

航空用钛合金的发展概况

General Development Situation of Titanium Alloys for Aviation

□北京航空材料研究院 曹春晓

摘要：航空用钛合金近期工程化发展中呈现出一些技术创新的“亮点”，其中工艺创新的亮点比成分创新的亮点更多一些。这些亮点包括阻燃钛合金、钛基复合材料、纤维/钛层板、超塑性钛合金、特大整体结构件锻造工艺、金属型精铸工艺、大型整体结构件精铸工艺、激光成形工艺、摩擦焊工艺和热处理工艺等。

关键词：钛合金 飞机 发动机 热处理工艺

20世纪50年代，军用飞机进入了超声速时代，航空发动机相应地进入喷气发动机时代，原有的铝、钢结构已不能满足新的需求。钛合金恰恰在这个时候进入了工业性发展阶段，由于它具有比强度高、使用温度范围宽（-269~600℃）、抗蚀性好和其他一些可利用的特性，因此很快被选用于飞机及航空发动机。50年来的世界钛市场中最大的用户始终属于航空。当前，航空仍然占50%左右市场份额。

受2002年“9.11”事件影响，美国2003年钛工业产品发货量降至15625t（2002年为16071t），日本2003年钛加工材发货量则降至13838t（2002年为14481t），而中

国从2000~2004年的钛加工材销售量却一直以很高的速度增长（见表1）。

1993年以后，几乎看不到新推出的工业性钛合金，而钛合金工艺方面的创新却屡见不鲜。这既与冷战时代的结束有关，也与工艺创新往往起到事半功倍之效有关。

一、钛合金在飞机及航空发动机上的用量不断扩大

1. 飞机机体的钛用量

表2中列出的F/A-18E/F、F/A-22、F-35三大战斗/攻击机和B-2轰炸机是美国在2015年前保持空中优势的4块“王牌”。由表2可知，总的发展趋势是钛在飞机机体上的用量不断扩大。F/A-18

在不断改型的过程中其钛用量也不断增多。

民用飞机的钛用量也在不断扩大（图1和表3）。

我国战斗机的钛用量也在不断扩大，20世纪80年代开始服役的歼八系列的钛用量为2%，两种新一代战斗机的钛用量分别为4%和15%，更新一代的高性能新型战斗机的钛用量将达25%~30%。

2. 航空发动机的钛用量

从表4和图2可知，国外先进发动机上的钛用量通常保持在20%~35%的水平。

我国早期生产的涡喷发动机均不用钛，1978年开始研制并于1988年初设计定型的涡喷13发动机的钛用量达到13%。2002年设计定型的昆仑涡喷发动机是我国第一个拥有完全自主知识产权的航空发动机，钛用量提高至15%。即将设计定型的我国第一台拥有自主知识产权的涡扇发动机又进一步把钛用量提高到25%的水平。

二、航空用钛合金近期工程化发展中的一些“亮点”

1. 阻燃钛合金闪亮登场

为了避免“钛火”，俄罗斯曾研制了含Cu高量的BTT-1和BTT-3阻燃钛合金，但由于其力学

表1 中国近几年钛加工材的销售量(t)

年份	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年
钛加工材	2233	4720	5488	7080	9292

表2 美国第三代、第四代战斗机及先进轰炸机、运输机的用材百分比

机型	F-16	F-17Y	F/A-18 A/B	F/A-18 C/D	F/A-18 E/F	F/A-22	F-35	B-1	B-2	C-5	C17
开始服役时间	1978	未服役	1980	1986	2002	2005	2008	1986	1991	1970	1992
复合材料	3	8	9.5	10	23	24	36	29	38		8.1
钛合金	2	7	12	13	15	41	27	21	26	6	10.3
铝合金	83	73	50	50	29	15		41	19		69.3
钢	5	10	15	16	14	5		9	6		12.3

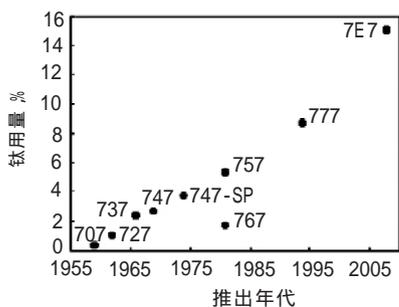


图1 波音飞机钛用量随年代的变化

性能和熔铸性能差而未能工程化。美国发明的 Alloy C (Ti-35V-15Cr) 阻燃钛合金近期已成功地应用于 F119 发动机 (F/A-22 战斗机的动力装置) 的高压压气机机匣、导向叶片和矢量尾喷管。这是高温钛合金领域的最新亮点,也是钛发展史中第一个进驻航空发动机的型钛合金和阻燃钛合金。Alloy C 的阻燃原理有三:其一,国外和一航材料院的研究结果表明,在转子零件与静子零件相对摩擦而升温时,低熔点(675°C)的 V₂O₅ 的首先熔化起到了吸热、润滑和降

表3 空客飞机钛合金和复材料的用量 (%)

机型	钛合金	复合材料
第三代客机 A320	4.5	5.5
第四代客机 A340	6	8
研制中客机 A380	10	25

低氧化膜内应力的作用;其二,西北有色院的试验表明, Alloy C 的导热系数远高于普通钛合金;其三,北京有色院利用 CALPHAD 技术计算得到的结果表明,该合金成分设计符合“绝热燃烧温度”尽可能低的要求。西北有色院、一航材料院等联合研制的低成本阻燃钛合金 Ti-40(Ti-25V-15Cr-0.2Si) 已研制出机匣并装机,等待试车。利用渗金属技术形成表面阻燃合金是另一条成本更低的技术途径。

2. 钛基复合材料初见曙光

世界各国为钛基复合材料 (TMC) 的工程化已奋斗很多年,近期终于在 F119 发动机上获得了应用,即选用 SiC 纤维/Ti-6242S 复合材料制成矢量喷管驱动器活塞。不久前,荷兰飞机起落架开发公司 SP 航宇公司又宣称,荷兰皇家空军试飞了装有钛基复合材料主起落架下部后撑杆的 F-16。与原用的 300M 钢相比,新材料可减重 40%,成本也已接近战斗机设计认可的指标,因此洛克希德·马丁公司也打算在 F-35 联合攻击机上采用这种 TMC 材料制造起落架零件。据称用 TMC 取代 Ti-6Al-4V 合金制造的空心宽弦风扇叶片,其成本更低。

3. 纤维/钛层板崭露头角

层间混合材料(如图3所示)因其比强度和疲劳寿命远高于金属材料且成本远低于纤维增强的复合材料,已引起人们的广泛兴趣。从20世纪80年代以来该材料已经历了第一代 ARALL (芳纶纤维铝合金层板)、第二代 GLARE (玻璃纤维铝合金层板)、第三代 CARE (碳纤维铝合金层板)到第四代 TiGr (石墨纤维钛合金层板)的发展过程。

一航材料院研制的 ARALL 已用于我国歼八的方向舵上,解决了原铝合金方向舵铆钉孔处裂纹扩展的问题。GLARE 已大面积地用于 A380 机身壁板和尾翼上,而 TiGr 则用于制造 B7E7 的机翼和机身蒙皮。TiGr 还可用于蜂窝夹层的面板。实践表明,自动铺放的 TiGr 层板的性能优于手工铺叠的 TiGr 层板。CARE 因很难解决碳纤维与铝合金之间的接触腐蚀问题,迄今无商业化产品。而 TiGr 既无电化学腐蚀问题,又可进一步提高综合性能(特别是比强度和高温性能)。

4. 超塑性钛合金独树一帜

超塑性成形、等温锻造、近等温锻造等先进工艺技术所具有的

表 4 一些西方国家航空发动机的钛用量

发动机型号	J79	JT3D /TF33	TF36	TF39	JT9D	F100	F101	CF6	V2500
推出年代	1956	1960	1965	1968	1969	1973	1976	1985	1989
装备的机型	F-4 F-104	B-707 B-52 F-141	C-5A	C-5A C-5B	B-747 B-767 F-5A	F-15 F-16	B-1	A-330 B-747 B-767	A-320 A-321
钛合金用量(%)	2	15	32	33	25	25	20	27	31

优越性促进了自身的发展。然而,锻造成形温度过高带来的模具制造、加热费用昂贵问题,影响了产品成本的进一步降低和工艺技术进一步的扩大应用。据此,日本推出了 SP700 (Ti-4.5Al-3V-2Fe-1Mo)合金。这是第一个以 SP(超塑的英文缩写)为牌号的钛合金。与 Ti-6Al-4V 相比,其等温锻造或超塑成形的温度降低了 120℃(即从 900℃降至 780℃),最佳超塑条件下的延伸率提高一倍(即从 1000%增至 2000%)。SP700 还具有优于 Ti-6Al-4V 的综合力学性能、热处理淬透性和冷加工性。SP700 呈现上述优越特性的重要原因之一是在同样工艺条件下 SP700 能获得更细于 Ti-6Al-4V 的晶粒尺寸(分别为 2μm 和 5μm)。正缘于此,SP700 当前已作为一种新型工程合金用于制造

高尔夫球头等体育用品和活动扳手等工具,而且已引起各国航空界的密切关注,正在考虑应用于飞机及发动机零件的可能性。

5. 特大整体结构件锻造工艺余音绕梁

为了提高结构效率、减轻结构重量、缩短生产周期和降低生产成本,结构整体化是先进飞机的重要发展方向。F/A-22 的机身隔框就采用了整体结构,这就需要提供前所未有的特大规格的钛合金模锻件,从而显著增加了充填成型和组织控制方面的困难。F/A-22 的中机身有 4 个很大的 Ti-6Al-4V 整体式隔框,其中最大的“583”隔框锻件重 2770kg,投影面积 5.53m²,是迄今为止最大的航空用钛合金锻件。F/A-22 后机身的一个发动机机舱的隔框也很大。魏曼戈登公司在 45000t 水压机上生产了该隔框

模锻件,锻件长 3.8m,宽 1.7m,投影面积 5.2m²,重 1590kg。按通常的 Ti-6Al-4V 合金的模锻变形抗力来计算,这么大投影面积的锻件是不可能模锻出来的。已知的情况表明,该公司采用以下三大

关键技术确保特大钛合金锻件的形状尺寸和组织性能:一是采用优良的润滑剂以降低变形抗力;二是采用计算机有限元方法模拟模锻时金属流变、充填情况以确定可保证最终形状尺寸的工艺(包括模具和预制坯的设计方案);三是搞好全过程(从开坯至最终模锻)的工艺设计以确保最终锻件的组织性能。虽然我们可以从中粗略地感觉到这首“协奏曲”的美妙之处,但仍不能完全理解在 45000t 水压机上能模锻出如此大规格锻件的理由,还得细细品味其绕梁的余音以探究存在其他“奥妙之处”的可能性。

6. 金属型精铸工艺重开天日

很早以前,人们就否定了金属型(长久性铸型)用于钛合金铸造的可能性。然而,美国普·惠公司近期的实践表明,金属型不仅适用于钛合金铸造,而且与陶瓷型(熔模)相比,可以降低 40%成本,减少污染,获得拉伸强度、疲劳强度更好的钛合金精铸件,甚至可以和钛合金锻件的性能相媲美。普·惠公司已应用金属型精铸技术制造了 F119 发动机的第 4、5 级高压压气机阻燃钛合金导流叶片。该公司还打算探索金属型精铸工艺用于制造转子叶片(含风扇叶片)的可能性。

7. 大型整体结构件精铸工艺方兴未艾

航空用钛合金领域近期工程化发展中最耀眼的“亮点”当属大型整体结构件熔模精铸工艺。美国和我们一些先进发动机都用该工艺制造了整体机匣。更引人注目的是,由 Ti-6Al-4V 合金制造的

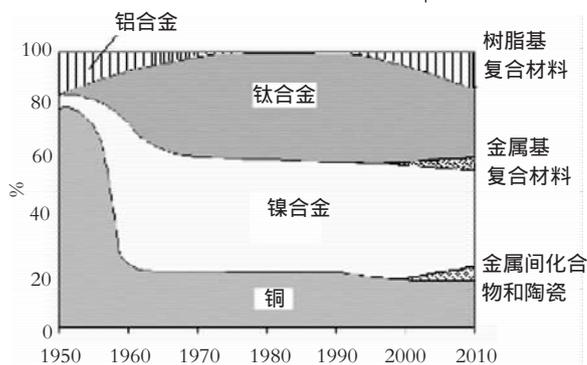


图 2 航空发动机主体材料用量的变化趋势

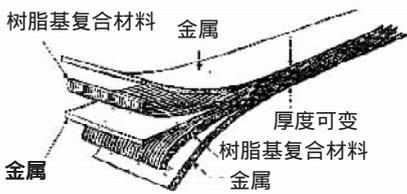


图3 纤维金属层板结构示意图

F/A-22 垂尾方向舵作动筒支座等 6 个大型整体结构件和 V-22 倾转旋翼飞机的转接座都采用了该新型精铸工艺。以 V-22 转接座为例,原来由 43 个零件和 536 个紧固件装配而成。改为整体精铸件后则由 3 个零件和 32 个紧固件装配而成,既显著缩短了生产周期(加工和安装时间减少 62%)和减轻了结构重量,又降低成本 30%。F/A-22 上最大的两个整体精铸件是机翼与机身侧边连接的两个 Ti-6Al-4V 接头(加工后成品重量分别为 87 kg 和 58kg)。如此关键的零件都敢选用铸件,主要靠关键技术及其显著的效果。三大关键技术:一是高水平 and 准确的计算机模拟技术,二是热等静压技术(包括大型装备),三是新型的热处理技术。显著的效果是往往能一次成功地研制出形状尺寸、组织性能、冶金质量均获得精确控制的大型复杂精铸件,其许用应力和安全可靠性可等同于锻件。

8. 激光成形工艺前程似锦

这是一种由高功率激光镀膜技术与快速原型技术结合而成的金属粉末熔化和直接沉积的新工艺,是美国两所大学与两家公司联合研究成功的。激光成形(Lasform)工艺的主要特点是:不需要模具、工夹具等硬件而在软件驱动下进行柔性加工;生产周期

短,可对各种新设计或改变设计的产品作出快速反应;成本低,近净成形;特别适用于大型复杂薄壁整体结构件的制造;力学性能达到或超过锻件水平;可裁缝式地制成“变成分”的材料或零件。E/A-18E/F 已选定 4 个 Ti-6Al-4V 大型构件应用此工艺。美国国防后勤局最近与 AeroMet 公司签订了 1900 万美元的协议,用激光成形法为军用飞机与发动机制造钛合金结构件的试生产件。我国西工大、北航等单位也在积极开展激光成形工艺的研究工作。例如西工大最近研制了我国某新型战斗机用的 TC4 钛合金典型构件,其室温拉伸性能达到或超过锻件水平。

9. 摩擦焊工艺梅开三度

美国在 CFM56 等航空发动机中通常采用钛合金盘与盘之间的惯性摩擦焊。普·惠公司已成功地采用线性摩擦焊工艺将转子叶片与盘连接成整体叶盘(Bling),并实际应用于 F119 发动机多级钛合金风扇和压气机转子。未来摩擦焊将会应用到今后发展的整体叶环(Bling)中。近期发展的搅拌摩擦焊又为摩擦焊工艺在飞机零件中的广泛应用开辟了道路。北京航空制造工程研究所已购买了英国焊接研究所有关搅拌摩擦焊的专利,预期在我国也将取得迅速发展。

10. 热处理工艺一箭三雕

首先突破传统的 + 热处理工艺而采用 热处理工艺的是高温钛合金领域,其初衷是为了提高蠕变抗力(相应地提高使用温度),这是 热处理工艺射中的第一“雕”。其次, 热处理工艺被广泛应用于高损伤容限钛合金,

其主要目的是大幅度地提高断裂韧性(K_{IC})和降低疲劳裂纹扩展速率(da/dN)。例如 F/A-22 飞机上占结构重量 41% 的钛合金,主要是 Ti-6Al-4V 和 Ti-62222 (Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Cr-2Mo) 这两种牌号,均大量采用了 热处理工艺(包括 5 个特大的 Ti-6Al-4V 钛合金隔框锻件),以适应损伤容限设计的要求。 热处理工艺射中的第三“雕”是铸造钛合金,其主要目的是显著提高铸件的疲劳强度,以保证钛合金铸件的使用可靠性。这是设计师们敢于在一些关键部位选用钛合金铸件的重要原因之一。一航材料院以钛合金伞舱梁和压气机盘为对象开展了较系统的研究,创立了具有自己特色的新型 热处理工艺——BRCT 热处理工艺,其综合性能优于英、美常用的 热处理工艺。

航空用钛合金的发展历程反映了一个辩证关系:成分创新与工艺创新是材料技术创新主要的两大途径。从钛合金近期工程化发展的情况来看,工艺创新的“亮点”似乎更多一些。

航空钛合金的发展历程又告诉我们:性能驱动和成本驱动是材料技术发展永恒的两大动力。两者不可偏废,必须综合考虑,但可根据不同使用对象和不同历史时期有所侧重。从钛合金近期工程化发展的情况来看,成本驱动的“马力”似乎更大一些。从一定意义上说,近期发展中工艺创新“亮点”较多的原因主要是工艺创新途径往往能更好、更快、更省地达到高性能、低成本的效果。 ■