



航空用钛合金研究进展

金和喜^{1,2}, 魏克湘², 李建明², 周建宇², 彭文静²

(1. 中南大学 轻合金研究院, 长沙 410076;

2. 湖南工程学院, 湘潭 411104)

摘要: 对航空用钛合金的研究应用情况进行综述。从合金基体相组成角度, 将钛合金分为 α 型钛合金、 $\alpha+\beta$ 型钛合金和 β 型钛合金。着重介绍钛合金在航空发动机、飞机机身、航空紧固件等方面的应用; 讨论航空用钛合金研究目前存在的问题, 结果表明: 提高高温热稳定性、增强蠕变抗力和降低成本是航空用钛合金今后的发展方向。

关键词: 钛合金; 航空应用; 航空发动机; 飞机机身合金; 航空紧固件

中图分类号: TG146

文献标志码: A

Research development of titanium alloy in aerospace industry

JIN He-xi^{1,2}, WEI Ke-xiang², LI Jian-ming², ZHOU Jian-yu², PENG Wen-jing²

(1. Light Alloy Research Institute, Central South University, Changsha 410076, China;

2. Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411104, China)

Abstract: The researches and prospects of titanium alloys for aircraft were reviewed. Titanium alloys can be divided into α titanium alloy, $\alpha+\beta$ and β titanium alloy from the perspective of alloy matrix phase composition. The recent development and application of titanium alloys in the aircraft engine, aircraft and aerospace fasteners were introduced. The problems of titanium alloys applied to the aerospace industry were also discussed. It shows that improving the thermal stability under high temperature, strengthening the creep resistance and lowering the cost reduction are the future development directions of titanium alloys for aircraft.

Key words: titanium alloy; aerospace application; aircraft engine; airframe alloy; aerospace fastener

钛元素分布比较广泛, 其含量超过地壳质量的0.4%, 全球探明储量约34亿吨, 在所有元素中含量居第10位(氧、硅、铝、铁、钙、钠、钾、镁、氢、钛)^[1-3]。美国科学家在1910年采用“钠法”(钠还原 TiCl_4)最早获得金属钛, 但是钛工业并没有随着钛的发现立即得以发展。直到第二次世界大战后的1948年, 卢森堡科学家发明的“镁法”(镁还原 TiCl_4)在美国用于生产之后钛工业才开始起步^[4-6]。

钛比钢密度小40%^[1], 而钛的强度和钢的相当, 这可以提高结构效率。同时, 钛的耐热性、耐蚀性、弹性、抗弹性和成形加工性良好。由于钛具备上述特

性, 从一出现钛合金就应用于航空工业^[2-3]。1953年, 美国道格拉斯公司出产的DC-T机发动机防火壁和短舱上首次使用钛材, 开始钛合金应用于航空的历史。航天飞机是最主要的、应用范围最广的航空器。钛是飞机的主要结构材料, 也是航空发动机风扇、压气机轮盘和叶片等重要构件的首选材料^[4], 被誉为“太空金属”^[5]。飞机越先进, 钛用量越多, 如美国F22第四代机用钛含量为41%(质量分数), 其F119发动机用钛含量为39%^[2], 是目前用钛含量最高的飞机。钛合金研究起源于航空, 航空工业的发展也促进了钛合金的发展。航空用钛合金的研究一直是钛合金领域中最

重要、最活跃的一个分支,但其发展也极其艰辛,如人们花费十几年的精力克服航空发动机用钛合金的“热障”问题^[6]。

本文作者从合金基体相组成角度对钛合金进行归类。以飞机为航空器的代表,着重介绍钛合金在航空发动机、飞机机身、航空紧固件等方面的应用研究情况。最后,分析航空用钛合金发展过程中存在的问题。

1 钛合金的分类

美、英、俄、法、日等国钛合金的分类多为厂家自定^[6],名目繁多。某些公司直接采用元素的化学符号和数字代替所加合金元素及其含量命名,如 Ti-6Al-4V(相当于我国的 TC4),各国牌号对照及化学成分如表 1 所列^[1]。按相组成钛合金可分为:密排六

方结构(HCP)的 α 型钛合金(包括近 α 型合金)—即国内牌号 TA、两相混合的 $\alpha+\beta$ 型钛合金—即国内牌号 TC 和体心立方结构(BCC)的 β 型钛合金(包括近 β 型合金)—即国内牌号为 TB^[7]。

1.1 α 型钛合金

退火状态以 α 钛为基体的单相固溶体合金为 α 型钛合金,它主要含 Al、Sn 等元素。Al 能增加合金的抗拉和蠕变强度,减小钛合金的密度,提高比强度,是钛合金中重要的合金元素^[8-10]。为了最大限度地发挥铝的固溶强化作用,避免因过量 Al 引起合金脆化,高温钛合金的合金化工作应遵循 ROSENBERG^[11]提出的当量经验公式,只有这样才能保证合金在提高耐热强度的同时保持良好的热稳定性。 α 钛合金中的这些元素通过在相变温度下抑制相变或者提高相变温度而起到稳定作用。与 β 型钛合金相比, α 型合金具有良好的抗蠕变性能,强度、可焊性以及韧性,是高温

表 1 各国钛合金牌号对照^[1]

Table 1 Titanium grades comparison of different countries^[1]

Alloy type	China(GB)	Soviet Union (TOCT)	United States (ASTM)	United Kingdom (IMI)	Germany (BWB)	France (NF)	Japan (JIS)
Pure titanium	TA0	—	—	—	—	—	—
	TA1	BT1-0	Ti-35A	IMI115	LW3.7024	T-35	KS50
	TA2	BT1-1	Ti-50A	IMI125	LW3.7034	T-40	KS60
	TA3	BT1-2	Ti-65A	IMI135	—	—	KS85
α titanium alloy	TA4	48-T2	—	—	—	—	—
	TA5	48-OT3	—	—	—	—	—
	TA6	BT5	—	—	—	—	—
	TA7	BT5-1	Ti-5Al-2.5Sn	—	—	—	KS115
	TA8	BT10	Ti-5Al-2.5Sn	IMI317	TA5E	—	AS
β titanium alloy	TB1	BT15	—	—	—	—	—
	TB2	—	—	—	—	—	—
	TB3	—	—	—	—	—	—
$\alpha+\beta$ titanium alloy	TC1	OT4-1	—	—	—	—	ST-A90
	TC2	OT4	—	—	—	—	—
	TC3	BT6C	—	—	—	—	—
	TC4	BT6	—	—	LW3.7164	—	—
	TC5	BT3	Ti-6Al-4V	—	—	T-A6V	—
	TC6	BT3-1	—	—	—	—	—
	TC7	AT6	—	IMI315	—	—	—
	TC8	BT8	—	—	—	—	—
	TC9	—	—	IMI318	—	T-A6V6S2	—
	TC10	—	Ti-6Al-6V-2Sn	—	—	—	—

下使用的首选合金^[12]。同时, α 型合金不存在冷脆性, 它也适合在低温环境中使用, 扩大了其应用范围。 α 型合金锻造性较差, 容易产生锻造缺陷, 可通过减少每道次加工率和频繁热处理来控制锻造缺陷。 α 基体为稳定相, 对于给定成分合金而言, 其性能变化主要是晶粒大小的变化^[8], 因为屈服强度和抗蠕变强度均与晶粒大小、变形时储存的能量有关。 α 型钛合金不能通过热处理来提高强度^[13], 退火后强度基本无变化或少有变化。有些合金含有较多的 Al、Sn、Zr 及少量的 β 稳定元素(一般小于 2%)^[13]。尽管这些合金中含有 β 相, 但基体主要由 α 相组成, 在热处理敏感性和加工性能上都与 α 型合金很接近, 被称为近 α 型钛合金^[10]。近 α 型合金是在人们认识到采用固溶合金元素强化 α 基体可以得到高的蠕变强度基础上开发的, 大多数近 α 型合金因具有较好的热稳定性, 现在已成为高温钛合金的重要合金种类^[10]。它的强化机制是 β 相中原子扩散快, 易于发生蠕变^[13], β 稳定元素还有抑制 α 相脆化的作用(即延缓 α 中形成有序相的过程)^[14]。

常见的 α 型钛合金(包括近 α 型合金)有 Ti811 (Ti-8Al-1Mo-1V)^[15-18]、Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V^[19-21]、Ti-679 (Ti-2.25Al-11Sn-5Zr-1Mo-0.25Si)^[22-23]、BT18(Ti-7.7Al-11Zr-0.6Mo-1Nb-0.3Si)^[20]和 Ti6242S (Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si)^[21]等, 其成分和性能如表 2 所列。

1.2 $\alpha+\beta$ 型钛合金

为提高钛合金的强度和韧性, 人们研制出 $\alpha+\beta$ 型钛合金。与其他钛合金相比, $\alpha+\beta$ 合金中同时加入 α 稳定元素和 β 稳定元素, 使 α 和 β 相得到强化。 $\alpha+\beta$ 合金具有优良的综合性能, 如其室温强度高于 α 合金的, 热加工工艺性能良好, 可以进行热处理强化, 因此适用于航空结构件。 $\alpha+\beta$ 型钛合金退火组织为 $\alpha+\beta$

相^[24], β 相含量一般为 5%~40%^[25]。但其组织不够稳定, 使用温度最高只能到 500 °C, 焊接性能和耐热性低于 α 型钛合金。

$\alpha+\beta$ 型钛合金主要有 TC4(Ti-6Al-4V)^[26]、TC6 (Ti-6Al-1.5Cr-2.5Mo-0.5Fe-0.3Si)^[27-30]、TC11(Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si)^[30-33]、TC17(Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr)^[34-37]、TC19(Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo)^[38-40]和 TC21 (Ti-6.2Al-2.8Mo-2Nb-2Sn-2.1Zr-1.3Cr)^[41-45]等。其中 TC11 合金也被称为近 β 合金。ZHOU^[31]提出了一种 TC11 合金加工工艺, 先将合金在低于 β -转变温度 15° 下进行热处理, 随后快速水冷, 再经过高温和低温增韧强化热处理, 获得一种新的显微组织。这种新组织基体由 15%等轴 α 晶粒、50%~60%层状 α 晶粒和已转变完成的 β 晶粒组成。其研究结果显示该合金表现出较高的抗疲劳性能, 较长的蠕变疲劳寿命, 高韧性和优良的高温服役性能, 并且不降低塑性和热稳定性。并且对该新工艺和强韧化机理的实验原理进行了讨论。该加工工艺实际应用的关键问题就是对温度的准确控制。这种 TC11 钛合金加工工艺已应用于生产可靠的航空发动机压气机盘、旋转子和其他部件^[32-33]。

1.3 β 型钛合金

β 稳定元素含量足够高, 且固溶处理后快速冷却 β 相保留至室温得到的合金称为 β 型钛合金^[46-48]。按照稳定状态组织类型分类, β 钛合金可分为稳定型 β 钛合金, 亚稳型 β 钛合金, 如图 1 所示。在图 1 中, M_s 为马氏体相变温度线, β_c 为亚稳型合金的 β 稳定元素最低含量, β_s 为稳定型合金 β 稳定元素最低含量^[49]。 β 钛合金在固溶状态下冷成形性能良好, 而且淬透性和热处理响应性也优良。常用的热处理方法是先固

表 2 几种 α 型钛合金的性能

Table 2 Performances of several near α titanium alloys

Sample	Heat treatment	Working temperature/°C	Performance at room temperature			
			$\sigma_b/(N \cdot mm^{-2})$	$\sigma_{0.2}/(N \cdot mm^{-2})$	$\delta/\%$	$\psi/\%$
Ti-679 (Ti-2.25Al-11Sn-5Zr-1Mo-0.25Si)	Double annealing solution-aging	450	101.5	94.5	10	20
			112.5-123	98.6-108	10	30
Ti6242S (Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si)	Annealing solution-aging	500	91-94.5	94.5	10	—
			105-114	98.6-108	12	25
Ti-685 (Ti-6Al-5Zr-0.6Mo-1Nb-0.3Si)	Solution treatment and aging	500-550	99-108	84-94	8	15
BT18 (Ti-7.7Al-11Zr-0.6Mo-1Nb-0.3Si)	Annealing	550-600	100~120	95-115	10-16	24-25
Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V	Annealing	<350	70-90	55-65	10-26	25-55

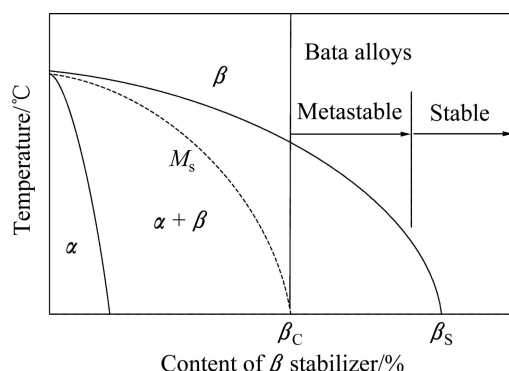


图1 β 稳定剂含量和钛合金相组成的关系^[46]

Fig. 1 Relationship between titanium alloy phase composition and β stabilizer^[46]

溶处理,然后在 450~650 °C 时效,合金原 β 基体上会析出细小的 α 相,形成弥散分布的第二相,这就是 β 合金的强化机理^[10]。由于 β 钛合金比其他类型钛合金在时效时析出更多的 α 相,含有更多的 α - β 相界面阻碍位错运动^[50],因此 β 钛合金的室温强度最高。

金属材料在变形和断裂过程中吸收能量的能力称为韧性,材料吸收的能量越多,韧性也就越好。断裂韧性是表示材料韧性的指标,反映材料对裂纹和其他尖锐缺陷扩展的抵抗能力。通常来说,钛合金的断裂韧性和强度呈反比趋势,即强度提高的同时断裂韧性下降。研究 β 钛合金在航空航天工业的应用,需要设计同时具备良好强度和断裂韧性的显微组织以及加工工艺和热处理制度。合金成分和显微组织是决定 β 钛合金断裂韧性的两个主要因素^[49]。合金成分决定合金中 β 相的数量,也决定合金的类型和断裂韧性。显微组织的形态、数量、体积同样影响合金断裂韧性的高低。付艳艳等^[50]认为 β 钛合金的 β 稳定元素和中型元素 Zr 可以提高合金的强度,降低断裂韧性。细小的 β 晶粒并不能有效提高时效态 β 钛合金的强度,会降低 Ti-15-3 合金的断裂韧性,但对 β -C 和 Ti-1023 合金的断裂韧性无明显影响。时效态 β 钛合金的强度主要取决于时效析出的次生 α 相的含量和尺寸,在含有同样初生 α 相的情况下,细小的次生 α 相可以显著提高合金的强度。初生 α 相的粗化以及初生相从球状转变为片状会导致 β 钛合金塑性降低,断裂韧性提高。 β 钛合金的双态组织具有良好的强度、塑性和韧性的匹配。 β 钛合金之所以得到广泛的应用,也是因为其时效后具有其他类型的钛合金无法比拟的高强度和高温塑性优势。同时, β 钛合金所具有的可热处理强化性和深淬透能力使得它逐渐代替 α + β 两相钛合金成为用于飞机机身和机翼的首选结构材料^[51],在航空航天工业中发

挥着越来越重要的作用。

2 航空用钛合金的发展及应用

20 世纪 50 年代,军用飞机进入超音速时代,原有的铝、钢结构已经不能满足新的需求,钛合金恰恰在这个时候进入了工业性发展阶段。钛合金因密度小、比强度高、耐蚀、耐高温、无磁、可焊、使用温度范围宽(-269~600 °C)等优异性能,而且能够进行各种零件成形、焊接和机械加工,在航空领域很快得到广泛应用。20 世纪 50 年代初期的军用飞机上开始使用工业纯钛制造后机身的隔热板、机尾罩、减速板等受力较小的结构件^[52]。20 世纪 60 年代,钛合金进一步应用到飞机襟翼滑轨、承力隔框、中翼盒形梁、起落架梁等主要受力结构件中。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。进入 20 世纪 80 年代后,民用飞机用钛逐步增加,并已超过军用飞机用钛。飞机越先进,钛用量越多。表 3~5 所列分别为美国第 3 代、第 4 代战斗机及先进轰炸机、运输机用钛材的质量分数^[53]、一般飞机使用的钛合金种类^[53]和空客飞机钛合金和复合材料的用量^[54]。由表 5 可知,空客 A380 飞机上的钛材使用量已达 10%,钛材已经成为现代飞机不可缺少

表3 美国第三代、第四代战斗机及先进轰炸机、运输机用材的质量分数^[53]

Table 3 Mass fraction of materials used in American battle plane advanced, bombing plane and aerotransport^[53]

Aircraft type	Service time	Mass fraction/%			
		Composite materials	Titanium alloy	Aluminum alloy	Steel
F16	1978	3	2	83	5
F-17Y	—	8	7	73	10
F/A 18A/B	1980	9.5	12	50	15
F/A18C/D	1986	10	13	50	16
F/A18E/F	2002	23	15	29	14
F/A22	2005	24	41	15	5
F35	2008	36	27	—	—
B-1	1986	29	21	41	9
B2	1991	38	26	19	6
C5	1970	—	6	—	—
C17	1992	8.1	10.3	69.3	12.3

表 4 一般飞机使用的钛合金^[53]

Table 4 Titanium alloys use in aircraft ^[53]	
Alloy type	Chemical composition
α (near α) titanium alloy	Pure titanium
	Ti-3Al-2.5V
	Ti-5Al-2.5Sn
	Ti-8Al-1Mo-1V
	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-Si(0.1-0.25)
	Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Nb-0.25Mo-0.3Si(IMI829)
	Ti-5.5Al-4Sn-4Zr-0.3Mo-1Nb-0.5Si-0.006C(IMI834)
$\alpha+\beta$ titanium alloy	Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0.5Mo-0.35Si-0.06C (IMI884)
	Ti-6Al-2.75Sn-4Zr-4Mo-0.45Si(Ti-1100)
	Ti-6Al-4V (four kinds of heat treatment were used)
	Ti-6Al-6V-2Sn
β titanium alloy	Ti-6Al-2Sn-2Cr-2Mo-2Cr-Si
	Ti-6Al-2Sn-2Zr-6Mo
	Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr(Ti-17)
β titanium alloy	Ti-13V-11Cr-3Al
	Ti-10V-2Fe-3Al
	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn
	Ti-15Mo-2.7Nb-3Al-0.2Sn(Timetel21S)
	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr(β -C)

表 5 空客飞机钛合金和复合材料的用量^[54]

Table 5 Titanium alloys and composite materials used in aerial plane ^[54]		
Aircraft type	Mass fraction/%	
	Titanium alloy	Composite materials
The third generation of aircraft-A320	4.5	5.5
The fourth generation of aircraft-A340	6	8
A380	10	25

表 6 各国飞机发动机用钛合金^[57]

Table 6 Titanium alloys used for aircraft engines from different countries ^[57]								
Country	350 °C	400 °C	450 °C	500 °C	550 °C	600 °C	650 °C	Burn resistant titanium alloy
China	TC4	TC16 TC17	TA11	TC11 TA7 TA15	TA12	Ti60	TD3(Ti ₃ Al) Ti ₂ AlNb	Ti40
Russia	BT6 BT22	BT3-1	BT8M	BT9 BT20	BT25	BT18y BT36	—	BTT-1 BTT-3
Europe and USA	Ti-64	Ti-6246 IMI550 Ti-17	IMI679 Ti-811	IMI685 Ti-6242	Ti-6242S IMI829	IMI834 Ti-1100	Ti-25Al-10Nb-3V-1Mo	Alloy-C

的结构材料。根据用途不同, 可将航空用钛合金分为飞机发动机用钛合金、飞机机身用钛合金和航空紧固件用钛合金。近年来, 人们对航空用钛合金在上述 3 个方面的应用进行了深入研究。

2.1 航空发动机用钛合金

发动机是飞机的核心。发动机的风扇、高压压气机盘件和叶片等转动部件, 不仅要承受很大的应力, 而且要有一定的耐热性。这样的工况条件对铝来说温度太高; 对钢来说密度太大。钛是最佳的选择, 钛在 300~650 °C 温度下具有良好的抗高温强度、抗蠕变性和抗氧化性能。同时, 发动机的一个重要性能指标是推重比^[55], 即发动机产生的推力与其质量之比。最早发动机的推重比为 2~3, 现在能够达到 10^[8]。推重比越高, 发动机性能越好。使用钛合金替代原镍基高温合金可使发动机的质量降低^[7], 大大提高飞机发动机的推重比。钛在飞机发动机上的用量越来越多。在国外先进航空发动机中, 高温钛合金用量已占发动机总质量的 25%~40%, 如第 3 代发动机 F100 的钛合金用量为 25%, 第 4 代发动机 F119 的钛合金用量为 40%^[56]。

航空发动机部件要求钛合金在室温至较高的温度范围内具有很好的瞬时强度、耐热性能、持久强度、高温蠕变抗力、组织稳定性。 β 型和近 β 型钛合金尽管在室温至 300 °C 左右具有高的拉伸强度, 但在更高的温度下, 合金的蠕变抗力和耐热稳定性急剧下降^[56], 所以 β 型钛合金很少用于飞机发动机。 α 型和近 α 型钛合金具有良好的蠕变、持久性能和焊接性, 适合于在高温环境下使用。 $\alpha+\beta$ 型钛合金不仅具有良好的热加工性能, 而且在中高温环境下还具有良好的综合性能。因此, α 型、近 α 型和 $\alpha+\beta$ 型钛合金被广泛应用于航空发动机。表 6 所列世界各国研制的飞机发动机用钛合金^[57]。

目前,航空发动机用高温钛合金的最高工作温度已由 350 °C 提高到 600 °C^[57],能够满足先进发动机对材料的需求。经过世界各国钛合金研究者半个世纪的努力,研制出 Ti811(Ti-8Al-1Mo-1V)^[17]、Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V^[21]、Ti-679(Ti-2.25Al-11Sn-5Zr-1Mo-0.25Si)^[18]、TC6(Ti-6Al-1.5Cr-2.5Mo-0.5Fe-0.3Si)^[29]、TC17(Ti-5Al-4Mo-4Cr-2Sn-2Zr)^[33-36]、TC19(Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo)^[38-40]、TC21(Ti-6.2Al-2.8Mo-2Nb-2Sn-2.1Zr-1.3Cr)^[41-45]、Ti1100(Ti-6Al-2.75Sn-4Zr-4Mo-0.45Si)^[58]、IMI834(Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0.5Mo-0.35Si-0.06C)^[59]等合金。

Ti811(Ti-8Al-1Mo-1V)合金具有密度低、弹性模量高、振动阻尼性能优良、热稳定性好、焊接性能和成型性能好等诸多优点^[17],其比刚度是所有工业钛合金中最高的。赵永庆等^[15]对 Ti811 合金热稳定性^[15, 23]和高温疲劳性能等问题进行深入研究,研究显微组织和试样表面状态对 Ti811 合金热稳定性性能的影响。结果表明:具有等轴组织和双态组织的 Ti811 合金有很好的热稳定性;针状组织的存在使 Ti811 合金热稳定性性能恶化。此外,研究认为 Ti811 合金在 425 °C 热暴露下,表面氧化层及暴露时间对合金的热稳定性没有明显影响。高广睿等^[17]利用高频疲劳实验机和自制高温微动疲劳装置研究温度、位移幅度、接触压力等因素对 Ti811 钛合金高温微动疲劳(FF)行为的影响。结果表明:在 350 °C 和 500 °C 的高温下, Ti811 合金微动疲劳敏感性随着温度的升高微动疲劳的敏感性增强,蠕变是高温下 Ti811 合金 FF 失效的重要影响因素,位移幅度变化影响疲劳应力因素和磨损在 FF 过程中所起作用 and 机制。

Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V 是前苏联 20 世纪 60 年代研制成功的一种通用性合金,该合金能够在 300~500 °C 温度下工作,主要用于生产飞机发动机匣。OUYANG 等^[21]在研究 Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V 钛合金不同温度和应变速率下的再结晶行为方面做了大量工作。研究结果表明:在变形温度高于 1050 °C、应变速率低于 0.01 s⁻¹ 时,合金的动态再结晶机制以不连续动态再结晶为主;在变形温度低于 1050 °C、应变速率高于 0.01s⁻¹ 时,合金的动态再结晶机制以连续动态再结晶为主,同时存在少量的不连续动态再结晶。此外, Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V 合金相变时的位向关系与其他钛合金有所不同,HE 等^[19]对影响该合金相变位向关系的因素进行研究。结果表明:外部因素(如变形应力、应变速率和冷却速率)在 $\beta \rightarrow \alpha$ 阶段转换遵守 Burgers 位向转换规则。然而,应变速率和冷却速率能显著影响 α 沉淀相的形态。

Ti-679 合金为低铝高锡,再添加锆、钼、硅等合

金元素而得到的,可用作发动机高压压气机叶片和盘。在它的合金元素中,铝的作用是提高合金强度,但易导致塑性变差,用低铝高锡配合,可以获得较好的塑性和强度;钼的作用是避免形成过多的 β 相,使蠕变强度下降;而锆的作用是补充强化 α 相^[18]。Ti-679 合金的抗蠕变性能和热稳定性都比较好,其工作温度可达 450 °C。

TC6 钛合金的热强性和热稳定性良好,它在高温下的力学行为与微结构的变化引起全世界研究者的广泛关注。白新房等^[32]对 TC6 钛合金进行 990 °C 保温热处理,研究保温过程中氧原子、合金元素分布变化对内表层组织及硬度的影响。结果表明:在 990 °C 热处理后试样内表层富氧 α 层从边部到基体内部显微硬度呈现低-高-低的变化规律,在距边部约 55 μm 处达到最大值 449 HV1。内表层显微硬度的变化是由于氧化作用而导致内表层合金元素分布变化和氧原子的富集引起的。孙坤等^[29]研究 4 种典型组织 TC6 钛合金试样在高应变率加载条件($1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$)下的动态力学行为。结果表明:不同组织 TC6 钛合金的流变应力随应变增加快速增加。

TC17 钛合金是一种富 β 稳定元素的过渡型两相钛合金,该合金在中温(300~450 °C)具有抗蠕变性能高,淬透性好、断裂韧度高等优点,广泛用于制造航空发动机风扇盘、压气机盘。作为两相钛合金,TC17 可以通过热处理调整其显微组织,进而提高综合力学性能^[33-35],其标准热处理工艺为^[36]: (840 °C, 1 h AC)+(800 °C, 4 h WQ)+(630 °C, 8 h ACTC4)。孙晓敏等^[37]研究激光熔化沉积 TC17 钛合金原态及固溶时效后的显微组织。结果表明:当固溶温度从 800 °C 升高到 835 °C 时,初生 α 相体积分数由 53% 减少到 34%,时效后相片层显著增粗,宽 0.7~0.8 μm ,次生 α 相含量伴随固溶温度升高逐渐增多。TC19 钛合金是 20 世纪美国开发的一种富 β 的 $\alpha+\beta$ 型钛合金,是在 Ti-6242 合金(Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo)基础上发展而来,是一种高强度高韧性钛合金。与 Ti-6242 合金相比,TC19 钛合金提高 Mo 含量,使室温和高温拉伸性能得到改善^[38]。而 Sn 和 Zr 的加入,使该合金的相变行为变得非常缓慢^[39]。朱宝辉等^[37]研究不同锻造工艺制备的 TC19 钛合金棒材。结果表明:常规锻造工艺和高-低-高锻造工艺均可用来锻造 TC19 合金棒材,但采用高-低-高锻造工艺得到的棒材的力学性能优于常规锻造工艺。

TC21 合金是我国自行研制的具有独立知识产权的新型两相高强韧钛合金^[41],在航空、航天领域作为重要的结构材料使用。人们对该合金的冷却速度、热处理和组织性能的关系先后展开了较多研究^[42-45]。王

义红等^[42]提出:当冷却速率大于 122 e/s 时, β 相转变形成正交马氏体,冷却速率介于 122~3 °C/s 之间时,发生块状转变,冷却速率继续降低,相变由扩散控制,形成两种不同形貌的魏氏体片层。宋颖刚等^[43]的研究结果表明:TC21 钛合金表面经喷丸强化后,在表层形成一个弹塑性变形层。强化过程中由于密排六方晶体的基面、柱面和锥面滑移系的开动造成位错密度升高, A 相中位错形貌呈现网状;强化前纳米压痕硬度为 3.2 GPa,强化后为 6.7 GPa,提高 1 倍以上。在强化层内形成很高的宏观残余压应力,并且表现为由表面向里逐渐减少的梯度变化。强化层深度达到 370 μm 。宫旭辉等^[44]研究 TC21 钛合金的高温动态拉伸力学行为。结果表明:当应变速率为 0.001 和 0.05 s^{-1} 的屈服应力-温度曲线存在转折点,且转折点温度随应变速率的增大而升高;当温度低于转折点温度时,相同氧含量的 TC21 钛合金和多晶纯钛的屈服应力具有相似的温度相关性。曲恒磊等^[45]对 TC21 钛合金进行应变速率为 0.01~50 s^{-1} 、温度为 973~1373 K 的压缩试验后得出结论,在试样的不同部位存在变形组织的不均匀现象,该合金在不同温度区域变形时分别发生重结晶和动态再结晶。重结晶导致晶粒粗化(尺寸约 100~200 μm)。而动态再结晶导致晶粒细化(最小尺寸为 1~2 μm)。

以上几种合金为常规航空发动机用钛合金,其使用温度均在 650 °C 以下。目前实用性能耐热钛合金是 Ti1100 和 IMI834,它们已经分别应用于 EJ2000 和 55-712 改型发动机。由于“钛火”事故的出现,阻燃钛合金越来越受到人们的关注^[60-63]。美、俄等国进行了阻燃性能良好新型钛合金的研制^[60-63]。由美国普惠公司研制的高强阻燃钛合金 Alloy C,已用作 F119 发动机的矢量喷口零件,该合金的名义成分为 Ti-35V-15Cr(质量分数, %),合金中含大量昂贵金属钒,再加上 Alloy-C 合金铸锭热变形工艺要采用一些专用设备,进一步提高了材料价格^[63]。俄国对成本较低的 Ti-Cu 合金进行了研究,并报导了 BT25 和 BT36 合金^[57]。中国科研工作者^[7, 26, 53, 58-59]对前人的发动机用钛合金研究工作进行过系统总结和中肯评价。

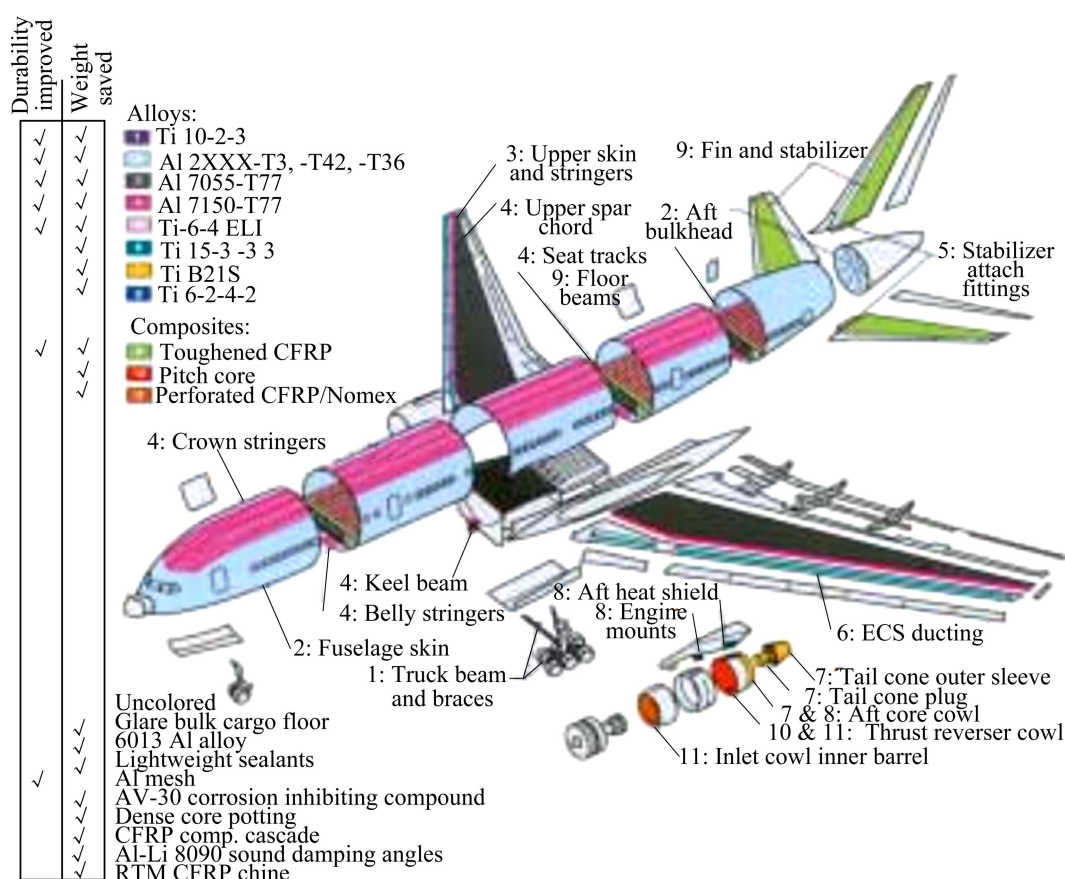
2.2 飞机机身用钛合金

飞机发动机要求所用合金热强度、比强度好,而机身则要求合金在中等温度下具备强度好、耐腐蚀、质轻等优良特性。钛合金能很好的达到这些要求,采用钛合金做机身材料有以下 5 方面优势:1) 替代钢和镍基高温合金可大大降低飞机质量。高推重比让钛合金能够替代强度稍好的钢而用于飞机零部件中。2) 能

够满足飞机强度要求。与铝合金相比,60%左右质量的钛合金即可达到相同的强度。在使用温度超过 130 °C 时,钛合金能取代铝合金,因为这一温度是传统铝合金的极限适用温度。3) 耐腐蚀性良好。大部分飞机支撑机构在厨房、厕所下面,很容易产生腐蚀,钛合金不需要表面防腐涂层或者镀膜。4) 与聚合物复合材料电化学相容性好。5) 空间的限制,替代钢和铝合金。因空间限制而使用钛合金的典型例子是波音 747 的钛合金起落架梁^[64]。这种梁是最大的钛合金锻件,尽管其他合金(比如 7075 铝合金)成本更低,但承载需要质量时,铝合金起落架体积超出机翼范围而不符合要求。钢的强度足可以承载质量,但它会使飞机质量大大增加。图 2 所示是波音 777 飞机机身使用材料示意图^[65]。在飞机机身中应用较广泛的钛合金有 β -21S(Ti-15Mo-3Al-2.7Nb-0.25Si)^[66]、Ti-10-2-3(Ti-10V-2Fe-3Al)^[67]、Ti-15-3(Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn)^[67]、Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr^[68]等。BOYER^[67]曾就钛合金在机身的应用情况进行过总结,本文作者仅讨论前两种合金。

β -21S(Ti-15Mo-3Al-2.7Nb-0.25Si)合金是美国 Timet 公司为国家航天飞机开发的,可制成带材,具有抗氧化性,可作为复合材料来使用。它具有较好的高温特性,并比 Ti-6-4 具有更好的抗蠕变性能(一般 β 合金在高温环境下抗蠕变性并不好)。 β -21S 已被波音和 P&W 用在瞬时 650 °C 的高温环境,它的持续工作温度是 480~565 °C^[66]。 β -21S 合金的突出优点在于它可以较好地抗高温液压机液体腐蚀。这种液压机液体是一种少数能在航天环境下腐蚀钛合金的物质,在超过 130 °C 时会分解并形成一种含有机金属的磷酸,会腐蚀钛合金,更重要的是会使含有大量氢的发动机泵产生严重的脆裂。 β -21S 是唯一一种能抵抗这种腐蚀剂的金属^[69-70],这是因为 β -21S 含有钼和铌,可用于引擎机舱和喷射引擎部位(原先使用钢或镍基合金)。此外, β -21S 可减少质量,用于制造波音 777 的 3 种引擎(P&W4084, GE90 和 Trent800)中的喷嘴、塞子、蒙皮和各种纵梁结构,这些可以为每架飞机减少质量 74 kg。

Ti-10-2-3(Ti-10V-2Fe-3Al)是迄今为止应用最为广泛的一种高强韧近 β 钛合金,最早也由美国 Timet 公司在 1971 年研制而成。它是一种为适应损伤容限性设计原则而产生的高结构效益、高可靠性和低成本的锻造钛合金, V 和 Fe 为主要的 β 稳定元素。为了提高合金的锻造性能和断裂韧性, Fe 的含量低于 2%, O 的含量限制在 0.13% 以下。该锻件抗拉强度可达 1190 MPa,为满足不同需求采取不同加工方法和热处理工艺,用 Ti-10-2-3 可为每架飞机减少质量 270 kg。波音

图 2 波音 777 飞机机身使用材料示意图^[65]Fig. 2 Schematic diagram of advanced materials on fuselage of Boeing 777^[65]

公司生产飞机时选择高强度合金并最大限度减少质量, 该钛合金是波音 777 中用量最大的 β 钛合金^[66], 该种飞机起落架几乎全部由该合金制成, 仅内、外气缸和轮轴由 4340 M 制成(强度为 1895 MPa)。空客 A380 的主起落架支柱也是采用的 Ti-10-2-3 合金。该合金还具有很好的抗疲劳性能, 还能消除用钢时产生的应力腐蚀开裂。McDonnell Douglas 采用 Ti-10-2-3(1105 MPa)制成货舱门、引擎机舱、尾翼以及 C-17 运输机的其他部分。Ti-10-2-3 在疲劳强度方面的优势也使其广泛应用于直升机。Bell, Westland, Sikorsky 和 Eurocopter 等公司都采用 Ti-10-2-3 合金做他们的转子系统^[9]。

2.3 航空紧固件用钛合金

不论军民用飞机还是航天器上, 除了金属构件还有很多碳纤维复合材料。钛与碳纤维复合材料的电极电位相近, 钛合金又成为复合材料惟一的连接材料。因此, 随着先进军民用飞机钛合金和复合材料用量的不断增加, 对钛合金紧固件的需求日益加大。钛合金用作航空紧固件, 至少具备以下 4 点优势^[71-72]: 1) 减

重效果好。俄罗斯的一架伊尔-96 飞机用紧固件 14.2 万件, 可减少质量近 600 kg。我国航空航天系统钛合金紧固件的使用也有明显的减重效果。飞机和航天器减少质量后, 可以提高推力、增加射程、节省燃料、减少发射费用等。2) 钛合金优异的耐腐蚀性能, 尤其是它正电位与碳纤维复合材料匹配, 可以有效防止紧固件发生电偶腐蚀。3) 在飞机结构中, 紧固件部位因温度较高, 不能采用铝合金, 只能使用钛合金。4) 钛具有良好弹性和无磁, 对于防止紧固螺栓的松动和防磁场干扰至关重要。

现代飞机采用多种钛合金紧固件主要有普通钛螺栓、干涉螺栓、特种紧固件等^[70]。美国、法国等航空发达国家, 95% 以上的钛合金紧固件都采用 Ti-6Al-4V(TC4)材料制造^[71]。除此之外, 还有 TB2、 β_{III} 、Ti-44.5、Ti-15-3(TB5)、TB8 和 TB3, 其典型性能参数如表 7 所列^[70-74]。

Ti-6Al-4V(TC4)合金 β 稳定系数最低, 为 0.27。它的优点是密度最低, 强度和疲劳性能良好, 合金成分简单, 半成品成本最低。但由于室温塑性没有达到足够高, 所以加工紧固件时需要采用感应加热进行热

表 7 紧固件用钛合金的部分典型性能参数^[70-74]

Table 7 Typical performance parameters of fastener titanium alloys^[70-74]

Material	β -stabilizing factor K_β	Equivalent Al-value	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	Heat treatment	Maximum long term working temperature/ °C	Fatigue property			
						K_t	R	N/cycle	σ_D/MPa
TC4	0.27	6	4.44	M	400	—	—	—	—
				STA		1	0.1	1×10^7	727
TB16	0.83	3	4.68	M	350	—	—	—	—
				STA		1	0.1	5×10^6	955
						3	0		187
β_{III}	1.15	2.5	5.10	ST	—	—	—	—	—
				STA	370	—	—	—	—
Ti-44.5	1.24	0	5.83	M	425	—	—	—	—
Ti-15-3 (TB5)	1.43	3	4.77	ST	200	—	—	—	—
				STA	290	—	—	—	—
TB8	1.57	3	4.93	ST	200	—	—	—	—
				STA	450	1	0.1	1×10^7	628
						3			271
TB2	1.97	3	4.83	ST	200	—	—	—	—
				STA	300	—	—	—	—
TB3	1.73	3.5	4.84	ST	200	—	—	—	—
				STA	300	1	0.1	10^7	584

锻造成形，以及真空固溶处理和时效处理加工成本较高^[73]。TB2、TB3、TB8 和 TB16 为亚稳型 β 钛合金， β 稳定系数均比合金高，缺点是密度较高，强度虽与 Ti-6Al-4V 相当，但疲劳性能不如 Ti-6Al-4V，而且成分复杂，半成品成本高。由于同样需要进行真空时效处理，所以成品紧固件的成本还要高于 Ti-6Al-4V。

3 存在的问题与前景展望

钛是一种性能优异而又储量丰富的金属，有“现代金属”的美称，经过半个世纪的发展，钛合金制备技术和应用研究都取得了很大进展，在航空领域中尤其得到广泛的应用。但存在的一些问题也逐渐暴露出来，航空用钛合金进一步发展面临着不小的挑战，主要表现在以下 3 个方面：

1) 用量方面。不论是军民用飞机或航空器中，钛合金用量高低直接反应出一个国家的航空水平。目前航空发动机钛用量都较低，要进一步提高至 50% 左右，其难度仍相当大。

2) 性能方面。与其他航空结构材料一样，高性能

是要求具有良好的性能匹配，即必须综合考虑其力学性能、物理性能、化学性能、工艺性能和缺陷的可控性。现有的钛合金在 600℃ 以上，蠕变抗力和高温抗氧化性的急剧下降是限制钛合金扩大应用的两大主要障碍。本文作者认为，在整个航空钛合金技术发展和应用过程中，新的制造技术将会是开发和研究的重点，如超塑成形等近净型加工、粉末冶金成型法等。

3) 成本方面。目前人们在降低成本航空钛合金方面虽然取得了一些成就，但仍有许多领域有待研究和开发。以阻燃钛合金为例，美国发明的 Alloy-C 虽然具有优良的阻燃特性和高温力学性能，但由于它需要添加大量昂贵的 V 和较差的可锻性而导致价格很高，因此只有在 F119 发动机中正式应用。由于管理和技术落后等原因，国内钛合金产品价格在国际上竞争力差，在国内不利于进一步扩大应用。因此，首先必须认真研讨降低钛产品成本的途径，确定近、中、长期发展规划。其次，我国应建立自己的钛合金体系，确保每一用途有多种合金备选，逐步摆脱航空关键材料对国外的长期依赖，形成主干材料或通用材料，从根本上为实现低成本制造奠定基础。最后，用价格较低的元素取代贵的合金元素，通过工艺途径降低钛合金零部

件的成本,是今后钛合金研究工作中的重要课题。

综上所述,钛合金推重比大、韧性高、强度和可焊接性好,是一种综合性能优良的航空材料。在过去几十年中,航空用钛合金的合金化理论、综合强化技术和热处理工艺均得到了很大发展。目前,钛合金的研究主要集中在高温下热稳定性、蠕变抗力和低成本的钛合金设计及制造工艺等方面。随着研究的深入,将以航空高端应用带动钛合金低成本加工的技术进步,从而在根本上突破制约航空用钛合金用量和应用水平提升的成本瓶颈。全钛制造的飞机也许在不远的将来即会成为现实。

REFERENCES

- [1] 张喜燕,赵永庆,白晨光.钛合金及应用[M].北京:化学工业出版社,2005.
ZHANG Xi-yan, ZHAO Yong-qing, BAI Chen-guang. Titanium alloy and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [2] 邓 炬. 钛与航空[J]. 钛工业进展, 2004, 21(2): 6.
DENG Ju. Titanium and aerospace[J]. Titanium Industry Progress, 2004, 21(2): 6.
- [3] 逯福生,何 瑜.世界钛工业现状及今后发展趋势[J]. 钛工业进展, 2001, 5: 1-5.
LU Fu-sheng, HE Yu. The present situation of titanium industry and development trend in the future[J]. Titanium Industry Progress, 2001, 5: 1-5.
- [4] 逯福生,何 瑜.世界钛工业现状及今后发展趋势[J]. 世界有色金属, 2000, 12: 16-21.
LU Fu-sheng, HE Yu. The present situation of titanium industry and development trend in the future[J]. World Nonferrous Metals, 2000, 12: 16-21.
- [5] 刘 彬,刘延斌,杨 鑫,刘 咏. TITANIUM 2008: 国际钛工业,制备技术与应用的发展现状[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2009, 14(2): 67-73.
LIU Bin, LIU Yan-bin, YANG-Xin, LIU Yong, TITANIUM 2008: the international titanium industry, preparation technology and application development[J]. Powder Metallurgy Materials Science and Engineering, 2009, 14(2): 67-73.
- [6] 赵永庆,奚正平,曲恒磊.我国航空用钛合金材料研究现状[J]. 航空材料学报, 2003, 23(1): 215-219.
ZHAO Yong-qing, XI Zheng-ping, QU Heng-lei. The current research of aerospace titanium alloy materials in China[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003, 23(1): 215-219.
- [7] 李重河,朱 明,王 宁,鲁雄刚,程申涛.钛合金在飞机上的应用[J]. 稀有金属, 2009, 33(1): 84-91.
LI Chong-he, ZHU Ming, WANG Ning, LU Xiong-gang, CHENG Shen-tao. The application of titanium alloy in the plane[J]. Rare Metals, 2009, 33(1): 84-91.
- [8] SHI Z F, GUO H Z, HAN J Y, YAO Z K. Microstructure and mechanical properties of TC21 titanium alloy after different heat treatment[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(10): 2882-2889.
- [9] ZHU Jing-chuan, WANG Yang, LIU Yong, LAI Zhong-hong, ZHAN Jia-jun. Influence of deformation parameters on microstructure and mechanical properties of TA15 titanium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(S): s490-s494.
- [10] 武宏让. 航空用钛合金[J]. 钛工业进展, 2000, 2(1): 30-31.
WU Hong-rang. Aerospace titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2000, 2(1): 30-31.
- [11] ROSENBERG H W. Ti-15-3: A new cold-formable sheet titanium alloy[J]. Journal of Metals, 1983, 11(2): 30-33.
- [12] 韩传玺. 高温钛合金的研制现状及前景[J]. 稀有金属材料与工程, 1986, 1: 30-36.
HAN Chuan-xi. The progress and prospect of high temperature titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1986, 1: 30-36.
- [13] INABA T, AMEYAMA K, TOKIZANE M. Formation of ($\alpha+\beta$) Micro duplex Structure in a Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al alloy[J]. ISIJ International, 1991, 31(8): 792-798.
- [14] KURODA T, HORINOCHI T, IWAGI O. Microstructure in weld heat-affected zone of beta titanium alloy[J]. Materials, Metallurgy & Weldability, 2012.
- [15] 赵永庆,全桂彝. Ti811 合金的热稳定性能[J]. 稀有金属材料与工程, 1997, 26(3): 35-39.
ZHAO Yong-qing, QUAN Gui-yi. Thermal stability of Ti811 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1997, 26(3): 35-39.
- [16] 朱康英,赵永庆,李佐臣,全桂彝,王玮琪,王 稿,王小朝. Ti811 合金在不同温度和时间下的蠕变性能[J]. 中国有色金属学报, 1998, 8(2): 76-79.
ZHU Kang-ying, ZHAO Yong-qing, LI Zuo-chen, QUAN Gui-yi, WANG Wei-qi, WANG Gao, WANG Xiao-chao. The creep properties of Ti811 alloy under different temperature and time[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1998, 8(2): 76-79.
- [17] 高广睿,刘道新,张晓化. Ti811 合金的高温微动疲劳行为[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(1): 38-43.
GAO Guang-rui, LIU Dao-xin, ZHANG Xiao-hua. The high temperature of Ti811 alloy micro fatigue behavior[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(1): 38-43.
- [18] 王 非,王悔改. Ti811 合金的高温氧化行为[J]. 铸造技术, 2011, 32(4): 507-510.
WANG Fei, WANG Hui-gai. High temperature oxidation behavior of Ti811 alloy[J]. Casting Technology, 2011, 32(4): 507-510.
- [19] HE D, ZHU J C, ZAEFFERER S, RAABE D, LIU Y, LAI Z L, YANG X W. Influences of deformation strain, strain rate and cooling rate on the burgers orientation relationship and variants

- morphology during $\beta \rightarrow \alpha$ phase transformation in a near α titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 549(15): 20–29.
- [20] CHANDRAVANSI V K, SARKAR R, GHOSAL P, KAMAT S V, NANDY T K. Effect of minor additions of boron on microstructure and mechanical properties of as-cast near α titanium alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2010, 41(4): 936–946.
- [21] OUYANG D L, WANG K L, CUI X. Beta forging dynamic recrystallization of Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(4): 762–767.
- [22] LOUZGUINE D V, KATO H, INOUE A. High strength and ductile binary Ti-Fe composite alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2004, 384(1): L1–L3.
- [23] 赵永庆, 朱康英, 李佐臣. Ti811 合金棒材的热稳定性性能[J]. 材料开发与应用, 1995, 10(2): 16–19.
- ZHAO Yong-qing, ZHU Kang-ying, LI Zuo-chen. Thermal stability properties of Ti811 alloy bars[J]. Materials Development and Application, 1995, 10(2): 16–19.
- [24] 敖宏, 惠松晓, 叶文君, 王希哲. 高强度, 高韧性, 高模量钛合金研究进展[J]. 金属学报, 2002, 38(z1): 22–24.
- AO Hong, HUI Song-xiao, YE Wen-jun, WANG Xi-zhe. High strength, high toughness, and high modulus of titanium alloy research progress[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(z1): 22–24.
- [25] LI J S, LI F H, LEI L, XIAO H Y, ZHAN G F, DIAN Y G. Re-bronzing below beta transoms temperature on TC4 titanium alloy surface[J]. Advanced Materials Research, 2013, 75(3): 651–654.
- [26] 付艳艳, 宋月清, 惠松晓, 米绪军. 航空用钛合金的研究与应用进展[J]. 稀有金属, 2006, 30(6): 850–855.
- FU Yan-yan, SONG Yue-qing, HUI Song-xiao, MI Xu-jun. Research and application of typical aerospace titanium alloys[J]. Rare Metals, 2006, 30(6): 850–855.
- [27] 徐媛, 孙坤, 钟卫, 向文丽, 刘霖. α 相与 β 相比例对TC6钛合金力学性能的影响[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2012, 34(3): 320–323.
- XU Yuan, SUN Kun, ZHONG Wei, XIANG Wen-li, LIU Lin. Alpha and beta facies ratio on the influence of mechanical behavior of TC6 titanium alloy[J]. Journal of Yunnan University: Natural Science Edition, 2012, 34(3): 320–323.
- [28] 朱知寿, 王庆如, 周宇, 王新南. TC6钛合金棒材热处理工艺研究[J]. 航空材料学报, 2004, 24(5): 15–20.
- ZHU Zhi-shou, WANG Qing-ru, ZHOU Yu, WANG Xin-nan. TC6 titanium alloy rod heat treatment process study[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2004, 24(5): 15–20.
- [29] 孙坤, 徐媛, 刘晋豪. TC6钛合金4种典型组织的动态力学行为研究[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2012, 34(2): 185–190.
- SUN Kun, XU Yuan, LIU Jin-hao. The dynamic mechanical behavior of four typical TC6 titanium alloy organization[J]. Journal of Yunnan University: Natural Science Edition, 2012, 34(2): 185–190.
- [30] 曹春晓. 选材判据的变化与高损伤容限钛合金的发展[J]. 金属学报, 2002, 38(S): 4–11.
- CAO Chun-xiao. Change of material selection criterion and development of high damage-tolent titanium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(S): 4–11.
- [31] ZHOU Y G, ZENG W D, YU H Q. An investigation of a new near-beta forging process for titanium alloys and its application in aviation components[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 393(1): 204–212.
- [32] 白新房, 魏玉鹏, 辛社伟, 石新层, 贾峰. 热处理对TC6钛合金内表层组织及硬度的影响[J]. 金属热处理, 2010, 35(1): 106–109.
- BAI Xin-fang, WEI Yu-peng, XIN She-wei, SHI Xin-ceng, JIA Feng. The influence of heat treatment on surface within the organization and the hardness of TC6 titanium alloy[J]. Metal Heat Treatment, 2010, 35(1): 106–109.
- [33] TEIXEIRA J D, APPOLAIRE B, AEBY-GAUTIER E. Transformation kinetics and microstructures of Ti17 titanium alloy during continuous cooling[J]. Materials Science and Engineering, 2007, A448(1/2): 135–145.
- [34] 张翥, 路刚, 惠松晓. 固溶处理后冷却速度对TC17合金显微组织和性能的影响[J]. 金属学报, 2002, 38(9): 101–104.
- ZHANG Zhu, LU Gang, HUI Song-xiao. The effect of cooling speed after solid solution treatment on the microstructure and properties of TC17 alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(9): 101–104.
- [35] 王俊伟, 陈静, 刘彦红. 激光立体成形TC17钛合金显微组织研究[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 847–851.
- WANG Jun-wei, CHEN Jing, LIU Yang-hong. The microstructure research of laser solid forming TC17 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(3): 847–851.
- [36] 工程材料实用手册编辑委员会. 工程材料实用手册, 钛合金&铜合金[M]. 2版. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- Engineering materials and practical manual editing committee. Engineering materials and practical manual, titanium alloy and copper alloy[M]. 2nd ed. Beijing: China Standard Press, 2001.
- [37] 孙晓敏, 刘栋, 汤海波, 王华明. 固溶时效对激光熔化沉积TC17钛合金显微组织的影响[J]. 热加工工艺, 2012, 41(14): 226–229.
- SUN Xiao-min, LIU Dong, TANG Hai-bo, WANG Hua-ming. The effect of solid solution aging of laser melting deposition on microstructure of TC17 titanium alloy[J]. The Influence of Hot Working Process, 2012, 41(14): 226–229.
- [38] 朱宝辉, 赵洪章, 沈立华, 任丽萍, 刘守田, 王培军, 王小青. TC19钛合金棒材的研制[J]. 钛工业进展, 2012, 29(3): 26–28.
- ZHU Bao-hui, ZHAO Hong-zhang, SHEN Li-hua, REN Li-ping,

- LIU Shou-tian, WANG Pei-jun, WANG Xiao-qing. The preparation of TC19 titanium alloy rod [J]. Titanium Industry Progress, 2012, 29(3): 26–28.
- [39] WOOD R A, FAVOR R J. 钛合金手册[M]. 刘静安, 吴煌良. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1983: 46–47.
- WOOD R A, FAVOR R J. Titanium alloy handbook[M]. LIU Jing-an, WU Huang-liang. Chongqing: Chongqing Science and Technology Literature Press Bureau, 1983: 46–47.
- [40] 陈振华. 钛与钛合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 369.
- CHEN Zhen-hua. Titanium and titanium alloy[M]. Beijing: Chemical Technology Press, 2005: 369.
- [41] 费玉环, 周 廉, 曲恒磊. 两相区热处理对 TC21 钛合金显微结构的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36: 1928–1932.
- FEI Yu-huan, ZHOU Lian, QU Heng-lei. The influence of two phase heat treatment on TC21 titanium alloy microstructure[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36: 1928–1932.
- [42] 王义红, 寇宏超, 朱知寿, 常 辉, 周 廉, 李金山. 冷却速率对 TC21 合金相变行为的影响[J]. 航空材料学报, 2010, 30(1): 6–9.
- WANG Yi-hong, KOU Hong-chao, ZHU Zhi-shou, CHANG Hui, ZHOU Lian, LI Jin-shan. The influence of cooling rate on TC21 alloy phase transition behavior[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(1): 6–9.
- [43] 宋颖刚, 高玉魁, 陆 峰, 赵振业. TC21 钛合金喷丸强化层微观组织结构及性能变化[J]. 航空材料学报, 2010, 30(2): 40–44.
- SONG Ying-gang, GAO Yu-kui, LU Feng, ZHAO Zhen-ye. The microstructure and performance change of TC21 titanium alloy shot peening layer[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(2): 40–44.
- [44] 宫旭辉, 王 宇, 夏源明, 葛 鹏, 赵永庆. TC21 钛合金的高温动态拉伸力学行为[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(4): 647–654.
- GONG Xu-hui, WANG Yu, XIA Yuan-ming, GE Peng, ZHAO Yong-qing. Dynamic tensile behavior of TC21 titanium alloys at elevated temperatures[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(4): 647–654.
- [45] 曲恒磊, 赵永庆, 冯 亮, 奚正平, 李 辉, 夏源明. TC21 钛合金不同变形条件下的显微组织研究[J]. 航空工程, 2006(S1): 274–277.
- QU Heng-lei, ZHAO Yong-qing, FENG Liang, XI Zheng-ping, LI Hui, XIA Yuan-ming. Study on microstructure of TC21 alloy under different deformation conditions[J]. Aeronautical Engineering, 2006(S1): 274–277.
- [46] 汶建宏, 杨冠军, 葛 鹏, 毛小南, 赵映辉. β 钛合金的研究进展[J]. 钛工业进展, 2008, 25(1): 33–35.
- WEN Jian-hong, YANG Guan-jun, GE Peng, MAO Xiao-nan, ZHAO Ying-hui. The research progress of β titanium alloy[J]. Titanium Industrial Progress, 2008, 25(1): 33–35.
- [47] 宁兴龙. 俄罗斯航空用钛合金[J]. 钛工业进展, 1999, 4: 19–25.
- NING Xing-Long. The aviation titanium alloys of the Russian[J]. Titanium Industrial Progress, 1999, 4: 19–25.
- [48] 宁兴龙. 飞机用钛新数据[J]. 钛工业进展, 2003, 6: 31.
- NING Xing-Long. New data of aircraft titanium[J]. Titanium Industrial Progress, 2003, 6: 31.
- [49] WEISS I, SEMIATIN S L. Thermo mechanical processing of beta titanium alloys—An overview[J]. Materials Science and Engineering: A, 1998, 243(1): 46–65.
- [50] 付艳艳, 宋月清, 惠松晓, 米绪军, 叶文君, 于 洋. β 钛合金的强化机制分析[J]. 稀有金属, 2009, 33(1): 92–95.
- FU Yan-yan, SONG Yue-qing, HUI Song-xiao, MI Xu-jun, YE Wen-jun, YU Yang. Analysis of toughening mechanism of β titanium alloys[J]. Rare Metals, 2009, 33(1): 92–95.
- [51] TERLINDE G, RATHJEN H J, SCHWALBE K H. Microstructure and fracture toughness of the aged, β -Ti alloy Ti-10V-2Fe-M[J]. Metallurgical Transactions A, 1988, 19(4): 1037–1049.
- [52] 曹春晓. 航空用钛合金的发展概况[J]. 航空科学技术, 2005, 4: 1–6.
- CAO Chun-xiao. Aviation titanium alloy development[J]. Aeronautical Science and Technology, 2005, 4: 1–6.
- [53] 李明怡. 航空用钛合金结构材料[J]. 世界有色金属, 2000, 6: 17–20.
- LI Ming-yi. Structure of titanium alloys materials for aviation[J]. World Nonferrous Metals, 2000, 6: 17–20.
- [54] 曹春晓. 我国航空用钛面临的21世纪的挑战[J]. 钛工业进展, 1999, 5: 1–5.
- CAO Chun-xiao. Challenges of the 21st century confronting aero titanium in China[J]. Titanium Industrial Progress, 1999, 5: 1–5.
- [55] 毛小南, 赵永庆, 杨冠军. 国外航空发动机用钛合金的发展现状[J]. 稀有金属快报, 2007, 26(5): 1–7.
- MAO Xiao-nan, ZHAO Yong-qing, YANG Guan-jun. Present development of titanium alloys for aircraft engine in abroad[J]. Rare Metal Letters, 2007, 26(5): 1–7.
- [56] LÜTJERING G, WILLIAMS J C. Titanium (engineering materials and processes)[M]. Manchester: Springer, 2003: 251–255.
- [57] YAN M, LIU B, LI J. China aeronautical materials handbook[J]. Powder Metallurgy Super Alloy, Precision Alloy and Functional Material, 2001, 5: 105–107.
- [58] 黄 旭, 李臻熙, 黄 浩. 高推重比航空发动机用新型高温钛合金研究进展[J]. 中国材料进展, 2011, 30(6): 21–27.
- HUANG Xu, LI Zhen-xi, HUANG Hao. Research progress of new type high temperature titanium alloys for high thrust-weight ratio aero engine[J]. China's Material Progress, 2011, 30(6): 21–27.
- [59] 沙爱学, 王庆如, 李兴无. 航空用高强度结构钛合金的研究及应用[J]. 稀有金属, 2004, 28(1): 239–242.
- SHA Ai-xue, WANG Qing-ru, LI Xing-wu. Study and application of high strength structure of titanium alloys for

- aerospace[J]. Rare Metals, 2004, 28(1): 239–242.
- [60] MI G, HUANG X, CAO J. Frictional ignition of Ti40 fireproof titanium alloys for aero-engine in oxygen-containing media[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(8): 2270–2275.
- [61] YANG W B, HUANG X G, CAO C X, MA J M. Developments of fireproof titanium alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 1998(11): 12–16.
- [62] ZHAO Y Q, XIN S W, ZENG W D. Effect of major alloying elements on microstructure and mechanical properties of a highly β stabilized titanium alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 481(1): 190–194.
- [63] LI L L, SUN Y W. Experimental investigation on surface integrity in grinding titanium alloys with small vitrified CBN wheel[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 117: 1483–1490.
- [64] BOYER R R, BRIGGS R D. The use of β titanium alloys in the aerospace industry[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14(6): 681–685.
- [65] EYLLON D, VASSEL A, COMBRES Y, BOYER R R, BANIA P J, SCHUTZ R W. Issues in the development of beta titanium alloys[J]. Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, 1994, 46(7): 14–15.
- [66] SMITH B. The Boeing 777[J]. Advanced Materials and Processes, 2003, 161(9): 41–44.
- [67] BOYER R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry[J]. Materials Science and Engineering: A, 1996, 213(1/2): 103–114.
- [68] BOYER R R. Titanium for aerospace: rationale and applications[J]. Advanced Performance Materials, 1995, 2(4): 349–368.
- [69] NYAKANA S L, FANNING J C, BOYER R R. Quick reference guide for β titanium alloys in the 00s[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14(6): 799–811.
- [70] GRAUMAN J S. Effects of aircraft hydraulic fluid on timetal21s[J]. Beta titanium alloys in the 1990's, 1993: 127–135.
- [71] SCHUTZ R W. An overview of beta titanium alloy environmental behavior[J]. Beta Titanium Alloys in the 1990s, 1990, 3: 75.
- [72] 刘风雷. 我国航空钛合金紧固件的发展[J]. 航空制造技术, 2000, 6: 39–41.
- LIU Feng-lei. Development of aviation titanium fasteners in China[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2000, 6: 39–41.
- [73] 张庆玲, 王庆如, 李兴无. 航空用钛合金紧固件选材分析[J]. 材料工程, 2007, 1: 11–14.
- ZHANG Qing-ling, WANG Qing-ru, LI Xing-wu. Aviation titanium fasteners selection analysis[J]. Materials Engineering, 2007, 1: 11–14.
- [74] JHA A K, SINGH S K, SWATHI KIRANMAYEE M, SREEKUMAR K, SINHA P P. Failure analysis of titanium alloy (Ti-6Al-4V) fastener used in aerospace application[J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 17(6): 1457–1465.
- (编辑 王 超)