

特约专栏

# 钛合金在航天飞行器上的应用和发展

张绪虎, 单 群, 陈永来, 杜志惠

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

**摘 要:** 主要介绍了高强韧钛合金、高温钛合金、低温钛合金和铸造钛合金及钛合金的先进成形技术在航天飞行器上的应用, 指出了钛合金发展现状和趋势。其中对粉末冶金技术和超塑成形/扩散连接(SPF/DB)技术做了较详细的介绍。重点介绍了美国和俄罗斯的粉末冶金技术发展现状和我国粉末钛合金技术在多种型号产品研制中的应用情况。同时指出超塑成形/扩散连接新技术为克服钛合金成形昂贵又难以加工而受到限制的问题提供了新途径。

**关键词:** 钛合金; 高强度; 高韧性; 粉末冶金; 超塑性成形

**中图分类号:** TG146.23      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-3962(2011)06-0028-05

## Application and Development of Titanium Alloys for Aircrafts

ZHANG Xuhu, SHAN Qun, CHEN Yonglai, DU Zhihui

(Aerospace Research Institute of Material and Processing Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Applications of high strength & toughness titanium alloys, high-temperature titanium alloys, lower-temperature titanium alloys, and casting titanium alloys in aerospacecrafts are introduced. The status and directions for development of titanium alloys are described. At the same time, advanced forming technologies about titanium alloys applied in aerospacecraft, such as powder metallurgy technique and superplastic forming/diffusion bonding technology (SPF/DB), are illustrated. The actuality and development of powder metallurgy technique in America and Russia are introduced in particular, and this technique has already been applied in the development of various types of products in our country. Meanwhile, SPF/DB provides a new approach to overcome some shortages in titanium processing, e. g., high cost and difficult processing ability.

**Key words:** titanium alloy; high strength; high toughness; powder metallurgy; superplastic forming

### 1 前 言

随着人类探索太空步伐的加快, 对航天飞行器的要求越来越高。航天飞行器在超高温、超低温、高真空、高应力、强腐蚀等极端条件下工作, 除了依靠优化的结构设计之外, 还有赖于材料所具有的优异特性和功能。对航天材料而言, 轻质高强、耐高温、耐低温和耐腐蚀是航天产品选材的主要标准<sup>[1]</sup>。

钛的密度为  $4.5 \text{ g/cm}^3$ , 仅为钢的 56%, 满足航天产品对材料质轻的需求; 钛合金的强度为 500 ~ 1 400 MPa, 比 Al, Mg 合金高得多; 并且钛合金的高温及低温性能优越, 能在 550 °C 高温和零下 250 °C 低温下长期工作而保持性能不变, 正因为钛合金将航天产品所需的特质集于一身而被誉为“宇宙金属”、“空间金属”。根据航天产品对材料的需求, 钛合金在航天领域形成了不同的发

展方向, 主要包括高强韧钛合金、高温钛合金、低温钛合金、铸造钛合金和粉末钛合金等<sup>[2]</sup>。

### 2 高强韧钛合金

美国在 20 世纪 70 年代成功研制了  $\alpha + \beta$  两相高强高韧钛合金 Ti62222S, 其具有良好的强度和塑性配合, 室温断裂强度和屈服强度分别大于 1 300 MPa 和 1 200 MPa。高强高韧钛合金 Ti62222S 不仅室温性能好, 而且其高温性能也很好, 当工作温度高达 500 °C 时, 高强高韧钛合金 Ti62222S 的断裂强度和屈服强度仍在 800 MPa 以上。此外, 钛合金 Ti62222S 还具有较高的断裂韧性和损伤容限, 与合金 Ti6Al4V 相当的疲劳裂纹扩展速率, 优于合金 Ti6Al4V 的弹性模量和超塑成形性, 可以替代合金 Ti6Al4V。高强高韧钛合金 Ti62222S 的优良力学性能使其在  $\times \times$  样机和 F22 战斗机以及各种导弹上得到广泛的应用。

我国虽然开展高强钛合金的研究比较早, 如在 20 世纪 60 年代初期北京有色金属研究院就研制出了

Ti5583 合金; 70 年代, 宝鸡有色金属研究所和上海钢铁研究所相继研制出了 Ti22 合金和 Ti47121 合金。然而, 进入 90 年代后, 高强钛合金的研制由于各种原因基本已停滞。在航天领域, 目前我国高强钛合金只有 TB<sub>2</sub> 合金(Ti5583)带材用于卫星发射上, 远不能适应形势发展的需求。我国现有型号所用结构钛合金主要为 TC1, TC4, TA7M, BT20 等, 这些钛合金的强度比较低, 均在 1 100 MPa 以下, 已不能满足未来航天飞行器对结构钛合金强度的要求。为此, 必须深入研究高强钛合金在航天领域应用的可行性, 为未来型号的发展做好技术储备。

### 3 高温钛合金

超声巡航弹、高超声速巡航弹、可重复使用运载器以及亚轨道重复使用跨大气层飞行器的研究和发展, 要求钛合金必须能在高温(甚至是 650 ℃)下使用, 这就要求钛合金必须具有优异的耐温性能。高温钛合金的研究极为活跃、极为重要, 但发展历程极为艰辛, 这主要是因为要求高温钛合金具有良好的室温性能、高温强度、蠕变性能、热稳定性、疲劳性能和断裂韧性等性能匹配, 而这些性能对材料的成分和组织的要求往往是矛盾的<sup>[3-4]</sup>。国际上第 1 个高温钛合金是美国于 1954 年研制的 Ti6Al4V 合金, 可在 300 ~ 350 ℃ 下使用。Ti6Al4V 合金兼具  $\alpha + \beta$  两相特征, 既可作高温合金使用, 也可作结构合金应用, 在航天领域, 如“阿波罗”飞船、“宇宙神”导弹以及“徘徊者”卫星等, 得到了广泛的应用。但 Ti6Al4V 合金也存在一些不足, 主要有耐热性不够好、淬透性不理想、冷加工性较差、制备工艺复杂等。为了最大限度发挥 Al 固溶热强化作用, 钛合金中还加入了 Sn, Zr, Mo 和 Si 等元素, 相继开发了使用温度为 450 ℃ 的 IMI679, Ti6242 等合金, 使用温度为 500 ℃ 的 IMI685, Ti6242S 等合金以及使用温度为 550 ~ 600 ℃ 的 IMI834, Ti1100, BT36 等合金。除了 Ti6Al4V 合金外, Ti6242S, Ti1100 等合金应用较为成熟。美国第 1 代部分重复使用的超超声速载人飞行器——航天飞机的热防护系统部分采用了钛合金 Ti1100 作为隔热瓦, 其第 2 代航天飞机或空天飞机(NASP)的热防护系统也采用快速凝固钛合金, 亚轨道单级入轨火箭运载器 X-33 还是采用钛合金 Ti1100 作为其机身背风面大面积防热系统材料。英国空天飞机 HOTOL 的机身材料也部分采用了钛合金, 德国 Sanger 空天飞机则采用多层壁钛基结构作为机身<sup>[5-6]</sup>。

我国在高温钛合金 Ti55 的研究上取得了一些成绩, 但钛合金 Ti55 的使用温度只有 550 ℃, 只相当美、英、

俄等国家 20 世纪 70 年代的研究水平, 远不能满足未来航空航天飞行器及其推力系统对高温钛合金的要求。近几年来, 国外把采用快速凝固/粉末冶金技术研制的钛合金作为高温钛合金的发展方向, 美国麦道公司用上述技术研制的一种高纯度、高致密性钛合金, 其 760 ℃ 下的强度相当于目前常温下使用的钛合金强度。基于此, 研究高温钛合金对于促进我国航天事业的发展无疑具有十分重要的意义。

### 4 低温钛合金

钛合金具有良好的低温力学性能, 广泛应用于航天领域。随着温度降低, 钛合金的强度大幅度提高, 但延伸率、冲击韧性和断裂韧性随之下降, 特别是在 77 K 以下下降幅度较大。随着空间技术迅速发展, 钛合金在低温和极低温环境的应用增多, 低温钛合金的研制显得极为重要。经研究发现: 通过降低 H, O, N 等间隙元素和 Al 的含量可提高钛合金的低温性能, 使其能在 20 K 温度环境下长期使用<sup>[7]</sup>。

常用的低温钛合金主要是 TC4ELI 和 TA7ELI 超低间隙合金, 这两种合金均是通过降低间隙元素如 H, O 等含量而获得的, 其中 TC4ELI 合金被用于制造低温高压气瓶以及低温导管等零件, TC4ELI 合金被用于制造液氢贮箱等部件。但由于 TC4ELI 和 TA7ELI 超低间隙合金的工艺性能和冷成形性能较差, 严重地制约了其使用范围, 为此, 日本研制出了新型低温结构钛合金 LT700(Ti3Al5Sn1Mo0.2Si)。LT700 合金在低温下, 具有较高的屈服强度、塑性与 Ti5Al2.5SnELI 合金相当, 并有较好的断裂韧性与屈服强度的配合, 其高周疲劳强度高于 TA7ELI 合金, 当温度  $T = 77$  K, 循环次数  $N = 10^5$  时, 该合金最大疲劳强度可达 1 300 MPa, 而 Ti5Al2.5SnELI 合金只有 1 100 MPa, LT700 已被用于制作液氢涡轮泵。

我国利用低间隙元素含量钛合金 TA7ELI 在低温下具有更高的强度、更好的塑性和韧性的特点, 研制出在液氢环境下使用的 20 L 低温 TA7ELI 钛合金气瓶(如图 1), 现已将该气瓶用于 CZ- $\times \times$  系列运载火箭。此外, 钛合金 BT20 还被用于制造导弹的外壳体和燃料油箱壳体等。针对新一代运载火箭对大容积低温液氧、液氢高压气瓶的需求, 又开展了大规格的 TC4ELI 钛合金锻饼研制, 制备出了  $\phi 300$  mm  $\times$  120 mm 的大规格 TC4ELI, TA7ELI 钛合金锻饼。针对航天飞行器对大尺寸薄壁钛合金构件的需求, 航天材料及工艺研究所又开展了大尺寸薄壁 TC4 钛合金旋压成形技术研究, 成功旋制出了直径为  $\phi 420$  mm 的 TC4 钛合金半球形样件和直

径为  $\phi 580$  mm 的 TC4 钛合金曲母线形样件, 并将此研究成果用于钛合金膜盒式贮箱试验件的研制<sup>[8]</sup>。



图 1 CZ- $\times\times$  系列用低温 TA7ELI 钛合金气瓶

Fig. 1 Low temperature titanium alloy gas bottle used on CZ- $\times\times$  series

## 5 铸造钛合金

铸造钛合金密度小, 室温和中温强度高, 耐腐蚀性好, 具有好的铸造工艺性能, 较好的冲击韧性和焊接性。然而钛熔点高( $1\ 668\ ^\circ\text{C}$ ), 化学性质十分活泼, 在熔融状态下容易与空气和铸型材料发生作用, 极易被 H, O, N 等杂质所污染, 使金属脆化。这给钛合金铸造带来困难, 致使钛合金的铸造工艺的发展远远落后于压力加工工艺。直到 20 世纪 50 年代初, 美国才开始对钛合金铸造进行试验, 并于 1965 年实现了工业化生产。在铸造钛合金发展初期, 选择了 Ti6Al4V 等常用变形钛合金进行试验。大量的试验结果表明, Ti6Al4V 合金完全可以作为一种良好的铸造钛合金使用。目前, Ti6Al4V 合金已成为欧美、日本等国主要的铸造钛合金。俄罗斯最重要的铸造钛合金是 Ti5Al 合金。现在钛铸件已由静止构件发展为旋转构件, 如由美国 Aerojet 公司制作的火箭发动机的低温涡轮泵叶轮。

我国钛合金的铸造研究始于 20 世纪 60 年代末, 目前, 国内已有 10 多个单位从事钛铸件的科研和生产, 铸造钛合金的牌号也发展到 10 多个, 已能生产压气机机匣、叶片安装座、静子内外环、整流器壳体等几十种铸件。我国航天用铸造钛合金的应用始于 20 世纪 80 年代中期, 现已有 ZTi3, ZTiAl4, ZTiAl5Sn2.5, ZTiAl6V4, ZTiAl6Zr2MoV 等多种合金用于型号产品。

## 6 粉末钛合金

钛合金虽然具有非常优良的性能, 具有高比强度及强耐蚀能力, 但因其相对高昂的价格阻碍了它的广泛使用。目前, 世界各国对钛合金及其部件的低成本制造技术开展了大量的研究工作, 其中重要的一项就是钛合金的粉末冶金技术。经过多年研究, 国外在钛合金粉末冶

金近净成形技术应用方面已取得了很大进展, 尤其在航天领域, 已实现了商业化应用。

在美国, 有部分公司掌握了高性能粉末冶金技术并进行了相关生产及应用, 如 Bodycote, ADMA, Pratt and Whitney 等, 高性能粉末钛合金技术已用于生产各种导弹武器用钛合金部件, 如 Sidewind 导弹粉末钛合金头罩、F107 巡航导弹发动机粉末钛合金叶轮、Stinger 防空导弹粉末钛合金战斗部壳体、Stinger 防空导弹新型钛钨复合战斗部壳体等。俄罗斯具有很强的粉末冶金产品的开发能力, 在世界上首先研制出了整体复杂形状的粉末钛合金氢泵涡轮, 并在 RD-0120 等型氢氧发动机上得到了应用; 还用钛合金粉末冶金技术制造了氢氧发动机用整体 VT5-1 kt 合金燃料供给导流叶片装置, 其性能和可靠性均远优于传统产品<sup>[9]</sup>。

在国内, 粉末钛合金材料及构件的优势已为越来越多的设计部门所认可, 目前, 粉末钛合金技术已开始进入多种型号产品的研制中, 如用于钛合金舵芯骨架、大尺寸水平翼骨架、导弹舱体及叶轮等。航天材料及工艺研究所已开始进行粉末 TC4 合金骨架(图 2)的研制, 并已提供了小批量的试验件进行全面的试验; 研制的粉末 TA15 大尺寸水平翼骨架(图 3), 已通过地面静力载荷试验; 用粉末 TC11 钛合金制成了耐高温的整体网格舱体件(图 4), 突破了带内加强筋的薄壁仓体件的研制, 并已进入地面模拟试验阶段; 此外, 航天材料及工艺研究所还开展了发动机低温用 TA7ELI 粉末钛合金叶轮(图 5)的研制, 材料在室温和低温下的拉伸性能都已经超过了锻件的性能标准, 并且低温下材料塑性也达到了较高水平, 通过了的 1 800 s 的真空超转模拟试验, 满足了设计要求。

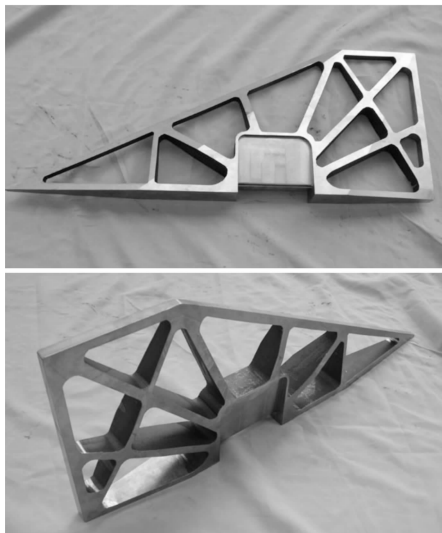


图 2 粉末 TC4 合金骨架

Fig. 2 Skeleton fabricated by powder Ti alloy TC4



图 3 粉末 TA15 水平翼骨架

Fig. 3 Horizontal wing skeleton fabricated by powder Ti alloy TA15



图 4 粉末 TC11 整体网格舱体件

Fig. 4 Network cabin body fabricated by powder Ti alloy TC11

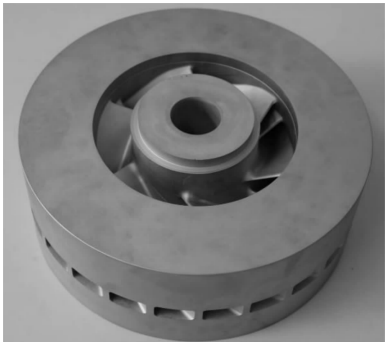


图 5 TA7ELI 粉末钛合金叶轮

Fig. 5 Impeller fabricated by powder Ti alloy

7 钛合金超塑成形技术

20 世纪 70 年代超塑成形/扩散连接 (SPF/DB) 新技术的问世, 为克服钛合金成形昂贵又难以加工而受到限制的问题提供了新途径<sup>[10]</sup>。其利用钛良好的超塑性和扩散连接特性, 在一次热循环内实现既成形又连接的工艺特点, 使一般构件减重 30%, 节约成本 50%。现在, 钛合金 SPF/DB 技术已经成为一种推动现代航空航天结构设计概念发展和突破传统钣金成形方法的先进制造技

术, 该技术的发展应用水平已成为衡量一个国家航空航天生产能力和发展潜力的标志。世界主要飞机制造公司, 如波音、普惠等, 都已建立起了自己的 SPF/DB 生产和研究基地, 其中美国休斯公司、BAE 公司等 SPF/DB 技术方面居世界前列。钛合金超塑成形工艺已广泛用于制造导弹外壳, 推进剂贮箱, 整流罩球形气瓶、波纹板以及发动机部件等, 采用 SPF/DB 组合工艺制造的非圆截面和低剖面的整体式 Ti-6Al-4V 钛合金进气道, 其费用可减少 30% ~ 40%, 质量减轻 25% ~ 30%, 可谓是进行了一次完美的“瘦身”变形。

我国的 SPF/DB 技术研究开始于 20 世纪 70 年代末, 在国内开展超塑成形技术研究和应用的单位主要有北京航空制造工程研究所、哈尔滨工业大学、西北工业大学、南京航空航天大学、航天材料及工艺研究所等单位, 经过多年研究, 我国的超塑成形/扩散连接技术取得了很大进展。北京航空制造工程研究所以飞机、发动机为需求背景, 研究了整流叶片、口盖以及舱门等零件的超塑成形工艺, 航天材料及工艺研究所通过对金属隔热结构的需求分析, 开展了 TC4 钛合金蜂窝以及波纹板 SPF/DB 技术研究, 目前已制备出了 TC4 钛合金隔热瓦等热结构部件(图 6, 7)。

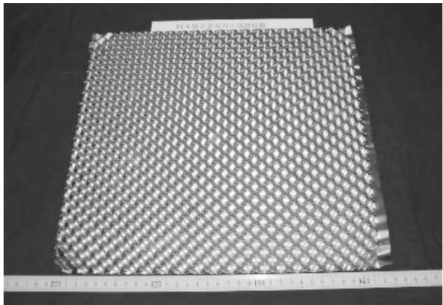


图 6 TC4 钛合金双向正弦波纹板

Fig. 6 Bidirectional sine wave vein plate fabricated by Ti alloy TC4

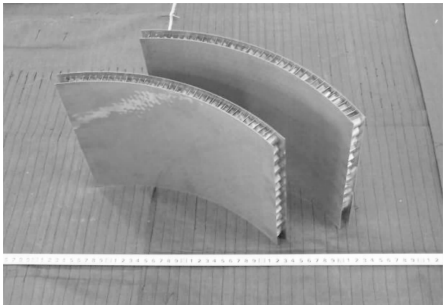


图 7 TC4 钛合金曲面蜂窝夹层板

Fig. 7 Curve-shaped honeycomb sandwich plate fabricated by Ti alloy TC4

## 8 钛合金应用前景及未来发展趋势

钛作为地球上并不稀缺的资源,多年来并未得到广泛应用,而其应用潜力,特别是在航天上的应用潜力十分巨大。在富资源和大市场之间转化存在较大的阻力,归其原因就在于存在技术与经济上的问题。研制高性能低成本的航天材料,是未来航天型号发展的一个必然趋势。如何优化技术提高钛合金的性能并降低钛合金的使用成本将是未来钛产业发展的战略性关键问题<sup>[11]</sup>。

我国航天飞行器上应用的钛及钛合金未来的发展方向是:①高性能化。即研制具有良好的强度和塑性相配合的高强韧钛合金和耐温性能更优异的钛合金;②低成本化。即发展不含或少含贵金属元素的钛合金和易加工成形、易切削加工的钛合金等;③高加工率。即发展粉末冶金、超塑成形-扩散连接(SPF-DB)、精密铸造等技术。随着我国航天技术发展,粉末钛合金和铸造钛合金将获得广泛的应用。航天飞行器速度提高,以及对构件轻质化、低成本和高可靠性的苛刻要求,给粉末钛合金和铸造钛合金的应用发展带来了机遇。粉末钛合金与铸造钛合金相比较,其内部组织细小均匀,不存在成分偏析,性能优于铸造钛合金。高性能粉末钛合金目前已在国外先进的航空航天关键部件上得到应用,在国内的相关研究也取得了较好的进展。超塑成形/扩散连接新技术的问世,为钛合金的发展提供了广阔的发展空间。用超塑成形/扩散连接结构件代替昂贵的组件、机加工部件和经过维修有问题的结构,以及减少装配时需要许多工具的准备时间,超塑成形/扩散连接对未来航天可望产生显著的影响。

钛的蕴藏量是铜的 10 倍,是继铁、铝之后的“第三金属”。它资源丰富,但是其工业生产仅有 60 多年,与具有百年历史的铝、镁相比,被形象地称为“婴儿金属”。而如今,正是这颗金属家族的新生儿,凭借其独

特而优越的性能在航天工业的舞台上大放异彩,在航天这种特殊且苛刻的环境中熠熠闪光。

### 参考文献 References

- [1] Zhao Yongqing(赵永庆). 国内外钛合金研究的发展现状及趋势[J]. *Materials China*(中国材料进展), 2010, 29(5): 1-8.
- [2] Leyens C, Chen Zhenhu(陈振华). *Titanium and Titanium Alloys* (钛与钛合金)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 19-20.
- [3] Zhao Yongqing(赵永庆). 高温钛合金研究[J]. *Titanium Industry Progress*(钛工业进展), 2001(1): 33-39.
- [4] Xu Guodong(徐国栋), Wang Fenge(王凤娥). 高温钛合金的发展与应用[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属), 2008, 32(6): 774-780.
- [5] Huang Zhanghong(黄张洪), Xie Yingjie(谢英杰), Lü Liqiang(吕利强), et al. 耐热钛合金概述[J]. *Hot Working Technology* (材料热处理技术), 2010, 39(12): 4-8.
- [6] Cai Jiangmin(蔡建明), Li Zhenxi(李臻熙), Ma Jimin(马济民), et al. 航空发动机用 600 °C 高温钛合金的研究与发展[J]. *Materials Review*(材料导报), 2005, 19(1): 50-53.
- [7] Liu Wei(刘伟), Du Yu(杜宇). 低温钛合金的研究现状[J]. *Rare Metals Letters*(稀有金属快报), 2007, 26(9): 6-10.
- [8] Lü Chunli(刘春丽), He Tao(何涛), Fu Daxin(富大欣). 航天结构材料低温力学性能测试技术[J]. *Cryogenics*(低温工程), 1999(3): 17-21.
- [9] Huang Jinchang(黄金昌). SP-700 钛合金的开发和应用[J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*(稀有金属与硬质合金), 1998(3): 58-62.
- [10] Zeng Liying(曾立英), Zhao Yongqing(赵永庆), Li Danke(李丹柯), et al. 超塑性钛合金的研究进展[J]. *Heat treatment of metals*(金属热处理), 2005, 30(5): 28-33.
- [11] Zhao Yongqing(赵永庆), Wei Jianfeng(魏建峰), Gao Zhanjun(高占军), et al. 钛合金的应用和低成本制造技术[J]. *Materials Review*(材料导报), 2003, 17(4): 5-7.