



“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

先进航空钛合金 材料与应用

Advanced Aeronautical Titanium
Alloys and Applications

黄旭 朱知寿 王红红 编著



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

先进航空钛合金 材料与应用

黄 旭 朱知寿 王红红 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书概括了国内外航空钛合金发展的现状和水平,对航空钛合金进行了分类,重点叙述了我国航空结构用新型钛合金材料及其应用技术的研究进展,包括了飞机结构用低强度、中强度、高强度、损伤容限型钛合金和特种功能钛合金,航空发动机结构用中温高强度、600℃高温、650℃高温钛合金、阻燃钛合金和 Ti-Al 系金属间化合物,以及铸造钛合金及其氢处理技术。本书还叙述了航空钛合金材料技术的发展与应用,包括型材制备、管材制备、环轧工艺、复合材料增强纤维制备和超细晶制备等技术。

本书主要供航空工业和科研设计部门从事材料研究、应用、生产的工程技术人员参考,也可供高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

先进航空钛合金材料与应用/黄旭,朱知寿,王红红编著. —北京:
国防工业出版社,2012.5

(先进航空材料与技术丛书)

ISBN 978-7-118-08106-0

I. ①先... II. ①黄... ②朱... ③王... III. ①钛合金—航空材料 IV. ①V252.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 103157 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 27 $\frac{3}{4}$ 字数 530 千字

2012 年 5 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

《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 (按姓氏笔画为序)

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

大量采用先进钛合金材料及其应用技术,提高钛合金用量,是新一代飞机和发动机先进性的显著标志之一,可大幅度提高结构减重效果和安全可靠性。如美国第四代战斗机 F/A-22 的用钛量占结构的 38.8%,其中大部分零件是按照耐久性/损伤容限设计准则选用先进的 Ti6Al4V ELI 和 Ti-6-22-22S 损伤容限型钛合金制造的,真是“一代材料,一代飞机。”同样,航空发动机结构的钛合金用量也在不断提高,如 F100 的用钛量为 25%,F119 的用钛量达 40%。

经过 50 年来的研究和发展,我国钛合金共有 72 种牌号,其中投入工业化应用的钛和钛合金牌号有 40 多个, α 和近 α 型钛合金(TA1 ~ TA28)共 22 个, α - β 型钛合金(TC1 ~ TC24)共 24 个, β 或近 β 型钛合金(TB2 ~ TB9)共 8 个以及铸造钛合金共 3 个和 Ti_3Al 基金属间化合物 2 个等。航空结构用新型钛合金已基本形成了中国特色的钛合金材料体系,可满足航空结构应用的需要。目前,中国钛产业近几年来得到了快速发展,钛材产量一直位居世界第四位,航空结构用钛合金产品也得到了稳步发展,但与国外发达国家在钛合金应用水平、产业结构和用量等方面仍存在一定差距。为此,加强航空结构用新型钛合金材料技术及其应用研究,提高航空结构用钛合金的加工技术和应用水平,是提高钛合金在航空工业用量的重要推动力和保障。

本书概括了国内外航空钛合金发展的现状和水平,对航空钛合金进行了分类,重点叙述了我国航空结构用新型钛合金材料及其应用技术的研究进展,包括了飞机结构用低强度、中强度、高强度、损伤容限型钛合金和特种功能钛合金,航空发动机结构用中温高强度、600℃ 高温、650℃ 高温钛合金、阻燃钛合金和 Ti-Al 系金属间化合物,以及铸造钛合金及其氢处理技术。本书还叙述了航空钛合金材料技术的发展与应用,包括型材制备、管材制备、环轧工艺、复材增强纤维制备和超细晶制备等技术。

全书共分5章,第1章由黄旭和朱知寿撰写,第2章由沙爱学、朱知寿、张旺峰、黄利军、王清瑞、王新南、李艳和王玉会撰写,第3章由李臻熙、雷力明、蔡建明、李四清、曹京霞和黄浩撰写,第4章由王红红、南海、郭仲贤、冯芝华、李建崇和黄东撰写,第5章由李四清、齐立春、张旺峰、王宝、黄浩和雷力明撰写。王庆如负责全书统稿,李志燕和马月林负责全书的文字和图表编辑,黄旭和沙爱学负责全书的审定。

由于时间紧迫,书中错误在所难免,欢迎读者不吝赐教。

作者

2011年12月

目 录

第 1 章 航空钛合金材料体系及钛合金化特点	1
1.1 航空钛合金类型	1
1.1.1 飞机结构钛合金类型	1
1.1.2 发动机结构钛合金类型	2
1.2 航空钛合金材料合金化特点	3
第 2 章 飞机结构钛合金	5
2.1 概述	5
2.2 低强度高塑性钛合金	7
2.2.1 工业纯钛	7
2.2.2 TC1 钛合金	16
2.2.3 TC2 钛合金	22
2.3 中强度钛合金	26
2.3.1 TA15 钛合金	26
2.3.2 TC4 钛合金	47
2.3.3 TC6 钛合金	65
2.4 高强度钛合金	82
2.4.1 TC18 钛合金	82
2.4.2 TB5 钛合金	98
2.4.3 TB6 钛合金	113
2.4.4 TB8 钛合金	124
2.5 损伤容限型钛合金	141
2.5.1 TC4 - DT 钛合金	141
2.5.2 TC21 钛合金	157
2.6 特种功能钛合金	178

2.6.1	紧固件用钛合金	178
2.6.2	管材用钛合金	206
2.6.3	弹簧用钛合金	226
2.6.4	超弹钛合金	236
	参考文献	243
第3章	航空发动机用高温钛合金	247
3.1	概述	247
3.2	中温高强钛合金及其应用	249
3.2.1	成分及组织	249
3.2.2	锻造及热处理	251
3.2.3	力学性能	252
3.2.4	应用情况	256
3.2.5	国内中温高强钛合金的研究	258
3.3	新型高温钛合金及其应用	258
3.3.1	600℃高温钛合金	258
3.3.2	650℃高温钛合金	267
3.4	阻燃钛合金及应用	276
3.4.1	材料简介	276
3.4.2	相变及组织	279
3.4.3	应用技术	282
3.4.4	主要性能	289
3.4.5	应用情况	291
3.5	Ti-Al系金属间化合物(TiAl, Ti ₃ Al)材料及应用	291
3.5.1	TiAl合金	291
3.5.2	Ti ₃ Al/Ti ₂ Al Nb基合金	310
3.6	钛基复合材料及应用	328
3.6.1	钛基复合材料简介	328
3.6.2	钛基复合材料制备技术	334
3.6.3	钛基复合材料应用	336
	参考文献	342
第4章	铸造钛合金	348
4.1	概述	348

4.2	ZTC6 铸造钛合金	348
4.2.1	材料简介	348
4.2.2	热处理及组织	349
4.2.3	主要性能	349
4.3	ZTA15 铸造钛合金	353
4.3.1	材料简介	353
4.3.2	热处理及组织	354
4.3.3	主要性能	357
4.3.4	应用情况	360
4.4	Ti-15-3 铸造钛合金	361
4.4.1	材料简介	361
4.4.2	热处理及组织	362
4.5	TiAl 合金	366
4.5.1	材料简介	366
4.5.2	相变及组织	367
4.5.3	应用技术	369
4.6	铸造钛合金的氢处理技术	370
4.6.1	氢处理技术简介	370
4.6.2	氢处理对高温塑性的作用	371
4.6.3	氢处理对低温塑性的作用	374
4.6.4	氢处理对超塑性成形的作用	375
4.6.5	氢处理工艺在钛合金铸件中的应用	376
	参考文献	383
第5章	航空钛合金材料技术的发展与应用	385
5.1	概述	385
5.1.1	钛及钛合金传统加工方法	385
5.1.2	钛合金铸锭加工工艺	385
5.1.3	航空钛合金铸锭冶金工艺发展的趋势	387
5.2	钛合金型材制备技术	388
5.3	钛合金管材制备技术	390
5.3.1	钛合金管材	390
5.3.2	钛合金管材加工工艺	390

5.3.3	钛合金管材的轧制	393
5.3.4	钛合金管材的挤压	397
5.3.5	钛合金管材的拉拔	399
5.3.6	钛合金焊接管材	402
5.4	钛合金环件轧制技术	403
5.4.1	环轧原理	403
5.4.2	环件轧制技术特性	405
5.5	钛基复合材料增强纤维制备技术	409
5.5.1	SiC 纤维	409
5.5.2	SiC 纤维制备工艺	410
5.5.3	SiC 纤维制备影响因素	412
5.5.4	SiC 纤维涂层制备工艺	414
5.6	钛合金超细晶制备技术	415
5.6.1	概述	415
5.6.2	钛及钛合金的超细晶制备技术	415
	参考文献	427

第 1 章 航空钛合金材料体系及钛合金化特点

1.1 航空钛合金类型

钛合金是在纯钛中加入一种或几种其他合金元素,通过真空熔炼工艺熔炼,并可进一步通过热机械处理、粉末冶金、焊接和铸造等工艺方法制造各种产品的合金。钛合金具有密度低(4.5g/cm^3 ,是低碳钢的 57%)、比强度高、耐腐蚀性好、热导率低、无毒无磁、可焊接、生物相容性好、表面可装饰性强等特性,它是一种轻质高强度耐蚀结构材料,在武器装备中具有广泛的应用前景,并已经广泛应用于化工、石油、电力、医疗、建筑、体育用品等领域。

钛合金的分类方法有多种,例如,按组织结构可分为 α 型合金、近 α 型合金、 $\alpha-\beta$ 型合金、近 β 型合金、亚稳定 β 型合金、 β 型合金等;按使用的领域可分为结构钛合金、热强钛合金、耐蚀钛合金和低温钛合金等;按制备方法分为变形钛合金、铸造钛合金和粉末钛合金。

1.1.1 飞机结构钛合金类型

飞机结构钛合金按设计用途和材料特性可分为低强度高塑性钛合金、中强度钛合金、高强度钛合金和损伤容限型钛合金等。

(1) 低强度高塑性钛合金。抗拉强度低于 700MPa 的钛合金属于低强度高塑性钛合金,主要有 TA18、TC1、TC2 等。其主要特点是低合金化、高塑性和高韧性,并具有高可焊性、可成形性等,主要用来制造各种钣金件、蒙皮、管材零件等。

(2) 中强度钛合金。抗拉强度在 $700\text{MPa} \sim 1000\text{MPa}$ 范围的钛合金为中强度钛合金,主要有 TA15、TC4、TC6 等。这类合金的主要特点是具有良好的综合性能,既有较高的强度,又有足够的塑性以及优良的焊接性能,多用于制造承力构件。

(3) 高强度钛合金。抗拉强度超过 1000MPa 范围的钛合金为高强度钛合金,主要有 TB5、TB6、TB8、TC16、TC18 等。这类合金主要用于制造强度要求高、代替钢可达到高减重效果的承力构件、钣金件和紧固件等。

(4) 损伤容限型钛合金。具有高断裂韧度和低疲劳裂纹扩展速率的中/高强度钛合金称为损伤容限型钛合金,主要有 TC4-DT 和 TC21 等。这类合金是

按照耐久性/损伤容限设计准则用于飞机结构的承力构件,可以进一步提高飞机设计使用寿命和降低使用寿命期内的维修与维护成本。

1.1.2 发动机结构钛合金类型

航空发动机用钛合金是指具有较高的高温蠕变抗力、持久强度、高温强度、热稳定性和高温疲劳等性能,能够满足航空发动机零件在高温环境下长期工作要求的钛合金,主要用于制造航空发动机叶片、轮盘和机匣等零件。航空发动机用钛合金以能满足发动机高温零部件长期工作的最高温度进行分类。

350℃使用的高温钛合金主要有 TC4(ZTC4)钛合金,该合金是世界上使用量最多的一种钛合金,工艺性能优越,综合力学性能好,成本低,生产和使用稳定,性能数据齐全,半成品种类多。该合金主要用于制造航空发动机风扇及压气机 400℃以下工作的叶片、压气机盘和鼓筒等。ZTC4 钛合金主要用于机匣等铸件的生产。

400℃使用的高温钛合金主要有 TC17、TC6 和 TC19 钛合金,TC17 钛合金与美国的 Ti17 合金相仿,主要用于制造压气机盘、整体叶盘零件;而 TC6 钛合金与俄罗斯的 BT3-1 合金相仿,主要用于制造风扇叶片及高压压气机叶片等零件;TC19 对应于国外的 Ti-6246 合金,可用于制造压气机盘和叶片等重要构件。

450℃使用的高温钛合金主要有 TA11 钛合金。TA11 钛合金与美国的 Ti-811 合金相仿,用于制造发动机 1 级~3 级高压转子叶片。

500℃使用的高温钛合金主要有 TC11、TA15(ZTA15)、TA7(ZTA7)和 TA19(ZTC6)钛合金。TC11 钛合金是以俄罗斯的 BT9 合金为基础的改进合金,是我国航空发动机上应用数量最多的钛合金,综合力学性能好。生产 TC11 叶片和盘件及其半成品的工艺稳定,二十多年来在我国航空发动机上的使用中发生过因 TC11 合金材料问题造成的故障,主要用于制造航空发动机 500℃及以下温度使用的压气机叶片、盘、鼓筒等零件。TA15 钛合金与俄罗斯的 BT20 钛合金相仿,具有良好的可焊性和热稳定性,主要用于制造发动机加力燃烧室筒体、承力环、可变弯度叶片等零部件。TA7 钛合金与美国的 Ti5Al2.5Sn 合金相仿,主要用于制造发动机转接座、前机匣壳体、封严圈壳体以及板材热压成形的衬板、支架座和壁板等零件。TA19 钛合金与美国的 Ti-6242(S)合金相仿,用于制造发动机前机匣。国外 Ti-6242(S)钛合金在发动机盘、叶片等部件都有应用,添加 Si 的 Ti-6242S 钛合金使用温度接近 550℃。

550℃使用的高温钛合金有 TA12 合金,尚未在我国的航空发动机上获得应用,拟用于制造加力燃烧室筒体等零件。

600℃使用的高温钛合金有 Ti60 合金,尚处于研制阶段,拟用于高压压气机整体叶盘等零件。

650℃使用的高温钛合金正在研制阶段,但固溶强化型钛合金性能在 650℃以上温度使用已经无法满足要求,Ti-Al 系金属间化合物将是 650℃~850℃使用的重要结构材料。

1.2 航空钛合金材料合金化特点

α 型钛合金是指具有 α 结构的稳定 α 固溶体,其中含有有限固溶的 β 稳定元素,多用 α 稳定元素 Al 和中性元素 Sn 和 Zr 合金化,主要有工业纯钛(实际上是 Ti-O 合金)和 TA7。这一类型合金的特点是合金强度不高,但其热稳定性好,蠕变强度较高。这类合金在很低温度下仍有良好的延性,而且具有良好的焊接性,甚至当含有较多 Al 时焊缝和近焊缝区也不脆化。工业纯钛是应用非常广泛的工业钛合金。可以通过控制 O 含量来得到不同强度级别的工业纯钛。

低 Al 当量(Al 当量小于 6%)的近 α 型钛合金, α 稳定元素含量相对较少,固溶强化效果不明显,组织中约含有 2%~4% 的 β 相。这类合金类似于 α 工业钛合金,优点是压力加工性相对较好,具有良好的焊接性和热稳定性,其缺点是强度较低,不能热处理强化。这类合金适合制造形状复杂的板材冲压及焊接件。

高 Al 当量的近 α 型钛合金均采用较多数量的 Al、中性元素和少量 β 稳定元素合金化。这些合金中 α 稳定元素和中性元素的含量比低 Al 当量近 α 型合金的高,可以确保高的热强性能。这类合金工艺性较低,主要以锻件和模锻件形式供应;在退火状态下使用,有时经过双重或等温退火,也可经过固溶和时效。此类合金有 TA11、TA12、TA15、TA19 等。

马氏体 α - β 型钛合金($K_\beta=0.3\sim0.9$),这类合金中的 Al 当量一般控制在 8% 以下, β 稳定元素的添加量为 2%~10%,主要是为了获得足够数量的 β 相,以进一步改善钛合金的压力加工性和热处理强化能力。与近 α 型钛合金相比,两相钛合金具有较高的强度和良好的塑性。两相钛合金可在退火状态下使用,也可进行热处理强化,但淬透性较低,强化热处理后断裂韧性降低。此类合金有 TC6、TC11、TC16、TC21 等。

近 β 型钛合金($K_\beta=1.0\sim1.4$),也称过渡型 α - β 合金。这种合金退火状态下为 α + β 两相,但在淬火时, β 相可由高温保留至室温,或发生 ω 相变,使组织中全部为淬火状态的亚稳 β 相或亚稳 β + ω 相。该类合金具有较好的热加工特性和淬透性,通过固溶加时效可有效地实现高强度。主要用于制作高强度锻件等半成品。此类合金有 TB6、TB10、TC17、TC18 等。

亚稳定 β 型钛合金 ($K_\beta = 1.5 \sim 2.4$), 在平衡状态仍为 $\alpha + \beta$ 两相, β 相含量超过 50%, 但在一般退火冷速条件下, β 相即可保留至室温, 使组织中全部为退火状态的亚稳 β 相, 当然, 亚稳定 β 合金中的 β 相的稳定性高于近 β 合金。此类合金有 TB2、TB3、TB5、TB8、TB9 等。

β 型钛合金在平衡状态下, 全部由稳定的 β 相组成, 不易受热处理变化影响。这类合金含有较高的 β 稳定元素 ($K_\beta = 2.5 \sim 3$), 在某些侵蚀介质中具有很高的抗腐蚀能力, 如 TB7 和适用于航空发动机部件的阻燃钛合金 Ti40。

第 2 章 飞机结构钛合金

2.1 概述

钛及钛合金在飞机上应用可以取得良好的减重效益,满足军用飞机高机动性、高可靠性和长寿命的设计需要。早在 20 世纪 50 年代初期,国外一些军用飞机上就开始用工业纯钛制造后机身的隔热板、机尾整流罩、减速板等受力不大的结构件。20 世纪 60 年代,钛合金在飞机结构上的应用,进一步扩大到襟翼滑轨、承力隔框、中央翼盒型梁、起落架梁、直升机桨毂等主要受力构件。到 20 世纪 70 年代,钛合金在飞机结构上的应用又从战斗机扩大到军用大型轰炸机和运输机,而且在民用飞机上也开始大量采用钛合金结构。例如,波音 747 大型客机的起落架支承梁,是由 Ti6Al4V 合金制造的大型锻件,长 6m,质量 1.8t。波音 787 大型客机的起落架转向架梁,是由 Ti-5553 高强度钛合金制造的大型锻件,强度级别为 1240MPa,质量约 2.0t。随着钛合金的研究和生产的发展,飞机上的用钛量也越来越大,美国第四代战斗机代表机型 F/A-22 的用钛量已经占到飞机结构的 38.8%。F/A-22 飞机主要使用 7 个牌号的钛合金,分别是:中强度钛合金 Ti6Al4V,高强高韧钛合金 Ti6Al2Sn4Zr2Mo、Ti10V2Fe3Al、Ti15V3Cr3Sn3Al,损伤容限型钛合金 Ti6Al4VELI、Ti6Al2Sn2Zr2Mo2Cr0.2Si 以及管材专用钛合金 Ti3Al2.5V,这些合金满足了飞机上不同部位对钛合金的设计需求。

我国目前飞机的用钛量达到 15% 左右,但与国外先进水平相比仍有一定差距。我国飞机应用的主要钛合金牌号见表 2-1,包括低强高塑钛合金、中强度钛合金、高强度钛合金、损伤容限钛合金和铸造钛合金等 5 大类。在过去的几十年中,我国的钛合金发展主要是参照美国和俄罗斯的牌号,自主研发的还不多,其结果是合金牌号众多,相近性能水平的钛合金往往有多个,但材料的技术成熟度却普遍不高。