

卓越工程师教育 —— 焊接工程师系列教程

无损检测与焊接 质量保证

第2版

郑振太 编著

卓越工程师教育——焊接工程师系列教程

无损检测与焊接质量保证

第2版

郑振太 编著



机械工业出版社

本书是结合高等学校“卓越工程师教育”及现代焊接制造业对“焊接”专业、“材料成型及控制”专业毕业生的要求,使学生掌握无损检测与焊接质量保证的基础知识,具备从事焊接结构无损检测与质量保证工作的基本技术素养而编写的教材。

本书包括绪论和1~6章,绪论介绍了无损检测方法及其选择、材料成型工艺缺陷和无损检测人员技术资格鉴定与认证。1~6章着重介绍和分析了五种常规无损检测方法,即射线检测、超声检测、渗透检测、磁粉检测和涡流检测的物理基础、设备器材、检测工艺和结果评价,并对焊接质量保证体系和一些关键的体系要素进行了详细的分析和阐述。

本书可以作为焊接工程师和无损检测工程师的培训教材,也可以作为材料成型及控制工程本科专业及材料加工工程专业硕士研究生相关课程的参考教材,还可以供焊接生产企业相关质量管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

无损检测与焊接质量保证/郑振太编著. —2版. —北京:
机械工业出版社, 2019. 2

卓越工程师教育. 焊接工程师系列教程
ISBN 978-7-111-62721-0

I. ①无… II. ①郑… III. ①无损检验-教材②焊接-
质量控制-教材 IV. ①TG115.28②TG441.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第087849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:何月秋 杨璇

责任校对:郑婕 封面设计:马精明

责任印制:孙炜

天津翔远印刷有限公司印刷

2019年7月第2版第1次印刷

184mm×260mm·24.75印张·612千字

0001—2500册

标准书号:ISBN 978-7-111-62721-0

定价:69.00元

电话服务

客服电话:010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

机工教育服务网:www.cmpedu.com

卓越工程师教育——焊接工程师系列教程

编委会名单

主任 胡绳荪

委员 (按姓氏笔画排序)

王立君 杜则裕

何月秋 杨立军

郑振太 贾安东

韩国明

教育部“卓越工程师教育培养计划”是贯彻落实《国家中长期教育改革和规划纲要（2010—2020年）》和《国家中长期人才发展规划纲要（2010—2020年）》的重大改革项目，也是促进我国高等工程教育改革和创新，努力建设具有世界先进水平和中国特色的现代高等工程教育体系，走向工程教育强国的重大举措。该计划旨在培养和造就创新能力强、适应经济社会发展需要的高质量各类型工程技术人才，为实现中国梦服务。

焊接作为制造领域的重要技术在现代工程中的应用越来越广，质量要求越来越高。为适应时代的发展与工程建设的需要，焊接科学与工程技术人员培养进入了“卓越工程师教育培养计划”，本套“卓越工程师教育——焊接工程师系列教程”的出版可谓是恰逢其时，一定会赢得众多的读者关注，使社会和企业受益。

“卓越工程师教育——焊接工程师系列教程”内容丰富、知识系统，凝结了作者们多年的焊接教学、科研及工程实践经验，必将在我国焊接卓越工程师人才培养、“焊接工程师”职业资格认证等方面发挥重要的作用，进而为我国现代焊接技术的发展做出重大的贡献。

单 平

编写说明

随着高等教育改革的发展,2010年教育部开始实施“卓越工程师教育培养计划”,其目的就是要“面向工业界、面向世界、面向未来”,培养造就创新能力强、适应现代经济社会发展需要的各类型高质量工程技术人才,为建设创新型国家、实现工业化和现代化奠定坚实的人力资源基础,增强我国的核心竞争力和综合国力。

我国高等院校本科“材料成型及控制工程”专业担负着为国家培养焊接、铸造、压力加工和热处理等领域工程技术人才的重任。结合国家经济建设和工程实际的需求,加强基础理论教学和注重培养解决工程实际问题的能力成为“卓越工程师教育计划”的重点。

在普通高等院校本科“材料成型及控制工程”专业现行的教学计划中,专业课学时占总学时数的比例在10%左右,教学内容则要涵盖铸造、焊接、压力加工和热处理等专业知识领域。受专业课教学学时所限,学生在校期间只能是初知焊接基本理论,毕业后为了适应现代企业对焊接工程师的岗位需求,还必须对焊接知识体系进行较系统的岗前自学或岗位培训,再经过焊接工程实践的锻炼与经验积累,才能成为“焊接卓越工程师”。显然,无论是焊接卓越工程师的人才培养,还是焊接工程师的自学与培训都需要有一套实用的焊接专业系列教材。“卓越工程师教育——焊接工程师系列教程”正是为适应高质量焊接工程技术人才的培养和需求而精心策划和编写的。

本系列教程是在机械工业出版社1993年出版的“继续工程教育焊接教材”系列与2007年出版的“焊接工程师系列教程”的基础上修订、完善与扩充的。新版“卓越工程师教育——焊接工程师系列教程”共11册,包括《焊接技术导论》《熔焊原理》《金属材料焊接》《焊接工艺理论与技术》《现代高效焊接技术》《焊接结构理论与制造》《焊接生产实践》《现代弧焊电源及其控制》《弧焊设备及选用》《焊接自动化技术及其应用》《无损检测与焊接质量保证》。

本系列教程的编写基于天津大学焊接专业多年的教学、科研与工程科技实践的积淀。教程取材力求少而精,突出实用性,内容紧密结合焊接工程实践,注重从理论与实践结合的角度阐明焊接基础理论与技术,并列举了较多的焊接工程实例。

本系列教程可作为普通高等院校“材料成型及控制工程”专业(焊接方向)本科生和研究生的参考教材;适用于企业焊接工程师的岗前自学与岗位培训;可作为注册焊接工程师认证考试的培训教材或参考书;还可供从事焊接技术工作的工程技术人员参考。

衷心希望本系列教程能使业内读者受益,成为高等院校相关专业师生和广大焊接工程技术人员的良师益友。若发现本套教程中存在瑕疵和谬误,恳请各界读者不吝赐教,予以斧正。

前言

焊接产品和焊接结构，尤其是大型的、重要的产品和结构的焊接质量是非常关键的，在工业生产中往往采用无损检测技术对焊接质量予以检查、确认和评价。焊接是一种特殊的、复杂的、多因素的材料成型工艺，不仅需要从技术角度保证焊接质量，也非常需要以系统的观点从质量管理的角度对焊接质量予以保证。为了满足焊接和无损检测工程技术人员以及大学生的需要，特编写了本书。本书是“卓越工程师教育——焊接工程师系列教程”丛书之一。

本书介绍和分析了射线检测、超声检测、渗透检测、磁粉检测和涡流检测这五种常规无损检测技术的物理基础、设备器材、检测工艺和结果评价，以及焊接质量保证体系及其构成要素，并就一些关键要素进行了详细分析和阐述。

本书可以作为焊接工程师和无损检测工程师的培训教材，也可以作为材料成型及控制工程本科专业及材料加工工程专业硕士研究生相关课程的参考教材，还可以供焊接生产企业相关质量管理人员参考。

在本书的编写过程中，天津大学胡绳荪教授给予了很多的关心和指导，北京化工大学的杨剑锋教授、河北省锅炉压力容器监督检验院的付坤工程师、天津市天大北洋化工设备有限公司的杜剑锋工程师和王建岐工程师提供了许多宝贵的资料，王泽龙和雷云峰等研究生对本书的资料搜集和图表绘制做了许多辛苦的工作，对上述人员和文末参考文献所列书籍的作者及文中引用标准的机构和作者一并表示衷心的感谢！天津大学王立君教授在编写该书的过程中于工作岗位不幸逝世，作者愿以本书纪念王立君教授！

由于作者水平有限，书中可能存在不当甚至错误之处，敬请读者批评指正。

编著者

目 录

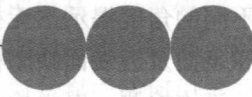
序	
编写说明	
前言	
绪论	1
0.1 无损检测方法及其选择	1
0.2 材料成型工艺缺陷	4
0.3 无损检测人员技术资格鉴定与认证	5
第1章 射线检测	7
1.1 射线检测的物理基础	9
1.1.1 射线的基本性质、获得方法与传播	9
1.1.2 射线与物质的相互作用及其衰减定律	11
1.1.3 射线对特定物质的作用效应	14
1.2 射线检测设备及器材	15
1.2.1 射线机	15
1.2.2 射线检测过程器材	20
1.2.3 射线检测后处理器材	27
1.3 射线检测工艺	29
1.3.1 检测前的准备	29
1.3.2 射线透照过程	47
1.3.3 感光胶片的处理	53
1.4 射线检测的缺陷评定与焊接接头质量分级	54
1.4.1 评片的基本要求及主要步骤	54
1.4.2 熔化焊焊接接头射线检测缺陷评定与质量分级	55
1.5 射线检测的工程实例	61
1.5.1 乙醇精馏塔的基本情况	61
1.5.2 乙醇精馏塔的射线检测	65
第2章 超声检测	73
2.1 超声检测的物理基础	74
2.1.1 超声波及其发射和接收	74
2.1.2 超声波在介质中的传播	81
2.2 超声检测设备及器材	95
2.2.1 超声探伤仪	95
2.2.2 超声探头	101
2.2.3 超声试块	107
2.2.4 耦合剂	119
2.3 超声检测工艺	120
2.3.1 检测前的准备	120
2.3.2 器材选择及仪器调整	123
2.3.3 扫查工艺	133
2.3.4 缺陷信号的判定	134
2.3.5 超声检测工艺文件	139
2.3.6 钢板对接焊接接头超声检测工艺举例	142
2.4 超声检测的缺陷评定与焊接接头质量分级	145
2.4.1 缺陷评定	145
2.4.2 焊接接头质量分级	146
2.5 超声检测的工程实例	147
2.5.1 汽水分离器的基本情况	147
2.5.2 汽水分离器的超声检测	150
第3章 渗透检测	153
3.1 渗透检测的物理基础	155
3.1.1 表面张力	155
3.1.2 润湿作用	156
3.1.3 毛细作用	157
3.1.4 光学基础	158
3.2 渗透检测设备及器材	160
3.2.1 渗透检测设备	160
3.2.2 渗透检测材料	161
3.2.3 渗透检测辅助器具	165
3.3 渗透检测工艺	170
3.3.1 检测前的准备	172



3.3.2 工件的预处理	177	第5章 涡流检测	248
3.3.3 渗透工艺	179	5.1 涡流检测的物理基础	252
3.3.4 去除多余渗透剂	180	5.1.1 交变电磁场及电磁感应	252
3.3.5 干燥工艺	182	5.1.2 涡流及趋肤效应	254
3.3.6 显像工艺	183	5.1.3 阻抗分析	257
3.3.7 缺陷显示的观察、测量及 记录	184	5.2 涡流检测设备及器材	262
3.3.8 后处理工艺	184	5.2.1 涡流检测仪	263
3.4 渗透检测的缺陷评定与 质量分级	185	5.2.2 检测线圈	264
3.4.1 缺陷评定	185	5.2.3 对比试样	267
3.4.2 质量分级	185	5.3 涡流检测工艺	271
3.5 渗透检测的工程实例	186	5.3.1 检测前的准备	271
3.5.1 蒸汽锅炉的基本情况	186	5.3.2 涡流检测系统的调整	275
3.5.2 蒸汽锅炉管板角焊缝 渗透检测	190	5.3.3 扫描	278
第4章 磁粉检测	193	5.3.4 检测结果分析	279
4.1 磁粉检测的物理基础	194	5.3.5 后处理	279
4.1.1 励磁磁场及磁化	194	5.4 涡流检测的缺陷评定与 质量分级	280
4.1.2 感应磁场及漏磁	197	5.4.1 以通孔人工缺陷进行质量分级	281
4.1.3 剩磁磁场及退磁	202	5.4.2 以刻槽人工缺陷进行质量分级	281
4.2 磁粉检测设备及器材	204	5.5 涡流检测的工程实例	281
4.2.1 磁粉探伤机	204	5.5.1 管束及其涡流检测的基本情况	281
4.2.2 磁粉	208	5.5.2 管束涡流检测结果及分析	283
4.2.3 磁化品质评价器材	210	第6章 焊接质量保证	292
4.2.4 其他器材	216	6.1 质量管理的基本概念	293
4.3 磁粉检测工艺	217	6.2 质量管理体系	295
4.3.1 检测前的准备	218	6.2.1 质量管理体系要素	297
4.3.2 工件的预处理	219	6.2.2 质量管理体系的建立、运行 和改进	311
4.3.3 磁化方法及规范	220	6.3 焊接质量保证体系	313
4.3.4 施加磁粉	235	6.3.1 焊接质量目标	315
4.3.5 磁痕的观察及记录	237	6.3.2 焊接相关人员的质量管理职责	316
4.3.6 退磁及后处理工艺	238	6.3.3 焊接质量信息资源	319
4.4 磁粉检测的缺陷评定与 质量分级	240	6.3.4 标识和可追溯性	322
4.4.1 磁痕分类	240	6.3.5 设计和合同评审	326
4.4.2 磁痕分析	240	6.3.6 焊接生产计划	328
4.4.3 缺陷评定与质量分级	240	6.3.7 分承包商	329
4.5 磁粉检测的工程实例	241	6.3.8 采购	329
4.5.1 分气缸的基本情况	241	6.3.9 焊接人员资格	330
4.5.2 分气缸的磁粉检测	244	6.3.10 焊接相关设备	343
		6.3.11 母材和焊接材料	345
		6.3.12 预焊接工艺规程和焊接	



工艺评定	356	6.3.17 试验与检验	379
6.3.13 焊接工艺规程和焊接作业		6.3.18 焊接返修	380
指导书	372	6.3.19 焊接质量报告	382
6.3.14 焊接现场环境	375	6.3.20 焊接质量分析与改进	383
6.3.15 施焊过程	377	参考文献	385
6.3.16 焊后热处理	378		



绪 论

在早期的生活、科研和工程实践中，需要对物件无损地检查出缺陷，如陶罐中的裂纹，逐渐形成了无损探伤（Non Destructive Inspecting, NDI）。随着科学技术的发展以及不断的工程实践，无损探伤逐渐发展成为理论基础系统、检测手段丰富的一个学科门类，即无损检测（Non Destructive Testing, NDT）。随着现代工程实践的进一步广泛、深入的发展，人们认识到无损检测难以满足全系列产品链的需求。不仅需要检测出缺陷，还需要技术服务的延伸，遂发展为无损评价（Non Destructive Evaluation, NDE），即在无损检测的基础上，结合断裂力学等科学理论，对产品的应用环境、参数及预期寿命等做出评价。虽然习惯上仍然称其为无损检测，但其内涵更加丰富。

目前，无损检测的科学研究和工程应用在更广阔背景下得到发展。一方面，通过将现代科学研究成果应用于无损检测学科，使其理论基础更加坚实、检测手段更加丰富、检测工艺更加完善；另一方面，将无损检测技术在工程上的应用纳入到企业的质量管理体系中，将无损检测作为产品质量保证的重要一环来调整、统合和规范。这势必带来无损检测学科更深入、更广泛和更丰富的发展和变化，这一趋势正在逐渐地清晰显现。焊接质量往往必须采用无损检测技术来加以检测、验证和确定。焊接产品的生产，也宜将无损检测技术作为焊接产品质量保证体系的重要一环来对待而非仅仅是一项产品检验技术，使其在保证焊接质量方面发挥更重要、更系统和更可靠的作用。焊接质量保证与无损检测技术紧密相关。

0.1 无损检测方法及其选择

1. 无损检测定义及分类

无损检测是指以不损及将来使用和使用可靠性的方式，对材料或制件进行宏观缺陷检测，几何特性测量，化学成分、组织结构和力学性能变化的评定，并进而就材料或制件对特定应用的适用性进行评价的一门学科。侧重于工程应用的相似定义为，在不损坏检测对象的前提下，以物理方法或化学方法为手段，借助相应的设备及器材，按照规定的技术要求，对检测对象的内部及表面结构、性质或状态进行检查和测试，并对检测结果进行分析和评价。可见在工程应用中，无损检测的对象主要是原材料或制件（以下统称为工件），主要用于检测工件中的缺陷。

故障诊断是对具有一定功能性的机器的故障进行监测、定位，采用的检测技术手段与无损检测手段相同或相近。理化检验是指对对象的物理性能或化学性能的检验，往往是破坏性的，也不仅限于工件。焊接检验是保证焊接质量的检验技术的统称，包括破坏性和非破坏性的检验方法，如射线检测、力学性能测试等。上述概念，与无损检测概念比较相近，应注意区分。



无损检测方法很多,分类方法各异。不同的分类方法,均从不同的角度揭示出无损检测方法的某些本质和特点,如按照缺陷部位分为内部缺陷检测方法和表面及近表面缺陷检测方法,按照所借助的物理手段分为射线检测、声学检测、磁学检测、流体检测、电学检测、光学检测及热学检测。射线检测包括X射线检测、 γ 射线检测、高能X射线检测、中子射线检测及射线计算机层析检测等。声学检测包括超声检测、声发射检测、声成像检测、声全息检测及声振检测等。磁学检测包括磁粉检测、漏磁场检测、磁声发射检测、核磁共振检测、磁记忆检测及磁吸收检测等。流体检测包括渗透检测、氨渗漏检验、煤油渗漏检验、氨检漏、载水试验及沉水试验等。电学检测包括涡流检测及带电粒子检测等。光学检测包括目视检测、红外检测、光全息术检测、激光检测及微波检测等。热学检测包括液晶检测、热光效应检测、热电效应检测及热敏检测等。

虽然这种分类方法使得繁多的无损检测方法有了清晰的归类,但实际上一些无损检测方法本质上是复合方法,并不单单依赖于某一种物理手段,因此不能简单地将其归类于某一种物理手段的检测方法。无论哪一种无损检测方法均是根据检测对象主动或被动地表现出来的、人类能够感知的物理性能或化学性能的变化来判断检测对象的。例如:声发射检测就是采用检测对象主动发出的声波来实现缺陷检测的;射线检测则是将射线射入到检测对象中并根据检测对象所被动表现出来的射线强度衰减的差异性来完成缺陷检测的。

在实际工程中得到最多应用的无损检测方法有射线检测(Radiographic Testing, RT)、超声检测(Ultrasonic Testing, UT)、渗透检测(Penetrant Testing, PT)、磁粉检测(Magnetic particle Testing, MT)和涡流检测(Eddy current Testing, ET),合称为五种常规无损检测方法,这也正是本书的主要内容。

2. 无损检测方法的选择

在实际工程应用中,往往从技术性和经济性来分析并选择适宜的无损检测方法。技术性角度主要考虑两方面:一是无损检测方法的技术优势及局限性;二是特定检测对象及其缺陷的特点。以304L奥氏体不锈钢焊缝内部结晶裂纹的检测为例,从经济性角度来看,宜选用检测成本较低的超声检测;从裂纹检测技术分析,射线检测或超声检测均可采用;但如果从无损检测方法的局限性考虑,则由于304L奥氏体不锈钢焊缝晶粒比较粗大,超声检测时回波噪声很大,因此不宜采用超声检测方法。综合考虑经济性和技术性,在检测304L奥氏体不锈钢焊缝内部结晶裂纹时,选用射线检测方法比较适宜。

无损检测方法很多,但每种方法都有其技术优势和局限性。当我们试图在众多无损检测方法中选择一种或几种适宜于某具体的检测工程时,首先应考虑以下技术因素并综合分析:①工件的几何因素,如超声检测很难检测尺寸极小的工件;②工件的材料特点,如磁粉检测只能用于铁磁性材料的检测;③工件的材料加工工艺,如铸件较难采用超声检测;④工件缺陷的特点,如相比于射线检测,超声检测更易发现裂纹类缺陷,涡流检测不能检测内部缺陷,缺陷尺寸太小则应考虑检测方法的灵敏度;⑤工件表面条件,如表面粗糙度过大则不宜采用超声检测;⑥检测区域的可达性,如细小狭长部位的射线检测,相比于X射线检测, γ 射线检测更适合;⑦检测方法的技术优势及其局限性,如因超声探头压电晶片的居里温度问题而不宜采用超声检测方法来检测高温工件。

五种常规无损检测方法主要的技术特点是:渗透检测仅能检测工件表面的开口缺陷,但几乎没有材料种类方面的限制;磁粉检测只能检测铁磁性材料表面开口缺陷和近表面缺陷,



但灵敏度极高,是铁磁性材料检测应该优先选用的方法;涡流检测只能检测导电材料的表面开口缺陷和近表面缺陷,但因非接触而对表面状态要求较低;射线检测和超声检测几乎可以检测任何材料中任何位置的缺陷,但是超声检测对于表面开口缺陷或近表面缺陷的检测能力低于磁粉检测、渗透检测或涡流检测,而射线检测结果直观且客观,但对人和环境有害。下面对五种常规无损检测方法的能力范围和局限性进行分析,以便在选择具体的无损检测方法时参考。

(1) 射线检测的能力范围和局限性

1) 能力范围

- ① 能检测出焊接接头中的裂纹、未焊透、未熔合、气孔及夹渣等缺陷。
- ② 能检测出铸件中的缩孔、夹杂、气孔和疏松等缺陷。
- ③ 能确定缺陷平面投影的位置、大小及缺陷的性质。

2) 局限性

- ① 检测厚度较小,较难检测出厚铸件、厚锻件、厚壁管材和棒材中的缺陷。
- ② 较难检测出 T 形焊接接头和堆焊层中的缺陷。
- ③ 较难检测出细小裂纹和焊缝中的层间未熔合。
- ④ 工件直径较大并采用 γ 射线源进行中心曝光时,较难检测出面积型缺陷。
- ⑤ 较难确定缺陷的深度位置和缺陷高度。

(2) 超声检测的能力范围和局限性

1) 能力范围

- ① 能检测出板材、复合板材、管材和锻件等原材料和零部件中的缺陷。
- ② 能检测出焊接接头中的缺陷,而且危害性较大的面积型缺陷的检出率较高。
- ③ 可检测的厚度大。
- ④ 能确定缺陷的位置和相对尺寸。

2) 局限性

- ① 较难检测晶粒粗大工件中的缺陷。
- ② 缺陷的位置、取向和形状,对检测结果有一定的影响。
- ③ A 型显示检测结果不直观、检测记录的信息少。
- ④ 较难确定体积型缺陷或面积型缺陷的具体性质。

(3) 渗透检测的能力范围和局限性

1) 能力范围。渗透检测能检测出非松孔性材料中的表面开口缺陷,如气孔、夹渣、裂纹及疏松等缺陷。

2) 局限性

- ① 较难检测松孔性材料,如纸张、布匹和软木等。
- ② 不能检测封闭型表面缺陷。

(4) 磁粉检测的能力范围和局限性

1) 能力范围。磁粉检测能检测出铁磁性材料中的表面开口缺陷和近表面缺陷。

2) 局限性

- ① 难以检测几何结构复杂的工件。
- ② 不能检测非铁磁性材料。



(5) 涡流检测的能力范围和局限性

1) 能力范围

- ① 能检测出金属材料对接接头和母材表面、近表面缺陷。
- ② 能检测出带非金属涂层的金属材料表面、近表面缺陷。
- ③ 能确定缺陷的位置,并能给出表面开口缺陷深度或近表面缺陷埋藏深度的参考值。
- ④ 灵敏度和检测深度主要由涡流激发能量和频率确定。

2) 局限性

- ① 很难检测出金属材料的内部缺陷。
- ② 较难检测出涂层厚度超过 3mm 的金属表面、近表面缺陷。
- ③ 较难检测出焊缝表面的微细裂纹。
- ④ 较难检测出缺陷的自身宽度和准确深度。

0.2 材料成型工艺缺陷

缺陷将造成工件的力学性能降低、耐蚀性下降、尺寸误差及成型不良等,进而影响产品的质量。一名优秀的无损检测技术人员,不仅需要熟练掌握无损检测技术,还需要对无损检测的主要对象即材料成型工艺缺陷有一定的了解。

1. 金属板材中的常见缺陷

金属板材中主要有分层、折叠和白点等,裂纹很少。分层是板坯中缩孔和夹渣等在轧制过程中未密合而形成的分离层;折叠是金属板材表面局部形成互相折合的双层金属;白点是金属板材在轧制后的冷却过程中氢原子来不及扩散而形成的白色点状缺陷,常出现在厚度大于 40mm 的钢板中。

2. 金属管材中的常见缺陷

金属管材中的无缝管常见缺陷有裂纹、折叠和夹层等;焊接管常见缺陷与焊接常见缺陷类似,一般为裂纹、未熔合、未焊透、气孔及夹渣等;锻轧管常见缺陷与锻件类似,一般为裂纹、白点及折叠等。

3. 锻件中的常见缺陷

锻件是由热态坯料经锻压变形而成,因此锻件缺陷可分为铸造缺陷、锻造缺陷和热处理缺陷。锻件中的铸造缺陷主要有缩孔残余即铸锭的切头量不足,疏松即凝固收缩时形成的不致密,以及孔穴在锻造时因锻造比不足而出现的未全焊合、夹杂及裂纹等;锻件中的锻造缺陷主要有裂纹、白点及折叠等;锻件中的热处理缺陷主要有裂纹等。

4. 铸件中的常见缺陷

铸件中的常见缺陷主要是气孔、缩孔,即液态金属冷却凝固时体积收缩得不到补充而形成的缺陷;夹杂、裂纹和疏松,即铸件凝固缓慢的区域因微观补缩通道堵塞而在枝晶间及枝晶臂之间形成的细小空洞。

5. 焊件中的常见缺陷

在焊接中,常用焊接缺欠(Weld Imperfection)和焊接缺陷(Weld Defect)来表述焊件的不完美。焊接缺欠是指焊接接头中的材料不连续性、不均匀性以及其它不健全的缺欠。在 NB/T 47014—2011《承压设备焊接工艺评定》标准中定义焊接缺欠和焊接缺陷分别为:焊



焊接缺陷是指在焊接接头与母材中、无损检测标准允许存在的材料不连续部位；焊接缺陷是指不符合具体焊接产品使用性能的焊接缺陷，出现焊接缺陷一般意味着该条焊缝的判废或返修。在焊接中，五种常规无损检测方法主要用于检测焊接缺陷。

焊接缺陷可以分为面积型缺陷和体积型缺陷，也可以分为内部缺陷和外部缺陷，还可以分为不连续性缺陷和几何偏差缺陷等。面积型缺陷是指在某二维方向上的尺寸较大而第三维方向上的尺寸很小的缺陷，如裂纹、未熔合和未焊透等。体积型缺陷是指三维方向上的尺寸大致相当的缺陷，如气孔和夹杂等。内部缺陷如内部裂纹和内部气孔等。外部缺陷如表面裂纹、表面气孔、咬边及焊缝型面不良等。不连续性缺陷是指割裂金属基体的一种缺陷，如裂纹、夹杂及气孔等；几何偏差缺陷不是割裂金属基体，是指几何形状及尺寸不良，如角变形、波浪变形及错边等。一些比较常见且危害性较大的缺陷如裂纹，还可以根据其产生机理分为结晶裂纹、液化裂纹、失延裂纹、氢致延迟裂纹和淬硬裂纹等。上述的缺陷分类，均在焊接生产实际中得到使用，应注意区分，以免混淆。

在参照 ISO 6520-1: 1998 国际标准制订的中国国家标准 GB/T 6417.1—2005《金属熔化焊接头缺陷分类及说明》中，根据缺陷的性质和特征将焊接缺陷分为六大类，即裂纹、孔穴、固体夹杂、未熔合及未焊透、形状及尺寸不良、其他缺陷，按照缺陷存在的位置及状态将每一大类再细分为若干小类，比较系统和规范。

0.3 无损检测人员技术资格鉴定与认证

1. 相关标准

世界上各先进工业国家及一些国际组织均有无损检测人员技术资格鉴定与认证的标准。例如：国际标准化组织的 ISO 9712《Non-destructive testing-Qualification and certification of personnel》、中国机械工程学会无损检测专业委员会提出并纳入中国国家标准的 GB/T 9445—2015《无损检测人员资格鉴定与认证》、美国无损检测学会（American Society for Nondestructive Testing, ASNT）的 SNT-TC-1A《Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing》、欧盟的 EN 473《Non Destructive Testing-Qualification and Certification of NDT Personnel-General Principles》以及日本的 JIS Z 2305《非破壊試験技術者の資格及び認証》等。

此外，不同行业根据自身行业的特点，也提出了无损检测人员技术资格鉴定与认证的标准。例如：美国有军用标准 MIL-STD-410E、航空与宇航标准 NAS 410《NAS Certification & Qualification of Nondestructive Test Personnel》等。再如：中国国家质量监督检验检疫总局的 TSG Z8001《特种设备无损检测人员资格鉴定考核规则》、国防科学技术工业委员会的 GJB 9712A《无损检测人员资格鉴定与认证》、航空与航天系统的 HB 5357《航空无损检测人员的资格鉴定与认证》、民用航空系统的 MH/T 3001《航空器无损检测人员技术资格鉴定规则》等。

2. 技术资格等级及相应职责

虽然无损检测人员技术资格鉴定与认证的标准很多，但其技术资格等级的划分及相应的职责是比较相似的。无损检测人员技术资格通常划分为Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级，Ⅲ级为最高。参考上述诸多无损检测人员技术资格鉴定与认证标准，下面介绍各级别划分的依据及相应职责。



(1) I级 应该具有在Ⅱ级或Ⅲ级人员监督下,按无损检测作业指导书来具体实施无损检测的能力,其具体职责如下:

- 1) 调整无损检测设备。
- 2) 在Ⅱ级或Ⅲ级人员指导下实施检测操作。
- 3) 记录和分类检测结果。
- 4) 报告检测结果。

(2) Ⅱ级 应该具有按已制订的无损检测工艺规程执行或指导无损检测的能力,其具体职责如下:

- 1) 选择所用无损检测方法的检测技术。
- 2) 限定无损检测方法的应用范围。
- 3) 把无损检测规范、标准、技术条件和工艺规程转化为无损检测指导书。
- 4) 调整和验证设备设置。
- 5) 执行和指导检测操作。
- 6) 解释和评价检测结果。
- 7) 执行或指导属于Ⅱ级或低于Ⅱ级的全部工作。
- 8) 培训和指导低于Ⅱ级证书的人员。
- 9) 编写无损检测报告。

(3) Ⅲ级 应该具有执行和指挥无损检测操作的能力,应具备用现有规范、标准、技术条件来评定和解释检测结果的能力,以及在选择检测方法、确定可接受的检测技术以及协助制订验收标准时所需要的有关原材料、制品及生产工艺方面,具有丰富的理论知识和实际经验,还要对其他无损检测方法比较熟悉,其具体职责如下:

- 1) 对所有检测设施和人员负责。
- 2) 确定检测技术和程序。
- 3) 解释无损检测规范、标准、技术条件和工艺规程。
- 4) 为特殊的无损检测工程选定特定的检测技术和程序。
- 5) 根据现有无损检测规范、标准及技术条件对检测结果进行解释和评价。
- 6) 实施、指导和监督各个等级人员的全部工作。

第 1 章

射线检测

某些射线，如 X 射线，能穿透工件并且与工件相互作用后射线强度被衰减，通过显式表达和分析射线强度衰减规律，从而得到工件内部特征信息的方法，称为射线检测。射线检测是五种常规无损检测方法之一。专为得到工件内部损伤信息的射线检测称为射线探伤，是工件内部缺陷两种常规探伤方法之一。

射线检测的基本原理是，射线源发出的射线经空气传播射入物质中并与物质相互作用，透过物质的射线强度已被衰减，通过某种显式表达方法，如胶片感光成像，使其强度衰减规律显现出来，从而得到物质内部的特征信息。在工业射线检测领域中，射线照相法得到最多应用。当用射线透照被检工件时，如果工件内部存在缺陷如气孔，致使沿射线透照方向上的工件实际厚度减小，从有气孔的部位入射的射线被衰减的程度与无气孔的部位相比较低，其透射射线的强度则相对较大。在射线照相法中，这种因透照厚度变化造成的透射射线强度差被射线照相胶片记录下来，经暗室处理以后，再由其底片的黑度差即反差予以反映，也即底片上较大的黑度对应较大的透射射线强度。根据射线照相底片上这种黑度变化的图像来发现被检工件中存在的缺陷，并据此对其定性定量就是射线照相法的基本原理。如果用荧光屏代替射线照相胶片接收并以光强差来显示工件透射射线的强度变化，即为射线检测的荧光屏法或工业电视法的基本原理。

与同为工件内部缺陷检测方法的超声检测相比较，射线检测的主要优点是：显示工件内部特征客观准确；检测结果显示直观；重复性好；可靠性高；几乎不受材料种类和特性的限制，甚至可以检测放射性材料，通用性强；对检测表面的预处理要求不高；对结构类型没有特殊要求；检测结果可以长期保存等。射线检测的局限性是：检出危害较大的面积型缺陷的能力略低；可检测的工件厚度较小；污染环境；操作不当时易造成人身伤害；检测成本较高；检测工艺较复杂等。

射线检测所使用的射线主要有 X 射线、 γ 射线、高能 X 射线、中子射线和 β 射线等，与材料相互作用的方式和规律均有所不同。按检测技术的不同，有射线照相技术如射线胶片成像，射线实时成像技术（Real-Time Radiography, RTR）如荧光屏和工业电视等，以及射线的计算机层析技术（Computed Tomography, CT）等几种方法。其中 X 射线和 γ 射线的射线照相法的检测灵敏度高、技术最成熟，在工业领域应用最广泛，也是学习其他射线检测技术的基础，是本章主要介绍的内容。

1895 年德国的威廉·康德拉·伦琴发现 X 射线及 1896 年法国的亨利·贝克勒尔发现 γ 射线后的 20 世纪 20 年代，射线检测方法开始得到工业应用。发展至今，射线检测原理基本上没有发生变化。但随着现代电子技术及计算机技术等的高速发展，射线检测设备的轻量化、小型化，高质量射线胶片及彩色图像的使用，检测技术如射线层析技术、射线检测的仿真技术、数字化照相技术、高速射线照相技术，缺陷自动识别与智能评片系统，检测结果的