

高等学校规划教材

无损检测实用教程

WUSUN JIANCE SHIYONG JIAOCHENG

付亚波 主编



化学工业出版社

高等 学 校 规 划 教 材

无损检测实用教程

WUSUN JIANCE SHIYONG JIAOCHENG

付亚波 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本教材以满足应用型人才培养要求为目的,编写过程中采用理论和实验相结合的方式,内容不仅包括无损检测的原理、条件和案例,还包括了8种实验教学方案和3套试题,有利于在教学过程中理论结合实际以提高教学质量。

本书主要面向材料类专业的大学本科生,也可作为机械等其他专业师生和在职无损检测高级人员进行系统培训的参考教材,还可供从事工程设计、技术管理、安全防护管理人员和广大无损检测工作者阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

无损检测实用教程/付亚波主编. —北京:化学工业出版社,2018.6
高等学校规划教材
ISBN 978-7-122-32054-4

I. ①无… II. ①付… III. ①无损检验-高等学校-教材
IV. ①TG115.28

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第084197号

责任编辑:陶艳玲
责任校对:王素芹

装帧设计:韩 飞

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

印 装:北京市白帆印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张9 $\frac{3}{4}$ 字数228千字 2018年7月北京第1版第1次印刷

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

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:39.00元

版权所有 违者必究

本书编写人员名单

主 编：付亚波

副主编：李树丰 钟文武 卢正欣 霍颜秋

主 审：吴建波

前言

无损检测技术不仅有着深刻的科学背景，而且有着丰富的文化内涵；无损检测凝聚着现代科学的智慧，闪耀着现代文化的光辉，现代文明有无损检测的一份贡献。在人类进入辉煌的 21 世纪的今天，我们应该以更宽广的视角来审视无损检测在工业中的应用。为此，加强应用型人才培养显得尤为重要。

近年来我国高等教育大众化教育取得了令世人瞩目的成就。在新形势下要求工科教材多元化，以满足不同层次的要求。本教材以满足应用型人才培养为目的，在《无损检测实用教程》编写过程中，以理论和实践相结合的方式，内容不仅包括无损检测的原理、检测工艺和应用案例，还包括了实验教学所需要的 8 种实验教学方案，最后编写了三套考试试题，有利于教师教学和学生学习的。

本书主要面向材料类专业的大学本科学士生，也可作为机械等其他专业师生和在职无损检测高级人员进行系统培训的参考教材，还可供从事工程设计、技术管理、安全防护管理人员和广大无损检测工作者阅读参考。

本书第 1~10 章由台州学院付亚波完成，第 11 章由西安理工大学李树丰、卢正欣完成，第 12 章及附录由台州学院钟文武和霍颜秋完成；全书由台州学院吴建波主审。感谢台州学院冯尚申、陈英才和王宇对本书的出版提供帮助。

付亚波
2018 年 1 月

第 1 章 绪论

1

1.1 基本概念及其技术组成	1
1.1.1 基本概念	1
1.1.2 无损检测文化现象	1
1.1.3 无损检测与质量管理	1
1.1.4 无损检测技术的构成	2
1.1.5 无损检测研究内容	2
1.1.6 无损检测的理论基础	2
1.1.7 无损检测技术的发展	2
1.1.8 无损评价	3
1.1.9 五种常用无损检测英文及缩写	3
1.2 无损检测的应用及其重要性	3
1.2.1 应用在“全领域”各过程	3
1.2.2 无损检测的重要性	5
1.3 无损检测方法及其分类	5

第 2 章 超声波检测

6

2.1 超声波的概念	6
2.2 不同频率范围的声学研究内容	6
2.3 超声波的特点	6
2.3.1 优点	6
2.3.2 超声检测技术的局限性	7
2.3.3 超声检测技术的适用范围	7
2.3.4 超声波的分类	7
2.3.5 超声波在介质中的传播特性	8
2.3.6 超声波的衰减	9
2.4 超声探伤原理及结构	10
2.4.1 超声探伤的工作原理	10
2.4.2 超声波探头	10
2.4.3 试块与耦合剂	11

2.5	超声波检测方法	12
2.5.1	超声波反射法	12
2.5.2	超声波透射法(穿透法)	13
2.5.3	超声波横波检测法	14
2.6	耦合剂	14
2.7	显示方式	14
2.7.1	A型显示探伤仪	15
2.7.2	B型显示探伤仪	15
2.7.3	C型显示探伤仪	15
2.7.4	P扫描系统	16

第3章 射线检测

17

3.1	射线检测的物理基础	17
3.2	X射线的发现	18
3.3	X射线的产生	18
3.3.1	连续X射线	19
3.3.2	标识X射线	20
3.4	γ 射线的产生	20
3.5	中子射线的产生	21
3.6	射线检测及其特点	21
3.7	射线通过物质的衰减规律	21
3.7.1	射线与物质的相互作用	21
3.7.2	射线的衰减定律和衰减曲线	23
3.7.3	X射线检测的基本原理	24
3.8	检测方法	24
3.8.1	照相法	24
3.8.2	电离检测法	24
3.8.3	荧光屏直接观察法	25
3.8.4	电视观察法	25
3.8.5	线阵列探测器	25
3.8.6	X射线照相检测技术	25
3.8.7	曝光参数的选择	27
3.9	常见缺陷及其影像特征	30
3.9.1	焊件中常见的缺陷	30
3.9.2	铸件中常见的缺陷	32
3.10	射线的剂量限值及防护方法	34
3.10.1	照射剂量限值	34
3.10.2	射线防护方法	35

3.11 典型工件的透照方向选择	36
3.11.1 外透法	36
3.11.2 内透法	36
3.11.3 双壁双影法	36
3.11.4 双壁单影法	36

第4章 涡流检测

37

4.1 涡流检测的基本原理	37
4.2 涡流检测的特点	37
4.2.1 优点	37
4.2.2 缺点	38
4.3 涡流的趋肤效应和渗透深度	38
4.3.1 趋肤效应	38
4.3.2 渗透深度	38
4.4 电磁感应现象	39
4.4.1 电磁感应	39
4.4.2 自感	39
4.4.3 互感	39
4.5 涡流检测的阻抗分析法	40
4.5.1 检测线圈的阻抗和阻抗归一化	40
4.5.2 有效磁导率和特征频率	41
4.5.3 涡流检测相似律	41
4.5.4 影响线圈阻抗的因素	42
4.6 涡流效应的测量	43
4.6.1 测量线圈阻抗的变化	43
4.6.2 测量线圈中电流的变化	43
4.7 涡流检测线圈	44
4.7.1 按感应方式分类	44
4.7.2 按应用方式分类	44
4.7.3 按比较方式分类	44
4.8 涡流检测方式及探头	45
4.8.1 涡流检测的方式	45
4.8.2 涡流检测探头	45
4.9 信号检出电路	46
4.10 涡流检测的一般工艺程序	47
4.10.1 试件的表面清理	47
4.10.2 检测仪器的准备及稳定	47
4.10.3 检测规范的选择	48

4.10.4	检测操作	48
4.11	涡流检测的应用	48
4.11.1	涡流探伤	48
4.11.2	材质检验	49
4.11.3	涡流测厚	50
4.11.4	其他方面的应用	50

第5章 磁粉检测

51

5.1	简单的磁现象及概念	51
5.1.1	磁的基本概念	52
5.1.2	磁场和磁力线	52
5.1.3	真空中的恒定磁场	52
5.1.4	磁介质中的磁场	53
5.2	铁磁性材料	54
5.2.1	磁畴	54
5.2.2	磁化过程	54
5.2.3	铁磁质的磁滞回线	55
5.2.4	磁屏蔽	55
5.3	磁粉检测	56
5.3.1	磁粉检测发展简史	56
5.3.2	磁粉检测的优点和局限性	56
5.3.3	磁粉检测原理	57
5.3.4	影响漏磁场强度的主要因素	58
5.3.5	磁化方法及过程	58
5.3.6	磁粉的种类及适用环境	63
5.3.7	磁粉检测工艺	64

第6章 渗透检测

68

6.1	概述	68
6.2	渗透检测的基本原理	68
6.3	渗透检测的特点及适用范围	69
6.3.1	渗透检测的特点	69
6.3.2	渗透检测的适用范围	69
6.4	渗透检测的物理基础	70
6.4.1	物质的分子运动	70
6.4.2	液体的表面张力	70

6.4.3	液体的润湿与铺展	71
6.4.4	液体的毛细管现象	72
6.4.5	乳化作用与乳化剂	73
6.4.6	渗透液在缺陷中的残留性	73
6.5	渗透检验的基本检验程序	73
6.5.1	试件表面的预清洗	73
6.5.2	渗透	74
6.5.3	清洗	74
6.5.4	干燥	74
6.5.5	显像	74
6.5.6	观察评定	74
6.5.7	后清洗	74
6.6	影响渗透检验质量的因素	75
6.6.1	试件的表面粗糙度	75
6.6.2	试件的预清洗与渗透后清洗	75
6.6.3	渗透液的性能	75
6.6.4	显像剂性能	75
6.6.5	观察评定的环境条件	76
6.6.6	操作人员的经验与技术水平、身体状况	76

第7章 激光全息检测

77

7.1	概述	77
7.2	激光全息检测的特点及原理	78
7.2.1	全息照相的特点	78
7.2.2	全息照相的原理	78
7.2.3	拍摄全息图像需要具备的条件	79
7.2.4	全息干涉检测原理	82
7.3	激光全息检测诊断方法	83
7.3.1	检验方法	83
7.3.2	加载方法	85
7.3.3	诊断技术	87
7.4	激光全息检测的应用	87
7.4.1	蜂窝结构检测	87
7.4.2	复合材料检测	88
7.4.3	胶接结构检测	88
7.4.4	压力容器检测	89

第 8 章 声振检测法

90

8.1	检测原理	90
8.2	检测方法	90
8.2.1	频率检测法	90
8.2.2	局部激振法	90
8.3	扫描声振检测技术	91
8.4	声振检测的应用	91
8.4.1	蜂窝结构检测	91
8.4.2	复合材料检测	92

第 9 章 微波无损检测

93

9.1	微波概述	93
9.2	微波检测技术的特点	93
9.2.1	微波检测的优点	93
9.2.2	微波检测的局限	94
9.3	微波检测的基本原理	94
9.3.1	微波的传播	94
9.3.2	反射与折射	95
9.4	微波的检测方法	95
9.4.1	穿透法	95
9.4.2	反射法	96
9.4.3	散射法	96
9.5	微波检测技术的应用	96
9.5.1	金属表面裂缝的微波检测	96
9.5.2	金属应力微波腐蚀检测	96
9.5.3	其他领域的应用	97

第 10 章 声发射检测

98

10.1	声发射现象的物理基础	98
10.1.1	声发射现象	98
10.1.2	声发射检测原理	98
10.2	声发射检测的特点	99
10.2.1	缺点	99
10.2.2	优势	99
10.3	声发射的来源与产生	99
10.3.1	工程材料的声发射源	99

10.3.2	声发射信号的特征参数	99
10.4	声发射检测的应用	100
10.4.1	声发射在材料研究中的应用	100
10.4.2	声发射在焊接中的应用	101

第 11 章 红外检测技术

102

11.1	概述	102
11.1.1	红外检测技术的发展	102
11.1.2	红外测温的特点	103
11.2	红外基本概念和基础知识	103
11.2.1	热辐射和红外辐射	103
11.2.2	温度、温度测量与温标	103
11.2.3	红外相关术语	104
11.2.4	红外辐射基本定律	106
11.2.5	红外辐射的传输与衰减	107
11.2.6	红外成像技术	107
11.2.7	红外探测器	107
11.3	红外检测仪器	109
11.3.1	红外点温仪	110
11.3.2	红外热像仪	110
11.3.3	红外热电视	112
11.4	红外系统类型	113
11.4.1	红外系统的类型	113
11.4.2	红外仪器的基本特性	113
11.4.3	红外仪器的应用	113
11.5	红外测温技术的应用	114
11.5.1	红外测温技术在材料和结构检测中的应用	115
11.5.2	红外测温技术在冶金工业中的应用	116
11.5.3	红外测温系统在铁路交通运输中的应用	117
11.5.4	红外测温技术在石化企业中的应用	118
11.5.5	红外测温技术在电力系统中的应用	118
11.5.6	红外测温技术在机械工业中的应用	120
11.6	红外无损检测的不足与改进	120

第 12 章 无损检测实验

122

12.1	超声波检测标准试块的厚度	122
12.2	超声波探测试件内的缺陷	127

12.3 超声波探伤仪探头的标定..... 128

12.4 涡流法测金属裂纹..... 131

12.5 涡流法测金属电导率..... 134

12.6 超声波、涡流法测厚的比较..... 135

12.7 渗透探伤..... 136

12.8 磁粉法对焊缝探伤..... 137

附 录 考试试题	140
----------	-----

参考文献	143
------	-----

1.1.8 无损评价

1.1.8.1 基本思想

基于材料微观结构因子，建立“使用通用仪器设备得到的无损评价结果与决定材料性能的结构因子”之间的联系；基于有损检测，建立神经网络系统以及把材料的无损评价结果与确定材料性能联系起来的计算方法；最终获得有效的无损评价，如图 1-3 所示的金三角关系。

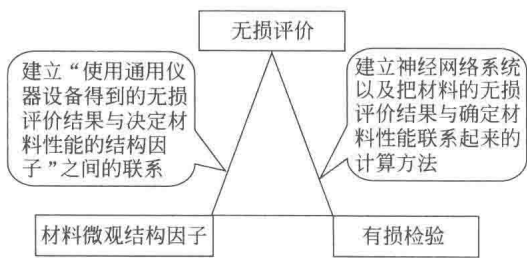


图 1-3 无损评价的金三角关系

1.1.8.2 无损评价手段

借鉴有损检测手段获得信息，在材料的力学性能、微观结构与无损检测参量之间建立相关性，进而对材料进行评价。如图 1-4 所示的“铁四边”。

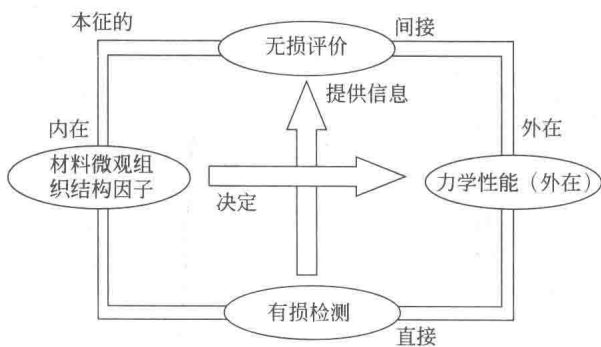


图 1-4 无损评价手段“铁四角”

1.1.9 五种常用无损检测英文及缩写

超声波检测：Ultrasonic Testing	UT
射线检测：Radiographic Testing	RT
涡流检测：Eddy Current Testing	ET
磁粉检测：Magnetic Particle Testing	MT
渗透检测：Penetration Testing	PT

1.2 无损检测的应用及其重要性

1.2.1 应用在“全领域”各过程

无损检测可应用于产品设计、加工制造、成品检验、质量评价以及设备（或装置）服役等各个阶段，如图 1-5 所示。

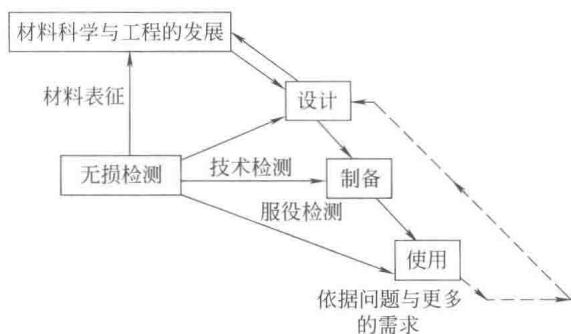


图 1-5 应用的全领域各过程

应用该技术能够在铸造、锻造、冲压、焊接以及切削加工等每道工序中检查工件（材料）是否符合要求，放弃不合格者以避免对其再进行徒劳无益的加工以保证产品的质量。有时则可以根据使用部位的不同，在不影响设计性能的前提下，使用某些有缺陷的材料，以求降低制造成本和节约资源。无损检测工序在材料和产品的静态（或动态）检测以及质量管理中，已经成为一个不可缺少的重要环节。如图 1-6 所示。

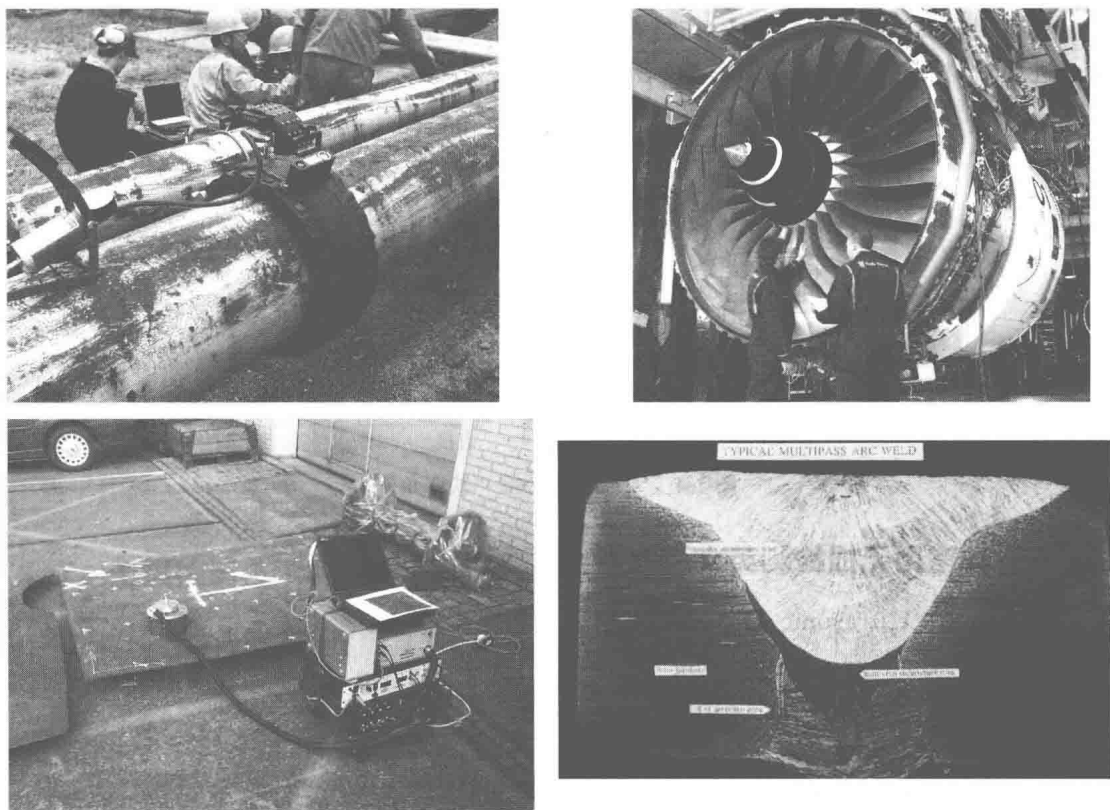


图 1-6 无损检测应用的行业

统计资料显示，经过 NDT 后产品增值情况大概是：
机械产品为 5%，国防、宇航、原子能产品为 12%~18%；
火箭为 20% 左右；
德国奔驰公司汽车的部分零件经过 NDT 后，整车运行公里数提高了一倍。

1.2.2 无损检测的重要性

当前世界上有一种提法，叫作“在质量大堤的保护下生存” [宋键，质量与可靠性，1988.(5)]，对发展中国家来说这个问题更加突出，发展中国家的问题是急需建立本国的工业基础，以达到出口产品、争取外汇、替代进口、节省外汇的目的。实际情况是：发展中国家的质量监督权被发达国家控制，如挪威船级社标准、ASM 标准、ISO 9000 质量认证等。

应该说标准本身并没有穷国、富国、大国、小国之分，但是由于历史的或是地域的原因，一般来说发展中国家的产品质量较差，既不能替代进口也不能进入国际市场，由于没有质量保证，出口换汇成了一句空话。

德国科学家曾说过，NDT 技术是机械工业的四大支柱之一。1981 年，美国前总统里根在给美国无损检测学会成立 40 周年的贺信中说：“你们能够给飞机和空间飞行器、发电厂、船舶、汽车和建筑物等带来更大的可靠性，没有无损检测，我们就不能享有目前在这些领域和其他领域的领先地位”。日本制定的 21 世纪优先发展四大技术领域之一的设备延寿技术中，把 NDT 放在十分重要的地位。

1.3 无损检测方法及其分类

根据所依据物理性质的不同，NDT 可分为：RT—射线检测技术；UT—超声检测技术；PT—渗透检测技术；ET—涡流检测技术；MT—磁粉检测技术；以及红外、微波、声发射、激光全息检测。

随着科学技术的发展，付诸应用的无损检测技术愈来愈多，现在到底有多少种，说法不一，比较公认的大致有两种。1973 年美国国家宇航局 (NASA) 提出，无损检测技术有七十种并将它们归纳为六大类和两个辅助分类；美国的 D. T. Hagemmaier 则根据实际应用情况把无损检测技术归纳为三十二种，该分类方法也得到了了一定程度的认可。

第2章 超声波检测

2.1 超声波的概念

波有两大类：电磁波和机械波。电磁波是由电磁振荡产生的变化电场和变化磁场在空间的传播过程（无线电波、紫外线、伦琴射线和可见光）；机械波是机械振动在介质中的传播过程（水波、声波、超声波）。

振动是波动的产生根源，波动是振动的传播过程。

超声波是超声振动在介质中的传播，它的实质是以波动形式在弹性介质中传播的机械振动。超声波的产生必须依赖于作高频机械振动的“声源”。同时，还必须依赖于弹性介质的传播。超声波的传播过程包括机械振动状态和能量的同时传递。

2.2 不同频率范围的声学研究内容

次声 ($f < 16\text{Hz}$)：台风、地震、核爆炸、天体等；

声频声 ($16\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ —可听声)：语言声学、音乐声学、电声学、噪声学、建筑声学、生理声学、心理声学等；

超声 ($2 \times 10^4 \sim 10^9\text{Hz}$)：超声学、水声学、生物声学、仿生学等；

特超声 ($f > 10^9\text{Hz}$)：研究物质结构。

2.3 超声波的特点

2.3.1 优点

① 超声波的方向性好：超声波具有像光波一样定向发射的特性。

② 超声波的穿透能力强：对于大多数介质而言，它具有较强的穿透能力。例如在一些金属材料中，其穿透能力可达数米。

③ 超声波的能量高：超声检测的工作频率远高于声波的频率，超声波的能量远大于声波的能量。

④ 遇有界面时，超声波将产生反射、折射和波型的转换：利用超声波在介质中传播时的这些物理现象，经过巧妙地设计，可使超声检测工作的灵活性、精确度得以大幅度提高。