



国防科技图书出版基金



航空用钛合金的 失效及其预防(第2版)

Failure and Prevention of
Aeronautical Titanium Alloy

陶春虎 刘庆琰 刘昌奎 曹春晓 张卫方 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

航空用钛合金的失效及其预防

Failure and Prevention of Aeronautical Titanium Alloy

(第2版)

陶春虎 刘庆琰 刘昌奎 曹春晓 张卫方 编著

国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

航空用钛合金的失效及其预防 / 陶春虎等编著. —2 版.

—北京: 国防工业出版社, 2013. 10

ISBN 978-7-118-08965-3

I. ①航... II. ①陶... III. ①航空材料—钛合金—失效
分析 IV. ①V252. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 152120 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 × 1000 1/16 插图 2 印张 15 3/4 字数 314 千字

2013 年 10 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—2000 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

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的

效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	王 峰			
副主任委员	吴有生	蔡 镛	杨崇新	
秘 书 长	杨崇新			
副 秘 书 长	邢海鹰	贺 明		
委 员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	陆 军	芮筱亭
	李言荣	李德仁	李德毅	杨 伟
	肖志力	吴宏鑫	张文栋	张信威
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

20 世纪 90 年代中期,相继发生了几起钛合金零部件在服役条件和试车过程中的失效,且暴露出一系列共性的问题。这些现象引起了人们的高度重视,认识到必须尽快就钛合金失效特征及模式,尤其是试车和使用过程中出现的失效,包括在制造过程中常见的缺陷及其预防措施进行收集、归纳、总结,填补目前在该领域的空白,以免在今后钛合金使用过程中出现失效时束手无策。基于此,本书第 1 版于 2002 年 9 月出版,填补了国内没有关于钛合金失效分析及其预防方面专著的空白。第 1 版在简要介绍钛及其合金金属学基础以及组织性能关系的基础上,着重介绍了钛合金及其零部件的失效特征、模式、机理及其预防;介绍了钛合金零部件在制造过程中的常见缺陷及其形成机理、检测及其预防技术;同时介绍了钛合金的缺陷敏感性及其损伤容限,也突出了提高钛合金加工质量和表面完整性的新颖的强化技术与方法。

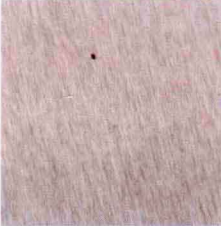
经过近 10 年的发展,钛合金在我国发展十分迅速,包括 TA15、TA16、TB3、TB6、TC18、TC21、Ti60 等各类钛合金材料新牌号得到大力的研制,并且在各行业的应用范围也大大增加,特别是在航空领域,不仅发动机压气机叶片、盘和风扇叶片以及机匣等广泛采用了钛合金材料,而且飞机结构中采用钛合金结构件,包括钛合金焊接结构件也越来越广泛,如作为飞机加强框和尾梁等。目前广泛应用的还有钛合金紧固件、钛合金管材等。第 1 版中,较多的内容是针对发动机用钛合金材料与构件,特别是在失效现象和模式等方面。随着科学技术不断发展,新的钛合金材料和结构在工程上得以不断应用,其失效特征以及在新的使用环境下的失效行为有了一些新的现象和模式。本次修订增加了近 10 年来钛合金的一些新的失效现象和模式,特别是结构用钛合金材料与构件的失效,以及与钛合金材料损伤相关的一些新的研究成果。增加的内容主要包括:钛合金焊接接头的疲劳断裂行为及其基本特征,以及原始疲劳质量的计算模型、影响因素;钛合金温色对比的基本理论,以及相关的研究成果,并给出了 TC4 钛合金温色变化规律与特征;钛合金超高周疲劳行为;钛合金高周疲劳断裂新现象;钛合金气蚀损伤、失效特征与判据;钛合金的铜脆和银脆、钛合金应力腐蚀失效新现象;表面强化对钛合金疲劳性能的影响规律、残余应力变化及其对疲劳性能的影响规律,表面强化后疲劳断裂特征;增加

了新发现的金属和非金属夹杂缺陷分析及图片;钛合金锻造折叠缺陷失效判据,特别是钛合金紧固件锻造折叠和脆性断裂;钛合金超温对性能影响;钛合金的氮污染;钛合金钛火失效;钛合金富氧层疲劳开裂现象和断裂特征等。

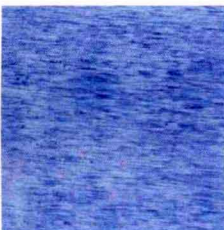
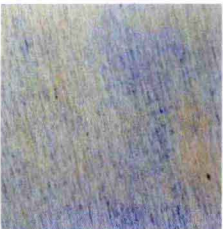
本书修订部分主要由陶春虎、刘昌奎、缪宏博、刘新灵、李莹撰稿,北京航空材料研究院的何玉怀、刘德林、陈星、刘高扬、张兵等提供了大量的资料和图片。中国工程院徐滨士院士和钟群鹏院士对本书给了很高的评价。作者向为本书修订出版作出贡献的所有老前辈和科技工作者致以衷心的感谢。作者也衷心感谢范金娟、姜涛、刘丽玉、赵文侠、郑真、孔焕平等中国航空工业集团公司失效分析中心的一批年轻技术骨干为本书修订出版付出的辛勤劳动。

本书共分为六章,全书由陶春虎研究员负责统稿,曹春晓院士负责全书的内容审定。由于作者水平的限制,本书的不足在所难免,恳请读者提出批评指正。愿本书的出版能为我国钛合金更广泛地安全应用提供一点帮助。

作者
2013 年 3 月

加热温度 /℃	加热时间/min		
	10	20	60
300	 RGB 值: 188 - 176 - 163	 RGB 值: 184 - 173 - 162	 RGB 值: 188 - 176 - 162
350	 RGB 值: 184 - 172 - 160	 RGB 值: 186 - 171 - 155	 RGB 值: 187 - 171 - 150
400	 RGB 值: 187 - 176 - 164	 RGB 值: 195 - 180 - 161	 RGB 值: 196 - 177 - 149
450	 RGB 值: 192 - 177 - 158	 RGB 值: 195 - 178 - 153	 RGB 值: 206 - 178 - 123

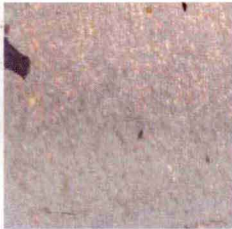
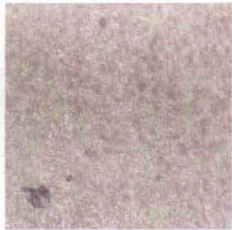
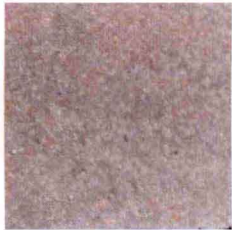
(续)

加热温度 /℃	加热时间/min		
	10	20	60
500	 RGB 值: 193 - 171 - 133	 RGB 值: 197 - 171 - 121	 RGB 值: 214 - 178 - 101
550	 RGB 值: 203 - 169 - 98	 RGB 值: 206 - 158 - 70	 RGB 值: 193 - 126 - 84
600	 RGB 值: 208 - 165 - 80	 RGB 值: 187 - 104 - 113	 RGB 值: 122 - 160 - 226
650	 RGB 值: 167 - 182 - 181	 RGB 值: 161 - 175 - 152	 RGB 值: 205 - 208 - 200

(续)

加热温度 /℃	加热时间/min		
	10	20	60
700	 RGB 值: 180 - 210 - 181	 RGB 值: 207 - 201 - 185	 RGB 值: 206 - 201 - 191
750	 RGB 值: 206 - 196 - 183	 RGB 值: 205 - 198 - 189	 RGB 值: 204 - 197 - 187
800	 RGB 值: 202 - 195 - 187	 RGB 值: 159 - 150 - 133	 RGB 值: 167 - 144 - 132
850	 RGB 值: 182 - 173 - 158	 RGB 值: 164 - 141 - 120	 RGB 值: 174 - 146 - 129

(续)

加热温度 /℃	加热时间/min		
	10	20	60
900	 RGB 值: 178 - 159 - 142	 RGB 值: 167 - 141 - 128	 RGB 值: 187 - 160 - 130
950	 RGB 值: 196 - 180 - 161	 RGB 值: 181 - 169 - 152	 RGB 值: 160 - 150 - 130
1000	 RGB 值: 171 - 159 - 143	 RGB 值: 179 - 168 - 150	 RGB 值: 157 - 143 - 128

彩图 5-3 TC4 钛合金不同加热温度和时间条件下的温色图谱

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 钛合金在航空上的应用	1
1.2 钛及其合金的金属学基础	3
1.2.1 杂质的影响	3
1.2.2 合金元素的影响	6
1.3 钛合金的组织与力学性能	7
1.3.1 钛合金的分类	7
1.3.2 显微组织	7
1.3.3 拉伸性能	8
1.3.4 断裂韧度及裂纹扩展速率	9
1.3.5 疲劳性能	15
1.3.6 热稳定性及抗蠕变性能	17
1.4 航空钛合金零件常见的失效模式	18
1.5 钛合金应用前景及发展方向	19
参考文献	21
第 2 章 钛合金及其零部件的疲劳断裂失效	23
2.1 低周疲劳断裂及其基本特征	23
2.1.1 钛合金低周疲劳现象及其特点	23
2.1.2 钛合金低周疲劳损伤表面形貌与裂纹扩展特征	26
2.1.3 钛合金疲劳断口的宏、微观特征	32
2.2 高周疲劳断裂及其基本特征	37
2.2.1 钛合金高周疲劳现象及其特点	37
2.2.2 钛合金高周疲劳损伤表面形貌	40
2.2.3 钛合金高周疲劳断口的宏、微观分析	41
2.3 钛合金的微动疲劳及其基本特征	46
2.4 钛合金焊接接头的疲劳断裂及其基本特征	51
2.4.1 焊接接头疲劳裂纹扩展行为	51
2.4.2 焊接缺陷对疲劳行为的影响	59
2.4.3 焊接接头疲劳断口的宏、微观特征	62

2.5	腐蚀疲劳及其环境对疲劳损伤的影响	65
2.5.1	环境对钛合金疲劳损伤的影响	65
2.5.2	腐蚀疲劳	67
2.6	钛合金疲劳断裂失效的预防	69
2.6.1	设计	69
2.6.2	材料与构件的抗力	69
2.6.3	制造过程	70
	参考文献	73
第3章	钛合金的腐蚀与磨损失效	75
3.1	钛合金的腐蚀损伤	75
3.1.1	钛及其合金的化学腐蚀抗力	75
3.1.2	钛及其合金的电化学腐蚀抗力	77
3.2	钛合金的应力腐蚀开裂	78
3.2.1	钛合金应力腐蚀损伤的条件和特点	78
3.2.2	应力腐蚀断口特征	80
3.2.3	钛合金应力腐蚀开裂的判断	81
3.3	钛合金的氢脆断裂	83
3.3.1	钛合金中氢的来源与存在形式	83
3.3.2	钛合金氢脆的类型	85
3.3.3	钛合金氢脆的断口特征	86
3.3.4	钛合金氢脆断裂失效的判别	90
3.4	钛合金的液态金属致脆	90
3.4.1	钛合金的镉脆	91
3.4.2	钛合金的铜脆	91
3.4.3	钛合金的银脆	92
3.5	钛合金的气蚀	93
3.6	提高钛合金环境抗力和预防环境失效的技术措施	94
3.7	钛合金的磨损失效及其预防	96
3.7.1	冲刷磨损	97
3.7.2	提高钛合金零部件磨损失效及微动损伤抗力的技术措施	99
	参考文献	101
第4章	钛合金零部件制造过程中的常见缺陷与预防	102
4.1	与熔炼工艺相关的缺陷	102
4.1.1	金属夹杂	102

4.1.2	非金属夹杂	106
4.1.3	化学成分偏析	112
4.2	与其他工艺相关的缺陷	121
4.2.1	破坏金属连续性的缺陷	121
4.2.2	热变形或热处理工艺控制不当造成的不合格金相组织	130
4.2.3	冷加工工艺缺陷	141
4.2.4	焊接缺陷	151
4.2.5	铸造缺陷	154
4.3	钛合金零部件的表面完整性	158
4.3.1	表面完整性定义及其重要性	158
4.3.2	表面强化对钛合金零部件疲劳抗力的影响	159
4.3.3	装配不当对钛合金零部件疲劳抗力的影响	162
4.3.4	冶金缺陷对钛合金零部件疲劳抗力的影响	163
4.3.5	机械加工工艺因素及圆角 R 尺寸对钛合金零部件疲劳抗力的影响	165
4.4	冷床熔炼技术——消除熔炼相关缺陷的有效途径	168
4.5	钛合金零部件的材质检验	170
4.5.1	原材料复验	170
4.5.2	半成品检验	170
4.5.3	成品检验	171
4.5.4	我国钛合金材质检验与西方国家的差异	172
	参考文献	173
第5章	钛合金的其他失效形式及其预防	174
5.1	钛合金的失稳	174
5.1.1	构件失稳失效的基本概念	174
5.1.2	失稳失效的基本特征和基本判据	175
5.2	钛合金的超温	176
5.2.1	钛合金超温的特点	176
5.2.2	钛合金的温色变化及其超温判别	177
5.3	钛合金的蠕变及其变形失效	178
5.3.1	金属蠕变的基本过程	178
5.3.2	钛合金蠕变的基本特点	179
5.3.3	钛合金蠕变断口的基本特征及其判断	180
5.3.4	变形伸长失效	182

5.4	钛合金的表面污染	182
5.4.1	氧污染的危害及其影响因素	182
5.4.2	氧化污染层检查方法	190
5.4.3	氢污染	192
5.4.4	氮污染	194
5.5	钛火	195
5.5.1	钛火产生原因	195
5.5.2	预防钛火的措施	196
	参考文献	196
第6章	钛合金的缺陷敏感性与损伤容限	197
6.1	钛合金缺陷敏感性	197
6.2	钛合金零部件的损伤容限设计	199
6.3	钛合金零部件原始疲劳质量	200
6.3.1	原始疲劳质量的评估对象和思路	200
6.3.2	原始疲劳质量的评估模型与算法	201
6.3.3	钛合金焊接接头原始疲劳质量评估及其影响因素	212
6.4	钛合金零部件裂纹“扩展寿命”的估算	215
6.4.1	裂纹扩展寿命估算的理论基础及基本步骤	215
6.4.2	断口反推疲劳裂纹扩展寿命的基本方法	217
6.4.3	钛合金零部件裂纹扩展寿命估算误差及其工程应用	220
6.5	钛合金零部件缺陷“扩展应力”的断口反推	222
6.5.1	断口反推疲劳应力大小的基本方法	223
6.5.2	利用疲劳条带间距进行断口反推疲劳应力的基本原理	223
6.5.3	断口疲劳条带反推应力的实验室研究	224
6.5.4	钛合金叶片振动应力反推实例	227
6.5.5	断口反推疲劳应力存在的问题	234
	参考文献	234

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Application of titanium alloys in aviation	1
1.2 Metallurgy of titanium and its alloys	3
1.2.1 Influence of impurity	3
1.2.2 Influence of alloying elements	6
1.3 Microstructure and properties of titanium alloys	7
1.3.1 Classification of titanium alloys	7
1.3.2 Microstructure	7
1.3.3 Tensile properties	8
1.3.4 Fracture toughness and crack propagation rate	9
1.3.5 Failure properties	15
1.3.6 Heat stability and creep properties	17
1.4 Primary failure modes of aeronautical titanium alloy components	18
1.5 Application prospect and development trend of titanium alloys	19
References	21
Chapter 2 Fatigue fracture failure of titanium alloys and their components	23
2.1 Low-cycle fatigue fracture and its characteristics	23
2.1.1 Phenomena and characteristics	23
2.1.2 Surface morphology and crack propagation characteristics	26
2.1.3 Macro and micro characteristics of fracture surface	32
2.2 High-cycle fatigue fracture and its characteristics	37
2.2.1 Phenomena and characteristics	37
2.2.2 Surface morphology	40
2.2.3 Macro and micro analysis on fracture surface	41
2.3 Fretting fatigue and its characteristics	46
2.4 Fatigue fracture and its characteristics of welded joint	51
2.4.1 Crack propagation of welded joint	51
2.4.2 Influence of welding defects on fatigue	59
2.4.3 Macro and micro characteristics of fatigue fracture surface	62