

# 钛合金材料在我国航空紧固件中的应用

## Application of Titanium Alloy in Chinese Aircraft Fastener

西安西工大超晶科技发展有限公司 张利军 王幸运  
中国航天科工集团信阳航天标准件厂 郭启义 谢田  
西北工业大学凝固技术国家重点实验室 薛祥义 常辉

**[摘要]** 钛合金材料作为一种 20 世纪中期出现并发展起来的新兴结构材料,因其具有优异的耐腐蚀性、高的比强度以及无磁性等一系列优点,在航空航天等高端工业部门获得了广泛应用。在 20 世纪 50 年代,美国就已经开始使用钛合金材料制造航空紧固件,我国从 20 世纪 80 年代开始才陆续使用钛合金材料制造少量的工程用航空航天紧固件,进入 21 世纪之后,随着我国航空航天工业制造技术水平的整体提升,紧固件用钛合金材料及其加工制造技术获得了系统化、专业化的发展。

**关键词:** 紧固件 钛合金 航空

**[ABSTRACT]** Titanium alloy as a new structural material, because of its excellent corrosion resistance, high specific strength and non-magnetic and a series of unique advantages, has a wide range of applications in the aviation industry. In the 1950s, the United States begun to use titanium alloy aerospace fasteners. Beginning in the 1980s, titanium alloy materials are used to make a small amount of engineering use of aerospace fasteners in China. After entering the 21st century, with development of the manufacturing technology level in China's aerospace industry, fasteners made of titanium alloy and processing technology obtained systematic, professional development.

**Keywords:** Fastener Titanium alloy Aerospace

钛及钛合金由于具有比强度高、抗腐蚀性好、耐高温等一系列突出优点,使其发展成为现代航空航天工业中广有前途的金属结构材料<sup>[1-2]</sup>。自从 20 世纪 50 年代美国首次将 Ti-6Al-4V 钛合金螺栓应用于 B-52 型轰炸机上,并取得了非常好的减重效果后,各航空工业发达国家都纷纷展开了钛合金紧固件的研究及工程应用。钛合金紧固件代替大部分比强度较低的钢制紧固件后,对飞行器减重取得非常显著的效果。如波音 747 飞机紧固件以钛代钢后,其结构质量减轻了 1814 kg;俄罗斯的伊尔-96 飞机,一架用 14.2 万件钛合金紧固件,较钢件重量减轻达 600kg;一架图 204 飞机上采用 940kg 的 BT16 钛合金紧固件,较钢件减轻 688kg<sup>[4]</sup>。钛合金的正

电位性能恰好与碳纤维复合材料相匹配,有效地防止了紧固件的电偶腐蚀,使钛合金成为复合材料的最佳连接材料<sup>[5]</sup>。因此,随着先进军民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增加。钛合金比铝合金的使用温度高出 150~200℃,对于在飞行器结构中因工作温度过高而不能采用铝合金紧固件的部位,钛合金将是一种更好的选择。此外,钛合金所固有的良好弹性和无磁性,对防止紧固螺栓的松动和防磁场干扰也具有非常重要的作用<sup>[6-7]</sup>。

在美国军民飞机上,钛合金紧固件已基本取代了合金钢紧固件。国外钛合金紧固件的应用已经非常普遍,大型民用飞机单机钛合金紧固件的用量达到数十万件,同时各类新型的钛合金紧固件也被不断地研制开发出来<sup>[5]</sup>。我国钛合金紧固件的研制历史可追溯到 1965 年,成都飞机设计研究所根据新机需要提出研制钛合金铆钉,20 世纪 70 年代相关单位进行了钛合金铆钉及应用研究工作,20 世纪 80 年代在我国部分第二代军用飞机上开始少量使用钛合金铆钉、螺栓等紧固件<sup>[8-9]</sup>。20 世纪 90 年代后期,随着国外第三代重型战斗机生产线的引进和国产第三代战斗机的研制,以及大量航空转包生产业务的开展,我国航空工业中开始使用一些钛合金紧固件。近年来随着我国航空航天工业的发展,国内相关单位有针对性地开展了大量基础材料与紧固件制造技术方面的研究开发工作,目前我国自主研制生产的钛合金紧固件已经在我国的改型飞机和新设计的飞机中获得了大量工程应用<sup>[2,5,10]</sup>。

## 1 铆钉类紧固件用钛合金材料

航空航天工业中常用的紧固件主要包括铆钉、螺栓及特种紧固件 3 大类。对铆钉来说,最重要的是材料的冷态塑性,只有冷态塑性好的材料制造的铆钉,才能够进行冷铆接安装。通常在对强度要求不太高而对耐腐蚀性能要求高的部位采用钛合金铆钉, $\beta$ 型钛合金由于在固溶状态下为单一的 $\beta$ 晶粒、且由于其具有体心立方的原子结构排列,所以该类合金具有十分优异的冷加工性能,非常适用于制造钛合金铆钉<sup>[7,11-12]</sup>。

### 1.1 TB2 钛合金

我国钛合金紧固件的研制就是以 TB2 钛合金铆钉的研制工作为起点的。1965 年,成都飞机设计研究所在新机研制时提出,计划在其后机身钛结构件上采用钛合金铆钉,并提出了论证和设计。从 1970 年开始,在天津冶金局材料研究所和有色金属研究院等单位的配合下,成都飞机设计研究所与成飞公司联合展开了 TB2 钛合金铆钉的研制及应用研究工作,先后完成了 TB2 钛合金材料研制、丝材冷镦成形研究、铆钉铆接试验研究工作,并于 1979 年完成了相关工作技术鉴定,制订了暂行技术条件<sup>[8]</sup>。TB2 钛合金是一种亚稳定型  $\beta$  钛合金,合金名义成分 Ti-3Al-8Cr-5Mo-5V。该合金在固溶处理状态下具有优异的冷成形性能和焊接性能,我国目前主要用作制造卫星波纹壳体、星箭连接带及各类冷镦铆钉,有时也用于小规格螺栓的制造。制造航空紧固件时,其使用温度一般在 300℃ 以下,航天紧固件可在短时间内使用到 500℃<sup>[2]</sup>。

1986 年,我国颁布了第一部钛合金紧固件专用标准 GJB120-1986《钛合金铆钉》,1990 年我国颁布了第 2 部及第 3 部钛合金紧固件专用技术标准 GJB856-90《抗拉型钛合金环槽铆钉规范》与 GJB857.1-90《100° 沉头抗拉型钛合金进环槽铆钉》,这 3 部标准都是 TB2 钛合金铆钉的专用技术标准,就各类规格的 TB2 铆钉进行了明确规范,为其工程化批产及应用奠定了标准基础。目前 TB2 制造的钛合金铆钉已经在我国航天工业中的多个型号获得了大量应用,同时在航空型号产品中也获得了一定数量的应用,均取得了良好的效果<sup>[13-15]</sup>。

### 1.2 TB5 钛合金

TB5 钛合金是一种亚稳定  $\beta$  型钛合金,其名义成分为 Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al。该合金最初是在美国空军的资助下开发的,由洛克希德·马丁公司确定成分、TIMET 公司进行规模化生产。该合金具有优异的冷成形性能,其冷成形能力与纯钛相当,可在固溶状态下进行各种复杂零件的冷成形(如铆钉铆接),时效后室温拉伸强度可达 1000MPa 以上,该合金由于其 V 元素含量高,抗氧化性能较差,一般在 200℃ 以下的工作环境中使用,但是该合金具有优异的抗腐蚀性能<sup>[16]</sup>。

美国普惠公司在其生产的航空发动机上大量使用 Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al 钛合金作为托架,美国 B-1B 轰炸机上 Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al 钛合金零件的用量达到 1000 多个, Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al 钛合金紧固件在波音飞机上也应用了很多年<sup>[6]</sup>。我国使用 TB5 钛合金替代 30CrMnSiA 制造某歼击机伞梁以及制造卫星发动机波纹板等部件,同时采用 TB5 钛合金制造与歼击机伞梁和卫星波纹板配套使用的冷镦铆钉<sup>[2]</sup>。

### 1.3 Ti-45Nb 合金

Ti-45Nb 合金作为一种铆钉专用材料,其突出的优点是塑性高(伸长率可达 20% 以上,断面收缩率高达 60%~80%),冷加工性能优异,其剪切强度( $\tau \geq 350\text{MPa}$ )和抗拉强度( $\sigma_b \geq 450\text{MPa}$ )均高于纯钛,并且冷变形抗力低于纯钛,非常适合做复合材料连接用铆钉材料。美国针对 Ti-45Nb 合金进行了大量的基础研究,研制技术较为成熟,并于 1974 年列入 AMS4982 规范,2002 年修订为 AMS4982C,至今获得广泛使用。美国在航空航天铆钉产品中, Ti-45Nb 合金已经全面取代纯钛。该合金与 Ti-6Al-4V 合金搭配,制成的双金属铆钉,已经在空客和波音飞机上获得大量应用<sup>[17-19]</sup>。

对于要求剪切强度高,在安装过程中不允许铆钉杆变形的铆钉,一般采用双金属钛合金铆钉,双金属钛合金铆钉是由 Ti-6Al-4V 钉杆和 Ti-45Nb 头部组成,经过惯性摩擦焊接,紧密融合在一起而形成了一个整体实心铆钉。这种双金属铆钉在铆接时,只需用较小的冲击力就可以使 Ti-45Nb 铆钉头产生塑性变形,而 Ti-6Al-4V 铆钉杆却不变形。双金属钛合金铆钉在 B-1 轰炸机、波音等飞机上广泛用于钛合金构件及复合材料构件的铆接。如美国 F-14 战斗机机翼前缘使用 4000 只该双金属铆钉,其疲劳性能与高锁螺栓相当,而成本可降低 50%,重量轻 30%~40%,这种双金属铆钉的成本要低于其他  $\beta$  型钛合金铆钉。近年来我国也相继研制开发了该型双金属铆钉和 Ti-45Nb 铆钉,已经在新一代飞机的复合材料蒙皮铆接中获得了工程应用<sup>[5,20]</sup>。

## 2 螺栓类紧固件用钛合金材料

航空航天紧固件中使用量最大的是钛合金螺栓,钛合金螺栓按其用途可分为普通螺栓、高锁螺栓及干涉型螺栓等。以来制造螺栓的钛合金材料,一般要求其热处理后获得高的抗拉强度和剪切强度,通常要求其强度水平与 30CrMnSiA 高强度合金钢相当<sup>[21-22]</sup>。

### 2.1 TC4 钛合金( $\sigma_b \geq 1100\text{MPa}$ 级)

TC4(美国牌号 Ti-6Al-4V)钛合金最初由美国在 1954 年首先研制成功,目前已经发展成为一种国际性的钛合金,是目前人们对其研究最为全面、最为深入的钛合金。在航空、航天、民用等工业中得到了广泛应用。已经广泛用于制造飞机结构中的梁、框、起落架、紧固件,航空发动机风扇、压气机盘、机匣、叶片等,同时也大量用于其他行业中,目前占钛合金产量的一半以上。该合金具有良好的工艺塑性和超塑性,合金  $\alpha+\beta$  转变温度 980~1010℃,长期工作温度可达 400℃。1973 年开始,为配合涡扇 -8 航空发动机 TC4 钛合金叶片的研制工

作,我国开始了该合金的研究与工程应用<sup>[2,23-24]</sup>。

1956年,美国采用TC4(Ti-6Al-4V)钛合金制造了当今世界上第一批钛合金螺栓,首先用在B-52轰炸机上(代替原30CrMnSiA螺栓),由于使用效果非常好,很快就被推广应用,现在西方几乎所有的飞机都在大量采用TC4(Ti-6Al-4V)钛合金制造其螺栓。但是由于TC4(Ti-6Al-4V)是 $\alpha + \beta$ 双相合金,不能冷锻成形、其钉头必须加热锻制,热处理需真空水淬和时效,对加工设备及工艺要求高。20世纪80年代后期,我国相关单位开展了TC4钛合金紧固件热锻技术研究,先后开发出了热锻机床,与20世纪90年代实现了TC4钛合金紧固件的工业化生产。目前我国多个航空航天标准件厂都具有批量生产TC4螺栓的热锻设备与技术能力,采用TC4钛合金制造的螺栓已经在我国新一代军机、航天飞行器、卫星中获得了大量工程应用<sup>[2,4-6,10,25]</sup>。

## 2.2 TC6 钛合金( $\sigma_b \geq 980\text{MPa}$ 级)

为满足航空发动机高温使用要求,北京航空制造工程研究所研制出了能耐500℃以下高温的TC6(俄罗斯材料BT3-1)钛合金紧固件,与TC4钛合金相比,该材料对温度具有较高的敏感性,其紧固件制造更困难。该合金是前苏联研制的BT3-1钛合金,名义成分为Ti-6Al-2.5Mo-1.5Cr-0.5Fe-0.3Si,目前在俄罗斯得到广泛应用<sup>[5,24]</sup>。我国在1979年为配合WP13航空发动机TC6钛合金尾杆等部件及配套紧固件的研制工作,进行了该合金的仿制工作及应用研究工作。

TC6合金是一种综合性能良好的马氏体型 $\alpha + \beta$ 型双相钛合金,一般在退火状态下使用,也可进行适当的热处理强化。该合金具有良好的性能,抗氧化性能和耐腐蚀性能非常优异,其制造的零部件可在400℃下长时间工作6000h以上,450℃下长时间工作2000h以上。等温退火处理后室温抗拉强度大于980MPa,屈服强度大于840MPa、延伸率大于10%、断面收缩率大于25%。400℃高温拉伸强度大于720MPa、延伸率大于14%、断面收缩率大于40%。为了进一步提高其使用强度,也可进行“固溶+时效”处理<sup>[2]</sup>。

## 2.3 TC16( $\sigma_b \geq 1030\text{MPa}$ 级)

目前对于钢制紧固件,大部分都采用冷锻成形加工,只有少数尺寸较大的采用热锻成形加工,冷锻工艺使紧固件实现了大批量连续生产。但是大部分工业钛合金由于冷成形性能差,无法进行冷锻成形加工。因此,在西方国家,TC4钛合金紧固件主要采用热锻成形工艺方法生产,热锻工艺的缺点在于:坯料加热时易出现局部烧伤和过热以及表面氧化,同时不易实现自动化连续锻制、生产效率低。为了提高钛合金紧固件生产效率及其质量的稳定性,前苏联研制开发了紧固件专用冷锻用

BT16钛合金,实现了钛合金紧固件冷锻技术的发展和跨越,并在伊尔76、伊尔86、伊尔96、安124、Su27系列等苏制(俄制)飞机上获得了大量工程应用<sup>[21,26-27]</sup>。

BT16(我国仿制牌号TC16)钛合金名义成分Ti-3Al-5Mo-4.5V,该合金是马氏体型 $\alpha + \beta$ 型双相钛合金, $\beta$ 稳定系数为0.83,接近临界成分。该钛合金主要用于制造工作温度350℃以下的航空紧固件,合金 $\alpha + \beta/\beta$ 转变温度(860±20)℃。较小的 $\beta$ 晶粒和在退火状态下高达25%的 $\beta$ 相体积分数决定了BT16合金具有优异的室温工艺塑性,所以该合金可在室温条件下完成紧固件头部的冷锻成形,因而明显提高了其螺栓生产效率、降低了生产成本,随后在固溶时效热处理后其强度可达1030~1180MPa。俄罗斯(前苏联)钛合金螺栓类紧固件主要采用BT16钛合金制造,使用了几十年没有出现任何质量事故。我国20世纪90年代从俄罗斯引进了Su-27飞机生产线,为了满足Su-27飞机的国产化需求,国内相关单位随即开展了BT16钛合金及其紧固件的国产化工作,我国仿制后命名为TC16钛合金。目前,我国自主研制生产的TC16钛合金螺栓已经在国产的第三代战斗机上获得了大量工程应用<sup>[2-12,22]</sup>。

## 2.4 TB3( $\sigma_b \geq 1100\text{MPa}$ 级)

20世纪七八十年代,美国等西方工业发达国家的航空航天用1100MPa级钛合金螺栓主要采用TC4(Ti-6Al-4V)钛合金材料制造,都是采用热锻成形工艺生产。我国20世纪70年代末80年代初应复合材料结构连接需求,急需1100MPa的钛合金螺栓类紧固件,由于受到热锻设备的限制(当时国内没有热锻成形设备),无法研制生产1100MPa级的TC4(Ti-6Al-4V)螺栓,为此主要集中精力研制可以直接冷锻的 $\beta$ 型钛合金,TB3钛合金就是在这种背景条件下研制开发出来的。TB3合金的成分设计参照了美国钛金属公司20世纪研制开发的Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al钛合金<sup>[3,7,24]</sup>。

TB3钛合金是一种可热处理强化的亚稳定 $\beta$ 型钛合金,合金名义成分为Ti-10Mo-8V-1Fe-3.5Al。该合金的主要优点是固溶处理状态具有优异的冷成形性能,其冷锻比( $D_i/D_0$ )可达2.8,“固溶+时效”制度处理后可获得高的强度,主要用于制造使用温度低于300℃的1100MPa级高强度航空航天紧固件。1982年10月,我国开始了TB3钛合金螺栓的研制工作,1985年研制工作取得进展,并形成了相关技术规范。在20世纪80年代中后期国产TB3钛合金先后制成高锁螺栓和干涉型螺栓,装于飞机复合材料结构与金属结构,为我国钛合金螺栓类紧固件的应用摸索出了一定经验基础。该合金现已广泛用做1100MPa钛合金螺栓的制造,并已成功应用于Y-7、J-8、J-10飞机及某些航天飞行器上。

目前, TB3 钛合金已成为我国能够工业化生产的宇航飞行器用钛合金螺栓类紧固件的主要材料。同时, 该钛合金也用于铆钉的制造, 我国在 2006 年颁布的 GJB120-2006《钛及钛合金铆钉》中也将 TB3 钛材作为铆钉用料正式列入标准<sup>[2,6,28-31]</sup>。

### 2.5 TB8 钛合金 ( $\sigma_b \geq 1280\text{MPa}$ 级)

随着航空航天技术的飞速发展, 在军民用飞机上所采用的机械连接技术要求越来越高, 其所采用的标准件技术含量也越来越高, 其在整机上所起的作用已不仅是“紧固”、“连接”作用, 而是成为实现整机性能的重要结构件。未来航空航天技术的发展趋势要求新型紧固件的比强度高, 即要求重量轻、强度高。所以美国、俄罗斯、法国等世界航空强国都在积极开发抗拉强度 1200MPa 以上的高强度钛合金材料及其紧固件。近年来, 美铝公司开发出了 Timetal555 钛合金高强螺栓, 其固溶时效后抗拉强度达 1300MPa 以上、双剪强度大于 745MPa、延伸率大于 10%, 各项性能指标完全达到了典型的 1250MPa 镀镉合金钢紧固件规范的要求。SPS 航空紧固件集团采用 SPS TITANTM761 钛合金加工制造的螺栓产品 Aerlite180, 其抗拉强度可达 1240MPa、剪切强度可达 745MPa, 达到了许多合金钢和耐蚀合金紧固件的强度水平, 同时减重 40%<sup>[5-6]</sup>。

为了紧跟国际先进航空航天钛合金紧固件发展趋势, 近年来西工大超晶公司与信阳航天标准件厂联合研制开发了紧固件专用 TB8 钛合金棒丝材及其 1280MPa 高强螺栓类紧固件, 其规格从  $\phi 4 \sim \phi 25$ 。TB8 钛合金是我国仿制美国的  $\beta$  21S 钛合金, 其名义成分为 Ti-3Al-2.7Nb-15Mo,  $\beta$  21S 合金是美国钛金属公司 (Timent) 1989 年为 NASP 计划研制开发的亚稳定  $\beta$  型钛合金,  $\beta$  21S 钛合金具有优异的冷热加工性能、深的淬透性、高的抗蠕变性能、高的抗氧化性能和良好的抗腐蚀性能, 所以该合金得到了飞机设计者和制造者的认可, 作为优良的宇航结构材料于 1994 年首先被列入美国的 ASTM 标准中, 美国主要使用该合金制造航天飞机用钛基复合材料及波音 777 等飞机发动机吊舱部件。我国从 20 世纪 90 年代开始进行了该合金的仿制工作, 完成了某型飞机结构件用 TB8 钛合金锻件及钣金件的研制及应用研究工作, 由于最终没有获得工程化应用, 仅在 GB/T3620.1-2007《钛及钛合金属牌号和化学成分》中对其牌号及成分进行规范, 其材料及产品没有形成国标、国军标以及航标规范<sup>[32-36]</sup>。

信阳航天标准件厂与西工大超晶公司联合研制开发的 1280MPa 级 TB8 钛合金螺栓实物照片见图 1, 主要性能指标见表 1。由于该合金的采用的  $\beta$  稳定元素为高熔点、抗氧化的钼元素和铌元素, 而非 TB2、TB3 钛合金采用的抗氧化性能差的钒元素, 所以该合金制造的紧固件长时间使用温度可达 550℃, 彻底解决了传统高强  $\beta$  钛合金紧固件使用温度低 (不高于 300℃) 的问题。目前, 研制开发的该 1280MPa 级 TB8 钛合金高强螺栓已经在我国新一代飞机中获得了工程应用, 取得了良好的减重效果和与复合材料相容性效果。

### 3 总结

可以看出, 航空用钛合金紧固件的研究与应用自工业钛合金出现就已经开始, 美国、俄罗斯 (前苏联) 等航空工业发达国家在很早就已经形成了符合自身工艺技术的紧固件用钛合金材料体系, 钛合金紧固件已经在其航空制造领域获得了大量应用。而我国航空用钛合金紧固件的研究及应用起步较晚, 都是在航空发动机或飞机的仿制、技术借鉴或引进改进过程中被动进行的, 制造紧固件的钛合金材料基本都是借鉴或仿制俄罗斯 (前苏联)、美国的, 同时我们国家航空紧固件中钛合金紧固件的占有量相对较低。随着我国航空工业的迅速发展及对飞行器性能要求的不断提高, 未来高性能航空紧固件对其制造钛合金材料提出了更高强度、更高断裂韧



图1 1280MPa级TB8钛合金螺栓照片  
Fig.1 Photos of 1280MPa TB8 Titanium bolt

表1 1280MPa级TB8钛合金螺栓性能指标

性能项目	指标	备注
抗拉强度 /MPa	$\geq 1280$	按照 GJB715.23A-2008 标准进行
延伸率 /% (同炉材料)	$\geq 8$	为同批材料随炉试样延伸率, 螺栓对延伸率无要求
双剪强度 /MPa	$\geq 755$	按照 GJB715.26A-2008 标准进行
疲劳寿命 /次	$\geq 130000$	按照 GJB715.30A-2002 标准进行, 载荷: 512MPa

性、更高疲劳性能要求。

### 参考文献

- [1] 王金友,葛志明. 航空用钛合金. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
- [2] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [3] 张树启. 紧固件用高强钛合金的发展. 钛工业进展, 1998(5): 1-3.
- [4] 张庆玲,王庆如,李兴无. 航空用钛合金紧固件选材分析. 材料工程, 2007(1): 11-18.
- [5] 赵庆云,徐锋. 航空紧固件用钛合金的研究进展. 中国有色金属学报, 2010, 20( 专辑 1): 1021-1023.
- [6] 倪沛彤,韩明臣,张英明,等. 宇航飞行器紧固件用钛合金的发展. 钛工业进展, 2012, 29(3): 6-10.
- [7] 张全纯. 钛合金紧固件的选材探讨. 航空工艺技术, 1991(4): 18-21.
- [8] 611 所标准组. TB2-1 钛合金铆钉的研制及应用.
- [9] 一七二厂钛铆课题组. 钛合金铆钉在飞机上的应用.
- [10] 刘风雷. 我国航空钛合金紧固件的发展. 航空制造技术, 2000(6): 39-55.
- [11] 毛进勤. 我国应积极发展高品质钛合金紧固件. 世界有色金属, 2008(4): 64-68.
- [12] 宋敖登. 探讨我国航空标准件的发展. 航空工程与维修, 1999(4): 12-13.
- [13] GJB120-1986, 钛合金铆钉[S].
- [14] GJB856-90, 抗拉型钛合金环槽, 铆钉规范[S].
- [15] GJB857.1-90, 100° 沉头抗拉型钛合金环槽铆钉[S].
- [16] 汪建林. 高强度 $\beta$ 钛合金的发展和应. 上海钢研, 2001(2): 25-30.
- [17] Zorn G, Lesman A, Gotman I. Oxide formation on low modulus Ti45Nb alloy by anodic versus thermal oxidation. Surface & Coatings Technology, 2006 (201): 612-618.
- [18] Godley R, Starosvetsky D, Gotman I. Corrosion behavior of a low modulus  $\beta$ -Ti-45%Nb alloy for use in medical implants. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 2006 (17): 63-67.
- [19] Feng X J, Macac J M, Schmuki P. Flexible self-organization of two size-scales oxide annotates on Ti45Nb alloy. Electrochemistry Communications, 2007(9): 2403-2407.
- [20] 商国强,王新南,唐斌. 紧固件用 Ti-45Nb 合金丝材的性能评价. 中国有色金属学报, 2010, 20( 专辑 1): 70-74.
- [21] 周芸,王超. 钛合金紧固件生产技术. 钛工业进展, 2001(1): 12-15.
- [22] 赵庆云,刘风雷,刘华东. 世界先进航空紧固件进展. 航空制造技术, 2009(3): 54-56.
- [23] 张源,张爱荔,李惠娟. TC4 钛合金的表面氧化及其对疲劳性能的影响. 钛工业进展, 2010, 27(1): 25-27.
- [24] 陕西省有色金属工业管理局. 陕西省有色金属工业科技志. 西安: 陕西科学技术出版社, 1991.
- [25] 张鹏,赖运金,王永哲,等. TC4 紧固件的疲劳断口. 中国有色金属学报, 2010, 20( 专辑 1): 826-829.
- [26] 李兴无,沙爱学,苏生明,等. 冷变形强化钛合金紧固件及其应用前景. 第十二届中国有色金属学会材料科学与合金加工学术

讨论会文集, 2007: 70-73.

- [27] 杨洋,董利民,关少轩,等. 冷锻和热锻对 TC16 合金组织和性能的影响. 中国有色金属学报, 2010, 20( 专辑 1): 108-112.
- [28] 曲璇中,殷小健,郭向洪. 新型航天天标准紧固件. 航天标准化, 2003(5): 15-18.
- [29] GJB2219-94, 紧固件用钛及钛合金棒(线)材规范[S].
- [30] 何春艳,叶红川,曲恒磊,等. 热处理制度对 TB3 钛合金组织及性能的影响. 热加工工艺, 2011(20): 181-185.
- [31] HB6732-93, 航空紧固件用 TB3 钛合金棒(线)材[S].
- [32] Grauman J S. Corrosion Behavior of Timetal 21S for Non-aerospace Applications. Titanium' 92: Science and Technology, TMS, 1993, 2737-2742.
- [33] 彭益群,周光爵,于启山. 新一代  $\beta$  钛合金 -  $\beta$  21s 合金. 稀有金属, 1994(3): 187-189.
- [34] 朱知寿,钟鸣,储俊鹏,等.  $\beta$  21S 钛合金薄板的热处理工艺和冷成形性能研究. 稀有金属材料与工程, 2000(1): 50-52.
- [35] Boyer R R. Aerospace Applications of Beta Titanium Alloys. JOM, 1994, 7: 20-23.
- [36] GB/T3620.1-1607, 钛及钛合金牌号和化学成分[S].

(责编 深蓝)

(上接第 128 页)

表 4 钛蜂窝整体壁板与传统加筋结构要素对比

结构要素	传统加筋壁板	钛蜂窝整体壁板	要素减少	减少百分比/%
零件数量	13	5	8	61.5
结构重量/kg	9.14	6.78	2.36	25.8
机械连接件数量	560	170	390	69.6

数量减少了接近 70%, 从而大大减少了因连接装配开孔对结构产生的削弱和初始缺陷, 并有效地提高了蒙皮的表面质量。

## 4 结论

性能分析表明, 钛合金蜂窝与铝合金蜂窝相比, 有更高的比强度、比刚度和耐热性, 能有效提高夹层壁板结构的整体刚度、稳定性和隔热性; 而在实际工程应用中, 钛蜂窝整体壁板与传统加筋壁板相比, 在结构整体性和重量上更具有明显的优势。

### 参考文献

- [1] 潘玲英. 共固化复合材料 / 铝蜂窝夹层结构性能. 宇航材料工艺, 2012(4): 56.
- [2] 岳喜山, 欧阳小龙, 侯金宝, 等. 钛合金蜂窝壁板结构钎焊工艺. 航空制造技术, 2009(10): 96-97.
- [3] Pressly H B. Brazing Titanium Structures. Technical Communications, 1977: 7.
- [4] Drury J C. Ultrasonic flaw detection for technicians. 3rd ed. Wales UK: Silverwing Limited, 2004: 165-210.

(责编 良辰)