



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

研究生创新教育系列教材

现代无损检测技术

主编 沈玉娣 副主编 曹军义



西安交通大学



西安交通大学

研究生创新教育系列教材

现代无损检测技术

主编 沈玉娣 副主编 曹军义

内容简介

本书详细阐述了超声、射线、涡流、磁粉、渗透、声发射、工业 CT、红外、激光全息、电子错位散斑、微波、振动与噪声、泄漏、目视检测技术的检测原理,检测方法,特点和应用范围,同时介绍了中子照相检测、电子舌和电子鼻检测、光纤检测等无损检测新技术。

本书可作为大专院校研究生、本科生的参考教材,也可作为相关专业的技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

现代无损检测技术/沈玉娣主编. —西安:西安交通大学出版社,2012.7
ISBN 978-7-5605-4199-0

I. ①现… II. ①沈… III. ①无损检验 IV.
①TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 014159 号

书 名 现代无损检测技术
主 编 沈玉娣
责任编辑 桂 亮 刘雅洁

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)

网 址 <http://www.xjtpress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315 82669096(总编办)

传 真 (029) 82668280
印 刷 陕西奇彩印务有限责任公司

开 本 727mm×960mm 1/16 印张 25.5 字数 470 千字
版次 2012 年 7 月第 1 版 2012 年 7 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-4199-0/TG·41
定 价 50.00 元

读者购书、书店添货如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82664954

读者信箱:jdly@yahoo.cn

版权所有 侵权必究

总 序

创新是一个民族的灵魂,也是高层次人才水平的集中体现。因此,创新能力的培养应贯穿于研究生培养的各个环节,包括课程学习、文献阅读、课题研究等。文献阅读与课题研究无疑是培养研究生创新能力的重要手段,同样,课程学习也是培养研究生创新能力的重要环节。通过课程学习,使研究生在教师指导下,获取知识并理解知识创新过程与创新方法,对培养研究生创新能力具有极其重要的意义。

西安交通大学研究生院围绕研究生创新意识与创新能力改革研究生课程体系的同时,开设了一批研究型课程,支持编写了一批研究型课程的教材,目的是为了推动在课程教学环节加强研究生创新意识与创新能力的培养,进一步提高研究生培养质量。

研究型课程是指以激发研究生批判性思维、创新意识为主要目标,由具有高学术水平的教授作为任课教师参与指导,以本学科领域最新研究和前沿知识为内容,以探索式的教学方式为主导,适合于师生互动,使学生有更大的思维空间的课程。研究型教材应使学生在在学习过程中可以掌握最新的科学知识,了解最新的前沿动态,激发研究生科学研究的兴趣,掌握基本的科学方法,把教师为中心的教学模式转变为以学生为中心教师为主导的教学模式,把学生被动接受知识转变为在探索研究与自主学习中掌握知识和培养能力。

出版研究型课程系列教材,是一项探索性的工作,也是一项艰苦的工作。虽然已出版的教材凝聚了作者的大量心血,但毕竟是一项在实践中不断完善的工作。我们深信,通过研究型系列教材的出版与完善,必定能够促进研究生创新能力的培养。

西安交通大学研究生院

前 言

随着现代工业的发展、产品复杂程度的增加以及人们对产品可靠性要求的提高,无损检测技术在产品质量控制中发挥着越来越重要的作用,已成为产品制造质量控制、保障设备安全运行的重要手段,在很多行业得到了广泛的应用。无损检测已形成一门独立的综合性应用技术。

无损检测是一种多学科,多行业交叉的综合性技术。近年来随着信息技术、计算机技术的发展,新的无损检测技术不断地被开发及应用,极大地丰富了无损检测的方法、理论和技术,推动了无损检测的发展。为此本教材在内容上首先介绍了常规的五种无损检测方法,同时也介绍了部分近年出现的新方法、新技术。在编写中兼顾介绍各种检测方法的原理、对缺陷有害度的综合评价方法、适用范围及特点,目的在于使读者在学习不同的检测方法和理论的基础上,掌握一些实践应用技巧,以利于研究生创新意识和创新能力的培养。

本教材由沈玉娣副教授担任主编,曹军义副教授担任副主编,共同负责全书的统稿及修改工作。全书校正工作最后由沈玉娣副教授完成。全书内容共分15章,其中,第1、2、3、7、12章由沈玉娣副教授编写;第5、9、10、15章由曹军义副教授编写;第8章由张西宁教授编写;第6、11、14章由廖与禾讲师编写;第4、13章由王琇峰讲师编写;李锐参与了第6、10、15章的资料整理及部分编写工作,薛士明参与了第5、9、11章的资料整理及部分编写工作,邹今春参与了第2章的资料整理及部分编写工作。

本教材编写过程中得到了天华化工机械及自动化研究设计院化工设备质量监督检验中心杨海军副主任/高工、陕西天宇无损检测公司胡锡宁总工、兰州石化公司曹春荣高工的帮助与支持,在此对他们表示衷心的感谢。

在本教材的编写过程中编者参考了国内外公开出版的相关专著、教材、学术论文,也参考了国内相关的学位论文,编者对这些专著、教材、论文的作者表示衷心的感谢。

西安交通大学杨玉孝副教授为本教材主审,为本教材的内容提出了许多宝贵的改进意见和合理建议。从审稿到定稿过程无不浸含着杨玉孝副教授大量的心血

和汗水,在此特向杨玉孝副教授表示衷心的感谢。在本教材出版之际,感谢我校研究生院创新教育教材建设项目的资助,感谢西安交通大学出版社为本教材出版所付出的辛勤劳动。

限于编者的水平,书中难免会存在错误和不妥之处,恳请读者批评和指正。

编 者

2011 年 11 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 无损检测的目的与内容	(1)
1.2 无损检测方法及其选择	(3)
1.3 无损检测技术的现状与发展	(8)
第 2 章 超声检测技术	(12)
2.1 概述.....	(12)
2.2 超声波与超声场.....	(13)
2.3 超声波的传播.....	(21)
2.4 超声检测设备及器材.....	(38)
2.5 超声波检测方法的特点.....	(51)
2.6 兰姆波检测技术.....	(59)
2.7 相控阵超声检测技术.....	(64)
2.8 超声检测通用技术	(67)
第 3 章 射线检测	(80)
3.1 概述.....	(80)
3.2 射线源及其特性.....	(83)
3.3 射线检测设备.....	(97)
3.4 射线照相的影像质量	(108)
3.5 射线照相检测工艺	(115)
3.6 暗室处理与底片评定	(126)
3.7 其他射线检测方法	(131)

第 4 章 渗透检测技术	(139)
4.1 渗透检测的特点	(139)
4.2 液体渗透检测中的物理基础	(139)
4.3 液体渗透检测方法	(145)
4.4 渗透检测法的质量控制和管理	(153)
第 5 章 涡流检测技术	(155)
5.1 概述	(155)
5.2 涡流检测原理	(157)
5.3 涡流检测方法	(167)
5.4 涡流检测仪器	(174)
第 6 章 磁粉检测技术	(178)
6.1 概述	(178)
6.2 磁粉检测基础知识	(179)
6.3 磁粉检测方法	(185)
6.4 磁痕分析与评定	(189)
第 7 章 声发射检测技术	(199)
7.1 概述	(199)
7.2 声发射的产生与传播	(201)
7.3 声发射检测系统	(207)
7.4 声发射信号分析	(211)
7.5 声发射源的定位方法	(220)
7.6 压力容器缺陷有害度评价与分类	(229)
7.7 声发射检测技术的应用	(234)
第 8 章 工业 CT 检测技术	(246)
8.1 工业 CT 检测概述	(246)
8.2 工业 CT 检测技术的基本原理	(251)
8.3 工业 CT 的图像质量	(254)
8.4 工业 CT 检测系统的结构及配置	(261)

第 9 章 红外检测技术	(265)
9.1 概述	(265)
9.2 红外基础知识	266
9.3 红外检测仪器	(275)
9.4 红外测温技术的应用	(278)
第 10 章 激光全息检测技术	(285)
10.1 激光全息检测概述	(285)
10.2 激光全息检测原理	(286)
10.3 激光全息检测方法	(289)
10.4 激光散斑干涉检测技术	(294)
第 11 章 微波检测技术	(303)
11.1 概述	(303)
11.2 微波检测的原理和方法	(305)
11.3 微波检测仪器	(311)
11.4 微波检测技术的应用	(314)
第 12 章 振动与噪声检测技术	(318)
12.1 振动检测的基本概念	(318)
12.2 振动测量系统	(320)
12.3 噪声的基础知识	(321)
12.4 噪声测量	(327)
12.5 振动、噪声检测方法的应用	(336)
第 13 章 泄漏检测技术	(341)
13.1 泄漏检测概述	(341)
13.2 泄漏检测基础知识	(342)
13.3 泄漏检测方法	(345)
第 14 章 目视检测	(358)
14.1 概述	(358)

14.2	目视检测中的光学基础·····	(359)
14.3	目视检测的设备及器件·····	(362)
14.4	目视检测操作·····	(369)
14.5	内窥镜检测技术·····	(371)
第 15 章	其他无损检测新技术 ·····	(373)
15.1	光纤无损检测技术·····	(373)
15.2	电子鼻和电子舌无损检测技术·····	(378)
15.3	中子照相无损检测技术·····	(384)
15.4	磁记忆效应检测技术·····	(387)
15.5	正电子湮灭检测技术·····	(389)
15.6	液晶检测技术·····	(390)
参考文献	·····	(392)

第1章 绪 论

1.1 无损检测的目的与内容

1.1.1 无损检测的定义

无损检测(Non-Destructive Testing,简称 NDT)是一门新兴的综合性应用技术。无损检测是在不损伤被检测对象使用性能的条件下,利用材料内部由于结构异常或缺陷存在所引起的对声、热、光、电、磁等反应的变化,探测各种工程材料、零部件、结构件等内部和表面缺陷,并对缺陷的类型、性质、数量、形状、位置、尺寸、分布及其变化作出判断和评价。

1.1.2 无损检测的目的

无损检测的目的是定量掌握缺陷与强度的关系,评价构件的允许负荷、剩余寿命,检测设备(构件)在制造、使用过程中产生的缺陷情况,以便改变制造工艺、提高产品质量、及时发现故障,保证设备安全可靠地运行。

1) **质量管理** 对加工的原材料或零部件提供实时质量控制,例如:材料或零件的缺陷及分布等。同时,将无损检测过程中获得的与质量相关的信息反馈到设计、工艺等部门,为改进产品的设计与制造工艺提供依据。另外,可以根据验收标准,利用无损检测技术把产品质量控制在允许的范围内,以利于提高材料的利用率。

2) **设备的在役检测** 用无损检测技术对运行中的设备或停机检修的设备进行检测,可以及时发现设备存在的安全隐患,保证设备安全运行。

3) **质量监控** 零部件在进行组装或设备投入使用前进行检验,判断产品是否合格。

1.1.3 无损检测的主要内容

随着现代工业和科学技术的发展,无损检测技术从单纯的质量检验发展成为一门多用途的综合技术。无损检测的主要内容包括以下三个方面。

1) **无损探伤** 发现材料或工件中的缺陷,确定缺陷的位置、数量、大小、形状及

性质。以便对设备的安全运行、产品的质量作出评价,同时,为产品设计、制定(修订)工艺提供依据。

2)测试 包括测定材料的机械物理性能,例如:裂纹扩展速率、机械强度、硬度、导电率等;检查产品的性质和状态,例如:热处理状态、应力应变特性、硬化层深度;产品的几何度量,例如:产品的几何尺寸、涂层、镀层、板厚等的测量。

3)监控 对正在运行中的重要部件进行动态检测,把部件缺陷的变化连续地提供给检测者。

1.1.4 无损检测的特点

无损检测技术具有如下特点。

① 不会对构件造成任何损伤。无损检测是在不破坏构件的条件下,利用材料的物理性质因有缺陷发生变化的现象,来判断构件内部和表面是否存在缺陷,而不会对材料、工件和设备造成任何损伤。

② 为找缺陷提供了一种有效方法。任何结构、部件或设备在加工或使用过程中,由于其内外部各种因素的影响,不可避免地会产生缺陷。操作使用人员不仅要知道是否有缺陷,还要查找缺陷的位置、大小及其危害程度,并要对缺陷的发展进行预测和预报。无损检测为此提供了一种有效的方法。

③ 能够对产品质量实现监控。产品在加工或成型过程中,如何保证产品质量及其可靠性是提高效率的关键。无损检测能够在铸造、锻造、冲压、焊接、切削加工等每道工序中,检查该工件是否符合要求,可避免徒劳无益的加工,从而降低生产成本,提高产品质量和可靠性,实现对产品质量的监控。

④ 能够防止因产品失效引起的灾难性后果。机械零部件、装置或系统,在制造或服役过程中丧失其规定功能而不能工作,或不能继续完成其预定功能称为失效。失效是一种不可接受的故障。用无损检测技术提前或及时检测出失效部位和原因,并采取有效的措施,就可以避免灾难性事故的发生。

⑤ 具有广泛的应用范围。无损检测技术适用于各种设备、压力容器、机械零件等缺陷的检测,例如金属材料、非金属材料、铸件、锻件、焊接件、板材、棒材、管材以及多种产品内部与表面的缺陷的检测。因此无损检测技术受到工业界的普遍重视。

1.1.5 使用无损检测时应注意的问题

① 检测结果的可靠性。一般来说,不管采用哪一种检测方法,要完全检测出结构的异常部分是非常困难的。因为缺陷与表征缺陷的物理量之间并非一一对应的关系,因此需要根据不同情况选用不同的物理量。有时甚至同时使用两种或多

种无损检测方法,才能对结构异常做出可靠的判断。

② 检测结果的评价。无损检测结果必须与一定数量的破坏性检测结果相比较,才能得到合理的评价。而且这种评价只能作为材料或构件质量和寿命判定的依据之一。

③ 无损检测实施时间。无损检测应该在对材料或工件质量有影响的每道工序之后进行。例如焊缝检测,在热处理前对原材料和焊接工艺进行检查,在热处理后则对热处理工艺进行检查,有时还要考虑时效对焊缝的影响等。

1.2 无损检测方法及其选择

1.2.1 常用的无损检测方法

无损检测技术是应用物理、电子技术与材料学等各门学科相互渗透和结合的产物。随着无损检测技术应用的日益广泛和伴随着其他基础科学的综合应用,已发展了几十种无损检测方法。表1-1为常用无损检测方法的适用范围、优点与局限性。

表1-1 常用的无损检测方法的适用范围、优点与局限性

方法	用途	优点	局限性
超声检测	检测锻件裂纹、分层、夹杂,焊缝中的裂纹、气孔、夹渣、未熔合、未焊透;型材的裂纹、分层、夹杂、折叠;铸件中的缩孔、气泡、热裂、冷裂、疏松、夹渣等缺陷及测厚	对平面型缺陷十分敏感,一经探伤便知结果;设备易于携带	为耦合传感器,要求被检测表面光滑;难以探测出细小裂纹;要有参考标准,要求检测人员有较高的素质,不适用于形状复杂或表面粗糙的工件
声发射检测	检测构件的动态裂纹、裂纹萌生及裂纹生长等	实时连续监控,探测可以遥控,装置轻便	传感器与试件耦合应良好,试件必须处于应力状态,噪声不得进入探测系统。设备贵,人员素质要求高
噪声检测	检测设备内部结构的磨损、撞击、疲劳等缺陷,寻找噪声源	仪器轻便,检测分析速度快,可靠性高	外界干扰大

续表 1-1

方法	用途	优点	局限性
激光检测	检测微小变形、夹板蜂窝结构的胶接质量、充气轮胎缺陷、测量裂纹等	检测灵敏度高,面积大,不受材料限制,结果便于保存	仅适用于近表面缺陷检测
微波检测	检测复合材料、非金属制品、火箭壳体、航空部件、轮胎等,测量厚度、密度、湿度等	灵敏度高,绝缘好,抗腐蚀,不受电磁干扰	不能检测金属材料内部缺陷,一般不适用于检测小于 1 mm 的缺陷,空间分辨率较低。
光纤检测	检测锅炉、泵体、铸件、炮筒、压力容器、火箭壳体、管道内表面的缺陷及焊缝质量和疲劳裂纹等	灵敏度高,绝缘好,抗腐蚀,不受电磁干扰	仪器成本较高,不能检测结构内部缺陷
涡流检测	检测导电材料表面或接近表面的裂纹、夹杂、折叠、凹坑、疏松等缺陷,能确定缺陷的位置和相对尺寸	经济,简便,可自动对准工件探伤,不需耦合	仅限于导电材料,穿透浅,要有参考标准,难以判断缺陷种类,不适用于非导电材料
X射线检测	检测焊缝中未焊透、气孔、夹渣、铸件中缩孔、疏松、热裂等,并能确认缺陷的位置、大小及种类	功率可调,照相质量比 γ 射线高,可永久记录	仪器成本较高,不易携带,有放射危险,要素质高的操作人员,较难发现焊缝裂纹和未熔合缺陷,不适用于锻件和型材
γ 射线检测	检测焊接不连续(包括裂纹、气孔、未熔合、未焊透及夹渣)以及腐蚀和装配缺陷。最易检查厚壁体积型缺陷	获得永久记录。 γ 源可以定位在诸如钢管和压力容器之类的物体内部	不安全,要保护被照射的设备。要控制检验源的曝光能级和剂量,对易损耗的辐射源必须定期更换, γ 源输出能量(波长)不能调节,成本高,要有素质高的操作和评价人员

续表 1-1

方法	用途	优点	局限性
磁粉检测	检测铁磁性材料和工件表面或近表面的裂纹、折叠、夹层、夹渣等,并能确定缺陷的位置、大小和形状	简单、操作方便、速度快,灵敏度高	限于磁性材料,探伤前必须清洁工件,涂层太厚会引起假显示,某些应用要求探伤后要退磁,难以确定缺陷深度
渗透检测	能检测金属和非金属材料裂纹、折叠、疏松、针孔等表面开口缺陷,并能确定缺陷的位置、大小、形状	对所有材料都适用,投资相对较少,探伤简便,结果易解释	涂料、污垢及涂覆金属等表面层会掩盖缺陷,孔隙表面的漏洞也能引起假显示,探伤前后必须清洁工件,难以确定缺陷的深度,不适于疏松多孔材料
目视检测	检测表面缺陷,焊接外观和尺寸	经济,方便,设备少	只能检查外部(表面)损伤,要求检验员视力好
工业CT检测	缺陷检测,尺寸测量,装配结构分析,密度分布表征	能给出检测试件断层扫描图像和空间位置、尺寸、形状,成像直观,分辨率高,不受试件几何结构限制	仪器成本高

上述方法中较为成熟并在工程技术中得到广泛应用的检测方法有:射线、超声、涡流、磁粉、渗透五种常规检测方法。此外,激光全息照相干涉、声发射、微波、红外等无损检测技术已得到日益广泛的应用。

1.2.2 无损检测方法的选择

由于被检测对象非常复杂,不同的材料、不同的加工方法在构件中形成的缺陷也不同,同时无损检测的方法种类多,所以选择无损检测方法、设计无损检测方案是无损检测工作中的重要环节。只有选择了正确的方法,才能进行有效的无损检测。

因此,必须在掌握各种无损检测方法的特点、适用范围及它们之间的相互关

系,在综合分析、评价的基础上,对具体的检测对象选择恰当的无损检测方法 & 检测方案。

一般,选择无损检测方法首先必须搞清楚选择无损检测的原因。主要考虑:①检测什么? ②检测对象工件的材质、成型方法、加工过程、使用经历、缺陷的可能类型、部位、大小、方向、形状等;③选择哪种方法能达到目的?

应用无损检测的原因确定后,选择无损检测方法要考虑的主要因素是:缺陷的类型、缺陷在工件中的位置、工件的形状、大小、材质。材料与加工工艺中的常见缺陷见表 1-2。

表 1-2 材料与加工工艺中的常见缺陷

材料与工艺		常见缺陷
加工工艺	铸 造	疏松、裂纹、缩孔、气孔、冷隔、夹杂、夹砂
	锻 造	疏松、白点、裂纹、偏析、夹杂、缩孔
	焊 接	裂纹、夹渣、气孔、未熔合、未焊透
	热处理	开裂、变形、脱碳、过烧、过热等
	冷加工	表面粗糙、深度缺陷层、组织转变、晶格扭曲等
金属型材	板 材	裂纹、夹杂、皮下气孔、龟裂等
	管 材	裂纹、折叠、夹杂、翘皮、划痕
	棒 材	裂纹、夹杂、皮下气孔、缩孔、折叠、皱纹等
	钢 轨	裂纹、白核、黑核
非金属型材	橡 胶	气泡、分层、裂纹等
	塑 料	气孔、夹杂、分层、粘合不良等
	陶 瓷	夹杂、气孔、裂纹等
	混凝土	空洞、裂纹等
维修检查		疲劳裂纹、应力腐蚀、摩擦腐蚀等
复合材料		未粘合、粘合不良、脱粘、树脂开裂、水溶胀、柔化等

根据缺陷的形貌,可将缺陷分为体积型缺陷和平面型缺陷。可以用三维尺寸或体积来描述的缺陷称为体积型缺陷,常见的体积型缺陷及可采用的无损检测方法见表 1-3。平面型缺陷是指一个方向很薄而另两个方向较大的缺陷,其缺陷类

型及可选用的无损检测方法见表1-4。

表1-3 不同体积型缺陷可采用的无损检测方法

缺陷类型	可选用的检测方法
夹杂、夹渣、疏松	目测检测(表面)、渗透检测(表面)、磁粉检测(表面及近表面)、涡流检测(表面及近表面)
缩孔、气孔、腐蚀坑	微波检测、超声检测、射线检测、中子照相、红外检测、光全息检测

表1-4 不同平面型缺陷可采用的无损检测方法

缺陷类型	可选用的检测方法
分层、粘结不良、折叠	目测检测、磁粉检测、涡流检测、超声检测
冷隔、裂纹、未熔合	微波检测、声发射检测、红外检测

不同的无损检测方法对构件材料的特征也有不同的要求,如表1-5所示。

表1-5 不同检测方法对应的不同材质

方法	材质
渗透	缺陷必须延伸到表面,非多孔材料
磁粉	必须是磁性材料
涡流	必须是导电材料
微波	能透入微波
X射线检测	与工件厚度、密度及化学成分有关
计算机层析成像	与工件厚度、密度及化学成分有关
中子照相	与工件厚度、密度及化学成分有关
全息干涉检测	表面光学性质
散斑干涉检测	表面光学性质

被检测构件的尺寸不同,适用的无损检测方法也不同。表1-6所示为不同厚度的构件可采用的无损检测方法。