

航空用 钛合金的失效及其预防

Failure and Prevention of
Aeronautical Titanium alloy

陶春虎 刘庆琰 曹春晓 张卫方 著

国防工业出版社

航空用钛合金的失效 及其预防

Failure and Prevention of Aeronautical Titanium alloy

陶春虎 刘庆琰 著
曹春晓 张卫方

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

航空用钛合金的失效及其预防/陶春虎等著. —北京:
国防工业出版社, 2002. 9

ISBN 7-118-02818-5

I. 航... II. 陶... III. 飞机 - 钛合金 - 零部件 -
失效分析 IV. V215.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 010116 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)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 9¼ 228 千字

2002 年 9 月第 1 版 2002 年 9 月北京第 1 次印刷

印数: 1 - 2000 册 定价: 21.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

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。

1A12391.1

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 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾铎
秘书长	崔士义			
委员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
(以姓氏笔画为序)	刘仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

序

航空装备已由过去强调以保证性能为主转变为强调满足“三性”要求,即适应性、可靠性和维修性,新型材料的研制过程从过去“成分-组织-性能”的研制模式演变为“成分组织-合成加工-性能-设计制造-服役-失效-综合表现”七者之间的综合体现,从而将材料在使用过程中的“综合表现”提高到理性的高度,正如国际著名教授 J. Schijve 在 1993 年国际疲劳会议上所作报告中指出的:“有关新材料的应用不仅要建立在了解有关设计与工艺要求的基础上,而且也要建立在了解材料损伤和断裂过程中的行为基础上”。本书所介绍的正是人们在航空上广泛应用钛合金所必须了解的一些重要基础知识。

人们虽早在 1795 年就发现了钛,但由于钛的熔点高,化学性十分活泼,塑性良好的纯钛难以制取,钛锭的冶炼需在真空下进行,制造工艺复杂,因此钛及其合金长期不能作为结构材料用于工业生产。

钛工业得以发展是近一个世纪的事情,特别是得益于 20 世纪 50 年代以来航空航天技术发展的迫切需要,如阿波罗飞船上用钛量高达 1180kg。高的比强度、优良的抗蚀性和高的使用温度不仅使钛成为航空航天工业中不可或缺的结构材料,而且在造船、化工、冶金、医疗等领域也越来越得以广泛地应用。

我国钛合金的自行研制是从 1957 年才刚刚开始。1951 年在美国工作期间曾研究过钛合金的颜鸣皋教授,1957 年调入北京航空材料研究所(院),领导和创建了第一个钛合金研究室,和曹春晓研究员等人一起,自行设计制造了一台 3kg 非自耗电弧炉和一台 7.5kg 自耗电弧炉,历经多次失败后,终于熔炼出中国第一个 3kg 的钛合金铸锭,标志着我国从此有了自行研制的钛合金。

钛合金用量与日俱增,也发生了一系列灾难性的事故,如 20 世纪 60 年代中期,美国在执行登月计划时,发生过 $\text{Ti}-6\text{Al}-4\text{V}$ 制作用 N_2O_4 压力容器的爆破;20 世纪 70 年代以来,美国发生多起燃气涡轮发动机钛合金部件的失效;90 年代中期以后,我国也相继发生过几起钛合金转动部件的失效。然而迄今为止,国内外尚未有系统介绍有关钛合金失效及其预防的专著。

本书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,着重系统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成型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,给出了一系列实用的断口定量分析技术和方法,也突出了近年来发展起来的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,它是目前国内外第一部系统介绍钛合金失效与预防方面的专著。本书学术思想新颖,内容具体实用。它将不仅成为航空用钛合金研制和零部件设计、生产的科研人员的重要参考书,也将为其它行业部门从事机械失效分析和钛合金设计、研制提供参考和借鉴。本书也可作为钛合金材料及失效分析等专业研究生的重要参考教材。

机械失效分析几乎均涉及对材料抗力和构件承受外力(包括环境介质等)的分析。科学技术不断发展,新材料在工程上得以不断应用,新材料的失效特征以及材料在新的特殊使用环境下的行为就成为失效分析中不断出现的新问题。《航空用钛合金的失效及其预防》将为我们今后在解决钛合金零部件失效分析问题时提供很大的帮助,希望今后会不断有类似的好书问世!

中国工程院院士
北京航空航天大学教授



2002 年元旦

前 言

1996 年底,相继发生了几起钛合金零部件在服役条件和发动机试车过程中的断裂失效,且暴露出一系列共性的问题,如断口性质难以确认,源区缺陷虽远小于设计容限,设计应力也不大,但疲劳区极小。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。

钛合金的用量与日俱增,美国研制的 F-22 战斗机上钛合金用量占机体总重量的 40% 以上,发动机实现了压气机全钛化。因此近年来有关先进战斗机和发动机的报告中无一不谈到钛合金材料及其制造工艺的重要作用。正像天有阴阳雨雪,人有生老病死,钛合金零部件也必然会出现失效。我国在钛合金工程应用上的较大差距,除制造工艺的制约外,在钛合金损伤行为、过程质量控制、失效机理及性能评价与表征研究方面的差距更是显而易见的。

本书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,也突出了近年来发展起来的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。该书不仅能帮助失效分析人员在航空钛合金零部件出现失效或导致重大故障时迅速准确地判断其失效性质,找出失效原因,为使用部门提出预防再失效的措施,而且也将为航空部门从事钛合金研制、零部件设计、生产的科研人

员从根本上减少和消除因钛合金零件失效导致重大事故的隐患,提高航空用钛合金的失效诊断水平和钛合金零部件使用的安全可靠。同时该书也将为其它行业部门从事机械失效分析和钛合金设计、研制提供参考和借鉴。本书也可作为钛合金材料研制及失效分析等专业研究生的重要参考教材。

正因为钛合金失效及其预防研究十分重要,因而该工作的构思一经提出,就得到了广泛的支持与帮助。北京航空材料研究院的马济民、王仁智、高扬、朱知寿、张少卿、韩希鹏、刘绍伦、习年生、张庆玲、张晓云以及贵州新艺机械厂的李放、孙雪征等专家为本书提供了大量的资料、图片和数据,甚至有相当一部分是这些专家们尚未发表的最新研究成果。黎阳公司的郭敬轩、李聚丰、李惕冰和贵州新艺机械厂的戴恭等研究员为本工作提供了大力支持,空军第一研究所张栋、海航某发动机修理厂孙相臣、上海钢铁研究所庞克昌以及沈阳发动机研究所杨士杰、王理等著名专家也为本书提供了许多珍贵的图片。许多从事钛合金研究的国外专家也为本书提供了一些很有价值的照片。我国著名失效分析专家、中国工程院钟群鹏院士多年来对本书的完成给予了很大的支持、指导与帮助,并亲自为本书作序。我国钛合金研究的创始人之一、中国科学院颜鸣皋院士以及中国工程院徐滨士院士和柯伟院士对本书给予了很高的评价。在本书成稿过程中,得到了国防工业出版社杜豪年编辑的指导和帮助,为获得国防科技图书出版基金资助奠定了很好的基础。国防科技图书出版基金评审委员会的专家们对本书给予了充分肯定,并诚恳地提出了修改意见,作者向为本书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。作者也衷心感谢赵爱国、张焱、刘新灵、刘高远、高威等航空工业失效分析中心的一批年轻技术骨干为本书出版付出的辛勤劳动。

全书共分为六章,第1、2、3章由陶春虎研究员撰稿,第4章由刘庆琰研究员撰稿,其中有关铸造缺陷和焊接缺陷内容分别由南海和梁海两位博士提供,第5、6章由陶春虎研究员和张卫方博士共同撰写。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,本书的缺点错误在所难免,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

2001 年 9 月 25 日

目 录

第一章 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	4
1.2.2 合金元素的影响	7
1.3 航空常用的钛合金	8
1.3.1 α 钛合金	9
1.3.2 β 钛合金	10
1.3.3 $\alpha + \beta$ 钛合金	10
1.4 钛合金的组织与力学性能	11
1.4.1 拉伸性能	14
1.4.2 断裂韧度及裂纹扩展速率	15
1.4.3 疲劳性能	23
1.4.4 热稳定性及抗蠕变性能	26
1.5 航空钛合金零件常见的失效模式	27
1.6 钛合金应用前景及发展方向	29
参考文献	32
第二章 钛合金及其零部件的疲劳断裂失效	34
2.1 低周疲劳断裂及其基本特征	34
2.1.1 钛合金低周疲劳现象及其特点	35
2.1.2 钛合金低周疲劳损伤表面形貌与 裂纹扩展特征	39
2.1.3 钛合金疲劳断口的宏、微观特征	45

2.2 高周疲劳断裂及其基本特征	52
2.2.1 钛合金高周疲劳现象及其特点	52
2.2.2 钛合金高周疲劳损伤表面形貌	55
2.2.3 钛合金高周疲劳断口的宏、微观分析	55
2.3 钛合金的微动疲劳及其基本特征	61
2.4 腐蚀疲劳及其环境对疲劳损伤的影响	68
2.4.1 环境对钛合金疲劳损伤的影响	69
2.4.2 腐蚀疲劳	70
2.5 钛合金疲劳断裂失效的预防	75
2.5.1 设计	75
2.5.2 材料与构件的抗力	75
2.5.3 制造过程	76
参考文献	80
第三章 钛合金的腐蚀与磨损失效	82
3.1 钛合金的腐蚀损伤	82
3.1.1 钛及其合金的化学腐蚀抗力	83
3.1.2 钛及其合金的电化学腐蚀抗力	86
3.2 钛合金的应力腐蚀开裂	87
3.2.1 钛合金应力腐蚀损伤的条件和特点	87
3.2.2 应力腐蚀断口特征	90
3.2.3 钛合金应力腐蚀开裂的判断	92
3.3 钛合金的氢脆断裂	92
3.3.1 钛合金中氢的来源与存在形式	93
3.3.2 钛合金氢脆的类型	94
3.3.3 钛合金氢脆的断口特征	97
3.3.4 钛合金氢脆断裂失效的判别	100
3.4 钛合金的液态金属致脆	102
3.5 提高钛合金环境抗力和预防环境失效的技术措施	104
3.6 钛合金的磨损失效及其预防	106
3.6.1 冲刷磨损	107

3.6.2 提高钛合金零部件磨损失效及微动损伤抗力的技术措施	109
参考文献	113
第四章 钛合金零部件制造过程中的常见缺陷与预防	114
4.1 与熔炼工艺相关的缺陷	114
4.1.1 金属夹杂	114
4.1.2 非金属夹杂	119
4.1.3 化学成分偏析	127
4.2 与其它工艺相关的缺陷	139
4.2.1 破坏金属连续性的缺陷	140
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	147
4.2.3 冷加工工艺缺陷	162
4.2.4 焊接缺陷	174
4.2.5 铸造缺陷	180
4.3 钛合金零部件的表面完整性	186
4.3.1 表面完整性定义及其重要性	186
4.3.2 装配不当对钛合金零部件疲劳抗力的影响	187
4.3.3 冶金缺陷对钛合金零部件疲劳抗力的影响	189
4.3.4 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	192
4.4 冷床熔炼技术——消除熔炼相关缺陷的有效途径	195
4.5 钛合金零部件的材质检验	198
4.5.1 原材料复验	198
4.5.2 半成品检验	199
4.5.3 成品检验	199
4.5.4 我国钛合金材质检验与西方国家的差异	201
参考文献	202
第五章 钛合金的其它失效形式及其预防	204
5.1 钛合金的失稳	204

5.1.1 构件失稳失效的基本概念	204
5.1.2 失稳失效的基本特征和基本判据	206
5.2 钛合金的超温	207
5.2.1 钛合金超温的特点	207
5.2.2 钛合金的温色变化及其超温判别	208
5.3 钛合金的蠕变及其变形失效	209
5.3.1 金属蠕变的基本过程	209
5.3.2 钛合金蠕变的基本特点	210
5.3.3 钛合金蠕变断口的基本特征及其判断	212
5.3.4 变形伸长失效	214
5.4 钛合金的表面污染	214
5.4.1 氧污染的危害及其影响因素	214
5.4.2 氧化污染层检查方法	224
5.4.3 氢污染	226
5.4.4 氮污染	229
参考文献	229
第六章 钛合金的缺陷敏感性与损伤容限	230
6.1 钛合金缺陷敏感性	230
6.2 钛合金零部件的损伤容限设计	232
6.3 钛合金零部件原始疲劳质量的估算及其分布	234
6.4 钛合金零部件裂纹“扩展寿命”的估算	241
6.4.1 裂纹扩展寿命估算的理论基础及基本步骤	241
6.4.2 断口反推疲劳裂纹扩展寿命的基本方法	243
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	247
6.5 钛合金零部件缺陷“扩展应力”的断口反推	250
6.5.1 断口反推疲劳应力大小的基本方法	251
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	252
6.5.3 断口疲劳条带反推应力的实验室研究	253

6.5.4 钛合金叶片振动应力反推实例	257
6.5.5 断口反推疲劳应力存在的问题	268
参考文献	269

Content

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Aeronautical application of titanium alloy	1
1.2 Metallurgy of titanium and its alloys	3
1.2.1 Influence of impurity elements	4
1.2.2 Influence of metallurgical elements	7
1.3 Primary titanium alloys in aviation	8
1.3.1 α titanium alloys	9
1.3.2 β titanium alloys	10
1.3.3 $\alpha + \beta$ titanium alloys	10
1.4 Microstructure and properties of titanium alloys	11
1.4.1 Tensile properties	14
1.4.2 Fracture toughness and crack growth rate	15
1.4.3 Fatigue properties	23
1.4.4 Heat stability and creep properties	26
1.5 Primary failure modes in aeronautical titanium alloy components	27
1.6 Application prospect and development trend of titanium alloy	29
References	32
Chapter 2 Fatigue fracture failures of titanium alloys and their components	34
2.1 Low cycle fatigue fracture and its basic characteristics	34
2.1.1 Phenomenon and characteristics	35