



无损检测技术

基础及应用 Basis and Application of
Nondestructive Testing
Technology

韩书霞 戚大伟 编著

黑龙江教育出版社

无损检测技术基础及应用

韩书霞 戚大伟 编著

黑龙江教育出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

无损检测技术基础及应用 / 韩书霞, 戚大伟编著. —哈尔滨: 黑龙江教育出版社, 2008.7

ISBN 978—7—5316—4985—4/G · 3903

I. 无… II. ①韩…②戚… 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 (2008) 第 109853 号

无损检测技术基础及应用

WU SUN JIAN CE JI SHU JI CHU JI YING YONG

韩书霞 戚大伟 编著

责任编辑 张玉娟
封面设计 706 艺术空间
责任校对 文 清
出 版 黑龙江教育出版社(哈尔滨市南岗区花园街 158 号)
发 行 黑龙江教育出版社 新华书店经销
印 刷 哈尔滨海天印刷设计有限公司
开 本 880×1230 毫米 1/32 印张 9.56 字数 28 千
出版日期 2008 年 7 月第 1 版 2008 年 7 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978—7—5316—4985—4/G · 3903

定 价 28.00 元

如有印装质量问题, 请与印刷厂联系调换

前 言

无损检测（探伤）是不破坏工件，而对工件进行物理检测的方法。目前广泛应用于工业和林业等行业材料的质量检测，是安全的检测方法之一。

为了进一步提高设备、产品的安全可靠性和从事无损检测的人员越来越多，对检测人员的技术水平要求也愈来愈高，他们发挥的作用也越来越大。实际检测中要求检测人员不仅要能够检出缺陷，还应该能准确确定缺陷的形状、大小、方位、取向和性质，这就需从事检测的人员，要有丰富的物理基础知识和与材料相关的其他专业知识，因此，要求检测人员具有一定的学历作为资本，我们向大学本科生开设无损检测选修课，目的是想让他们在校就了解这一行业及这一行业的重要性。

无损检测技术的理论基础是物理定律和材料物理性质，在无损检测的发展过程中，贯穿着物理学的新成就和新方法，材料的物理性质研究的进展与无损检测技术的发展是相辅相成的。

无损检测技术的主要功能是：无损探伤，即对工业的原材料和机械加工件及一些非金属材料，比如林业用的木材等用无损检测的方法找出内部和表面的缺陷，并对缺陷进行定量和定性的分析，能够有效利用材料，降低原材料和产品的成本。

无损检测的另一个功能是对材料进行材质物理性能的检查，包括机械强度、组织结构、热处理状态等。还有就是无损检测能对在役的和生产中的产品进行在役监测和现场检测，提高产品的安全可靠性和。

无损检测从 20 世纪 60 年代发展至今，已经趋于成熟，现在

已经进入了计算机控制时代，很多情况下无损检测已是自动化检测，随着科学技术的不断进步，必须要有一批有素质，有技术的无损检测梯队，因此，现在已有中专、大专、大学、研究生等人员从事无损检测专业。也正是有这样一只队伍，才使得无损检测技术得以向更完美的方向发展。

本书的编写，主要介绍各种无损检测方法的基础知识和典型应用，第六章介绍了目前我们正在从事研究的木材 X 射线无损检测技术，是无损检测技术在实际中应用的典型例子。本书在校对、排版上得到了王德洪老师的支持和帮助，在此表示衷心感谢！

由于水平有限，加之时间短促，缺点和错误难免，请同行和使用本书的读者批评指正。

编者

2008 年 5 月

目 录

绪论	1
第一章 超声波检测	5
1.1 超声波探伤的物理基础	7
1.1.1 机械振动与机械波	7
1.1.2 波的类型	13
1.1.3 超声波的传播速度	19
1.1.4 波的迭加、干涉、衍射和惠更斯原理	25
1.1.5 超声场的特征值	30
1.1.6 超声波在介质中的传播特性	31
1.1.7 超声波发射声场与规则反射体的回波声压	40
1.2 超声波检测设备与仪器	59
1.2.1 超声波换能器(探头)	59
1.2.2 超声波探伤仪	63
1.2.3 超声波标准试块	67
1.2.4 耦合剂	69
1.3 超声波检测方法	70
1.3.1 接触法与液浸法	70
1.3.2 纵波脉冲反射法	71
1.3.3 横波探伤法	73
1.3.4 表面波探伤法	75
1.3.5 兰姆波探伤法	75
1.3.6 穿透法检测	76

1.4 缺陷大小的确定	76
1.4.1 当量法	77
1.4.2 测长法	82
1.4.3 底波高度法	85
1.5 超声检测通用技术实例	86
1.5.1 锻件超声波探伤	86
1.5.2 铸件超声波探伤	97
1.5.3 焊接件超声波探伤	102
第二章 磁粉检测	114
2.1 磁粉检测的物理基础	115
2.2 磁粉检测的基本原理	120
2.2.1 漏磁场	120
2.2.2 磁粉检测的基本原理	121
2.3 磁粉检测方法	124
2.3.1 磁粉检测方法分类	124
2.3.2 磁化方法	126
2.3.3 退磁	134
2.4 磁粉检测设备	136
2.4.1 磁粉探伤机	136
2.4.2 磁粉与磁悬浮液	137
2.4.3 试块与试片	142
2.5 磁粉检测的应用与磁痕分析	145
2.5.1 非连续性的分类法	145
2.5.2 非相关磁痕（又称伪缺陷磁痕）	146
2.6 磁粉检测应用实例	149
2.6.1 锻件的磁粉探伤	149
2.6.2 铸件的磁粉探伤	154

2.6.3 疲劳缺陷的磁粉探伤	156
2.7 磁粉检测过程	157
第三章 渗透检测	163
3.1 渗透检测的物理化学基础	165
3.1.1 液体的表面张力	165
3.1.2 液体的润湿作用	166
3.1.3 液体的毛细现象	167
3.1.4 溶液的吸光性能	168
3.1.5 溶解作用	169
3.1.6 乳化作用	170
3.2 渗透探伤原理和影响探伤灵敏度的主要因素	172
3.2.1 渗透探伤使用材料	172
3.2.2 液体渗透探伤原理	172
3.2.3 操作程序	173
3.2.4 影响探伤灵敏度的主要因素	173
3.3 液体渗透探伤法的分类	177
3.3.1 液体渗透探伤的分类	177
3.3.2 液体渗透检测方法	178
3.4 渗透检测设备	186
3.4.1 渗透检测装置	186
3.4.2 试块	186
3.5 渗透检测显示与记录	187
3.5.1 显示的分类	187
3.5.2 缺陷的记录	188
第四章 涡流检测	190
4.1 涡流检测的物理基础	190
4.1.1 涡流检测物理基础	190

4.1.2 自感和互感	192
4.2 涡流检测的特点	194
4.3 涡流检测原理	196
4.3.1 涡流检测基本原理	196
4.3.2 涡流检测条件	197
4.4 检测线圈(探头)	199
4.5 涡流检测仪器	200
4.6 涡流检测的应用	201
第五章 射线检测	204
5.1 射线检测的物理基础	205
5.1.1 射线的种类和频谱	205
5.1.2 X射线的产生	206
5.1.3 射线与物质的相互作用和衰减定律	211
5.2 射线检测的基本原理和方法	216
5.2.1 照相法	218
5.2.2 电离检测法	220
5.2.3 荧光屏直接观察法	221
5.2.4 工业射线 CT 技术	222
5.3 射线检测工艺	226
5.3.1 照相法的灵敏度和透度计	227
5.3.2 增感屏及增感方式的选择	231
5.3.3 曝光参数的选择	234
5.3.4 散射线控制	246
5.3.5 射线感光胶片	247
5.3.6 胶片的暗室处理	255
5.4 射线探伤设备	258
5.4.1 X射线探伤机	258

5.4.2 γ 射线探伤机	261
5.4.3 高能X射线设备	263
5.5 射线的防护	263
5.5.1 射线对人体的有害作用	263
5.5.2 射线的防护	266
第六章 X射线检测木材	268
6.1 木材无损检测研究的背景与意义	268
6.2 木材缺陷 X 射线检测原理	269
6.3 原木缺陷及其对木材加工的影响	271
6.4 原木 X 射线成像公式推导	272
6.4.1 平行光源 X 射线原木成像规律	273
6.4.2 点光源 X 射线原木成像模型	274
6.4.3 增厚型缺陷与减厚型缺陷	276
6.5 原木缺陷 X 射线无损检测系统	277
6.6 原木缺陷无损检测图像处理系统工作平台	278
附录: 实验	282
参考文献	293

绪 论

无损检测是建立在现代科学技术基础上的一门应用型技术学科，它以不损坏被检测物体内部结构为前提，应用物理的方法，检测物体内部或表面的物理性能、状态特性以及内部结构，检查物质内部是否存在不连续性（即缺陷），从而评价其质量。无损检测学科几乎涉及到了物理科学中的光学、电磁学、声学、原子物理学以及计算机、数据通讯等学科，在冶金、机械、石油、化工、航空、航天各个领域有广泛的应用。

1895年伦琴发现X射线，从此以后，无损检测作为一门多学科的综合技术正式开始进入工业化大生产的实际应用领域。1900年法国海关开始应用X射线检验物品，1922年美国建立了世界第一个工业射线实验室，用X射线检查铸件质量，以后在军事工业和机械制造业等领域得到广泛的应用，射线检测至今仍然是许多工业产品质量控制的重要手段。1912年超声波探测技术最早在航海中用于探查海面上的冰山，1929年超声波技术用于产品缺陷的检验，至今仍是锅炉压力容器、铁轨、重要机械产品的主要检测手段。20世纪30年代开始在钢结构件上广泛应用磁粉探伤方法，使磁粉检测得以普及到各种铁磁性材料的表面检测。毛细管现象是土壤水分蒸发的一种常见现象，随着工业化大生产的出现，将“毛细管现象”的原理成功地应用于金属和非金属材料开口缺陷的检验，灵敏度与磁粉检测几乎相当，它的优点是可以检测非铁磁性物质。经典的电磁感应定律的发现，促进了现代导电材料涡流检测方法的产生。1935年第一台涡流探测仪器研究成功。20世纪50年代初，德国科学家霍



斯特发表了一系列有关电磁感应的论文，开创了现代涡流检测的新篇章。到了20世纪中期，在现代化工业大生产促进下，建立了以射线检测（RT）、超声检测（UT）、磁粉检测（MT）、渗透检测（PT）和电磁检测（ET）五大常规检测方法为代表的无损检测体系。随着现代科学技术的不断发展和相互间的渗透，新的无损检测技术不断涌现，新的无损检测方法层出不穷，建立起一套较完整的无损检测体系，覆盖工业化大生产的大部分领域；在无损检测体系建立的过程中，逐渐形成了一套较完整的无损检测文化。即在近代物理学和现代物理学的基础上建立一套较完整的无损检测理论；建立了一支高素质的无损检测专业队伍，从事无损检测理论的研究和无损检测实际检测的应用；拥有一大批无损检测仪器、设备专业制造厂家；无损检测在工业生产的各个领域得到充分的应用，对工业产品，是重大工程的质量控制和质量保证起到重要作用。现代工业重要产品具有“高温、高压、高速、高应力”的特点，如果没有无损检测技术的应用，“四高”产品的质量难于得到保证。无损检测技术经过一个世纪的发展，其主要性已得到世界的公认。可以说，现代工业离不开先进的无损检测技术，这个论述已经越来越被人们普遍的接受。作为一种科学文化，无损检测已越来越受到广泛的关注和重视。

无损检测主要有用于以下几个方面：质量管理、在役检测、质量鉴定。

无损检测的特点是不会对工件造成任何损伤，能有效地检验缺陷，能够对产品质量进行监控；无损检测诊断技术能够防止因产品缺陷引起的严重后果。无论是金属材料（磁性和非磁性、放射性和非放射性），还是非金属材料；无论是锻件、铸件、焊件，还是板材、棒材、管材；无论是内部缺陷，还是表面缺陷，都可以应用无损检测技术进行缺陷检测，因此，无损检测技术

广泛应用于各种设备、压力容器、机械零部件等的检测，受到工业界的普遍重视。

综合看无损检测技术的发展，主要经历可分为三个发展阶段，即无损检查（Nondestructive Inspection, NDI）、无损检测（Nondestructive Testing, NDT）和无损评价（Nondestructive Evaluation, NDE），目前一般统称为无损检测（NDT）。

无损检查（Nondestructive Inspection, NDI）阶段，主要用于产品的最终检验，在不破坏产品的前提下发现零部件中的缺陷（含肉眼观察、耳听诊断等）。

无损检测（Nondestructive Testing, NDT）阶段，不但要进行产品的最终检验，还要测量过程工艺参数，特别是加工过程中所需的各种工艺参数，如温度、密度、黏度、浓度、成分、压力、组织结构、晶粒大小等。

无损评价（Nondestructive Evaluation, NDE）阶段，无损评价主要做法是：对构件（材料）进行应力分析，根据构件承受的载荷，计算和测定构件有缺陷部位的应力；测定或估算缺陷部位和残余应力；确定材料的断裂强度；进行定量的无损检测；进行断裂力学计算，判断缺陷的危险程度，最后对缺陷的去留作评定。

20世纪70年代以来信息科学迅速发展，计算机已进入各个领域，无损检测行业也不例外，随着计算机的发展，无损检测的新方法和新技术也不断出现，使无损检测仪器的性能得到很大提高。

超声检测中的A扫描、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信道声发射检测系统，以及采用自适应网络对缺陷波进行识别和分类，采用模数转换技术将波形数字化，以便存储和处理的微机化超声检测仪等均已开始应用。用于金属陶瓷管检测的小型轻量X射线



机、X射线工业电视和图象增强与处理装置、安全可靠的 γ 射线装置和微波直线加速器、回旋加速器等相继出现并得到应用。X射线、 γ 射线和中子射线的计算机辅助层析摄影术（CT技术）在工业无损检测中也已经得到应用。微型计算机在数据和图象处理、过程的自动化控制等方面也得到了广泛的应用，使一些检查达到了在线和实时检测的水平。

目前，无损检测诊断技术正向快速化、数字化、标准化、程序化和规范化的方向发展，其中包括高灵敏度、高可靠性、高效率的无损检测诊断仪器和无损检测诊断方法，无损检测诊断和验收标准的制定，无损检测诊断操作步骤的程序化、实施方法的规范化、缺陷判别和评价的标准化等。另外还有全国统一的人员资格培训、鉴定和考核。从中可以预见，无损检测诊断技术在工业生产中将发挥越来越重要的作用。

在许多先进的国家，比如美国、德国、日本已将无损检测技术与工业化实际应用协调得很好。随着现代化工业水平的提高，我国的无损检测技术也已取得了很大的进步，已建立和发展了一支训练有素的无损检测队伍，形成了一个包括中等专业教育、大学专科、大学本科和无损检测硕士生、博士生培养方向等门类齐全的教育体系，近年来很多部门也大力加强了无损检测技术的应用推广工作。在我国已出现了一批生产无损检测仪器设备的专业厂家。有些专门的仪器设备已经采用计算机控制，已和国际水平接轨。

国际著名质量管理学家朱兰博士曾经指出：“如果说20世纪是生产力的世纪，那么21世纪就是质量的世纪，质量将成为新世纪的主题。”无损检测是现代工业生产中质量控制和质量保证的重要方法，在现代化大生产中，谁掌握了高超的无损检测技术，谁就能在激烈的竞争中立于不败之地。

第一章 超声波检测

采用超声波研究物体内部结构的方法开始于19世纪40年代初，美国和英国研制成功脉冲反射式超声波探伤仪。到了19世纪50年代，超声波作为无损检测的一种方法，已被广泛应用于工业领域。19世纪60年代，德国等国家研制出高灵敏度和高分辨率的超声波仪器，有效地解决了焊缝超声波探伤问题，使超声波探伤的应用进一步扩大。

超声波检测因具有可探测的厚度大、成本低、速度快、检测灵敏度高、对人体无害、使用灵活、设备轻巧，适合在车间、野外和水下等各种环境下工作。等优点。仍是目前应用最广泛的无损检测方法之一。

超声波是一种机械波，机械振动与波动是超声波检测的物理基础。超声波检测中，主要涉及到几何声学 and 物理声学中的一些基本定律和概念。如几何声学中的反射、折射定律及波型转换。物理声学中波的叠加、干涉、绕射及惠更斯原理等。

超声波检测常用的工作频率为0.4~5MHz，较低频率用于粗晶材料和衰减较大材料的检测，较高频率用于细晶材料和高灵敏度检测。对于某些特殊要求的检测，工作频率可达1~50MHz。近年来随着宽频窄脉冲技术的研究和应用，超声探头的工作频率，有的已高达100 MHz。

超声波检测对于平面状的缺陷，例如裂纹，只要波束与裂纹平面垂直，就可以获得很高的缺陷回波。但是，对于球状缺陷，例如气孔，假如气孔不是很大，或者不是较密集的话，就难以获得足够的回波。这一点与X射线检测方法刚好相反，这



是因为两者检测缺陷的原理不同，因此各有其易于检测和难于检测的缺陷。超声波检测的最大优点就是对裂纹、夹层、折叠、未焊透等类型的缺陷具有很高的检测能力。

超声波检测的不足是难以识别缺陷的种类。利用A扫描法，根据缺陷发生的位置，即使采用各种扫查方法，对缺陷种类的判别仍需有高度熟练的技术。B扫描和C扫描显示法可以给出缺陷的图形，对识别缺陷的种类大有益处。超声频谱分析和超声全息成像方法，也都有助于对缺陷的定性。

超声波检测适用于各种尺寸的锻件、轧制件、焊缝和某些铸件，无论是钢铁、有色金属和非金属，都可以采用超声波法进行检验。各种机械零件、结构件、电站设备、船体、锅炉、压力容器和化工容器、非金属材料等，都可以用超声波进行有效的检测。有的采用手动方式，有的可采用自动化方式。就物理性能检测而言，用超声波法可以检测材料的厚度、材料硬度、淬硬层深度、晶粒度、液位和流量、残余应力和胶接强度等。

超声波检测要求检测人员要具有以下知识：首先，要掌握超声探伤的基础知识。即探伤人员需要掌握有关超声波的物理学基础知识。其次，要掌握与材料及其制造工艺有关的知识。为了分辨缺陷信号和非缺陷信号以及对缺陷性质做出较正确的估判，探伤人员必须掌握与材料及制造工艺有关的知识。特别应了解各种工艺和制造过程中可能出现的缺陷的位置、取向、性质及出现时机等。再次，要了解被检工件的几何形状、状态和结构。了解被检工件的结构能使探伤人员对由工件本身几何形状引起的反射信号进行正确的判断，从而有助于排除伪缺陷信号。了解被检工件的状态，将帮助探伤人员对缺陷的形成原因做出正确分析，给出缺陷形成的依据。

超声波在材料中传播时，受金属组织特别是晶粒大小的影响很大。对细晶材料，超声波可以穿透几米的厚度；而在粗晶

材料中，超声波衰减严重，即使50mm厚的试件也很难用超声波检查。在结构疏松的一些非金属材料中，超声波的衰减更为严重。

近年来，随着微型计算机的发展，超声波检测仪器和检测方法都得到了迅速的发展，使超声波检测的应用更为普及。目前，微机在超声波检测中已能够完成数据采集、信息处理、过程控制和记录存储等多种功能。超声波检测仪器可以把微机作为一个部件组装在一起，去执行处理数据和图象的任务。目前，工业上常用的一些全电脑对话式超声波探伤仪，可在屏幕上同时显示回波曲线和检测数据、存储仪器调整状态、缺陷波形和各种操作功能；用打印机输出可供永久记录的各种数据和图形资料，并直接由计算机给出检测结果。

1.1 超声波探伤的物理基础

1.1.1 机械振动与机械波

1. 振动

(1) 振动的一般概念

物体沿着直线或曲线在某一平衡位置附近作往复周期性的运动，称为机械振动。

振动是往复、周期性的运动，振动的快慢常用振动周期和振动频率两个物理量来描述。

周期 T —振动物体完成一次全振动所需要的时间，称为振动周期，用 T 表示。常用单位为秒（s）。

频率 f —振动物体在单位时间内完成全振动的次数，称为振动频率，用 f 表示。常用单位为赫兹（Hz），1赫兹表示1秒钟内完成1次全振动，即 $1\text{Hz}=1\text{次/秒}$ 。此外还有千赫（kHz），兆