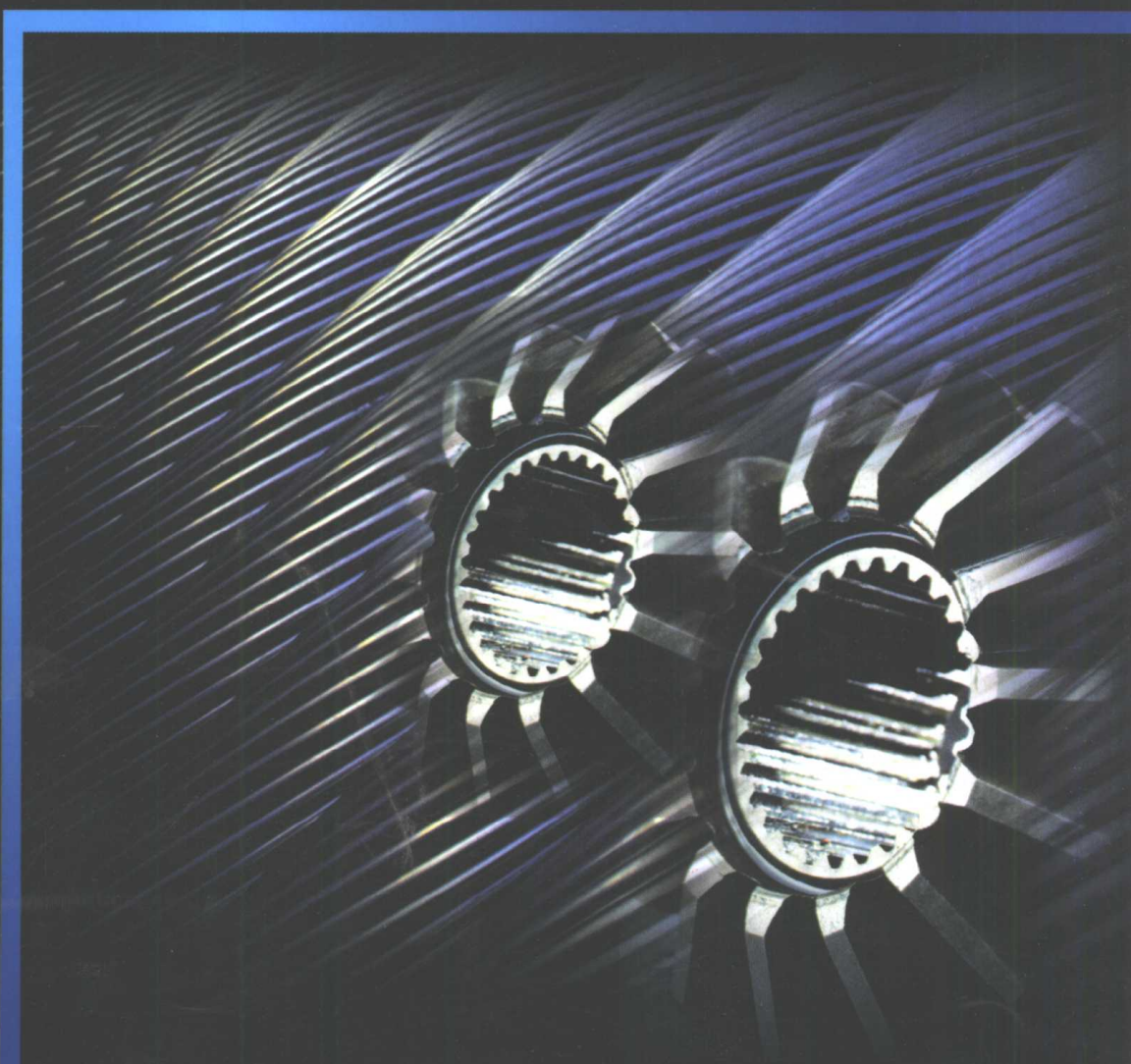


B

普通高等教育机电类规划教材

# 无损检测

大连理工大学 李喜孟 主编



机械工业出版社  
China Machine Press

无损检测

机械工业出版社

普通高等教育机电类规划教材

# 无损检测

主编 李喜孟  
协编 杨志懋 王立君 刚铁  
主审 郑中兴



机械工业出版社

本书系统地介绍了无损检测的目的、意义及其在工业现代化进程中的重要作用,对各种常规检测技术(超声波、射线、涡流、磁粉和渗透检测技术)都分章进行了介绍,具体阐述了各种检测技术的原理、特点、适用范围,并列举了应用实例。第六章则集中介绍了一些正在发展中的无损检测新技术(含激光全息、声振、微波、声发射、红外无损检测新技术)。

本书可作为大学本科材料科学与工程、材料加工等专业使用,《无损检测》教材,亦可供有关技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

无损检测/李喜孟主编. —北京:机械工业出版社, 2001.5  
普通高等教育机电类规划教材  
ISBN 7-111-08565-5

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 76589 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)  
责任编辑:常燕宾 版式设计:霍永明 责任校对:唐海燕  
封面设计:方 芬 责任印制:郭景龙  
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行  
2001 年 2 月第 1 版·第 1 次印刷  
1000mm×1400mmB5·4.875 印张·184 千字  
0 001—4 000 册  
定价:12.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
本社购书热线电话(010) 68993821、68326677-2527

## 前 言

本书是根据《全国高校第二届材料工程类专业教学指导委员会金属材料及热处理指导组第二次会议纪要》的精神编写的，是普通高等教育“九五”原机械工业部规划教材之一。

全书分为绪论和第一章至第六章等七部分，内容涉及无损检测的五大常规检测技术，以及激光、声振、微波、红外、声发射等新技术。为了适应大学本科教育扩大知识面、淡化专业、强化素质教育等教学改革的需要，本书在编写时对于每一种检测技术，只简单介绍其检测原理和检测方法，重点突出对检测结果的分析和应用实例的介绍。由于学时有限，对有关检测设备的工作原理、技术条件、制造方法以及传感器技术等基本未做介绍，或介绍很少。目的是使大学本科生能在较短的时间内，获得有关无损检测的基本理论和检测方法的基本知识。在学时数的分配上，适当地向超声检测和无损检测新技术倾斜。本教材主要面向材料研究和材料加工专业（侧重于金属材料加工）的大学本科生，也可供其它专业师生和有关技术人员参考。

本书由大连理工大学李喜孟主编，并负责编写绪论和第一章；西安交通大学杨志懋编写了第二和第五章，天津大学王立君编写了第三和第四章，哈尔滨工业大学刚铁编写了第六章。由北方交通大学郑中兴教授担任主审。

在编写过程中，得到了西安交通大学宋晓平教授、哈尔滨工业大学周玉教授、大连理工大学高守义教授、天津大学赵乃勤教授和上述各校领导以及教务部门的指导与支持，还获得大连理工大学教材出版基金的资助，在此一并致以衷心的感谢。

鉴于编者水平和时间所限，缺点错误在所难免。恳请同行和读者给予批评指正。

编 者

2000年5月

# 目 录

## 前 言

绪 论	1
参考文献	9
<b>第一章 超声波检测</b>	<b>10</b>
第一节 超声检测的基础知识	10
第二节 超声场及介质的声参量简介	13
第三节 超声波在介质中的传播特性	18
第四节 由圆形压电晶片产生的声场简介 (活塞源声场)	29
第五节 超声波检测方法	32
第六节 超声检测技术的应用	39
复习思考题	44
参考文献	45
<b>第二章 射线检测</b>	<b>46</b>
第一节 射线检测的物理基础	46
第二节 X射线检测的基本原理和方法	50
第三节 X射线照相检测技术	52
第四节 常见缺陷及其在底片上的影像特征	58
第五节 $\gamma$ 射线探伤和中子射线检测简介	63
第六节 射线的防护	64
复习思考题	66
参考文献	66
<b>第三章 涡流检测</b>	<b>67</b>
第一节 涡流检测的基本原理	67
第二节 涡流检测的阻抗分析法	69
第三节 涡流检测的应用	77
复习思考题	82
参考文献	82
<b>第四章 磁粉检测</b>	<b>83</b>
第一节 磁粉检测的基本原理	83

第二节 磁化过程 .....	85
第三节 磁粉检测技术 .....	91
复习思考题 .....	96
参考文献 .....	96
<b>第五章 渗透检测 .....</b>	<b>98</b>
第一节 渗透检测的基本原理 .....	98
第二节 渗透检测技术 .....	101
复习思考题 .....	106
参考文献 .....	106
<b>第六章 无损检测新技术 .....</b>	<b>107</b>
第一节 激光全息无损检测 .....	107
第二节 声振检测法 .....	113
第三节 微波无损检测 .....	120
第四节 声发射检测技术 .....	124
第五节 红外无损检测 .....	134
参考文献 .....	145

# 绪 论

## 一、无损检测概述

随着我国科学和工业技术的迅速发展，工业现代化进程日新月异，高温、高压、高速度和高负荷，无疑已成为现代化工业的重要标志。但它的实现是建立在材料（或构件）高质量的基础之上的，为确保这种优异的质量，还必须采用不破坏产品原来的形状、不改变使用性能的检测方法，对产品进行百分之百的检测（或抽检），以确保产品的安全可靠，这种技术就是无损检测技术。

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、结构件进行有效地检验和测试，借以评价它们的连续性、完整性、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，并对缺陷的形状、大小、方位、取向、分布和内含物等情况进行判断；还能提供组织分布、应力状态以及某些机械和物理量等信息。无损检测技术的应用范围十分广泛，已在机械制造、石油化工、造船、汽车、航空航天和核能等工业中被普遍采用。无损检测工序在材料和产品的静态和（或）动态检测以及质量管理中，已成为一个不可缺少的重要环节。无损检测人员已发展为一支庞大的生力军，并享有“工业卫士”的美誉。

无损检测技术的理论基础是材料的物理性质，其发展过程几乎利用了世界上所有物理研究的新成就、新方法，可以说材料物理性质研究的进展与无损检测技术的发展是一致的。目前，在无损检测技术中利用的材料的物理性质有：材料在弹性波作用下呈现出的性质，在射线照射下呈现出的性质，在电场、磁场、热场作用下呈现出的性质等。例如射线检测（X射线、 $\gamma$ 射线、高能X射线、中子射线、质子和X光工业电视等）、超声和声振检测（超声脉冲反射、超声透射、超声共振、超声成像、超声频谱、电磁超声和声振检测等）、电学和电磁检测（电位法、电阻法、涡流法、微波法、录磁与漏磁、磁粉法、核磁共振、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、光弹性覆膜法、脆性涂层、激光全息干涉法、泄漏检查、应力测试等）、热力学方法（热电势法、液晶法、红外线热图法等）和化学分析方法（电解检测法、离子散射、俄歇电子分析和穆斯堡尔谱等）。现代无损检测技术还应包括计算机数据和图像处理、图像的识别与合成以及自动化检测技术。无损检测是一门理论上综合性较强，又非常重视实践环节的很有发展前途的学科。它涉及到材料的物理性质、产品设计、制造工艺、断裂力学以及有限元计算等诸多方面。

综上所述，分析材料（或构件）在不同势场作用下的物理性质，并测量材料（或构件）性能的细微变化，说明产生变化的原因并评价其适用性，就构成了无损检测工作的基本内容。

无损检测的目的可以主要从三个方面予以阐述：

#### （一）质量管理

每种产品的使用性能、质量水平，通常在其技术文件中都有明确规定，如技术条件、规范、验收标准等，均以一定的技术质量指标予以表征。无损检测的主要目的之一，就是对非连续加工（如多工序生产）或连续加工（如自动化生产流水线）的原材料、零部件提供实时的质量控制，例如控制材料的冶金质量、加工工艺质量、组织状态、涂镀层的厚度以及缺陷的大小、方位与分布等等。在质量控制过程中，将所得到的质量信息反馈到设计与工艺部门，便可反过来促使其进一步改进产品的设计与制造工艺，产品质量必然得到相应的巩固与提高，从而收到降低成本、提高生产效率的效果。当然，利用无损检测技术也可以根据验收标准，把原材料或产品的质量水平控制在设计要求的范围之内，勿须无限度地提高质量要求，甚至在不影响设计性能的前提下，使用某些有缺陷的材料，从而提高社会资源利用率，亦使经济效益得以提高。

#### （二）在役检测

使用无损检测技术对装置或构件在运行过程中进行监测，或者在检修期进行定期检测，能及时发现影响装置或构件继续安全运行的隐患，防止事故的发生。这对于重要的大型设备，如核反应堆、桥梁建筑、铁路车辆、压力容器、输送管道、飞机、火箭等等，能防患于未然，具有不可忽视的重要意义。

在役检测的目的不仅仅是及时发现和确认危害装置安全运行的隐患并予以消除，更重要的是根据所发现的早期缺陷及其发展程度（如疲劳裂纹的萌生与发展），在确定其方位、尺寸、形状、取向和性质的基础上，还要对装置或构件能否继续使用及其安全运行寿命进行评价。虽然在我国无损评价工作才刚刚起步，但这已成为无损检测技术的一个重要的发展方向。

#### （三）质量鉴定

对于制成品（包括材料、零部件）在进行组装或投入使用之前，应进行最终检验，此即为质量鉴定。其目的是确定被检对象是否达到设计性能，能否安全使用，亦即判断其是否合格，这既是对前面加工工序的验收，也可以避免给以后的使用造成隐患。应用无损检测技术在铸造、锻压、焊接、热处理以及切削加工的每道（或某一种、某几种）工序中，检测材料或部件是否符合要求，以避免对不合格产品继续进行徒劳无益的加工。该项工作一般叫做质量检查，实质上也属于质量鉴定的范畴。产品使用前的质量验收鉴定是非常必要的，特别是那些将在复杂恶劣条件（如高温、高压、高应力、高循环载荷等）下使用的产品。在这方



面，无损检测技术表现了能进行百分之百的检验的无比优越性。

综上所述，无损检测技术在生产设计、制造工艺、质量鉴定以及经济效益、工作效率的提高等方面都显示了极其重要的作用。所以无损检测技术已越来越被有远见的企业领导人和工程技术人员认识和接受。无损检测的基本理论、检测方法和对检测结果的分析，特别是对一些典型应用实例的剖析，也就成为工程技术人员的必备知识。

值得说明的是，无损检测技术并非所谓的“成形技术”，因而对产品所期待的使用性能或质量只能在产品制造中达到，而不可能单纯靠产品检验来完成。

## 二、无损检测技术的发展

本世纪 70 年代至 90 年代是国际无损检测技术发展的兴旺时期，其特点是微机技术不断向无损检测领域移植和渗透，无损检测本身的新方法和新技术不断出现，而使得无损检测仪器的改进得到很大提高。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  $\gamma$  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、 $\gamma$  射线和中子射线的计算机辅助层析摄影术（CT 技术）在工业无损检测中已经得到应用。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/数转换技术将波形数字化，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及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水平。

复合材料、胶接结构、陶瓷材料以及记忆合金等功能材料的出现，为无损检测提出了新的检测课题，还需研究新的无损检测仪器和方法，以满足对这些材料进行无损检测的需要。

长期以来，无损检测有 3 个阶段，即 NDI（Non-destructive Inspection）、NDT（Non-destructive Testing）和 NDE（Non-destructive Evaluation）。目前一般统称之为无损检测（NDT）。20 世纪后半叶无损检测技术得到了迅速的发展，从无损检测的三个简称及其工作内容中（详见表 0-1），便可清楚地了解其发展过程。实际上国外工业发达国家的无损检测技术已逐步从 NDI 和 NDT 阶段向 NDE 阶段过渡，即用无损评价来代替无损探伤和无损检测。在无损评价（NDE）阶段，自动无损评价（ANDE）和定量无损评价（QNDE）是该发展阶段的两个组成部分。他们都以自动检测工艺为基础，非常注意对客观（或人为）影响因素的排除和解释。前者多用于大批量、同规格产品的生产、加工和在役检测，而后者多见于关键零部件的检测。

表 0-1 无损检测的发展阶段及其基本工作内容简介

	第一阶段	第二阶段	第三阶段
简称	NDI 阶段	NDT 阶段	NDE 阶段
汉语名称	无损探伤	无损检测	无损评价
英文名称	Non-destructive Inspection	Non-destructive Testing	Non-destructive Evaluation
基本 工作 内容	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(含人眼观察、耳听诊断等),以满足工程设计中对零部件强度设计的需要	不但要进行最终产品的检验,还要测量过程工艺参数,特别是测量在加工过程中所需要的各种工艺参数。诸如温度、压力、密度、粘度、浓度、成分、液位、流量、压力水平、残余应力、组织结构、晶粒大小等	不但要进行最终产品的检验以及过程工艺参数的测量,而且当认为材料中不存在致命的裂纹或大的缺陷时,还要: 1. 从整体上评价材料中缺陷的分散程度 2. 在 NDE 的信息与材料的结构性能(如强度、韧性)之间建立联系 3. 对决定材料的性质、动态响应和服役性能指标的实测值(如断裂韧性、高温持久强度)等因素进行分析和评价

我国无损检测技术随着现代化工业水平的提高,已取得了很大的进步。已建立和发展了一支训练有素、技术精湛的无损检测队伍。已形成了一个包括中等专业教育、大学专科、大学本科(或无损检测专业方向)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。可以乐观地说,今后在我国无损检测行业,将是一个人才济济的新天地。很多工业部门,近年来亦大力加强了无损检测技术的应用推广工作。

与此同时,我国已有一批生产无损检测仪器设备的专业厂,主要生产常规无损检测技术所需的仪器、设备。虽然,我国的无损检测技术和仪器设备的水平,从总体上讲仍落后于发达国家 15~20 年,但一些专门仪器设备(如 X 射线探伤仪、多频涡流仪、超声波探伤仪等)都逐渐采用电脑控制,并能自动进行信号处理,这就大大提高了我国的无损检测技术水平,有效地缩短了中国无损检测技术水平与发达国家的差距。

无损检测技术的发展,首先得益于电子技术、计算机科学、材料科学等基础学科的发展,才不断产生了新的无损检测方法。同时,也由于该技术广泛采用在产品的设计、加工制造、成品检验、以及在役检测等阶段,并都发挥了重要作用,因而愈来愈受到人们的重视和有效的经济投入。从某种意义上讲,无损检测技术的发展水平,是一个国家工业化水平高低的重要标志,也是在现代企业中,开展全面质量管理工作的一个重要标志。有资料认为,目前世界上无损检测技术最先进者当属美国,而德国、日本是将无损检测技术与工业化实际应用协调得最为有

效的国家。

### 三、无损检测方法的选用及其对产品质量的影响

有人按照不同的原理和不同的探测方法及信息处理方式，详细地统计了各种无损检测方法，总共达 70 余种。其中最常用的仍然是射线检测、超声检测、磁粉检测、渗透检测和涡流检测五种常规检测方法。在其它无损检测方法中，用得比较多的有声发射检测、红外线检测和声振检测等。合理地选择无损检测方法十分重要。一般而言，选择不同的检测方法，主要基于经济和技术两方面的考虑。

#### (一) 经济方面的考虑

目前，在加工制造业利用无损检测技术对成品进行最终检测，其主要目的是使用户满意。当然将无损检测指定用作工艺质量控制时，作为第一步便是根据产品（或工程）的要求，制订实用的验收/拒收标准，该标准将成为实际检测工作的依据。

但无损检测技术在质量和成本竞争中的地位又如何呢？这里应评估的有两个成本因子，即制造成本和使用期成本。成本的高低，往往主要取决于对产品的内在质量及对关键零部件及组装件的检测效能。例如：日本小汽车中 30% 的零件，采用无损检测后，质量迅速超过美国；德国奔驰汽车公司对汽车的几千个零件全部进行无损检测后，运行公里数增加了一倍，大大提高了在国际市场上的竞争能力。

当然应用无损检测技术，必须有全局观念，对其局部的有限的使用，经济收益未必能表现得那么明显。例如：若能检测出钢中的夹层，就可减少焊缝中产生的缺陷，而要避免钢中存在夹层，在轧钢时就应检测钢坯，当然要保证钢坯的质量，在连续铸造时就应对工艺过程进行有效的控制。在此过程中，一环紧扣一环，无损检测掺插或融入产品的生产制造过程。而这一切控制和检测工作，在资本投入方面，往往是某些企业领导人最为关注的。据资料统计，世界上先进的大型企业，其在检测方面的投资有的高达整个企业投资的 10%。也就是说，无损检测方法的采用，首先应考虑必要的资本投入，并详细评估资金的回收（见图 0-1）。

#### (二) 技术方面的考虑

在工程技术界人们普遍认为：

① 没有缺陷的材料是不存在的，而所有的装置、设备又都是选用不同材料来制作零部件，然后安装而成的。② 不产生缺陷的（缺陷的多少轻重不一）加工方法是有的，而所有的零部件都是经过多种加工工序制造的。

在对材料或构件进行无损检测时，不论在什么情况下，首先

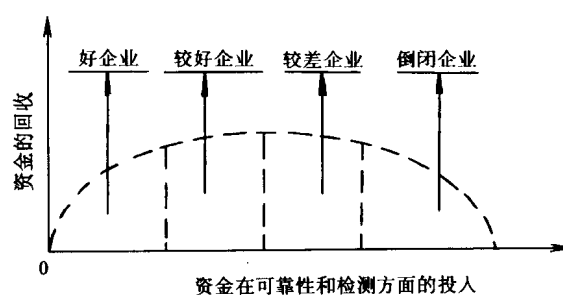


图 0-1 在检测方法和可靠性方面增加费用所引发的效果

检测对象要明确，才能确定应该采用怎样的检测方法和检测规范来达到预定的目的。为此，必须预先分析被检工件的材质、成形方法、加工过程和使用经历，必须预先分析缺陷的可能类型、方位和性质，以便有针对性地选择恰当的检测方法进行检测。为了达到各种不同的检测目的，发展并应用了各种不同的检测方法。在所有这些无损检测方法中，可以说都是很重要的，且往往又是不能完全相互替代的。或者说在诸多的无损检测方法中，没有哪一种方法是万能的。

根据检测目的或被检对象的重要性，需要用来描述材料和构件中缺陷状态的数据相应地有多有少，且任何一种检测方法都不可能给出所需要的全部信息。因此，从发展的角度来看，有必要使用两种或多种无损检测方法，并使之形成一个检测系统，才能比较满意地达到检测目的，对大型复杂设备的检测就更是如此。

就缺陷的检出而言，各种检测方法的适用范围，有关资料已做了详细地整理（各种加工工艺和材料中常见的缺陷见表 0-2）。同时就一个成功的 NDT 工艺设计而言，还应考察被检对象的许多情况，主要包括以下几点：

- (1) 材料的特性（磁性、非磁性、金属、非金属等）。
- (2) 零（部）件的形状（管、棒、板、饼及各种复杂的形状）。
- (3) 零（部）件中可能产生的缺陷的形态（体积型、面积型、连续型、分散型）。
- (4) 缺陷在零（部）件中可能存在的部位（表面、近表面、或内部）。

表 0-2 各种加工工艺和材料中常见的缺陷

材 料 与 工 艺		常 见 的 缺 陷
加 工 工 艺	铸 造	气泡、疏松、缩孔、裂纹、冷隔
	锻 造	偏析、疏松、夹杂、缩孔、白点、裂纹
	焊 接	气孔、夹渣、未焊透、未熔合、裂纹
	热处理	开裂、变形、脱碳、过烧、过热
	冷加工	表面粗糙度、缺陷层深度、组织转变、晶格扭曲
金 属 型 材	板 材	夹层、夹灰、裂纹等
	管 材	内裂、外裂、夹杂、翘皮、折叠等
	棒 材	夹杂、缩孔、裂纹等
	钢 轨	白核、黑核、裂纹
非 金 属 材 料	橡 胶	汽泡、裂纹、分层
	塑 料	气孔、夹杂、分层、粘合不良等
	陶 瓷	夹杂、气孔、裂纹
	混 凝 土	空洞、裂纹等
复 合 材 料		未粘合、粘合不良、脱粘、树脂开裂、水溶胀、柔化等

就缺陷类型来说，通常可分为体积型和面积型两种，表 0-3 为不同的体积型缺陷及其可采用的无损检测方法，表 0-4 为不同的面积型缺陷及其可采用的无损检测方法。一般来说，射线检测对体积型缺陷比较敏感，超声波检测对面状缺陷比较敏感，磁粉检测只能用于铁磁性材料的检测，渗透检测则用于表面开口缺陷的检测，而涡流检测对开口或近表面缺陷、磁性和非磁性的导电材料都具有很好的适用性。就检测对象来说，尽管目前被检测对象中仍然以金属材料（或构件）为主，但无损检测技术在非金属材料中的应用愈来愈多。例如复合材料无损检测、陶瓷材料无损检测、钢筋混凝土构件的无损检测等亦已全面展开。当然合理地掌握无损检测的实施时间也十分重要，无损检测应该在对材料（或构件）的质量有影响的各工序之后进行，仅以焊缝的检测为例，在热处理前应视为对原材料和焊接质量的检查；而在热处理后则是对热处理工艺的检测。另外高合金钢焊缝有时会发生延迟裂纹，因此这种焊缝通常至少要在 24~78h 之后再行进行无损检测。

表 0-3 不同的体积型缺陷及其可采用的检测方法

缺陷类型	可采用的检测方法
夹杂、夹渣、夹钨、疏松、 缩孔、气孔、腐蚀坑	目视检测（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） 超声检测、射线检测、红外检测、 微波检测、中子照相、光全息检测

表 0-4 不同的面积型缺陷及其可采用的检测方法

缺陷类型	可采用的检测方法
分层、粘接不良、折叠、 冷隔、裂纹、未熔化	目视检测、超声检测、磁粉检测、涡流检测、 微波检测、声发射检测、红外检测

就无损评价（NDE）与无损检测（NDT）相比而言，NDE 所考虑的问题要复杂得多。在失效分析研究的基础上，首先 NDE 采用的检测技术通常不是单一技术，往往是同时采用几种检测技术。其次，NDE 利用传感器获取被检对象的信息，再将这些信息转换成材料性能和（或）缺陷的参数，并对其进行模拟、分析等，以便对被检对象的使用状态进行评价。进而言之，因为有些缺陷，特别是它们的发展趋势，对系统服役寿命的影响是至关重要的。因而，有必要按照失效分析理论做出合理的判定。每个环节之间的联系与工作内容见图 0-2 和图 0-3。

NDE 技术的应用不仅仅限于冶金学领域，它还能监控被检对象内部损伤和疲劳积累的程度，金三角（图 0-4）表达了这种思想的内涵。即 NDE 是把材料

微观结构与直观测量力学性能的方法相联系，同时还与决定力学性能的微观因子相结合，这些细微的工作是利用计算机模拟以及神经网络系统等先进工具进行的。

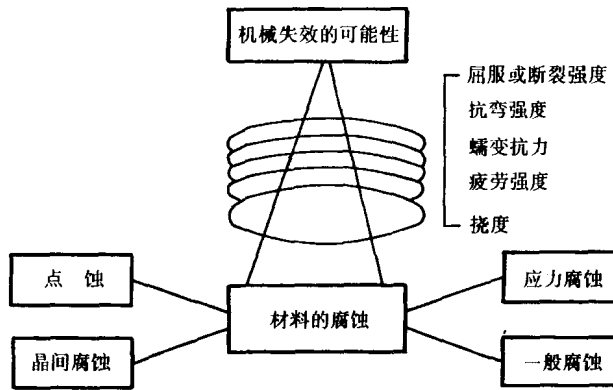


图 0-2 失效模式分析示意图

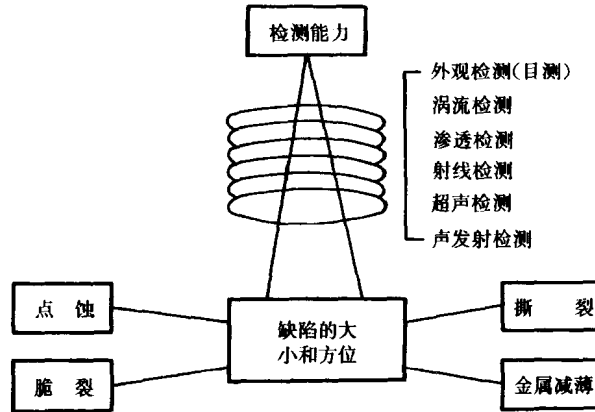


图 0-3 腐蚀性缺陷产生的原因和无损检测方法一览

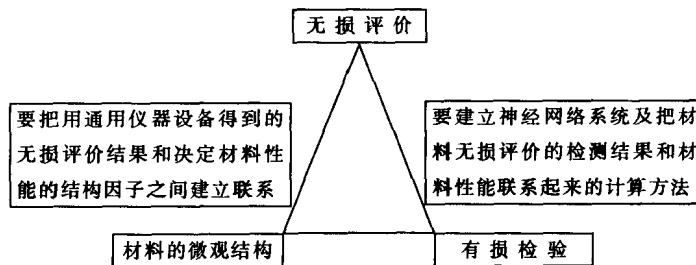


图 0-4 金三角(NDE 模式简图)

总之，面对一个 NDE 工程设计，设计师对被检对象的物理性能要有清楚的了解，对其失效形式及失效理论要有明确的分析，对可能进行的检测方法要有详细的布局。材料在不同势场下所表现出来的物理性质，本书将在相应章节进行必要的阐述，并分别介绍各种检测方法的基本工作原理、检测方法及典型应用实例分析等。

### 参 考 文 献

- 1 [日] 石井勇五郎编，吴义，王东江，沐志成译. 无损检测学. 北京：机械工业出版社，1986
- 2 张俊哲等著. 无损检测技术及其应用. 北京：科学出版社，1993
- 3 夏纪真编著. 无损检测导论. 劳动部锅炉压力容器安全杂志社，1988
- 4 张家骏. 无损检测技术的发展及其对国民经济发展的影响. 无损检测. 1993, 15 (2)
- 5 中国机械工程学会无损检测学会编. 无损检测概论. 北京：机械工业出版社，1993
- 6 Pierre R. Roberge. A Knowledge-based Shell for Selecting a Nondestructive Evaluation Technique, Materials Evaluation February, 1995
- 7 Vary. A. NDE of the Universe. New ways to look at Old Facts, Materials Evaluation March. 1993

# 第一章 超声波检测

## 第一节 超声检测的基础知识

超声波是超声振动在介质中的传播，超声波是在弹性介质中传播的机械波。与声波和次声波在弹性介质中的传播类同，区别在于超声波的频率高于 20kHz。

工业超声检测常用的工作频率为 0.5~10MHz。较高的频率主要用于细晶材料和高灵敏度检测，而较低的频率则常用于衰减较大和粗晶材料的检测。有些特殊要求的检测工作，往往首先对超声波的频率作出选择，如粗晶材料的超声检测常选用 1MHz 以下的工作频率，金属陶瓷等超细晶材料的检测，其频率选择可达 10~200MHz，甚至更高。

### 一、超声波的特点

超声波用于无损检测是由其特性决定的：

(1) 超声波的方向性好；超声波具有像光波一样良好的方向性，经过专门的设计可以定向发射，犹如手电筒的灯光可以在黑暗中帮助人的眼睛探寻物体一样，利用超声波可在被检对象中进行有效的探测。

(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。研究表明，材料的声速、声衰减、声阻抗等特性携带有丰富的信息，并且成为广泛应用超声波的基础。

(4) 遇有界面时，超声波将产生反射、折射和波型的转换；人们利用超声波在介质中传播时这些物理现象，经过巧妙的设计，使超声检测工作的灵活性、精确度得以大幅度提高，这也是超声检测得以迅速发展的原因。

(5) 对人体无害。

### 二、超声波的分类

#### (一) 描述超声波的基本物理量

声速：单位时间内，超声波在介质中传播的距离称为声速，用符号“ $c$ ”表示。

频率：单位时间内，超声波在介质中任一给定点所通过完整波的个数称为频率，用符号“ $f$ ”表示。



波长：声波在传播时，同一波线上相邻两个相位相同的质点之间的距离称为波长，用符号“ $\lambda$ ”表示。

周期：声波向前传播一个波长距离时所需的时间称为周期，用符号“ $T$ ”表示。

角频率：角频率以符号  $\omega$  表示，定义为  $\omega = 2\pi f$ 。

上述各量之间的关系为

$$T = (1/f) = (1/2\pi\omega) = (\lambda/c)$$

## (二) 超声波的分类

超声波有很多分类方法，介质质点的振动方向与波的传播方向之间的关系，是研究超声波在介质中传播规律的重要理论根据，应加以认真地研究。

### 1. 纵波 L

介质中质点的振动方向与波的传播方向相同的波叫纵波，用 L 表示（见图 1-1）。介质质点在交变拉压应力的作用下，质点之间产生相应的伸缩变形，从而形成了纵波。纵波传播时，介质的质点疏密相间，所以纵波有时又被称为压缩波或疏密波。

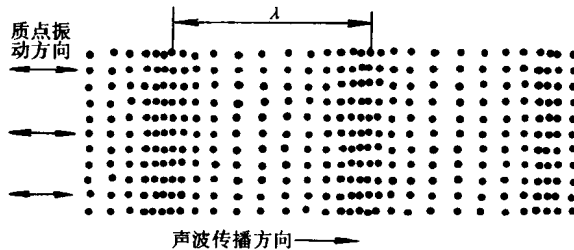


图 1-1 纵波

固体介质可以承受拉压应力的作用，因而可以传播纵波，液体和气体虽不能承受拉应力，但在压应力的作用下产生容积的变化，因此液体和气体介质也可以传播纵波。

### 2. 横波 S (T)

介质中质点的振动方向垂直于波的传播方向的波叫横波，用 S 或 T（见图 1-2）来表示。

横波的形成是由于介质质点受到交变切应力作用时，产生了切变形变，所以横波又叫作切变波。液体和气体介质不能承受切应力，只有固体介质能够承受切应力，因而横波只能在固体介质中传播，不能在液体和气体介质中传播。

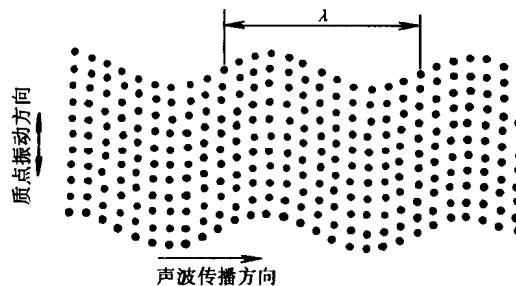


图 1-2 横波

### 3. 表面波 R

当超声波在固体介质中传播时，对于有限介质而言，有一种沿介质表面传播