

无损检测 技术及其应用

(第二版)

张俊哲 编著



科学出版社
www.sciencep.com

无损检测技术及其应用

(第二版)

张俊哲 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了无损检测技术及其应用,阐述了各种无损检测方法的原理、特点、适用范围和发展趋势,并列举了应用实例。内容包括渗透、磁粉、录磁和漏磁、磁记忆、电位、涡流、X射线、 γ 射线、高能射线、X射线成像检测与工业CT、中子照相、声阻、超声、非线性超声和相控阵超声、超声衍射时差法、声发射检测、激光全息摄影等无损检测技术,以及X射线残余应力测试、氦质谱真空检漏、液晶检测、红外热成像、微波检测、光纤与内窥镜、穆斯堡尔谱、正电子湮没、巴克豪森噪声、外激电子发射、光声显微镜、核磁共振等新技术,还介绍了在役结构完整性评价的基本理论和特种设备、石油天然气管道、铁道系统、航空系统、土木工程与钢结构、核电站等的在役检查。

本书可供高等院校无损检测专业研究生、教师和相关领域及学科的工程技术人员阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

无损检测技术及其应用/张俊哲编著. —2版. —北京:科学出版社,2010
ISBN 978-7-03-029104-2

I. 无… II. 张… III. 无损检测-高等学校-教材 IV. TG115.28

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第189190号

责任编辑:张 静/责任校对:张凤琴

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

1993年5月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010年10月第 二 版 印张:27 1/2

2010年10月第二次印刷 字数:531 000

印数:1—2500

定价:86.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第二版序

无损检测与无损评价技术是在物理学、材料科学、断裂力学、机械工程、电子学、计算机技术、信息技术以及人工智能等学科的基础上发展起来的一门工程应用技术。随着现代工业和科学技术的发展,无损检测与无损评价技术正日益受到各个工业领域和科学研究部门的重视,不仅在产品质量控制中其不可替代的作用已为众多科技人员和企业界所认同,对运行中设备的在役检查也发挥着重要作用,因此对从事无损检测专业及相关人员提出了相应专业知识的要求。

《无损检测技术及其应用》(第一版)一书正是为了满足各方面人士对无损检测技术学习和参考的需要,以促进无损检测事业的进一步发展,同时也是总结了作者在中国工程物理研究院从事无损检测工作 40 多年的实践经验,作为《中国工程物理研究院科技丛书》之一而出版的。由于该书是一本比较系统和全面介绍无损检测技术的专门著作,因此一经出版发行就受到了无损检测学术界和相关部门的热烈欢迎,很快便销售一空。1997 年 7 月,科学出版社责任编辑林鹏便提出再版要求,由于当时作者工作较忙,需要修改和补充的内容也不多,因此没有修订再版。

现在,《无损检测技术及其应用》(第一版)发行已经过去十多年了,无损检测技术的一些主要分支学科都有了很大的发展,特别是在计算机技术的应用方面进展很快,使很多无损检测设备和方法都实现了数字化、信息化、自动化和人工智能化,同时全国各地各工业领域和部门对无损检测技术的需求和应用更加广泛,因此,很有必要对本书进行修改、补充和再版。

这次修改主要增加了涡流检测技术的新发展,磁记忆检测法,数字化射线成像检测技术,工业 CT 技术的新进展及其应用,射线检测中的传递函数,相控阵超声检测技术,超声 TOFD 检测法,非线性超声检测技术,声发射技术的新发展,X 射线残余应力测试和巴克豪森噪声检测技术的进展,漏磁检测技术和微波检测技术的新进展,核磁共振检测技术等。另外增加了第 10 章在役检查,介绍了在役结构可靠性的基本理论,以及特种设备、石油天然气管道、铁道系统、航空系统、土木工程与钢结构和核电站的在役检查现状与应用情况。

本书的修改和再版得到了中国工程物理研究院技术转移中心宁波分中心、浙江中物九鼎科技孵化器有限公司的大力支持和协助,也得到科学出版社数理分社的大力支持。在此深表谢意!

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

张俊哲

于中国工程物理研究院技术转移中心宁波分中心

浙江中物九鼎科技孵化器有限公司

二零一零年五月

第一版序

随着现代工业和科学技术的发展,无损检测技术的重要性越来越被各个部门所重视。当前,无损检测技术已经形成一门新兴的独立的综合性应用技术科学。

无损检测是在不损害或基本不损害材料或构件的情况下采用物理、化学等方法 and 手段,探测被检对象内部和表面的各种缺陷及某些物理性能。现代无损检测与评价技术不但要探测缺陷的有无,而且要给出材质的定量评价,其中包括对缺陷的定量测量,如缺陷的形状、大小、位置、取向、分布和内含物等,以及对有缺陷的材料和产品的质量评价,还包括测量材料和产品的某些物理、力学性能,如内部的残余应力、组织结构、涂层厚度等。无损评价是无损检测更高层次的发展。无损检测与评价技术对于控制和改进产品质量,保证材料、零件和产品的可靠性,保证设备的安全运行以及提高生产效率、降低成本等方面都起着重要的作用,是发展现代工业和科学技术必不可少的重要措施之一。可以说,无损检测与评价技术的发展程度标志着一个国家的工业水平。

从应用角度来说,无损检测主要有下述三种应用方法:第一种是在生产过程质量控制中的无损检测,即应用于产品的质量管理工作。它可以剔除每道生产工序中的不合格产品,并把检测结果反馈到生产工艺中去,指导和改进生产,监督产品的质量。第二种是用于成品的质量控制,即用于出厂前的成品检验和用户进行的验收检验。它主要是检验产品是否达到设计性能,能否安全使用。第三种是用于产品使用过程中的监测,即维护检验。它是用户在使用产品或设备的过程中,经常地或定期地检查是否出现危险性缺陷而采用的无损检测方法,有时也称为在役检查。这种检测可以做到“防患于未然”,对消灭灾害性事故起着重要的作用。

本书的编著者在工程物理科研实践中长期从事无损检测工作和专项课题研究,积累了丰富的工作经验。这次根据《中国工程物理研究院科技丛书》的编写要求,按照无损检测学科的体系,以全面系统地介绍无损检测技术及其在工程物理中的应用为目的编著了这本书。由于无损检测技术涉及的学科范围和理论基础十分广泛,本书力求简洁,用有限的篇幅既介绍常规无损检测方法,又力求反映无损检测领域的新技术和新成果。

由于作者们水平有限,书中出现错误在所难免,敬请读者批评指正。本书由张俊哲同志担任主编。书中第1章、第2章、第3章、第4章中4.1.3, 4.3.6, 4.4.1, 4.4.3, 4.5.2至4.5.6, 4.6至4.8节、第6章、第7章和第9章由张俊哲同志编著;第4章其余各节由游开兴同志编著;第5章由马振泽同志编著;第8章由刘常龄同志

编著。全书由张俊哲同志负责修改、校对。全国无损检测学会主任委员、中国科学院声学研究所研究员郭成彬同志和中国核动力研究设计院研究员何凤岐同志担任主审。成都飞机公司高级工程师孔凡庚同志对本书初稿曾提出一些宝贵意见。在本书的修改过程中，中国工程院院士、中国工程物理研究院俞大光教授，研究员徐清之、姚治、高级工程师罗诚镒和副研究员方乃相等同志都提出了许多宝贵的意见。丛书编委会的其他同志也给予了热情的帮助和指导，在此一并表示衷心感谢。

张俊哲
于中国工程物理研究院
一九九二年五月

目 录

第二版序

第一版序

第 1 章 总论	1
1.1 无损检测概述	1
1.1.1 无损检测技术及其应用	1
1.1.2 无损检测与评价技术的进展	2
1.2 材料和构件中缺陷与强度的关系	4
1.3 工程设计与断裂预报力学	5
1.4 无损检测技术的特点	7
1.5 无损检测方法的选择	9
参考文献	12
第 2 章 渗透与磁法检测	13
2.1 渗透检测的特点与应用	13
2.1.1 渗透检测的特点	13
2.1.2 渗透检测的应用	13
2.1.3 渗透检测发展趋势	14
2.2 渗透检测的原理和方法	15
2.2.1 渗透检测的基本原理	15
2.2.2 着色检测法	16
2.2.3 荧光检测法	17
2.2.4 渗透检漏法	18
2.2.5 影响渗透检测灵敏度的因素	18
2.3 渗透检测应用实例	19
2.3.1 高强度铸造铝合金部件荧光检验	19
2.3.2 小型零部件的荧光检验	21
2.3.3 着色探伤的应用	21
2.4 磁粉检测的特点与应用	21
2.4.1 磁粉检测的特点与应用	21
2.4.2 磁粉检测发展趋势	22
2.5 磁粉检测的原理和方法	23

2.5.1	磁粉检测的基本原理	23
2.5.2	磁粉检测方法	24
2.5.3	影响磁粉检测灵敏度的因素	27
2.6	磁粉检测应用实例	29
2.6.1	大型钢壳的磁粉检验	29
2.6.2	带中心孔零件的磁粉检验	29
2.6.3	紧固件的磁粉检验	30
2.6.4	工艺装置的磁粉检验	30
2.7	漏磁和录磁检测法	30
2.7.1	漏磁检测法	31
2.7.2	录磁检测法	33
2.7.3	漏磁检测技术的进展	34
2.8	磁记忆检测	37
2.8.1	磁记忆检测的原理与特点	37
2.8.2	磁记忆检测仪器	39
2.8.3	磁记忆检测的计算机系统	40
2.8.4	磁记忆检测的应用	41
	参考文献	42
第 3 章	电位与涡流检测	43
3.1	电位检测法	43
3.1.1	电位检测法原理	43
3.1.2	电位法检测探头	46
3.1.3	电位法检测夹层	46
3.1.4	电位法检测小球形容器电子束焊缝的熔深	47
3.2	涡流检测的特点与应用	47
3.2.1	涡流检测的特点与应用	47
3.2.2	涡流检测发展趋势	48
3.3	涡流检测的原理和方法	49
3.3.1	涡流检测的基本原理	49
3.3.2	有效磁导率和界限频率	51
3.3.3	阻抗图特性	53
3.3.4	涡流检测的仪器与方法	55
3.4	涡流检测应用实例	58
3.4.1	涡流测量与测厚	58
3.4.2	薄壁管的涡流探伤	59

3.5 涡流检测技术的新发展	62
3.5.1 多频涡流检测技术	62
3.5.2 远场涡流检测技术	63
3.5.3 脉冲涡流检测技术	64
3.5.4 涡流阵列检测技术	65
3.5.5 磁光/涡流成像检测技术	67
参考文献	67
第 4 章 射线检测	68
4.1 射线检测的特点和应用	68
4.1.1 射线检测的特点	68
4.1.2 射线检测的应用	68
4.1.3 射线检测发展趋势	69
4.2 射线源及其特性	70
4.2.1 什么是射线	70
4.2.2 X 射线的产生及其性质	71
4.2.3 X 射线透过物质时的衰减	76
4.2.4 γ 射线的产生及其特性	80
4.3 射线检测原理和装置	82
4.3.1 X 射线检测法原理	82
4.3.2 X 射线检测装置	84
4.3.3 X 射线管	85
4.3.4 产生 X 射线的典型电路	92
4.3.5 X 射线发生器	94
4.3.6 γ 射线检测装置	95
4.4 射线检测方法	97
4.4.1 射线检测灵敏度	97
4.4.2 影响灵敏度的有关因素	101
4.4.3 射线检测方法的近期发展	106
4.5 射线检测应用实例	113
4.5.1 炸药件内部质量的 X 射线检测	113
4.5.2 铝合金铸件的 X 射线探伤	116
4.5.3 普通焊缝的 X 射线探伤	117
4.5.4 仪器支架焊缝的 X 射线探伤	119
4.5.5 小球形容器电子束焊缝的 X 射线探伤	121
4.5.6 聚氨酯泡沫塑料件的软 X 射线探伤	123

4.6	高能射线检测的应用	123
4.7	闪光射线检测的应用	126
4.8	质子照相和电子照相	128
4.8.1	质子散射照相	128
4.8.2	电子射线照相	130
4.9	数字化射线成像检测技术	130
4.9.1	数字化射线成像检测技术的进展	130
4.9.2	计算机射线照相技术 (CR)	133
4.9.3	线阵列扫描成像技术 (LDA)	133
4.9.4	数字平板直接成像技术 (DR)	136
4.9.5	450kV 工业 X 射线数字平板成像检测系统	138
4.10	工业 CT 检测系统的进展及其应用	140
4.10.1	工业 CT 检测系统的进展	140
4.10.2	工业 CT 检测系统的配置	141
4.10.3	工业 CT 的图像质量	145
4.10.4	工业 CT 图像质量性能指标及影响因素	147
4.10.5	工业 CT 图像质量的测试方法	150
4.10.6	工业 CT 在无损检测中的应用	152
4.11	射线检测中的传递函数	154
4.11.1	分辨力函数	154
4.11.2	线扩展函数	155
4.11.3	调制传递函数	156
	参考文献	158
第 5 章	中子照相检测	160
5.1	概述	160
5.2	中子照相的原理、方法和特征	161
5.3	中子源及中子照相装置	164
5.3.1	中子和中子源	164
5.3.2	中子照相装置	166
5.4	中子照相的应用	173
5.5	研究实验堆的中子照相及其应用	177
5.5.1	研究实验堆中子照相装置一般性能	177
5.5.2	研究实验堆中子照相应用概述	178
5.6	中子照相的质量检验标准	180
5.6.1	E545-75 检验标准	180

5.6.2 几种检验裂缝分辨率的方法	182
参考文献	186
第 6 章 超声波检测	187
6.1 超声波检测的特点与应用	187
6.1.1 超声波检测的特点	187
6.1.2 超声波检测的应用与发展趋势	188
6.2 超声波的传播	189
6.2.1 超声波传播特性	189
6.2.2 声波在界面上的反射和折射	192
6.2.3 声强和声压的反射率与透射率	193
6.2.4 波型转换	195
6.2.5 斜入射时声压的反射率和透射率	197
6.2.6 超声波在多层平面的反射和透射	201
6.2.7 声波在弯曲界面的反射和折射	203
6.3 波动方程与超声波声场特性	205
6.3.1 理想流体介质中质点运动方程	205
6.3.2 固体中超声波波动方程	207
6.3.3 圆形压电晶片声场中的声压	208
6.3.4 近场、远场和超声指向性	209
6.3.5 声场截面上的声压分布	211
6.3.6 斜探头横波声场	212
6.3.7 声场分布测量方法	214
6.3.8 超声波的衰减	215
6.4 换能器与超声波探伤仪	216
6.4.1 压电效应和等效电路	216
6.4.2 超声波换能器	218
6.4.3 超声波探伤仪	221
6.5 超声检测方法	227
6.5.1 接触法与液浸法	227
6.5.2 纵波脉冲反射法	228
6.5.3 横波探伤法	229
6.5.4 表面波探伤法	230
6.5.5 兰姆波探伤法	230
6.5.6 穿透法检测	230
6.5.7 检测条件的选择	231

6.6 缺陷的定位、定量和定性	231
6.6.1 缺陷的定位	231
6.6.2 缺陷的定量	232
6.6.3 缺陷的定性	239
6.7 超声检测应用实例	240
6.7.1 屏蔽铸铁超声检测	240
6.7.2 钢壳和模具的超声检测	240
6.7.3 小型压力容器壳体超声检测	241
6.7.4 复合材料检测	241
6.7.5 各类结构件焊缝的超声检测	243
6.7.6 非金属材料探伤	245
6.7.7 薄壁管的超声检测	245
6.8 用超声波检测材料的其他性能	247
6.8.1 厚度的超声波检测法	247
6.8.2 硬度的超声波检测法	250
6.8.3 超声波检测淬硬层深度	252
6.8.4 弹性模量和晶粒度的超声波检测	253
6.9 声阻检测法	254
6.9.1 声阻检测法概述	254
6.9.2 双片声阻法	255
6.9.3 单片声阻法	256
6.10 超声成像与超声全息摄影	257
6.10.1 液面法超声全息摄影	258
6.10.2 激光干涉声全息法	260
6.10.3 换能器阵列法	261
6.10.4 超声摄像管法	261
6.11 声显微镜技术	263
6.12 非线性超声检测技术	265
6.13 相控阵超声检测技术	268
6.13.1 相控阵超声检测技术的应用与发展	268
6.13.2 相控阵超声原理及系统关键技术	270
6.13.3 相控阵超声检测系统	278
6.13.4 相控阵超声成像技术研究现状	278
6.14 超声检测仪器设备的新进展	281
参考文献	283

第 7 章 声发射检测	284
7.1 声发射检测的特点与应用	284
7.1.1 声发射技术的特点	284
7.1.2 声发射技术的应用	285
7.1.3 声发射检测的发展趋势	285
7.2 声发射波的产生和传播	286
7.2.1 声发射源	286
7.2.2 声发射波的传播	288
7.2.3 实际传播的声发射波	291
7.3 声发射检测方法 with 装置	292
7.3.1 声发射信号的表征参数	292
7.3.2 对声发射检测仪器的要求	295
7.3.3 声发射检测系统的组成	296
7.4 声发射检测的应用	298
7.4.1 声发射在材料研究中的应用	298
7.4.2 焊接质量的声发射监测	299
7.4.3 胶接质量的声发射检测	301
7.4.4 压力容器的声发射检测	302
7.4.5 小型韧性不锈钢压力容器的声发射检测	304
7.5 声发射检测信号处理新技术	307
7.5.1 参数分析法	307
7.5.2 波形分析法	307
7.5.3 人工神经网络	308
7.5.4 声发射检测信号处理方法的集成化	309
参考文献	309
第 8 章 激光全息摄影无损检测	311
8.1 激光全息摄影无损检测的特点与应用	311
8.2 激光全息摄影	312
8.2.1 激光全息摄影的原理和特点	312
8.2.2 拍摄全息图需具备的条件	314
8.2.3 激光全息图的类型	317
8.3 全息干涉度量技术	319
8.3.1 实时全息干涉度量技术	319
8.3.2 二次曝光全息干涉度量技术	320
8.3.3 时间平均全息干涉度量技术	320

8.4	物体移动、变形和它的全息干涉图	321
8.5	物体三维变形的定量分析和计算	324
8.5.1	零级条纹法	324
8.5.2	条纹计数法	326
8.6	用全息干涉度量技术进行无损检测	327
8.6.1	无损检测的加载方法	327
8.6.2	某些无损检测的实例	328
8.7	全息摄影等高线法及其无损检测	331
8.7.1	双波长全息摄影等高线法	331
8.7.2	双折射率全息摄影等高线法	333
8.8	高速全息摄影及高速全息摄影机	334
8.8.1	高速全息摄影允许物体的最大运动速度与各参数的关系	334
8.8.2	高速全息摄影的应用	335
8.8.3	高速全息摄影机	341
	参考文献	345
第 9 章	其他无损检测方法与新技术	346
9.1	X 射线残余应力测试技术	346
9.1.1	残余应力的测试方法和发展趋势	346
9.1.2	X 射线残余应力测试基本原理	347
9.1.3	X 射线应力测定的实验方法	349
9.1.4	X 射线应力测定技术的进展	351
9.2	氦质谱真空检漏技术	354
9.2.1	泄漏检定方法和发展趋势	354
9.2.2	氦质谱检漏的基本原理	356
9.2.3	容器焊缝氦质谱检漏方法	357
9.3	液晶与红外无损检测技术	359
9.3.1	液晶无损检测技术	359
9.3.2	红外线无损检测技术	361
9.4	微波无损检测技术	363
9.4.1	微波无损检测的特点和原理	363
9.4.2	微波无损检测方法 with 装置	364
9.4.3	微波检测技术的新进展	366
9.5	光纤无损检测技术	369
9.5.1	光纤目视检测仪	369
9.5.2	光纤裂纹检测仪	371

9.6	穆斯堡尔谱在无损检测中的应用	372
9.7	正电子湮没在无损检测中的应用	373
9.8	巴克豪森噪声在无损检测中的应用	375
9.8.1	巴克豪森效应的原理及应用	375
9.8.2	巴克豪森效应的新发展	376
9.9	外激电子发射在无损检测中的应用	378
9.10	光声显微镜在无损检测中的应用	379
9.11	核磁共振检测	381
	参考文献	385
第 10 章	在役检查	387
10.1	在役结构可靠性评价的基本理论	387
10.1.1	欧洲工业结构完整性评定方法 SINTAP 简介	389
10.1.2	英国含缺陷结构完整性评定标准简介	394
10.1.3	美国石油学会标准 API 579 简介	398
10.2	特种设备的在役检查	401
10.2.1	停产检验用无损检测技术	401
10.2.2	在线检测用无损检测技术	402
10.2.3	压力容器腐蚀检测的其他常规方法	403
10.3	石油天然气管道的在役检查	404
10.3.1	非开挖检测及其检测方法	405
10.3.2	开挖检测及电磁超声技术	406
10.3.3	超声导波技术在管道腐蚀检测中的应用	407
10.4	铁道系统的在役检查	408
10.5	航空系统的在役检查	411
10.5.1	航空系统在役检查的特点与方法	411
10.5.2	复合材料的在役检查	413
10.6	土木工程与钢结构的在役检查	416
10.6.1	土木工程的在役检查	416
10.6.2	钢结构的在役检查	418
10.6.3	超声衍射时差法 (TOFD)	419
10.7	核电站的在役检查	420
	参考文献	422

第1章 总 论

1.1 无损检测概述

1.1.1 无损检测技术及其应用

虽然无损检测这种行为有着古老的历史,但作为一门技术科学的分支则是新兴的,因此无损检测是一门新兴的综合性的应用技术。无损检测以不损害被检验对象的使用性能为前提,应用多种物理原理和化学现象,对各种工程材料、零部件和结构件进行有效的检验和测试,借以评价它们的完整性、连续性、安全可靠性及某些物理性能。包括探测材料或构件中是否有缺陷存在并判断缺陷的形状、性质、大小、位置、取向、分布和内含物等情况;还能提供涂层厚度、材料成分、组织状态、应力分布以及某些物理和机械量等信息。

无损检测技术可以对工程材料、零部件和结构件进行百分之百的检测,并根据检出缺陷的特性,依照常规力学或断裂力学的判据作出恰当的评价。所以无损检测技术是为了保证材料和构件的高质量、高性能,以及在安全可靠的基础上经济、有效的使用而提供依据的重要方法。它是工业生产中实现质量控制、节约原材料、改进工艺和提高劳动生产率的重要手段;也是设备安全运行的重要监测手段。无损检测技术与断裂力学、计算技术等相邻学科互相配合,可以带来显著的经济效果。因此,近年来,无损检测技术受到工业界的普遍重视,特别是在航空与航天、核技术、武器系统、电站设备、铁道与造船、石油与化工、锅炉和压力容器、建筑、冶金和机械制造等工业中应用极为广泛。

随着现代物理学、材料科学、微电子学和计算机技术的发展,无损检测技术也获得了迅速的发展。各种无损检测方法的基本原理几乎涉及现代物理学的各个分支。有人按照不同的原理方法和不同的探测及信息处理方式,详细地统计了已经应用和正在研究的各种无损检测方法,总共达 70 余种。主要包括射线检测 (X 射线、 γ 射线、高能 X 射线、中子射线、质子和电子射线等)、声和超声检测 (声振动、声撞击、超声脉冲反射、超声透射、超声共振、超声成像、超声频谱、声发射和电磁超声等)、电学和电磁检测 (电阻法、电位法、涡流法、录磁与漏磁、磁粉法、核磁共振、微波法、巴克豪森效应和外激电子发射等)、力学和光学检测 (目视法和内窥镜、荧光法、着色法、脆性涂层、光弹性覆膜法、激光全息摄影干涉法、泄漏检定、应力测试等)、热力学方法 (热电动势法、液晶法、红外线热图等) 和化学分析