



“十二五”国家重点出版规划  
精品项目

先进航空材料与技术丛书

# 航空材料与制件 无损检测技术新进展

New Progress in Non-destructive Testing  
of Aeronautical Material and Components

史亦韦 梁菁 何方成 著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



“十二五”国家重点出版规划  
精品项目

先进航空材料与技術丛书

# 航空材料与制件 无损检测技术新进展

史亦韦 梁菁 何方成 著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书介绍了航空材料与制件无损检测技术的发展历史与现状,重点介绍了近十年来在粉末高温合金盘件超声及涡流检测、变形钛合金材料无损检测、航空发动机叶片无损检测、复杂薄壁铸件无损检测、电子束焊接与钎焊接头超声检测、复合材料制件无损检测、高强钢超声与磁粉检测、无损检测设备与器材的研发和校准等领域取得的实用创新性科研成果。

本书可为从事无损检测技术研究、产品测试的人员提供借鉴,也可为航空产品的设计人员、生产人员和研发人员提供参考,还可作为航空院校教学人员的参考资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

航空材料与制件无损检测技术新进展/史亦伟,梁菁,  
何方成著. —北京:国防工业出版社,2012.4

(先进航空材料与技术丛书)

ISBN 978-7-118-08035-3

I. ①航... II. ①史... ②梁... ③何... III. ①航空  
材料—无损检验 IV. ①V250.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第058283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 26 $\frac{3}{4}$  字数 520千字

2012年4月第1版第1次印刷 印数 1—3000册 定价 68.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 序

一部人类文明史从某种意义上说就是一部使用和发展材料的历史。材料技术与信息技术、生物技术、能源技术一起被公认为是当今社会及今后相当长时间内总揽人类发展全局的技术,也是一个国家科技发展和经济建设最重要的物质基础。

航空工业领域从来就是先进材料技术展现风采、争奇斗艳的大舞台,自美国莱特兄弟的第一架飞机问世后的 100 多年以来,材料与飞机一直在相互推动不断发展,各种新材料的出现和热加工工艺、测试技术的进步,促进了新型飞机设计方案的实现,同时飞机的每一代结构重量系数的降低和寿命的延长,发动机推重比量级的每一次提高,无不强烈地依赖于材料科学技术的进步。“一代材料,一代飞机”就是对材料技术在航空工业发展中所起的先导性和基础性作用的真实写照。

回顾中国航空工业建立 60 周年的历程,我国航空材料经历了从无到有、从小到大的发展过程,也经历了从跟踪仿制、改进改型到自主创新研制的不同发展阶段。新世纪以来,航空材料科技工作者围绕国防,特别是航空先进装备的需求,通过国家各类基金和项目,开展了大量的先进航空材料应用基础和工程化研究,取得了许多关键性技术的突破和可喜的研究成果,《先进航空材料与技术丛书》就是这些创新

性成果的系统展示和总结。

本套丛书的编写是由北京航空材料研究院组织完成的。19个分册从先进航空材料设计与制造、加工成形工艺技术以及材料检测与评价技术三方面入手,使各分册相辅相成,从不同侧面丰富了这套丛书的整体,是一套较为全面系统的大型系列工程技术专著。丛书凝聚了北京航空材料研究院几代专家和科技人员的辛勤劳动和智慧,也是我国航空材料科技进步的结晶。

当前,我国航空工业正处于历史上难得的发展机遇期。应该看到,和国际航空材料先进水平相比,我们尚存在一定的差距。为此,国家提出“探索一代,预研一代,研制一代,生产一代”的划代发展思想,航空材料科学技术作为这四个“一代”发展的技术引领者和技术推动者,应该更加强化创新,超前部署,厚积薄发。衷心希望此套丛书的出版能成为我国航空材料技术进步的助推器。可以相信,随着国民经济的进一步发展,我国航空材料科学技术一定会迎来一个蓬勃发展的春天。



2011年3月

# 前 言

无损检测技术是产品质量控制中不可缺少的基础技术,由于其不破坏产品使用特性的特点,可直接针对各制造阶段和使用阶段的产品,对其缺陷、尺寸等质量特性进行检测与评价,因此,该技术成为保证产品完整性和可靠性的重要手段,产品无损检测成为产品质量控制的重要环节。尤其对于航空产品而言,其产品质量和可靠性关系到人身安全,关系到国家的国防能力建设,采用无损检测技术进行质量保障意义尤为突出。

随着飞机和发动机性能及安全性和可靠性要求的不断提高,各种新材料和新的制造技术被不断地开发和应用于航空产品的制造,也给无损检测技术不断带来新的课题。因此,针对新材料和新制件的无损检测技术研究是需求丰富和充满挑战的。

本书汇集了中国航空工业集团公司北京航空材料研究院近十年来在粉末高温合金盘件超声及涡流检测、变形钛合金材料无损检测、航空发动机叶片无损检测、复杂薄壁铸件检测、电子束焊接与钎焊接头超声检测、复合材料制件检测、高强度钢超声与磁粉检测等领域取得的实用创新成果和经验。

全书共分 10 章,第 1 章航空无损检测技术的发展,由史亦韦、梁菁、王倩妮、任学冬、王树志、王东升、刘颖韬、张于北等撰写;第 2 章粉末高温合金盘件无损检测技术研究与应用,由梁菁和王东升撰写;第 3 章变形钛合金材料无损检测方法,由史亦韦、梁菁、徐可北、何方成和韩波撰写;第 4 章航空发动机叶片无损检测技术,由徐可北、郭广平、韩波、任学冬、葛子亮、张于北和王倩妮撰写;第 5 章复杂薄壁铸件无损检测技术,由郭广平、周俊华、任学冬、杨党纲和王倩妮撰写;第 6 章特种焊接接头无损检测技术,由史亦韦、梁菁和王铮撰写;第 7 章复合材料制件无损检测技术,由何方成、郭广平、王铮、刘颖韬和张于北撰写;第 8 章高强度钢无损检测技术,由王树志、何方成和周俊华撰写;第 9 章超声检测器材的研

制和校准,由梁菁、韩波和史亦韦撰写;第 10 章超声检测系统的研制,由杨青和王东升撰写。史亦韦、梁菁和何方成负责全书的统稿和定稿。

在本书涉及的研究工作中,王自明、马震亚、孙凯、汪松、李硕宁、史丽军,凡丽梅和胡婷萍等也作出了重要的贡献,在此表示感谢。

鉴于本书内容涉及范围较广,且基于近十年来在无损检测技术领域的研究成果,技术上可能会存在一些问题,望读者不吝赐教与纠正。

作者

2011 年 11 月 12 日

# 目 录

<b>第 1 章 航空无损检测技术的发展</b> .....	1
1.1 航空无损检测技术的发展历史与现状 .....	1
1.1.1 早期的无损检测技术 .....	1
1.1.2 现代无损检测技术的发展 .....	3
1.1.3 我国航空无损检测技术的历史与发展 .....	5
1.2 主要无损检测方法的特点及在航空产品中的应用 .....	7
1.2.1 超声检测 .....	7
1.2.2 射线检测 .....	9
1.2.3 渗透检测 .....	12
1.2.4 磁粉检测 .....	12
1.2.5 涡流检测 .....	14
1.2.6 红外热像检测 .....	15
1.2.7 激光错位散斑检测 .....	16
1.3 无损检测技术的发展趋势 .....	17
参考文献 .....	19
<b>第 2 章 粉末高温合金盘件无损检测技术研究与应用</b> .....	21
2.1 概述 .....	21
2.1.1 粉末高温合金盘件制造工艺特点 .....	21
2.1.2 粉末高温合金盘件常见缺陷类型 .....	22
2.1.3 粉末高温合金盘件检测技术简介 .....	25
2.2 微夹杂缺陷的超声检测 .....	27
2.2.1 接触法检测 .....	28
2.2.2 多区聚焦检测 .....	29
2.2.3 超声相控阵动态聚焦检测 .....	35



2.2.4	夹杂缺陷的解剖分析 .....	42
2.3	致密性的无损评价 .....	45
2.3.1	声速测量方法 .....	46
2.3.2	微孔隙的超声反向散射表征 .....	47
2.3.3	实例 .....	48
2.4	涡流检测技术在粉末高温合金盘件检测中的应用 .....	50
2.4.1	航空发动机盘件涡流检测技术特点 .....	50
2.4.2	涡流自动成像检测系统的研制与应用 .....	53
2.4.3	涡流检测技术对粉末高温合金盘件缺陷检测能力的研究 .....	60
	参考文献 .....	63
<b>第3章</b>	<b>变形钛合金材料无损检测方法 .....</b>	<b>65</b>
3.1	变形钛合金材料的类型与检测方法概述 .....	65
3.1.1	变形钛合金材料的类型 .....	65
3.1.2	变形钛合金材料的主要缺陷 .....	66
3.1.3	变形钛合金材料常用无损检测方法 .....	66
3.1.4	变形钛合金材料无损检测的难点 .....	67
3.2	典型材料形式的检测技术与方法 .....	68
3.2.1	薄板兰姆波检测技术 .....	68
3.2.2	中厚板超声检测技术 .....	73
3.2.3	丝材涡流检测技术 .....	77
3.2.4	小直径棒材超声检测技术 .....	80
3.2.5	管材超声检测技术 .....	90
3.3	钛合金材料的组织结构对超声检测的影响 .....	96
3.3.1	钛合金材料的高低倍组织对超声检测噪声的影响 .....	96
3.3.2	不同超声检测技术在钛合金中噪声水平的差异 .....	104
3.3.3	提高超声检测信噪比的技术与方法 .....	110
	参考文献 .....	115
<b>第4章</b>	<b>航空发动机叶片无损检测技术 .....</b>	<b>117</b>
4.1	概述 .....	117
4.1.1	航空发动机叶片的类型 .....	117
4.1.2	航空发动机叶片常用无损检测方法及其特点 .....	118

4.2	航空发动机铸造空心叶片的超声波测厚技术 .....	120
4.2.1	空心叶片的超声测厚工艺研究 .....	120
4.2.2	空心叶片超声测厚影响因素分析 .....	122
4.2.3	单晶叶片的声学各向异性对超声测厚的影响 .....	126
4.3	航空发动机铸造空心叶片残留型芯的 X 射线检测 .....	131
4.4	航空发动机铸造叶片的渗透检测 .....	134
4.4.1	叶片渗透检测工艺研究 .....	134
4.4.2	渗透检测技术在某叶片检测中的典型应用 .....	135
4.5	工业 CT 在叶片检测中的应用 .....	143
4.5.1	叶片壁厚测量 .....	143
4.5.2	叶片常规检测的辅助方法 .....	146
4.6	航空发动机锻造叶片的检测技术 .....	147
4.6.1	航空发动机锻造叶片的超声检测技术 .....	147
4.6.2	航空发动机锻造叶片的射线检测技术 .....	149
	参考文献 .....	150
<b>第 5 章</b>	<b>复杂薄壁铸件无损检测技术 .....</b>	<b>152</b>
5.1	概述 .....	152
5.1.1	精密铸造技术在航空工业中的发展 .....	152
5.1.2	复杂薄壁铸件无损检测技术特点 .....	153
5.2	复杂薄壁精密铸件的射线检测技术 .....	155
5.2.1	检测工艺研究 .....	155
5.2.2	典型缺陷的检出和分析 .....	160
5.3	钛合金机匣铸件的渗透检测技术 .....	163
5.3.1	检测工艺研究 .....	163
5.3.2	典型缺陷的检出和分析 .....	168
5.4	射线检测计算机模拟技术 .....	170
5.4.1	射线检测计算机模拟的原理 .....	171
5.4.2	射线检测模拟软件的功能及特点 .....	172
5.4.3	模拟软件在精密铸件检测中的应用 .....	173
5.4.4	射线检测计算机模拟技术的发展趋势 .....	176
5.5	工业 CT 检测技术 .....	177
5.5.1	工业 CT 技术在复杂精密铸件无损检测中的应用 .....	178

5.5.2	加速器工业 CT 在大型铸件检测中的应用 .....	178
5.5.3	铝合金铸件工业 CT 检测及缺陷分级 .....	183
	参考文献 .....	186
<b>第 6 章</b>	<b>特种焊接接头无损检测技术 .....</b>	<b>188</b>
6.1	概述 .....	188
6.1.1	特种焊接技术分类及检测需求 .....	188
6.1.2	钎焊接头无损检测技术及特点 .....	190
6.1.3	电子束焊接头无损检测技术及特点 .....	190
6.2	钎焊接头无损检测技术研究 .....	191
6.2.1	多层钎焊接头超声成像技术 .....	191
6.2.2	钎焊接头的定量评价技术 .....	205
6.3	电子束焊接头无损检测技术研究 .....	209
6.3.1	大厚度电子束焊缝高灵敏度检测技术 .....	209
6.3.2	大厚度电子束焊缝缺陷的特点及无损检测方法 .....	218
	参考文献 .....	230
<b>第 7 章</b>	<b>复合材料制件无损检测技术 .....</b>	<b>232</b>
7.1	概述 .....	232
7.1.1	复合材料的类别及其结构、缺陷特点 .....	232
7.1.2	复合材料无损检测技术的选用 .....	233
7.1.3	复合材料无损检测技术的发展趋势 .....	239
7.2	碳纤维树脂基复合材料的超声检测 .....	240
7.2.1	常见碳纤维树脂基复合材料类型 .....	240
7.2.2	碳纤维树脂基复合材料中的主要缺陷 .....	240
7.2.3	常用复合材料超声检测标准 .....	241
7.2.4	碳纤维树脂基复合材料常用超声检测技术 .....	242
7.2.5	检测用对比试块 .....	242
7.2.6	影响检测结果的因素 .....	245
7.2.7	复杂结构制件超声检测方法 .....	250
7.2.8	孔隙率检测 .....	259
7.3	红外热像检测技术 .....	260
7.3.1	脱粘和分层缺陷的检测 .....	260
7.3.2	样件表面状态对检测的影响 .....	273

7.3.3	红外热像检测与超声检测的对比 .....	274
7.3.4	蜂窝夹层结构胶接面树脂堆积的检测 .....	277
7.3.5	蜂窝积水的检测 .....	280
7.3.6	吸波涂层脱粘缺陷的检测 .....	281
7.3.7	红外检测的工程应用研究 .....	282
7.4	激光错位散斑技术 .....	289
7.4.1	复合材料激光错位散斑检测的加载特点 .....	290
7.4.2	人工缺陷试验件的检测 .....	290
7.4.3	典型航空复合材料制件的检测 .....	300
7.5	C 夹层雷达罩无损检测技术研究 .....	304
7.5.1	概述 .....	304
7.5.2	雷达罩制造过程中的无损检测技术 .....	304
7.5.3	雷达罩的在役无损检测技术 .....	309
7.5.4	小结 .....	310
7.6	SiC 增强铝基复合材料的无损检测与评价 .....	311
7.6.1	SiC 增强铝基复合材料的无损检测特点 .....	311
7.6.2	SiC 增强铝基复合材料的超声检测 .....	311
7.6.3	SiC 颗粒分布的超声评价 .....	314
	参考文献 .....	322
<b>第 8 章</b>	<b>高强钢无损检测技术 .....</b>	<b>324</b>
8.1	大尺寸 A-100 钢棒材与制件的超声检测 .....	324
8.1.1	A-100 钢及制件主要缺陷特点 .....	324
8.1.2	A-100 钢的声特性 .....	324
8.1.3	大尺寸 A-100 钢棒材的超声检测 .....	324
8.1.4	大型复杂锻件的超声检测 .....	326
8.2	航空优质钢磁特性分析技术及应用 .....	328
8.2.1	磁滞回线测试系统研制 .....	328
8.2.2	磁特性测量技术在航空优质钢磁粉检测中的应用 .....	335
8.3	巴克豪森测试技术研究 .....	336
8.3.1	巴克豪森技术国内外发展状况 .....	336
8.3.2	残余应力巴克豪森法测量研究 .....	338
8.3.3	巴克豪森法检测铁磁性材料热损伤研究 .....	342

参考文献.....	345
<b>第9章 超声检测器材的研制和校准</b> .....	<b>347</b>
9.1 概述 .....	347
9.2 超声波试块的研制和校准 .....	348
9.2.1 超声波试块的制作及评价方法 .....	348
9.2.2 超声波试块的人工伤硅橡胶覆型检验方法研究 .....	357
9.2.3 超声波试块的距离幅度曲线测试方法研究 .....	358
9.3 超声波探头的校准 .....	361
9.3.1 国内外探头评价标准中涉及的探头类型 .....	362
9.3.2 探头评价参数.....	363
9.3.3 探头性能评价方法.....	367
9.3.4 频率特性测试的影响因素试验研究 .....	380
9.3.5 声场测试试验研究.....	386
参考文献.....	389
<b>第10章 超声检测系统的研制</b> .....	<b>391</b>
10.1 概述.....	391
10.2 水浸超声盘轴件检测系统.....	391
10.2.1 水浸超声盘轴件检测特点与系统设计.....	391
10.2.2 典型应用与试验结果 .....	397
10.3 喷水穿透法超声自动检测系统.....	402
10.3.1 问题提出 .....	402
10.3.2 喷水穿透法超声自动检测系统介绍 .....	403
10.4 超声叶片壁厚自动测量系统.....	409
10.4.1 空心叶片壁厚检测 .....	409
10.4.2 空心叶片壁厚自动测量系统 .....	411
10.4.3 测量重复性试验 .....	414

# 第 1 章 航空无损检测技术的发展

## 1.1 航空无损检测技术的发展历史与现状

航空无损检测技术领域包括了飞机(及发动机)部件、零件、原材料制造以及使用维修过程中用于发现材料和结构中的缺陷和异常状态,评价制造质量和损伤程度所采用的无损检测方法和技术。

由于航空产品的可靠性对于人身安全的高度相关性,以及材料和零件使用环境和载荷条件的极端苛刻,对其产品的完整性要求是极其严格的。而无损检测技术不破坏产品使用特性的特点,使其可直接针对各制造阶段和使用阶段的产品,对其缺陷、尺寸等质量特性进行检测与评价,因此,该技术成为保证航空产品完整性和可靠性的重要手段。无损检测技术的发展对航空技术的发展有着不可或缺的作用,而飞机和发动机性能及安全性和可靠性要求的不断提高,也给无损检测技术不断带来新的需求,促进着无损检测技术的发展。

### 1.1.1 早期的无损检测技术

世界上工业无损检测技术的应用大致始于 20 世纪 30 年代,在第二次世界大战期间,超声检测、射线检测、磁粉检测、渗透检测和涡流检测技术已在飞机制造过程中大量采用,其中最基本的检测原理和程序至今仍在使用。

利用超声波进行无损检测始于 20 世纪 30 年代。1929 年,苏联索科洛夫(Sokolov)首先提出了用超声波探查金属物体内部缺陷的建议,并发明了穿透法检测仪器。20 世纪 40 年代,美国的费尔斯通(Firestone)首次介绍了脉冲回波式超声检测仪并申请了该仪器的专利。利用该技术,超声波可从物体的一面发射并接收,且能够检测小缺陷,较准确地确定其位置及深度,评定其尺寸。20 世纪 60 年代,超声检测仪在灵敏度、分辨力和放大器线性等主要性能上取得了突破性进展。A 型脉冲回波式超声检测技术至今仍是使用最普遍的基本超声检测技术。

约从 1930 年起射线照相检测技术广泛应用于工业检测。迄今为止,射线检测一直是无损检测领域重要的检测手段之一。射线检测的基本原理是对于不同成分、密度、厚度的被检工件,射线产生的吸收或散射特性存在差异,由此判断被检工件的质量、尺寸、特性。射线检测技术自 1895 年伦琴发现 X 射线以来 100

多年的发展历程中, X 射线管从最初的冷阴极式克鲁克斯管到热阴极式康利吉管及高能 X 射线设备电子加速器;从 1896 年发现天然放射性元素到 20 世纪 50 年代研制出工业射线照相用的第一个人造放射同位素  $\gamma$  源  $^{182}\text{Ta}$ ; 图像存储介质从玻璃感光板到目前常用的非增感型胶片、成像板、线阵列探测器等;对于射线检测的评价也从仅考虑射线的穿透能力到注重射线检测影响质量,并在 1962 年前后建立了完整的、至今仍在指导常规射线照相检测技术的基本理论。

渗透检测是在不破坏被检材料或零件的前提下,能够检测其表面开口缺陷的无损检测方法之一,是航空产品质量检查的重要手段。利用铁锈检查裂纹,可以认为是它的初始阶段。即存放在外边的钢板,如果钢板表面存在裂纹,水渗入裂纹,形成了铁锈氧化物,裂纹上的铁锈比其他地方多。因此,利用铁锈的位置和分布状态,可以找出钢板上裂纹的位置和分布状态。“油—白”法是公认的最早应用的一种渗透检测方法,其步骤如下:首先将重油和煤油的混合液施加于被检件的表面,隔几分钟以后,将表面的油抹去,然后再涂以“酒精—白粉”的混合液,酒精挥发后,在存在裂纹的地方,裂纹中的油将被吸附到白色的涂层上,形成显示,这就是早期的渗透检测方法,它被广泛地应用于工业部门的检测中。从 20 世纪 30 年代到 40 年代初期,美国人斯威策对渗透液进行了大量试验,首先把着色染料加入到渗透液中去,增加了裂纹显示的颜色对比,使显示更加清晰。1941 年,斯威策将荧光染料加入到渗透液中,并采用显像粉显像,在黑光灯照射下检测裂纹,从而显著提高检测灵敏度,使渗透检测进入一个崭新的阶段。

磁粉检测是利用磁现象来检测工件中缺陷的方法。1918 年,美国人霍克提出可利用磁铁吸引铁屑这一人所共知的物理现象来进行检测。1928 年,美国人福里斯特(Forest)为解决油井钻杆断裂,研制出了周向磁化,使用了尺寸和形状受控的并具有磁性的磁粉,获得了可靠的检测结果。1934 年,生产磁粉检测设备和材料的美国磁通公司创立,固定式磁粉探伤设备问世。1941 年荧光磁粉投入使用。苏联航空材料研究院的学者瑞加德罗,毕生致力于磁粉检测的试验、研究和发展工作,为磁粉检测做出了卓越的贡献。20 世纪 50 年代初期,他系统地研究了各种因素对探伤灵敏度的影响,在大量试验的基础上,制定出了磁化规范,被世界许多国家认可并采用,我国各工业部门的磁粉检测也大都以此为依据。

涡流检测是一种适用于导电制件的非接触耦合的高效无损检测方法,它以电磁理论为基础,可用于了解材料表面、近表面缺陷情况,或者是材料的特性。涡流检测技术的发展最早可追溯至 1879 年,当时休斯(Hughes)首先将涡流检测用于金属、合金的材质分选。随后,在 1926 年,第一台涡流测厚仪问世。1935 年—1945 年第二次世界大战期间,各工业部门的快速发展又促进一大批各种形式的涡流探伤仪器和材质分选装置问世,并较多地应用于航空及军工企业的检

验部门,而当时,由于还没有从理论或实验研究中成功解决涡流检测中各种干扰因素的处理问题,使涡流检测的应用范围受到很大限制。直到 20 世纪 50 年代初期,德国的福斯特提出阻抗分析理论,才使涡流检测技术在理论和实践上得到完善,并真正在全世界范围内得到推广和发展。

### 1.1.2 现代无损检测技术的发展

随着对飞机的性能、寿命、可靠性和安全性要求的不断提高,大量新材料不断投入应用,飞行安全问题也引起人们越来越大的关注,要求检测出金属材料中更小的缺陷,对新型材料的缺陷和内部结构要求更准确的描述,同时,维修维护中的检测要求有更快速的以及更适于原位检测的技术。这些要求,促进了工业 CT、红外热像、声发射等新的无损检测技术的发展与应用,同时,电子与信息技术的发展给无损检测技术也带来了巨大的变革,检测设备的自动化、可视化、智能化程度不断提高。

在超声检测领域,以 A 型显示手工操作为主的检测方式不再能够满足要求。20 世纪 70 年代以来,对于规则的板、棒类等大批量生产的产品,逐渐发展了自动检测系统,配备了自动报警、记录等装置,发展了 B 型显示和 C 型显示;近年来,超声相控阵、TOFD 等新技术的开发和应用,极大地提升了超声检测技术的检测能力,超声检测的优势得到很好发挥,应用领域得到进一步扩展。与此同时,对缺陷的定性定量评价的研究得到了较大的发展,利用超声波技术进行材料特性评价也成为了重要的研究方向。随着电子技术和计算机技术的发展,超声检测设备不断向小型化、智能化方向改进,形成了适应不同用途的多种超声检测仪器,并于 20 世纪 80 年代末出现了数字式超声仪器。近年来,数字式仪器已日益成熟,已逐渐取代模拟式仪器成为主流产品。

对于工业应用,射线检测技术已经形成了一个完整的技术系统,分为:射线照相检测技术、射线实时成像检测技术、射线层析检测技术(含工业 CT 技术)和辐射测量技术四类。在航空无损检测领域中,目前使用最广泛的射线检测方法仍是采用胶片的 X 射线照相检测技术,这是因为航空产品对于零件质量要求特别高,而在成像质量上,特别对于小缺陷的检测,胶片图像质量要优于非胶片射线照相检测技术和射线实时成像检测技术;此外航空零件往往形状较为复杂,如大型整体复杂精密铸件,需要进行小透照区、多角度、多次透照,为了胶片与零件更好的贴合,往往需要使用特制的胶片,数字射线技术难以满足。近年来,随着数字射线技术的快速发展,Snecma 公司将 CR 技术应用于透照方式较为简单的航空发动机叶片检测,并建立了完善的 CR 检测标准及验收标准体系,在批量生产中使用可以大大提高效率、节省成本。射线实时成像检测技术几乎与胶片射



线照相技术同时发展,在海关、汽车行业、压力容器行业得到了较多应用,受其成像质量水平的限制,目前在航空行业中应用较少,成功实例是用于检测碳纤维增强塑料层板、蜂窝夹层结构等复合材料制件中芯格变形、裂纹、孔洞等缺陷。

工业 CT 技术产生于 20 世纪 70 年代,该技术可通过投影重建算法获得零件截面图像,其检测过程不受零件材料、形状的限制,得到的断层图像不受其他区域干扰,可对缺陷定性、定位、定量,结果直观。但是由于工业 CT 系统一次投入成本高,检测周期较长;用于内部缺陷检测时,灵敏度低于胶片检测,且传统射线工业 CT(最高电压 450kV)难以穿透大型零件,需要使用高能电子加速器作为射线源等原因,限制了工业 CT 技术在航空领域的应用。目前在航空行业中工业 CT 多用于精密铸造的发动机叶片尺寸测量、小型零件内部缺陷检测,并尝试用于检测大型零件射线照相检测盲区及逆向工程等。

由于航空产品对表面缺陷的控制要求高,渗透检测技术在航空工业领域不断得到发展和提高,出现了各种手动、半自动、全自动生产线,静电喷涂生产线,研究不同的渗透液施加方式和显像方式的灵敏度和控制要求,在预清洗、施加渗透液、去除渗透液、显像及检验的各个环节,严格控制操作规范,以保证缺陷得到显现。出于环境保护的要求,还发展了荧光渗透液废水处理技术。

随着机械、电子等技术发展,磁粉检测设备逐渐向自动化方向发展,出现了钢管等自动磁粉检测流水线。由于航空领域不断推出新型钢种,材料磁特性多样复杂,这就要求在制定磁化规范标准等方面开展研究,丰富完善方法标准。对于磁粉检测中观察不到部位,目前普遍采用内窥镜等辅助观察手段,使零件 100% 检测成为了可能。磁粉检测以观察磁痕为前提,而飞机上某些部位却难直接观察到,为解决这类难题,美国 Convair 航空公司在 20 世纪 70 年代,首创了磁橡胶探伤法(MRI)。该法系将磁粉弥散于室温硫化硅橡胶中,加入固化剂后倒入经适当围堵的受检部位。磁化零件在缺陷漏磁场的作用下,磁粉在橡胶液内迁移和排列。取出固化的橡胶,即可获得一个重现缺陷的铸件,可进行磁痕观察。

在涡流检测领域,人们在理论和实践方面不断努力,使涡流检测技术及设备发展到实用阶段,目前其适用领域涵盖金属等导电制件缺陷检测、电导率测量与材质分选、覆盖层厚度测量等多个方面,成为主要的无损检测方法之一。近年来,随着电子技术和计算机技术的飞速发展,在传统涡流检测理论上,脉冲涡流、远场涡流、阵列涡流、扫频涡流、自动成像检测等新的涡流检测技术不断被开发和应用,使涡流检测技术呈现出应用范围继续扩大的趋势。

红外热像检测,是基于红外辐射原理,通过扫描记录或观察被检测工件表面上由于缺陷所引起的温度变化来检测表面和近表面缺陷的无损检测方法。红外