



《中国工程物理研究院科技丛书》第010号

无损检测技术 及其应用

张俊哲 等著

科学出版社

75.220
552

《中国工程物理研究院科技丛书》 第 010 号

无损检测技术及其应用

张 俊 哲 等 著

科 学 出 版 社

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书系统地介绍了工业无损检测技术及其应用,阐述了各种方法的原理、特点、适用范围和发展趋势,并列举了应用实例。内容包括射线、超声、磁粉、渗透、涡流等常规无损检测技术,以及中子照相检测、声发射检测和激光全息摄影检测等新技术。对微波与红外检测、光纤检测、X射线残余应力测试等在无损检测中的应用也作了简要介绍。

本书可供工程技术人员和高等院校有关专业师生阅读。

《中国工程物理研究院科技丛书》 第 010 号

无损检测技术及其应用

张 俊 哲 等 著

责任编辑 朴 玉 芬 林 鹏

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100707

北京朝阳大地印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

*

1993 年 5 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1993 年 5 月第 一 次印刷 印张: 15 1/4

印数: 1-2800 字数 398000

ISBN 7-03-003323-X / O·604

定 价: 12.30 元

《中国工程物理研究院科技丛书》出版说明

中国工程物理研究院建院三十年来，坚持理论研究、科学实验和工程设计密切结合的科研方向，完成了国家下达的各项国防科研任务。通过完成任务，在许多专业学科领域里，不论在基础理论方面，还是在实验测试技术和工程应用技术方面，都有重要发展和创新，积累丰富的知识和经验，造就了一大批优秀科技人材。

为了扩大科技交流与合作，促进我院事业的继承与发展，系统地总结我院三十年来在各个专业领域里集体积累起来的经验，吸收国内外最新科技成果，形成一套系列科技丛书，无疑是一件十分有意义的事情。

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科研工作的成果，内容涉及本院过去开设过的二十几个主要学科。现在和今后开设的新学科，也将编著出书，续入本丛书中。

这套丛书将在今后几年里陆续编辑出版。我院早些年零散编著出版的专业书籍，经编委会审定后，也纳入本丛书系列。

谨以此套丛书献给三十年来为我国国防现代化而献身的人们！

《中国工程物理研究院科技丛书》编审委员会

1989年1月25日

《中国工程物理研究院科技丛书》

编 审 委 员 会

主 任 杜祥琬

副主任 章冠人 华欣生

委 员 (以姓氏笔划为序)

水鸿寿 方乃相 王之康 王铁铮 刘庆兆

汤绍源 陈银亮 吴宏志 汪源浚 张永昌

张寿齐 张仕发 杨成龙 周正朝 姚景华

姜学贤 赵维晋 俞大光 胡再军 徐锡申

徐玉彬 高天祐 高国桐 董海山 赖祖武

丛书编辑部负责人 吴衍斌

本册编辑 吴衍斌

《中国工程物理研究院科技丛书》

已 出 版 书 目

001 高能炸药及相关物性能

董海山主编 科学出版社 1989年10月出版

002 光学高速摄影测试技术

谭显祥编著 科学出版社 1990年2月出版

003 凝聚炸药起爆动力学

章冠人等编著 国防工业出版社 1991年11月出版

004 线性代数方程组的迭代解法

胡家贇编著 科学出版社 1991年12月

005 映象与混沌

陈世刚编著 国防工业出版社 1992年2月

006 高温辐射物理与量子辐射理论

陈世昌编著 国防工业出版社 1992年3月

007 再入遥测技术 (上册)

谢铭勋编著 国防工业出版社 1992年3月

008 再入遥测技术 (下册)

谢铭勋编著 国防工业出版社 1992年3月

009 粘性消去法和差分格式粘性

郭柏灵著 科学出版社 1993 年 3 月

010 无损检测技术及其应用

张俊哲等著 科学出版社 1993 年 5 月

序 言

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的。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。这种损

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。

本书的编著者们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。书中第一章、第二章、第三章、第四章中 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、第六章、第七章和第九章由张俊哲同志编著；第四章其余各节由游开兴同志编著；第五章由马振泽同志编著；第八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，中国工程物理研究院俞大光教授，研究员徐清之、姚志、高级工程师罗诚铿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

第一章 总论	1
1.1 无损检测概述	1
1.2 材料和构件中缺陷与强度的关系	3
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	8
1.5 无损检测方法的选择	11
第二章 渗透与磁粉检测	16
2.1 渗透检测的特点与应用	16
2.2 渗透检测的原理和方法	19
2.3 渗透检测应用实例	26
2.4 磁粉检测的特点与应用	29
2.5 磁粉检测的原理和方法	31
2.6 磁粉检测应用实例	40
2.7 漏磁和录磁检测法	43
第三章 电位与涡流检测	49
3.1 电位检测法	49
3.2 涡流检测的特点与应用	56
3.3 涡流检测的原理和方法	58
3.4 涡流检测应用实例	71

第四章 射线检测 79

4.1 射线检测的特点和应用	79
4.2 射线源及其特性	82
4.3 射线检测原理和装置	102
4.4 射线检测方法	124
4.5 射线检测应用实例	149
4.6 高能射线检测的应用	164
4.7 闪光射线检测的应用	168
4.8 质子照相的电子照相	173

第五章 中子照相检测 177

5.1 概述	177
5.2 中子照相的原理、方法和特征	179
5.3 中子源及中子照相装置	183
5.4 中子照相的应用	198
5.5 ^{300}P 反应堆的中子照相及其应用	203
5.6 中子照相的质量检验标准	207

第六章 超声波检测 217

6.1 超声波检测的特点与应用	217
6.2 超声波的传播	220
6.3 波动方程与超声波声场特性	244
6.4 换能器与超声波探伤仪	263
6.5 超声检测方法	279
6.6 缺陷的定位、定量和定性	286
6.7 超声检测应用实例	299
6.8 用超声波检测材料的其它性能	312

6.9	声阻检测法	322
6.10	超声成像与超声全息摄影	327
6.11	声显微镜技术	335
第七章	声发射检测	339
7.1	声发射检测的特点与应用	339
7.2	声发射波的产生和传播	343
7.3	声发射检测方法 with 装置	351
7.4	声发射检测的应用	360
第八章	激光全息摄影无损检测	376
8.1	激光全息摄影无损检测的特点与应用	376
8.2	激光全息摄影	378
8.3	全息干涉度量技术	389
8.4	物体移动、变形和它的全息干涉图	392
8.5	物体三维变形的定量分析和计算	396
8.6	用全息干涉度量技术进行无损检测	402
8.7	全息摄影等高线法及其无损检测	407
8.8	高速全息摄影及高速全息摄影机	412
第九章	其它无损检测方法 with 新技术	430
9.1	X 射线残余应力测试技术	430
9.2	氦质谱真空检漏技术	439
9.3	液晶与红外无损检测技术	447
9.4	微波无损检测技术	453
9.5	光纤无损检测技术	458
9.6	穆斯鲍尔谱在无损检测中的应用	462

9.7 正电子湮灭在无损检测中的应用	465
9.8 巴克豪森噪声在无损检测中的应用	467
9.9 外激电子发射在无损检测中的应用	469
9.10 光声显微镜在无损检测中的应用	472

第一章 总论

1.1 无损检测概述

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地检验和测试，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、材料成份、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、有效地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通重视，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

本原理几乎涉及到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)和化学分析方法(电解检测法、激光检测法、离子散射、俄歇电子分析和穆斯鲍尔谱等)。现代无损检测技术还应该包括计算机数据和图像处理、图像的识别与合成和自动化检测技术等。

无损检测主要是检测材料和构件中的宏观缺陷,也就是说无损检测技术所表征的是材料和构件中宏观组织结构的特点。对于微观缺陷的检测,一般说来是困难的。应用几 MeV 的闪光 X 射线照相、微焦点软 X 射线照相、高灵敏度的电子照相和高对比度的质子散射照相等,虽然能检测 0.01—0.005mm 左右的微裂纹,但由于对试样的穿透能力很低(一般不超过 3mm),在工业检测中目前还难以广泛应用。

在工业生产检验中,目前应用最广泛的无损检测方法主要是液体渗透法、磁粉检验法、射线检测法、超声波检测法和涡流检测法。近年来声发射检测和激光全息摄影检测等也获得了迅速的发展和应用。

60 年代和 70 年代是国际无损检测技术发展的兴旺时期,其特点是无损检测的新方法和新技术不断出现。80 年代在无损检测仪器的改进方面得到进一步提高。金属陶瓷管的小型轻量 X 射线机、X 射线工业电视和图像增强与处理装置、安全可靠的 γ 射线装置和微波直线加速器、回旋加速器等分别出现和应用。X

射线、 γ 射线和中子射线的计算机辅助层析摄影术(C T 技术)在工业无损检测中已经得到应用。黑白和彩色超声波电视装置、B扫描、C扫描和超声全息成像装置、超声显微镜、具有多种信息处理和显示功能的多通道声发射检测系统以及采用自适应网络对缺陷波进行识别和分类、采用模/数转换将波形数字化以便存储和处理的微机化超声检测仪均已开始应用。用于高速自动化检测的漏磁和录磁探伤装置和多频多参量涡流测试仪,以及各类高速、高温检测、高精度和远距离检测等技术和设备都获得了迅速的发展。微型计算机在数据和图像处理、过程的自动化控制两个方面得到了广泛的应用,从而使某些项目达到了在线和实时检测的目的。

随着新型材料的出现,对复合材料、胶接结构、陶瓷材料、非晶态合金、各种功能材料和记忆合金等,还必须不断研究新的无损检测仪器和方法,以满足对这些材料进行高精度和高灵敏度无损检测的需要。

1.2 材料和构件中缺陷与强度的关系

在人们使用各种材料尤其是金属材料的长期实践中,观察到大量的断裂现象。特别是材料与构件的脆性断裂,曾为人们带来了许多灾难性的事故,其中涉及到舰船、飞机、轴类、压力容器、宇航器、核设备和各类武器等多方面事故。因此,断裂问题始终是研究各种材料的一个重要方面。

为了避免金属材料与构件在加工制造和使用过程中发生断裂,人们一方面要求材料有效高的强度,同时要求材料有一定的韧性,即要求材料有良好的综合机械性能。金属材料强度的来源是金属原子间的结合力。如果金属原子间的结合力能够得到充分的发挥,则按照理论上所计算出来的金属强度比金属在实际上所表现的强度要高出 2 到 3 个数量级。而在实际的材料和构件中,

金属原子间的结构都不是理想完整晶体，而是存在着大量的微观缺陷和宏观缺陷。微观缺陷如空位、间隙原子、杂质原子、位错、堆垛层错、晶界和相界等。宏观缺陷则是材料和构件在冶炼、铸造、锻造、焊接、轧制、热处理、磨削等加工过程中产生的，如气孔、疏松、缩孔、夹渣、夹杂物、裂纹、折迭、未焊透等。裂纹又可详细分为铸造裂纹、轧制和锻造裂纹、热处理裂纹、酸洗裂纹、磨削裂纹、疲劳裂纹、应力腐蚀裂纹、焊接裂纹和热应力裂纹等。由于这些缺陷的存在，大大降低了材料和构件的强度。因此，研究断裂问题就必须与材料和构件中的缺陷联系起来。在工程上往往按断裂前材料发生的变形量的大小或者按断口的形貌把断裂区分为脆性断裂和韧性断裂。在特定条件下，还可分为冲击断裂、蠕变断裂、疲劳断裂和应力腐蚀断裂等。

材料和构件中缺陷与强度的关系是极为复杂的。这与材料和构件的使用条件如应力、温度、环境以及缺陷的类型、大小、取向、位置(表面、内部或应力集中部位)等多种因素有关。因此，在同种材料或构件中，若存在相同的缺陷，但使用条件不同，则破损的情况可能完全不同。另外，根据小试样所做的材料力学性能试验结果，往往同实际的设备或构件在使用条件下的破损强度很不相同。假如片面地相信材料力学性能试验的结果，以此来堆断工程断裂情况，有时很可能会犯大错误。然而，如将试样的尺寸和各方面条件都做得和实物一样，在实际工作中也是行不通的。因此，在研究材料和构件中缺陷与强度的关系时，必须综合考虑如下各种因素：

- (1) 材料、焊缝和构件所处的应力条件和环境条件；
- (2) 缺陷的类型、形状、大小、取向、部位、分布和内含物等情况；
- (3) 材料、焊缝和构件中有缺陷部位的厚度；
- (4) 材料和焊缝的机械性能试验结果；
- (5) 材料和焊缝的断裂力学性能试验结果；
- (6) 有缺陷部位的残余应力分布状况；