的宽度与焊接方法、热输入、板厚及焊接工艺有关。

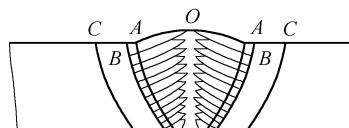


图2-2-3 焊接接头的组成

## 五、焊缝常见的焊接缺陷

金属作为最常用的工程结构材料,往往要求具有如高温强度、低温韧性、耐蚀性及其他的一些基本性能,并且要求在焊接之后仍然能够保持这些基本性能。焊接过程结束后,焊缝常见缺陷有:裂纹、未焊透、未熔合、气孔、夹渣等。

(1) 裂纹 裂纹一般分为热裂纹和冷裂纹。热裂纹是在焊接过程中形成的,因此大部分都产生在焊缝的填充部位以及熔合线部位,并埋藏于焊缝中;冷裂纹也叫延时裂纹,一般都是在焊缝冷却过程中由于应力的影响而产生的,有时还随着焊缝组织的变化首先在焊缝内部形成组织晶界裂纹,经过一段时间之后才形成宏观裂纹,这类裂纹一般形成于焊缝的热影响区以及焊缝的表面。

裂纹是焊缝中危害性最大的一种缺陷，它属于面状缺陷，在常温下会导致焊缝的抗拉强度降低，并随着裂纹所占截面积的增加而引起抗拉强度的大幅度下降。另外，裂纹的尖端是一个尖锐的缺口，应力集中很大，它会促使构件在低应力下扩展破坏，所以在焊缝中裂纹是一种不允许存在的缺陷。

(2) 未焊透 未焊透实际上就是焊接接头的根部未完全熔透的现象，单面焊双面成形或加垫板焊的焊缝主要产生于V形坡口的根部，双面焊双面成形的焊缝主要产生于X形坡口或双U形坡口钝边的边缘处。

未焊透属于一种面状缺陷，通常都视为裂纹类缺陷，未焊透会导致焊缝的有效截面减少，从而降低焊缝的强度。在主应力作用下很容易扩展形成裂纹导致构件破坏。若是连续性未焊透，则更是一种极其危险的缺陷，所以在焊缝中未焊透是一种不允许存在的缺陷。

(3) 未熔合 未熔合缺陷一般产生于焊件坡口的熔合线处以及焊缝隙层间、焊缝隙的根部。在焊接时焊道与母材之间或焊道与焊道之间未完全熔化成一体，在定位焊时母材与母材未完全熔合成一体而形成未熔合部位。

未熔合缺陷大都是以面状存在于焊缝中，通常也被视为裂纹类型的缺陷。其实质就是一种虚焊现象，会导致焊缝的有效截面积减少，在交变应力高度集中的情况下致使焊缝的强度降低，塑性下降，最终造成焊缝开裂。在焊缝中是不允许存在未熔合缺陷的。

(4) 气孔 气孔是焊缝中最常见的缺陷，按位置可分为表面气孔、内部气孔，按形状可分为点状、链状、分散状，密集型、圆形、椭圆形、长条形和管形等。因此，气孔可以分布在焊缝的任何部位。

气孔属于体积性缺陷，它主要削弱焊缝的有效截面积，降低焊缝的力学性能和强度，尤其是焊缝的弯曲强度和冲击韧性，同时也破坏了焊缝金属的致密性。

(5) 夹渣 夹渣缺陷在焊缝中的表现一般都是没有规则的，有分散点状的也有密集的，既有块状也有条状和链状。因此，夹渣缺陷可以存在于焊缝的任何部位。

夹渣是属于体积性缺陷，它的危害程度比面状缺陷要小。但是，夹渣缺陷的形状是多种多样的，并具有尖锐的边缘，在交变应力的作用下，也很容易扩展形成裂纹而成脆性断裂；同时也会减少焊缝的有效截面积而降低焊缝的强度、塑性、韧性、耐腐蚀能力以及疲劳极限。

# 第三章

## 承压类特种设备基本知识

### 一、锅炉的基本知识

#### 1. 锅炉的定义及用途

锅炉是利用燃料燃烧时产生的热能或其他能源的热能，把工质加热到一定温度和压力的热能转换设备。

锅炉是工农业生产和人民生活中广泛应用的设备，它可以为工农业生产、交通运输和人民生活提供动力和热能。

#### 2. 锅炉的特点

锅炉投用后一般都要求连续运行，不能任意停车，否则会影响一条生产线、一个工厂甚至一个地区的生活和生产，其直接、间接经济损失巨大，甚至可能造成严重后果。锅炉在高温、高压下运行具有爆炸的危险性，一旦发生爆炸，其破坏性很大，会对生命财产及国民经济造成很大的危害。

#### 3. 锅炉的主要参数

(1) 容量 (输出功率) 蒸汽锅炉的容量是指蒸发量，即每小时产生的蒸气量，通常用“ $D$ ”表示，单位是  $t/h$ 。热水锅炉和有机热载体锅炉的容量是指供热量，即每小时输出的热量，通常用“ $Q$ ”表示，单位是  $MW$ 。它们之间的换算关系见式 (2-3-1)

$$1t/h \approx 0.7MW \quad (2-3-1)$$

(2) 压力 锅炉压力是指锅炉出口处 (锅筒或过热器) 的工作压力 (表压)，通常用“ $p$ ”表示，单位是  $MPa$ 。

锅炉铭牌上标示的压力是锅炉的设计压力，又称额定工作压力。有过热器的锅炉是指过热器出口处的蒸汽压力，无过热器的锅炉是指锅筒内的蒸汽压力，热水锅炉是指出水阀入口处的热水压力。

测量压力时有两种基准：一种是以压力为零 (即绝对真空) 作为测量起点，这时测出的压力为绝对压力；另一种是以大气压力作为测量起点，即压力表上直接读

出的压力值，这时测出的压力称为表压力。平时所说的锅炉压力或介质压力都是指表压力。

(3) 温度 锅炉温度指锅炉出口介质的温度。对于蒸汽锅炉为出口处饱和蒸汽或过热蒸汽的温度，对于热水锅炉为进、出口热水的温度。锅炉额定蒸汽温度是指锅炉输出蒸汽的最高温度，有过热器的锅炉是指过热器出口处蒸汽的最高温度，无过热器的锅炉是指额定压力下的饱和蒸汽温度。

#### 4. 锅炉的分类

(1) 按用途分类 可分为电站锅炉、工业锅炉、生活锅炉、船舶锅炉、机车锅炉。

(2) 按载热介质分类 可分为蒸汽锅炉、热水锅炉、汽水两用锅炉、热风炉、有机热载体锅炉。

(3) 按燃料和热源分类 可分为燃煤锅炉、燃油和燃气锅炉、燃生物质燃料锅炉、原子能锅炉、余热锅炉、电热锅炉。

(4) 按本体结构分类 可分为水管锅炉、火管锅炉、水火管锅炉、热管锅炉、真空相变锅炉。

(5) 按介质循环方式分类 可分为自然循环锅炉、强制循环锅炉、直流锅炉。

(6) 按燃烧方式分类 可分为层燃锅炉、室燃锅炉、沸腾炉（又称流化床锅炉）。

(7) 按出厂形式分类 可分为散装锅炉、组装锅炉、整装锅炉。

(8) 按压力等级分类 可分为低压锅炉 ( $p \leq 3.8 \text{ MPa}$ )、中压锅炉 ( $3.8 \text{ MPa} \leq p < 5.3 \text{ MPa}$ )、次高压锅炉 ( $5.3 \text{ MPa} \leq p < 9.8 \text{ MPa}$ )、高压锅炉 ( $9.8 \text{ MPa} \leq p < 13.7 \text{ MPa}$ )、超高压锅炉 ( $13.7 \text{ MPa} \leq p < 16.7 \text{ MPa}$ )、亚临界锅炉 ( $16.7 \text{ MPa} \leq p < 22.1 \text{ MPa}$ ) 及超临界锅炉 ( $p \geq 22.1 \text{ MPa}$ )。

(9) 按制造管理分类 可分为 A 级锅炉、B 级锅炉、C 级锅炉、D 级锅炉、E1 级锅炉、E2 级锅炉。

#### 5. 锅炉的结构

(1) 锅炉主要受压部件 锅炉的主要受压部件有：锅筒、锅壳、联箱、下降管、受热面管、省煤器、过热器、减温器、再热器、炉胆、下脚圈、炉门圈、喉管、冲天管等。

(2) 锅炉安全附件 工业锅炉安全附件主要是指锅炉上使用的安全阀、压力表、水位计、水位报警器、排污阀等。

热水锅炉上的安全附件有安全阀、压力表、温度计、超温报警器和排污阀或防水阀。

#### 6. 锅炉的工作流程

(1) 锅炉汽水流程系统 锅炉汽水流程如图 2-3-1 所示。

(2) 锅炉水循环 水在锅炉循环回路中的流动称为锅炉水循环。水循环的主要

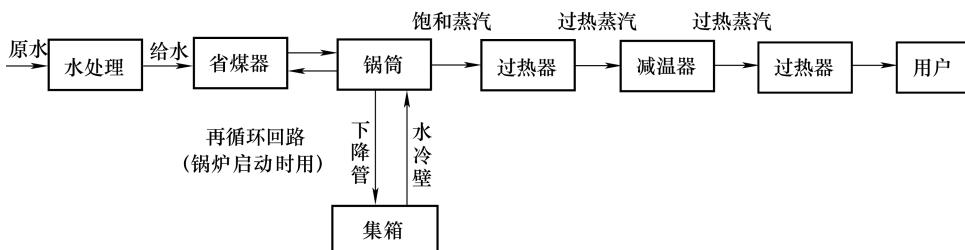


图 2-3-1 锅炉汽水流程图

作用是使锅炉水沿受热面连续不断地流动，把受热面传递的热量及时吸去，使金属壁温不会过度升高，保持其应有的强度。锅炉水循环有自然循环和强制循环两种，自然循环是指位于炉膛内的水冷壁管，受到高温热辐射，管中的水有一部分汽化，故水冷壁内是汽水混合物，而位于炉膛外的下降管不受热，管内是温度较低的水。由于水冷壁管内汽水混合物的相对密度比下降管中水的相对密度小，于是就产生了一个流动压力，这个压力使水沿着下降管向下流动，汽水混合物不断沿水冷壁管向上流动，整个回路在锅炉运行中循环不息。水在对流管道中同样有自然循环，接触烟气温度高的管道吸热多，其中水的相对密度较小，于是这些管道内的水就向上流动，另外一些吸热少的管道内的水就向下流动，这就形成了水的自然循环。强制循环是利用水泵的推动作用，强迫锅水流而实现的。

(3) 锅炉工作过程 锅炉设备主要有三个系统组成，即水汽系统、燃料灰渣系统和风烟系统。锅炉运行时同时进行着三个过程，即燃料的燃烧过程，火焰和烟气向水和蒸汽的传热过程，水的加热、汽化、分离和蒸汽的过热及锅内过程，这三个过程进行的好坏，不仅影响锅炉的蒸发量和经济性，同时也影响锅炉的安全性。

## 二、压力容器的基本知识

### 1. 压力容器的定义及用途

压力容器是指盛装气体或液体，承载一定压力的密闭设备，其范围规定为最高工作压力大于或等于  $0.1 \text{ MPa}$  (表压)，且压力与容积的乘积大于或等于  $2.5 \text{ MPa} \cdot \text{L}$  的气体或液化气体，和最高工作温度高于或等于标准沸点液体的固定式容器和移动式容器；盛装公称工作压力大于或等于  $0.2 \text{ MPa}$  (表压)，且压力与容积的乘积大于或等于  $1.0 \text{ MPa} \cdot \text{L}$  的气体、液化气体和标准沸点等于或低于  $60^\circ\text{C}$  液体的气瓶、医用氧舱等。压力容器是工业生产中的常用设备，它广泛应用于石油、化工、动力、食品等行业，尤其是石油、化工，日常生活中也离不开压力容器。

压力容器一般使用条件比较苛刻，它要承受大小不同的压力载荷和其他附加载荷，经常处于高温、高压或低温状态下，且盛装的介质常常具有腐蚀性。一旦发生事故会给国民经济造成重大损失，给人民的生命和财产造成重大危害。

## 2. 压力容器的主要工艺参数

(1) 压力容器的压力参数 压力容器的压力参数有：工作压力（操作压力）、最高工作压力和设计压力。

1) 工作压力，是指压力容器在正常操作条件下，所要承受的内（外）部表压力。工作压力是由生产工艺要求决定的。

2) 最高工作压力，对于承受内压的压力容器，其最高工作压力是指在正常使用过程中，容器顶部可能出现的最高压力；对于承受外压的压力容器，其最高工作压力是指在正常使用过程中，容器可能出现的最高压力差值；对于夹套容器，其最高工作压力是指在正常使用过程中，夹套顶部可能出现的最高压力差值。一般用  $p_w$  来表示。

3) 设计压力，是指在相应设计条件下用以确定压力容器壳体壁厚及其元件尺寸的压力，用  $p$  来表示。在正常的情况下，设计压力应等于或略高于最高工作压力。

4) 公称压力，为了提高制造质量，并降低制造费用，增加零部件的互换性，使容器及其零部件的制造趋于标准化，把标准化后的压力数值称为公称压力，容器设计时应尽量采用标准的公称压力系列参数。容器的公称压力是指容器在规定温度下的最大操作压力，用符号  $p_g$  来表示。

(2) 压力容器的温度参数 压力容器的温度参数有：工作温度（操作温度）、设计温度。

1) 工作温度，是指容器在操作过程中，在工作压力下壳体可能达到的最高或最低温度。

2) 设计温度，是指容器在操作过程中，在相应的设计压力下壳体或元件可能达到的最高或最低温度。

(3) 直径 一般所说的容器直径系指其内径，单位多用 mm 表示。

出于标准化的需要，把容器的直径按尺寸大小排列成一定数目的系列，该系列中的各尺寸称为容器的公称直径，用符号  $D_g$  来表示。在确定容器直径时应选取与之相近的公称直径，以利于封头、法兰等零部件的标准化。

## 3. 压力容器类别及压力等级、品种的划分

《固定式压力容器安全技术监察规程》中规定了压力容器类别及压力等级、品种的划分。

(1) 压力容器类别划分

1) 介质分组。压力容器的介质分为以下两组，包括气体、液化气体或者最高工作温度高于或者等于标准沸点的液体。

① 第一组介质：毒性程度为极度危害、高度危害的化学介质、易爆介质及液化气体。

② 第二组介质：除第一组以外的介质。

2) 介质危害性。介质危害性指压力容器在生产过程中因事故致使介质与人体大量接触,发生爆炸或者因经常泄漏引起职业性慢性危害的严重程度,用介质的毒性程度和爆炸危害程度来表示。

① 毒性程度。综合考虑急性毒性、最高容许浓度和职业性慢性危害等因素。极度危害最高容许浓度小于  $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ ; 高度危害最高容许浓度为  $0.1\sim 1.0\text{mg}/\text{m}^3$ ; 中度危害最高容许浓度为  $1.0\sim 10.0\text{mg}/\text{m}^3$ ; 轻度危害最高容许浓度大于或者等于  $10.0\text{mg}/\text{m}^3$ 。

② 易爆介质。指气体或者液体的蒸汽、薄雾与空气混合形成的爆炸混合物,并且其爆炸下限小于 10%,或者爆炸上限和爆炸下限的差值大于或者等于 20% 的介质。

③ 具体介质毒性危害程度和爆炸危险程度的确定。按照 HG 20660—2000《压力容器中化学介质毒性危害和爆炸危险程度分类》确定。HG 20660—2000 中没有规定的,由压力容器设计单位参照 GBZ 230—2010《职业性接触毒物危害程度分级》的原则,决定介质组别。

3) 压力容器类别划分方法。

① 基本划分。压力容器类别的划分应当根据介质特性,按照以下要求选择划分图,再根据设计压力  $p$  (单位 MPa) 和容积  $V$  (单位 L),标出坐标点,确定压力容器类别。

第一组介质,压力容器类别的划分如图 2-3-2 所示;第二组介质,压力容器类别的划分如图 2-3-3 所示。

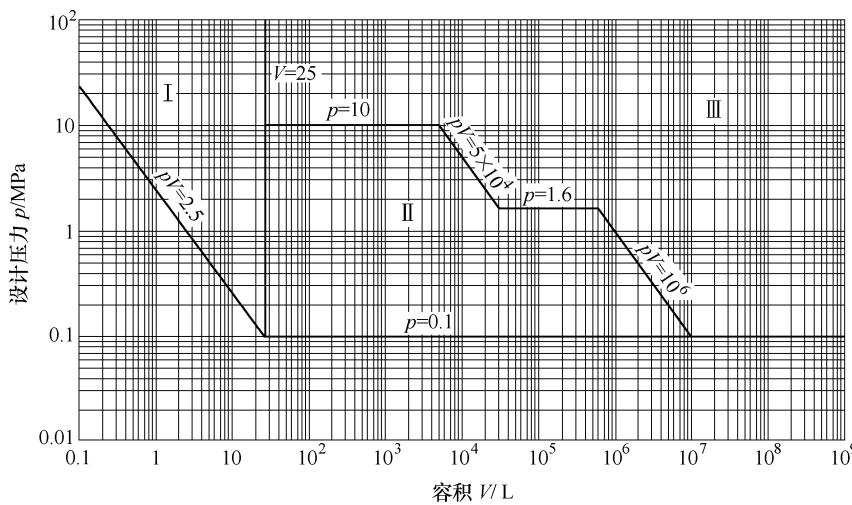


图 2-3-2 压力容器类别划分图——第一组介质

② 多腔压力容器类别划分。多腔压力容器(如换热器的管程和壳程、夹套容器等)按照类别高的压力腔作为该容器的类别并且按该类别进行使用管理,但应当

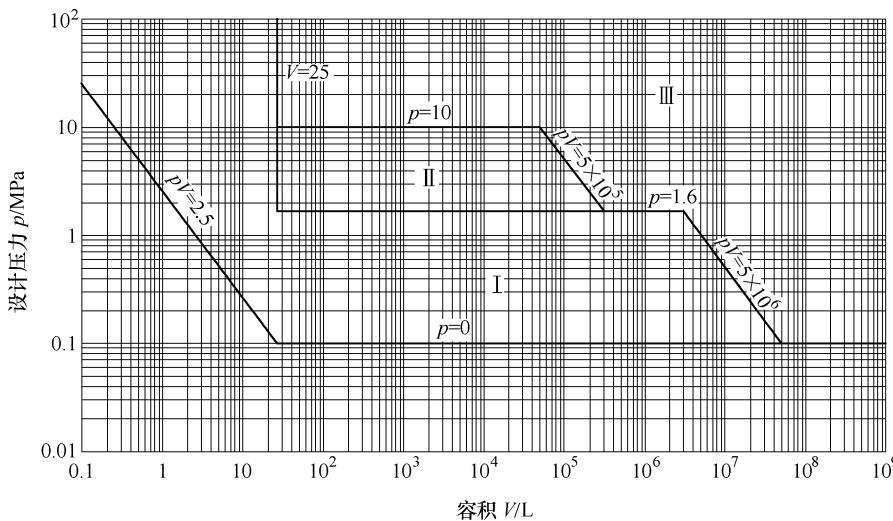


图 2-3-3 压力容器类别划分图——第二组介质

按照每个压力腔各自的类别分别提出设计、制造技术要求。对各压力腔进行类别划分时，设计压力取本压力腔的设计压力，容积取本压力腔的几何容积。

③ 同腔多种介质压力容器类别划分。一个压力腔内有多种介质时，按照组别高的介质划分类别。

④ 介质含量极小压力容器类别划分。当某一危害性物质在介质中含量极小时，应当根据其危害程度及其含量综合考虑，按照压力容器设计单位决定的介质组别划分类别。

⑤ 特殊情况类别划分。坐标点位于图 2-3-2 或者图 2-3-3 的分类线上时，按照较高的类别划分其类别。

(2) 压力等级划分 压力容器的设计压力 ( $p$ ) 划分为低压、中压、高压和超高压四个压力等级：

- 1) 低压 (代号 L):  $0.1 \text{ MPa} \leq p < 1.6 \text{ MPa}$ 。
- 2) 中压 (代号 M):  $1.6 \text{ MPa} \leq p < 10.0 \text{ MPa}$ 。
- 3) 高压 (代号 H):  $10.0 \text{ MPa} \leq p < 100.0 \text{ MPa}$ 。
- 4) 超高压 (代号 U):  $p \geq 100.0 \text{ MPa}$ 。

(3) 压力容器品种划分 压力容器按照在生产工艺过程中的作用原理，分为反应压力容器、换热压力容器、分离压力容器、储存压力容器，具体划分如下：

- 1) 反应压力容器 (代号 R)。主要是用于完成介质的物理、化学反应的压力容器，例如反应器、反应釜、聚合釜、合成塔、变换炉、煤气发生炉等。
- 2) 换热压力容器 (代号 E)。主要是用于完成介质的热量交换的压力容器，例如，换热压力容器、热交换器、冷却器、冷凝器、蒸发器等。

3) 分离压力容器(代号S)。主要是用于完成介质的流体压力平衡缓冲、分离压力容器、气体净化分离的压力容器,例如各种分离器、过滤器、集油器、洗涤器、吸收塔、铜洗塔、干燥塔、汽提塔、分气缸、除氧器等。

4) 储存压力容器(代号C,其中球罐代号B)。主要是用于储存、盛装容器、储存压力容器,如各种形式的储罐、缓冲罐、消毒锅、印染机、烘缸、蒸锅等。

在一种压力容器中,如同时具备两个以上的工艺作用原理时,应当按工艺过程中的主要作用来划分品种。

#### 4. 压力容器的结构特点

压力容器一般由筒体(又称壳体)、封头(又称端盖)、法兰、密封元件、开孔与接管(人孔、手孔、视镜孔、物料进出口接管、液位计、流量计、测温管、安全阀等)和支座以及其他各种内件所组成。

1) 压力容器按支座形式可分为:卧式容器、立式容器、悬挂式容器。

2) 按容器总体形状可分为:圆柱形压力容器、球形容器、矩形容器。

### 三、压力管道的基本知识

#### 1. 压力管道的定义

压力管道是指利用一定的压力,用于输送气体或液体的管状设备,其范围规定为最高工作压力大于或等于0.1MPa(表压)的气体、液化气体、蒸汽介质或者可燃、易爆、有毒、有腐蚀性、最高工作温度高于或等于标准沸点的液体介质,且公称直径大于25mm的管道。

《压力管道安全管理与监察规定》中规定压力管道是指具有下列属性的管道:

1) 输送GBZ 230—2010《职业性接触毒物危害程度分级》中规定的毒性程度为极度危害介质的管道。

2) 输送GB 50160—2008《石油化工企业设计防火规范》及GB 50016—2006《建筑设计防火规范》中规定的火灾危险性为甲、乙类介质的管道。

3) 最高工作压力大于等于0.1MPa(表压),输送介质为气体、液化气体的管道。

4) 最高工作压力大于等于0.1MPa(表压),输送介质为可燃、易爆、有毒、有腐蚀性的或最高工作温度等于高于标准沸点的液体管道。

5) 前四项规定的管道附属设施及其安全保护装置等。

#### 2. 压力管道分类及级别的划分

压力管道分为:长输管道、公用管道和工业管道。

(1) 长输管道为GA类,级别划分如下:

1) 符合下列条件之一的长输管道为GA1级。

① 输送有毒、可燃、易爆气体介质,设计压力  $p > 1.6 \text{ MPa}$  的管道。

② 输送有毒、可燃、易爆液体流体介质,输送距离(输送距离指产地、储存

库及用户间的用于输送商品介质管道的直接距离)  $\geq 200\text{km}$  且管道公称直径  $DN \geq 300\text{mm}$  的管道。

③ 输送浆体介质, 输送距离  $\geq 50\text{km}$  且管道公称直径  $DN \geq 150\text{mm}$  的管道。

2) 符合以下条件之一的长输管道为 GA2 级。

① 输送有毒、可燃、易爆气体介质, 设计压力  $p \leq 1.6\text{MPa}$  的管道。

② GA1②范围以外的管道。

③ GA1③范围以外的管道。

(2) 公用管道为 GB 类 级别划分如下:

1) GB1: 燃气管道。

2) GB2: 热力管道。

(3) 工业管道为 GC 类 级别划分如下:

1) 符合下列条件之一的工业管道为 GC1 级:

① 输送 GBZ 230—2010《职业性接触毒物危害程度分级》中规定毒性程度为极度危害介质的管道。

② 输送 GB 50160—2008《石油化工企业设计防火规范》及 GB 50016—2006《建筑设计防火规范》中规定的火灾危险性为甲、乙类可燃气体或甲类可燃液体介质且设计压力  $p \geq 4.0\text{MPa}$  的管道。

③ 输送可燃流体介质、有毒流体介质, 设计压力  $p \geq 4.0\text{MPa}$  且设计温度不大于  $400^\circ\text{C}$  的管道。

④ 输送流体介质且设计压力  $p \geq 10.0\text{MPa}$  的管道。

2) 符合以下条件之一的工业管道为 GC2 级:

① 输送 GB 50160—2008《石油化工企业设计防火规范》及 GB 50016—2006《建筑设计防火规范》中规定的火灾危险性为甲、乙类可燃气体或甲类可燃液体介质且设计压力  $p < 4.0\text{MPa}$  的管道。

② 输送可燃流体介质、有毒流体介质, 设计压力  $p < 4.0\text{MPa}$  且设计温度不大于  $400^\circ\text{C}$  的管道。

③ 输送非可燃流体介质、无毒流体介质, 设计压力  $p < 10\text{MPa}$  且设计温度不大于  $400^\circ\text{C}$  的管道。

④ 输送流体介质, 设计压力  $p < 10\text{MPa}$  且设计温度小于  $400^\circ\text{C}$  的管道。

3) 符合以下条件之一的 GC2 级管道划分为 GC3 级:

① 输送可燃流体介质、有毒流体介质, 设计压力  $p < 1.0\text{MPa}$  且设计温度小于  $400^\circ\text{C}$  的管道。

② 输送非可燃流体介质、无毒流体介质, 设计压力  $p < 4.0\text{MPa}$  且设计温度小于  $400^\circ\text{C}$  的管道。

### 3. 压力管道的用途及特点

(1) 压力管道的用途 压力管道的主要用途是输送介质。除此之外, 对长输管

道而言，压力管道还有储存功能；对工业管道而言，压力管道还有热交换功能。

## （2）压力管道的主要特点

- 1) 种类多，数量大，标准多，设计、制造、安装、应用管理环节多。
- 2) 长细比大，跨越空间大，边界条件复杂。
- 3) 布置方式多样，现场安装条件差，工作量大。
- 4) 材料应用种类多，选用复杂。
- 5) 失效的模式多样，失效概率大。
- 6) 实施检验的难度大。

## 4. 压力管道的组成

压力管道由多种元件组成，元件品种主要有：

- 1) 管子，其种类有无缝钢管、焊接钢管、有色金属管、铸铁管、非金属材料管等。
- 2) 管件，包括弯头、三通、大小头等许多形式。其种类有无缝管件、有缝管件、锻制管件、铸造管件、非金属材料管件等。
- 3) 法兰和紧固件，其种类有锻造法兰、焊接法兰、非金属材料法兰等。
- 4) 阀门，其种类有安全阀、调压阀、闸阀、球阀、蝶阀、截止阀、止回阀、非金属材料壳体阀门等。
- 5) 膨胀节及波纹管，其种类有金属波纹膨胀节、金属波纹管、其他形式金属膨胀节、非金属膨胀节等。
- 6) 密封元件及特种元件，其种类有金属密封元件、非金属密封元件、防腐管道元件、阻火器等。

压力管道是由压力管道组成件和支承件组成的装配总成，管道组成件是指用于连接或装配管道的元件，管道支承件是管道安装件和附着件的总称。

# 第三篇 射线检测

## 第一章 射线检测的物理基础

### 一、原子和原子结构

#### 1. 元素与原子

世界上的一切物质都是由元素构成的。迄今为止，已发现的元素有 110 多种，其中天然存在的有 90 多种，其余的都为人工制造。

元素是指具有相同核电荷数（或质子数）的同一类原子的总称。为了便于表达和书写，每种元素都用一定的符号来表示，这种符号被称为元素符号。元素符号通常采用该元素拉丁文名称第一个字母的大写，或再附加一个小写字母。例如，碳的元素符号是 C，钴的元素符号是 Co，铱的元素符号是 Ir 等。

原子是元素的具体存在，是体现元素性质的最小微粒。原子是由一个原子核和若干核外电子组成。原子核带正电荷，位于原子中心；核外电子带负电荷，绕原子核做高速运动。原子核所带的正电荷与核外电子所带的负电荷相等，所以整个原子不显电性。

原子核仍然可以再分，由质子和中子组成，中子不显电性，质子带一个单位正电荷。原子核中有多少个质子就带多少单位正电荷，所以，质子所带的正电荷数又叫核电荷数。

在原子中，原子核所带的正电荷数（即核电荷数）与核外电子所带的负电荷数相等，所以核外电子数就等于核电荷数。在元素周期表中，元素的次序就是按核电荷数排列的，因此，周期表中的原子序数（Z）等于核电荷数，因此在数值上存在以下关系：

$$\text{质子数} = \text{核电荷数} = \text{核外电子数} = \text{原子序数} (Z) \quad (3-1-1)$$

原子的质量极其微小，用常用质量单位（kg）来表示非常不方便。因此，物理学中采用“原子质量单位”，用符号“u”表示，即规定碳同位素<sup>12</sup>C 原子质量的

1/12为1u，则相对原子质量（即原子量）就是某元素的原子的平均质量相对于<sup>12</sup>C的质量的1/12的比值。

质子和中子的质量几乎相等，用原子质量单位来度量，都接近于1u，而电子太轻，计算相对原子质量时可以忽略不计，由此得出以下关系：

$$\text{相对原子质量} = \text{质子数} + \text{中子数} \quad (3-1-2)$$

$$\text{中子数} = \text{相对原子质量} - \text{质子数} = \text{相对原子质量} - \text{原子序数} Z \quad (3-1-3)$$

凡是具有一定质子数、中子数并处于特定能量状态的原子或原子核称为核素。核素的标准写法是将核子数（质量数）表示在元素符号的左上标位置，核电荷数标于左下角。例如<sup>60</sup><sub>27</sub>Co，即表示核素钴质量数为60，其核电荷数为27，核内有27个质子，而中子数为 $60 - 27 = 33$ 。在工程应用时可直接用元素符号和质量数来表示某一种核素，例如写为：钴60或Co60。

目前已知的核素有2000多种，分别属于100多种元素，一种元素可包含有多种核素。这些具有相同质子数、不同中子数（或不同质量数）同一元素的不同核素互称为同位素。例如：Co60和Co59。

核素可分为稳定和不稳定的两类，不稳定的核素又称放射性核素，它能自发地放出某种射线（ $\alpha$ 、 $\beta$ 或 $\gamma$ 射线），而变为另一种元素。

放射性核素又分为天然的和人工制造的两类。由于天然放射性核素稀少，又不易提炼，价格昂贵，所以当前射线检测所用的均为人工放射性核素。

## 2. 核外电子运动规律

1913年，丹麦科学家玻尔的原子理论假设可概括为：原子中的电子沿着圆形轨道运行，各条轨道有不同的能量状态，称为能级，各能级的能值都是确定的。正常情况下电子总是在能级最低的轨道上运行，这时的原子状态称为基态。当原子从外界吸收一定的能量时，电子就由最低能级跳到较高能级，这一过程称为跃迁，这时原子的状态称为激发态。激发态是一种不稳定状态，电子将再次跃迁回较低能级。

## 3. 放射性衰变

采用人为的方法，以中子、质子或其他粒子作为炮弹轰击原子核，从而改变核内质子或中子的数目，便可以制造出新的核素，也可以使稳定的核素变为不稳定的核素。在没有任何外界作用的条件下，不稳定的核素会自发蜕变，变成另一种核素，同时放出各种射线，这种现象称为放射性衰变。

放射性衰变有多种模式，其中最主要的有：

1)  $\alpha$ 衰变。放射性原子核释放出 $\alpha$ 粒子（氦的原子核，核内含两个质子和两个中子）的过程称为 $\alpha$ 衰变。一次 $\alpha$ 衰变，质子数减少两个，中子数减少两个，相对原子质量减少四个。 $\alpha$ 粒子所形成的 $\alpha$ 射线是一种电离辐射。

2)  $\beta$ 衰变。放射性原子核释放出 $\beta$ 粒子（电子）的过程称为 $\beta$ 衰变。一次 $\beta$ 衰变，质子数增加一个，相对原子质量不变。

3)  $\gamma$ 衰变。放射性原子核释放出 $\gamma$ 光子的过程称为 $\gamma$ 衰变。 $\gamma$ 衰变通常是在 $\alpha$

衰变和  $\beta$  衰变过程中发生的。 $\gamma$  射线的释放不影响原子核的核子数，仅减少原子核的能量。并非每一个  $\alpha$  衰变和  $\beta$  衰变都释放  $\gamma$  光子。

4) 人工放射性衰变。用高能粒子轰击稳定原子核，使其变成不稳定的具有放射性的原子核，这些原子核具有人工放射性。

## 二、射线的种类及性质

### 1. X 射线和 $\gamma$ 射线的性质

- 1) 都是电磁波，在真空中以光速直线传播。
- 2) 本身不带电，不受电场和磁场的影响。
- 3) 在媒质界面上只能发生漫反射，都具有透射、折射、干涉和衍射等光学性质。

4) 不可见，能穿透可见光不能穿透的物质。穿透物质的过程中，会与物质发生复杂的物理和化学作用。能使胶片感光。

- 5) 具有辐射生物效应，能够杀伤生物细胞，破坏生物组织。

### 2. X 射线的产生及其特点

X 射线是在 X 射线管中产生的，X 射线管是一个具有阴阳两极的真空管，阴极是钨丝，阳极是金属制成的靶。在阴阳两极之间加有很高的直流电压（管电压），当阴极加热到白炽状态时释放出大量电子，这些电子在高压电场中被加速，从阴极飞向阳极（管电流），最终以很大速度撞击在金属靶上，失去所具有的动能，这些动能绝大部分转换为热能，仅有极少一部分转换为 X 射线向四周辐射。

对 X 射线管发出的 X 射线做光谱测定，可以发现 X 射线谱由两部分组成，一个是波长连续变化的部分，称为连续谱，它的最短波长只与外加电压有关；另一部分是具有分立波长的谱线，这部分谱线要么不出现，一旦出现它的谱峰所对应的波长位置完全取决于靶材料本身，这部分谱线称为标识谱，又称为特征谱。

(1) 连续谱 大量电子（例如，当管电流为 5mA 时，撞到靶上的电子数目约为  $3 \times 10^{16}$  个/s）与靶相撞，相撞前电子初速度各不相同，相撞时减速过程也各不相同。少量电子经一次撞击就失去全部动能，而大部分电子经过多次制动逐步失去动能，这就使得能量转换过程中所发出的电磁辐射可以具有各种波长，因此，X 射线的波谱呈连续分布。

连续谱存在着一个最短波长  $\lambda_{\min}$ ，其数值只依赖于外加电压，而与靶材料无关。连续谱中最大强度对应的波长大约是最短波长的 1.5 倍。在实际检测中，以最大强度波长为中心的邻近波段的射线起主要作用。

实验证明，连续 X 射线的总强度  $I_T$  与管电流  $i$ 、管电压  $V$ 、靶材料原子序数  $Z$  有以下关系：

$$I_T = K_i Z i V^2 \quad (K_i \text{ 为比例常数}) \quad (3-1-4)$$

可见，管电流越大，管电压越大，靶材料的原子序数越高，产生的射线强度越大。

(2) 标识谱 当X射线管两端所加的电压超过某个临界值 $V_k$ 时, 波谱曲线上除连续谱外, 还将在特定波长位置出现强度很大的线状谱线, 这种线状谱的波长只依赖于阳极靶面的材料, 而与管电压和管电流无关, 因此, 把这种标识靶材料特征的波谱称为标识谱,  $V_k$ 称为激发电压。

### 3. $\gamma$ 射线的产生及其特点

$\gamma$ 射线是放射性同位素经过 $\alpha$ 衰变或 $\beta$ 衰变后, 在激发态向稳定态过渡的过程中从原子核内发出的, 这个过程称为 $\gamma$ 衰变, 又称 $\gamma$ 跃迁。以放射性同位素Co60为例, Co60经过一次 $\beta^-$ 衰变成为处于2.5MeV激发态的Ni60, 随后放出能量分别为1.17MeV和1.33MeV的两种 $\gamma$ 射线而跃迁到基态。

由此可见,  $\gamma$ 射线的能量是由放射性同位素的种类所决定的。一种放射性同位素可能放出许多种能量的 $\gamma$ 射线, 对此取其所辐射出的所有能量的平均值作为该同位素的辐射能量。例如Co60的平均能为 $(1.17\text{MeV} + 1.33\text{MeV})/2 = 1.25\text{MeV}$ 。

$\gamma$ 射线的能谱为线状谱。放射性同位素的原子核衰变是自发进行的, 对于任意一个放射性核, 它何时衰变具有偶然性, 不可预测, 但对于足够多的放射性核的集合, 它的衰变规律服从统计规律, 可表示为

$$N = N_0 e^{-\lambda T} \quad (3-1-5)$$

式中  $N$ ——当前存在的原子核数;

$T$ ——时间;

$N_0$ —— $t=0$ 时原子核的数目;

$\lambda$ ——比例常数, 称为衰变常数。

衰变常数 $\lambda$ 反映了放射性物质的固有属性,  $\lambda$ 值越大, 说明该物质越不稳定, 衰变得越快。放射性同位素衰变掉原有核数一半所需时间, 称为半衰期, 用 $T_{1/2}$ 表示。推导可得

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (3-1-6)$$

可见,  $T_{1/2}$ 也反映了放射性物质的固有属性,  $\lambda$ 越大,  $T_{1/2}$ 越小。

## 三、射线与物质的相互作用

射线通过物质时, 会与物质发生相互作用而使强度减弱。导致强度减弱的原因可分为吸收和散射。吸收是一种能量转换, 光子的能量被物质吸收后变为其他形式的能量; 散射会使光子的运动方向改变, 其效果等于在束流中移去入射光子。在X射线与 $\gamma$ 射线能量范围内, 光子与物质作用的主要形式有: 光电效应、康普顿效应、电子对效应。当光子能量较低时, 还必须考虑瑞利散射。

射线通过物质时的强度衰减遵循指数规律, 衰减情况不仅与吸收物质的性质和厚度有关, 而且还取决于辐射自身的性质。

## 1. 光电效应

当光子与物质原子的束缚电子作用时，光子把全部能量转移给某个束缚电子，使之发射出去，而光子本身则消失掉，这一过程称为光电效应。光电效应反射出的电子叫光电子。

原子吸收了光子的全部能量，其中一部分消耗于光电子脱离原子束缚所需的电离能，另一部分就作为光电子的动能。所以，发生光电效应的前提条件是光子能量必须大于电子的逸出能。光电效应的发生概率与射线能量和物质原子序数有关，它随着光子能量的增大而减小，随着原子序数的增大而增大。

## 2. 康普顿效应

入射光子与轨道电子碰撞后，轨道电子脱离轨道成为反冲电子，入射光子能量降低（波长变长）并改变运动方向成为散射线，这一现象称为康普顿效应（散射）。

产生康普顿效应的入射光子能量较大，其能量一部分克服轨道电子的结合能，另一部分作为反冲电子的动能，剩下的是散射光子的能量。康普顿效应的发生概率大致与物质原子序数成正比，与光子能量成反比。

## 3. 电子对效应

当入射光子的能量大于  $1.022\text{ MeV}$  时，在原子核附近由于核库仑场的作用将产生一对正、负电子，这种现象称为电子对效应。

电子对的寿命很短，它们很快湮灭并生成两个能量分别为  $0.511\text{ MeV}$  的新光子，能量越大，产生电子对的可能性越大。

## 4. 瑞利散射

光子与芯电子发生弹性散射时，电子吸收光子能量从低能级跃迁到高能级，同时释放出一个散射光子，其能量与入射光子的能量相同。

瑞利散射的概率和物质的原子序数及入射光子的能量有关，大致与物质原子序数的平方成正比，并随入射光子能量的增大而急剧减小。

## 5. 各种相互作用发生的相对概率

光电效应、康普顿效应、电子对效应的发生概率与物质的原子序数和入射光子能量有关，对于不同物质和不同能量区域，这三种效应的相对重要性不同。图 3-1-1 所示为各种效应所占优势的区域。

各种效应对射线照相质量产生不同的影响，例如，光电效应和电子对效应引起的吸收有利于提高照相对比度，而康普顿效应产生的散射线则会降低对比

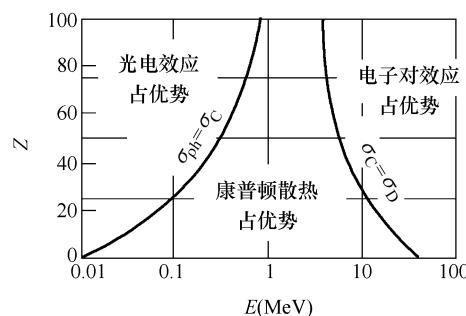


图 3-1-1 各种效应所占优势的区域

度。轻金属试件照相质量往往比重金属试件照相质量差；使用 1MeV 左右能量的射线照相，其对比度往往不如较低能量射线或更高能量射线，这些都是康普顿效应的影响造成的。

X 射线与物质相互作用导致强度的减弱以及能量转化示意图，如图 3-1-2 所示。

## 6. 窄束、单色射线的强度衰减规律

所谓窄束射线是指不包括散射成分的射线束，通过物质后的射线束，仅由未与物质发生相互作用的光子组成。所谓单色是指由单一波长电磁波组成的射线，或者说，由相同能量光子组成的辐射束流，又称为单能辐射。

窄束、单色射线强度衰减公式见式 (3-1-7)：

$$I = I_0 e^{-\mu T} \quad (3-1-7)$$

式中  $I$ ——一次透射射线强度；

$I_0$ ——辐射初始强度；

$\mu$ ——线衰减系数；

$T$ ——穿透物质的厚度。

线衰减系数  $\mu$  的意义是射线通过单位厚度物质时，与物质相互作用的概率。它与射线能量、物质的原子序数和密度有关。

在实际应用中，经常使用半价层来描述某种能量射线的穿透能力或某种射线的衰减作用程度。半价层是指使入射射线强度减少一半时吸收物质的厚度，用符号  $T_{1/2}$  表示。推导可得

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu} \quad (3-1-8)$$

## 7. 宽束、多色射线的强度衰减规律

工业检测中应用的射线，不可能是窄束、单色射线。把包含有散射线成分的射线称为宽束射线。束流中的光子往往不具有相同的能量。通常将包括几种乃至十几种能量光子的组合，称为多色射线。而将包括所有波长的连续 X 射线称为白色射线。

1) 散射线和散射比。对射线照相产生影响的散射线主要来自康普顿效应，在较低能量范围，则来自相干散射。

应用宽束射线时，射线总强度  $I$  等于一次投射射线强度  $I_p$  和散射线强度  $I_s$  之和，即

$$I = I_p + I_s = I_p (1 + I_s/I_p) = I_p (1 + n) \quad (3-1-9)$$

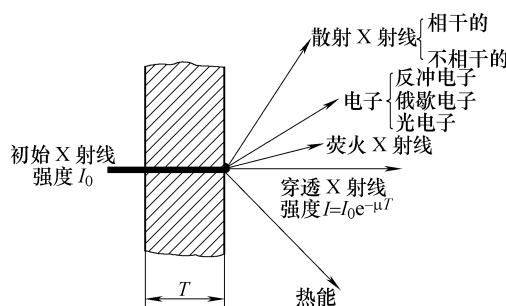


图 3-1-2 X 射线与物质相互作用

这里  $n = I_s/I_p$ ，称作散射比，散射比  $n$  的大小与射线能量、穿透物质种类、穿透厚度等诸多因素有关。

2) 宽束、多色射线的强度衰减规律。宽束、多色射线的强度衰减公式可归纳为

$$I = I_0 e^{-\bar{\mu} T} (1 + n) \quad (3-1-10)$$

式中  $I$ ——透射射线强度，为一次透射射线  $I_p$  和散射射线  $I_s$  强度之和；

$I_0$ ——初始射线强度；

$\bar{\mu}$ ——平均衰减系数；

$T$ ——穿透物质的厚度；

$n$ ——散射比。

## 四、射线检测方法

射线检测是工业无损检测中一个重要的专业门类。射线检测最主要的应用是检测试件内部的宏观几何缺陷。在这里主要介绍一种最基本、应用最广泛的射线检测方法，即射线照相法。它是指用 X 射线或  $\gamma$  射线穿透试件，以胶片作为记录信息的器材的无损检测方法。

### 1. 射线照相法的原理

射线在穿透物质的过程中会与物质发生相互作用，因吸收和散射而使其强度减弱。强弱衰减程度取决于物质的衰减系数和射线在物质中穿透的厚度。如果被透照物体（试件）的局部存在缺陷，且构成缺陷的物质的衰减系数又不同于试件，该局部区域的透过射线强度就会与周围产生差异。把胶片放在适当位置使其在透过射线的作用下感光，经暗室处理后得到底片。底片上各点的黑化程度取决于射线照射量，由于缺陷部位和完好部位的透射射线强度不同，底片上相应部位就会出现黑度差异。射线照相原理示意图如图 3-1-3 所示，底片上相邻区域的黑度差异定义为对比度。把底片放在观片灯光屏上借助透过光线观察，可以看到由对比度构成的不同形状的影像，评片人员据此判断缺陷情况并评价试件质量。

### 2. 射线照相法的特点

射线照相法在锅炉、压力容器的制造检验中得到广泛应用，它的检测对象是各种熔化焊接方法（电弧焊、气体保护焊、电渣焊及气焊等）的对接接头。该方法也能检测铸钢件，在特殊情况下也可用于检测角焊缝或其他一些特殊结构试件。它一般不适宜钢板、钢管及锻件的检测，也较少用于钎焊、摩擦焊等焊接接头的检测。

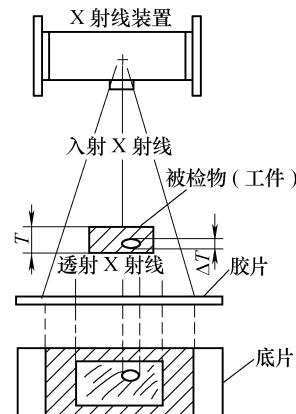


图 3-1-3 射线照相原理示意图

射线照相法用底片作为记录介质，可以直接得到缺陷的直观图像，且可以长期保存。通过观察底片能够比较准确地判断出缺陷的性质、数量、尺寸和位置。

射线照相法容易检出那些形成局部厚度差的缺陷，对气孔和夹渣之类的缺陷有很高的检出率。而裂纹类缺陷的检出率则受透照角度的影响，射线照相法不能检出垂直照射方向的薄层缺陷，例如钢板的分层。

射线照相法所能检出的缺陷高度尺寸与透照厚度有关，可以达到透照厚度的1%，甚至更小；所能检出的长度和宽度尺寸分别为毫米数量级和亚毫米数量级，甚至更小。射线照相法检测薄工件没有困难，几乎不存在检测厚度下限，但检测厚度上限受射线穿透能力的限制，而穿透能力取决于射线光子能量。射线照相法几乎适用于所有材料，该方法对试件的形状、表面粗糙度没有严格要求，而材料晶粒度对其不产生影响。

射线照相法的检测成本较高，检测速度较慢。射线对人体有伤害，需要采取防护措施。

## 第二章

# 射线检测的设备与器材

## 第一节 X 射线机

### 一、X 射线机的分类和发展

X 射线按能量高低分为：普通 X 射线机，管电压不大于 500kV；高能 X 射线机，能量不小于 1MeV。

#### 1. 普通 X 射线机的分类

##### (1) 按结构分

1) 携带式 X 射线机。

① 管电压不大于 300kV，电流不大于 5mA。

② 结构简单，体积小，重量轻，适合于高空和野外作业。

2) 移动式 X 射线机。

① 管电压可达 500kV，电流较大可达数十毫安（通常有两个焦点，对应大、小两个管电流）。

② 结构复杂，体积和质量大，固定或半固定使用。

##### (2) 按使用性能分

1) 定向 X 射线机。40°左右圆锥角定向辐射，适用定向单张拍片。

2) 周向 X 射线机。（平耙、锥耙）360°周向辐射，适用环焊缝周向曝光。

3) 管道爬行器。

##### (3) 按绝缘介质分

1) 变压器油绝缘。主要在移动式 X 射线机上采用。

2) SF<sub>6</sub> 气绝缘。主要在携带式 X 射线机上采用。

##### (4) 按频率分

1) 工频（50 ~ 60Hz）。对应油绝缘 X 射线机。

- 2) 变频 (300 ~ 800Hz)。对应气绝缘 X 射线机。
- 3) 恒频 (约 200 Hz)。对应气绝缘 X 射线机。

## 2. 高能 X 射线机的分类

- 1) 电子感应加速器, 其结构为交变脉冲电流、电磁铁和激磁线圈、环形真空管、电子枪、X 射线靶及真空泵。
- 2) 电子直线加速器, 其结构为磁控管-微波源、波导管、电子枪、X 射线靶及真空泵。
- 3) 电子回旋加速器, 其结构为高频交变电源、D 型盒、电子枪、X 射线靶及真空泵。

## 二、X 射线管

### 1. X 射线管的分类

- (1) 按外壳材料分为: 玻璃管和陶瓷管。
- (2) 按射线辐射角分为: 定向管、周向管 (锥靶和平靶: 平靶散热效果好, 拍片时焊缝投影倾斜变形, 纵向裂纹可能漏检)。
- (3) 按特殊使用性能分为: 微焦点管、棒阳极管、软 X 射线管及脉冲 X 射线管。

### 2. X 射线管的结构

#### (1) 阴极

- 1) 灯丝。作用: 发射电子; 材料: 钨丝 (发射效率高, 不易损坏); 形状: 圆焦点 (盘香形), 线焦点 (螺管形)。

- 2) 阴极头。作用: 聚集电子; 材料: 铜。

#### (2) 阳极

- 1) 阳极靶。作用: 接受高速电子的轰击, 动能约 1% 转换为 X 射线 ( $\eta = K_i ZV$ ), 99% 转化为热能; 材料: 钨熔点高 (3387°C), 原子序数大 ( $Z = 74$ ), 转换效率高; 软 X 射线管常选用钼, 其熔点为 2600°C, 原子序数为  $Z = 42$ 。

- 2) 阳极体。作用: 支撑靶面、传送靶上的热量; 材料: 无氧铜 (导热率高)。

- 3) 阳极罩。作用: 吸收散乱射线和二次电子 (轰击阳极靶产生); 材料: 通常用钢、钨 (提高吸收散乱射线效率), 如安装铍窗口 (可透过更多的软 X 射线)。

#### (3) 阳极的冷却方式

- 1) 辐射散热。阳极体尾部装散热片 (或风扇), 用于携带式 X 射线机。
- 2) 冲油冷却。阳极体为空腔, 可用外循环油通过空腔冷却, 用于移动式 X 射线机。

- 3) 旋转阳极冷却。阳极高速旋转增加了散热面 (相当于静止阳极靶的十倍电流), 用于大电流医疗用 X 射线机 (几百毫安)。

#### (4) 外壳

1) 作用。保持真空度  $10^{-7} \sim 10^{-6}$  mmHg ( $1.33 \times 10^{-5} \sim 1.33 \times 10^{-4}$  Pa)。

2) 材料。耐高温的石英玻璃。

### 3. 金属陶瓷管

20世纪70年代开发出性能优越的金属陶瓷管，具有以下优点：

1) 机械性能好，抗震性强，不会破碎。

2) 管内真空度高 ( $10^{-9} \sim 10^{-8}$  mmHg)，电性能好，寿命长（约为玻璃管的1.2倍）。

3) 陶瓷绝缘性能好，管子尺寸小于玻璃管（250kV以上的X射线管）。

4) 容易焊装铍窗口。

### 4. 特殊用途的X射线管

1) 周向辐射X射线管（平靶和锥靶）：工作效率高。

2) 小焦点X射线管：检测灵敏度高。

3) 棒阳极X射线管：可对小直径焊缝进行周向检测。

### 5. X射线管的技术性能

(1) 阴极特性 在一定的管电压下，在阴极的工作温度范围内，较小的温度变化就会引起管电流较大的变化，如图3-2-1所示。

(2) 阳极特性 工作在饱和区的X射线管，要改变管电流，只有改变灯丝的加热电流（即改变灯丝的温度），如图3-2-2所示。

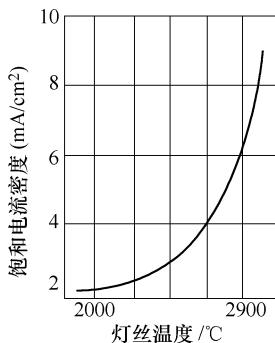


图3-2-1 管电流与灯丝温度的关系曲线

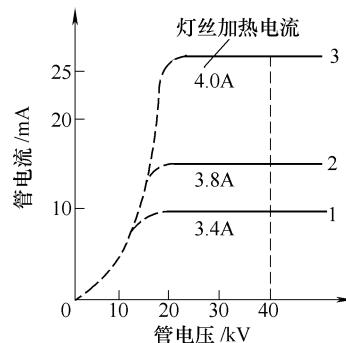


图3-2-2 X射线管电流与管电压的关系曲线

#### (3) X射线管的管电压

1) 管电压：X射线管承载的最大峰值电压，用kV<sub>p</sub>表示。

2) 有效管电压： $U_{\text{有效值}} = 0.707 U_{\text{峰值}}$ 。

3) 管电压越高，发射的X射线能量越高，穿透能力就越强。

#### (4) X射线管的焦点

1) 实际焦点。阳极靶被电子轰击的部分（焦点大，散热好；焦点小，几何不清晰度高）。

2) 有效焦点。实际焦点垂直于管轴线上的正投影 (检测机说明书提供的焦点尺寸就是有效焦点)。

3) 有效焦点的形状。圆焦点 (用直径表示)、长方焦点 [用 (长 + 宽) / 2 表示]、正方形焦点 (用边长表示)。

(5) 辐射场强度的分布

1) 阴极侧强度比阳极侧强, 大约  $30^{\circ}$  辐射角处射线强度最强。

2) 阴极侧软射线成分多, 照相黑度和阳极侧差不多。

(6) X 射线管的真空度 ( $10^{-7} \sim 10^{-6}$  mmHg)

1) 训机目的: 提高 X 射线管的真空度, 稳定工作。

2) 训机方法: 低 mA, 从低 kV 逐渐升到高 kV。

3) X 射线管工作时, 管内存在吸气和放气两个过程, 一是高速运动的电子与 X 光管内的空气分子碰撞, 使其电离, 电离形成的正、负离子在加速电场中分别向阴阳极移动而被吸收, 称为吸气过程; 另一过程是, 随着温度的提高, 管子内壁吸附的气体被逐步地释放出来, 称为放气过程。吸气过程使真空度提高, 放气过程使真空度降低, 当两个过程达到平衡时, 就决定了 X 射线管的真空度。

(7) X 射线管的寿命

1) 定义: X 射线管辐射剂量率降为初始值的 80% 的时限 (由于灯丝发射电子的能力降低)。

2) 玻璃管寿命 400h, 陶瓷管寿命 500h。

3) 保证寿命的措施:

- ① 送高压前灯丝预热活化。
- ② 最高管电压控制在 90% 以内。
- ③ 使用中阳极即时冷却。
- ④ 严格训机。

### 三、X 射线机的电气原理

通常 X 射线机由四部分组成: 高压部分、冷却部分、保护部分和控制部分。

#### 1. 高压部分

1) 高压发生电路。X 射线管实际上是一个特殊的二极管, 工作时管子的两个极需要加上直流高压才能产生 X 射线, 因此必须用二极管整流电路来达到这一目的。常用的二极管整流电路有: 半波整流、全波整流、倍压整流及恒直流四种。

2) 高压部分的部件。X 射线机的高压部分包括 X 射线管、高压发生器 (高压变压器、灯丝变压器、高压整流管和高压电容) 及高压电缆等。

① 高压变压器 (高压包)。高压变压器的作用是将输入的电源电压 (通常是 220V) 用变压器提升到几百 kV。它的特点是变压器的次级线圈匝数多, 线径细 (管电流只有几毫安), 层间绝缘要求高。其层间绝缘材料油机用电容纸, 气机用聚

酯薄膜或聚压胺薄膜。

② 灯丝变压器。灯丝变压器的作用是将输入的电源电压（通常是 220V）用变压器降低到十几伏。其特点是次级线圈匝数少，线径粗（灯丝电流有十几安），串接在高压回路里，因此层间绝缘要求高。

③ 整流管。整流管的作用是将交流转换为直流。其特点是耐压级别高，有玻璃整流管（尺寸较大）和硅堆（体积小）两种。

④ 电容。电容作用是在倍压线路里使用，储存能量达到倍压的目的。其特点是耐压级别高，采用金属纸介电容。

⑤ 高压电缆。高压电缆作用是连接高压发生器和射线机头（移动式 X 射线机）。由七部分构成，即保护层、金属网层、半导体层、主绝缘层、同心线、薄绝缘层及电缆头。

## 2. 冷却部分

冷却是保护 X 射线机正常工作和长期使用的关键。冷却不好，会造成 X 射线管阳极过热，靶面烧损；X 射线管真空度下降、击穿损坏，还会导致高压变压器过热，绝缘性能变差，线圈击穿烧坏。由于上述原因，及时冷却可以保证 X 射线机的使用寿命。

冷却的方法主要有循环油自冷（携带式油绝缘机）、强制风冷（携带式气绝缘机）、循环油外冷（移动式油绝缘机）。为确保冷却能够正常进行，在主控线路里串接了冷却正常运行的开关（温度继电器开关、油通开关、水通开关），当出现异常时，上述开关断开，X 射线机高压自动切断，起到保护 X 射线管的作用。

## 3. 保护部分

保护系统是为了确保 X 射线机正常工作和人身安全而进行的必要设置。主要包括：短路保护、阳极冷却的保护、X 射线管过载保护、零位保护、机头气压保护及接地保护。

## 4. 控制部分

控制系统是指 X 射线管外部工作条件的总控制部分，主要包括管电压的调节、管电流的调节以及各种操作指示。

# 四、X 射线机的主要技术条件

## 1. 电器性能的一般要求

- 1) 输入电流电压波动不应超过额定值  $\pm 10\%$ ，输出电压波动应不大于  $\pm 2\%$ 。
- 2) 计时器误差应在 5% 之内。
- 3) 温度继电器的整定值为  $(60 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。
- 4) 低压电路绝缘电阻应大于  $2\text{M}\Omega$ 。
- 5) 接地电阻应不大于  $0.5\Omega$ 。
- 6)  $\text{SF}_6$  的气压低于  $0.34\text{ MPa}$  ( $20^\circ\text{C}$ ) 时高压应断开。

7) 过电流、过电压超过规定值应切断高压。

## 2. 使用性能的一般要求

1) X射线机的穿透能力不低于规定值。

2) 透照灵敏度不低于1.8%。

3) 辐射场不允许有缺圆。

4) 允许漏射线剂量率符合要求。

# 五、X射线机的使用和维护

## 1. X射线机的操作程序

1) 通电前的准备。

① 正确可靠连接电源线、电缆线。

② 检查确认电源电压。

③ 控制箱可靠接地。

2) 通电后的检查。

① 控制箱电源指示灯亮。

② 冷却系统工作正常。

3) 训机。

4) 曝光准备。

① 管电压预置。油绝缘机调到零位，气绝缘机预置到规定数值。

② 管电流预置。油绝缘机调到零位。

③ 曝光时间预置。曝光时间预置到规定数值。

5) 曝光。

① 按下高压开关。

② 油绝缘机均匀调节管电压和管电流到规定数值。

③ 曝光过程中若有异常，必须立即切断高压，认真检查并分析原因。

6) 曝光结束。油绝缘机均匀调节管电压和管电流到零位。

## 2. X射线机使用的注意事项

1) 认真训机，训练方法按说明书要求进行。

2) 可靠接地。

3) 检查电源电压波动值。

4) 灯丝预热。

5) 可靠有效冷却。

6) 间歇时间。

## 3. X射线机的维护

1) 存放环境符合要求。

2) 搬运、运输皮面剧烈震动。

- 3) 保持设备清洁。
- 4) 保持各种连线及接头处于良好状态。
- 5) 检查机头是否漏油漏气。

## 第二节 $\gamma$ 射线机

### 一、 $\gamma$ 射线源的主要特征参数

#### 1. 放射性活度

$\gamma$  射线源在单位时间内发生的衰变数。单位贝可，符号为 Bq。1Bq 表示为 1s 的时间内有一个原子核发生衰变。 $1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{Bq}$ 。

#### 2. 放射性比活度

单位质量放射源的放射性活度。单位为 Bq/g。对于同一种  $\gamma$  射线源，放射性活度越大，放出  $\gamma$  射线 ( $\gamma$  光子) 越多。对于不同种  $\gamma$  射线源，不能进行类似比较。

### 二、 $\gamma$ 射线检测设备的特点

#### 1. $\gamma$ 射线检测设备的优点

- 1) 检测厚度大，穿透能力强。对钢工件而言，400kV X 射线机最大穿透厚度仅为 100 mm 左右，而 Co60 $\gamma$  射线检测机最大穿透厚度可达 200mm。
- 2) 体积小，重量轻，不用水、电，特别适用于野外作业和在用设备的检测。
- 3) 效率高，对环和球罐可进行周向曝光和全景曝光。同 X 射线机相比大大提高效率。
- 4) 可以连续进行，且不受温度、压力、磁场等外界条件影响。
- 5) 设备故障率低，无易损部件。
- 6) 与同等穿透率的 X 射线机相比，价格低。

#### 2. $\gamma$ 射线检测设备的缺点

- 1) 射线源都有一定的半衰期，有些半衰期较短的射源，如 Ir192 更换频繁，给使用带来不便。
- 2) 辐射能量固定，无法根据试件厚度进行调节，当源穿透厚度与能量不适应时，灵敏度下降严重。
- 3) 放射强度随时间减弱，无法进行调节，当源强度较小时，曝光时间过长会感到不方便。
- 4) 固有不清晰度比 X 射线大，用同样的器材及透照技术条件，其灵敏度低于 X 射线机。
- 5) 对安全防护要求高，管理严格。

### 三、 $\gamma$ 射线检测设备的分类与结构

#### 1. $\gamma$ 射线检测设备分类

按所装放射同位素不同，可分为  $\text{Co60}\gamma$  射线检测机、 $\text{Cs137}\gamma$  射线检测机、 $\text{Ir192}\gamma$  射线检测机、 $\text{Se75}\gamma$  射线检测机、 $\text{Tm170}\gamma$  射线检测机及  $\text{Yb169}\gamma$  射线检测机。

按机体结构可分为直通道形式和 S 通道形式。

按使用方式可分为便携式、移动式、固定式及管道爬行器。

#### 2. $\gamma$ 射线检测设备的结构

$\gamma$ 射线检测设备大体可分为五个部分：源组件、检测机机体、驱动机构、输源管和附件。

- 1) 源组件。源、包壳（双层：不锈钢和铝）、源鞭（不锈钢）。
- 2) 机体。不锈钢外壳及贫化铀内衬，S 通道和直通道两种，安全锁。
- 3) 驱动机构。摇动手柄、控制缆索和导管。
- 4) 输源管。不大于三根（包塑软管）。
- 5) 附件。
  - ① 准直器（限制射线辐射方向，如单张拍片）。
  - ② 定向架（固定手柄等）。
  - ③ 曝光计算尺（计算曝光时间）。
  - ④ 换源器（换源专用）。
  - ⑤  $\gamma$ 射线监测仪、个人剂量笔及音响报警器（安全监测）。

### 四、 $\gamma$ 射线机的操作

#### 1. $\gamma$ 射线检测设备设计制造时保证安全操作的规定程序

专用钥匙→开安全锁→选择环（连接状态）→打开端盖→卸掉端盖→阴阳接头连接好→选择环（工作状态）→源可以输出。

#### 2. 使用 $\gamma$ 射线机应注意的问题

- 1) 使用  $\gamma$ 射线机之前，必须首先详细阅读随机使用说明书。
- 2) 使用  $\gamma$ 射线机的操作人员首先须经当地环保部门进行防护专业知识培训，持证上岗。
- 3) 操作  $\gamma$ 射线机时，现场必须有环境剂量监测仪监测，不允许在没有剂量仪情况下工作，以免发生超剂量事故；操作人员必须随带射线剂量报警仪监测，且至少有两台以上报警仪在现场监测复核校对。
- 4) 严禁带故障操作，发现问题及时与制造厂联系，待修复正常后使用。

#### 3. $\gamma$ 射线机操作时要注意的关键点

- 1)  $\gamma$ 射线机安装时传输机构的控制缆要铺直（弯曲半径不小于 1m）；输源管弯曲半径不能太小（直通道不小于 500mm，S 通道不小于 300mm），多根连接使用

时，一般不得超过三根。

2) 机体的输入端一定要确保控制缆阳接头和源辫连接牢固，即源辫与控制缆球接头连接好后，可用手握住控制缆套管向后拉，检查是否能拉脱。

3) 机体的输出端一定要确保与输源导管接头连接可靠，可用手握住输源导管往后拉，检查是否能拉脱。

4) 操作人员转动控制缆摇柄（顺时针方向）时应快速轻转，严禁猛劲狠转造成传输控制缆损坏。如摇手柄有困难，则应反向摇动，将源收回机头内，查明原因后再摇源。

5) 当一次曝光完毕后，摇动传输机构使射线源回位到检测机内（用射线剂量报警仪检查，应停止响声）。

6) 在离开拍片现场时，还应用剂量仪对现场环境再次检查，剂量是否在本底范围内，同时测量 $\gamma$ 射线机侧面，确认射线源是否在容器安全位置。

#### 4. 换源

$\gamma$ 射线机换源通常可以将设备运回厂家完成，有倒源罐（换源器）的企业可以自行完成。

### 五、 $\gamma$ 射线机的维护和故障排除

#### 1. $\gamma$ 射线机的维护

$\gamma$ 射线机的维护主要是对传输系统（摇柄、输源导管及缆索）进行维护，采用柴油经常清洗泥沙，齿轮应经常添加润滑剂。输源管接头内应避免灰尘和砂粒，进行经常性擦洗。每次使用完毕后盖好两端“封堵”。

#### 2. 现场故障排除

排除故障时，必须佩带射线剂量报警仪，以防止排除过程中接受超过规定限额的照射。表3-2-1所列为 $\gamma$ 射线检测设备的操作故障及排除方法。

表3-2-1  $\gamma$ 射线检测设备的操作故障及排除方法

故障类型	原因分析	排除故障
$\gamma$ 源输出时卡堵	1. 输源导管没按规定放置，有曲率半径小于规定的现象 2. 输送软轴导管没拉直 3. 曝光头与输源导管连接不良	迅速收回，分析原因、仔细操作
$\gamma$ 源收回时卡堵	1. 输源导管由于现场条件突然变化，发生曲率半径小于规定值的情况 2. 曝光头与输导管连接不良	1. 来回摇动手柄、试图收回 2. 在短时间内上前把输源导管拉直，再收回
摇动圈数达到规定圈数以上，突感摇柄手很轻松，发现金属软轴与齿轮脱开	输入和输出端（特别是输出端）软管接头与 $\gamma$ 射线检测机接头没接好，摇动手柄时软管接头脱落，金属软轴导向外面	1. 短时间内拆开摇柄与输送导管连接处 2. 用手迅速把金属软轴拉回

(续)

故障类型	原因分析	排除故障
γ射线源掉在输源管内 (注意整个事故处理过程必须在监测仪监测下进行)	1. 违反操作规程, 软轴球头未与源辫挂钩 2. γ射线机安全锁损坏, 人为将γ射线源推出在输源管内	1. 将γ射线机前端抬高 2. 将γ射线曝光头与探伤物体松开 3. 将前端软管抬高抖动, 使源回位到检测机内

### 3. 事故发生后的应急处理

- 1) 立即疏散公众, 并保护控制现场。
- 2) 及时向领导汇报, 立即通知厂家, 分析原因。
- 3) 采取善后措施, 控制事态发展。
- 4) 在应用工作现场模拟测量结果, 估算个人剂量。
- 5) 限制排除事故人员受照剂量, 有效排除事故。
- 6) 做好事故记录。
  - ① 事故发生的时间和地点。
  - ② 事故经过 (包括源与人的相对位置, 受照时间等)。
  - ③ 事故原因和处理措施。
  - ④ 剂量估算。

### 4. γ射线源的储存

- 1) γ射线源的存放场所, 不得设置在人员密集和道路旁。通常可建地下或半地下库。
- 2) 存放源的场所必须经当地环保、公安及卫生三个部门进行环境评估、审定批准。
- 3) 源应放在专用的贮藏箱内, 不得与易燃、易爆腐蚀性物品一起存放。
- 4) 施工现场不得存放射线源, 工作完毕应及时把γ射线机运送到贮存室内。
- 5) 射源存放后, 应指定专人保管, 定期检测, 严格实行领用制度, 射源存放场所必须设有两道安全锁的防盗门。

## 第三节 射线胶片

### 一、射线胶片的结构与特点

射线胶片在胶片片基的两面均涂布感光乳剂层 (一般感光胶片单面), 目的是增加卤化银含量以吸收较多的穿透能力很强的射线, 从而提高胶片的感光速度, 增加黑度, 其构造如图 3-2-3 所示。

(1) 片基 是感光乳剂层的支持体, 起骨架作用, 厚度约为 0.175 ~ 0.20mm,

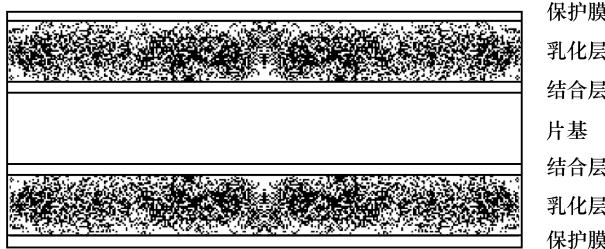


图 3-2-3 X 光胶片的构造

大多采用醋酸纤维或聚酯材料。聚酯片基较薄，韧性好，强度高，通常采用淡蓝色。

(2) 结合层 由明胶、水、活化剂（润湿剂）及树脂（防静电剂）组成，其作用是使感光剂层和片基牢固地黏结在一起，防止感光剂层在冲洗时脱落。

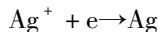
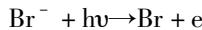
(3) 感光乳剂层 由溴化银微粒在明胶中的混合体构成。加入少量（不大于5%）碘化银，可改善感光性能。此外，还加入防灰剂、稳定剂和坚膜剂。

(4) 保护层 防止感光剂层受到污损和摩擦，其主要成分是明胶、坚膜剂、防腐剂和防静电剂。

## 二、潜影

(1) 概念 胶片受到照射时，在感光乳剂层中会产生眼睛看不到的影像。

(2) 形成过程 是银离子接受电子还原成银的过程。



(3) 潜影衰退 潜影形成后，如相隔很长时间才显影，得到的影像比及时冲洗的淡。实际上是银又被空气氧化而变成银离子的逆变过程。胶片所处的环境温度越高，湿度越大，则氧化作用越加剧，潜影的衰退越厉害。

## 三、黑度 $D$

黑度  $D$  定义为照射光强  $L_0$  与穿过底片的透射光强  $L$  之比的常用对数值

$$D = \lg \frac{L_0}{L} \quad (3-2-1)$$

## 四、射线胶片特性

射线胶片的感光特性主要有：感光度（ $S$ ），灰雾度（ $D_0$ ），梯度（ $G$ ），宽容度（ $L$ ），最大密度（ $D_{\max}$ ），这些特性可在胶片特性曲线上定量表示。

### 1. 胶片特性曲线

胶片特性曲线是表示相对曝光量（ $\lg E$ ）与底片黑度（ $D$ ）之间关系的曲线。

在特性曲线图中，横坐标表 X 射线曝光量的对数值，纵坐标表示胶片显影后所得到的相应黑度。

1) 增感型胶片的特性曲线 (图 3-2-4)。

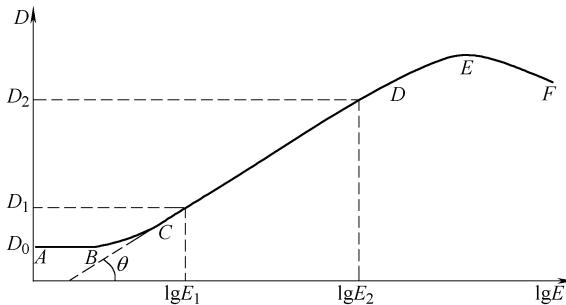


图 3-2-4 增感型胶片的特性曲线

① 曝光迟钝区 (AB)。曝光量增加,  $D$  不变。

② 曝光不足区 (BC)。曝光量增加,  $D$  缓慢增加。

③ 曝光正常区 (CD)。 $D = \gamma \Delta \lg E$  (曝光量) (射线检测区)。

④ 曝光过渡区 (DE)。曝光量增加,  $D$  增加较小, 到  $E$  点时, 斜率为 0。

⑤ 反转区 (EF)。也称负感区, 曝光极端过渡时,  $D$  反而减小。

2) 非增感型胶片的特性曲线 (图 3-2-5)。

① 前三个区 (曝光迟钝区、曝光不足区及曝光正常区) 同增感型胶片的特性曲线。

② 第四区 (曝光过渡区) 观片灯看不到。

③ 第五区 (反转区) 不明显。

④ 在常用黑度范围内曲线呈 J 形。

## 2. 胶片特性参数

1) 感光度 ( $S$ )。以达到净黑度 (不包括胶片灰雾度) 为 2.0 时所用的曝光量  $K_s$  的倒数作为该胶片的感光度。

$$S = \frac{1}{K_s} \quad (3-2-2)$$

射线胶片感光度与乳剂层中的含银量、明胶成分、增感剂含量以及银盐颗粒大小、形状有关, 感光度的测定结果还受到射线能量、显影条件 (配方、温度和时

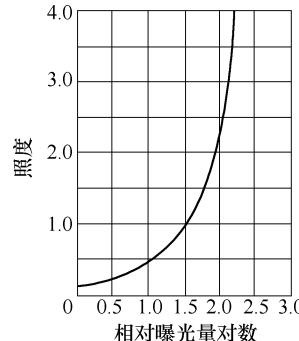


图 3-2-5 非增感型胶片的特性曲线

间) 以及增感方式的影响。对于同一类型的胶片, 银盐颗粒越粗,  $S$  越高。

2) 灰雾度 ( $D_0$ )。未经曝光的胶片经显影和定影处理后也会有一定的黑度, 此黑度称为灰雾度 ( $D_0$ )。

灰雾度小于 0.30 时, 对射线底片影像影响不大; 灰雾度过大会损害影像对比度和清晰度, 降低灵敏度。

灰雾度由片基光学密度和胶片乳剂层经暗室处理后的固有光学密度组成。感光度高的胶片灰雾度大, 保存时间长和保存不当会使灰雾度增大, 暗室处理条件也会影响灰雾度。

3) 梯度 ( $G$ 、 $\gamma$ )。胶片的梯度是指胶片对不同曝光量在底片上显示不同黑度差的固有能力。可用胶片特性曲线上某点切线的斜率表示, 又称胶片反差系数  $\gamma$ 。用特性曲线上两点的连线的斜率来表示平均梯度。以特性曲线上底片净黑度 1.5 和 3.5 两点连线的斜率作为胶片的平均梯度。

增感型胶片 (适宜与荧光增感屏联用的胶片) 的  $G$  值在较低的黑度范围内, 随黑度的增大而增大, 但当黑度超过一定数值, 黑度再增大,  $G$  值反而减小。在射线照相应用范围内, 非增感型胶片的  $G$  值随黑度的增大而增大。

4) 宽容度 ( $L$ )。宽容度是指胶片有效密度范围相对应的曝光范围。在胶片特性曲线上, 用与黑度为许用下限值和上限值 (如 1.5 和 3.5) 相应的相对曝光量的倍数表示, 即

$$L = 10^{\lg E_2 - \lg E_1} = \frac{E_2}{E_1} \quad (3-2-3)$$

可见, 梯度大的胶片宽容度小。

## 五、胶片系统的分类

所谓胶片系统是指包括射线胶片、增感屏 (材质、厚度) 和冲洗条件 (方式、配方、温度及时间) 组合。胶片分类所依据的成像特性, 是指胶片的四个特征参数, 即  $D = 2.0$  和  $D = 4.0$  时的最小梯度  $G_{\min}$ ,  $D = 2.0$  时的最大颗粒度  $(\sigma_0)_{\max}$ , 及  $D = 2.0$  时的最大梯度噪声比  $(G/\sigma_0)_{\max}$ 。

工业射线胶片系统的分类为 T1、T2、T3 及 T4 四个类型, T1、T2 最大颗粒度较细, T3、T4 最大颗粒度较细次之。

## 六、胶片的使用和保管

### 1. 胶片的选用

- 1) 如需要较高的射线照相质量, 选用号数较小的胶片。
- 2) 如需要缩短曝光时间, 选用号数较大的胶片。
- 3) 当工件厚度较小、工件材料等效系数较低或射源线质较硬时, 选用号数较小的胶片。

4) 当工作环境温度较高时,宜选用抗潮性能较好的胶片,在工作环境比较干燥时,宜选用抗静电感光性能较好的胶片。

## 2. 胶片的使用与保存

- 1) 不可接近氨、硫化氢、煤气、乙炔和酸等有害气体,否则会产生灰雾。
- 2) 裁片时不可取掉衬纸,以防划伤胶片;不要多层胶片同时裁切,防止轧刀,擦伤胶片。
- 3) 装片和取片时,胶片与增感屏应避免摩擦,否则会擦伤,显影后底片上会产生黑线。还应避免胶片受压受曲受折,会在底片上出现新月形折痕。
- 4) 开封后的胶片和装入暗袋的胶片要尽快使用,短时用不完时,应采取干燥措施。
- 5) 胶片应保存在适宜的温度(10~15℃)和湿度(55%~65%)环境中。湿度高会使胶片与衬纸或增感屏粘在一起,空气过于干燥容易使胶片产生静电感光。
- 6) 胶片应远离热源和射线的影响,在暗室红灯下操作不宜距离过近,暴露时间不宜过长。
- 7) 胶片应竖放,避免受压。

## 第四节 射线照相辅助器材

常用的射线照相辅助设备器材黑度计(光学密度计)、增感屏、像质计、暗袋、标记带(标记)、屏蔽铅板及中心指示器等。

### 一、黑度计

黑度计又名光学密度计,或简称密度计。射线照相底片的黑度均用透射式黑度计测量。早期使用的光电直读式黑度计是模拟电路指针显示黑度计,由于误差大,如今已很少使用。目前广泛使用的是数字显示黑度计,其误差小。

黑度计的校准(JB/T 4730—2005规定)要求:

- 1) 可测得最大黑度应不小于4.5,测量值的误差应不超过 $\pm 0.05$ 。
- 2) 黑度计至少每六个月用标准黑度片校验一次(属于自校的仪器)。
- 3) 标准黑度片应每两年送计量单位检定一次(属于强检)。

黑度计校验程序:

- 1) 接通电源,预热10min左右。
- 2) 用标准黑度片校准黑度计零点和其他各点(测三次,求平均值)。
- 3) 计算黑度片与黑度计的误差。
- 4) 要求 $D \leq 4.5$ 的各点的测量误差均不大于 $\pm 0.05$ ,否则黑度计应校准、修理或报废。

## 二、增感屏

目前常用的增感屏有金属增感屏、荧光增感屏和金属荧光增感屏三种。使用金属增感屏所得到的底片质量最好，金属荧光增感屏次之，荧光增感屏最差，但增感系数以荧光增感屏最高，金属增感屏最低。

### 1. 增感系数 $Q$ (增感因子)

指胶片一定、线质一定和暗室处理条件一定时，得到同一黑度底片，不用增感屏的曝光量  $E_0$  与使用增感屏时的曝光量  $E$  之间的比值。即

$$Q = E_0/E \quad (3-2-4)$$

### 2. 金属增感屏

金属增感屏的种类：铅、钨、钽、钼、铜及铁等；金属增感屏的构造与作用如图 3-2-6 所示。

在射线照相中，与胶片直接接触的金属增感屏有两个基本效应：

1) 增感效应。金属屏受到透射射线激发产生二次电子和射线，二次电子与射线能量很低，极易被胶片吸收，从而能增加对胶片的感光作用。

2) 吸收效应。对频率较低的散射线有吸收作用，从而减少散射线引起的灰雾度，提高影像对比度。

### 3. 荧光增感屏

增感系数大，影像模糊，清晰度差，灵敏度低，缺陷分辨率差，细小缺陷易漏检。

### 4. 金属荧光增感屏

具有金属增感屏的吸收作用和荧光增感屏的高增感特性。与非增感型胶片配合使用，像质优于荧光增感屏。

### 5. 增感屏的使用注意事项

- 1) 保持光洁。
- 2) 无损伤无变形。
- 3) 屏片紧贴。
- 4) 屏片之间无物品。
- 5) 防止暗室药液浸蚀。
- 6) 防潮。

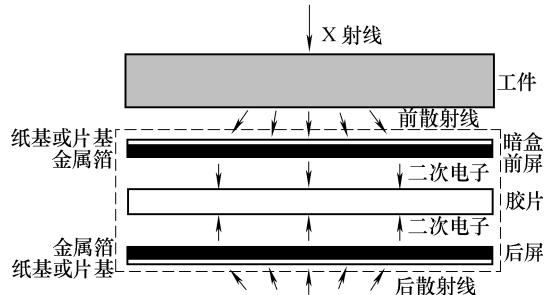


图 3-2-6 金属增感屏的构造与作用

### 三、像质计

像质计是用来检查和定量评价射线底片影像质量的工具，又称影像质量指示器或简称透度计、IQI。

工业射线照相用的像质计有三种类型：金属丝像质计、孔形像质计和槽形像质计。像质计的指示值不等于可以发现的最小缺陷的尺寸。

金属丝像质计按金属丝直径变化规律分：等差数列、等比数列、等径和单丝；按等比数列分：R10 系列、R20 系列；按金属丝材料分：钢像质计、铝像质计、铜像质计和钛像质计等。其结构为七根编号相连接的金属丝为一组。金属丝的长度有 10mm、25mm 和 50mm。金属丝像质计的标志有最大线径号、丝的材料和标准代号，型号包含：1 号（1~7）、2 号（6~12）、3 号（10~16）、4 号（12~18）。

选用金属丝像质计原则：

- 1) 像质计的材质应与试件相同或相近。
- 2) 缺少同材质像质计时，可以用原子序数低的材料代替。

像质计摆放在射线透照区内显示灵敏度较低的部位。透照焊缝时，放在射线源一侧被检区的一端，金属丝横跨焊缝并与焊缝垂直，细丝在被检区的外侧。射线源侧无法放置时可以放在胶片侧，但应做对比试验，并加“F”以示区别。

### 四、其他射线照相器材

- 1) 暗袋（暗盒）。暗袋应经常清理，如发现破损，立即更换。
- 2) 标记。标记应摆放整齐，其在底片上的影像不能相互重叠，并距离被检焊缝边缘至少 5mm。
- 3) 屏蔽铅板。
- 4) 中心指示器。
- 5) 安全防护用品
- 6) 其他小器件。

# 第三章

## 射线照相质量的影响因素

### 一、射线照相灵敏度

所谓射线照相灵敏度，从定量方面来说，是指在射线底片上可以观察到的最小缺陷尺寸或最小细节尺寸，从定性方面来说，是指发现和识别细小影像的难易程度。

灵敏度有绝对与相对之分，在射线照相底片上所能发现的沿射线穿透方向上的最小缺陷尺寸称为绝对灵敏度。此最小缺陷尺寸与射线透照厚度的百分比称为相对灵敏度。

为便于定量评价射线照相灵敏度，常用与被检工件或焊缝的厚度有一定百分比关系的人工结构（如金属丝、孔、槽等组成所谓透度计，又称为像质计）作为底片影像质量的监测工具，由此得到灵敏度称为像质计灵敏度。需要注意的是，底片上显示的像质计最小金属丝直径、孔径或槽深，并不等于工件中所能发现的最小缺陷尺寸，即像质计灵敏度并不等于自然缺陷灵敏度。

### 二、射线照相灵敏度的影响因素

射线照相灵敏度是射线照相对比度（缺陷影像与其周围背景的黑度差）、不清晰度（影像轮廓边缘黑度过渡区的宽度）和颗粒度（影像黑度的不均匀程度）三大要素的综合结果（图 3-3-1 所示）。同时，三大要素又受到不同工艺因素的影响。

#### 1. 射线照相对比度

射线底片上缺陷影像与其周围背景的黑度差称为射线照相对比度，分为主因对比度和胶片对比度。主因对比度是由于工件厚度差引起的射线片上的黑度差，胶片对比度是底片上某一小区域和相邻区域的黑度差。表 3-3-1 所列为影响射

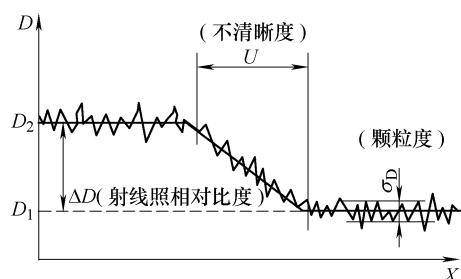


图 3-3-1 射线照相对比度、不清晰度、颗粒度的概念示意

线照相对比度的因素。

表 3-3-1 影响射线照相对比度的因素

射线照相对比度 $\Delta D$ $\Delta D = 0.434\mu G \Delta T / (1 + n)$	
主因对比度 $\Delta I/I = \mu \Delta T / (1 + n)$	胶片对比度 $G = \Delta D / \Delta \lg E$
取决于： a. 缺陷造成的透照厚度 $\Delta T$ (缺陷高度、透照方向) b. 射线的 $\mu$ (或 $\lambda$ ) c. 散射比 $n$ ( $n = I_s/I_p$ )	取决于： a. 胶片类型 (或梯度 $G$ ) b. 显影条件 (配方、时间、温度及搅动) c. 底片黑度 $D$

## 2. 射线照相不清晰度

影像轮廓边缘黑度过渡区的宽度称为射线照相不清晰度。射线照相不清晰度包括几何不清晰度  $U_g$  和固有不清晰度  $U_i$ 。

几何不清晰度是由于 X 射线管焦点或  $\gamma$  射线源都有一定尺寸，所以透照工件时，工件表面轮廓或工件中的缺陷在底片上的影像边缘会产生一定宽度的半影，此半影宽度就是几何不清晰度  $U_g$ ，如图 3-3-2 所示，用式 (3-3-1) 表示

$$U_g = d_f \frac{b}{F - b} \quad (3-3-1)$$

式中  $d_f$ ——焦点尺寸；

$F$ ——焦点至胶片距离；

$b$ ——缺陷至胶片距离。

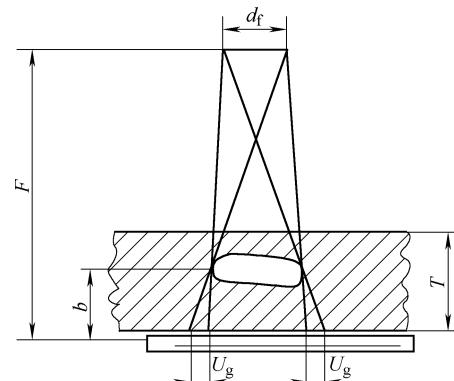


图 3-3-2 工件中缺陷的几何不清晰度

通常技术标准中所规定的射线照相必须满足的几何不清晰度，是指工件中可能产生的最大几何不清晰度  $U_{g\max}$ 。由上式可知，几何不清晰度与焦点尺寸和工件厚度成正比，而与焦点至工件表面的距离成反比。在焦点尺寸和工件厚度给定的情况下，为获得较小的  $U_g$  值，透照时就需要取较大的焦距  $F$ ，但由于射线强度与距离平方成反比，如果要保证底片黑度不变，在增大焦距的同时就必须延长曝光时间或提高管电压，所以对此要综合权衡考虑。

使用 X 射线照相时，由于透照场中不同位置上的焦点尺寸不同，阴极一侧的焦点尺寸较大，因此，相应位置上的几何不清晰度也较大。

固有不清晰度是由照射到射线胶片上的射线在乳剂层中激发出的电子的散射产生的。

表 3-3-2 所列为影响射线照相不清晰度的因素。

表 3-3-2 影响射线照相不清晰度的因素

射线照相不清晰度 $U$	
几何不清晰度 $U_g = d_f L_2 / L_1$	固有不清晰度 $U_i$ $U_i = 0.0013 \times (kV)^{0.79}$
取决于： a. 焦点尺寸 $d_f$ b. 焦点至工件表面距离 $L_1$ c. 工件表面至胶片距离 $L_2$	取决于： a. 射线的 $\mu$ (或 $\lambda$ ) b. 增感屏种类 (Pb、Au、Sb 等) c. 屏 - 片贴紧程度

### 3. 颗粒度

颗粒性是指均匀曝光的射线底片上影像黑度分布不均匀的视觉印象。颗粒度则是根据测微光密度计测出的数据、按一定方法求出的所谓底片黑度涨落的客观量值。观察受到高能量射线照射的快速胶片，不用放大镜，颗粒性就很明显；而对受低能量射线照射的慢速胶片来说，可能要经中度放大才使颗粒性明显。

颗粒性产生原因可归纳为两个方面：一是胶片噪声，相关于银盐粒度和感光速度；二是量子噪声，即光子随机分布的统计涨落，相关于射线能量、曝光量和底片黑度。一般说来，颗粒性随胶片粒度、感光速度及射线能量的增大而增大，随曝光量和底片黑度的增大而减小。

表 3-3-3 所列为影响颗粒度的因素。

表 3-3-3 影响颗粒度的因素

颗粒度 $\sigma_D$	
	$\sigma_D = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{(D_i - \bar{D})^2}{N-1} \right]^{1/2}$
取决于： a. 胶片系统 (胶片型号、增感屏及冲洗条件) b. 射线的 $\mu$ (或 $\lambda$ ) c. 曝光量 ( $H$ ) 和底片黑度 $D$	

# 第四章

## 射线透照工艺

### 一、射线透照工艺的术语和定义

#### 1. 公称厚度 $T$

受检工件的名义厚度，不考虑材料制造偏差和加工减薄。

#### 2. 透照厚度 $W$

射线照射方向上材料的公称厚度。多层透照时，按照厚度为通过的各层材料公称厚度之和。

#### 3. 工件至胶片距离 $b$

沿射线中心测定的工件受检部位射线源侧表面与胶片之间的距离。

#### 4. 射线源至工件距离 $f$

沿射线中心测定的工件受检部位射线源与受检工件近源侧表面之间的距离。

#### 5. 焦距 $F$

沿射线中心测定的射线源与胶片之间的距离。

#### 6. 射线源尺寸 $d$

射线源的有效焦点尺寸。

#### 7. 管子直径 $D_0$

管子的外径。

#### 8. 透照厚度比 $K$

一次透照长度范围内射线束穿过母材的最大厚度与最小厚度之比。

### 二、透照工艺条件的选择

#### 1. 射线源和能量的选择

选择射线源的首要因素是射线源所发出的射线对被检试件具有足够的穿透力。

对 X 射线来说，穿透力取决于管电压。对于  $\gamma$  射线来说，穿透力取决于放射源种类。表 3-4-1 所列为工业 X 射线设备可穿透钢的最大厚度，表 3-4-2 所列为常用  $\gamma$  射线源可穿透钢的厚度范围。

表 3-4-1 工业 X 射线设备可穿透钢的最大厚度

射线能量	高灵敏度法可穿透钢最大厚度/mm	低灵敏度法可穿透钢最大厚度/mm
100kV X 射线	10	16
150kV X 射线	15	24
200kV X 射线	25	35
300kV X 射线	40	60
400kV X 射线	75	100
1MV X 射线	125	150
2MV X 射线	200	250
8MV X 射线	300	350
30MV X 射线	325	450

表 3-4-2 常用  $\gamma$  射线源可穿透钢的厚度范围

源种类	高灵敏度法/mm	低灵敏度法/mm
Se75	14 ~ 40	5 ~ 50
Ir192	20 ~ 90	10 ~ 100
Cs137	30 ~ 100	20 ~ 120
Co60	60 ~ 150	30 ~ 200

注：表中“高灵敏度法”一栏表示用微粒胶片 + 金属箔增感屏，大致相当于 JB/T 4730—2005 标准 B 级和 AB 级；“低灵敏度法”一栏表示用粗粒胶片 + 金属箔增感屏，大致相当于 JB/T 4730—2005 标准 A 级。

X 射线和  $\gamma$  射线的照相灵敏度不同，40mm 以下钢厚度，用 Ir192 $\gamma$  射线透照所得到的像质计灵敏度不如用 X 射线所得到的像质计灵敏度。但对于 40mm 以上的钢厚度而言，两者的像质计灵敏度大致相同。

除了穿透力和灵敏度外，两类设备的其他不同特点也是需要考虑的因素。

#### (1) X 射线机的特点

1) 体积较大，以便携式、移动式及固定式依次增大。

2) 基本费用和维修费用均较大。

3) 能检查 40mm 以上钢厚度的大型 X 射线机成本很高，其发展倾向为移动式而非便携式。

4) X 射线能量可改变，因此，对各种厚度的试件均可使用最适宜的能量。

5) X 射线机可用开关切断，故较易实施射线防护。

6) 曝光时间一般为几分钟。

7) 所有 X 射线机均需电源，有些还需有水源。

#### (2) $\gamma$ 射线源的特点

1) 射源曝光头尺寸小，可用于 X 射线机管头无法接近的现场。

2) 不需电源或水源。

3) 运行费用低。

4) 曝光时间长, 通常需几十分钟, 甚至几小时。

5) 对薄钢试件 (如 5mm 以下), 只有选择合适的放射性同位素 (如 Yb169, Tm170) 才能获得较高的检测灵敏度。

### (3) 选择射线源的原则

1) 对轻质合金和低密度材料, 国内使用 Yb169, Tm176 $\gamma$  射线源很少, 最常用的射线源实际上是 X 射线。

2) 同样, 要透照厚度小于 5mm 的钢 (铁素体钢或高合金钢), 除非允许较低的检测灵敏度, 也要选用 X 射线。

3) 如要对大批量的工件实施射线照相, 还是用 X 射线为好, 因为曝光时间较短。

4) 对厚度大于 150mm 的钢, 即使用最大的  $\gamma$  射线源, 曝光时间也是很长的, 如工件批量大, 宜用兆伏级高能 X 射线。

5) 对厚度为 50 ~ 150mm 的钢, 如果使用正确的方法, 用 X 射线和  $\gamma$  射线可得到几乎相同的像质计灵敏度, 但裂纹检出率还是有差异的。

6) 对厚度为 5 ~ 50mm 的钢, 用 X 射线总可获得较高的灵敏度,  $\gamma$  射线源的选用则应根据具体厚度和所要求的检测灵敏度选择 Ir192 或 Se75, 并应考虑配合适当的胶片类别。

7) 对某些条件困难的现场透照工作, 体积庞大的 X 射线机使用不方便可能成为主要问题。

8) 只要与容器直径有关的焦距能满足几何不清晰度要求, 环形焊缝的透照应尽量选用圆锥靶周向 X 射线机做内透中心法垂直全周向曝光, 以提高工效和影像质量。对直径较小的锅炉联箱管或其他管道焊缝, 也可选用小焦点 (0.5mm) 的棒阳极 X 射线管或小焦点 (0, 5 ~ 1mm)  $\gamma$  射线源做 360°周向曝光。

9) 选用平面靶周向 X 射线机对环焊缝做内透中心法倾斜全周向曝光时, 必须考虑射线倾斜角度对焊缝中纵向面状缺陷的检出影响。

## 2. X 射线能量的选择

1) 在满足穿透力的前提下, 选择能量较低的 X 射线, 以保证射线照相灵敏度。

2) 在有透照厚度差的情况下, 适当提高管电压, 降低对比度, 得到合适的透照厚度宽容度。

3) 在满足射线照相灵敏度和黑度不变的前提下, 适当提高管电压可缩短曝光时间, 提高工作效率。

4) 图 3-4-1 所示为不同透照厚度允许 X 射线最高透照管电压。

## 3. 焦距的选择

在满足几何不清晰度的前提下, 选择合适的焦距, 以保证工作效率和有效照长度。在我国现行的 JB/T 4730—2005 标准中, 规定射线源至工件距离  $f$  与焦点尺寸

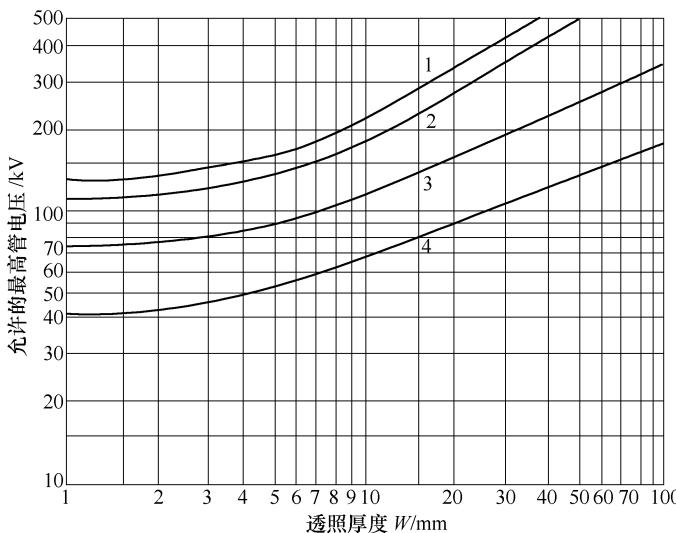


图 3-4-1 不同透照厚度允许的 X 射线最高透照管电压

1—铜及铜合金 2—钢 3—钛及钛合金 4—铝及铝合金

$d_f$  和工件至胶片距离  $b$  应满足以下关系：

A 级射线检测技术： $f \geq 7.5 d_f \cdot b^{2/3}$ ， $U_g \leq (2/15) b^{1/3}$ 。

AB 级射线检测技术： $f \geq 10 d_f \cdot b^{2/3}$ ， $U_g \leq (1/10) b^{1/3}$ 。

B 级射线检测技术： $f \geq 15 d_f \cdot b^{2/3}$ ， $U_g \leq (1/15) b^{1/3}$ 。

在实际工作中，焦点的最小值通常由诺模图查出。如图 3-4-2、图 3-4-3 所示。

#### 4. 曝光量的选择与修正

(1) 曝光量的推荐值 射线透照曝光量为射线强度和曝光时间的乘积。对于 X 射线，曝光量为管电流与曝光时间的乘积，单位为 mA · min；对于  $\gamma$  射线，曝光量为  $\gamma$  射线源活度与曝光时间的乘积，单位为 Ci · min。曝光量不只影响影像的黑度，也影响影像的对比度、颗粒度以及信噪比，从而影响底片上可记录的最小细节尺寸。为了射线照相质量，JB/T 4730—2005 对曝光量做出了明确规定：

1) X 射线照相，当焦距为 700mm 时，曝光量的推荐值为：A 级和 AB 级射线检测技术不小于 15mA · min；B 级射线检测技术不小于 20mA · min。当焦距改变时可按平方反比定律对曝光量的推荐值进行换算。

2) 采用  $\gamma$  射线源透照时，总的曝光时间应不少于输送源往返所需时间的十倍。

#### (2) 曝光量的修正

1) 利用曝光因子的曝光量修正。

当射线透照焦距发生改变时，为了得到相同的底片黑度，必须对曝光量进行修正，对于 X 射线，在同一管电压下，有

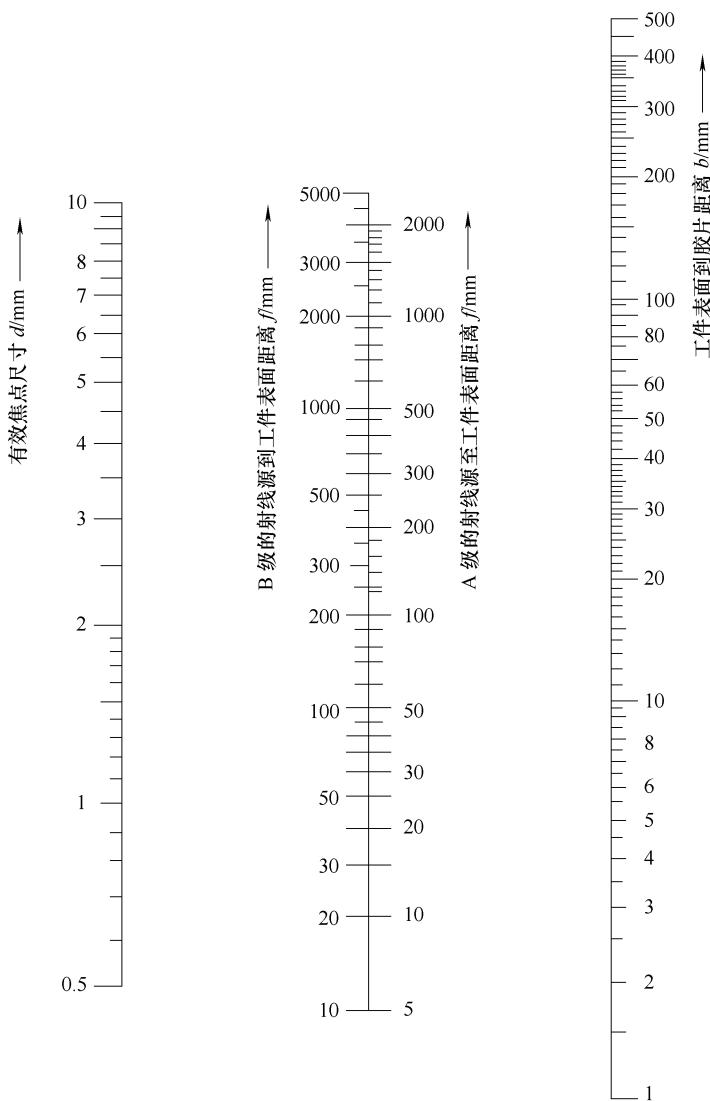


图 3-4-2 A 级和 B 级射线检测技术确定焦点至工件表面距离的诺模图

$$\frac{I_1 t_1}{F_1^2} = \frac{I_2 t_2}{F_2^2} = \psi \quad (3-4-1)$$

对于同一个  $\gamma$  射线源，有

$$\frac{A_1 t_1}{F_1^2} = \frac{A_2 t_2}{F_2^2} = \psi \quad (3-4-2)$$

式 (3-4-1) 和式 (3-4-2) 中的  $\psi$  称为曝光因子。

2) 利用胶片特性曲线进行曝光量修正。

① 底片黑度改变的曝光量修正。在其他条件保持一定的情况下，如需改变底

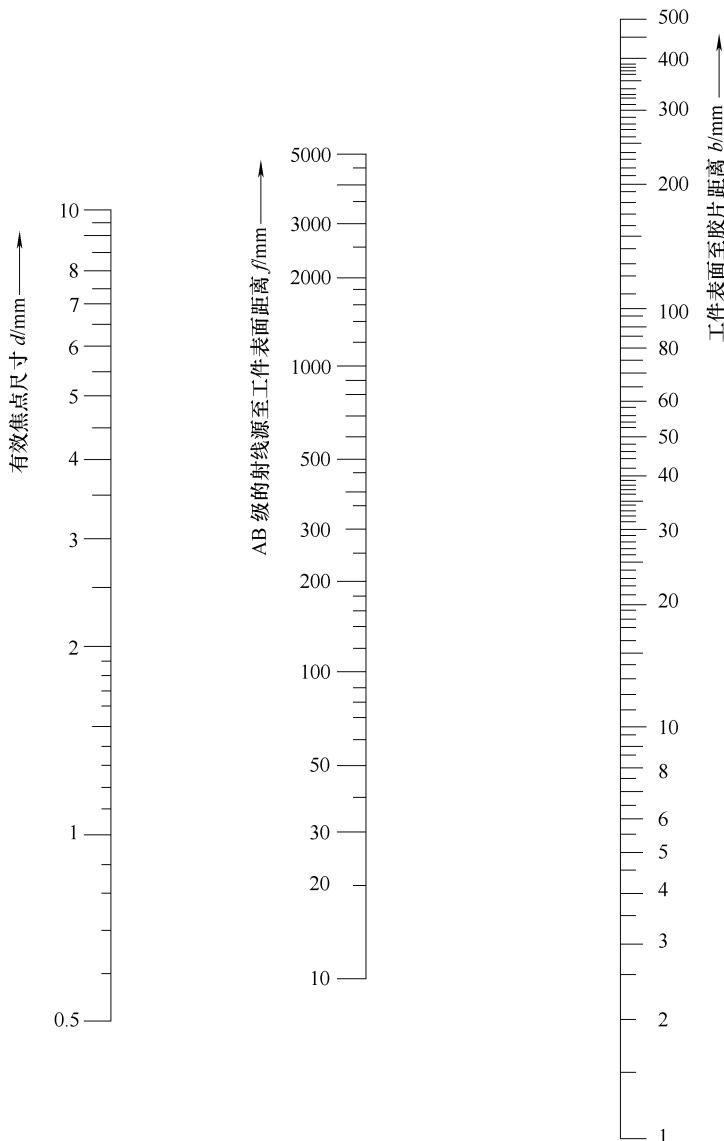


图 3-4-3 AB 级射线检测技术确定焦点至工件表面距离的诺模图

片黑度，可根据胶片特性曲线上黑度的变化与曝光量的对应关系，对曝光量进行修正，有

$$D_2 - D_1 = \lg E_2 - \lg E_1 = \lg \frac{E_2}{E_1} \quad (3-4-3)$$

$$E_2 = 10^{D_2 - D_1} E_1 \quad (3-4-4)$$

② 胶片类型改变的曝光量修正。当使用不同类型胶片进行透照而需要达到原

胶片一样黑度时, 可利用这两种胶片曲线按达到同一黑度时的曝光量之比来修正曝光量。有

$$\lg E_B - \lg E_A = \lg E_2 - \lg E_1 \quad (3-4-5)$$

$$\frac{E_B}{E_A} = 10^{\lg E_2 - \lg E_1} \quad (3-4-6)$$

### 三、透照方式的选择和一次透照长度的计算

#### 1. 常用的透照方式 (图 3-4-4)

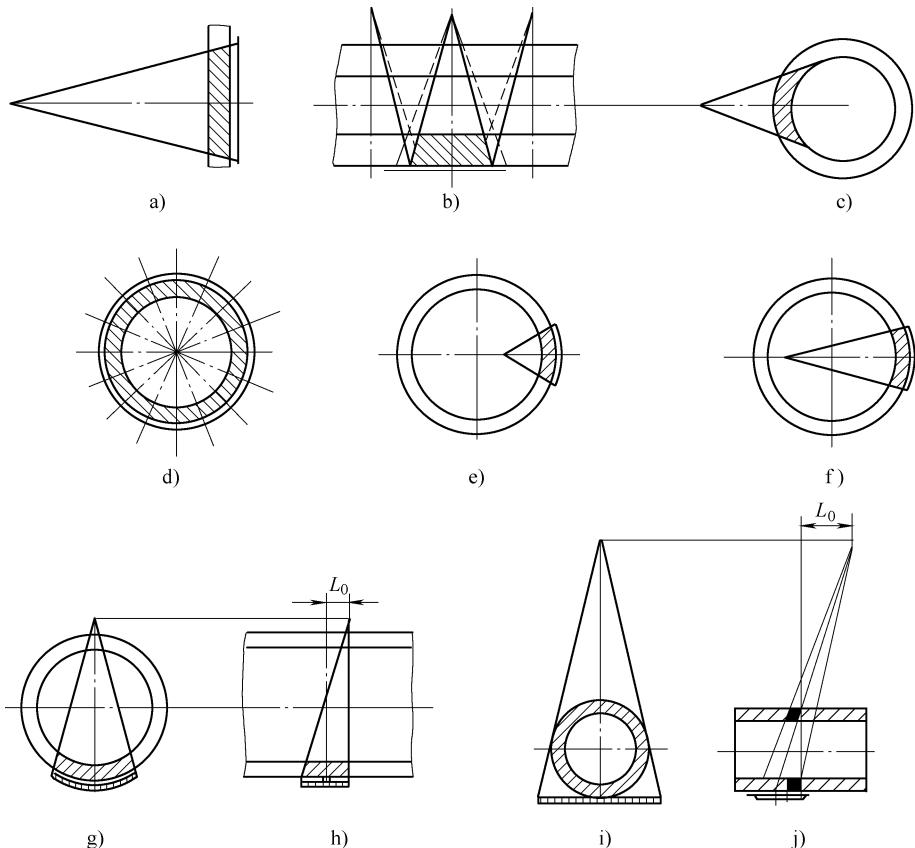


图 3-4-4 常用的对接焊缝透照方式

- a) 直缝单壁透 b) 直缝双壁透 c) 环缝外透 d) 环缝内透 (中心法)
- e) 环缝内透 (内偏心法  $F < R$ ) f) 环缝内透 (外偏心法  $F > R$ ) g) 环缝双壁单影
- h)  $L_0 = 0$  时为直透法 i) 环缝双壁双影 j)  $L_0 = 0$  时为直透法

#### 2. 透照方式的选择

1) 透照灵敏度。在透照灵敏度存在明显差异的情况下, 应选择有利于提高灵敏度的透照方式。

2) 缺陷检出特点。有些透照方式特别适合于检出某些类型的缺陷,可根据检出缺陷的要求的实际情况选择。

3) 透照厚度差和横向裂纹检出角。较小的透照厚度和横向裂纹检出角有利于提高底片质量和裂纹检出率。

4) 一次透照长度。各种透照方式的一次透照长度各不相同,选择一次透照长度较大的透照方式可以提高检测速度和工作效率。

5) 操作方便。

6) 试件及检测设备的具体情况。

### 3. 一次透照长度的计算

一次投照长度,即焊缝射线照相一次透照的有效检验长度。决定一次投照长度的两个因素:射线源的有效照射范围,影响焊缝横向裂纹检出率的透照厚度比  $K$ 。

JB/T 4730—2005 中对透照厚度比  $K$  的要求见表 3-4-3。

表 3-4-3 JB/T 4730—2005 中对透照厚度比  $K$  的要求

射线检测技术级别	A 级、AB 级	B 级
纵向焊接接头	$K \leq 1.03$	$K \leq 1.01$
环向焊接接头	$K \leq 1.1^{\circ}$	$K \leq 1.06$

①对  $100\text{mm} < D_0 \leq 400\text{mm}$  的环向对接焊焊接接头(包括曲率相同的焊接接头),A 级、AB 级允许采用  $K \leq 1.2$ 。

(1) 直缝透照。直缝透照为平板对接焊缝或筒体纵缝的透照,如图 3-4-5 所示有

$$K = \frac{T'}{T} = \cos\theta, \text{ 即 } \theta = \arccos \frac{1}{K} \quad (3-4-7)$$

$$L_3 = 2L_1 \tan\theta \quad (3-4-8)$$

搭接长度是指一张底片与相邻底片重叠部分的长度。有效评定长度是指一次透照检验长度在底片上的投影长度。实际工作中应知道这两项数据,以确定所使用胶片的长度和底片的有效评定范围。

搭接长度  $\Delta L$  计算式可由相似三角形关系推出

$$\Delta L = L_2 \frac{L_3}{L_1} \quad (3-4-9)$$

底片的有效评定长度

$$L_{\text{eff}} = L_3 + \Delta L$$

实际透照时,如搭接标记放在射源侧,则底片上搭接标记之间长度为有效评定长度。如搭接标记放在胶片侧,则底片上搭接标记以外还应附加  $\Delta L$  长度才是有效评定范围。

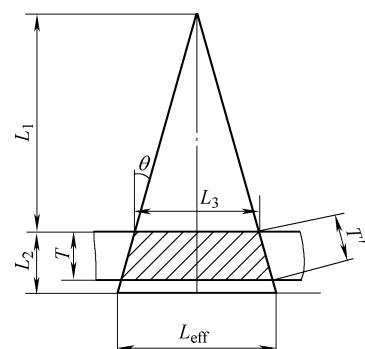


图 3-4-5 直缝透照厚度比示意图

(2) 查图表确定环缝透照次数。可通过查图表确定环缝 100% 检测所需的最少透照次数, 然后计算出一次透照长度  $L_3$  及其他相关参数。这是一种简单易行的方法, 现介绍如下:

1) 透照次数曲线图。

通过查图表只能确定环向对接焊接接头 100% 检测所需的最少透照次数, 环缝一次透照长度  $L_3$ , 以及相关参量搭接长度  $\Delta L$ , 有效评定长度  $L_{\text{eff}}$ , 仍需计算求出。

环向对接焊接接头进行 100% 检测所需的透照次数与透照方式和透照厚度比有关。由于内透中心法 ( $F=R$ ) 和双壁双影法一次透照长度不需计算, 所以不同透照方式和透照厚度比组合, 只需要制作六张透照次数曲线图, 即:

- ① 源在外单壁透照  $K=1.06$  (图 3-4-6)。
- ② 其他方式透照  $K=1.06$  (图 3-4-7)。
- ③ 源在外单壁透照  $K=1.1$  (图 3-4-8)。
- ④ 其他方式透照  $K=1.1$  (图 3-4-9)。
- ⑤ 源在外单壁透照  $K=1.2$  (图 3-4-10)。
- ⑥ 其他方式透照  $K=1.2$  (图 3-4-11)。

从图中确定透照次数的步骤是: 计算出  $T/D_0$ 、 $D_0/f$ , 在横坐标上找到  $T/D_0$  值对应的点, 过此点画一垂直于横坐标的直线; 在纵坐标上找到  $D_0/f$  对应的点, 过此点画一垂直于纵坐标的直线; 从两直线交点所在的区域确定所需的透照次数  $N$ ; 当交点在两区域的分界线上时, 应取较大数据值作为所需的最少透照次数。

2) 环缝一次透照长度及有关参量的计算由透照次数  $N$  可求得一次透照长度  $L_3$ :

$$L_3 = \frac{\pi D}{N} \quad (3-4-10)$$

其中, 外等分长度  $L_3 = \frac{\pi D_0}{N}$ ; 内等分长度  $L'_3 = \frac{\pi D_i}{N}$ 。

有效评定长度  $L_{\text{eff}} = L_3 + \Delta L$  (源在内) 或  $L_{\text{eff}} = L'_3 + \Delta L$  (源在外), 搭接长度  $\Delta L$  以源在外透照的数值最大; 源在内透照  $F \geq R$  时, 不需考虑搭接长度; 源在内透照  $F \leq R$  时, 可通过计算求得准确值, 也可近似取源在外透照的数值。

源在外透照时, 搭接长度  $\Delta L$  的计算:

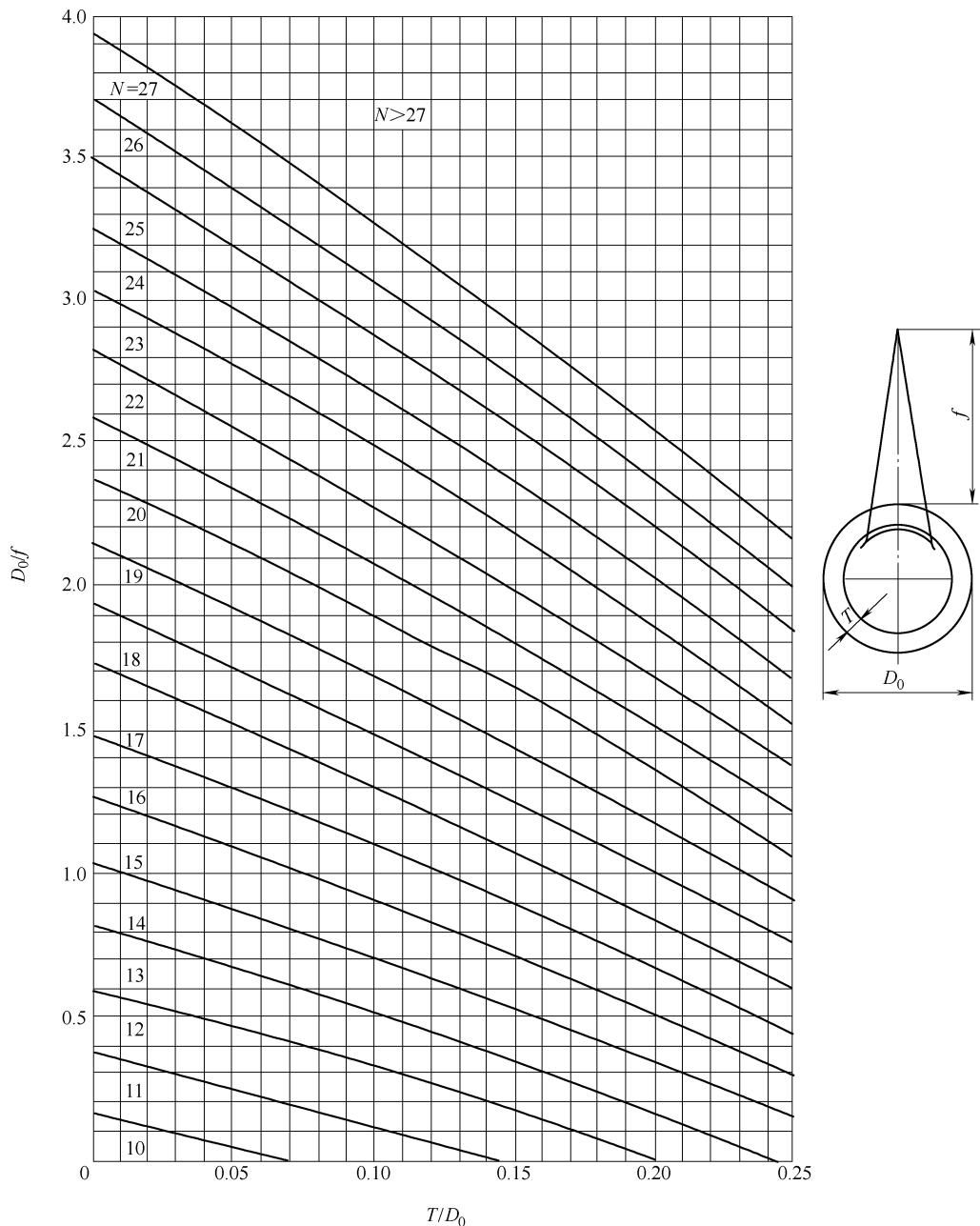
$$\Delta L = 2T \tan \theta \quad (3-4-11)$$

$$\theta = \arccos \frac{1}{K} \quad (3-4-12)$$

$K = 1.06$ 、 $\varepsilon = 19.37^\circ$ 、 $\Delta L = 0.703T$ , 为简化计算, 搭接长度  $\Delta L$  可近似取  $0.7T$ ;

$K = 1.1$ 、 $\varepsilon = 24.62^\circ$ 、 $\Delta L = 0.916T$ , 为简化计算, 搭接长度  $\Delta L$  可近似取  $1T$ ;

$K = 1.2$ 、 $\varepsilon = 33.56^\circ$ 、 $\Delta L = 1.326T$ , 为简化计算, 搭接长度  $\Delta L$  可近似取  $1.4T$ 。

图 3-4-6 源在外单壁透照环向对接焊接接头, 透照厚度比  $K = 1.06$  时的透照次数图

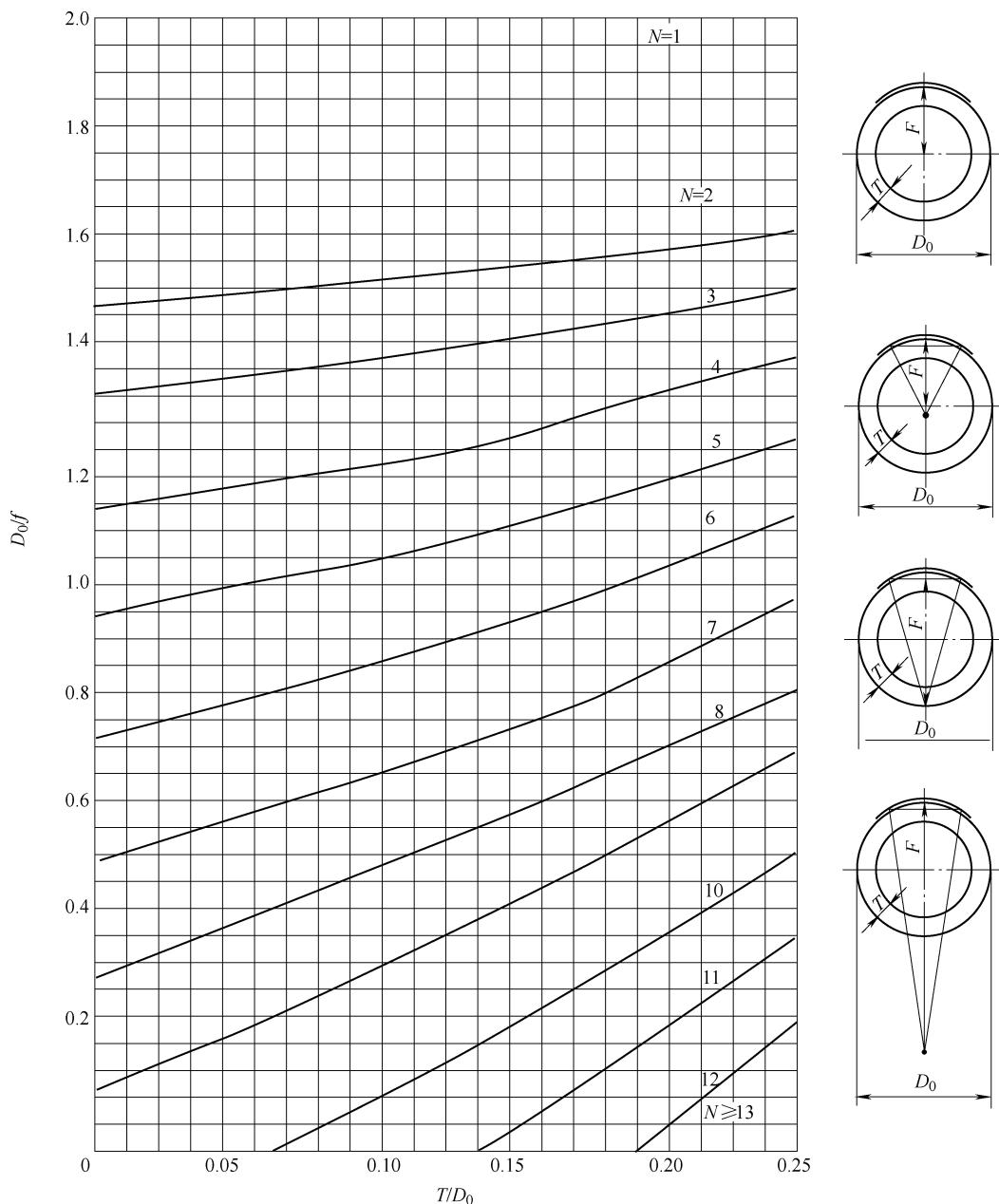
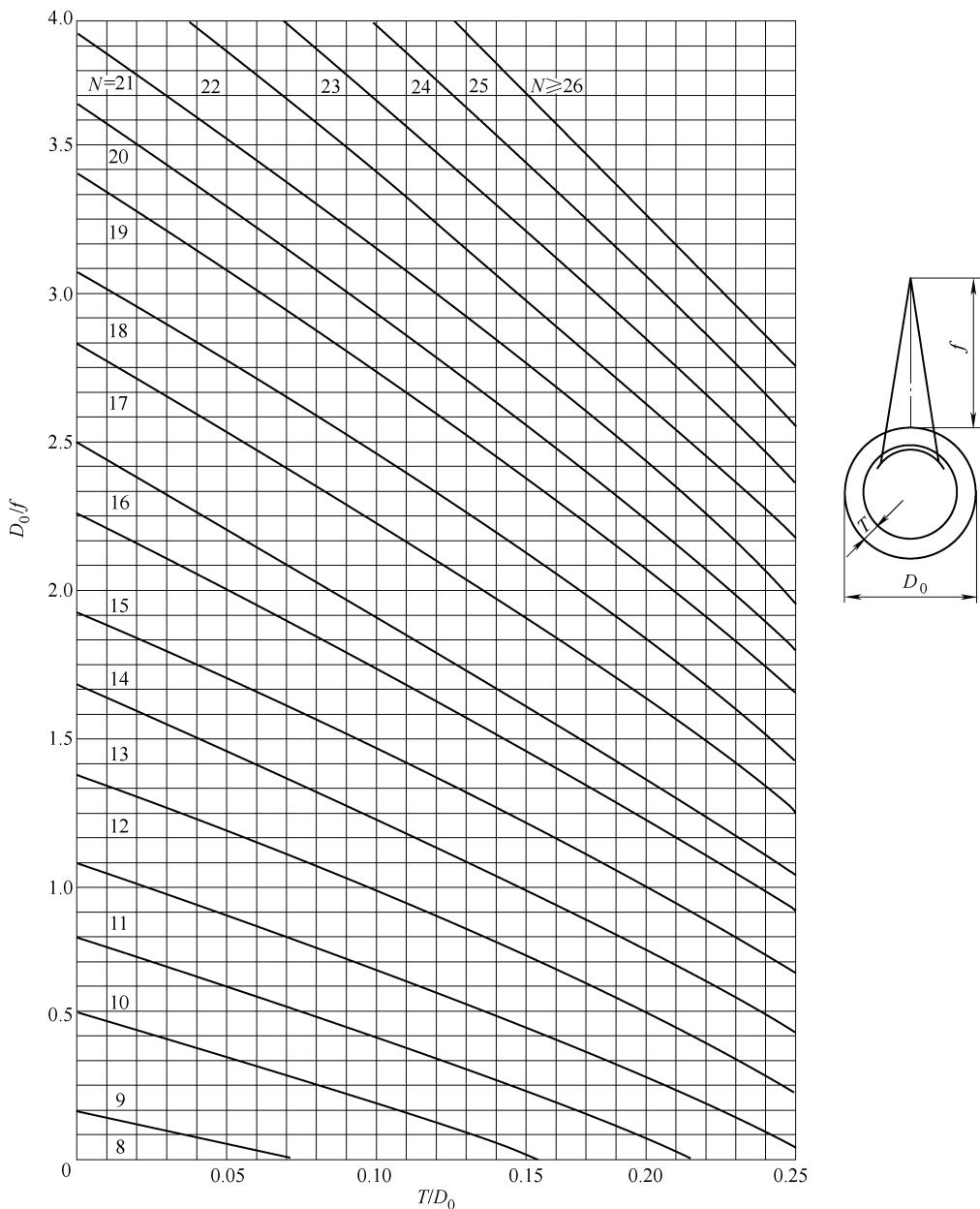


图 3-4-7 其他方式透照环向对接焊接接头, 透照厚度比  $K = 1.06$  时的透照次数图

图 3-4-8 源在外单壁透照环向对接焊接头, 透照厚度比  $K = 1.1$  时的透照次数图

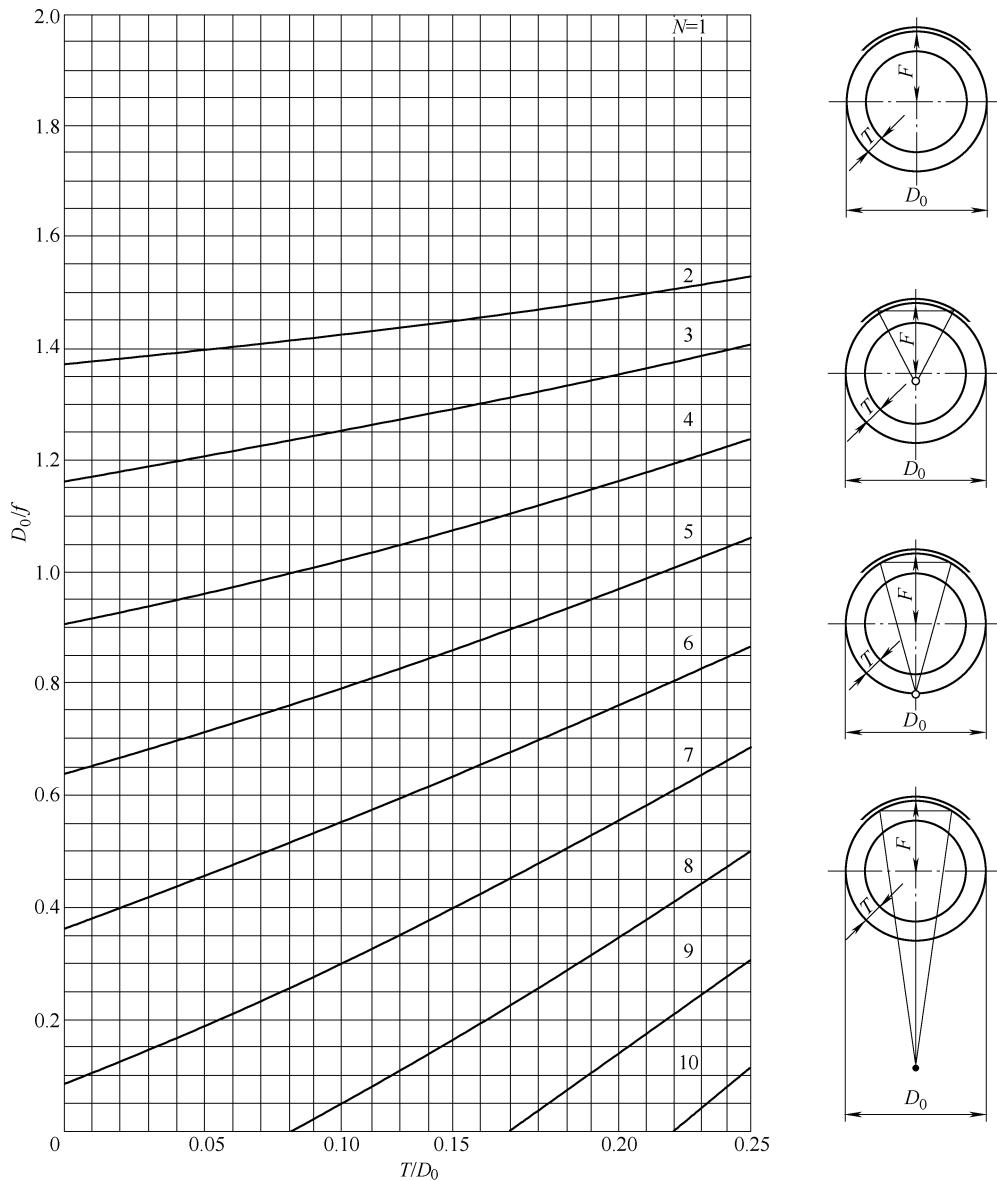
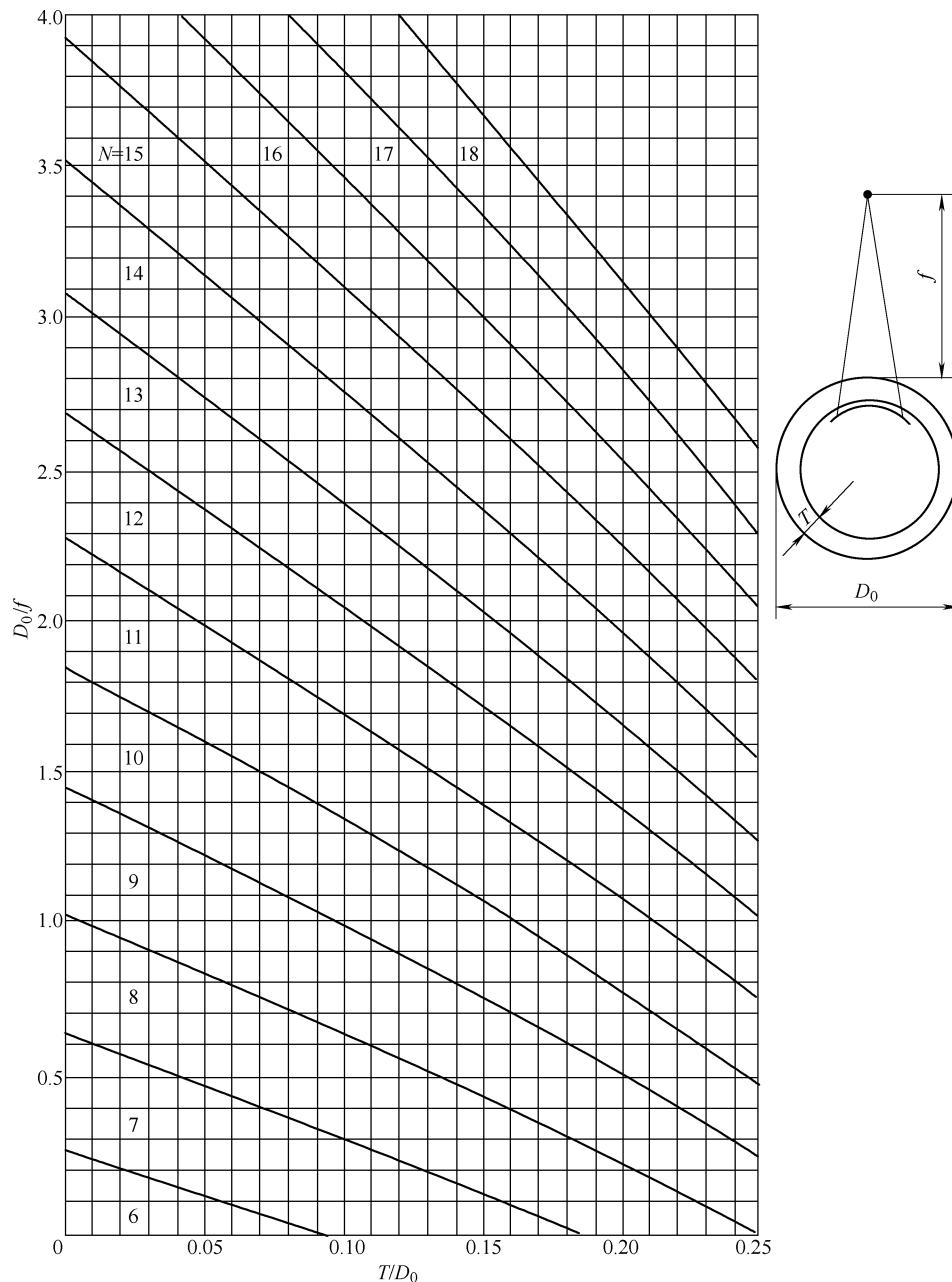
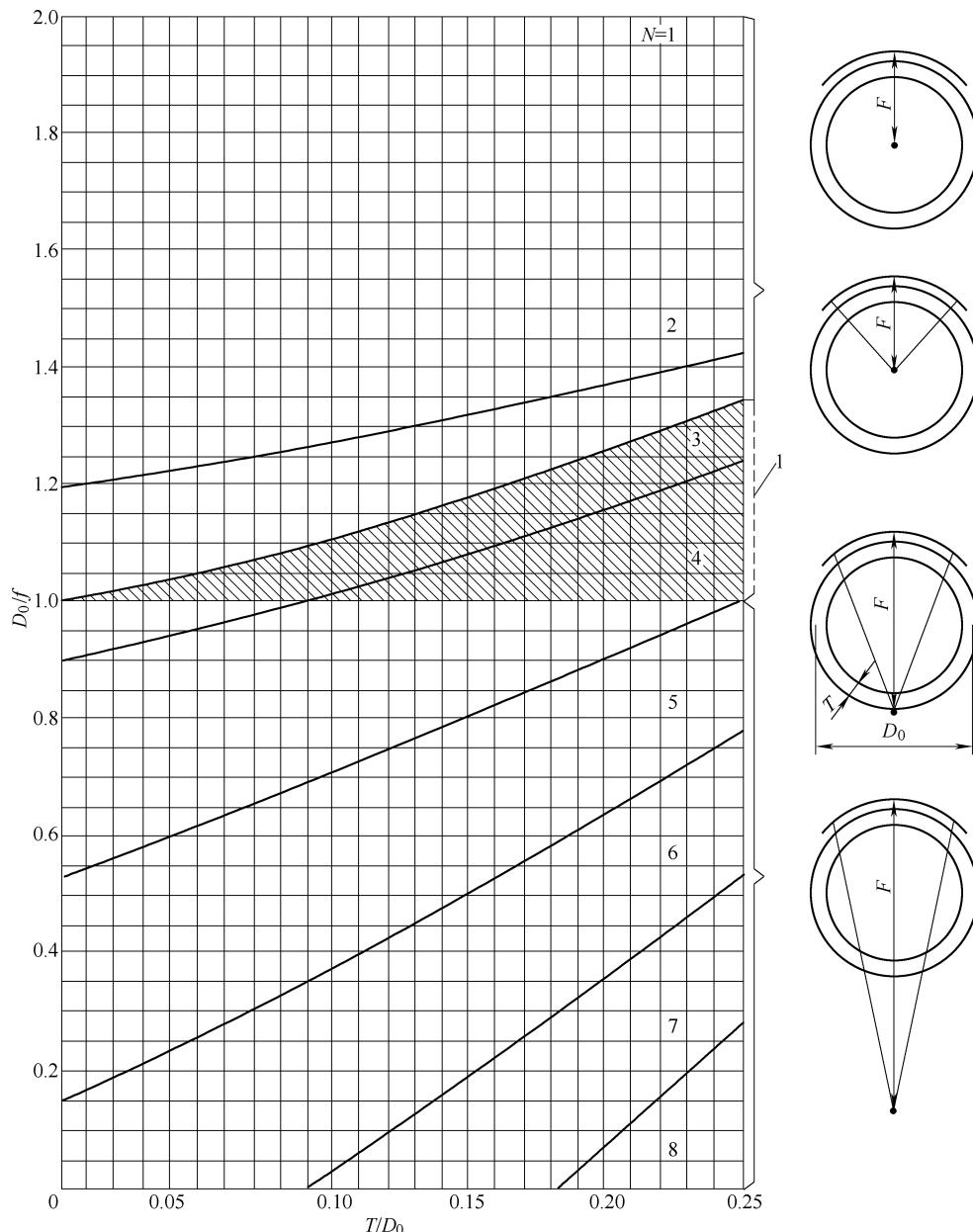


图 3-4-9 其他方式透照环向对接焊接接头, 透照厚度比  $K = 1.1$  时的透照次数图

图 3-4-10 源在外单壁透照环向对接焊接接头, 透照厚度比  $K = 1.2$  时的透照次数图

图 3-4-11 其他方式透照环向对接焊接接头, 透照厚度比  $K = 1.2$  时的透照次数图

3) 计算法确定环缝单壁外透法的一次透照长度及有关参数。采用外透法100%透照环焊缝时, 满足一定厚度比的最少曝光次数  $N$  可参考图 3-4-12 由式 (3-4-13) 确定。

$$N = \frac{180^\circ}{\alpha}$$

$$\alpha = \theta + \eta$$

$$\theta = \arccos \frac{1 + (K^2 - 1)T/D_0}{K} \quad \text{当 } D_0 \gg T \text{ 时, } \theta \approx \arccos \frac{1}{K} \quad (3-4-13)$$

$$\eta = \arcsin \left( \frac{D_0}{2F - D_0} \sin \theta \right)$$

式中  $\alpha$ —与  $\hat{AB}/2$  对应的圆心角;

$\theta$ —影像最大失真角;

$\eta$ —有效半辐射角;

$K$ —透照厚度比;

$T$ —工件厚度;

$D_0$ —容器外直径。

求出了满足  $K$  值要求的环焊缝最少曝光次数, 就可进一步求出射源侧焊缝的一次透照长度 (即外等分长度)  $L_3$  和胶片侧焊缝的等分长度  $L'_3$ , 以及底片上有效评定长度  $L_{\text{eff}}$  和相邻两片的搭接长度  $\Delta L$ :

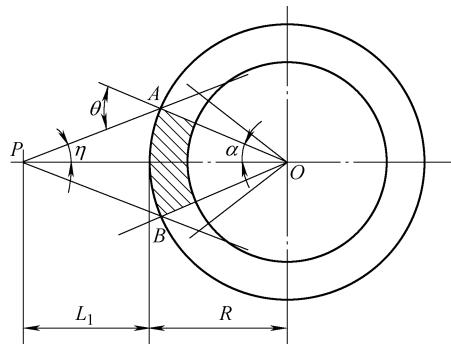


图 3-4-12 环缝单壁外透法

$$L_3 = \frac{\pi D_0}{N} \quad (3-4-14)$$

$$L'_3 = \frac{\pi D_i}{N} \quad (3-4-15)$$

$$\Delta L = 2T \tan \theta \quad (3-4-16)$$

$$L_{\text{eff}} = L'_3 + \Delta L \quad (3-4-17)$$

实际透照时, 如搭接标记放在射源侧焊缝透照区两端, 则底片上搭接标记之间的长度范围即为有效评定长度  $L_{\text{eff}}$  不需计算。

由图可见, 环缝外透法中的几何参数变化特点: 当透照距离  $L_1$  减小时, 若透照长度  $L_3$  不变, 则  $K$  值、 $\theta$  角增大; 若  $K$  值、 $\theta$  角不变, 则一次透照长度  $L_3$  缩短。而当透照距离  $L_1$  增大时, 情况相反, 当  $L_1$  趋向无穷大时, 透照弧长所对应的圆心角即与壁厚无关, 其极限值等于影像最大失真角  $\theta$  的两倍。

4) 内透中心法 ( $F=R$ )。采用此法时, 射源或焦点位于容器或圆筒或管道中心, 胶片或整条或逐张连接覆盖在整圈环缝外壁上, 射线对焊缝做一次性的周向曝光。这种透照布置, 透照厚度  $K=1$ , 横向裂纹检出角  $\theta \approx 0^\circ$ , 一次透照长度为整条

环缝长度。

5) 计算法确定双壁单影法的一次透照长度及参数 100% 透照环焊缝时最少曝光次数  $N$  和一次透照长度  $L_3$  由下式求出:

$$L_3 = \frac{\pi D_0}{N} \quad (3-4-18)$$

对双壁单影法中的摄片张数可作如下讨论: 若想透照有效范围最大, 则可使焦距等于管子外径, 在  $T/D_0$  甚小的情况下, 最大透照有效长度  $L_3$  所对应的圆心角  $2\alpha$  与壁厚无关, 等于影像失真角  $\theta$  的四倍, 即  $2\alpha_{\max} = 4\theta$ , 因  $N = \frac{180^\circ}{\alpha}$ , 若  $\theta$  取  $15^\circ$  或  $18^\circ$ , 则最少摄片张数为六张或五张。另一方面, 当焦距无限大时, 最小透照有效长度  $L_3$  所对应的圆心角  $2\alpha$  就与管子形状无关、等于失真角  $\theta$  的两倍, 即  $2\alpha_{\max} = 2\theta$ , 因  $N = \frac{180^\circ}{\alpha}$ , 若  $\theta$  取  $15^\circ$  或  $18^\circ$ , 则最多摄片张数也不必超过 12 张或 10 张。

#### 四、小径薄壁管的(椭圆成像)透照技术与工艺

外径  $D_0 \leq 100\text{mm}$  的管子称为小径管, 一般采用双壁双影法透照其对接环缝。按照被检焊缝在底片上的影像特征, 又分椭圆成像和重叠成像两种方法。同时满足下列两条件, 即  $T \leq 8\text{mm}$ ;  $g \leq D_0/4$  时, 采用倾斜透照方式椭圆成像。不满足上述条件, 或椭圆成像有困难, 或为适应特殊需要(如特意要检出焊缝根部的面状缺陷)时, 可采用垂直透照方式重叠成像。

##### 1. 透照布置

1) 椭圆成像法。胶片暗袋平放, 射源焦点偏离焊缝中心平面一定距离(称为偏心距  $L_0$ ), 以射线束的中心部分或边缘部分透照被检焊缝(图 3-4-13)。偏心距应适当, 可按椭圆开口宽度( $q$ )的大小算出。

$$L_0 = \frac{(b + q)L_1}{L_2} = \frac{F - (D_0 + \Delta h)}{D_0 + \Delta h}(b + q) \quad (3-4-19)$$

式中  $\Delta h$ —焊缝余高;

$b$ —焊缝宽度;

$q$ —椭圆开口宽度(椭圆影像短轴  
方向间距)。

应控制椭圆影像的开口宽度(上下焊缝投影最大间距)在一倍焊缝宽度左右。如偏心距太大, 椭圆开口宽度过大, 窄小的根部缺陷(裂缝、未焊透等)有可能漏检, 或者因影像畸变过大, 难于评判。偏心距太小, 椭圆开口宽度过小, 又会使源侧焊缝与片侧

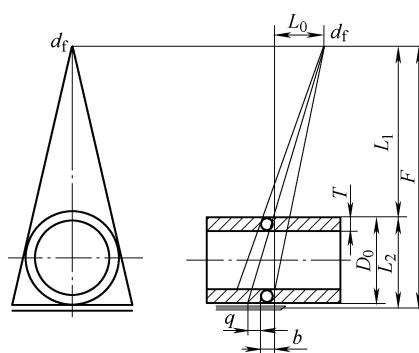


图 3-4-13 小径管椭圆透照布置

焊缝根部缺陷不易分开。合理布置为5~10mm，最好为5mm。

2) 重叠成像法。对直径小( $D_0 \leq 20\text{mm}$ )，或壁厚大( $T > 8\text{mm}$ )，或焊缝宽( $g > D_0/4$ )的管子，或是为了重点检测根部裂纹和未焊透等特殊情况，可使射线垂直透照焊缝，此时胶片宜弯曲贴合焊缝表面，以尽量减少缺陷到胶片距离。当发现不合格缺陷后，由于不能分清缺陷是处于射源侧或胶片侧焊缝中，一般多做整圈返修处理。

## 2. 厚度变化

小径管透照厚度变化很大，其最小值为管壁厚度的两倍(即 $2T$ )，理论最大值为假定射线束与内圆相切时的射线行程即 $2\sqrt{T(D-T)}$ ，故理论最大透照厚度比为

$$K \approx \frac{2\sqrt{T(D-T)}}{T} \quad (3-4-20)$$

小径管透照厚度变化如图3-4-14所示。

## 3. 透照次数

为对小径管的整圈环焊缝进行有效检测，通常要根据成像方式和壁厚与外径之比 $T/D_0$ 确定透照次数。有关标准规定了小径管环向对接焊接接头100%检测的透照次数：采用倾斜透照椭圆成像时，当 $T/D_0 \leq 0.12$ 时，相隔90°透照两次。当 $T/D_0 > 0.12$ 时，相隔120°或60°透照三次。垂直透照重叠成像时，一般应相隔120°或60°透照三次。

规定 $T/D_0 \leq 0.12$ 透照两次， $T/D_0 > 0.12$ 透照三次，主要是为了限制透照厚度比。

## 4. 像质要求

由于小径管透照截面厚度变化很大，又采用双壁双影透照，影像畸变较大，且源侧焊缝和片侧焊缝相对于胶片的距离变化较大，影像各处几何不清晰度和散射比不一，因此，影像质量和缺陷检出灵敏度与其他透照方式相比都要差些。即使底片黑度范围符合要求，基本问题仍然存在。

(1) 像质计的形式及摆放 对小径管透照使用的像质计，不同的标准规定了不同的形式和摆放方法。主要有以下三种：

① 等比丝像质计。像质计可放在射源侧管子表面或置于胶片侧，丝的长度方向与焊缝走向相垂直。置于胶片侧要有附加标记，其像质计显示丝号要求与放在射源侧不一样。

② 等径丝像质计。置于射源侧管子表面，丝的长度方向与焊缝走向相垂直。其优点是评价有效评定范围准确，能显示等径丝的焊缝长度范围即为有效评定范围。

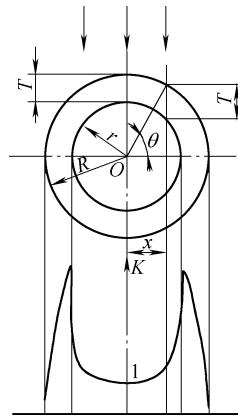


图3-4-14 小径管透照厚度变化图

③ 单丝像质计。置于管子环缝中心，金属丝绕管一圈，丝的长度方向与焊缝走向平行，以显示丝的长度作为有效评定范围。应用此法时，应防止丝的影像掩盖焊缝根部缺陷的显示。

(2) 像质计灵敏度 小径管的椭圆透照工艺中，灵敏度与宽容度的矛盾尤为突出，为兼顾较大的厚度宽容度，灵敏度总要受到一定损失。

(3) 黑度范围 小径管焊缝和热影响区的黑度范围可控制在 1.5~4.0。当有意提高局部区域的检出灵敏度时，可将该区域黑度控制在 2.5~3.5。

(4) 椭圆开口度 射线底片上椭圆开口度太小会使源侧与片侧焊缝根部热影响区缺陷产生混淆，开口度太大又不利于根部裂纹、未焊透之类面状缺陷的检出。通常椭圆开口度应大致为一个焊缝宽度。

(5) 标记 小径管透照必须放置片号、中心定位标记及透照顺序号（表明某一接头的透照次数）等识别标记。评片时，通常以中心标记短矢所指位置作为 12 点，以钟点定位法标定缺陷位置。

## 五、曝光曲线的制作及应用

### 1. 曝光曲线的制作

曝光曲线是在机型、胶片、增感屏及焦距等条件一定的前提下，通过改变曝光参数（固定 kV，改变 mA·min，或固定 mA·min，改变 kV）透照由不同厚度组成的钢阶梯试块，根据给定冲洗条件洗出的底片所达到的某一基准黑度（如 3.0 或 2.0），来求得 kV、mA·min 及 T 三者之间关系的曲线。

所使用的阶梯块面积不可太小，其最小尺寸应为阶梯厚度的五倍，否则散射线将明显不同于均匀厚度平板中的情况。另外，阶梯块的尺寸应明显大于胶片尺寸，否则要作适当遮边。

按有关透照结果绘制 E-T 曲线的过程如下：

1) 绘制 D-T 曲线。采用较小曝光量、不同管电压拍摄阶梯试块，获得第一组底片。再采用较大曝光量、不同管电压拍摄阶梯试块，获得第二组底片，用黑度计测定获得透照厚度与对应黑度的两组数据，绘制出 D-T 曲线图。

2) 绘制 E-T 曲线。选定一基准黑度值，从两张 D-T 曲线图中分别查出某一管电压下对应于该黑度的透照厚度值。在 E-T 图上标出这两点，并以直线连接即得该管电压的曝光曲线。

### 2. 曝光曲线的一般使用方法

从 E-T 曲线上求取透照给定厚度所需要的曝光量，一般都采用所谓“一点法”，即按射线束中心穿透厚度确定与某一“kV”相对应的 E，但需注意，对有余高的焊接接头照相，射线穿透厚度有两个值，例如，透照母材厚度 12mm 的双面焊接接头，母材部位穿透厚度为 12mm，焊缝部位穿透厚度为 16mm，这时需要注意标准允许黑度范围与曝光曲线基准黑度的关系，JB/T 4730—2005 规定 AB 级允许黑度

范围 2.0 ~ 4.0, 如果曝光曲线基准黑度为 3.0 或更高, 则以母材部位 12mm 为透照厚度查表为宜, 这样能保证焊缝部位黑度不致太低; 如果曝光曲线基准黑度为 2.5 或更低, 则以焊缝部位 16mm 照厚度查表为宜, 这样能保证母材部位黑度不致太高。以 12mm 为透照厚度查曝光曲线, 可得到三组曝光参数: 150kV、18mA · min, 170kV, 10mA · min, 200kV, 5mA · min。具体选择哪一组参数, 则应根据工件厚度是否均匀, 宽容度是否满足, 以及照相灵敏度、工作时间及效率等因素, 选择高能量小曝光量的组合, 或低能量大曝光量的组合。

## 六、散射线的控制

### 1. 散射线的来源和分类

射线在穿透物质过程中与物质相互作用会产生吸收和散射, 其中散射主要是由康普顿效应造成的。与一次射线相比, 散射线的能量减小, 波长变长, 运动方向改变。产生散射线的物体称作散射源, 在射线透照时, 凡是被射线照射到的物体, 例如, 试件、暗盒、桌面、墙壁及地面, 甚至连空气都会成为散射源。其中最大的散射源是试件本身。

按散射的方向对散射线分类, 可将来自暗盒正面的散射称为“前散射”, 将来自暗盒背面的散射称为“背散射”, 还有一种散射称为“边蚀散射”, 是指试件周围的射线向试件背后的胶片散射, 或试件中的较薄部位的射线向较厚部位散射, 这种散射会导致影像边界模糊, 产生低黑度区域的周边被侵蚀, 面积缩小的所谓“边蚀”现象。

### 2. 散射比的影响因素

在实际使用的焦距范围内, 焦距的变化对散射比几乎没有影响。当照射场较小时, 散射比随照射场的增大而增大, 当照射场直径超过 50mm 后, 即使照射场再增大, 散射比也基本保持不变。因此, 除非是用极小的照射场透照, 照射场大小对散射比几乎没有影响。

在工业射线照相应用范围内散射比随射线能量增大而变小, 而在相同射线能量下, 散射比随钢厚度增大而增大。对有余高的焊缝试板透照时, 焊缝中心部位的散射比与平板试件的散射比明显不同, 焊缝中心散射比高于同厚度平板中的散射比, 随着能量的增大, 两者数值逐渐接近。

### 3. 散射线的控制措施

- 1) 选择合适的射线能量。
- 2) 使用铅箔增感屏。
- 3) 其他控制措施: 背防护铅板、铅罩和光阑、厚度补偿物、滤板、遮蔽物及修磨试件。

# 第五章

## 暗室处理技术

### 一、暗室基本知识

#### 1. 暗室设备器材使用知识

暗室常使用的设备器材包括安全灯、温度计、天平、洗片槽及烘片箱等，有的还配有自动洗片机。

1) 安全灯用于胶片冲洗过程中的照明。不同种类胶片具有不同的感光波长范围，此特性称为感色性。工业射线胶片对可见光的蓝色部分最敏感，而对红色或橙色部分不敏感，因此，用于射线胶片处理的安全灯采用暗红色或暗橙色。为保证安全，对新购置的安全灯应进行测试，对长期使用的安全灯也应做定期测试。测试方法为：在工作位置放置胶片，上盖黑纸，打开安全灯，每隔数分钟移动一下黑纸，使胶片不同部位在安全灯下经受不同时间的曝光，然后进行标准显影处理，将曝光部分与未曝光部分比较，以黑度不明显增大为安全，据此可确定安全灯的性能以及允许工作时间和工作距离。

2) 温度计用于配液和显影操作时测量药液温度。可使用量程大于 50℃，刻度为 1℃ 或 0.5℃ 的酒精玻璃温度计，也可使用半导体温度计。

3) 天平用于配液时称量药品。可采用称量精度为 0.1g 的托盘天平。天平使用后应及时清洁，似防腐蚀造成称量失准。胶片手工处理可分为盘式和槽式两种方式。由于盘式处理易产生伪缺陷，所以目前多采用槽式处理。洗片槽用不锈钢或塑料制成，其深度应超过底片长度 20% 以上，使用时应将药液装满槽，并随时用盖将槽盖好，以减少药液氧化。槽应定期清洗，保持清洁。

#### 2. 配液注意事项

1) 配液的容器应使用玻璃、搪瓷或塑料制品，也可使用不锈钢制品，搅拌棒也应用上述材料制作，切忌使用铜、铁及铝制品，因为铜、铁等金属离子对显影剂的氧化有催化作用。

2) 配液用水可使用蒸馏水、去离子水、煮沸后冷却水或自来水，对井水或河水应进行再制，以降低硬度，提高纯度。

3) 配制显影液的水温一般在 30 ~ 50℃，水温太高会促使某些药品氧化，太低又会使某些药品不易溶解。配制定影液的水温可升至 60 ~ 70℃，因为硫代硫酸钠溶

解时会大量吸热。

4) 配液时应按配方中规定的次序进行, 待前一种药品溶解后方可投入下一种药品, 切不可随意颠倒次序。在显影液配制中, 因米吐尔不能溶于亚硫酸钠溶液故最先加入, 其余显影剂都应在亚硫酸钠之后加入。在配制定影液时, 亚硫酸钠必须在加酸之前溶解, 以防硫代硫酸钠分解; 硫酸铝钾必须在加酸之后溶解, 以防水解产生氢氧化铝沉淀。

5) 配液时应不停地搅拌, 以加速溶解。但显影液的搅拌不宜过于激烈, 且应朝着一个方向进行, 以免发生显影剂氧化现象。

6) 配液时宜先取总体积3/4的水量, 待全部药品溶解后再加水至所要求的体积, 配好的药液应静置24h后再使用。

### 3. 胶片处理程序和操作要点

胶片手工处理过程可分为显影、停显、定影、水洗和干燥五个步骤, 各个步骤的标准条件和操作要点见表3-5-1。

表3-5-1 胶片处理的标准条件和操作要点

步 骤	温 度/℃	时 间/min	药 液	操作要点
显影	20±2	4~6	显影液(标准配方)	预先水浸, 过程中适当搅动
停显	16~24	约0.5	停显液	充分搅动
定影	16~24	5~15	定显液	适当搅动
水洗	—	30~60	水	流动水漂洗
干燥	≤40	—	—	除去表面水滴后干燥

有关说明如下:

- 1) 显影温度对底片质量影响很大, 必须严格控制。
- 2) 胶片放入显影液之前, 应在清水中预浸一下, 使胶片表面润湿, 避免进入显影液后胶片表面附有气泡造成显影不均匀。
- 3) 显影时正确的搅动方法: 在最初30s内不间断地搅动, 以后每隔30s搅动一次。
- 4) 停显阶段应不间断地充分搅动。
- 5) 停显温度最好与显影温度相近, 停显温度过高, 可能会产生网纹、褶皱等缺陷。
- 6) 定影总的时间为通透时间的两倍, 所谓通透时间是指胶片放入定影液开始到乳剂的乳白色消失为止的时间。
- 7) 水洗应使用清洁的流水漂洗, 水洗不充分的底片长期保存后会发生变色现象。
- 8) 水洗水温应适当控制, 水温高时水洗效率也高, 但药膜高度膨胀易产生划伤、药膜脱落等缺陷。

9) 底片干燥应选择没有灰尘的地方进行,因为湿底片极易吸附空气中的尘埃。

10) 热风干燥能缩短干燥时间,但如温度过高易产生干燥不均的条纹。

11) 水洗后的底片表面附有许多水滴,如不除去会因干燥不均产生水迹,可用湿海绵擦去水滴,或浸入脱水剂溶液,使水从底片表面快速流尽。

## 二、暗室处理技术

### 1. 显影

显影在整个胶片处理过程中具有特别重要的意义。底片的黑度、对比度及颗粒度等都受到显影的影响。

(1) 显影液的组成 一般显影液中含有四种主要成分:显影剂、保护剂、促进剂和抑制剂。此外有时还加入一些其他物质,例如,坚膜剂和水质净化剂。

显影剂常用的显影剂有米吐尔、菲尼酮及对苯二酚。

1) 米吐尔为白色或灰色针状结晶或粉末,易溶于水,不易溶于亚硫酸钠溶液,因此配制显影液时将米吐尔在亚硫酸钠之前溶解。米吐尔显影能力强,其显影能力约为对苯二酚的20倍,速度快、初影时间短,得到的影像较柔和,反差小,称为软性显影剂。米吐尔适用的溶液pH范围很宽,在6~10之间均可使用。温度的变化对米吐尔的显影能力影响不大。

2) 菲尼酮是另一种软性显影剂,呈白色结晶粉末状,常温下不溶于水,但易溶于碱性水溶液。大多数情况下菲尼酮无显影诱导期,出影快。菲尼酮本身属于中等活性显影剂,但它与其他显影剂合用呈现出超加和性,与对苯二酚配合使用时表现出极强的显影能力,且性能稳定。

3) 对苯二酚为白色或黄色针状结晶,易溶于水和亚硫酸溶液。对苯二酚显影诱导期长,显影速度慢、初影时间长,一旦出影,则影像密度急增。对苯二酚可使影像具有很高的反差,称为硬性显影剂,对苯二酚pH值在9~11之间的碱性溶液中才有较好的显影能力,同时它对温度敏感,在10℃以下时几乎无显影能力,温度过高则易引起灰雾。此外它对溴化钾也很敏感,如显影液中溴化钾过量会大大抑制对苯二酚的显影作用。

保护剂的作用是阻止显影剂与进入显影液的氧发生作用,使其不被氧化。最常用的保护剂是亚硫酸钠。

促进剂的作用是增强显影剂的显影能力和速度。通常使用的促进剂是一些强碱弱酸盐,如碳酸钠、硼砂,有时也用一些强碱,如氢氧化钠。

抑制剂的主要作用是抑制灰雾,常用的抑制剂包括溴化钾、苯丙三氮唑等。

(2) 影响显影的因素 影响显影的因素很多,除了配方外,显影时间、温度、搅动情况和显影液老化程度对显影都有明显影响。

1) 时间对显影的影响。合适的显影时间与配方有关,所以配方都附有推荐的显影时间。对于手工处理,大多规定为4~6min。显影时间进一步延长,虽然黑度

和反差会增加，但影像颗粒和灰雾也将增大。而显影时间过短，将导致黑度和反差不足。

2) 温度对显影的影响。显影温度也与配方有关，手工处理的显影配方推荐的显影温度多在18~20℃。温度高时显影速度快，温度低时显影速度慢。温度高时对苯二酚显影能力增强，其结果使影像反差增大，同时灰雾也增大，颗粒变粗，此时药膜松软，容易划伤或脱落；温度低时对苯二酚显影能力减弱，此时显影主要靠米吐尔作用，因此，反差降低。

3) 搅动对显影的影响。在显影过程中进行搅动，可以使乳剂膜表面不断地与新鲜药液接触并发生作用，这样不仅使显影速度加快，还保证了显影作用均匀。此外，由于感光多的部分显影反应迅速，与之接触的药液容易疲乏，不感光的部分显影作用少，药液不易疲乏，搅拌的结果加速了感光多的部分的显影速度，从而提高了反差。如果胶片在显影液中静止不动，会使反应产生的溴化物无法扩散，造成显影不均匀的条纹，为保证显影均匀，应不断进行搅动操作，尤其是胶片进入显影液的最初1min的频繁搅动特别重要。

4) 显影液活性对显影的影响。显影液的活性取决于显影剂的种类和浓度以及显影液的pH值。显影液在使用过程中，显影剂浓度逐渐减少，显影剂氧化物逐渐增加，pH值逐渐降低，溶液中卤化物离子逐渐增加，将导致显影作用减弱，活性降低，这种现象称为显影液老化。使用老化的显影液，显影速度变慢，反差减小，灰雾增大。为保证显影效果，可在活性减弱的显影液中加入补充液。补充液应具有比显影液更高的pH值，更高的显影剂和亚硫酸盐浓度。补充液通常不含溴化物，如原配方中有有机防灰雾剂可以补充。每次添加的补充液最好不超过槽中显影液总体积的2%或3%，当加入的补充液达到原显影液体积两倍时，药液必须废弃。

## 2. 停显

停显的作用是防止产生不均匀的条纹和两色性雾翳；防止胶片上残留的碱性显影液带进酸性定影液，污染定影液，使pH值升高，缩短定影液寿命。停显液通常是体积分数为2%~3%的醋酸溶液，其他停显剂有酒石酸、柠檬酸及亚硫酸氢钠等。

## 3. 定影

显影后的胶片，其乳剂层中大约还有70%的卤化银未被还原成金属银。这些卤化银必须从乳剂层中除去，才能将显影形成的影像固定下来，这一过程称为定影。在定影过程中，定影剂与卤化银发生化学反应，生成溶于水的络合物，但对已还原的金属银则不发生作用。

(1) 定影液的组成 定影液包含有四种组分：定影剂、保护剂、坚膜剂及酸性剂。

1) 定影剂是定影液的主要成分，常用的定影剂为硫代硫酸钠 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ，又称大苏打、海波。有时也使用硫代硫酸铵 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$ ，后者有快速定影作用。

2) 定影剂硫代硫酸钠在酸性溶液中易发生分解析出硫而失效, 需要使用保护剂来阻止这种现象发生。常用的保护剂为无水亚硫酸钠, 亚硫酸根离子能与氢离子结合从而抑制硫代硫酸钠的分解。

3) 在定影过程中, 胶片乳剂层吸水膨胀, 易造成划伤和药膜脱落, 因此, 需要在定影液中加入坚膜剂。使用坚膜剂的另一好处是降低胶片的吸水性, 干燥起来更容易。常用的坚膜剂有硫酸铝钾(钾明矾), 化学式为  $K_2SO_4 \cdot Al_2(SO_4)_3 \cdot 24H_2O$ , 硫酸铬钾(钾铬矾)化学式为  $K_2SO_4 \cdot Cr_2(SO_4)_3 \cdot 24H_2O$ , 后者的坚膜能力优于前者, 上述坚膜剂适用于酸性定影液, 坚膜效果最佳的pH值约为4.3。

4) 酸性剂为中和停显阶段未除净的显影液碱性物质, 通常将定影液配制成酸性溶液, 加入的酸性物质通常是醋酸和硼酸。

(2) 影响定影的因素 影响定影的因素主要有: 定影时间, 定影温度, 定影液老化程度及定影时的搅动。

1) 定影时间。定影过程中, 胶片乳剂膜的乳黄色消失, 变为透明的现象称为通透, 从胶片放入定影液直至通透的这段时间称为通透时间。通透现象出现意味着胶片乳剂层中未显影的卤化银已被定影剂溶解, 但要使被溶解的银盐从乳剂中渗出进入定影液, 还需要附加时间。因此, 定影时间应明显多于通透时间。为保险起见, 规定整个定影时间为通透时间的两倍。

2) 定影温度。温度影响到定影速度, 随着温度的升高, 定影速度将加快。但如果温度过高, 胶片乳剂膜过度膨胀, 容易造成划伤或药膜脱落。因此, 需要对定影温度做适当控制, 通常规定为16~24℃。

3) 定影液的老化。定影液在使用过程中定影剂不断消耗, 浓度变小, 而银的络合物和卤化物不断积累, 浓度增大, 使得定影速度越来越慢, 所需时间越来越长, 此现象称为定影液的老化。老化的定影液在定影时会生成一些较难溶的银盐络合物, 虽经过水洗也难以除去, 仍残留在乳剂层中, 经过若干时间后, 会分解出硫化银, 使底片变黄。对使用中的定影液, 当需要的定影时间已长到新液所需时间的两倍时, 即认为已经失效, 需更换新液。

4) 定影时的搅动。搅动可以提高定影速度, 并使定影均匀。在胶片刚放入定影液中时, 应作多次抖动。在定影过程中, 应适当搅动, 一般每两分钟搅动一次。

#### 4. 水洗和干燥

1) 水洗。胶片在定影后, 应在流动的清水中冲洗20~30min, 冲洗的目的是将胶片表面和乳剂膜内吸附的硫代硫酸钠以及银盐络合物清除掉。否则银盐络合物会分解产生硫化银, 硫代硫酸钠也会缓慢地与空气中的水分和二氧化碳作用, 产生硫和硫化氢, 最后与金属银作用生成硫化银。硫化银会使射线底片变黄, 影像质量下降, 为使射线底片具有稳定的质量, 能够长期保存, 必须进行充分的水洗。

2) 干燥。干燥的目的是去除膨胀的乳剂层中的水分。为防止干燥后的底片产生水迹, 可在水洗后、干燥前进行润湿处理, 即把水洗后的湿胶片放入润湿液(质

量分数约为 0.3% 的洗洁精水溶液) 中浸润约 1min, 然后取出, 使水从胶片表面流光, 再进行干燥。

## 5. 暗室处理综述

暗室处理的基本过程一般都包括显影、停显(或中间水洗)、定影、水洗及干燥这五个基本过程。经过这些过程, 使胶片潜在的图像成为固定下来的可见图像。暗室处理方法, 目前可分成自动处理和手工处理两类。自动处理采用自动洗片机完成胶片暗室处理过程, 它需要使用专用显影液、定影液, 一般是在高温下进行处理, 得到的射线照片质量好并且稳定。手工处理可分为盘式处理和槽式处理两种方式, 槽式处理适于处理规格比较一致的胶片; 盘式处理适于胶片规格不固定、变化较大情况的暗室处理, 盘式处理要求操作人员应具有熟练的暗室操作技术和较高的操作水平, 否则将难以得到质量良好的射线照片。手工处理时各环节操作的概要情况见表 3-5-2。

表 3-5-2 手工暗室处理过程的要点

处理过程	温度/℃	时间/min	基本操作与要求
显影	20 ± 2	4 ~ 6	水平方向、竖直方向移动胶片
停显	16 ~ 24	0.5 ~ 1	应保证胶片完全浸入在停显液中
定影	16 ~ 24	10 ~ 15	可间断适当时间移动胶片
水洗	一般 16 ~ 24	≥30	流动水, 级联方式可减少水洗时间
干燥	≤40	—	环境空气中应无尘、无杂物

暗室操作的基本要求是: 清洁、有序、细心、熟练。

暗室操作人员, 在进行暗室操作之前应洗手, 去除手上的汗液和污物, 以保证不因手接触胶片而对胶片产生污染, 必要时应戴乳胶手套。

在切装胶片之前, 应清洁工作台面、切刀及有关用具; 整理并布置工作台面, 使胶片、暗袋及增感屏等按序排放; 必要时应带细纱手套进行切装胶片的操作。切装后剩余的非整张胶片, 应加上必要的包装纸, 按管理规定放置, 以备以后使用。操作人员应安排好正确的工作流程, 养成良好的习惯, 避免错装、漏装。切装胶片和胶片冲洗的主要处理过程 [显影、停显(或中间水洗)、定影的初期阶段] 必须在安全红灯照明下进行。

冲洗胶片之前, 应按序布置好处理溶液, 完成必要的温度控制检验, 调整好计时设备。对手工处理, 需要时应进行溶液有效性试验, 对自动洗片机, 在预热后必要时应进行系统稳定性试验。

操作之中必须避免胶片之间、胶片与工作台面、胶片与暗袋间的严重摩擦, 避免胶片发生弯折和受到严重挤压; 取放胶片时应尽量夹持其边角部位、两个侧边, 尽量减少手与胶片表面的接触面积和时间。

暗室处理的各个操作环节, 必须遵守有关的规定, 必须按有关的操作要求进

行。操作时若粗心常导致胶片损伤，并将严重损害射线照片的质量，甚至造成返工。

### 三、自动洗片机

自动洗片机采用连续冲洗方式，能自动完成显影、定影、水洗及烘干整个暗室处理过程，它与手工处理胶片相比有以下优点：

- 1) 速度快。自动洗片机能在 8 ~ 12min 内提供干燥好的可供评定的射线照相底片。
  - 2) 效率高。每小时约可处理 360mm × 100mm 胶片 100 ~ 200 张。
  - 3) 质量好。只要拍片条件正确，通过自动洗片机处理的底片表面光洁、性能稳定且像质好。
  - 4) 劳动强度低。操作者只需将胶片逐张输入自动洗片机即可，对操作者的技术熟练要求不高。

自动洗片机工作原理如图 3-5-1 所示。

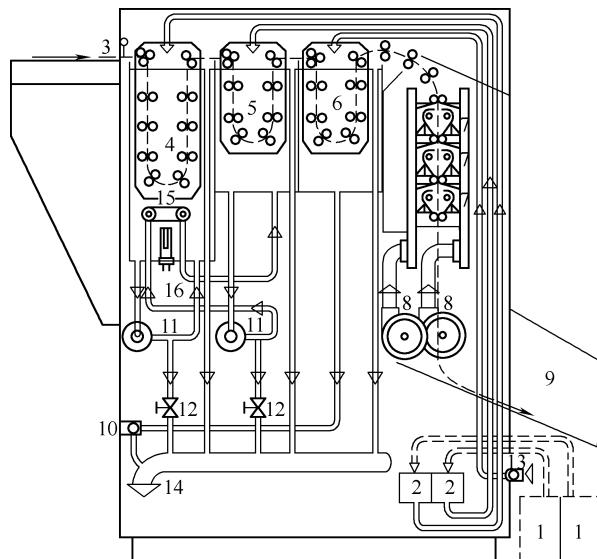


图 3-5-1 自动洗片机工作原理图

1—显影液和定影液补充箱（机外） 2—补给泵 3—进片扫描器 4—显影箱 5—定影箱  
6—水洗箱 7—红外加热器 8—风扇 9—收片斗 10—排水阀门 11—循环泵  
12—显影液和定影液排放口 13—冷水供给阀门 14—总排放口 15—定影液热交换器 16—显影液加热器

自动洗片机一般都包括五部分：胶片传送机构、显影液和定影液输送机构（补充机构）、温度控制机构、搅拌机构及干燥机构。

- 1) 胶片传送机构。胶片传送机构是由多个滚筒及其传动部件组成, 它能使胶片从输入口进入, 按一定速率移动, 完成显影、定影、水洗及干燥等各项胶片处理。

工作，最后将底片送入收片箱。送片滚筒分为几组，可以方便地从洗片机中取出，进行清洗、维修工作。

2) 温度控制机构。自动洗片机内显影、干燥温度要求严格，温度自动控制通过电加热器及热交换器来完成，使各项温度达到要求。

3) 干燥机构。由电加热器和鼓风机构成，使水洗后的底片在热风中迅速烘干。

4) 补充机构。显影液、定影液在与胶片多次作用后药力会下降，然而自动洗片机显影、定影的时间和温度是一定的，要求药液的浓度不能变化，为了解决这一矛盾，自动洗片机配置了显影液、定影液补充筒。每次进片自动洗片机能给出一个进片信号，使溶液泵自动向机内补充一定数量的显影液、定影液，与此同时机内排出相应数量的溶液，每处理  $1m^2$  的胶片约需补充 1000mL 显影液和 1000mL 定影液。

5) 搅拌机构。为了使机内药液温度、浓度均匀，并使胶片表面不断与溶液充分接触，自动洗片机设有搅拌机构。

使用自动洗片机应注意下列事项：

1) 每次使用前，应先开机预热一段时间，当温度达到设定温度、机器给出允许送片信号后才能开始处理胶片。然后，才能开始正式处理工作。

2) 处理的胶片的长度一般不应小于 100mm。

3) 胶片不能不间断地连续送入（对同一送片位置），必须在前一张胶片已送入一定时间、机器给出允许送片信号后方可送入第二张胶片。

4) 胶片送入时，应使其长度方向尽量垂直于送入口方向。

5) 在自动洗片机工作结束后或开始前，将显影槽和定影槽中的辊轴机构取出，用清水洗净，以免其上黏附的药液氧化和形成结晶颗粒对胶片产生污染。否则，在正式处理胶片前，应先送入一张宽度为机器可处理的最大幅面的、一定长度的清洗片（例如，常用一张  $43cm \times 35cm$  尺寸的废胶片），用它带走辊轴上黏附的已氧化的显影液和定影液，但这并不是推荐的方法。此外，还应定期清洗水洗槽和其辊轴。

6) 要防止异物进入洗片机，防止划伤滚筒。

# 第六章 | 射线照相底片的评定

## 一、评片工作的基本要求

缺陷是否能够通过射线照相而被检出，取决于若干环节。首先，必须使缺陷在底片上留下足以识别的影像，这涉及照相质量方面的问题。其次，底片上的影像应在适当条件下得以充分显示，以利于评片人员观察和识别，这与观片设备和环境条件有关。第三，评片人员对观察到的影像应能做出正确的分析与判断，这取决于评片人员的知识、经验、技术水平和责任心。

综上所述，对评片工作的基本要求可归纳为三个方面，即底片质量要求，设备、环境条件要求和人员条件要求。

### 1. 底片质量要求

通常对底片的质量检查包括以下项目：

1) 灵敏度检查。灵敏度是射线照相质量诸多影响因素的综合结果。底片灵敏度用像质计测定，即根据底片上像质计的影像的可识别程度来定量评价灵敏度高低。目前国内广泛使用的是丝形像质计，评价底片灵敏度的指标是像质指数  $Z$ ，它等于底片上能识别出的最细金属丝的编号。显然，透照给定厚度的工件时，底片上显示的金属丝直径越小，其像质指数  $Z$  越大，底片的灵敏度也就越高。灵敏度是射线照相底片质量的最重要指标之一，必须符合有关标准的要求。我国国家标准 GB/T 3323—2005 根据不同透照厚度和不同照相质量等级，规定了必须达到的像质指数  $Z$ 。对底片的灵敏度检查内容包括：底片上是否有像质计影像、像质计型号、规格、摆放位置是否正确，能够观察到的金属丝像质指数是多少，是否达到了标准规定的要求等。

2) 黑度检查。黑度是射线照相底片质量的又一重要指标，各个射线检测标准对底片的黑度范围都有规定。GB/T 3323—2005 标准规定了底片黑度范围。由胶片特性曲线可知，胶片梯度随黑度的增加而增大，为保证底片具有足够的对比度，黑度不能太小，所以标准规定了黑度的下限值；另一方面，受观片灯亮度的限制，底片黑度又不能过大，黑度过大将造成透过光强不足，导致人眼观察识别能力下降，所以标准又规定了底片黑度的上限值。底片黑度用光学密度计测定。测定时应注意，最大黑度一般在底片中部焊接接头热影响区位置，最小黑度一般在底片两端焊

缝余高中心位置，只有当有效评定区内各点的黑度均在规定的范围内，才能认为该底片黑度符合要求。

3) 标记检查。底片上标记的种类和数量应符合有关标准和工艺规定。常用的标记种类有：工件编号、焊缝编号、部位编号、中心定位标记及搭接标记。此外，有时还需使用返修标记，像质计放在胶片侧的区别标记以及人员代号，透照日期等。标记应放在适当位置，距焊缝边缘应不少于5mm。

4) 伪缺陷检查。伪缺陷是指由于透照操作或暗室操作不当，或由于胶片、增感屏质量不好，在底片上留下的非缺陷影像。常见的伪缺陷影像包括：划痕、折痕、水迹、静电感光、指纹、霉点、药膜脱落及污染等。伪缺陷容易与真缺陷影像混淆，影响评片的正确性，造成漏检和误判，所以底片上有效评定区域内不允许有伪缺陷影像。

5) 背散射检查。背散射检查即“B”标记检查。照相时，在暗盒背面贴附一个“B”铅字标记，观片时若发现在较黑背景上出现“B”字较淡影像，说明背散射严重，应采取防护措施重新拍照；若不出现“B”字或在较淡背景上出现较黑“B”字，则说明底片未受背散射影响，符合要求。黑“B”字是由于铅字标记本身引起射线散射产生了附加增感，不能作为底片质量判废的依据。

## 2. 环境、设备条件要求

环境、设备条件应能提供底片的最大的细节对比度，使评片人员感到舒适且疲劳最小，各种干扰应尽量避免，以保证评片人员能聚精会神地工作。

(1) 环境 观片室应与其他工作岗位隔离，单独布置，室内光线应柔和偏暗，但不必全黑，一般等于或略低于透过底片光的亮度。室内照明应避免直射人眼或在底片上产生反光。观片灯两侧应有适当台面供放置底片及记录。黑度计、直尺等常用仪器和工具应靠近放置，取用方便。

(2) 观片灯 观片灯应有足够的发光强度。要求透过底片的光亮度不低于 $30\text{cd}/\text{m}^2$ ，这样，为能观察黑度为3.5的底片，要求观片灯的最大亮度应大于 $10^5\text{cd}/\text{m}^2$ 。观片灯亮度必须可调，以便在观察低黑度区域时将光强减小，而在观察高黑度区域时将光强调大。光源的颜色通常应是白色，也允许橙色或黄绿色之间。偏红或偏紫色则不适合。观片灯应有足够大的照明区，一般不小于 $300\text{mm} \times 80\text{mm}$ ，照明区过小会使人感到观察不方便，实际使用时采用一系列遮光板改变照明区面积，使其略小于底片尺寸。照射到底片上的光应是散射的，通常用一块漫射玻璃来实现这一要求。观片灯应散热良好，无噪声。

(3) 各种工具用品 评片需用的工具物品包括：

- 1) 放大镜。用于观察影像细节，放大倍数一般为2~5倍，最大不超过10倍。
- 2) 遮光板。观察底片局部区域或细节时，遮挡周围区域的透射光，避免多余光线进入评片人眼中。
- 3) 直尺。最好是透明塑料尺。

- 4) 记号笔。用于在底片上作标记。
- 5) 手套。避免评片人手指与底片直接接触，产生污痕。
- 6) 文件。提供数据或用于记录的各种规范、标准及图表。

### 3. 人员条件要求

担任评片工作的人员应符合以下要求：

- 1) 应经过系统的专业培训，并通过法定部门考核确认其具有承担此项工作的能力与资格。
- 2) 应具有一定的评片实际工作经历和经验。
- 3) 除了系统地掌握射线检测理论知识外，还应具有焊接、材料等相关专业知识。
- 4) 应熟悉射线检测标准以及被检测试件的设计制造规范和有关管理法规。
- 5) 应充分了解被检测试件的状况，如材质、焊接和热处理工艺，以及表面形态等。
- 6) 应充分了解所评定的底片的射线照相工艺及工艺执行情况。
- 7) 应具有良好的职业道德，高度的工作责任心。
- 8) 应具有良好的视力。要求矫正视力不低于 1.0，近视力检查应能读出距离 400mm 处高 0.5mm、间隔 0.5mm 的一组印刷字母。

### 4. 与评片基本要求相关的知识

1) 人眼的视觉特性。电磁波谱中可见部分波长为 400 ~ 700nm，其中波长较短部分呈紫色，而波长较长部分呈红色，此范围内所有波长的光都存在时则呈白色。人眼对不同颜色的可见光敏感程度不同，在较亮环境中对黄光最敏感，在较暗环境中对绿光最敏感，无论在何种亮度条件下，人眼对红光和蓝紫色光都不敏感。虽然片基对透射光的颜色有些影响，但影响光色的主要因素还是观片灯，所以要求观片灯的光色应为白色、橙色或黄绿色，而不宜使用偏红或偏蓝色光。人眼难以适应光强不断变化的环境，从亮环境到暗环境，适应时间至少需要 10min。光强的不断变化，除了使视觉敏感度下降外，还容易引起眼疲劳，所以观片室不宜过暗。人眼能分辨物体的最小尺寸称作目视分辨率，它依赖于物体对眼的张角，而张角又受眼的聚焦能力的限制。此外，光强、颜色、反差等因素对目视分辨率也有影响，一般条件下正常眼睛大约能看清 0.25mm 的点或 0.025mm 的线，对更微小的细节，则需要借助放大镜观察，合适的放大倍数应为 2 ~ 5 倍，高倍放大镜因易产生影像畸变而不宜采用。

2) 表观对比度与观片条件。观片时，进入眼中的光线除了透过底片缺陷部位的光强  $L$  外，还要加上  $L_s$ ， $L_s$  包括室内环境光线和底片周围对显示缺陷不起作用的光线。由于  $L_s$  的影响，人眼辨别影像黑度差的能力下降，由此提出了表观对比度  $\Delta D_a$  的概念。 $L_s$  越大，表观对比度  $\Delta D_a$  越小，因此应尽量避免那些对显示缺陷不起作用的光线进入眼中。

观片条件对透度计识别灵敏度的影响如下：底片黑度和识别灵敏度的关系，对较粗的金属丝，底片黑度大一些，识别灵敏度高；而对较细的金属丝，底片黑度小一些，识别灵敏度高。增大观片灯亮度能够增大可识别金属丝影像的黑度范围。周围光线使得人眼感觉到的底片对比度变小，从而使得可识别的黑度范围减小，识别灵敏度下降。

## 二、评片基本知识

### 1. 观片的基本操作

观察底片的操作可分为两个阶段，即通览底片和影像细节观察。

通览底片的目的是获得焊接接头质量总体印象，找出需要分析研究的可疑影像。通览底片时必须注意，评定区域不仅仅是焊缝，还包括焊缝两侧的热影响区，对这两部分区域，都应仔细观察。由于余高的影响，焊缝和热影响区的黑度差异往往较大，有时需要调节观片灯亮度，在不同的光强下分别观察。

影像细节观察是为了做出正确的分析判断。因细节的尺寸和对比度极小，识别和分辨是比较困难的，为尽可能看清细节，常采用下列方法：

- 1) 调节观片灯亮度，寻找最适合观察的透过光强。
- 2) 用纸框等物体遮挡住细节部位邻近区域的透过光线。
- 3) 使用放大镜进行观察。
- 4) 移动底片，不断改变观察距离和角度。

### 2. 投影的基本概念

投影概念对于影像识别和评定具有重要意义。用一组光线将物体的形状投射到一个面上去，称为“投影”。在该面上得到的图像，也称作“投影”。这个面称为“投影面”（通常是平面）。光线称“投射线”。投射线从一点出发的称“中心投影”，投射线相互平行的称“平行投影”。平行投影中，投射线与投影面垂直的称“正投影”，倾斜的称“斜投影”。

射线照相就是通过投影把具有三维尺寸的试件（包括其中的缺陷）投射到底片上转化为只有二维尺寸的图像，由于射线源、物体（试件及缺陷）、胶片三者之间相对位置和角度的变化，会使底片上的影像与实际物体的尺寸、形状及位置有所不同，常见的情况有以下几种：

1) 放大。影像放大是指底片上的影像尺寸大于物体的实际尺寸。由于焦距比射源尺寸大很多，射源可视为“点源”，照相投影可视为“中心投影”，影像放大程度与  $L_1$ 、 $L_2$  有关（图 3-6-1），放大率  $M$  的计算公式为

$$M = W'/W = (L_1 + L_2)/L_1 = 1 + L_2/L_1$$

一般情况下  $L_1 \gg L_2$ ，所以，影像放大并不显著，底片评定时一般不考虑放大产生的影响。

- 2) 畸变。对于同一物体，正投影和斜投影所得到的影像形状不同，如果正投

影得到的像视为正常，则认为斜投影的像发生了畸变。

实际照相中，影像畸变大部分是由投射线和投影面不垂直的斜投影造成的。此外，当投影面不是平面时（胶片弯曲），也会引起或加剧畸变。球形气孔在斜投影中畸变影像为椭圆形（图 3-6-2）。裂纹影像有时会畸变为一个有一定宽度的，即黑度不大的暗带。畸变会改变缺陷的影像特征，有时会给缺陷的识别和评定带来困难。

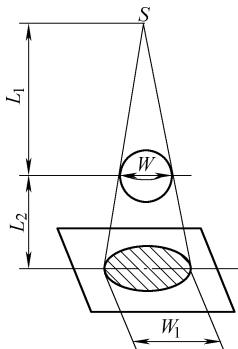


图 3-6-1 球孔透照的影像放大

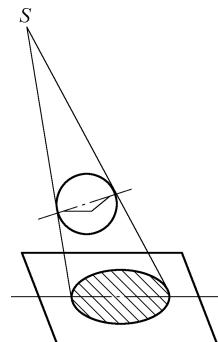


图 3-6-2 球孔透照的影像畸变

3) 重叠。影像重叠是射线照相投影特有的情况，由于射线能够穿透物质，试件对于射线是“透明”的，试件上下表面的几何形状影像和内部缺陷影像都能在底片上出现，从而造成影像重叠。例如，图 3-6-3 中，底片上 A 点的影像实际上是投射线经过各点  $A_1, A_2, A_3, \dots$  的影像的叠加。射线照相底片上影像重叠的情况有以下几种：试件上下表面几何形状影像重叠；表面几何形状影像与内部缺陷影像重叠；两个或更多的缺陷影像重叠。在评片时应注意分析不同影像的层次关系。

4) 相对位置改变。比较正投影方式照相的底片和斜投影方式照相的底片，可以发现底片上影像的相对位置发生变化。例如图 3-6-4 中，不同的投影角度使  $a, b, c, d$  点在底片上的相对位置改变。影像位置是判断和识别缺陷的重要依据之一，相对位置改变有时会给评片带来困难，需要通过观察，推测投影角度，做出正确判断。

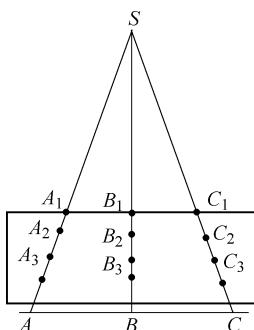


图 3-6-3 射线照相的影像重叠

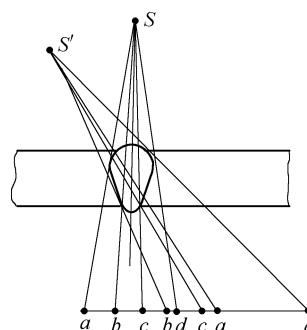


图 3-6-4 射线照相的影像相对位置改变

### 3. 焊接基本知识

(1) 焊接冶金特点 两个分离的物体（同种或异种材料）通过原子或分子之间的结合和扩散造成永久性连接的工艺过程称为焊接。熔化焊是金属材料焊接的主要方法。熔化焊时，被焊金属在热源作用下被加热，发生局部熔化，同时熔化了的金属、熔渣及气相之间进行着一系列影响焊缝金属的成分、组织和性能的化学冶金反应，随着热源的离开，熔化金属开始结晶，由液态转变为固态，形成焊缝。熔化焊是一种特殊的冶金过程，它具有以下特点：

1) 温度高。以焊条电弧焊为例，电弧温度高达  $6000 \sim 8000^{\circ}\text{C}$ ，熔滴温度达  $1800 \sim 2400^{\circ}\text{C}$ ，在如此高温下，外界气体（如  $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2$ ）会大量分解，溶入液态金属中，随后又在冷却过程中析出，所以焊缝易形成气孔缺陷。

2) 温度梯度大。焊接是局部加热，熔池温度在  $1700^{\circ}\text{C}$  以上，而其周围是冷态金属，形成很陡的温度梯度，从而会导致较大的内应力，引起变形或产生裂纹缺陷。

3) 熔池小，冷却速度快。熔池的体积，手工焊为  $2 \sim 10\text{cm}^3$ ，自动焊为  $9 \sim 30\text{cm}^3$ ，金属从熔化到凝固只有几秒钟，在这样短的时间里，冶金反应是不平衡的，因此焊缝金属成分不均匀，偏析较大。

(2) 焊缝结晶特点 焊接熔池从高温冷却到常温，其间经历过两次组织变化过程：第一次是液体金属转变为固体金属的结晶过程，称为一次结晶；第二次是温度降低到相变温度时，发生组织转变，称为二次结晶。

一次结晶从熔合线上开始，晶体的生长方向指向熔池中心，形成柱状晶体，当柱状晶生长至相互接触时，结晶过程即告结束。焊缝表面形态以及热裂纹、气孔等缺陷的成因、形态、位置均与一次结晶有关（图 3-6-5）。

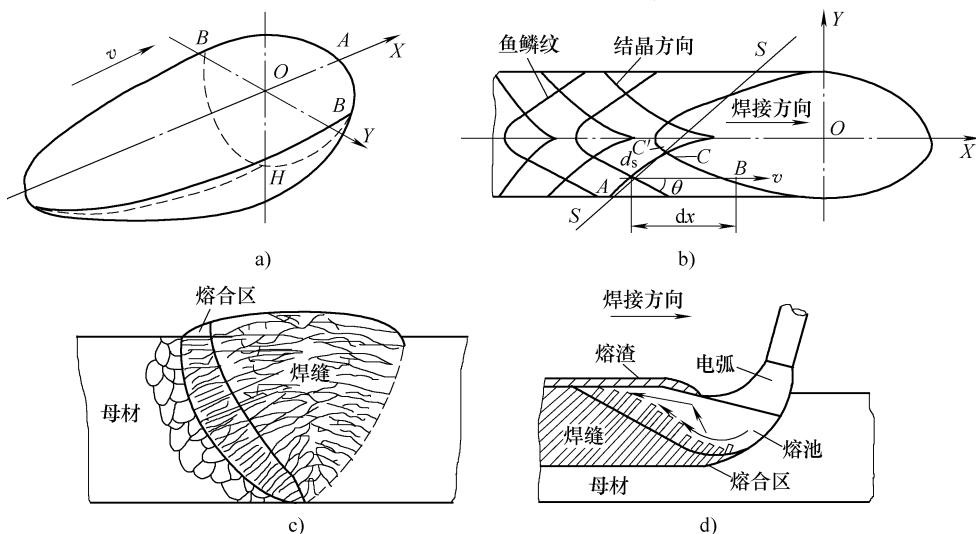


图 3-6-5 熔池金属的结晶方向

a) 熔池 b) 俯视 c) 剖视 d) 侧面

对低碳钢及低合金钢，一次结晶的组织为奥氏体，继续冷却到低于相变温度时，奥氏体分解为铁素体和珠光体。冷却速度影响着铁素体和珠光体的比率和大小，进而影响焊缝的强度、硬度和塑性韧性。当冷却速度很大时，有可能产生淬硬组织马氏体。冷裂纹的形成与淬硬组织有关。

(3) 焊接接头组成及热影响区组织 焊接接头由焊缝和热影响区两部分组成。二次结晶不仅仅发生在焊缝，也发生在靠近焊缝的基本金属区域，该区域在焊接过程中受到不同程度加热，在不同温度下停留一段时间后又以不同速度冷却下来，最终获得各不相同的组织和力学性能，称为热影响区。根据组织特征可将热影响区划分为熔合区、过热区、相变重结晶区及不完全重结晶区四个小区，其中熔合区和过热区组织晶粒粗大，塑性很低，是产生裂纹、局部脆性破坏的发源地，是焊接接头的薄弱环节。

低碳钢焊接接头热影响区的划分如图 3-6-6 所示，组织特征和性能见表 3-6-1。不同焊接方法热影响区的平均尺寸见表 3-6-2。

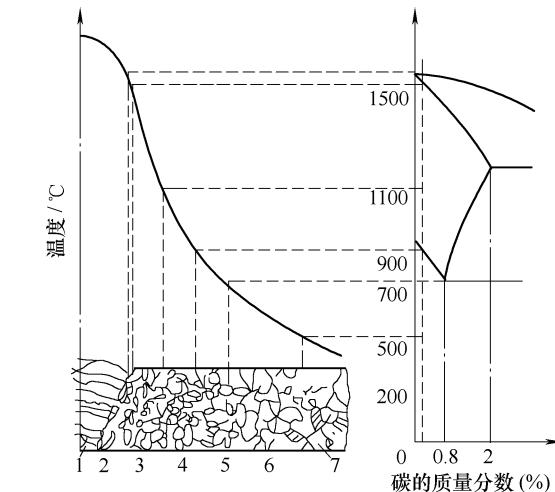


图 3-6-6 焊接热影响区不同温度范围与铁碳相图的关系

表 3-6-1 低碳钢热影响区的组织特征及性能

部 位	加热温度范围/℃	组织特征及性能	图 3-6-6 上的位置
焊缝	>1500	铸造组织柱状树枝晶	1
熔合区及过热区	1400 ~ 1250	晶粒粗大，可能出现魏氏组织，硬化之后，易产生裂纹，塑性不好	2
	1250 ~ 1100	粗晶与细晶交替混合	
相变重结晶区	1100 ~ 900	又称正火区或细晶粒区，晶粒细化，力学性能良好	3
不完全重结晶区	900 ~ 730	粗大铁素体和细小的珠光体、铁素体，力学性能不均匀，在急冷的条件下可能出现高碳马氏体	4
时效脆化区	730 ~ 300	由于热应力及脆化物析出，经时效而产生脆化现象，在显微镜下观察不到组织上的变化	5 ~ 6
母材	300 ~ 室温	没有受到热影响的母材部分	7

表 3-6-2 不同焊接方法热影响区的平均尺寸

焊接方法	各区平均尺寸/mm			总宽/mm
	过热	相变重结晶	不完全重结晶	
焊条电弧焊	2.2~3.0	1.5~2.5	2.2~3.0	6.0~8.5
埋弧焊	0.8~1.2	0.8~1.7	0.7~1.0	2.3~4.0
电渣焊	18~20	5.0~7.0	2.0~3.0	25~30
氧乙炔焊	21	4.0	2.0	27.0
真空电子束	—	—	—	0.05~0.75

#### 4. 焊接缺陷的危害性及分类

焊接缺陷对锅炉压力容器安全的影响主要表现在三个方面，一是由于缺陷的存在，减小了焊缝的承载横截面积，削弱了静力抗拉强度；二是由于缺陷形成缺口，缺口尖端会发生应力集中和脆化现象，容易产生裂纹并扩展；三是缺陷可能穿透筒壁，发生泄漏，影响致密性。

金属熔化焊焊接接头中的缺陷可分为以下六类：

(1) 裂纹 裂纹是指材料局部断裂形成的缺陷。

裂纹有多种分类方法。按延伸方向可分为纵向裂纹、横向裂纹及辐射状裂纹等；按发生部位可分为焊缝裂纹、热影响区裂纹、熔合区裂纹、焊趾裂纹、焊道下裂纹及弧坑裂纹等；按发生条件和时机可分为热裂纹、冷裂纹及再热裂纹等(图 3-6-7)。

热裂纹发生于焊缝金属凝固末期，敏感温度区间大致在固相线附近的高温区，最常见的热裂纹是结晶裂纹，其生成原因是在焊缝金属凝固过程中，结晶偏析使杂质生成的低熔点共晶物富集于晶界，形成所谓“液态薄膜”，由于焊缝凝固收缩而受到拉应力，最终开裂形成裂纹。结晶裂纹最常见的情况是沿焊缝中心长度方向开裂，为纵向裂纹，有时也发生在焊缝内部两个柱状晶之间，为横向裂纹(图 3-6-8)。弧坑裂纹是另一种形态的、常见的热裂纹。热裂纹都是沿晶界开裂，通常发生在杂质较多的低碳钢、低合金钢及奥氏体不锈钢等材料焊缝中。

冷裂纹一般在焊后冷却至马氏体转变温度以下产生，对于低碳钢和低合金钢，大致在 200℃以下。冷裂纹可以在焊后立即出现，也

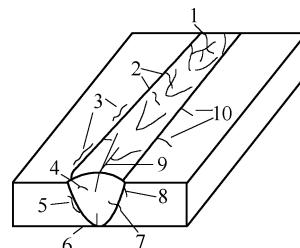


图 3-6-7 各种裂纹的分布情况

1—弧坑裂纹 2—焊缝上横向裂纹  
3—HAZ 纵向裂纹 4—焊缝内晶间裂纹  
5—焊道下裂纹 6—焊缝根部裂纹  
7—HAZ 焊缝贯穿裂纹 8—焊趾裂纹  
9—焊缝上纵向裂纹 10—HAZ 横向裂纹

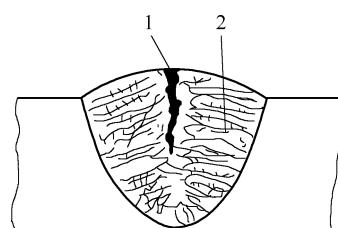


图 3-6-8 焊缝中结晶裂纹的出现地带

1—纵向裂纹 2—横向裂纹

有可能在几个小时，几天甚至更长时间以后才发生，这种冷裂纹称为延迟裂纹，具有更大的危险性。拘束应力、淬硬组织和扩散氢是产生延迟裂纹的三大因素。延迟裂纹多发生在热影响区，少数发生在焊缝上，沿纵向和横向都有发生。焊趾裂纹、焊道下裂纹、根部裂纹都是延迟裂纹常见的形态。冷裂纹微观形态有沿晶开裂，也有穿晶开裂，多发生在低合金高强钢，中、高碳钢的焊缝上。

再热裂纹是指某些含钼、钒、铬、铌及钛等沉淀强化元素的低合金高强钢和耐热钢，焊接冷却后又重新加热（通常是消除应力热处理）的过程中，在焊接热影响区的粗晶区产生的裂纹。产生裂纹的原因是再加热时焊接残余应力松弛，导致较大的附加变形，与此同时热影响区的粗晶部位会析出合金碳化物组成的沉淀硬化相，如果粗晶部位的蠕变塑性不足以适应应力松弛所产生的附加变形，则沿晶界发生裂纹。再热裂纹的敏感温度区间为550~650℃。

裂纹是焊接缺陷中危害性最大的一种。裂纹是一种面积型缺陷（具有三维尺寸的缺陷称为体积型缺陷，具有二维尺寸（第三维尺寸极小）的缺陷称为面积型缺陷），它的出现将显著减小承载横截面积，更严重的是裂纹端部形成尖锐缺口，应力高度集中，很容易扩展导致破坏。

(2) 未熔合 未熔合是指焊缝金属与母材金属，或焊缝金属之间未熔化结合在一起的缺陷。按其所在部位，未熔合可分为坡口未熔合、根部未熔合及层间未熔合三种（图3-6-9）。产生未熔合缺陷的原因主要有：焊接电流过小；焊接速度过快；焊条角度不对；产生了弧偏吹现象；焊接处于下坡焊位置，母材未熔化时已被铁液覆盖；母材表面有污物或氧化物影响熔敷金属与母材间的熔化结合等。未熔合也是一种面积型缺陷，坡口未熔合和根部未熔合对承载横截面积的减小都非常明显，应力集中也比较严重，其危害性仅次于裂纹。

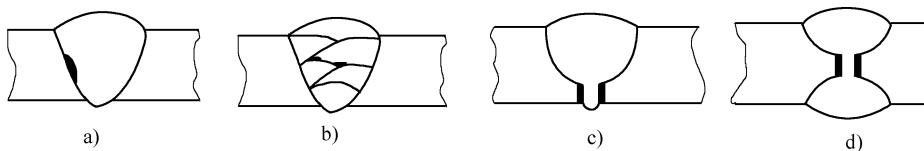


图3-6-9 未熔合示意图

a) 坡口未熔合 b) 层间未熔合 c) 单V坡口根部未熔合 d) X坡口根部未熔合

(3) 未焊透 未焊透是指母材金属之间没有熔化，焊缝金属没有进入接头的根部造成的缺陷。未焊透可分为双面焊未焊透和单面焊未焊透两种（图3-6-10）。产生未焊透的原因主要有：焊接电流过小，焊接速度过快；坡口角度太小；根部钝边太厚；间隙太小；焊条角度不当；电弧太长等。未焊透也是一种比较危险的缺陷，其危害性取决于缺陷的形状、深度和长度。

(4) 夹渣 夹渣是指焊缝金属中残留有外来固体物质所形成的缺陷。按形态，夹渣可分为点状夹渣、块状夹渣及条状夹渣（图3-6-11）；按残留固体物质种类，



图 3-6-10 未焊透示意图

a) 双面焊未焊透 b) 单面焊未焊透

夹渣可分为非金属夹渣和金属夹渣。非金属夹渣的主要成分是硅酸盐，也有一些是氧化物和硫化物，它们主要来自焊条药皮和焊剂熔渣。金属夹渣最常见的是钨夹渣，它是由钨极氩弧焊中的钨极烧损，熔入焊缝中形成的。产生非金属夹渣的主要原因是：焊接电流太小，焊接速度太快；熔池金属凝固过快；运条不正确；铁液与熔渣分离不好；层间清渣不彻底等。产生金属夹渣的主要原因是：焊接电流过大或钨极直径太小，氩气保护不良引起钨极烧损，钨极触及熔池或焊丝而剥落。夹渣是一种体积型缺陷，容易被射线照相检出。夹渣会减少焊缝受力截面。夹渣的棱角容易引起应力集中，成为交变载荷下的疲劳源。

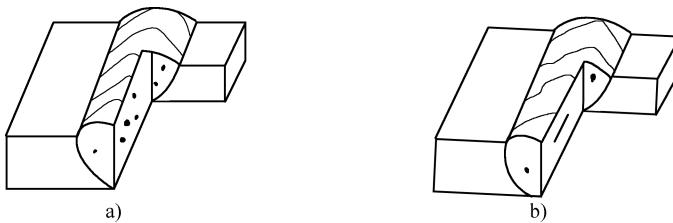


图 3-6-11 夹渣示意图

a) 单个点状夹渣 b) 条状夹渣

(5) 气孔 气孔是指溶入焊缝金属的气体引起的空洞。按形状，气孔可分为球形气孔、条形气孔及针形气孔；按分布状态，气孔可分为单个气孔、条状气孔、链状气孔及虫状气孔（图 3-6-12）。生成气孔的气体主要是  $H_2$  和  $CO$ ，气体来自电弧区周围的空气以及母材和焊材表面的杂质，如油污、锈、水分以及焊条药皮和焊剂的分解燃烧。熔化了的金属在高温下可以吸收大量气体，冷却时，气体在金属中的溶解度下降，气体便析出并聚集生成气泡上浮，如果受到焊缝金属结晶的阻碍无法逸出，就会留在金属内生成气孔。气孔是一种体积型缺陷，它对焊缝强度的影响主要是减少了受力截面，深气孔（针孔）有时会破坏焊缝的致密性。

(6) 形状缺陷 形状缺陷是指焊缝金属表面形成不良或其他原因造成的缺陷，大致分两类：

- 1) 视力能及的形状缺陷。咬边、未焊满、弧坑、外焊瘤及错边等；
  - 2) 视力不能及的形状缺陷。烧穿、根部内凹、根部咬边及根部焊瘤及错边等。
- 视力能及的形状缺陷属于外观检查的范围，除错口涉及的缺陷识别需要谈到

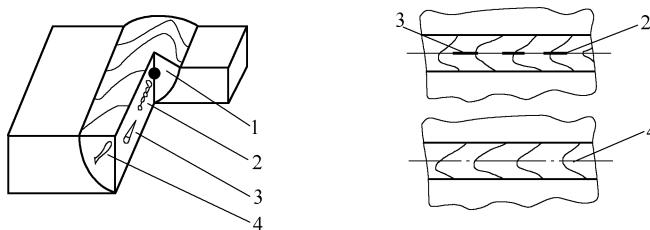


图 3-6-12 气孔示意图

1—单个气孔 2—链状气孔 3—条状气孔 4—虫状气孔

外，不在这里讨论。视力不能及的形状缺陷是与超声检测有关的问题，本节做一些必要的叙述。

(1) 根部焊瘤 焊接过程中，熔化金属流淌到焊缝根部之外所形成的金属瘤称为根部焊瘤，如图 3-6-13 所示。根部焊瘤的出现往往伴随着未熔合、未焊透等缺陷。

(2) 内凹 仰焊或立焊位置的单面焊焊缝，在根部由于熔化焊金属未顶上去而形成的弧形下塌，如图 3-6-14 所示。熔化焊金属的下塌，减小了焊缝的横截面积，且在一定程度上形成应力集中。

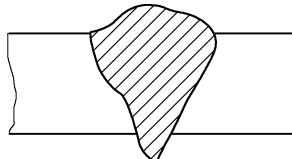


图 3-6-13 焊瘤示意图

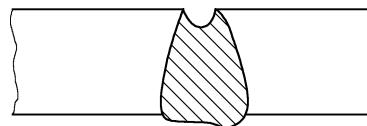


图 3-6-14 内凹示意图

(3) 根部咬边 口径不大的管子焊缝一般采用单面焊，根部第一道焊缝熔化焊过度会产生咬边，称为根部咬边（俗称内咬边），如图 3-6-15 所示。

(4) 错边 由于焊缝两侧母材没有对正而造成板的中心线平行偏差称为错边，如图 3-6-16 所示。

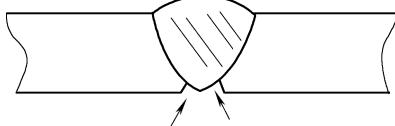


图 3-6-15 根部咬边示意图

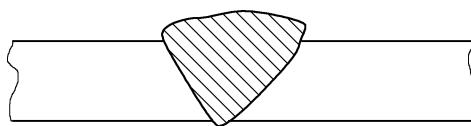


图 3-6-16 错边示意图

### 三、底片影像分析

底片上影像千变万化，形态各异，但按其来源大致可分为三类：由缺陷造成的缺陷影像，由试件外观形状造成表面几何影像，由于材料、工艺条件或操作不当造

成的伪缺陷影像。对于底片上的每一个影像，评片人员都应能够做出正确解释。影像分析和识别是评片工作的重要环节，也是评片人员的基本技能。

### 1. 焊接缺陷影像

(1) 裂纹 底片上裂纹的典型影像是轮廓分明的黑线或黑丝。其细节特征包括：黑线或黑丝上有微小的锯齿，有分叉，粗细和黑度有时有变化，有些裂纹影像呈较粗的黑线与较细的黑丝相互缠绕状；线的端部尖细，端头前方有时有丝状阴影延伸。

各种裂纹的影像差异和变化较大，因为裂纹影像不仅与裂纹自身形态有关，而且与射线能量、工件厚度、透照角度及底片质量等许多因素有关。例如，透照时射线束方向与裂纹深度方向平行，得到的裂纹影像是一条黑线，随着透照角度逐渐增大，黑线将变宽，同时黑度变小，透照角度更大时，可能只出现一条模糊的宽带阴影，完全失去了裂纹影像特征。又例如，薄板焊缝的裂纹影像比较清晰，各种细节特征可以显示出来，而当透照厚度增加后，细节特征可能有一部分丧失，甚至完全消失，影像将发生很大变化。所以在影像分析时，要注意各种因素对裂纹影像变化的影响。

裂纹可能发生在焊接接头的任何部位，包括焊缝和热影响区。

(2) 未熔合 根部未熔合的典型影像是条细直黑线，线的一侧轮廓整齐且黑度较大，为坡口钝边痕迹，另一侧轮廓可能较规则，也可能不规则。根部未熔合在底片上的位置应是焊缝根部的投影位置，一般在焊缝中间，因坡口形状或投影角度等原因也可能偏向一边。

坡口未熔合的典型影像是连续或断续的黑线，宽度不一，黑度不均匀，一侧轮廓较齐，黑度较大，另一侧轮廓不规则，黑度较小，在底片上的位置一般在焊缝中心至边缘的1/2处，沿焊缝纵向延伸。

层间未熔合的典型影像是黑度不规则的块状阴影，形状不规则，如伴有夹渣时，夹渣部位的黑度较大。

(3) 未焊透 未焊透的典型影像是细直黑线，两侧轮廓都很整齐，为坡口钝边痕迹，宽度恰好为钝边间隙宽度。

有时坡口钝边有部分熔化，影像轮廓就变得不很整齐，线宽度和黑度局部发生变化，但只要能判断是处于焊缝根部的线性缺陷，仍判定为未焊透。未焊透在底片上处于焊缝根部的投影位置，一般在焊缝中部，因透照偏、焊偏等原因也可能偏向一侧。未焊透呈断续或连续分布，有时能贯穿整张底片。

(4) 夹渣 非金属夹渣在底片上的影像是黑点、黑条或黑块，形状不规则，黑度变化无规律，轮廓不圆滑，有的带棱角。

非金属夹渣可能发生在焊缝中的任何位置，条状夹渣的延伸方向多与焊缝平行。钨夹渣在底片上的影像是一个白点，由于钨对射线的吸收系数很大，因此白点的黑度极小（极亮），据此可将其与飞溅影像相区别。钨夹渣只产生在非熔化极氩

弧焊焊缝中，该焊接方法多用于不锈钢薄板焊接和管子对接环焊缝的打底焊接。钨夹渣尺寸一般不大，形状不规则，大多数情况是以单个形式出现，少数情况是以弥散状态出现。

(5) 气孔 气孔在底片上的影像是黑色圆点，也有呈黑线（线状气孔）或其他不规则形状的。气孔的轮廓比较圆滑，其黑度中心较大，至边缘稍减小。

气孔可以发生在焊缝中的任何部位，手工单面焊根部线状气孔、双面焊根部链状气孔、焊缝中心线两侧的虫状气孔是发生部位与气孔形状有对应规律的例子。“针孔”直径较小，但影像黑度很大，一般发生在焊缝中心。“夹珠”是另一类特殊的气孔缺陷，它是由前一道焊接生成的气孔被后一道焊接熔穿，铁液流进气孔的空间而形成的，在底片上的影像为黑色气孔中间包含着一个白色圆珠。

## 2. 常见伪缺陷影像及识别方法

伪缺陷是指由于照相材料、工艺或操作不当在底片上留下的影像，常见的有以下几种：

1) 划痕。胶片被尖锐物体（指甲、器具尖角、胶片尖角及砂粒等）划过，在底片上留下的黑线。划痕细而光滑，十分清晰。识别方法主要是借助反射光观察，可以看到底片上药膜有划伤痕迹。

2) 压痕。胶片局部受压会引起局部感光，从而在底片上留下压痕。压痕是黑度很大的黑点，其大小与受压面积有关。借助反射光观察，可以看到底片上药膜有压伤痕迹。

3) 折痕。胶片受弯折，会发生减感或增感效应。曝光前受折，折痕为白色影像；曝光后受折，折痕为黑色影像。最常见的折痕形状呈月牙形。借助反射光观察，可以看到底片有折伤痕迹。

4) 水迹。由于水质不好或底片干燥处理不当，会在底片上出现水迹，水滴流过的痕迹是一条黑线或黑带，水滴最终停留的痕迹是黑色的点或弧线。

水迹可以发生在底片的任何部位，黑度一般不大。水流痕迹直而光滑，可以找到起点和终点。水珠痕迹形状与水滴一致。借助反射光观察，有时可以看到底片上水迹处药膜有污物痕迹。

5) 静电感光。切装胶片时，因摩擦产生的静电发生放电现象使胶片感光，在底片上留下黑色影像。静电感光影像以树枝状为最常见，也有点状或冠状斑纹影像。静电感光影像比较特殊，易于识别。

6) 显影斑纹。由于曝光过度，显影液温度过高，浓度过大导致快速显影，或因显影时搅动不及时，均会造成显影不均匀，从而产生显影斑纹。

显影斑纹呈黑色条状或宽带状，在整张底片范围出现，影像对比度不大，轮廓模糊，一般不会与缺陷影像混淆。

7) 显影液沾染。显影操作开始前，胶片上沾染了显影液。沾上显影液的部位提前显影，黑度比其他部位大，影像可能是点、条或成片区域的黑影。

8) 定影液沾染。显影操作开始前,胶片沾染了定影液。沾上定影液的部位发生定影作用,使得该部位黑度小于其他部位,影像可能是点、条或成片区域的白影。

9) 增感屏伪缺陷。由于增感屏的损坏或污染使局部增感性能改变而在底片上留下的影像。例如增感屏上的裂纹或划伤会在底片上造成黑色伪缺陷影像,而增感屏上的污物会在底片上造成白色影像。

增感屏引起的伪缺陷,在底片上的形状和部位与增感屏上完全一致。当增感屏重复使用时,伪缺陷会重复出现。避免此类伪缺陷的方法是经常检查增感屏,及时淘汰损坏的增感屏。

底片上其他伪缺陷还有:因胶片质量不好或暗室处理不当引起的药膜脱落、网纹、指印及污染等,因胶片保存或使用不当造成的跑光、霉点等。

### 3. 表面几何影像的识别

表面几何影像是指由于试件的结构和外观形状投影形成的影像,大致可分为以下几类:

1) 试件结构影像。如母材厚度的变化,焊缝垫板,试件内部结构件投影等因素造成的影像。

2) 焊接成形影像。如焊缝余高,根部形状,焊缝表面波纹,焊道间沟槽等生成的影像。

3) 焊接形状缺陷影像。如咬边、烧穿、内凹、收缩沟、弧坑、焊瘤、未填满及搭接不良等因焊接造成的表面缺陷的影像。

4) 表面损伤影像。由非焊接因素造成的表面缺陷的影像,如机械划痕、压痕、表面撕裂、电弧烧伤及打磨沟槽等。

为能正确地识别表面几何影像,首先应要求评片人员仔细了解试件结构和焊接接头形式。其次评片人员应熟悉不同焊接方法和焊接位置的焊缝成形特点。此外,评片人员应注意焊缝外观检查的结果,掌握试件的表面质量状况。对可能影响缺陷识别的表面几何形状进行打磨,评片时应注意对表面缺陷的核查。底片上焊接形状缺陷的影像和表面损伤的影像主要根据其位置、形状、表面结晶形态以及影像轮廓清晰度等特征来加以识别。

### 4. 底片影像分析要点

底片上包含着丰富的信息。评片人员从底片上能够获得的不仅仅是缺陷情况,还能了解到一些试件结构、几何尺寸、表面状态以及焊接和照相投影等方面的情况,注意提取上述信息并进行综合分析,有助于做出正确的评定。

这里简要叙述了观察底片时应提取的信息要点以及影像分析的一般方法。只有在理论学习的基础上经过大量的实践训练,才能较好地掌握影像分析的技能。

(1) 通览底片时的影像分析要点 结合已掌握的情况,通过观察底片,一般应进行以下分析并做出判断:

- 1) 焊接方法。区分手工焊、自动焊及氩弧焊等。
- 2) 焊接位置。区分平焊、立焊、横焊或仰焊（对管子环焊缝则有水平固定、垂直固定或滚动焊）。
- 3) 焊缝形式。区分双面焊、单面焊及加垫板单面焊。
- 4) 评定区范围。认清焊缝余高边缘、热影响区范围。
- 5) 投影情况及投影位置。判断投影是否偏斜，认清焊缝上缘和下缘以及根部的位置。
- 6) 认清焊接方向。估计结晶方向，查找起弧和收弧位置。
- 7) 了解试件厚度。判断试件厚度变化情况，大致判断清晰度、对比度、灰雾度的大小和成像质量水平，考核底片质量是否满足标准规定的要求。

(2) 缺陷定性时的影像分析要点 观察影像时，一般首先注意的是影像形状、尺寸及黑度。除此以外，还应做下列观察与分析：

- 1) 影像位置。根据影像在底片上的位置以及影像特征，结合投影关系，推测其在焊缝中的位置是在根部、坡口还是表面，是在焊缝还是热影响区。
- 2) 影像的延伸方向。影像的延伸方向有一定的规律性。例如未熔合、未焊透等沿焊缝纵向，热裂纹、虫状气孔与焊缝结晶方向有关，咬边、弧坑的轮廓与焊缝表面波纹相吻合。
- 3) 影像轮廓清晰度。除了照相工艺条件影响清晰度外，还应注意以下影响轮廓清晰度的因素，并据此进行分析：厚板与薄板中影像清晰度的差异、缺陷和某些伪缺陷清晰度差异、内部缺陷和表面缺陷轮廓清晰度的差异等。
- 4) 影像细节特征。注意寻找细节特征，如裂纹的尖端、锯齿，未焊透的直边等。

(3) 影像定性分析方法——列举排除法 列举排除法是影像定性分析常用的方法。对一定形状的影像，先列出它可能是什么，再根据每一类影像特点，逐个鉴别，排除与影像特征不符的推测，最终得到正确的结论。

例如，对底片的一个黑点，它可能是气孔、点状夹渣、弧坑、压痕、水迹及显影液沾染霉点，可逐个进行鉴别。

气孔、点状夹渣、压痕、水迹及显影液沾染的影像特征和识别方法在本章内已有叙述；弧坑的特征是发生在焊道中央，在收弧部位，焊接位置应处于平焊；若是霉点，则应大量发生，在底片上广泛分布，不会是孤立黑点。

对底片上的一条黑线，可以列出它可能是裂纹、未熔合、未焊透、线状气孔、咬边、错口、划痕、水迹及增感屏伪缺陷等。

裂纹、未熔合、未焊透、划痕、水迹及增感屏伪缺陷影像的特征和识别方法本章内已有叙述；线状气孔为细长黑线，黑度均匀，轮廓圆滑，发生在手工单面焊的焊缝根部；咬边发生在焊缝边缘，与焊缝波纹的起伏走向一致；错口发生在焊缝中心线上，如果细看的话可以发现它不是一道黑线而是一道不同黑度区域的明暗分

界线。

(4) 影像分析示例 小径管环焊缝底片评判要点。

1) 小径管环焊缝双壁双影照相特点。透照厚度变化大, 例如对  $\phi 51\text{mm} \times 3.5\text{mm}$  的管子照相, 最大透照厚度为最小透照厚度的 3.7 倍, 因此底片上不同部位的黑度和灵敏度差异较大。为错开上、下焊缝, 透照时有一倾角, 对  $\phi 51\text{mm} \times 3.5\text{mm}$  的管子, 这一倾角为  $12^\circ \sim 18^\circ$ , 会引起影像畸变, 对纵向裂纹检出也有影响。上、下焊缝几何清晰度存在较大差异, 对  $\phi 51\text{mm} \times 3.5\text{mm}$  的管子, 上焊缝  $U_g$  约为下焊缝的 10 倍, 边蚀效应较严重, 散射比较大, 因此成像质量不高。

2) 通览底片时的影像分析要点。

① 辨认焊接方法。小径管焊口多采用手工焊, 由根部成形情况判断是否用氩弧焊打底。

② 辨认焊接位置。根据焊缝波纹判断是水平固定、垂直固定, 还是滚动焊。如果是水平固定, 则应找出起弧的仰焊位置和收弧的平焊位置。

③ 确定有效评定范围。根据黑度和灵敏度情况判断检出范围是否达到 90%。

④ 辨明投影位置。焊缝根部投影位于椭圆影像的内侧, 根据影像放大或畸变情况以及清晰度有时可分辨出上焊缝和下焊缝。

3) 缺陷定性时的影像分析要点。常见缺陷: 裂纹、根部未熔合、未焊透、夹渣、气孔、焊穿、内凹及内咬边。

常见的形状缺陷: 焊瘤、弧坑及咬边。

影像位置的一般规律: 根部裂纹、未熔合、未焊透、线状气孔、内凹、内咬边及烧穿都发生在焊缝根部, 底片上的位置处于椭圆内侧; 内凹一般在仰焊位置; 根部焊瘤、焊漏及弧坑在平焊位置。

观察影像的主要特征和细节特征, 注意未焊透与内凹, 烧穿、弧坑与气孔的区别, 线状气孔与裂纹的区别。

#### 四、焊接接头的质量等级评定

底片上的缺陷被确认以后, 下一步就是对照有关标准, 评出焊接接头的质量等级。

射线照相标准有许多种, 例如国家标准、部颁标准、行业标准以及国外标准等。在我国, 锅炉压力容器产品执行的检测标准由国家安全监察法规和产品设计制造规范指定。法规和规范同时还在检测方法的选用、检测部位、比例以及验收质量等级等方面做出了规定。

不同的射线照相标准关于质量分级的具体规定各不相同, 但确定质量等级的原则和依据大体是一致的。缺陷的危害性、焊接接头的强度水平、制造要求的工艺水平是质量分级考虑的主要因素, 缺陷性质、尺寸大小、数量及密集程度是划分质量等级的主要依据。

评片人员应熟悉标准中的有关内容，正确运用并严格执行评级规定。

## 1. 质量分级规定评说

本节结合 GB/T 3323—2005，简单评说质量分级的有关规定。

1) 级别划分。标准将焊缝质量划分为四个等级，Ⅰ级质量最好，Ⅳ级质量最差。

2) 缺陷性质与质量等级。标准正文中提到了五种焊接缺陷：裂纹、未熔合、未焊透、夹渣及气孔。标准附录 E 中对于小径管环焊缝评定增加了一种内凹。至于其他焊接形状缺陷未提及，这是因为射线检测应在焊缝外观检验合格后进行，形状缺陷应由外观目视检查发现，不属于无损检测检出范畴，因此不做评级规定。但对于目视检查无法进行的场合或部位，例如小径管、小直径容器、钢瓶、锅炉集箱以及其他带垫板焊缝的根部缺陷，如内凹、烧穿及内咬边等应由射线照相检出并做评级规定。

标准有关缺陷性质的评级规定如下：

裂纹、未熔合、双面焊和加垫板单面焊的未焊透属不允许存在的缺陷，只要发生即评为Ⅳ级。不加垫板单面焊允许未焊透存在（这取决于焊缝系数），但最高只能评Ⅲ级，其允许长度按条状夹渣Ⅲ级的有关规定。对夹渣和气孔按长宽比重新分类：长宽比大于 3 的定义为条状夹渣，长宽比小于或等于 3 的定义为圆形缺陷，对两者分别制订控制指标，其中Ⅰ级焊缝不允许条状夹渣存在。

3) 缺陷数量与质量等级。缺陷数量包括单个尺寸、总量和密集程度三个方面。定量的依据（包括缺陷长度和宽度尺寸以及间距）是底片上量得的尺寸，不考虑投影放大或畸变造成的影响。黑度不作为缺陷定级依据，特殊情况下需要考虑缺陷高度和黑度对焊缝质量影响时应另做规定。标准允许圆形缺陷存在，根据母材厚度对缺陷数量加以限制。规定单个缺陷尺寸不得超过母材厚度的 1/2；对缺陷总量采用点数换算；对缺陷密集程度采用评定区控制。各质量等级允许的缺陷点数都有明确规定。标准对于条状夹渣也是根据母材厚度来限制的，以单个条渣长度、条渣总长和间距三项指标分别对单个缺陷尺寸、总量、密集程度做出限制。此外，如果在圆形缺陷评定区内同时存在圆形缺陷和条状夹渣，则需要进行综合评级，这也属于对缺陷密集程度限制的规定。标准关于缺陷定量和评级的各种规定甚多，应在标准讲解时逐条详细说明并示例，本节不做赘述。

## 2. 射线照相检验记录与报告

评片人员应对射线照相检验结果及有关事项进行详细记录并出具报告，其主要内容包括：

1) 产品情况：工程名称、试件名称、规格尺寸、材质、设计制造规范、检测比例部位、执行标准、验收及合格级别。

2) 透照工艺条件：射源种类、胶片型号、增感方式、透照布置、有效透照长度、曝光参数（管电压、管电流、焦距、时间）及显影条件（温度、时间）。

- 3) 底片评定结果: 底片编号、像质情况(黑度、像质指数、标记、伪缺陷)。
- 4) 缺陷情况(缺陷性质、尺寸、数量、位置)、焊缝级别、返修情况及最终结论。
- 5) 评片人签字、日期。
- 6) 照相位置布片图。

## 第七章 辐射防护

辐射，即通常所称的射线，从它与物质相互作用引起的电离情况可分为两类：（致）电离辐射和非（致）电离辐射。任何与物质作用，直接作用或间接作用可引起物质电离的辐射称为电离辐射，例如电子、 $\beta$ 射线、质子及 $\alpha$ 粒子等带电粒子，X射线和 $\gamma$ 射线，不能引起物质电离的辐射称为非电离辐射。

人们很早就认识到电离辐射对人体的危害作用，并注意到安全防护问题，辐射防护就是研究这方面的一个学科。

本章将针对工业射线检测技术涉及的外照射防护问题，介绍辐射防护的基本概念和相关的主要内容。

X射线和 $\gamma$ 射线可致电离辐射，即它射到物质上会使物质的原子产生电离。人的机体或器官受到射线的照射，其组成物质也会受到电离和激发，当其剂量达到一定程度时人的机体或器官的细胞就会受到损伤。当这种损伤不太严重时，借助于细胞的修复作用还可以恢复；当这种损伤比较严重且损伤面积较大时，细胞的修复作用受到抑制，人体各器官的功能就会受到明显的影响，从而使人患各种放射病。

因此，从事射线检测工作的人员一定要具有一定放射性防护的知识，注意对自身和周围人员的防护。本单元仅就射线检测工作所涉及的放射性防护知识作一简要介绍。

2002年我国根据六个国际组织（联合国粮农组织、国际原子能机构、国际劳工组织、经济合作与发展组织核能机构、泛美卫生组织和世界卫生组织）批准并联合发布的《国际电离辐射防护和辐射源安全基本安全标准》修订成了我国现行辐射防护基本标准。即GB 18871—2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（以下简称“基本标准”），替代了1984年我国颁布的GB 4792—84《放射卫生防护基本标准》。该标准为强制性标准。本单元中涉及辐射度量、单位及防护标准方面的问题，均取自于基本标准。

### 一、与射线检测有关的辐射度量及其单位

为了描述辐射与物质的相互作用，必须建立一些描述辐射本身性质的物理量及其测量单位。现在广泛使用的描述辐射的物理量主要是照射量、吸收剂量、当量剂量和有效剂量。

## 1. 照射量的定义与单位

当 X 射线或  $\gamma$  射线穿过空气时可以产生二次电子，二次电子和空气分子作用，使空气电离，形成带有正电荷的正离子和带有负电荷的负离子，照射量就是描述 X 射线或  $\gamma$  射线使空气产生电离能力的物理量。

照射量定义为：X 射线或  $\gamma$  射线在某一体积元的空气中产生的全部电荷被完全阻留在空气中时，产生的任一种符号的电荷的绝对值与这个小体积空气质量之比，其表达式为

$$P = dQ/dm \quad (3-7-1)$$

式中  $P$ ——照射量；

$dQ$ ——在体积元空气中产生的一种符号电荷的电量；

$dm$ ——体积元中空气的质量。

即照射量表示 X 射线或  $\gamma$  射线在单位质量的空气中所能产生的某一符号总电荷数量。

照射量的法定单位是  $C \cdot kg^{-1}$ ，没有专门名称。人们沿用的照射量专用单位是 R，与法定单位的关系是

$$1R = 2.58 \times 10^{-4} C \cdot kg^{-1} \quad (3-7-2)$$

$$1C \cdot kg^{-1} = 3.877 \times 10^3 R \quad (3-7-3)$$

照射量只适用于 X 或  $\gamma$  射线，它既不适用于其他辐射，也不适用于其他物质。

照射量率（也称照射率）用字母  $\dot{P}$  表示。照射量率的定义是单位时间内的照射量，也就是  $dP$  除以  $dt$  所得的商，即

$$\dot{P} = dP/dt \quad (3-7-4)$$

式中  $dt$ ——一小段时间间隔；

$dP$ ——在此时间间隔中产生的照射量。

照射量率的单位是  $C \cdot kg^{-1}s^{-1}$ 、 $R \cdot h^{-1}$  或  $mR \cdot s^{-1}$ 。

## 2. 比释动能

X 射线或  $\gamma$  射线与物质相互作用最重要的标志是将能量转移给物质，这是产生辐射效应的依据。能量转移过程分为两个阶段，首先 X 射线或  $\gamma$  射线的能量转移给次级电子，然后次级电子通过电离和激发的形式，将能量转移给物质。

比释动能是用于描述第一阶段的能量转移情况，即描述不带电粒子有多少能量转移给带电粒子的一个辐射量。它的定义是：比释动能  $K$  是指不带电粒子（包括 X 和  $\gamma$  射线）与物质相互作用，在单位质量的物质中释放出来的所有带电粒子的初始动能的总和。

若质量为  $dm$  的物质中，不带电粒子释放出来的全部带电粒子的初始动能之和为  $dE_{tr}$ ，则比释动能  $K$  定义表达式为：

$$K = dE_{tr}/dm$$

式中  $dE_{tr}$ ——不带电电离粒子在质量为  $dm$  的某一物质内释出的全部带电电离粒子的初始动能的总和。

比释动能只适用于 X 射线或  $\gamma$  射线等不带电粒子的辐射，但适用于各种物质。

比释动能的 SI 单位是  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，其特定名称为戈 [瑞] (Gy)

$$1\text{Gy} = 1\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3-7-5)$$

比释动能率用字母  $\dot{K}$  表示，是单位时间所释放的比释动能。若在时间  $dt$  内，比释动能的增量为  $dK$ ，则

$$\dot{K} = dK/dt \quad (3-7-6)$$

比释动能率的 SI 单位为  $\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

### 3. 吸收剂量

当射线辐照物体时，可以将它能量的一部分或全部传递给被辐照的物体，也即被辐照的物体可以吸收电离辐射的一部分或全部能量。但是，在同样的条件下，不同的物质吸收射线能量的情况并不相同。照射量仅仅表示了空气完全吸收 X 射线或  $\gamma$  射线能量的情况，而吸收剂量表示的是各种物质吸收各种电离辐射能量的情况。

前已述及，X 射线或  $\gamma$  射线将能量转移给物质是分两步进行的，用比释动能描述第一阶段的能量转移情况，而对于第二阶段的能量转移情况，即描述次级电子有多少能量被物质吸收，可用吸收剂量表示，即吸收剂量是表征受照物体吸收电离辐射能量程度的一个物理量。

吸收剂量  $D$  定义为：电离辐射授予某一体积元中物质的平均能量与该体积元中物质质量之比

$$D = \bar{d\varepsilon}/dm \quad (3-7-7)$$

式中  $\bar{d\varepsilon}$ ——电离辐射授予某一体积元中的物质的平均能量；

$dm$ ——在这个体积元中的物质的质量。

某一体积元中的物质的平均能量  $\bar{d\varepsilon}$  为进入一基本体积的全部带电电离粒子和不带电电离粒子能量总和与离开该体积的全部带电电离粒子和不带电电离粒子能量总和之差，再减去在该体积发生任何核反应或基本粒子反应所增加的静止质量的等效能量。

吸收剂量的单位和比释动能相同，SI 单位是  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，其特定名称也是戈 [瑞] (Gy)。

吸收剂量是适用于任何类型和任何能量的电离辐射。但是在提到吸收剂量时，应指明是什么物质的吸收剂量，例如是在空气中的，还是在人体某一组织中的。

单位时间内的吸收剂量称为吸收剂量率 ( $\dot{D}$ )，单位是  $\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

$$\dot{D} = dD/dt \quad (3-7-8)$$

#### 4. 照射量、比释动能及吸收剂量的关系与区别

1) 照射量与比释动能的关系。X 射线或  $\gamma$  射线照射空气时, 如果忽略次级电子能量转移成热能和辐射能的部分, 即认为: 在单位质量空气中所产生的次级电子能量全部用于使空气分子电离, 则空气中某点照射量  $P$  和比释动能  $K$  在带电粒子平衡条件下的关系为

$$K = 33.72P \quad (3-7-9)$$

式 (3-7-9) 中, 照射量的单位为  $\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 比释动能的单位为  $\text{Gy}$ 。

2) 照射量与吸收剂量的关系。吸收剂量和照射量是两个不同的概念, 照射量是以空气的电离程度对辐射场的一种量度, 吸收剂量给出的是被照射物质吸收辐射能量的状况, 但两者存在一定的关系。在实际工作中, 仪器直接测量的只能是照射量, 而不能直接测量吸收剂量。因此, 要知道辐射场中某点被照射物质的吸收剂量, 就只能实测该点的照射量进行换算。也就是说, 测量或计算出辐射场中某点的照射量, 才能换算出某一物质在该点的吸收剂量。

如果照射场中某点的照射量为  $P$ , 单位为  $\text{R}$  时, 该点空气的吸收剂量为  $D$ , 则可给出空气的吸收剂量与照射量的关系为

$$D_{\text{空}} = 8.69 \times 10^{-3} P_{\text{空}} \quad (3-7-10)$$

照射量单位为  $\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, 上式可写为

$$D_{\text{空}} = 33.72P_{\text{空}} \quad (3-7-11)$$

3) 照射量、比释动能、吸收剂量的区别 (表 3-7-1)。

表 3-7-1 照射量、比释动能、吸收剂量的区别

辐射量种类		照射量 $X$	比释动能 $K$	吸收剂量 $D$
剂量学含义		表征 $X$ 或 $\gamma$ 射线在所关心的体积内用于电离空气的能量	表征不带电粒子在所关心的体积内交给带电粒子的能量	表征任何辐射在所关心的体积内被物质吸收的能量
适用范围	辐射场	$X$ 、 $\gamma$ 射线	不带电粒子的辐射	任何带电粒子和不带电粒子的辐射
	介质	空气	任何物质	任何物质
单位及换算关系		$1\text{C} \cdot \text{kg}^{-1} = 3.877 \times 10^3 \text{ R}$	$1\text{Gy} = 100 \text{ rad}$	$1\text{Gy} = 100 \text{ rad}$

#### 5. 当量剂量

辐射的生物效应不仅仅依赖于吸收剂量的大小, 同样的吸收剂量, 由于射线的种类与能量不同对机体产生的效应也不同。考虑到这一因素, 采用了一个与辐射种类和射线能量有关的因子对吸收剂量进行修正, 这个因子取名为辐射权重因数  $w_R$ 。

当量剂量  $H_{T,R}$  是用辐射权重因数  $w_R$  修正过的平均吸收剂量, 其定义为

$$H_{T,R} = D_{T,R} \cdot w_R \quad (3-7-12)$$

式中  $D_{T,R}$ ——辐射及在器官或组织  $T$  内产生的平均吸收剂量;

$w_R$ ——辐射  $R$  的辐射权重因数。

当量剂量的单位是  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，称为希 [沃特] (Sv)。

辐射权重因数是以辐射防护目的，对吸收剂量乘以的因数，用以考虑不同类型辐射的相对危害效应 (包括对健康的危害效应)。

从上述可知，对于  $X$ 、 $\gamma$  射线而言，辐射权重因数  $w_R = 1$ 。因此可以认为，对于  $X$ 、 $\gamma$  射线的外照射，吸收剂量和当量剂量两者是相等的。

## 6. 有效剂量

随机效应发生的概率与受照射的组织或器官有关，不同的组织或器官虽然吸收了相同的当量剂量辐射，发生随机效应的概率可能有差异，为此引入了一个权重因数  $w_T$  对当量剂量进行加权修正。这样修正后的当量剂量能够更好地反映不同的组织或器官吸收射线后的危害程度。为此引入了有效剂量这一单位。

有效剂量  $E$  被定义为人体各组织或器官的当量剂量乘以相应的组织权重因数后的和

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad (3-7-13)$$

式中  $H_T$ ——组织或器官  $T$  所受的当量剂量；

$w_T$ ——组织或器官  $T$  的组织权重因数。

有效剂量的单位也是  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，也称为希 [沃特] (Sv)。

## 二、射线对人体产生的效应

从制定放射性防护标准的角度出发，国际放射防护委员会 (ICRP) 对放射性的生物效应做了如下的分类：

### 1. 随机性效应

随着对放射性生物效应的深入研究，发现虽然都受到相同水平的射线照射，有些放射性效应不是每个人都发生，而是随机的，存在一个概率。因此定义：发生概率与剂量成正比而严重程度与剂量无关的辐射效应为随机效应。一般认为，在辐射防护感兴趣的低剂量范围内，这种效应的发生不存在剂量阈值。

此效应发病的概率，需要对大量从事放射性工作的人员的受照射剂量史和发病史进行统计才能获得。例如据资料介绍，癌症的发病概率是百万分之二十六每毫希 [沃特]。

### 2. 确定性效应

辐射照射人体的组织，若能杀死相当数量的细胞，而又不能由活细胞的增殖来补充，可在组织或器官中表现出临幊上可检查出的严重功能性损伤。辐射造成的这种生物效应称为确定性效应。

确定性效应通常情况下存在剂量阈值，超过阈值时，剂量越高则效应的严重程度越大。

### 三、辐射防护的基本问题

#### 1. 辐射防护的目的和辐射防护要求

1) 辐射防护的目的。放射防护的目的在于防止有害的确定性（非随机）效应，并限制随机效应的发病率，使之达到被认为可以接受的水平。为了达到此目的，标准中采用防护综合原则替代以往的最大容许剂量，形成一个比较完整的现代剂量限制体系。

##### 2) 辐射防护的要求。

① 实践的正当性。对于一项实践，只有在考虑了社会、经济和其他有关因素之后，其对受照个人或社会所带来的利益足以弥补其可能引起的辐射危害时，该实践才是正当的。对于不具有正当性的实践及该实践中的源，不应予以批准。

换言之，进行任何伴有电离辐射的实践活动时，应先权衡利弊。只有当个人和社会从中获得的利益大于对人群和环境可能产生的危害（付出的代价）时，才能认为是正当的。若所考虑的实践不能带来超代价的纯利益，则不应当从事这种实践。

② 剂量限制和潜在照射危险限制。应对个人受到的正常照射加以限制，以保证除标准规定的特殊情况外，由来自各项获准实践的综合照射所致的个人总有效剂量和有关器官或组织的总当量剂量不超过附录 B（标准的附录）中规定的相应剂量限值。不应将剂量限值应用于获准实践中的医疗照射。

应对个人所受到的潜在照射危险加以限制，使来自各项获准实践的所有潜在照射所致的个人危险与正常照射剂量限值所相应的健康危险处于同一数量级水平。

③ 防护与安全的最优化。对于来自一项实践中的任一特定源的照射，应使防护与安全最优化，使得在考虑了经济和社会因素之后，个人受照剂量的大小、受照射的人数以及受照射的可能性均保持在可合理达到的尽量低水平；这种最优化应以该源所致个人剂量和潜在照射危险分别低于剂量约束和潜在照射危险约束为前提条件（治疗性医疗照射除外）。

换言之，应当避免一切不必要的照射，任何必要的照射应保持在可以合理做到的最低水平。辐射防护最优化应考虑到经济和社会因素，而不是盲目追求无限地降低剂量。否则所增加的防护费用是得不偿失，是不合理的。

④ 剂量约束和潜在照射危险约束。除了医疗照射之外，对于一项实践中的任一特定的源，其剂量约束和潜在照射危险约束应不大于审管部门对这类源规定或认可的值，并不大于可能导致超过剂量限值和潜在照射危险限值的值。

#### 2. 基本标准关于剂量限值的规定

基本标准所规定的剂量限值适用于实践所引起的照射，不适用于医疗照射，也不适用于无任何责任方负责的天然源的照射。

1) 职业照射的剂量限值。应对任何工作人员的职业照射水平进行控制，使之不超过下列数值：

① 由审管部门决定的连续五年的平均有效剂量（但不可作任何追溯性平均），20mSv。

② 任何一年中的有效剂量，50mSv。

③ 眼晶体的年当量剂量，150mSv。

④ 四肢（手和足）或皮肤的年当量剂量，500mSv。

2) 公众照射的剂量限值。实践使公众中有关关键人群组的成员所受到的平均剂量估计值不应超过下述限值：

① 年有效剂量，1mSv。

② 特殊情况下，如果5个连续年的年平均剂量不超过1mSv，则某一单一年份的有效剂量可提高到5mSv。

③ 眼晶体的年当量剂量，15mSv。

④ 皮肤的年当量剂量，50mSv。

#### 四、外照射防护的方法

放射防护的要求已指出，在考虑经济和社会因素的前提下，应尽量避免一切不必要的照射，要使照射剂量尽可能小，最大不能超过有效剂量和当量剂量限值，因此要采取必要的防护措施来保证，以下是外照射防护的三个基本要素：

##### 1. 时间防护

在射线辐射场内，人体所受的射线剂量是所处位置的剂量率与时间的乘积，即与时间成正比，可用下式表示

$$D = pt \quad (3-7-14)$$

式中  $D$ ——人体受照射的射线剂量；

$p$ ——人体所在辐射场位置的射线剂量率；

$t$ ——人体受照射时间。

从上式可看出，工作场所的射线剂量一定，尽量减少操作时间，就可将人体受到的射线剂量降到最小值。这种控制受照射时间的方法，称为时间防护法。

##### 2. 距离防护

由平方反比定律时已知道，在点源的辐射场中，射线强度与距离的平方成反比。在这里如果以剂量率来表示射线强度，则可用下式表示

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{R_2^2}{R_1^2} \quad (3-7-15)$$

式中  $D_1$ 、 $D_2$ ——辐射场中1、2处的剂量；

$R_1$ 、 $R_2$ ——辐射场中1、2处到射源的距离。

从上式可看出，至射源的距离增加一倍，剂量率可降至原来的1/4。因此尽量增加人员至射源的距离可较大程度地降低所受的剂量，这种防护方法就称为距离防护法。

### 3. 屏蔽防护

在实际工作中，当人与辐射源之间的距离无法改变，而时间又受到工艺操作的限制时，欲降低工作人员的受照剂量水平，只有采用屏蔽防护。

如前所述，射线穿过物质时通过与物质的相互作用，射线的强度被衰减。衰减的程度取决于屏蔽物质的线减弱系数  $\mu$  和厚度  $T$ ，密度大的物质线减弱系数  $\mu$  大，对射线的衰减作用大。因此，可以采用一些密度比较大的物质做成屏障，将射线挡住，使透过来的射线剂量在控制水平以下，这种方法就称为屏蔽防护法。

① 屏蔽方式。根据防护要求的不同，屏蔽物可以是固定式的，也可以是移动式的。属于固定式的屏蔽物是指防护墙、地板、顶棚及防护门等。属于移动式的如包装容器、防护屏等。

② 屏蔽材料。用作  $\gamma$  射线和 X 射线的屏蔽材料是多种多样的。任何材料对射线强度都有程度不同的削弱，但原子序数高的或密度大的防护材料，其防护效果更好。在实用中，铅和混凝土是最常用的防护材料。

总之，屏蔽材料必须根据辐射源的能量、强度、用途和工作性质来具体选择，同时还必须考虑成本和材料来源。

在现场工作时还可以利用现场的墙、柱及大型设备等作为临时屏蔽。

用作屏蔽物质的厚度要根据放射源的种类、强度、所用的屏蔽材料、在工作场所停留的时间以及要达到的有效剂量或当量剂量限值计算确定。

## 五、现场射线检测的有关规定

### 1. 现场 X 射线检测的有关规定

GBZ 117—2006 《工业 X 射线探伤放射卫生防护标准》规定了工业 X 射线检测装置和探伤作业场所及有关人员的放射卫生防护要求，适用于 500kV 以下的工业 X 射线检测装置（以下简称 X 射线装置）的生产和使用。

该标准规定，现场进行 X 射线照相检验时，应按辐射防护标准设定禁区和管理区。

进行透照检查时，必须考虑控制器与 X 射线管和被检物体的距离、照射方向、时间和屏蔽条件等因素，以保证检测作业人员的受照剂量低于剂量限值，并应达到尽可能低的水平。

进行透照检查时，可将被检物体周围的空气比释动能率在  $40\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$  以上的范围内划为控制区，在其边界上必须悬挂清晰可见的“禁止进入 X 射线区”标牌，检测作业人员应在控制区边界外操作，否则必须采取防护措施。

进行透照检查时，控制区边界外空气比释动能率在  $4\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$  以上的范围内可划为管理区，在其边界上必须设警戒标志，如信号灯、铃及警戒绳，并悬挂清晰可见的“无关人员禁止入内”警告牌，必要时要有专人警戒，还应注意控制在管理区边界附近不应有经常停留的公众成员。

现场检测的工作条件和现场变动时，必须进行场所监测，并验证确定的控制区和管理区。

把控制区边界空气比释动能率定为  $40\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$  是按放射工作人员年个人剂量当量限值的  $3/4$  ( $15\text{mSv}$ ) 和每周实际开机时间为  $7.5\text{h}$  推算的。如果每周实际开机时间大于  $7.5\text{h}$ ，控制区和管理区边界空气比释动能率应分别另行计算。

## 2. 现场 $\gamma$ 射线检测的有关规定

GBZ 132—2008 《工业  $\gamma$  射线探伤放射卫生防护要求》规定了  $\gamma$  射线检测机防护性能及其使用过程中的放射防护和有关监测要求。适用于应用  $\gamma$  射线检测机进行金属构件内部结构的无损检测实践。该标准把工业  $\gamma$  射线检测分为移动式检测（即在室外、生产车间或安装现场用手提式或移动式  $\gamma$  射线检测机进行检测的工作过程）和固定式检测（即在专用  $\gamma$  射线检测室内用固定安装的或可有限移动的检测机进行  $\gamma$  射线检测的工作过程）两类。该标准规定了  $\gamma$  射线检测机的放射防护性能要求，固定式检测的放射防护要求，以及移动式检测的放射防护要求。

其中移动式检测的放射防护要求规定如下：

- 1) 进行检测作业前，应先将工作场所分为控制区和监督区。
- 2) 控制区边界外空气比释动能率低于  $40\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在其边界应悬挂清晰可见的“禁止进入放射性工作场所”标牌。未经许可人员不得进入该范围边界，可采用绳索、链条和类似的方法或安排监督人员实施人工管理。控制区范围的计算方法见该标准的附录 B。
- 3) 监督区位于控制区外，允许有关人员在此区活动，培训人员或探访者也可进入该区域。其边界空气比释动能率应不大  $2.5\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ ，边界线应有“当心，电离辐射！”标牌，公众不得进入该区域。
- 4) 进行检测作业时，必须考虑  $\gamma$  射线检测机和被检物体的距离、照射方向、时间和屏蔽条件，以保证作业人员的受照剂量低于年剂量限值，并应达到尽可能低的水平。

## 六、放射性事故及其处理

引起异常的或未预料到的辐射危害的任何情况，都称为放射性事故。

对于检测来说一般指操作事故。采用 X 射线检测只要严格遵守安全操作规程，一般不会发生事故。用  $\gamma$  射线检测，发生过一些放射源与机械手脱开的事故，即机械手已退回到原位时，源却没有回到贮存容器内，造成失去屏蔽；另一类事故是因操作不当使操作系统发生故障，源退不回贮存容器内。

放射性事故是可以预防的，关键在于平常加强对工作人员的安全教育，严格遵守操作规程。

事故发生以后为了有效地处理放射性事故，应制定各种可能事故的应急措施。事故的种类千差万别，处理事故时应根据事故的具体情况，制定适宜于不同事故的

处理方案。

一般的处理程序均应包括如下内容：

1) 事故发生后，当事人应立即通知同工作场所的工作人员离开，并报告防护负责人及单位领导。

2) 由单位领导召集专业人员，根据具体情况迅速制定事故处理方案。

3) 事故处理必须在单位负责人的领导下，在有经验的工作人员和卫生防护人员的参加下进行。未取得防护监测人员的允许不得进入事故区。

4) 防护监测人员还应进行以下几项工作：

① 迅速确定现场的辐射强度及影响范围，划出禁区，防止外照射的危害。

② 根据现场辐射强度，决定工作人员在现场工作的时间。

③ 协助和指导在现场执行任务的工作人员佩戴防护用具及个人剂量仪。

④ 对严重剂量事故，应尽可能记下现场辐射强度和有关情况，并对现场重复测量，估计当事人所受剂量，根据受照剂量情况决定是否送医院进行医学处理或治疗。

5) 各种事故处理以后，必须组织有关人员进行讨论，分析事故发生原因，从中吸取经验教训，采取措施防止类似事故重复发生。

6) 凡属大事故或重大事故，应向上级主管部门报告。

## 七、辐射防护监测

辐射防护监测对我们从事射线检测工作的人员是非常重要的。辐射防护监测的内容大约有以下三方面：工作场所监测、个人剂量监测及环境监测。根据射线检测工作的实际，这里仅就前两种监测中的外照射监测做一简介。

### 1. 工作场所监测

工作场所外照射监测是指对工作场所人员所在处的照射率或剂量率进行测量，其内容是：

1) 辐射场射线剂量的分布情况。

2) 确定人员（包括工作人员和公众）在该处允许工作或停留的时间。

3) 在一定时间内所受的照射是否超过规定的剂量当量限值。

4) 防护措施是否合乎规定的要求等。

因此，工作场所外照射监测所测得的不是人员实际受的剂量，而是测量的在一定时间内人员将会受到多大的剂量，也可用来估算在该处停留过的人员所受到的剂量。

工作场所外照射监测还包括工作场所周边环境的监测，包括透照室门口、窗口、走廊、楼上、楼下和其他相邻房间的照射量率，以保证环境剂量水平符合放射卫生防护要求。

## 2. 个人剂量监测

在外照射的情况下，个人剂量监测是测量被射线照射的个人所接受的剂量，这是一种控制性的测量。它可以告知在辐射场中工作的人员直到某一时刻为止已经接受了多少剂量，因此就可以控制以后的照射。如果被照射者接受了超剂量的照射，个人剂量监测不仅有助于分析超剂量的原因，还可以为医生治疗被照射者提供有价值的数据，并且个人剂量监测对加强管理、积累资料、研究剂量与效应关系有很大的作用。

## 3. 监测仪器

1) 监测仪器的工作原理。剂量仪之所以能测量电离辐射，其基本原理是根据电离辐射的物理和化学效应，利用这些效应制成各种不同型号和用途的剂量仪。对于X和 $\gamma$ 射线的监测，主要效应有：

- ① 利用射线通过气体时的电离效应。
- ② 利用射线通过某些固体时的电离和激发。
- ③ 利用射线的能量在物质中所产生的热效应。
- ④ 利用射线和物质作用而产生的化学变化。

2) 监测仪器的组成和类型。辐射剂量仪可分为检测器和测量装置（电子线路）两部分，前者是选用某种物质按一定方式对辐射产生响应（即物理、化学反应）；后者是选用电子线路测量响应的程度。常见剂量仪的检测器，主要是利用射线的电离性质，如电离室、正比计数器、盖革-弥勒计数管及各种半导体检测器等。此外还有利用与电离同时产生的激发等其他性质进行检测的，如闪烁计数器、化学剂量计以及固体剂量计等。

3) 场所监测仪器。用于场所辐射监测的仪器按体积重量和结构可分为携带式和固定式两类。携带式仪器体积小、重量轻，具有合适的量程，便于人员携带现场使用。固定式监测装置，一般由安装在操作室的主机和通过电缆安装在监测处的探头两部分组成。还可采用带有音响，或灯光信号的报警装置，一旦场所的剂量超过某一预定阈值时，仪器能自动给出信号。

在场所辐射监测中，有用射线束的照射场内辐射水平很高，而一般散、漏射线的辐射水平较低，必须选用适当的仪器进行测量。

4) 个人剂量监测仪器。个人剂量检测仪的检测器件通常佩戴在人体身上，以监测个人受到的总吸收量。因此，检测元件或仪器必须非常小巧、轻便、牢固、容易使用、佩带舒适而且能量响应要好，并不受所测辐射以外的因素干扰。

常用的个人剂量监测仪有电离室剂量笔、热释光剂量仪等。

① 个人剂量笔。个人剂量笔（个人剂量计），实际上是一种直读式袖珍电离室，又称为携带剂量表，是一种形似钢笔的小型电器。

其基本结构包括两个电极，一个带正电（中心电极），一个带负电（外电极），中心电极（阳极）与外电极（阴极）绝缘，中心电极有一个活动丝，当电离室充

电后，因同性电相斥，活动丝被固定中心电极推开，把斥力最大的为丝位校核为零刻度。在射线照射下，因为放电，电离室两极板电荷减少，斥力减弱，活动丝下垂，即可直接读出 X 射线剂量。

② 热释光剂量计。热释光剂量计是一种固体发光剂量计。这是 20 世纪 50 年代以来迅速发展起来的剂量测量仪器。热释光剂量计具有灵敏度和精确度较高等优点，且尺寸小，剂量元件可加工成小微章，有的还可加工成一定形状的指环戴在手指上，佩戴方便。热释光剂量计的缺点是不能直接显示读数，需要通过专门的加热读出装置读取剂量值。

热释光剂量计的工作原理是：具有晶体结构的固体剂量元件，常因含有杂质或其中的原子、离子缺位及错位等原因造成晶体缺陷。这种缺陷导致周围电中性状态的破坏，形成带电中心，能够吸引异性电荷，则称之为“陷阱”。当固体受到射线照射时，电子获得足够能量，从其正常位置（禁带）跳到导带而运动，直到被陷阱捕获。陷阱深度很大，常温下电子将长久地留在陷阱之中。只有当固体被加热到一定程度时，它才能从陷阱中逸出。当逸出电子从导带返回禁带时，即发出蓝绿色的可见光。其发光强度与陷阱中的电子数有关，而电子数又取决于受照射的射线量，因此测量发光强度，即可测算出射线的照射量。

热释光剂量元件的品种很多，目前最常用的热释光材料是氟化锂，也有用硼酸锂和氟化钙的。热释光剂量元件，一经加热读数，其内部贮存的辐射信息随即消失，因而它不具备复测性，但是作为剂量元件，可重复投入使用。

热释光剂量计包括剂量元件（磷光体）和测量仪器（读数装置）。

③ 累积式剂量仪。目前市场上有一种个人剂量仪是做成比香烟盒稍大一点的个人累积剂量仪，可以将它放在胸前的口袋中。这种仪器主要是利用 G - M 计数管测量剂量率，通过积分电路形成累积剂量。仪器的读数告诉使用者在这段工作时间内共受到了多少射线剂量的照射。这种剂量仪对较低能量的射线不敏感，适用于  $\gamma$  射线操作。

④ 个人剂量报警仪。市场上还有一种形如前述个人累积剂量仪的报警仪，也可以将它放在胸前的口袋中，当人体在辐射场中工作时，一旦进入剂量率超过规定值的地域时，该仪器就会报警。这种剂量仪也对较低能量的射线不敏感，适用于  $\gamma$  射线操作。

随着电子技术和数字技术的发展，实现即可检测剂量率，也可测量累积剂量，还可报警的个人剂量仪必将成为现实，定会研发出小型化、能量响应好、多功能的剂量仪器。

#### 4. 剂量监督管理

对于射线检测工作，做好剂量监督管理工作主要包括两方面的内容：

一是要经常地对放射性工作场所及周围环境进行剂量监测，做好记录，发现不安全的情况要及时反映，及时解决。

二是要监督每个从事放射性工作人员要遵守规章制度，做好个人剂量监督档案，及时准确地记录下每次工作所受的剂量，按时进行体检并将结果及时入档，发现异常要及时安排治疗和休养。

为了做好这一工作，有两个及以上的放射性工作人员的单位，均应设专职或兼职的剂量监督员，负责这项工作。

所有从事射线检测工作的人员均应通过有关审管部门的培训考核，取得射线安全操作资格证书。

# 第八章

## 其他射线检测方法和技术

除了以 X 射线和  $\gamma$  射线为检测手段, 以胶片作为信息载体的常规射线照相方法外, 还有许多其他种射线检测方法: 例如, 利用加速器产生的高能 X 射线进行检测的高能射线照相, 利用中子射线进行检测的中子射线照相, 应用数字化技术的图像增强器射线实时成像、计算机 X 射线照相 (CR)、线阵列扫描成像 (LDA)、数字平板成像 (DR), 以及层析照相等。

本章重点介绍在目前工业生产中得到应用的高能射线照相、图像增强器射线实时成像, 以及近年来发展很快的数字化成像技术。

### 一、高能射线照相

能量在  $1\text{ MeV}$  以上的 X 射线称为高能射线。工业检测使用的高能射线大多数是通过电子加速器获得的。工业射线照相通常使用两种加速器, 即回旋加速器和直线加速器。

#### 1. 电子回旋加速器和电子直线加速器

##### 1) 电子回旋加速器。

图 3-8-1 所示为电子回旋加速器示意图。电子回旋加速器能量范围为  $6\sim25\text{ MeV}$ , 能量的分散度小, 焦点尺寸也小, 束流强度比较大, 束流的准直性好。

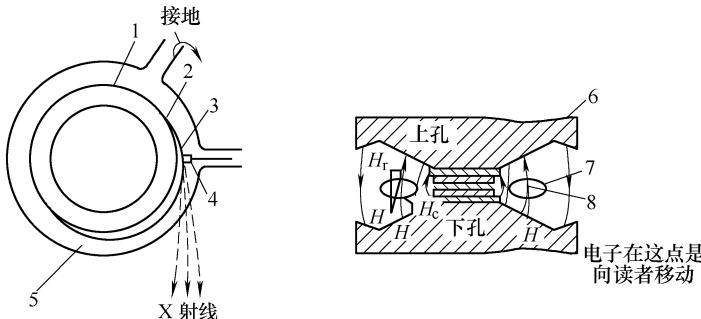


图 3-8-1 电子回旋加速器示意图

1—平衡轨道 2—盘型轨道 3—靶结构 4—发射器 5—内部深靶 6—钢片 7—环形室 8—电子轨道

电子回旋加速器的焦点很小，照相几何不清晰度小，可以获得高灵敏度的照片，但设备复杂造价高，体积大，射线强度低，影响了它的应用。

## 2) 电子直线加速器。

图 3-8-2 为电子直线加速器示意图。

电子直线加速器分为行波和驻波电子直线加速器。其能量范围为 1~15MeV。焦点约为 2~3mm，电子直线加速器产生高能射线过程大致描述为：

电子枪→电子→加速→高速→4MeV→撞击靶材→产生高能射线。

与电子回旋加速器相比，直线加速器焦点稍大，但其体积小，电子束流大，所产生的 X 射线强度大，更适合用于工业射线照相。

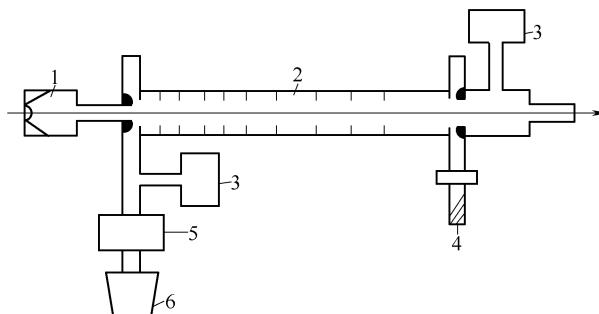


图 3-8-2 电子直线加速器示意图

1—电子枪 2—加速管 3—离子泵 4—吸收负载 5—隔离器 6—磁控管

## 2. 高能射线照相的特点

- 1) 射线穿透能力强，透照厚度大。
- 2) 焦点小，焦距大，几何不清晰度小。
- 3) 散射线少，照相灵敏度高。
- 4) 射线强度大，曝光时间短，可以连续运行，工作效率高。
- 5) 照相厚度宽容度大。

## 3. 高能射线的辐射防护

- 1) 加速器的防护主要采用屏蔽保护，加速器屏蔽室必须进行专门的安全防护设计，室外的剂量率必须低于国家卫生标准。
- 2) 因为高能 X 射线对空气进行电离后产生的臭氧和氮氧化物对人体有害，故室内必须安装通风机进行换气。
- 3) 对于直线加速器来说，除了高能 X 射线的误伤害防护之外，还应进行微波辐射防护，同时还要预防高电压、氟利昂气体对人体的危害。

## 二、射线实时成像检测技术

X 射线数字化实时成像无损检测原理如图 3-8-3 所示，它可用两个“转换”来

概述：X射线穿透金属材料后被图像采集器所接收，图像采集器把不可见的X射线检测信号转换为光学图像，称为“光电转换”；图像采集器（对于图像不具备数字采集功能的图像增强器而言，用高清晰度电视摄像机摄取光学图像，输入计算机进行A/D转换），将采集到的数字信号转换为数字图像，经计算机处理后，还原在显示器屏幕上，可显示出材料内部的缺陷性质、大小、位置等信息，按照有关标准对检测结果进行缺陷等级评定，从而达到无损检测的目的。

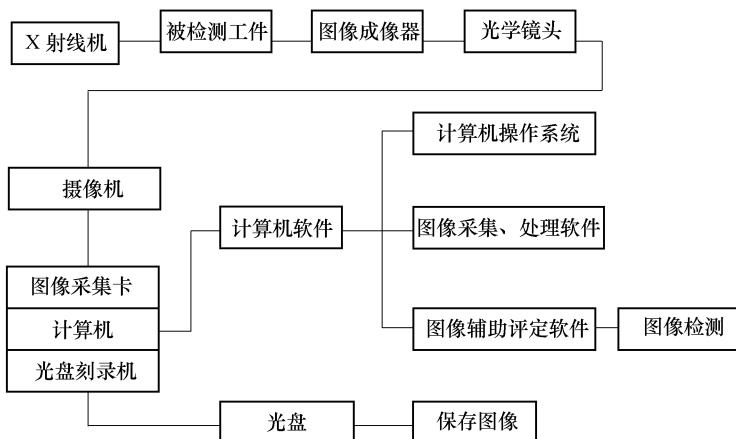


图 3-8-3 X 射线数字化实时成像无损检测原理图

X射线数字化实时成像技术无论在检测效率、经济效益、表现力、远程传送及方便实用等方面都比照相底片更胜一筹，因而具有良好的发展前景。

所谓“实时”是指图像的采集速度制式，图像采集速度能够达到每秒 25 帧 (PAL 制) 或每秒 30 帧 (NTSC 制)，即视为实时成像。关于图像的采集制式，我国采用 PAL 制式，欧美等国家多采用 NTSC 制式。

### 1. 射线实时成像检测系统的图像特性

#### 1) 射线实时成像系统图像的构成要素。

① 像素。像素是构成数字图像的基本单元。对一幅图来说，像素越多，单个像素的尺寸越小，图像的分辨率就越高。

#### ② 灰度。像素的亮度称为灰度。

#### 2) 射线实时成像系统图像的质量指标。

① 图像分辨率。图像分辨率定义为显示器屏幕图像可识别线条分离的最小间距，单位是 Lp/mm。射线实时成像检测系统的图像分辨率可采用线对测试卡测定。

② 图像不清晰度。图像不清晰度定义为一个边界明锐的器件成像后，其影像边界模糊区域的宽度。影响图像不清晰度的因素主要是几何不清晰度和荧光屏的固

有不清晰度。

图像不清晰度可采用线对测试卡测定，也可用双丝像质计测量。

射线实时成像检测系统的图像，容易实现较高的对比度，但却往往不能得到满意的清晰度。

③ 对比灵敏度。对比灵敏度定义为从显示器图像中可识别的透照厚度百分比。在射线实时成像检测系统显示器上所观察到的图像对比度与主因对比度和荧光屏的亮度有关。

对比灵敏度可用阶梯试块测定。

## 2. 图像增强器实时成像的优点和局限性

- 1) 检测速度快，工作效率比射线照相高数十倍。
- 2) 不使用胶片，不需要处理胶片的化学药品，运行成本低且不会造成环境污染。
- 3) 检测结果可转化为数字化图像可用光盘等存储器存放、调用、传送比底片方便。
- 4) 仅在最后阶段通过数字式摄像机才变成数字信号图像，而其成像过程，从射线作用多次转换，造成信噪比降低和图像质量劣化，影响最终获得的数字图像质量。
- 5) 显示器视域有局限，图像边沿容易出现扭曲失真。
- 6) 设备一次投资较大。
- 7) 图像增强器体积较大，检测系统应用的灵活性和适用性不如普通射线照相装置。

## 三、数字化射线成像技术

一般认为，数字化射线成像技术包括计算机 X 射线照相 (CR) 技术、线阵列扫描成像 (LDA) 技术以及数字平板直接成像 (DR) 技术，后者包括非晶硅、非晶硒数字平板成像和 CMOS 数字平板成像。

### 1. 计算机 X 射线照相 (CR) 技术

图 3-8-4 为计算机 X 射线照相 (CR) 技术原理示意图。CR 技术是将 X 射线透过工件后的信息记录在成像板上，经扫描装置读取，再由计算机生出数字化图像的技术。整个系统由成像板、激光扫描仪、读出器、数字

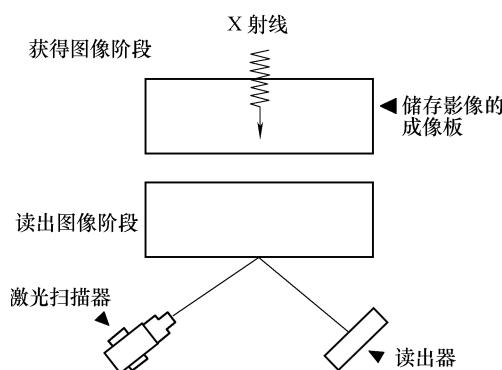


图 3-8-4 计算机 X 射线照相 (CR) 技术原理示意图

图像处理和储存系统组成。

(1) 计算机射线照相工作过程

1) 曝光。射线穿过工件到达成像板,与荧光物质相互作用,在较高能带俘获的电子形成光激发射荧光中心,构成潜影。

2) 扫描。将成像板装入专用扫描器,有激光扫描被射线照射过的荧光物质,将存储存在成像板上的射线影像转换为可光信号。

3) 成像。输出蓝色光辐射被光电接收器捕获,通过具有光电倍增和模数转换功能的读出器将其转换成数字信号输出,通过计算机重建为可视影像在显示器上显示。

(2) CR 技术和优点和局限性

1) 目前最好的 CR 成像空间分辨率可达到  $25\mu\text{m}$ ,稍低于胶片水平,但优于其他各种数字成像方法。

2) 原有的 X 射线设备不需要更换或改造,可以直接使用。

3) 成像板与胶片一样,能够分割和弯曲,能适用于复杂部位,成像板可重复使用几千次,其寿命决定于机械磨损程度。虽然价格昂贵,但实际比胶片更便宜。

4) 宽容度大,曝光条件易选择。对于曝光不足或过度的胶片可通过影像处理进行补救。

5) 虽然比胶片照相速度快一些,但是不能直接获得图像,必须将成像板放入扫描读取器中才能得到图像。

6) 成像板与胶片一样,对使用条件有一定要求,不能在潮湿的环境中和极端的温度条件下使用。

## 2. 线阵列扫描成像 (LDA) 技术

图 3-8-5 为 LDA 线阵列扫描数字成像系统示意图。

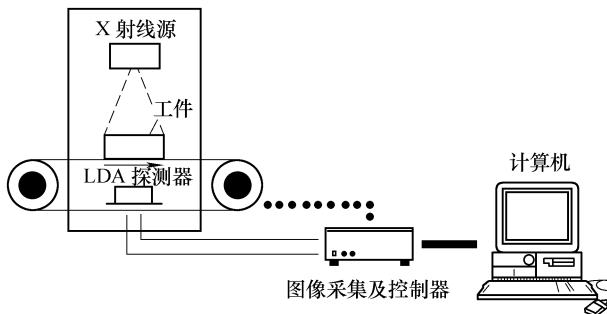


图 3-8-5 LDA 线阵列扫描数字成像系统示意图

线阵列扫描数字成像系统是由射线机发出的一束射线,穿过被检测工件,被线扫描直接成像器 (LDA 检测器) 接收,将射线直接转换成数字信号,然后传送至

图像采集控制器和计算机中。每次扫描 LDA 检测器所生成的图像仅仅是很窄的一条线，为了获得完整的图像，就必须使被检测工件做匀速运动，逐次进行扫描。计算机将多次扫描获得的线形图像进行组合。最后在显示器上显示出完整的图像，从而完成整个成像过程。

LDA 技术的优点和局限性：

- 1) 一次投资费用较低，比 DR 技术低很多，大致与图像增强器实时成像技术相近。
- 2) 成像质量比图像增强器实时成像技术好，但低于 DR 技术，更低于 CR 技术。
- 3) 成像速度比 CR 技术快得多，但比图像增强器实时成像技术慢。
- 4) 运行费用较低，大致与图像增强器实时成像技术相近。

### 3. 数字平板直接成像 (DR) 技术

DR 技术与胶片和 CR 技术的处理过程不同，在两次照射期间，不必更换胶片和存储荧光板，仅仅需要几秒钟的数据采集，就可以观察到图像，检测速度和效率大大高于胶片和 CR 技术。数字平板的成像质量比图像增强器射线实时成像系统好很多，不仅成像区均匀，没有边缘几何变形，而且空间分辨率和灵敏度更高一些。与 LDA 线阵列扫描相比，数字平板可做成大面积平板一次曝光形成图像，而不需要通过移动或旋转工件，经过多次线扫描才获得图像。

数字平板技术有非晶硅 (a-Si)、非晶硒 (a-Se) 和 CMOS 三种。

### 4. 数字化射线成像技术特点

各种数字化射线成像技术的共同点是：检测过程容易实现自动化，工作效率高，数字图像的处理、存储、传输、提取及观察应用十分方便。

- 1) 成像速度。各种数字化射线成像技术均比不上图像增强器实时成像，但比胶片照相或 CR 技术快得多。
- 2) 空间分辨率。数字化射线成像技术的图像质量比图像增强器射线实时成像系统高得多。
- 3) 数字平板的缺点。数字平板的共同缺点是其价格昂贵，而胶片和 CR 技术的成本相对较低，此外，数字平板需要连接电源；非晶硅/硒接收板数字板易碎；其灵敏度会随温度变化。

### 5. 数字化射线图像优势

与射线照相底片的模拟图像相比，数字化的射线图像至少有以下优势：

- 1) 不再需要庞大的底片库，检测结果的保存问题很容易解决。
- 2) 形成的电子文档资料库可通过先进和软件实现高水平的管理，检索、查找、统计及调用快速方便。
- 3) 可在网络上传输，实现检测结果的异地远程分析评定。
- 4) 可通过计算机处理，提高图像质量。

5) 容易复制, 可保存时间几乎无限, 对于设备运行后期维修和安全具有十分重要的意义。

#### 四、X 射线层析照相

工业 CT 是用经过高度准直的窄束 X 射线, 对工件分层进行扫描。X 射线管与检测器作为同步转动的整体, 分别位于工件两侧的相对位置。检查中 X 射线束从各个方向对被探查的断面进行扫描, 位于对侧的检测器接收透过断面的 X 射线, 然后将这些 X 射线信息转变为电信号, 再由模拟/数字转换器转换为数字信号输入计算机进行处理, 最后由图像显示器用不同的灰度等级显示出来, 就成为一幅 X - CT 图像。

## 第九章

# 射线检测的质量管理与工艺编制

### 一、全面质量管理概念

质量在不同领域、不同部门具有不同的含义。在一般的情况下其抽象为：反映实体满足明确和隐含需要的能力的特性的总和。在实际工作中，常常采用一些具体的质量概念，如产品质量、工作质量及服务质量等描述一个具体实体的质量。

产品质量，简单地说是指产品符合有关法规、标准及合同等对产品规定的质量特性的程度。符合规定要求的判定为合格产品，不符合规定要求的判定为不合格产品。

全面质量管理，是以系统的观点对待产品质量，对一切与产品质量有关的因素进行系统的管理，力求建立一个能够有效确保质量和不断提高质量的质量保证体系。

全面质量管理，也就是企业的全体职工和部门共同努力，把专业技术、经营管理、数理统计和思想教育结合起来，建立起产品的研究设计、生产制造、售后服务等各环节的全过程的质量保证体系，从而以最经济的手段生产出用户满意的产品。

全面质量管理的基本核心是，强调提高人的工作质量，保证和提高产品质量，达到全面提高企业和社会经济效益的目的。

全面质量管理的基本特点是从过去的事后检验和把关为主转变为预防和改进为主，从管结果改变为管质量影响因素，发动全员、全部门参加，依靠科学管理理论、程序、方法，使生产的全过程都处于受控状态。

总结为：全员参加的、全过程的、全面质量管理。全面质量管理涉及五个方面的因素：人、机、料、法、环即人的因素、设备的因素、材料的因素、方法的因素及环境的因素。

### 二、射线检测人员的管理

射线检测人员的素质、技术水平、健康状况直接决定射线检测工作的质量，必须对射线检测人员加强管理。主要的管理内容可分为人力资源配备和储备、人员资格管理、技术培训与考核、技术档案管理、健康与考核。

## 1. 人力资源配备和储备

配备足够的管理人员、技术人员及检测作业人员；人员的资格、等级及数量满足单位资格认可条件的基本要求；及时地进行人员的调整和补充；根据发展需要，制定人员发展、储备规划。

## 2. 人员资格管理

凡从事承压设备无损检测的人员必须按照“特种设备无损检测人员资格考核规则”的规定，经过技术培训和考核，取得特种设备安全监察机构颁发的资格证书，从事与资格相应的技术工作，所持有的技术资格证书必须处于有效期内。技术资格分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三个级别，Ⅰ级是初级资格，Ⅱ级是中级资格，Ⅲ级是高级资格，不同级别在技术上具有不同的能力。由于技术的发展，标准的修订，知识和经验需要更新，取得技术资格的人员应按资格标准的规定定期参加资格更新培训和考核（即复试）。

## 3. 人员培训与考核

培训分为外部培训和内部培训两类。

外部培训主要指无损检测人员资格考核和复试规定的培训内容，一般有考核部门认定的专业培训机构组织实施，如这次培训班；内部培训是企业组织的对自己员工的培训。

培训内容：与特种设备有关的法规、标准、仪器设备的操作、新技术、新方法、质量手册及程序文件等。

企业的有关部门（如教育部门）制定射线照相检验人员的培训计划和规划，组织射线照相检验人员参加有资格部门进行的技术培训和资格考核，制定制度鼓励射线照相检验人员不断提高技术水平，在可能时组织企业内部的岗位培训和技术培训。

岗位培训是根据本单位的质量管理体系文件，对从事射线检测的人员组织培训，使他们熟悉本岗位的职责、权限、工作要求，并自觉转变为本人的工作任务。技术培训是对其技术知识和技术能力的培训，以提高人员完成规定任务和执行有关标准、法规等的能力。

培训考核应有记录，并记入档案。

## 4. 人员技术业绩档案

射线检测人员所在单位，应建立持证射线检测人员的技术档案，记载其技术经历和工作业绩，持证与复考情况、培训情况、检测质量方面的奖惩情况等。技术工作经历：学历、资格证书、技能等级证书，培训、考核记录；技术业绩记录：事故处理、制定标准、发表论文、研究成果；检测质量方面的奖惩记录。

## 5. 健康

从事射线检测人员的身体健康状况必须符合国家有关部门标准规定的条件，这是保证射线检测工作正常进行的基础条件，也是保证射线检测人员自身健康的要

求。对已从事射线检测的人员，主要的管理方面是单位应建立他们的健康档案，按国家有关条例或法规进行定期的体检，按国家有关的条例或法规组织休假或疗养等。

### 三、射线检测设备和器材的管理

射线检测的设备和器材是保证射线检测工作质量的基本条件，所使用的设备和器材必须适于进行的射线检测工作的要求，它们的质量必须处于有效、受控状态。对它们管理的主要方面包括采购管理、档案资料、使用维护及检定校准等。

#### 1. 仪器设备材料采购管理

射线检测工作所使用的设备和器材，应符合射线检测所执行标准的要求，并具有合格证明文件。

- 1) 建立合格供应商名录：资质、资信、以往供货业绩、价格及服务质量等
- 2) 采购管理。采购程序：购置申请、批准、选择供方、签订采购合同、付款、到货验收、入库。

验收内容包括：

- ① 开箱清点。核查设备名称、型号、主机、附件数量是否与采购清单一致。
- ② 技术性能验收。必要的性能测试。
- ③ 技术资料归档。合格证、质量证明书、使用说明书。

#### 2. 仪器设备使用管理

- 1) 标识。三色标红、黄、绿分别代表：合格、准用、停用。
- 2) 仪器设备的保管、使用与维护。设备管理员统一保管，办好借用手续、做好记录。使用者根据仪器的保管、使用条件、环境要求保管好仪器，按操作规程操作仪器设备。设备归还时，借用人将设备清理干净，与设备管理员共同确认设备状态，办理归还手续。仪器操作时做好记录、确认其校准状态。按仪器的操作规程进行使用，做好保养、定期充电，不用时将电池取出。设备管理员对损坏的设备及时维修、校准、检定。仪器无法修复的按规定报废，明确标识、隔离存放。使用外部设备时应进行评定，确保满足检测要求。

#### 3. 仪器设备的检测校准

对国家标准、行业标准有规定的或性能会快速改变的设备和仪器，应按有关标准的规定或自行编制的规定进行性能的校验。

主要需要校验的是黑度计（黑白密度计）和辐射剂量监测仪器。

黑度计使用开始时，应用标准黑度片校验黑度计的读数，按多数标准的规定，读数的不确定度应在  $\pm 0.05$  范围内。校准读数的标准黑度片，应定期送计量部门检定或更新。

辐射剂量监测仪器应送卫生防疫部门或计量部门检定。X 射线检测设备至少检定一次。X 射线机年度检定内容：辐射角和有效焦点尺寸、曝光曲线、最大透照厚

度应定期测定。X射线机上的电流表、电压表应按规定进行定期校验。 $\gamma$ 射线机的屏蔽性能、安全连锁装置、驱动机构等也应按规定进行定期检验，以确保安全使用。

#### 4. 消耗材料的管理

胶片、显影液、定影液要注意生产日期、有效期，胶片低温储藏，显影液、定影液注意避光保存。

### 四、射线检测工艺的管理

射线检测工艺是决定射线检测工作质量的具体过程，显然十分重要，必须对其进行严格的控制，才能保证射线检测的工作质量，也才能保证射线检测结果的可靠性。检测工艺管理包括工艺制定（包括工艺规程核工艺卡），工艺的执行和监督，新技术新工艺控的鉴定，例外检测的专用工艺制定等。通过这些方面的控制，使采用的射线检测技术，符合有关标准的要求，使射线检测技术处于严格受控的状态。

#### 1. 工艺规程的制定

通用工艺规程是根据有关法规、标准编制的一个单位或一个单位对一类产品关于射线检测工作所规定的检验工作的程序、人员、设备与器材、技术、操作、条件和质量控制等要求的文件，即它对射线检测的工艺过程做出通用性规定，它用于管理一个单位或一类产品的射线检测工作和保证射线检测的工作质量，由该专业的Ⅲ级人员编制；应有编制、审核、批准三级签字。

射线检测的规程一般应包括下列方面的内容：

- 1) 适用范围（依据的法规标准，透照的质量等级，透照母材的厚度范围，工件种类，焊接方法和类型）。
- 2) 对检测人员的要求（资格、视力）。
- 3) 检测准备要求（检测时机、工件表面状况标记方法）。
- 4) 设备与器材要求（射源、能量选择、胶片牌号和类型、增感屏、像质计、暗盒及铅字）。
- 5) 透照方法及相关要求（100%透照或局部透照要求、焦距选择、一次透照长度、编号方法、标记的摆放及散射线的屏蔽等）。
- 6) 曝光参数及曝光曲线（管电压、管电流及曝光时间等）。
- 7) 暗室处理（洗片方法、胶片处理程序、条件及要求）。
- 8) 底片评定（评片条件、验收标准、像质要求、综合评定及返修规定）。
- 9) 记录报告（原始记录、报告格式、内容及档案管理要求）。
- 10) 安全管理规定。
- 11) 其他必要的说明。

#### 2. 检测工艺卡

射线检测工艺卡是针对具体产品射线检测的具体技术和要求的表卡，用于控制

具体产品射线检测的技术和指导检验操作。

射线检测工艺卡一般应包括下列方面的内容：

- 1) 编号。
- 2) 产品的有关资料。
- 3) 检测设备与器材。
- 4) 检测技术标准。
- 5) 检测方法与技术参数。
- 6) 检测部位示意图。
- 7) 检测质量主要控制指标。
- 8) 签署。

其内容应达到要求，按照工艺卡的规定，不同的具有相同资格的射线检测人员，对同一工件可以重复地得到基本相同的检验质量。射线检测工艺卡由持有高级或中级技术资格的人员编制，由具有资格的负责射线检测的无损检测责任工程师审核。

射线检测工艺卡应按射线检测规程的规定编制，其某些方面将引用射线检测规程的内容。

### 3. 工艺纪律的监督与管理

严格执行工艺文件，定期或不定期抽查工艺纪律的执行情况，是否适宜，制定奖励和处罚的规定。

### 4. 新技术、新工艺、新材料及新设备使用的控制

在射线检测中采用一般的新技术、新工艺、新材料及新设备时，需经充分试验验证、并经主管部门批准后方可投入使用。

对较重大的技术、工艺、材料改变，除了必须经过充分的试验验证外，还应进行经过批准的必要的试用期，使技术走向成熟，并经专家评审通过，才能逐步转为正式采用。

慎重地采用重大改变的新技术、新工艺、新材料，是保证质量、避免错误的可行态度。

### 5. 例外检测的专用工艺制定

例外检测是指检测工程中受现场具体情况或工件结构制约，某些检测条件不能满足技术标准或产品设计工艺文件的要求，不能应用规定的检测方法、工艺、工艺参数或工艺措施实施检测，而没有其他更好的替代方法时，所进行的特殊性质的检测工作。

对 RT 来说，受限制焦距不能满足最小几何不清晰度的要求；透照厚度差过大导致黑度和灵敏度不能满足标准要求；工件厚度大射线穿透能力不足导致黑度和灵敏度不能满足标准要求；工件厚度小于  $\gamma$  射线透照厚度下限导致灵敏度不能满足标准要求；等等。

例外检测可能影响检测灵敏度和缺陷检出的可靠性，要控制、制定管理程序，包括：例外申请、方案制定、专用工艺的编制及批准等；进行例外检测时及时告知客户，并在报告中注明，必要时向有关部门备案。

制定例外检测方案和工艺时，应考虑：

1) 申请例外许可的理由是否成立，是否需要进行例外检测，现场条件是否确实无法满足技术标准或产品设计工艺文件。

2) 是否一定要用该方法进行检测，是否有其他更好的替代方法。

3) 例外检测方案是否周密完整。

4) 例外检测工艺中，是否针对存在的具体情况制定了针对性补偿措施，是否能保证检测质量不降低或使这种降低减少的最低程度。

例外检测工艺中注意采取补偿措施：使用更高等级的胶片、提高底片黑度、采用双胶片技术、采用厚度补偿及屏蔽散射线措施等。

## 五、射线检测报告、底片及原始记录控制和档案的管理

射线检测报告由特种设备无损检测Ⅱ级以上人员出具，按程序文件的规定进行编制、审核、批准签字；盖单位印章（一般为检验专用章）；采用专用格式，字迹清楚或打印，采用法定计量单位。

原是记录应保证真实性，记录实际操作数据，不得抄录工艺卡上的数据，原是记录与报告要一致，原是记录的信息量应大于等于报告的信息量。

原是记录、报告及底片按规定归档。

## 六、射线检测环境的管理

射线检测环境包括：透照场地、办公场地、暗室及评片室。

透照室的设计应符合国家放射安全和环保的有关规定，启用前进行安全剂量测试合格并报送卫生环保备案后才能使用。透照室应设置安全防护装置：报警装置、工作信号灯、安全连锁装置、入口处放置放射性标志。

射线透照现场透照时应设定控制区和监督管理区。控制边界应悬挂清晰可见的“禁止进入放射性工作场所”标牌，未经许可不得进入该范围，可采用绳索隔离或实施人工管理；监督管理区允许相关人员在此活动，边界悬挂“当心，电离辐射”标牌，公众不得进入该区域。

控制区：空气比释动能率低于  $40\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$  作为边界，该区域内需要专门的防护手段和安全措施；X射线监督管理区：控制区外  $4\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$  以上范围； $\gamma$ 射线监督管理区：控制区外  $2.5\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$  以上范围。

## 七、放射防护安全管理

放射防护安全管理是指射线应用单位及其主管部门所进行的自主管理。

## 1. 放射防护法规与标准

与工业射线有关的放射卫生防护法规：

- 1) 《放射性同位素与射线装置放射防护条例》，2005年12月1日起实施。
- 2) 《中华人民共和国放射性污染防治法》，2003年10月1日起实施。
- 3) 《放射事故管理规定》，2001年8月26日由卫生部及公安部公布。
- 4) 《中华人民共和国职业病防治法》，2011年12月31日起实施。

与工业射线有关的放射卫生防护标准：

- 1) GB18871—2002《电离辐射防护及辐射源安全基本标准》。
- 2) GBZ 117—2006《工业X射线探伤放射卫生防护标准》。
- 3) GBZ 132—2008《工业γ射线探伤放射卫生防护标准》。

## 2. 放射防护管理责任部门

使用放射装置的单位应设置辐射防护安全管理责任部门或任命专（兼）职防护安全员，职责：

- 1) 制定本单位的辐射防护实施细则和规章制度。
- 2) 从业人员的辐射防护教育与训练。
- 3) 负责源的购买、使用、存放及回收等管理工作。
- 4) 检查防护设施，报告监测结果，提出评价和改进意见。
- 5) 划分工作区和监督区，监测放射水平。
- 6) 参与放射事故调查。

## 3. 放射装置申请许可制度

使用辐射装置的单位，办理申请许可手续：

- 1) 新从事射线检测工作的单位。
- 2) 射线装置转让、调拨的接收单位。
- 3) 购置新的射线装置的单位。
- 4) 新建、改建或扩建射线装置工作场所的单位。

申请开展辐射装置的工作单位必须具备：

- 1) 与开展工作相适应的场所、设施和装备，相应的资料。
- 2) 人员具备专业防护知识和健康条件，相应见证。
- 3) 辐射防护机构或人员，必要的防护用品及监测仪器。
- 4) 安全防护的管理规章制度文件。

取得“射线装置工作许可证”后方可从事许可的射线装置工作。

辐射工作场所应设有电离辐射标志（图3-9-1）。

## 4. 放射防护培训及取证

从事放射工作的人员，必须接收放射防护培训，取得《放射工作人员证》方可从事所限定的放射工作。我国的有关条例、法规、标准等，对从事放射工作的人员应具备的基本条件做出了规定，最主要的是归纳为下列四个方面：

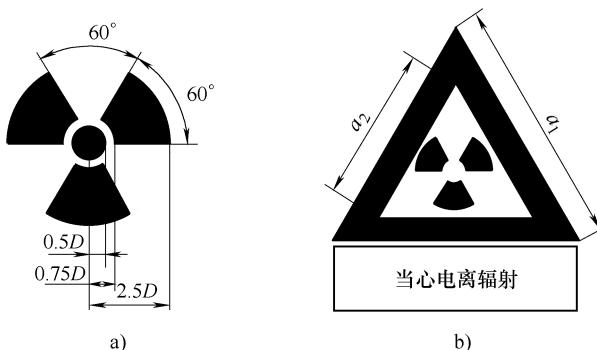


图 3-9-1 电离辐射标志

$$a_1 = 0.034L \quad a_2 = 0.700a_1 \quad L \text{—观察距离}$$

- 1) 年满 18 周岁, 健康合格。
- 2) 遵守辐射防护法规和制度, 接受个人剂量监督。
- 3) 掌握辐射防护知识和有关法规, 经培训考核合格。
- 4) 具有高中以上文化水平和相应的专业技术知识和能力。

## 5. 放射工作人员的健康管理

关于放射工作人员的健康管理, 国家有关标准和国家卫生部第 55 号部令《放射工作人员健康管理规定》(1997 年 6 月 5 日) 均做出了具体的规定, 规定的主要内容包括下列五个方面。

1) 总的要求。从事放射工作人员必须进行就业前或操作前的医学检查和就业后的工作过程中的定期医学检查。放射工作人员的健康状况, 必须保证其具备在正常、异常和紧急情况下, 都能够准确无误地、安全地履行其职责的能力。

2) 健康状况的主要要求。放射工作人员的健康应满足的主要要求包括正常的呼吸、循环、消化、内分泌、免疫系统和物质代谢功能; 正常的造血功能, 红系、粒系、巨核细胞系等均在正常范围; 正常的神经系统功能、精神状态和稳定的情绪; 正常的视觉、听觉、嗅觉及触觉等; 外周血淋巴细胞染色体畸变率和微核率正常等。

3) 就业后的健康管理。主要规定是按放射工作人员的工作场所条件, 规定健康状况的定期检查频度和项目; 应记录从事放射工作的工种、工龄、剂量、受照情况、适应放射工作情况等。

4) 不应或不宜从事放射工作的规定。具体规定了不应或不宜从事放射工作的健康或其他的情况, 也规定了不应或不宜从事某些放射工作或不应接触射线的情况。

5) 医学随访(每两年)。

① 从事 20 年以上。

- ② 一次或几天 0.1Sv 以上。
- ③ 一年 1.0Sv 以上。
- ④ 确诊的职业放射病患者。
- 6) 保健津贴。按相关规定。
- 7) 休假。每年 2~4 周。

## 6. 辐射(放射)事故管理

关于辐射事故管理问题,卫生部的文件《放射事故管理规定》(2001年8月26日)做出了规定,下面是部分主要规定内容。

(1) 辐射事故分类 辐射事故按性质分为三类:责任事故、技术事故、其他事故。辐射事故按类别也分为三类:一类事故、二类事故、三类事故。一类事故是人员受超剂量照射事故,二类事故是放射性物质污染事故,三类事故是丢失放射性物质事故。

(2) 辐射事故处理原则 辐射事故处理原则可粗略地归纳为下列一些方面:

1) 发生事故的单位必须及时采取妥善措施,控制事故,防止事故的扩大和蔓延,减少和控制事故的危害和影响,按规定上报,接受监督部门的处理。

2) 处理事故时,应首先考虑工作人员和公众人员的生命安全。

3) 发生事故的单位应及时收集与事故有关的物品和资料,作好调查研究工作,认真分析事故原因,采取妥善措施,保护国家财产和公众的安全。

4) 发生丢失放射性物质事故的单位,应密切配合卫生行政部门和公安部门,迅速查找、侦破,尽快追回丢失的放射性物质。

5) 对事故中的受照人员,应通过模拟实验和各种检测迅速估算受照剂量,做出必要的医学处理。

(3) 辐射事故监督管理 关于辐射事故的监督管理,主要有下列方面的规定:

1) 国务院卫生行政部门和公安部门对全国辐射事故实施统一监督管理。省级卫生行政部门和公安部门对本辖区辐射事故实施统一监督管理,组织处理二级以下(含二级)事故。

2) 地方各级卫生行政部门和公安部门在接到辐射事故报告后,应迅速核实事故情况,判定事故级别,逐级上报。对初步确认为三级的事故,必须在 24h 内报告国务院卫生行政部门和公安部门。

3) 发生射线装置事故(不含放射源)的单位,应依照规定将事故情况及时报告上级主管部门和卫生行政部门,由卫生行政部门会同有关部门调查处理。

4) 发生放射性同位素事故的单位,应依照规定将事故情况及时报告上级主管部门、卫生行政部门、公安部门,由卫生行政部门、公安部门会同有关部门调查处理。

5) 辐射事故应在发现事故之日起 30 日内结案。一、二、三级事故以“放射事故报告表”形式结案。逾期不能结案的,必须每隔三个月做出“放射事故报告

表”。放射事件以“放射事件登记表”形式登记。

6) 负责处理辐射事故的卫生行政部门、公安部门必须建立辐射事故档案数据库。

此外，还有其他和进一步的规定。

## 7. 放射性物质管理

关于放射性物质的管理，国务院第449号令做出的规定的主要点如下：

1) 放射性同位素不得与易燃、易爆、腐蚀性物品一同存放。存放场所必须有防火、防盗、防泄漏措施，专人负责保管。

2) 贮存、领取、使用、归还放射性同位素必须进行登记、检查，账物相符。

3) 从事放射性同位素的订购、销售、转让、调拨和借用的单位或个人，必须有许可登记证，并只限于在许可登记证的范围内活动，并向同级卫生和公安部门备案。

4) 放射性废水、废气和固体废物排放，必须事先向所在省、自治区、直辖市的环保部门递交环境影响报告，经批准后到所在县以上卫生行政部门申请办理许可证，并向公安部门登记。

5) 托运、承运和自行运输放射性同位素或装过放射性同位素的空容器，必须按国家有关运输规定进行包装和剂量检测，经县以上运输和卫生行政部门检查后方可运输。

6) 生产的装有放射性同位素的设备、射线装置和放射防护器材，必须符合放射防护规定。

## 第十章 射线检测应用实例

## 一、浮头式换热器管箱组件的射线检测

## 1. 产品的概貌及检测要求

- 1) 如图 3-10-1 所示, 需射线检测的焊缝编号为 A1、B1 ~ B4, 焊缝 B1 处的筒体外侧削薄至 20mm, 采用全双面焊。
  - 2) 筒体长度 700mm, 筒体上有一条纵缝。
  - 3) 管箱的内径为 1100mm。环焊缝 B3 和 B4 所在的两个接管规格为  $\phi 273\text{mm} \times 9\text{mm}$ , 接管位于筒节长度方向的中心部位。封头无拼接焊缝, 壁厚 20mm。筒节厚度 26mm (材料 Q345R), 右侧为长颈设备法兰。

## 2. 检测要求

设计图样规定,该设备部件的制造和验收应满足《压力容器》(GB 150—2011)和《固定式压力容器安全技术监察规程》的要求:执行JB/T 4730.2—2005,A、B类对接接头的射线检测技术级别AB级,检测比例不小于20%,合格级别不低于Ⅲ级。

### 3. 检测条件

- 1) 射线机: XXQ - 2505 (定向, 焦点尺寸  $2.0\text{mm} \times 2.0\text{mm}$ ); XXH - 2505 (平靶周向, 焦点尺寸为  $1.0\text{mm} \times 2.4\text{mm}$ )。
  - 2) 胶片: AgfaC7, 规格  $300\text{mm} \times 80\text{mm}$ 。
  - 3) 冲洗方式: 手工。显影条件: 显影时间  $4 \sim 8\text{min}$ , 显影温度  $18 \sim 22^\circ\text{C}$ 。
  - 4) 曝光规范 (两台射线机相同): 由曝光曲线可知,  $F = 600\text{mm}$ , 曝光量  $15\text{mA} \cdot \text{min}$  时,  $\text{kV} = 5T_A + 80$ , 其中  $T_A = W + \text{余高}$ 。

#### 4. 工艺卡

射线检测工艺卡见表 3-10-1。

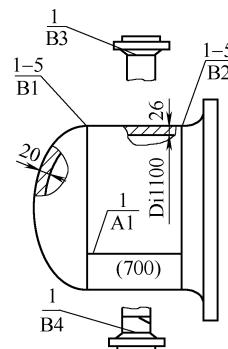


图 3-10-1 浮头式换热器管箱组件

表 3-10-1 射线检测工艺卡

工 件	产品名称	浮头式换热器管箱组件	产品(制造)编号	201101
	材料牌号	Q345R	规格	φ1100mm × 1000mm
器 材	源种类	□X □Ir192 □Co60	设备型号	XXH2505/XXQ250
	焦点尺寸	1.0mm × 2.4/2.0mm × 2.0mm	胶片牌号	AgFaC7
	增感方式	前屏 0.03mm 后屏 0.03mm	胶片规格	80mm × 300mm
	屏蔽方式	必要时背衬薄铅板	冲洗方式	□自动 □手工
	显影液配方	胶片厂家配方	显影条件	时间 4~8min, 温度 18~22℃
检 测 工 艺 参 数	焊缝编号	A1	B1	B2
	板厚/mm	26	20	26
	像质计型号	Fe6/12	Fe6/12	Fe10/16
	透照方式	单壁外透	单壁外透	中心透照
	f(焦距)/mm	(600)	(600)	(578)
	能量/kV	230	200	230
	管电流/mA	5	5	5
	曝光时间/min	3	3	2.8
	应识别丝号	10	11	10
	焊缝长度/mm	700	3581	3619
	一次透照长度/mm	250	238	250
	拍片数量/片	1	5	5
	合格级别	III	III	III
技术 要求	检测比例(%)	≥20	≥20	≥20
	1. 检测标准: JB/T 4730. 2—2005			
	2. 射线检测技术等级: AB 级			
	3. 底片黑度范围 D: 2.0~4.0			
	4. 本工艺卡未规定事宜, 执行射线通用工艺规程			
	5. 补充说明: 透照 B2 焊缝使用 XXH2505 (周向)射线机, 其他采用 XXQ-2505 (定向)射线机			
透照部位 示意图				
编制人(资格): ××Ⅱ××××年××月××日	审核人(资格): ××Ⅱ(或Ⅲ) ××××年××月××日			

## 二、在用压缩机出口分液罐射线检测

### 1. 产品的概貌及检测要求

一台分液罐（图 3-10-2），产品编号为 201102，容器类别为二类，主体材质 Q245R；规格为  $\phi 800\text{mm} \times 1500\text{mm} \times 12\text{mm}$ ，设备上接管规格及开孔方位如图所示。设计图样要求对该容器 B1 焊缝进行 100% 射线检测，对其他对接焊缝（公称直径小于 250mm 接管焊缝除外）进行局部射线检测（ $\geq 20\%$ ），并执行 JB/T 4730.2—2005，技术级别 AB 级，合格级别不低于Ⅲ级。

### 2. 检测条件

现有 X 射线检测机两台：1) 型号 250EG-S3，焦点尺寸为  $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ ，管电流 5mA；2) 型号 200EGB1C，焦点尺寸为  $1.0\text{mm} \times 3.5\text{mm}$ ，管电流 5mA。图 3-10-3 为 250EG-S 型号的曝光曲线，图 3-10-4 为 200EGB1C 型号的曝光曲线。其他器材有：胶片（AgfaC7、天津Ⅲ型）；规格分别  $360\text{mm} \times 80\text{mm}$ 、 $240\text{mm} \times 80\text{mm}$ 、 $180\text{mm} \times 80\text{mm}$ ，增感屏类型：Pb0.03mm；暗室处理冲洗方式为手工冲洗。

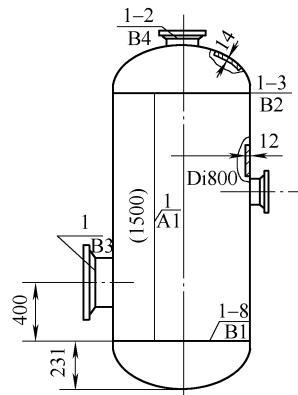


图 3-10-2 在用压缩机出口分液罐

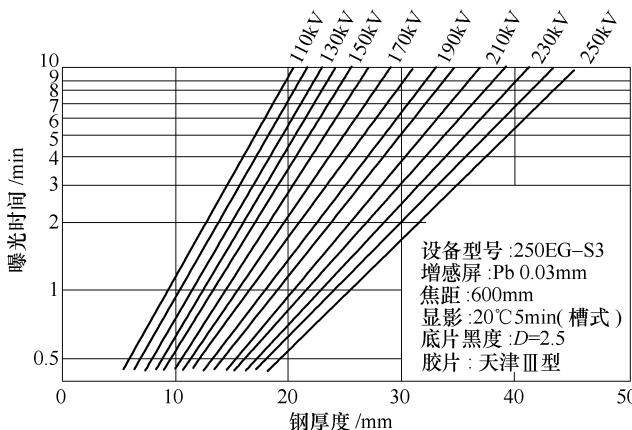


图 3-10-3 250EG-S3 定向 X 射线检测机曝光曲线图

### 3. 工艺卡

射线检测工艺卡见表 3-10-2。

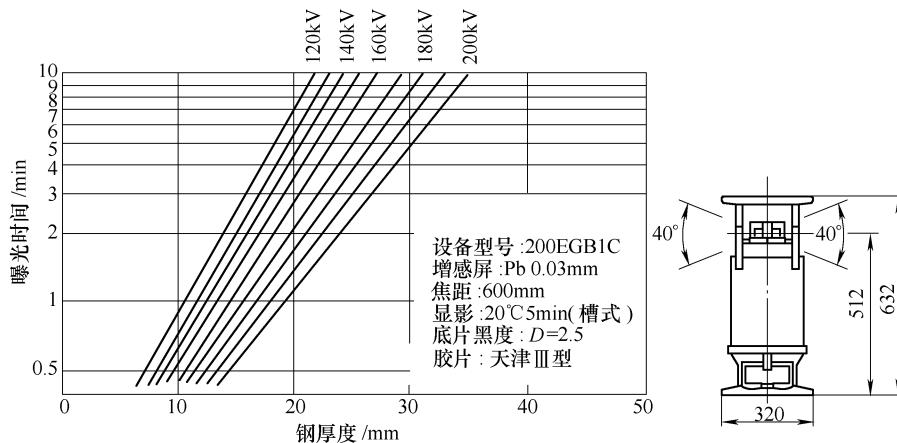
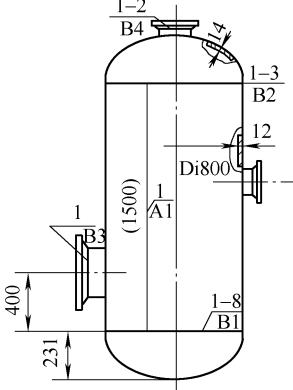


图 3-10-4 200EGB1C 周向 X 射线检测机曝光曲线及机头结构图

表 3-10-2 射线检测工艺卡

工件	产品名称	分液罐		产品(制造)编号	201102
	材料牌号	Q245R		规格	$\phi 800\text{mm} \times 1500\text{mm} \times 12\text{mm}$
器材	源种类	<input checked="" type="checkbox"/> X <input type="checkbox"/> Ir192 <input type="checkbox"/> Co60		设备型号	200EGB1C/250EG-S3
	焦点尺寸	1.0mm $\times$ 3.5mm/2.0mm $\times$ 2.0mm		胶片牌号	天津Ⅲ型
	增感方式	前屏 0.03mm <input checked="" type="checkbox"/> Pb <input type="checkbox"/> Fe 后屏 0.03mm		胶片规格	360mm $\times$ 80/240mm $\times$ 80/ 180mm $\times$ 80mm
	屏蔽方式	背衬薄铅板		冲洗方式	<input type="checkbox"/> 自动 <input checked="" type="checkbox"/> 手工
	显影液配方	胶片厂家配方		显影条件	时间 4 ~ 8min, 温度 18 ~ 22℃
	焊缝编号	A1	B1	B2	B3
检测工艺参数	板厚/mm	12	12	12	10
	像质计型号	Fe10/16	Fe10/16	Fe10/16	Fe10/16
	透照方式	单壁外透	中心透照	单壁外透	中心透照
	$f$ (焦距) /mm	(700)	(414)	(600)	(215)
	能量/kV	120	120	120	120
	管电流/mA	5	5	5	5
	曝光时间/min	4	1.5	3	0.5
	应识别丝号	12	12	12	13
	焊缝长度/mm	1500	2589	2589	1339
	一次透照长度/mm	342	324	210	320
	拍片数量/片	1	8	3	1
	合格级别	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ

(续)

检测比例 (%)	≥20	100	≥20	≥20	≥20
技术要求	1. 检测标准: JB/T 4730. 2—2005 2. 射线检测技术等级: AB 级 3. 底片黑度范围 $D$ : 2.0 ~ 4.0 4. 本工艺卡未规定事宜, 按射线检测通用工艺规程执行 5. 补充说明: 透照 B1、B3 焊缝使用 200EGB1C (周向) 射线机, 其他采用 250EG - S3 定向射线机				
透照部位示意图	 A technical drawing showing the cross-section of a furnace tube joint. The tube has an outer diameter of Di800 and an inner diameter of (1500). The tube is supported by a stand with a height of 400. The joint is labeled with various inspection points: 1-2 (top), 1-3 (top), B2 (top), 12 (top), A1 (middle), 1-8 (bottom), B1 (bottom), and B3 (bottom). The bottom of the tube is labeled with 231.				

编制人 (资格): ××Ⅱ××××年××月××日 | 审核人 (资格): ××Ⅱ (或Ⅲ) ××××年××月××日

### 三、乙烯裂解炉辐射炉的管对接接头射线检测

#### 1. 产品的概貌及检测要求

乙烯装置的裂解炉辐射炉管结构 (图 3-10-5), 炉管材质为 P91 (相当于 9Cr1MoVN), 管子规格  $\phi 73\text{mm} \times 9\text{mm}$ , 焊缝宽度 10mm, 焊缝余高 2mm。设计要求管对接接头 100% 射线检测, 执行 JB/T 4730. 2—2005, 技术级别 AB 级, 不低于Ⅱ级合格。

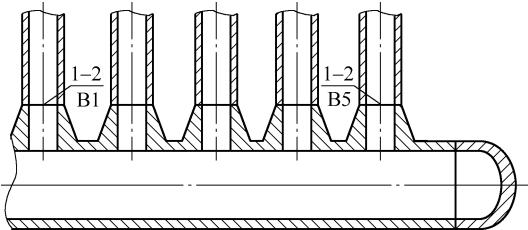


图 3-10-5 辐射炉的管对接接头

#### 2. 检测条件

现有检测设备和材料包括: X

射线检测机 (300EG - B2F 型周向)、Se75 $\gamma$  射线检测机 (活度 80Ci; 焦点尺寸为  $\phi 3\text{mm} \times 3\text{mm}$ ) 和 Ir192 $\gamma$  射线检测机 (活度 80Ci; 焦点尺寸为  $\phi 3\text{mm} \times 3\text{mm}$ )；天津Ⅲ型、天津 V 型胶片 (规格 360mm  $\times$  80mm、120mm  $\times$  80mm)。图 3-10-6 ~ 图 3-10-8 分别为上述射线机的曝光曲线。

#### 3. 工艺卡

射线检测工艺卡见表 3-10-3。

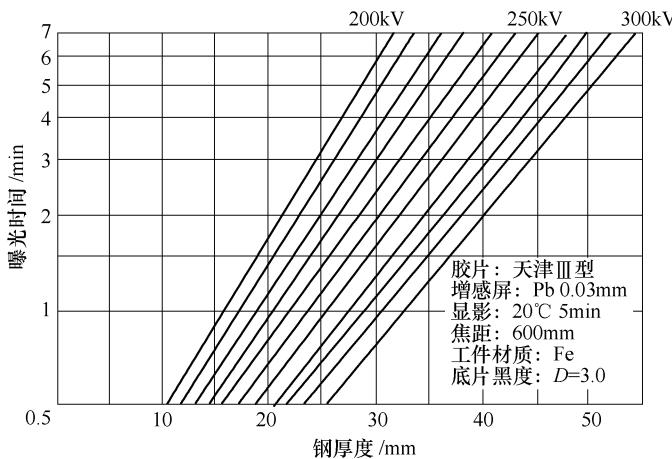


图 3-10-6 300EG - B2F 射线检测机曝光曲线图 (焦点尺寸: 1.0mm × 2.5mm)

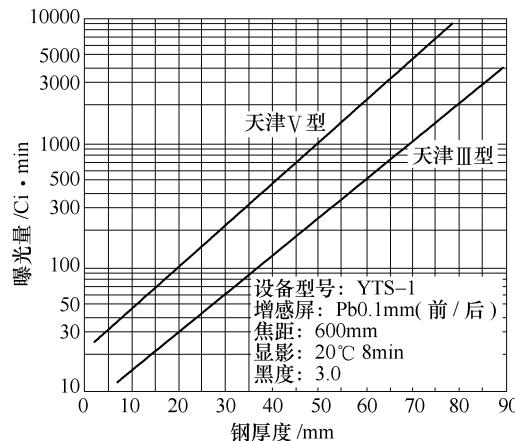


图 3-10-7 Ir192 曝光曲线图

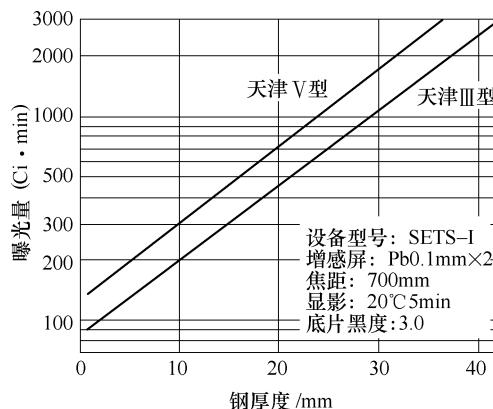


图 3-10-8 Se75 曝光曲线图

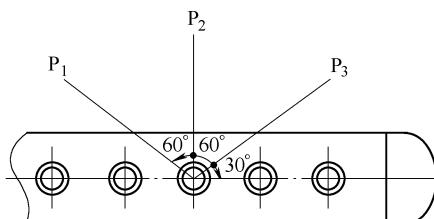
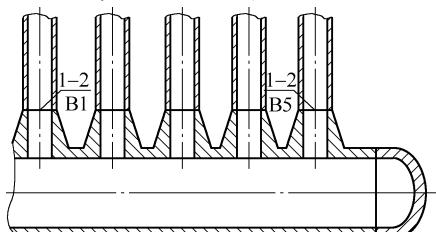
表 3-10-3 射线检测工艺卡

工件	产品名称	裂解炉辐射炉管	产品(制造)编号	201103
	材料牌号	P91	规格	$\phi 73\text{mm} \times 9\text{mm}$
器材	源种类	<input type="checkbox"/> X <input type="checkbox"/> Ir192 <input checked="" type="checkbox"/> Se-75	设备型号	SETS-1 (Se75)
	焦点尺寸	$\phi 3\text{mm} \times 3\text{mm}$	胶片牌号	天津V型
	增感方式	<input checked="" type="checkbox"/> Pb <input type="checkbox"/> Fe	胶片规格	$120\text{mm} \times 80\text{mm}$
	屏蔽方式	背衬薄铅板	冲洗方式	<input type="checkbox"/> 自动 <input checked="" type="checkbox"/> 手工
	显影液配方	胶片厂家配方	显影条件	时间 4~8min, 温度 18~22°C
检测工艺参数	焊缝编号	B1~B5		
	板厚/mm	9		
	像质计型号	Fe-10/16		
	透照方式	垂直重叠		
	$f$ (焦距) /mm	(600)		
	能量/kV	—		
	管电流(活度)/mA(Ci)	(80)		
	曝光时间/min	6.4		
	应识别丝号	11/12F		
	焊缝长度/mm	$230 \times 5$		
	一次透照长度/mm	77		
	拍片数量/片	$3 \times 5$		
技术要求	合格级别	II		
	检测比例 (%)	100		

## 补充说明:

- 选择 Se75 源配合天津 V 型胶片 (P91 属裂纹敏感性材料)
- 检测时机: 焊接完成 24h 后
- 壁厚  $T > 8\text{mm}$  不满足椭圆成像条件选择垂直透照重叠成像
- $f \geq 10d^{2/3} = 10 \times 3 \times 77^{2/3}\text{mm} = 543\text{mm}$   
选取焦距  $F$ : 600mm
- 应识别丝号: 源侧 11, 胶片侧 12F

透照示意图: 隔 60°C 透照 3 次



辐射炉管焊接接头俯视图

编制人(资格): ××Ⅱ××××年××月××日

审核人(资格): ××Ⅱ(Ⅲ) ××××年××月××日

# 第四篇 超声检测

## 第一章 超声检测的物理基础

### 一、机械振动与机械波

#### (一) 机械振动

物体(或质点)在某一平衡位置附近做来回往复的运动,称为机械振动。

振动在日常生活中随处可见,凡有摇摆、晃动、打击及发声的地方都存在机械振动,如弹簧、摆轮、音叉、琴弦以及蒸汽机活塞的往复运动等,振动是自然界最常见的一种运动形式。

振动是往复运动,可用周期和频率表示振动的快慢。当物体做往复运动时完成一次全振动所需要的时间,称为振动周期,用 $T$ 表示。常用单位为s。振动物体在单位时间内完成全振动的次数称为振动频率,用 $f$ 表示。常用单位为Hz,1Hz表示1s内完成一次全振动,即 $1\text{Hz} = 1\text{次/s}$ 。此外还有kHz,MHz。 $1\text{kHz} = 10^3\text{Hz}$ , $1\text{MHz} = 10^6\text{Hz}$ 。

由周期和频率的定义可知,二者互为倒数:

$$T = \frac{1}{f} \quad (4-1-1)$$

#### (二) 机械波

##### 1. 机械波的产生与传播

振动在物体中或空间中的传播过程称为波动,简称波。波动一般可分为两大类:一类是:机械振动在弹性介质中的传播过程,称为机械波;另一类是:变化的电磁场在空间的传播过程,称为电磁波。超声波是一种机械波,而产生机械波必须具备两个条件:

- 1) 要有做机械振动的波源。
- 2) 要有能传播机械振动的弹性介质。

机械振动与机械波是互相关联的,振动是产生机械波的根源,机械波是振动状

态的传播。波动中介质各质点并不随波前进，而是按照与波源相同的振动频率在各自的平衡位置上振动，并将能量传递给周围的质点。因此，机械波的传播不是物质的传播，而是振动状态和能量的传播。

## 2. 机械波的主要物理量

(1) 周期  $T$  和频率  $f$  为波动经过的介质质点产生机械振动的周期和频率，可理解为机械波的周期和频率与振动的波源相同，与介质无关。波动频率也可定义为波动过程中，任一给定点在 1s 内所通过的完整波的个数，单位为 Hz。

(2) 波长  $\lambda$  波经过一个完整周期所传播的距离，称为波长，用  $\lambda$  表示。同一波线上相邻两振动相位相同的质点间的距离即为波长。波源或介质中任一质点完成一次全振动，波正好前进一个波长的距离。波长的常用单位为 m 或 mm。

(3) 波速  $c$  波动中，波在单位时间内所传播的距离称为波速，用  $c$  表示。常用单位为 m/s 或 km/s。

由波速、波长和频率的定义可得

$$c = \lambda f \text{ 或 } \lambda = c/f \quad (4-1-2)$$

由上式可知，波长与波速成正比，与频率成反比。当频率一定时，波速越高，波长就越长；当波速一定时，频率越低，波长就越长。

## 二、次声波、声波和超声波

次声波、声波和超声波都是在弹性介质中传播的机械波，人们能够引起听觉的机械波称为声波，其频率在 20 ~ 20000 Hz 之间，例如人们击鼓时产生的声波约为 50 Hz，钢琴的高音部产生的声波约为 4100 Hz，频率低于 20 Hz 的机械波称为次声波，频率高于 20000 Hz 的机械波称为超声波，次声波与超声波都是人耳不可闻的。

用于宏观缺陷检测的超声波，其频率通常为 0.5 ~ 25 MHz，对于钢等金属材料的检测常用频率为 0.5 ~ 10 MHz。

## 三、超声波的特性

超声波之所以被广泛运用于无损检测，是因为超声波具有以下特性：

1) 指向性好。超声波的能量能够集中地向一个方向发射的特性就是指向性，简称指向性。利用指向性有利于检测工件中的缺陷。

2) 穿透能力强。超声波的波长短、振速高、能量大，在大多数介质中传播时，传播距离大，在一些金属材料中的穿透能力可达数米，这正是其他检测手段所无法比拟的。

3) 在异质界面上产生反射和折射。当超声波从一种介质射入到另一种介质时，在两种介质的界面上，一部分或全部的能量会反射回前一种介质，利用这一反射特性，可以测定工件的厚度，以及对工件内部的缺陷进行检测。

当超声波倾斜入射两种不同介质的界面时，一部分能量穿过界面进入到第二种

介质,由于两种介质的声速不同,进入到第二介质的超声波,通常会改变传播方向而发生折射现象,斜射法超声检测的基础理论就基于这一折射现象。

4) 具有波形转换特性。当超声波传播到两种不同的介质时,在异质界面上,不仅会产生波形相同的反射波和折射波,还会因斜射而产生不同波形的反射波与折射波,在异质界面上超声波能由一种波形转变成另外一种波形的现象就是超声波的波形转换特性。超声波的波形转换特性是横波法及表面波法的理论基础。

## 四、波的类型

### (一) 按波形分类

根据波动传播时介质质点的振动方向相对于波的传播方向的不同关系,可将波分为多种波形,在超声检测中常用的波形有纵波、横波、表面波和板波等。

(1) 纵波  $L$  介质中质点的振动方向与波的传播方向互相平行的波称为纵波,用  $L$  表示,如图 4-1-1 所示。

凡是能够承受拉伸或压缩应力的介质都能传播纵波。固

体介质能承受拉伸或压缩应力,因此固体介质可以传播纵波。液体和气体虽然不能承受拉伸应力,但能够承受压应力产生的体积变化,因此液体和气体介质也可以传播纵波。钢中纵波声速一般为 5900m/s。纵波一般用于钢板、锻件检测。

(2) 横波  $S$  介质中质点的振动方向与波的传播方向互相垂直的波,称为横波,一般用  $S$  或  $T$  表示,如图 4-1-2 所示。

横波中介质质点受到交变的剪切应力作用并产生切变形变,故横波又称切变波或剪切波。只有固体

介质才能够承受剪切应力,液体和气体不能承受剪切应力,故横波只能在固体介质中传播,不能在液体和气体介质中传播。钢中横波声速一般为 3230m/s。横波一般应用于焊缝、钢管检测。

(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,也称瑞利波,常用  $R$  表示,如图 4-1-3 所示。

表面波在介质表面传播时,

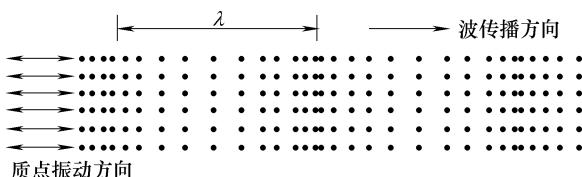


图 4-1-1 纵波

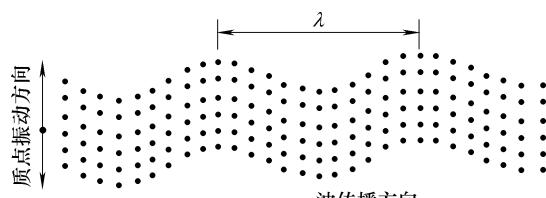


图 4-1-2 横波

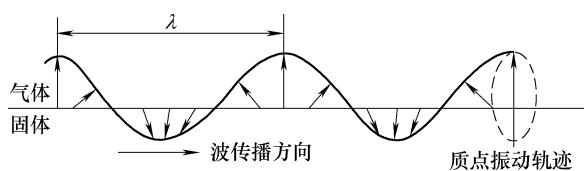


图 4-1-3 表面波

介质表面质点做椭圆运动，可视为纵向振动与横向振动的合成，即纵波与横波的合成。因此表面波与横波一样只能在固体介质中传播，而不能在液体介质中传播。

表面波的能量随深度增加而迅速减弱，当传播深度超过两倍波长时，质点的振幅就已经很小了，因此，一般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。表面波一般应用于钢管检测。

(4) 板波 在板厚与波长相当的薄板中传播的波，称为板波。根据质点的振动方向不同可将板波分为 SH 波和兰姆波。板波一般应用于薄板、薄壁钢管检测。

## (二) 按振动的持续时间分类

(1) 连续波 波源持续不断的振动所辐射的波称为连续波，超声波穿透法检测常采用连续波。

(2) 脉冲波 波源振动持续时间很短（通常是微秒数量级），间歇辐射的波称为脉冲波，目前超声检测中广泛采用的就是脉冲波。

## (三) 按波形（波的形状）分类

波线、波前和波阵面的概念：

(1) 波线 波动的传播方向。

(2) 波前 某一时刻振动传播到最前沿的各质点的轨迹。

(3) 波阵面 在同一时刻介质中振动的相位相同的所有轨迹。

根据波阵面的形状不同，可以把不同波源发出的波分为平面波、柱面波和球面波。

1) 平面波，波阵面为平面的波称为平面波，如图 4-1-4 所示，波幅不随距离变化，其波动方程式为

$$y = A \cos \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) \quad (4-1-3)$$

2) 球面波，波阵面为同心球面的波称为球面波，如图 4-1-5 所示，其波动方程式为

$$y = \frac{A}{x} \cos \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) \quad (4-1-4)$$

从式中看出，波幅与距离成反比。

3) 柱面波，波阵面为同轴柱面的波称为柱面波，如图 4-1-6 所示，其波动方程式为

$$y = \frac{A}{\sqrt{x}} \cos \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) \quad (4-1-5)$$

从式中看出，波幅与距离的平方根成反比。

## 五、声波的波动特性

### (一) 波的叠加

当几列波在同一介质中传播时，如果在空间某处相遇，则相遇处质点的振动是

各列波引起振动的合成，在任意时刻该质点的位移是各列波引起位移的矢量和。几列波相遇后仍保持自己原有的频率、波长、振动方向等特性并按原来的传播方向继续前进，好像在各自的途中没有遇到其他波一样，这就是波的叠加原理，又称波的独立性原理。

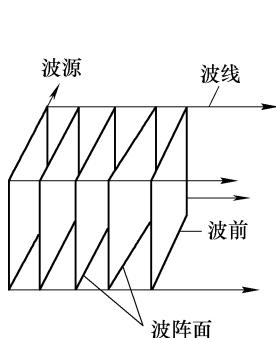


图 4-1-4 平面波

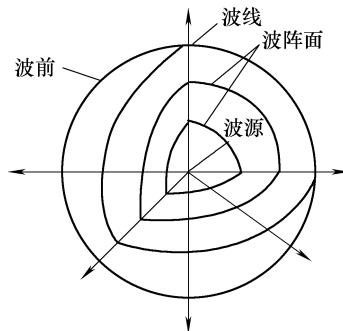


图 4-1-5 球面波

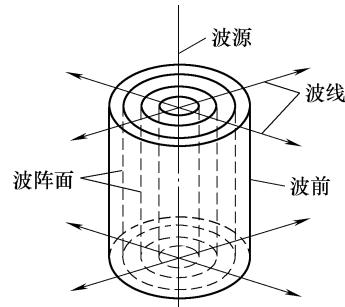


图 4-1-6 柱面波

波的叠加现象可以从许多事实观察到，如两个石子落水，可以看到两个以石子入水处为中心的圆形水波的叠加情况和相遇后的传播情况，又如乐队合奏或几个人谈话，人们可以分辨出各种乐器和各人的声音，这些都可以说明波传播的独立性。

## (二) 波的干涉

当两个频率相同、振动方向相同、相位相同或相位差恒定的波在介质中某点相遇后，会使一些点处的振动始终加强，而在另一些点处的振动始终减弱或完全抵消，这种现象称为波的干涉。这两束波称为相干波，波源称为相干波源。

如图 4-1-7 所示，点波源  $S_1$ 、 $S_2$  分别在  $M$  点引起的振动为

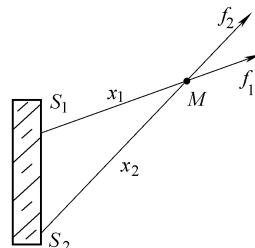


图 4-1-7 波的干涉

$$y_1 = A_1 \cos \omega \left( t - \frac{x_1}{c} \right)$$

$$y_2 = A_2 \cos \omega \left( t - \frac{x_2}{c} \right)$$

质点  $M$  的合振幅为

$$y = A \cos(\omega t + \varphi) \\ A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos \frac{2\pi}{\lambda} \delta} \quad (4-1-6)$$

式中  $A_1$ 、 $A_2$ —— $S_1$ 、 $S_2$  在  $M$  点引起的振幅；

$A$ —— $M$  点的合振幅；

$\lambda$ ——波长；

$\delta$ ——波程差， $\delta = x_2 - x_1$ 。

1) 当  $\delta = n\lambda$  ( $n$  为整数) 时， $A = A_1 + A_2$ 。这说明当两相干波的波程差等于波长的整数倍时，二者互相加强，合振幅达最大值。

2) 当  $\delta = (2n+1)\lambda/2$  ( $n$  为整数) 时， $A = |A_1 - A_2|$ 。这说明当两相干波的波程差等于半波长的奇数倍时，二者互相抵消，合振幅达最小值。若  $A_1 = A_2$ ，则  $A = 0$ ，即二者完全抵消。

波的叠加原理是波的干涉现象的基础，波的干涉是波动的重要特征。在超声波检测中，由于波的干涉，使超声波源附近出现声压极大极小值。

### (三) 惠更斯原理和波的衍射

#### 1. 惠更斯原理

如前所述，波动是振动状态的传播，如果介质是连续的，那么介质中任何质点的振动都将引起邻近质点的振动，邻近质点的振动又会引起较远质点的振动，因此波动中任何质点都可以看作是新的波源。据此惠更斯于 1690 年提出了著名的惠更斯原理：介质中波动传播到的各点，都可以看作是发射子波的波源，在其后任意时刻这些子波的包迹就决定新的波阵面。

#### 2. 波的衍射

波在传播过程中遇到与波长相当的障碍物时，能绕过障碍物边缘改变方向继续前进的现象，称为波的衍射或波的绕射。

如图 4-1-8 所示，超声波（波长为  $\lambda$ ）在介质中传播时，遇到缺陷 AB（其尺寸为  $D$ ），据惠更斯原理，缺陷边缘 A、B 可以看作是发射子波的波源，使波的传播改变，从而使缺陷背后的声影缩小，反射波降低。

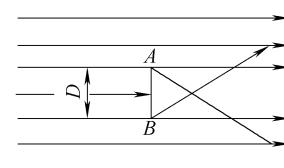


图 4-1-8 波的衍射

## 六、超声波的传播速度

声波在介质中传播的速度称为波速，又称声速。

超声波波形不同时，介质弹性变形形式不同，声速也不同。同一波形的超声波在介质中的传播速度还与介质的弹性模量和密度有关。对特定的介质，弹性模量和密度为常数，因此声速也为常数。不同的介质，有不同的声速。超声波在介质中的传播速度是表征介质声学特性的重要参数。

#### (一) 固体介质中的声速

##### 1) 无限大固体介质的纵波波速为

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (4-1-7)$$

式中  $c_L$ ——纵波波速；

$E$ ——介质的杨氏弹性模量；

$\sigma$ ——介质的泊松比。

2) 无限大固体介质的横波波速为

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1}{2(1+\sigma)}} \quad (4-1-8)$$

式中  $c_s$ ——横波波速；

$G$ ——介质的剪切弹性模量；

$\rho$ ——介质密度。

3) 无限大固体介质中的表面波波速为

$$c_R = \frac{0.87 + 1.12\sigma}{1+\sigma} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{1}{2(1+\sigma)} \quad (4-1-9)$$

固体介质不仅能传播纵波，而且还可以传播横波和表面波等，但它们的声速是不同的，但总体来说有如下两点：

① 固体介质中的声速与介质的密度和特性模量等有关，不同的介质，声速不同：介质的弹性模量越大，密度越小，则声速越大。

② 声速还与波的类型有关，在同一固体介质中，纵波，横波和表面波的声速各不相同，并且相互之间有着如下关系

$$c_L > c_s > c_R$$

例如钢中声速  $c_L = 5900 \text{ m/s} > c_s = 3230 \text{ m/s} > c_R = 3000 \text{ m/s}$ 。

### (二) 固体介质中声速与温度、应力、均匀性的关系

1) 一般固体中的声速随介质温度的升高而降低。

2) 固体介质的应力状况对声速有一定的影响，当应力方向与声波传播的方向一致时，若应力为压应力，则应力增加，声速加快；反之，若应力为拉应力，则声速减慢。

3) 固体材料中组织的均匀性同样对声速产生影响，晶粒细则声速快，晶粒粗则声速慢。

### (三) 液体介质中声速与温度的关系

对液体介质来说，绝大多数液体介质的声速随温度的升高而变小。唯有水是个例外，水温在 74℃ 左右时声速最大，当水温低于 74℃ 时，声速随温度升高而增大；当水温高于 74℃ 时，声速随温度的升高而变小。水中声速与温度的关系如下

$$c_L = 1557 - 0.0245(74 - t)^2 \quad (4-1-10)$$

式中  $t$ ——水温 (℃)。

## 七、超声场的特征值

充满超声波的空间或产生振动所波及的部分介质，称为超声场。超声场具有一定的空间大小及形状，只有当缺陷位于超声场内时，才有可能被发现。描述超声场

的特征值主要有声压、声强和声阻抗。

### 1. 声压 $p$

超声场中某一点在某一时刻所具有的压强  $p_1$  与没有超声场存在时的静态压强  $p_0$  之差, 称为该点的声压, 用  $p$  表示

$$p = p_1 - p_0 \quad (4-1-11)$$

声压单位为 Pa 或  $\mu\text{Pa}$ , 换算关系如下

$$1\text{ Pa} = 10^6 \mu\text{Pa}$$

超声检测仪器显示的信号幅值的本质就是声压  $p$ , 示波屏上的波高与声压成正比。在超声检测中就缺陷而论, 声压值反映缺陷的大小。

### 2. 声阻抗 $Z$

超声场中任一点的声压与该处质点速度之比称为声阻抗, 常用  $Z$  表示。单位为  $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$  或  $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$

$$Z = p/v = \rho c \mu / \mu = \rho c \quad (4-1-12)$$

式中  $\rho$ ——材料密度;

$c$ ——某波形的声速。

由式 (4-1-12) 可知, 声阻抗的大小等于介质的密度与波速的乘积。由  $v = p/Z$  不难看出, 在同一声压下, 声阻抗  $Z$  增加则质点的振动速度  $v$  就下降。因此声阻抗  $Z$  可以理解为对介质振动的阻碍作用。这有点像电学中的欧姆定律, 电压一定, 电阻增加, 电流减小。

声阻抗是表征介质声学特性的重要物理量。超声波在两种介质组成的界面上的反射和透射情况与两种介质的声阻抗密切相关。

### 3. 声强 $I$

单位时间内垂直通过单位面积的声能称为声强, 常用  $I$  表示。单位是  $\text{W}/\text{cm}^2$  或  $\text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$

$$I = \frac{1}{2} p^2 / Z = \frac{1}{2} p^2 / \rho c \quad (4-1-13)$$

从式 (4-1-13) 可以看出, 在同一介质中, 声强与声压的平方成正比, 与超声波频率的平方成正比。

### 4. 分贝 dB

在实际的生产与科学实验中, 所遇到的声强数量级往往相差很大, 如引起听觉的声强范围为  $10^{-16} \sim 10^{-4}$  ( $\text{W}/\text{cm}^2$ ), 最大值与最小值相差 12 个数量级, 显然用绝对值来度量是很不方便的, 但如果对其比值 (相对量) 取对数来比较计算则可大大简化运算。分贝与奈培就是两个同量纲的量之比取对数后的单位。

通常规定引起听觉的最弱声强为  $I_1 = 10^{-16} \text{ W}/\text{cm}^2$  作为声强的标准, 另一声强  $I_2$  与标准声强  $I_1$  之比的常用对数称为声强级, 单位为贝 (尔) (B)。

$$\Delta = \lg(I_2/I_1) \quad (\text{B})$$

在实际应用中贝尔太大，故常取其1/10即dB来做单位。

因声强与声压的平方成正比，因此公式可写为

$$\Delta = 10 \lg(I_2/I_1) = 10 \lg(p_2^2/p_1^2) = 20 \lg(p_2/p_1) \text{ (dB)} \quad (4-1-14)$$

在超声检测中，当超声检测仪的垂直线性较好时，仪器示波屏上的波高与声压成正比。

## 八、超声波垂直入射到界面时的反射和透射

超声波从一种介质传播到另一种介质时，在两种介质的分界面上，一部分能量反射回原介质内，称为反射波；另一部分能量透过界面在另一种介质内传播，称为透射波。在界面上声能（声压、声强）的分配和传播方向的变化都遵循一定的规律。

### 1. 单一平界面的反射和透射

当超声波垂直入射到光滑平界面时，将在第一介质中产生一个与入射方向相反的反射波，在第二介质中产生一个与入射波相同的透射波，如图4-1-9所示。反射波与入射波的声压（或声强）按一定规律分配的。这个分配比例由声压（或声强）的反射率和透射率来表示。

当超声波垂直入射到异质（ $Z_1 \neq Z_2$ ）大平界面时，则在第一介质（声阻抗 $Z_1$ ）中产生一个与入射波相反的反射波，在第二介质（声阻抗 $Z_2$ ）中产生一个与入射方向相同的透射波。

设入射波声压为 $p_0$ （声强为 $I_0$ ），反射波的声压 $p_r$ （声强为 $I_r$ ）透射波的声压为 $p_t$ （声强为 $I_t$ ）。

界面上反射波声压为 $p_r$ 与入射波声压 $p_0$ 之比称为界面的声压反射率，用 $r$ 表示，即

$$r = p_r/p_0$$

界面上透射波声压为 $p_t$ 与入射波声压 $p_0$ 之比称为界面的声压透射率，用 $t$ 表示，即

$$t = p_t/p_0$$

在界面两侧的声波，必须符合下列两个条件：

- 1) 界面两侧的总声压相等，即 $p_0 + p_r = p_t$ 。
- 2) 界面两侧质点振动速度幅值相等，即 $p_0 - p_r/Z_1 = p_t/Z_2$ 。

由上述两个边界条件和声压反射率和透射率定义得

$$\begin{cases} 1 + r = t \\ (1 - r)/Z_1 = t/Z_2 \end{cases}$$

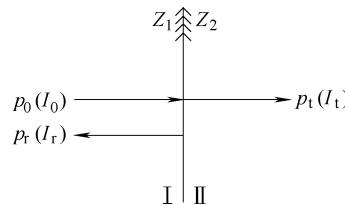


图4-1-9 垂直入射的反射和透射

解上述联立方程得声压反射率  $r$  和透射率  $t$  分别为

$$r = \frac{p_r}{p_0} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4-1-15)$$

$$t = \frac{p_t}{p_0} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (4-1-16)$$

$$R = \frac{I_r}{I_0} = \frac{p_r^2}{p_0^2} = r^2 = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (4-1-17)$$

$$T = \frac{I_t}{I_0} = \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \frac{p_t^2}{p_0^2} = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (4-1-18)$$

有以上公式可推导出  $T + R = 1 \quad t - r = 1 \quad (4-1-19)$

声能的变化与两种介质的声阻抗密切相关，设波从介质1（声阻抗  $Z_1$ ）入射到介质2（声阻抗  $Z_2$ ），有以下几种情况：

1) 若  $Z_1 \approx Z_2$  时，即界面两侧介质的声阻抗近似相等，如普通碳钢焊缝的母材与填充金属之间的声阻抗差很小，一般为1%左右。设  $Z_1 = 1$ ,  $Z_2 = 0.99$ , 则

$$r = \frac{p_r}{p_0} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{0.99 - 1}{0.99 + 1} = -0.005 \approx 0$$

$$t = \frac{p_t}{p_0} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{2 \times 0.99}{0.99 + 1} \approx 0.995 \approx 1$$

$$R = r^2 = (-0.005)^2 = 2.5 \times 10^{-5} \approx 0$$

$$T = 1 - R = 0.999975 \approx 1$$

$r \approx 0$ ,  $t \approx 1$ , 这时超声波几乎没有反射，全透射。因此在焊缝检测中，若母材与填充金属结合面没有任何缺陷，两者间是不会超声界面回波的。

2) 若  $Z_1 > Z_2$  时，则声波在界面上几乎全反射而透射极少。现以超声波纵波从钢射向水时为例。此时:  $Z_1 = 45 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$  (钢),  $Z_2 = 1.5 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$  (水), 则

$$r = \frac{p_r}{p_0} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{1.5 - 45}{1.5 + 45} = -0.935$$

$$t = \frac{p_t}{p_0} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{2 \times 1.5}{1.5 + 45} = 0.065$$

$$R = r^2 = (-0.935)^2 = 0.875$$

$$T = 1 - R = 1 - 0.875 = 0.125$$

用百分比表示，反射波声压占入射波声压的-93.5%，透射波声压仅占入射波声压的6.5%。负号表示反射波相位与入射波相位相反。

3) 若  $Z_2 > Z_1$  时，以超声波纵波从水射向钢时为例。则

$$r = \frac{p_r}{p_0} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{45 - 1.5}{45 + 1.5} = 0.935$$

$$t = \frac{p_t}{p_0} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{2 \times 45}{45 + 1.5} = 1.935$$

$$R = r^2 = 0.935^2 = 0.875$$

$$T = 1 - R = 1 - 0.875 = 0.125$$

$r$  为正值, 说明入射波与反射波相位相同。

4) 当  $Z_1 \gg Z_2$  时, (如钢/空气界面),  $Z_1 = 4.5 \times 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{S}$ ,

$$Z_2 = 0.00004 \times 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{S}, \text{ 则}$$

$$r = \frac{p_r}{p_0} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{0.00004 - 4.5}{0.00004 + 4.5} \approx -1$$

$$t = \frac{p_t}{p_0} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{2 \times 0.00004}{0.00004 + 4.5} \approx 0$$

$$R = r^2 = (-1)^2 \approx 1$$

$$T = 1 - R = 1 - 1 = 0$$

计算表明, 当入射波介质声阻抗远大于透射波介质声阻抗时, 声压反射率趋于 -1, 透射率趋于 0, 即声压几乎全反射, 无透射。检测中, 探头和工件间如不施加耦合剂, 则形成固/气界面, 超声波无法进入工件。

## 2. 薄层界面的反射和透射

此情况主要对探头保护膜设计具有指导意义。

当超声波依次从三种介质  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$  (如晶片—保护膜—工件) 中穿过, 则当薄层厚度等于半波长的整数倍时, 通过薄层的声强透射与薄层的性质无关, 即好像不存在薄层一样; 当薄层厚度等于四分之一波长的奇数倍且薄层声阻抗为其两侧介质声阻抗几何平均值时, 即  $Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3}$ , 超声波全透射。

## 3. 声压往复透过率

实际检测中, 探头发声波经过工件表面进入工件, 遇反射体 (例如底面) 被反射回来又经过工件表面到达探头。声波往复通过工件界面后的声压与探头发声压之比, 称为声压往复透过率。如图 4-1-10 所示。

$$T_{\text{往}} = \frac{p_a}{p_0} = \frac{p_t}{p_0} \frac{p_a}{p_t} = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (4-1-20)$$

声压往复透射率与界面两侧介质的声阻抗有关, 与从何种介质入射到界面无关。界面两侧介质的声阻抗相差越小, 声压往复透射率就越高, 反之就越低。

往复透射率高低直接影响检测灵敏度高低, 往复透射率高, 检测灵敏度高。反之, 检测灵敏度低。

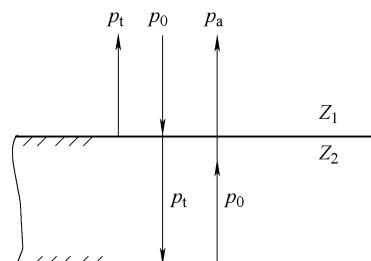


图 4-1-10 声压往复透射率

## 九、超声波倾斜入射到界面时的反射和折射

### (一) 波型转换与反射、折射定律

如图 4-1-11 所示当超声波倾斜入射到异质界面时, 除超声同种类型的反射和折射波外, 还会产生不同类型的反射和折射波, 这种现象称为波型转换。

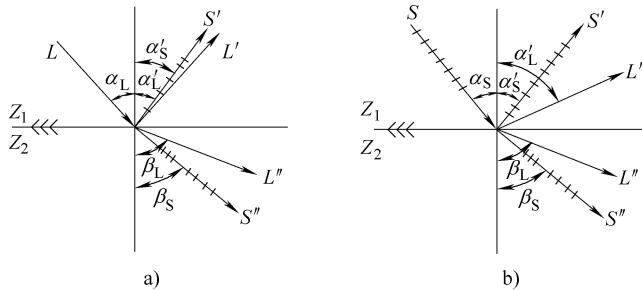


图 4-1-11 声波倾斜入射  
a) 纵波入射 b) 横波入射

#### 1. 纵波斜入射

当纵波  $L$  倾斜入射到固/固界面时, 除产生反射纵波  $L'$  和折射纵波  $L''$  外, 还会产生反射横波  $S'$  和折射横波  $S''$ , 各种反射波和折射波的方向符合反射、折射定律:

$$\frac{\sin\alpha_L}{c_{L1}} = \frac{\sin\alpha'_L}{c_{L1}} = \frac{\sin\alpha'_S}{c_{S1}} = \frac{\sin\beta_L}{c_{L2}} = \frac{\sin\beta_S}{c_{S2}} \quad (4-1-21)$$

式中  $c_{L1}$ 、 $c_{S1}$ ——第一介质中的纵波、横波声速;

$c_{L2}$ 、 $c_{S2}$ ——第二介质中的纵波、横波声速;

$\alpha_L$ 、 $\alpha'_L$ ——纵波入射角、反射角;

$\beta_L$ 、 $\beta_S$ ——纵波、横波折射角;

$\alpha'_S$ ——横波反射角。

由于在同一介质中纵波波速不变, 因此  $\alpha'_L = \alpha_L$ 。又由于在同一介质中纵波波速大于横波波速, 因此  $\alpha'_L > \alpha'_S$ ,  $\beta_L > \beta_S$  (图 4-1-12)。

(1) 第一临界角  $\alpha_I$  由式  $\frac{\sin\alpha_L}{c_{L1}} = \frac{\sin\beta_L}{c_{L2}}$  可以看出, 当  $c_{L2} > c_{L1}$  时,  $\beta_L > \alpha_L$ , 随着  $\alpha_L$  增加,  $\beta_L$  也增加, 当  $\alpha_L$  增加到一定程度时,  $\beta_L = 90^\circ$ , 这时所对应的纵波入射角称为第一临界角, 用  $\alpha_I$  表示 (图 4-1-12a)。

$$\alpha_I = \arcsin \frac{c_{L1}}{c_{L2}} \quad (4-1-22)$$

(2) 第二临界角  $\alpha_{II}$  由式  $\frac{\sin\alpha_L}{c_{L1}} = \frac{\sin\beta_S}{c_{S2}}$  可以看出, 当  $c_{S2} > c_{L1}$  时  $\beta_S > \alpha_L$ , 随着  $\alpha_L$  增加,  $\beta_S$  也增加, 当  $\alpha_L$  增加到一定程度时,  $\beta_S = 90^\circ$ , 这时所对应的纵波入射角

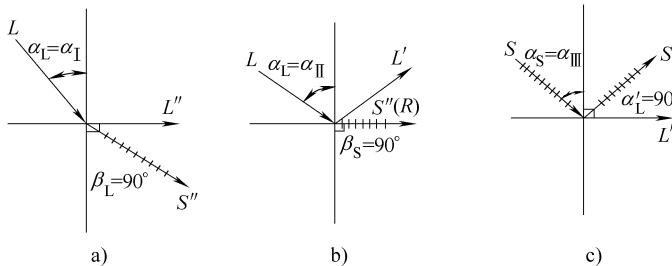


图 4-1-12 临界角

a)  $\alpha_I$  b)  $\alpha_{II}$  c)  $\alpha_{III}$ 

称为第二临界角, 用  $\alpha_{II}$  表示 (图 4-1-12b)。

$$\alpha_{II} = \arcsin \frac{c_{L1}}{c_{S2}} \quad (4-1-23)$$

由  $\alpha_I$  和  $\alpha_{II}$  的定义可知:

- 1) 当  $\alpha_L < \alpha_I$  时, 第二介质中既有折射纵波  $L''$  又有折射横波  $S''$ 。
- 2) 当  $\alpha_L = \alpha_I \sim \alpha_{II}$  时, 第二介质中只有折射横波  $S''$ , 没有折射纵波  $L''$ , 这就是常用横波探头的制作和横波检测的原理。
- 3) 当  $\alpha_L \geq \alpha_{II}$  时, 第二介质中既无折射纵波  $L''$ , 又无折射横波  $S''$ 。这时在其介质表面存在表面波  $R$ , 这就是常用表面波探头的制作原理。

例如: 用纵波声速  $c_L = 2730 \text{ m/s}$  的有机玻璃制作横波斜探头楔块, 用以检测钢焊缝 ( $c_L = 5900 \text{ m/s}$ ,  $c_S = 3230 \text{ m/s}$ ), 试计算第一、第二临界角各为多少度。

$$\alpha_I = \arcsin \frac{c_{L1}}{c_{L2}} = \arcsin \frac{2730}{5900} = 27.6^\circ$$

$$\alpha_{II} = \arcsin \frac{c_{L1}}{c_{S2}} = \arcsin \frac{2730}{3230} = 57.7^\circ$$

由此可见, 有机玻璃横波斜探头楔块角度  $\alpha_L = 27.6^\circ \sim 57.7^\circ$ , 有机玻璃表面波探头楔块的角度  $\alpha_L \geq 57.7^\circ$ 。

## 2. 横波斜入射

当横波倾斜入射到界面时, 头一回超声波型转换, 各反射波、折射波的方向同样符合反射、折射定律:

$$\frac{\sin \alpha_S}{c_{S1}} = \frac{\sin \alpha'_S}{c_{S1}} = \frac{\sin \alpha'_L}{c_{L1}} = \frac{\sin \beta_L}{c_{L2}} = \frac{\sin \beta_S}{c_{S2}} \quad (4-1-24)$$

不难看出, 横波倾斜入射时, 同样存在第一、第二临界角, 由于在实际检测中无多大实际意义, 故只讨论第三临界角  $\alpha_{III}$ 。

由式 (4-1-24) 得  $\frac{\sin \alpha_S}{c_{S1}} = \frac{\sin \alpha'_L}{c_{L1}}$ , 因为  $c_{L1} > c_{S1}$ , 所以  $\alpha'_L > \alpha_S$ , 随  $\alpha_S$  增加,  $\alpha'_L$  也增加, 当  $\alpha_S$  增加到一定程度时,  $\alpha'_L = 90^\circ$ 。这时所对应的横波入射角称为第三临

界角, 用  $\alpha_{\text{III}}$  表示, 如图 4-1-12c 所示。

$$\alpha_{\text{III}} = \arcsin \frac{c_{\text{SI}}}{c_{\text{LI}}} \quad (4-1-25)$$

当  $\alpha_s \geq \alpha_{\text{III}}$  时, 在第一介质中只有反射横波, 没有反射纵波, 即横波全反射。

对于钢  $c_{\text{LI}} = 5900 \text{ m/s}$ ,  $c_{\text{SI}} = 3230 \text{ m/s}$

$$\alpha_{\text{III}} = \arcsin \frac{c_{\text{SI}}}{c_{\text{LI}}} = \arcsin \frac{3230}{5900} = 33.2^\circ$$

当  $\alpha_s \geq 33.2^\circ$  时, 钢中横波全反射。

## (二) 声压反射率

### 1. 纵波倾斜入射到钢/空气界面的反射

如图 4-1-13 表示的是纵波斜入射到钢/空气时纵波声压反射率与横波声压反射率随入射角的变化。随着纵波入射角从  $0^\circ$  逐渐增加, 纵波声压反射率从 1.0 逐渐下降; 而在  $60^\circ \sim 70^\circ$  之间纵波声压反射率达到极小值; 纵波入射角继续增大, 纵波声压反射率又随之增大直到 1.0。当入射角在  $60^\circ$  左右时产生一个较强的反射横波。

### 2. 横波倾斜入射到钢/空气界面的反射

图 4-1-14 表示的是横波斜入射到钢/空气时的情况。随着横波入射角从  $0^\circ$  逐渐增加, 横波声压反射率从 1.0 逐渐下降; 而在  $20^\circ \sim 30^\circ$  之间横波声压反射率达到极小值; 横波入射角继续增大, 横波声压反射率继续随之增大, 当横波反射角  $\alpha_s \geq 33.2^\circ$  时, 横波声压反射率等于 1.0。

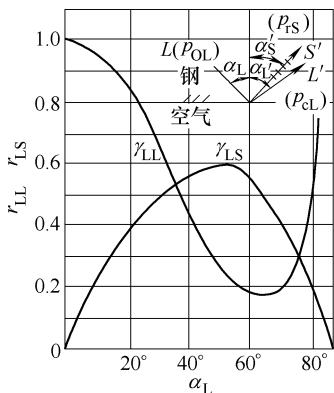


图 4-1-13 纵波  $L$  斜入射到钢/空气界面

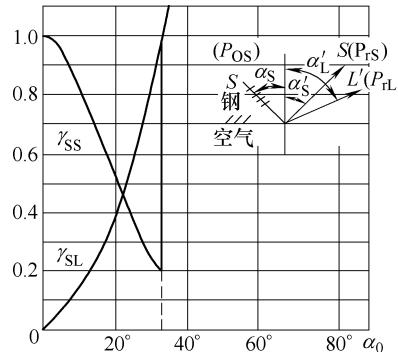


图 4-1-14 横波  $S$  斜入射到钢/空气界面

## (三) 声压往复透射率

超声检测中, 常常采用反射法, 超声波往复透过同一探侧面, 因此声压往复透射率更具有实际意义。

超声波倾斜入射, 折射波全反射, 探头接收到的回波声压  $p_a$  与入射波声压  $p_0$  之比称为声压往复透射率, 常用  $T$  表示,  $T = p_a / p_0$ 。如图 4-1-15 所示。

图 4-1-16 所示为纵波斜入射至水/钢界面时的声压往复透射率与入射角的关系图。图上表明,当纵波入射角小于  $14.5^\circ$  (第一临界角) 时, 折射纵波往复透射率不超过 13%, 折射横波往复透射率小于 6%。当纵波入射角为  $14.5^\circ \sim 27.27^\circ$  (第二临界角) 之间时, 钢中没有折射纵波, 只有折射横波, 其折射横波往复透射率最高不到 20%。

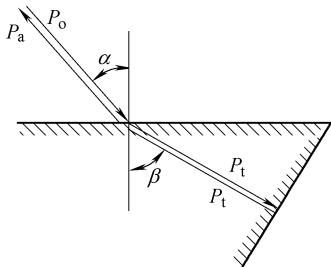


图 4-1-15 斜入射声压往复透射率

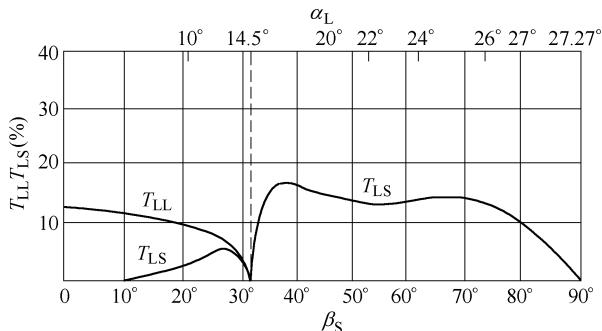


图 4-1-16 纵波斜入射至水/钢界面时的声压往复透射率与入射角关系图

图 4-1-17 为纵波斜入射至有机玻璃/钢界面时的声压往复透射率与入射角的关系图。图中表明,当纵波入射角小于  $27.6^\circ$  (第一临界角) 时, 折射纵波往复透射率小于 25%, 折射横波往复透射率小于 10%。当纵波入射角为  $27.6^\circ \sim 57.7^\circ$  (第二临界角) 之间时, 钢中没有折射纵波, 只有折射横波, 其折射横波往复透射率最高不超过 30%, 最高往复透射率时所对应的纵波入射角约为  $30^\circ$ , 横波折射角约为  $37^\circ$ 。从图上还可看出, 折射角在  $35^\circ \sim 50^\circ$  之间往复透射率比较高, 更大的折射角往复透射率相对较低。

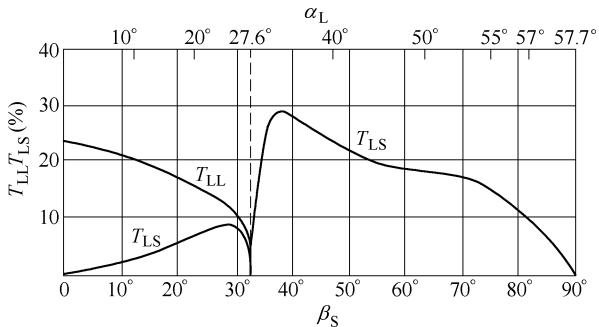


图 4-1-17 纵波斜入射至有机玻璃/钢界面时的声压往复透射率与入射角的关系图

#### (四) 端角反射

超声波在两个平面构成的直角内的反射称为端角反射, 如图 4-1-18 所示。

在端角反射中超声波经历了两次反射, 如不考虑波型转换, 第二次反射回波与入射波互相平行, 回波声压 \$p\_a\$ 与入射波声压 \$p\_0\$ 之比称为端角反射率, 用 \$T\_{\text{端}}\$ 表示, 即 \$T\_{\text{端}} = p\_a/p\_0\$。

图 4-1-19 所示为钢/空气界面上钢中的端角反射率与入射角的关系图。图 4-1-19a

是纵波入射端角的情况，端角反射率大都很低，这是因为纵波在端角的两次反射中分离出较强的横波。

图 4-1-19b 是横波入射端角的情况，入射角等于  $30^\circ$  或  $60^\circ$  附近时，端角反射率最低。入射角在  $35^\circ \sim 55^\circ$  之间时，端角反射率达 100%。也就是说，横波斜探头的折射角  $\beta_s$  为  $35^\circ \sim 55^\circ$  ( $K = \tan \beta_s = 0.7 \sim 1.43$ ) 之间时，检测类似端角的缺陷（例如焊缝中的未焊透）灵敏度较高， $\beta_s > 55^\circ$  ( $K > 1.5$ ) 灵敏度较低。

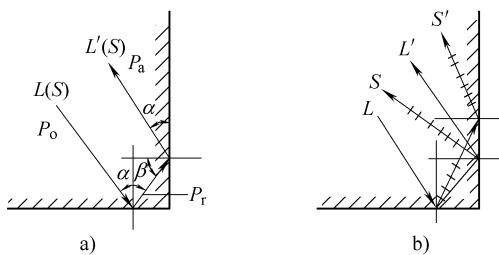


图 4-1-18 端角反射

a) 不考虑波型转换 b) 考虑波型转换

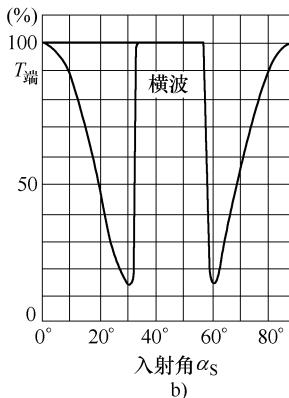
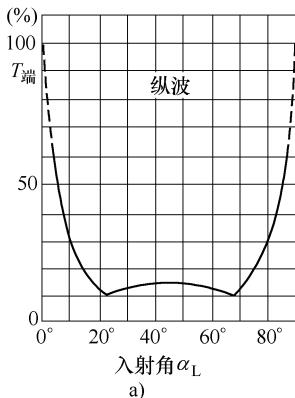


图 4-1-19 钢/空气界面上钢中的端角反射率入射角的关系图

## 十、超声波的聚焦和发散

### (一) 平面波在曲面上的反射和折射

#### 1. 平面波在曲面上的反射

当平面波入射到曲界面上时，其反射波将发生聚焦或发散，如图 4-1-20 所示。反射波的聚焦或发散与曲面的凹凸（从入射方向看）有关。凹曲面的反射波聚焦，凸曲面的反射波发散。

1) 平面波入射到球面时，其反射波可视为从焦点发出的球面

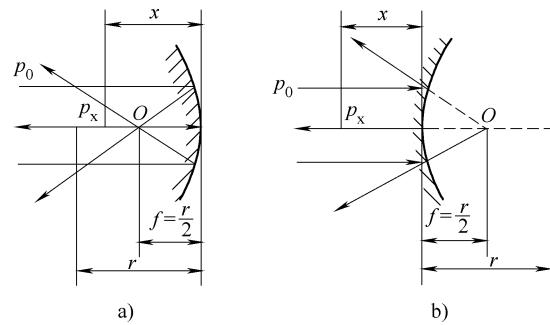


图 4-1-20 平面波在曲界面的反射

a) 聚焦 b) 发散

波。在曲面轴线上距曲面顶点  $x$  处的反射波声压  $p_x$  为

$$p_x = p_0 \left| \frac{f}{x \pm f} \right| \quad (4-1-26)$$

式中  $f$ ——焦距,  $f=r/2$ ,  $r$  为曲率半径;

$x$ ——轴线上某点至顶点的距离;

$p_0$ ——顶点处入射波声压。

“ $\pm$ ”——“ $+$ ”用于发散, “ $-$ ”用于聚焦。

2) 平面波入射到柱面时, 其反射波可视为从焦轴发出的柱面波。在曲面轴线上距曲面顶点  $x$  处的反射波声压  $p_x$  为

$$p_x = p_0 \sqrt{\left| \frac{f}{x \pm f} \right|} \quad (4-1-27)$$

## 2. 平面波在曲面上的折射

平面波入射到曲界面上时, 其折射波也将发生聚焦或发散, 如图 4-1-21 所示。这时折射波的聚焦或发散不仅与曲面的凹凸有关, 而且与界面两侧介质的波速有关。对于凹透镜, 当  $c_1 < c_2$  时聚焦, 当  $c_1 > c_2$  时发散; 对于凸透镜, 当  $c_1 > c_2$  时聚焦, 当  $c_1 < c_2$  时发散。

1) 平面波入射至球面透镜时, 其折射波可视为从焦点发出的球面波, 曲面轴线上距曲面顶点  $x$  处的折射波声压  $p_x$  为

$$p_x = tp_0 \left| \frac{f}{x \pm f} \right| \quad (4-1-28)$$

式中  $t$ ——声压透射率;

$f$ ——焦距,  $f=r/(1-c_2/c_1)$ ,  $r$  为曲率半径。

“ $\pm$ ”——“ $+$ ”用于发散, “ $-$ ”用于聚焦。

2) 平面波入射到柱面透镜, 其折射波可视为从焦轴发出的柱面波。轴线上点  $x$  处的折射波声压  $p_x$  为

$$p_x = tp_0 \sqrt{\left| \frac{f}{x \pm f} \right|} \quad (4-1-29)$$

实际检测用的水浸聚焦探头就是根据平面波入射到  $c_1 > c_2$  的凸透镜上, 折射波发生聚焦的特点来设计的, 如图 4-1-21b 所示, 这样可以提高检测灵敏度。

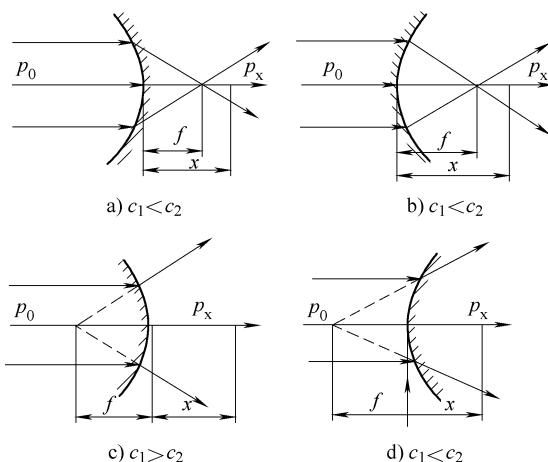


图 4-1-21 平面波在曲界面上的透射

## (二) 球面波在曲面上的反射和透射

### 1. 球面波在曲面上的反射

球面波入射到曲界面上，其反射波将发生聚焦或发散，如图 4-1-22 所示。凹曲面的反射波聚焦，凸曲面的反射波发散。

1) 球面波在球面上的反射波，可视为从像点发出的球面波。轴线上距顶点为  $x$  处的反射波声压  $p_x$  为

$$p_x = \frac{p_1}{a} \left| \frac{f}{x \pm f(1 + x/a)} \right| \quad (4-1-30)$$

式中  $p_1/a$ ——球面顶点处入射波声压；

$f$ ——焦距， $f = r/2$ ；

$a$ ——球面顶点至波源的距离。

“ $\pm$ ”——“ $+$ ”用于发散，“ $-$ ”用于聚焦。

2) 球面波在柱面上的反射波，既不是单纯的球面波，也不是单纯的柱面波，而是近似为两个不同的柱面波叠加。轴线上距顶点为  $x$  处的反射波声压为

$$p_x = \frac{p_1}{a} \sqrt{\left| \frac{f}{(1 + x/a)[x \pm f(1 + x/a)]} \right|} \quad (4-1-31)$$

3) 球面波在实心圆柱体中的反射，采用超声波径向检测大型实心圆柱形锻件时，如图 4-1-23 所示，类似于球面波在凹柱面上的反射，反射波聚焦于像点。以  $x = a$ ,  $f = r/2$  代入 (4-1-29) 式取“ $-$ ”得到圆柱面上入射点处的反射回波声压：

$$p_{\text{柱}} = \frac{p_1}{2a} = p_{\text{平}}$$

这说明实心圆柱体曲底面反射与同距离平底面反射，二者在入射点处的反射回波声压理论值是相同的。实际上，由于柱面耦合不良（接触面小）其回波一般都低于平底面回波。

4) 球面波在空心圆柱体中的反射，采用超声波径向检测大型空心圆柱形锻件时，如图 4-1-24 所示，类似于球面波在凸柱面上的反射，反射波发散。以  $x = a$ ,  $f = a/2$  代入式 (4-1-29) 取“ $+$ ”得到圆柱面上入射点处的反射回波声压：

$$p_{\text{柱}} = \frac{p_1}{2a} \sqrt{\frac{r}{a+r}} = \frac{p_1}{2a} \sqrt{\frac{r}{R}} < \frac{p_1}{2a}$$

这说明入射点处空心圆柱体的反射声压总是低于同距离的平底面的反射声压。

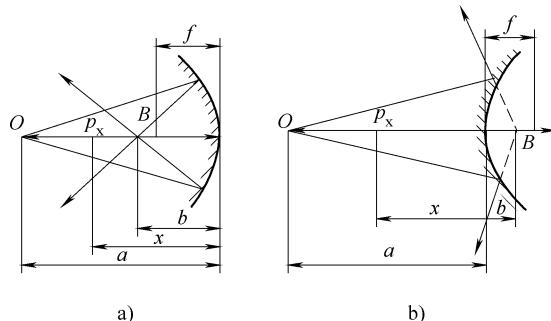


图 4-1-22 球面波在曲面上的反射  
a) 聚焦 b) 发散

这是由于凸曲面反射波发散的结果。另外还可看出，当圆柱体外径（ $2R$ ）一定，内孔径直径（ $2r$ ）增加时，其反射回波升高。

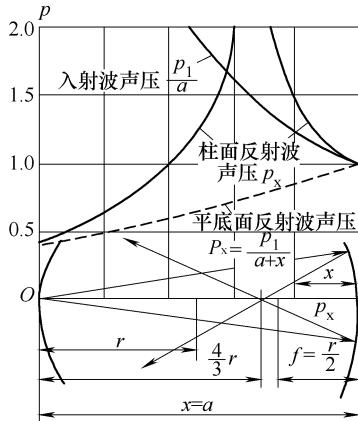


图 4-1-23 实心圆柱体反射波声压图

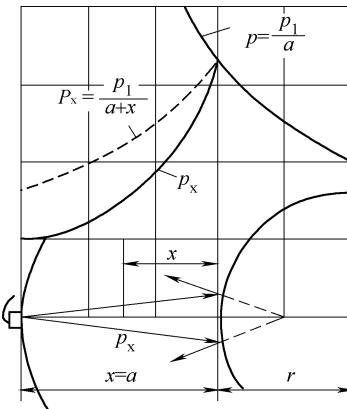


图 4-1-24 空心圆柱体反射波声压

## 2. 球面波在曲面上的折射

球面波入射到曲界面上，当其发生透射时，其折射波同样会发生聚焦和发散，如图 4-1-25。轴线上距顶点  $x$  处的折射波声压为

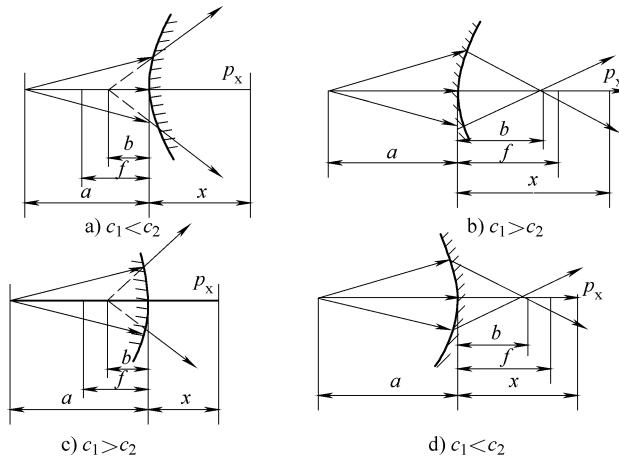


图 4-1-25 球面波在曲面上的折射

球形界面

$$p_x = t \frac{p_1}{a} \frac{f}{[x \pm f(1 + xc_2/ac_1)]} \quad (4-1-32)$$

柱形界面

$$p_x = t \frac{p_1}{a} \sqrt{\frac{f}{(1 + xc_2/ac_1)[x \pm f(1 + xc_2/ac_1)]}} \quad (4-1-33)$$

式中  $c_2/c_1$ ——透射介质与入射介质波速之比。

## 十一、超声波的衰减

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

### (一) 衰减的原因

超声波衰减大致有三个原因：波束扩散、晶粒散射及介质吸收。

(1) 扩散衰减 超声波在传播过程中，由于波束的扩散，使超声波的能量随距离的增加而逐渐减弱的现象称为扩散衰减。超声波的扩散衰减仅取决于波阵面的形状，与介质的性质无关，平面波的波阵面为平面，波束不扩散，不存在扩散衰减。柱面波波阵面为同轴圆柱面。波束向四周扩散，垂直扩散衰减，声压与距离的平方根成反比。球面波波阵面为同心球面，波束向四面八方扩散，垂直扩散衰减，声压与距离成反比。

(2) 散射衰减 超声波在介质中传播时，遇到声阻抗不同的界面产生散乱反射引起衰减的现象，称为散射衰减。散射衰减与材质的晶粒密切相关，当材质晶粒粗大时，散射衰减严重，被散射的超声波沿着复杂的路径传播到探头，在屏上引起林状回波（又叫草波），使信噪比下降，严重时噪声会淹没缺陷波。

(3) 吸收衰减 超声波在介质中传播时，由于介质中质点间内摩擦（即黏滞性）和热传导引起超声波的衰减，称为吸收衰减或黏滞衰减。

衰减系数值考虑了介质的散射衰减和吸收衰减，衰减系数与超声波的频率、介质的晶粒尺寸、介质的各向异性系数等有关。超声波的频率越高、介质的晶粒尺寸越大、介质的各向异性倾向越大，一般情况下衰减系数也越大。

### (二) 衰减系数的实用测量方法

#### 1) 对于薄工件

$$\alpha = \frac{20 \lg(B_m/B_n) - (m-n)}{2(n-m)T} \quad (4-1-34)$$

式中  $\alpha$ ——材料的单程衰减系数；

$m$ 、 $n$ ——底波的反射次数；

$B_m$ 、 $B_n$ ——第  $m$ 、 $n$  次底波高度；

$T$ ——工件厚度。

#### 2) 对于厚工件

$$\alpha = \frac{20 \lg(B_1/B_2) - 6 - \delta}{2T} \quad (4-1-35)$$

式中  $B_1$ 、 $B_2$ ——第 1、2 次底波高度；

6——扩散衰减引起的分贝差；

$\delta$ ——反射损失；

$T$ ——工件厚度。

## 第二章

# 超声波发射声场与规则反射体的回波声压

超声波探头（波源）发射的超声场，具有特殊的结构。只有当缺陷位于超声场内时才有可能被发现。

由于液体介质中的声压可以进行线性叠加，并且测试比较方便，因此对声场的理论分析研究常常从液体介质入手，然后在一定的条件下过渡到固体介质。

又由于实际检测中广泛使用反射法，因此本章在讨论了超声波发射声场以后，还讨论了各种规则反射体的回波声压。

### 一、纵波发射声场

#### （一）圆盘波源辐射的纵波声场

##### 1. 纵波圆盘声源在声束轴线上声压的分布

根据叠加原理和波的干涉理论，声束轴线上任何一点处的声压等于声源上各点辐射的声压在该点的叠加，如图 4-2-1 所示。由于压电晶片上各点到达该点的距离不同，叠加时有相位差，因而在整个声束轴线上出现有声压极大值和声压极小值的起伏。如果声源发出的波为连续简谐波，且不考虑衰减，则圆盘形纵波声源在声束轴线上瞬时的声压分布可由式 (4-2-1) 表示

$$p = 2p_0 \sin \frac{\pi}{\lambda} (\sqrt{R_s^2 + x^2} - x) \quad (4-2-1)$$

式中  $p_0$ ——声源的起始声压；

$p$ ——声束轴线上距声源距离为  $x$  处的声压；

$R_s$ ——晶片直径；

$\lambda$ ——波长；

$x$ ——距声源距离。

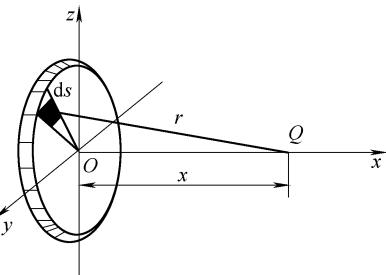


图 4-2-1 圆盘源轴线上声压推导图

上述声压公式比较复杂，使用不便。当  $x \geq 3R_s^2/\lambda$  ( $x > 3N$ )，经简化后得

$$p \approx \frac{p_0 \pi R_s^2}{\lambda x} = \frac{p_0 F_s}{\lambda x} \quad (4-2-2)$$

(1) 近场区 波源附近由于波的干涉而出现一系列声压极大极小值的区域，称为超声场的近场区。近场区声压分布不均，是由于波源各点值轴线上的某点距离不同，垂直波程差，互相叠加时存在相位差而互相干涉，使某些地方声压互相加强，另一些地方互相减弱，于是就出现了声压极大极小值的点。

波源轴线上最后一个声压极大值至波源的距离称为近场区长度，用  $N$  表示。

近场区长度

$$N = \frac{D_s^2 - \lambda^2}{4\lambda} \approx \frac{D_s^2}{4\lambda} = \frac{R_s^2}{\lambda} = \frac{F_s}{\pi\lambda} \quad (4-2-3)$$

由式可知：近场区长度与波源面积成正比，与波长成反比。

在近场区内检测定量是非常不利的，处于声压极小值处的较大缺陷回波可能较低，而处于声压极大值处的较小缺陷会可能较高，这样就很容易引起漏检和误判，因此应尽可能避免在近场区内进行检测定量。

(2) 远场区 波源轴线上值波源的距离  $x > N$  的区域称为远场区。远场区轴线上的声压随距离增加单调减小。当  $x > 3N$  时，声压与距离成反比，近似球面波的规律，这是因为当距离  $x$  足够大时，波源各点至轴线上某一点的波程差很小，引起的相位差也很小，干涉现象可忽略不计，所以远场区轴线上不会出现声压极大极小值。

## 2. 超声场横截面声压分布

超声场近场区与远场区各截面上的声压分布不同，在  $x < N$  的近场区内，存在着中心轴线上声压为 0 的截面，如  $x = 0.5N$  的截面，中心声压为 0，偏离中心声压较高。在  $x \geq N$  的远场区内，轴线上的声压最高，偏离中心线声压逐渐较低，且同一横截面上声压的分布完全对称的。因此在实际检测中，测定探头波束轴线的偏离和横波斜探头的  $K$  值，都应在  $2N$  以外进行。

## 3. 波束指向性和半扩散角

同样根据叠加原理，声源辐射场内任一点的声压也可以用声源上各点辐射声压在该点叠加来计算，如图 4-2-2 所示。

图 4-2-3 用直角坐标和极坐标表示了在远场，垂直于声束轴线的某一截面的声压分布情况。图中说明，超声波能量主要集中在声束轴线附近，两侧的声压很低并略有起伏，对应  $Y = 3.83, 7.02, 10.17$  的位置出现零值。将  $Y = 3.83$  的第一零值至晶片中心的连线与声束轴线形成的夹角  $\theta_0$  定义为指向角，(也称半扩散角)，其值可由下式求出

$$\theta_0 = \arcsin 1.22\lambda/D_s \approx 70\lambda/D_s \quad (4-2-4)$$

式中  $\lambda$ ——波长；

$D_s$ ——晶片直径。

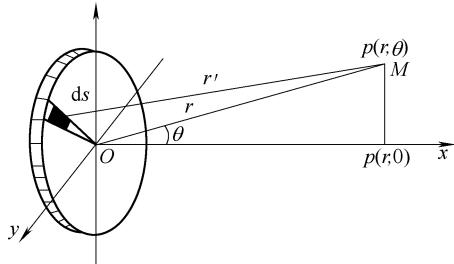


图 4-2-2 圆盘源轴线上声压推导图

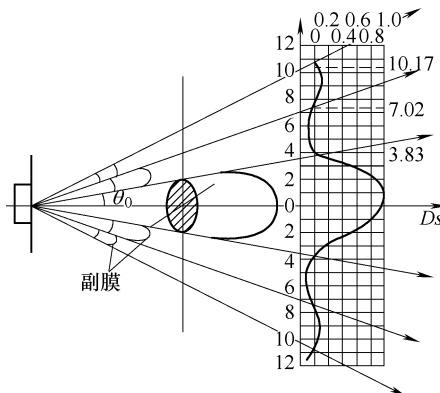


图 4-2-3 圆盘波源声束指向性图

对于方形晶片其值可由下式求出

$$\theta_0 = \arcsin \frac{\lambda}{a(\text{或 } b)} \approx 57 \frac{\lambda}{a(\text{或 } b)} (\text{度}) \quad (4-2-5)$$

式中  $a, b$ ——方形晶片的边长。

#### 4. 波束未扩散区与扩散区

超声波波源辐射 超声波以特定的较大向外扩散，但并不是从波源开始扩散的，而是在波源附近存在一个未扩散区  $b$ ，其理想化的形状如图 4-2-4 所示。

$$\text{由 } \sin \theta_0 = 1.22 \frac{\lambda}{D_s} = \frac{D_s/2}{\sqrt{b^2 + (D_s/2)^2}} \text{ 得}$$

$$b \approx \frac{D_s^2}{2.44\lambda} = 1.64N \quad (4-2-6)$$

在波束未扩散区内，波束不扩散，不存在扩散衰减，各截面平均声压基本相同。因此对于薄板检测时其前几次底波相差无几。

## 二、横波发射声场

### 1. 假想横波波源

目前常用的横波探头，是使纵波倾斜入射到界面上，通过波型转换来获得横波的。当入射角在第Ⅰ临界角和第Ⅱ临界角之间时，纵波全反射，第二介质中只有折射横波。

横波探头辐射的声场由第一介质中的纵波声场与第二介质中的横波声场两部分

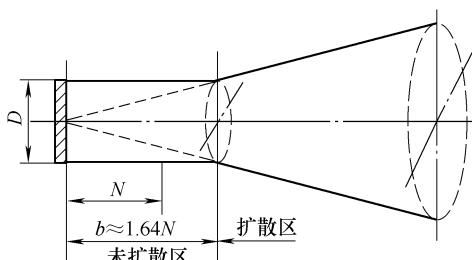


图 4-2-4 圆盘波源理想化声场中的波束未扩散区和扩散区

组成，两部分声场是弯折的，如图 4-2-5 所示。为了便于对横波声场的描述并像纵波那样处理其计算，特将第一介质中的纵波波源转换为轴线与第二介质中横波波束轴线重合的假想横波波源，这时整个声场可视为由假想横波波源辐射出来的连续的横波声场。

当实际波源为圆形时，其假想横波波源为椭圆形，椭圆的长轴等于实际波源的直径  $D_s$ ，短轴为

$$D'_s = D_s \frac{\cos\beta}{\cos\alpha} \quad (4-2-7)$$

式中  $\beta$ —横波折射角；

$\alpha$ —纵波入射角。

## 2. 横波声场结构

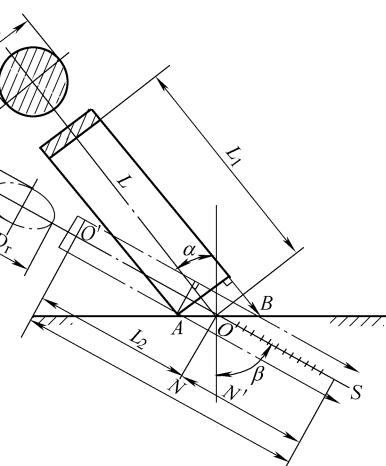


图 4-2-5 假想波源的回波声场

### (1) 波束轴线上的声压 横波声场同

纵波声场一样由于波的干涉存在近场区和远场区。当声程  $x \geq 3N$  时，横波声场声束轴线上的声压为

$$P = \frac{KF_s}{\lambda_{s_2} x} \frac{\cos\beta}{\cos\alpha} \quad (4-2-8)$$

式中  $K$ —系数；

$F_s$ —波源的面积；

$\lambda_{s_2}$ —第二介质中横波波长；

$a$ —轴线上某点至假想波源的距离。

由式 (4-2-8) 可知，横波声场中，当  $x \geq 3N$  时，波束轴线上的声压与波源面积成正比；与至假想波源的距离成反比，类似纵波声场。

### (2) 近场长度 横波声场近场长度为

$$N = \frac{F_s}{\pi\lambda_{s_2}} \frac{\cos\beta}{\cos\alpha} \quad (4-2-9)$$

式中  $N$ —近场长度，从假想声源算起。

由式 (4-2-9) 可知，横波声场的近场长度和纵波声场一样，与波长成反比，与波源面积成正比。

横波声场中，第二介质中的近场区长度为

$$N' = N - L_2 = \frac{F_s}{\pi\lambda_{s_2}} \frac{\cos\beta}{\cos\alpha} - L_1 \frac{\tan\alpha}{\tan\beta} \quad (4-2-10)$$

式中  $F_s$ —波源面积；

$\lambda_{s_2}$ —介质 II 中横波波长；

$L_1$ ——入射点至波源的距离；

$L_2$ ——入射点至假想波源的距离。

为便于计算，教材中将采用有机玻璃做楔块的斜探头，检测钢时的  $\cos\beta/\cos\alpha$  和  $\tan\alpha/\tan\beta$  比值与  $K$  值的关系，列于表 4-2-1。

表 4-2-1  $\cos\beta/\cos\alpha$ 、 $\tan\alpha/\tan\beta$  与  $K$  值的关系

$K$ 值	1.0	1.5	2.0	2.5
$\cos\beta/\cos\alpha$	0.88	0.78	0.68	0.6
$\tan\alpha/\tan\beta$	0.75	0.66	0.58	0.5

(3) 半扩散角 从假想横波声源辐射的横波声束同纵波声场一样，具有良好的指向性，可以在被检材料中定向辐射，只是声束的对称性与纵波声场有所不同，如图 4-2-6 所示。

1) 纵波斜入射在第二介质中产生横波声场，其声束不再对称于声束轴线，而是存在上下两个不同的半扩散角，其中上半扩散角  $\theta_u$  大于下半扩散角  $\theta_d$ 。

2) 在通过轴线与入射平面垂直的平面内，指向角是对称的。

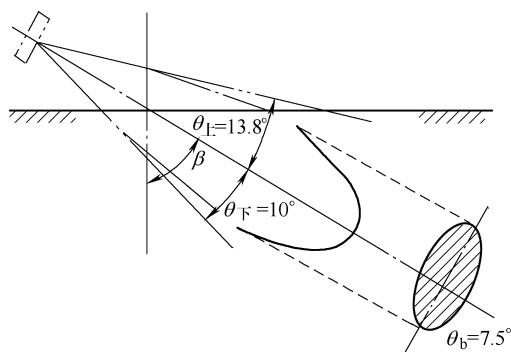


图 4-2-6 斜探头 (2.5MHz、 $\phi 12\text{mm}$ 、 $K=2$ )  
在钢中的指向角

### 三、规则反射体的回波声压

前面讨论的是超声波发射声场中声压分布情况，实际检测中常用反射法。反射法是根据缺陷反射回波来评价缺陷的大小。然而工件中的缺陷形状、性质各不相同，目前的检测技术还难以确定缺陷的真实大小和形状。回波声压相同的缺陷的实际大小可能相差很大，为此特引入当量法。当量法是指在同样的检测条件下，当缺陷的回波与某一规则反射体的回波等高时，则该人工反射体的尺寸就是此自然缺陷的当量尺寸。自然缺陷的实际尺寸往往大于当量尺寸。

超声检测中常用的规则反射体有平底孔、长横孔、短横孔、球孔和大平底等。

#### 1. 平底孔回波声压

在  $x \geq 3N$  的圆盘波源轴线上存在一平底孔缺陷，根据惠更斯原理，可把平底孔看作一个直径为  $\phi$  的新圆盘声源，起始声压就是入射波在平底孔处的声压  $p_x = \frac{p_0 F_s}{\lambda x}$ ，它的辐射规律也是遵循球面波声压公式，故探头晶片上接收到的声压为

$$p_f = \frac{p_0 F_f}{\lambda x} = \frac{p_0 F_s F_f}{\lambda^2 x^2} \quad (4-2-11)$$

式中  $p_0$ ——探头波源的起始声压；

$F_s$ ——探头波源面积,  $F_s = \pi D_s^2/4$ ;

$F_f$ ——平底孔缺陷的面积,  $F_f = \pi D_f^2/4$ ;

$\lambda$ ——波长；

$x$ ——平底孔至波源的距离。

当检测条件一定时, 平底孔的回波声压与平底孔面积成正比, 与距离成反比。任意两个距离、直径不同的平底孔回波分贝差为

$$\Delta_{1/2} = 20\lg \frac{p_{f_1}}{p_{f_2}} = 40\lg \frac{D_{f_1}x_2}{D_{f_2}x_1} \quad (4-2-12)$$

1) 当  $D_{f_1} = D_{f_2}$ ,  $x_2 = 2x_1$  时

$$\Delta_{1/2} = 20\lg(p_{f_1}/p_{f_2}) = 40\lg(x_2/x_1) = 12\text{dB}$$

这说明平底孔当直径一定, 距离增加一倍, 其回波下降 12dB。

2) 当  $x_2 = x_1$ ,  $D_{f_1} = 2D_{f_2}$  时

$$\Delta_{1/2} = 20\lg(p_{f_1}/p_{f_2}) = 40\lg(D_{f_1}/D_{f_2}) = 40\lg 2 = 12\text{dB}$$

这说明平底孔当距离一定, 直径增加一倍, 其回波升高 12dB。

## 2. 长横孔回波声压

长横孔是长度大于声束截面尺寸的横孔。在  $x \geq 3N$  时, 其回波可视为球面波在柱面的发射, 回波声压计算公式为

$$p_f = \frac{p_0 F_s}{2\lambda x} \sqrt{\frac{D_f}{2x}}$$

式中  $D_f$ ——长横孔的直径。

当检测条件一定时, 长横孔的回波声压与其直径的平方成正比, 与距离的二分之三次方成反比。任意两个距离、直径不同的长横孔回波分贝差为

$$\Delta_{1/2} = 20\lg \frac{p_{f_1}}{p_{f_2}} = 10\lg \frac{D_{f_1}x_2^3}{D_{f_2}x_1^3} \quad (4-2-13)$$

1) 当  $D_{f_1} = D_{f_2}$ ,  $x_2 = 2x_1$  时

$$\Delta_{1/2} = 20\lg(p_{f_1}/p_{f_2}) = 30\lg(x_2/x_1) = 30\lg 2 = 9\text{dB}$$

这说明长横孔直径一定, 距离增加一倍, 其回波下降 9dB。

2) 当  $x_2 = x_1$ ,  $D_{f_1} = 2D_{f_2}$  时

$$\Delta_{1/2} = 20\lg(p_{f_1}/p_{f_2}) = 10\lg(D_{f_1}/D_{f_2}) = 10\lg 2 = 3\text{dB}$$

这说明长横孔距离一定, 直径增加一倍, 其回波升高 3dB。

## 3. 短横孔回波声压

短横孔时长度明显小于声束截面尺寸的横孔, 其回波声压计算公式为

$$p_f = \frac{p_0 F_s}{\lambda x} \frac{l_f}{2x} \sqrt{\frac{D_f}{\lambda}} \quad (4-2-14)$$

式中  $l_f$ ——短横孔的长度；

$D_f$ ——短横孔直径。

当检测条件一定时，短横孔的回波声压与其长度成正比，与直径的平方根成正比，与距离的平方成反比。任意两个距离、长度和直径不同的短横孔回波分贝差为

$$\Delta_{1/2} = 20 \lg \frac{p_{f_1}}{p_{f_2}} = 10 \lg \frac{l_{f_1}^2}{l_{f_2}^2} \frac{x_2^4}{x_1^4} \frac{D_{f_1}}{D_{f_2}} \quad (4-2-15)$$

1) 当  $D_{f_1} = D_{f_2}$ ,  $l_{f_1} = l_{f_2}$ ,  $x_2 = 2x_1$  时：

$$\Delta_{1/2} = 20 \lg(p_{f_1}/p_{f_2}) = 40 \lg(x_2/x_1) = 40 \lg 2 = 12 \text{dB}$$

这说明短横孔直径和长度一定，距离增加一倍，其回波下降 12dB，与平底孔变化规律相同。

2) 当  $D_{f_1} = D_{f_2}$ ,  $x_2 = x_1$ ,  $l_{f_1} = 2l_{f_2}$  时：

$$\Delta_{1/2} = 20 \lg(p_{f_1}/p_{f_2}) = 20 \lg(l_{f_1}/l_{f_2}) = 20 \lg 2 = 6 \text{dB}$$

这说明短横孔距离和直径一定，长度增加一倍，其回波上升 6dB。

3) 当  $x_2 = x_1$ ,  $l_{f_1} = l_{f_2}$ ,  $D_{f_1} = 2D_{f_2}$  时：

$$\Delta_{1/2} = 20 \lg(p_{f_1}/p_{f_2}) = 10 \lg(D_{f_1}/D_{f_2}) = 10 \lg 2 = 3 \text{dB}$$

这说明短横孔长度和距离一定，直径增加一倍其回波升高 3dB。

#### 4. 球孔回波声压

超声波在球孔上的反射类似于球面波在球面上的反射，其回波声压为

$$p_f = \frac{p_0 F_s}{\lambda x} \frac{D_f}{4x} \quad (4-2-16)$$

式中  $D_f$ ——球孔直径。

当检测条件一定时，球孔的回波声压与其直径成正比，与距离的平方成反比。任意两个直径、距离不同的球孔回波分贝差为

$$\Delta_{1/2} = 20 \lg \frac{p_{f_1}}{p_{f_2}} = 20 \lg \frac{D_{f_1} x_2^2}{D_{f_2} x_1^2} \quad (4-2-17)$$

1) 当  $D_{f_1} = D_{f_2}$ ,  $x_2 = 2x_1$  时：

$$\Delta_{1/2} = 20 \lg(p_{f_1}/p_{f_2}) = 40 \lg(x_2/x_1) = 40 \lg 2 = 12 \text{dB}$$

这说明球孔直径一定，距离增加一倍，其回波下降 12dB，与平底孔变化规律相同。

2) 当  $x_2 = x_1$ ,  $D_{f_1} = 2D_{f_2}$  时

$$\Delta_{1/2} = 20 \lg(p_{f_1}/p_{f_2}) = 20 \lg(D_{f_1}/D_{f_2}) = 20 \lg 2 = 6 \text{dB}$$

这说明球孔距离不变，直径增加一倍，其回波上升 6dB。

#### 5. 大平底面回波声压

当  $x \geq 3N$  时，超声波在于波束轴线垂直、表面光洁的大平底面的反射就是球面

波在平面上的反射，其回波声压  $p_B$ ：

$$p_B = \frac{p_0 F_s}{\lambda x} \quad (4-2-18)$$

当检测条件一定时，大平底面的回波声压与距离成反比。两个不同距离的大平底回波分贝差为

$$\Delta_{1/2} = 20 \lg \frac{p_{B_1}}{p_{B_2}} = 20 \lg \frac{x_2}{x_1} \quad (4-2-19)$$

当  $x_2 = 2x_1$  时：

$$\Delta_{1/2} = 20 \lg (p_{B_1}/p_{B_2}) = 20 \lg (x_2/x_1) = 20 \lg 2 = 6 \text{dB}$$

这说明大平底面距离增加一倍，其回波下降 6dB。

## 6. 圆柱曲底面回波声压

实心圆柱体的回波声压公式与大平底面回波声压公式相同，其与距离的回波规律也相同，故此不再重复，只来说明空心圆柱体的回波声压，如图 4-2-7 所示。

1) 当探头置于外圆径向检测空心圆柱体时， $x \geq 3N$ ，类似于球面波在凸柱面上的反射，如图 4-2-7 所示探头 A 位置，其回波声压  $p_B$  为

$$p_B = \frac{p_0 F_s}{2 \lambda x} \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (4-2-20)$$

式中  $d$ ——空心圆柱体内径；

$D$ ——空心圆柱体外径。

上式说明外圆检测空心圆柱体，因为凸柱面反射波发散，其回波声压低于同距离大平底面的回波声压。

2) 当探头置于空心圆柱体内侧，对圆柱体检测时，类似于球面波在凹柱面上的反射，如图 4-2-7 所示探头 B 位置，其回波声压  $p_B$  为

$$p_B = \frac{p_0 F_s}{2 \lambda x} \sqrt{\frac{D}{d}} \quad (4-2-21)$$

上式说明内孔检测空心圆柱体，因为凹柱面反射波聚焦，其回波声压高于同距离大平底面的回波声压。

## 四、AVG 曲线

AVG 曲线是描述规则反射体的距离、回波高及当量大小之间关系的曲线；A、V、G 是德文距离、增益和大小的字头缩写，英文缩写为 DGS。AVG 曲线可用于对缺陷定量和灵敏度调整。

以横坐标表示实际声程，纵坐标表示规则反射体相对波高，用来描述距离、波

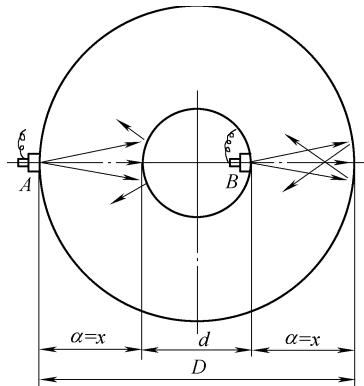


图 4-2-7 空心圆柱体回波声压

幅及当量大小之间的关系曲线，称为实用 AVG 曲线。实用 AVG 曲线可由以下公式得到：

1) 不同距离的大平底回波 dB 差：

$$\Delta = 20 \lg \frac{p_{B_1}}{p_{B_2}} = 20 \lg \frac{x_2}{x_1} \quad (4-2-22)$$

2) 不同距离的不同大小平底孔回波 dB 差：

$$\Delta = 20 \lg \frac{p_{f_1}}{p_{f_2}} = 40 \lg \frac{D_1 x_2}{D_2 x_1} \quad (4-2-23)$$

3) 同距离的大平底与平底孔回波 dB 差：

$$\Delta = 20 \lg \frac{p_B}{p_f} = 20 \lg \frac{2\lambda x}{\pi D_f^2} \quad (4-2-24)$$

用以上公式计算绘制实用 AVG 曲线时，要统一灵敏度基准。

## 第三章 | 超声检测设备与器材

超声检测设备与器材包括超声检测仪、探头、试块、耦合剂和机械扫查装置等，其中仪器和探头对超声检测系统的能力起着关键的作用。了解其原理及其主要性能，是正确选择检测设备与器材并进行有效检测的保证。

### 一、超声检测仪

超声检测仪是超声检测的主体设备，它的作用是产生电振荡并施加于换能器（探头），激励探头发射超声波，同时接收来自于探头的电信号，将其放大后以一定的方式显示出来，从而得到被检工件中有关缺陷的信息。

#### （一）超声检测仪的分类

超声检测仪根据检测对象、检测目的、检测环境及检测速度多方面的要求不同，有不同的分类，常见有以下几种：

##### 1. 按激励源持续时间分

（1）脉冲波检测仪 这种检测仪器对探头的激励源为脉冲发生器，通过探头产生周期性地发射不连续且频率不变的超声波，根据接收超声波的传播时间及幅度判断缺陷的位置和大小，这是目前使用最广泛的金属超声检测仪。

（2）连续波检测仪 这种检测仪施加在探头上的激励源是连续波。连续波可以是单一频率的等幅连续正弦波，也可以是调幅正弦波或调频波。这种仪器检测灵敏度低，且不能确定缺陷的位置，因而以大多被脉冲波检测仪所替代，但在超声显像及超声共振测厚等方面仍有应用。

##### 2. 按显示分

可分为 A 型、B 型、C 型等多种方式，就目前来讲最常用的是 A 型显示。

（1）A 型显示 A 型显示是一种波形显示，是将超声信号的幅度与传播时间的关系在直角坐标系中显示出来，如图 4-3-1 所示，横坐标代表声波的传播时间，纵坐标代表信号的幅度。如果超声波在均匀介质中传播，声速是恒定的，则传播时间可转变为传播距离，从声波的传播时间可以确定缺陷的位置，由回波的幅度可以估

算缺陷的当量尺寸。

(2) B型显示 B型显示是一种图像显示, 检测仪荧光屏的横坐标时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), 因而可以直观地显示出被检工件任一纵截面上缺陷的分布及缺陷的深度。

(3) C型显示 C型显示也是一种图像显示, 是显示一个工件的平面投影图, 检测仪荧光屏的横坐标及纵坐标都是靠机械扫描来代表探头在工件表面的位置。探头接收信号的幅度已光点的辉度表示, 因次, 当探头在工件表面移动时, 荧光屏上便显示出工件内部缺陷的平面图像, 但不能显示缺陷的深度。

## (二) A型脉冲反射式超声检测仪

### 1. 仪器的组成及作用

A型脉冲反射式超声检测仪有各种不同的型号, 但基本电路是相似的。仪器的基本电路有同步电路、发射电路、扫描电路、接收放大电路、显示电路和电源电路等。如图4-3-2所示。

电路方框图是把仪器的每一部分用一方框来表示, 各方框之间用线条连起来, 表示各部分之间的关系。电路方框图只是说明仪器的大致结构及工作原理, 帮助理解。

仪器除上述五部分基本电路外, 还有辅助电路, 如延迟电路、报警电路、补偿电路等。

1) 同步电路。是一个同步脉冲发生器, 又称触发电路, 主要由多谐振荡器和微分电路等组成, 使检测仪的各个部分在同步电路的统一指挥下协调地工作。同步电路是整个检测仪的大脑和司令部。

能使两个或两个以上电路波长一定关系协同工作的脉冲电压(或电流)称为同步脉冲。同步电路每秒内产生几十以至上千个同步脉冲, 并周期性的出现。每秒钟内发射同步脉冲的次数, 称为检测仪的重复频率, 通过改变重复频率, 可以改变检测仪的发射电路和扫描电路等部分协同工作的次数。

2) 发射电路。接受同步脉冲的触发, 产生高压脉冲(一般为300~800V), 去

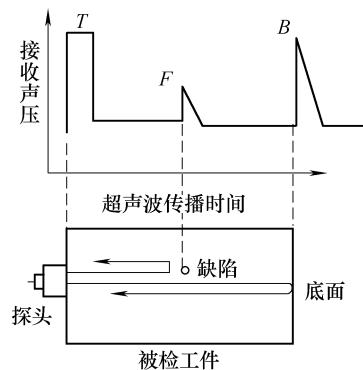


图4-3-1 A型显示原理  
T—始波 F—缺陷波 B—底波

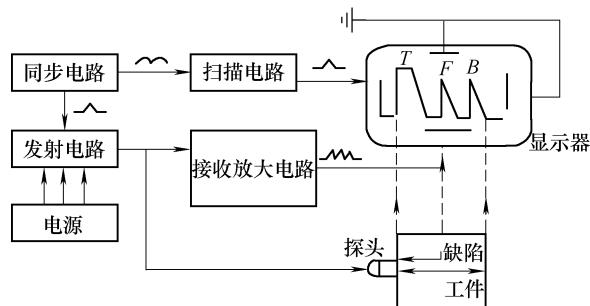


图4-3-2 A型脉冲反射式超声检测仪电路方框图

激励探头上的晶片发射超声波，通过调节高压脉冲的幅度和宽度，可以控制发射强度和分辨力。超声检测仪中多设置有发射强度旋钮或阻尼旋钮，通过改变发射电路中的阻尼电阻，由使用者调节发射脉冲的电压幅度和脉冲宽度。通常电压越高脉冲越宽，则发射能量越大，但同时也增大了盲区，使得深度分辨力变差。因此，使用时需根据检测对象的特点加以调节，以适应对穿透能力和分辨力的不同要求。

同时高压脉冲有尖脉冲、方脉冲等多种类型，每种脉冲都有一定的频率范围，称为发射脉冲的频带宽度。当发射脉冲频带与探头晶片的固有频率相匹配时，探头晶片产生的超声波强度比较大。

3) 扫描电路。又称时基电路或时基发生器，用来产生锯齿波电压，施加到示波管水平偏转板上，使示波管荧光屏上的光点沿水平方向从左到右做等速移动，产生一条水平扫描时基线。改变扫描深度(锯齿波的斜率)可以改变显示在屏幕上的时间范围，也就是超声波传播的声程范围，如图 4-3-3 所示。

仪器上通常提供两个时基线调节功能，一个是用来改变屏幕上显示的时间(距离)范围的大小，称为测量范围或声速，调节该旋钮的实质是调节扫描速度，即设置测量范围。

另一个时基线调节功能是调节屏幕上显示的时间范围的起点，也就是时基电路触发的延迟时间，称为延迟。延迟由延迟电路实现，延迟电路的作用就是将同步信号延迟一段时间后去触发扫描电路，使扫描延迟一段时间在开始，这样就可以以较快的时基扫描速度，声波将传播方向上某一小段的波形展现在整个屏幕上，以便更仔细地观察。在水浸法检测时，可以用来将水中传播的距离移出屏幕左端。

4) 接收放大电路。由衰减器、高频放大器、检波器、抑制器和视频放大器等组成。将经过探头转换的微小电信号如缺陷，底面回波信号进行放大、检波、再放大，然后加于示波管的垂直偏转板上，形成荧光屏上的回波显示。

接收电路的性能对检测仪的性能影响极大，它直接影响到检测仪的垂直线性、动态范围、检测灵敏度及分辨力等重要技术指标。

超声检测仪的接收放大器对电压的放大量称为增益，增益常用分贝来表示。检测仪的衰减器就是用来调节增益的。

5) 显示电路。主要由示波管及其外围的高压电路和控制电路等组成。将来自于扫描电路和接收放大电路的电信号，以时基线和回波组成的图形显示出来，以供检测人员观察、分析、判断工件中是否存在缺陷以及缺陷的位置、大小。

## 2. 检测仪的工作原理

A 型脉冲波检测仪的工作原理：同步电路产生同步脉冲，由同步脉冲触发扫描电路和发射电路。一方面，被触发的扫描电路产生锯齿波电压，施加于示波管的水

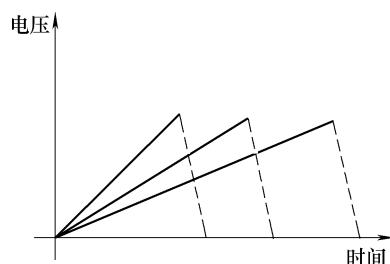


图 4-3-3 锯齿波示意图

平偏转板上，使示波管中的电子束水平扫描，在荧光屏上形成一条反应时间的时基扫描线。另一方面，被触发的发射电路产生高压脉冲，施加于探头的晶片上，激励晶片将电能转变为声能发射出超声波。超声波在被检工件中传播，遇到缺陷或界面会产生反射回波。回波被探头接收，晶片又将声能转变为电能输入接收电路。接收电路将微弱的电能回波放大后加于示波管的垂直偏转板上，使示波管中的电子束垂直移动，从而在荧光屏上形成回波显示。荧光屏上缺陷波的位置反映了缺陷的埋藏深度，缺陷波的高度反映了缺陷发射面的大小。

### 3. 模拟式 A 型仪器的主要旋钮及其作用

仪器面板上有许多开关和旋钮，用于调节检测仪的功能和工作状态，以 CTS-22 型检测仪为例，如图 4-3-4 所示。

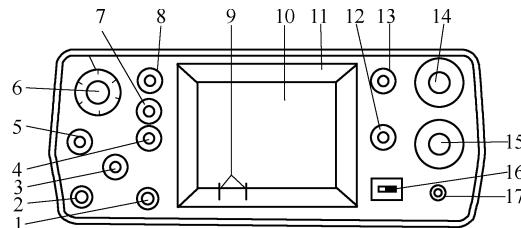


图 4-3-4 CTS-22 型检测仪面板示意图

1—发射插座 2—接收插座 3—工作方式选择 4—发射强度 5—粗调衰减器 6—细调衰减器  
7—抑制 8—增益 9—定位游标 10—示波管 11—遮光罩 12—聚焦 13—深度范围  
14—深度细调 15—脉冲移位 16—电源电压指示器 17—电源开关

1) 工作方式选择旋钮。工作方式选择旋钮的作用是选择检测方式，即“双探”或“单探”方式。当开关置于“双探”位置时，为双探头一发一收工作状态，可用一个双晶探头或两个单探头检测；当使用一个自发自收探头（单晶探头）时，将开关置于“单探”位置。

2) 发射强度旋钮。发射强度旋钮的作用是改变仪器发射脉冲功率，从而改变仪器的发射强度。增大发射强度时，可提高仪器灵敏度，但脉冲变宽，分辨力变差。因此在检测灵敏度能满足要求的情况下，发射强度旋钮应尽量放在较低的位置上。

3) 衰减器旋钮。衰减器的作用是调节检测灵敏度和测量回波高度。调节灵敏度时，衰减器读数大则灵敏度低；反之，衰减读数小则灵敏度高。测量回波振幅时，衰减读数大，回波幅度高；反之，衰减读数小，回波幅度低。一般检测仪的衰减器有粗调和细调两个旋钮，粗调每档 10dB 或 20dB，细调每档 1dB 或 2dB，总衰减量为 80~110dB。

当使用增益型检测仪时，回波幅度与读数的关系和衰减型仪器截然相反，增益器读数大则灵敏度高。

4) 增益旋钮。增益旋钮也称为增益细调旋钮，其作用在于改变接收放大器的

放大倍数，进而连续改变检测仪的灵敏度。使用时可以将反射波精确地调节到某一指定高度，仪器灵敏度确定以后，检测过程中一般不再调整增益旋钮。

5) 抑制旋钮。在超声检测中，为了减少或消除幅度较低的杂波信号，以便突出幅度较高的有用信号的控制方法称为抑制。抑制旋钮通过调整抑制器，限制检波后幅度较低的杂波幅度，使之不再显示。

由于抑制越大，仪器的垂直线性越差，灵敏度越低，使有用的弱回波信号可能显示不出来，容易造成小缺陷的漏检。因此除十分必要，一般不使用抑制。

6) 深度范围旋钮。深度范围旋钮也称为深度粗调旋钮，其作用是粗调荧光屏扫描线所代表的检测范围，调节深度范围旋钮，可较大幅度地改变时间扫描线的扫描速度（锯齿波的斜率），从而使荧光屏上的回波间距大幅度的扩展或压缩。

粗调旋钮一般分为若干档，检测时视被检工件的厚度选择合适的档位，厚度大选择数值大的档位，厚度小选择数值较小的档位。

7) 深度细调旋钮。深度细调旋钮的作用是精确调整检测范围。调节细调旋钮，可以连续改变扫描线的扫描深度，从而使荧光屏上的回波间距在一定范围内连续变化。

调整检测范围时，先将深度粗调旋钮置于合适的档位，然后调节细调旋钮，使反射波的间距与反射体的距离成一定比例。

8) 延迟旋钮。或称脉冲移位旋钮，用于调节同步脉冲触发扫描电路的时间，将触发扫描电路的时间推迟，使时基线上的回波左右移动而不改变回波的间距，以便始脉冲之后一定范围内的回波不再显示，让远声程上的回波得到显示。在用水浸法检测时，可以把界面回波调到荧光屏水平刻度“0”的位置，把显示的水层距离移到“0”位左边，以便提高荧光屏的利用率。

9) 重复频率旋钮。重复频率旋钮的作用调节脉冲重复频率，即改变发射电路的每秒钟发射脉冲的次数。重复频率低时荧光屏图形较暗，仪器的灵敏度有所提高，重复频率高时荧光屏图形较亮，这对露天检测时观察波形是有利的。应当指出，重复频率要根据工件厚度来调节，厚度大，应使用较低的重复频率；厚度小，可使用较高的重复频率，但重复频率过高时，易出现幻想波。有些检测仪的重复频率开关与深度范围旋钮联动，在调节深度范围旋钮的同时，重复频率也随之调节到适合于所探厚度的数值。

### (三) 数字式 A 型脉冲超声检测仪

数字式 A 型脉冲超声检测仪是在常规模拟式超声检测仪的基础上，采用计算机技术通过模数转换，实现仪器功能的精确和自动控制、信号获取和处理的数字化和自动化、检测结果的可记录性和可再现性。因此，它具有传统的模拟式超声检测仪的基本功能，同时又增加了数字化带来的数据测量、显示、存储和输出功能。近年来，数字式仪器发展很快，有逐步替代模拟式仪器的趋势。总体来说数字式超声检测仪具有以下特点：

(1) 操作方式 模拟式超声检测仪采用旋钮操作,一个旋钮对应一个功能。如衰减钮调节灵敏度、深度范围钮调节检测范围、工作方式钮选择检测方式等。数字式超声检测仪则采用键盘来实现,一人机对话的方式完成对仪器的操作。人机对话通常有菜单方式和功能键两种,菜单式按键少,人机对话功能强,但操作繁琐;功能键式直接与检测人员的原习惯较吻合,因此,目前一般均采用功能键方式,这样既充分发挥仪器功能又方便操作,只是按键多一些。

(2) 波形显示繁琐 数字式超声检测仪显示的是数字化后的波形,大多采用平板显示器(液晶屏)以及高亮度场致发光显示器等。

(3) 检测速度快 数字式检测仪一般都可实现自动检测、计算及记录功能,有些仪器还能自动进行深度补偿和自动设置检测灵敏度,因此检测速度快,效率高。

(4) 检测精度高 数字式检测仪能对模拟信号进行高速数据采集、量化、计算和判别,其检测精度高于传统仪器的检测结果。

(5) 可靠性高、稳定性好 数字式仪器可以全面客观地采集存储数据,并对采集到的数据进行实时处理和后处理,对信号进行时域、频域或图像分析,还可通过模式识别对工件质量进行分级,减少了人为因素的影响,提高了检测的可靠性和稳定性。

(6) 记录与存档 数字式检测仪的计算机系统可以存储和记录检测原始数据和检测结果,对工件质量进行自动综合评价,对在役设备的定检结果进行分析处理,为材料评价和寿命评估提供依据。

(7) 可编辑性 数字式检测仪的性能和功能的实现很大程度上取决于软件系统的支持。因此,可以通过变更或扩充软件程序来改变或增加仪器的功能。

#### (四) 超声波测厚仪

超声测厚仪按原理可分为共振式,脉冲反射式和兰姆波式三种。

共振式测厚仪可测厚度下限小,  $\delta_{\min} = 0.1\text{mm}$ , 测量精度可达 0.1%, 但使用不方便,不能直读,对侧面平整光洁要求高,工程中应用较少。兰姆波测厚仪适用于薄板,技术问题较多,目前应用更少,常用的是脉冲反射式,下面作一简单介绍。

脉冲反射式测厚仪是通过测量超声波在工件上下底面之间往返一次传播的时间来求得工件的厚度  $\delta$ ,其计算公式如下

$$\delta = \frac{1}{2}ct \quad (4-3-1)$$

式中  $c$ ——工件中的波速;

$t$ ——超声波在工件中往返一次传播的时间。

脉冲反射式测厚仪原理方框图如图 4-3-5 所示。发射电路发出脉冲很窄的周期性电脉冲,通过电缆加到探头上,激励探头中压电晶片产生超声波。该超声波在工件的上下底面产生多次反射,反射波被探头接收,转变为电信号经放大器放大后输入计算电路,由计算电路测算出超声波在工件上下底面间往返一次传播的时间,最

后再换算成工件厚度显示出来。

脉冲反射式测厚仪发展非常快,近年来由于采用集成电路,其体积大大减小、重量轻、精度也明显提高(可达 $\pm 0.01\text{mm}$ ),操作方便敏捷,携带方便,在锅炉压力容器、船舶和海洋工程中应用十分广泛,是目前应用最广的一种超声波测厚仪。

## 二、探头

凡是能将任何其他形式的能量转变为超音频振动形式能量的器件均可用来发射超声波,其具有可逆效应时又可接收超声波,这类元件称为超声波换能器,以换能器为主要元件组装成具有一定特性的超声波发射、接收器件,常称为探头。探头是组成超声检测系统的最主要组件之一,其性能直接影响到超声检测的能力和效果。

当前超声检测中采用的超声换能器主要有压电换能器、磁致伸缩换能器、电磁声换能器及激光超声换能器,其中最为常用的是压电换能器探头。压电换能器探头的关键部件是压电晶片,是一个具有压电效应的单晶或多晶体的薄片,其作用是将电能转换为声能,并将声能转换为电能。

### (一) 压电效应

某些晶体材料在交变拉应力的作用下,会产生交变电场的效应称为正压电效应,反之当晶体材料在交变电场的作用下,产生伸缩变形的效应称为逆压电效应。正、逆压电效应统称为压电效应。

超声波探头中的压电晶片具有压电效应,当高频电脉冲激励压电晶片时,发生逆压电效应,将电能转换为声能,探头发射出超声波;当探头接收到超声波时发生正压电效应,将声能转换为电能。不难看出超声波探头在工作中实现了电能和声能的相互转换,因此也常把探头称为换能器。

### (二) 压电材料的主要性能参数

#### 1. 压电应变常数 $d_{33}$

压电应变常数  $d_{33}$  表示在压电晶体上施加单位电压时所产生的应变大小,是衡量压电晶体材料发射性能的重要参数,  $d_{33}$  值越大,发射性能越好,发射灵敏度高。

#### 2. 压电电压常数 $g_{33}$

压电电压常数  $g_{33}$  表示作用在压电晶体上单位应力所产生的电压梯度大小,是衡量压电晶体材料接收性能的重要参数,  $g_{33}$  值越大,接收性能越好,接收灵敏度高。

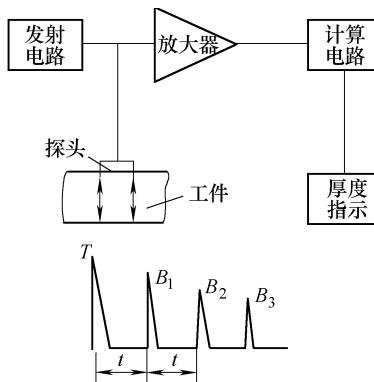


图 4-3-5 脉冲反射式测厚仪原理方框图

### 3. 频率常数 $N_t$

压电晶片的厚度与固有频率的乘积时一个常数，这个常数称为频率常数，用  $N_t$  表示。同样的材料，制作高频探头时，晶片厚度小；制作低频探头时，晶片厚度较大。

### 4. 居里温度 $T_c$

压电材料与磁性材料一样，其压电效应与温度有关。它只能在一定的温度范围内产生，超过压电温度后，压电效应就会消失。使压电材料的压电效应消失的温度称为压电材料的居里温度，用  $T_c$  表示。例如，石英  $T_c = 570^\circ\text{C}$ ，钛酸钡  $T_c = 115^\circ\text{C}$ 。

#### (三) 探头的种类和结构

超声检测的探头种类较多，根据波形的不同，可分为纵波探头横波探头、表面波探头和板波探头等，根据耦合方式可分为接触式探头和液（水）浸探头，根据波束分为聚焦探头和非聚焦探头，根据晶片数目不同分为单晶探头和双晶探头等，根据工作环境分还有高温探头和微型探头等特殊探头。下面介绍几种典型的探头。

#### 1. 直探头

直探头主要用于检测与检测面相平行的缺陷，如板材、锻件检测等。直探头的结构主要由压电晶片、保护膜、阻尼块、电缆线、接头和外壳等组成，如图 4-3-6 所示。

压电晶片的作用是发射和接收超声波，实现电声转换。

保护膜的作用是保护压电晶片不致磨损和损坏。保护膜分为硬、软保护膜两类，硬保护膜的探头由于表面粗糙度较低的工件检测，软保护膜的探头可用于表面较粗糙的工件和有一点曲率的工件。

吸收块紧贴压电晶片，对压电晶片的振动起阻尼作用，因此又称阻尼块，其作用是使晶片在起振后尽快停下来，从而使脉冲宽度变小，分辨力提高；另外吸收块还可以吸收晶片背面的杂波，提高信噪比；吸收块的第三个作用是支撑晶片。吸收块常用环氧树脂加钨粉制成，其声阻抗应尽可能接近压电晶片的声阻抗。

外壳的作用是将各部分组合在一起并保护它们，通常还起到接地电极的作用。

#### 2. 斜探头

斜探头可分为纵波斜探头 ( $\alpha_L < \alpha_I$ )，横波斜探头 ( $\alpha_L = \alpha_I \sim \alpha_{II}$ ) 和表面波探头 ( $\alpha_L \geq \alpha_{II}$ ) 等。如图 4-3-7 所示，其共同点是压电晶片贴在一斜楔上，晶片与探头表面成一定倾角。

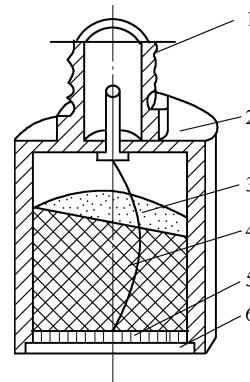


图 4-3-6 直探头基本结构  
1—接头 2—外壳 3—阻尼块  
4—电缆线 5—压电晶片 6—保护膜

纵波斜探头是入射角  $\alpha_L < \alpha_{II}$  的探头，目的是利用小角度的纵波进行检测，或在横波衰减过大的情况下，利用纵波穿透能力强的特点进行纵波入射检测。但应注意的是在使用时工件中会存在着横波的干扰。

横波斜探头是入射角  $\alpha_L = \alpha_I \sim \alpha_{II}$  且折射波为纯横波的探头，主要用于检测与检测面成一定角度的缺陷，如焊缝检测，汽轮机叶轮检测等。

横波斜探头实际上是由直探头加斜楔块组成的，由于晶片与工件不直接接触，因此这种探头无须保护膜。透声斜楔的主要作用是实现波型转换，是被检工件中指乘坐折射横波。仪器透声斜楔的纵波声速必须小于工件中的纵波声速，一般斜楔的衰减系数要适当且耐磨损、易加工。一般透声斜楔用有机玻璃制成（近年来有些探头用尼龙、聚乙烯等新型材料制作斜楔，也达到不错的效果，例如：可以适当地减小探头的前沿距离）。斜楔前面开槽可以减少反射杂波，还可以将斜楔做成牛角形，使反射波进入牛角出不来，从而也可以减少杂波。

横波斜探头的标称方式目前主要有两种：一种是欧美国家和日本使用的，以横波的折射角来标称，常用的有  $40^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  及  $70^\circ$  等；另一种是我国提出的，以钢中  $K = \tan \beta$  来标称，常用的有  $K = 0.8$ 、 $1.0$ 、 $1.5$ 、 $2.0$  及  $2.5$  等，这样可以使得缺陷定位的计算大大简化。目前国产横波斜探头大多都采用  $K$  值系列。探头上常标有工作频率、晶片尺寸和  $K$  值等。

常用  $K$  值与横波折射角  $\beta_s$  的换算关系见表 4-3-1（只适用于有机玻璃/钢界面）。

表 4-3-1 常用  $K$  值与横波折射角  $\beta_s$  的换算关系（有机玻璃/钢）

$K$ 值	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
$\beta_s$	$45^\circ$	$56.3^\circ$	$63.4^\circ$	$6.2^\circ$	$71.6^\circ$

表面波斜探头是入射角  $\alpha_L \geq \alpha_{II}$  的，一般略大于  $\alpha_{II}$ ，表面波探头主要用于对表面或近表面的缺陷进行检测，其结构与横波斜探头唯一的区别就是斜楔块的角度不同。

### 3. 双晶探头（分割探头）

双晶探头有两块压电晶片，一块用于发射超声波，另一块用于接收超声波，中间夹由隔声层。根据入射角  $\alpha_L$  的不同，又分为双晶纵波探头和双晶横波探头。双晶探头的结构如图 4-3-8。

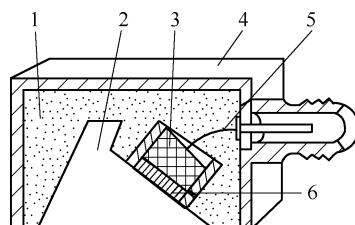


图 4-3-7 斜探头基本结构图  
1—吸声材料 2—斜楔 3—阻尼块  
4—外壳 5—电缆线 6—压电晶片

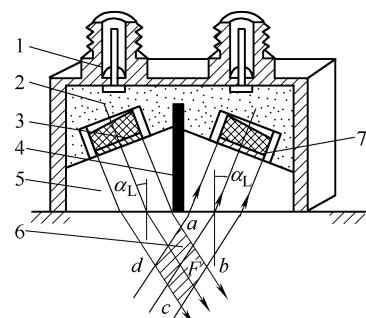


图 4-3-8 双晶探头结构图  
1—壳体 2—吸声材料 3—探头芯 4—隔声层  
5—延迟块 6—探测区 7—压电晶片

所示。

双晶探头具有以下优点：

1) 灵敏度高。双晶探头的两个晶片，一发一收，发射晶片常用发射灵敏度高( $d_{33}$ 值较大)的压电材料制成，如PZT；接收晶片由接收灵敏度高( $g_{33}$ 值较大)的压电材料制成，如硫酸锂。这样探头的发射和接收灵敏度都很高，这是单晶探头无法比拟的。

2) 杂波少盲区小。双晶探头的发射与接收分开，消除了发射压电晶片与延迟块之间的反射杂波。同时由于始脉冲未进入放大器，克服了阻塞现象，使盲区大大减小，为检测近表面缺陷提供了有利条件。

3) 工件中近场区长度小。双晶探头采用了延迟块，缩短了工件中近场区的长度，这对检测是有利的。

4) 检测范围可调。双晶探头检测时，对于位于菱形 $abcd$ 内的缺陷灵敏度较高。而菱形 $abcd$ 是可调的，可以通过改变两个晶片的相对入射角度 $\alpha_L$ 来调整， $\alpha_L$ 增大，菱形 $abcd$ 向表面移动，在水平方向变扁。 $\alpha_L$ 减小，菱形向内部移动，在垂直方向变扁。

双晶探头主要用于检测近表面缺陷和已知缺陷的定点测量，其主要参数为频率、晶片尺寸和声束汇聚区的范围。

#### 4. 接触聚焦探头

聚焦探头种类较多，根据焦点形状不同分为点聚焦和线聚焦。点聚焦的理想焦点为一点，其声透镜为球面；线聚焦的理想焦点为一条线，其声透镜为柱面。根据耦合情况的不同分为水浸聚焦与接触聚焦。水浸聚焦以水为耦合介质，探头不与工件直接接触。

接触聚焦是探头通过薄层耦合介质与工件接触。接触聚焦据聚焦方式的不同又分为透镜式聚焦、反射式聚焦和曲面晶片式聚焦，如图4-3-9所示。透镜式聚焦由平面晶片发射超声波通过声透镜的透声楔块来实现聚焦，如图4-3-9a所示；反射式聚焦由平面晶片发射超声波通过曲面楔块反射来实现聚焦，如图4-3-9b所示；曲面晶片式聚焦探头的晶片为曲面，通过曲面楔块实现聚焦，如图4-3-9c所示，但曲面晶片很难制作，目前已很少采用。

接触聚焦探头的作用参数为频率、晶片尺寸和焦距。

#### 5. 水浸聚焦探头

水浸聚焦探头如图4-3-10所示，在液浸平探头的晶片平面上加上声透镜，检测时以水作为耦合剂，将声能传入试件，由于探头不直接与试件接触，晶片不易损坏。在聚焦区内超声束宽度可被减小，而声强被增大，从而提高信噪比和检测灵敏度。

水浸聚焦探头的上述特点已使其在手工或自动检测中使用日益增多，例如小径钢管的检测。

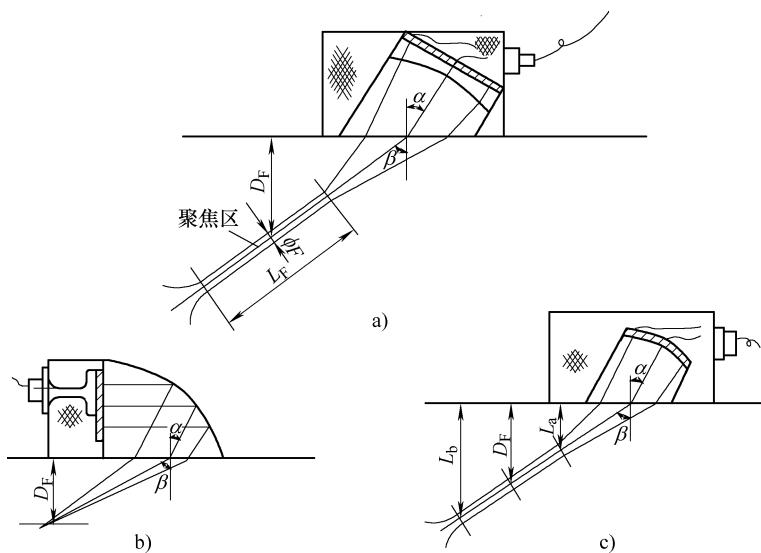


图 4-3-9 接触聚焦示意图

#### (四) 探头型号

##### 1. 探头型号的组成项目

探头型号的排列顺序为基本频率→晶片材料→晶片尺寸→探头种类→探头特征。

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，见表 4-3-2。

晶片尺寸：用阿拉伯数字表示，单位为 mm。其中圆晶片用直径表示，方晶片用长×宽表示，双晶探头晶片用晶片分割前的尺寸表示。

探头种类：用汉语拼音缩写字母表示，见表 4-3-3，直探头也可不标出。

探头特征用阿拉伯数字表示，斜探头为钢中折射角的正切值，双晶探头为钢中声束交叉区的深度，水浸探头为水中焦距。后缀 DJ 表示点聚焦，XJ 表示线聚焦。

##### 2. 举例

(1) 探头 2.5B20Z 2.5 表示频率为 2.5MHz，B 表示钛酸钡陶瓷，20 表示圆晶片直径为 20mm，Z 表示直探头。

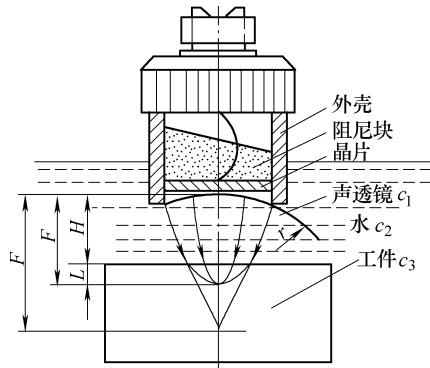


图 4-3-10 水浸探头结构图

表 4-3-2 晶片材料代号

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

表 4-3-3 探头种类代号

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

(2) 探头 5P12×14K2.5 5 表示频率为 5MHz, P 表示锆钛酸铅陶瓷, 12×14 表示矩形晶片尺寸为 12×14mm, K2.5 表示 K 值为 2.5。

(3) 探头 5T20FG10Z 5 表示频率为 5MHz, T 表示钛酸铅陶瓷, 20 表示圆晶片直径为 20mm (分割前尺寸), FG 表示分割探头, 10Z 表示钢中声束交叉区深度为 10mm (直探头)。

### 三、试块

与一般的测量方式一样为了保证检测结果的准确性、可重复性和可比性, 必须用一个具有已知固定特性的试样对检测系统进行校准。这种按一定用途设计制作的具有简单几何形状人工反射体或模拟缺陷的试样, 通常称为试块。试块和仪器、探头一样, 是超声检测中的重要器材。

#### (一) 试块的作用

(1) 确定检测灵敏度 超声检测灵敏度太高和太低都不好, 灵敏度太高杂波多, 辨别缺陷波困难, 灵敏度过低会造成漏检。因此在超声检测前, 常用试块上某一特性的人工反射体来调整检测灵敏度。

(2) 测试仪器和探头的性能 超声检测仪和探头的重要性能, 如放大线性、水

平线性、动态范围、灵敏度余量、分辨力、盲区、探头的入射点及  $K$  值等都要利用试块来进行测试。

(3) 调整扫描速度 利用试块可以调整仪器示波屏上水平刻度值与实际声程之间的比例关系, 即扫描速度, 以便对缺陷进行定位。

(4) 评判缺陷的大小 利用某些试块绘制出的距离-波幅曲线 (即使用 AVG) 来对缺陷定量是目前常用的当量方法之一。特别是对  $3N$  以内的缺陷, 采用试块比较法仍然是最有效的定量方法。

## (二) 试块的分类

超声检测用试块通常分为标准试块、对比试块和模拟试块三大类。

(1) 标准试块 标准试块通常是由权威机构制定的试块, 其特性与制作要求有专门的规定。标准试块通常具有规定的材质、形状、尺寸和表面状态。标准试块用于仪器探头系统旋钮测试校准, 如 IIW 试块。JB/T 4730—2005 标准中采用的标准试块有: 钢板检测用标准试块 CB I、CB II, 锻件用标准试块 CS I、CS II 及 CS III, 焊接接头用标准试块 CSK- I A、CSK- II A、CSK- III A 及 CSK- IV A。

(2) 对比试块 对比试块是以特定方法检测特定工件时采用的试块含有明确的人工反射体 (平底孔、槽等)。它与被检工件材料的声学特性相似, 其外形尺寸应能代表被检工件的特征, 试块厚度应与工件的厚度相对应。对比试块主要用于检测校准及评估缺陷的当量尺寸, 以及将所检出的不连续信号与试块中已知反射体产生的信号相比较。

(3) 模拟试块 模拟试块是含有模拟缺陷的试块, 可以是模拟工件中实际缺陷而制作的样件, 或者是在以往检测中所发现的含自然缺陷的样件。模拟试块主要用于检测方法的研究、无损检测人员资格考核和评定、评价和验证仪器探头系统的检测能力和检测工艺等。

## (三) 人工反射体

试块中的人工反射体应按其使用目的选择, 应尽可能与需检测的缺陷调整相近。通常的人工反射体有长横孔、短横孔、横通孔、平底孔、V 形槽和其他线切割槽等。

(1) 横通孔和长横孔 横通孔和长横孔具有轴对称的特点, 反射波幅比较稳定, 有线性缺陷的特征, 适用于各种  $K$  值探头。一般代表工件内部有一定长度的裂纹、未焊透、未熔合和条状夹渣。通常用于对接接头、堆焊层的超声检测中, 也有用于螺栓件和铸件检测的。

(2) 短横孔 短横孔在近场区表现为线状反射体特征, 在远场区表现为点状反射体特征。主要用于对接焊接接头的检测, 适用于各种  $K$  值的探头。

(3) 平底孔 平底孔一般具有点状面积型反射体的特点, 主要用于锻件、钢板、对接焊接接头、复合板及堆焊层的超声检测。通常适用于直探头和双晶探头的校准和检测。

(4) V形槽和其他线切割槽 V形槽和其他线切割槽具有表面开口的线性缺陷的特点,适用于钢板、钢管及锻件等工件的回波检测,也可模拟其他工件或对接接头的表面或近表面缺陷以调整检测灵敏度。检测或校准时通常用  $K_1$  斜探头,根据需要也可采用其他  $K$  值探头。

#### (四) 标准试块

##### 1. 标准试块的要求

标准试块的材质应均匀,内部杂质少,无影响使用的缺陷,容易加工,不易变形和腐蚀,具有良好的声学特性。试块的平行度、垂直度、表面粗糙度和尺寸精度都应经过严格检验并符合一定的要求。

标准试块要使用平炉镇静钢或电炉软钢制作,如20号碳钢。

标准试块检测面的表面粗糙度一般不低于  $Ra = 1.6 \mu\text{m}$ ,尺寸公差为  $\pm 0.05 \text{ mm}$ 。

试块上的平底孔应检验其直径、孔底表面粗糙度及平面度等。常用下述检验方法:先用无腐蚀性溶剂清洗孔并干燥,然后用注射器将硅胶注入孔内,抽出注射器,插入大头针,待硅胶凝固后借助大头针将硅胶模型取出,在光学投影仪上检查孔底的表面粗糙度和平整程度。

##### 2. 国内常用标准试块

(1) CB II 标准试块 CB II 标准试块是我国 JB/T 4730—2005 标准规定的标准试块。该试块适用于厚度为 20~250mm 的钢板检测,主要用于调节检测灵敏度。用单直探头检测板厚大于 20mm 的钢板时, CB II 标准试块应符合图 4-3-11 和表 4-3-4 的规定,试块厚度应与被检钢板厚度相近。

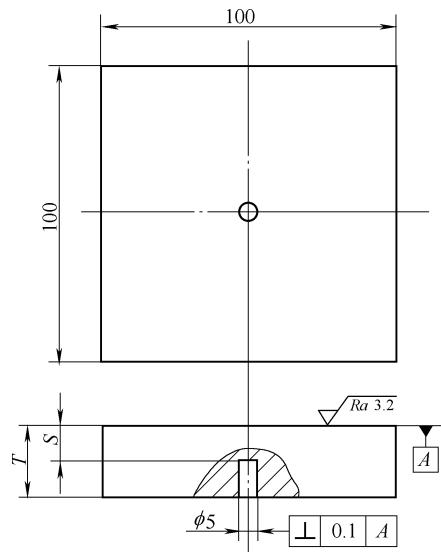


图 4-3-11 CB II 标准试块

表 4-3-4 CB II 标准试块

(单位: mm)

试块编号	被检钢板厚度	检测面到平底孔的距离 $S$	试块厚度 $T$
CB II-1	>20~40	15	$\geq 20$
CB II-2	>40~60	30	$\geq 40$
CB II-3	>60~100	50	$\geq 65$
CB II-4	>100~160	90	$\geq 110$
CB II-5	>160~200	140	$\geq 170$
CB II-6	>200~250	190	$\geq 220$

(2) CS I 标准试块 CS I 标准试块是我国 JB/T 4730—2005 标准规定的标准试块，主要用于锻件的超声检测，其形状和尺寸应符合图 4-3-12 和表 4-3-5 的规定。

CS I 标准试块的主要用途如下：

1) 测试检测仪的水平线性、垂直线性和动态范围：用大平底或平底孔测。

2) 测定纵波直探头的实用 AVG 曲线：用大平底或平底孔测。

3) 测试直探头和检测仪的组合性能：用  $\phi 2\text{mm} \times 200\text{mm}$  平底孔测试灵敏度余量。

4) 调节检测灵敏度：用大平底或平底孔调。

5) 评定缺陷当量尺寸：多为 3N 以内的缺陷定量。

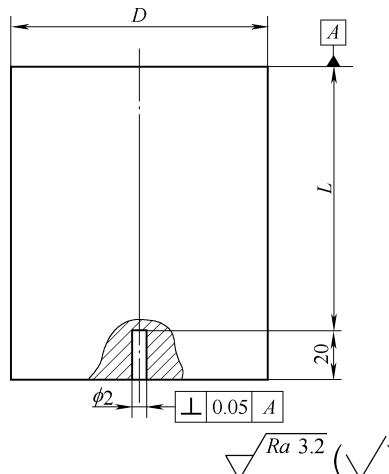


图 4-3-12 CS I 标准试块

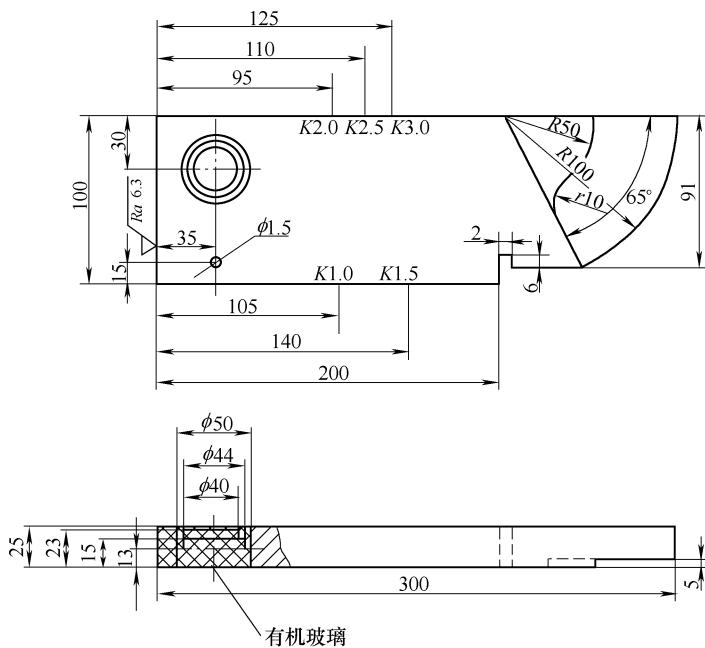
表 4-3-5 CS I 标准试块尺寸 (单位：mm)

试块序号	CS I -1	CS I -2	CS I -3	CS I -4
<i>L</i>	50	100	150	200
<i>D</i>	50	60	80	80

(3) CSK- I A 试块 CSK- I A 试块是我国 JB/T 4730—2005 标准规定的标准试块，是在 IIW (国际焊接学会的缩写) 试块基础上经过改进后得到的。IIW 试块是国际焊接学会标准试块，该试块是由荷兰代表首先提出的，故称荷兰试块。CSK- I A 试块的结构及主要尺寸如图 4-3-13 所示。

CSK- I A 试块的主要用途如下：

- 1) 调整纵波检测范围和扫描速度 (时基线比例)：利用试块上 25 或 100 测量。
- 2) 测量仪器的水平线性、垂直线性和动态范围：利用试块上 25 或 100 测量。
- 3) 测直探头和仪器的分辨力：利用试块上 85、91 和 100 测量。
- 4) 测斜探头和仪器的分辨力：利用有机玻璃  $\phi 50\text{mm}$ 、 $\phi 44\text{mm}$  和  $\phi 40\text{mm}$  台阶孔测量。
- 5) 测直探头和提前组合后的穿透能力：利用试块有机玻璃底面的多次反射波。
- 6) 测直探头和仪器的盲区范围：利用试块上  $\phi 50\text{mm}$  有机玻璃圆弧面与侧面间距 5mm 和 10mm 测量。
- 7) 测斜探头的入射点：利用试块上  $R100\text{mm}$  圆弧面测。
- 8) 测斜探头的入射角：折射角在  $35^\circ \sim 76^\circ$  范围内用  $\phi 50\text{mm}$  孔测量。折射角在



注：尺寸误差不大于 $\pm 0.05\text{mm}$ 。

✓  $\sqrt{Ra \ 3.2}$  (✓)

图 4-3-13 CSK-1A 试块

74°~80°范围内用Φ1.5mm圆孔测量。

9) 测斜探头和仪器的组合灵敏度余量: 利用试块上  $R100\text{mm}$  和  $\phi 1.5\text{mm}$  圆孔测量。

10) 调整横波检测范围和扫描速度(时基线比例):纵波声程91相对于横波声程50,可利用试块上91来调整横波的检测范围和扫描速度。例如:调节横波1:1,先用直探头对准91底面,使底波B1、B2分别对准50、100,然后换上横波探头并对准R100mm圆弧面,找到最高回波,并调至100即可。

11) 测斜探头的声束轴线的偏离: 利用试块的直角棱边测。

(4) CSK-ⅡA、CSK-ⅢA 和 CSK-ⅣA 标准试块 CSK-ⅡA、CSK-ⅢA 和 CSK-ⅣA 试块是 JB/T 4730—2005 标准中规定采用的焊缝超声检测用的横孔标准试块。CSK-ⅡA 试块如图 4-3-14 所示, CSK-ⅢA 试块如图 4-3-15 所示, CSK-ⅣA 试块如图 4-3-16 所示。

我国的 CSK 系列标准试块比较特殊, 要求试块的材质与工件相同或相近。CSK-IIA、CSK-III A 和 CSK-IV A 试块的主要作用是测定横波距离 - 波幅曲线、斜探头的  $K$  值和调整横波扫描速度和灵敏度等。其中 CSK-IIA 和 CSK-III A 适用于壁厚范围为 8~120mm 的焊缝, CSK-IV A 系列试块适用于壁厚范围 120~400mm 的焊缝。

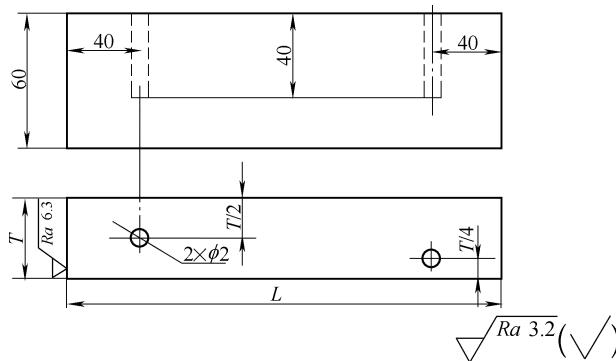


图 4-3-14 CSK-IIA 试块

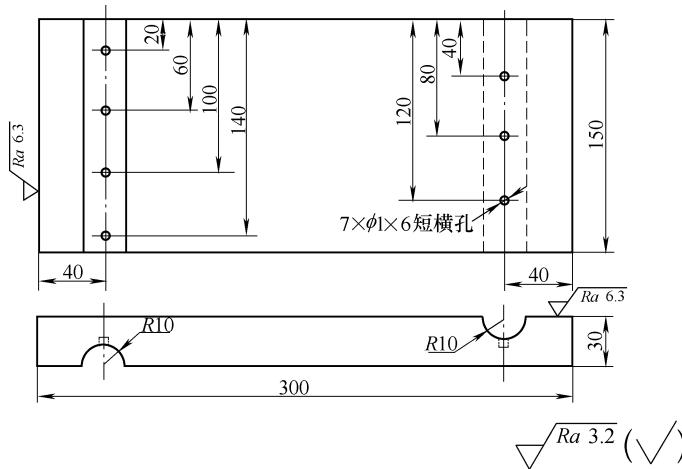


图 4-3-15 CSK-III A 试块

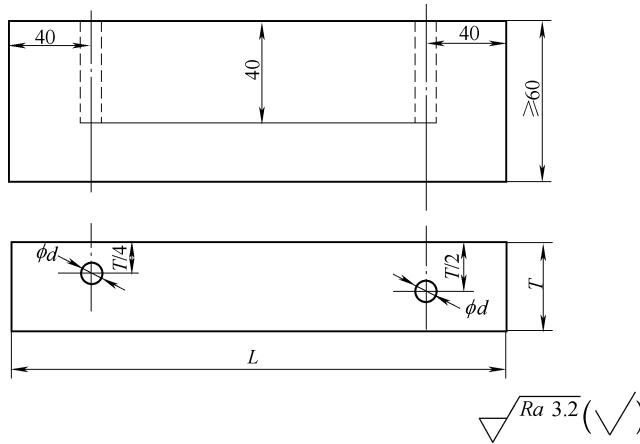


图 4-3-16 CSK-IV A 试块

## 四、仪器和探头的性能及其测试

仪器和探头的性能包括仪器的性能、探头的性能以及仪器和探头的组合性能。了解这些性能，并定期进行测试和校验，确保检测结果的可靠性，保证超声检测工作的质量是十分必要的。

### (一) 超声检测仪的主要性能

超声检测仪的性能主要有垂直线性、水平线性和动态范围等，且只与仪器有关，与探头无关。

#### 1. 垂直线性

仪器的垂直线性是指仪器示波屏上的波高与探头接收的信号之间成正比的程度。放大器和示波管的性能影响垂直线性。

垂直线性好坏常以垂直线性误差来表示，其测试步骤如下：

- 1) [抑制] 至 0, [衰减器] 保留 30dB 衰减余量。
- 2) 直探头通过耦合剂置于 CSK- IA (或其他试块) 上，对准 25mm 底面，并用压块恒定压力。
- 3) 调节仪器使试块上某次底波位于示波屏的中间，并达满幅度 100%，但不饱和，作为 0dB。
- 4) 固定 [增益] 和其他旋钮，调 [衰减器]，每次衰减 2dB，并记下相应的波高  $H_i$  填入表 4-3-6 中，直到衰减量达到 24dB。

表 4-3-6 衰减量记录表

衰减量 $\Delta$ dB		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
回波高度	实测	绝对波高 $H_i$												
		相对波高 (%)												
		理想相对波高 (%)	100	79.4	63.1	50.1	39.8	31.6	25.1	19.9	15.8	12.6	10	7.9
偏差 (%)														

注：实测相对波高 =  $\frac{H_i(\text{衰减 } \Delta_i \text{ dB 后波高})}{H_0(\text{衰减 } 0 \text{ dB 后波高})} \times 100\%$

$$\text{理想相对波高} = 10 - \frac{\Delta_i}{20} \times 100\% \quad (20 \lg \frac{H_i}{H_0} = -\Delta_i)$$

#### 5) 计算垂直线性误差

$$D = (|d_1| - |d_2|) \% \quad (4-3-2)$$

#### 2. 水平线性

仪器水平线性是指仪器示波屏上时基线显示的水平刻度值与实际声程之间成正比的程度。

水平线性的好坏常用水平线性误差来表示，其测试步骤如下：

- 1) 将直探头置于 CSK- IA (或其他试块) 上，对准 25mm 厚的大平底面，如

图 4-3-17a 所示。

2) 调 [微调]、[水平] 或 [脉冲移位] 等旋钮, 使示波屏上出现五次底波  $B_1$  到  $B_5$ , 且使  $B_1$  前沿对准 2.0,  $B_5$  对准 10.0, 如图 4-3-17b 所示。记录  $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$  与水平刻度值 4.0、6.0、8.0 的偏差值  $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 。

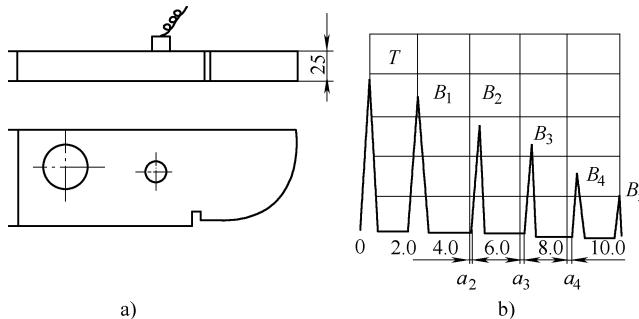


图 4-3-17 水平线性的测试

### 3) 计算水平线性误差

$$\delta = \frac{|a_{\max}|}{0.8b} \times 100\% \quad (4-3-3)$$

式中  $a_{\max}$  ——  $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$  中最大者;

$b$  —— 示波屏水平满刻度值。

一般要求仪器的水平线性误差  $\delta \leq 2\%$ 。

仪器水平线性的好坏直接影响测距精度, 进而影响缺陷定位。一般规定, 检测仪的水平线性误差不得大于 2%。

## 3. 动态范围

动态范围接收在增益不变时产生检测仪荧光屏上能分辨的最大反射波高与最小反射波高之比, 也就是仪器能检测的最大缺陷和最小缺陷之比, 即仪器能够容纳回波信号的能力。通常用 dB 为单位。

动态范围大, 说明仪器对反射回波信号的容纳量大, 就是在同样的增益条件下, 仪器既能评价大缺陷, 又能检测出小缺陷。一般规定, 检测仪的动态范围不得小于 26dB。

## (二) 探头的主要性能

探头的性能主要有频率特性、距离幅度特性、声束特性包括双峰、声束对称性和声束偏斜角等。对斜探头来说, 还有入射点、前沿距离及折射角 (或  $K$  值) 等。探头的性能只与探头有关。

### 1. 斜探头的入射点与前沿距离

斜探头的入射点是指声束轴线与检测面的交点。探头的前沿距离是指斜探头入射点到探头前端面的距离。前沿距离也称前沿长度  $L_0$ 。测定斜探头的入射点和前沿

距离是为了便于给缺陷定位和测定斜探头的  $K$  值。

如图 4-3-18 所示, 将斜探头放置于 CSK- I A 试块上  $R100\text{mm}$  圆心处, 并朝向  $R100\text{mm}$  圆弧。使  $R100\text{mm}$  圆弧曲面回波达最高时斜楔底面与试块圆心的重合点就是该探头的入射点。这时探头的前沿长度为 ( $R100\text{mm}$  探头前端至圆弧的距离)

$$L_0 = 100 - M$$

注意试块上  $R$  一般应大于该探头的钢中近场区长度  $N$  的两倍, 因为近场区内声束轴线上的声压不一定最高, 会存在测试误差。

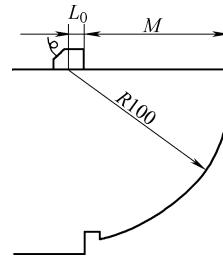


图 4-3-18 入射点的测定

## 2. 斜探头的折射角和 $K$ 值

我国用  $K$  值表示探头的折射角,  $K$  值就是折射角的正切值, 即  $K = \tan\beta$ 。对一个具体的斜探头来说, 其入射角是固定的, 但它的折射角 (或  $K$  值) 是随着材料的声速的不同而不同。

斜探头  $K$  值是指被探钢工件中横波折射角  $\beta_s$  的正切值,  $K = \tan\beta_s$ 。斜探头的  $K$  值常用 II W 试块或 CSK- I A 试块上的  $\phi 50\text{mm}$  和  $\phi 1.5\text{mm}$  横孔来测定。如图 4-3-19 所示。当探头置于  $B$  位置时, 可测定  $\beta_s$  为  $35^\circ \sim 60^\circ$  ( $K = 0.7 \sim 1.73$ ); 探头置于  $C$  位置时, 可测定  $\beta_s$  为  $60^\circ \sim 75^\circ$  ( $K = 1.73 \sim 3.0$ ); 探头置于  $D$  位置时, 可测定  $\beta_s$  为  $75^\circ \sim 80^\circ$  ( $K = 3.73 \sim 5.67$ )。

下面以  $C$  位置为例说明斜探头的折射角 ( $K$  值) 的测试方法。探头对准试块上  $\phi 50\text{mm}$  横孔, 前后移动探头找到最高回波, 此时可从探头入射点所对应的刻度读出  $\beta_s$  或  $K$  值。为获得较准确的值, 找到最高回波时, 测出探头前边沿至试块端头的距离  $L$ , 则有

$$K = \frac{L + L_0 - 35}{30} \quad (4-3-4)$$

式中  $L_0$ ——探头的前沿长度。

值得注意的是: 测定探头的  $K$  值或  $\beta_s$  同样应在近场区以外进行, 因为近场区内声压最高点不一定在声速轴线上, 测试误差会较大。

## 3. 斜探头的双峰

对同一反射体 (缺陷) 产生两个波峰的现象称为双峰。双峰的产生是由声束的分叉引起的。

双峰现象会影响对缺陷的定位和判断缺陷的个数, 因此, 经测试有明显双峰的探头就不能用于检测。

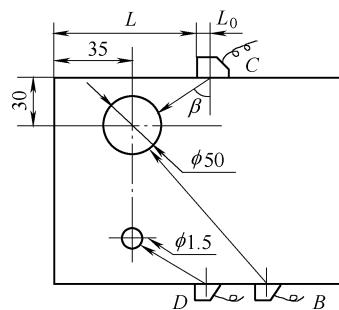


图 4-3-19 斜探头  $K$  值的测试

双峰的测试除了用频谱分析法外，也可使用超声检测仪的估计方法：将探头置于有横通孔的试块上，对着横通孔前后移动，若横通孔的回波出现两个波峰，则说明该探头有双峰现象。

### (三) 仪器和探头的组合性能

仪器和探头的组合性能主要有灵敏度、盲区、分辨力和信噪比等。仪器和探头组合在一起的综合性能不仅与仪器有关，而且和探头也有关。

#### 1. 灵敏度和灵敏度余量

灵敏度是指整个检测系统（主要是仪器和探头组合在一起）所具有的能够检测出最小缺陷的能力，这称为仪器和探头的综合灵敏度，常用灵敏度余量来表示。

##### (1) 仪器与直探头组合的灵敏度余量的测定

1) 仪器 [增益] 至最大，[抑制] 至 0，[发射强度] 至“强”，连接探头，并使探头悬空，调 [衰减器] 使电噪声电平不大于 10%，记下此时的 [衰减器] 的读数  $N_1$  dB。

2) 将探头对准图 4-3-20a 所示的 200mm 声程处的  $\phi 2$ mm 平底孔，调 [衰减器] 使  $\phi 2$ mm 平底孔回波高达 50%，记下此时 [衰减器] 读数  $N_2$  dB。则仪器与探头的灵敏度余量  $N$  为

$$N = N_2 - N_1 \quad (4-3-5)$$

一般要求仪器与直探头组合的灵敏度余量要不小于 30dB。

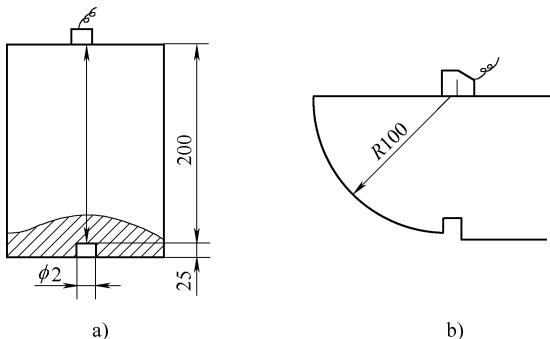


图 4-3-20 灵敏度余量的测定

##### (2) 仪器与斜探头组合的灵敏度余量的测定

1) [增益] 至最大，[抑制] 至 0，发射强度至“强”，连接探头并悬空，记下电噪声电平不大于 10% 的衰减量  $N_1$ 。

2) 探头置于 IIW 试块上对准  $R100$ mm 圆弧面，如图 4-3-20b 所示。前后移动探头获取  $R100$ mm 圆弧面反射的最大波高，将其调为满幅度 50% 时，记下衰减量  $N_2$ 。则仪器与斜探头组合的灵敏余量  $N$  为

$$N = N_2 - N_1 \quad (4-3-6)$$

一般要求仪器和斜探头的灵敏度余量不小于 40dB。

灵敏度余量大，说明仪器和探头的综合灵敏度高，灵敏度越高，则检测系统能检测出的缺陷越小。不同的仪器和不同的探头组合有着不同的灵敏度余量。

## 2. 盲区和始波宽度

盲区指的是在规定的检测灵敏度条件下，从检测面到能够检测出缺陷的最近距离，单位为 mm。盲区的大小主要与仪器的阻塞和始波宽度有关。

阻塞是指接收器在接收到发射脉冲信号后短暂出现灵敏度降低或失灵的现象。阻塞也称为自锁。

盲区的测定可在盲区试块上进行，如图 4-3-21 所示。示波屏上能清晰地显示  $\phi 1$ mm 平底孔独立回波的最小距离即为所测的盲区。

如果没有盲区试块，也可利用 IIW 或 CSK- I A 试块来估计盲区的范围，如图 4-3-22 所示。若探头于 I 处有独立回波，则盲区小于或等于 5mm。若 I 处无独立回波，II 处有独立回波，则盲区在 5~10mm 范围内；若 II 处仍无独立回波，则盲区大于 10mm。

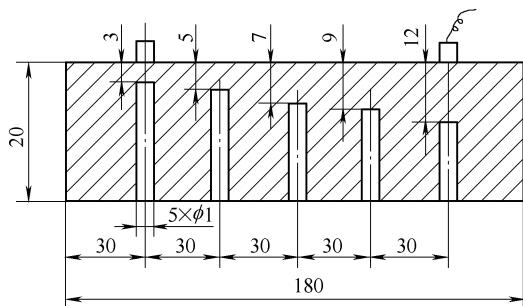


图 4-3-21 用盲区试块测试盲区

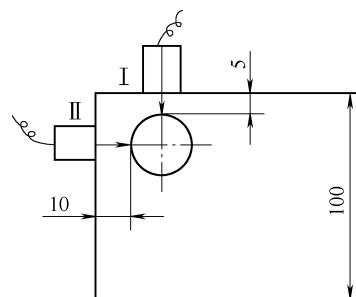


图 4-3-22 用 CSK- I A 试块测试木器漆

盲区大，始波宽度大，对检测是很不利的，因为盲区内的缺陷被始脉冲所掩盖而无法检出。如果要在盲区内检测就必须采用别的办法，如采用双晶探头可以大大减小盲区的影响。

## 3. 分辨力

分辨力指的是超声检测系统在荧光屏上能够区分开两个相邻缺陷回波的能力。分辨力用 mm 或 dB 为单位。

影响分辨力的主要因素是脉冲宽度，脉冲宽度大，则分辨力低；脉冲宽度窄，则分辨力高。

分辨力用距离表示时，距离越小说明分辨力越高；分辨力用分贝表示时，分贝值大，则说明分辨力高。

分辨力越高，说明检测系统区分两个相邻缺陷的距离越小。测试分辨力可以评定缺陷的个数和量相邻缺陷的距离也就是说，测试分辨力对于评定密集性缺陷有重

要意义。

(1) 仪器与直探头组合分辨力的测定 抑制旋钮至于“0”，探头置于CSK- I A试块上如图4-3-23a所示，左右移动探头，使示波屏上出现85mm、91mm、100mm三个台阶的反射回波A、B、C。如图4-3-23b所示，则波峰和波谷的分贝差 $20\lg(a/b)$ 表示分辨力。

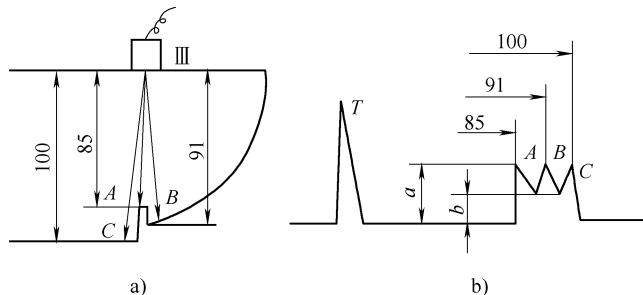


图4-3-23 直探头分辨力测试

a) 测试位置 b) 波形显示

一般要求直探头远场分辨力不小于30dB。

(2) 仪器与斜探头组合分辨力的测定

1) 斜探头置于CSK- I A试块上，如图4-3-24a所示，对准 $\phi 50\text{mm}$ 、 $\phi 44\text{mm}$ 、 $\phi 40\text{mm}$ 三个台阶孔，示波屏上便出现三个反射波。

2) 平行移动探头并调节仪器，使 $\phi 50\text{mm}$ 、 $\phi 44\text{mm}$ 圆弧面回波等高，如图4-3-24b，其波峰为 $h_1$ ，波谷为 $h_2$ ，则其分辨力 $X$ 为

$$X = 20\lg \frac{h_1}{h_2} \quad (4-3-7)$$

实际测试时，用[衰减器]将 $h_1$ 衰减到 $h_2$ ，其衰减量 $\Delta N$ 为分辨力，即 $X = \Delta N\text{dB}$ 。

一般要求斜探头远场分辨力 $X \geq 6\text{dB}$ 。

#### 4. 噪声比

噪声比指的是荧光屏上有用的最小回波幅度与无用的最大噪声幅度之比。噪声是对有用信号的接收、辨别或处理起干扰作用的无用信号，噪声也称为杂波。

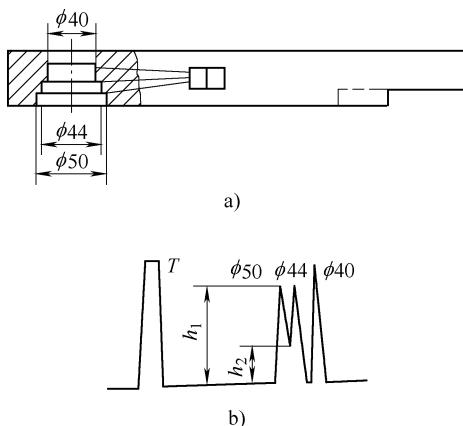


图4-3-24 斜探头分辨力测试

a) 测试位置 b) 波形显示

信噪比高，说明杂波小，就能清楚而准确的探出缺陷；如果信噪比太低，就会引起误判或漏检，甚至会无法进行检测。

一般以  $200/\phi 1\text{mm}$  平底孔反射回波  $H_{\text{信}}$  与噪声杂波高  $H_{\text{噪}}$  之间的分贝差来表示信噪比的大小，即  $\Delta = 20\lg (H_{\text{信}}/H_{\text{噪}})$ 。

## 第四章

# 脉冲反射法超声检测方法的分类与特点

## 一、超声检测方法分类

超声检测方法按原理分类可分为脉冲反射法、穿透法和共振法。

### (一) 脉冲反射法

超声波探头发射脉冲波到被检试件内，根据反射波的情况来检测试件缺陷的方法，称为脉冲反射法。脉冲反射法包括缺陷回波法、底波高度法和多次底波法。

#### 1. 缺陷回波法

根据仪器示波屏上显示的缺陷波形进行判断的方法，称为缺陷回波法。该方法是脉冲反射法的基本方法。

图 4-4-1 所示为缺陷回波法的基本原理，当试件完好时，超声波可顺利传播到达底面，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 4-4-1a 所示。若试件中存在缺陷，则在检测图形中，底面回波前有表示缺陷的回波  $F$  如图 4-4-1b 所示。

#### 2. 底波高度法

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。如果试件内存在缺陷，底面回波高度会下降甚至消失，如图 4-4-2 所示。这种依据底面回波的高度变化判断试件缺陷情况的检测方法，称为底波高度法。

底波高度法的特点在于同样投影

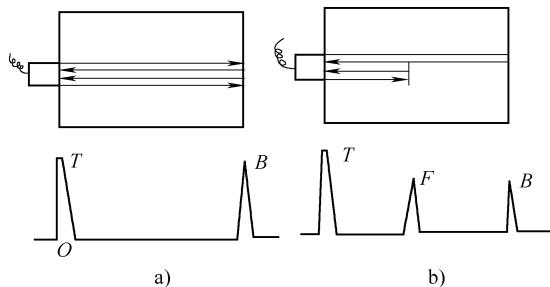


图 4-4-1 缺陷回波法基本原理

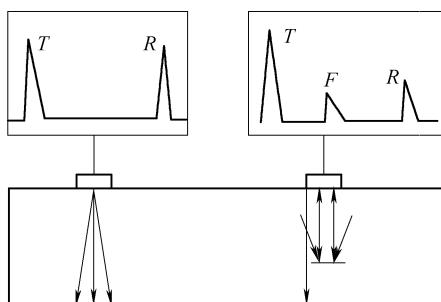


图 4-4-2 底波高度法

大小的缺陷可以得到同样的指示，而且不出现盲区，但是要求被探试件的检测面与底面平行，耦合条件一致。由于该方法检出缺陷定位定量不便，灵敏度较低，因此，实用中很少作为一种独立的检测方法，而经常作为一种辅助手段，配合缺陷回波法发现某些倾斜的和小而密集的缺陷。

### 3. 多次底波法

如图 4-4-3 所示，当透入试件的超声波能量较大，而试件厚度较小时，超声波可在检测面与底面之间往复传播多次，示波屏上出现多次底波  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  等。如果试件存在缺陷，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衰减的规律，并显示出缺陷回波。这种依据底面回波次数来判断试件有无缺陷的方法，即为多次底波法。

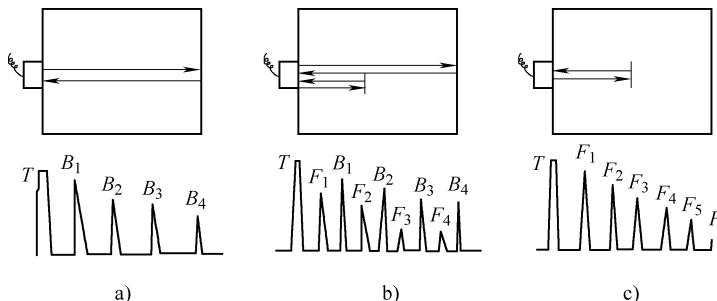


图 4-4-3 多次底波法  
a) 无缺陷 b) 小缺陷 c) 大缺陷

多次底波法主要用于厚度不大、形状简单、检测面与底面平行的试件检测，缺陷检出的灵敏度低于缺陷回波法。

### (二) 穿透法

穿透法是依据脉冲波或连续波穿透试件之后的能量变化来判断缺陷情况的一种方法，如图 4-4-4 所示。

穿透法常采用两个探头，一个作发射用，一个作接收用，分别放置在试件的两侧进行检测，图 4-4-4a 所示为无缺陷时的波形，图 4-4-4b 所示为有缺陷时的波形。

### (三) 共振法

如频率可调的连续超声波在被检工件内传播，当试件的厚度为超声波的半波长

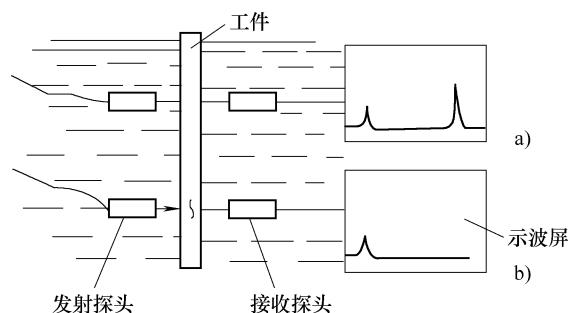


图 4-4-4 穿透法

的整数倍时，将引起共振，仪器显示出共振频率，用相邻的两个共振频率之差可算出试件厚度。

当试件内存在缺陷或工件厚度发生变化时，将改变试件的共振频率。依据试件的共振特性，来判断缺陷情况和工件厚度变化的方法称为共振法。共振法常用于试件测厚。目前已很少使用共振法测厚。

## 二、按波形分类

根据检测采用的波形，可分为纵波法、横波法、表面波法、板波法及爬波法等。

### (一) 纵波法

使用直探头发射纵波，进行检测的方法，称为纵波法。此法波束垂直入射至试件检测面，以不变的波型和方向透入试件，所以又称为垂直入射法，简称垂直法，如图 4-4-5 所示。

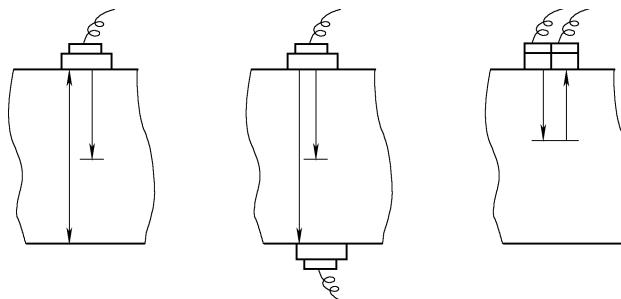


图 4-4-5 纵波法（垂直法）

纵波法分为单晶探头反射法、双晶探头反射法和穿透法，常用的是单晶探头反射法。

#### 1. 纵波法的优点

- 1) 垂直入射，对与检测面平行的缺陷检出效果最佳。
- 2) 对于同一介质，纵波传播速度大于其他波形的速度，对相同频率而言波长最长，因而穿透能力强，可检测工件的厚度是所有波型中最大的，晶界反射或散射的敏感性较差，可用于粗晶材料的检测。
- 3) 纵波法检测时，波形和传播方向不变，所以缺陷定位比较方便。

#### 2. 纵波法的缺点

- 1) 难于发现垂直于或接近垂直于检测面的缺陷。
- 2) 于盲区和分辨力的限制，其中反射法只能发现试件内部离检测面一定距离以外的缺陷。

因此垂直法主要用于铸造、锻压、轧材及其制品的检测。

## (二) 横波法

将纵波通过楔块、水等介质倾斜入射至试件检测面，利用波型转换得到横波进行检测的方法，称为横波法。由于透入试件的横波束与检测面成锐角，所以又称斜射法，如图 4-4-6 所示。

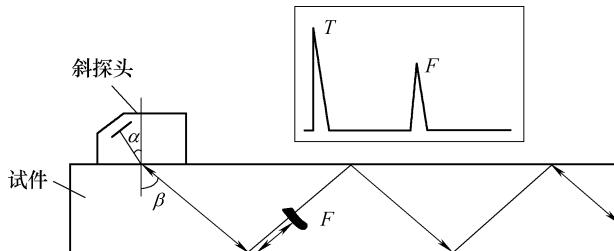


图 4-4-6 横波法

### 1. 横波法的优点

- 1) 倾斜入射，能检测垂直于或接近垂直于检测面的缺陷。
- 2) 同一介质中同一频率的超声波波长较短，灵敏度相对较高。

### 2. 横波法的缺点

- 1) 正因为波长较短，在介质中的衰减较大，检测距离较短。
- 2) 倾斜入射，缺陷定位相对较复杂。

此方法主要用于管材、焊缝的检测。其他试件检测时，则作为一种有效的辅助手段，用以发现垂直检测法不易发现的缺陷。

## (三) 表面波法

使用表面波进行检测的方法，称为表面波法。这种方法主要用于表面光滑的试件。

表面波波长比横波波长还短，因此衰减也大于横波。同时，它仅沿表面传播，对于表面上的复层、油污及粗糙等反应敏感，并被大量地衰减。利用此特点可以通过手沾油在声束传播方向上进行触摸并观察缺陷回波高度的变化，对缺陷定位。

## (四) 板波法

使用板波进行检测的方法，称为板波法，主要用于薄板、薄壁管等形状简单的试件检测。检测时板波充塞于整个试件，可以发现内部和表面的缺陷。

## 三、按探头数量分类

### (一) 单探头法

使用一个探头兼作发射和接收超声波的检测方法称为单探头法，如图 4-4-5 和图 4-4-6 所示。单探头法操作方便，大多数缺陷可以检出，是目前最常用的一种

方法。

单探头法检测，对于与波束轴线垂直的片状缺陷和立体型缺陷的检出效果最好。与波束轴线平行的片状缺陷难以检出。当缺陷与波束轴线倾斜时，则根据倾斜角度的大小，能够收到部分回波或者因反射波束全部反射在探头之外而无法检出。

### (二) 双探头法

使用两个探头（一个发射，一个接收）进行检测的方法称为双探头法，主要用于发现单探头法难以检出的缺陷。

双探头法又可根据两个探头排列方式和工作方式，进一步分为并列式、交叉式、V形串列式、K形串列式、串列式等。如图4-4-7所示。

(1) 并列式 两个探头并列放置，检测时两者做同步移动。但直探头并列放置时，通常是一个探头固定，另一个探头移动，以便发现与检测面倾斜

的缺陷，如图4-4-7a所示。分割式探头就是将两个并列的探头组合在一起，具有盲区小、较高的分辨能力和信噪比，适用于薄试件，近表面缺陷的检测。

(2) 交叉式 两个探头轴线交叉，交叉点为要检测的部位，如图4-4-7b所示。此种检测方法可用来发现与检测面垂直的片状缺陷，在焊缝检测中，常用来发现横向缺陷。

(3) V形串列式 两探头相对放置在同一面上，一个探头发射的声波被缺陷反射，反射的回波刚好落在另一个探头的入射点上，如图4-4-7c所示。此种检测方法主要用来发现与检测面平行的片状缺陷。

(4) K形串列式 两探头以相同的方向分别放置于试件的上下表面上。一个探头发射的声波被缺陷反射，反射的回波进入另一个探头，如图4-4-7d所示。此种检测方法主要用来发现与检测面垂直的片状缺陷。

(5) 串列式 两探头一前一后，以相同方向放置在同一表面上，一个探头发射的声波被缺陷反射的回波，经底面反射进入另一个探头，如图4-4-7e所示。此种检测方法用来发现与检测面垂直的片状缺陷（如电渣焊厚焊缝的破口边沿未熔合）。两个探头在一个表面上移动，操作比较方便，是一种常用的检测方法。

### (三) 多探头法

使用两个以上的探头成对地组合在一起进行检测的方法，称为多探头法。多探头法的应用，主要是通过增加声束来提高检测速度或发现各种取向的缺陷。通常与多通道仪器和自动扫描装置配合，如图4-4-8所示。

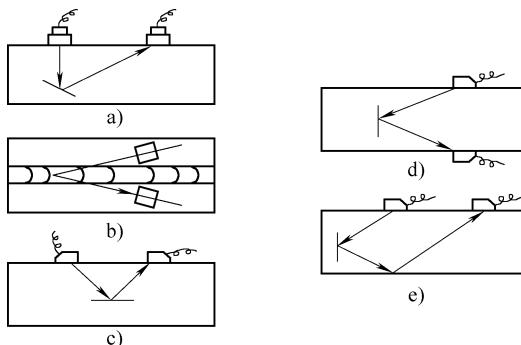


图4-4-7 双探头排列方式

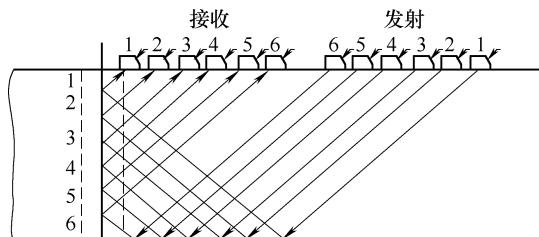


图 4-4-8 多探头法

#### 四、按探头接触方式分类

依据检测时探头与试件的接触方式，可以分为接触法与液浸法。

##### (一) 直接接触法

探头与试件检测面之间，涂有很薄的耦合剂层，因此可以看作为两者直接接触，这种检测方法称为直接接触法，图 4-4-5 和图 4-4-6 所示均属直接接触法。

此方法操作方便，检测图形较简单，判断容易，检出缺陷灵敏度高，是实际检测中用得最多的方法。但是，使用直接接触法检测的试件，要求检测面的表面粗糙度较低。

##### (二) 液浸法

将探头和工件浸于液体中以液体作耦合剂进行检测的方法，称为液浸法。耦合剂可以是水，也可以是油。当以水为耦合剂时，称为水浸法。

液浸法检测，探头不直接接触试件，所以此方法适用于表面粗糙的试件，探头也不易磨损，耦合稳定，检测结果重复性好，便于实现自动化检测。

液浸法按检测方式不同又分为全浸没式和局部浸没式。

##### 1. 全浸没式

被检试件全部浸没于液体之中，适用于体积不大，形状复杂的试件检测，如图 4-4-9a 所示。

##### 2. 局部浸没式

把被检试件的一部分浸没在水中或被检试件与探头之间保持一定的水层而进行检测的方法，适用于大体积试件的检测。局部浸没法又分为喷液式、通水式和满溢式。

1) 喷液式：超声波通过以一定压力喷射至检测表面的液流进入试件，称为喷液式，如图 4-4-9b 所示。

2) 通水式：借助于一个专用的有进水、出水口的液罩，以使罩内经常保持一定容量的液体，这种方法称为通水式，如图 4-4-9c 所示。

3) 满溢式：满溢罩结构与通水式相似，但只有进水口，多余液体在罩的上部溢出，这种方法称为满溢式，如图 4-4-9d 所示。

根据探头与试件检测面之间液层的厚度, 液浸法又可分为高液层法和低液层法。

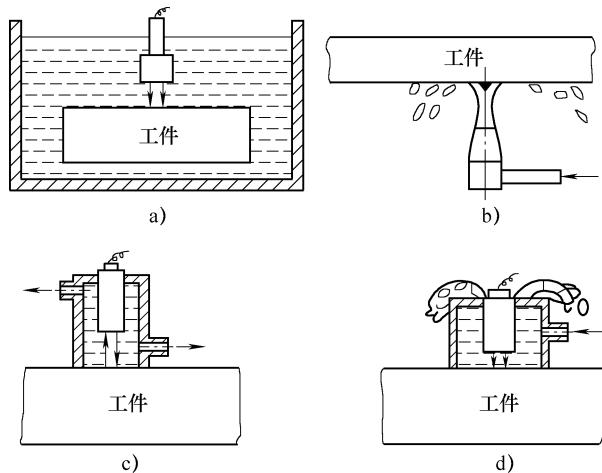


图 4-4-9 液浸法

# 第五章

## 脉冲反射法超声检测通用技术

### 一、对检测对象的了解与要求

1) 为了提高检测结果的可靠性,应对受检件的材料牌号、性能,制造方法和工艺特点,影响其使用性能的缺陷种类及形成原因、缺陷的最大可能取向及大小、受检部位受力状态及检收标准进行了解。

2) 所有受检件一般在正式机加工之前,经目视检验合格后进行。当采用接触法时,表面粗糙度  $Ra$  值一般应为  $1.6 \sim 3.2 \mu\text{m}$ 。必要时应通过添加专门的加工工序,采用经批准的加工方法准备检测表面。

### 二、检测条件的选择

#### 1. 入射方向和检测面的选择

(1) 入射方向的选择 入射方向的选择应使声束中心线与缺陷延伸方向面,特别是最大受力方向垂直的缺陷面尽可能地接近垂直,并力求得到缺陷最大信号。缺陷的最大可能取向应根据结构、工艺特点和低倍组织的研究来判定。

选择入射方向还应注意被测工件形状和结构可能产生反射或变形信号,给缺陷的判断增加困难。所以,入射应选择在不会出现这些干扰信号的方向上。

根据确定的入射方向,选择直探头法或是斜探头法以及斜探头法的扫查方向。

(2) 检测面的选择 接触法的检测面应规则对称,底波法最好应有平行的检测面和底面。考虑到盲区,必要时应从正、反两面进行检查。当从一面检查灵敏度不够时,也应从正、反两面进行检查。还应根据工件的厚度、形状综合考虑。

#### 2. 检测仪的选择

超声检测仪是超声检测的主要设备。目前国内外检测仪种类繁多,性能各异,检测前应根据检测要求和现场条件来选择检测仪。首先要选择仪器稳定性、重复性和可靠性好的仪器,检测仪的各项指标要达到有关标准的要求。

1) 就性能而言,一般应考虑以下原则:

- ① 对于定位要求高的情况，应选择水平线性误差小的仪器。
- ② 对于定量要求高的情况，应选择垂直线性好，衰减器精度高的仪器。
- ③ 对于大型零件的检测，应选择灵敏度余量高、信噪比高及功率大的仪器。
- 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、分辨力好的仪器。
- ⑤ 对于室外现场检测，应选择重量轻，示波屏亮度好，抗干扰能力强的携带式仪器。

2) 根据所测对象要考虑的问题：

- ① 根据生产量及是否连续，确定选择自动检测仪或手工检测仪。
- ② 对于自动检测仪，根据被检对象情况选择单通道或多通道设备。
- ③ 对于手工检测仪，根据检测现场的位置及条件选择较大型的检测仪或是便携型的检测仪。
- ④ 检测工作的要求较高或需要提供较客观的现场记录可选择数字式超声检测仪。

### 3. 探头的选择

探头是超声检测的重要工具之一，其种类很多，结构形式也不一样。检测前应根据被检对象的形状、衰减和技术要求来选择探头。探头的选择包括探头形式、频率、晶片尺寸和斜探头  $K$  值的选择等。

(1) 形式的选择 常用的探头形式有纵波直探头、横波斜探头、表面波探头、双晶探头及聚焦探头等。其选择主要取决于所选择的检测方法，一般根据工件的形状和可能出现缺陷的部位、方向等条件来选择检测方法，一旦方法确定，应采用什么形式的探头也就确定了。

例如锻件、钢板的检测主要检测平行于锻压（轧制）面的夹层、折叠等缺陷，检测方法选择纵波垂直检测法，则探头一定选用纵波直探头。

又如焊缝检测主要检测与检测面垂直或成一定角度的未焊透、未熔合及裂纹等危害性缺陷，检测方法选择横波倾斜入射的检测方法，探头一定选用横波斜探头。

表面波探头、双晶探头及液浸聚焦探头的选择也都是根据各自所用的检测方法确定的。

(2) 频率的选择 超声检测所使用的频率一般为  $0.5 \sim 10\text{MHz}$ ，在选择时一般应考虑以下因素：

- 1) 由于波的绕射，超声检测灵敏度大约为  $\lambda/2$ ，因此提高频率，有利于发现更小的缺陷。
- 2) 频率高，脉冲宽度小，分辨率高，有利于区分相邻缺陷。
- 3) 由  $\theta = \arcsin 1.22\lambda/D$  可知，频率高，波长短，则半扩散角小，声束指向性好，能量集中，有利于发现缺陷并对缺陷定位。
- 4) 由  $N = D^2/4\lambda$  可知，频率高，波长短，近场区长度大，对检测不利。

5) 由  $\alpha_s = c_2 F d^3 f^4$  可知, 频率增加, 衰减急剧增加, 对检测不利。

由以上分析可知, 频率的高低对检测有较大的影响。频率高, 灵敏度和分辨率高, 指向性好, 对检测有利。但频率高, 近场区长度大, 衰减大, 又对检测不利。实际检测中要全面分析考虑各方面的因素, 合理选择频率。一般在保证检测灵敏度的前提下尽可能选用较低的频率。

对于晶粒细的锻件、轧制件和焊接件等, 一般选用较高的频率, 常用 2.5 ~ 5.0 MHz。对晶粒较粗大的铸件、奥氏体钢等宜选用较低的频率, 常用 0.5 ~ 2.5 MHz。如果频率过高, 就会引起严重衰减, 示波屏上出现林状回波, 信噪比下降, 甚至无法检测。

(3) 晶片尺寸的选择 晶片大小对检测也有一定的影响, 选择晶片尺寸时要考虑以下因素:

1) 由  $\theta = \arcsin 1.22 \lambda / D$  可知, 晶片尺寸增加, 半扩散角减小, 波束指向性变好, 超声波能量集中, 对检测有利。

2) 由  $N = D^2 / 4\lambda$  可知, 晶片尺寸增加, 近场区长度迅速增加, 对检测不利。

3) 晶片尺寸增大, 辐射的超声波能量增大, 探头未扩散区扫查范围增大, 远距离扫查范围相对变小, 发现远距离缺陷能力增强。

以上分析说明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的影响。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的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。

(4) 横波斜探头  $K$  值的选择 在横波检测中, 探头的  $K$  值对缺陷检测率、检测灵敏度、声束轴线的方向、一次波的声程有较大的影响。由  $K = \tan \beta_s$  可知,  $K$  值越大,  $\beta_s$  也越大, 一次波声程也就越大。

因此在实际检测中, 当工件厚度较小时, 应选用较大的  $K$  值, 以便增加一次波的声程, 避免近场区的检测。当工件厚度较大时, 应选用较小的  $K$  值, 以便减少声程过大引起的衰减。

在焊缝检测中,  $K$  值的选择既要考虑到可能产生的缺陷与检测面形成的角度, 还要保证主声束能扫查到整个焊缝截面。为了检测单面焊根部是否未焊透, 还应考虑端角反射的问题, 使用  $K = 0.7 \sim 1.5$  的横波斜探头, 因为  $K = 0.7 \sim 1.5$  时, 端角反射率最高。

#### 4. 耦合剂的选用

(1) 耦合和耦合剂 耦合是物理学中的一个术语, 指的是通过某种方法使两个或两个以上的体系相互作用以至联合起来的现象。在超声检测中把通过某种物质能使探头和工件中的超声能量互相传入的现象称为耦合。加在探头和检测面之间能改善探头和工件中的超声能量互相传入的液体物质称为耦合剂。

耦合剂的好坏决定着超声波能量传入工件的声强透射率的高低。耦合得好，则声强透射率高；耦合得不好，则声强透射率低。因此，检测时，对耦合剂的选择很重要。

(2) 耦合剂的作用 耦合剂的主要作用在于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，达到检测的目的。此外耦合剂还有减少摩擦的作用。

### (3) 对耦合剂的要求

- 1) 能润湿工件和探头表面，流动性、黏度和附着力适当，不难清洗。
- 2) 声阻抗高，透声性能好。
- 3) 来源广，价格便宜。
- 4) 对工件无腐蚀，对人体无害，不污染环境。
- 5) 性能稳定，不易变质，能长期保存。

目前，超声检测中常用耦合剂有机油、变压器油、甘油、水及水玻璃等。

(4) 影响耦合的主要因素 影响耦合的主要因素是耦合剂的声阻抗、工件表面粗糙度及工件表面的形状等。

1) 耦合层厚度的影响。耦合层厚度对耦合有较大的影响。当耦合剂层厚度小于  $\lambda/4$  时，耦合剂层厚度越薄，透声效果越好；当耦合剂层厚度为  $\lambda/4$  的奇数倍时，透声效果差，耦合不好，反射回波低；当耦合层厚度为  $\lambda/2$  的整数倍时，透声效果相对较好，反射回波高。

2) 耦合剂声阻抗的影响。耦合剂的声阻抗对耦合效果有着明显的影响，对同一检测面，声阻抗相对较大的耦合剂（如甘油），耦合效果好，回波幅度高；声阻抗相对较小的耦合剂（如水），耦合效果差，回波幅度低。

3) 检测面粗糙度的影响。检测面是超声波声束进入工件时所通过的表面。检测面的表面粗糙度对耦合有着显著的影响，对于同一耦合剂，检测面的表面粗糙度低，耦合效果好，回波幅度高；检测面的表面粗糙度高，耦合效果差，回波幅度低。

4) 检测面形状的影响。检测面的形状不同，耦合效果也不同，平面比曲面耦合效果好，曲率半径大的比曲率半径小的耦合效果好。因为探头的表面通常为平面，与曲面的接触面小，尤其是与曲率半径小的凹面中心难以接触，因此，曲率半径小的凹面耦合效果差。

## 三、纵波直探头检测技术

### (一) 检测设备的调整

#### 1. 扫描线的调整

纵波检测一般按纵波声程  $S$  与示波屏水平刻度  $\tau$  成一定比例来调节扫描线。具体方法是利用已知尺寸的试块或工件上的两次不同反射波（底波）的前沿分别对准相应的水平刻度。

例如按 1:2 的比例调整纵波直探头的扫描线比例, 即水平满刻度代表 200mm 的纵波声程。可在 II W 试块上按图 4-5-1 所示的方式检测 100mm 的底面, 调仪器 [扫描] 及 [水平位移] 旋钮, 将第一、二次底波的前沿分别对准水平刻度的 5.0 和 10.0, 扫描线即调好。

## 2. 灵敏度的调整

无损检测中所指的灵敏度是指发现最小缺陷的能力。在超声检测中检测灵敏度太高或太低都对检测不利。灵敏度太高, 示波屏上杂波多, 检测困难。灵敏度太低, 容易引起漏检。一般产品技术条件或有关标准规定了应该发现的最小缺陷尺寸, 因此在超声检测中调整检测灵敏度的目的在于发现工件中规定形状规定尺寸的缺陷, 并对缺陷定量。

超声检测灵敏度是指在确定的声程范围内发现规定形状规定尺寸缺陷的能力。可通过调节仪器上的 [增益]、[衰减器] 及 [发射强度] 等灵敏度旋钮来实现。

在纵波直探头法中, 规定形状的缺陷是平底孔, 即以规定直径的平底孔来调整检测灵敏度。为此有试块调整法和底波调整法两种方法。

(1) 试块调整法 根据工件对灵敏度的要求选择相应的平底孔试块, 将探头对准试块上的人工缺陷, 调整仪器上有关灵敏度的旋钮, 使示波屏上人工缺陷的最高反射回波达到基准波高, 这时灵敏度调好。

例如用纵波直探头检测厚度为 100mm 的锻件, 检测灵敏度的要求是: 不允许存在平底孔以上当量大小的缺陷。检测灵敏度的调整方法是: 选择一块 CS-1 或 CS-2 型的  $\phi 2$ mm 平底孔试块, 其平底孔声程为 100mm, 将探头对准试块上的  $\phi 2$ mm 平底孔, 仪器 [衰减器] 保留一定的衰减余量, [抑制] 调至 “0”, 调 [增益] 旋钮, 使  $\phi 2$ mm 平底孔的最高回波达基准波高, 这时检测灵敏度调好。

又如, 压力容器用钢板是利用  $\phi 5$ mm 平底孔来调整灵敏度的。具体方法是: 探头对准试块上的  $\phi 5$ mm 平底孔, 仪器 [衰减器] 保留一定的衰减余量, [抑制] 至 “0”, 调 [增益] 使  $\phi 5$ mm 平底孔最高回波达示波屏基准波高, 这时灵敏度调好。

如果试块平底孔声程不正好等于工件厚度, 平底孔直径也不正好等于规定灵敏度要求的平底孔直径, 只要工件厚度和试块平底孔声程均大于  $3N$ , 可先由式 (4-5-1) 算出规定灵敏度要求的平底孔与试块平底孔反射信号的分贝差  $\Delta dB_{sj}$  后进行调整

$$\Delta dB_{sj} = 40 \lg \frac{d_s \times x_B}{d_j \times x_s} + 2\alpha(x_B - x_s) \quad (4-5-1)$$

式中  $d_s$ 、 $d_j$ ——分别为试块平底孔和规定灵敏度要求的平底孔直径;

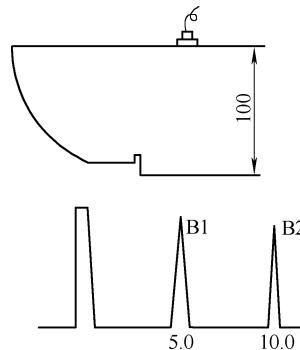


图 4-5-1 纵波直探头扫描速度的调整

$x_s$ 、 $x_B$ ——分别为试块平底孔声程和工件厚度；

$\alpha$ ——材质衰减系数（工件和试块相同）。

具体调整方法是：将探头对准试块上的平底孔，仪器保留一定的衰减余量，仪器〔衰减器〕保留一定的衰减余量，〔抑制〕调至“0”，调〔增益〕旋钮，使平底孔的最高回波达基准波高，然后仪器增益所算出的  $\Delta dB_{sj}$  值，检测灵敏度调好。

【例1】用2.5P20Z探头检测200mm厚的钢锻件，要求 $\phi 2\text{mm}$ 平底孔当量缺陷不漏检，采用声程为150mm的 $\phi 3\text{mm}$ 平底孔试块调整检测灵敏度如何调？（材质衰减系数忽略不计）

解：已知  $x_B = 200\text{mm}$   $x_s = 150\text{mm}$   $d_s = 3\text{mm}$   $d_j = 2\text{mm}$

$$\text{则 } \Delta dB_{sj} = 40 \lg \frac{d_s \times x_B}{d_j \times x_s} = 40 \lg \frac{3 \times 200}{2 \times 150} = 12\text{dB}$$

答：将探头对准试块上的 $\phi 3\text{mm}$ 平底孔，仪器保留一定的衰减余量，调〔增益〕旋钮，使平底孔的最高回波达基准波高，然后仪器增益12dB，检测灵敏度调好。

利用试块调整灵敏度，操作简单方便，但需要加工不同声程、不同当量尺寸的试块，成本高，携带不便。更为主要的是要考虑工件与试块因耦合和衰减不同的补偿问题。如果利用工件底波来调整检测灵敏度，那么既不要加工任何试块，又不需要任何补偿，这就是下节要介绍的方法。

(2) 底波调整法 利用工件底波调整检测灵敏度是根据工件底面回波与同深度的平底孔回波的反射比( $\Delta dB_{bj}$ )为一定值。将无缺陷处的底波调至基准波高，然后将仪器增益 $\Delta dB_{bj}$ ，检测灵敏度调好。

当工件厚度大于等于 $3N$ ，则

$$\Delta dB_{sj} = 20 \lg \frac{P_B}{P_d} = 20 \lg \frac{2\lambda x_B}{\pi d_j^2} \quad (4-5-2)$$

式中  $\lambda$ ——超声波长；

$x_B$ ——工件厚度；

$d_j$ ——规定灵敏度要求的平底孔直径。

具体调整方法是：将纵波直探头置于工件检测面上，找到无缺陷处的底波，仪器〔衰减器〕保留一定的衰减余量，〔抑制〕调至“0”，调〔增益〕旋钮，将底波调到基准波高，仪器增益所算出的  $\Delta dB_{bj}$  值，灵敏度调好。

【例2】用2.5P20Z探头检测350mm厚的钢锻件，要求 $\phi 2\text{mm}$ 平底孔当量缺陷不漏检，采用工件大底面调整检测灵敏度如何调？（工件 $c_L = 5900\text{m/s}$ ）

解：已知  $f = 2.5\text{MHz}$   $c_L = 5900\text{m/s}$   $x_B = 350\text{mm}$   $d_j = 2\text{mm}$

$$\text{则 } \lambda = c_L/f = 5.9/2.5 = 2.36\text{mm}$$

$$\Delta dB_{sj} = 20 \lg \frac{2\lambda x_B}{\pi d_j^2} = \frac{2 \times 2.36 \times 350}{3.14 \times 2^2} = 42\text{dB}$$

答：将纵波直探头置于工件检测面上，找到无缺陷处的底波，将其调到基准波高，仪器增益 42dB，灵敏度调好。

### (二) 扫查

将探头放在工件上，其所产生的声束范围是它可检测到的部分。扫查就是移动探头时声束覆盖到工件上需检测所有体积的过程。因此扫查的方式包括探头的移动方式、扫查速度及扫查间距等就是为保证扫查的完整而做出的具体规定。

(1) 扫查方式 扫查方式按探头移动方向、移动轨迹来描述。纵波直探头的扫查方式一方面要考虑声束覆盖范围，另一方面，还要根据受检工件形状缺陷的可能取向和延伸方向，尽量使缺陷能够重复显现，并使动态波形容易判别。

(2) 扫查速度 为使缺陷回波能充分地被探头接收，并在示波屏上有明显的显示或在记录装置上能得到明确的记录，扫查速度  $v$  应当适当。通常，这取决于探头有效尺寸和仪器重复频率  $n$ 。探头有效直径  $D$  越大，重复频率  $f$  越高，扫查速度  $v$  可以相应高一些。

$$v \leq \frac{Df}{n} \quad (4-5-3)$$

一般标准都规定扫查速度不得大于 150mm/s。

(3) 扫查间距 扫查间距指的是相邻扫查线之间的距离（锯齿形扫查为齿距，螺旋线扫查为螺距等）。扫查的间距通常根据探头的最小声束宽度来衡量，保证两次扫查之间有一定比例的覆盖。要求较高的工件，扫查间距通常要求不大于探头有效声束宽度的二分之一或三分之一。对于板材等扫查面积大的工件，有时仅要求 10% ~ 20% 的覆盖率。

### (三) 缺陷的评定

当超声检测发现缺陷信号后，要对缺陷进行评定，以判断是否危害使用。缺陷评定的内容主要是缺陷位置的确定和缺陷尺寸的评定。

#### 1. 缺陷的定位

超声检测中缺陷位置的测定是确定缺陷在工件中的位置，简称定位。一般可根据工件示波屏上缺陷波的水平刻度值与扫描速度来对缺陷定位。

仪器按  $1:n$  调节扫描速度，缺陷波前沿所对的水平刻度值为  $\tau_f$ 、测缺陷值探头的距离（埋藏深度） $x_f$  为

$$x_f = n \tau_f \quad (4-5-4)$$

若探头的声束轴线不偏离，当找到缺陷的最大回波时，则缺陷正位于探头的中心轴线上。此时探头的位置就是缺陷位于检测面的位置。

例如：用纵波直探头检测某工件，仪器按  $1:2$  调节扫描速度检测中示波屏上水平刻度值 70 处出现一缺陷波，那么此缺陷值探头的距离  $x_f$

$$x_f = n \tau_f = 2 \times 70 = 140 \text{mm}$$

## 2. 缺陷的定量

(1) 当量法的概念 当缺陷小于声束直径时, 通常采用规则人工反射体的尺寸来定量缺陷的尺寸。在相同检测条件下缺陷的反射波与规则人工反射体回波高度相等时, 所对应的规则反射体的尺寸, 称为缺陷当量尺寸。采用缺陷当量尺寸来定量缺陷尺寸的方法称为当量法。

(2) 纵波直探头检测的当量法 在纵波直探头检测中, 规定人工反射体通常采用平底孔, 即以平底孔直径来定量缺陷的尺寸, 并且又分为试块法、计算法和 AVG 法。由于 AVG 法目前不是太常用, 因此只介绍试块法及计算法。

1) 试块法。将工件中的自然缺陷回波与试块上的人工缺陷(平底孔)回波进行比较来定量缺陷当量尺寸的方法称试块法, 也称试块比较法。

为此要加工制作一系列含有不同声程、不同尺寸的平底孔试块, 检测中发现缺陷时, 将工件中自然缺陷回波与试块上平底孔回波进行比较。当同声程处的自然缺陷回波与平底孔回波高度相等时, 该平底孔的直径就是此自然缺陷的当量尺寸。

如果工件与试块的检测面的表面粗糙度不一样或材质衰减不同, 在确定当量尺寸时, 应对耦合和材质衰减进行补偿。

2) 计算法。计算法是根据超声检测中测得的缺陷回波与基准波高(或底波)的分贝差值, 利用各种规则反射体的理论回波声压公式进行计算, 求出缺陷当量尺寸的定量方法。计算法确定缺陷当量尺寸不需要任何试块, 在当量法中广泛应用。但应用的前提是缺陷位于三倍近场区以外。

① 当测出缺陷回波高度与基准平底孔回波高度之比的分贝差  $\Delta dB$  时, 可用式(4-5-5)计算缺陷的当量尺寸

$$d_f = \frac{d_j x}{x_j} 10^{\frac{\Delta dB - 2\alpha(x_j - x_f)}{40}} \quad (4-5-5)$$

式中  $d_j$ ——基准平底孔直径 (mm);

$x_j$ ——基准平底孔深度 (mm);

$x$ ——缺陷深度 (mm);

$\alpha$ ——衰减系数 (dB/mm)。

② 当测出缺陷回波高度与大平底回波高度之比的分贝差  $\Delta dB$  时, 可用式(4-5-6)计算缺陷的当量尺寸

$$d_f = \sqrt{\frac{2\lambda x^2}{\pi x_B}} \cdot 10^{\frac{\Delta dB - 2\alpha(x_B - x_f)}{20}} \quad (4-5-6)$$

式中  $x_B$ ——大平底距探头的距离 (mm)。

不考虑材质衰减时, 可令式(4-5-5)和式(4-5-6)中的衰减系数  $\alpha$  为 0。

**【例 3】** 用频率  $f = 4\text{MHz}$ , 晶片直径  $D = 14\text{mm}$  的直探头, 对厚度  $T = 400\text{mm}$  的钢制工件进行检测, 材料衰减系数  $\alpha = 0.01\text{dB/mm}$ , 发现距检测面  $250\text{mm}$  处有一缺陷, 此缺陷回波与工件完好部位底波的分贝差为  $-16\text{dB}$ , 求此缺陷的平底孔当量尺寸。

寸。 $(c_L = 5.9 \times 10^6 \text{ mm/s})$

$$\text{解: 因为 } N = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{fD^2}{4c} = \frac{4 \times 14^2}{4 \times 5.9} = 33 \text{ mm}$$

又因  $x = 250 \text{ mm} > 3N$ , 所以可以用计算法。

$$\text{将 } x = 250 \text{ mm}, \lambda = \frac{5.9 \times 10^6}{4 \times 10^6} = 1.48 \text{ mm}, \Delta \text{dB} = -16 \text{ dB}, x_B = 400 \text{ mm}, \alpha = 0.01 \text{ dB/mm, 代入式 (4-5-5), 可得: } d = 4 \text{ mm, 即此缺陷的当量平底孔尺寸为 4mm。}$$

**【例 4】** 用频率  $f = 2 \text{ MHz}$ , 晶片直径  $D = 14 \text{ mm}$  的直探头, 对厚度  $T = 350 \text{ mm}$  的钢制工件进行检测, 发现距检测面 200mm 处有一缺陷, 此缺陷回波比平底孔试块  $150/\phi 2 \text{ mm}$  回波高度高 11dB, 求此缺陷的平底孔当量尺寸。

$$\text{解: 因为 } N = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{fD^2}{4c} = \frac{2 \times 14^2}{4 \times 5.9} = 17 \text{ mm}$$

又因  $200 \text{ mm} > 3N$ , 所以可以用计算法。

将  $x = 200 \text{ mm}, x_j = 150 \text{ mm}, d_j = 2 \text{ mm}, \Delta \text{dB} = 11 \text{ dB}$ , 代入式 (4-5-6), 令  $\alpha = 0$ , 可得,  $d = 5 \text{ mm}$ , 即此缺陷的当量平底孔尺寸为 5mm。

### 3. 缺陷延伸长度 (或面积) 的测定

当缺陷的尺寸大于声场截面时, 不能用当量法来定量缺陷的尺寸, 一般要求测量缺陷的长度或缺陷的平面尺寸, 这时就需要测长度或测面积。测长度或测面积的方法有多种, 其中有相对灵敏度法、绝对灵敏度法。前者又有 3dB 法、6dB 法、端点 6dB 法、20dB 法、端点峰值法等, 具体采用哪种方法由有关的标准或技术规范确定。按规定的方法测定的缺陷长度称为缺陷的指示长度。

(1) 相对灵敏度法 相对灵敏度法是以缺陷回波峰值为相对基准、沿缺陷的延伸方向移动探头, 当缺陷波高从峰值降低到一定的 dB 值时, 确定缺陷的端点, 从而测定缺陷的长度。常用的 dB 值是 6dB, 根据缺陷回波峰值的选取又分为 6dB 法和端点 6dB 法。

1) 6dB 法 (半波高度法)。由于波高从峰值降低 6dB 后正好为原来峰值的一半, 因此 6dB 法又称为半波高度法。当探头平行缺陷的延伸方向移动时, 其动态波形包络线只有一个峰值时, 采用 6dB 法。

半波高度法具体做法是: 移动探头找到缺陷的最大反射波 (不能达到饱和, 一般调至 80% 满幅度), 然后平行缺陷走向左右移动探头, 当缺陷波高分别降低一半时 (一般为 40% 满幅度), 探头停止移动, 此时探头中心线之间距离就是缺陷的指示长度。

6dB 法的具体测法是: 如图 4-5-2 所示, 移动探头找到缺陷最大反射波 (探头位置 1) 后, 调节衰减器, 使缺陷波高降至基准波高。再调衰减器将仪器灵敏度提高 6dB, 然后平行缺陷延伸方向移动探头, 当缺陷波高分别降至基准波高

(探头位置2和3)时,探头停止移动,此时探头中心线之间距离就是缺陷的指示长度。

2) 端点6dB法。当探头平行缺陷的延伸方向移动,且其动态波形包络线有多个峰值时,采用端点6dB法(端点半波高度法)。

端点6dB法的具体测法是:如图4-5-3所示,探头平行缺陷延伸方向分别向左、右移动,找到缺陷两端的最大反射波,分别以这两个端点反射波峰值为基准,继续向左、向右移动探头,当端点反射波峰值降低一半时(或6dB时),探头中心线之间的距离即为缺陷的指示长度。

(2) 端点峰值法 当探头平行缺陷的延伸方向移动,且其动态波形包络线有多个峰值时,还可采用端点峰值法。

端点峰值法的具体测法是:探头平行缺陷走向分别向左、右移动,找到缺陷两端的最大反射波,此时探头中心线之间的距离即为缺陷的指示长度,如图4-5-4所示。

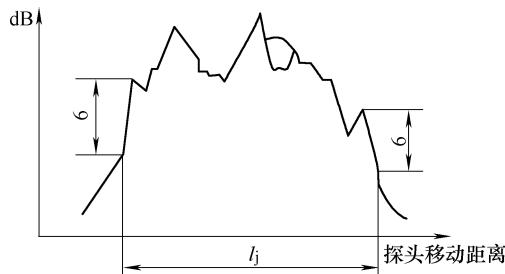


图4-5-3 端点6dB法

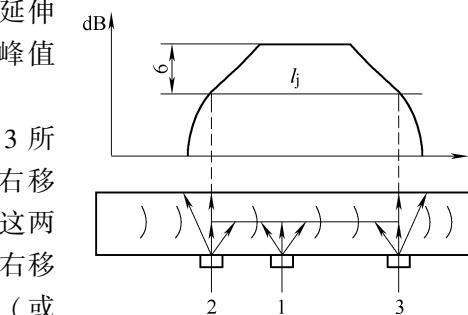


图4-5-2 6dB法

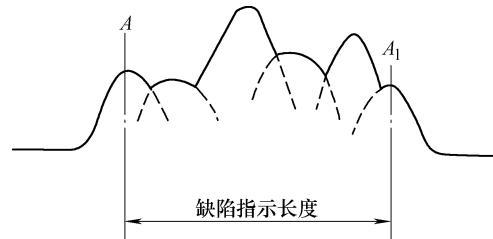


图4-5-4 端点峰值法

(3) 绝对灵敏度法 当探头平行缺陷的延伸方向移动,且其缺陷反射波波幅都在某一灵敏度水平之上(如图4-5-5所示的B线)时,可采用绝对灵敏度法。

绝对灵敏度法具体测法是:探头平行缺陷延伸方向分别向左、右移动,当缺陷波高降到某一灵敏度水平时(如图4-5-5所示的B线),此时探头中心线之间的距离即为缺陷的指示长度。

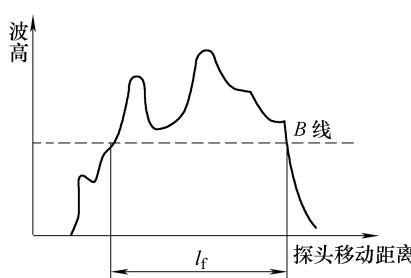


图4-5-5 绝对灵敏度法

#### (四) 非缺陷回波的判别

纵波直探头法超声检测中,除了始波、底波和缺陷波外,常常还会出现一些其他的信号回波,如迟到波、三角反射波以及其他原因引起的非缺陷回波等,这些信号波将影响到对缺陷波的正确判别。因此分析和了解非缺陷回波产生的原因和特点是十分必要的。

(1) 迟到波 如图 4-5-6 所示,当纵波直探头置于细长(或扁长)的工件或试块上时,扩散纵波波束在侧壁产生波型转换,转换为横波,此横波在另一侧面又转换为纵波,最后经底面反射回到探头,被探头接收,从而在示波屏上出现一个波。由于转换的横波声程长且波速低,传播时间比直接从底面反射的纵波长,因此转换后的波总是出现在第一次底波之后,故称为迟到波。又由于波型横波可能在侧壁产生多次反射,每反射一次就会出现一个迟到波,因此迟到波往往有多个,如图 4-5-6 中的  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 。

由于迟到波总是位于  $B_1$  之后,并且位置特定,其位置位于  $d + 0.76 + 0.76 \dots$  ( $d$  为试件的厚度或直径)。而缺陷波一般位于  $B_1$  之前,因此迟到波不会干扰到缺陷波的判别。

(2)  $61^\circ$  反射 当探头置于如图 4-5-7 所示的直角三角形钢试件上时,若纵波入射角  $\alpha$  与横波反射角  $\beta$  能满足如下关系:

由  $\beta = 90^\circ - \alpha$  得

$$\sin\beta = \cos\alpha \quad (4-5-7)$$

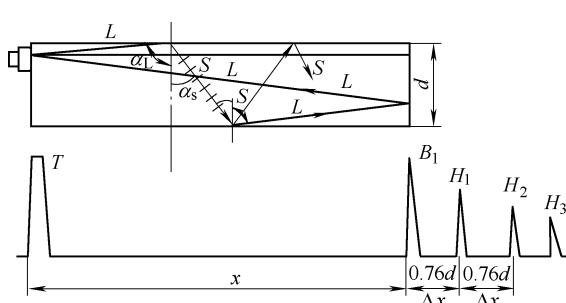


图 4-5-6 迟到波

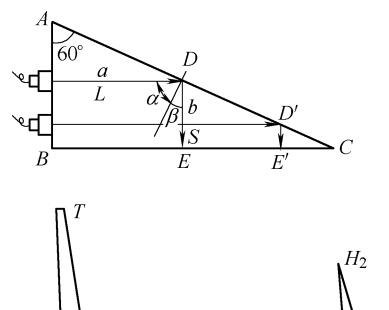


图 4-5-7  $61^\circ$  反射

由反射定律得

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} = \tan\alpha = \frac{c_L}{c_S} \quad (4-5-8)$$

对钢而言,  $c_L = 5900 \text{ m/s}$ ,  $c_S = 3230 \text{ m/s}$ , 则  $\tan\alpha = 1.82$ ,  $\alpha = 61^\circ$ , 故称  $61^\circ$  反射。通过推导可知,直探头在  $AB$  边上移动,其声程不变并恒等于直角三角形的  $BC$  边长,这是  $61^\circ$  反射的特点。

(3) 三角反射 如图 4-5-8 所示,纵波直探头径向检测实心圆柱体时,由于探头平面与柱面接触面积小,使波束扩散角增加,这样扩散波束就会在圆柱面上形成

三角反射路径，从而在示波屏上出现三角反射波，人们把这种反射称为三角反射。

两次三角反射波总是位于第一次底波  $B_1$  之后，而且位置特定，分别为  $1.3d$  和  $1.67d$  ( $d$  为圆柱体的直径)，而缺陷波一般位于  $B_1$  之前，因此三角反射波也不会干扰到缺陷波的判别。

(4) 探头杂波 当探头中的吸收块吸收不良时，会在始波后面出现一些杂波。双晶直探头检测厚壁工件时，由于入射角比较小，始波在延迟块内的多次反射也可能产生一些非缺陷信号，干扰缺陷回波的判别。

(5) 工件轮廓信号 当超声波到达工件的台阶、螺纹等轮廓时在示波屏上将引起一些轮廓回波，如图 4-5-9 所示。

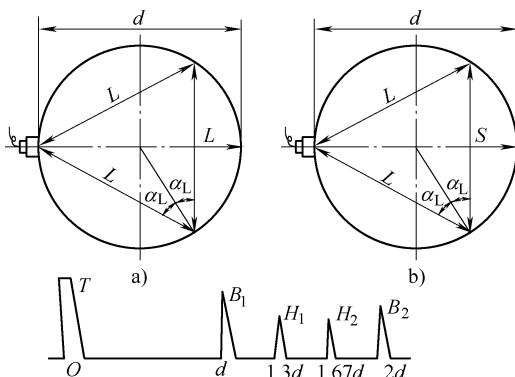


图 4-5-8 三角反射

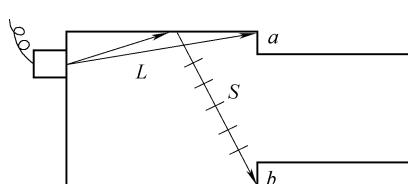


图 4-5-9 轮廓回波

## 四、横波斜探头检测技术

### (一) 检测设备的调整

#### 1. 扫描线的调整

如图 4-5-10 所示，横波检测时，缺陷位置可由折射角  $\beta$  和声程  $x$  来确定，也可由缺陷的水平距离和深度来确定。

一般横波扫描速度的调节方法有三种：声程调节法、水平调节法和深度调节法。

(1) 声程调节法 声程调节法是使示波屏的水平刻度值  $\tau$  与声程  $x$  成正比，即  $\tau : x = 1 : n$ 。这时仪器示波屏上直接显示横波声程。

按声程调节横波扫描速度可在 II W、CSK-I A、II W2、半圆试块以及其他试块或工件上进行。

1) 利用 II W 试块或 CSK-I A 试块调节。II W 试块  $R100\text{mm}$  圆心处未切槽，因

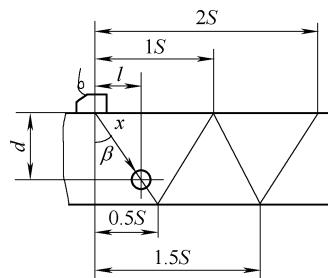


图 4-5-10 横波检测缺陷位置的确定

此横波不能在  $R100\text{mm}$  圆弧面上形成多次反射，这样也就不能直接利用  $R100\text{mm}$  来调节横波扫描速度。但 II W 试块上有  $91\text{mm}$  尺寸，钢中纵波声程  $91\text{mm}$  相当于横波声程  $50\text{mm}$  的时间。因此可以利用  $91\text{mm}$  调节横波扫描速度。

下面以横波  $1:1$  为例进行说明。如图 4-5-11 所示，先将直探头对准  $91\text{mm}$  底面，调节仪器使底波  $B_1$  及  $B_2$  分别对准水平刻度  $50$ 、 $100$ ，这时扫描线与横波声程的比例正好为  $1:1$ 。然后换上横波探头，并使探头的入射点对准  $R100\text{mm}$  的圆心 ( $R100\text{mm}$  圆弧面的回波

最高时)，调节脉冲移位使  $R100\text{mm}$  圆弧面的回波  $B_1$  对准水平刻度  $100$ ，这时零位才算校准。即这时水平刻度“ $0$ ”对应于斜探头的入射点，始波的前沿位于“ $0$ ”的左侧。

以上调节方法比较麻烦，针对这一情况，我国的 CSK- I A 试块在  $R100\text{mm}$  圆弧处增加了一个  $R50\text{mm}$  的同心圆弧面，这样就可以将横波探头直接对准  $R50\text{mm}$  和  $R100\text{mm}$  圆弧面，使回波  $B_1$  ( $R50\text{mm}$ ) 对  $50$ ， $B_2$  ( $R100\text{mm}$ ) 对  $100$ ，于是横波扫描速度  $1:1$  和“ $0$ ”点同时调好校准。

2) 利用 II W2 试块和半圆试块调节。当利用 II W2 试块和半圆试块调节横波扫描速度时，要注意它们的反射特点。探头对准 II W2 试块的  $R25\text{mm}$  圆弧面时，各反射波间距为  $25\text{mm}$ 、 $75\text{mm}$  等，对准  $R50\text{mm}$  圆弧面时，各反射波间距为  $50\text{mm}$ 、 $75\text{mm}$  等。探头对准  $R50\text{mm}$  半圆试块 (中心未切槽) 的圆弧面时，各反射波间距为  $50\text{mm}$ 、 $100\text{mm}$  等。

下面说明横波  $1:1$  扫描速度的调整方法。

利用 II W2 试块调整：探头对准  $R25\text{mm}$  圆弧面，调节仪器  $B_1$ 、 $B_2$  分别对准水平刻度  $25$ 、 $100$  即可，如图 4-5-12 所示。

(2) 水平调节法 水平调节法是指示波屏上水平刻度值  $\tau$  与反射体的水平距离  $l$  成比例，即  $\tau:l=1:n$ 。这时示波屏水平刻度值直接显示反射体的水平投影距离 (简称水平距离)，这种方法多用于壁板工件的焊缝检测。

按水平距离调节横波扫描速度可在 CSK- I A 试块、半圆试块、横孔试块上进行。

1) 利用 CSK- I A 试块调节。先计算  $R50\text{mm}$ 、 $R100\text{mm}$  对应的水平距离  $l_1$ 、 $l_2$  为

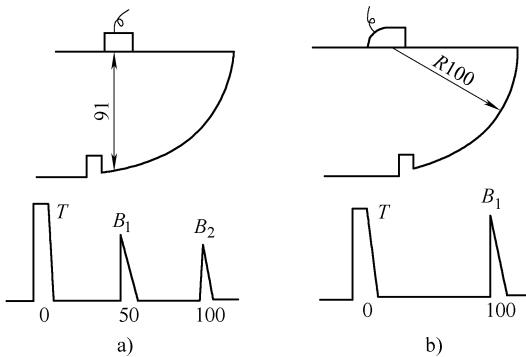


图 4-5-11 用 II W 试块按声程调整横波扫描速度

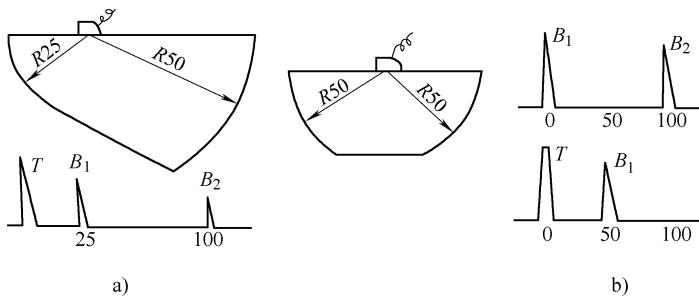


图 4-5-12 用 II W2 和半圆试块按声程调整扫描速度

$$l_1 = \frac{50K}{\sqrt{1+K^2}}$$

$$l_2 = \frac{100K}{\sqrt{1+K^2}} = 2l_1 \quad (4-5-9)$$

式中  $K$ ——斜探头的  $K$  值 (实测值)。

然后将探头对准  $R50\text{mm}$ 、 $R100\text{mm}$ ，调节仪器使  $B_1$ 、 $B_2$  分别对准水平刻度  $l_1$ 、 $l_2$ 。当  $K=1.0$  时， $l_1=35\text{mm}$ 、 $l_2=70\text{mm}$ ，若使  $B_1$ 、 $B_2$  分别对准 35、70，则水平距离扫描速度为 1:1。

2) 利用  $R50\text{mm}$  半圆试块调节。先计算半圆试块  $B_1$ 、 $B_2$  对应的水平距离  $l_1$ 、 $l_2$

$$l_1 = \frac{KR}{\sqrt{1+K^2}}$$

$$l_2 = \frac{3KR}{\sqrt{1+K^2}} = 3l_1 \quad (4-5-10)$$

然后将探头对准  $R50\text{mm}$  圆弧，调节仪器使  $B_1$ 、 $B_2$  分别对准水平刻度  $l_1$ 、 $l_2$ 。当  $K=1.0$  时， $l_1=35\text{mm}$ 、 $l_2=105\text{mm}$ 。先使  $B_1$ 、 $B_2$  分别对准 0、70，再调“脉冲移位”使  $B_1$  对准 35，则水平距离扫描速度为 1:1。

3) 利用横孔试块调节。以 CSK- I A 试块为例，设探头的  $K=1.5$ ，并计算深度为 20mm、60mm 的  $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm}$  横孔对应的水平距离  $l_1$ 、 $l_2$

$$l_1 = Kd_1 = 1.5 \times 20 = 30$$

$$l_2 = Kd_2 = 1.5 \times 60 = 90 \quad (4-5-11)$$

调节仪器使深度为 20mm、60mm 的  $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm}$  横孔的回波  $H_1$ 、 $H_2$  分别对准水平刻度的 30、90，这时水平距离扫描速度 1:1 就调好了。需要指出的是，这里  $H_1$ 、 $H_2$  不是同时出现的，当  $H_1$  对准 30 时， $H_2$  不一定正好对准 90，因此往往要反复调试，直至  $H_1$  对准 30， $H_2$  正好对准 90。

(3) 深度调节法 深度调节法是使示波屏上的水平刻度值  $\tau$  与深度  $d$  成比例，即  $\tau:d=1:n$ ，这时示波屏的水平刻度值直接显示深度距离，常用于较厚工件焊缝的横波检测。按深度调节横波扫描速度可在 CSK- I A 试块、半圆试块和 CSK- III A

等横孔试块上进行。

1) 利用 CSK-Ⅰ A 试块调节。先计算  $R50\text{mm}$ 、 $R100\text{mm}$  圆弧反射波  $B_1$ 、 $B_2$  对应的深度距离  $d_1$ 、 $d_2$

$$d_1 = \frac{R50}{\sqrt{1+K^2}}$$

$$d_2 = \frac{R100}{\sqrt{1+K^2}} = 2d_1 \quad (4-5-12)$$

然后调节仪器使  $B_1$ 、 $B_2$  分别对准水平刻度值  $d_1$ 、 $d_2$ 。当  $K = 2.0$  时,  $d_1 = 22.4\text{mm}$ 、 $d_2 = 44.8\text{mm}$ , 调节仪器使  $B_1$ 、 $B_2$  分别对准水平刻度 22.4、44.8, 则深度 1:1 就调好了。

2) 利用  $R50\text{mm}$  半圆试块调节。先计算半圆试块  $B_1$ 、 $B_2$  对应的深度距离  $d_1$ 、 $d_2$ 。

$$d_1 = \frac{R}{\sqrt{1+K^2}}$$

$$d_2 = \frac{3R}{\sqrt{1+K^2}} = 3d_1 \quad (4-5-13)$$

然后调节仪器使  $B_1$ 、 $B_2$  分别对准水平刻度值  $d_1$ 、 $d_2$ , 这时深度 1:1 就调好了。

3) 利用横孔试块调节。探头分别对准深度  $d_1 = 40\text{mm}$ ,  $d_2 = 80\text{mm}$  的 CSK-Ⅲ A 试块上  $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm}$  横孔, 调节仪器使  $d_1$ 、 $d_2$  对应的  $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm}$  横孔回波  $H_1$ 、 $H_2$  分别对准水平刻度 40、80, 这时深度 1:1 就调好了。这里同样要注意反复调试, 使  $H_1$  对准 40 时  $H_2$  正好对准 80。

## 2. 距离 - 波幅曲线的制作和灵敏度的调整

距离 - 波幅曲线是相同大小的反射体随距探头距离的变化其反射波高的变化曲线。需采用检测用的特定探头, 在含有不同深度人工反射体的试块上实测 (如 CSK-Ⅲ A 试块) 横波距离 - 波幅曲线。

在回波检测中常采用距离 - 波幅曲线进行曲线尺寸的评定, 尤其在焊缝检测中使用极为广泛, 并形成了一定的通用做法, 在标准中也有相应的规定。

### (二) 扫查

横波斜探头扫查时, 扫查速度和扫查间距的要求与纵波检测时相似。但扫查方式有其独特点, 不仅要考虑探头相对于工件的移动方向、移动轨迹, 还要考虑探头的朝向。声束方向是根据拟检测缺陷的取向确定的, 声束方向确定后, 探头就有了前后左右之分。

斜探头的四种基本扫查方式如图 4-5-13 所示, 通常前后左右扫查用于发现缺陷的存在, 且寻找缺陷的最大峰值, 左右扫查可用于缺陷横向长度的测定, 转动扫查和环绕扫查则为了确定缺陷的形状。

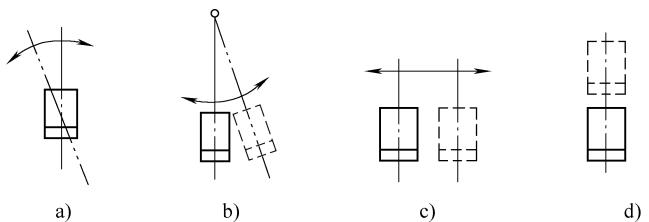


图 4-5-13 斜探头的扫查方式

### (三) 缺陷的评定

#### 1. 平面工件的缺陷定位

横波斜探头检测平面工件时,只要知道了折射角  $\beta$  (或  $K$  值),再从示波屏上得出声程  $S$ 、水平距离  $l$  或缺陷距检测面的深度  $d$  的值,即可定出缺陷的位置。从而有了按声程、水平距离或深度调整扫描线的三种方法,因此缺陷定位也相应地有了三种情况。

(1) 按声程调整法的定位 首先在示波屏上读出缺陷波前沿的水平刻度值  $\tau_f$ ,根据  $x_f = n \tau_f$  算出缺陷的声程值  $x_f$ 。然后由下列各式算出缺陷的水平距离  $l_f$  和深度  $d_f$ 。则

$$l_f = x_f \sin \beta \quad (4-5-14)$$

$$d_{f1} = x_f \cos \beta \quad (\text{一次波}) \quad (4-5-15)$$

$$d_{f2} = 2T - x_f \cos \beta \quad (\text{二次波}) \quad (4-5-16)$$

式中  $T$ —工件厚度 (mm);

$\beta$ —探头横波折射角。

横波检测缺陷定位如图 4-5-14 所示。

(2) 按水平距离调整法的定位 首先在示波屏上读出缺陷波前沿的水平刻度值  $\tau_f$ ,根据式 (4-5-11) 算出缺陷的水平距离值  $l_f$ 。然后由式 (4-5-12) 或式 (4-5-13) 算出缺陷的深度  $d_f$ 。则

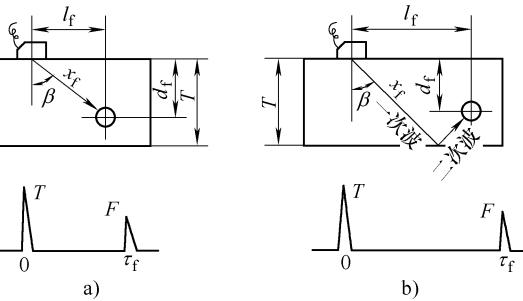


图 4-5-14 横波检测缺陷定位  
a) 一次波 b) 二次波

$$l_f = n \tau_f \quad (4-5-17)$$

$$d_f = \frac{l_f}{\tan \beta} = \frac{l_f}{K} \quad (\text{一次波}) \quad (4-5-18)$$

$$d_f = 2T - \frac{l_f}{\tan \beta} = 2T - \frac{l_f}{K} \quad (\text{二次波}) \quad (4-5-19)$$

(3) 按深度调整法的定位 首先在示波屏上读出缺陷波前沿的水平刻度值  $\tau_f$ ,

再算出缺陷的深度  $d_f$ 。然后由下式算出缺陷的水平距离值  $l_f$

$$d_f = n \tau_f \text{ (一次波)} \quad (4-5-20)$$

$$d_f = 2T - n \tau_f \text{ (二次波)} \quad (4-5-21)$$

$$l_f = Kd_f \quad (4-5-22)$$

## 2. 圆柱曲面工件的缺陷定位

当采用横波斜探头检测圆柱曲面时, 若沿轴向检测, 缺陷定位与平面相同; 若沿周向检测时, 缺陷定位则与平面不同, 而且定位时, 外侧与内侧也存在着不同。

(1) 外侧周向检测 如图 4-5-15 所示, 外侧周向检测圆柱曲面时, 缺陷的位置由深度  $H$  和弧长  $\hat{L}$  来确定, 显然  $H$ 、 $\hat{L}$  与平面工件的缺陷深度  $d$  和水平距离  $l$  有着较大的差别。

图 4-5-15 中  $AC = d$  (平面工件的缺陷深度)  
 $BC = dtan\beta = dK = l$  (平面工件的缺陷水平距离)

$$AO = R, CO = R - d$$

$$\tan\theta = \frac{BC}{OC} = \frac{Kd}{R - d}, \theta = \arctan \frac{Kd}{R - d}$$

$$BO = \sqrt{(Kd)^2 + (R - d)^2}$$

从而可得

$$H = OD - OB = R - \sqrt{(Kd)^2 + (R - d)^2}$$

$$\hat{L} = \frac{R\pi\theta}{180} = \frac{R\pi}{180} \arctan \frac{Kd}{R - d} \quad (4-5-23)$$

(2) 内侧周向检测 如图 4-5-16 所示, 内侧周向检测圆柱曲面时, 缺陷的位置由深度  $h$  和弧长  $\hat{L}$  来确定, 这里的  $h$  和  $\hat{L}$  与平面工件中的缺陷深度  $d$  和水平距离  $l$  有着较大的差别。

图 4-5-16 中  $AC = d$  (平面工件中缺陷深度)  
 $BC = dtan\beta = dK = l$  (平面工件中缺陷水平距离)

$$AO = r, CO = r + d$$

$$\tan\theta = \frac{BC}{OC} = \frac{Kd}{r + d}, \theta = \arctan \frac{Kd}{r + d}$$

$$BO = \sqrt{(Kd)^2 + (r + d)^2}$$

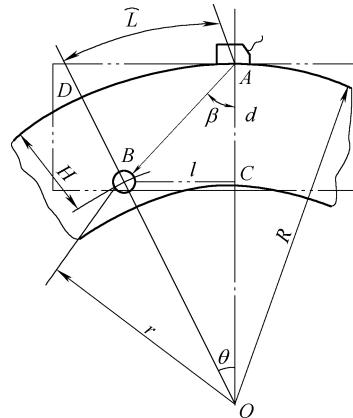


图 4-5-15 外侧周向检测定位

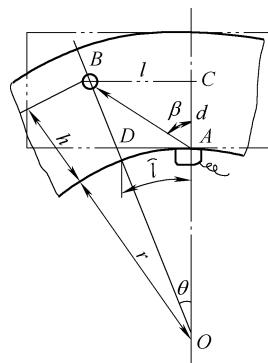


图 4-5-16 内侧周向检测定位

从而可得

$$H = OB - OD = \sqrt{(Kd)^2 + (r+d)^2} - r \quad (4-5-24)$$

$$\hat{L} = \frac{r\pi\theta}{180} = \frac{r\pi}{180} \arctan \frac{Kd}{r+d}$$

(3) 最大检测壁厚 如图 4-5-17 所示, 当采用横波斜探头从外圆周向检测筒体工件且波束轴线与筒体内壁相切时, 对应的壁厚为最大检测壁厚  $T_m$ , 工件壁厚超过该厚度时, 超声波束轴线将检测不到内壁。对应于每一个确定的探头, 都有一个对应的最大检测厚度。不同  $K$  值探头最大检测壁厚  $T_m$  与工件外径  $D$  之比可由下式导出

$$\sin\beta = \frac{r}{R} = \frac{R - T_m}{R} = 1 - \frac{2T_m}{D} \quad (4-5-25)$$

$$\frac{T_m}{D} \leq \frac{1}{2}(1 - \sin\beta) = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{K}{\sqrt{1+K^2}}\right) \quad (4-5-26)$$

式中  $T_m$  ——可检测的最大壁厚 (mm);

$D$  ——工件外径 (mm);

$K$  ——探头的  $K$  值。

探头的  $K$  值越小, 可检测的最大壁厚就越大,  $K$  值越大, 可检测的最大壁厚就越小。

### 3. 缺陷定量

采用横波斜探头法对缺陷的定量包括缺陷回波的幅度和指示长度两个参数。回波幅度依据的是规则反射体的回波幅度与缺陷尺寸的关系, 常用实测距离 - dB 曲线进行评定。而缺陷指示长度的测定方法与纵波直探头相同, 也有相对灵敏度法、绝对灵敏度法和端点峰值法。

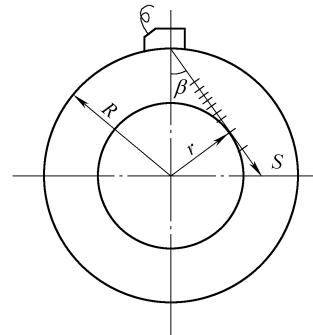


图 4-5-17 斜探头  $K$  值范围的确定

# 第六章

## 板材的超声检测

承压设备所用的板材对质量的要求比较严格，通常要求采用无损检测方法进行检测。目前对板材内部进行检测的最好方法就是超声检测。

广泛采用的板材是钢板和熔敷有防腐材料的复合钢板，这里仅就这两种板材的超声检测方法介绍如下。

一般从超声检测的角度可将钢板按厚度分为：薄板（6mm 以下）、中厚板（6~40mm）和厚板（40mm 以上）。

### 一、中厚钢板超声检测

#### 1. 中厚钢板中常见缺陷

钢板中主要的固有缺陷是：夹层和层状非金属夹杂物。钢板在轧制过程中产生的工艺缺陷主要有：裂纹、折叠（重皮）和白点。

钢板中缺陷的特点是除裂纹以外，大都平行于轧制面。

#### 2. 检测方法

正因为钢板中的缺陷大都平行于轧制面，主要采用纵波直探头法，包括直接接触法和水浸法。对于易产生轧制裂纹或要求较高的钢板，要辅以横波斜探头法。这里重点介绍纵波直探头法。

#### 3. 检测条件的确定

(1) 检测频率 钢材经轧制后其晶粒比较细，可以采用较高的频率，一般为 2.5~5.0MHz。

(2) 探头形式 当板厚不大于 20mm 时，为了克服盲区的影响，应采用双晶直探头，板厚大于 20mm 时，采用单晶直探头。

(3) 探头尺寸 钢板的面积都很大，为了提高检测速度宜选用大尺寸晶片探头，晶片尺寸过大近场长度相应增大，又不利于检测，一般选用  $\phi 20 \sim \phi 30$ mm 的单晶直探头或  $10mm \times 30mm \times 2mm$  的双晶直探头。

(4) 耦合条件 钢板面积大，检测工作量相应较大，若采用直接接触法，则工

作人员的劳动强度大,生产率低,为此一般在大面积粗测时采用水浸法,故水就是耦合剂。粗测发现缺陷要进行细测时,若采用直接接触法,则耦合剂可采用机油或化学浆糊。

(5) 试块 钢板检测的试块有两种:当板厚 $\leq 20\text{mm}$ ,采用双晶直探头时,要用阶梯试块,如图 4-6-1 所示。阶梯的厚度基本涵盖了板厚 $\leq 20\text{mm}$ 的中板厚度。

#### 4. 灵敏度调节

##### (1) 采用双晶直探头 当板

厚不大于 $20\text{mm}$ ,采用双晶直探头时,将双晶直探头放置在阶梯试块与被测板厚等厚的台阶上,获取一次底波,并将其调为满刻度的 50% 高度,仪器增益 $10\text{dB}$ ,即为检测灵敏度。

(2) 采用单晶直探头 当板厚大于 $20\text{mm}$ ,采用单晶直探头时,根据被测钢板的厚度在表 4-3-4 中选择相应编号的 $\phi 5\text{mm}$  平底孔试块。将单晶直探头放置在所选的平底孔试块上,检测 $\phi 5\text{mm}$  平底孔,并将其调为满刻度的 50% 高度,即为检测灵敏度。

当采用第二次缺陷波和第二次底波来评定缺陷时,检测灵敏度应以相应的第二次反射波来校准。

#### 5. 扫查方式

钢板超声检测的扫查方式主要有以下四种:

(1) 列(平行)线扫查 如图 4-6-2a 所示,在整个板材的检测面上,沿垂直钢板的压延方向划出 $100\text{mm}$  间隔的直线,探头沿此直线扫查,进行粗测。发现缺陷后,再在缺陷周围扩大扫查范围进行细测,测出缺陷分布面积。

(2) 边缘扫查 如图 4-6-2b 所示,只在板材边缘或焊接件坡口线两侧的一定宽度区域内全面积扫查,扫查宽度为板厚的 $1/2$ ,最小为 $50\text{mm}$ 。

(3) 格子线扫查 如图 4-6-2c 所示,在整个板材的检测面上划成 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$  的方格子线,探头沿格子线扫查,进行粗测。发现缺陷后,再在缺陷周围扩大扫查范围进行细测,画出缺陷分布面积。边缘扫查的目的是防止钢板边缘加工坡口后焊接时因存在缺陷而炸裂,使得前功尽弃。

(4) 全面扫查 在整个钢板面上进行全面积(100%) 扫查,相邻扫查线之间应有 10% 探头尺寸的覆盖。对钢板质量要求特别高的才作这种全面扫查。

(5) 关于双晶纵波直探头的扫查方向 双晶纵波直探头扫查细长的缺陷时,其隔声层与缺陷延伸方向一致( $X$  方向)或垂直( $Y$  方向),检测灵敏度有明显不同。

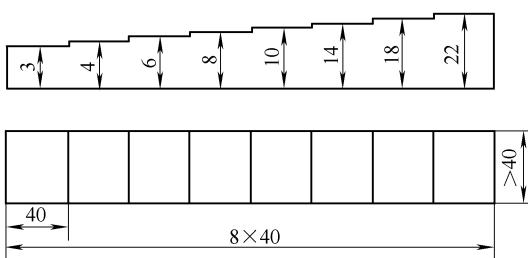


图 4-6-1 阶梯试块

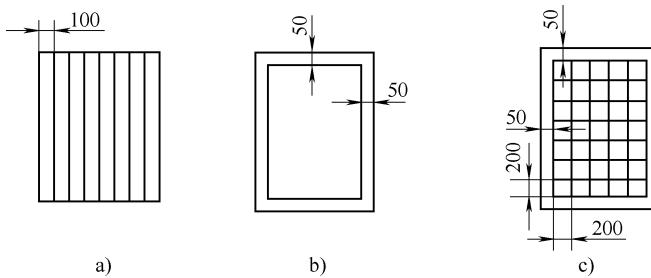


图 4-6-2 扫查方式

如图 4-6-3 所示，在测定缺陷的纵向长度时，探头隔声层可按 Y 方向放置，并沿缺陷的纵向移动；测定缺陷的宽度时，探头隔声层可按 X 方向放置，并沿缺陷的横向（宽度方向）移动。

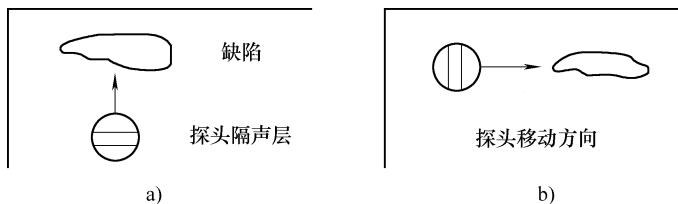


图 4-6-3 双晶探头扫查

a) X 方向 b) Y 方向

## 6. 钢板缺陷的判定

在检测过程中，发现下列三种情况之一者即作为缺陷：

- 1) 缺陷第一次反射波 ( $F_1$ ) 波高大于或等于满刻度的 50%，即  $F_1 \geq 50\%$  者。
- 2) 当底面第一次反射波 ( $B_1$ ) 波高未达到满刻度，此时，缺陷第一次反射波 ( $F_1$ ) 波高与底面第一次反射波 ( $B_1$ ) 波高之比大于或等于 50%，且  $B_1 < 100\%$ ，而  $F_1/B_1 \geq 50\%$  者。
- 3) 当底面第一次反射波 ( $B_1$ ) 波高低于满刻度的 50%，即  $B_1 < 50\%$  者。

## 7. 缺陷边界或指示长度的测定方法

检出缺陷后，应在它的周围继续进行检测，以确定缺陷的延伸。

- 1) 用双晶直探头确定缺陷的边界或指示长度时，探头的移动方向应与探头的声波分割面相垂直，并使缺陷波下降到检测灵敏度条件下荧光屏满刻度的 25% 或使缺陷第一次反射波高与底面第一次反射波高之比为 1:2。此时，探头中心的移动距离即为缺陷的指示长度，探头中心点即为缺陷的边界点。两种方法测得的结果以较严重者为准。

- 2) 用单晶直探头确定缺陷的边界或指示长度时，移动探头，使缺陷波第一次反射波高下降到检测灵敏度条件下荧光屏满刻度的 25% 或使缺陷第一次反射波与底

面第一次反射波高之比为1:2。此时，探头中心移动距离即为缺陷的指示长度，探头中心即为缺陷的边界点。两种方法测得的结果以较严重者为准。

3) 对于底面第一次反射波( $B_1$ )波高低于满刻度的50%，即 $B_1 < 50\%$ 的缺陷，测定其边界或指示长度时，移动探头，使底面第一次反射波升高到荧光屏满刻度的50%。此时，探头中心移动距离即为缺陷的指示长度，探头中心点即为缺陷的边界点。

## 8. 缺陷的评定方法

(1) 缺陷指示长度的评定规则 一个缺陷所指示的最大长度作为该缺陷的指示长度。

(2) 单个缺陷指示面积的评定规则

- 1) 一个缺陷所指示的最大面积作为该缺陷的单个指示面积。
- 2) 多个缺陷其相邻间距小于100mm或间距小于相邻小缺陷的指示长度(取其较大值)时，其各块缺陷面积之和作为单个缺陷指示面积。

(3) 缺陷面积占有率为评定规则 在任一 $1m \times 1m$ 检测面积内，按缺陷面积所占的百分比来确定。

## 9. 钢板缺陷等级评定

1) 钢板缺陷等级划分(表4-6-1)。

表4-6-1 钢板缺陷分级

等 级	单个缺陷指示长度/mm	单个缺陷指示面积/cm <sup>2</sup>	在任一 $1m \times 1m$ 检测面积内存在的缺陷面积百分比(%)	以下单个缺陷显示面积不计/cm <sup>2</sup>
I	<80	<25	≤3	<9
II	<100	<50	≤5	<15
III	<120	<100	≤10	<25
IV	<150	<100	≤10	<25
V	超过IV级者			

2) 在坡口预定线两侧各50mm(板厚大于100mm时，以板厚的一半为准)内，缺陷的指示长度大于或等于50mm时，则应报废，不作评级。

3) 在检测过程中，检测人员如确认钢板中有白点、裂纹等危害性缺陷存在时，则应报废，不作评级。

## 10. 叠加效应

当缺陷较小时，缺陷回波从第一次开始会出现二次、三次逐渐增高的现象，如图4-6-4所示，这是由于缺陷小，又处于板厚中心或其附近，缺陷的直接反射与缺陷的多次反射相互叠加而形成的，故称之为叠加效应。

如图4-6-4所示，当缺陷位于板材中间部位时，缺陷的一次反射波 $F_1$ 是一条路径；显示出的缺陷二次反射波 $F_2$ 有三条路径；显示出缺陷的三次反射波 $F_3$ 有五条

路径；缺陷的四次反射波  $F_4$  则有七条路径。依此类推，缺陷反射波的幅度随反射路径的增多而增大，然后再逐渐降低，最高幅度出现在第几次反射波上，与板材的厚度及材质的衰减等有关。

在钢板检测中，若出现叠加效应，应根据  $F_1$  来评价缺陷。只有当板厚  $T < 20\text{mm}$  时，才以  $F_2$  来评价缺陷，主要是为了减少近场区的影响。

## 二、复合板的检测

### 1. 复合材料中常见缺陷

复合材料是由母材与复合层黏合而成，常见的复合材料是在碳钢或低合金钢母材上，粘接不锈钢、钛及铝铜合金等复合层，可提高钢板的耐蚀性。

复合材料一般用轧制、爆炸和堆焊等方法制造。复合材料中常见缺陷是脱层（脱接），即复合层与母材在界面处复合不良。

### 2. 检测方法

复合材料检测与一般钢板的检测基本相同，常用单晶直探头或双晶直探头进行纵波检测，检测频率一般为  $2.5 \sim 5.0\text{MHz}$ ，探头直径一般不大于  $25\text{mm}$ 。

灵敏度设置：将复合板完好部位的一次底波  $B_1$  调至满屏幅度的 80% 即可。检测时，可从母材一侧检测，也可从复合层一侧检测。

### 3. 缺陷的判别

(1) 当两种复合的两种材料声阻抗接近时 如不锈钢/碳钢复合板，复合良好的区域基本上无界面回波。若存在脱接缺陷，则会在示波屏出现缺陷回波  $F$ 。

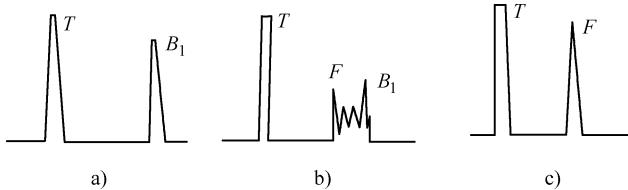


图 4-6-5 母材一侧检测

a) 完好区 b) 不完全脱接 c) 完全脱接

当从母材一侧检测时，若无脱接，则无缺陷波  $F$ ，只有底波  $B_1$ ，如图 4-6-5a 所示。如存在不完全脱接，则在  $B_1$  前不远处  $F$  波出现多次彼连，底波  $B_1$  降低，如图 4-6-5b 所示。若为完全脱接，则  $F$  波较强，底波消失，如图 4-6-5c 所示。

当从复合材料一侧检测时，若无脱接，则无缺陷波  $F$ ，只有底波  $B_1$ ，如

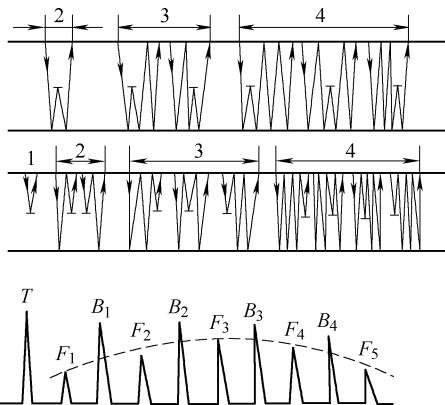


图 4-6-4 叠加效应

图 4-6-6a 所示。如图 4-6-6b 所示为不完全脱接，底波  $B_1$  降低，F 波多次脉冲，并紧随始波  $T$  与底波  $B_1$  之后。如图 4-6-6c 所示为完全脱接，F 波多次脉冲，宽度增加，底波消失。

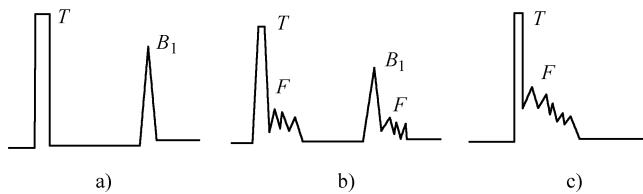


图 4-6-6 复合层一侧检测

a) 完好区 b) 不完全脱接 c) 完全脱接

(2) 当复合的两种材料声阻抗相差较大时，如钛/碳钢复合板，即使复合良好，也会出现界面回波。这时缺陷波判别困难，为此常常利用图 4-6-7 所示的试块来比较。根据复合界面反射波宽度、高度和底波变化来判别。

从复合材料一侧检测时，需根据复合界面反射波宽度  $L$  和底波  $B_1$  的高度来判别复合是否良好。若

工件复合界面反射波宽度  $L_{工}$  小于试块上的反射波宽度  $L_{试}$ ，且工件底波高于试块底波，则复合良好，如图 4-6-8 所示。

当从母材侧检测时，需要根据复合界面反射波  $S$  和底波  $B_1$  的高度来判别复合是否良好。若工件中  $S$  波低于试块中的  $S$  波，工件中底波  $B_1$  高于试块中底波  $B_1$ ，则复合良好，如图 4-6-9 所示，反之则复合不好。

#### 4. 未结合区缺陷的测定

JB/T 4730—2005 中规定，当第一次底波高度低于荧光屏满屏刻度的 5%，且有明显的未结合缺陷反射波时（ $\geq 5\%$ ），该部位称为未结合区。移动探头，使第一次底波升高到满屏刻度的 40%，以此时探头的中心作为未结合区边界点，以此确定缺陷的边界并确定单个缺陷的指示长度和未结合区的面积。

#### 5. 缺陷评定和质量分级

JB/T 4730—2005 中关于评定复合板未结合缺陷的评定和质量级别的方法如下：

(1) 缺陷指示长度的评定 一个缺陷所指示的最大长度作为该缺陷的指示长度。若单个缺陷的指示长度小于 25mm 时，可不作记录。

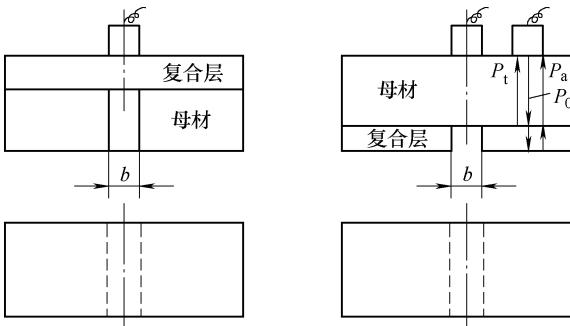


图 4-6-7 复合材料检测用对比试块

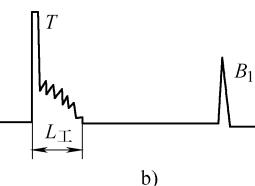
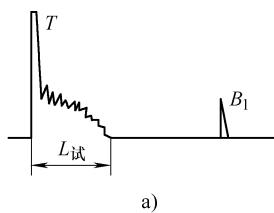


图 4-6-8 从复合材料侧检测  
a) 试块 b) 工件

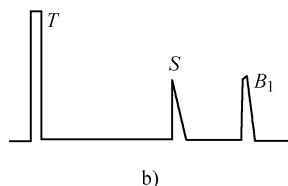
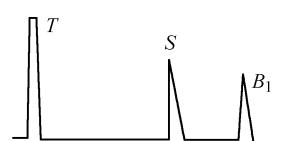


图 4-6-9 从母材侧检测  
a) 试块 b) 工件

(2) 缺陷面积的评定 多个相邻的未结合区, 当其最小间距小于等于 20mm 时, 应作为单个未结合区处理, 其面积为多个未结合区面积之和。

(3) 未结合率的评定 未结合区总面积占复合板总面积的百分比。

(4) 质量分级

1) 复合钢板的质量分级见表 4-6-2。

2) 在坡口的预定线两侧各 50mm 的范围内, 未结合的指示长度大于或等于 25mm 时, 定级为Ⅳ级。

表 4-6-2 复合钢板质量分级

等 级	单个未结合指示长度/mm	单个未结合区面积/cm <sup>2</sup>	未结合率 (%)
I	0	0	0
II	≤50	≤20	≤2
III	≤75	≤45	≤5
IV		大于Ⅲ级者	

## 第七章 管材超声检测

### 一、管材的加工和管材缺陷

管材种类很多，根据管径不同分为小口径管和大口径管，根据加工方法不同分为无缝钢管和焊接管。

无缝钢管是通过穿孔法和高速挤压法得到的。穿孔法是用穿孔机穿孔，并同时用轧辊滚轧，最后用心棒轧管机定径压延平整成形；高速挤压法是在挤压机中直接挤压成形，这种方法加工的管材尺寸精度高，厚壁中径管也有用这种方法的。

焊接管是先将板材卷成管形，然后用电阻焊或自动埋弧焊加工成形。一般大口径管，例如燃气输送管道，多用这种方法加工。焊接管的无损检测对象主要是焊缝。

从超声的角度讲，一般将外径大于100mm的管材称为大直径管，外径小于100mm的称为小直径管；将管壁与管外径之比大于0.2的金属管材称为厚壁管，小于0.2的称为薄壁管，这是以折射横波是否可以到达管材内壁来区分的。

正因为无缝钢管是将钢锭加热滚压或挤压而成，其固有缺陷或工艺缺陷除周向裂纹外，大都平行于管子轴线。为有效地检测这类缺陷，主要采用横波从管子周向入射的检测方法。

### 二、管材横波检测技术

沿外圆做周向扫查的横波检测是管材检测的主要方式。在实际检测时，通常希望管材中存在的波形单一，形成的A显示波形清晰简单，以便于缺陷信号的正确判断。因此常将管材检测的声束入射角选择在第一和第二临界角之间，选择在管材中只存在纯横波进行检测。

管材检测最重要的目的是检测内、外壁的纵向裂纹。因此在管材中采用纯横波检测的前提条件就是使声束能够检测到管材的内壁。

如图4-7-1所示，当超声波束以纵波入射角 $\alpha$ 进入管材（壁厚为 $t$ ，外径为 $D$ ）

时, 折射角为  $\beta$ ; 当声束按锯齿形路径传播, 入射角  $\alpha$  到管材内壁时, 入射角为  $\beta_1$ 。将折射声束的轴线  $PQ$  延长, 并由圆心  $O$  引垂线与该延长线相交于  $q$ , 由直角三角形  $PqO$  和  $QqO$ , 可推导得到下面的关系式

$$\sin\beta_1 = \frac{\sin\beta}{\left(1 - \frac{2t}{D}\right)} = \frac{\sin\beta}{\frac{r}{R}}$$

(4-7-1)

式中  $r$  —— 内半径;  
 $R$  —— 外半径。

当  $\beta_1 = 90^\circ$  时, 声束轴线与内管壁相切, 为声束到达内壁的临界状态。此时, 折射角满足下列关系

$$\sin\beta = 1 - \frac{2t}{D} = \frac{r}{R} \quad (4-7-2)$$

因此, 从几何关系上推导得出的声束到达内壁的条件为

$$\sin\beta < 1 - \frac{2t}{D} = \frac{r}{R} \quad (4-7-3)$$

由第一临界角公式可知, 产生纯横波的条件是

$$\sin\alpha > \frac{c_{L_1}}{c_{L_2}} \quad (4-7-4)$$

式中  $c_{L_1}$  —— 入射介质中的纵波声速;  
 $c_{L_2}$  —— 管材中的纵波声速。

结合上面两个条件可知, 要在管材中得到纯横波并到达内壁, 入射角必须满足以下条件

$$\frac{c_{L_1}}{c_{L_2}} < \sin\alpha = \frac{c_{L_1}}{c_{S_2}} \sin\beta < \frac{c_{L_1}}{c_{S_2}} \left(1 - \frac{2t}{D}\right) \quad (4-7-5)$$

式中  $c_{S_2}$  —— 管材中的横波声速。

显然, 并不是任何条件下式 (4-7-2) 均可成立, 成立的条件是

$$\frac{c_{L_1}}{c_{L_2}} < \frac{c_{L_1}}{c_{S_2}} \left(1 - \frac{2t}{D}\right) \quad (4-7-6)$$

所以, 管材中为纯横波条件下, 声束可到达内壁的前提条件是

$$\left(\frac{t}{D}\right)_{\text{临界}} < \frac{1}{2} \left(1 - \frac{c_{S_2}}{c_{L_2}}\right) \quad (4-7-7)$$

对于钢管, 纵波速度为  $5850\text{m/s}$ , 横波速度为  $3200\text{m/s}$ ,  $\sin\beta = 0.55$ ,  $\left(\frac{t}{D}\right)_{\text{临界}} = 0.23$ 。粗略的估计金属管材能否用横波检测时, 通常用厚度与外径比

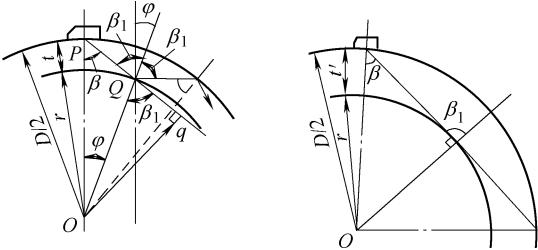


图 4-7-1 斜角入射纵波检测时管材中横波及主声束传播情况

是否小于 0.2 作为依据，小于 0.2，则认为可以检测，并称这样的管材为薄壁管。

上述结果是以声束轴线扫查到内壁为依据的。实际上，由于声束具有一定的宽度，即使声束轴线稍偏离管子内壁，扩散声束仍有可能检测到管材内壁的缺陷，但此时灵敏度会降低。

### 三、大直径薄壁管的接触法检测

对于外径小于 100mm 的管材进行超声检测，为了提高耦合效果，当批量较大时，大多采用水浸法检测，但这种方法一般都是成套的自动检测设备，大都应用在钢管制造企业，而在机械制造行业较少应用，因此不做详细说明，下面介绍大直径管的接触法检测。

大口径管曲率半径较大，探头与管壁声耦合，因此大多采用接触法，如管径不太大，需要将探头的斜楔磨成与管材表面相吻合的曲面，也可在探头前加装与管材相吻合的滑块，如图 4-7-2 所示。

下面分别介绍纵向缺陷和横向缺陷的一般检测方法。

#### 1. 纵向缺陷的检测

(1) 探头 检测纵向缺陷的斜探头，应进行加工使之与工件表面吻合良好。探头压电晶片的长度或直径不大于 25mm，探头的频率为 2.5~5.0MHz。

(2) 试块 检测纵向缺陷的对比试块应选取与被检钢管规格相同，材质、热处理工艺和表面状况相同或相近的钢管制备。对比试块不得有大于  $\phi 2$ mm 当量的自然缺陷。对比试块的长度应满足检测方法和检测设备的要求。对比试块上的人工缺陷为尖角槽，尖角槽的位置如图 4-7-3 所示，其尺寸见表 4-7-1。

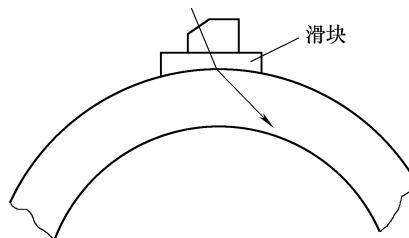


图 4-7-2 探头加装滑块

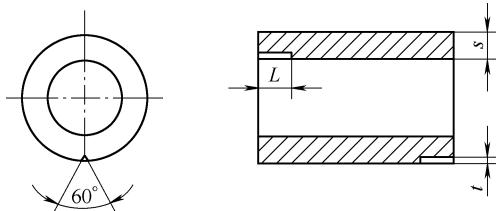


图 4-7-3 纵向缺陷对比试块

表 4-7-1 对比试块上人工缺陷尺寸

级 别	长度 $l$ /mm	深度 $t$ 占壁厚的百分比 (%)
I	40	5 (0.2mm ≤ $t$ ≤ 1mm)
II	40	8 (0.2mm ≤ $t$ ≤ 2mm)
III	40	10 (0.2mm ≤ $t$ ≤ 3mm)

(3) 灵敏度调节 把探头置于对比试块上作周向扫查检测，然后将试块上内壁

尖角槽的最高回波调至满屏的 80%，在移动探头找到外壁尖角槽的最高回波，二者波峰的连线为距离 - 波幅曲线，作为基准灵敏度，一般在基准灵敏度基础上提高 6dB 作为扫查灵敏度。

(4) 扫查 探头沿径向按螺旋线进行扫查。具体扫查方式有四种：一是探头不动，管材旋转的同时做轴向移动；二是探头做轴向移动，管材转动；三是管材不动，探头沿螺旋线运动；四是探头旋转，管材做轴向移动。探头扫查螺旋线的螺距不能太大，要保证超声波束对管材进行 100% 扫查，并有不小于 15% 的重叠。

(5) 探头沿周向扫查 以使声束在管壁内沿周向成锯齿形传播，如图 4-7-4 所示。

(6) 评定和验收 在扫查过程中，当发现缺陷时，要将仪器调回基准灵敏度，若缺陷回波幅度  $\geq$  基准灵敏度，则判为不合格。不合格品允许在公差范围内采取修磨方法进行处理，然后再进行复验。

## 2. 横向缺陷的检测

(1) 探头 检测横向缺陷的探头，应进行加工使之与工件表面吻合良好。探头压电晶片的长度或直径不大于 25mm，探头的频率为 2.5 ~ 5.0MHz。

(2) 检测横向缺陷的对比试块 同样应选用与被检钢管规格相同，材质、热处理工艺和表面状况相同或相近的钢管制成。对比试块上的人工缺陷为尖角槽，尖角槽的位置如图 4-7-5 所示，缺陷等级划分见表 4-7-2。

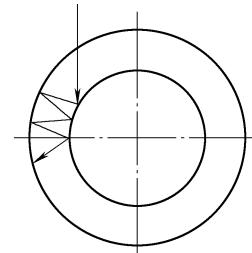


图 4-7-4 管壁内声束的周向传播

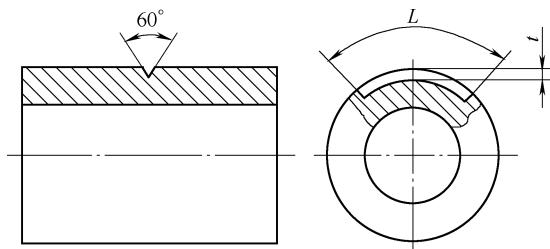


图 4-7-5 横向缺陷试块

表 4-7-2 缺陷等级划分

级 别	长度 $l/\text{mm}$	人工缺陷槽深度 $t$ 占壁厚的百分比 (%)
I	40	5 ( $0.2\text{mm} \leq t \leq 1\text{mm}$ )
II	40	8 ( $0.2\text{mm} \leq t \leq 2\text{mm}$ )
III	40	10 ( $0.2\text{mm} \leq t \leq 3\text{mm}$ )

(3) 灵敏度调节 对于只有外表面人工缺陷的试块，可直接将对比试块上的人工缺陷最高回波调至 50% 作为基准灵敏度。

对于内外表面均有人工缺陷的试块，应将内表面人工缺陷的最高回波调至 80%，然后找到外表面的人工缺陷最高回波，二者波峰的连线作为距离 - 波幅曲

线, 该曲线为基准灵敏度。同样在基准灵敏度基础上提高 6dB 作为扫查灵敏度。

(4) 扫查检测 探头沿轴向按螺旋线进行扫查, 以使声束在管壁内沿轴向成锯齿形传播, 如图 4-7-6 所示。

(5) 评定和验收 当发现缺陷时, 要将仪器调回基准灵敏度, 若缺陷回波幅度  $\geq$  基准灵敏度, 则判为不合格。不合格品允许在公差范围内采取修磨方法进行处理, 修磨后复验。

合格级别由供需双方商定。

### 3. 与管壁平行缺陷的检测

对于与管壁平行缺陷的检测则采用纵波垂直入射检测法, 如图 4-7-7 所示, 一般采用纵波单晶直探头或双晶直探头。当缺陷较小时, 缺陷波  $F$  与底波  $B$  同时出现, 这时可根据  $F$  波的高度来评价缺陷的当量大小。当缺陷较大时, 底波  $B$  会消失, 这时可用半波高法来测定缺陷的面积大小。

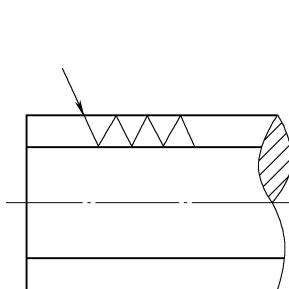


图 4-7-6 管壁内声束的轴向传播

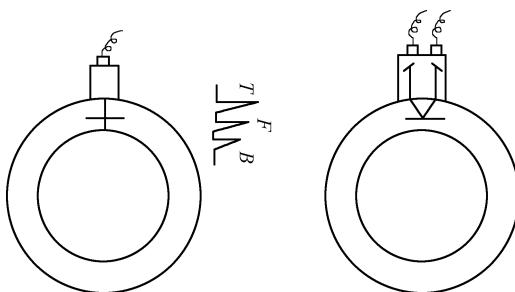


图 4-7-7 纵波垂直入射检测法

## 第八章 锻钢件的检测

### 一、制造工艺及常见缺陷

一般较大型锻件大多要经过治铸→锻造→热处理→机械加工等工艺过程。锻件中的缺陷主要有两个来源：一种是铸锭中缺陷引起的缺陷，另一种是锻造及热处理过程中产生的缺陷。

#### 1. 固有缺陷

钢锭治铸过程中产生的缩孔、疏松、夹杂和裂纹等缺陷在锻件后续工艺过程中不可能消除，但会产生变形和延伸。

缩孔多见于锻件的端部，锻压时沿着锻造金属流变方向延伸，在轴芯部位多呈平面状，锻压比较小也可能呈体积状。疏松和夹杂物是在钢锭凝固收缩时形成的，主要集中在钢锭的中心及头部，经锻造后往往压成平面状分布，且一般均与锻压方向垂直，即与轴线平行，当锻造比不足时，也会以体积形存在。

铸造引起的裂纹，如奥氏体钢轴心晶间裂纹在锻压时如温度不够会扩展延伸，甚至形成缝隙。

固有缺陷的特点是大多呈平面状，且与锻压面垂直。

#### 2. 工艺缺陷

锻造过程中产生的缺陷主要有折叠（重皮）、白点、裂纹等，热处理过程中产生的缺陷主要有白点、裂纹等，机械加工缺陷主要是表面裂纹类；锻压产生的裂纹可出现在芯部或表面，热处理裂纹大多在表层，机械加工裂纹则属表面裂纹。

若锻件含氢量较高，锻造或热处理过程中冷却速度过快，钢中溶解的氢来不及扩散逸出而在内部某核心集聚产生局部大应力而引起材质不连续——微细开裂，其断面是发亮的，故称之为白点，易在镍铬钼钢、铬钢、镍钢及锰钢等合金钢中出现。

白点主要集中在锻件大截面的中心或特定部位，在钢中总是成群出现。如在轴类锻件中往往在  $1/2$  半径处形成一环带。

### 3. 使用缺陷

锻件经长期使用后,由于疲劳或应力腐蚀等原因而产生裂纹,这种裂纹一般出现在表面。

## 二、检测方法的确定和检测条件的选择

### (一) 检测方法及检测面的确定

前已述及,锻件中的固有缺陷或是工艺缺陷大多呈面状且与锻压面平行,因此主要采用纵波直探头在锻压面上检测。但是在锻压和热处理过程中产生的裂纹大多出现在表面且与表面垂直,因此对于易产生表面裂纹的锻件还要采用横波斜探头进行检测,现分述如下。

#### 1. 轴类锻件的检测

轴类锻件的锻压面为圆柱面,应以纵波直探头在圆柱面上从径向检测为主。考虑到裂纹缺陷,还应辅以直探头轴向检测,如图 4-8-1 所示,以及斜探头周向检测及轴向检测,如图 4-8-2 所示。

直探头做径向检测时,将探头置于轴的圆柱面做全面扫查。直探头做轴向检测时,探头置于轴的端头做全面扫查,以检出与轴线相垂直的横向缺陷。但当轴的长度太长或轴有多个直径不等的轴段时,会有声束扫查不到的死区,因而此方法有一定的局限性。

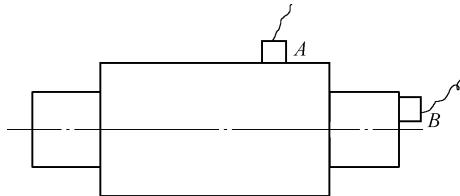


图 4-8-1 轴类锻件直探头径向、轴向检测示意图

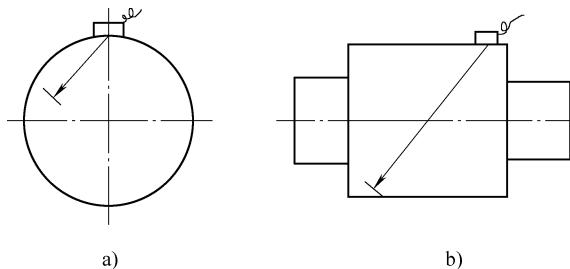


图 4-8-2 轴类锻件斜探头周向、轴向检测

a) 周向检测 b) 轴向检测

斜探头做周向及轴向检测时,考虑到缺陷的取向,检测时探头应做正、反两个方向的全面扫查。

#### 2. 饼类、碗类锻件的检测

饼类和碗类锻件的锻造工艺主要以镦粗为主,锻压面为端面,所以主要以纵波直探头在端面检测为主。对于有些重要的饼类、碗类锻件,要从两个端面进行检

测，有时还要从侧面进行径向检测，如图 4-8-3 所示。

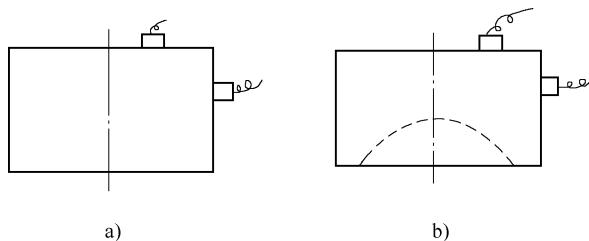


图 4-8-3 饼类、碗类锻件检测  
a) 饼类锻件 b) 碗类锻件

从端面或圆柱面检测时，一般要进行全面扫查。

### 3. 简类锻件的检测

简类锻件的锻造工艺是先镦粗，后冲孔，再滚压。因此锻压面为内外圆柱面，其缺陷的主要取向仍与筒体的圆柱面平行，所以简类锻件的检测以直探头外圆柱面检测为主，如图 4-8-4 所示。但对于壁较厚的重要筒类锻件，须加用纵波直探头的端面检测，以及横波斜探头在圆柱面上的检测，如图 4-8-5 所示。

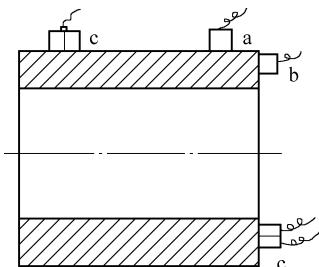
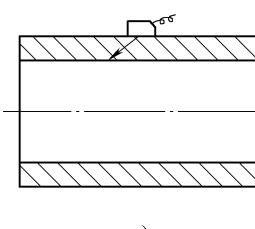
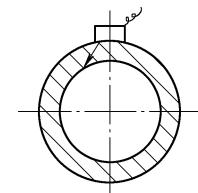


图 4-8-4 简类锻件直探头检测



a)



b)

图 4-8-5 简类锻件斜探头检测  
a) 轴向检测 b) 周向检测

一般壁厚小于等于 50mm 的筒类锻件，为了解决盲区灵敏度低的问题，应采用双晶纵波直探头检测。

筒类锻件的检测一般要求全面扫查。

### 4. 环形锻件的检测

环形锻件的锻压面为端面，因此主要采用纵波直探头在端面上进行检测，如图 4-8-6 所示。当环的厚度小于等于 50mm 时，宜采用双晶纵波直探头。

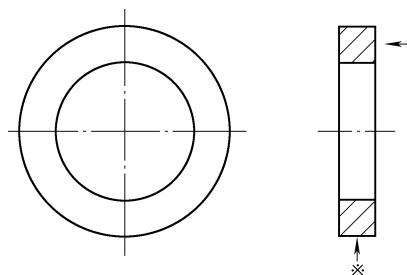


图 4-8-6 环形锻件的检测

## (二) 检测条件的确定

### 1. 探头形式的确定

前面叙述的检测方法中已经阐明, 锻件检测是以纵波直探头检测为主, 必要时辅以斜探头, 这是锻件检测确定探头形式的基本原则。

对于直探头, 锻件一般都比较厚, 一般采用单晶纵波直探头; 对于厚度小于等于 50mm 的锻件, 因为盲区的影响, 要求采用双晶片纵波直探头。

对于斜探头, 锻件一般都比较厚, 考虑到减小声程及获得较大的往复透过率, 一般选择  $\beta = 39^\circ \sim 45^\circ$  的探头, 例如 K1 探头。

### 2. 探头尺寸的确定

锻件一般都比较厚、比较大, 并要求 100% 扫查, 为了获得较强的超声能量、较好的指向性以及高的扫查效率, 宜采用较大的晶片尺寸, 一般为 14 ~ 25mm 直径的圆形晶片, 大多采用  $\phi 20\text{mm}$ 。

### 3. 探头频率的确定

一般锻件经热加工后晶粒都比较细, 为了获得较好的指向性, 可以考虑采用较高的频率。但锻件一般都比较厚, 频率过高、衰减较大不利于检测。因此一般使用的频率为 2.0 ~ 5.0 MHz, 国内多采用 2.5 MHz。

## (三) 耦合条件的确定

### 1. 检测面的要求

在锻件检测时, 为了实现较好的声耦合, 一般要求检测面的表面粗糙度  $R_a$  值不高于  $6.3\mu\text{m}$ , 表面平整均匀, 无划伤、油垢、污物、氧化皮及涂装等。当在试块上调节检测灵敏度时, 要注意补偿块与工件之间因曲率半径和表面粗糙度不同引起的耦合损失。

### 2. 耦合剂

锻件检测时, 常用机油、浆糊及甘油等耦合剂。当锻件表面较粗糙时也可选用水玻璃作耦合剂; 对于加工尺寸已到位或基本到位、表面粗糙度较低的锻件, 不宜采用浆糊、甘油作耦合剂, 因为它们具有腐蚀性。

## 三、缺陷的评定

### 1. 缺陷的分类

JB/T 4730—2005 标准中对锻件缺陷分为三类, 即单个缺陷、底波降低量和密集缺陷区。

(1) 单个缺陷 单个缺陷是指小于声束直径, 单个或分散分布的, 由平底孔当量来定量的缺陷。

(2) 底波降低量 底波降低量是指无缺陷处的底波  $B$  与有缺陷处底波  $BF$  之比, 用分贝数表示。

(3) 密集缺陷 密集缺陷区是指锻件中在棱长为 50mm 的正方体内存在五个或

五个以上缺陷，且每个缺陷均大于  $\phi 2\text{mm}$  当量直径，则该区域称为一个密集缺陷。

## 2. 缺陷的分级

JB/T 4730—2005 标准将上述三类缺陷分别分为五级，在同一检测位置若同时出现任意两种以上缺陷信号，应降级使用。

1) 缺陷引起底波降低量的质量分级见表 4-8-1。

表 4-8-1 缺陷引起底波降低量的质量分级 (单位: dB)

等 级	I	II	III	IV	V
底波降低量 $BG/BF$	$\leq 8$	$> 8 \sim 14$	$> 14 \sim 20$	$> 20 \sim 26$	$> 26$

注：本表仅适用于声程大于近场区长度的缺陷。

2) 单个缺陷的质量分级见表 4-8-2。

表 4-8-2 单个缺陷的质量分级 (单位: mm)

等 级	I	II	III	IV	V
缺陷当量直径	$\leq \phi 4$	$\phi 4 + ( > 0\text{dB} \sim 8\text{dB} )$	$\phi 4 + ( > 8\text{dB} \sim 14\text{dB} )$	$\phi 4 + ( > 12\text{dB} \sim 16\text{dB} )$	$> \phi 4 + 16\text{dB}$

3) 密集区缺陷的质量分级见表 4-8-3。

表 4-8-3 密集区缺陷的质量分级

等 级	I	II	III	IV	V
密集区缺陷占检测总面积的百分比 (%)	0	$> 0 \sim 5$	$> 5 \sim 10$	$> 10 \sim 20$	$> 20$

# 第九章

## 铸钢件的检测

### 一、铸钢件的特征

(1) 组织不均匀 液态金属注入铸模后与模壁首先接触的一层液态金属因温度下降最快，因此很快凝固成为较细晶粒。随着与模壁距离的增加，模壁影响逐渐减弱，晶体沿与模壁相垂直的方向生长成彼此平行的柱状晶体。在铸件的中心部位，散热已无显著的方向性，且可自由地朝各个方向生长直至彼此接触，故形成等轴晶区。由此可见，铸件内的组织是不均匀的，一般说来，晶粒比较粗大。

(2) 组织不致密 液态金属的结晶以树枝生长方式进行，树枝间的液态金属最后凝固，但树枝间很难由金属液体全部填满，造成铸件普遍存在不致密性。此外，注入模中的液态金属在冷却中及凝固中如体积收缩而未获足够的补充，也可形成疏松甚至缩孔。铸铁件中的石墨往往以较大尺寸的片状、球状或其他形状出现，也可看成是一种不致密组织。

(3) 表面粗糙 表面一般来说比较粗糙，不能与机加工表面相比，形状也较复杂。

### 二、铸钢件的常见缺陷

铸钢件在浇铸过程中产生的缺陷虽然与钢锭浇注产生的缺陷类似，但它们仍属工艺缺陷，常见的工艺缺陷有气孔、夹杂、缩孔、疏松和裂纹等。

(1) 气孔(气泡) 气孔(气泡)是由于金属液含气量过多，模型潮湿及透气性不佳而形成的空洞。铸件中的气孔分为单个分散气孔和密集气孔。

(2) 夹杂 夹杂分为非金属夹杂和金属夹杂两类。非金属夹杂是冶炼时金属与气体发生化学反应形成的产物或浇注时耐火材料、型砂等混入钢液形成的夹杂物。金属夹杂是异种金属偶尔落入钢液中未能溶化而形成的夹杂物。

(3) 缩孔 缩孔是由于金属液冷却凝固时体积收缩得不到补充而形成的缺陷。缩孔多位于浇冒口附近和截面最大部位或截面突变处。

(4) 疏松 由于熔炼不良, 铸模形状不适当等原因, 在铸钢件壁厚的中部产生了细的晶界裂纹或者晶界中产生细微的空隙, 而形成的疏松结构, 这部分晶粒间的结合相当弱 (在射线透照底片上形成云雾状暗影)。

(5) 裂纹 裂纹是指钢液, 冷却过程中由于低熔点杂质过多, 加之内应力 (热应力和组织应力) 过大使铸件局部裂开而形成的缺陷。铸件截面尺寸突变处, 应力集中严重, 易出现裂纹。

综上所述, 铸钢件中工艺缺陷的显著特点是形状复杂; 铸钢件的使用缺陷主要是疲劳裂纹, 包括机械疲劳裂纹和热疲劳裂纹。

### 三、铸钢件检测的难点

#### 1. 超声波穿透性差

粗大的晶粒、不均匀的组织等的复杂界面, 都增强了超声波的散射, 能量衰减大, 以致可探厚度比之锻件要小。

#### 2. 干扰杂波多

声波在不均匀、不致密组织和粗大晶粒界面上散射时, 其散射信号强度较大, 并为探头所接收; 粗糙的铸造表面对声波反射会形成杂波; 这些在示波屏上都会显示为杂乱的林状回波 (也称之为草状回波), 将可能淹没缺陷回波, 妨碍缺陷回波的辨认。

#### 3. 表面耦合条件差

铸钢件表面粗糙, 不利于声的耦合, 表面硬度大, 打磨较困难。

#### 4. 缺陷的定量较困难

由于铸钢件对声波的衰减大, 缺陷形状复杂, 以人工缺陷为基准的缺陷定量评定, 误差较大, 用计算的方法对缺陷定量难度更大。

以上所述正是铸件检测的困难所在, 这些困难使铸件检测受到一定的限制。但另一方面由于铸件质量要求较低, 允许存在单个缺陷尺寸较大, 数量较多, 同时铸件缺陷出现的部位规律性强, 因此铸件检测还是具有一定的价值。

### 四、检测条件的选择

#### 1. 检测方法

一般采用纵波直探头检测, 可以发现铸钢件内的各种缺陷。铸钢件在使用过程中产生的裂纹 (多为疲劳裂纹), 要采用横波斜探头检测。

#### 2. 探头

(1) 探头的形式 对于厚铸钢件, 采用单晶纵波直探头; 对于较薄的铸钢件, 采用双晶纵波直探头。采用斜探头时, 如铸钢件晶粒不太粗, 可用单晶横波斜探头; 如晶粒较粗, 可用双晶横波斜探头, 以提高信噪比。

(2) 探头的尺寸 纵波直探头的直径一般为  $\phi 20 \sim \phi 30$ mm, 横波斜探头的折射

角宜选用  $45^\circ$ ，只有在探头移动范围受到限制的情况选用较大角度的探头。

(3) 检测频率 铸钢件晶粒比较粗大，衰减较大，宜选用较低的频率。对于厚度不大又经过热处理的铸钢件，可选用  $1.0 \sim 2.5$  MHz；对于厚度较大和未热处理的铸钢件，宜选用  $0.5 \sim 2.5$  MHz。

(4) 试块 采用纵波直探头对铸钢件检测时，常用如图 4-9-1 所示的 ZGZ 系列平底孔对比试块。试块材质与被探铸钢件相同或相似，不允许存在  $\phi 2$  mm 平底孔缺陷。

试块平底孔直径  $d$  分别为 3mm、4mm 及 6mm 三种。平底孔声程  $l$  为 25mm、50mm、75mm、100mm、150mm 和 200mm 六种。该试块用于测试距离 - 波幅曲线和调整检测灵敏度。

(5) 检测表面与耦合剂 铸钢件表面粗糙，耦合条件差，检测前应对其表面进行打磨清理，表面粗糙度  $R_a$  值不大于  $12.5 \mu\text{m}$ 。

铸钢件检测时，常用黏度较大的耦合剂，如浆糊、黄油、甘油及水玻璃等。也可以联合使用，例如先在表面涂一层水玻璃，待干后用砂纸打磨平滑，再用机油耦合进行检测。这样可以降低对表面粗糙度的要求，减少打磨工作量。

(6) 透声性测试 前已述及，铸钢件对声的衰减较大，检测前有必要采用前述测试衰减系数的方法，测试其透声性。只需测出第一、二次底波的分贝差即可，为减少测试误差，一般测三点取平均值。

(7) 铸钢件内外层划分 铸钢件中缺陷至表面的距离不同，其危害不一样，一般外层比内层大。为此按铸钢件厚度划分为外层、内层、外层等三层。当其厚度小于 90mm 时，每层各占  $1/3$ ，当其厚度不小于 90mm 时，两外层厚度各为 30mm，其余为内层。

## 五、距离 - 波幅曲线的测绘与灵敏度调整

根据规范对灵敏度的要求，选定一组平底孔对比试块（平底孔直径相同，声程不同）。测出工件与对比试块的透声性和耦合损失差  $\Delta\text{dB}$ 。将探头置于平底孔声程与工件厚度相同或相近的试块上，对准平底孔，调节仪器使平底孔最高回波达  $10\% \sim 20\%$ ，然后固定各旋钮，将探头分别对准声程逐渐减小的平底孔，标记各平底孔回波的最高点，连成曲线，从而得到该平底孔的距离一波幅曲线（即面板曲线）。

调 [衰减器] 使仪器增益  $\Delta\text{dB}$ ，灵敏度调整就绪。为了便于发现缺陷，有时再增益  $6\text{dB}$  作为扫查灵敏度。

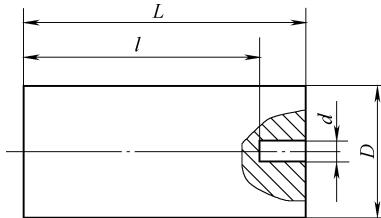


图 4-9-1 ZGZ 系列平底孔对比试块

## 六、缺陷的判别与测定

### 1. 缺陷的判别

探头按选定的方式进行扫查，相邻两次扫查重叠 15%，探头移动速度不大于 150mm/s。扫查中根据缺陷波高与底波降低情况来判别工件内部是否存在缺陷。以下几种情况作为缺陷记录。

- 1) 缺陷回波幅度达到距离 - 波幅曲线者。
- 2) 底面回波幅度降低量不小于 12dB 者。
- 3) 不论缺陷回波高低。认为是线状或片状缺陷者。

### 2. 缺陷的测定

发现缺陷以后，要测定缺陷的位置与大小。

(1) 缺陷位置的测定 缺陷的位置由示波屏上缺陷波前沿对应的水平刻度值来确定。

(2) 缺陷大小的测定 缺陷的面积大小用下述方法测定：当利用缺陷反射法判别缺陷时，用缺陷 6dB 法测定缺陷面积大小。当采用底波降低 12dB 法判别缺陷时，用底波降低 12dB 作为缺陷边界来测定缺陷面积。

## 七、铸钢件质量级别的评定

根据平面型缺陷和非平面型缺陷的尺寸，将铸钢件质量分为 I、II、III、IV 及 V 五个等级，其中 I 级最高，V 级最低。

评定时，评定区面积为  $10^5 \text{ mm}^2$  ( $317\text{mm} \times 317\text{mm}$  或面积相同的矩形)，尽可能使最严重的缺陷位于评定区内。位于评定区边界线上的缺陷，只计入缺陷位于评定区内的那部分面积。位于内外层界面上的非平面型缺陷，若大部分在外层，则计入外层，反之计入内层。若检测面积不足  $10^5 \text{ mm}^2$ ，则按比例折算允许的缺陷面积。

平面型缺陷等级划分见表 4-9-1，非平面型缺陷等级划分见表 4-9-2。

表 4-9-1 平面型缺陷等级划分

等 级	I	II	III	IV	V
单个缺陷在厚度方向的尺寸/mm	0	5	8	11	超过 IV 级
单个缺陷面积/mm <sup>2</sup>	0	75	200	360	
缺陷总面积/mm <sup>2</sup>	0	150	400	7000	

表 4-9-2 非平面型缺陷等级划分

等 级		I	II	III	IV	V
外层	单个缺陷在厚度方向的尺寸占外层厚度百分比 (%)	20	20	20	20	超过 IV 级
	单个缺陷面积/mm <sup>2</sup>	250	1000	2000	4000	
	缺陷总面积/mm <sup>2</sup>	5000	10000	20000	40000	
内层	单个缺陷在厚度方向的尺寸占外层厚度百分比 (%)	10	10	15	15	超过 IV 级
	缺陷总面积/mm <sup>2</sup>	12500	20000	30000	50000	

- 注: 1. 单个缺陷尺寸大于 320mm 者为 V 级。  
 2. 单个缺陷面积为缺陷最大尺寸和与其垂直方向最大尺寸之积。  
 3. 位于外层间距小于 25mm 的两个或多个缺陷可视为一个缺陷, 其面积为各缺陷面积之和。  
 4. 凡检测区存在裂纹的铸钢件, 评为 V 级。  
 5. 某铸钢件的质量级别, 系指平面型缺陷和非平面型缺陷均满足该级别的规定, 即二者中级别较低的级别为该铸钢件的级别。

# 第十章

## 焊缝的超声检测

### 一、平板对接焊缝的检测

#### (一) 检测方法和检测面的确定

##### 1. 检测方法的确定

基于以下两个原因，平板对接焊缝的检测主要采用横波斜探头法。

- 1) 一般焊缝都存在余高，探头无法在焊缝上扫查。
- 2) 焊缝中的危害性缺陷大都垂直于或接近垂直于检测面，最适宜用斜探头检测。

其中第二个原因是主要的，即使是对于要求高的焊缝，也要求将余高磨平，采用以横波斜探头为主的检测方法。

##### 2. 检测面的确定

焊缝超声检测时，检测面是焊缝两侧的母材表面，根据母材厚度和焊接接头的结构，检测面的确定大致有如下几种情况：单面双侧、双面双侧、单面单侧和双面单侧。对接焊缝主要是前两种，后两种主要用于角焊缝的检测。

1) 单面双侧：母材壁厚小于或等于 46mm 的焊缝，一般在焊件一面的双侧用一、二次波检测，如图 4-10-1 所示。

2) 双面双侧：母材壁厚大于 46mm 的焊缝，一般在焊件双面的双侧用一次波检测，如图 4-10-2 所示。

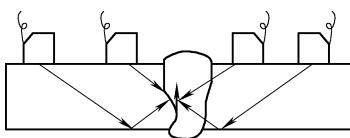


图 4-10-1 单面双侧检测示意图

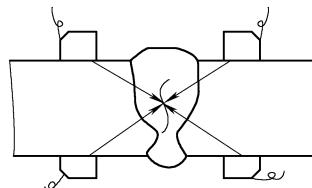


图 4-10-2 双面双侧检测示意图

## (二) 检测条件的选择

### 1. 检测频率的确定

一般碳钢焊缝的母材和熔化焊金属的晶粒都比较细，可以采用高一些的频率，但也不能太高，否则由于衰减的原因影响检测灵敏度，一般为 2.0~5.0MHz。

### 2. 折射角 (K 值) 的确定

探头  $K$  值的选择应从以下三个方面考虑：

1) 使声束能扫查到整个焊缝截面。

2) 使声束中心线尽量与主要危害性缺陷垂直。

3) 保证有足够的检测灵敏度。

从使声束能扫查到整个焊缝截面来考虑，可分析图 4-10-3 所示的情况，用一、二次波单面检测双面焊时

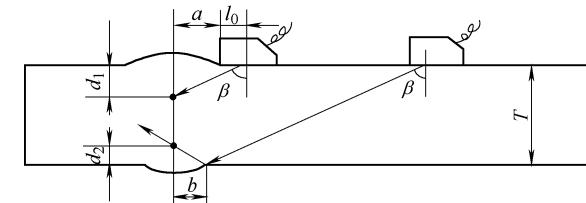


图 4-10-3 探头  $K$  值的确定

$$d_1 = \frac{a + l_0}{K}, \quad d_2 = \frac{b}{K} \quad (4-10-1)$$

其中一次波只能扫查到  $d_1$  以下的部分（受余高限制），二次波只能扫查到  $d_2$  以上的部分（因底面为曲面）。

为保证能扫查整个焊缝截面，必须满足  $d_1 + d_2 \leq T$ ，从而得到

$$K \geq \frac{a + b + l_0}{T} \quad (4-10-2)$$

式中  $a$ ——上焊缝宽度的一半；

$b$ ——下焊缝宽度的一半；

$l_0$ ——探头的前沿距离；

$T$ ——工件厚度；

$K$ ——探头的  $K$  值。

对于单面焊， $b$  可忽略不计，这时

$$K \geq \frac{a + l_0}{T}$$

从使声束中心线尽量与主要危害性缺陷垂直来考虑，因为焊缝中的危害性缺陷大多垂直于或近似垂直于检测面，故宜选用较大折射角 ( $K$  值)；但从保证有足够的检测灵敏度来考虑，宜选用较小折射角 ( $39^\circ \sim 50^\circ$ )，因为在此角度范围内往复透过率较高，所以要综合权衡选取。

一般斜探头  $K$  值可根据工件厚度来选择，薄工件采用大  $K$  值，以避免近场区检测，提高定位、定量精度；厚工件采用小  $K$  值，以便缩短声程，减少衰减，提高检测灵敏度，同时还可减少打磨宽度。

实际检测时，可参照表 4-10-1 选择斜探头  $K$  值或折射角。

表 4-10-1 推荐采用的斜探头  $K$  值

板厚 $T/\text{mm}$	$K$ 值 [ 折射角 / (°) ]
8 ~ 25	3.0 ~ 2.0 (72 ~ 60)
> 25 ~ 46	2.5 ~ 1.5 (68 ~ 56)
> 46 ~ 120	2.0 ~ 1.0 (60 ~ 45)
> 120 ~ 400	2.0 ~ 1.0 (60 ~ 45)

### 3. 探头晶片尺寸的选择

探头晶片尺寸大，发射声波的强度大，指向性好，全面扫查时扫查速度快，有利于焊缝检测，但不利的方面是探头前沿长，一次波扫查的焊缝截面小，近场长度长有可能进入焊缝，不利于缺陷定量，不适宜用于检测面为曲面的焊缝；小晶片尺寸探头的优缺点与其相反，因此也要综合权衡选取。

一般对于薄板焊缝宜选用短前沿的小晶片尺寸探头，厚板焊缝宜选用大晶片尺寸探头。检测面为曲面的宜选用小晶片尺寸探头。

### 4. 检测面的修磨

为了获得较好的声耦合，被探焊缝两侧母材表面上的油垢、锈斑及飞溅氧化皮必须清除。检测面应光滑平整，露出金属光泽，其宽度按声程跨越形式不同而不同。

当采用一次反射法检测时，探头移动区大于或等于  $1.25P$

$$P = 2TK \text{ 或 } P = 2T\tan\beta \quad (4-10-3)$$

式中  $P$ ——跨距 (mm)；

$T$ ——母材厚度 (mm)；

$K$ ——探头  $K$  值；

$\beta$ ——探头折射角 (°)。

当采用直射法检测时，探头移动区应大于或等于  $0.75P$ 。

### (三) 试块

#### 1. 标准试块

用来检测仪器和探头的性能和调整扫描线，使用 IIW 试块或 CSK- IA 试块。为便于调整扫描线一般多采用 CSK- IA 试块。

#### 2. 对比试块

主要用来测绘距离 - dB 曲线和调整灵敏度。使用斜探头检测时，经常要更换使用不同的角度，因此人工反射体不采用平底孔，而是采用横孔，因为横孔不受探头角度的限制。目前常用的横孔中有  $\phi 2\text{mm} \times 40\text{mm}$  的长横孔、 $\phi 3\text{mm} \times 40\text{mm}$  的横

通孔和  $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm}$  的短横孔等。

#### (四) 距离 - 波幅曲线和灵敏度调节

##### 1. 距离 - 波幅曲线

曲线波高与缺陷大小及距离有关, 大小相同的缺陷由于距离不同, 回波高度也不同。描述某一确定反射体回波高度随距离变化的曲线称为距离 - dB 曲线。

焊缝超声检测的距离 - dB 曲线是按所用探头和仪器在试块上实测的数据绘制而成的, 该曲线族由评定线、定量线和判废线组成。评定线与定量线之间 (包括评定线) 为 I 区, 定量线与判废线之间 (包括定量线) 为 II 区, 判废线及其以上区域为 III 区, 如图 4-10-4 所示。

##### 2. 不同壁厚的距离 - dB 曲线灵敏度选择

在 JB/T 4730.3—2005 中, 灵敏度选择与壁厚有关。例如壁厚为 6~120mm 的焊接接头, 其距离 - dB 曲线的灵敏度见表 4-10-2。

表 4-10-2 距离 - dB 曲线的灵敏度

试块形式	板厚/mm	评 定 线	定 量 线	判 废 线
CSK-ⅡA	6~46 >46~120	$\phi 2\text{mm} \times 40\text{mm} - 18\text{dB}$ $\phi 2\text{mm} \times 40\text{mm} - 14\text{dB}$	$\phi 2\text{mm} \times 40\text{mm} - 12\text{dB}$ $\phi 2\text{mm} \times 40\text{mm} - 8\text{dB}$	$\phi 2\text{mm} \times 40\text{mm} - 4\text{dB}$ $\phi 2\text{mm} \times 40\text{mm} + 2\text{dB}$
CSK-ⅢA	8~15 >15~46 >46~120	$\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} - 12\text{dB}$ $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} - 9\text{dB}$ $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} - 6\text{dB}$	$\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} - 6\text{dB}$ $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} - 3\text{dB}$ $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm}$	$\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} + 2\text{dB}$ $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} + 5\text{dB}$ $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} + 10\text{dB}$

##### 3. 距离 - dB 曲线的绘制方法及应用

实用中, 距离 - dB 曲线有两种形式, 一种是用 dB 值表示的波幅作为纵坐标, 距离为横坐标, 称为距离 - dB 曲线; 另一种是以百分数表示的波幅作为纵坐标, 距离为横坐标, 实际检测中将其绘制在示波屏的面板上, 称为面板曲线。下面以板厚  $T = 30\text{mm}$  为例进行说明。

###### (1) 距离 - dB 曲线的绘制及应用

###### 1) 距离 - dB 曲线的绘制:

① 测定探头的入射点和  $K$  值, 并根据板厚按水平或深度调节扫描速度, 一般为 1:1 调节。

② 将探头置于 CSK-ⅢA 试块上, 衰减 48dB (假定), 调增益旋钮使深度为 10mm 的  $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm}$  短横孔的最高回波达基准 80% 高, 记下此时衰减器的读数和

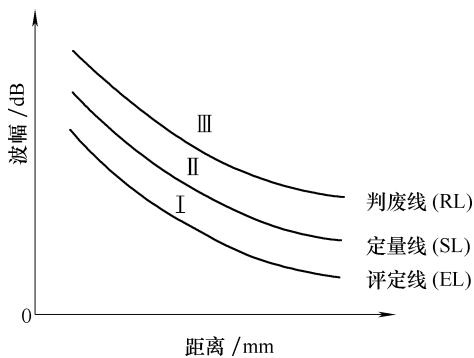


图 4-10-4 距离 - dB 曲线

孔深, 然后分别检测不同深度的  $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm}$  孔, 增益旋钮不动, 用衰减器将各孔的最高回波调至 80%, 记下相应的 dB 值和孔深填入表 4-10-3 中, 并将板厚  $T=30\text{mm}$  对应的定量线、判废线和评定线的 dB 值填入表中 (实际检测中, 只要测到 60mm 深的横孔即可)。

表 4-10-3 举例数据表 (单位: dB)

孔深/mm	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm}$	52	50	47	44	41	38	36	34	32
$\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} + 5\text{dB}$ (判废线)	57	55	52	49	46	43	41	39	37
$\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} - 3\text{dB}$ (定量线)	49	47	44	41	38	35	33	31	29
$\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} - 9\text{dB}$ (评定线)	43	41	38	35	32	29	27	25	23

③ 利用表 4-10-3 中所列数据, 以孔深为横坐标, 以 dB 值为纵坐标, 在坐标纸上描点绘出定量线、判废线和评定线, 标出 I 区、II 区和 III 区, 并注明所用探头的频率、晶片和  $K$  值, 如图 4-10-5 所示。

④ 用深度不同的两个孔校验距离 - dB 曲线, 若不相符, 则应重测。

## 2) 距离 - dB 曲线的应用:

① 了解反射体波高与距离之间的对应关系。

② 调整检测灵敏度。标准要求焊缝检测灵敏度不低于评定线。这里  $T=30\text{mm}$ , 评定线为  $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} - 9\text{dB}$ , 二次波检测最大深度为 60mm。由距离 - dB 曲线可知扫查灵敏度为 29dB, 因此将衰减器调到 29dB 时灵敏度就调好了。若考虑耦合补偿, 那么灵敏度为 26dB。实际检测过程中还应定期利用某一深度的孔来校验检测灵敏度。例如  $d=40\text{mm}$  的  $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm}$  横孔回波是否为 44dB。

③ 比较缺陷的大小。例如, 检测中发现两个缺陷, 缺陷 1:  $d_{f1}=30\text{mm}$ , 波高为 45dB; 缺陷 2:  $d_{f2}=50\text{mm}$ , 波高为 40dB, 试比较二者的大小。

由距离 - dB 曲线可知,  $d=30\text{mm}$ ,  $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm}$  波高为 47dB, 所以缺陷 1 当量为  $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} + 45\text{dB} - 47\text{dB} = \phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} - 2\text{dB}$ 。 $d=50\text{mm}$ ,  $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm}$  波高为 41dB, 所以缺陷 2 当量为  $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} + 40\text{dB} - 41\text{dB} = \phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} - 1\text{dB}$ , 不难看出缺陷 1 小于缺陷 2。

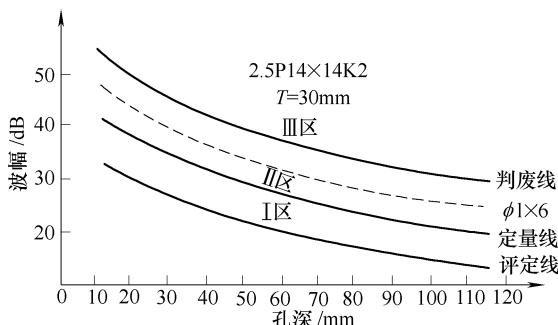


图 4-10-5 距离 - dB 曲线



④ 确定缺陷所处区域。例如检测中发现一缺陷  $d_{f1} = 20\text{mm}$ , 波高为  $45\text{dB}$ ; 另一缺陷  $d_{f2} = 60\text{mm}$ , 波高为  $40\text{dB}$ 。由距离 - dB 曲线可知,  $d = 20\text{mm}$ , 定量线为  $47\text{dB}$ , 缺陷 1 波高为  $45\text{dB} < 47\text{dB}$ , 在定量线以下, 即 I 区;  $d = 60\text{mm}$ , 定量线为  $35\text{dB}$ , 判废线为  $43\text{dB}$ , 缺陷 2 波高为  $40\text{dB}$ , 在定量线以上和判废线以下, 即 II 区。

(2) 面板曲线 实际检测中, 使用距离 - dB 曲线比较麻烦, 而面板曲线使用方便, 可根据波高直接确定缺陷当量和区域, 目前国内外应用很广。

### 1) 面板曲线的绘制:

测定探头的入射点和  $K$  值, 根据板厚按深度或水平调节扫描速度, 这里按深度  $1:1$  调节。

探头对准 CSK- III A 试块上深为  $10\text{mm}$  的  $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm}$  横孔并找到最高回波, 调节满幅度的  $100\%$  (但不饱和), 在面板上标记波峰对应的点①, 并记下此时的 dB 值  $N$  (假定  $N = 30\text{dB}$ )。

固定增益旋钮和衰减器, 分别测定深度为  $20\text{mm}$ 、 $30\text{mm}$ 、 $40\text{mm}$ 、 $50\text{mm}$ 、 $60\text{mm}$  的  $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm}$  横孔, 找到最高回波, 并在面板上标记相应波峰对应的点②、③、④、⑤、⑥, 然后连接①、②、③、④、⑤、⑥得到一条  $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm}$  的参考曲线, 这就是面板曲线, 如图 4-10-6 所示。

### 2) 面板曲线的应用:

① 灵敏度的调节。若工件厚度在  $15 \sim 46\text{mm}$  范围内, 评定线为  $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} - 9\text{dB}$ , 只要在  $N = 30\text{dB}$  的基础上再提高  $9\text{dB}$ , 即衰减器读数为  $21\text{dB}$ , 这时灵敏度就调好了。如果考虑  $5\text{dB}$  补偿, 则衰减器读数为  $16\text{dB}$  即可。

② 确定缺陷区域。检测时若缺陷波高低于参考线, 则说明缺陷波低于评定线, 可以不予考虑; 若高于参考线, 则用衰减器将缺陷波调至参考线, 根据衰减的 dB 值求出缺陷的当量和区域。例如:

$+4\text{dB}$ , 则缺陷当量为  $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} - 9\text{dB} + 4\text{dB} = \phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} - 5\text{dB}$ , 在 I 区。

$+8\text{dB}$ , 则缺陷当量为  $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} - 9\text{dB} + 8\text{dB} = \phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} - 1\text{dB}$ , 在 II 区。

$+16\text{dB}$ , 则缺陷当量为  $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} - 9\text{dB} + 16\text{dB} = \phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} + 7\text{dB}$ , 在 III 区。

用上述面板曲线时, 只要记住  $+6\text{dB}$  和  $+14\text{dB}$  即可。 $+6\text{dB}$  表示缺陷达定量线;  $+14\text{dB}$  表示缺陷达判废线, 应判废。如将判废线、定量线和评定线都绘制在示波屏上, 使用起来将更加方便。

对于现在广泛使用的数字式超声检测仪, 只需测出不同距离处的  $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm}$  最高回波, 输入评定线、定量线和判废线与  $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm}$  的 dB 差, 仪器即可同时将各线显示于示波屏上, 使用起来很方便。

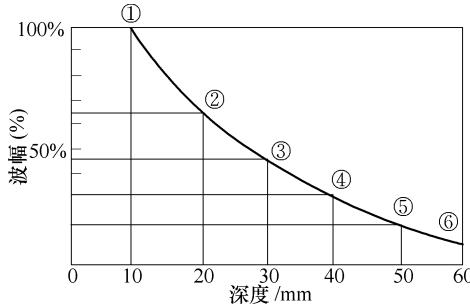


图 4-10-6 面板曲线

## (五) 扫查方式

扫查的目的是为了寻找和发现缺陷。为了达到这个目的，必须采用正确的扫查方式。在焊缝检测中，扫查方式有多种。

### 1. 锯齿形扫查

锯齿形扫查是手工超声检测中最常用的扫查方式，往往作为检测纵向缺陷的初始扫查方式，斜探头应垂直于焊缝中心线放置在检测面上，如图 4-10-7 所示。探头前后移动的范围应保证扫查到全部焊缝截面，在保持探头垂直焊缝做前后移动的同时，还应作  $10^\circ \sim 15^\circ$  的左右摆动。应注意每次前进的齿距不得超过探头晶片直径的 85%，以避免间距过大造成漏检。

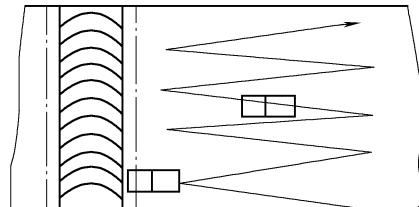


图 4-10-7 锯齿形扫查

### 2. 前后、左右、转角、环绕扫查

发现缺陷后，为观察缺陷的动态波形和区分缺陷信号或伪缺陷信号，确定缺陷的位置、方向和形状，可采用前后、左右、转角和环绕四种基本扫查方式，如图 4-10-8 所示。

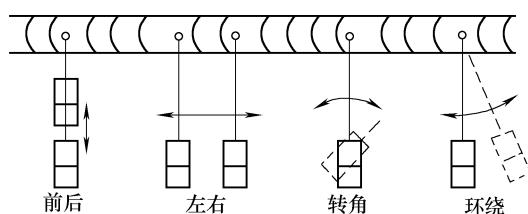


图 4-10-8 四种基本扫查方式

前后与左右扫查：当用锯齿形扫查发现缺陷后，可用前后与左右扫查找到缺陷的最大回波处，用前后扫查来确定缺陷的水平距离和深度，用左右扫查来确定缺陷沿焊缝方向的长度。

转角扫查：可利用转角扫查推断缺陷的方向。

环绕扫查：可利用环绕扫查大致推断缺陷的形状。

### 3. 检测横向缺陷的扫查方式

为检测焊缝或热影响区的横向缺陷，可采用如下扫查方式，同时将扫查灵敏度适当提高，一般为 6dB。

(1) 平行扫查 对于磨平的焊缝，可将斜探头直接放在焊缝上做平行扫查，如图 4-10-9 所示。

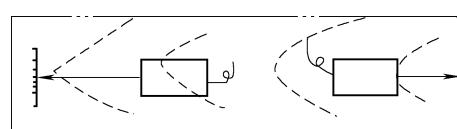


图 4-10-9 平行扫查

(2) 斜平行扫查 对于有余高的焊缝可在焊缝两侧边缘，使探头与焊缝成一定夹角 ( $< 10^\circ$ ) 做斜平行扫查，如图 4-10-10 所示。

(3) 交叉扫查 对于电渣焊中的人字形裂纹，可用  $K_1$  斜探头在焊缝两侧  $45^\circ$  方向做交叉扫查，如图 4-10-11 所示。

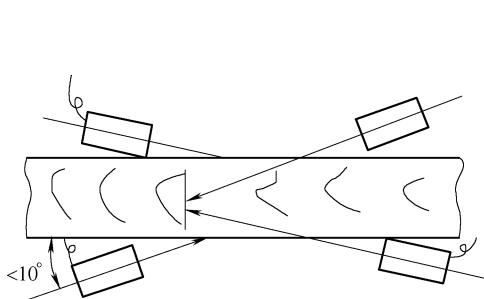


图 4-10-10 斜平行扫查

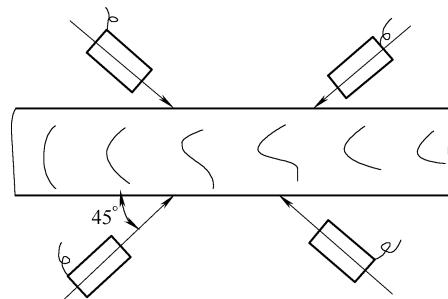


图 4-10-11 交叉扫查

#### 4. 双探头扫查方式

上述扫查方式是焊缝检测用单探头进行扫查的方式。串列扫查、V形扫查、交叉扫查则是用双探头进行扫查的常用方式。

对厚壁焊缝检测时，在焊缝的一侧，将一发一收两个斜探头同方向一前一后放置，做等间隔移动，以检测垂直于检测面的缺陷，这种扫查方式称为串列扫查，如图 4-10-12 所示。

对平板对接焊缝检测时，在焊缝的两侧，各放置一个探头，两个探头一发一收，做垂直于焊缝中心线的相向运动，以检测平行于检测面的缺陷，这种扫查方式称为 V 形扫查，如图 4-10-13 所示。

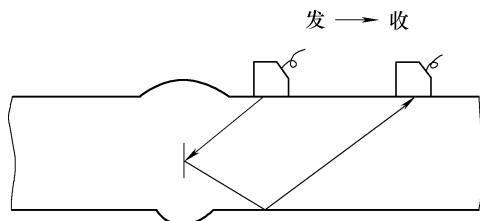


图 4-10-12 串列扫查

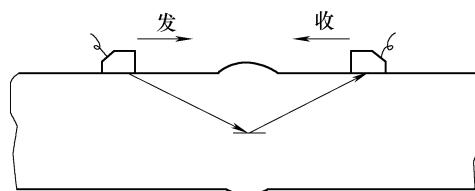


图 4-10-13 V 形扫查

对平板对接焊缝检测时，在焊缝的两侧各放置一个探头，使两个探头的声束轴线相交于要检测的部位，两个探头一发一收，在焊缝两侧做平行于焊缝中心线的移动，以检测横向缺陷，这种扫查方式称为交叉扫查，如图 4-10-14 所示。

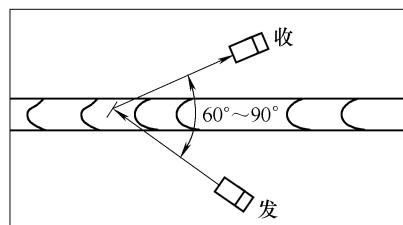


图 4-10-14 交叉扫查

#### (六) 扫查速度和扫查间距

##### 1. 扫查速度

检测时，探头与检测面相对运动的速度即为扫查速度。扫查速度要适当，才能使检测人员分辨清楚荧光屏上显示的缺陷回

波信号，或者是记录仪能明确地记录下缺陷的回波信号。

扫查速度与探头的有效直径以及仪器的重复频率有关。如果探头的有效直径大，仪器的重复频率高，则扫查速度可以快一点；如果探头的有效直径小，仪器的重复频率低，则扫查速度就需要慢一些。焊缝手工检测的扫查速度不应大于150mm/s。对于要求很高的检测场合，扫查速度要慢。总之，扫查速度既要保证检测人员能看清显示的回波信号，又要保证记录仪能明确地记录下缺陷回波信号，在此前提下可适当提高扫查速度。

## 2. 扫查间距

扫查间距指的是相邻扫查线（探头移动路线）之间的距离（锯齿形扫查为齿距）。扫查间距一般不大于探头晶片直径或探头有效声束宽度的1/2。

所谓有效声束宽度，是指声束边缘的声压比声束轴线上的声压低某规定的分贝数（如-6dB）的声束截面宽度。距探头的距离（声程）不同，其有效声束宽度也不同。

### （七）焊接接头的缺陷评定

焊接接头的缺陷评定包括确定缺陷的位置、性质、幅度和指示长度，然后应用标准中的规定，对焊接接头进行质量分级。

超声检测发现反射波幅超过I区的缺陷以后，首先要判断缺陷是否位于焊缝中或焊缝的截面的位置，之后判断缺陷是否具有裂纹、未熔合等危害性缺陷的特征。如为危害性缺陷，则直接评定为最低质量级别；若不是危害性缺陷，则确定缺陷的最大反射波幅所在距离-dB曲线上的区域，并对缺陷指示长度进行测定。缺陷的幅度区域和指示长度确定后，需要结合相关标准的规定，评定质量级别。

## 1. 缺陷位置的确定

发现缺陷后，可根据缺陷最大反射波幅在时基线的位置，确定缺陷的水平位置与垂直深度。但焊接接头的定位还要首先确定缺陷是否在焊缝中，具体方法是确定缺陷到探头入射点的水平距离 $l_f$ 。用直尺测量出缺陷波幅最大时探头入射点到焊缝边缘的距离 $l$ 及焊缝的宽度 $a$ 。如果 $l < l_f < l + a$ ，则缺陷在焊缝中；如果 $l_f < l$ 或 $l_f > l + a$ ，则缺陷不在焊缝中，不属于焊接缺陷（图4-10-15）。

实际检测时，可在缺陷波幅最大时的探头实际位置用直尺量出 $l_f$ 所对应的位置，从而直接判断缺陷是否在焊缝中。

## 2. 缺陷幅度的测定

焊接接头中发现的缺陷，需确定缺陷最大反射波幅在距离-dB曲线上所在的区域。

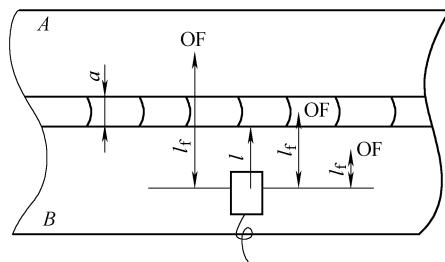


图4-10-15 焊缝检测缺陷位置的测定

缺陷幅度的表示方式是：以距离-波幅曲线某一条线为基准，用缺陷信号的最大峰值高于或低于该线的dB数表示缺陷的幅度，如缺陷信号高于定量线上同深度处人工反射体幅度3dB，可称缺陷幅度为定量线+3dB（SL+3dB）。按JB/T 4730—2005的规定，若定量线幅度为 $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} - 6\text{dB}$ ，则该缺陷位于Ⅱ区，其幅度为 $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} - 3\text{dB}$ 。

### 3. 缺陷指示长度的测定

主要有6dB法、端点6dB法和绝对灵敏度法。

### 4. 质量分级

缺陷定位、定量之后，要根据缺陷的当量和指示长度并结合有关标准的规定评定焊缝质量的级别。

JB/T 4730—2005将焊接接头质量级别分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三个级别，其中Ⅰ级最高，Ⅲ级最低，具体分级规定见表4-10-4。

表4-10-4 焊接接头质量分级 (单位：mm)

等级	板厚	反射波幅 (所在区域)	单个缺陷指示长度 L	多个缺陷累计长度 L'
I	6~400	I	非裂纹类缺陷	
	6~120	II	$L = T/3$ ，最小为10， 最大不超过30	在任意 $9T$ 焊缝长度范围内 $L' \leq T$
	>120~400		$L = T/3$ ，最大不超过50	
II	6~120	II	$L = 2T/3$ ，最小为12， 最大不超过40	在任意 $4.5T$ 焊缝长度范围内 $L' \leq T$
	120~400		最大不超过75	
III	6~400	II	超过II级者	超过II级者
		III	所有缺陷	
		I、II、III	裂纹等危害性缺陷	

注：1. 母材板厚不同时，区别薄板侧厚度值。

2. 当焊缝长度不足 $9T$ （Ⅰ级）或 $4.5T$ （Ⅱ级）时，可按比例折算。当折算后的缺陷累计长度小于单个缺陷指示长度时，以单个缺陷指示长度为准。

**【例1】**检测 $T=45\text{mm}$ 的对接焊缝，发现波幅为 $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} + 2\text{dB}$ 、指示长度为12mm的条状缺陷三个且位于同一直线上，其间距均为7mm，试据JB/T 4730.3—2005标准评定该焊缝质量等级。

解：① 缺陷反射波幅所在区域。 $T=45\text{mm}$ ，定量线为 $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} - 3\text{dB}$ ，判废线为 $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} + 5\text{dB}$ ，该缺陷当量为 $\phi 1\text{mm} \times 6\text{mm} + 2\text{dB}$ ，位于Ⅱ区。

② 缺陷指示长度计量。由已知得 $T/3 = 45\text{mm}/3 = 15\text{mm}$ ， $2T/3 = 30\text{mm}$ ，由于缺陷间距为7mm，小于相邻缺陷中较小指示长度12mm，应以缺陷之和作为单个缺陷，则缺陷总长为

$$L = 12 \times 3 = 36\text{mm} > 2T/3$$

故该焊接接头质量等级为Ⅲ级。

**【例 2】** 检测  $T = 40\text{mm}$  对接接头, 发现一个缺陷, 其当量为  $\phi 2\text{mm} \times 40\text{mm} - 2\text{dB}$ , 长为 10mm, 试评定该焊接接头的质量等级。

解: ① 缺陷反射波幅所在的区域。 $T = 40\text{mm}$ , 定量线为  $\phi 2\text{mm} \times 40\text{mm} - 12\text{dB}$ , 判废线为  $\phi 2\text{mm} \times 40\text{mm} - 4\text{dB}$ , 该缺陷当量为  $\phi 2\text{mm} \times 40\text{mm} - 2\text{dB}$ , 位于Ⅲ区。

② 质量等级。Ⅲ级。

## 二、T形焊接接头的超声检测

### (一) 结构特点与检测方法

T形接头由翼板和腹板焊接而成, 坡口开在腹板上。

在选择检测面和探头时应考虑到检测各类缺陷的可能性, 并使声束尽可能垂直于该结构中的主要缺陷。根据焊接接头结构形式, T形焊接接头的检测有以下三种检测方式, 如图 4-10-16 ~ 图 4-10-18 所示, 可选择其中一种或几种方式组合实施检测, 并应考虑主要检测对象和几何条件的限制。

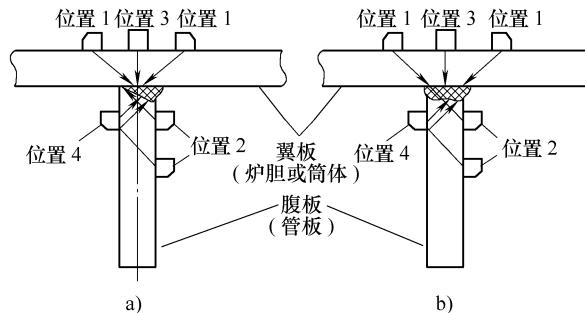


图 4-10-16 T形焊接接头 (形式 1)

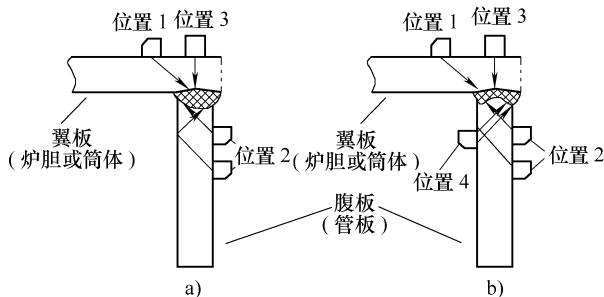


图 4-10-17 T形焊接接头 (形式 2)

1) 用斜探头从翼板外侧用直射法进行检测, 如图 4-10-16 中的位置 1、

图 4-10-17 中的位置 1 和图 4-10-18 中的位置 1 所示。

2) 用斜探头在腹板一侧用直射法或一次反射法进行检测, 如图 4-10-16 中的位置 2、位置 4, 图 4-10-17 中的位置 2、位置 4 和图 4-10-18 中的位置 2 所示。

3) 用直探头或双晶直探头在翼板外侧沿焊接接头检测, 或用斜探头在翼板外侧沿焊接接头检测, 如

图 4-10-16 中的位置 3、图 4-10-17 中的位置 3 和图 4-10-18 中的位置 3 所示。位置 3 包括直探头和斜探头两种扫查。

## (二) 检测条件的选择

(1) 探头 采用纵波直探头时, 探头的频率可选为 2.5MHz, 探头的晶片尺寸不宜过大。采用斜探头时, 探头的频率为 2.5~5MHz; 在翼板外侧进行检测时, 推荐使用  $K_1$  探头; 用斜探头在腹板延迟进行检测时, 探头的  $K$  值根据腹板厚度按表 4-10-1 进行选择。

(2) 试块 直探头检测用对比试块为平底孔试块或翼板底面。斜探头检测用对比试块与平板对接接头所用试块相同。

## (三) 仪器的调整

(1) 扫描速度的调节 直探头利用翼板底波或试块调节。斜探头调节方法与平板对接接头所用试块相同。

(2) 检测灵敏度的调整 直探头检测灵敏度应以翼板厚度按表 4-10-5 进行调整。

表 4-10-5 直探头距离 -dB 曲线的灵敏度

评定线	定量线	判废线
φ2mm 平底孔	φ3mm 平底孔	φ4mm 平底孔

斜探头检测时, 距离 - 波幅曲线灵敏度应以腹板厚度按表 4-10-2 确定。

## (四) 扫查

直探头和斜探头的扫查可按图 4-10-16~图 4-10-18 所示的方法进行。

## (五) 缺陷的判别与评定

直探头检测时, 应注意区分底波与焊接接头中的未焊透和层状撕裂。发现缺陷后确定缺陷的位置、指示长度或当量大小。

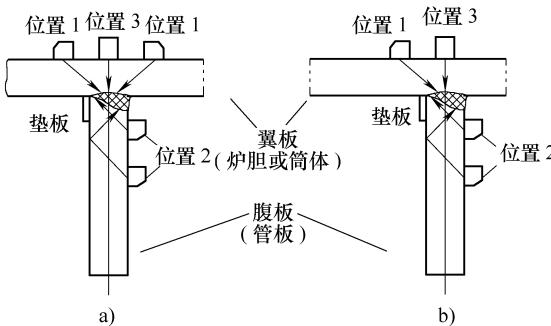


图 4-10-18 T 形焊接接头 (形式 3)

斜探头检测时，探头在焊缝两侧沿垂直于焊缝方向扫查，焊脚反射强烈。当焊缝中存在缺陷时，缺陷波一般出现在焊脚反射波前面。焊缝中缺陷的位置、指示长度的测定方法同平板对接接头。

缺陷的评定参照表 4-10-4 进行质量分级。壁厚均以腹板为准。

### 三、管座角焊缝超声检测

#### (一) 结构特点与检测方法

管座角焊缝的结构形式有插入式和安放式两种。在选择检测方法时应考虑到各种类型缺陷的可能性，并使声束尽可能垂直于该焊接接头结构中的主要缺陷。

1) 插入式管座角焊缝是接管插入容器的筒体内焊接而成，如图 4-10-19 所示，可采用以下几种方式检测：

- ① 在接管内壁采用直探头检测，如图 4-10-19 位置 1 所示。
- ② 在容器外壁采用斜探头检测，如图 4-10-19 位置 2 所示。
- ③ 在接管内壁采用斜探头检测，如图 4-10-19 位置 3 所示。
- ④ 在容器内壁采用斜探头检测，如图 4-10-19 位置 4 所示。

2) 安放式管座角焊缝是接管安放在容器筒体上焊接而成，如图 4-10-20 所示，可采用以下几种方式检测：

- ① 在容器内壁采用直探头检测，如图 4-10-20 位置 1 所示。
- ② 在接管外壁采用斜探头检测，如图 4-10-20 位置 2 所示。
- ③ 在接管内壁采用斜探头检测，如图 4-10-20 位置 3 所示。

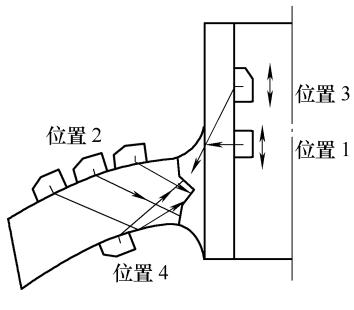


图 4-10-19 插入式管座角焊缝

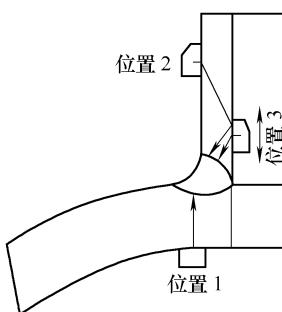


图 4-10-20 安放式管座角焊缝

由于管座角焊缝中危害最大的是未熔合和裂纹等纵向缺陷（沿焊缝方向），因此以纵波直探头检测为主。对直探头检测不到的区域，如安放式接管角焊缝根部，需要增加斜探头检测。

#### (二) 检测条件的选择

(1) 探头 采用直探头检测时，由于筒体或接管表面为曲面，二者接触面小，为保证耦合，探头的尺寸不宜过大。

(2) 试块 直探头检测用试块与锻件检测的平底孔试块相似。试块材质、曲率半径、表面粗糙度与被检工件相同。斜探头检测用对比试块与平板对接接头所用试块相同。

### (三) 仪器调整

(1) 扫描速度的调节 直探头可利用试块或工件底面调节, 斜探头可利用CSK-ⅠA试块按声程法调节。

(2) 灵敏度调节 直探头检测可按试块对比法或工件底波计算法调节, 斜探头按平板对接接头检测的方法调整。

### (四) 缺陷评定

(1) 缺陷定量 直探头检测时, 可用当量计算法、距离-波幅曲线或试块对比法确定缺陷的当量; 斜探头检测时, 可按平板对接接头方法测定缺陷幅度和所在区域。

(2) 质量分级 可按表4-10-6进行质量分级。

表4-10-6 质量分级 (单位: mm)

级 别	A	B	C
	8~50	8~300	8~300
I	$2T/3$ (最小12)	$T/3$ (最小10, 最大30)	$T/3$ (最小10, 最大20)
II	$3T/4$ (最小12)	$2T/3$ (最小12, 最大50)	$T/2$ (最小10, 最大30)
III	$T$ (最小20)	$3T/4$ (最小16, 最大75)	$2T/3$ (最小12, 最大50)
IV	超过III级者		

# 第十一章

## 超声检测通用工艺规程和工艺卡

### 一、超声检测通用工艺规程

超声检测通用工艺规程是根据相关法规、安全技术规范、产品标准、有关的技术文件和相关检测标准的要求，并针对检测机构的特点和检测能力而编制的技术文件，其内容应涵盖本单位（制造、安装或检验检测单位）产品（或检测对象）的检测范围。

超声检测通用工艺规程一般以文字说明为主，检测对象一般为某类工件，它应具有一定的覆盖性和通用性，至少应包括以下内容：

- (1) 适用范围 指明该超声检测通用工艺规程适用于哪类工件或哪种产品的焊缝及焊缝类型等。
- (2) 引用标准、法规 技术文件引用的法规、安全技术规范及技术标准等。
- (3) 检测人员资格 对检测人员的资格要求。
- (4) 检测设备、器材和材料 超声检测用的仪器、探头、试块和耦合剂等。主要性能指标有：检测设备规格与型号、探头类型、晶片尺寸和频率，标准试块和对比试块的型号与名称，耦合剂型号与名称。
- (5) 检测表面制备 对被检工件表面的准备方法和要求。
- (6) 检测时机 指不同材料的被检工件超声检测的时间安排等。
- (7) 检测工艺和检测技术 指明进行超声检测时可选择的检测技术等级、测定缺陷位置、当量和指示长度的方法。
- (8) 检测结果的评定和质量等级分类 指明检测结果评定所依据的验收标准以及验收合格等级等。
- (9) 检测记录、报告和资料存档 规定检测原始记录、报告内容及格式要求，安全管理规定等。
- (10) 编制（级别）、审核（级别）和批准人、制定日期。

## 二、超声检测工艺卡

超声检测工艺卡是具体产品检测作业的指导性文件，一般用表、卡的形式。它是针对某一具体产品上某一部件，依据超声检测通用工艺规程、被检工件的技术要求和检测标准而专门制订的有关检测技术细节和具体参数的工艺文件，凡是工艺卡上没有规定的一些共性问题，应按通用工艺规程进行。超声检测工艺卡一般应包括以下内容：

- (1) 工艺卡编号 应根据程序文件的规定编制。
- (2) 产品部分 产品名称和编号，制造、安装或检验编号，设备类别、规格尺寸、材料编号、热处理状态和表面状态。
- (3) 检测设备与材料 仪器型号和编号、探头规格参数、试块和耦合剂等。
- (4) 检测工艺参数 检测方法、检测比例、检测部位、仪器的基线比例和检测灵敏度调整等。
- (5) 检测技术要求 执行标准、验收级别。
- (6) 检测部位示意图。
- (7) 编制人员（资质级别）、审核人员（资质级别）。
- (8) 制定日期。

实施超声检测的人员应按检测工艺卡进行操作。

超声检测工艺卡的编制、审核应符合相关法规、安全技术规范和技术标准的规定。

超声检测工艺卡的格式见表 4-11-1。

表 4-11-1 超声检测工艺卡

产品名称		产品编号	
工件	部件名称	厚度	mm
	部件编号	规格	
	材料牌号	检测时机	
	检测项目	坡口形式	
	表面状态	焊接方法	
仪器 探头 参数	仪器型号	仪器编号	
	探头型号	试块种类	
	检测面	扫查方式	
	耦合剂	表面补偿	dB
	扫描线调节	检测灵敏度	dB

(续)

产品名称		产品编号	
技术 要求	检测标准	检测比例	%
	验收标准	合格级别	

检测部位示意图

编制(资格)		审核(资格)	
日期		日期	

## 第十二章

# 超声检测实例

### 一、锻造封头的检测

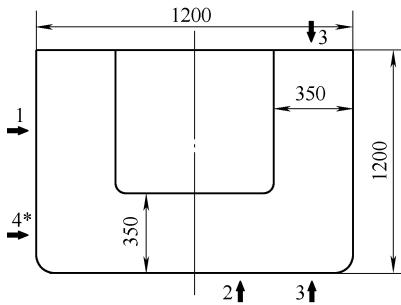
**【例 1】**依据 JB/T 4730. 3—2005 对一在制高压容器机加工锻造封头进行超声检测，工件具体尺寸见表 4-12-1 中示意图，验收级别为Ⅱ级。具体检测方法见如下工艺卡（表 4-12-1）。

表 4-12-1 锻造封头超声检测工艺卡

编 号	RD2005 - 06	试 件 名 称	封 头
规 格/mm	φ1200	厚 度	350
材 质	20MnMo	检 测 比 例	100%
检 测 时 机	机 械 加 工 后	检 测 标 准	JB/T 4730. 3—2005
合 格 级 别	Ⅱ	仪 器 型 号	HS600
探 头 型 号	2. 5P24Z	试 块 种 类	大 平 底
耦 合 方 式	直 接 接 触 法	耦 合 剂	浆 糊
表 面 状 态	$Ra \leq 6.3 \mu\text{m}$	表 面 补 偿/dB	0dB
检 测 面	应 检 测 方 向 1、2		应 (参 考) 检 测 方 向 3 (4)
扫 描 线 调 节	1:1 调 节 扫 描 线		1:1 调 节 扫 描 线
检 测 灵 敏 度	350mm/φ2 平 底 孔		600mm/φ2 平 底 孔
灵 敏 度 说 明	350mm 处大平底与 φ2mm 平底孔回波的分贝差为 42dB，将 350mm 处大平底回波调整至基准波高，在增益 42dB		350mm 处大平底与 600mm/φ2mm 平底孔回波的分贝差为 52dB，将 350mm 处大平底回波调整至基准波高，再增益 52dB

检测部位示意图

4\* 为参考方向



## 二、压力容器用钢板及对接接头的超声检测

**【例2】**某公司现场安装一台  $1000\text{m}^3$  液化气球罐，采用 16MnR 制造，主要技术参数如下：容器类别：三类；设计压力：1.8MPa；设计温度：50℃；规格： $\phi 12300\text{mm} \times 42\text{mm}$ ；容积： $1000\text{m}^3$ ；超声检测执行 JB/T 4730.3—2005 标准，抽查 20% 的球壳板进行超声检测，Ⅱ级合格；对接焊接接头焊后 36h 进行 100% 超声检测，Ⅰ级合格，球壳板（钢板）的检测见工艺卡（表 4-12-2）。

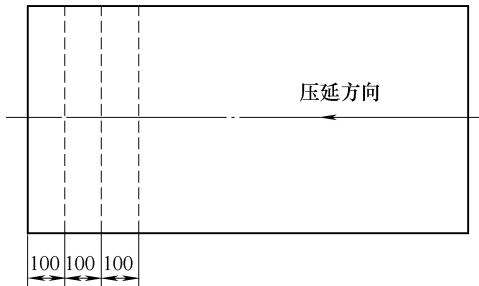
表 4-12-2 球壳板（钢板）超声检测工艺卡

产品名称		液化气球罐	产品编号	2007F148
工件	部件名称	球壳板	厚度	42mm
	部件编号	—	规格	$5900\text{mm} \times 1900\text{mm}$ $4400\text{mm} \times 1800\text{mm}$
	材料牌号	16MnR	检测时机	安装前
	检测项目	板材	坡口形式	—
	表面状态	轧制	焊接方法	—
仪器探头参数	仪器型号	HS600	仪器编号	FE0225
	探头型号	2.5P20Z	试块种类	CB Ⅱ -2
	检测面	轧制面	扫查方式	100mm 列线扫查 (边缘 50mm 全面扫查)
	耦合剂	水	表面补偿/dB	4dB
	扫描线调节	深度 1:2	检测灵敏度	$\phi 5\text{mm}$ 平底孔一次波高 50%

(续)

产品名称		液化气球罐	产品编号	2007F148
技术要求	检测标准	JB/T 4730.3—2005	检测比例	20%
	验收标准	JB/T 4730.3—2005	合格级别	Ⅱ级

探测部位示意图



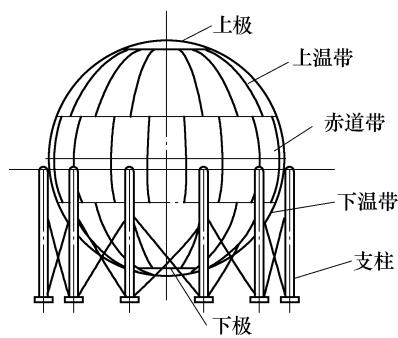
### 三、对接焊接接头的超声检测

待焊接完成36h后，对接接头的超声检测按以下工艺卡进行（表4-12-3）。

表4-12-3 对接接头超声检测工艺卡

产品名称		液化气球罐	产品编号	2007F148
工件	部件名称	—	厚度	42mm
	部件编号	—	规格	φ12300mm × 42mm
	材料牌号	16MnR	检测时机	焊后36h
	检测项目	对接焊接接头	坡口形式	—
	表面状态	打磨	焊接方法	—
仪器探头参数	仪器型号	HS600	仪器编号	FE0225
	探头型号	2.5P13 × 13K2	试块种类	CSK-ⅠA, CSK-ⅢA
	检测面	单面双侧	扫查方式	锯齿形、斜平行
	耦合剂	机油	表面补偿	4dB
	扫描线调节	深度1:1	检测灵敏度	φ1mm × 6mm - 9dB
技术要求	检测标准	JB/T 4730.3—2005	检测比例	100%
	验收标准	JB/T 4730.3—2005	合格级别	Ⅰ级

探测部位示意图



## 第十三章

# 衍射时差法 (TOFD) 检测技术

## 一、TOFD 技术简介和基本原理

### 1. TOFD 技术简介

TOFD (Time of flight diffraction technique) 检测技术是一种基于衍射信号实施检测的技术。通常使用纵波斜探头，采用一发一收模式。是利用缺陷端部的衍射波传播时间差来进行缺陷检测定量的方法。该技术由英国哈威尔 (Harwell) 实验室的 Mauric Silk 博士于 1977 年根据超声波衍射现象提出来。从 70 年代初期对衍射现象开始研究到创造出能够检测和确定缺陷尺寸的一整套检测方法，Silk 博士和他的合作者对 TOFD 技术开发经过大约 10 年时间。随着 90 年代数字式仪器的诞生和计算机技术的飞速发展，此技术首先是应用于军工和核工业设备的在役检验，现在在电力、石化、建造、运输及压力容器等民用工业的焊缝检测方面广泛应用。

### 2. 衍射时差法 (TOFD) 的基本原理

TOFD 技术是利用缺陷端部的衍射波传播时间差来进行缺陷检测定量的方法。所谓衍射，是指波在传播过程中与界面作用而发生的不同于反射的一种物理现象。典型的情况是：当超声波作用于一条长裂纹缺陷，在裂纹表面产生超声波反射的同时，还将从裂纹的尖端产生衍射波。衍射波信号比反射波信号弱得多，且向各个方向传播即没有明显的指向性，如图 4-13-1 所示。

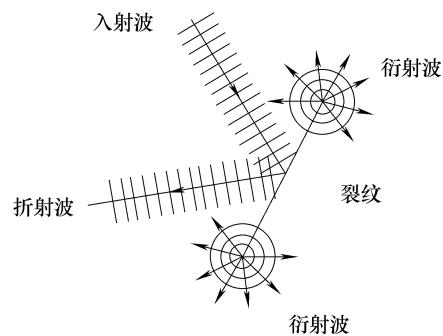


图 4-13-1 衍射现象

衍射及反射现象都可以用惠更斯原理解释，按惠更斯原理，裂纹表面上的每一个点都可以看作是一个独立反射超声波的子波源，各子波源的叠加构成反射波的波阵面。裂纹中部的反射波接近平面波，其波阵面由众多子波源反射波叠加构成，而

裂纹的尖端则没有叠加现象发生，尖端独立的子波源发出的超声波即为衍射波。衍射使得原来沿单一方向传播的能量在大角度范围内发生散射，与反射波相比，衍射波具有如下特点：

- 1) 没有明显的方向性。
- 2) 强度弱得多。
- 3) 裂纹的端点越尖锐，衍射特性越明显。

## 二、TOFD 技术的基本知识

### 1. TOFD 技术的基本配置

TOFD 技术所采取的方案是两个探头配对组成检测系统，一个探头起发射作用，另一个探头起接收作用，如图 4-13-2 所示。

采用双探头的优点及特征是：

- 1) 可避免镜面反射信号掩盖衍射波信号。
- 2) 能够更好地测定反射体的准确位置和深度。
- 3) 容易实现大范围扫查，快速接收大量信号。

### 2. TOFD 技术使用的探头

与常规脉冲反射技术使用的超声波探头不同，TOFD 所使用的探头不要求小的扩散角和好的指向性。相反提高检测速度且有利于衍射发生，往往使用小尺寸晶片的大扩散角探头，由于衍射信号比反射信号微弱很多，所以要求 TOFD 探头要有好的发射和接收性能。为了提高深度方向的分辨力，TOFD 探头应具有宽频带和窄脉冲特性。

一般使用的 TOFD 探头的频率范围是 1 ~ 15MHz，晶片尺寸范围是 3 ~ 20mm，通过楔块在钢中形成 45°、60° 和 70° 的折射纵波。

### 3. TOFD 技术采用的超声波波型

在脉冲反射法检测焊缝时大多采用横波，通过设计探头的入射角度，使工件中只存在横波而没有纵波，这就避免了两种波的同时存在而导致回波信号难以识别的困难。TOFD 检测不使用横波而使用纵波，其目的同样是为了避免回波信号难以识别的困难。

由于在各种波形中，纵波的传播速度最快，几乎是横波的两倍。从而能够领先其他种类的波，在最短的时间内到达接收探头。使用纵波并利用纵波波速计算缺陷的深度得到的结果是唯一的。

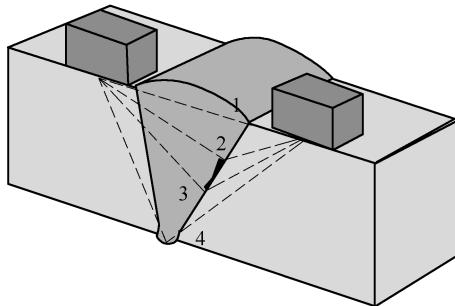


图 4-13-2 两个探头配对组成的  
TOFD 检测系统  
1—一直通波 2—上端点衍射波  
3—下端点衍射波 4—底面反射波

任意一种波都可能通过折射或衍射转换成为其他种类的波，如果采用横波检测，在其通过端点衍射后会产生纵波，那么纵波信号将先于横波到达接收探头，这时采用横波的波速计算将算出错误的缺陷深度。

#### 4. TOFD 声场中的 A 扫信号

在焊缝两侧，将一对频率相同的纵波斜探头相向对称放置（入射角的范围通常是  $45^\circ \sim 70^\circ$ ），一个作为发射探头，另一个作为接收探头。发射探头发射的纵波从侧面入射到被检焊缝断面，在无缺陷部位，接收探头会接收到沿工件表面传播的直通波和底面反射波，而在有缺陷存在时，在上述两波之间，接收探头会接收到缺陷上端部和下端部的衍射波，具体的传播路径如图 4-13-3 所示。

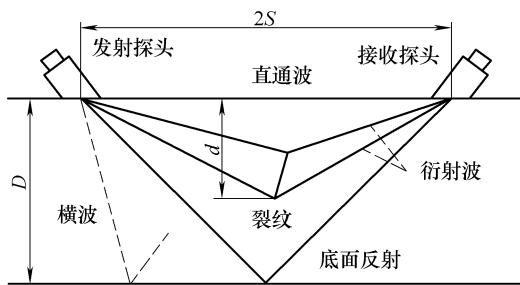


图 4-13-3 TOFD 技术的波传播路径

图 4-13-4 所示为 TOFD 的 A 扫信号。各种信号介绍如下：

① 直通波。在工件表面以下沿两个探头之间最短路径以纵波声速传播。

② 缺陷信号。缺陷上、下端点产生的衍射信号，在直通波和底面反射波之间，比直通波信号强，比底面反射波信号弱。

③ 底面反射波。纵波在底面的反射波。

④、⑤、⑥波形转换波。纵波和横波经过反射或衍射产生的变形波。

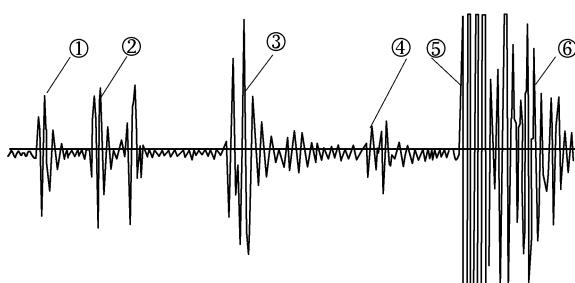


图 4-13-4 TOFD 技术的 A 扫信号

#### 5. 相位关系

当波束从高阻抗介质中入射到一个低阻抗介质（例如，波束从钢中入射到钢/水界面或钢/空气界面）时，在界面反射的信号相位改变  $180^\circ$ 。图 4-13-5 中，波束在碰到界面之前是以正向周期开始传播的，在经过界面反射后变成以负向周期开始传播。

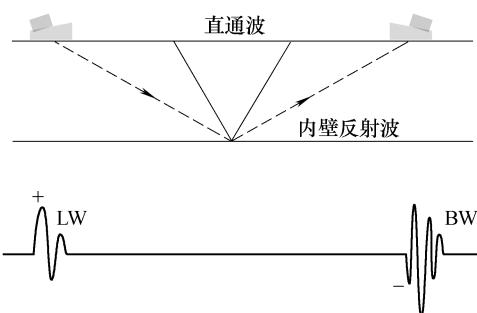


图 4-13-6 所示为 TOFD 检测有缺陷的 A 扫信号相位比较，可以看出各

图 4-13-5 无缺陷的 A 扫信号

一个回波信号的相位变化。

1) 直通波 (LW) 和底面反射波 (BW) 的相位是相反的。

2) 缺陷的下端点与直通波的相位是相同的。

3) 缺陷的上端点与底面反射波的相位是相同的。

4) 每一个衍射信号的上、下端点衍射波相位是相反的。

在实际检测中, 对分析信号和测定缺陷的准确尺寸, 相位的识别非常重要。

例如, 对不同深度的两个信号, 可根据相位变化来评定工件中的缺陷时一个缺陷还是两个缺陷。如果两个信号的相位相反, 可能是一个缺陷 (例如一条裂纹) 的上下尖端的因素信号; 如果两个信号的相位相同, 则可判定为两个缺陷。

## 6. 深度计算

TOFD 技术根据信号到达时间, 利用简单的三角函数关系来计算衍射端点的深度, 而不需要像常规超声检测那样, 寻找最高回波位置计算反射体的深度。

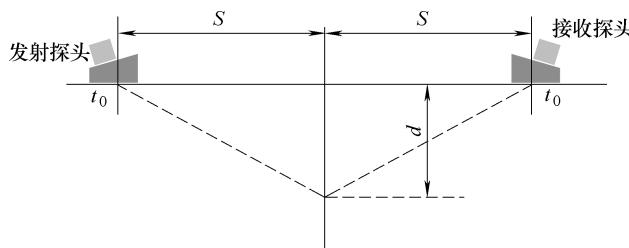


图 4-13-7 TOFD 基本计算示意图

两探头入射点之间的距离又称探头中心距, 用  $PCS$  表示。如图 4-13-7 所示,  $PCS = 2S$ 。由于两探头相对于衍射端点是对称的, 所以超声信号传播距离  $L$  可用下式计算

$$L = 2 \sqrt{S^2 + d^2} \quad (4-13-1)$$

式中  $L$ —超声信号传播距离 (mm);

$S$ —两探头入射点距离的一半 (mm);

$d$ —衍射端点的深度 (mm)。

超声信号传播时间可由下式计算

$$t = 2 \sqrt{S^2 + d^2} / c \quad (4-13-2)$$

式中  $c$ ——波的传播速度 (mm/μs)。

通过上式还可以得到衍射端点深度的计算式

$$d = \sqrt{(ct/2)^2 - S^2} \quad (4-13-3)$$

式 (4-13-3) 表明, 通过信号传播时间可以计算出衍射端点的深度, 前提是衍射端点在两探头之间对称的中心位置上。但实际情况是裂纹有时并不在两探头之间对称的位置上, 这样算出的深度有误差 (对非平行扫查而言)。对宽度不大的 V 形坡口焊缝, 缺陷偏离焊缝中心轴线不大, 因此在计算缺陷深度时误差很小, 一般在  $\pm 1\text{mm}$  之内。大多数情况下这种误差是可以忽略不计的。

### 7. PCS 的设定

当为非平行扫查 (D 扫描)

设定参数时, PCS 的最佳选择是超声波束中心打在工件厚度的  $2/3$  处, 如图 4-13-8 所示。这样能够覆盖焊缝的大部分区域。如果主声束在工件中的角度是  $\theta$ , 聚焦深度在三分之二处, 则 PCS 值应为

$$2S = (4/3)Dt\tan\theta \quad (4-13-4)$$

式中  $D$ ——工件厚度。

### 8. TOFD 的图像显示

TOFD 技术把一系列 A 扫数据组合, 通过信号处理转换为 TOFD 图像, 如图 4-13-10 所示, 在图像中每个独立的 A 扫信号 (图 4-13-9) 成为图像中很窄的一行, 通常一幅 TOFD 图像包含数百个 A 扫信号。A 扫信号的波幅在图像中是以灰度明暗显示的。通过灰度的等级表现出幅度大小, 如图 4-13-9 所示。

TOFD 图像的一维坐标代表探头移位, 另一维坐标代表信号的传播时间。

在 TOFD 图像中, 点状缺陷显示或线性缺陷端点显示呈现出一种特殊的弧形, 如图 4-13-11 所示。

产生弧形的原因可解释如下: 弧形凸起峰的最高点对应的是衍射信号声程的最小位置。探头在扫查过程中, 衍射点相对于探头位置不断变化, 衍射信号传输时间也不断变化。当缺陷位于发射和接收探头的连线中心下方的对称处时, 信号通过发射和接收探头和与检测面的垂直平面, 脉冲传输时间最短; 当探头偏离这一位置,

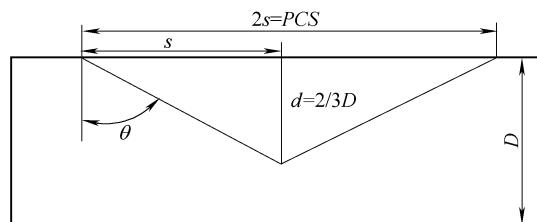


图 4-13-8 PCS 设定示意图

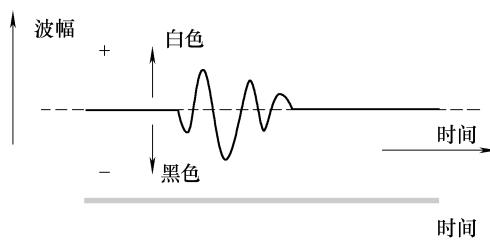


图 4-13-9 独立的 A 扫信号

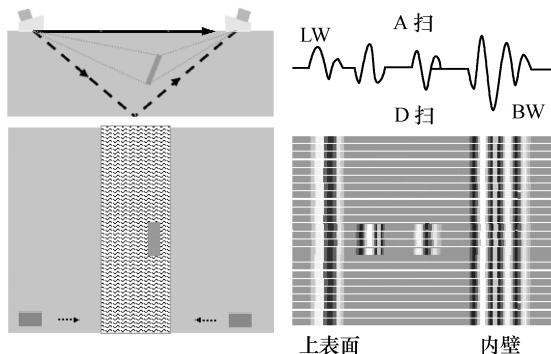


图 4-13-10 TOFD 图像 (灰度图)

传输时间就会增加。可以想象, TOFD 扫查时, 探头有远处而来, 经过缺陷再离去, 有对称位置的一边扫描至另一边, 衍射信号的传输时间先是逐渐减小, 直到最小值, 然后再次增加, 这样在 TOFD 图像中就形成了一个圆弧。

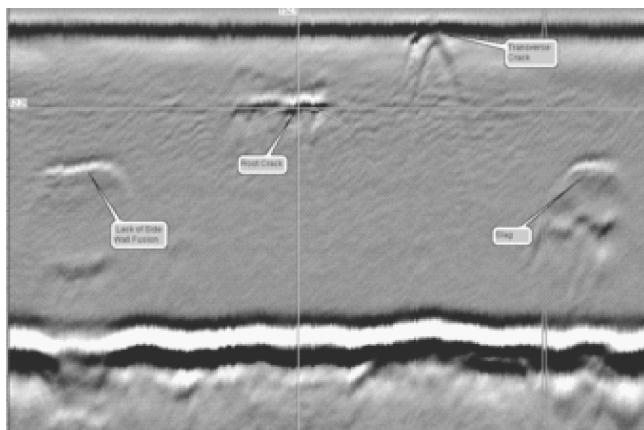


图 4-13-11 TOFD 图像

图像的信息量比 A 型显示大得多, 在 A 型显示中, 屏幕只能显示一条 A 扫信号, 而 TOFD 图像显示是大量 A 扫信号的集合。与 A 型信号的波形显示相比, TOFD 图像更有利于缺陷的识别与分析。

### 9. TOFD 扫查类型

TOFD 检测的扫查方式一般分为非平行扫查、平行扫查和偏置非平行扫查三种。

(1) 非平行扫查 如图 4-13-12 所示, 所

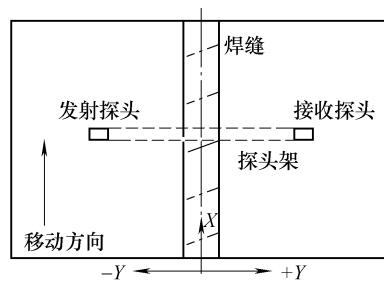


图 4-13-12 非平行扫查

谓非平行扫查是指探头的运动方向与波束方向垂直的扫查方式，扫查结果称为D扫描。一般将探头对称布置与焊缝中心线两侧沿焊缝长度方向进行扫查，可作为初始的扫查方式，用于缺陷的快速检测和缺陷长度的测定，可大致测定缺陷的高度，但无法确定缺陷距焊缝中心线的偏移量。

(2) 平行扫查 如图4-13-13所示，平行扫查是指扫查方向与超声波束的方向是平行的扫查方式，扫查结果称为B扫描。对已发现的缺陷进行扫查，可以改进缺陷定位和缺陷高度测定的准确性，并为缺陷定性提供更多的信息。

(3) 偏置非平行扫查 如图4-13-14所示，所谓偏置非平行扫查是指探头在焊缝两侧不对称放置，扫查方向与超声波束方向垂直的扫查方式，这种扫查主要针对一些特殊情况，例如解决轴偏离底面盲区问题。当工件底面的焊缝较宽时，为提高焊缝底面熔合区的缺陷检出率就需要采用这种方式扫查。

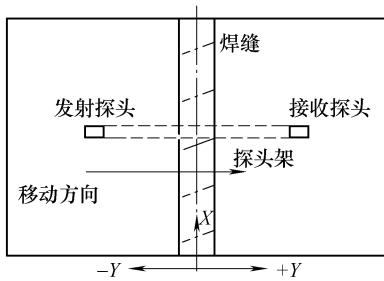


图4-13-13 平行扫查

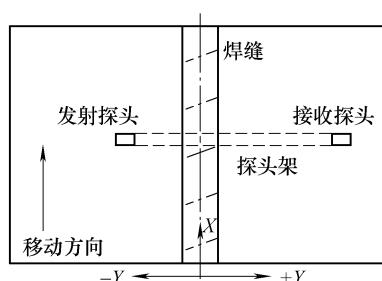


图4-13-14 偏置非平行扫查

### 三、TOFD技术的特点

#### 1. TOFD技术的优点

从原理上讲，TOFD与常规脉冲反射法超声检测相比，有两个重要的不同点：一是由于缺陷衍射信号与角度无关，检测可靠性与精度不受缺陷与入射波之间的角度的影响；二是根据衍射信号传播时差确定衍射点的位置，缺陷的定位定量不依靠信号振幅。

作为一种日益成熟的现代技术，TOFD具有很多优点：

- 1) 可靠性好，由于衍射信号波幅基本不受声束角度影响，任何方向的缺陷都能有效地发现，使该项技术具有很高的缺陷检出率。
- 2) 定位角度高，采用TOFD技术对缺陷高度的定量精度远远高于常规手工超声检测。一般认为，对线性或面积型缺陷，TOFD测高误差小于1mm。
- 3) 简便快捷，最常用的非平行扫查只需一人即可以操作，探头只需沿焊缝两侧移动即可，不需做锯齿扫查，检测效率高。
- 4) TOFD检测系统配有自动或半自动扫查装置，能够确定缺陷与探头的相对位

置，信号通过处理而得到的 TOFD 图像包含的丰富信息，更有利于缺陷的识别与分析。

5) 当今使用的 TOFD 检测系统都是高性能数字化仪器，完全克服了模拟超声检测仪和简单数字超声检测仪记录信号能力差的缺点，不仅能全过程记录信号，长久保存数据，而且能够高速进行大批量信号处理。

6) TOFD 除用于检测外，还可用于缺陷扩展的监控，且对裂纹高度扩展的材料精度极高，可达 0.1mm。

## 2. TOFD 技术的局限性

与其他技术一样，TOFD 技术也具有局限性：

1) 对近表面缺陷的检测可靠性不够。对于上表面缺陷，因为缺陷可能隐藏在直通波下而漏检，该区域缺陷即使被检出其测量精度也不高。对下表面，因为存在轴偏离底面盲区，位于热影响区或熔合线的缺陷信号有可能被底面反射信号所掩盖而漏检。

2) 对缺陷定性比较困难，TOFD 技术比较有把握区分上表面开口、下表面开口及埋藏缺陷，但难以准确评定缺陷性质。

3) TOFD 图像的识别和判断比较难，数据分析需要丰富的经验。

4) 对粗晶材料的焊缝检测比较困难，其信噪比较低。

5) 检测横向缺陷比较困难。

6) 检测几何形状复杂的工件有一定的困难。

7) 测量点状缺陷尺寸不够准确。

# 第五篇 磁粉检测

## 第一章 磁粉检测基础知识

### 一、磁粉检测

铁磁性材料或工件磁化后，在表面或近表面如有不连续性存在，则在不连续性处磁力线离开工件和进入工件表面发生局部畸变产生磁极，并形成可检测的漏磁场。漏磁场检测包括磁粉检测和利用检测元件检测，其区别在于，磁粉检测是使用铁磁性粉末——磁粉作为磁场的传感器，即利用漏磁场吸附施加在不连续性处的磁粉聚集形成磁痕，从而显示出不连续性的位置、形状和大小，而使用检测元件检测则是利用磁带、霍尔元件、磁敏二极管或感应线圈作为磁场的传感器，检测不连续性处漏磁场的位置、大小和方向。

### 二、磁粉检测的基本原理

铁磁性材料和工件被磁化后，由于不连续性的存在，使工件表面和近表面的磁力线发生局部畸变而产生漏磁场，吸附施加在工件表面的磁粉，形成在合适光照下目视可见的磁痕，从而显示出不连续性的位置、形状和大小。

### 三、磁粉检测适用性和局限性

#### 1. 适用性

- 1) 磁粉检测适用于检测铁磁性材料表面和近表面尺寸很小、间隙极窄（如可检测出长0.1mm、宽为微米级的裂纹）或目视难以看出的缺陷。
- 2) 磁粉检测可对原材料、半成品、成品工件和在役的零部件进行检测，还可对板材、型材、管材、棒材、焊接件、铸钢件及锻钢件进行检测。
- 3) 马氏体不锈钢和沉淀硬化不锈钢具有磁性，因而可进行磁粉检测。
- 4) 磁粉检测可发现裂纹、夹杂、发纹、白点、折叠、冷隔和疏松等缺陷。

## 2. 局限性

- 1) 磁粉检测不能检测奥氏体不锈钢材料和用奥氏体不锈钢焊条焊接的焊缝，也不能检测铜、铝、镁及钛等非磁性材料。
- 2) 对于表面浅的划伤、埋藏较深的孔洞和与工件表面夹角小于20°的分层和折叠难以发现。

## 第二章

# 磁粉检测物理基础

### 一、磁粉检测中的相关物理量

#### 1. 磁的基本现象——磁性、磁体、磁极

(1) 磁性 磁铁能够吸引铁磁性材料的性质叫磁性。

(2) 磁体 凡能够吸引其他铁磁性材料的物体叫磁体。

(3) 磁极 靠近磁铁两端磁性特别强、吸附磁粉特别多的区域称为磁极。

#### 2. 磁场的特征、显示和磁力线

(1) 磁场的特征 对运动的电荷(或电流)具有作用力,在磁场变化的同时也产生电场。

(2) 磁场的显示 磁场的大小、方向和分布情况可以利用磁力线来表示。

(3) 磁力线 磁力线在每点的切线方向代表磁场的方向,磁力线的疏密程度反映磁场的大小。

磁力线具有以下特性:磁力线在磁体外是由N极出发穿过空气进入S极,在磁体内是由S极到N极的闭合线;磁力线互不相交;同性磁极相斥,因同性磁极间磁力线有互相排挤的倾向;异性磁极相吸,因异性磁极间磁力线有缩短长度的倾向。

#### 3. 磁场强度、磁通量与磁感应强度

(1) 磁场强度 磁场具有大小和方向,磁场大小和方向的总称叫磁场强度 $H$ ,通常也把单位正磁极所受的力称为磁场强度。单位为A/m(SI)和Oe(CGS)。

(2) 磁通量 简称磁通,它是磁场中垂直穿过某一截面的磁力线的条数,用符号 $\Phi$ 表示。单位为Wb(SI)和Mx(CGS)。

(3) 磁感应强度 将原来不具有磁性的铁磁性材料放入外加磁场内,便得到磁化,它除了原来的外加磁场外,在磁化状态下铁磁性材料本身还产生一个感应磁场,这两个磁场叠加起来的总磁场,称为磁感应强度 $B$ 。单位是T(SI)和Gs(CGS)。磁感应强度是矢量,有大小和方向,可用磁力线来表示,磁感应强度的大小等于穿过与磁力线垂直的单位面积上的磁通量,所以磁感应强度又称为磁通密度。

磁感应强度不仅与外加磁场有关,还与被磁化的铁磁性材料的性质有关。

## 二、磁介质

### 1. 磁介质分类

能影响磁场的物质称为磁介质，各种宏观物质都是磁介质。磁介质又分为顺磁质、逆磁质（抗磁质）和铁磁质。

磁粉检测只适用于铁磁性材料，通常把顺磁性材料和逆磁性材料都列入非磁性材料。

### 2. 磁导率

磁感应强度  $B$  与磁场强度  $H$  的比值称为磁导率，或称为绝对磁导率，用符号  $\mu$  表示，表示材料被磁化的难易程度，单位为  $\text{H/m}$ 。 $\mu$  不是常数，随磁场大小不同而改变，有最大和最小值。三者关系为  $B = \mu H$ 。

真空磁导率  $\mu_0$ ：在真空中，磁导率是常数， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。

相对磁导率  $\mu_r$ ：材料的磁导率与真空磁导率的比值， $\mu_r = \mu/\mu_0$ ，无单位。

## 三、铁磁性材料

### 1. 磁畴

铁磁性材料内部自发磁化的大小和方向基本均匀一致的小区域称为磁畴，其体积约为  $10^{-9} \text{ cm}^3$ ，在这个小区域内，含有大约  $10^{14}$  个磁性原子。在没有外加磁场的作用时，铁磁性材料内各磁畴的磁矩方向相互抵消，因而对外显示不出磁性，如图 5-2-1a 所示。当把铁磁性材料放到磁场中去时，磁畴就会受到外加磁场的作用，一是使磁畴磁矩转动，二是使畴壁发生位移，最后全部磁畴的磁矩方向转向与外加磁场方向一致，如图 5-2-1b 所示，铁磁性材料被磁化。铁磁性材料被磁化后，就变成磁铁，显示出很强的磁性。去掉外加磁场后，磁畴出现局部转动，但仍保留一定的剩余磁性，如图 5-2-1c 所示。

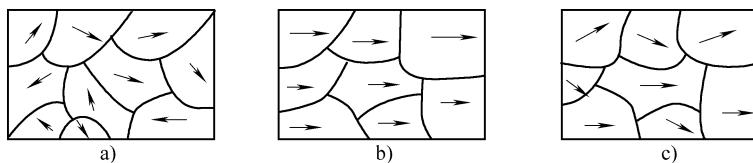


图 5-2-1 铁磁性材料的磁畴方向

### 2. 磁化过程

铁磁性材料的磁化过程如图 5-2-2 所示

- 1) 未加外加磁场时，磁畴磁矩杂乱无章，对外不显示宏观磁性（图 5-2-2a）。
- 2) 在较小的磁场作用下，磁矩方向与外加磁场方向一致或接近的磁畴体积增大，而磁矩方向与外加磁场方向相反的磁畴体积减小，畴壁发生位移（图 5-2-2b）。

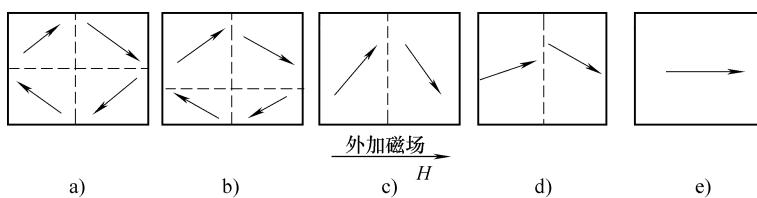


图 5-2-2 铁磁性材料的磁化过程

3) 增大外加磁场时, 磁矩转动畴壁继续位移, 最后只剩下与外加磁场方向比较接近的磁畴 (图 5-2-2c)。

4) 继续增大外加磁场, 磁矩方向转动, 与外加磁场方向接近 (图 5-2-2d)。

5) 当外加磁场增加到一定值时, 所有磁畴的磁矩都沿外加磁场方向有序排列, 达到磁饱和, 相当于一个微小磁铁, 产生 N 级和 S 级, 宏观上产生磁性 (图 5-2-2e)。

### 3. 磁化曲线

磁化曲线是表征铁磁性材料磁特性的曲线, 用以表示外加磁场强度  $H$  与磁感应强度  $B$  的变化关系, 即  $B-H$  曲线, 如图 5-2-3 所示。

### 4. 磁滞回线

描述磁滞现象的闭合磁化曲线叫磁滞回线, 只有交流电才产生这种磁滞回线, 如图 5-2-4 所示。磁感应强度变化滞后于磁场强度变化的现象叫磁滞现象。

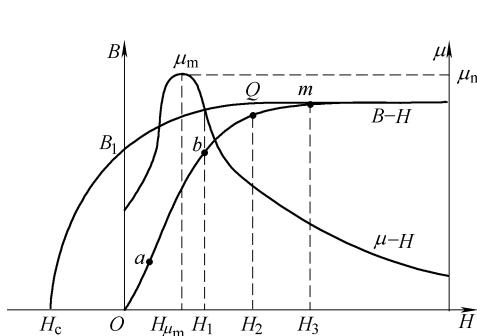
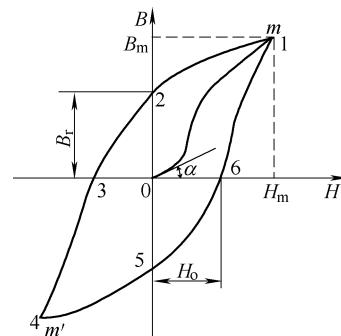
图 5-2-3  $B-H$  曲线

图 5-2-4 磁滞回线

铁磁性材料的特性:

(1) 高磁导率 能在外加磁场中强烈地磁化, 产生非常强的附加磁场, 它的磁导率很高, 相对磁导率可达数百甚至数千。

(2) 磁饱和性 铁磁性材料由于磁化所产生的附加磁场, 不会随外加磁场的增加而无限增加, 当外加磁场达到一定程度后, 全部磁畴的方向都与外加磁场的方向一致, 磁感应强度  $B$  不再增加, 呈现磁饱和现象。

(3) 磁滞性 当外加磁场的方向发生变化时, 磁感应强度的变化滞后于磁场强

度的变化。当磁场强度减小到零时，铁磁性材料在磁化时所获得的磁性并不完全消失，而保留了剩磁。

根据铁磁性材料矫顽力  $H_c$  大小，铁磁性材料可分为软磁材料和硬磁材料两大类。

1)  $H_c < 100\text{ A/m}$  认为是软磁材料，磁滞回线如图 5-2-5 所示。

2)  $H_c \geq 100\text{ A/m}$  认为是硬磁材料，磁滞回线如图 5-2-6 所示。

软磁材料与硬磁材料的特征：

(1) 软磁材料 指磁滞回线狭长，具有高磁导率、低矫顽力和低磁阻的铁磁性材料。软磁材料磁粉检测时容易磁化，也容易退磁。

(2) 硬磁材料 指磁滞回线肥大，具有低磁导率、高剩磁、高矫顽力和高磁阻的铁磁性材料。硬磁材料磁粉检测时难以磁化，也难以退磁。

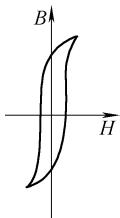


图 5-2-5 软磁材料磁滞回线

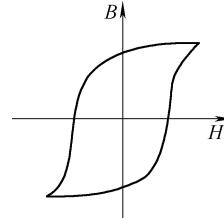


图 5-2-6 硬磁材料磁滞回线

## 四、电流与磁场

### 1. 通电圆柱导体的磁场

1) 磁场方向：与电流方向有关，用右手定则确定。

2) 磁场大小：安培环路定律计算

$$\oint H dl = \sum I \quad (5-2-1)$$

根据式 (5-2-1)，通电圆柱体表面的磁场强度为

$$H = \frac{1}{2\pi R} \quad (5-2-2)$$

式中  $H$ ——磁场强度 ( $\text{A/m}$ )；

$I$ ——电流 ( $\text{A}$ )；

$R$ ——圆柱导体半径 ( $\text{m}$ )。

导体外  $r$  处 ( $r > R$ ) 和导体内部  $r$  处 ( $r < R$ ) 磁场强度

$$\text{当 } r > R \text{ 时} \quad H = \frac{Ir}{2\pi R^2}$$

$$\text{当 } r < R \text{ 时} \quad H = \frac{I}{2\pi r}$$

3) 通交流电和直流电钢棒磁场强度分布如图 5-2-7 所示。

共同点是：

- ① 在钢棒中心处，磁场强度为零。
- ② 在钢棒表面，磁场强度达到最大。
- ③ 离开钢棒表面，磁场强度随  $r$  的增加而下降。

不同点是：

直流电磁化，从钢棒中心到表面，磁场强度是直线上升到最大值；交流电磁化，由于趋肤效应，只有在钢棒近表面才有磁场强度，并缓慢上升，而在接近钢棒表面时，迅速上升达到最大值。

4) 钢管通电法磁化磁场强度分布如图 5-2-8 所示。

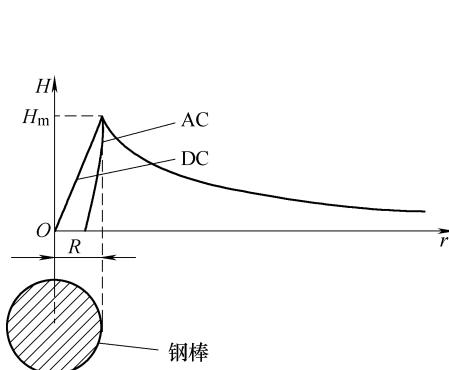


图 5-2-7 钢棒通交流电和直流电磁场强度分布

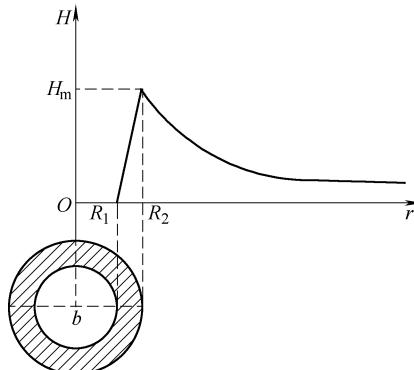


图 5-2-8 钢管通电法磁化磁场强度分布

用交流电和直流电磁化同一钢管时，钢管内部  $H = 0$ ， $B = 0$ ，钢管内部没有磁场存在，磁场是从钢管内壁到表面逐渐上升到最大值，其余与钢棒通电法磁化磁场分布相同。

5) 钢管中心导体法采用直流电磁化磁场强度分布如图 5-2-9 所示。

钢管中心导体法磁化时，在通电中心导体内、外磁场分布与钢棒通电磁化相同，由于中心导体为铜棒，其  $\mu_r \approx 1$ ，所以只存在  $H$ 。在钢管上由于  $\mu_r \gg 1$ ，所以能感应产生较大的磁感应强度，并且钢管内壁的磁场强度和磁感应强度都比外壁大。

## 2. 通电线圈的磁场

- (1) 磁场方向 右手定则。
- (2) 磁场大小 空载通电线圈中心的磁场强度可用下式计算

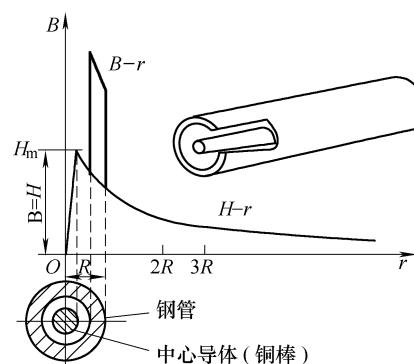


图 5-2-9 钢管中心导体法磁化磁场强度分布

$$H = \frac{NI}{L} \cos \alpha = \frac{NI}{\sqrt{L^2 + D^2}} \quad (5-2-3)$$

式中  $H$ —磁场强度 (A/m)；

$N$ —线圈匝数；

$L$ —线圈长度 (m)；

$D$ —线圈直径 (mm)；

$\alpha$ —线圈对角线与轴线的夹角 (°)。

线圈纵向磁化的磁化力用安匝 ( $IN$ ) 来表示。

### (3) 线圈的分类

1) 按结构。电缆缠绕线圈和螺管线圈。

2) 按填充系数。低填充、中填充、高填充。

3) 按  $L/D$ 。短螺管线圈  $L < D$ 、有限长螺管线圈  $L > D$ 。

### (4) 线圈内磁场分布特点

在有限长螺管线圈内部的中心轴线上，磁场分布较均匀，线圈两端处的磁场强度为内部的  $1/2$  左右，在线圈横截面上，靠近线圈内壁中心的磁场强度较线圈中心强。磁场强度分布如图 5-2-10 所示。

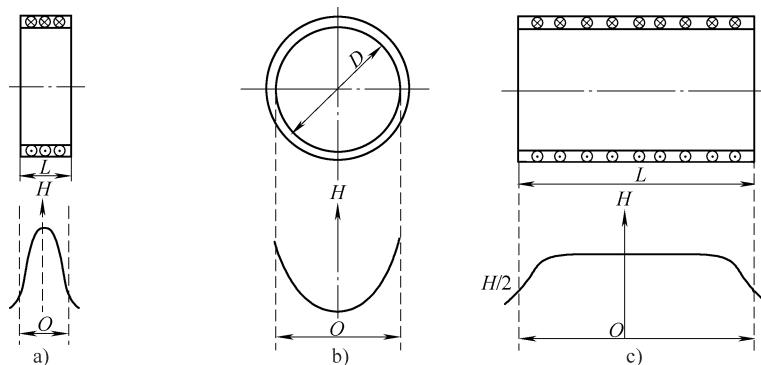


图 5-2-10 线圈内磁场强度分布

- a) 短螺管线圈中心轴线上的磁场强度分布 b) 螺管线圈截面上的磁场强度分布  
c) 有限长螺管线圈中心轴线磁场强度分布

## 五、退磁场

### 1. 退磁场概念

把铁磁性材料磁化时，由材料中磁极所产生的磁场称为退磁场，也叫反磁场，它对外加磁场有削弱作用，用符号  $\Delta H$  表示。退磁场与材料的磁化强度  $M$  成正比，即

$$\Delta H = NM \quad (5-2-4)$$

式中  $\Delta H$ ——退磁场 (A/m)；  
 $M$ ——磁化强度 (A/m)；  
 $N$ ——退磁因子。

## 2. 有效磁场

铁磁性材料磁化时，只要在工件上产生磁极，就会产生退磁场，它削弱了外加磁场，所以工件上的有效磁场用  $H$  表示，它等于外加磁场  $H_0$  减去退磁场  $\Delta H$ ，其数学表达式为

$$H = H_0 - \Delta H \quad (5-2-5)$$

经推导

$$H = \frac{H_0}{1 + N (\mu_r - 1)} \quad (5-2-6)$$

式中  $H$ ——有效磁场 (A/m)；  
 $H_0$ ——外加磁场 (A/m)；  
 $\Delta H$ ——退磁场 (A/m)；  
 $\mu_r$ ——相对磁导率。

## 3. 影响退磁场大小的因素

- 1) 退磁场大小与外加磁场强度有关，外加磁场强度越大，工件磁化越好，产生的 N 极和 S 极磁场越强，因此退磁场也越大。
- 2) 退磁场大小与工件  $L/D$  值有关，工件  $L/D$  值越大，退磁场越小。
- 3) 退磁因子  $N$  与工件几何形状有关，纵向磁化所需的磁场强度大小与工件的几何形状及  $L/D$  值有关，随着  $L/D$  的减小  $N$  增大。
- 4) 磁化尺寸相同的钢管和钢棒，钢管比钢棒产生的退磁场小。
- 5) 磁化同一工件时，交流电比直流电产生的退磁场小。

# 六、漏磁场

## 1. 漏磁场的形成

所谓漏磁场，就是铁磁性材料磁化后，在不连续处或磁路的截面变化处，磁力线离开和进入表面时形成的磁场，如图 5-2-11 所示。

漏磁场的形成，是由于空气的磁导率远远低于铁磁性材料的磁导率。如果在磁化了的铁磁性工件上存在着不连续性或裂纹，则磁力线优先通过磁导率高的工件，这就迫使部分磁力线从缺陷下面绕过，形成磁力线的压缩。但是，工件上这部分可容纳的磁力线数目也是有限的，又由于同性磁力线相斥，所以大部分磁力线从不连

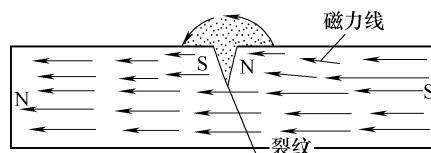


图 5-2-11 缺陷处形成的漏磁场

续处中穿过，另一部分磁力线遵从折射定律几乎从工件表面垂直地进入空气中绕过缺陷又折回工件，形成了漏磁场。

## 2. 缺陷漏磁场的分布

缺陷产生的漏磁场可以分解为水平分量  $B_x$  和垂直分量  $B_y$ ，水平分量与工件表面平行，垂直分量与工件表面垂直。假设有一矩形缺陷，则在矩形中心，漏磁场的水平分量有极大值，并左右对称，而垂直分量为通过中心点的曲线，缺陷的漏磁场分布如图 5-2-12 所示，图 5-2-12a 所示为水平分量，图 5-2-12b 所示为垂直分量，如果将两个分量合成，则可得到如图 5-2-12c 所示的漏磁场。

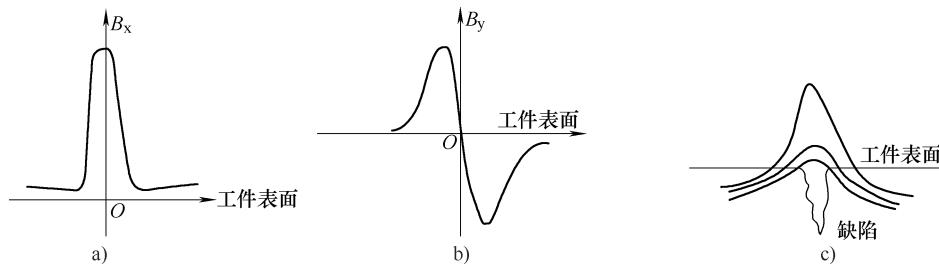


图 5-2-12 缺陷漏磁场的分布

漏磁场对磁粉的吸附可看成是磁极的作用，如果有磁粉在磁极区通过，则将被磁化，也呈现出 N 极和 S 极，并沿着磁力线排列起来。当磁粉的两极与漏磁场的两极互相作用时，磁粉就会被吸附并加速移到缺陷上去。漏磁场的磁力作用在磁粉微粒上，其方向指向磁力线最大密度区，即指向缺陷处，如图 5-2-13 所示。

漏磁场的宽度要比缺陷的实际宽度大数倍至数十倍，所以磁痕对缺陷宽度具有放大作用，能将目视不可见的缺陷变成目视可见的磁痕，使之容易观察出来。

## 3. 影响漏磁场的因素

(1) 外加磁场的影响 缺陷的漏磁场大小与工件磁化程度有关。一般说来，外加磁场强度一定要大于产生最大磁导率  $\mu_m$  对应的磁场强度  $H_{\mu_m}$ ，使磁导率减小，磁阻增大，漏磁场增大。当铁磁性材料的磁感应强度达到饱和值的 80% 左右时，漏磁场便会迅速增大。

### (2) 缺陷位置及形状的影响

1) 缺陷埋藏深度的影响。同样的缺陷，位于工件表面时，产生的漏磁场大；若位于工件的近表面，则产生的漏磁场显著减小；若位于距工件表面很深处，则几

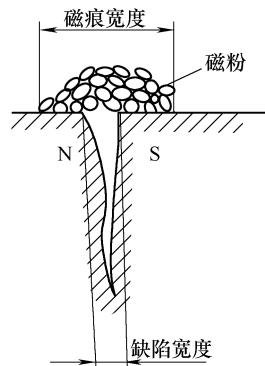


图 5-2-13 磁粉受漏磁场吸引

乎没有漏磁场泄漏出工件表面。

2) 缺陷方向的影响。当缺陷垂直于磁场方向时,漏磁场最大,也最有利于缺陷的检出。随着夹角由90°逐渐减小,灵敏度下降,当缺陷与磁场方向平行或夹角小于30°时,几乎不产生漏磁场,不能检出缺陷。

3) 缺陷深宽比的影响。缺陷的深宽比越大,漏磁场越大,缺陷越容易检出。

(3) 工件表面覆盖层的影响 工件表面覆盖层厚度的大小直接影响磁粉检测灵敏度,若有较厚的漆层,漏磁场不能泄漏到覆盖层之上,则不吸附磁粉,没有磁痕显示。

#### (4) 工件材料及状态的影响

1) 晶粒大小的影响。晶粒越大,磁导率越大,矫顽力越小,漏磁场就越小;相反,晶粒越小,磁导率越小,矫顽力越大,漏磁场就越大。

2) 含碳量的影响。随着含碳量的增加,矫顽力几乎成线性增加,相对磁导率则随着含碳量的增加而下降,漏磁场也增大。

3) 热处理的影响。当钢材处于退火与正火状态时,其磁性差别不大,而退火与淬火状态的差别却比较大。淬火可提高钢材的矫顽力和剩磁,使漏磁场增大。但淬火后随着回火温度的升高,材料变软,矫顽力降低,漏磁场也降低。

4) 合金元素的影响。由于合金元素的加入,材料硬度增加,矫顽力也增加,所以漏磁场也增加。

5) 冷加工的影响。冷加工将使材料表面硬度增加,矫顽力增大。随着压缩变形率增加,矫顽力和剩磁均增加,漏磁场也会增大。

## 第三章 磁粉检测设备

### 一、设备的分类

按设备重量和可移动性或便携性分：固定式、移动式和便携式。

按设备组合方式分：一体型和分立型。

1) 一体型。将磁化电源、磁化线圈、工件夹持装置、磁悬液喷洒装置、观察照明装置和退磁装置等部分组成一体，优点是操作方便。

2) 分立型。将磁化电源、磁化线圈、工件夹持装置、磁悬液喷洒装置、观察照明装置和退磁装置等部分分开，优点是便于搬运和组合，且维修方便。

#### 1. 固定式探伤机

特点：体积和重量都比较大，额定磁化电流一般为  $1000 \sim 10000A$ 。提供的磁化电流大，有专门放置和夹持工件的工作平台，主要用于中、小型工件的湿法磁粉检测。

磁化方法：直接通电法、中心导杆法、端部直接通磁法、线圈法、磁轭法和多种组合磁化法。

设施配备：各种磁化方式的装置、夹持支持装置、普通光和紫外线照明装置、磁悬液搅拌和喷洒装置以及退磁装置。一般还配有触头和电缆，以便对搬上工作台有困难的大型工件进行检测。

#### 2. 移动式探伤机

特点：以交流电、半波整流电作为磁化电流，电流一般为  $500 \sim 8000A$ ，整体装有滚轮或吊耳，可移动到现场进行检测工作，便于对大型结构件、锻铸件进行现场检测。

磁化方法：直接通电法、中心导杆法、端部直接通磁法、线圈法、固定磁轭法和多种组合磁化法。

设施配备：支柱触头、夹钳触头、开合式线圈、闭合式线圈及缠绕电缆等各种磁化方法所需装置。另外还配有退磁装置。

### 3. 便携式探伤机

特点：以交流电和单相半波整流电为主要磁化电流，体积小、重量轻且便于携带，适于野外和高空作业，常用于锅炉、压力容器的焊缝检测以及大型固定设备或工件表面的局部检测。

磁化方法：直接通电法、线圈法及磁轭法。

设施配备：电磁轭、交叉磁轭、永久磁铁、开合式线圈、闭合式线圈、支杆触头及绕线电缆等。另外可用配备的线圈进行简易退磁工作。

## 二、磁粉检测设备的组成部分

- 1) 磁化电源。
- 2) 工件夹持装置。
- 3) 指示和控制装置。
- 4) 磁粉和磁悬液施加装置。
- 5) 照明装置。
- 6) 退磁装置。

## 三、磁粉检测照明

### 1. 光度量术语及单位

1) 发光强度：指光源在给定方向上单位立体角内传输的光通量，用符号  $I$  表示，单位是  $cd$ 。

2) 光通量：指能引起眼睛视觉强度的辐射通量，用符号  $\Phi$  表示，单位是  $lm$ 。

3) 照度：单位面积上接收的光通量，用符号  $E$  表示，单位是  $lx$ 。

4) 辐射照度：表面上一点的辐射照度是入射在包含该点的面元上的辐射通量  $d\Phi_e$  除以该面元上面积  $dA$  之商，用符号  $E_e$  (或  $E$ ) 表示，单位是  $W/m^2$ 。

5) 光亮度：指在给定方向上单位立体角的垂直光强度，用符号  $L$  表示，单位是  $cd/m^2$ 。

### 2. 紫外线

紫外线是指波长为  $100 \sim 400nm$  的不可见光，其电磁波谱图位于可见光和 X 射线之间，如图 5-3-1 所示。

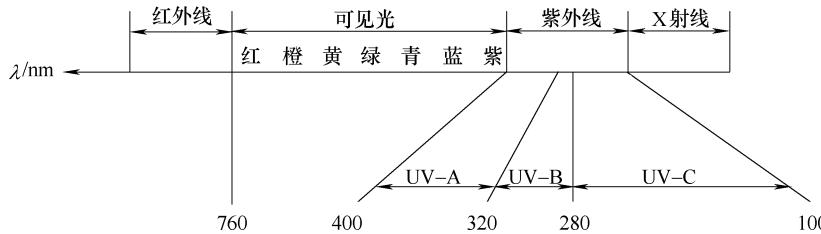


图 5-3-1 紫外线电磁波谱图

波长 320~400nm 的紫外线称为 UV-A、黑光或长波紫外线。UV-A 适用于荧光磁粉检测，它的峰值波长约为 365nm。

波长 280~320nm 的紫外线称为 UV-B 或中波紫外线，又叫红斑紫外线。UV-B 具有使皮肤变红的作用，还可引起晒斑和雪盲，不能用于磁粉检测。

波长 100~280nm 的紫外线称为 UV-C 或短波紫外线。UV-C 具有光化和杀菌作用，能引起猛烈的烧伤，还伤害眼睛，也不能用于磁粉检测。

### 3. 人眼对光的响应

在可见光环境下，人眼对波长小于 400nm 的辐射波并不敏感，但若不存在可见光时，人眼的灵敏度会大大提高。

在暗室环境下，平均光照度为 10lx，因为不可能达到完全黑暗。紫外灯本身会产生一些蓝光或紫色的可见光，检验场所存在一些荧光源。在此环境下人眼对波长在 380~400nm 的辐射波的灵敏度比在可见光下提高 30 倍，同时此波长范围内的辐射波还会在人眼中引起深蓝色的感觉，并大大提高蓝色范围 405nm 波长黑光灯的灵敏度。

人眼对各色光的敏感性是不同的，最敏感的是黄绿色光线。荧光磁粉检测时，磁痕呈黄绿色荧光，很容易被观察到，且黄绿色光与照射到工件表面的紫色本底有很高的对比度，从而缺陷磁痕在暗区具有很好的可见度，检测灵敏度很高。

因紫外线对人眼有伤害作用，故不允许紫外线直接照射人的眼睛。在荧光磁粉检测时，应注意防护，避免紫外线照射眼睛，可佩戴吸收紫外线的护目眼镜，但应注意不得降低对黄绿色荧光磁粉磁痕的检出能力。

### 4. 黑光灯

(1) 结构 黑光灯的结构如图 5-3-2 所示。它是由石英内管和外壳组成，内管的两端各有一个主电极，管内装有汞和氩气，在主电极的旁边装有一个引燃用的辅助电极，其引出处串联一个限流电阻，外面有一个玻璃外壳，起保护石英内管和聚光的作用。通过电感镇流器稳流。

(2) 工作原理 接通电源后，辅助电极与一个主电极之间发生辉光放电，此时石英管内温度升高，汞逐渐汽化，使管内产生足够的汞蒸气，导致主电极之间的汞弧光放电，产生紫外线。此过程约需 5min，石英管内汞蒸气可达 4~5 个大气压，因此又称高压汞灯。

#### (3) 黑光灯使用注意事项

1) 黑光灯刚点燃时，输出达不到最大值，检验工作应等 5min 以后再进行。

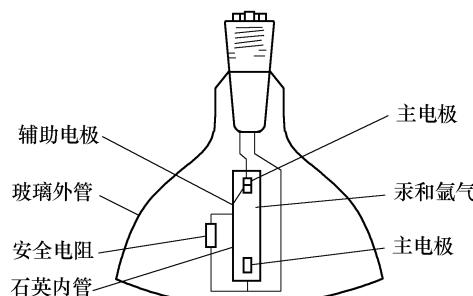


图 5-3-2 黑光灯结构

- - 2) 要尽量减少灯的开关次数, 频繁启动会缩短灯的寿命。
  - 3) 黑光灯使用后, 辐射能量会不断下降, 所以应定期测量紫外线辐射照度。
  - 4) 电源不稳定对黑光灯影响很大, 电压低, 灯不能启动, 或使点燃的灯熄灭; 电压超过灯的额定电压时, 会降低灯的使用寿命, 因此应装稳压电源, 保证电源稳定。
  - 5) 应保证滤光片始终完好、洁净, 以获得良好的紫外线。
  - 6) 避免将磁悬液溅到黑光灯泡上, 这样会导致灯泡炸裂。
  - 7) 工作中不要使黑光灯光线直接照射人的眼睛。
  - 8) 滤光片如果有裂纹, 应及时更换, 因为会使可见光和中、短波紫外线通过, 对人体有害。

#### 四、常用典型设备

- 1) CJE 交流电磁轭探伤仪、CEE 交直流电磁轭探伤仪。
- 2) CXE 系列交叉磁轭旋转磁场探伤仪。
- 3) CJX-500 型、CJX-1000 型及 CJX-2000 型交流磁轭探伤仪。

#### 五、测量仪器

- 1) 高斯计。
- 2) 袖珍式磁强计。
- 3) 照度计。
- 4) 黑光辐照计。

## 第四章

# 磁粉检测器材和标准试片的种类及用途

## 一、磁粉

磁粉按磁痕显示分为荧光磁粉和非荧光磁粉，按施加方式分为湿法磁粉和干法磁粉。

### 1. 荧光磁粉

在黑光灯下观察磁痕显示的磁粉称为荧光磁粉。以磁性氧化铁粉、工业纯铁粉或羰基铁粉为核心，在铁粉外面用树脂黏附一层荧光染料而制成。在黑光灯照射下，荧光磁粉能发出波长为 510~550nm、人眼接受最敏感的黄绿色荧光。适用于任何颜色的受检表面，容易观察，灵敏度高，检测速度快，一般适用于湿法。

### 2. 非荧光磁粉

在可见光下观察磁痕显示的磁粉称为非荧光磁粉。有四氧化三铁 ( $Fe_3O_4$ ) 黑磁粉和  $\gamma$  三氧化二铁 ( $\gamma-Fe_2O_3$ ) 红褐色磁粉、蓝磁粉和白磁粉。这两种磁粉可用于湿法或干法。

湿法是将磁粉悬浮在油或水载液中喷洒到工件表面的磁粉。

干法是将磁粉在空气中吹成雾状喷撒到工件表面的磁粉。

### 3. 磁粉的性能

(1) 磁特性 磁粉应具有高磁导率、低矫顽力及低剩磁。高磁导率的磁粉易被微弱漏磁场磁化和吸附。高矫顽力和高剩磁的磁粉，磁化后磁粉自身形成磁极彼此吸引聚集成团，不易分散，且吸附在工件表面不易去除，形成过度背景，降低检测灵敏度，甚至会掩盖真实磁痕。

(2) 粒度 磁粉的粒度就是指磁粉的颗粒大小。粒度的大小对磁粉的悬浮性及漏磁场对磁粉的吸附能力都有很大影响。

磁粉粒度选择的基本原则：

- 1) 检验表面缺陷宜选用粒度细的磁粉，检验表面下缺陷宜选用粒度粗的磁粉。
- 2) 检验小缺陷宜选用粒度细的磁粉，检验较大缺陷宜选用粒度粗的磁粉。

- 3) 采用湿法时宜选用粒度细的磁粉,采用干法时宜选用粒度粗的磁粉。
- 4) 干法时所用磁粉粒度范围为  $10 \sim 50 \mu\text{m}$ ,最大不超过  $150 \mu\text{m}$ ; 湿法时所用磁粉粒度为  $5 \sim 10 \mu\text{m}$ ,最大不超过  $50 \mu\text{m}$ 。

(3) 形状 磁粉形状包括:条形、椭圆形、球形或其他不规则的颗粒形状。

条形磁粉磁极明显,易被磁化形成磁极,且易被漏磁场吸附形成磁痕,但流动性较差,磁极间相互干扰会降低灵敏度,干法时喷撒较困难。

球形磁粉具有良好的流动性,但因退磁场的影响不易磁化形成磁极。

为使磁粉既有良好的磁吸附性能,又有良好的流动性,磁粉应由条形、球形和其他规则形状的磁粉混合在一起使用。

(4) 流动性 湿法检验是利用磁悬液的流动带动磁粉向漏磁场处流动。干法检验是利用微风吹动磁粉,且利用交流电方向的不断改变或半波整流的强烈脉动搅动磁粉,促进磁粉流动。直流电不利于磁粉流动,因此不适宜干法检验。

(5) 密度 湿法(非荧光)的密度约为  $4.5 \text{ g/cm}^3$ ,干法(非荧光)的密度约为  $8 \text{ g/cm}^3$ ,荧光磁粉的密度与磁粉原料、荧光染料和黏结剂的配比有关。

(6) 识别度 指磁粉的光学性能,包括磁粉的颜色、荧光亮度及与工件表面颜色的对比度。

非荧光磁粉检测时,磁粉的颜色应与工件表面形成尽可能大的对比度,这样才有利于磁痕的观察。

荧光磁粉检测是在黑光灯下观察,工件表面呈蓝紫色,荧光磁粉呈黄绿色,色泽鲜明,在微弱本底可见光下可获得最大对比度和亮度。

影响磁粉使用性能的因素包括:磁特性、粒度、形状、流动性、密度和识别度六个方面,其相互关联、相互制约,应通过综合性能灵敏度试验的结果来衡量磁粉的性能。

#### 4. 磁粉的验收试验

湿法非荧光磁粉的验收试验包括污染、颜色、粒度、灵敏度和悬浮性,湿法荧光磁粉的验收试验还应包括耐用性。

- 1) 污染:不应显示明显的外来物、结块和浮渣。
- 2) 颜色:黑色、红色非荧光磁粉应保证颜色纯正;荧光磁粉在紫外线下应发黄绿色荧光。
- 3) 粒度:应满足标准和使用说明的要求。
- 4) 灵敏度:常规采用标准试块进行测试合格。
- 5) 悬浮性:可用酒精沉淀法进行测试。
- 6) 耐用性:用恒速搅拌器搅拌、停留,并重复五次,检查其灵敏度、亮度和颜色。

## 二、载液

用来悬浮磁粉的液体称为载液,常用的有油基载液和水载液,磁粉检测-橡胶

铸型法使用乙醇载液。

(1) 油基载液 油基载液一般是闪点高、黏度低、无荧光和无臭味的煤油，也可使用变压器油或二者混合液，不允许使用低闪点的煤油作为载液。

(2) 水载液 水作为载液时应添加润湿剂、防锈剂及消泡剂，保证载液具有合适的润湿性、分散性、防锈性、消泡性及稳定性。

### 三、磁悬液

磁粉和载液按一定比例混合而成的悬浮液体称为磁悬液。

#### 1. 磁悬液浓度

每升磁悬液中所含磁粉的重量 (g/L) 或每 100mL 磁悬液沉淀出磁粉的体积 (mL/100mL) 称为磁悬液浓度。前者称为磁悬液配制浓度，后者称为磁悬液沉淀浓度。

磁悬液浓度对显示缺陷的灵敏度影响很大，浓度不同，检测灵敏度也不同。浓度太低，影响漏磁场对磁粉的吸附，磁痕不清使缺陷漏检；浓度太高，造成背景下降，甚至会掩盖磁痕显示。

磁悬液浓度大小的选用与磁粉种类、粒度、施加方式和工件表面状态等因素有关，JB/T 4730. 4—2005 对磁悬液的浓度要求见表 5-4-1。

表 5-4-1 磁悬液浓度

磁粉类型	配制浓度/ (g/L)	沉淀浓度/ (含固体量: mL/100mL)
非荧光磁粉	10 ~ 25	1. 2 ~ 2. 4
荧光磁粉	0. 5 ~ 3. 0	0. 1 ~ 0. 4

#### 2. 磁悬液配制

(1) 油磁悬液配制 将少量油基磁悬液与磁粉混合，使磁粉全部湿润，搅拌成均匀的糊状，按表 5-4-1 比例配制成为所需磁悬液。

(2) 水磁悬液配制 非荧光磁粉水磁悬液配制方法，是将 100 号浓乳加入到 1L 50℃温水中，搅拌至完全溶解，再加入亚硝酸钠、三乙醇胺和消泡剂，每加入一种成分后都要搅拌均匀，最后加入磁粉搅拌均匀，其推荐配方见表 5-4-2。

表 5-4-2 非荧光磁粉水磁悬液配方

水	100 号浓乳	三乙醇胺	亚硝酸钠	28 号消泡剂	HK-1 黑磁粉
1L	10g	5g	10g	0. 5 ~ 1g	10 ~ 25g

荧光磁粉水磁悬液配制方法，是将乳化剂与消泡剂加入水中搅拌均匀，并按比例加足水，成为水载液，用少量水载液与磁粉和匀，与余量水载液均匀混合，然后加入亚硝酸钠，其推荐配方见表 5-4-3。

表 5-4-3 荧光磁粉水磁悬液配方

水	JFC 乳化剂	亚硝酸钠	28 号消泡剂	YC2 荧光磁粉
1L	5g	10g	0.5 ~ 1g	0.5 ~ 2g

(3) 磁膏水磁悬液的配制 在特种设备检验检测行业,一般多采用磁膏配制水磁悬液,常用的有 HR-1 和 HB-1,易溶于水。由于磁膏中含有磁粉、润湿剂和防腐剂等,所以可以直接与水配制。配制方法:先取少量的水,在水中挤入磁膏后搅拌成稀糊状,再按比例加入水后搅拌均匀即可。

使用时,除应进行综合性能试验外,还必须测量磁悬液的浓度,并进行水断试验。

## 四、反差增强剂

### 1. 应用

对表面粗糙的焊件或铸件进行磁粉检测时,因表面不平整,或者因工件表面与磁粉颜色对比度低,均易造成漏检。可在检测前在工件表面喷涂反差增强剂来提高对比度。

### 2. 配方、施加及清除

反差增强剂可按表 5-4-4 推荐的配方配制,搅拌均匀即可使用。目前大多数单位都使用配制好的反差增强剂灌。

表 5-4-4 反差增强剂配方

成分 含量	工业丙酮	稀释剂 X-1	火棉胶	氧化锌粉
每 100mL 含量	65mL	20mL	15mL	10g

施加反差增强剂的方法有:浸涂法、喷涂和刷涂法。

清除反差增强剂的方法:可用工业丙酮与稀释剂 X-1 按 3:2 配制的混合液浸过的棉纱擦洗,或将整个工件浸入该混合液中清洗。

## 五、标准试片

### 1. 标准试片的用途

- 1) 用于检验磁粉检测设备、磁粉和磁悬液的综合性能(系统灵敏度)。
- 2) 用于检测被检工件表面磁场方向、有效磁化范围和大致的有效磁场强度。
- 3) 用于考察所用的检测工艺规程和操作方法是否妥当。
- 4) 当无法计算复杂工件的磁化规范时,将小而柔软的试片贴在复杂工件的不同部位,可大致确定较理想的磁化规范。

### 2. 标准试片的分类

在我国使用的试片有 A 型、C 型、D 型和 M1 型四种(表 5-4-5)。

表 5-4-5 标准试片类型、规格和图形

类型	( 规格 - 缺陷槽深 / 试片厚度 ) / $\mu_m$		图形和尺寸
A 型	A <sub>1</sub> -7/50	A <sub>2</sub> -7/50	
	A <sub>1</sub> -15/50	A <sub>2</sub> -15/50	
	A <sub>1</sub> -30/50	A <sub>2</sub> -30/50	
	A <sub>1</sub> -15/100	A <sub>2</sub> -15/100	
	A <sub>1</sub> -30/100	A <sub>2</sub> -30/100	
	A <sub>1</sub> -60/100	A <sub>2</sub> -60/100	
C 型	C <sub>1</sub> -8/50	C <sub>2</sub> -8/50	
	C <sub>1</sub> -15/50	C <sub>2</sub> -8/50	
	C <sub>1</sub> -30/50	C <sub>2</sub> -8/50	
D 型	D <sub>1</sub> -7/50	D <sub>2</sub> -7/50	
	D <sub>1</sub> -15/50	D <sub>2</sub> -7/50	
	D <sub>1</sub> -30/50	D <sub>2</sub> -7/50	
M1 型	φ12	7/50	
	φ9	15/50	
	φ6	30/50	

试片为 DT4A 超高纯低碳纯铁轧制而成的薄片。加工试片的材料，包括经退火处理和未经退火处理两种。试片分类符号用英文字母表示，热处理状态由下标的阿拉伯数字表示，经退火处理的为 1 或空缺，未经退火处理的为 2。型号名称中的分母，分子表示试片人工缺陷槽的深度，分母表示试片的厚度，单位为  $\mu_m$ 。

### 3. 使用

- 1) 试片只适用于连续法检验，不适用于剩磁法检验。
- 2) 试片使用前应脱脂，应与工件紧密贴合，且试片有人工缺陷的一面与工件受检面相接触。
- 3) 试片表面不得有褶纹和锈蚀。
- 4) 根据工件检测面的大小选择合适的试片类型。
- 5) 根据工件检测所需的有效磁场强度选用不同灵敏度的试片。
- 6) 磁场强度不同的检测部位可选用不同类型的试片。
- 7) 试片使用完毕后应清洗干净，并妥善保管。

## 六、标准试块

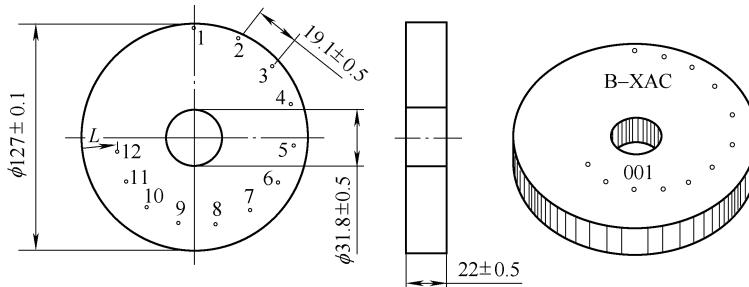
### 1. 用途

用于检验磁粉检测设备、磁粉和磁悬液的综合性能（系统灵敏度），也用于考

察磁粉检测试验条件和操作方法是否恰当,但不能确定被检工件的磁化规范,也不能用于考察被检工件表面的磁场方向和有效磁化范围。

## 2. 分类

我国目前使用的试块有: 直流试块(B型试块),其形状和尺寸如图5-4-1所示; 交流试块(E型试块),其形状和尺寸如图5-4-2所示; 磁场指示器(八角试块),其形状和尺寸如图5-4-3所示,以及自然缺陷试块。

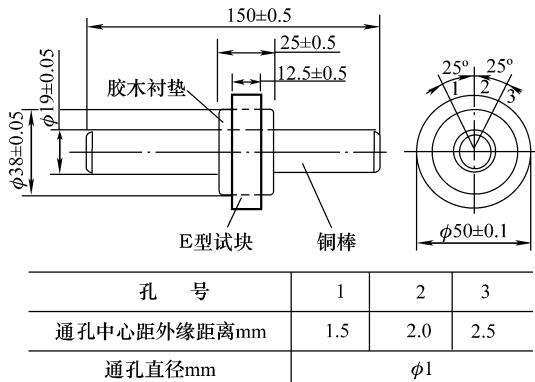


孔号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
通孔中心距外缘距离 L/mm	1.78	3.56	5.33	7.11	8.89	10.67	12.45	14.22	16.00	17.78	19.56	21.34

注: 1. 12个通孔的直径  $D$  为  $\phi 1.78\text{mm}\pm 0.08\text{mm}$ 。

2. 通孔中心距外缘距离  $L$  的尺寸公差为  $\pm 0.08\text{mm}$ 。

图 5-4-1 B型试块的形状和尺寸



注: 1. 3个通孔的直径为  $\phi 1.0\text{ mm}^{+0.03}_{-0.05}$ 。

2. 通孔中心距外缘距离的尺寸公差为  $\pm 0.05\text{mm}$ 。

图 5-4-2 E型试块的形状和尺寸

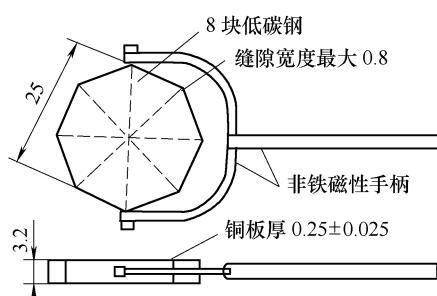


图 5-4-3 磁场指示器(八角试块)的形状和尺寸

## 第五章

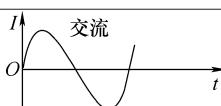
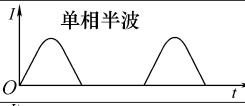
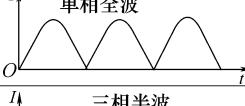
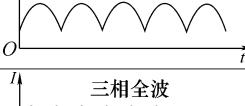
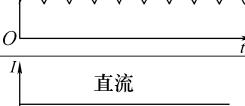
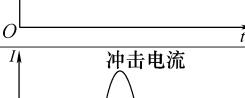
# 磁化电流、磁化方法和磁化规范

## 一、磁化电流

在磁粉检测中，是用电流来产生磁场的，常用不同的电流对工件进行磁化。这种为在工件上形成磁化磁场而采用的电流称为磁化电流。

磁粉检测中常用的磁化电流有交流电、直流电、单相半波整流电和三相全波整流电。磁化电流的波形、电流表指示及换算关系见表 5-5-1。

表 5-5-1 磁化电流的波形、电流表指示及换算关系

电流波形	电流表指示	换算关系	峰值为 100A 时电流表读数
	有效值	$I_m = \sqrt{2}I$	70A
	平均值 两倍平均值	$I_m = \pi I_d$ $I_m = \frac{\pi}{2} I_d$	32A 65A
	平均值	$I_m = \frac{\pi}{2} I_d$	65A
	平均值	$I_m = \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} I_d$	83A
	平均值	$I_m = \frac{\pi}{3} I_d$	95A
	平均值	$I_m = I_d$	100A
			

## 1. 交流电

大小和方向随时间按正弦规律变化的电流称为正弦交流电，简称交流电。

(1) 交流电峰值  $I_m$  和有效值  $I$  的换算关系为

$$I_m = \sqrt{2} I \approx 1.414 I \quad (5-5-1)$$

(2) 交流电峰值  $I_m$  与平均值  $I_d$  的换算关系为

$$I_d = (2/\pi) I_m \approx 0.637 I_m \quad (5-5-2)$$

(3) 趋肤效应 交流电通过导体时，导体表面电流密度较大而内部电流密度较小的现象称为趋肤效应。趋肤深度  $\delta$ （也称渗入深度）与材料的电导率和相对磁导率及交流电的频率有关，可用下式表示

$$\delta = \frac{500}{\sqrt{f\sigma\mu_r}} \quad (5-5-3)$$

式中  $\delta$ ——交流电趋肤深度；

$f$ ——交流电频率；

$\sigma$ ——材料电导率；

$\mu_r$ ——相对磁导率。

(4) 交流电的优点和局限性

交流电的优点：

- 1) 对表面缺陷检测灵敏度高。
- 2) 容易退磁。
- 3) 能够实现感应电流磁化。
- 4) 能够实现多向磁化。
- 5) 变截面工件磁场分布较均匀。
- 6) 有利于磁粉迁移。
- 7) 用于评价直流电发现的磁痕显示。
- 8) 适用于在役工件的检验。
- 9) 适用于  $\phi \leq 12\text{mm}$  弹簧钢丝的检验。
- 10) 交流电磁化时，两次磁化的工序间不需要退磁。

交流电的局限性：

- 1) 剩磁法检验时，受交流电断电相位的影响，剩磁大小不稳定或偏小，易造成缺陷漏检，所以使用剩磁法检验的交流检测设备，应配备断电相位控制器。
- 2) 检测缺陷的深度小，剩磁法约为  $1\text{mm}$ ，连续法约为  $2\text{mm}$ 。

## 2. 整流电

整流电分为单相半波、单相全波、三相半波及三相全波。最常用的是单相半波和三相全波整流电。

(1) 单相半波整流电 单相半波整流电是磁粉检测中最常用的磁化电流之一，其优点如下：

- 1) 兼有直流的渗透性和交流的脉动性。
- 2) 剩磁稳定。
- 3) 有利于近表面缺陷的检测。
- 4) 能提供较高的灵敏度和对比度。
- 5) 设备结构简单、轻便，有利于现场检验。

局限性如下：

- 1) 退磁较困难。
  - 2) 检测缺陷深度不如三相全波整流电和直流电大。
  - 3) 要求较大的输入功率。
- (2) 三相全波整流电 磁粉检测中最常用的磁化电流之一，其优点如下：
- 1) 具有很大的渗透性和很小的脉动性。
  - 2) 剩磁稳定。
  - 3) 适用于近表面缺陷的检测。
  - 4) 需要设备的输入功率小。

局限性如下：

- 1) 退磁困难。
- 2) 退磁场大。
- 3) 变截面工件磁化不均匀。
- 4) 不适用于干法检验。
- 5) 在周向和纵向磁化工序间需要退磁。

### 3. 直流电

直流电是磁粉检测应用最早的磁化电流，它的大小和方向都不变。现在磁粉检测中很少使用。

#### (1) 直流电的优点

- 1) 磁场渗入深度大，检测缺陷的深度最大。
- 2) 剩磁稳定，剩磁能有力地吸住磁粉，便于磁痕评定。
- 3) 适用于近表面缺陷的检测。

#### (2) 局限性

- 1) 退磁困难。
- 2) 不适用于干法检验。
- 3) 退磁场大。
- 4) 在周向和纵向磁化工序间需要退磁。

### 4. 冲击电流

冲击电流一般是由电容器放电而获得的电流，该磁化电流仅适用于需要的磁化电流值特别大而常规设备又不能满足时，根据工件要求制作的专用设备。其优点是检测机可做得很小，但需要输出的磁化电流却很大；其局限性是只适用于剩磁法，

因为通电时间很短，一般是0.01s，所以很难在通电时间内完成施加磁粉并使磁粉向缺陷处迁移。

## 5. 磁化电流的选用

- 1) 用交流电磁化湿法检验，对工件表面微小缺陷检测灵敏度高。
- 2) 交流电的渗入深度不如整流电和直流电。
- 3) 交流电用于剩磁法时，应加装断电相位控制器。
- 4) 交流电磁化连续法检验主要与有效值电流有关，而剩磁检验主要与峰值电流有关。
- 5) 整流电中包含的交流分量越大，检测近表面较深缺陷的能力越小。
- 6) 单相半波整流电磁化干法检验，对工件近表面缺陷检测灵敏度高。
- 7) 三相全波整流电可检测工件近表面较深的缺陷。
- 8) 直流电可检测工件近表面最深的缺陷。
- 9) 冲击电流只能用于剩磁法检验和专用设备。

## 二、磁化方法

### 1. 磁化方法的选择

磁化方法的选择依据为磁场方向与缺陷方向垂直。选择磁化方法应考虑的因素有工件的尺寸大小、工件的外形结构及工件的表面状态。还应根据工件过去断裂的情况和各部位的应力分布，分析可能产生缺陷的部位和方向，选择合适的磁化方法。

### 2. 磁化方法的分类

根据工件的几何形状、尺寸大小和欲发现缺陷方向而在工件上建立的磁场方向，磁化方法一般可分为周向磁化、纵向磁化和多向磁化（复合磁化）。

(1) 周向磁化 周向磁化是指给工件直接通电，或者使电流流过贯穿空心工件孔中的导体，在工件中建立一个环绕工件并与工件轴垂直的周向闭合磁场，用于发现与工件轴平行的纵向缺陷，即与电流方向平行的缺陷。周向磁化法分类如图5-5-1所示。



图 5-5-1 周向磁化法分类

(2) 纵向磁化 纵向磁化是指将电流通过环绕工件的线圈，使工件沿纵向方向磁化的方法，工件中的磁力线平行于线圈的中心轴线。用于发现与工件轴垂直的周向缺陷。利用电磁轭和永久磁铁磁化，使磁力线平行于工件纵轴的磁化方法也是纵向磁化。纵向磁化法分类如图5-5-2所示。

将工件置于线圈中进行纵向磁化，称为开路磁化。开路磁化在工件两端产生磁

极，因而产生退磁场。电磁轭整体磁化、电磁轭或永久磁铁的局部磁化，称为闭路磁化。闭路磁化不产生退磁场或退磁场很小。

(3) 多向磁化 多向磁化是指通过复合磁化，在工件中产生一个大小和方向随时间成圆形、椭圆形或螺旋形轨迹变化的磁场。因磁场的方向在工件上不断地变化着，所以可发现工件上多个方向的缺陷。多向磁化法分类如图 5-5-3 所示。

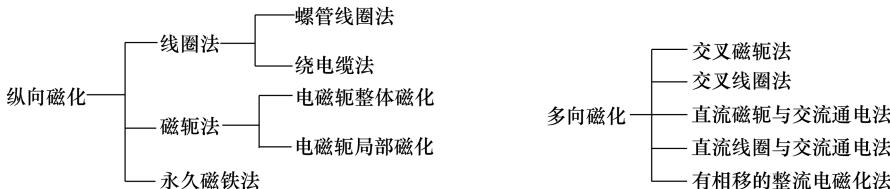


图 5-5-2 纵向磁化法分类

图 5-5-3 多向磁化法分类

### 3. 各种磁化方法的特点

磁化工件的顺序，一般是先进行周向磁化，后进行纵向磁化。如果一个工件上横截面尺寸不等，周向磁化时，电流值应分别计算，先磁化小直径，后磁化大直径。

(1) 轴向通电法 轴向通电法是将工件夹于检测机两磁化夹头之间，使电流从被检工件上直接流过，在工件的表面和内部产生一个闭合的周向磁场，用于检查与磁场方向垂直、与电流方向平行的纵向缺陷。

轴向通电法的优点如下：

- 1) 无论简单工件还是复杂工件，一次或数次通电都能方便地磁化。
- 2) 在整个电流通路的周围产生周向磁场，磁化基本上都集中在工件的表面和近表面。
- 3) 两端通电即可对工件全长进行磁化，所需电流值与长度无关。
- 4) 磁化规范容易计算。
- 5) 工件端头无磁极，不会产生退磁场。
- 6) 用大电流可在短时间内进行大面积磁化。
- 7) 工艺方法简单，检测效率高。
- 8) 有较高的检测灵敏度。

轴向通电法的缺点如下：

- 1) 接触不良会使工件被电弧烧伤。
- 2) 不能检测空心工件内表面的不连续性。
- 3) 夹持细长工件时，容易使工件变形。

轴向通电法适用于实心和空心工件的焊缝、机加工件、轴类、管子、铸钢件和锻钢件的磁粉检测。

(2) 中心导体法 中心导体法是将导体穿入空心工件的孔中，并置于孔中心，电流从导体上通过，形成周向磁场，以检查空心工件内、外表面与电流平行的纵向

不连续性和端面的径向不连续性。

中心导体法的优点如下：

- 1) 磁化电流不从工件上直接流过，不会产生电弧。
- 2) 在空心工件的内、外表面及端面都会产生周向磁化。
- 3) 重量轻的工件可用芯棒支撑，许多小工件可穿在芯棒上一次磁化。
- 4) 一次通电，工件全长都能得到周向磁化。
- 5) 工艺方法简单，检测效率高。
- 6) 有较高的检测灵敏度，因而是最有效、最常用的磁化方法之一。

中心导体法的缺点如下：

- 1) 对于厚壁工件，外表面缺陷的检测灵敏度比内表面低很多。
- 2) 检测大直径管子时，应采用偏置芯棒法，需转动工件，进行多次磁化和检验。
- 3) 仅适用于有孔工件的检验。

中心导体法适用于管子、管接头、空心焊接件和各种有孔的工件如轴承圈、空心圆柱、齿轮、螺帽及环形件的磁粉检测。

(3) 偏置芯棒法 偏置芯棒法是将导体穿入空心工件的孔中，并贴近工件内壁放置，电流从导体上通过形成周向磁场，用于局部检验空心工件内、外表面与电流方向平行的缺陷和端面的径向缺陷。

(4) 触头法 触头法是用两支杆触头接触工件表面，通电磁化，在平板工件上磁化能产生一个畸变的周向磁场，用于发现与触头连线平行的缺陷。

触头法的优点如下：

- 1) 设备轻便，可携带到现场检测，灵活方便。
- 2) 可将周向磁场集中在经常出现缺陷的局部区域进行检测。
- 3) 检测灵敏度高。

触头法的缺点如下：

- 1) 一次磁化只能检测较小的区域。
- 2) 接触不良会引起工件过热和打火烧伤。
- 3) 大面积检测时，要求分块累计检测，效率较低。

触头法适用于平板对接焊缝、T形焊缝、管板焊缝、角焊缝及大型铸件、锻件和板材的局部磁粉检测。

(5) 线圈法 线圈法是将工件放在通电线圈中，或用软电缆缠绕在工件上通电磁化，形成纵向磁场，用于发现工件的周向缺陷。

线圈法的优点如下：

- 1) 非电接触。
- 2) 方法简单。
- 3) 大型工件用绕电缆法很容易得到纵向磁化。

4) 有较高的检测灵敏度。

线圈法的缺点如下：

1)  $L/D$  值对退磁场和灵敏度有很大的影响，决定安匝数时要加以考虑。

2) 工件端面的缺陷，检测灵敏度低。

3) 为了将工件端部效应减至最小，应“快速断电”。

线圈法适用于设备对接焊缝、角焊缝、管板焊缝以及纵长工件如曲轴、轴、管子、棒材、铸件和锻件的磁粉检测。

(6) 磁轭法 磁轭法是用固定式电磁轭两磁极夹住工件进行整体磁化，或用便携式电磁轭磁极接触工件表面进行局部磁化，用于发现与两磁极连线垂直的缺陷。

磁轭法的优点如下：

1) 非电接触。

2) 改变磁轭方位，可发现任何方向的缺陷。

3) 便携式磁轭可带到现场检测，灵活方便。

4) 可用于检测带漆层的工件（当漆层厚度允许时）。

5) 检测灵敏度较高。

磁轭法的缺点如下：

1) 几何形状复杂的工件检验较困难。

2) 磁轭必须放到有利于缺陷检出的方向。

3) 用便携式磁轭一次磁化只能检测较小的区域，大面积检验时，要求分块累积，效率低。

4) 磁轭磁化时要与工件接触良好，尽量减小间隙的影响。

磁轭法适用于平板对接焊缝、T形焊缝、管板焊缝、角焊缝及大型铸件、锻件和板材的局部磁粉检测。

(7) 交叉磁轭法 交叉磁轭法是在被检工件表面上产生旋转磁场，这种多向磁化技术可以检测出非常小的缺陷，一次磁化可以检测出工件表面任何方向的缺陷，检测效率高。

交叉磁轭法的优点如下：

1) 一次磁化可检测出工件表面任何方向的缺陷。

2) 检测灵敏度和检测效率都很高。

交叉磁轭法的缺点如下：

只是用于连续法，不适用剩磁法磁粉检测，操作要求严格。

交叉磁轭法适用于锅炉压力容器的平板对接焊缝的磁粉检测。

使用交叉磁轭法的注意事项：

1) 交叉磁轭磁化检验只适用于连续法。必须采用连续移动的方式进行工件磁化，且边移动交叉磁轭进行磁化，边施加磁悬液。

2) 为了保证灵敏度、避免造成漏检，磁轭的移动速度不能太快，不能超过标

准规定的4m/min的移动速度。

3) 磁悬液的喷洒至关重要, 必须在有效磁化区范围内始终保持润湿状态, 以利于缺陷痕迹的形成。

4) 磁痕观察必须在交叉磁轭通过后立即进行, 避免已形成的磁痕遭到破坏。

5) 交叉磁轭磁极必须与工件表面接触良好, 特别是磁极不能悬空, 最大间隙不应超过1.5mm, 否则会导致检测失效。

### 三、磁化规范

对工件磁化, 选择磁化电流或磁场强度值所遵循的规则称为磁化规范。磁粉检测应使用既能检测出所有的有害缺陷, 又能区分磁痕显示的最小磁场强度进行检验。因磁场强度过大易产生过渡背景, 会掩盖相关显示; 磁场强度过小, 磁痕显示不清晰, 难以发现缺陷。

#### 1. 磁化规范的制定原则

##### (1) 制定磁化规范应考虑的因素

1) 根据工件的材料、热处理状态和磁特性, 确定采用连续法还是剩磁法, 制定相应的磁化规范。

2) 根据工件的尺寸、形状、表面状态和欲检出缺陷的种类、位置、形状和大小, 确定磁化方法、磁化电流种类和有效磁化区, 制定相应的磁化规范。

##### (2) 制定磁化规范的方法

1) 用经验公式计算, 并结合磁场强度监控方法使用。

2) 利用材料的磁特性曲线, 确定合适的磁场强度。制定磁化规范时, 除了应考虑工件的尺寸和形状外, 还应将材料的磁特性考虑进去。

3) 用毫特斯拉计测工件表面的切向磁场强度, 确定相应的磁化规范。

4) 用标准试片确定磁化规范。

#### 2. 轴向通电法和中心导体法磁化规范

轴向通电法和中心导体法的磁化规范见表5-5-2。中心导体法可用于检测工件内、外表面与电流平行的纵向缺陷和端面的径向缺陷。外表面检测时应尽量使用直流电或整流电。

表5-5-2 轴向通电法和中心导体法的磁化规范

检测方法	磁化电流计算公式	
	交流电	直流电、整流电
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: 1.  $I$ —磁化电流 (A); 圆柱形工件,  $D$ —工件直径 (mm)。

2. 非圆柱形工件,  $D$ —工件截面积上最大尺寸 (mm)。

### 3. 偏置芯棒法磁化规范

当使用中心法时,如电流不能满足检测要求时应采用偏置芯棒法进行检测,芯棒应靠近内壁放置,导体与内壁接触时应采取绝缘措施。每次有效检测区长度约为四倍芯棒直径,且应有一定的重叠区,重叠区长度不应小于有效检测区的10%(0.4d)。磁化电流按表5-5-2公式计算,式中D的数值取芯棒直径加两倍工件壁厚。

### 4. 触头法磁化规范

当采用触头法磁化时,电极间距L一般应控制在75~200mm范围内。磁场的有效宽度为触头中心线两侧1/4间距。两次磁化区之间应有不小于10%的磁化重叠区。

连续法检测的触头法磁化电流值见表5-5-3。磁化电流应根据标准试片实测结果校正。

表5-5-3 触头法磁化电流值

工件厚度/mm	电流值/A
$T < 19$	$I = (3.5 \sim 4.5) L$
$T \geq 19$	$I = (4 \sim 5) L$

注: I—磁化电流(A), L—两触头间距(mm)。

### 5. 线圈法磁化规范

线圈法产生的磁场平行于线圈的轴线,其有效磁化区是从线圈端部向外延伸150mm的范围内,超过150mm之外区域,磁化强度应采用标准试片确定。当被检工件太长时,应进行分段磁化,且应有一定的重叠区。重叠区不应小于分段检测长度的10%。检测时,磁化电流应根据标准试片实测结果来确定。

(1) 低充填因数线圈 线圈截面积与被检工件横截面积之比大于等于10时。

1) 当工件偏心放置时,线圈的安匝数为

$$IN = \frac{45000}{L/D} \quad (5-5-4)$$

2) 当工件正中放置于线圈中心时,线圈的安匝数为

$$IN = \frac{1690R}{6(L/D) - 5} \quad (5-5-5)$$

(2) 高充填因数线圈 线圈横截面积与被检工件横截面积之比小于等于2时线圈的安匝数为

$$IN = \frac{35000}{L/D + 2} \quad (5-5-6)$$

以上各式中 I—施加在线圈上的磁化电流(A);

N—线圈匝数;

R—线圈半径(mm);

$L$ ——工件长度 (mm)；

$D$ ——工件直径或横截面上最大尺寸 (mm)。

(3) 中充填因数线圈 线圈横截面积与被检工件横截面积之比大于 2 且小于 10 时线圈的安匝数为

$$IN = (IN)_h \frac{10 - Y}{8} + (IN)_i \frac{Y - 2}{8} \quad (5-5-7)$$

式中  $(IN)_h$ ——由式 (5-5-6) 计算出的安匝数；

$(IN)_i$ ——由式 (5-5-4) 或式 (5-5-5) 计算出的安匝数；

充填因数  $Y$ ——线圈横截面积与被检工件横截面积之比。

注：

1) 充填因数  $Y$  的计算，无论工件是实心或空心，工件截面积为总的横截面积。

2)  $L/D$  中的直径  $D$

① 若工件为实心件圆柱体，则  $D$  为外直径；若为其他形状，则  $D$  为横截面最大尺寸。

② 若工件为空心件，则应采用有效直径  $D_{\text{eff}}$  代替。

对于中空的非圆筒形工件， $D_{\text{eff}}$  的计算如下

$$D_{\text{eff}} = 2 \sqrt{\frac{(A_t - A_h)}{\pi}} \quad (5-5-8)$$

式中  $A_t$ ——工件总的截面面积 ( $\text{mm}^2$ )；

$A_h$ ——工件中空部分横截面积 ( $\text{mm}^2$ )。

对于中空的圆筒形工件， $D_{\text{eff}}$  的计算如下

$$D_{\text{eff}} = \sqrt{D_0^2 - D_i^2} \quad (5-5-9)$$

式中  $D_0$ ——圆筒外直径 (mm)；

$D_i$ ——圆筒内直径 (mm)。

3) 当  $L/D \geq 15$  时， $L/D$  值按 15 计算。

## 6. 磁轭法磁化规范

磁轭的磁极间距应控制在 75 ~ 200mm 之间，当使用磁轭最大间距时，交流电磁轭的提升力应不小于 45N；直流电磁轭提升力应不小于 177N；交叉磁轭提升力应不小于 118N。

检测的有效区域为两极连线两侧各 50mm 的范围内，磁化区域每次应有不少于 15mm 的重叠。采用磁轭法磁化工件时，其磁化电流应根据标准试片实测结果来选择；如果采用固定式磁轭磁化工件时，应根据标准试片实测结果来校验灵敏度是否满足要求。

## 第六章 磁粉检测工艺

磁粉检测工艺是指包含磁粉检测预处理、磁化工件（选择磁化方法、磁化规范和安排在合适的工序）、施加磁粉或磁悬液（根据工件要求选择湿法或干法，根据材料的剩磁和矫顽力选择连续法或剩磁法检验并施加磁粉）、磁痕观察与记录、缺陷评定、退磁和后处理的全过程。

工艺过程包括预处理、磁化工件、施加磁粉或磁悬液、磁痕观察与记录、缺陷评定、退磁和后处理七个步骤。

磁粉检测方法一般根据磁粉检测所用载体不同，分为湿法检测和干法检测；根据磁化工件和施加磁粉或磁悬液的时机不同，分为连续法和剩磁法；根据磁化方法的不同，分为轴向通电法、触头法、线圈法、磁轭法、中心导体法及交叉磁轭法等。根据不同分类条件，磁粉检测方法的分类见表 5-6-1。

表 5-6-1 磁粉检测方法分类

分类条件	磁粉检测方法
施加磁粉的载体	湿法（荧光磁粉、非荧光磁粉），干法（非荧光磁粉）
施加磁粉的时机	连续法检测、剩磁法检测
磁化方法	轴向通电法、触头法、线圈法、磁轭法、中心导体法及交叉磁轭法等

磁粉检测时机应安排在容易产生缺陷的各道工序之后进行，在喷漆、发蓝、磷化、氧化、阳极化、电镀或其他表面处理工序前进行。表面处理后还要进行局部机加工的，对该局部机加工表面需再次进行磁粉检测。工件要求腐蚀检验时，磁粉检测应在腐蚀工序后进行。焊接接头的磁粉检测应安排在焊接工序完成后进行。对于有延迟裂纹倾向的材料，磁粉检测应根据要求至少在焊接完成 24 小时后进行。有再热裂纹倾向的材料应在热处理后再增加一次磁粉检测。除另有要求，对于紧固件和锻件的磁粉检测应安排在最终热处理之后进行。

### 一、预处理

因为磁粉检测用于对工件的表面缺陷和近表面缺陷进行检测，所以工件的表面

状态对于磁粉检测的操作和检测灵敏度有很大影响。故磁粉检测前，对工件应做好以下预处理工作：

(1) 清除 清除工件表面的油污、灰尘、铁锈、毛刺、氧化皮、金属屑及焊渣等，以及一些外来的会影响灵敏度的物质。

(2) 打磨 使用轴向通电法和触头法磁化时，去除非导电覆盖层。

(3) 分解 拆卸组合工件，便于对工件各检测面进行检验。因为工件结构复杂，磁化和退磁困难；磁悬液难以清洗，并会对工件造成磨损；部分检测面难以观察；交界处易产生漏磁场，形成非相关显示。

(4) 封堵 若工件有盲孔和内腔，防止磁悬液流入，检测前应将空洞封堵。

(5) 涂敷 如果磁粉与工件表面颜色的对比度小，或工件表面过于粗糙，为了提高对比度，增加对比反差。

## 二、磁化、施加磁粉或磁悬液

磁化工件是磁粉检测中较为关键的工序，对检测灵敏度影响很大。磁化不足会导致缺陷的漏检；磁化过度，会产生非相关显示而影响缺陷的正确判别。施加磁粉或磁悬液要注意掌握施加的方法和施加时机。连续法和剩磁法、干法和湿法对施加磁粉或磁悬液的要求各不相同。

### 1. 连续法

连续法是在外加磁场磁化的同时，将磁粉或磁悬液施加到工件上进行磁粉检测的方法。

#### (1) 应用范围

- 1) 适用于所有铁磁性材料、工件和磁粉检测。
- 2) 适用工件形状复杂不易得到所需剩磁的工件。
- 3) 适用于表面覆盖层较厚的工件。
- 4) 适用于使用剩磁法检验设备功率达不到时的工件。

#### (2) 操作要点

1) 湿连续法。先用磁悬液润湿工件表面，在通电磁化的同时浇磁悬液，停止浇磁悬液后再通电数次，通电时间为1~3s，停止施加磁悬液1s后，待磁痕形成并滞留下来时方可停止通电，再进行磁痕观察和记录。

2) 干连续法。对工件通电磁化后开始喷撒磁粉，并在通电的同时吹去多余的磁粉，待磁痕形成与磁痕观察和记录后再停止通电。

#### (3) 优点

- 1) 适用于任何铁磁性材料。
- 2) 具有最高的检测灵敏度。
- 3) 可用于多向磁化。
- 4) 交流磁化不受断电相位的影响。

- 5) 能发现近表面的缺陷。
- 6) 可用于湿法检验和干法检验。

(4) 局限性

- 1) 效率低。
- 2) 易产生非相关显示。
- 3) 目视可达性差。

## 2. 剩磁法

停止磁化后，再将磁悬液施加到工件上进行磁粉检测的方法。

(1) 应用范围

1) 凡经过热处理（淬火、回火、渗碳及局部正火等）的高碳钢和合金结构钢，矫顽力在  $800\text{A/m}$ ，剩磁在  $0.8\text{T}$  以上者，才可进行剩磁法检验。

2) 用于因工件几何形状限制连续法难以检验的部位，如螺纹根部和筒形件内表面。

3) 用于评价连续法检验出的磁痕显示属于表面还是近表面缺陷。

(2) 操作要点

1) 磁粉应在通电结束后再施加，一般通电时间为  $0.25\sim1\text{s}$ 。

2) 浇磁悬液  $2\sim3$  遍，保证工件各个部位润湿。

3) 若浸入搅拌均匀的磁悬液中，一般控制在  $10\sim20\text{s}$  后取出进行检验，时间过长会产生过度背景。

4) 磁化后的工件在检验完毕前，不要与任何铁磁性材料接触，以免产生磁性。

(3) 优点

1) 有足够的检测灵敏度，检测效率高。

2) 缺陷显示重复性好，可靠性高。

3) 易于检验观察，易实现自动化检测。

4) 能评价连续法检测出的磁痕显示属于表面还是近表面缺陷显示。

5) 可避免螺纹根部、凹槽和尖角处磁粉过度堆积。

(4) 局限性

1) 只适用于剩磁和矫顽力达到要求的材料。

2) 不能用于多向磁化。

3) 交流磁化受断电相位的影响。

4) 检测缺陷深度浅，近表面缺陷灵敏度低。

5) 不适用于干法检验。

## 3. 湿法

湿法是将磁粉悬浮在载液中进行磁粉检测的方法。

(1) 应用范围

1) 适用于锅炉压力容器压力管道焊缝、宇航工件及灵敏度要求高的工件。

- 2) 适用于大批量工件的检查，常与固定设备配合使用，磁悬液可回收。
- 3) 适用于检测表面微小缺陷，如疲劳裂纹、磨削裂纹、焊接裂纹和发纹等。

#### (2) 操作要点

- 1) 磁悬液施加可采用浇法、喷法和浸法，但不能采用刷涂法。
- 2) 连续法宜用浇、喷法，磁悬液流速应缓慢，防止冲刷掉磁痕。
- 3) 剩磁法用浇法、浸法皆宜，浇法灵敏度低于浸法，浸法应严格掌握时间，保证良好显示，防止产生过度背景。
- 4) 采用水磁悬液时，应进行水断试验。
- 5) 可根据各种工件的要求，选择不同的磁悬液浓度。
- 6) 仰视检验和水中检验宜用磁膏。

#### (3) 优点

- 1) 用湿法加交流电，检验工件表面微小缺陷灵敏度高。
- 2) 可用于剩磁法和连续法。
- 3) 与固定式设备配合使用，操作方便，检测效率高，磁悬液可回收。
- (4) 局限性 检验大裂纹和近表面缺陷的灵敏度不如干法。

### 4. 干法

干法是以空气为载体用干磁粉进行磁粉检测的方法。

#### (1) 应用范围

- 1) 适用于表面粗糙的大型锻件、铸件、毛坯、结构件和大型焊接件焊缝的局部检查及灵敏度要求不高的工件。

- 2) 常与便携设备配合使用，磁粉不回收。
- 3) 适用于检测大缺陷和近表面缺陷。

#### (2) 操作要点

- 1) 工件表面要干净和干燥，磁粉也要干燥。
- 2) 工件磁化后施加磁粉，并在观察和分析磁痕后再撤去磁场。
- 3) 施加磁粉应缓慢均匀，在工件表面形成薄而均匀的磁粉覆盖层，避免磁粉局部堆积过多。

- 4) 磁化时，吹去多余磁粉，应控制空气流速、风压及风口距离，并应按一定顺序和一定方向进行，防止过吹。

#### (3) 优点

- 1) 检验大裂纹灵敏度高。
- 2) 干法加单向半波整流电，检验近表面灵敏度高。
- 3) 适用于现场检验。

#### (4) 局限性

- 1) 检验微小缺陷灵敏度不如湿法。
- 2) 磁粉不易回收。

3) 不适用于剩磁法检验。

### 三、磁痕观察、记录与缺陷评定

#### 1. 磁痕的观察

磁痕的观察和评定一般应在磁痕形成后立即进行。非荧光磁粉检测时，被检工件表面应有足够的可见光度。可见光度不应小于1000lx，由于条件限制无法满足时，可见光度可以适当降低，但不能低于500lx。

荧光磁粉检测时使用黑光灯照明，并应在暗区进行，暗区的可见光度不应大于20lx，被检工件表面的黑光辐照度应大于等于 $1000\mu\text{W}/\text{cm}^2$

检测人员进入暗区后，眼睛至少要有三分钟的适应过程。

#### 2. 缺陷磁痕显示记录

缺陷磁痕显示记录方法：①照相法；②贴印法；③磁粉检测-橡胶铸型法；④录像法；⑤可剥性涂层法；⑥临摹法。

#### 3. 缺陷评定

磁粉检测出来的磁痕显示，首先要鉴别出是相关显示还是非相关显示或是伪显示，只有相关显示是由缺陷引起的，磁粉检测只对相关显示进行评定。如果是相关显示还要进一步确定缺陷的性质、大小和方向，结合相关标准进行评定。

### 四、退磁

#### 1. 剩磁的产生与影响

(1) 剩磁的产生 铁磁性材料和工件一旦被磁化，即使除去外加磁场后，某些磁畴仍会保持新的取向而不会回复到原来的随机取向状态，于是该材料或工件就保留了剩磁。剩磁的大小与材料的磁特性、施加的磁场强度、磁化方向和工件的几何形状等因素有关。

#### (2) 影响

- 1) 工件上的剩磁会影响装在工件附近磁罗盘和仪表的精度及其正常使用。
- 2) 工件上的剩磁会吸附铁屑和磁粉，在继续加工时影响工件的表面粗糙度和刀具使用寿命。
- 3) 工件上的剩磁会给清除磁粉带来困难。
- 4) 工件上的剩磁会使电弧焊过程中的电弧产生偏吹现象，导致焊位偏离。
- 5) 油路系统的剩磁会吸附铁屑和磁粉，影响供油系统的畅通。
- 6) 滚珠轴承上的剩磁会吸附铁屑和磁粉，造成滚珠轴承磨损。
- 7) 电镀钢件上的剩磁会使电镀电流偏离期望流通的区域，影响电镀质量。
- 8) 对多次磁化的工件，上一次磁化的剩磁会给下一次磁化带来不良影响。

#### 2. 退磁的原理

退磁是将工件置于交变磁场中，利用磁滞回线递减进行退磁。随着交变磁场的

幅值逐渐衰减，磁滞回线的轨迹也越来越小。当磁场逐渐衰减到零时，会使工件中残留的剩磁  $B_r$  接近于零，退磁原理如图 5-6-1 所示。由此可以看出，退磁时电流与磁场的方向和大小的变化，必须换向和衰减同时进行。

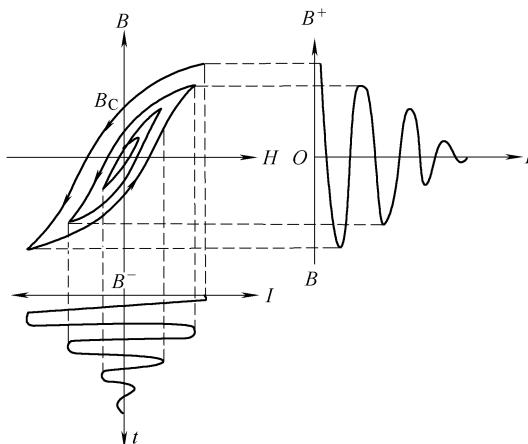


图 5-6-1 退磁原理

### 3. 退磁方法

(1) 交流电退磁 交流电磁化过的工件用交流电退磁，可采用通过法或衰减法，并可组合成以下几种方式：

- 通过法
  - （线圈法）线圈不动工件动，磁场逐渐衰减到零。
  - （线圈法）工件不动线圈动，磁场逐渐衰减到零。
  - （线圈法）线圈、工件都不动，电流逐渐衰减到零。
  - （通电法）两磁化夹头夹持工件，电流逐渐衰减到零。
- 衰减法
  - （触头法）两触头接触工件，电流逐渐衰减到零。
  - （交流磁轭法）交流电磁轭通电时离开工件，磁场逐渐衰减到零。
  - 扁平线圈通电时离开工件，磁场逐渐衰减到零。

交流电退磁电流波形如图 5-6-2 所示。

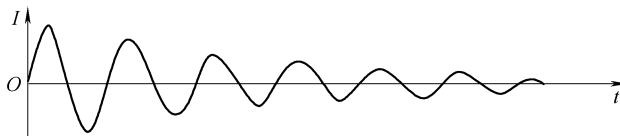


图 5-6-2 交流电退磁波形图

### (2) 直流电退磁

1) 直流换向衰减退磁。通过不断改变直流电的方向，同时使通过工件的电流

递减到零进行退磁，直流电退磁电流波形如图 5-6-3 所示。

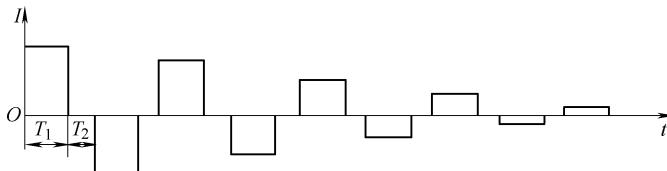


图 5-6-3 直流电退磁波形图

图中  $T_1$  为电流导通时间间隔， $T_2$  为电流断电时间间隔，要保证在断电时电流换向。电流的衰减次数应尽可能多（一般要求 30 次以上），每次衰减的电流幅度应尽可能小，如果衰减的幅度太大，则达不到退磁的目的。

2) 超低频电流自动退磁。超低频通常指频率为 0.5 ~ 10Hz，可用于对三相全波整流电磁化的工件进行退磁。

3) 通过加热工件退磁。通过加热提高工件温度至居里点以上，是最有效的退磁方法，但这种方法通常不经济，所以不实用。

#### 4. 退磁注意事项

- 1) 退磁的磁场强度，应大于（至少要等于）磁化时用的最大磁场强度。
- 2) 对周向磁化过的工件退磁时，应将工件纵向磁化后再纵向退磁，以便能检出退磁后存在的剩磁大小。
- 3) 交流电磁化用交流电退磁，直流电磁化用直流电退磁。直流退磁后若再用交流电退磁一次，可获得最佳效果。
- 4) 线圈通过法退磁时应注意：

- ① 工件与线圈轴应平行，并靠内壁放置。
- ② 工件  $L/D \leq 2$  时，应使用延长块加长后再进行退磁。
- ③ 小工件不应以捆扎或堆叠的方式放在框里退磁。
- ④ 不能采用铁磁性的筐或盘摆放工件退磁。
- ⑤ 环形工件或复杂工件应一边旋转一边通过线圈进行退磁。
- ⑥ 工件应缓慢通过并远离线圈 1m 后方可断电。
- ⑦ 退磁机应东西方向放置，退磁的工件也应东西放置，与地磁场垂直可有效退磁。
- ⑧ 已退磁的工件不要放在退磁机或磁化装置附近。

#### 5. 剩磁测量

剩磁测量可采用剩磁测量仪，也可采用 Xcz 型或 Jcz 型袖珍式磁强计测量。剩磁应不大于 0.3mT（相当于 240A/m），或按产品技术条件规定。

### 五、后处理与合格工件的标记

磁粉检测以后，为不影响工件的后续加工和使用，往往在检验后需要对工件进

行后处理。

### 1. 后处理的内容

- 1) 清洗工件表面包括孔中、裂缝和通路中的磁粉。
- 2) 使用水磁悬液检验，为防止工件生锈，可用脱水防锈油处理。
- 3) 如果使用过封堵应取出。
- 4) 如果涂覆了反差增强剂应清洗掉。
- 5) 被拒收的工件应隔离。

### 2. 合格工件标记方法

- 1) 打钢印。
- 2) 刻印。
- 3) 电化学腐蚀。
- 4) 挂标签。

### 3. 标记注意事项

- 1) 检测内容作为产品验收项目者，应在合格工件或材料上做永久或半永久性的醒目标记。
- 2) 标记方法和部位应经委托或设计单位同意。
- 3) 标记方法应不影响工件的使用和后续的检验工作。
- 4) 标记应防止擦掉或污染。
- 5) 标记应经得起运输和装卸的影响。

## 六、超标缺陷磁痕显示的处理和复验

### 1. 超标缺陷磁痕显示的处理

当发现超标缺陷磁痕显示时，如果允许打磨清除，应打磨清除至肉眼不可见。打磨圆滑过渡后，再采用磁粉检测进行复查，直至确认缺陷完全清除为止。如打磨深度超出规定的要求应采用其他方法进行处理，包括补焊方法修补、力学方法计算等方式。

### 2. 复验

出现以下情况时，应对工件进行复验。

- 1) 检测结束后，用标准试片验证检测灵敏度不符合要求时。
- 2) 发现检测过程中操作方法有误或技术条件改变时。
- 3) 合同各方有争议或认为有必要时要进行复验，复验应按照规定的步骤进行。

## 七、检测记录和检测报告

检测结束后一定要及时、认真、准确地填写检测记录和报告。检测记录和报告应能追踪到被检测的具体工件和部位，至少应包括以下内容：

- 1) 委托单位、被检工件名称和编号。

- 2) 被检工件材质、坡口形式、焊接方法热处理状态及表面状态。
- 3) 检测装置的名称和型号。
- 4) 磁粉种类及磁悬液浓度和施加磁粉的方法。
- 5) 磁化方法和磁化规范。
- 6) 检测灵敏度及标准试片、标准试块。
- 7) 磁痕记录及工件草图。
- 8) 检测结果及质量等级评定、检测标准名称和验收等级。
- 9) 检测人员和负责人签字及其技术资格等级。
- 10) 检测日期。

## 八、影响磁粉检测灵敏度的主要因素

磁粉检测灵敏度是指检测最小缺陷的能力，是绝对灵敏度。

影响磁粉检测灵敏度的主要因素：

- 1) 磁场大小和方向的选择。
- 2) 磁化方法的选择。
- 3) 磁粉的性能。
- 4) 磁悬液的浓度。
- 5) 设备的性能。
- 6) 工件形状和表面粗糙度。
- 7) 缺陷的性质、形状和埋藏深度。
- 8) 正确的工艺操作。
- 9) 检测人员的素质。
- 10) 检测环境的条件。

## 第七章

# 磁痕分析及常见缺陷磁痕显示比较

### 一、磁痕分析的意义

磁粉检测是利用磁粉聚集形成的磁痕来显示工件上的不连续性和缺陷的。通常把磁粉检测时磁粉聚集形成的图像称为磁痕。正确分析磁痕的意义是十分重要的，主要体现在以下几个方面：

- 1) 正确的磁痕分析可以避免误判。
- 2) 由于磁痕显示能反映出不连续性和缺陷的位置、形状和大小，并可大致确定缺陷的性质，所以磁痕分析可为产品设计和工艺改进提供较可靠的信息。
- 3) 在工件使用后进行磁粉检测，用于发现疲劳裂纹，并可间断检测和监视疲劳裂纹的扩展，可以做到及早预防，避免设备和人身事故发生。

### 二、磁痕的分类

能够形成磁痕显示的原因很多，综合各种原因将磁痕分为三类：相关显示、非相关显示和伪显示。相关显示是由缺陷产生的漏磁场形成的磁痕显示称为相关显示。非相关显示是由工件截面突变和材料磁导率差异等产生的漏磁场形成的磁痕显示称为非相关显示。伪显示是由非漏磁场形成的磁痕显示称为伪显示。

#### 1. 伪显示

伪显示产生的原因、磁痕特征和鉴别方法分别是：

- 1) 工件表面粗糙（如焊缝两侧的凹陷，粗糙的工件表面）滞留磁粉形成磁痕显示，其磁痕堆集松散，磁痕轮廓不清晰，在载液中漂洗磁痕可漂洗掉。
- 2) 工件表面有油污或不清洁，黏附磁粉形成磁痕显示，尤其在干法中最常见，磁粉堆集松散，清洗并干燥工件后重新检验，该显示不再出现。
- 3) 湿法检验中，磁悬液中的纤维物线头，黏附磁粉留在工件表面，容易误认为磁痕显示，仔细观察即可辨认。
- 4) 工件表面的氧化皮，油漆斑点的边缘上滞留磁粉形成的磁痕显示，通过仔

细观察或漂洗工件即可鉴别。

5) 工件上形成排液沟的外形滞留磁粉形成的磁痕显示，尤其沟槽底部磁痕显示有的类似缺陷显示，但漂洗后磁痕不再出现。

6) 磁悬液浓度过大，或施加不当会形成过度背景，磁粉松散，磁痕轮廓不清晰，漂洗后磁痕不再出现。

过度背景是指妨碍磁痕分析和评定的磁痕背景。过度背景是由于工件表面太粗糙，工件表面污染，过高的磁场强度或过高的磁悬液浓度而产生的，磁粉堆多而松散，易掩盖相关显示。

## 2. 非相关显示

非相关显示产生的原因、磁痕特征和鉴别方法分别是：

### (1) 磁极和电极附近

1) 产生原因。采用电磁轭检验时，磁极和磁极附近产生的非相关显示。用磁轭法时，磁极与工件接触处，磁力线离开工件表面和进入工件表面均产生漏磁场，且磁极附近磁通密度大；用触头法时，电极附近电流密度大，磁通密度大，因此在磁极和电极附近的工件表面上会产生磁痕显示。

2) 磁痕特征。磁极和电极附近的磁痕多而松散，与缺陷产生的相关显示磁痕特征不同，但该处容易形成过度背景，掩盖相关显示。

3) 鉴别方法。退磁后，改变磁极和电极的位置，重新进行检验，该处磁痕显示重复出现者可能是相关显示，不再出现者为非相关显示。

### (2) 工件截面突变

1) 产生原因。工件内键槽等部位的截面缩小，在这一部分金属截面内所能容纳的磁感应线有限，由于磁饱和，迫使一部分磁感应线离开和进入工件表面，形成漏磁场，吸附磁粉，形成非相关显示。

2) 磁痕特征。磁痕松散，有一定的宽度。

3) 鉴别方法。这类磁痕显示都是有规律地出现在同类工件的同一部位。根据工件的几何形状，容易找到磁痕显示形成的原因。

### (3) 磁写

1) 产生原因。当两个已磁化的工件相互接触或用一钢块在一个已磁化的工件上划过时，在接触部位便会产生磁性变化，产生的磁痕显示称为磁写。

2) 磁痕特征。磁痕松散，线条不清晰，像乱画的样子。

3) 鉴别方法。将工件退磁后，重新进行磁化和检验，若磁痕显示不重新出现，则原显示为磁写磁痕显示。但严重者在进行多方向退磁后，磁痕才不再出现。

### (4) 两种材料交界处

1) 产生原因。焊接过程中，当两种磁导率不同的材料焊接在一起，或者母材与焊条的磁导率相差很大（如用奥氏体焊条焊接铁磁性材料）时，在焊缝与母材交界处就会产生磁痕显示。

2) 磁痕特征。磁痕有的松散,有的浓密清晰,类似裂纹磁痕显示,在整条焊缝都出现同样的磁痕显示。

3) 鉴别方法。结合焊接工艺、母材与焊条材料进行分析。

(5) 局部冷作硬化

1) 产生原因。工件的冷加工硬化(如局部锤击和矫正等),会使工件局部硬化,导致磁导率变化,形成漏磁场。

2) 磁痕特征。磁痕显示宽而松散,呈带状。

3) 鉴别方法。一是根据磁痕特征分析;二是将该工件退火消除应力后重新进行磁粉检测,这种磁痕显示不再出现。

(6) 金相组织不均匀

1) 产生原因。工件淬火后冷却不均匀造成组织差异;马氏体不锈钢的金相组织为铁素体和马氏体,二者磁导率差异大;高碳钢和高碳合金钢钢锭凝固时,产生树枝状偏析,使钢组织不均匀,在其间隙中形成碳化物,轧制中沿压延方向被拉成带状,其组织不均匀,磁导率差异大。

2) 磁痕特征。磁痕呈带状,单个磁痕类似发纹,磁痕松散不浓密。

3) 鉴别方法。根据磁痕分布和特征及材料进行分析。

(7) 磁化电流过大

1) 产生原因。磁化电流过大时会使磁力线逸出工件表面,产生漏磁场吸附磁粉形成磁痕,在截面突变处更为严重。

2) 磁痕特征。磁痕松散,沿工件棱角处分布,或者沿金属流线分布,形成过度背景。

3) 鉴别方法。退磁后,用合适的磁化规范,磁痕不再出现。

### 3. 相关显示

相关显示产生原因、磁痕特征和鉴别方法。

(1) 原材料缺陷磁痕显示

1) 发纹。

① 产生原因。钢锭中存在的非金属夹杂物和气孔,在轧制和拉拔过程中随着金属的变形伸长而形成发纹。绝大多数发纹都是非金属夹杂物(硫化物和氧化物)产生的,并沿金属纤维方向分布。在钢棒上是与轴线平行的连续或断续的直线状,在钢管上的发纹与钢管轴线有一小夹角,在锻件上发纹随着纤维走向微弯曲。发纹有的很短,有的很长,可分布在工件不同深度处,一般很浅、很细。

② 磁痕特征。发纹磁痕均匀清晰而不浓密,两头钝(呈圆角)。

③ 鉴别方法。一是根据发纹分布和磁痕特征进行判定;二是擦掉磁痕,用五倍放大镜观察缺陷处,发纹目视不可见;三是用刀刃在垂直磁痕的表面上来回刮,一般不阻挡刀刃的磁痕是发纹。

2) 分层。

① 产生原因。属板材中常见的缺陷，钢锭中存在缩孔、疏松或密集的气泡，在轧制时没有熔合在一起，所以钢板在纵向或横向剪切时，从侧面可发现金属分为两层，也称夹层。钢锭内有非金属夹杂物，轧制时被压碎，也能产生分层。

② 磁痕特征。分层是一种内部缺陷，特点是平行于轧制面，磁痕清晰，呈连续或断续的线状分布。

③ 鉴别方法。根据磁痕分布和特征鉴别。

3) 材料裂纹。坯料上的裂纹、皮下气泡、夹杂物及冷拔变形量选择不适当都会在钢材上会产生材料裂纹。一般呈直线状，有时分叉，多与拔制方向一致，但也有其他方向。磁痕浓密清晰，擦掉磁痕，裂纹目视可见。

4) 拉痕。由于模具表面粗糙度不低、残留有氧化皮或润滑条件不良等原因，在钢材通过轧制设备时，便会产生拉痕，也称为划痕。拉痕呈直线状，肉眼可见到沟底，分布于钢材的局部或全长，宽而浅的拉痕检测时不吸附磁粉，较深者会吸附磁粉。鉴别时应转动工件观察磁痕，如沟底明亮不吸附磁粉，即为拉痕。

5) 白点。白点是钢材的内部撕裂，是对钢材危害极大的内部缺陷。在热轧和锻压的合金钢中，特别是含 Ni、Cr、Pb 及 Mn 的钢中常见。它大多数分布于钢材近中心处，在纵断面上呈椭圆形的银白色斑点，故叫白点。在钢材的横断面上则表现为短小断续的辐射状不规则分布的小裂纹。白点裂纹多为穿晶断裂，也有沿晶粒边界分布，其裂纹边缘呈锯齿形，多以成群出现。

磁痕特征是，在横断面上白点磁痕呈锯齿状，中部粗，两头尖呈辐射状分布。在纵向剖面上，磁痕沿轴向分布，呈弯曲状或分叉，磁痕浓密清晰。

(2) 锻钢件缺陷磁痕显示

1) 锻造裂纹。产生原因包括加热不当、操作不正确、终锻温度太低及冷却速度太快等。磁痕浓密清晰，呈直线或弯曲线状。

2) 锻造折叠。产生原因如下：①模具设计不合理，金属流动受阻，被挤压后形成折叠，多发生在倒角部位，磁痕呈纵向直线状；②预锻时打击过猛，在滚光过程中嵌入金属，磁痕呈纵向弧形状；③锻件拔长过度，入型槽终锻时，两端金属向中间对挤形成横向折叠，多分布在金属流动较差的部位，磁痕呈圆弧形。

锻造折叠缺陷磁痕一般不浓密，但在对表面打磨后，磁痕往往更加清晰。

(3) 铸钢件缺陷磁痕显示

1) 铸造裂纹。金属液在铸型内凝固收缩过程中，表面和内部冷却速度不同产生很大的铸造应力，当应力超过金属强度极限时，铸件便产生破裂。根据破裂时的温度高低分为热裂纹和冷裂纹。

热裂纹约在 1200 ~ 1400℃ 的高温下产生，并在最后凝固区或应力集中区出现，一般是沿晶扩展，呈很浅的网状裂纹，也称为龟裂，其磁痕细密清晰，稍加打磨裂纹即可排除。

冷裂纹约在 200 ~ 400℃ 的低温下产生。低温时由于铸钢的塑性变坏，在巨大的

热应力和组织应力的共同作用下产生冷裂纹，一般分布在铸钢件截面尺寸突变的部位，如夹角、圆角、沟槽、凹角、缺口及孔的周围等部位。这种裂纹一般穿晶扩展，有一定深度，一般为断续或连续的线条，两端有尖角，磁痕浓密清晰。

2) 疏松。它是由于金属液在凝固收缩过程中得不到充分补缩，因而出现极细微的、不规则的分散或密集的孔穴，称为疏松。

一般产生在铸钢件最后凝固的部位，加工后的铸钢件表面，更容易发现疏松。疏松缺陷磁痕一般涉及范围较大，呈点状或线状分布，两端不出现尖角，有一定深度，磁粉堆集比裂纹稀松。改变磁化方向时，磁痕显示方向也明显改变。

3) 冷隔。是由于两股金属熔液相遇却未熔合在铸钢件表面产生的缺陷。一般产生在铸钢件上较大的水平面和转角处，呈有圆角的缝隙或凹陷，其磁痕较淡。

4) 夹杂。铸造时由于合金中熔渣未彻底清除干净，浇注工艺或操作不当等原因，在铸件上出现微小的熔渣或非金属夹杂物。夹杂在铸件上的位置不定，易出现在浇注位置上方，磁痕呈分散的点状或弯曲的短线状。

5) 气孔。是当熔化金属冷却凝固过程中气体未及时排出形成空穴。其磁痕呈圆形或椭圆形，显示不太清晰，磁痕的浓度与气孔深度有关，皮下气孔一般使用直流电检测。

#### (4) 焊接件缺陷磁痕显示

1) 焊接裂纹。磁粉检测的主要目的中检查焊缝及热影响区的裂纹。焊接裂纹可能在焊接过程中产生，也可能在焊后或放置一段时间后产生，因此对有延迟裂纹倾向的焊接件，其磁粉检测应在焊后 24h 后进行。

① 焊接热裂纹。焊接热裂纹一般产生在 1100 ~ 1300℃ 高温范围内的焊缝熔化金属内，焊接完毕即出现，沿晶扩展，有纵向、横向或弧坑裂纹，露出工件表面的热裂纹断口有氧化色，热裂纹浅而细小，磁痕清晰而不浓密。

② 焊接冷裂纹。焊接冷裂纹一般产生在 100 ~ 300℃ 低温范围内的热影响区(也有在焊缝区的)冷裂纹可能是沿晶开裂、穿晶开裂或两者混合出现，断口无氧化，颜色发亮。冷裂纹多是纵向的，一般深而粗大，磁痕浓密清晰，容易引起脆断，危害极大。

2) 未焊透。在焊接过程中，母材金属未熔化，焊缝金属没有进入接头根部的现象称为未焊透。它是由于焊接电流小，母材未充分加热和焊根清理不良等原因产生的。磁粉检测只能发现埋藏浅的未焊透，磁痕松散、较宽。

3) 气孔。在焊接过程中，气体在熔化金属冷却之前来不及逸出而保留下来的孔穴，多成圆形或椭圆形。它是由于母材金属含气体过多，焊药潮湿等原因产生的。有的单独出现，有的成群出现，磁痕显示与铸钢件气孔相同。

4) 夹渣。夹渣是焊接过程中熔池内未来得及浮出而残留在焊接金属内的焊渣，多呈点状或条状，磁痕宽而不浓密。

#### (5) 热处理缺陷磁痕显示

1) 淬火裂纹。工件淬火冷却时产生的裂纹称为淬火裂纹,它是由于钢在高温快速冷却时产生的热应力和组织应力超过钢的抗拉强度而引起的开裂,所以一般都产生在工件的应力集中部位,如孔、键槽、尖角及截面突变处。淬火裂纹比较深,尾端尖,呈直线或弯曲线状,磁粉显示浓密清晰。

2) 渗碳裂纹。结构钢渗碳后冷却速度过快,在热应力和组织应力的作用下形成渗碳裂纹,其深度不超过渗碳层。磁痕呈线状、弧形或龟裂状,严重时造成块状剥落。

3) 表面淬火裂纹。为提高工件表面的耐磨性,可进行高频、中频及工频电感应加热,使工件表面的很薄一层迅速加热到淬火温度,并立即喷水冷却进行淬火,在此过程中,由于加热冷却不均匀而产生喷水应力裂纹。其磁痕呈网状或平行分布,面积一般较大,也有单个分布的。感应加热还容易在工件的油孔、键槽、凸轮桃尖及齿轮齿部产生热应力裂纹,该裂纹多呈辐射状或弧形,磁痕浓密清晰。

(6) 磨削裂纹磁痕显示 工件进行磨削加工时,在工件表面产生的裂纹称为磨削裂纹。它是由于热处理和磨削不当等原因产生的。磨削裂纹方向一般与磨削方向垂直,由热处理不当产生的磨削裂纹有的与磨削方向平行。磨削裂纹磁痕呈网状、鱼鳞状、放射状或平行线状分布,渗碳表面产生的多为龟裂状,一般比较浅,磁痕轮廓清晰,均匀而不浓密。

(7) 矫正裂纹磁痕显示 变形工件校直过程中产生的裂纹称为矫正裂纹或校正裂纹。校直过程施加的压力会使工件内部产生塑性变形,在应力集中处产生与受力方向垂直的矫正裂纹,裂纹中间粗,两端尖,呈直线形或微弯曲,一般单个出现,磁痕浓密清晰。

(8) 疲劳裂纹磁痕显示 工件在使用过程中如果反复受到交变应力的作用,则工件内原有的小缺陷、表面划伤、缺口和内部空洞等可能形成疲劳源,产生的疲劳裂纹称为疲劳裂纹。疲劳裂纹一般都出现在应力集中部位,其方向与受力方向垂直,中间粗,两头尖,磁痕浓密清晰。

(9) 应力腐蚀裂纹磁痕显示 工件材料在特定腐蚀介质和拉应力共同作用下产生的裂纹称为应力腐蚀裂纹。工件金属材料由于受到外部介质的化学作用而产生的腐蚀坑,起到缺口作用造成应力集中,成为疲劳源。该裂纹源在交变应力作用下不断扩展,最终导致腐蚀开裂。应力腐蚀裂纹与应力方向垂直,磁痕显示浓密清晰。

(10) 电镀产生的缺陷磁痕显示 工件材料在电镀时由于氢脆产生的裂纹称为脆性裂纹。脆性裂纹的磁痕特征是,一般不单个出现,都是大面积出现,呈曲折线状,纵横交错,磁痕浓密清晰。

#### 4. 常见缺陷磁痕显示比较

(1) 发纹和裂纹缺陷磁痕显示比较 发纹和裂纹缺陷的对比分析见表 5-7-1。

表 5-7-1 发纹和裂纹缺陷的对比如分析

产生原因	发纹是由于钢锭中的非金属夹杂物和气孔在轧制拉长时，随着金属变形伸长而形成的类似头发丝的细小缺陷	裂纹是由于工件淬火、锻造或焊接等原因，在工件表面产生的窄而深的 V 形破裂或撕裂的缺陷
形状、大小和分布	发纹缺陷都是沿着金属纤维方向，分布在工件纵向截面的不同深度处，成连续或断续的直线，很浅，长短不一，长者可达数十毫米	裂纹缺陷一般都产生在工件的耳、孔边缘和截面突变等应力集中部位的工件表面上，呈窄而深的 V 字形破裂，长短不一，通常边缘参差不齐，弯弯曲曲或有分岔
磁痕特征	磁痕均匀清晰而不浓密，直线形，两头呈圆角	磁痕浓密清晰，弯弯曲曲或有分岔，两头呈尖角
鉴别方法	1) 擦掉磁痕，发纹缺陷目视不可见 2) 在 2~10 倍放大镜下观察，发纹缺陷目视仍不可见 3) 用刀刃在工件表面沿垂直磁痕方向来回刮，发纹缺陷不阻挡刀刃	1) 擦掉磁痕，裂纹缺陷目视可见，或不太清晰 2) 在 2~10 倍放大镜下观察，裂纹缺陷呈 V 形开口，清晰可见 3) 用刀刃在工件表面沿垂直磁痕方向来回刮，裂纹缺陷阻挡刀刃

(2) 表面缺陷和近表面缺陷磁痕显示比较 表面缺陷是指由热加工、冷加工和工件使用后产生的表面缺陷或经过机械加工才暴露在工件表面的缺陷，如裂纹等。表面缺陷有一定的深宽比，磁痕显示浓密清晰、瘦直、轮廓清晰，呈直线状、弯曲状或网状，磁痕显示重复性好。

近表面缺陷是指工件表面下的气孔、夹杂物、发纹和未焊透等缺陷，因缺陷处于工件近表面，未露出表面，所以磁痕显示宽而模糊，轮廓不清晰。磁痕显示与缺陷性质和埋藏深度有关。

## 第八章 磁粉检测应用

磁粉检测可用于检测铁磁性材料和零部件的表面与近表面缺陷，并具有很高的检测灵敏度，是控制产品质量的重要手段之一。

### 一、焊接件磁粉检测

焊接是利用加热、加压或加热与加压并用，加或不加填充材料的方式将两种工件连接成一体的加工方法。在焊接过程中，焊缝及热影响区易产生焊接缺陷，为保证焊接件的产品质量和安全运行必须加强对焊接件的无损检测。

#### 1. 焊接件磁粉检测的内容与范围

(1) 坡口检测 坡口可能出现的缺陷有分层和裂纹。分层是轧制缺陷，它平行于钢板表面，一般分布在板厚中心附件。裂纹有两种，一种是沿分层端部开裂的裂纹，方向大多平行于板面；另一种是火焰切割裂纹。坡口检测的范围是坡口面和钝边区域。

#### (2) 焊接过程中的检测

1) 层间检测。当焊完每一层时都要求做一次磁粉检测，它的目的是便于及时发现裂纹并进行相应的处理，确认无缺陷后再继续施焊。

2) 电弧气刨面检测。该检测的目的是检测电弧气刨造成的表面增碳可能导致产生的裂纹。

(3) 焊缝检测 焊缝检测的主要目的是焊接裂纹等焊接缺陷。焊缝检测应包括焊缝金属及母材的热影响区，热影响区的宽度一般为焊缝宽度的一半。

(4) 机械损伤部位检测 在组装过程中，往往需要在焊接部件的某些位置上焊临时性的卡具，施焊完毕后要割掉，在这些部位有可能产生裂纹，需要检测。

#### 2. 检测方法的选择

大型焊接结构件不同于机械零件，无法使用固定式设备，只能用便携式设备分段检测。具体的检测方法应根据焊接件的结构特点选择检测方法。大型焊缝常用的检测方法有磁轭法、触头法、绕电缆法和交叉磁轭法。

## 二、锻钢件磁粉检测

锻钢件是通过把钢加热后锻造或挤压而成形的。由于锻钢件加工工序较多，在生产上容易产生不同性质的缺陷，为了保证锻钢件的产品质量，必须把锻钢件在制造工艺过程中产生缺陷的不合格品挑选出来。

### 1. 锻钢件缺陷产生

(1) 锻造过程产生的缺陷 锻造过程产生的缺陷包括原材料不良、下料剪切和锻造操作工艺不当以及模具设计不合理等原因产生的锻造裂纹、折叠、白点和发纹等。

(2) 热处理过程产生的缺陷 热处理过程产生的缺陷包括消除锻造应力而进行热处理时，由于热处理工艺不当、工件异型尺寸变化引起热应力集中以及材料锻造缺陷在热处理时扩展等原因产生的淬火裂纹等。

(3) 机加工过程产生的缺陷 机加工过程产生的缺陷包括磨削裂纹、矫正裂纹等。

(4) 表面热处理过程产生的缺陷 表面热处理过程产生的缺陷包括工艺不当引起的裂纹以及孔槽等部位热应力不均引起的淬火裂纹等。

### 2. 锻钢件磁粉检测方法选择

选择锻钢件磁粉检测设备和工艺时，应考虑工件的尺寸形状、材料磁性、检测部位、灵敏度要求和生产效率等因素。

- 1) 大型锻钢件一般采用触头法、磁轭法或绕电缆法进行局部检测。
- 2) 形状复杂较大的轴类工件采用连续法，并用轴向通电法和线圈法开路分段磁化。
- 3) 尺寸较小的轴类、销子、转向接臂及齿圈等可分别选用通电法、中心导体法以及线圈法。

## 三、铸钢件磁粉检测

铸钢件是将熔化的钢水倒入砂型铸模中而成形的。一般表面粗糙，形状复杂；精密铸钢件形状复杂，体积较小，但表面较光。

### 铸钢件磁粉检测特点及磁化方法选择

- 1) 精密铸钢件要求检出表面微小缺陷，宜采用固定式探伤机至少在两个方向磁化，并用湿法检验。
- 2) 砂型铸钢件要求检出表面和近表面较大缺陷，应采用单相半波整流电磁化，并用干法检验，以检出铸造裂纹和皮下气孔、夹渣等缺陷，磁化方法可选用触头法和磁轭法局部检测。
- 3) 铸钢件由于内应力的影响，有些裂纹延迟开裂，所以不应铸造后立即检测。

## 四、在用特种设备与维修件磁粉检测

### 1. 在用特种设备与维修件磁粉检测的要求

1) 对在用特种设备磁粉检测时,如制造时采用高强钢以及对裂纹敏感的材料,或是长期工作在腐蚀介质环境下,有可能发生应力腐蚀裂纹的场合,宜采用荧光磁粉检测方法进行检测。

2) 对装过易燃易爆材料的容器,绝对不能使用通电法和触头法在容器内对焊缝进行磁粉检测,以防打火引起燃烧或爆炸。

### 2. 在用特种设备与维修件磁粉检测特点及检测方法选择

1) 特种设备维修件检测的目的主要是为了检查疲劳裂纹和应力腐蚀裂纹,所以检测前要充分了解工件在使用中的受力状态,应力集中部位、易开裂部位以及裂纹的方向。

2) 疲劳裂纹一般出现在应力最大部位,因此,在许多情况下,只需要在局部进行检测,特别是不能拆卸的组合件只能局部检测。

3) 常用的检测方法是触头法、电磁轭法及线圈法(绕电缆法)等,已拆卸的小工件常常利用固定式检测机进行全面检测。

4) 对于不可接近或视力不可达到的部位,可使用内窥镜配合检测。对于危险孔,最好采用磁粉检测-橡胶铸型法。

5) 许多维修件有镀层或漆层,须采用特殊的检测工艺,必要时要除掉表面覆盖层。

6) 磁粉检测后往往需要记录磁痕,以观察疲劳裂纹的扩展。

# 第九章

## 质量控制与安全防护

### 一、磁粉检测质量控制

磁粉检测质量控制要从人、机、料、法、环五个方面着手，从而保证磁粉检测灵敏度的三变量（工艺变量、设备变量和应用变量）得到控制。

#### 1. 人员控制

检测人员的素质对磁粉检测质量控制是至关重要的。要求检测人员除具有一定磁粉检测基础知识和专业知识外，还应具有其他无损检测方法、金属材料和加工工艺及其产生缺陷等方面的知识，并具有较丰富的实践经验和熟练的操作技能。矫正视力达到要求，无色盲且取得相应的资格。

#### 2. 设备的质量控制

设备质量控制应考虑如下问题：

- 1) 设备上仪表的校验。
- 2) 电缆连接良好与否。
- 3) 电磁轭提升力校验。
- 4) 退磁设备性能检查。
- 5) 测量仪器的校验，如照度计、紫外线辐射计、磁强计及毫特斯拉计等。
- 6) 电流载荷校验。
- 7) 设备的维护保养。

#### 3. 材料的质量控制

- 1) 磁悬液浓度测定。
- 2) 磁悬液污染测定。
- 3) 水断试验。

#### 4. 检测工艺的控制

1) 为保证磁粉检测的可靠性，必须严格按照有关的标准、规范和检验规程进行检测工作。所有的技术文件应齐全、正确，并应是现行有效版本。

2) 做好磁粉检测原始记录, 原始记录不仅能追溯产品的质量状态, 也可以证明检测工作的质量。原始记录要妥善保管, 防止变质和丢失, 并做到每一个记录表应有唯一的编号。

3) 对磁粉检测进行综合性能试验, 保证磁粉检测工作顺利进行。性能试验的方法包括用自然缺陷标准试块、交流标准试块、直流标准试块和标准试片进行测试。

## 5. 检测环境的控制

1) 可见光照度控制。非荧光磁粉检测时, 被检工件表面可见光照度应不小于1000lx, 用照度计测量, 每月测量一次。

2) 紫外线辐射度控制。荧光磁粉检测时, 所用紫外灯能产生波长为320~400nm范围, 其中心波长为365nm的紫外线。在工件表面的紫外线辐射度应大于等于 $1000\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。用紫外线辐射计测量, 每月一次。

3) 环境光照度控制。荧光磁粉检测时, 暗室或暗处的可见光照度应不大于20lx。

# 二、磁粉检测安全防护

## 1. 紫外线危害的防护

1) 使用黑光灯时, 应避免紫外光源直接照射人的眼睛, 应经常检验滤光板, 发现有裂纹应及时更换。

2) 防止工作温度较高的紫外灯烧伤皮肤。

## 2. 电气与机械危害的防护

1) 设备的绝缘性应保证操作人员不至触电。

2) 不得用手接触高压电路, 以防伤人。

3) 气压和液压部件失效时, 也会引起伤害事故, 因此也应加以预防。

## 3. 材料潜在危险的防护

1) 磁悬液中的油基载液、荧光磁粉、润湿剂、防锈消泡剂和溶剂等, 是一种组合物, 并非是危险的化学品, 但长期使用会除去皮肤中的天然油, 引起皮肤的干裂或刺激, 所以磁粉检测人员应戴防护手套, 并避免磁悬液进入人的口腔和眼睛。

2) 使用干法检测时, 磁粉飘浮在空气中, 检测区域应通风良好, 避免人吸入太多。

## 4. 磁粉检测系统潜在危险的防护

1) 用通电法或触头法检测时, 因接触不好会产生打火现象, 其火星飞溅会烧伤检测人员的眼睛、皮肤, 还会烧伤工件、甚至会引起油磁悬液起火。

2) 为改善电接触, 在与工件接触部位装铅垫, 但产生打火或电流过大时, 会使铅加热产生铅蒸汽使人中毒。

3) 磁化区域周围均产生磁场, 它会影响测磁仪器和机械手表的精度, 不允许

将仪器和手表置于强磁场附近。

4) 安装心脏起搏器者，不得从事磁粉检测。

### 5. 检测场所潜在危险的防护

锅炉压力容器压力管道磁粉检测常在高空、野外、水下或球罐中操作，磁粉检测人员首先知道这些特殊环境中有哪些特殊的安全要求，必须学会在这类场所检测时的安全知识，保护自身不受到伤害。

### 6. 磁粉检测系统与检测环境相互作用的潜在危险的防护

- 1) 盛装易燃易爆介质的容器不要使用触头法和通电法进行磁粉检测。
- 2) 在附近有易燃易爆材料的场所，禁止使用触头法和通电法进行磁粉检测。
- 3) 磁粉检测使用油基磁悬液时，在检测环境中不允许有明火和火源。

# 第十章 磁粉检测通用工艺规程和工艺卡

## 一、磁粉检测通用工艺规程

磁粉检测通用工艺规程至少应包括以下内容：①适用范围；②引用标准、法规；③检测人员资格；④检测设备、器材和材料；⑤检测表面制备；⑥检测时机；⑦检测工艺和检测技术；⑧检测结果的评定和质量等级分类；⑨检测记录、报告和存档；⑩编制（级别）、审核（级别）和批准人；⑪制定日期。

磁粉检测通用工艺规程的编制、审核及批准应符合相关法规或标准的规定。

## 二、磁粉检测工艺卡

实施磁粉检测的人员应按检测工艺卡进行操作。磁粉检测工艺卡应根据磁粉检测通用工艺规程、产品标准、有关的技术文件和相关的检测标准的要求编制，一般应包括以下内容：①工艺卡编号；②产品名称、产品编号、制造、安装或检验编号，承压设备的类别、规格尺寸、材料牌号、材质及热处理状态；③检测设备与器材：设备种类、型号、检测附件和检测材料；④检测工艺参数：检测方法、检测比例、检测部位、标准试块；⑤检测技术要求：执行标准和验收级别；⑥检测程序；⑦检测部位示意图；⑧编制（级别）和审核（级别）人；⑨制定日期。

磁粉检测工艺卡的编制、审核及批准应符合相关法规或标准的规定。

## 三、工作实例

**【例 1】**某压力管道元件制造单位生产一批配法兰式三通，实物照片如图 5-10-1 所示，规格尺寸如图 5-10-2 所示，材料牌号为 16Mn（锻），其磁性能与 16MnR（材料供应状态）基本一致。三通制造工艺采用模锻后经机加工至规定尺寸，机加工后表面粗糙度为  $3.2\mu\text{m}$ 。制造单位为保证产品质量，采用 MT 方法检测三通在制造过程中可能产生的表面缺陷。请按照 JB/T 4730. 4—2005，采用中等级灵敏度检测，验收级别为Ⅱ级，回答下列问题。



图 5-10-1 实物照片

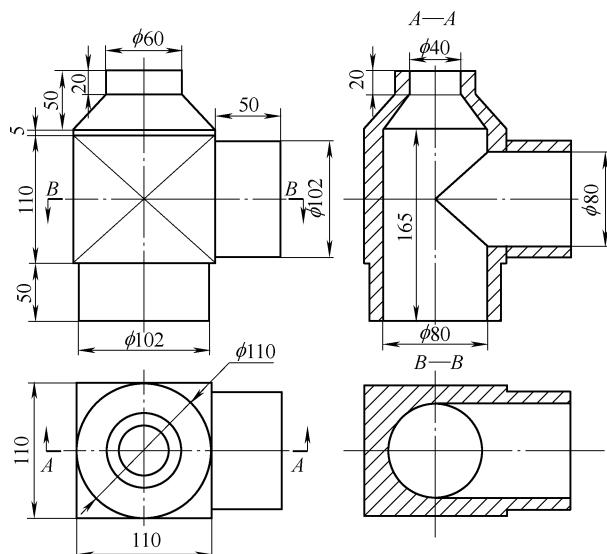


图 5-10-2 规格尺寸

1) 结合产品材料的磁性能和结构形状, 你认为该三通能否采用剩磁法进行检测? 并简述理由。

答：16Mn（锻）磁性能与16MnR（材料供应状态）基本一致，其剩磁为0.75T，矫顽力为320A/m，不符合JB/T 4730.4—2005关于剩磁法检测的条件（矫顽力在1kA/m以上，剩磁在0.8T以上），因此不可以进行剩磁法检测。

另外，该三通工件形状较为复杂，不易得到所需剩磁，因此也不宜选用剩磁法检测。

2) 采用中心导体法对三通进行磁化, 如图 5-10-3 所示, 请比较图示中三通外表面  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  四处的磁感应强度的大小, 并简述理由。

答: 磁感应强度  $A > B > C > D$ 。

理由:  $A$  处离中心导体最近,  $B$  处其次,  $C$  处和  $D$  处离中心最远, 因此  $A$  处的其磁感应强度高于  $B$  处,  $B$  处的磁感应强度高于  $C$  处和  $D$  处。

*C* 处与 *D* 处与中心导体的距离相等, 但 *C* 处磁感应线走向基本不受三通侧面  $\phi 102\text{mm} \times 11\text{mm}$  管口的干扰, 大部分可以在工件中形成闭合的回路, 回路的磁阻较小。而 *D* 处的磁感应线走向会受到三通侧面  $\phi 102\text{mm} \times 11\text{mm}$  管口的干扰, 部分磁感应线逸出  $\phi 102\text{mm} \times 11\text{mm}$  管口表面, 又在另一侧进入工件形成闭合回路, 使回路的磁阻增大, 因此其磁感应强度小于 *C* 处。

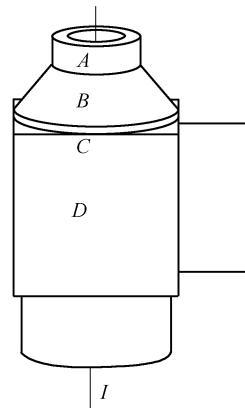


图 5-10-3 中心导体法磁化

3) 为检测三通侧面  $\phi 102\text{mm}$  圆周面 (图示中的 D 区) 外表面纵向缺陷, 采用如图 5-10-4 所示的磁化布置, 请比较图示中 A、B、C 三处的磁感应强度大小。如果灵敏度试验时 A、B 的灵敏度满足要求, 而 C 处的灵敏度不满足要求, 问应增加怎样的磁化布置 (在原图上绘图说明), 才能保证 C 处的灵敏度满足要求?

答: 磁感应强度  $A > B > C$ 。

应再增加一次绕电缆法磁化, 磁化布置如图 5-10-5 所示。

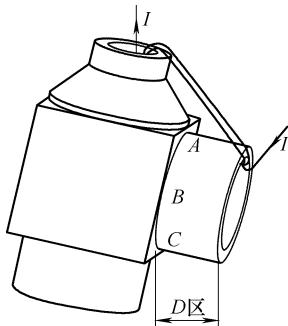


图 5-10-4 磁化布置

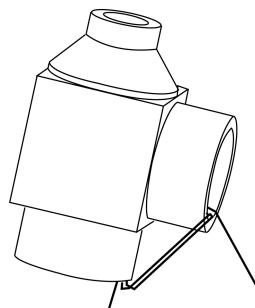


图 5-10-5 增加后磁化布置

4) 简述制订磁化规范的方法? 在上题的磁化布置中, 怎样确定磁化规范?

答: 磁场强度足够的磁化规范可通过下述一种或综合四种方法来确定:

① 用磁化电流表征的磁场强度按经验公式计算。

② 利用材料的磁特性曲线, 确定合适的磁场强度。

③ 用磁场强度计测量施加在工件表面的切线磁场强度。连续法检测时应达到  $2.4 \sim 4.8\text{kA/m}$ 。

④ 用标准试片 (块) 来确定磁场强度。

⑤ 在上题的磁化布置中, 用标准试片来确定磁场强度是否合适。

由于工件形状比较复杂, 也可选用多个标准试片, 同时分别贴在工件上不同的部位, 可看出工件磁化后, 被检表面不同部位的磁化状态或灵敏度的差异, 可确定大致理想的磁化规范。

**【例 2】** 一低温容器用甲型平焊法兰, 精车表面, 其结构形式及几何尺寸如图 5-10-6 所示, 材料牌号为 09MnNiD (剩磁  $B_r = 0.76\text{T}$ ,

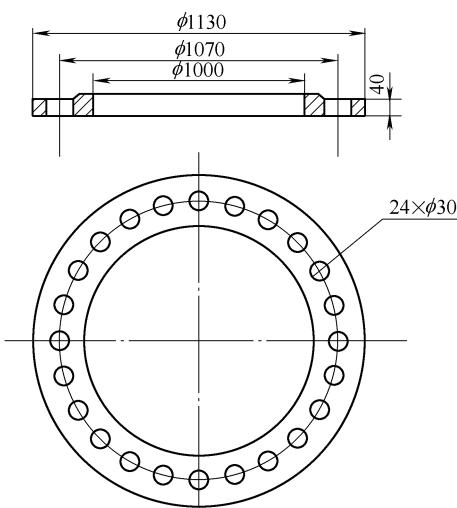


图 5-10-6 平焊法兰结构形式及几何尺寸

矫顽力  $H_c = 940\text{A/m}$ )。法兰公称压力为  $1.6\text{MPa}$ ，工作温度为  $-20^\circ\text{C}$ 。要求采用磁粉检测方法检验螺栓孔内壁表面的纵向不连续性，以高等级灵敏度进行检测，检测标准为 JB/T 4730.4—2005，质量验收等级 I 级。请根据工件特点选择最适宜的方法、编制磁粉检测工艺卡并填写操作要求及主要工艺参数。

现有如下检测设备与器材：

- 1) EE-1000 型单磁轭角磁粉检测仪、CXE-2000 型旋转磁场磁粉检测仪、CJX-1000型交流磁粉检测仪、CEW-4000 型移动式磁粉检测仪。
- 2) GD-3 型毫特斯拉计。
- 3) ST-80 (C) 型照度计。
- 4) UV-A 型紫外线辐照度计。
- 5) 黑光灯。
- 6) YC<sub>2</sub> 型荧光磁粉、黑磁粉、BW-1 型黑磁膏、水、煤油、LPW-3 号油基载液。
- 7) A<sub>1</sub>、C、D 型试片。
- 8) 磁悬液浓度测定管。
- 9) 2~10 倍放大镜。
- 10)  $\phi 10\text{mm}$  铜棒。
- 11) 其他需要的辅助器材。

表 5-10-1 磁粉检测工艺卡 (例 2)

工件名称	平焊法兰	工件规格	$\phi 1130/1070/1000\text{mm} \times 40\text{mm}$	材料牌号	09MnNiD
检测部位	螺栓孔内壁表面	表面状况	精车	检测设备	CJX-1000型或 CEW-4000型
检验方法	湿法连续法交流电 (或直流电)	紫外光 照度或工件表面光 照度	黑光灯辐照度不小于 $1000\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 或工件表面光照度不小于 $1000\text{lx}$	标准试片	C-8/50
磁化方法	中心导体法	磁粉、载液及磁悬液配制浓度	YC <sub>2</sub> 荧光磁粉 LPW-3 号油基载液 $0.5\sim3.0\text{g/L}$ 或非荧光磁粉水载液 $10\sim25\text{g/L}$	磁悬液施加方法	喷洒
磁化规范	$I = (240\sim450)\text{ A}$ (交流电) $I = (360\sim960)\text{ A}$ (直流电) 并根据标准试片实测结果确定	检测方法标准	JB/T 4730.4—2005	质量验收等级	I 级

(续)

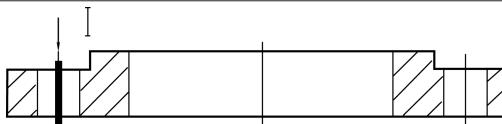
工件名称	平焊法兰	工件规格	φ1130/1070/1000mm×40mm	材料牌号	09MnNiD
不允许缺陷	① 任何裂纹和白点 ② 任何线性缺陷磁痕 ③ 在评定框内, 单个圆形缺陷磁痕 $d > 2.0\text{mm}$ 或 $\leq 2.0\text{mm}$ 的圆形缺陷超过一个 ④ 综合评级超标的缺陷磁痕				
计算依据	① 按 JB/T 4730.4—2005 表 3 交流电连续法、中心导体法磁化规范 $I = (8 \sim 15) D$ 计算, $D = 30\text{mm}$ , 则 $I = (240 \sim 450) \text{A}$ ; 直流电 $I = (12 \sim 32) D$ , 则 $I = (360 \sim 960) \text{A}$ ② $\phi 10\text{mm}$ 铜棒进行中心导体法磁化, 选取的磁化电流值应保证灵敏度试片上人工缺陷磁痕清晰显示 ③ 24 个螺栓孔分别进行磁化、检测				
示意草图	 中心导体法磁化示意图				

表 5-10-2 操作要求及主要工艺参数 (例 2)

工 序 号	工序名称	操作要求及主要工艺参数
1	预处理	清除工件表面油脂或其他黏附磁粉的物质
2	磁化顺序	① 采用中心导体法 (通电铜棒置于孔中心) 磁化被检测法兰螺栓孔 ② 内壁表面纵向缺陷
	试片校核	① 应将 C 型试片弯成与 $\phi 30\text{mm}$ 螺栓孔曲率相同状态, 贴在孔内壁 ② 磁化时, 先按 JB/T 4730.4—2005 标准中表 3 公式计算出的磁化电流 磁化 ③ 再采用 C-8/50 试片验证磁化电流, 以试片上人工缺陷清晰显示时的 电流为最终磁化规范
	磁化次数	同一螺栓孔至少磁化两次, 24 个孔分别磁化
	磁化时间	采用连续法磁化, 磁化、施加磁悬液及观察必须在通电时间内完成, 通 电 $1 \sim 3\text{s}$ , 停施磁悬液 $1\text{s}$ 后才停止磁化
3	观察时机	检验在磁痕形成后立即进行
	检验环境	荧光法: 紫外光不小于 $1000\text{uW/cm}^2$ 暗室可见光辐照度不大于 $20\text{lx}$ , 非荧 光法: 可见光下工件表面辐照度不小于 $1000\text{lx}$
	缺陷观察	磁痕观察需采用相关辅助器材和措施, 如内窥镜、反光镜及多角度观 察等
	超标缺陷处理	发现超标缺陷后认真记录, 然后清除至肉眼不可见, 再用 MT 复验, 直 至缺陷被完全清除

(续)

工序号	工序名称	操作要求及主要工艺参数				
4	记录	记录方式	采用照相、录像和可剥性塑料薄膜等方式记录缺陷，同时应用草图标示			
		记录内容	记录缺陷形状、数量、尺寸和部位			
5	退磁	无特殊要求时不需退磁				
6	后处理	清除工件表面多余的磁悬液和磁粉				
7	报告	按 JB/T 4730.4—2005 第 10 条要求签发 MT 报告				
编制			审核	批准		
	年 月 日		年 月 日	年 月 日		

**【例 3】**如图 5-10-7 所示，一个在制  $10m^3$  液氯储罐，材料牌号 16MnR，直径  $\phi 1600mm$ ，板厚 14mm，要求检测所有对接焊缝及热影响区外表面缺陷。请按照 JB/T 4730—2005 标准，I 级合格，编制磁粉检测工艺卡并填写主要操作步骤。

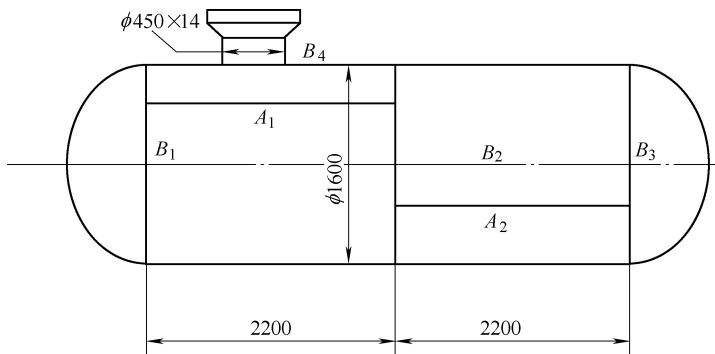


图 5-10-7 液氯储罐

制造单位现有如下检测设备与器材：

- 1) CYE-1 单磁轭磁粉检测仪，CYE-3 型交叉磁轭磁粉检测仪。
- 2) GD-3 型毫特斯拉计。
- 3) ST-80 (C) 型照度计。
- 4) 黑磁粉、BW-1 型黑磁膏、水。
- 5) A<sub>1</sub> 试片。
- 6) 磁悬液浓度测定管。
- 7) 2~10 倍放大镜。

表 5-10-3 磁粉检测工艺卡 (例 3)

产品名称	液氯储罐	材料牌号	16MnR	检测部位	对接焊缝及热影区外表面
检测时机	焊后	表面状况	焊态 (或打磨表面)	检测设备	CYE-1 单磁轭 CYE-3 交叉磁轭
检测方法	非荧光湿式 连续法	紫外光照度或工件 表面光照度	工件表面可见度 不小于 1000lx	标准试片	A1 - 30/100
磁化方法	旋转磁场法 或单磁轭法	磁粉、载液及 磁悬液沉淀浓度	黑磁粉 + 水 1.2 ~ 2.4ml/100ml	磁悬液施加方法	喷洒
电流种类 磁化规范	交流电提升力： ① 交叉磁轭不 小于 118N ② 单磁轭不小 于 45N ③ A <sub>1</sub> 试片确定	检测方法 标准	JB/T 4730—2005	质量验收等级	I
不允许缺陷	① 不允许任何裂纹和白点 ② 单个圆形缺陷 $d > 3.0$ , 且在评定框内大于两个 ③ 综合评级超标的缺陷磁痕				

示意草图：(画出磁化示意图)

表 5-10-4 操作要求及主要工艺参数 (例 3)

工序号	工序名称		操作要求及主要工艺参数
1	预清 理		清除焊缝边缘处飞溅、焊渣, 如焊缝光滑可直接进行 MT, 否则应打磨至被检区域光滑
2	磁化	设备选择	采用单磁轭检测 B4 焊缝, 交叉磁轭检测其他对接焊缝或采用单磁轭检测所有焊缝
		磁化要求	采用交叉磁轭磁化时, 其检测速度小于等于 4m/min; 检测时交叉磁轭与工件必须做相对运动; 单磁轭磁化时, 同一部位至少磁化两次, 两次磁化相互垂直
		磁化时间	通电时间 1 ~ 3s
		试片校核	由 A <sub>1</sub> 试片确定磁化规范
3	施加磁 悬液	浓度测定	每天检验前应进行磁悬液浓度测定
		施加时机	通电过程中施加磁悬液, 停施磁悬液至少 1s 后方可停止磁化
4	检验与 复验	观察时机	发现磁痕后立即观察
		观察环境	检验时工件表面可见光照度不小于 1000lx
		辅助观察器材	为辨认细小磁痕可用 2 ~ 10 倍放大镜观察
		复验	出现标准所述需复验的情况时应复验
		超标缺陷处理	发现超标缺陷后处理至肉眼不可见, 再用 MT 方法复检, 直至缺陷被完全清除, 补焊后仍复检至合格

(续)

工序号	工序名称	操作要求及主要工艺参数		
5	记录	采用照相、录像、草图标示或可剥性塑料薄膜等方式		
		记录超标缺陷磁痕尺寸、位置和形状		
6	退磁		可不退磁	
7	后处理		清除被检工件表面多余的磁粉和磁悬液	
8	报告		按 JB/T 4730.4—2005 第 10 条签发报告	
编制			审核	批准
	年 月 日		年 月 日	年 月 日

**【例 4】**有一在制锅炉接管如图 5-10-8 所示。规格尺寸分别为  $\phi 325\text{mm} \times 50\text{mm}$  和  $\phi 108\text{mm} \times 14\text{mm}$ ，材质为 20g，要求检测两只管子相交角焊缝外表面的缺陷。按 JB/T 4730.4—2005 标准，验收级别为Ⅱ级，自选条件优化编制磁粉检测工艺卡。

**【例 5】**有一传动轴结构尺寸如图 5-10-9 所示，材料牌号为 2Cr13，热处理状态为调质处理，工件表面为机加工。

要求检测该轴外表面各方向缺陷（不包括轴端面），请参照 JB/T 4730.4—2005 标准，采用高等级灵敏度检测，质量验收等级为Ⅰ级，根据现有条件编制磁粉检测工艺卡。

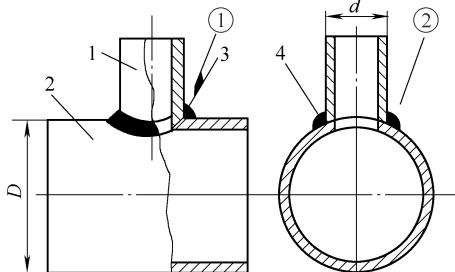
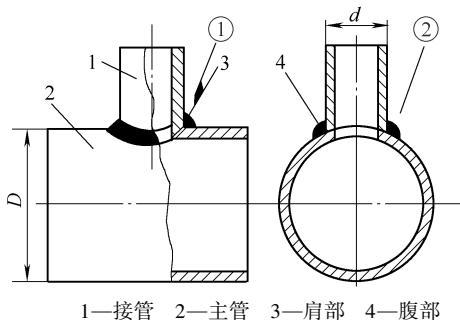


图 5-10-8 锅炉接管

表 5-10-5 磁粉检测工艺卡（例 4）

产品名称	锅炉接管	材料牌号	20g	工件规格	$\phi 325\text{mm} \times 50\text{mm}$ $\phi 108\text{mm} \times 14\text{mm}$
热处理状态	—	检测部位	焊缝及热影响区	被检表面要求	打磨
检测时机	焊接完成后	检测设备	CJE 交流电磁轭	标准试片	A <sub>1</sub> -30/100
检测方法	非荧光、湿法连续法	可见光照射度	被检表面可见光照射度不小于 1000lx	缺陷记录方式	照相 临摹草图
磁化方法	磁轭法	电流种类 磁化规范	交流提升力 不小于 45N	磁悬液配制浓度	1.2 ~ 2.4 mL/100mL
磁悬液施加方法	喷	检测方法 标准	JB/T 4730.4—2005	质量验收等级	Ⅱ 级
磁粉检测质量评级要求	① 不允许存在任何裂纹 ② 不允许存在任何线性缺陷磁痕 ③ 圆形缺陷磁痕（评定框尺寸为 35mm × 100mm），长径 $d \leq 0.3\text{mm}$ ，且在评定框内不大于两个				

磁化方法示意图：



磁化方法附加说明：

- ① 用活动关节电磁轭，保证磁极与关节接触良好
- ② 用交流电磁轭垂直于焊缝磁化，检测焊缝纵向缺陷
- ③ 在用交流电磁轭平行于焊缝磁化，检测焊缝横向缺陷
- ④ 磁极间距  $L \geq 75\text{mm}$
- ⑤ 保证有效磁化区重叠

编制		审核		批准	
	年 月 日		年 月 日		年 月 日

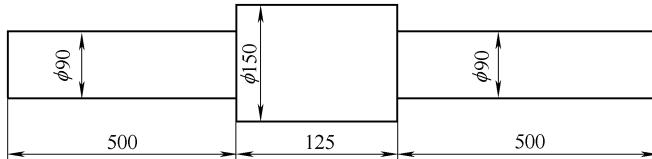
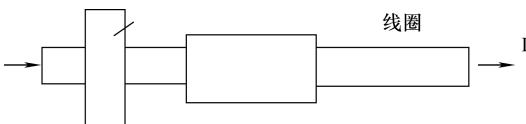


图 5-10-9 传动轴结构尺寸

- 1) TC-6000 固定式磁粉检测机、CYD-3000 移动式磁粉检测机、CEW-2000 固定式磁粉检测机、CEW-1000 固定式磁粉检测机。五匝  $\phi 300\text{mm} \times 100\text{mm}$  线圈。
- 2) GD-3 型毫特斯拉计。
- 3) ST-80C 型照度计。
- 4) UV-A 型黑光辐照计。
- 5) UV-A 型黑光灯。
- 6) YC2 荧光磁粉、HK-1 黑磁粉、BW-1 黑磁膏、水、煤油、LPW-3 号油基载液。
- 7) A<sub>1</sub> 型、C 型标准试片。
- 8) 磁悬液浓度测定管。
- 9) 2 ~ 10 倍放大镜。

表 5-10-6 磁粉检测工艺卡 (例 5)

产品名称	传动轴	材料牌号	2Cr13	尺寸规格	$\phi 150\text{mm} \times 125\text{mm}$ $\phi 90\text{mm} \times 500\text{mm}$
热处理状态	调质处理	检测部位	轴外表面	表面状态	机加工表面
检测时机	机加工后	检测设备	CYD-3000 TC-6000	标准试片	C-8/50
检测方法	荧光、湿法、 交流连续法	检测环境	黑光辐照度不小于 $1000\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , 可见光辐 照度不大于 20lx	缺陷磁痕 记录方式	照相、临摹草图
磁化方法	轴向通电法 + 线圈法	电流种类 磁化规范	交流, 周向磁化 $I_{\phi 90\text{mm}} = (720 \sim 1350)\text{A}$ $I_{\phi 150\text{mm}} = (1200 \sim 2250)\text{A}$ 纵向磁化, 偏心放置 $I_{\phi 90\text{mm}} = 720\text{A}$ $I_{\phi 150\text{mm}} = 853\text{A}$	磁粉, 载液 及磁悬液 沉淀浓度	YC2 型荧光磁粉 LPW-3 号 油基载液 0.5 ~ 3.0g/L
磁悬液 施加方法	喷	检测方法 标准	JB/T 4730. 4—2005	质量验收 等级	I 级
检测质量 评级要求	① 不允许任何裂纹和白点 ② 不允许任何线性缺陷显示 ③ 在 $2500\text{mm}^2$ 评定框内, 其中一条矩形边长最大为 150mm, 圆形缺陷长径 $d \leq 2\text{mm}$ , 且在 评定框内不大于一个 ④ 不允许存在综合评级超标的缺陷磁痕				
磁化示意 草图					

磁化方法附加说明:

- ① 磁化顺序: 先对  $\phi 90\text{mm}$  轴进行轴向通电, 再对  $\phi 150\text{mm}$  轴进行磁化。然后对  $\phi 90\text{mm}$  轴进行线圈磁化, 再对  $\phi 150\text{mm}$  轴进行线圈磁化
- ② 磁化次数:  $\phi 90\text{mm}$  轴两段, 每段各磁化两次。 $\phi 150\text{mm}$  轴磁化一次
- ③ 退磁后  $B_r \leq 0.3\text{mT}$

编 制	年 月 日	审核	年 月 日	批准	年 月 日

# 第六篇      渗透检测

## 第一章 | 渗透检测基础知识

### 一、渗透检测的定义和作用

渗透检测是一种以毛细作用原理为基础的检查表面开口缺陷的无损检测方法。

渗透检测同其他无损检测方法一样，也是以不损坏检测对象的使用性能为前提，运用物理、化学、材料科学及工程学理论为基础。对各种工程材料、零部件和产品进行有效的检验，借以评定它们的完整性、连续性及安全可靠性。渗透检测是产品制造中实现质量控制、节约原材料、改进工艺及提高劳动生产率的重要手段，也是设备维护中不可或缺的手段。

### 二、渗透检测的基本原理

渗透检测是基于液体的毛细作用（或毛细现象）和固体染料在一定条件下的发光现象。渗透检测的工作原理是：工件表面被施涂含有荧光染料或着色染料的渗透剂后，在毛细作用下，经过一定时间，渗透剂可以渗入表面开口缺陷中；去除工件表面多余的渗透剂，经干燥后，再在工件表面施涂显像剂；同样在毛细作用下，显像剂将吸引缺陷中的渗透剂，即渗透剂回渗到显像剂中形成放大的缺陷显示；在一定的光源下，缺陷处的渗透剂痕迹被显示，从而检测出缺陷的形貌及分布状态。

### 三、渗透检测方法的分类

渗透检测方法分类的依据是根据渗透液种类、清洗方式（渗透剂的去除）、显像方式来分，渗透检测方法分类见表 6-1-1。

表 6-1-1 渗透检测方法分类

渗透剂		渗透剂的去除		显像剂	
分类	名称	方法	名称	分类	名称
I	荧光渗透检测	A	水洗型渗透检测	a	干粉显像
II	着色渗透检测	B	亲油型后乳化渗透检测	b	水溶解显像剂
III	荧光、着色渗透检测	C	溶剂去除型渗透检测	c	水悬浮显像剂
		D	亲水型后乳化渗透检测	d	溶剂悬浮显像剂
				e	自显像

注：渗透检测方法代号示例：II C - d 为溶剂去除型着色渗透检测（溶剂悬浮显像剂）。

#### 四、渗透检测的优点和局限性

渗透检测的优点：

- 1) 渗透检测可以检查金属和非金属工件的表面开口缺陷；不受被检工件化学成分限制，可以检查磁性材料、非磁性材料。
- 2) 渗透检测不受工件结构限制，可以检查焊接件、铸件、锻件及机加工件。
- 3) 渗透检测具有较高的灵敏度。
- 4) 渗透检测不受缺陷形状、尺寸和方向的限制，只需一次渗透检测即可同时检查开口于工件表面的所有缺陷，显示直观，操作方便。

渗透检测的局限性：

- 1) 只能检测表面开口缺陷。
- 2) 不适用于检查多孔性材料。
- 3) 难以定量的控制检测操作质量，检验结果受操作者影响较大。

## 第二章

# 渗透检测的物理化学基础

### 一、表面张力与表面张力系数的概念

沿表面切线方向垂直作用于任意长度分界线，使液面紧缩的作用力称为表面张力。沿表面切线方向垂直作用于任意单位长度分界线，使液面紧缩的作用力称为表面张力系数。

#### 1. 表面张力数学表达式及表面张力的属性

1) 表面张力的数学表达式，实验示意图如图 6-2-1 所示。

在图中， $EMNF$  是金属框， $AB$  是活动边， $AB$  边同相连的两边的摩擦力忽略不计。把液体做成液膜，框在  $AMNB$  内。 $AB$  边会在表面张力  $f$  作用下向使液面缩小的方向移动。为保持平衡（不收缩）就必须施一适当的与液面相切的力  $F$  于宽度为  $L$  的液面上。平衡时这两个力大小相等方向相反，令  $AB$  为  $L$ ，则有

$$F = mg = f = \alpha L \quad (6-2-1)$$

式中  $f$ ——表面张力；

$m$ ——所挂物体的质量；

$g$ ——重力加速度；

$L$ ——活动边  $AB$  长度；

$\alpha$ ——表面张力系数。

由式 (6-2-1) 可知，表面张力一般以表面张力系数表示，表面张力系数可定义为单位长度上的表面张力。通常以  $mN/m$  或  $N/m$  为单位。

2) 表面张力的属性，一般来讲，一定成分的液体，在一定的温度和压力下有一定的  $\alpha$  值；不同液体  $\alpha$  值不同；同一液体，表面张力系数  $\alpha$  值随温度上升而下降；含有杂质的液体比纯净的液体的表面张力系数要小。

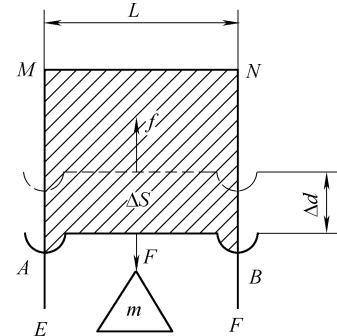


图 6-2-1 表面张力实验示意图

## 二、润湿现象

液体在固体表面不呈球形，且能覆盖固体表面，此现象称润湿现象，表明液体能润湿这种固体。液体在固体表面呈球形，不能覆盖固体表面，此现象称为不润湿现象，表明液体不能润湿这种固体。能增强水或水溶液取代固体表面空气的物质称为润湿剂。

### 1. 润湿方程和接触角

如图 6-2-2 所示，将一滴液体洒在固体的平面上，可有三种界面，即液-气、固-气、固-液界面。与三种界面一一对应，存在三种界面张力，也就是液-气界面上的液体表面张力，它使液滴表面收缩，用  $\gamma_L$  表示；固-气界面上存在固体与气体的界面张力，它力图使液滴表面铺开用  $\gamma_s$  表示；固-液界面上存在固体与液体的界面张力，它也力图使液滴表面收缩，用  $\gamma_{SL}$  表示。在液-固界面与界面处液体表面的切线所夹的角，称为接触角，用  $\theta$  表示。

当液滴停留在固体平面上时，三个界面张力相平衡，各界面张力与接触角的关系是

$$\gamma_s - \gamma_{SL} = \gamma_L \cos\theta \quad (6-2-2)$$

式中  $\gamma_s$ ——固体与气体的界面张力；

$\gamma_L$ ——液体的表面张力；

$\gamma_{SL}$ ——固体与液体的界面张力；

$\theta$ ——接触角。

此式是润湿的基本公式，常称为润湿方程。接触角  $\theta$  可用于表示液体的润湿性能，即可用于判定润湿以何种方式进行。

### 2. 润湿的三种方式和润湿的四个等级

润湿有三种方式：沾湿润湿、浸湿润湿、铺展润湿。

1) 当  $\theta \leq 180^\circ$  时，可发生沾湿润湿现象。

2) 当  $\theta \leq 90^\circ$  时，可发生浸湿润湿现象。

3) 当  $\theta \leq 0^\circ$  时（或不存在），发生铺展润湿现象。

发生铺展润湿现象的条件是： $\gamma_s > \gamma_{SL} + \gamma_L \cos\theta$ 。

在工程上，常用完全润湿、润湿、不润湿和完全不润湿四个等级，来表示不同的润湿性能。

当接触角  $\theta$  为  $0^\circ$ ，即  $\cos\theta = 1$  时，液滴在固体表面接近于薄膜的形态，这种

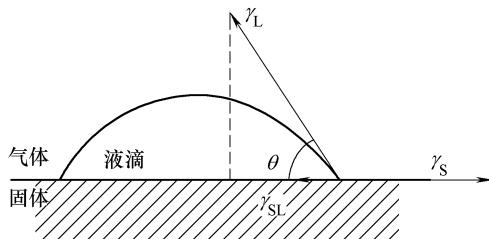


图 6-2-2 液滴的接触角

情况称为完全润湿。当接触角  $\theta$  在  $0^\circ$  到  $90^\circ$  之间，即  $0 < \cos\theta < 1$  时，液滴在固体表面上成为小于半球的球冠，这种情况称为润湿。当接触角  $\theta$  在  $90^\circ$  到  $180^\circ$  之间，即  $-1 < \cos\theta < 0$  时，液滴在固体表面上成为大于半球的球冠，这种情况称为不润湿。当接触角  $\theta$  为  $180^\circ$ ，即  $\cos\theta = -1$  时，液滴在固体表面上成为球形，它与固体之间仅有一个接触点，这种情况称为完全不润湿。四种不同的润湿性能如图 6-2-3 所示。

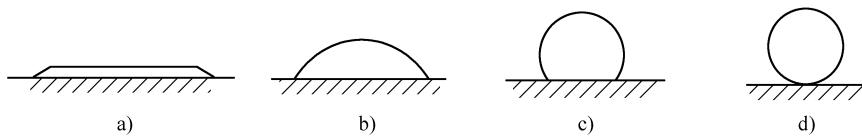


图 6-2-3 四种不同的润湿性能示意图

### 三、毛细现象

润湿液体在毛细管中呈凹面并且上升，不润湿液体在毛细管中呈凸面并且下降的现象，称为毛细现象。能够发生毛细现象的管子称为毛细管，如图 6-2-4 所示。

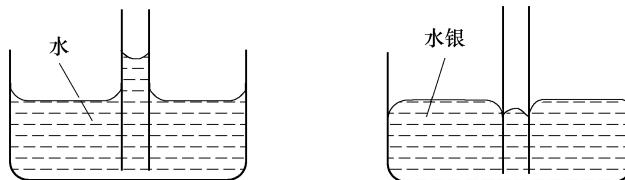


图 6-2-4 毛细现象

毛细现象产生的原因是弯曲液面的附加压力。

#### 1. 渗透检测中的毛细现象

1) 渗透剂渗入表面开口缺陷的过程发生了毛细现象，实质是渗透剂的毛细作用。毛细作用的产生是由缺陷处渗透剂附着层的推斥力和渗透剂表面张力共同作用的结果。毛细作用，使渗透剂渗透到细小而清洁的裂纹中的速度比它渗透到宽裂纹中速度更快。

2) 显像剂的显像过程发生了毛细现象，它来源于液体与固体表面分子间的相互作用力。它是利用显像剂吸附从缺陷中回渗到被检工件表面的渗透剂，形成一个肉眼可见的缺陷显示。

### 四、吸附现象

物质自一相内部富集于界面的现象即为吸附现象。

## 1. 固体表面的吸附现象

当固体和液体或气体接触时，凡能把液体或气体中的某些成分聚集到固体表面上来的现象，就是固体表面上发生的吸附现象。能起吸附作用的固体称为吸附剂，被吸附在固体表面上的液体或气体称为吸附质。

## 2. 液体表面的吸附现象

一种液体与另一种液体（或气体）接触时，能够将被接触的液体或气体中的某些成分吸附到该液体表面的现象称为液体表面的吸附现象。

## 3. 渗透检测中的吸附现象

1) 乳化过程中的吸附：渗透液 + 乳化剂，便于清洗。

2) 渗透过程中的吸附：工件吸附渗透剂。

3) 显像过程中的吸附：显像剂吸附渗透液。

渗透检测全过程所发生的吸附现象，主要是物理吸附。

## 五、溶解现象

### 1. 溶解现象和溶解度

一种物质均匀地分散于另一种物质中的过程叫溶解，所组成的均匀物质称为溶液。通常把分子较大的一种或液态物质称为溶剂，较小的一种或固态物质称为溶质。

溶质粒子溶解在溶剂中，同时溶解的溶质粒子可能重新吸附到未溶解的溶质粒子的现象称为溶解现象。溶解现象包括溶解及结晶两个过程。

溶解度是指在一定的温度和压力下，一定量溶剂中，溶质溶解达到饱和状态时，已溶解了的溶质的量。

### 2. 渗透检测与溶解度

渗透检测在显像后能显示色泽的能力与渗透剂中着色染料或荧光染料的种类有关，与染料在渗透剂中溶解度有关。

## 六、表面活性与表面活性剂

### 1. 表面活性及表面活性剂的定义

使溶液的表面张力降低的性质称为表面活性，具有表面活性的物质称为表面活性剂。

### 2. 表面活性剂的种类及 H. L. B 值

表面活性剂分为离子型表面活性剂和非离子型表面活性剂。离子型表面活性剂溶于水时，能电离生成离子；非离子型表面活性剂溶于水时，不能电离生成离子。

在渗透检测时，通常使用非离子型表面活性剂，因为非离子型表面活性剂在水溶液中不电离，所以稳定性高，不易受强电解质及无机盐类的影响，也不易受酸及碱的影响；与其他类型表面活性剂的相容性好，能很好地混合使用，在水及有机溶

剂中都有较好的溶解性；由于在溶液中不电离，故在一般固体表面上不易发生强烈吸附。

表面活性剂是否易溶于水，即亲水性大小是一项非常重要的指标。非离子型表面活性剂的亲水性，可用亲水基的相对分子质量大小来表示，称为亲憎平衡值，即 H. L. B 值

$$H. L. B = \frac{\text{亲水基部分的相对分子质量}}{\text{表面活性剂的相对分子质量}} \times 20 = \text{亲水基质量\%} \times 1/5 \quad (6-2-3)$$

H. L. B 值越高，亲水性越强。

### 3. 表面活性剂的作用

表面活性剂就是这样的一种物质，它在加入量很少时即能改变溶液的表面状态，从而产生润湿，乳化，消泡及加溶等一系列的作用。

### 4. 乳化作用

(1) 乳化现象及乳化剂 由于表面活性剂的作用使本来不能混合到一块的两种液体能混合在一起的现象称为乳化现象。具有乳化作用的表面活性剂称乳化剂。

(2) 乳化形式 一般来说典型的乳化形式分为水包油型乳状液和油包水型乳状液。水包油型乳状液以 o/w 表示，油包水型乳状液以 w/o 表示。

## 第三章 | 渗透检测的光学基础

### 一、发光及光致发光

#### 1. 发光

发光的物体称为光源，也称为发光体。

发光类型：

- 1) 自发发光。物体自身发光，如太阳光。
- 2) 化学发光。化学能激励发光，如磷的氧化发光。
- 3) 生物发光。如荧光虫的辉光。
- 4) 场致发光。电极引弧发光。
- 5) 光致发光。紫外照射荧光体发光，如荧光、磷光。
- 6) 受激发光。激励态原子再受激发光，如激光。

#### 2. 光致发光

许多原来在白光下不发光的物质，在紫外线等外辐射源的作用下，能够发光，这种现象称为光致发光。

这种发光的和时间，有长有短。有些物质的发光，当外辐射源停止作用后，经过极短时间 ( $\leq 10^{-8}$  s) 就消失了，这种发光称荧光。有些物质的发光，当外辐射源停止作用后，经过很长的时间才能停止发光，这种发光称磷光。外辐射源停止作用后，仍然能保持发光的物质称磷光物质。外辐射源停止作用后，立即停止发光的物质，称荧光物质。荧光渗透剂中的荧光染料是一种荧光物质。

#### 3. 渗透检测用光

- 1) 着色渗透检测时，使用可见光，其波长范围为 400 ~ 760 nm。
- 2) 荧光渗透检测时，使用紫外线，它是一种比可见光更短波长的不可见光，又称为黑光。荧光渗透检测所用紫外线，波长范围为 330 ~ 390 nm，中心波长约 365 nm。
- 3) 荧光渗透检测常用的荧光，其波长为 510 ~ 550 nm，呈黄绿色。

## 二、对比度和可见度

### 1. 对比度

某个显示和围绕这个显示的表面背景之间的亮度和颜色之差，称为对比度。对比度可用两者间的反射光或发射光的相对量来表示，这个相对量称为对比率。着色渗透检测，红色染料显示与白色显像剂背景之间的对比率为 6:1；荧光渗透检测，荧光显示与不发荧光的背景之间的对比率一般可达 300:1。

### 2. 可见度

可见度是表征相对于背景及外部光等条件，渗透剂形成可用人眼直接观察到的缺陷显示的能力。

人的眼睛对各色光的敏感性是不同的，对黄绿色光最敏感，在黑暗处黄绿色光具有最好的可见度。荧光渗透检测时采用的荧光渗透剂，在紫外线照射下，发黄绿色荧光，因而缺陷显示在暗室里具有最好的可见度。

## 三、缺陷显示及裂纹检出能力

### 1. 缺陷显示

缺陷容积（深度×宽度×长度）越大，它容纳的渗透剂就越多，留在缺陷中输给显像剂形成显示的渗透剂就越多，缺陷显示越明显。显像剂显示的缺陷图像尺寸比缺陷的实际图像尺寸要大，缺陷的长度是缺陷显示的只要尺寸，它能提供一个肉眼可观察的实测尺寸。缺陷越窄、越浅、越短、越不易被发现，所需要的渗透停留时间越长。渗透检测检出表面开口缺陷的检出率，主要取决于表面开口缺陷的开口宽度，其次取决于深度及长度。当表面开口缺陷的开口宽度尺寸，窄到渗透剂中染料分子尺寸同数量级时，渗透检测中染料分子不能进入缺陷中，缺陷显示将受到极大限制。

影响渗透液渗入开口缺陷的主要因素：

- 1) 渗透剂的表面张力，渗透剂中的添加物和污染。
- 2) 表面缺陷开口缺陷的尺寸及形状。
- 3) 被检工件表面状态（涂层、污染物等）。
- 4) 阻止渗透剂渗入缺陷的机械障碍物。
- 5) 工件和渗透剂的温度。
- 6) 开口缺陷内壁的粗糙程度及受污染状况。
- 7) 操作时的大气压。

### 2. 裂纹检出能力

在一定条件下（背景、光照等），裂纹缺陷内的渗透液能形成可用肉眼直接观察裂纹缺陷显示的能力，称为裂纹检出能力。

渗透检测的裂纹检出能力取决于渗透剂染料中分子大小、缺陷显示图形色彩反

差，以及形成目视可见显示所需的渗入缺陷的最小渗透剂量等。

- 1) 不同渗透液 - 裂纹检出能力不同。
- 2) 染料种类不同，裂纹检出能力不同。
- 3) 染料浓度不同，裂纹检出能力不同。

其他条件的影响：

- 1) 光照影响，光照时间太长影响裂纹检出能力。
- 2) 环境污染影响裂纹检出能力。

## 第四章 渗透检测剂

### 一、渗透剂

渗透剂是一种含有着色染料或荧光染料且具有很强渗透能力的溶液，它能渗入表面开口的缺陷并以适应的方式显示缺陷的痕迹。渗透剂是渗透检测中使用的最关键的材料，其性能直接影响检测的灵敏度。

#### 1. 渗透剂的分类

- 1) 按溶剂分类：①水基渗透剂；②油基渗透剂。
- 2) 按去除方法分类：①水洗型渗透剂；②后乳化型渗透剂；③溶剂去除型渗透剂。
- 3) 按染料成分分类：①荧光渗透剂；②着色渗透剂；③荧光着色渗透剂。
- 4) 按灵敏度水平分类：很低、低、中、高、超高五类。水洗型渗透剂有低、中、高三类；后乳化型渗透剂有中、高、超高三类；着色渗透剂有低、中两类。
- 5) 按与受检材料的相容性分类：①与液氧相容渗透剂；②低硫渗透剂；③低氯低氟渗透剂。

#### 2. 渗透剂的组成

(1) 着色染料 在渗透检测中，常用的染料有着色染料和荧光染料两类。着色渗透液所用的染料多为暗红色的染料，因为暗红色与显像剂的白色背景能形成较高的对比度。着色渗透液中的染料应能满足色泽鲜艳、颜色浓、对比度高、对光和热的稳定性好、不褪色、对工件不腐蚀、易清洗和易溶于合适的溶剂等要求。常用的着色染料有苏丹IV红、刚果红、烛红、油溶红及丙基红等。其中以苏丹IV红使用最广，其化学名称为偶氮苯，偶氮- $\beta$ 奈酚为醇溶性染料，它在酒精、煤油及滑油中呈暗红色。

(2) 荧光染料 是荧光渗透液的关键物质之一，荧光染料具有发光强，色泽鲜艳、在可见光和黑光照射下具有良好的稳定性，对工件不腐蚀，容易清洗和在渗透液中的溶解度大等特点。

荧光染料的种类很多，在黑光的照射下从发蓝光到发红色荧光的染料均有，荧光渗透液应选择在黑光的照射下发出黄绿色荧光的染料，这是因为人眼对黄绿色荧光最敏感，从而可以提高检测灵敏度，我国常用的荧光染料有 YJI-43、YJP-15、香豆素化合物 MDAC 和 YJN-68 等。

(3) 溶剂 溶剂主要是溶解染料和起渗透作用的。渗透剂中所用溶剂应具有渗透能力强、对染料溶解性能好、挥发性小、毒性小及对金属无腐蚀等性能，且经济易得。多数情况下，渗透剂都是将几种溶剂组合使用。

溶剂大致可分为基本溶剂和起稀释作用的溶剂两类。

#### (4) 表面活性剂

- 增加染料在溶剂中的溶解度和增强渗透液对固体表面的润湿能力。
- 表面活性剂作为乳化剂添加到渗透液中，使渗透液容易被水洗掉。
- 乳化剂还能促进染料的溶解，起增溶的作用。
- 选择两种以上的表面活性剂组合使用。

### 3. 渗透剂的性能

#### (1) 渗透剂的综合性能

- 渗透力强，容易渗入工件的表面开口缺陷。
- 荧光渗透剂应具有鲜明的荧光，着色渗透剂应具有鲜艳的色泽。
- 清洗性好，容易从工件表面清洗掉。
- 润湿显像剂的性能好，容易从缺陷中被显像剂吸附到工件表面。
- 无腐蚀，对工件和设备无腐蚀性。
- 稳定性好，在日光（或黑光）与热作用下，材料成分和荧光亮度或色泽能维持较长时间。
- 毒性小。
- 对氟、氯、硫的要求。

#### (2) 渗透剂的物理性能

- 表面张力与接触角。表面张力与接触角是确定渗透剂是否具有高的渗透能力的两个最主要的参数。渗透剂的渗透能力与表面张力  $\alpha$  和接触角的余弦  $\cos\theta$  的乘积成正比。 $\alpha\cos\theta$  表征渗透剂渗入表面开口缺陷的能力，称静态渗透参量。静态渗透参量可用下式表示

$$SPP = \alpha\cos\theta \quad (6-4-1)$$

式中  $SPP$ ——静态渗透参量；

$\alpha$ ——表面张力（一般已表面张力系数表示）；

$\theta$ ——接触角。

静态参量可表征渗透剂渗入缺陷的能力。当渗透剂的接触角  $\theta \leq 5^\circ$  时，渗透性能较好，使用此类渗透剂进行渗透检测，可得到较满意的检验结果。静态参量的单位为  $\text{mN/m}$  或  $\text{N/m}$ 。

2) 黏度。渗透剂的黏度与液体的流动性有关。它是流体的一种液体特性，是流体分子间存在摩擦力而互相牵制的表现。渗透剂性能用运动黏度来表示，单位是 $\text{m}^2/\text{s}$ 。渗透剂的渗透速率常用动态渗透参量(*KPP*)来表征。它反映的是要求受检工件浸入渗透剂的时间的长短。动态渗透参量可用下式表示

$$KPP = \frac{\alpha \cos \theta}{\eta} \quad (6-4-2)$$

式中 *KPP*——动态渗透参量；

$\alpha$ ——表面张力(一般已表面张力系数表示)；

$\theta$ ——接触；

$\eta$ ——黏度。

渗透剂黏度太高或太低都不好，渗透剂的黏度一般控制在 $(4 \sim 10) \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ (38℃)较为适宜。

3) 密度。液体的密度越小，渗透能力越强。液体的密度一般与温度成反比，温度越高密度值越小，渗透能力也随之增强。

4) 挥发性。不易挥发的渗透剂较好，易挥发的渗透剂易干在工件表面，给去除带来困难；易干在缺陷中，不能回渗至工件表面难以形成缺陷显示。

5) 闪点和燃点。渗透剂在温度升高过程中，接触火焰时，会出现爆炸闪光现象。刚刚出现闪光现象时的最低温度称为闪点，闪点有开口和闭口两种测量方法。

渗透剂能够用火焰点燃的温度称为燃点。

6) 导电性。要求渗透剂应具有高电阻，避免产生逆弧传给操作者。

(3) 渗透剂的化学性能

1) 化学惰性。渗透剂对被检材料和盛装容器应尽可能地惰性的或无腐蚀性的，因此要控制渗透剂的PH、F、Cl及S的含量值。

2) 清洗性。渗透剂的清洗性是十分重要的，如果清洗困难，工件上则会造成不良背景，影响检测效果。

3) 含水量和容水量。渗透剂中的水含量与渗透剂总量之比的百分数称为含水量。渗透剂中含水量超过某一极限值时，渗透剂出现分离、浑浊、凝胶或灵敏度下降等现象，这一极限值称为渗透剂的容水量。

渗透剂含水量越小越好。渗透剂容水量指标越高，抗水污染性越好。

4) 毒性。渗透剂应是无毒的，与其接触，不得引起皮肤炎症；渗透剂挥发出的气体，其气味不能引起操作者恶心。

5) 溶解性。渗透剂是将染料溶解到溶剂中配制而成的，溶剂对染料的溶解能力高，就可以得到染料浓度高的渗透剂，可提高渗透剂的发光强度，提高检测灵敏度。

6) 腐蚀性能。由于渗透剂中含有卤化元素(F、Cl、S)，这些元素在一定条件下，可对工件材料造成腐蚀，所以对渗透剂一定要限制F、Cl、S的含量。

## 二、去除剂

渗透检测中，用来去除工件表面多余渗透剂的溶剂称为去除剂。水洗型渗透剂，直接用水去除，水就是溶剂。

溶剂去除型渗透剂采用有机溶剂去除，这些有机溶剂就是去除剂。它们对渗透剂中的染料有较大的溶解度，对渗透剂中溶解染料的溶剂有良好的互溶性，并有一定的挥发性，应不与荧光渗透剂起化学反应，应不猝灭荧光。

后乳化型渗透剂是在乳化后再用水去除，它的去除剂就是乳化剂和水。

### 1. 乳化剂

乳化剂用于乳化不溶于水的后乳化型渗透剂，使其便于用水清洗。

(1) 乳化剂的分类 乳化剂分为亲水性和亲油性两大类。H. L. B 值在 8 ~ 18 的乳化剂称为亲水性乳化剂，乳化形式是水包油型，它能将油分散在水中；H. L. B 值在 3.5 ~ 6 的乳化剂称为亲油性乳化剂，乳化形式是油包水型，它能将水分散在油中。

#### (2) 乳化剂性能

##### 1) 乳化剂的综合性能。

- ① 外观上能与渗透剂明显的区分开。
- ② 受少量水或渗透剂的污染时，不能降低乳化去除性能。
- ③ 表面活性与黏度或浓度适中，使乳化时间合理，乳化操作不困难。
- ④ 储存保管中，温度稳定性好，性能不变。
- ⑤ 对金属及盛装容器不腐蚀变色。
- ⑥ 对操作者的健康无害，无毒及无不良气味。
- ⑦ 闪点高，挥发性低，废液及去除污水的处理简便等。

##### 2) 乳化剂的物理性能。

① 黏度。乳化剂的黏度对渗透剂的乳化时间有直接影响。高黏度的乳化剂在渗透剂中扩散较慢，黏度较低的乳化剂扩散到渗透剂中比较快，乳化时间控制困难，一般情况下乳化剂的最短乳化时间控制在 30s 内。

② 闪点。从安全观点出发，必须考虑乳化剂的闪点，所有乳化剂的材料，其闪点都应不低于 50℃。

③ 挥发性。对于乳化剂的挥发性，主要考虑问题是使用中的经济性。乳化剂的挥发性应当低，以免由于挥发引起过大的损失。

##### 3) 乳化剂的化学性能

① 毒性。乳化剂使用的材料必须是无毒的，不能对人体产生诸如恶心或引起皮肤炎症等不良副作用。

② 溶水性。乳化剂会受到水的污染，因此对使用的乳化剂要有溶水性的要求。按体积计算，乳化剂应能允许混入 5% 的水，而无凝胶、分离、凝聚或水浮在表面

上等现象产生，且须满足同族组渗透检测灵敏度的要求。

③ 相容性。某些渗透剂会不可避免地混入到乳化剂中。收到渗透剂的过分污染后，乳化剂会减弱其对渗透剂的乳化能力。按体积计算，乳化剂应能容许混入20%的渗透剂不变质。

## 2. 溶剂去除剂

(1) 溶剂去除剂的分类 按照溶剂去除剂与受检材料的相容性，可将其分为卤化型溶剂去除剂、非卤化型溶剂去除剂及特殊用途溶剂去除剂。

(2) 溶剂去除剂的性能 溶剂去除剂与溶剂去除型着色或荧光渗透剂配合使用。其性能要求是：溶解渗透剂适度、去除时挥发适度、储存保管中稳定、不使金属腐蚀与变色、无不良气味及毒性小等。

## 三、显像剂

显像剂是渗透检测中的另一关键材料，它的作用在于：通过毛细作用将缺陷中的渗透剂吸附到工件表面上形成缺陷显示；将形成的缺陷显示在被检表面上横向扩展，放大至人眼可见；提供与缺陷显示较大反差的背景，以利于观察。

### 1. 显像剂的分类和组成

显像剂分为干式显像剂与湿式显像剂两大类。自显像是不使用显像剂的。

#### (1) 干式显像剂——干粉显像剂

干粉显像剂为白色无机物粉末，干粉显像剂应是轻质的，松散的及干燥的，粉末应细微，尺寸不应超过 $1\sim3\mu\text{m}$ ；应有较好的吸水及吸油性能，容易被缺陷处微量的渗透剂润湿，能把微量的渗透剂吸附出；应吸附在干燥工件表面上，并仅形成一层显像粉薄膜。在黑光下不发荧光，对工件和存放容器不应腐蚀，且没毒。干粉显像剂一般与荧光渗透剂配合使用，适用于螺纹及粗糙表面工件的荧光检验。

#### (2) 湿式显像剂

1) 水悬浮显像剂。水悬浮显像剂是干式显像剂按一定比例加入到水中配制而成。显像剂中加有润湿剂，是为改善与工件表面的润湿性，保证在工件表面形成均匀的薄膜。加有分散剂，是为防止沉淀和结块；加有限制剂，是为防止缺陷显示无限制的扩散，保证较好的分辨力；加有防锈剂，是为防止显像剂对工件和存放容器的锈蚀。该类显像剂不适用于水洗型渗透检测剂体系，要求工件表面有较低的表面粗糙度。

2) 水溶解显像剂。水溶解显像剂是将显像剂结晶粉末溶解在水中而制成，添加有润湿剂、分散剂、防锈剂及限制剂等。它克服了水悬浮显像剂易沉淀、不均匀和可能结块的缺点；还具有清洗方便、不可燃、使用安全等优点。但由于显像剂结晶粉末多为无机盐类，白色背景不如水悬浮显像剂。另外，该显像剂也不适用于水洗型渗透检测剂体系，同时要求工件表面有较低的表面粗糙度值。

3) 溶剂悬浮显像剂。溶剂悬浮显像剂是将显像剂粉末加在挥发性的有机溶剂中配制而成。该类显像剂通常装在喷罐中使用，而且与着色渗透剂配合使用。就显像方法而论，该类显像剂灵敏度较高。

## 2. 显像剂的性能

### (1) 显像剂的综合性能

1) 吸水能力要强，吸湿速度要快，能容易被缺陷处的渗透剂所湿润并吸出足量渗透剂。

2) 显像剂粉末颗粒要细微，对工件表面有一定的黏附力，能在工件表面形成均匀的薄覆盖层，将缺陷的显示宽度扩张到足以用肉眼看到。

3) 用于荧光法的显像剂应不发荧光，也不应有微弱的荧光成分，而且不应吸收黑光。

4) 用于着色法的显像剂应与缺陷显示形成较大的色差，以保证最佳的对比度。对着色染料无消色作用。

5) 对被检工件和存放容器不腐蚀，对人体无害。

6) 使用方便，易于清除，价格便宜。

### (2) 显像剂的物理性能

1) 颗粒度。显像剂的颗粒应研磨得很细。如果颗粒过大，微小的显示就显现不出来。这是因为渗透剂只能润湿颗粒较细的球状颗粒所致。

2) 干粉显像剂的密度。松散状态：密度小于  $0.075\text{g/cm}^2$ ，每升质量在  $75\text{g}$  以下。包装状态：密度小于  $0.13\text{g/cm}^2$ ，每升质量在  $130\text{g}$  以下。干粉显像剂的颗粒度应不超过  $1\sim 3\mu\text{m}$ 。

3) 水悬浮或溶剂悬浮显像剂的沉淀速率。显像剂粉末在水中或溶剂中的沉淀速度沉淀速率。细小粉末沉淀慢，粗的沉淀快，粗细不均匀的沉淀的不均匀。为确保悬浮性好，应选用细微均匀的显像剂粉末。

## 3. 显像剂的化学性能

1) 毒性。各种显像剂必须是无毒的，使用中不能对人体产生恶心或引起皮肤炎症等。禁止使用二氧化硅干粉显像剂。

2) 腐蚀性。显像剂不应使受检工件在渗透检测期间及以后的使用期间产生腐蚀。应对显像剂中的 F、Cl、S 元素进行严格控制。

3) 温度稳定性。现场使用的水悬浮显像剂或水溶性显像剂，不应在冰冻情况下使用，为此，显像前，应对工件加热，或对显像剂加热，防止显像剂在使用中产生冻结；在高温或相对湿度特别低的环境会使显像剂液体成分过度蒸发。所以，在上述环境下使用显像剂，应经常检查显像剂槽液的浓度。

4) 污染。渗透剂的污染将引起虚假显示。油和水的污染，将使工件表面沾上过多显像剂，遮盖显示。

## 四、渗透检测剂系统

### 1. 渗透检测剂系统的定义及同族组

渗透剂检测系统是指由渗透剂、去除剂和显像剂所构成的特定组合系统。系统中每种材料不仅需要满足各自特定的要求，而且作为一个整体，还需要做到系统内部相互兼容，最终要满足达到整个系统的目标。

所谓“同族组”是指完成一个特定的渗透检测过程所必须有的一系列完整材料，含渗透剂、去除剂及显像剂。由渗透剂、去除剂和显像剂所构成的渗透检测系统，原则上必须同一厂家提高的、同族组的产品，不同族组的产品不能混用。否则，可能出现渗透剂、去除剂和显像剂等材料各自都符合规定要求，但它们之间不兼容，最终使渗透检测无法进行的现象。如确需混用，则必须通过验证，确保它们能相互兼容且有所要求的检测灵敏度。

### 2. 渗透检测剂系统的选则原则

- 1) 同族组要求，渗透剂检测系统应同族组。
- 2) 灵敏度应满足检测要求，应当注意，检测灵敏度越高，其检测费用也越高。因此，不能片面追求高灵敏度检测，只要灵敏度满足检测要求即可。
- 3) 根据被检工件状态进行选择。对表面光洁的工件，可选用后乳化型渗透检测系统；对表面粗糙的工件，可选用水洗性渗透检测系统；对大工件的局部检测，可选用溶剂去除型着色渗透检测系统。
- 4) 在灵敏度应满足检测要求的条件下，应尽量选用价格低、毒性小、易清洗的渗透检测材料组合系统。
- 5) 渗透检测材料组合系统对被检工件应无腐蚀。
- 6) 化学稳定性好，能长期使用，受到阳光或遇高温时不易分解和变质。
- 7) 使用安全，不易着火。

## 第五章

# 渗透检测设备、仪器和试块

### 一、便携式设备

一般是一个小箱子，里面装有渗透剂喷罐、去除剂喷罐和显像剂喷罐，以及清理擦拭零件用的金属刷、毛刷及紫外线灯。这种设备多用于现场检查。

喷罐一般由盛装容器和喷射机构两部分组成，如图 6-5-1 所示。

喷罐内装有渗透检测剂和气雾剂。气雾剂采用乙烷或氟利昂等，使用喷罐时应注意，喷罐应与工件表面保持一定的距离，太近会使检测剂施加不均匀；喷罐不宜放在靠近火源、热源处，以防爆炸；处置空罐前，应先破坏其密封性。

### 二、固定式设备

固定式设备一般在固定场所使用，基本上是采用水洗型或后乳化型渗透检测法，其主要装置有：预清洗装置、渗透剂施加装置、乳化剂施加装置、水洗装置、显像剂施加装置及后清洗装置。

#### 1. 预清洗装置

预清洗装置有三氯乙烯蒸汽除油槽、溶剂清洗槽、超声波清洗机、碱性或酸性腐蚀槽、洗涤剂清洗槽及冲洗喷枪等。

#### 2. 渗透剂施加装置

渗透剂的施加装置主要包括渗透剂槽及滴落架。滴落架与渗透剂槽多做成一体，渗透剂槽体可用碳钢制造，且应进行泄漏检查，槽体内部的所有焊缝、弯曲处和连接处均施涂上渗透剂，在槽体的外部对应位置进行检验，不允许有任何泄漏迹象。

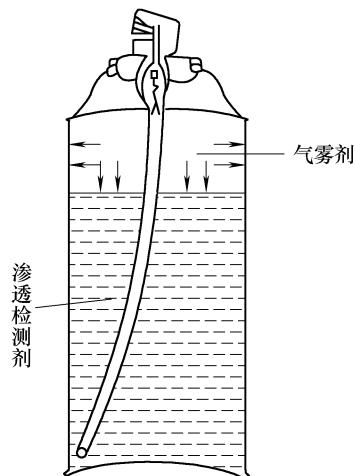


图 6-5-1 内压式喷罐结构示意图

### 3. 乳化剂施加装置

乳化剂施加装置是用来将乳化剂施加到零件表面并使其与渗透剂混合，从而使渗透剂能够被水清洗。乳化剂施加装置包括乳化剂槽及滴落架。乳化剂槽体可用碳钢制造，但需装备搅拌器。

### 4. 水洗装置

去掉零件表面上多余的渗透剂，而不得把缺陷内的渗透剂去除掉，并防止过水洗。水洗装置是由格栅、压缩空气输入管及水洗槽组成。水洗槽应用不锈钢制造，防止生锈。

### 5. 干燥装置

(1) 热空气循环干燥装置的作用 被检零件水洗后进行热空气循环干燥，提高检测速度，保证下道检测工序的顺利进行。

(2) 热空气循环干燥装置的组成 是由装有恒温控制器和空气搅拌装置组成。它分为井式热空气循环干燥装置和罩式热空气循环干燥装置两种。

### 6. 显像剂施加装置

(1) 显像剂施加装置的分类 分为湿式显像剂施加装置和干式显像剂施加装置。

(2) 显像剂施加装置的组成 干式显像剂施加装置是由柜体、格栅、加热器、密封盖、压缩空气输入装置及显像粉组成。湿式显像剂施加装置是由槽体、滴落架、空气搅拌机构及恒温控制器等组成。湿式显像剂施加装置槽体应用不锈钢制造，并应进行泄漏检验。不允许有任何泄漏现象。

### 7. 后清洗装置

后清洗装置就是应把多余的渗透剂及零件表面的显像剂清洗掉。

### 8. 整体装置

将渗透检测用的各种槽子组成一个整体，称为渗透检测整体型装置。根据被检零件的大小、数量和现场情况等，可将渗透检查用的槽子分别排列成“一”字形、“U”字形或“L”字形等。

## 三、检验场地及光源

### 1. 检验场地

(1) 着色渗透检测 着色渗透检测时，工件被检表面处白光辐照度应大于等于 1000lx。

(2) 荧光渗透检测 荧光渗透检测时，应在暗室或暗处进行。暗室或暗处白光辐照度不应大于 20lx。暗室内应装有标准黑光灯，备有便携式黑光灯。暗室或暗处的黑光强度要足够，一般规定距黑光灯滤光片 380mm 的工件表面处的辐照度大于等于  $1000\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，自显像时距黑光灯滤光片 150mm 的工件表面的辐照度大于等于  $3000\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。

## 2. 检测光源

- (1) 白光灯 着色渗透检测用日光或白光照明，光的照度应不低于 1000lx。
- (2) 黑光灯

1) 黑光。“黑光”是指波长为 200 ~ 400nm 的紫外线。在该范围内，波长为 200 ~ 320nm 的短波紫外线，其作用力很强，会引起灼伤、杀死细胞、伤害人的眼睛，因此，该光谱范围的紫外线在渗透检测时不予采用。

2) 黑光灯的工作原理。黑光灯采用水银石英灯作为光源，以深紫色玻璃作外壳，这种玻璃设计成能阻挡可见光和短波黑光通过，而仅让 330 ~ 390nm 的黑光通过，该波长的黑光对人眼几乎无害。

3) 黑光灯与镇流器的串接。黑光灯需串接镇流器才能使用，镇流器在主、辅电极和两主电极放电时阻止电流增加，保护黑光灯不被击穿。黑光灯每断电一次，寿命缩短约 3h，应尽量减少不必要的开关次数。通常每工作班只开关一次。

## 四、测量设备

渗透检测常用的测量设备及器具有：黑光辐射强度计、白光照度计及荧光亮度计等。

### 1. 黑光辐射强度计

黑光辐射强度计主要用于校验黑光源性能和测定被检工件表面的黑光辐射强度。一般采用直接测量法。

### 2. 黑光照度计

黑光照度计一般采用间接测量法。它是将黑光辐射到一块荧光板上，使其激发出黄绿色荧光，黄绿色荧光再照射到光电池上，使照度计指针偏转，指出照度值，以 lx 为刻度。由于这种检测仪器以照度刻度，故称黑光照度计。

### 3. 白光照度计

白光照度计是用于测定被检工件表面白光照度值。一般采用直接测量，被检工件表面的实际的白光照度，应使用白光照度计进行实地测定，以确定是否真正满足观察缺陷时所需要的白光照度。

着色渗透检测操作过程和观察显示时，工件表面都需要有一定的可见光照度。荧光检测观察时则需要控制可见光照度，以提高缺陷显示的可见度。

### 4. 荧光亮度计

荧光亮度计是一种一定波长范围的可见光度计。其主要用途是比较两种荧光渗透检测材料性能的仪器，而不是做荧光显示亮度的真实测定，不是得出真正的亮度值。

## 五、渗透检测试块

渗透检测试块是指带有人工缺陷或自然缺陷的试件。它是用于衡量渗透检测灵

敏度的器材，也称灵敏度试块。

### 1. 铝合金淬火试块（A型试块）

又称A型试块，具体规格尺寸如图6-5-2所示。

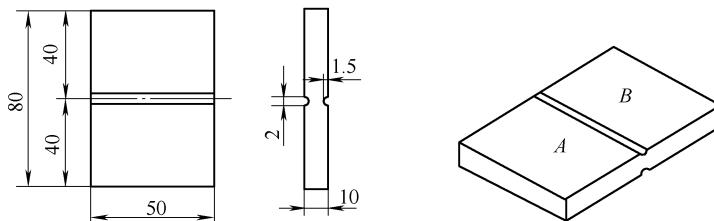


图6-5-2 铝合金淬火试块

铝合金淬火试块适用于两种不同的渗透检测剂在互不污染的情况下进行灵敏度对比试验，也适用于同一种渗透检测剂的某一不同操作工序的灵敏度对比试验。如不同温度下的渗透检测灵敏度对比试验。

### 2. 不锈钢镀铬辐射状裂纹试块（B型试块）

不锈钢镀铬辐射状裂纹试块又称B型试块，推荐尺寸为130mm×25mm×4mm，如图6-5-3所示。

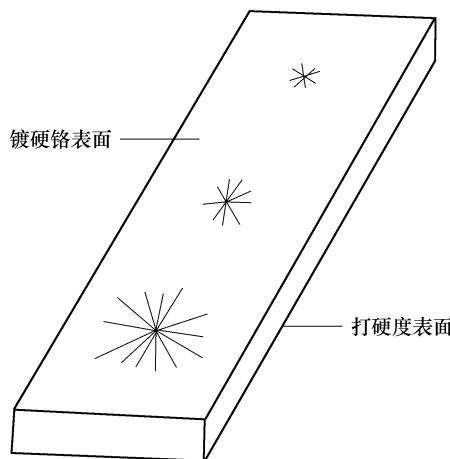


图6-5-3 不锈钢镀铬辐射状裂纹试块

不锈钢镀铬辐射状裂纹试块主要用于检验渗透检测剂系统灵敏度及操作工艺正确性。

### 3. 黄铜板镀镍铬层裂纹试块（C型试块）

黄铜板镀镍铬层裂纹试块又称C型试块，形状如图6-5-4所示。

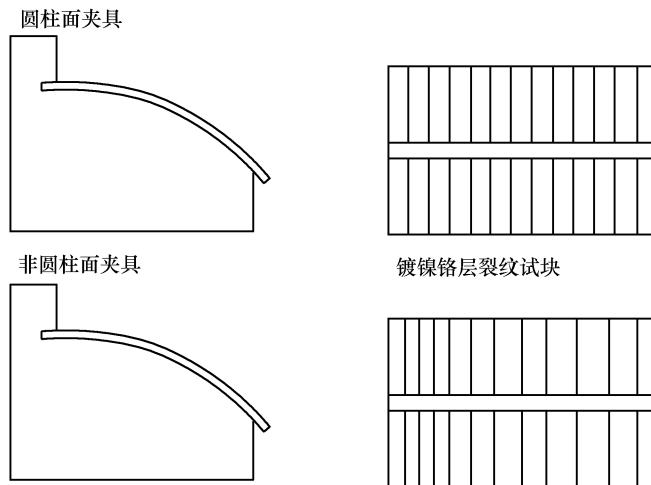


图 6-5-4 黄铜板镀镍铬层裂纹试块

黄铜板镀镍铬层裂纹试块主要用于鉴别各类渗透检测剂性能和确定灵敏度等级。

使用过的试块要用丙酮进行彻底清洗，清洗后的试块，应采取有效的方法保存。

## 第六章 渗透检测方法

渗透检测方法主要分为水洗型渗透检测法、后乳化型渗透检测法和溶剂去除型检测法，以及其他一些特殊的渗透检测方法。

### 一、水洗型渗透检测法

水洗型渗透检测法是广泛使用的渗透检测方法之一，它包括水洗型着色渗透检测法及水洗型荧光渗透检测法，其检测程序如图 6-6-1 所示。

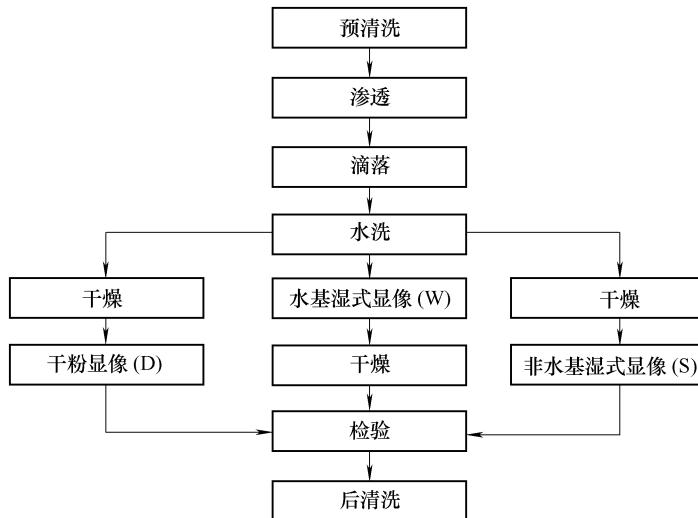


图 6-6-1 水洗型渗透检测法程序方框图

#### 1. 水洗型渗透检测法适用范围

- 1) 灵敏度要求不高。
- 2) 检验大体积或大面积的工件。
- 3) 检验开口窄而深的缺陷。

- 4) 检验表面很粗糙（如沙型铸造）的工件。
- 5) 检验螺纹工件和带有键槽的工件。

## 2. 水洗型渗透检测法的渗透时间及温度

渗透温度在 10 ~ 50℃ 范围内时，渗透时间一般不少于 10min。当渗透温度不能满足上述条件时，渗透时间应通过试验决定。零件的状态不同，缺陷种类不同，所需渗透时间不同。不同的材料和不同的缺陷，不仅渗透时间不同，显像时间也不同。

## 3. 水洗型检测法的优缺点

水洗型检测法的优点：

- 1) 表面多余的渗透剂可以直接用水去除，相对于后乳化型渗透检测法，具有操作简便，检验费用低。
- 2) 检测周期较其他方法短，能适应绝大多数类型的缺陷检测，如果使用高灵敏度荧光渗透剂，可检出很细微的缺陷。
- 3) 较适合于表面粗糙工件的检测，也适用于螺纹类工件、窄缝和工件上的键槽、盲孔内缺陷等的检测。

水洗型渗透检测法的缺点如下：

- 1) 灵敏度相对较低，对浅而宽的缺陷容易漏检。
- 2) 重复检验时再现性差，故不易在复验的场合下使用。
- 3) 如果清洗方法不当，易造成过清洗，降低缺陷的检出率。
- 4) 渗透剂的配方复杂。
- 5) 抗水污染的能力弱。
- 6) 酸的污染将影响检测灵敏度，尤其是酸和铬酸盐的影响很大。

## 二、后乳化型渗透检测法

后乳化型渗透检测法也是广泛使用的渗透检测方法之一，它包括后乳化型着色渗透检测法及后乳化型荧光渗透检测法两种，其中亲水型后乳化渗透检测程序如图 6-6-2 所示。

### 1. 后乳化型渗透检测法适用范围

- 1) 表面阳极化工件，镀铬工件及复查工件。
- 2) 有更高检测灵敏度要求的工件。
- 3) 被酸或其他化学试剂污染的工件，而这些物质会有害于水洗型渗透检测剂。
- 4) 检验开口浅而宽的缺陷。
- 5) 被检工件可能存在使用过程中被污物所污染的缺陷。
- 6) 应力或晶界腐蚀裂纹类缺陷。
- 7) 磨削裂纹缺陷。

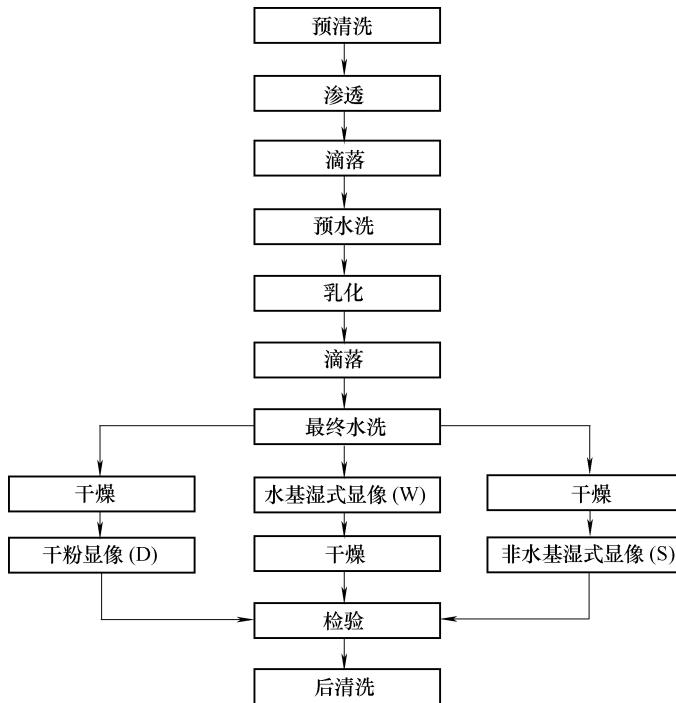


图 6-6-2 亲水型后乳化渗透检测程序方框图

## 2. 乳化时间及乳化剂的施加方法

乳化工序是后乳化型渗透检测工艺中最关键的步骤，必须严格控制乳化时间，防止过乳化。

乳化时间是浸入乳化剂中的时间与滴落时间之和。乳化时间随零件表面粗糙度、乳化剂浓度、乳化温度、乳化剂被污染程度和后乳化型渗透液种类不同而异。需对具体零件，通过试验选择最佳乳化时间。

乳化剂可采用浸、流涂和喷洒等方法施加于零件被检表面，不允许采用刷涂法。

## 3. 后乳化型渗透检测法的优缺点

后乳化型渗透检测法的优点：

- 1) 具有较高的检测灵敏度，可发现更细微的缺陷。
- 2) 能检测浅而宽的表面开口缺陷。
- 3) 因渗透剂中不含乳化剂，故渗透速度快，渗透时间比水洗型要短。
- 4) 抗污染能力强，不易被水、酸和铬盐的污染。
- 5) 重复检验的再现性好。
- 6) 渗透剂不含乳化剂，故温度变化时，不会产生分离、沉淀和凝胶等现象。

后乳化型渗透检测法的缺点：

- 1) 要进行单独的乳化工序, 故操作周期长, 检测费用大。
- 2) 必须严格控制乳化时间, 才能保证检验灵敏度。
- 3) 要求工件表面有较低的表面粗糙度, 如工件表面粗糙度较大或工件上存有凹槽、螺纹或拐角、键槽时, 渗透剂不易被清洗掉。
- 4) 大型拐角用后乳化渗透检测法比较困难。

### 三、溶剂去除型渗透检测法

溶剂去除型渗透检测法是渗透检测中应用较广的一种方法, 它包括溶剂去除型着色渗透检测法及溶剂去除型荧光渗透检测法两种, 其检测程序如图 6-6-3 所示。

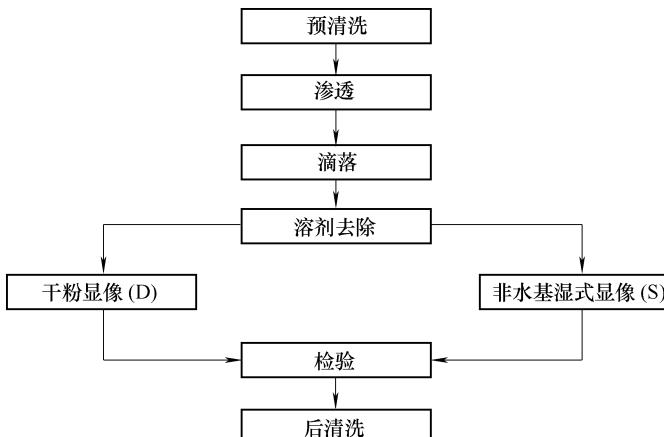


图 6-6-3 溶剂去除型渗透检测法程序方框图

#### 1. 溶剂去除型渗透检测法的适用范围

- 1) 焊接件和表面光洁的工件。
- 2) 大工件的局部检验。
- 3) 非批量工件的检验和现场检验。

#### 2. 渗透时间及温度

渗透温度在 10 ~ 50℃ 范围内, 根据被检零件的材料和状态及缺陷类型, 确定相应的渗透时间。

#### 3. 溶剂去除型渗透检测法的优缺点

溶剂去除型着色渗透检测法的优点:

- 1) 设备简单, 渗透剂、清洗剂和显像剂一般装在喷罐中使用, 故携带方便, 且不需要暗室和黑光灯。
- 2) 操作方便, 对单个工件检测速度快。
- 3) 适合于现场和大型工件局部检测, 配合返修或对有怀疑的部位, 可随时进行局部检测。

- 4) 可在没有水、电的场合下进行检测。
  - 5) 缺陷污染对渗透检测灵敏度的影响不像对荧光渗透检测的影响那样严重，工件上残留的酸和碱对着色渗透剂的破坏不明显。
  - 6) 与溶剂悬浮显像剂配合使用，能检出非常细小的开口缺陷。
- 溶剂去除型着色渗透检测法的缺点：
- 1) 所用的材料多数是易燃和易挥发的，故不易在开口槽中使用。
  - 2) 相对于水洗型和后乳化型而言，不太适合于批量工件的连续检测。
  - 3) 不太适用于表面粗糙工件的检测。
  - 4) 去除表面多余渗透剂时要细心，否则易将浅而宽缺陷中的渗透剂清洗掉，造成漏检。

## 四、渗透检测方法的选用

### 1. 渗透检测方法选择原则

渗透检测方法的选择首先应满足检测缺陷类型和检验灵敏度的要求，同时应考虑零件批量大小、表面状态及几何形状、检验场所的水源、电源、气源及检验费用等。

### 2. 渗透检测方法的选择

- 1) 对于细小裂纹，宽而浅的裂纹，表面粗糙度低的零件的检验宜选用后乳化型荧光法或后乳化型着色法，也可采用溶剂去除型荧光法。
- 2) 疲劳裂纹、磨削裂纹及其他微小裂纹的检验，宜选用后乳化型荧光法或溶剂去除型荧光法。
- 3) 对于批量大的工件，宜选用水洗型荧光法或水洗型着色法。
- 4) 大工件的局部检测，宜选用溶剂去除型着色法或溶剂去除型荧光法。
- 5) 对于表面粗糙且灵敏度要求低的工件，宜选用水洗型荧光法或水洗型着色法。
- 6) 检验场所无电源、水源时，宜选用溶剂去除型着色法。

# 第七章

## 渗透检测工艺

渗透检测方法的六个基本操作步骤：

- 1) 表面准备和预清洗——检测前工件表面的预处理和预清洗。
- 2) 施加渗透剂——渗透剂的施加和滴落。
- 3) 去除多余渗透剂。
- 4) 干燥——自然干燥、吹干或烘干。
- 5) 施加显像剂。
- 6) 观察及评定——观察和评定显示的痕迹。

检测一般以最终成品为对象。但在生产中和维修中的检验也常常使用渗透检测方法，时机安排原则如下：

- 1) 渗透检测应在喷漆、镀层、阳极化、涂层、氧化或其他表面处理工序之前进行。表面处理后还局部机加工的，对该局部机加工表面需再次进行渗透检测。
- 2) 工件要求腐蚀检测时，渗透检测应紧接在腐蚀工序后进行。
- 3) 焊接件在热处理后进行渗透检测。如需进行两次以上热处理，可在温度较高的一次热处理后进行，紧固件和锻件的渗透检测一般安排在热处理之后进行。
- 4) 使用过的工件应去除表面积碳层及漆层后进行渗透检测。但是，阳极化层可不去除，工件可以直接进行渗透检测。完整无缺的脆漆层，可不必去除就直接进行渗透检测。在漆层上检测发现裂纹后，去除裂纹局部的漆层，再检查基体金属上有无裂纹。
- 5) 磨削、焊接，矫正、机械加工和热处理等操作，如果可能产生表面缺陷，渗透检测应在这些操作完成后进行。对有延迟裂纹倾向的材料，至少应在焊接完成24h后进行。
- 6) 渗透检测通常在喷丸和研磨操作前进行，如果在其后进行，则应进行包括腐蚀在内的预清洗操作，使表面开口缺陷完全开口。

### 一、表面准备和预清洗

受检工件表面准备和预清洗的基本要求：任何可能影响渗透检测的污染物必须

清除干净。同时，又不得损伤受检工件的工作功能。不得用钢丝刷打磨铝、镁及钛等软合金，密封面不得进行酸腐蚀处理等。渗透检测准备工作范围应从检测部位四周向外扩展 25mm。

### 1. 污物类别及其对渗透检测的影响

#### 1) 污物类别。

① 固体污物。铁锈、氧化皮、腐蚀产物、焊接飞溅、焊渣、毛刺、清漆、油漆及其他有机防护层。

#### ② 液体污物。防锈油、机油、润滑油及含有有机成分的其他液体。

2) 清除污物的目的。保证渗透检测效果，防止污物引起的虚假显示，避免污物对渗透液造成污染。

#### 3) 污物对渗透检测的影响。

① 妨碍渗透剂对受检工件的润湿，妨碍渗透剂渗入缺陷，甚至完全堵塞缺陷。

② 妨碍显像剂对缺陷中的渗透剂的吸附，影响缺陷痕迹显示的效果。

③ 缺陷中的污染物，会与渗透剂混合，甚至发生作用，降低渗透剂的灵敏度及其性能；有些污物，如酸和铬酸盐，会影响荧光染料发光。

④ 有些污染物，会引起虚假显示；有些污物，会掩盖显示；所有污染物，都会污染渗透剂、显像剂等渗透检测剂。

### 2. 清除污物的方法

#### (1) 机械法 振动光饰、抛光、干吹沙、湿吹沙、钢丝刷及超声波清洗等。

注意：由于机械方法清除污物时产生的金属细末、沙末等可能堵塞缺陷，所以，经过机械处理的零件，一般在渗透前应进行酸洗或碱洗。渗透检测一般不允许采用喷丸法清理表面，因为可能堵塞缺陷开口。如使用喷丸法处理后的被检工件必须进行酸洗或碱洗。

#### (2) 化学法 碱洗和酸洗。

碱洗适用于去除油污、抛光剂及积碳等。

酸洗适用于去除氧化皮、零件表面薄层金属及金属粉末。

### 3. 溶剂去除法

溶剂蒸汽除油和溶剂液体清洗，溶剂液体清洗常用于大零件局部区域的清洗。

### 4. 其他方法

使用超声波清洗、去污剂及去漆剂等。

## 二、施加渗透剂

### 1. 施加渗透剂的方法

(1) 喷涂 静电喷涂、喷罐喷涂或低压循环泵喷涂，适用于大零件的局部或全部检查。

(2) 刷涂 用刷子、棉纱或抹布刷涂，适用于局部检查、焊缝检查。

- (3) 浇涂 将渗透液直接浇在零件表面上，适用于大零件的局部检查。
- (4) 浸涂 把整个零件全部浸入渗透液中，适用于小零件的全面检查。

## 2. 渗透时间及温度

(1) 渗透时间 渗透时间一般不得少于 10min。对于怀疑有缺陷的零件，渗透时间相对较长，应力腐蚀裂纹，渗透时间需更长。

(2) 渗透温度 渗透温度应控制在 10 ~ 50℃ 范围内，当渗透检测温度不能满足要求时，则应用铝合金标准试块作对比试验。

## 三、去除多余的渗透剂

去除多余渗透剂时，要防止过清洗或过乳化，同时，为取得较高灵敏度可是荧光背景或者色底色保持在一定的水准上。

### 1. 水洗型渗透剂的去除

水洗型和后乳化型渗透剂，可用水去除。冲洗时，水射束与被检面的夹角以 30° 为宜，水温为 10 ~ 40℃，水压应不超过 0.34MPa。

水洗型荧光渗透剂用水喷洗时，应使用粗水柱，喷头距离受检工件 300mm 左右，由下而上进行，以避免留下一层难以去除的荧光薄膜。

### 2. 后乳化型渗透剂的去除

施加亲水性乳化剂的操作方法是先用水预清洗，然后乳化，最后再用水冲洗。施加乳化剂时，只能用浸涂、浇涂或喷涂，不能用刷涂，因为刷涂不均匀。

施加亲油性乳化剂的操作方法是直接用乳化剂乳化，然后用水冲洗。施加乳化剂时，只能用浸涂法或浇涂法，不能用刷涂法或喷涂，而且也不能在被检工件上搅动。

乳化时间的影响因素一般包括工件表面粗糙度、乳化剂浓度、乳化剂温度、乳化剂被污染程度和后乳化型渗透剂种类。一般标准对乳化时间做了原则上的规定，亲油性乳化剂的乳化时间在 2min 内，亲水性乳化剂的乳化时间在 5min 内。

### 3. 溶剂去除型渗透剂的去除

先用干燥、洁净不脱毛的布依次擦拭，直至大部分多余渗透剂被去除后，再用蘸有清洗剂的干净不脱毛布或纸进行擦拭，直至将被检面上多余的渗透剂全部擦净。不得用清洗剂直接在被检面上冲洗，不得往复擦拭。

## 四、干燥

### 1. 干燥的目的和时机

干燥的目的是除去被检工件表面的水分，使渗透剂充分地渗入缺陷或回渗到显像剂上。干燥的时间与表面多余渗透剂的去除方法和使用的显像剂密切相关。

溶剂去除法渗透检测时，不必进行专门的干燥处理，应在室温下自然干燥，不得加热干燥。

施加干式显像剂、溶剂悬浮显像剂时，检测面应在施加前进行干燥，施加水湿式显像剂（水溶解、水悬浮显像剂）时，检测面应在施加后进行干燥处理。

采用自显像时应在水清洗后进行干燥。

## 2. 常用的干燥方法

常用的干燥方法一般有干净布擦干、压缩空气吹干、热风吹干、热空气循环烘干和自然干燥等。

## 3. 干燥温度和时间

干燥温度不能太高，干燥时间不能太长。否则会将缺陷中渗透剂烘干，不能形成缺陷显示。干燥时被检工件表面温度不得大于50℃，干燥时间为5~10min。

# 五、显像

显像的过程是在被检工件表面施加显像剂，利用毛细作用原理将缺陷中的渗透剂吸附到被检工件表面，从而产生清晰可见的缺陷显示图像。

## 1. 显像方法

常用的显像方法有干式显像、非水基湿式显像、湿式显像和自显像。

1) 使用干式显像剂时，工件须先经干燥处理，可将工件埋入显像粉中，也可用喷枪或喷粉柜喷粉显像。多余的显像剂通过轻敲或轻气流吹除。

2) 使用水湿式显像剂（水基湿式显像剂）时，在被检面经过清洗处理后，直接将显像剂喷洒或涂刷到被检面上，然后再迅速排除多余显像剂，并进行干燥处理。

3) 使用溶剂悬浮显像剂（非水基湿式显像剂）时，将显像剂喷洒或刷涂到被检工件表面上，悬浮显像剂在使用前应充分搅拌均匀。显像剂施加应薄而均匀，不可在同一部位反复多次施加，喷涂显像剂时，喷嘴离被检工件表面距离为300~400mm，喷嘴方向与被检面夹角为30°~40°。

## 2. 显像时间

显像时间取决于显像剂和渗透剂的种类、缺陷大小以及被检工件表面温度，一般应不少于7min。

## 3. 干式显像与湿式显像比较

干式显像与湿式显像相比，缺陷轮廓图形不扩散，显像图像清晰、误差小且显像分辨力较高。溶剂悬浮显像剂显像灵敏度高。

## 4. 显像剂的选用

渗透剂不同，表面状态不同，使用的显像剂也应不同。就荧光渗透剂而言：光洁、光滑表面应优先选用溶剂悬浮显像剂，粗糙表面应优先选用干式显像剂，其他表面应优先选用溶剂悬浮湿式显像剂，然后是干式显像剂，最后考虑水悬浮或水溶解湿式显像剂。就着色渗透剂而言，任何表面状态，都应优先选用溶剂悬浮湿式显像剂，然后是水悬浮湿式显像剂。

水溶解湿式显像剂不适用于着色渗透检测剂系统和水洗型渗透检测体系。

## 六、观察和评定

### 1. 观察时机

观察显示应在显像剂施加后 7~60min 内进行。如显示的大小不发生变化，也可超过上述时间。

### 2. 观察光源

着色渗透检测时，缺陷显示的评定应在白光下进行，通常工件被检面处白光辐照度应大于等于 1000lx；当现场采用便携式设备检测，由于条件所限无法满足时，可见光辐照度可以适当降低，但不得低于 500lx。

荧光渗透检验时，显示的评定应在暗室或暗处进行，暗室或暗处白光辐照度应不大于 20lx，黑光辐照度要满足距离黑光灯 380mm 处，被检表面辐照度不低于  $1000\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。

### 3. 注意事项

1) 检测人员进入暗区，至少经过 3min 的黑暗适应后，才能进行荧光渗透检测。检测人员不能戴对检测有影响的眼镜。

2) 检测人员在黑光灯下发现显示后，首先判断显示的类型：相关显示、非相关显示或虚假显示。确定为相关显示后，要进一步确定缺陷性质、长度和位置，并做好记录。

3) 渗透检测一般不能确定缺陷的深度。

4) 在暗室检测人员容易疲劳，所以在暗室里连续工作的时间不能太长，否则会影响检测灵敏度。检测时应避免黑光直接或反射到检验者的眼睛，因为黑光可使人的眼球发荧光，人眼在照射后会出现模糊的感觉，加速眼睛疲劳，从而影响检测质量。

5) 检测完毕后，应按规定对被检工件加以标记。

## 七、后清洗及复验

完成渗透检测全过程之后，应去除显像剂涂层、渗透液残留痕迹及其他污物。

后清洗的目的是保证渗透检测后，不发生对受检件的损害或危害，并且去除任何会影响后续处理的残余物。

当出现下列情况之一时，需要进行复验：

- 1) 检测结束后，用标准试块校验时发现检测灵敏度不符合要求。
- 2) 发现检测过程中操作方法有误或技术条件出现改变时。
- 3) 合同各方有争议或认为有必要时。

需要复验时，必须对被检工件表面进行彻底清洗，以去掉缺陷内残余渗透检测剂，否则会影响检测灵敏度。

# 第八章

## 显示的解释与缺陷评定

渗透检测中的显示是缺陷存在的反映，但并非所有的显示都是由缺陷引起的。因此，必须对显示做出解释，确定这些显示产生的原因，即是否由缺陷引起。确定显示属于缺陷显示后，对缺陷的严重程度进行评定的过程称为缺陷评定。

### 一、显示的解释和分类

#### 1. 显示的解释

渗透检测显示（又称为痕迹显示）的解释，是对肉眼所见的着色或荧光显示进行观察和分析，确定产生这些显示的原因过程。即通过渗透检测显示的解释，确定出肉眼所见的显示究竟是由缺陷引起的，还是由工件结构等原因引起的，或仅是由于表面未清洗干净而残留的渗透剂所引起的。渗透检测后，对于观察到的所有显示均应做出解释，对有疑问不能做出明确解释的显示，应擦去显像剂直接观察，或重新显像、检查，必要且可能时应从预处理开始重新处理。

#### 2. 显示的分类

渗透检测显示一般分为三种类型：由缺陷引起的相关显示、由于工件结构等原因所引起的非相关显示、由于表面未清洗干净而残留的渗透剂所引起的虚假显示。

（1）相关显示 相关显示又称为缺陷痕迹显示、缺陷痕迹或缺陷显示，是指从裂纹、气孔、夹杂、疏松、折叠及分层等真实缺陷中渗出的渗透剂所形成的显示，它们是缺陷存在的标志。

（2）非相关显示 非相关显示又称为无关痕迹显示，是指与缺陷无关的、外部因素所造成的显示，通常不能作为渗透检测评定的依据，其形成原因可以归纳为三种情况：

1) 加工工艺过程中所造成的显示。

2) 由于工件的结构外形等所引起的显示。

3) 由于工件表面的外观缺陷引起的显示。

（3）虚假显示 虚假显示是由于渗透剂污染等所引起的渗透剂显示，往往因不

适当的方法或处理产生，或由操作不当引起。它不是由缺陷引起的，也不是由于工件结构或外形等原因引起的。产生虚假显示的常见原因包括：

- 1) 操作者手上的渗透剂污染。
- 2) 检测工作台上的渗透剂污染。
- 3) 显像剂受到渗透剂的污染。
- 4) 清洗时，渗透剂飞溅到干净的工件上。
- 5) 擦布或棉花纤维上的渗透剂污染。
- 6) 工件框、吊具上残存的渗透剂与清洗干净的工件接触造成的污染。
- 7) 工件上缺陷处渗出的渗透剂污染了邻近的工件等。

(4) 不同显示的区别 虽然相关显示、非相关显示和虚假显示都是痕迹显示，但其区别在于相关显示和非相关显示均是由某种缺陷或工件结构等原因引起的、由渗透剂回渗形成的显示，而虚假显示不是。相关显示影响工件的使用性能，需要进行评定；而非相关显示和虚假显示都不影响工件的使用性能，故不必进行评定。

## 二、缺陷评定

缺陷评定是对观察到的渗透相关显示进行分析，确定产生这种显示的原因及其分类过程。

### 1. 缺陷显示的分类

缺陷显示一般是根据其形状、尺寸和分布状况进行分类的。渗透检测的质量验收标准不同，对缺陷显示的分类也不尽相同。渗透检测标准对缺陷痕迹显示进行等级分类时，一般将其分为线状缺陷显示、圆形缺陷显示和分散状缺陷显示等类型。

### 2. 缺陷的分类

按照形成缺陷的不同阶段，一般将缺陷分为原材料缺陷、工艺缺陷和使用缺陷。

(1) 原材料缺陷 原材料缺陷是金属在冶炼过程中，金属由熔化状态、凝固成固体状态时产生的（如缩管、夹杂、钢锭裂纹及气泡等）。

(2) 工艺缺陷 工艺缺陷是与工件制造的各种工艺因素有关的缺陷，工艺缺陷又称为加工缺陷。

(3) 使用缺陷 工件在使用中产生的缺陷，例如应力腐蚀裂纹、疲劳裂纹和磨损裂纹等。

### 3. 常见缺陷及显示特征

(1) 焊接气孔 焊接气孔是一种常见缺陷，可分为表面气孔与内气孔，根据分布情况不同，又可分为疏散气孔、密集气孔和连续气孔等。气孔存在于焊缝中使焊缝有效面积减小，从而降低抗外载能力，特别对弯曲和冲击韧性影响较大。连续气孔是导致机构破断的原因之一。

渗透检测时，表面气孔的显示呈圆形、椭圆形或长圆条形，红色点（或黄绿色

荧光亮点) 均匀地向边缘减淡。

(2) 铸造气孔 铸造气孔是由于零件浇铸时, 进入了气体, 在铸件凝固时, 气泡没有排出来, 而在零件内部(内气孔)或在零件外部(表面气孔)形成的气孔。

渗透检测时铸造气孔的显示与焊接气孔的显示相似, 但由于回渗现象严重, 缺陷痕迹会随显像时间的延长而迅速扩展。

(3) 焊接裂纹 焊接裂纹是指在焊接过程中, 或焊接以后, 在焊接接头区域内出现的金属局部破裂现象。焊接裂纹除了降低焊缝强度外, 还将引起较高的应力集中, 从而使裂纹继续扩展, 导致整个结构件的破坏, 因此, 焊接裂纹是焊接接头中不能允许的缺陷。

焊接裂纹按其产生的部位不同, 可分为纵向裂纹、横向裂纹、熔合区裂纹、根部裂纹、火口裂纹及热影响区裂纹等; 按产生的温度和时间不同, 可分为热裂纹和冷裂纹。

渗透检测时, 热裂纹显示一般略带曲折的波浪状或锯齿状红色细条线(或黄绿色细亮条状); 冷裂纹显示一般呈直线红色细条纹(或黄绿色细亮条纹); 火口处裂纹系热裂纹, 呈星状, 有时呈圆形显示。

裂纹显示轮廓均较分明, 两端尖细, 中间稍宽, 两端红色色泽(或黄绿色荧光)渐淡最后消失。

(4) 淬火裂纹 淬火裂纹是工件在热处理淬火过程中产生的裂纹, 一般起源于刻槽、尖角等应力集中区。

渗透检测时, 通常呈红色或明亮黄绿色的细线条显示, 呈线状、树枝状或网状, 裂纹起源处宽度较宽, 沿延伸方向逐渐变细。

(5) 磨削裂纹 工件在磨削加工时, 由于砂轮粒度不当、砂轮太钝、磨削进刀量太大、冷却条件不好或工件上碳化物偏析等原因, 都可能引起磨削加工表面局部过热, 在加工应力作用下而产生的磨削裂纹。磨削裂纹一般比较浅, 其方向通常垂直于磨削方向。

渗透检测时, 磨削裂纹显示呈红色断续条纹, 有时呈现为网状条纹或黄绿色荧光亮网状条纹。

(6) 疲劳裂纹 工件在使用过程中, 长期受到交变应力或脉动应力作用, 可能在应力集中区产生疲劳裂纹。疲劳裂纹往往从工件上划伤、刻槽、陡的内凹拐角及表面缺陷处开始, 开口于工件表面, 其方向与受力方向垂直, 中间粗, 两头尖。渗透检测时, 疲劳裂纹显示呈红色光滑线条或黄绿色荧光亮线条。

(7) 应力腐蚀裂纹 应力腐蚀裂纹是处于特定腐蚀介质中的金属材料在拉应力作用下产生的裂纹。应力腐蚀裂纹通常与拉应力方向垂直。渗透检测时, 该缺陷显示呈红色光滑线条或黄绿色荧光亮线条。

(8) 未焊透 焊缝的母材与母材之间未被电弧熔化焊合而留下的空隙称为未焊透。未焊透能降低焊接接头的机械性能, 未焊透的缺口与尖角易产生应力集中, 承

载之后容易引起裂纹。

渗透检测时，能发现的未焊透显示呈一条连续或断续的红色线条（或黄绿色荧光亮线条），宽度一般较均匀。

（9）未熔合 焊缝金属和母材之间或焊缝金属与焊缝金属之间没有熔合在一起称为未熔合。未熔合分为坡口未熔合与层间未熔合两种，焊缝金属与母材之间没有熔合在一起称坡口未熔合，焊缝金属与焊缝金属之间没有熔合在一起称层间未熔合。

未熔合受外力作用时易产生开裂，因此未熔合是不允许存在的缺陷。层间未熔合渗透检测无法发现，坡口未熔合延伸到表面时渗透检测能发现。未熔合的显示呈现直线状或椭圆形的红色条状（或黄绿色荧光线条）。

（10）冷隔 冷隔是一种线性铸造缺陷，在浇铸时，两股金属液流到一起时没能真正地融合在一起，而呈现出紧密的、断线的或连续的线状表面缺陷。冷隔常出现在远离浇口的薄截面处。

渗透检测时，冷隔显示为连续的或断续的光滑红色线条（或黄绿色荧光亮线条）。

（11）折叠 折叠时在锻造或轧制零件的过程中，由于模具太大、放置位置不正确及坯料太大等原因而产生的一些金属重叠在零件表面上的缺陷，这种缺陷称为折叠。折叠通常与零件表面结合紧密，渗透剂渗入比较困难。

渗透检测时，缺陷显示呈连续或断续红色线条（或黄绿色荧光亮线条）。

（12）疏松 疏松是铸件在凝固晶界过程中，补缩不足而形成的不连续的形状不规则的孔洞。

渗透检测时，由于疏松形态的不同，缺陷显示也不同，有的呈密集点状，有的呈密集短条状，有的呈聚集块状。

#### 4. 缺陷显示的评定

对缺陷显示，均应进行定位、定量及定性等评定。渗透检测时，定量评定一定要特别注意缺陷实际尺寸与缺陷显示尺寸的区别。

在标准中一般将缺陷显示分为圆形缺陷显示和线性缺陷显示。缺陷显示评定等级，需按指定的相应质量验收标准确定，并对受检工件做出合格与否的结论。

超出质量验收标准又允许打磨或补焊的工件，应在打磨后再次进行渗透检测，确认缺陷被打磨干净后，才可验收或补焊，补焊后需再次进行渗透检测或其他方法检验。

### 三、渗透检测记录和报告

渗透检测时应做好检测原始记录，渗透检测完成后应在原始记录的基础上发出渗透检测报告。按照无损检测质量管理的一般要求，通常检测记录的信息量应不少于检测报告的信息量。渗透检测记录及报告应包括如下内容：

## 1. 受检工件

委托单位；被检工件：名称、编号、规格、坡口形式、焊接方式和热处理状态。

## 2. 检测方法及条件

检测设备：渗透检测剂名称和牌号；检测规范：检测比例、检测灵敏度校验及试块名称、预清洗方法、渗透剂施加方法、乳化剂施加方法、去除方法、干燥方法、显像剂施加方法、观察方法和后清洗方法，渗透时间、渗透温度、乳化时间、水压及水温，干燥温度和时间、显像时间。

## 3. 检测结论

检测标准名称和质量验收标准名称；缺陷性质、大小及等级；检测结果。

## 4. 示意图

渗透检测部位、缺陷显示记录及工件草图。

## 5. 其他

检测和审核人员签字及技术资格，检测日期等。

# 第九章

## 质量控制与安全防护

### 一、渗透检测质量控制

渗透检测体系主要包括渗透检测人员、渗透检测设备和材料、渗透检测工艺方法和渗透检测环境五个方面，简称“人”“机”“料”“法”“环”。渗透检测的质量控制就是对这五个方面进行控制管理。

#### 1. 渗透检测剂的性能校验

- (1) 渗透剂的性能校验包括：
  - 1) 外观检查。
  - 2) 润湿性能检查。
  - 3) 渗透剂的含水量和容水量的测定。
  - 4) 腐蚀性检验。
  - 5) 可去除性检查。
  - 6) 渗透剂亮度的比较试验。
  - 7) 灵敏度黑点试验。
  - 8) 荧光渗透剂的黑光稳定性试验。
  - 9) 渗透剂的热稳定性试验。
  - 10) 渗透剂的温度稳定性试验。
  - 11) 槽液寿命试验。
  - 12) 渗透剂储存稳定性试验。
  - 13) 渗透剂的黏度测定。
  - 14) 渗透剂的闪点测定。
  - 15) 持续停留时间试验。
- (2) 乳化剂的性能校验包括：
  - 1) 外观检查。
  - 2) 乳化性能检查。

- 3) 亲油性乳化剂的允许含水量检查。
- 4) 亲水性乳化剂的容水量测定。
- 5) 温度稳定性检查。
- 6) 亲油性乳化剂的槽液寿命检查。
- 7) 亲水性乳化剂的浓度。
- (3) 溶剂去除剂的性能校验包括：
  - 1) 外观检查。
  - 2) 去除性能检查。
  - 3) 储存稳定性检查。
- (4) 显像剂的性能校验包括：
  - 1) 外观检查。
  - 2) 干粉显像剂的性能校验。
  - 3) 湿式显像剂的性能校验。
  - 4) 显像剂的可去除性检查。

## 2. 渗透检测剂系统灵敏度鉴定

灵敏度鉴定就是用当前使用的渗透检测剂系统，按规定的工艺对标准试块进行处理，将检测结果与使用过的合格渗透检测剂系统的检测结果进行比较，以评定当前渗透剂系统的灵敏度。

## 3. 渗透检测剂的质量控制

(1) 渗透检测剂的选用 渗透检测剂，必须采用同一家厂商提供的、同族组的产品，不同族组的产品不能混用。未经有关部门鉴定、验收或批准的产品不准选用。

(2) 渗透检测剂的抽查 渗透检测剂，应在入厂时进行抽查，合格后方可投入使用。并抽取 1kg 合格的渗透检测剂作为校验使用过程中渗透检测剂的标准样品。

### (3) 渗透检测剂在使用过程中的校验

#### 1) 渗透剂的校验。

① 渗透剂的亮度比较校验。校验周期为三个月，被检测渗透液的亮度下降到同批标准样品的 85% 以下时，不准使用。

② 渗透剂的含水量测定。校验周期为三个月，不符合要求时不准使用。

③ 渗透剂的腐蚀性能校验。校验周期为六个月，不符合要求不能使用。

④ 渗透剂的可去除性校验。每天检查渗透剂，如发现有明显的沉淀或可去除性能下降，应进行可去除性校验。每天进行渗透检测系统灵敏度测定，若不符合要求，则不准使用。

⑤ 渗透剂的灵敏度校验。每个工作班次均使用 B 型标准试块进行渗透剂的灵敏度校验，若低于同批材料的标准样品，则不准使用。

每六个月使用 C 型标准试块对渗透剂进行灵敏度校验，若低于同批材料的标准

样品，则不准使用。

2) 乳化剂的校验。

① 乳化剂的外观检查。每天检查乳化剂的外观，若发现有明显沉淀及黏度增大而引起乳化能力下降时，则不能使用。

② 乳化剂的乳化能力和可去除性检查校验。校验周期为一个月，若发现有乳化能力下降或清洗性能不良，则不能使用。

③ 乳化剂的黑光检查。

校验周期为一周，在黑光灯下观察乳化剂，如果发现乳化剂中有荧光渗透剂污染（或着色渗透剂污染）而影响使用时，则不准使用。

3) 显像剂的校验。

① 干式显像剂的外观检查。每个工作班次均需进行一次外观检查，若发现明显的荧光及凝聚现象，则不准使用。

② 干式显像剂的松散度校验。校验周期为一个月，若不符合要求，则不准使用。

③ 湿式显像剂的荧光渗透液（或着色渗透液）污染或浓度校验。校验周期为一个月，在黑光灯（或日光）下若发现有明显的荧光渗透剂（或着色渗透剂）污染或浓度不符合要求，则不准使用。

④ 溶剂悬浮或水悬浮湿式显像剂的沉淀性校验。校验周期为一个月，若校验结果不符合要求时，则不准使用。

⑤ 溶剂悬浮或水悬浮湿式显像剂的再悬浮校验。校验周期为一个月，若校验结果不符合要求时，则不准使用。

⑥ 干式与湿式显像剂的显像灵敏度校验。校验周期为一周，使用 A 型标准试块进行试验，若发现显像能力下降和失去附着力，则不能使用。

#### 4. 渗透检测设备、仪器和试块的质量控制

##### （1）渗透检测工艺设备的质量控制

1) 渗透检测工艺设备的基本要求。根据受检零件的尺寸、规格数量及形状等，配备各种类型的工艺设备。

水洗槽应配备一定温度的水加热装置、水喷枪清洗工具，并可调节水压及流量。渗透剂槽、乳化剂槽应配置泵和喷浇液体的喷嘴，以便喷浇液体或更换槽液。显像剂内应加设电动搅拌器。

2) 渗透检测工艺设备的校验。渗透检测工艺设备应每半年维修一次，对空气管路的清洁度、槽液的水平面、设备的清洁度应每个工作班次检查一次。

##### （2）黑光灯的质量控制

1) 黑光灯的基本要求。黑光灯的波长范围为 320 ~ 400nm，峰值为 365nm，距黑光灯滤光玻璃罩表面 380nm 处的紫外线照度不应低于  $1000\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。水槽上方设置的吊挂式防爆黑光灯的黑光辐照度不应低于  $800\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。黑光灯电源电压波动

不能超过  $\pm 10\%$ 。

2) 黑光灯的校验。黑光灯的黑光辐照度应每周检查一次。黑光辐照强度用黑光辐照计或黑光辐照度计测量。

(3) 黑光辐照计的质量控制

1) 黑光辐照计的基本要求。黑光辐照计用于测量黑光辐照度, 波长范围为 320~400nm, 峰值应为 365nm。

2) 黑光辐照计的校验。黑光辐照计应每年由计量部门校验一次。

(4) 荧光亮度计的质量控制

1) 荧光亮度计的基本要求。荧光亮度计用以测定和比较荧光渗透剂的荧光亮度, 波长为 430~600nm, 峰值为 500~520nm。

2) 荧光亮度计的校验。荧光亮度计应每年由计量部门校验一次。

(5) 白光辐照度计的质量控制

1) 白光辐照度计的基本要求。白光辐照度计用以测定白光辐照度, 照度范围应为 0~1600lx 或 0~6450lx。

2) 白光辐照度计的校验。白光辐照度计应每年由计量部门校验一次。

(6) 渗透检测用标准试块的质量控制 铝合金淬火试块 (A型试块) 用于比较两种渗透检测剂的优劣, 不锈钢镀铬试块 (B型试块) 用于校验操作方法和工艺系统灵敏度, 黄铜板镀铬裂纹试块 (C型试块) 用于鉴别各类渗透检测剂性能和灵敏度等级。上述三种标准试块的制造厂家应经上级业务主管部门的认可并经鉴定合格。

荧光渗透检测使用的标准试块不得用于着色渗透检测, 反之亦然。

试块使用之后, 要按说明书的规定进行彻底清洗, 不应残留任何渗透检测剂的痕迹。当发现试块有堵塞或灵敏度与原先比较有下降时, 必须及时更换。

## 5. 渗透检测工艺操作的质量控制

渗透检测工艺操作系统包括以下几部分内容: 表面准备和预清洗、渗透、去除、干燥、显像、观察及评定及后清洗等。

渗透检测工艺操作系统质量控制的总体要求是: 每个工作班开始之前或渗透检测工艺操作条件发生变化时, 用 B型试块, 校验工艺操作系统的灵敏度, 缺陷显示痕迹的形貌、数量、亮度及颜色深度, 应与试块显示的复制品进行对比, 合格后方可进行渗透检测工作。试块是要反复使用的, 因此每次使用后要彻底清洗, 以保证去除缺陷中的荧光渗透液或着色渗透液的残余。渗透检测过程中, 严格执行渗透检测工艺规程。

(1) 表面清理和预清洗的质量控制 所有表面准备方法不得损伤零件表面, 不得堵塞表面开口缺陷。清洗材料及清洗方法不得影响渗透检测剂的性能, 且不腐蚀或损坏被检工件。工件表面及缺陷内的油脂、铁锈等污物去除之后, 工件必须进行干燥, 以便排除缺陷内的有机溶剂及水分。

(2) 渗透操作的质量控制 在渗透时间内, 渗透液必须将被检部位全部润湿覆盖。工件及渗透液的温度应保持在 10 ~ 50℃ 之间。渗透时间应根据渗透剂的种类、被检工件材料及用途、缺陷的性质及细微程度来确定, 应确保规定的渗透时间。

(3) 施加乳化剂的质量控制 乳化剂要与渗透剂同族组, 施加方法要适当, 要确保被检表面能均匀乳化。

乳化时间取决于乳化剂的乳化能力、浓度、工件表面状态和缺陷类型等因素, 要严格控制乳化时间, 必须防止“过乳化”。

(4) 去除表面渗透剂的质量控制

1) 水洗型和后乳化型渗透剂的去除。工件经充分渗透或乳化以后, 清洗去除时, 必须边清洗边观察。清洗荧光渗透剂时, 在黑光灯下观察。清洗着色渗透剂时, 在适当白光光照下观察, 以免清洗不足或清洗过度。

2) 溶剂去除型渗透剂的去除。先用不起毛和有吸附能力的布擦去大部分渗透剂, 再用不起毛、清洁、干燥及沾有有机溶剂的布擦去剩余在表面上的渗透剂。不允许直接用有机溶剂对工件喷洗。

(5) 干燥操作的质量控制 用清洁、干燥和经过过滤的压缩空气吹去工件表面的水分, 其压力不超过 1.5 MPa, 喷嘴与零件相距不小于 30cm。

用温度不超过 80℃ 的热空气循环干燥零件。时间随零件尺寸及材料而定, 干燥时间应尽量短。

(6) 显像操作的质量控制 施加在零件表面上的干粉显像剂, 分布要均匀, 显像剂层要薄。悬浮显像剂使用前要充分搅拌均匀, 使显像剂粉末保持悬浮分散状态。用喷涂法显像时, 喷涂装置应与被检表面保持一定的距离 (200 ~ 300mm), 使显像剂在到达工件表面时, 几乎是干的。避免过近而造成淌流或局部覆盖过厚。

显像时间应根据渗透检测方法及缺陷的性质确定, 应不少于 7min。

(7) 观察及评定操作的质量控制

1) 荧光渗透检验操作。黑光灯启动 10 ~ 15min 后方可开始工作。被检表面上的紫外线辐照度不应低于  $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。不可佩戴光敏眼镜, 检测人员进入暗室后, 眼睛至少要有 5min 的暗场适应时间, 可佩戴防紫外线的无色镜。

2) 着色渗透检验操作。必须在自然光或白光辐照度不低于 500lx 的灯光下检验, 并应无其他反射光。

(8) 后清洗操作的质量控制 工件检验完毕, 应清洗残余的渗透剂和显像剂。如果残余渗透剂和显像剂对工件随后的处理或使用有影响, 则清洗更需彻底。清洗后的工件应干燥处理或进行防腐蚀处理。

(9) 工件标识的质量控制 工件显示出缺陷痕迹, 可根据需要分别用照片、示意图或复印等方法记录缺陷痕迹显示位置及形貌。

渗透检测合格的工件, 按设计或工艺制造部门规定的标印方法和标印位置做出“合格”标记。不合格的工件, 必须做出“不合格”的明显标记。合格工件与不合

格工件应严格隔离放置。

(10) 渗透检测环境条件的控制 渗透检测场地应有足够的活动空间，应设有排水沟及水磨石地面。渗透检测场地内，应设置抽排风装置、压缩空气管路及暖气设施，渗透检测场地内温度不应低于10℃。静电喷涂间墙壁应采用瓷砖砌成，地面应保持15°~20°的倾斜，以便排污水。荧光液废水及其他污水处理应符合环境保护要求。

## 二、渗透检测安全防护

### 1. 防火安全

渗透检测所使用的渗透检测剂，除干粉显像剂、乳化剂以及金属喷灌内使用的氟利昂气体是不燃性物质外，其他大部分是可燃性有机溶剂。因此，在使用这些可燃性渗透检测剂时，一定要采取必要的防火措施。

(1) 储存渗透检测剂注意事项 储存渗透检测剂的容器应加盖密封。储存地点应尽量挑选冷暗处，并且避免烟火、热风、阳光直射等。压力喷罐严禁在高温处存放。

(2) 压力喷罐制品的防火 压力喷罐内充填渗透检测剂的同时，还要充填丙烷气或氟利昂等高压液化气。渗透检测剂本身是一种可燃性物质，充填丙烷气后，着火的可能性更大。所以，操作时必须充分注意防火。

(3) 灭火器设置 使用可燃性渗透检测剂时，不仅必须充分注意防火，而且为了防止万一，还应该在操作现场及渗透检测剂储存处设置灭火器。

### (4) 防火安全措施

- 1) 操作现场应做到文明整洁，并有切实可行的防火措施。
- 2) 操作现场应备有专人管理的灭火器。
- 3) 除使用的渗透检测剂外，操作现场应尽量避免大量储存渗透检测剂。
- 4) 盛装渗透检测剂的容器应加盖密封。对于清洗剂和显像剂等挥发性大的物质，使用后必须密封保管。
- 5) 避免在火焰附近以及在高温环境下操作，特别是压力喷罐，如果环境温度超过50℃，应特别引起注意。操作现场禁止明火存在。
- 6) 当环境温度较低时，压力喷罐内压力将降低，喷雾将减弱且不均匀。此时，可将其放入30℃以下的温水中，待加热后再用，但绝不允许将压力喷罐直接放在火焰附近来达到加温目的。

### 2. 卫生安全

渗透检测剂中的某些有机溶剂是有毒的，如果将它们的蒸汽或雾状气体大量吸入体内，可能会引起人体中毒。使用荧光渗透检测时，短紫外线如直接照射操作人员，会使操作人员患角膜炎等疾病。因此，采取积极的卫生安全防护是十分必要的。

● 卫生安全防护措施：

- 1) 在不影响渗透检测灵敏度，且满足工件技术要求的前提下，尽可能采用低毒配方来代替有毒或高毒的配方。
- 2) 采用先进技术，改进渗透检测工艺和完善渗透检测设备，特别是增设必要的通风装置，降低毒物在操作场所空气中的浓度。
- 3) 严格遵守操作规程，正确使用个人防护用品。
- 4) 当紫外线通过三氯乙烯时，将产生有害光气。在除油过程中，注意不要让三氯乙烯滞留在工件的盲孔里或其他凹陷之处。
- 5) 波长在320nm以下的短波紫外线对人眼有害，所以严禁使用不带滤波片或滤波片破裂的紫外线灯。
- 6) 操作现场严禁吸烟，一是防火安全需要，二是防止吸入有毒气体。
- 7) 三氯乙烯蒸汽除油时，要向槽内经常添加三氯乙烯溶液，放置加热器露出液面，否则会引起过热，产生剧毒气体。
- 8) 显像粉会使皮肤干燥，刺激人的器管，所以，操作者应戴橡皮手套，工作现场应有抽风装置。
- 9) 工作前，操作者手上应涂防护油，最好带上防护手套和围裙，可以避免皮肤与渗透检测剂直接接触而污染，并防止皮肤干燥或开裂，甚至引起皮炎。

# 第十章

## 渗透检测应用

### 一、焊接件的渗透检测

在对焊缝进行渗透检测时，无论是中间阶段的未成形焊缝，还是焊接完毕后的已成形焊缝，多采用溶剂去除型着色渗透检测法，也可采用水洗型荧光法。

#### 1. 预处理

借助机械的方法清除焊缝表面的焊渣、飞溅、焊药及氧化皮等。清除过程中要注意不要让铁屑粉末堵塞缺陷。表面清理完成后，还应用清洗液清洗焊缝表面油污，最后吹干。若焊缝表面已生锈则必须进行除锈处理。

#### 2. 渗透检测步骤

渗透剂的施加方法一般用刷涂和喷涂，小零件也可用浸涂。去除多余渗透剂一般采用溶剂去除法，在保证去除干净的前提下，应尽量缩短溶剂与焊缝的接触时间，以免产生过洗现象。

显像剂以喷涂法为最好，显像3~5min后用肉眼或放大镜观察，每隔5min观察一次，重复观察2~3次。

#### 3. 注意事项

焊缝起弧和熄弧处易产生细微的火口裂纹，检测时应特别注意。焊缝渗透检测后，需进行后处理。尤其是多层焊道的焊缝，每层焊缝渗透检测后的处理更加重要，必须清理干净。否则残留的渗透剂与显像剂会影响随后的焊接并产生严重缺陷。

当对钛合金、镍基合金或奥氏体钢焊缝进行渗透检测时，应严格控制渗透剂中氟、氯、硫元素的含量。

### 二、铸件的渗透检测

铸件表面粗糙，渗透检测时表面清洗困难，因此常采用水洗型渗透法。为确保灵敏度，采用水洗型荧光法较好。

## 1. 预处理

铸件表面准备应采用锉刀、细砂轮及喷砂等机械方法处理，然后用水或有机溶剂进行预清洗。对于小铸件，洗净后置于80℃的烘箱中干燥，完成后待冷却到30℃即可开始检测。

## 2. 渗透检测步骤

小工件渗透剂的施加可用浸涂法，渗透时间10min左右。较大的铸件可用刷涂法。清洗可用淋浴状水直接冲洗。对荧光渗透法而言，为掌握清洗质量的好坏，可在紫外光下观察工件表面渗透液残留情况后再次清洗。清洗完毕后擦干水迹，必要时还需烘干。通常使用干粉显像剂，显像时间7~60min左右。荧光渗透检测时，应在暗室或暗处观察，暗室或暗处的白光度应小于20lx。距光源380nm处的工件表面的紫外线度应不小于1000μW/cm<sup>2</sup>。观察过程中，还应随时对缺陷做出标记和记录。

## 3. 注意事项

对重要的铸件，常使用精密铸造法制造，表面粗糙度较低，这类铸件可使用高灵敏度的后乳化型荧光渗透法进行检验。

## 三、锻件的渗透检测

锻件是可锻金属经过锻造加工得到，锻件晶粒很细，且有方向性。与铸件相比，锻件承载能力更高，缺陷更紧密细小。渗透检测时，要求使用较高灵敏度的后乳化型荧光法，渗透时间也较长。

## 1. 预处理

锻件表面的准备可使用三氯乙烯蒸汽除油或汽油清洗。如工件表面油污很少，则可用浸蘸酒精丙酮的纱布擦拭干净。若工件表面氧化皮较多，则应用抛光、铁刷、喷沙或超声清洗等机械方法或用酸洗、碱洗等化学方法清理。

## 2. 渗透检测步骤

将清理干净的锻件放入干燥箱内干燥，干燥温度为80℃左右。烘干后，冷却到30℃左右进行渗透检测。渗透时间一般为15~30min，渗透完毕，去除锻件表面多余的渗透液，将锻件放入乳化槽内浸涂乳化。

乳化后的锻件，用30~40℃的温水冲洗。水流应呈淋浴状，均匀地洒于锻件表面。清洗效果可用黑光灯检查。锻件表面清洗干净后，再用纱布擦去锻件表面上的水分，或用压缩空气将锻件表面吹干。锻件表面干燥后，即可进行显像。

显像可用干粉显像剂，也可用溶剂悬浮显像剂。干粉显像时，可使用静电喷枪喷涂，也可将锻件浸埋于干粉显像剂中，还可以将锻件置于喷粉柜中喷涂。使用溶剂悬浮显像剂显像时，可用压力喷罐喷涂。显像时间一般为20min左右。

显像后的锻件，送入暗室，在紫外线灯下观察检验。暗室处的白光度应小于20lx。距光源380nm处的工件表面的黑光度应不小于1000μW/cm<sup>2</sup>。观察时，还

应随时对缺陷做出标记并记录。

### 3. 注意事项

对高强钢酸洗时，要注意防止氢脆现象，酸洗后应立即进行去氢处理。渗透检测时，渗透剂应在被检锻件表面均匀覆盖。

### 4. 在用承压设备与维修件渗透检测

对在用承压设备进行渗透检测或在用设备维修件渗透检测时，应注意的是：如果制造时采用的材料是高强度钢以及对裂纹敏感的材料，或长期工作在腐蚀介质环境下，有可能发生应力腐蚀裂纹的场合，其内壁宜采用荧光渗透检测法进行检测，或结合后乳化渗透检测法选择更高的方法对在用承压设备进行渗透检测。检测现场环境应符合相关标准的要求。

对在用承压设备检测而言，表面处理非常重要。对表面有涂装和密封剂的工件可采用化学腐蚀法去除漆层，也可采用酸洗或碱洗。采用酸洗后，应把工件烘干，去除表面的氢，防止氢脆现象的发生。

# 第十一章

## 渗透检测通用工艺规程和工艺卡

### 一、渗透检测通用工艺规程

渗透检测通用工艺规程是指用于指导渗透检测工程技术人员和实际操作人员进行渗透检测工作，处理检测结果，进行质量评定并做出合格与否的结论，从而完成渗透检测任务的技术文件。

渗透检测通用工艺规程编制的依据是：根据委托单位提供的渗透检测委托书、设计资料、受检工件图样、渗透检测部位、国家标准、行业标准及企业标准等技术资料，合理选用渗透检测工艺方法、设备仪器及材料，以确保受检工件达到委托书、设计资料及有关技术条件的要求。

渗透检测通用工艺一般以文字说明为主，它应具有一定的覆盖性、通用性和可选择性。它至少应包括以下内容：

- 1) 适用范围：指明该检验规程适用于哪类工件、哪组工件、哪种产品的焊缝及焊缝类型等。
- 2) 引用标准、法规：技术文件、安全技术规范和技术标准等。
- 3) 检测人员：检测人员的资格、视力等要求。
- 4) 检测设备、器材和材料：渗透检测设备型号、试块的名称、渗透检测剂的名称和牌号等。
- 5) 检测表面准备：被检工件表面的准备方法及要求等。
- 6) 检测时机：指不同材料的被检工件渗透检测的工序安排、时间安排等。
- 7) 检测工艺和检测技术：指明渗透检测时可选择的渗透检测方法，渗透检测剂的施加方法，清洗或去除方法、干燥方法、观察方式、渗透乳化和显像的时间及温度控制，清洗用水压、水温及水流量控制，干燥温度和时间的要求以及后清洗的要求等。
- 8) 检测结果的评定和质量分级：指明检测结果评定所依据的技术标准、安全技术规范和验收合格级别等。

9) 检测记录、报告和资料存档：规定检测记录、报告内容及格式要求，资料、档案管理要求，安全管理规定等。

10) 编制（级别）、审核（级别）和批准人，制定日期等。渗透检测通用工艺规程的编制、审核及批准应符合相关法规、安全技术规范或技术标准的规定。

11) 安全措施：制定检测过程中相关的卫生安全及防火安全防护措施。

## 二、渗透检测工艺卡

渗透检测工艺卡是依据渗透检测通用工艺规程，结合受检产品或部件的具体情况而单独编写的，检测对象就是该受检部件。工艺卡多为图表形式，其基本内容应包括：

- 1) 工艺卡编号：一般为年号加流水序号。
- 2) 产品部分：产品名称、产品编号、制造、安装或检验编号，设备类别、规格尺寸、材料牌号、热处理状态和表面状态。
- 3) 检测设备、器材和材料：检测用仪器设备名称、型号、试块名称、检测附件及检测材料。
- 4) 检测工艺参数：检测方法、检测部位、检测比例。
- 5) 检测技术要求：执行标准、验收级别。
- 6) 检测部位示意图：包括检测部位、缺陷部位及缺陷分布等。
- 7) 编制人（级别）和审核人（级别）。
- 8) 制定日期。

实施渗透检测的人员应按渗透检测工艺卡进行严格操作。

## 三、工作实例

**【例 1】**在建工业管道，如图 6-11-1 所示，规格为  $\phi 108mm \times 5mm$ ，材质为 1Cr18Ni9Ti，总长为 100m，共有 20 个对接焊缝接头。焊后外表面进行酸洗、钝化处理，整体进行水压试验。图样要求：对接焊缝外表面 20% 渗透检测抽查，按 JB/T 4730.5—2005 标准，I 级合格。自选条件，优化编制渗透检测工艺卡（表 6-11-1）。

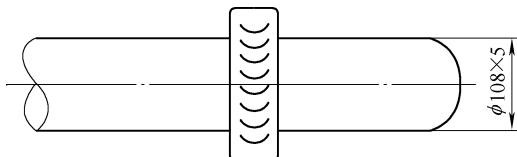
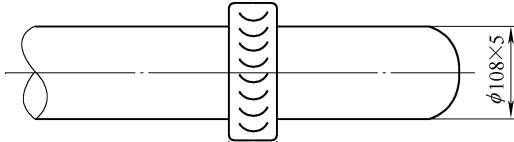


图 6-11-1 工业管道

表 6-11-1 工业管道渗透检测工艺卡

设备名称	压力管道	规格尺寸	$\phi 108mm \times 5mm$	热处理状态	—	检测时机	焊后 24h
表面状态	打磨	材料牌号	1Cr18Ni9Ti	检测部位	对接焊缝	检测比例	20%
检测方法	IIC-d	检验温度	10 ~ 50°C	标准试块	B 型	检测标准	JB/T 4730.5—2005

(续)

观察方式	白光目视	渗透剂型号	DPT-5	乳化剂型号	—	去除剂型号	DPT-5
显像剂型号	DPT-5	渗透时间	≥10min	干燥时间	自然干燥	显像时间	≥7min
乳化时间	—	检测设备	携带式喷罐	黑光辐照度	—	可见光辐照度	≥1000lx
渗透剂施加方法	喷涂	乳化剂施加方法	—	去除方法	擦洗	显像剂施加方法	喷涂
水洗温度	—	水压	—	验收标准	JB/T 4730.5—2005	合格级别	I 级
渗透检测质量评级要求	① 不允许存在任何裂纹 ② 不允许线性缺陷显示、圆形缺陷显示（评定框尺寸 35mm × 100mm），长径 $d \leq 1.5$ mm，且少于或等于一个						
示意草图							
序号	工序名称	操作要求及主要工艺参数					
1	表面准备	用不锈钢丝盘磨光机打磨去除焊缝及两侧 25mm 范围内焊渣、飞溅，酸洗、钝化处理被检面					
2	预清洗	用清洗剂将被检表面清洗干净					
3	干燥	自然干燥					
4	渗透	喷涂施加渗透剂，使之覆盖整个被检表面，在整个渗透时间内始终保持润湿，渗透时间应不少于 10min					
5	去除	先用干燥、洁净不脱毛的布或纸依次擦拭，直至大部分多余渗透剂被去除后，再用蘸有清洗剂的干净不脱毛布或纸进行擦拭，直至将被检表面上多余的渗透剂全部擦净。但应注意，擦拭时应按一个方向进行，不得往复擦拭，不得用清洗剂直接喷洗被检表面					
6	干燥	自然干燥，时间尽量短					
7	显像	喷涂法施加显像剂，喷嘴距被检表面距离 300~400mm，喷嘴方向与被检面夹角为 30°~40°，使用前应充分将喷罐摇动使显像剂均匀，不可在同一地点反复多次施加。显像时间不应少于 7min					
8	观察	显像时间 7~60min 内进行观察，被检表面处白光辐照度应不小于 100lx，必要时可用 5~10 倍放大镜进行观察					
9	复验	当检测灵敏度不符合要求、操作方法有误或技术条件改变时、合同各方有争议或认为有必要时，应进行复验。复验时，应将被检表面彻底清洗，重新进行渗透检测操作各步骤					
10	后清洗	用湿布擦除被检面显像剂或用水冲洗					
11	评定与验收	根据缺陷显示尺寸及性质按 JB/T 4730.5—2005 进行等级评定，I 级合格					
12	报告	出具报告内容至少包括按 JB/T 4730.5—2005 标准规定的內容					
备注	① 渗透检测剂中的氯、氟元素的含量质量比不得超过 1% ② 渗透检测实施前，检测操作方法或条件发生变化时，用 B 型试块进行校验						
编制人及资格				审核人及资格			
日期				日期			

**【例 2】**某在制  $10m^3$  储罐如图 6-11-2 所示, 设备编号 R03, II 类容器, 工作压力  $2.0MPa$ , 盛装腐蚀性介质。壳体材质为  $16MnR + 304L$  复合钢板, 直径  $\phi 1800mm$ , 板厚  $18 + 3mm$ , 工件温度为  $6^{\circ}C$ 。要求检测所有焊接接头内表面缺陷。执行标准为 JB/T 4730.5—2005, I 级合格, 高灵敏度。依据 JB/T 4730.5—2005 对该容器焊缝编制渗透检测工艺卡 (表 6-11-2)。

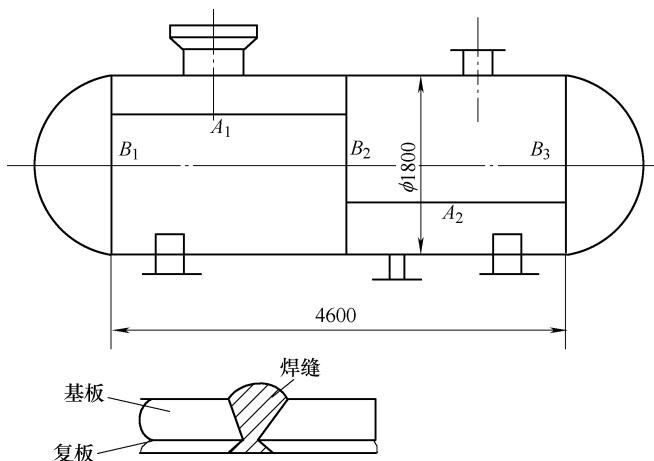


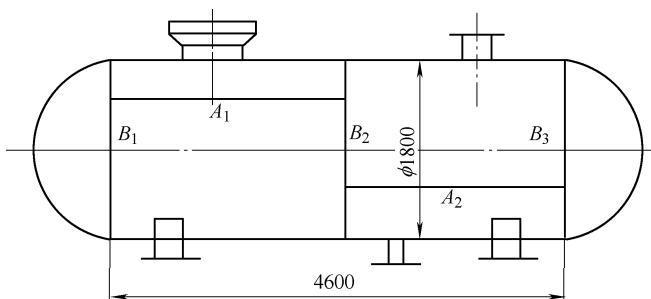
图 6-11-2 储罐

表 6-11-2 在制储罐渗透检测工艺卡

设备名称	储罐	规格尺寸	$\phi 1800mm$	热处理状态	—	检测时机	焊后 24h
表面状态	打磨	材料牌号	R03	检测部位	接焊接头内表面	检测比例	100%
检测方法	IIC-d	检验温度	$6^{\circ}C$	标准试块	A 型 B 型	检测标准	JB/T 4730.5—2005
观察方式	白光目视	渗透剂型号	DPT-5	乳化剂型号	—	去除剂型号	DPT-5
显像剂型号	DPT-5	渗透时间	$\geq 10min$	干燥时间	自然干燥	显像时间	$\geq 7min$
乳化时间	—	检测设备	携带式喷罐	黑光辐照度	—	可见光辐照度	$\geq 1000lx$
渗透剂施加方法	喷涂	乳化剂施加方法	—	去除方法	擦洗	显像剂施加方法	喷涂
水洗温度	—	水压	—	验收标准	JB/T 4730.5—2005	合格级别	I 级
渗透检测质量评级要求	① 不允许存在任何裂纹 ② 不允许线性缺陷显示、圆形缺陷显示 (评定框尺寸 $35mm \times 100mm$ ), 长径 $d \leq 1.5mm$ , 且少于或等于一个						

(续)

示意草图



序号	工序名称	操作要求及主要工艺参数
1	表面准备	用不锈钢丝盘磨光机打磨去除焊缝及两侧 25mm 范围内焊渣、飞溅，酸洗及钝化处理被检面
2	预清洗	用清洗剂将被检表面清洗干净
3	干燥	自然干燥
4	渗透	喷涂施加渗透剂，使之覆盖整个被检表面，在整个渗透时间内始终保持润湿，渗透时间应不少于 10min
5	去除	先用干燥、洁净不脱毛的布或纸依次擦拭，直至大部分多余渗透剂被去除后，再用蘸有清洗剂的干净不脱毛布或纸进行擦拭，直至将被检表面上多余的渗透剂全部擦净。但应注意，擦拭时应按一个方向进行，不得往复擦拭，不得用清洗剂直接喷洗被检表面
6	干燥	自然干燥，时间尽量短
7	显像	喷涂法施加显像剂，喷嘴距被检表面距离 300 ~ 400mm，喷嘴方向与被检面夹角为 30° ~ 40°，使用前应充分将喷罐摇动使显像剂均匀，不可在同一地点反复多次施加。显像时间不应少于 7min
8	观察	显像时间 7 ~ 60min 内进行观察，被检表面处白光辐照度应 $\geq 100\text{lx}$ ，必要时可用 5 ~ 10 倍放大镜进行观察
9	复验	当检测灵敏度不符合要求、操作方法有误或技术条件改变时、合同各方有争议或认为有必要时，应进行复验。复验时，应将被检表面彻底清洗，重新进行渗透检测操作各步骤
10	后清洗	用湿布擦除被检面显像剂或用水冲洗
11	评定与验收	根据缺陷显示尺寸及性质按 JB/T 4730.5—2005 进行等级评定，I 级合格
12	报告	出具报告内容至少包括按 JB/T 4730.5—2005 标准规定的内容

备注

- ① 渗透检测剂中氯、氟元素含量的质量比不得超过 1%
- ② 由于工件温度低于标准温度，必须采用铝合金试块确定检测规范，将铝合金试块的 A 部分和检测剂放在工件的环境（6℃）下进行检测操作，将铝合金试块的 B 部分和检测剂放在标准温度下，按同一规范进行检测，将两种检测结果比较，结果基本相同时，可认为低温规范可行
- ③ 渗透检测实施前，用 B 型试块确定灵敏度等级

编制人及资格		审核人及资格	
日期		日期	

**【例 3】**一批镍基合金锻件，结构如图 6-11-3 所示，规格  $\phi 14\text{mm} \times 3\text{mm}$ ，表面光滑，图样设计要求进行 100% 表面渗透检测，执行标准 JB/T 4730.5—2005，检测灵敏度等级 2 级，I 级合格。自选条件，优化编制渗透检测工艺卡（表 6-11-3）。

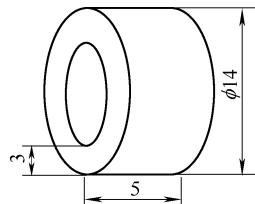


图 6-11-3 镍基合金锻件

表 6-11-3 锻件渗透检测工艺卡

设备名称	锻件	规格尺寸	$\phi 14\text{mm} \times 3\text{mm}$	热处理状态	—	检测时机	锻造后
表面状态	锻造表面	材料牌号	镍基合金	检测部位	所有表面	检测比例	100%
检测方法	ID-a	检验温度	10 ~ 50°C	标准试块	B 型	检测标准	JB/T 4730.5—2005
观察方式	黑光灯目视	渗透剂型号	985P12	乳化剂型号	9PR12	去除剂型号	水
显像剂型号	氧化镁粉	渗透时间	$\geq 10\text{min}$	干燥时间	$5 \sim 10\text{min}$	显像时间	$\geq 7\text{min}$
乳化时间	$\leq 2\text{min}$	检测设备	黑光灯	黑光辐照度	$\geq 1000\mu\text{W}/\text{cm}^2$	可见光辐照度	$\leq 20\text{lx}$
渗透剂施加方法	浸涂	乳化剂施加方法	浸涂	去除方法	喷（水）洗	显像剂施加方法	喷粉
水洗温度	20 ~ 30°C	水压	0.2 ~ 0.3 MPa	验收标准	JB/T 4730.5—2005	合格级别	I 级

渗透检测质量评级要求	① 不允许存在任何裂纹和白点
	② 不允许线性缺陷显示、圆形缺陷显示（评定框尺寸 35mm × 100mm），长径 $d \leq 1.5\text{mm}$ ，且少于或等于一个

示意草图	

序号	工序名称	操作要求及主要工艺参数
1	表面准备	喷砂去除氧化皮
2	预清洗	用温水清洗剂将被检表面冲洗干净
3	干燥	将工件放于干燥箱内进行干燥，干燥时间为 5min，被检表面温度不得高于 50°C
4	渗透	采用槽式浸涂，整个工件浸入槽中，使渗透剂将其全部覆盖，渗透时间应不少于 10min
5	滴落	逐个将工件从渗透剂中提起，滴落 1min，滴落过程适当翻动工件
6	预水洗	用水喷法去除被检表面多余渗透剂，水压控制在 0.2MPa 左右。水洗过程中注意转动工件
7	乳化、滴落	采用槽式浸涂乳化。亲水型乳化剂，乳化时间不大于 2min（含滴落时间）
8	最终水洗	用水喷法去除，冲洗时，水射束与被检面的夹角以 30° 为宜，水温为 10 ~ 40°C，冲洗装置处的水压应不超过 0.34MPa，冲洗时，在黑光灯照射下监控清洗效果

(续)

9	干燥	在热空气循环烘干装置中进行, 被检表面温度不应大于 50℃, 干燥时间 5~10min
10	显像	在喷粉箱中进行显像, 显像时间不少于 7min
11	观察	显像剂施加 7~60min 内进行观察, 距黑光灯滤光片 38cm 的工件表面的辐照度大于或等于 $1000\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , 暗处白光照度不应大于 20lx, 必要时可用 5~10 倍放大镜进行观察。进入暗区, 至少经过 3min 的黑暗适应, 不能带光敏眼镜
12	复验	当检测灵敏度不符合要求、操作方法有误或技术条件改变时、合同各方有争议或认为有必要时, 应进行复验。复验时, 应将被检表面彻底清洗, 重新进行渗透检测操作各步骤
13	后清洗	在水洗涤槽中进行后清洗, 将被检面的渗透检测剂用水洗净, 清洗后应进行干燥处理
14	评定与验收	根据缺陷显示尺寸及性质按 JB/T 4730.5—2005 进行等级评定, I 级合格
12	报告	出具报告内容至少包括按 JB/T 4730.5—2005 标准规定的内容
备注	① 渗透检测剂中氯、氟元素含量的质量比不得超过 1% ② 渗透检测实施前, 检测操作方法或条件发生变化时, 用 B 型试块进行校验	
编制人及资格		审核人及资格
日期		日期

# 第七篇 涡流检测

## 第一章 涡流检测概述

### 一、涡流检测基本原理、方法和应用范围

#### 1. 涡流检测基本原理

涡流检测是建立在电磁感应原理基础之上的一种无损检测方法，它适用于导电材料。当把一块导体置于交变磁场之中，在导体中就有感应电流存在，即产生涡流。由于导体自身各种因素（如电导率、磁导率、形状、尺寸和缺陷等）的变化，会导致涡流的变化，利用这种现象判定导体性质、状态的检测方法，称为涡流检测。

电磁感应现象和涡流的产生分别如图 7-1-1 和图 7-1-2 所示。在图 7-1-1 中，使线圈 1 和线圈 2 靠近，在线圈 1 中通过交流电，在线圈 2 中就会有感应产生交流电。如果使用金属板代替线圈 2，同样也可以使金属板导体产生交流电，如图 7-1-2 所示。这种由交流磁场感生出来的电流就称为涡流。

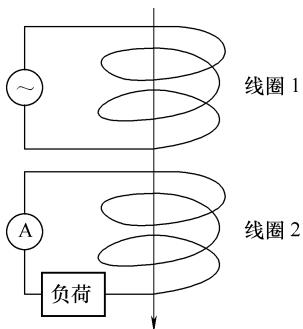


图 7-1-1 电磁感应现象

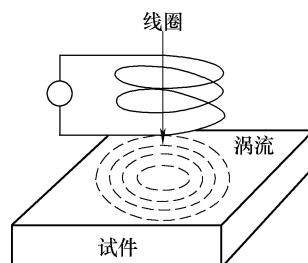


图 7-1-2 涡流的产生

## 2. 涡流检测方法

在图 7-1-2 中, 试件中的涡流方向与给试件施加交流磁场线圈的电流相反。涡流所产生的交流磁场也产生交变磁力线, 它通过激励线圈时又感生出反作用电流。如果工件中涡流变化, 这个反作用电流也变化。测定它的变化, 就可以测得涡流的变化, 从而得到试件的信息。涡流的分布及其电流大小由线圈的形状和尺寸, 试验频率, 导体的电导率、磁导率、形状和尺寸、导体与线圈间的距离以及导体表面的缺陷所决定的。因此, 根据检测到的试件中的涡流, 就可以取得关于试件材质、缺陷和形状尺寸等信息。

由于激励电流和反作用电流的相位会出现一定差异, 这个相位差随着试件的性质而改变, 因此, 常通过测量相位的变化来检测试件的有关信息, 它的变化与线圈阻抗的变化密切相关, 现在, 大多数的涡流检测仪器都以阻抗分析法为基础, 来鉴别各种引起涡流变化的因素。

由于涡流具有趋肤效应, 因此涡流检测只能检测表面和近表面的缺陷。

由于试件形状的不同、检测部位的不同, 所以检测线圈的形状与接近试件的方式也不尽相同。为了适应各种检测的需要, 人们设计了各种各样的检测线圈和涡流检测仪器。

## 3. 涡流检测的显示方式

涡流检测的显示方式与用途关系很大, 一般小型便携式仪器 (如裂纹检测仪、测厚仪等) 多采用表头显示方式。在冶金企业中使用的在线涡流检测设备大多采用示波器、记录仪加声及光报警等多种显示方式。示波器又有时基式、椭圆式和矢量光点式几种, 这些显示一般在现场用样件调试设备时使用。其中矢量光点式更多的用于科研及在役设备的检测, 以便利用阻抗变化判断大小和深浅; 记录仪则可以对样件或可疑件留下永久性的显示, 以便记录存档; 而声光报警则往往是和自动分选配合使用, 以便提醒操作人员注意。

## 4. 涡流检测的应用范围

因为涡流检测是以电磁感应为基础的检测方法, 所谓电磁感应现象就是随时间变化的磁场产生电场的现象, 当穿过闭合导体回路中的磁通量发生变化时, 回路中将产生感应电动势及感应电流。因此从原则上说, 所有与电磁感应有关的影响因素, 都可以作为涡流检测方法的检测对象。下面所列出的就是影响电磁感应的因素及可能作为涡流检测的应用对象。

- 1) 不连续性缺陷: 裂纹、夹杂物及不均匀等。
- 2) 电导率: 化学成分、硬度、应力、温度及热处理状态等。
- 3) 磁导率: 铁磁性材料的热处理、化学成分、应力及温度等。
- 4) 试件的几何尺寸: 形状、大小及膜厚等。
- 5) 被检件与检测线圈的距离 (提离间隙)、覆盖层厚度等。

## 二、涡流检测的优缺点

### 1. 涡流检测的优点

- 1) 对于金属管、棒、线材的检测，不需要接触，也无须耦合介质，所以检测速度高，易于实现自动化检测，特别适合在线检测。
- 2) 对于表面缺陷的检测灵敏度很高，且在一定范围内具有良好的线性指示，可对大小不同缺陷进行评价，所以可以用作质量管理与控制。
- 3) 影响因素很多，如裂纹、材质、尺寸、形状及电导率和磁导率等。采用特定的电路进行处理，可筛选出某一因素而控制其他因素，因此有可能对上述某一单独影响因素进行有效的检测。
- 4) 由于检测时不需接触工件又不用耦合介质，所以可进行高温下的检测。由于探头可伸入到远处作业，所以可对工件的狭窄区域及深孔壁（包括管壁）进行检测。
- 5) 由于是采用电信号显示，所以可存储、再现及进行数据化比较和处理。

### 2. 涡流检测的缺点

- 1) 涡流检测的对象必须是导电材料，且由于电磁感应的原因，只适用于检测金属的表面缺陷，不适用于检测金属材料深层的内部缺陷。
- 2) 金属表面感应涡流的渗透深度随频率而异，激励频率高时金属表面涡流密度大，随着激励频率的降低，涡流渗透深度增加，但表面涡流密度下降，所以检测深度与表面检测灵敏度是相互矛盾的。当对一种材料进行涡流检测时，需要根据材质、表面状态及检测标准做综合考虑，然后再确定检测方案与技术参数。
- 3) 采用穿过式线圈进行涡流检测时，线圈覆盖的是管、棒或线材上一段长度的圆周，获得的信息是整个圆环上影响因素的累积结果，对缺陷在圆周上所处的具体位置无法判定。
- 4) 旋转探头式涡流检测方法可准确检出缺陷位置，其灵敏度和分辨力也很高，但由于检测区域狭小，效率较低。
- 5) 目前涡流检测还是处于当量比较检测阶段，对缺陷做出准确的定性定量判断还尚待开发。

## 第二章 | 涡流检测设备

### 一、涡流传感器

涡流传感器又称探头。在涡流检测中，工件的情况是通过涡流传感器的变化反映出来的，只要对磁场变化敏感的元件，如霍尔元件、磁敏二极管等都可被用来作为涡流检测的传感器，但目前应用最多的是检测线圈。根据涡流检测原理，传感器首先需要一个激励线圈，以便交流电通过并在其周围和受检工件内激励形成电磁场；同时为了把在电磁场作用下反映工件各种特征的信号检出来，还需要一个检测线圈，因为涡流传感器激励线圈和检测线圈可以是功能不同的两个线圈，也可同一线圈具有激励和检测两种功能，因此在不需要区分线圈的功能时，通常把激励线圈和检测线圈统称为检测线圈，或称为涡流传感器。一般来说，涡流传感器具有下列基本结构和功能。

涡流传感器根据用途和检测对象的不同，其外观和内部结构各不相同，类型繁多。但是，不管什么类型的传感器其结构总是由距离绕组、检测绕组及其支架和外壳组成。

涡流传感器的功能有以下三方面：①激励形成涡流的功能，即能在被检工件中建立一个交变电磁场，使工件产生涡流；②检取所需信号的功能，即检测获取工件质量情况的信号并把信号传送给仪器分析评价；③抗干扰功能，即要求涡流传感器具有抑制各种不需要的信号的能力，如检测时要抑制直径、壁厚变化引起的信号，在测量壁厚时，要求抑制伤痕的信号等。

#### 1. 涡流传感器的分类

##### (1) 按检测线圈和工件的相对位置分类

1) 穿过式线圈。穿过式线圈是将被检试件放在线圈内进行检测的线圈，由于采用穿过式线圈，容易实现涡流检测的批量、高速检测，易于实现自动化检测，因此广泛地应用于管、棒、线材的检测。另外由于线圈产生的磁场首先作用于试件外壁，因此检测外壁的缺陷效果较好，内壁缺陷的检测灵敏度较低，如图 7-2-1 所示。

2) 内插式线圈。内插式线圈是放在管子内部进行检测的线圈,专门用来检查厚壁管子内壁或钻孔内壁的缺陷,也用来检查成套设备中管子的质量,如热交换器管的在役检测,如图 7-2-2 所示。

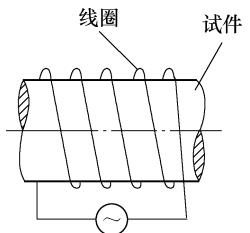


图 7-2-1 穿过式线圈

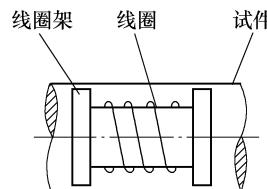


图 7-2-2 内插式线圈

3) 探头式线圈。探头式线圈是放置于试件表面上进行检测的线圈,它不仅适用于形状简单的板材、板坯、方坯、圆坯、棒材和大口径管材的表面检测,也适用于形状较为复杂的机械零件的检测。与穿过式线圈相比,由于其体积小,磁场作用范围小,所以适用于检出尺寸较小的表面缺陷,如图 7-2-3 所示。

(2) 按检测线圈的结构 由于使用对象和目的的不同,检测线圈的结构也不尽相同。有时检测线圈只由一单一线圈组成,即绝对检测方式,如图 7-2-4a 所示;但更多的是由两只反相连接的线圈组成,即差动检测方式;有时为了达到某种检测目的,检测线圈还可以由多只线圈串联、并联或相关排列组成,这些线圈有时绕在一个骨架上,即所谓自比较方式,如图 7-2-4b 所示;有时则绕在两个骨架上,其中一个线圈中放入已知样品,另一个用来进行实际检测,即所谓他比较方式(或标准比较方式),如图 7-2-4c 所示。

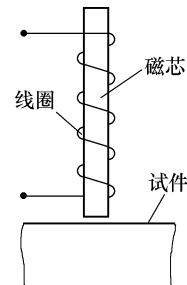


图 7-2-3 探头式线圈

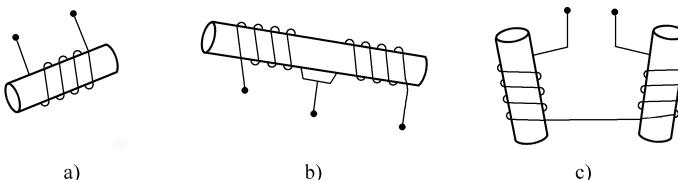


图 7-2-4 检测线圈接线方式

a) 绝对检测方式 b) 自比较方式 c) 他比较方式

(3) 按感应方式分类 按感应方式分为自感式线圈和互感式线圈,又称为参量式线圈和变压器式线圈。自感式线圈由单个线圈构成,该线圈既作为产生激励磁场、在导电体中形成涡流的激励线圈,同时又是感应、接收导电体中涡流再生磁场信号的检测线圈,故名自感线圈。互感线圈一般由两个或两组线圈构成,其中一个

(组)线圈是用于产生激励磁场、在导电体中形成涡流的激励线圈(又称为初级线圈)，另一个(组)线圈是感应、接收导电体中涡流再生磁场信号的检测线圈(又称为次级线圈)。

## 2. 各类检测线圈的特点

由于自感式线圈只有一个线圈，具有绕制方便、对多种影响被检对象电磁性能因素的综合效应响应灵敏的特点；同时，由于激励线圈和检测线圈二者合为一体，对某一影响因素的单独作用效应难以区分。因此，这类线圈一般仅用于管、棒、线材直径的测量。互感式线圈的激励线圈和检测线圈相互独立、各司其职，对不同影响因素响应信号的提取和处理比较方便，除此之外，激励线圈与检测线圈之间有静电屏蔽作用，因此静电感应的噪声较小，工作期间性能较为稳定。

外通过式、内穿过式和放置式检测线圈是根据不同应用对象在线圈外形的设计与制作上形成了差异，不同线圈的特点首先体现在对检测对象的适应性上，即外通过式线圈可用于检测管、棒、线等多种材料，内穿过式线圈则仅可用于检测管材及管材制品，放置式线圈不仅可用于管、棒、丝材的检测，而且可用于检测板材、型材以及形状复杂的零件；其次，由于外通过式和内穿过式线圈电磁场的作用范围为环状区域，而放置式线圈检测范围为尺寸较小的点状区域，因此外通过式和内穿过式线圈的检测效率要明显高于放置式线圈；再次，外通过式和内穿过式线圈管壁和(或)棒材表层感应产生的涡流沿管、棒材周向方向流动，对于缺陷方向的响应较为敏感，而放置式线圈在试件表面被检部位感应产生的涡流呈圆形，对于缺陷方向的响应敏感度低，即受裂纹取向的影响小，加上线圈中心缠有铁氧体磁芯，利于集中磁场能量，因此检测灵敏度最高。

绝对式线圈只有一个检测线圈(次级线圈)，不仅对被检对象的各种情况，如材质、形状、尺寸等均能够产生响应，而且受环境条件，如温度变化和外界电磁场干扰的影响较为明显。由于自比式线圈的两个次级线圈缠绕方向相反，在同一时刻同一方向交变磁场条件下感应产生的涡流流动方向相反，即在以串联方式连接的检测线圈输出端的感应电压是两个检测线圈中感应涡流与线圈阻抗乘积的差值，故称差动式线圈。这种线圈利于抑制由于环境温度、工件外形尺寸等缓慢变化引起的线圈阻抗的变化。他比式线圈实际上是由两个独立线圈构成的一个线圈组，其中一个线圈作用于被检测对象，另一个线圈作用于对比试样，通过比较两个线圈分别作用于被检测对象和对比试样时产生的电磁感应差异来评价被检测对象的质量，这种检测方式具有能够发现外形尺寸、化学成分缓慢变化的优点。

## 二、涡流检测系统

### 1. 涡流检测系统的基本结构

根据不同的检测目的和应用对象，研制出各种类型的涡流检测仪器。尽管各类仪器的电路和结构各不相同，但工作原理和基本结构是相同的。常用的涡流仪有以

下两种。

1) 常用于管、棒、丝材检测的涡流仪器, 其原理如图 7-2-5 所示。振荡器产生交变信号供给电桥和探头线圈构成电桥的一个桥臂, 一般在电桥的对应位置上有一个比较线圈构成的另一桥臂, 这两个线圈的电压差一般采用电桥来消除。在实际检测中, 一旦工件出现异常 (如缺陷), 电桥不平衡就产生一微小信号输出, 经过放大, 相敏检波和滤波, 除掉干扰信号, 最后经过幅度鉴别器, 进一步除掉噪声以取得所要显示和记录的信号。这类仪器有阻抗的相位分析、相敏检波功能, 但最后结果的显示是以信号的幅度为主的。

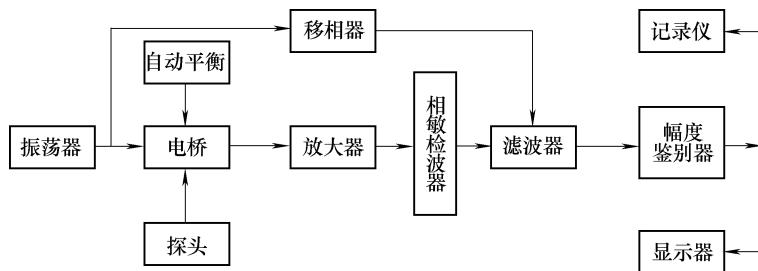


图 7-2-5 管、棒、丝材涡流检测模式图

2) 以阻抗的全面分析为基础, 称为阻抗分析仪, 其基本结构和原理如图 7-2-6 所示。正弦振荡器产生一个一定频率的正弦电流, 通过变压器耦合到检测线圈, 通过平衡电路消除两个线圈的电压差, 电桥一旦平衡, 输出信号接近于零。如果缺陷出现在一个线圈的下面, 则产生一个很小的不平衡信号, 这个信号被放大, 然后经过相敏检波和滤波变成一个包含有线圈阻抗变化的相位和幅度特征的直流信号。随后将这个信号分解成  $X$  和  $Y$  两个相互垂直的分量, 在  $X - Y$  显示器上进行显示。信号的两个分量能同时旋转, 因此, 可以选择任意的参考相位对信号进行相位和幅度分析。这种仪器与第一类仪器相比, 除可进行幅度分析外, 还可以进行相位分析。

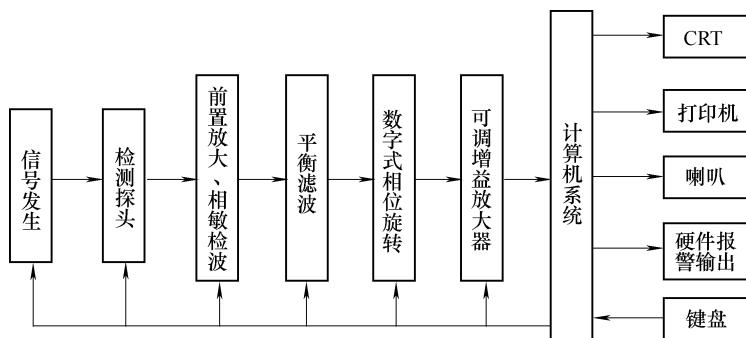


图 7-2-6 涡流阻抗平面分析系统模式图

## 2. 涡流检测仪器的基本电路

- 1) 电桥，主要用来除去线圈之间或者线圈和参考线圈之间的微小阻抗变化。
- 2) 移相器，通过调整移相器可以为检测提供一个可供选择的参考相位。
- 3) 相敏检波器，能在输出的信号中消除干扰信号而保留有用的信号。
- 4) 幅度鉴别器，用来建立一个鉴别电平，使得在此电平以下的噪声信号都消除掉，提高信噪比，有利于缺陷信号的观察和分析。
- 5) 提离效应抑制电路，在使用放置式检测线圈的涡流仪中，试件与线圈之间的间歇变化对检测线圈阻抗产生的影响称为提离效应，由于提离效应引起线圈阻抗的变化往往大于裂纹或电导率改变对线圈阻抗的影响，因此要加以抑制。
- 6) 残余电压补偿电路，主要作用是清除残余电压以消除其对检测的影响。
- 7) 相位放大器，其作用就是对相位进行放大以提高远场涡流检测的灵敏度。
- 8) 滤波器，其作用是将干扰信号予以滤除以消除各种干扰因素的影响。
- 9) 显示器，是用来显示经过放大和处理后的检测信号，提供检测结果。目前用于涡流检测系统的显示器主要有指针式电表、数字显示器及示波器等。
- 10) 记录装置，用来将检测结果记录下来，然后进行分析判断，目前配备计算机的涡流仪的记录形式很多，如软、硬磁盘，磁带机及光盘等。

## 3. 涡流检测辅助装置

涡流检测设备要对试件进行振动高效的检测，通常还包括一些辅助装置，如进给装置、报警装置和磁饱和装置等。

(1) 进给装置 进给装置主要用于自动检测，例如试件的自动传送装置，探头绕试件作圆轨迹旋转的驱动装置，试件的自动上、下料装置，自动分选装置等。

由于检测对象不同（如管材、丝材及球体等），各种装置的结构形式各不相同。但为了保证得到良好的检测效果，涡流仪对进给装置有一些共同的要求。

1) 由于传动机构的不稳定，振动或速度不匀，会产生大量的各种频率的干扰信号，而且会引起所需检出信息的频率发生变化，影响到检测的正常进行，因此传动装置的传动速度要稳定，一般要求传动速度的误差在5%以内。

2) 为了满足对各种型号、尺寸规格的试件进行涡流检测，要求在调换新的检测品种或进行新的检测试验时，传动装置的速度可以调节，以便一机多用，扩大要求的使用范围，因此传动机构的速度要可调。

3) 当采用穿过式线圈时，试件和线圈的不同心会使线圈阻抗发生不应有的变化；而旋转探头运转圆轨迹和试件不同心则会产生提离效应，这些影响都会使检测的灵敏度大大降低，因此要求试件在传动过程中能保持和检测线圈的同心度。

(2) 报警装置 在自动检测仪中准备的报警装置，当检测到大于标准伤痕的缺陷时，能提供音响或灯光指示信号，有的还可以输出信号时传动机构停车，这样检测人员就可以及时判断检测结果，对不符合质量要求的试件进行处理。

(3) 磁饱和装置 铁磁性金属在经过加工处理后，会引起金属体内部磁导率分

布的不均匀。在涡流检测中，金属磁导率的变化会产生噪声信号，为了克服铁磁性金属磁导率对检测的影响，应对试件进行饱和磁化，因为当外加稳恒磁场  $H$  达到一定值后，金属的磁感应强度  $B$  不再增加，趋于饱和状态，而磁导率降至最小值。铁磁性金属经过饱和磁化后即消除了磁导率不均匀的现象，也使涡流的透入深度大大增加。经过磁饱和处理后的铁磁性材料可作为非铁磁性材料对待。

在涡流检测中使用的磁饱和装置有两类，一类是通有直流电的线圈构成，这类磁饱和装置中主要有通过式和磁轭式；另一类磁饱和装置是有强的永久磁铁构成。

经饱和磁化后的工件，在去除磁化场后，会保留有剩磁，一些要求较高的产品需要进行退磁处理。通常采用的退磁方法多用通有交流电的退磁线圈进行消磁。它是让带有剩磁的工件通过退磁线圈，在试件逐渐远离线圈的过程中，工件上各部位都受到一个幅值逐渐减小、方向有正负之间反复变化的磁场的作用，在这个磁场的作用下，材料的磁化状态将沿着一次比一次小的磁滞回线，最后回到未磁化的状态。

## 第三章 涡流检测应用

### 一、穿过式线圈涡流检测

#### 1. 穿过式线圈

涡流穿过式线圈主要用于金属管、棒、线材在离线、役前和在役的检测。根据线圈与工件的位置关系有穿过式线圈和内通过式线圈之分。

穿过式线圈形成涡流的方向和分布与检测灵敏度密切相关，检测时为了获得较高的灵敏度，必须尽可能使涡流流动方向与缺陷相垂直。

线圈截面尺寸对检测灵敏度和分辨力具有很大的影响。一般来说，线圈长度越大，灵敏度越高，分辨力则相对较低。在分辨力和信号幅度之间最好的折中是选择线圈的长度和厚度等于缺陷的深度。一般来说，线圈的长度和厚度应该近似等于壁厚，差动探头中两线圈之间的跨距应该近似等于缺陷深度或者壁厚。

探头与管子之间的间隙应尽量小，以提高检测灵敏度，但间隙太小，会给传动带来困难，在大多数采用内穿式探头检测管子时，通常耦合间隙为 $1/2$ 的壁厚。

#### 2. 穿过式线圈应用举例

(1) 金属管道在线、离线涡流检测 钢管是一种金属管道，优质的金属材料，其化学成分、物理性能和几何形状都必须是连续的、单纯的和均匀的。如果这三个方面存在不足或受到破坏，该金属材料即为缺陷材料。为了确保钢管的质量，及时检测区分出低劣的产品，许多钢管生产厂家都相继配备了涡流检测设备。

1) 金属管道生产过程及缺陷的形成。无缝钢管是将圆管坯经穿孔机或挤压机加工成毛管，再经轧管机压延成形，小直管和薄壁管还要进行反复冷轧。无缝钢管的常见缺陷有折叠、结疤、直道缺陷、凹坑、裂缝、导板划痕、横裂或分层等。

焊接管是将金属带材经变形加工成管状，在焊缝部位焊接而成。焊接管常见的缺陷有夹渣、裂纹、气孔、焊接不良引起的表面裂纹及未熔合。

裂纹是最常见的自然缺陷，它是由材质不良、加热不当、内应力、热处理不当或皮下气泡暴露于表面等因素造成的。

2) 涡流设备与探头的选择。金属管道在线、离线涡流检测的设备包括检测线圈和检测仪, 检测仪最好选用多通道的, 也可按工件实际情况选择双通道或单通道的。探头性能的好坏与检测灵敏度、可靠性密切相关。管材在线、离线检测可采用多种形式的检测线圈, 如穿过式、扇形式、平面组合式、阵列式和旋转探头等, 一般来说, 穿过式线圈在电学原理和机械结构上都比较简单, 形状与试件吻合, 能使用高速进给提高效率, 穿过式线圈对试件表面和近表面的缺陷有较好的反应。直径较小的管材 ( $D < 50\text{mm}$ ), 通常选用外穿式线圈, 以便对工件进行 100% 检查, 且速度快、效率高。

总之, 最好的探头是要能在工件的检测范围内产生尽可能高的涡流密度并且使电流垂直于缺陷, 因为缺陷的可检出性决定于它对涡流的阻抗程度。

如用于铁磁性材料检测时, 应外加磁饱和装置。利用直流电对试件进行饱和磁化。但通常用的磁饱和电流不宜过强, 否则, 试件的推进有困难, 一般是取在使试件磁饱和稍稍不足的程度。采用穿过式线圈时还应注意填充率的取值, 填充率太小则灵敏度较低, 太大则由于试件的不规则和进时难以避免的跳动等很容易损坏线圈, 取值通常以允许稍不规则的试件能顺利通过为准则。

3) 仪器设备参数的设定和调节。涡流自动检测装置中的机械装置包括三部分, 即上料进给部分、检测部分和分选下料部分。而机械构件一般包括: 传动系统、调速系统及控制系统等部分。装置具有自动上、下料, 自动传送, 自动分选, 自动停车及给进速度可调等性能。在检测过程中, 传动装置应能使进给平衡, 无打滑、跳动和冲击等现象, 不损坏试件。

在实际检测中, 频率往往是唯一可以改变的参数, 通过改变频率来满足检测条件得到满意的检测结果, 因为材料的性能和几何形状是固定的, 探头的选择往往是有限的。频率的选择决定于检测对象, 如果测量直径的变化, 需要使提离效应有较高灵敏度, 这就需要使用高的检测频率。检测缺陷就需要仪器对缺陷所处的位置由较高的渗透深度, 表面缺陷可以使用更高的频率, 对表面下的缺陷, 既要采用较低的频率以保证足够的渗透深度, 又要使缺陷和其他干扰因素之间有足够的相位差以便分辨。

在实践中对某个类型和尺寸的管子检测证明, 工作频率  $f_{90}$ , 即选择频率使得在填充因素变化和外壁缺陷信号之间产生  $90^\circ$  的相位,  $f_{90}$  是根据经验从管子厚度和趋肤深度按一定的比例推导出来的, 通常选择这个比略大于 1, 即  $t/\delta = 1.1$ , 得到

$$f_{90} \approx \frac{3\rho}{t^2} \quad (7-3-1)$$

式中  $\rho$ —电阻率 ( $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ );

$t$ —管子壁厚 (mm)。

该工作频率适用于穿过式线圈和内穿式线圈, 而且与管子直径关系不大, 使用工作频率  $f_{90}$ , 对外壁和内壁的缺陷都具有较高的灵敏度。

(2) 金属棒、线、丝材的涡流检测 对于批量的棒材、线材检测，可采用与管材相类似的自动化检测装置。但由于棒材中涡流分布与管材不同，渗透深度更小，为了使试件达到良好的检测状态，提高检测灵敏度，选择的工作频率比管材要低，同时，当试件是铁磁性材料，需要采用直流磁化时，棒材的磁饱和比管材要难得多，原因在于即使直径比管材小，但截面积却不一定小，所以要达到可以较好地进行检测的磁饱和程度，需要较好的激励电流。

棒材检测同样可以使用穿过式线圈，如棒材直径较大时，与管材一样，应改用平面组合探头或旋转探头。

金属丝材的检测与管材、棒材检测有所不同，因为丝材直径很小 ( $\phi 0.025 \sim 1\text{mm}$ )，都是成轴生产的，一般丝材长度很大，不便单独标注缺陷，一般用缺陷的统计方式来评价丝材的质量。

由于丝材直径小，检测时应选择比管材、棒材检测高得多的频率，一般所选频率高达数十兆赫兹，甚至上百兆赫兹。检测线圈都采用外穿式。为了保证长期检测过程中导孔不被磨损，并保证丝材与线圈的同心度，检测线圈的导孔常用红宝石等极硬的材料制成，然后将线圈架在两个导孔之间，让细丝穿过导孔和线圈进行检测。

(3) 金属管道在役涡流检测 管道在役检测是涡流检测的另一重要应用，在核能、电力和石化等领域，某些装置中都有许多金属管道，它们在运行过程中由于高温、高压和强腐蚀等作用，容易受到损伤和腐蚀破坏而产生裂纹、点蚀或减薄等，严重威胁着设备的安全运行。

1) 涡流设备和探头的选择、安装和调试。在役管道涡流检测最好选用双频或多频涡流检测仪，涡流传感器应采用内穿式探头，普通钢管检测可采用人工推拉探头，也可配备探头半推拉装置，或探头自动定位推拉装置（机械手）。

采用多频涡流检测仪时，被检管道的状况（如缺陷、环境因素干扰等）在不同频率下将产生各自不同的反应，产生不同而又相关的矢量。经过混合处理，可以拾取有用信息，去除干扰因素。

2) 仪器设备参数的设定与调节。检测前应对仪器设备进行调试，下面以钛管在役检测为例加以说明。检测频率为  $10 \sim 600\text{kHz}$ 。检测的中心频率范围应能使标定管通孔信号与噪声信号互为  $40^\circ$  左右相位差，并有良好的信噪比。检测探头的频率特性和灵敏度是用主检频率（即  $200 \sim 600\text{kHz}$ ）来测试的，而用辅助低频与主频混合以消除支撑板下或其附近的缺陷。

在实际检测中，经试验选取  $400\text{kHz}$  作为主检频率， $100\text{kHz}$  作为辅助频率，用这两个频率进行混合产生的混频通道抑制了支承板的涡流信号，这样可以判断在支承板下的缺陷。

## 二、放置式线圈涡流检测

放置式线圈涡流检测多用于对汽轮机、大轴中心孔和航空发动机叶片的表面裂

纹、螺孔内裂纹、飞机的起落架、轮毂和铝蒙皮下缺陷的检测，也常用于对板材、多面体金属成品和半成品的检验。

### 1. 放置式线圈的特性

放置式线圈常用于工件表面缺陷、工件厚度测量或材料性质鉴定等。缺陷可以是表面或近表面的，如裂纹、气孔和夹杂等，由于放置式线圈用途广泛，声压形态、结构各异，据其特征可分为多种类型，如大饼式探头、平面探头、弹簧探头和笔式探头等。

#### (1) 放置式探头的性质

1) 线圈中心的灵敏度涡流及其磁通  $\phi$  正比于到线圈中心的距离。可见缺陷处于试件相对于线圈中心的不同位置，检出的灵敏度是不同的，在线圈的中心位置没有涡流，线圈的检出灵敏度为零。

2) 通常探头的阻抗要求和仪器及其信号电缆的阻抗匹配。探头的电感是构成阻抗的主要成分，一般不需要精确计算。表 7-3-1 所列为各种放置式探头外径、线圈匝数（保持线圈内径和线圈的长度等于 0.2 倍的外径）、线圈电感和电阻（线圈远离样品）。利用导线的直径关系式  $L \propto N^2 D^2$  可以比较容易地估计导线的尺寸和要达到一定电感量所需要的圈数。

表 7-3-1 各种放置式探头外径、线圈匝数、线圈电感和电阻

	$D_0 = 1.6\text{mm}$	$D_0 = 3.2\text{mm}$	$D_0 = 6.3\text{mm}$	$D_0 = 12.7\text{mm}$	$D_0 = 25.4\text{mm}$
$N = 21$	$L = 0.27\mu\text{H}$	$L = 0.54\mu\text{H}$	$L = 1.1\mu\text{H}$	$L = 2.1\mu\text{H}$	$L = 4.3\mu\text{H}$
	$R = 0.01\Omega$	$R = 0.2\Omega$	$R = 0.1\Omega$	$R = 0.05\Omega$	$R = 0.02\Omega$
	40AWG	34AWG	28AWG	22AWG	16AWG
	0.08mm	0.16mm	0.32mm	0.64mm	1.3mm
$N = 50$	$L = 1.5\mu\text{H}$	$L = 3.0\mu\text{H}$	$L = 6.1\mu\text{H}$	$L = 12\mu\text{H}$	$L = 24\mu\text{H}$
	$R = 0.06\Omega$	$R = 1.0\Omega$	$R = 0.5\Omega$	$R = 0.3\Omega$	$R = 0.1\Omega$
	43AWG	37AWG	31AWG	25AWG	19AWG
	0.056mm	0.11mm	0.23mm	0.45mm	0.91mm
$N = 98$	$L = 5.8\mu\text{H}$	$L = 12\mu\text{H}$	$L = 23\mu\text{H}$	$L = 47\mu\text{H}$	$L = 94\mu\text{H}$
	$R = 4\Omega$	$R = 2\Omega$	$R = 1\Omega$	$R = 0.5\Omega$	$R = 0.3\Omega$
	46AWG	40AWG	34AWG	28AWG	22AWG
	0.04mm	0.08mm	0.16mm	0.32mm	0.64mm
$N = 136$	$L = 11\mu\text{H}$	$L = 23\mu\text{H}$	$L = 45\mu\text{H}$	$L = 90\mu\text{H}$	$L = 180\mu\text{H}$
	$R = 9\Omega$	$R = 3\Omega$	$R = 2\Omega$	$R = 0.9\Omega$	$R = 0.5\Omega$
	48AWG	41AWG	36AWG	29AWG	23AWG
	0.03mm	0.07mm	0.13mm	0.29mm	0.57mm

(续)

	$D_0 = 1.6\text{ mm}$	$D_0 = 3.2\text{ mm}$	$D_0 = 6.3\text{ mm}$	$D_0 = 12.7\text{ mm}$	$D_0 = 25.4\text{ mm}$
$N = 200$	$L = 24\mu\text{H}$	$L = 49\mu\text{H}$	$L = 97\mu\text{H}$	$L = 195\mu\text{H}$	$L = 390\mu\text{H}$
	$R = 17\Omega$	$R = 8\Omega$	$R = 4\Omega$	$R = 2\Omega$	$R = 1\Omega$
	49AWG	43AWG	37AWG	31AWG	25AWG
	0.028mm	0.056mm	0.11mm	0.23mm	0.45mm

(2) 影响缺陷检测灵敏度的参数 涡流检测的最大局限性是只能检测表面和近表面的缺陷，且对表面缺陷具有很高的灵敏度，但对于表面下埋藏较深的缺陷灵敏度较低。对于现在涡流技术来讲，表面以下4~5mm就已经很深了。

影响涡流检测深度有两个主要因素，第一个是检测频率，由于趋肤效应是为了随着深度的增加迅速衰减，所以，要提高检测深度，需要较低的检测频率。第二个因素就是探头的直径，实际上探头的直径都很小，磁通量也小，为了直径检测深度，可以增大探头的直径，但直径增大，必定会降低对短小缺陷的检测灵敏度，而涡流检测的深度一般小于探头直径。

另外检测灵敏度的参数还有：

1) 提离。提离线圈从工件表面离开，即提离增加时，线圈与工件之间的互感减小，工件中磁通密度也减小，这样，对缺陷的检出灵敏度就较低，当线圈直径不同时，磁通密度随提离效应的变化也不一样，灵敏度的变化也不一样。

2) 缺陷的埋藏深度。工件中内部缺陷埋藏深度越大，磁通密度越小，再加上趋肤效应引起的衰减，缺陷的检出灵敏度也会下降。

如果不考虑趋肤效应的衰减，灵敏度随检测深度而下降，在无限厚的工件中和在有限厚的工件中一样。如果考虑趋肤效应的衰减，在无限厚工件中，灵敏度下降比较缓慢。

一般来说，灵敏度随着深度的增加而下降主要取决于探头的尺寸，而不是趋肤效应的衰减。因为大多数缺陷的长度不比工件的厚度大多少，因此也不可能采用直径比工件厚度大得多的探头，因为一定长度的检测灵敏度随探头直径的增加而降低，所以用表面探头进行涡流检测通常限于厚度小的工件。(厚度小于5mm)

3) 缺陷长度涡流的流动局限于探头磁场变化的区域。该区域的大小是线圈尺寸和几何形状的函数。对放置式线圈而言，缺陷灵敏度反比于线圈直径；作为一般规律，为了得到高的灵敏度，探头直径应该等于或小于所要检测缺陷的长度。

探头敏感区域由于探头线圈磁场的发散，比探头直径大，一般来讲，这个有效直径( $D_{\text{eff}}$ )近似等于探头直径加上四倍穿透厚度，即

$$D_{\text{eff}} = D_{\text{c}} + 4\delta \quad (7-3-2)$$

在高频时， $4\delta$ 这一项很小，探头的敏感区域可近似假设等于探头直径；但是在低频时，磁场扩散很大，通常使用铁氧体环等材料使磁场集中，这样既集中了磁场

又不允许穿透深度。

## 2. 放置式线圈检测应用举例

近代飞机的结构仍以合金构件（硬铝合金、钛合金及高强度结构钢等）为主，这些结构件在运行中的可靠性是安全飞行的基本要求。因此，在定期或不定期的维护检查中，发现这些构件存在的缺陷是保障飞行安全的一项重要内容。

飞机上连接构件和功能构件的工作环境比较恶劣，负荷较大，有些还在高温、高压及高速运转状态下工作，因而构件材料容易产生缺陷，缺陷的形成以承受交变应力产生的疲劳裂纹较为常见。这种缺陷多在材料表面，并且开始是很细微的，然后才会逐渐扩展变大。对于这种表面缺陷，采用磁粉及渗透方法进行检测都很有效，但相比之下，涡流法不仅方便易行，而且还可以在飞机未拆开的状态下进行检测，且可以在涂有覆盖层的部件检测。

飞机零部件现场在役检测常选用便携式涡流检测仪，仪器应具有的特点包括：

- 1) 体积小、重量轻、移动方便。
- 2) 灵敏度高，检测范围大。
- 3) 能够抑制提离效应和干扰信号。
- 4) 要有灵敏的声光报警装置。

由于放置式探头对结构及形状的通用性较差，因此为了适应不同情况，往往要为某一部件的检测特制专用探头。

在进行曲线检测之前，首先要弄清曲线的类型，如果缺陷是裂纹，那么需要检测的最小裂纹是多少，裂纹是在表面还是表面以下，是类似于分层的裂纹还是垂直于表面的裂纹。通常要求用两个或者更多的频率或不同的探头来检测和评定缺陷。

选择工作频率要使缺陷和其他变化因素易于分辨，对于放置式探头最主要干扰因素是提离效应。涡流的穿透深度为

$$\delta = 50 \sqrt{\rho/f} \quad (7-3-3)$$

所以在选择工作频率时，使得穿透深度  $\delta$  等于要检测的深度，这样在提离和缺陷之间就能够得到很好的区分。如果在检测时发现信号难以判断，分不清是缺陷信号还是其他变化引起的，则可以通过改变检测频率来进行判断。

## 参 考 文 献

- [1] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. JB/T 4730.1~6—2005 承压设备无损检测 [S]. 北京: 新华出版社, 2005.
- [2] 王晓雷, 等. 承压类特种设备无损检测相关知识 [M]. 2 版. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2007.
- [3] 强天鹏, 等. 射线检测 [M]. 2 版. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2007.
- [4] 郑晖, 林树青, 等. 超声检测 [M]. 2 版. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2008.
- [5] 宋志哲, 等. 磁粉检测 [M]. 2 版. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2007.
- [6] 胡学知, 等. 渗透检测 [M]. 2 版. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2007.
- [7] 任吉林, 林俊明, 高春法, 等. 电磁检测 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

技术工人岗位必备 规范化您的岗位操作

## 员工岗位手册系列

车工岗位手册  
铣工岗位手册  
钳工岗位手册  
磨工岗位手册  
数控铣床操作工岗位手册  
数控车床操作工岗位手册  
加工中心操作工岗位手册  
机械加工产品检验工岗位手册  
金属热处理工岗位手册  
铸造工岗位手册  
维修电工岗位手册  
制图员岗位手册  
电机检测及修理工岗位手册  
高低压电器装配(配线)工岗位手册  
电机装配工岗位手册  
天车工岗位手册  
起重装卸机械操作工岗位手册  
叉车工岗位手册  
中央空调工岗位手册  
无损检测员岗位手册

地址：北京市百万庄大街22号  
邮政编码：100037

电话服务

服务咨询热线：010-88361066  
读者购书热线：010-68326294  
010-88379203

网络服务

机工官网：[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)  
机工官博：[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)  
金书网：[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)  
教育服务网：[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)  
封面无防伪标均为盗版



机械工业出版社微信公众号



机械工业出版社科普平台  
科技有的聊



机械工业出版社制造业资讯  
制造业那些事儿

上架指导 工业技术 / 机械工程 / 无损检测

ISBN 978-7-111-50899-1

策划编辑◎何月秋 / 封面设计◎马精明

ISBN 978-7-111-50899-1



9 787111 508991 >

定价：58.00元