

航空紧固件用钛合金的研究进展

赵庆云¹, 徐 锋²

(1. 北京航空制造工程研究所, 北京 100024; 2. 宝钢股份 特钢事业部, 上海 200940)

摘 要: 分析航空紧固件用钛合金材料的应用概况、材料特性和紧固件加工制造特点, 研究了新近开发的高强钛合金材料及所加工的紧固件性能特点。

关键词: 钛合金; 航空紧固件; 高强度

中图分类号: TF 804.3

文献标志码: A

Research progress of titanium alloy for aerospace fasteners

ZHAO Qing-yun¹, XU Feng²

(1. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China;

2. Special Steel Business Unit, Baoshan Iron & Steel Co., LTD., Shanghai 200940, China)

Abstract: The application status, materials characteristics and manufacturing technology of titanium alloy for aerospace fasteners were studied. Emphasis was made on newly developed high-strength titanium fasteners and material characteristics.

Key words: titanium alloy; aerospace fastener; high-strength

由于航空产品工作环境的特殊性以及高可靠性的要求, 对紧固件产品也提出更高的性能要求。因此, 通常在进行航空紧固件的材料选择时, 需要考虑下面一些因素: 最大和最小工作温度, 环境的腐蚀性, 不同材料间的电偶腐蚀, 疲劳和冲击载荷等。另外, 还需要考虑如何在公开市场上获得这些材料。

钛及其合金由于具有密度小(4.51 g/cm^3)、强度高、比强度大, 且使用温度范围广($-212.22 \sim 426.66 \text{ }^\circ\text{C}$)、抗疲劳性能(疲劳极限是钢的两倍)优异等特点, 故非常适合在飞机等高速飞行器上使用。因为钛合金与复合材料的电极电位相近, 所以钛合金紧固件成为复合材料的主要连接材料。另外, 钛合金比合金钢更耐腐蚀, 在许多应用环境, 不需要保护涂层。因此, 钛及其合金也是生产极具发展潜力、应用于“重腐蚀或恶劣环境”下的紧固件材料^[1-3]。

应用钛合金紧固件产生的减重效果, 对提高飞机的推进力、增加射程、节省燃料、减少费用等都将产生巨大的效应。因此, 在美国军民用飞机上, 钛合金紧

固件已基本取代了合金钢紧固件。在现代飞机制造中, 一架飞机所用的连接紧固件少则几十万件, 多则几百万件, 钛合金紧固件占其中螺纹紧固件的比例高达90%。钛合金紧固件已成为当今最重要的航空紧固件品种。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也日益加大^[1-3]。

目前, 航空钛合金紧固件使用较多的原材料有Ti-6Al-4V、BT16和TC6等。随着航空工业的发展, 各种适合制作新型钛合金紧固件的原材料还将不断涌现。

1 100 MPa 强度等级钛合金

1.1 Ti-6Al-4V

大多数钛合金紧固件由Ti-6-4(国内牌号TC4)制造。TC4不能通过冷镦成形, 只能热镦成形, 时效后的强度可达100 MPa以上, 常用于制造螺栓、螺钉、

环槽铆钉等, 在 400 °C 以下使用。

目前, TC4 螺栓在国内飞机、发动机和机载设备上的应用越来越多, 加工的紧固件主要有钛螺栓、钛高锁螺栓、大底脚单面螺纹抽钉等, 头型有 90°、100°、120°沉头、半圆头等。

中航工业北京航空制造工程研究所已有近 30 年的钛紧固件研发制造历史, 解决了诸多钛紧固件研制生产的关键工艺技术, 已研制、开发了多种钛合金紧固件, 并得以应用。图 1 所示为该所加工的直径 4~18 mm TC4 钛紧固件产品。



图 1 北京航空制造工程研究所采用 Ti-6-4 所加工的紧固件
Fig.1 Ti-6-4 fasteners manufactured by Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute

1.2 BT16

另一个在航空紧固件上得到普遍应用的钛合金是俄罗斯的 BT16 合金(国内牌号 TC16), 固溶状态下具有很好的塑性及极好的冷镦性能, 镦锻比可达 1:4, 时效处理后的强度可达 1 030 MPa 以上。因此, TC16 通常冷镦成形而不用热处理, 采用冷变硬化方法加工紧固件, 极大地提高了生产效率。

TC16 制造的螺栓、螺钉和自锁螺母也得到了应用, 所加工螺栓头型有六角头、小六角头、90°沉头、120°半沉头、扁圆头等。

1.3 TC6

近年来, 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 °C 以下高温的 TC6(俄罗斯材料 BT3-1)钛紧固件, 与 TC4 钛紧固件比, 这种材料对温度具有较高的敏感性, 其制造更困难^[4]。

2 高强钛合金

尽管 Ti-6-4 是近 50 年来航空紧固件使用最普遍的

钛合金, 但是, Ti-6-4 在紧固件使用上有 2 个方面的限制因素: 1) 强度限制, 抗拉强度最高 1 100 MPa (160 ksi); 2) 尺寸限制, 最大使用尺寸约 19 mm (0.75 in)。

由于在静动态性能方面很难取得平衡, 钛合金在主承力结构所要求的紧固件性能(见表 1)上难以得到广泛应用。同时, 减少合金钢和防锈钢的镀层的需求, 结合 Ti-6-4 固有的淬透性的限制, 引发了一些公司开发其他钛合金的兴趣。这样, 用于替代 Ti-6-4 的高强钛合金的开发工作就开展起来。

表 1 高强航空紧固件的性能要求

Table 1 Properties requirement of high-strength aerospace fasteners

力学性能	要求
抗拉强度	$\geq 1\,241\text{ MPa}$
双剪强度	$\geq 745\text{ MPa}$
疲劳寿命	130 000 次循环不失效 (R=0.1, 载荷 22.24 kN/2.22 kN, 频率 10 Hz)

2.1 Timetal 555

过去的几年里, 美铝公司评估了许多新开发的用于高强紧固件的钛合金的能力。最近, 美铝公司成功地开发了使用 Timetal555 材料的高强紧固件(Ti555 是 Timet 开发的近 β 钛合金), 这种紧固件采用传统的紧固件生产工艺加工而成, 如图 2 所示。详细的质量检测, 包括非破坏性试验、力学性能试验、冶金性能试验, 显示了新开发的 Ti-555 紧固件具有优良的性能, 满足或超过典型的 1 250 MPa 镀镉合金钢紧固件规范的要求。其力学性能评估结果如表 2 所列^[5]。

2.2 SPS TITAN™761

SPS 航空紧固件集团自 1903 年以来一直是高强



图 2 采用 Timetal555 所加工的 Ti555 紧固件照片

Fig.2 Photo of Ti-555 fasteners manufactured by Timetal 555

表 2 Ti-555 紧固件的力学性能

Table 2 Mechanical properties of Ti-555 fasteners

热处理	抗拉强度/ MPa	伸长率	双剪强度/MPa	
			不带涂层	带涂层
固溶 +时效	≥1 309	>10%	≥779	≥745

紧固件的主要制造商, 其采用特殊加工工艺研制的 SPS TITAN™761 钛合金, 克服了其他钛合金在制造紧固件的尺寸和强度方面的限制, 所加工的 Aerlite160 钛合金螺栓尺寸从 19.05 mm 到 28.575 mm, 满足钛螺栓规范 NAS621, NAS4004, AS7460 和 AS7461 的要求, 在整个尺寸范围内抗拉强度都可达 1 100 MPa, 剪切强度达到 655 MPa, 并且具有良好的疲劳性能, 这种尺寸 Ti-6-4 合金是不可能达到的。这为由于尺寸限制而不得不从钛合金转向较重的钢或防锈钢的设计者们提供了新的材料选择。采用 SPS TITAN™761 钛合金所加工的另一个紧固件产品 Aerlite180, 其抗拉强度可达 1 240 MPa、剪切强度可达 745 MPa, 直径达 25.4 mm, 显示出许多合金钢和耐蚀合金紧固件的强度水平, 同时, 可节省 40%的质量^[6-7]。表 3 所列 Aerlite 紧固件的力学性能, 图 3 所示为采用 SPS TITAN™761 钛合金所加工的 Aerlite 紧固件照片。

表 3 Aerlite 紧固件的力学性能

Table 3 Mechanical properties of Aerlite fasteners

紧固件	抗拉强度/ MPa	双剪强度/ MPa	疲劳载荷
Aerlite160	≥1 103	≥655	0.4σ _b
Aerlite180	≥1 241	≥745	0.38σ _b



图 3 采用 SPS TITAN™761 钛合金所加工 Aerlite 紧固件照片

Fig.3 Photo of erlite fasteners manufactured by SPS TITAN™761

3 结语

通过航空紧固件钛合金的使用情况可以看出, 航空紧固件材料应具备足够的强度与塑性、耐蚀性、抗疲劳等性能, 随着先进飞机上的复合材料和钛合金的用量的增加, 以及高强钛合金的研发成功, 钛合金紧固件将得到更大的应用, 在保证强度性能的同时, 对飞机质量的减轻具有积极的意义。

REFERENCES

[1] 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. Materials selection analysis for titanium alloy fasteners in aviation industry [J]. Journal of Materials Engineering, 2007(1): 11-14.

[2] 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, 2(2): 239-242.
SHA ai-xue, WANG qing-ru, LI xing-wu. Research and application of high-strength titanium alloys used in airplane structure [J]. Chinese Journal of Rare Metal, 2004, 2(2): 239-242.

[3] 毛进勤. 我国应积极发展高品质钛合金紧固件[J]. 世界有色金属, 2008(4): 64-67.
MAO Jin-qin. China should develop high-quality titanium fasteners [J]. World Nonferrous Metals, 2008(4): 64-67.

[4] 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 aeronautical Ti alloy fastener in China [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2000(6): 39-41.

[5] JOHN F, LIANG Z, STACEY N, LUKE H. Properties and microstructure of Ti-555(Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-0.6Fe) for fasteners [C]// Ti-2007 Science and Technology. Tokyo: The Japan Institute of Metals, 2007: 1263-1266.

[6] 赵庆云, 刘风雷, 刘华东, 世界先进航空紧固件进展[J]. 航空制造技术, 2009(3): 54-56.
ZHAO Qing-yun, LIU Feng-lei, LIU Hua-dong. Development of advanced aerospace fastener [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(3): 54-56.

[7] SPS Technologies. SPS technologies offers TITAN titanium fasters with 1608.180 ksi tensile strength [EB/OL]. [2005-07-22]. <http://www.spstech.com>

(编辑 刘华森)