



“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

失效分析新技术

Modern Failure
Analysis Techniques

陶春虎 何玉怀 刘新灵 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

先进航空材料与技术丛书

失效分析新技术

陶春虎 何玉怀 刘新灵 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书简要介绍了失效分析的历史发展,重点介绍了近十年来在材料与结构的损伤行为与损伤的磁记忆检测、新材料损伤断裂特征识别、结构的安全和寿命评估、计算机辅助失效分析、断口定量反推裂纹扩展寿命和应力分析技术、结构件的失效分析、材料和结构的原始疲劳质量评估、金属结构材料的温色特征、高分子材料和复合材料的失效分析等领域取得的创新性科研成果。

本书可供从事失效分析的科技人员以及从事断裂力学、材料研制、可靠性等方面研究的教师、研究生和工程技术人员作为参考。

图书在版编目(CIP)数据

失效分析新技术 / 陶春虎,何玉怀,刘新灵著. —北京:
国防工业出版社,2011.5

(先进航空材料与技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 118 - 07391 - 1

I. ①失... II. ①陶...②何...③刘... III. ①失效
分析 IV. ①TB114.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 051602 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 插页 2 印张 21½ 字数 405 千字

2011 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 58.00 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

《先进航空材料与技术丛书》

编 委 会

主 任 戴圣龙

副主任 王亚军 益小苏

顾 问 颜鸣皋 曹春晓 赵振业

委 员 (按姓氏笔划为序)

丁鹤雁 王志刚 王惠良 王景鹤

刘 嘉 刘大博 阮中慈 苏 彬

李 莉 李宏运 连建民 吴学仁

张庆玲 张国庆 陆 峰 陈大明

陈祥宝 周利珊 赵希宏 贾泮江

郭 灵 唐 斌 唐定中 陶春虎

黄 旭 黄 敏 韩雅芳 蹇西昌

廖子龙 熊华平 颜 悦

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。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '李锐' (Li Rui), written in a cursive style.

2011 年 3 月

前 言

产品的失效不仅会造成巨大的经济损失,在很多情况下还会造成重大的人员伤亡,造成巨大的政治和社会影响。因此,判断产品的失效模式,查找产品失效的机理和原因,提出预防再失效的技术和管理对策,具有重大的政治和社会意义。

失效分析是全面质量管理必不可少的重要环节,是可靠性工程的重要技术基础,安全工程的重要技术保证,维修工程的理论基础和指导依据,是科技进步的强大推动力,也是社会主义市场经济条件下用户手中最强有力的武器,具有巨大的经济效益和社会效益。

本书简要介绍了中航工业失效分析中心近十年来在失效分析发展、材料与结构的损伤行为与损伤检测、新材料损伤断裂特征识别、安全评估、计算机辅助失效分析、断口定量反推技术、结构件失效分析、结构材料的温色特征、高分子材料和复合材料失效分析领域取得的创新性成果。

全书共分10章,第1章由陶春虎和何玉怀撰写,第2章由刘昌奎和陈星撰写,第3章由刘新灵、白明远、马海全和林涛撰写,第4章由刘新灵和胡春燕撰写,第5章由刘新灵、陈星、陶春虎撰写;第6章由张兵、姜涛和于洋撰写,第7章、第8章由范金娟和侯学勤撰写,第9章由缪宏博和刘高扬撰写,第10章由刘新灵、刘昌奎、白明远、范映伟、刘德林和李莹撰写。刘新灵负责全书的统稿,胡春燕负责全书的文字和图表编辑,陶春虎和何玉怀负责全书的审定。

鉴于本书内容涉及范围较广,且基于近十年来在失效分析领域新颖实用的研究成果,技术上可能会存在一些问题,望读者不吝赐教。

编审委员会

2010年12月



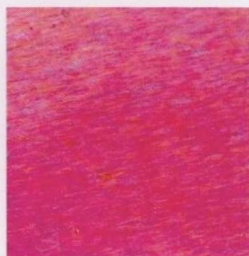
400 ℃ ×10min

RGB 值:176-165-152



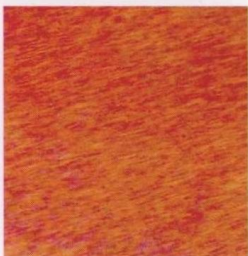
600 ℃ ×20min

RGB 值: 206-159-77



600 ℃ ×60min

RGB 值:234-127-163



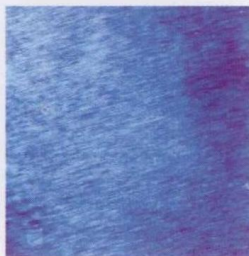
650 ℃ ×10min

RGB 值: 215-131-78



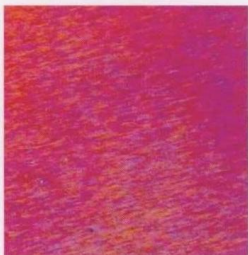
650 ℃ ×20min

RGB 值:210-112-187



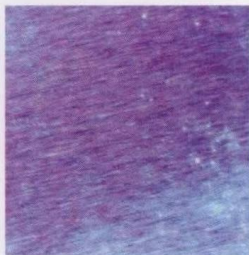
650 ℃ ×60min

RGB 值: 95-164-240



700 ℃ ×10min

RGB 值: 209-119-150



700 ℃ ×20min

RGB 值:144-128-251



700 ℃ ×60min

RGB 值:107-181-244



750 ℃ ×10min

RGB 值:95-155-248



800 ℃ ×60min

RGB 值:136-170-191



850 ℃ ×60min

RGB 值:141-137-132

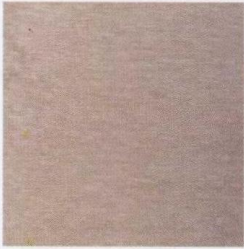
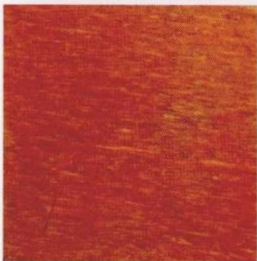
		
900 °C ×10min RGB 值: 163 -163 -163	900 °C ×60min RGB 值: 163 -163 -167	1200 °C ×60min RGB 值: 177 -175 -171

图 9-2 GH4169 合金温色特征

		
300 °C ×10min RGB 值: 188 -176 -163	450 °C ×20min RGB 值: 192 -177 -158	550 °C ×60min RGB 值: 193 -126 -84
		
600 °C ×10min RGB 值: 208 -165 -80	600 °C ×20min RGB 值: 187 -104 -113	600 °C ×60min RGB 值: 122 -160 -226
		
650 °C ×10min RGB 值: 167 -182 -181	650 °C ×20min RGB 值: 161 -175 -152	650 °C ×60min RGB 值: 205 -208 -200

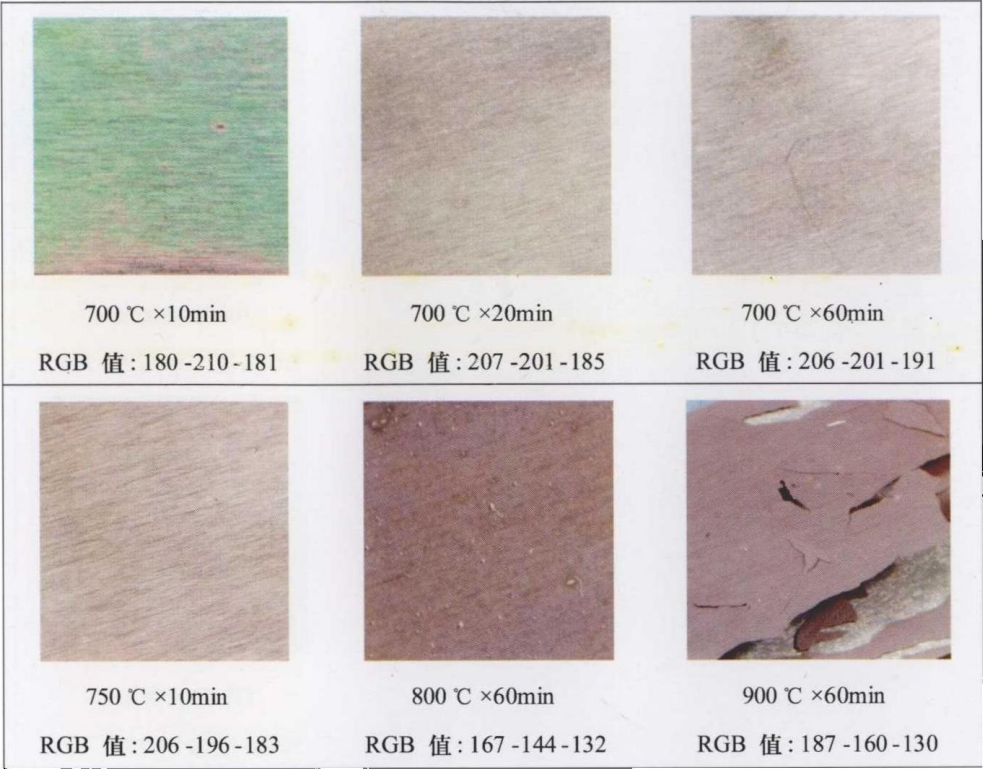


图 9-3 TC4 合金温色特征



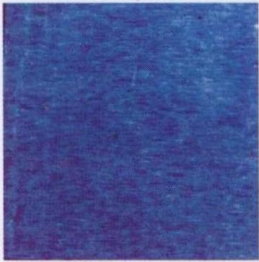
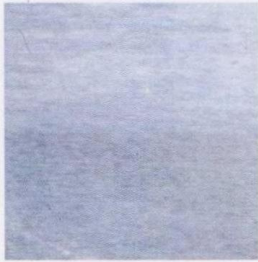
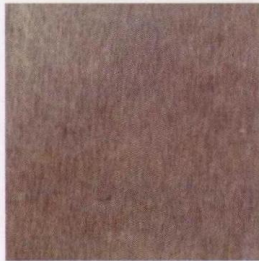
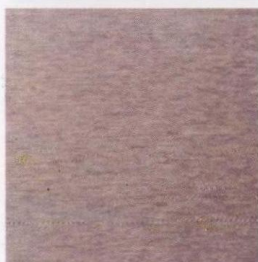
		
700 °C × 10min RGB 值: 130 -134 -192	700 °C × 20min RGB 值: 100 -127 -189	700 °C × 60min RGB 值: 180 -195 -214
		
750 °C × 10min RGB 值: 163 -190 -234	750 °C × 20min RGB 值: 125 -145 -171	750 °C × 60min RGB 值: 143 -137 -147
		
800 °C × 10min RGB 值: 83 -134 -180	800 °C × 20min RGB 值: 142 -132 -119	800 °C × 60min RGB 值: 131 -124 -121
		
850 °C × 10min RGB 值: 147 -134 -127	1100 °C × 60min RGB 值: 110 -107 -104	1200 °C × 20min RGB 值: 115 -120 -133

图 9-4 1Cr17Ni3 合金温色特征

由于印刷原因, 各图片实际效果与 RGB 值之间可能略有差异。真实颜色以 RGB 值为准。

目 录

第 1 章 失效分析的发展	1
1.1 失效分析的发展历史	1
1.1.1 古代失效分析	1
1.1.2 近代失效分析	2
1.1.3 现代失效分析	3
1.2 现代失效分析在中国的发展	3
1.3 现代失效分析的发展方向	5
1.4 失效分析的主要分支学科	8
1.5 失效分析与材料等相关学科的关系	9
参考文献	11
第 2 章 铁磁材料损伤的金属磁记忆检测与评估	13
2.1 磁记忆检测技术	13
2.1.1 磁记忆检测技术基本原理	13
2.1.2 应力作用下的磁畴形貌变化	14
2.2 静载拉伸损伤的磁记忆技术表征	17
2.2.1 光滑试件损伤行为表征	17
2.2.2 缺口试件损伤行为表征	22
2.2.3 在线和离线检测对磁信号的影响	26
2.3 疲劳损伤的磁记忆技术表征	28
2.3.1 低周疲劳损伤表征	28
2.3.2 高周疲劳损伤表征	35
2.3.3 磁记忆检测定量表征模型	39
2.4 金属磁记忆检测系统的应用	45
2.4.1 传动齿轮轴磁记忆检测	45
2.4.2 锥齿轮轴磁记忆检测	49
2.4.3 动力输入齿轮轴磁记忆检测	52
参考文献	54

第3章 安全评估与寿命预测	55
3.1 安全评估与寿命预测的基本方法	55
3.1.1 安全评估与寿命预测的内涵	55
3.1.2 材料性能的评估	56
3.1.3 构件的安全评估	58
3.1.4 系统的安全评估	61
3.1.5 寿命预测	65
3.1.6 计算机模拟在安全评估与寿命预测中的应用	68
3.2 原始疲劳质量评定	69
3.2.1 原始疲劳质量的内涵与应用	70
3.2.2 结构细节原始疲劳质量的评估	71
3.2.3 材料原始疲劳质量评估	75
3.2.4 原始疲劳质量评估的影响因素	76
3.3 寿命加速试验评估方法	78
3.3.1 寿命加速试验	78
3.3.2 加速试验损伤退化模型	81
3.3.3 基于加速试验的寿命可靠性评估方法	83
3.3.4 弹簧应力松弛加速试验及其可靠性评估	84
3.3.5 胶接结构加速试验和贮存寿命可靠性评估	89
参考文献	96
第4章 计算机辅助失效分析	97
4.1 计算机专家系统	97
4.1.1 专家系统的基本概念	97
4.1.2 专家系统的发展和应用	97
4.2 失效分析领域知识获取和表达	100
4.2.1 失效分析领域知识特点分析	100
4.2.2 失效分析知识表达方式的确定	100
4.3 失效分析专家系统模型构建	102
4.4 失效分析专家系统数据库	104
4.4.1 案例库	105
4.4.2 字典库	107
4.4.3 规则库	109
4.4.4 全文案例管理子系统	110
4.4.5 数据挖掘知识获取	111
4.5 智能推理	115

4.5.1	规则推理	115
4.5.2	类比推理	117
4.6	系统集成与应用举例	123
4.6.1	系统集成	123
4.6.2	系统使用	125
	参考文献	128
第5章	疲劳断口定量分析	129
5.1	断口定量分析的作用	129
5.1.1	疲劳断口定量分析的内涵	129
5.1.2	疲劳断口定量分析的作用	130
5.2	疲劳断口定量分析技术	131
5.2.1	疲劳断口定量分析的断裂特征	132
5.2.2	疲劳断口定量分析的常用模型	135
5.2.3	疲劳断口定量分析的影响因素	143
5.3	断口定量反推疲劳扩展寿命	145
5.3.1	载荷类型与断裂特征的对应关系	145
5.3.2	断口反推疲劳扩展寿命的基本过程	148
5.3.3	断口反推疲劳扩展寿命的应用	149
5.4	断口反推疲劳应力	153
5.4.1	参数的确定方法	153
5.4.2	断口反推疲劳应力的基本过程	154
5.4.3	断口定量分析叶片振动应力	155
	参考文献	159
第6章	定向凝固与单晶高温合金的再结晶及其控制	161
6.1	金属再结晶	161
6.1.1	回复与再结晶	161
6.1.2	动态回复和动态再结晶	162
6.2	定向凝固与单晶高温合金再结晶的基本特点	163
6.3	定向凝固与单晶高温合金再结晶的主要影响因素	165
6.3.1	热处理条件对再结晶的影响	165
6.3.2	变形条件对再结晶的影响	170
6.4	再结晶对定向凝固与单晶高温合金性能的影响	174
6.4.1	再结晶对定向凝固和单晶合金持久性能的影响	174
6.4.2	再结晶对定向凝固和单晶合金疲劳性能的影响	181
6.4.3	含再结晶层叶片的疲劳断裂	186

6.5	定向凝固与单晶高温合金的动态再结晶	188
6.5.1	定向凝固合金的动态再结晶	189
6.5.2	单晶高温合金的动态再结晶	191
6.5.3	动态再结晶的基本形态	193
6.5.4	动态再结晶的控制	196
6.6	定向凝固与单晶高温合金再结晶的检测与控制	196
6.6.1	再结晶的检测	196
6.6.2	再结晶的工艺控制	198
6.6.3	再结晶的工艺控制标准	199
6.7	定向凝固合金的喷丸强化与再结晶	199
6.7.1	定向合金喷丸强化的特点与应用	199
6.7.2	喷丸对定向合金高周疲劳性能的影响	201
6.7.3	定向合金喷丸的强化因素与再结晶	203
	参考文献	209
第7章	高分子材料的失效行为	210
7.1	高分子材料的失效机理	210
7.1.1	高分子材料的基本特性	210
7.1.2	失效机理	211
7.2	橡胶密封件失效	220
7.2.1	橡胶密封件的常见失效形式与特点	220
7.2.2	影响橡胶密封件失效的主要因素	221
7.3	有机玻璃制件失效	224
7.3.1	有机玻璃制件的常见失效形式与特点	224
7.3.2	影响有机玻璃制件失效的主要因素	225
	参考文献	225
第8章	复合材料损伤与失效	226
8.1	复合材料的失效分析	226
8.1.1	复合材料失效分析程序	226
8.1.2	常用的失效分析方法	227
8.2	复合材料的缺陷与损伤	233
8.2.1	常见缺陷	233
8.2.2	冲击损伤	237
8.3	复合材料的失效特征	240
8.3.1	拉伸	240
8.3.2	压缩	243
8.3.3	弯曲	245

8.3.4 剪切	247
8.4 复合材料在湿热环境下的损伤与失效	248
8.4.1 湿热环境下的损伤与失效机理	248
8.4.2 湿热环境对材料性能的影响	253
8.5 复合材料构件失效因素	255
8.5.1 设计因素	255
8.5.2 工艺原因	258
8.5.3 无损检测	259
8.5.4 使用维护	259
8.5.5 沟通与合作	259
8.5.6 复合材料失效的认识不够	260
参考文献	260
第9章 结构材料的温色特征	262
9.1 结构材料的温色特征及其鉴别方法	262
9.2 典型结构材料温色特征	265
9.2.1 常用高温合金温色特征	265
9.2.2 常用钛合金温色特征	265
9.2.3 常用结构钢温色特征	266
9.3 结构材料温色图谱	267
参考文献	267
第10章 新型关键结构材料的损伤行为	269
10.1 典型结构材料的断裂特征与断口图谱	269
10.1.1 断口图谱的研究方法	269
10.1.2 典型结构材料的断口图谱	275
10.2 钛合金损伤	281
10.2.1 钛及钛合金	281
10.2.2 钛合金的疲劳损伤	284
10.2.3 钛合金的环境损伤	294
10.2.4 钛合金的磨损损伤	300
10.2.5 钛合金的表面污染	301
10.3 粉末高温合金的损伤	303
10.3.1 粉末高温合金及其缺陷	303
10.3.2 粉末高温合金及其构件的断裂特征	309
10.3.3 粉末高温合金的疲劳行为	315
10.3.4 粉末高温合金及其结构的寿命预测方法	321
参考文献	330

第1章 失效分析的发展

失效分析是判断产品的失效模式,查找产品失效机理和原因,提出预防再失效对策的技术活动和管理活动。失效分析的主要内容包括明确分析对象,确定失效模式,研究失效机理,判定失效原因,提出预防措施(包括设计改进)。

失效分析是全面质量管理必不可少的重要环节,是可靠性工程重要技术基础,安全工程的重要技术保证,维修工程的理论基础和指导依据,多寿命周期的重要技术和理论支撑,科技进步的强大推动力,也是市场经济条件下用户手中最强有力的武器,具有巨大的经济效益和社会效益。

1.1 失效分析的发展历史

研究表明,失效分析的发展历程,大体经历了与简单手工生产基础相适应的古代失效分析、以大机器工业为基础的近代失效分析和以系统理论为指导的现代失效分析三个重要的历史阶段^[1-3]。

1.1.1 古代失效分析

公元前 2025 年巴比伦国王撰写的汉莫拉比法律大典是目前所能考证的有史记载的最早有关产品质量的法律文件,它在人类历史上明确规定对制造有缺陷产品的工匠进行严厉制裁。

“如果一个建筑师为别人建造了一栋质量不坚固的房子,由于房子倒塌而导致房东死亡,那么建筑师将被处死。如果房子倒塌而导致房东的儿子死亡,那么建筑师的儿子将被处死赔罪。如果房子因不坚固而被损坏,那么建筑师必须自己出资为房东修复或重建”^[4]。

这在今天的文明社会是不能予以实施的。即使在当时,生产力的落后和商品供不应求使得罗马法律肯定了商品出门概不退换的总原则。对产品质量的辨认只能靠零星、分散、宏观的经验世代相传。这一与简单手工生产基础相适应的古代失效分析阶段一直持续到两百年前开始的工业革命。

断口形貌学作为研究断口技术的名词尽管在 1944 年才由 Carl A. Zapffe 所定义^[5],但在古代失效分析阶段,人们用断口特征来研究金属材料的质量仍然取得了很大的进展^[6,7]。