

无损检测技术

主编 刘贵民



国防工业出版社
National Defense Industry Press

无损检测技术

主编 刘贵民

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

无损检测技术/刘贵民主编. —北京:国防工业出版社,2007.2 重印
ISBN 7-118-04206-4

I. 无... II. 刘... III. 无损检验
IV. TG115.28

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第119582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100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 23 $\frac{3}{4}$ 字数 450 千字

2007年2月第2次印刷 印数 4001—6000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

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

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,无损检测也已经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,或在相关的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。为促使无损检测专业教学和培训的系统化,编写了本书。

全书共分为绪论、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简单的介绍。第一篇共分为5章(第一章至第五章),分别对X射线检测和 γ 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原理、特点、所用仪器设备、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(第六章至第十五章),对一些其他比较常用的无损检测技术,如中子照相检测、工业CT检测、声发射检测、噪声检测、磁弹性检测、漏磁场检测、工业内窥镜检测、激光全息检测、微波检测等,以及最近出现的磁记忆检测技术进行了介绍。

本书不仅对相关的检测技术进行了原理和检测方法方面的介绍,同时也突出了检测材料、工艺以及检测结果的分析 and 判定;不仅对5种常规的无损检测技术进行了详细介绍,同时也介绍了一些其他常用的无损检测技术,注意反映当前国内外无损检测领域的最新动态和最新研究成果。

本书的绪论以及第一、五、六、七、八、十三、十四章由刘贵民编写,第二、十、十一章由张昭光编写,第四、九、十五章由马丽丽编写,第三、十二章由董世运编写,全书由刘贵民统稿。

本书编写过程中,许军教授提供了宝贵的建议,宋娅玲、吕光义同学在文字录入、校对等方面作了大量具体的工作,在此向他们表示真诚的谢意。

由于作者水平有限,书中错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2005 年 9 月

目 录

绪论	1
一、无损检测概述	1
二、无损检测技术的发展过程	3
三、无损检测技术的分类及本书重点	5
四、无损检测方法的选择	5
参考文献	8

第一篇 常规无损检测技术

第一章 射线检测技术	10
1.1 射线检测技术概述	10
1.1.1 射线检测技术的发展概况	10
1.1.2 射线检测主要方法	10
1.1.3 射线检测技术的特点、适用性与局限性	11
1.2 射线检测物理基础	12
1.2.1 射线概念	12
1.2.2 光子与物质的相互作用	17
1.2.3 射线衰减规律	20
1.3 射线检测的基本原理和方法	25
1.3.1 X射线检测原理	25
1.3.2 X射线检测方法	26
1.3.3 γ 射线检测	27
1.3.4 射线检测时透照方向的选择	27
1.4 射线照相检验设备与器材	31
1.4.1 X射线机	31
1.4.2 γ 射线机	36
1.4.3 加速器——高能X射线源	37
1.4.4 工业射线胶片	38

1.4.5 其他常用设备和器材	40
1.5 射线检测缺陷分析	44
1.5.1 常见缺陷及其影像特征	44
1.5.2 表面缺陷	46
1.5.3 伪缺陷	47
1.5.4 缺陷埋藏深度的确定	48
1.6 射线照相影像质量	49
1.6.1 影像质量的基本因素	49
1.6.2 影像的对比度	50
1.6.3 影像的不清晰度	50
1.6.4 影像的颗粒度	52
1.7 射线的防护	52
1.7.1 屏蔽防护法	53
1.7.2 距离防护法	53
1.7.3 时间防护法	53
参考文献	54
第二章 超声波检测技术	55
2.1 概述	55
2.2 超声波的分类	56
2.2.1 描述超声波的基本物理量	56
2.2.2 超声波的分类	56
2.3 超声场及介质的声参量	59
2.3.1 描述超声场的物理量	59
2.3.2 介质的声参量	61
2.4 超声波在介质中的传播特性	64
2.4.1 超声波垂直入射到平界面上的反射和透射	64
2.4.2 超声波倾斜入射到平界面上的反射和折射	67
2.4.3 超声波在曲界面上的反射和透射	70
2.5 超声检测仪、探头及试块	73
2.5.1 超声检测仪	73
2.5.2 探头	76
2.5.3 试块	81
2.6 超声波检测方法和通用检测技术	83
2.6.1 超声波检测方法	83
2.6.2 仪器与探头的选择	89

2.6.3 耦合	91
2.6.4 检测仪的调节	95
2.7 超声波测厚	96
2.7.1 测厚仪的工作过程	96
2.7.2 超声波测厚方式	97
2.7.3 测厚仪的调整与使用	99
2.8 超声波检测应用实例	100
2.8.1 港口集装箱龙门桥吊缺陷的超声检测	100
2.8.2 锅炉小管裂纹的超声波检测	101
2.8.3 硝酸储罐壁厚的超声检测	102
参考文献	104
第三章 涡流检测技术	105
3.1 概述	105
3.1.1 涡流检测基本原理	105
3.1.2 涡流检测的特点	105
3.1.3 涡流检测的发展过程	106
3.2 涡流检测基础知识	107
3.2.1 与涡流检测相关的电学和磁学基本知识	107
3.2.2 涡流检测技术原理	111
3.3 涡流检测仪器及设备	119
3.3.1 涡流检测仪	119
3.3.2 涡流检测探头(检测线圈)	122
3.3.3 对比试样	124
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	125
3.4.3 涡流检测信号分析	126
3.4.4 提离效应及其抑制	127
3.5 涡流检测诊断常用标准	129
3.5.1 钛及钛合金管材的涡流检验	129
3.5.2 圆钢穿过式涡流检测诊断标准	130
3.5.3 铝及铝合金冷拉薄壁管材涡流检测诊断标准	131
3.5.4 铜及铜合金无缝管涡流检测诊断标准	132
3.6 涡流检测技术应用	132
3.6.1 涡流探伤	132

3.6.2 材质检验	135
3.6.3 涡流测厚	137
参考文献	138
第四章 渗透检测技术	139
4.1 渗透检测技术简介	139
4.1.1 渗透检测的定义、原理和作用	139
4.1.2 渗透检测技术的发展过程	139
4.1.3 渗透检测方法的分类	140
4.1.4 渗透检测技术的优点和局限性	142
4.1.5 渗透检测技术与其他常规检测技术的比较	142
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	146
4.2.3 毛细现象	148
4.2.4 表面活性和表面活性剂	151
4.2.5 乳化作用	155
4.2.6 渗透检测中的光学基础知识	156
4.2.7 可见度和对比度	158
4.3 渗透检测材料	159
4.3.1 渗透液	159
4.3.2 去除剂	166
4.3.3 显像剂	169
4.3.4 渗透检测材料系统	173
4.4 渗透检测设备	174
4.4.1 试块	174
4.4.2 渗透检测装置	177
4.5 渗透检测技术	179
4.5.1 渗透检测基本步骤	179
4.5.2 渗透检测典型方法	189
4.6 显示的解释和缺陷评定	194
4.6.1 显示的分类	194
4.6.2 缺陷的评定	195
4.6.3 缺陷的记录	200
参考文献	200
第五章 磁粉检测技术	202

5.1 磁粉检测技术简介	202
5.1.1 磁粉检测发展历史和现状	202
5.1.2 漏磁场检测与磁粉检测	204
5.1.3 表面缺陷无损检测方法的比较	206
5.2 磁粉检测物理基础	206
5.2.1 相关的物理量	206
5.2.2 铁磁性材料	209
5.2.3 电流的磁场	212
5.2.4 退磁场	217
5.2.5 磁路与磁感应线的折射	218
5.2.6 漏磁场	219
5.3 磁化方法和磁化规范	221
5.3.1 磁化电流	221
5.3.2 磁化方法	226
5.3.3 磁化规范	233
5.4 磁粉检测设备	236
5.4.1 磁粉检测设备分类	236
5.4.2 固定式探伤机的组成	237
5.4.3 测量仪器	238
5.5 磁粉检测材料	239
5.5.1 磁粉	239
5.5.2 载液	241
5.5.3 磁悬液	242
5.5.4 反差增强剂	243
5.5.5 标准试片	243
5.5.6 标准试块	244
5.6 磁粉检测工艺	245
5.6.1 预处理及检测的时机	245
5.6.2 连续法磁粉检测	246
5.6.3 剩磁法磁粉检测	247
5.6.4 湿法磁粉检测	248
5.6.5 干法磁粉检测	248
5.6.6 磁粉探伤—橡胶铸型法(MT—RC法)	248
5.6.7 磁橡胶法(MRI法)	249
5.6.8 退磁	249

5.6.9 磁痕观察与记录	251
5.6.10 后处理	252
5.7 磁痕分析与工件验收	252
5.7.1 相关显示	253
5.7.2 伪显示	256
5.7.3 非相关显示	256
5.7.4 磁痕分析与工件验收	258
参考文献	258

第二篇 其他常用无损检测技术

第六章 中子射线照相检测技术	260
6.1 概述	260
6.2 中子照相检测技术	261
6.2.1 中子照相检测原理	261
6.2.2 中子照相检测技术的特点	261
6.3 中子照相检测装置	262
6.3.1 中子和中子源	262
6.3.2 中子照相装置	264
6.3.3 图像探测器	266
6.4 中子照相技术的应用	269
参考文献	272
第七章 工业 CT 检测技术	273
7.1 概述	273
7.2 工业 CT 检测的基本原理与性能	274
7.2.1 工业 CT 检测原理	274
7.2.2 工业 CT 的检测性能指标	280
7.3 工业 CT 检测系统的结构及配置	282
7.3.1 工业 CT 组成结构	282
7.3.2 工业 CT 系统的配置	283
参考文献	287
第八章 声发射检测技术	288
8.1 概述	288
8.1.1 声发射检测原理	288
8.1.2 声发射检测技术的特点	289

8.1.3 声发射检测技术的应用范围	290
8.2 声发射检测方法	291
8.2.1 声发射信号的基本特征	291
8.2.2 声发射信号的表征参数	293
8.2.3 声发射信号的检测与处理	293
8.3 声发射检测仪器	297
8.3.1 模拟信号声发射检测仪器	297
8.3.2 数字式声发射仪	300
8.4 缺陷的判定与评价	302
8.4.1 缺陷(声发射源)位置的确定	302
8.4.2 缺陷的评价	302
参考文献	309
第九章 噪声检测诊断技术	310
9.1 噪声及其度量	310
9.2 噪声测量与评价	311
9.2.1 噪声测量方法	311
9.2.2 噪声评价指标	312
9.2.3 噪声评价方法	313
9.3 噪声测量仪器	313
9.3.1 声级计	313
9.3.2 频率分析仪	313
9.3.3 噪声级分析仪	314
参考文献	314
第十章 巴克好森(Barkhausen)噪声检测	315
10.1 巴克好森(Barkhausen)检测原理	315
10.2 应力和显微组织对巴克好森信号的影响	315
10.2.1 应力的影响	315
10.2.2 显微组织的影响	316
10.3 检测仪器	317
10.4 检测参数选择	319
10.4.1 最佳磁场强度值的确定	319
10.4.2 检测深度的选择	319
10.5 巴克好森检测法的应用	321
参考文献	323
第十一章 漏磁场检测	324

11.1	概述	324
11.2	磁化技术	325
11.2.1	局部磁化和整体磁化	325
11.2.2	交、直流磁化	325
11.3	缺陷的漏磁场	325
11.3.1	漏磁场的试验测量	325
11.3.2	漏磁场的理论计算	326
11.3.3	影响缺陷漏磁场的因素	327
11.4	漏磁场信号的获得	328
11.5	漏磁场检测信号处理	329
11.6	缺陷的量化	331
11.6.1	裂纹宽度的量化	331
11.6.2	裂纹深度的量化	332
11.7	漏磁场检测的应用	334
	参考文献	334
第十二章	工业内窥镜检测	336
12.1	概述	336
12.2	工业内窥镜检测原理和特点	337
12.2.1	工业内窥镜的分类	337
12.2.2	工业内窥镜检测原理	337
12.3	工业内窥镜检测实施的基本因素	342
12.3.1	检测人员	342
12.3.2	试件	342
12.4	工业内窥镜检测的应用	343
	参考文献	343
第十三章	激光全息检测技术	344
13.1	概述	344
13.2	激光全息检测原理	344
13.2.1	全息照相的特点及原理	344
13.2.2	全息干涉检测原理	347
13.3	激光全息检测方法	348
13.3.1	检验方法	348
13.3.2	加载方法	349
13.3.3	激光全息检测技术	351
	参考文献	352

第十四章 微波检测技术	354
14.1 概述.....	354
14.2 微波检测的原理和方法.....	354
14.2.1 微波的性质.....	354
14.2.2 微波检测原理.....	355
14.2.3 微波检测方法.....	356
14.3 微波检测技术的应用.....	357
14.3.1 微波测厚.....	357
14.3.2 微波测湿.....	358
14.3.3 微波探伤.....	360
参考文献.....	360
第十五章 磁记忆检测技术	361
15.1 金属磁记忆原理.....	361
15.1.1 磁记忆效应.....	361
15.1.2 磁记忆检测原理.....	361
15.2 磁记忆检测物理基础.....	362
15.2.1 铁磁性材料的基本特点和自由能.....	362
15.2.2 磁致伸缩.....	363
15.2.3 铁磁体的技术磁化.....	363
15.2.4 磁致伸缩方程和磁记忆.....	364
15.3 磁记忆检测的局限性.....	366
15.4 磁记忆检测仪器.....	366
参考文献.....	367

绪 论

一、无损检测概述

(一) 无损检测的定义

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)高质量的基础之上的,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。

(二) 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,以免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。

(三) 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、锻、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 名宇航员全部遇难,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 型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。

二、无损检测技术的发展过程

(一) 无损检测技术发展的三个阶段

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

表 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	Non-destructive Inspection	Non-destructive Testing	Non-destructive 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(含肉眼观察、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

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。在无损评价技术中,自动无损评价(ANDE)和定量无损评价(QNDE)是其两个主要组成部分。ANDE 和 QNDE 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。前者多用于大批量产品的生产、加工和在役检测,后者多用于关键零部件的检测。

(二) 无损检测技术的发展趋势

20 世纪 70 年代以来是无损检测技术飞速发展的时期,其特点是微机技术不断应用到无损检测领域,同时无损检测本身的新方法和新技术也不断出现,从而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。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,使某些项目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、标准化、数字化、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、缺陷判伤和评价的标准化等。另外还要进行全国统一的人员资格培训、鉴定和考核。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。

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研究课题,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。

(三) 我国的无损检测技术

目前,无损检测技术最先进的国家当属美国,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。随着现代化工业水平的提高,我国的无损检测技术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。很多业务部门,近年来亦大力加强了无损检测技术的应用推广工作。

同时,我国已出现了一批生产无损检测仪器设备的专业厂家。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 年~20 年,但一