

无损检测 手册

李家伟 陈积懋 主编



机械工业出版社
China Machine Press

无损检测手册

李家伟 陈积懋 主 编



机械工业出版社

《无损检测手册》编写者名单

主 编

李家伟 北京航空材料研究院 研究员

陈积懋 中国航空制造工程研究所 研究员

编 写 者

(姓氏以汉语拼音顺序排列)

陈戈林	清华大学	教 授
陈惠中	上海核工业设计院	高级工程师
陈建萍	北京第二外国语学院计算机中心	副教授
金周庚	航天工业总公司 703 所	研究员
康纪黔	国家质量技术监督局锅炉压力容器检测中心	研究员
李路明	清华大学机械系无损检测教研室	副教授
李生田	哈尔滨焊接研究所	研究员级高级工程师
林维正	同济大学声学所	教 授
廖玉龄	北京航空材料研究院	高级工程师
梅德松	上海核工业设计院	研究员级高级工程师
穆向荣	北京科技大学物理系	教 授
任吉林	南昌航空工业学院	教 授
孙殿寿	北京航空材料研究院	高级工程师
苏恒兴	上海核工业设计院	研究员
田如均	电子部十一所	高级工程师
陶维道	兰州三磊电子公司	高级工程师
王自明	北京航空材料研究院	研究员

肖蔚彬	首钢通用机械厂	高级工程师
余南廷	中国航空制造工程研究所	高级工程师
张广纯	北京钢铁研究总院	研究员
郑家勋	上海汽轮机厂	高级工程师
张鹏林	兰州三磊电子公司	工程师
赵起良	北京航空材料研究院	高级工程师
郑世才	中国航天科工集团公司第二研究院	研究员
张朝宗	清华大学核能设计研究院	教 授

前 言

现今，无损检测技术在产品质量控制中所起的不可取代的重要作用已为日益众多的科技人员和企业所认同，无损检测技术的发展及其应用更是日新月异，客观的需要毕竟是事物发展的最大动力，本手册的编写正是在如此的历史背景下进行的，其意图是：

1. 为从事产品设计、研制、生产、使用的非无损检测专业科技人员、质量管理人员提供一了解无损检测、有效运用无损检测技术的参考资料；
2. 为从事无损检测领域某一方法的专业人员在工作中查阅某些参数及了解某些技术细节提供方便，并为其因工作需要而了解其他无损检测方法时提供有用的参考；
3. 为广大无损检测教学人员提供一参考读物。

本手册的第 1 篇对无损检测的内涵及其在质量控制中的作用及无损检测自身的质量控制问题作了一简明扼要的说明。第 2 篇为未涉及过材料科学与工程领域的人员提供了必要的有关材料学的基本知识，这有助于加深其对受检件的了解。第 3 至第 11 篇就 45 种方法的基本原理及运用要点和典型应用作了叙述，希望读者就每种方法能有较好的理解，我们深感只有理解了才能更好的掌握，例如，不深刻了解一信号的内涵是难以通过信号处理技术来获得有用信息的。第 12 篇则是对不同类型的材料和某些特定类型制件所出现的问题利用不同无损检测手段予以处理的一些示例，这既有助于我们对具体问题的解决，也有助于对面临的新问题的解决开拓思路，但是限于手册的性质，很多问题不能深入展开讨论，读者可从所列参考资料中得到进一步的信息。

关于电学方法、磁学方法的划分，本手册的做法是依据何种参量与受检件起作用从而得到所需信息来划分。例如，涡流法检测是通过涡流与材料的相互作用而获得所需信息的，乃将之列入电学方法篇，尽管涡流的产生和检测是利用电磁感应原理来完成的。

本手册的附录列出了国际标准化组织、世界各先进工业国家所发布的有关无损检测专业的标准、规范、实施方法等。不同于一般的参考资料，它们都是具有很强的针对性、实用性。对于无损检测的从业人员和技术管理人员来说是很有价值的参考资料，他山之石可以攻玉，准确予以运用当可收到事半功倍之效。

由于我们水平有限、经验不足及种种其他原因，作为本手册的第1版错误和不足之处实为难免，加之新技术发展迅速，深度和广度不断增大，恳切希望读者随时将意见函告我们，以便在今后各版次中不断修正补充，使本手册能更好地发挥其应有的作用，毕竟我们的心愿是共同的——愿我们的祖国日益繁荣富强。

在本手册的编写过程中曾得到许多同志的热情支持和帮助，谨此致谢。

编者

2001年12月



李家伟 1952年大学毕业，随即工作于一航空发动机制造厂，在多位苏联专家指导下，从事射线、磁粉、液体渗透、电磁无损检测方面的工作。1958~1959年在全苏航空材料研究院专家指导下从事超声无损检测方面的研究工作，而后一直在北京航空

材料研究院从事材料和制件的无损检测/评价工作。1981年、1987年及1992年先后被授予高级工程师、研究员级高级工程师及研究员和硕士研究生导师职称、职务。1992年起国务院发给政府特殊津贴。先后受聘担任过中国航空学会材料工程专业学会理化及无损检测专业委员会副主任委员，国家标准局、国家技术监督局全国无损检测标准化技术委员会副主任委员，南昌航空学院兼职教授。从1981年起，在中国机械工程学会无损检测学会，先后担任过理事、副理事长，标准化工作委员会、编辑出版工作委员会主任；学术工作委员会、第2~6届无损检测人员资格鉴定工作委员会副主任；《无损检测》杂志副主编；现为学会名誉委员、顾问、杂志编委会委员。



陈积懋 1951年毕业于浙江大学电机工程系。1952年起即在国防系统研究所从事生产自动化与测试技术研究。1956年参与航空工艺研究所（现中国航空制造工程研究所）筹建，并创建了航空制造工程无损检测专业，而后一

直在该所从事无损检测与评价研究。1981年、1987年、1992年先后被授予高级工程师、研究员级高级工程师、研究员职称；1992年被授予航空航天工业部有突出贡献专家称号；同年起国务院发给政府特殊津贴。1986年起先后受聘华侨大学、西北工业大学、北方交通大学、西安交通大学、镇江船舶工程学院、南昌航空工业学院名誉教授或兼职教授。主编《航空制造工程手册》工艺检测分册（含无损检测与特种形位测量）获1996年度部级科技进步二等奖。自1978年中国机械工程学会无损检测学会成立，先后任理事、常务理事、名誉委员、顾问；并长期任该学会新技术专业委员会主任与中国复合材料学会性能测试与检测专业委员会主任。

目 录

前言

第 1 篇 概 论

1 无损检测内涵从探伤到评价的演变	2	3.1 可靠性、缺陷检出概率和置信度	8
2 无损检测与质量控制	3	3.2 从二项式分布法获得 POD (a) 函数	8
2.1 质量与质量控制	3	3.3 从检出/漏检数据获得 POD (a) ...	9
2.2 无损检测在全面质量控制中的作用	4	3.4 从信号响应数据获得 POD (a) 函数	10
2.3 无损检测作业的质量控制	5	参考文献	11
3 缺陷检出的可靠性	7		

第 2 篇 材料学的基本知识

第 1 章 金属材料	15	1.6.3 电子显微术	29
1.1 金属材料的分类	15	1.6.4 其他	30
1.2 单组元金属的结构	15	1.7 金属材料的热加工工艺和相应缺陷	30
1.2.1 金属电子论	15	1.7.1 铸造	30
1.2.2 金属的晶体结构	16	1.7.2 塑性加工	31
1.2.3 晶粒与晶界	17	1.7.3 焊接	31
1.3 合金的结构	17	1.7.4 热处理	32
1.3.1 合金	17	1.7.5 表面技术	33
1.3.2 相	18	1.7.6 其他热加工工艺	34
1.3.3 相变、相平衡和相图	19	1.8 金属材料使用过程中产生的缺陷	34
1.4 金属材料的力学性能	22	1.9 金属中断裂发展的概念	35
1.4.1 在静拉伸下的力学性能	22	1.9.1 晶体缺陷	35
1.4.2 弹性与广义虎克定律	23	1.9.2 位错	35
1.4.3 在其他静加载下的力学性能 ...	25	1.9.3 滑移与位错塞积	36
1.4.4 冲击韧度	26	1.9.4 塑性形变和断裂	36
1.4.5 疲劳	26	1.9.5 断裂力学	36
1.4.6 蠕变	27	参考文献	37
1.4.7 断裂韧度	28	第 2 章 聚合物、无机非金属材料 and 复合材料	38
1.5 金属材料的物理性能	29	2.1 聚合物	38
1.6 金属材料组织的观察	29		
1.6.1 低倍组织观察	29		
1.6.2 光学金相显微术	29		

2.1.1 概述	38	2.3.2 功能复合材料	39
2.1.2 高聚物	38	2.3.3 先进复合材料	40
2.2 无机非金属材料	39	2.3.4 常用复合材料	40
2.3 复合材料	39	2.3.5 复合材料的失效	41
2.3.1 结构复合材料	39	参考文献	41

第3篇 射线检测

第1章 X射线与 γ 射线检测	47	1.7.2 缺陷识别	80
1.1 检测技术的物理基础	47	1.7.3 质量评定概述	82
1.1.1 X射线	47	1.8 射线实时成像检测技术	82
1.1.2 γ 射线与放射性	48	1.8.1 概述	82
1.1.3 光子与物质的相互作用	49	1.8.2 X射线图像增强器系统	82
1.1.4 X射线与 γ 射线的衰减规律	50	1.8.3 线阵扫描系统(LDA)	87
1.2 射线源	52	1.8.4 光纤CCD系统	91
1.2.1 X射线机	52	1.8.5 非晶硅探测器	92
1.2.2 γ 射线设备	58	1.8.6 X射线荧光/真空微光摄像 系统	92
1.2.3 高能X射线源	60	参考文献	93
1.3 射线胶片	62	第2章 中子射线法检测	95
1.3.1 射线胶片的结构	62	2.1 概述	95
1.3.2 潜影与射线照相效应 的特点	62	2.2 基本原理	95
1.3.3 胶片的主要感光特性	62	2.3 用于中子射线检测的装置	96
1.3.4 射线胶片的分类与选用	65	2.3.1 中子按能量的分级	96
1.4 射线照相的影像	66	2.3.2 中子源	97
1.4.1 影像质量的基本因素	66	2.3.3 准直器	97
1.4.2 射线照相灵敏度	68	2.4 热中子成像方法	98
1.5 射线照相检测的基本技术	71	2.4.1 射线胶片成像法	98
1.5.1 概述	71	2.4.2 闪烁器和实时成像	99
1.5.2 透照布置	72	2.4.3 迹蚀探测器	99
1.5.3 基本透照参数的确定	72	2.4.4 中子射线照相图像质量的 确定	100
1.5.4 散射线控制	74	2.5 其他能量中子的探测	102
1.5.5 增感	75	2.5.1 冷中子	102
1.5.6 曝光曲线	76	2.5.2 超热中子	102
1.6 暗室处理	78	2.5.3 共振中子	102
1.6.1 暗室处理概述	78	2.5.4 快中子	102
1.6.2 暗室处理过程	78	2.6 中子射线检测法的应用示例	102
1.6.3 存档质量检查	79	2.6.1 检测高密度容器中低密度 元件和低密度区	102
1.7 评片	79		
1.7.1 评片概述	79		

2.6.2 检测密度相似但中子截面不同的材料	103
2.6.3 检测高放射性试件	105
2.7 中子激活问题	105
附录	105
参考文献	106
第3章 射线计算机层析检测	107
3.1 概述	107
3.2 射线 CT 的基本原理	107
3.3 射线 CT 系统的构成	108
3.3.1 射线源	108
3.3.2 机械扫描系统	109
3.3.3 辐射探测系统	110
3.3.4 计算机系统	111
3.4 工业射线 CT 的图像质量	111
3.4.1 空间分辨力	111
3.4.2 对比度、对比灵敏度	112
3.4.3 伪像	112
3.5 射线 CT 系统性能的测量	113
3.5.1 试样	113
3.5.2 空间分辨力的测量	113
3.5.3 对比灵敏度的测量	115
3.5.4 对比度-细节-剂量 (Contrast-Detail-Dose, CDD) 曲线	116
3.5.5 某些市售工业用射线 CT 的性能	116
3.6 工业射线 CT 应用示例	117
3.7 双能 CT 技术	123
3.7.1 基本原理	123
3.7.2 应用示例	123
3.8 圆锥射束 CT 技术	123
3.9 康普顿背散射层析术	123
3.9.1 基本原理	123
3.9.2 优点和局限性	124
3.9.3 应用示例	124
3.10 焦平面层析	126

3.11 中子 CT 技术	126
参考文献	127
第4章 β 射线与 γ 射线测厚技术	128
4.1 射线和物质的相互作用	128
4.1.1 β 射线和物质的相互作用	128
4.1.2 γ 射线与物质的相互作用	130
4.2 辐射源、探测器和防护	133
4.2.1 常用测厚放射源	133
4.2.2 辐射探测器	134
4.2.3 射线的防护	135
4.3 测厚仪表	135
4.3.1 透射式仪表	135
4.3.2 散射式仪表	139
4.3.3 测厚仪表的标定	141
参考文献	142
第5章 其他射线检测方法	143
5.1 质子射线照相	143
5.1.1 所依据的基本原理	143
5.1.2 质子源和探测器材	144
5.1.3 应用	144
5.2 正电子湮没检测	145
5.2.1 基本概念	145
5.2.2 应用	146
5.3 中子活化分析	146
5.3.1 基本概念	146
5.3.2 优点与局限性	146
5.3.3 应用示例	147
5.4 穆斯堡尔谱法	147
5.4.1 基本概念	147
5.4.2 方法的优点和局限性	148
5.4.3 应用	149
5.5 电子射线照相	149
5.5.1 概述	149
5.5.2 透射法	150
5.5.3 发射法	150
参考文献	150

第4篇 声学方法检测

第1章 超声检测	155
-----------------------	------------

1.1 概述	155
--------------	-----

1.2 超声检测基础知识	155	1.5.12 缺陷埋深和自身高度的 测量——衍射传播时间 (TOFD) 技术	192
1.2.1 振动与波	155	1.5.13 头波和爬波	194
1.2.2 超声平面波在大平界面上 垂直入射时的行为	158	1.6 横波检测	195
1.2.3 超声平面波在大平界面上 斜入射时的行为	159	1.6.1 斜探头发射的横波声场	195
1.2.4 圆盘声源的声场	163	1.6.2 横波检测的基本工作方式	196
1.3 超声检测仪、探头和试块	166	1.6.3 检测条件选择的考虑	197
1.3.1 超声检测仪	166	1.6.4 横波检测前的准备	197
1.3.2 探头	168	1.6.5 缺陷位置的确定	199
1.3.3 超声检测仪、压电换能器探 头及两者组合的性能测试	174	1.6.6 缺陷的定量	200
1.3.4 试块	174	1.6.7 横波检测时侧壁的影响	200
1.4 超声检测中的共性问题	176	1.6.8 缺陷埋深及自身高度的 测量	200
1.4.1 超声检测系统的配置	176	1.6.9 圆弧面试件斜探头的直接 接触法检测	201
1.4.2 对受检件的要求	176	1.7 瑞利波检测	202
1.4.3 耦合	177	1.7.1 声表面波	202
1.4.4 关于频率的选择	179	1.7.2 瑞利波	202
1.4.5 对比试块	179	1.7.3 瑞利波的产生	202
1.4.6 扫查	180	1.7.4 斜楔瑞利波探头性能的 测试	203
1.4.7 影响缺陷回波幅度的因素	180	1.7.5 时间基线的标定及检测 灵敏度的调整	204
1.4.8 实际缺陷的定量评定方法	181	1.7.6 缺陷的检测	205
1.4.9 检测规程的编制和检测结果 的记录	182	1.8 蓝姆波的检测	205
1.5 纵波检测	182	1.8.1 蓝姆波方程、相速度、 群速度和质点振动的位移	205
1.5.1 设备性能要求	183	1.8.2 在薄板中蓝姆波的激励	208
1.5.2 扫查前的准备	183	1.8.3 蓝姆波检测薄板时模式 的选择	209
1.5.3 缺陷位置的确定	184	1.8.4 薄板分层的蓝姆波检测	211
1.5.4 用 AVG 图法确定缺陷的 当量值	184	1.8.5 板与固体或液体接触时 的情况	212
1.5.5 用对比试件法确定缺陷的 当量值	185	1.8.6 泄漏蓝姆波检测	213
1.5.6 缺陷长度的测量	187	1.9 超声测厚	214
1.5.7 背表面反射损失的评定	187	1.9.1 共振法	214
1.5.8 受检件纵波检测的质量 等级划分	188	1.9.2 脉冲反射法	215
1.5.9 双晶片纵波探头的运用	188	附录	218
1.5.10 纵波检测时试件侧边界 的影响	188	参考文献	223
1.5.11 水浸法检测	189		

第2章 材料的超声表征	224
2.1 概述	224
2.2 声速的测量	224
2.2.1 纵波速度的测量	224
2.2.2 横波速度的测量	226
2.2.3 瑞利波速度的测量	226
2.2.4 超声测角器	227
2.2.5 各向异性材料准纵波、 准横波速度的测量	228
2.3 涉及声速的应用示例	229
2.3.1 弹性常数的测定	229
2.3.2 各向异性的测量	230
2.3.3 陶瓷覆盖层的测量	230
2.3.4 晶粒尺寸的声速评定	230
2.4 声衰减的测量	232
2.4.1 方法	232
2.4.2 衰减值的给出	234
2.5 涉及声衰减的应用示例	234
2.6 非线性超声法	237
2.7 残余应力的检测	239
2.7.1 整体残余应力的检测	239
2.7.2 表面残余应力的检测	241
2.7.3 材料的各向异性问题	241
附录 弹性常数换算表	242
参考文献	242
第3章 声发射检测	244
3.1 概述	244
3.1.1 声发射技术概念	244
3.1.2 声发射技术的特点	244
3.1.3 发展过程	245
3.2 声发射技术基础	245
3.2.1 声发射源	245
3.2.2 波的传播	245
3.2.3 影响声发射特性的因素	248
3.2.4 凯塞效应和费利西蒂比	249
3.3 检测设备与信号处理	249
3.3.1 声发射传感器	249
3.3.2 电缆	251
3.3.3 信号调节	252

3.3.4 信号探测与处理	252
3.3.5 数据显示	254
3.3.6 声发射源定位	255
3.3.7 声发射检测系统	257
3.4 声发射检测技术	261
3.4.1 压力容器声发射检测 程序	261
3.4.2 设置与校准	262
3.4.3 传感器安装	263
3.4.4 加载程序	263
3.4.5 噪声来源与排除	264
3.4.6 数据解释与评价	265
3.4.7 声发射检测标准与规范	266
3.5 声发射检测应用	268
3.5.1 材料表征应用	268
3.5.2 结构件应用	268
参考文献	273

第4章 声-超声检测	275
4.1 概述	275
4.2 声-超声检测的技术基础	276
4.2.1 检测原理	276
4.2.2 信号表征	278
4.3 声-超声检测方法	280
4.3.1 工作频率	281
4.3.2 接收换能器	281
4.3.3 两换能器间的间距	281
4.3.4 换能器的接触压力	281
4.3.5 耦合剂	281
4.4 声-超声检测装置	281
4.5 声-超声检测技术应用示例	282
4.5.1 胶接结构检测	282
4.5.2 监测材料各向异性	287
参考文献	293

第5章 声振检测	294
5.1 概述	294
5.1.1 声振检测的技术基础	294
5.1.2 声振检测的分类	295
5.2 整体声振检测	296
5.2.1 整体人工敲击检测	296

5.2.2 单点激振单点测量	296	6.2.1 光学模拟声全息	358
5.2.3 多点激振多点测量	299	6.2.2 扫描声全息	366
5.2.4 振动分析	308	6.2.3 声全息系统比较	369
5.3 局部声振检测	323	6.2.4 声全息应用概况	369
5.3.1 局部人工敲击检测	323	参考文献	370
5.3.2 声阻法检测	327	第7章 声显微镜检测	371
5.3.3 声谐振检测	334	7.1 概述	371
5.3.4 定距发送/接收检测	344	7.2 激光扫描声显微镜检测	371
5.3.5 综合声学检测技术	347	7.2.1 工作原理	371
5.3.6 局部声振检测技术小结	347	7.2.2 检测前的考虑	372
参考文献	351	7.2.3 应用示例	372
第6章 声成像与声全息检测	352	7.3 扫描声显微镜	377
6.1 声成像	352	7.3.1 工作方式和基本原理	377
6.1.1 声成像基本原理	352	7.3.2 扫描声显微镜的构成	381
6.1.2 无损检测应用	356	7.3.3 应用示例	382
6.2 声全息检测	357	参考文献	387

第5篇 电学方法检测

第1章 涡流检测	391	热处理状态的确认	402
1.1 概述	391	1.5.2 缺陷的探测示例	406
1.2 涡流检测的物理基础	392	1.5.3 厚度的测定	408
1.2.1 金属的导电性	392	1.5.4 薄板和箔材的涡流检测——	
1.2.2 金属的磁特性	392	涡流检测的一个重要应用	410
1.2.3 电磁感应	392	1.6 棒材的穿过式线圈检测	412
1.2.4 集肤效应	393	1.6.1 分选	412
1.3 涡流检测中线圈的阻抗分析	394	1.6.2 缺陷的检测	413
1.3.1 线圈的阻抗和归一化	394	1.7 非磁性管材的穿过式线圈及	
1.3.2 放置式线圈的阻抗	395	内通过式线圈检测	414
1.3.3 带无限长导电圆棒的		1.7.1 薄壁管的检测	414
穿过式线圈的阻抗	396	1.7.2 厚壁管的检测	415
1.3.4 带管材的穿过式线圈		1.8 远场涡流检测	415
和内通过式线圈的情况	397	1.8.1 单激励线圈、单检测线圈	
1.4 用于涡流检测的主要电路	400	远场涡流检测	415
1.4.1 振荡器	400	1.8.2 单激励线圈多节检测线圈	
1.4.2 放大器	400	的配置	416
1.4.3 抑制电路	400	1.8.3 双激励线圈的运用	416
1.4.4 检出电路	400	1.9 多频涡流检测	417
1.4.5 信号显示	402	1.10 磁光涡流检测	418
1.5 放置线圈涡流检测的应用	402	1.10.1 原理	418
1.5.1 分选(混料的识辨)和		1.10.2 优点	418

1.10.3 应用示例	419	2.5 交流场测量 (ACFM) 技术	439
1.11 脉冲涡流检测	420	2.5.1 单探头的情况	439
附录 A	421	2.5.2 阵列探头的应用	440
附录 B	422	参考文献	440
附录 C	424	第 3 章 电流微扰检测	442
参考文献	425	3.1 概述	442
第 2 章 电位差和交流场检测	426	3.2 检测系统	442
2.1 概述	426	3.2.1 交流检测系统	442
2.2 直流电位差法测量裂纹深度	426	3.2.2 直流检测系统	443
2.2.1 基本原理	426	3.3 信号特征	443
2.2.2 单条、开裂面垂直于有限 厚试件表面的无限长裂纹 深度测量	427	3.4 应用示例	444
2.2.3 单条、开裂面垂直于无限 厚试件表面的有限长裂纹 深度测量	428	3.4.1 双层构件紧固件孔中底 层孔边裂纹的探测	444
2.2.4 倾斜裂纹的深度测量	429	3.4.2 钛合金空心主轴螺纹根部 疲劳裂纹的探测	446
2.2.5 多条裂纹的深度测量	430	3.4.3 叶片榫槽表面裂纹 的检查	447
2.2.6 直流电位差法的优缺点	431	参考文献	448
2.3 交流电位差法测裂纹深度	432	第 4 章 其他电学检测方法	449
2.3.1 交流电位差法的特点	432	4.1 带电粒子检测	449
2.3.2 电流集肤深度小、裂纹长 而深情况	432	4.1.1 带金属背衬的非导电 材料	449
2.3.3 电流集肤深度小、裂纹短 而深情况	432	4.1.2 不带金属背衬的非导电 材料	449
2.3.4 电流集肤深度大、不同裂 纹长、深比的情况	433	4.1.3 粉末特性和试验装置	449
2.3.5 裂纹倾斜的情况	434	4.2 电晕放电检测	450
2.3.6 附加信号	436	4.2.1 基本概念	450
2.3.7 交流电位差法的优缺点	437	4.2.2 检测技术	450
2.4 应用示例	437	4.2.3 作业	450
		4.3 外激电子发射	450
		参考文献	451

第 6 篇 磁学方法检测

第 1 章 磁粉检测	455	1.2.4 磁性材料的分类	456
1.1 概述	455	1.2.5 漏磁场与反磁场	456
1.2 磁粉检测基础知识	455	1.3 产生磁场的方法	457
1.2.1 磁场	455	1.3.1 电流法	457
1.2.2 磁感应强度	455	1.3.2 磁轭法	461
1.2.3 磁导率	456	1.3.3 复合磁化法	462

1.4 对磁场强度的要求	463	2.5 漏磁场检测信号处理	489
1.4.1 确定所需磁场强度时的考虑	463	2.6 漏磁场检测中缺陷的量化	
1.4.2 电流法	463	方法	491
1.4.3 磁轭法	465	2.6.1 裂纹宽度的量化	491
1.5 磁粉和磁悬液	465	2.6.2 深度的量化	492
1.5.1 磁粉	465	2.7 应用举例	494
1.5.2 磁悬液	466	2.7.1 管材的检测	494
1.5.3 磁粉的施加	467	2.7.2 地埋管线的检测	494
1.6 磁痕的判别和记录	469	2.7.3 钢丝绳的漏磁场检测	494
1.6.1 磁痕的判别	469	参考文献	495
1.6.2 磁痕的记录	470	第3章 Barkhausen 噪声检测	497
1.7 检测后的退磁和清理	470	3.1 检测原理	497
1.7.1 退磁	470	3.2 应力和显微组织的影响	498
1.7.2 清理	471	3.2.1 应力的影响	498
1.8 系统性能的控制	471	3.2.2 显微组织的影响	499
1.8.1 带缺陷试验件的利用	471	3.3 检测仪器介绍	500
1.8.2 磁粉检测装置的查核	473	3.3.1 传感器和前置放大器	500
1.8.3 磁粉性能的检定	473	3.3.2 激励电源	500
1.9 安全	474	3.3.3 模拟电路	501
1.9.1 使用材料时的安全	474	3.3.4 自动增益反馈电路	501
1.9.2 黑光源	475	3.3.5 信号处理和控制系统	501
1.9.3 电气设备	475	3.4 检测参数的选择	502
1.9.4 暗区适应	475	3.4.1 最佳磁场强度值的确定	502
1.10 应用示例	475	3.4.2 检测深度的选择	502
1.10.1 锻、铸件的检测	475	3.5 巴克豪森检测法的应用	504
1.10.2 焊缝的检测	476	3.5.1 应用范围	504
1.10.3 疲劳裂纹扩展的监测	476	3.5.2 残余应力检测	504
附录	477	3.5.3 显微组织缺陷的评估	506
参考文献	481	参考文献	508
第2章 漏磁场检测	483	第4章 磁声发射检测	509
2.1 概述	483	4.1 检测原理	509
2.2 磁化技术	484	4.1.1 磁声发射的产生	509
2.2.1 局部磁化和整体磁化	484	4.1.2 MAE 和磁致伸缩	509
2.2.2 交、直流磁化	484	4.2 应力的影响	510
2.3 缺陷的漏磁场	485	4.3 MAE 检测	510
2.3.1 漏磁场的实验测量	485	4.3.1 检测系统	510
2.3.2 漏磁场的理论计算	485	4.3.2 检测深度	511
2.3.3 各种因素对缺陷漏磁场的		4.4 应用示例	512
影响	487	4.4.1 残余应力的检测	512
2.4 漏磁场信号的获得	488	4.4.2 硬度的检测	512

4.4.3 热处理和冷加工	513	5.2 磁吸收检测	516
4.4.4 晶粒度的检测	513	5.2.1 基本概念	516
参考文献	513	5.2.2 应用示例	517
第5章 其他磁学检测方法	515	参考文献	519
5.1 核磁共振检测	515		

第7篇 微波与介电测量检测

第1章 微波检测	523	1.5.3 微波湿度分析	554
1.1 概述	523	1.5.4 金属应力腐蚀的微波测量 ..	554
1.1.1 微波	523	1.5.5 材料各向异性的微波测量 ..	556
1.1.2 微波检测技术的应用进展 ..	525	1.5.6 厚复合材料的无损评定	556
1.1.3 微波检测技术的特点	525	1.6 微波涡流检测技术	559
1.1.4 微波与超声波特性的比较 ..	526	1.6.1 铁磁共振涡流探头	564
1.1.5 微波的物理特性	527	1.6.2 涡流用于小半径的孔和 区域	567
1.2 微波检测机理	528	1.7 微波全息照相技术	567
1.2.1 微波检测的物理基础	528	1.7.1 同心圆绕射板	568
1.2.2 反射与折射	529	1.7.2 光全息照相	568
1.2.3 微波的吸收与色散	530	1.7.3 微波全息照相	568
1.2.4 驻波	531	1.7.4 应用示例	571
1.2.5 散射	531	1.7.5 检测仪器	572
1.2.6 各种检测原理比较	532	参考文献	574
1.3 微波检测技术	532	第2章 介电测量检测	576
1.3.1 穿透技术	533	2.1 概述	576
1.3.2 反射技术	533	2.2 技术基础	576
1.3.3 驻波技术	534	2.2.1 场的区分	576
1.4 微波检测装置	535	2.2.2 检测原理	577
1.4.1 微波无损检测器件	536	2.3 检测方法	579
1.4.2 检测装置分类	543	2.3.1 交流电桥法	579
1.4.3 测厚仪	545	2.3.2 谐振回路法	579
1.4.4 探伤仪	547	2.3.3 电容法	580
1.5 微波检测技术应用	553	2.4 介电测量固化监测	580
1.5.1 金属表面裂缝的微波检测 ..	553	参考文献	582
1.5.2 介电材料化学成分微波检测 ..	554		

第8篇 光学方法检测

第1章 目视检验	585	1.2.1 放大装置	585
1.1 概述	585	1.2.2 照明装置	586
1.2 放大镜检验	585	1.2.3 测量器具	586

1.2.4 记录	586	2.4 全息照相设备与器件	620
1.3 刚性内窥镜	586	2.4.1 激光器	620
1.4 柔性内窥镜	587	2.4.2 防振工作台	624
1.4.1 光导纤维的传光和传像	587	2.4.3 全息照相光学元件	624
1.4.2 柔性光纤内窥镜的构成	588	2.4.4 记录和再现像读出系统	626
1.4.3 光源	589	2.4.5 典型全息照相系统	629
1.5 柔性视频内窥镜	589	2.5 全息检测技术的应用	630
1.5.1 成像原理	589	2.5.1 全息检测技术的适用范围	630
1.5.2 优点	590	2.5.2 夹芯结构的脱粘检测	630
1.5.3 技术性能	590	2.5.3 叠层结构的脱粘检测	633
1.5.4 影子测量系统	591	2.5.4 金属工件裂纹检测	635
1.6 使用内窥镜检查的基本因素	593	2.5.5 涡轮与螺旋桨叶片的振动 分析	636
1.6.1 检查人员	593	2.5.6 用全息照相画等高线	638
1.6.2 试件	593	2.5.7 复合材料的表征	641
1.7 目视检验的应用	594	2.6 激光散斑干涉计量技术	642
1.7.1 内窥镜的应用	594	2.6.1 散斑现象	642
1.7.2 偏视技术的应用	594	2.6.2 散斑干涉原理	642
参考文献	595	2.6.3 散斑干涉定量分析	643
第2章 光全息术检测	596	2.6.4 散斑干涉技术的应用	645
2.1 光全息术检测的特点	596	参考文献	646
2.1.1 光全息术检测的优点与 局限性	596	第3章 错位散斑干涉	648
2.1.2 光全息术检测的应用	597	3.1 概述	648
2.2 光全息术检测的原理	598	3.2 与其他无损检测技术的比较	648
2.2.1 全息照相	598	3.3 错位散斑干涉原理	649
2.2.2 数学定量分析	599	3.3.1 错位照相	649
2.3 激光全息干涉计量技术	603	3.3.2 条纹解析	650
2.3.1 全息干涉计量技术的特点	603	3.3.3 相移技术	651
2.3.2 实时全息干涉计量技术	604	3.4 错位照相法设备	652
2.3.3 双曝光全息干涉计量技术	605	3.4.1 激光光源	652
2.3.4 时间平均全息干涉计 量技术	605	3.4.2 计算机数字图像处理系统	652
2.3.5 夹层全息干涉计量技术	607	3.4.3 加载装置	652
2.3.6 全息照相等高线绘制	607	3.4.4 光学头	653
2.3.7 全息干涉无损检测加载 方法	607	3.5 加载方法	653
2.3.8 检测程序	610	3.5.1 增压加载	653
2.3.9 检测参数的影响	612	3.5.2 局部真空加载	654
2.3.10 检测读出方法	615	3.5.3 热加载	654
2.3.11 检测结果判读	617	3.6 缺陷的识别与表征	654
		3.6.1 缺陷识别	654
		3.6.2 缺陷表征	654