

WUSUN JIANCE JISHU

无损检测技术

(第2版)

主编 刘贵民 马丽丽



国防工业出版社
National Defense Industry Press

无损检测技术

(第2版)

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书系统介绍了无损检测的目的、特点及其分类,对五种常规无损检测技术(射线检测、超声波检测、涡流检测、渗透检测以及磁粉检测技术)的物理基础、检测方法、检测工艺以及检测设备和材料进行了详细的介绍。对其它比较常用无损检测技术,如中子射线照相检测、工业 CT 检测、声发射检测、噪声检测、漏磁场检测、工业内窥镜检测、激光全息检测、微波检测技术,以及最近出现的磁记忆检测技术也进行了介绍。

本书可作为理工科大学相关专业的大学本科或研究生教材,也可作为无损检测从业人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

无损检测技术 / 刘贵民,马丽丽主编. —2 版. —北京:
国防工业出版社,2010.1
ISBN 978-7-118-06621-0

I. ①无... II. ①刘...②马... III. ①无损检测 IV.
①TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 220558 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 23¼ 字数 441 千字
2010 年 1 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474
发行业务:(010)68472764

前 言

随着现代工业和科学技术的发展,无损检测技术在设备和装备的运行、产品质量的保证、提高生产率、降低成本等领域正发挥着越来越大的作用,无损检测已发展成为一门独立的综合性学科。许多理工科的高等院校,或设置了无损检测专业,或在相关专业中设置了无损检测专业课程,以培养高层次的无损检测专门技术人才;同时,各种关于无损检测技术的培训也日益增多。为促进无损检测专业教学和培训的系统化,编写了本书。

全书分为绪论、第一篇、第二篇共三部分。绪论部分对无损检测技术的发展过程、分类以及无损检测技术的方法选择进行了介绍。第一篇分为5章(第1章~第5章),分别对射线检测、超声波检测、涡流检测以及磁粉检测技术的原理、特点、仪器设备、检测工艺方法、缺陷判定与评价标准进行了全面系统的介绍。第二篇共10章(第6章~第15章),对一些其它比较常用的无损检测技术,如中子射线照相检测、工业CT检测、声发射检测、噪声检测、漏磁场检测、工业内窥镜检测、激光全息检测、微波检测以及磁记忆检测等技术进行了介绍。

本书不仅对相关的检测技术原理和方法进行了介绍,同时也突出了检测材料、工艺以及检测结果的分析 and 判定;不仅详细介绍了五种常规无损检测技术,同时也介绍了一些其它常用的无损检测技术,注意反映国内外无损检测领域的最新动态和研究成果。

本书自2006年1月出版后,受到了来自大专院校、工矿企业等广大读者的欢迎,已前后两次印刷。为满足广大读者的需要,根据专业发展情况,对原书进行了修订;第2版除具有第1版的特色外,主要进行了以下几项修订:①注重原理的同时,增加了部分应用实例;②各章后均增加复习思考题,便于学生进行复习;③对部分内容进行了修改,使内容、结构更加合理;④修订了第1版中的错误。

本书的第1、3、5、6、7、8、10、13、14章由刘贵民进行修订,第2、4、9、11、12、15章由马丽丽进行修订,全书由刘贵民进行统稿。

由于时间仓促,难免存在缺点及错误,敬请各位读者批评指正。

编 者

2009年10月

目 录

绪论	1
0.1 无损检测技术概述	1
0.1.1 无损检测技术的定义	1
0.1.2 无损检测的目的	1
0.1.3 无损检测技术的特点	2
0.2 无损检测技术的发展过程	3
0.2.1 无损检测技术发展的三个阶段	3
0.2.2 无损检测技术的发展趋势	4
0.2.3 我国的无损检测技术	4
0.3 无损检测技术的分类及本书重点	5
0.4 无损检测方法的选择	6
参考文献	9
复习思考题	10

第一篇 常规无损检测技术

第1章 射线检测技术	12
1.1 概述	12
1.1.1 射线检测技术的发展概况	12
1.1.2 射线检测主要方法	12
1.1.3 射线检测技术的特点、适用性与局限性	13
1.2 射线检测物理基础	14
1.2.1 射线概念	14
1.2.2 光子与物质的相互作用	19
1.2.3 射线衰减规律	21
1.3 射线检测的基本原理和方法	27
1.3.1 X射线检测原理	27
1.3.2 X射线检测方法	27

1.3.3	γ 射线检测	28
1.3.4	射线检测时透照方向的选择	29
1.4	射线检测设备与器材	33
1.4.1	X 射线机	33
1.4.2	γ 射线机	38
1.4.3	加速器——高能 X 射线源	39
1.4.4	工业射线胶片	40
1.4.5	其它常用设备和器材	42
1.5	射线检测缺陷分析	45
1.5.1	常见缺陷及其影像特征	45
1.5.2	表面缺陷	48
1.5.3	伪缺陷	48
1.5.4	缺陷埋藏深度的确定	49
1.6	射线照相影像质量	50
1.6.1	影像质量的基本因素	50
1.6.2	影像的对比度	51
1.6.3	影像的不清晰度	52
1.6.4	影像的颗粒度	53
1.7	射线的防护	54
1.7.1	屏蔽防护法	54
1.7.2	距离防护法	54
1.7.3	时间防护法	55
	参考文献	55
	复习思考题	55
第 2 章	超声波检测技术	57
2.1	概述	57
2.2	超声波的分类	58
2.2.1	描述超声波的基本物理量	58
2.2.2	超声波的分类	58
2.3	超声场及介质的声参量	60
2.3.1	描述超声场的物理量	60
2.3.2	介质的声参量	62
2.4	超声波在介质中的传播特性	66
2.4.1	超声波垂直入射到平界面上的反射和透射	66
2.4.2	超声波倾斜入射到平界面上的反射和折射	68

2.4.3	超声波在曲界面上的反射和透射	71
2.5	超声波检测仪、探头及试块	74
2.5.1	超声波检测仪	74
2.5.2	探头	77
2.5.3	试块	82
2.6	超声波检测方法和通用检测技术	84
2.6.1	超声波检测方法	84
2.6.2	仪器选择及探头设计	90
2.6.3	耦合	93
2.6.4	检测仪的调节	97
2.7	超声波测厚	98
2.7.1	测厚仪的工作过程	98
2.7.2	超声波测厚方式	99
2.7.3	测厚仪的调整与使用	101
2.8	超声波检测应用实例	102
2.8.1	港口集装箱龙门桥吊缺陷的超声波检测	102
2.8.2	锅炉小管裂纹的超声波检测	103
2.8.3	硝酸贮罐壁厚的超声波检测	104
	参考文献	106
	复习思考题	106
第3章	涡流检测技术	107
3.1	概述	107
3.1.1	涡流检测基本原理	107
3.1.2	涡流检测的特点	107
3.1.3	涡流检测的发展过程	108
3.2	涡流检测基础知识	109
3.2.1	与涡流检测相关的电学和磁学基本知识	109
3.2.2	涡流检测技术原理	112
3.3	涡流检测仪器及设备	120
3.3.1	涡流检测仪	120
3.3.2	涡流检测探头(检测线圈)	123
3.3.3	对比试样	125
3.4	涡流检测方法	125
3.4.1	涡流检测一般操作步骤	125
3.4.2	涡流检测的频率选择	126

3.4.3	涡流检测信号分析	127
3.4.4	提离效应及其抑制	128
3.5	涡流检测诊断常用标准	130
3.5.1	钛及钛合金管材的涡流检验	130
3.5.2	圆钢穿过式涡流检测诊断标准	131
3.5.3	铝及铝合金冷拉薄壁管材涡流检测诊断标准	132
3.5.4	铜及铜合金无缝管涡流检测诊断标准	133
3.6	涡流检测技术应用	133
3.6.1	涡流探伤	133
3.6.2	材质检验	136
3.6.3	涡流测厚	137
	参考文献	138
	复习思考题	139
第4章	渗透检测技术	140
4.1	概述	140
4.1.1	渗透检测的定义、原理和作用	140
4.1.2	渗透检测技术的发展过程	140
4.1.3	渗透检测方法的分类	141
4.1.4	渗透检测技术的优点和局限性	143
4.2	渗透检测物理基础	143
4.2.1	表面张力和表面张力系数	143
4.2.2	润湿现象	145
4.2.3	毛细现象	147
4.2.4	表面活性和表面活性剂	151
4.2.5	乳化作用	154
4.2.6	渗透检测中的光学基础知识	155
4.2.7	可见度和对比度	158
4.3	渗透检测材料	158
4.3.1	渗透液	159
4.3.2	去除剂	165
4.3.3	显像剂	168
4.3.4	渗透检测材料系统	172
4.4	渗透检测设备	173
4.4.1	试块	173
4.4.2	渗透检测装置	176

4.5 渗透检测技术	178
4.5.1 渗透检测基本步骤	178
4.5.2 渗透检测典型方法	188
4.6 显示的解釋和缺陷評定	193
4.6.1 显示的分类	193
4.6.2 缺陷的評定	194
4.6.3 缺陷的记录	199
参考文献	199
复习思考題	200
第5章 磁粉检测技术	201
5.1 概述	201
5.1.1 磁粉检测发展历史和现状	201
5.1.2 漏磁场检测与磁粉检测	202
5.2 磁粉检测物理基础	204
5.2.1 相关的物理量	204
5.2.2 铁磁性材料	207
5.2.3 电流的磁场	210
5.2.4 退磁场	215
5.2.5 磁路与磁感应线的折射	217
5.2.6 漏磁场	218
5.3 磁化方法和磁化规范	220
5.3.1 磁化电流	220
5.3.2 磁化方法	224
5.3.3 磁化规范	231
5.4 磁粉检测设备	234
5.4.1 磁粉检测设备分类	234
5.4.2 固定式探伤机的组成	235
5.4.3 测量仪器	236
5.5 磁粉检测材料	237
5.5.1 磁粉	237
5.5.2 载液	239
5.5.3 磁悬液	240
5.5.4 反差增强剂	241
5.5.5 标准试片	241
5.5.6 标准试块	242

5.6 磁粉检测工艺	243
5.6.1 预处理及检测的时机	243
5.6.2 连续法磁粉检测	244
5.6.3 剩磁法磁粉检测	245
5.6.4 湿法磁粉检测	246
5.6.5 干法磁粉检测	246
5.6.6 磁粉探伤—橡胶铸型法(MT-RC法)	246
5.6.7 磁橡胶法(MRI法)	246
5.6.8 退磁	247
5.6.9 磁痕观察与记录	249
5.6.10 后处理	250
5.7 磁痕分析与工件验收	250
5.7.1 相关显示	250
5.7.2 伪显示	253
5.7.3 非相关显示	254
5.7.4 磁痕分析与工件验收	256
参考文献	256
复习思考题	256

第二篇 其它常用无损检测技术

第6章 中子射线照相检测技术	259
6.1 概述	259
6.2 中子射线照相检测技术	260
6.2.1 中子射线照相检测原理	260
6.2.2 中子射线照相检测技术的特点	260
6.3 中子射线照相检测装置	261
6.3.1 中子和中子源	261
6.3.2 中子射线照相装置	262
6.3.3 图像探测器	264
6.4 中子射线照相检测技术的应用	264
参考文献	267
复习思考题	267
第7章 工业CT检测技术	268

7.1	概述	268
7.2	工业 CT 检测的基本原理与性能	269
7.2.1	工业 CT 检测原理	269
7.2.2	工业 CT 的检测性能指标	275
7.3	工业 CT 检测系统的结构及配置	277
7.3.1	工业 CT 组成结构	277
7.3.2	工业 CT 系统的配置	278
	参考文献	281
	复习思考题	282
第 8 章	声发射检测技术	283
8.1	概述	283
8.1.1	声发射检测原理	283
8.1.2	声发射检测技术的特点	284
8.1.3	声发射检测技术的应用范围	285
8.2	声发射检测方法	286
8.2.1	声发射信号的基本特征	286
8.2.2	声发射信号的表征参数	287
8.2.3	声发射信号的检测与处理	288
8.3	声发射检测仪器	292
8.3.1	模拟信号声发射检测仪器	292
8.3.2	数字式声发射仪	294
8.4	缺陷的判定与评价	296
8.4.1	缺陷(声发射源)位置的确定	296
8.4.2	缺陷的评价	296
	参考文献	302
	复习思考题	302
第 9 章	噪声检测诊断技术	303
9.1	噪声及其度量	303
9.2	噪声测量与评价	304
9.2.1	噪声测量方法	304
9.2.2	噪声评价指标	305
9.2.3	噪声评价方法	306
9.3	噪声测量仪器	306
9.3.1	声级计	306
9.3.2	频率分析仪	306

9.3.3 噪声级分析仪.....	307
参考文献.....	307
复习思考题.....	307
第10章 Barkhausen 噪声检测技术	308
10.1 Barkhausen 检测原理	308
10.2 应力和显微组织对巴克好森信号的影响.....	308
10.2.1 应力的影响	308
10.2.2 显微组织的影响	310
10.3 检测仪器.....	310
10.4 检测参数选择.....	312
10.4.1 最佳磁场强度值的确定	312
10.4.2 检测深度的选择	312
10.5 巴克好森检测法的应用.....	314
参考文献.....	316
复习思考题.....	316
第11章 漏磁场检测技术.....	317
11.1 概述.....	317
11.2 磁化技术.....	318
11.2.1 局部磁化和整体磁化	318
11.2.2 交、直流磁化.....	318
11.3 缺陷的漏磁场.....	318
11.3.1 漏磁场的试验测量	318
11.3.2 漏磁场的理论计算	319
11.3.3 影响缺陷漏磁场的因素	320
11.4 漏磁场信号的获得.....	321
11.5 漏磁场检测信号处理.....	322
11.6 缺陷的量化.....	323
11.6.1 裂纹宽度的量化	323
11.6.2 裂纹深度的量化	324
11.7 漏磁场检测的应用.....	326
参考文献.....	327
复习思考题.....	327
第12章 工业内窥镜检测技术	328
12.1 概述.....	328
12.2 工业内窥镜检测原理和特点.....	329

12.2.1 工业内窥镜的分类	329
12.2.2 工业内窥镜检测原理	329
12.3 工业内窥镜检测实施的基本因素	333
12.3.1 检测人员	334
12.3.2 试件	334
12.4 工业内窥镜检测的应用	334
参考文献	335
复习思考题	335
第 13 章 激光全息检测技术	336
13.1 概述	336
13.2 激光全息检测原理	337
13.2.1 全息照相的特点及原理	337
13.2.2 全息干涉检测原理	340
13.3 激光全息检测方法	340
13.3.1 检测方法	340
13.3.2 加载方法	341
13.3.3 激光全息检测技术	343
参考文献	344
复习思考题	345
第 14 章 微波检测技术	346
14.1 概述	346
14.2 微波检测的原理和方法	346
14.2.1 微波的性质	346
14.2.2 微波检测原理	347
14.2.3 微波检测方法	348
14.3 微波检测技术的应用	349
14.3.1 微波测厚	349
14.3.2 微波测湿	350
14.3.3 微波探伤	351
参考文献	352
复习思考题	352
第 15 章 磁记忆检测技术	353
15.1 金属磁记忆原理	353
15.1.1 磁记忆效应	353
15.1.2 磁记忆检测原理	353

15.2 磁记忆检测物理基础研究——磁致伸缩和磁记忆	354
15.2.1 铁磁性材料的基本特点和自由能	354
15.2.2 磁致伸缩方程和磁记忆	354
15.3 磁记忆检测的局限性	355
15.4 磁记忆检测仪器	355
15.5 磁记忆检测实例——管子缺陷的磁记忆检测	356
参考文献	358
复习思考题	358

绪 论

0.1 无损检测技术概述

0.1.1 无损检测技术的定义

随着科学和工业技术的迅速发展,高温、高压、高速度和高负荷已成为现代工业的重要标志,但它的实现是建立在材料(或构件)高质量的基础之上,为确保这种优异的质量,必须采用不破坏产品原来的形状、不改变其使用性能的检测方法,对产品进行百分之百的检测(或抽检),以确保其可靠性和安全性,这种技术就是无损检测技术。

无损检测技术是在不损伤被检测对象的条件下,利用材料内部结构异常或缺陷存在所引起的对热、声、光、电、磁等反应的变化,来探测各种工程材料、零部件、结构件等内部和表面缺陷,并对缺陷的类型、性质、数量、形状、位置、尺寸、分布及其变化做出判断和评价。

无损检测技术的应用范围十分广泛,在机械制造、石油化工、造船、汽车、航空航天和核能等工业中得到了普遍应用。无损检测工序在材料和产品的静态和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成为一支庞大的生力军,享有“工业卫士”的美誉。

0.1.2 无损检测的目的

无损检测的目的是定量掌握缺陷与强度的关系,评价构件的允许负荷、寿命或剩余寿命;检测设备(构件)在制造和使用过程中产生的结构不完整性及缺陷情况,以便改进制造工艺,提高产品质量,及时发现故障,保证设备安全、高效可靠地运行。具体地说,无损检测的目的主要有以下三个方面。

1. 质量管理

各种产品的使用性能、质量水平等量化指标,通常在其技术文件中都有明确规定。无损检测的主要目的之一,就是对非连续加工(如多任务序生产)或连续加工(如自动化生产线)的原材料或零部件提供实时的质量控制。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。在质量控制过程中,将由无损检测获得的质量信息反馈到设计与工艺部门,可反过来

促进其改进产品的设计与制造工艺,从而提高产品质量、降低成本、提高生产效率。

另外,根据验收标准,也可以利用无损检测技术把原材料或产品质量控制在设计要求的范围内,无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,从而提高资源利用率,提高经济效益。

2. 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,或者在检修期进行检测,能及时发现影响其安全运行的隐患,防止事故。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,能防患于未然,具有重要的意义。

在役检测不仅可以及时发现隐患,更重要的是可以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、形状、尺寸和性质等的基础上,对装置或构件能否继续使用及其安全运行寿命进行评价。

3. 质量鉴定

制成品在进行组装或投入使用之前,应进行最终检验,即质量鉴定。其目的是确定被检对象是否达到设计性能,能否安全使用,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工序中,检测材料或部件是否符合要求,可以避免对不合格产品继续进行徒劳无益的加工。这项工作一般叫做质量检查,实质上属于质量鉴定的范畴。

质量鉴定是非常必要的,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检验的无比优越性。

0.1.3 无损检测技术的特点

无损检测技术具有以下特点:

(1) 无损检测不会对构件造成任何损伤。无损检测是在不破坏构件的前提下,利用材料物理性质的变化来判断构件内部和表面是否存在缺陷,不会对材料、工件和设备造成任何损伤。

(2) 无损检测技术为查找缺陷提供了一种有效方法。任何部件、设备在加工和使用过程中,由于其内、外部各种因素的影响,不可避免地会产生缺陷。使用人员有时不但要知道其是否有缺陷,还要确定缺陷的位置、大小及其危害程度,并对其发展进行预测和预报。无损检测诊断技术为此提供了一种有效方法。

(3) 无损检测技术能够对产品质量实施监控。产品在加工和成形过程中,如何保证质量及其可靠性非常关键。无损检测技术能够在铸造、锻压、冲压、焊接、切削加工等各工序中,检查工件是否符合要求,可避免徒劳无益的加工,从而降低产

品成本,提高产品质量和可靠性,实现对产品质量的监控。

(4) 无损检测诊断技术能够防止因产品失效引起的灾难性后果。机械零部件、装置或系统,在制造或服役过程中丧失其规定功能而不能工作,或不能继续可靠地完成其预定功能称为失效。失效是一种不可接受的故障。1986年1月28日,美国“挑战者”号航天飞机升空 70s 后发生爆炸,7 名字航员全部遇难,直接经济损失 12 亿美元。究其原因这是由于固体火箭助推器尾部连接处的 O 形密封圈失效使燃料泄漏所致。如果用无损检测诊断技术提前或及时检测出失效部位和原因,并采取有效措施,就可以避免灾难性事故的发生。

(5) 无损检测技术的应用范围广阔。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(水泥、塑料、炸药等);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诊断,受到工业界的普遍重视。

由于无损检测技术具有以上特点,因此在工程中得到了广泛地应用。

0.2 无损检测技术的发展过程

0.2.1 无损检测技术发展的三个阶段

无损检测技术经历了三个发展阶段,即无损探伤(Nondestructive Inspection, NDI)、无损检测(Nondestructive Testing, NDT)和无损评价(Nondestructive Evaluation, NDE),见表 0-1。目前一般统称为无损检测(NDT)。

表 0-1 无损检测技术的发展阶段及各阶段的基本工作范围

	第一 阶段	第二 阶段	第三 阶段
名称	无损探伤(NDI)	无损检测(NDT)	无损评价(NDE)
英文名称	Nondestructive Inspection	Nondestructive Testing	Nondestructive Evaluation
基本工作范围	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),满足工程设计中对零部件强度设计的需要	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要的各种工艺参数,如温度、压力、密度、黏度、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	不但进行产品的最终检验以及过程工艺参数的测量,而且当材料中不存在致命缺陷时,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之间建立联系; ③ 对决定材料性质、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