

文章编号:1674-8190(2014)03-275-06

钛合金在典型民用飞机机体结构上的应用现状

张宝柱, 孙洁琼

(中航沈飞民用飞机有限责任公司 工程研发中心, 沈阳 110013)

摘要: 民用飞机机体结构通常采用钛合金以实现结构减重、改善疲劳寿命、提高耐腐蚀性, 当代先进的民用飞机普遍提高了钛合金的用量。从钛合金的特点及其应用优势出发, 介绍了钛合金在先进民用飞机机体结构中的应用现状并分析原因, 总结并提出了钛合金在民用飞机机体结构上应用的机遇和挑战, 为我国民用飞机的研发和发展提供参考和借鉴。

关键词: 钛合金; 应用; 民用飞机; 机体结构

中图分类号: V252

文献标识码: A

Recent Applications of Titanium Alloys in Typical Commercial Aircraft Fuselage Structure

Zhang Baozhu, Sun Jieqiong

(Research & Development Center, AVIC SAC Commercial Aircraft Company, Ltd., Shenyang 110013, China)

Abstract: The application of titanium alloy for the commercial aircraft fuselage can make the structure weight saving, and improve fatigue life and the corrosion-resistant capability. The quantity of titanium alloy increased in the most advanced commercial aircrafts. The properties and advantages of the titanium alloys are described in detail. The recent applications of titanium alloys and fasteners on commercial aircrafts are introduced and the reason is analyzed. The opportunity and the challenge of titanium alloy applications are also presented. We provide a reference for research and development of commercial aircraft in China.

Key words: titanium alloy; application; commercial aircraft; fuselage structure

0 引言

钛合金以其高比强度、耐高温、耐腐蚀等特点, 在航空领域得到了广泛的应用^[1-3]。随着先进复合材料在民用飞机上用量的逐渐增加, 钛合金与复合材料相容性好的特点使其具有了更大的优势, 其在民用飞机机体结构的用量也在不断提高。以 B787 和 A350 为代表的最新一代民用飞机, 钛合金用量分别达到 15%^[4-5] 和 14%^[6], 充分体现了钛合金在现代民用飞机设计领域的重要性和不可替代性。

我国民用飞机设计起点较低、发展较慢, 钛合

金在机体上的应用还有待进一步提高。为提升我国民用飞机上钛合金的使用量, 发挥钛合金的优势, 进而提高飞机性能, 实现减重和优化, 本文对钛合金的性能特点、应用优势及其在现代先进民用飞机上的应用现状进行分析和研究, 总结钛合金应用的机遇和面临的挑战, 为我国民用飞机的研制和发展提供参考和借鉴, 具有较高的实际指导意义。

1 钛合金的主要性能特点

钛合金是一种重量轻、耐腐蚀的结构材料, 比强度高; 具有较高的熔点, 约为 1 690°C; 弹性模量相对较低, 可以通过合金化和热处理获取更高的强度性能; 具有很高的疲劳强度和断裂韧性; 很好的高温性能; 热性能好, 热膨胀系数比钢低, 比铝合金的 50% 还低^[7-8], 热传导率低; 无磁性。高温时, 与

其他材料具有很好的化学相容性;优越的耐腐蚀和抗氧化能力,能够降低飞机的运营和维护成本。

制约钛合金应用的主要问题是其密度比铝合金大、成本也相对较高(大约是铝或钢的 7 倍)。

2 钛合金的应用优势

民用飞机上大量应用钛合金的一个重要推动力是结构减重,减重效果直接决定飞机综合成本的高低。钛合金比同等强度的钢的密度低 40%,用钛合金代替钢和镍基合金甚至高强度钢时,能够大量减重。例如,在某些情况,用钛合金 Ti-6Al-4V 代替钢用于发动机风扇、压气机盘及叶片等可减重 30%;用 Ti-10V-2Fe-3Al 代替 30CrMnSiA 钢,零件可以减重 40%左右^[9]。采用超塑性成形及扩散联接技术(SPF/DB)的钛合金结构应用广泛,例如 A300、A310/320 的前缘缝翼收放机构外罩,可减重 10%;A330、A340 机翼检修口盖、驾驶舱顶盖、缝缘传动机构等减重达到 46%,经济效益显著^[10]。

民用飞机机体结构使用钛合金的另一优势是突破体积限制。当结构载荷比较高、采用铝合金又受到结构空间限制时,强度较高的钛合金成为较理想的材料。波音飞机上采用非常大的钛合金锻件以降低结构体积,例如波音 757 和 747 的起落架梁。起落架是连接起落架梁和机翼后梁之间的部件,虽然铝合金成本低,可以作为备选材料,但是由于操稳载荷高,铝合金需要做得非常大而难以包在机翼内^[11],故选用钛合金则更为适合。

较高的工作温度也是钛合金的一大优势。传统铝合金仅能适用于 130~150℃,在高温区域,采用钛合金更适宜,可以提高结构效率。钢和镍基合金也可以选用,但是这两种材料密度都比钛合金大。发动机支持结构,如 B787 吊挂结构和辅助动力装置(APU)区域等,将温度作为设计的主要考虑因素。

钛合金具有优良的耐腐蚀性,使其在腐蚀严重区域得以大量应用。实际上钛合金在民用飞机运营环境中,几乎不会发生腐蚀现象。在易腐蚀区域,如位于厨房和盥洗室下的地板支持结构,钛合金可取代铝合金用于连接座椅和地板。

随着碳纤维复合材料(CFRP)的广泛使用,钛合金与碳纤维复合材料相容性好的特点成为其大量使用的重要原因。铝合金和 CFRP 之间存在有

较大的电位差,将导致严重的电化腐蚀,尽管可以采取增加玻璃布等保护措施来隔离铝合金和碳纤维,但表面涂层的任何破损都将导致铝合金的快速腐蚀。对于关键结构,很难检查或替换,为避免电化腐蚀的出现,应优先选用钛合金。钛合金的这一特性,也使其在铝合金与复合材料结构之间的界面中,得到大量应用。与铝合金相比,钛合金能够提高结构寿命 60%^[12]。而且其热膨胀系数低,当与 CFRP 结构连接在一起时,能够降低高热载。

3 钛合金在典型民用飞机机体结构上的应用

3.1 钛合金在波音系列飞机上的应用

钛合金在波音系列飞机上的应用,是随着铝合金和钢用量的减少而逐步增加的,B777 飞机钛合金的用量为 7%,由于复合材料的全面使用,钛合金在 B787 飞机上的用量达到了创纪录的 15%,这标志着钛合金在现代复合材料民用飞机中的重要作用逐渐显现出来。波音系列飞机材料比例如图 1 所示,钛合金的应用比例随着每一个重要商业飞机的产生而增加。

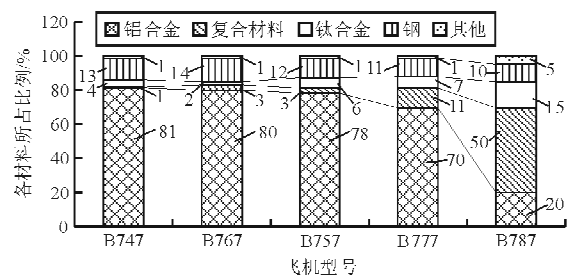


图 1 波音系列飞机材料比例

Fig. 1 Materials ratio on Boeing commercial aircraft

3.1.1 钛合金在 B777 上的应用

在 B777 上,钛合金主要应用于早期 CFRP 结构,来避免采用铝合金造成的电化腐蚀,大幅度提高了飞机的损伤容限。将 Ti-10V-2Fe-3Al 钛合金应用于 B777 的主起落架转向架梁上,单个钛合金锻件重量当时达到了最大。这一设计减重幅度非常大,与高强度钢的起落架部件相连接,没有产生典型的腐蚀和表面损坏。另一个主要进步是,B777 选择了 β -21S 钛合金用于发动机塞、整流罩和喷嘴等热结构,其高抗氧化性大幅度降低了排气

部件的重量^[18]。

3.1.2 钛合金在 B787 上的应用

钛合金在 B787 上的使用比例为破纪录的 15%。一方面是传统部位的采用,如吊挂、起落架结构等;另一方面,由于 B787 飞机复合材料用量的大幅增加以及钛合金与复材相容性好的特点,钛合金在某些部位也取代了铝合金。

吊挂是飞机的关键部件,B787 在其吊挂结构上采用了新型的 Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr 近 β 型合金,具有较高的强度,静强度优于传统的 Ti-6Al-4V^[14],主要应用于比较重要的上连杆和吊挂接头结构,侧连杆则采用了普通的 Ti-6Al-4V,既满足传力要求,又能满足运营温度要求。钛合金在 B787 吊挂结构上的应用如图 2 所示。

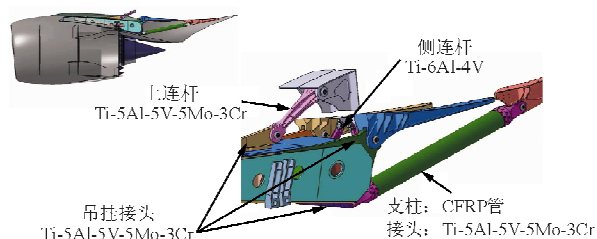


图 2 钛合金在 B787 吊挂结构上的应用
Fig. 2 Application of titanium alloys on B787 slung-load structure

B787 机身为全复合材料结构,包括机身蒙皮、长桁、普通框和剪切角片等。而在载荷复杂的中机身,所有侧边框包括前后压力隔框都普遍采用钛合金结构以承受高载,B787 中机身框结构如图 3 所示。

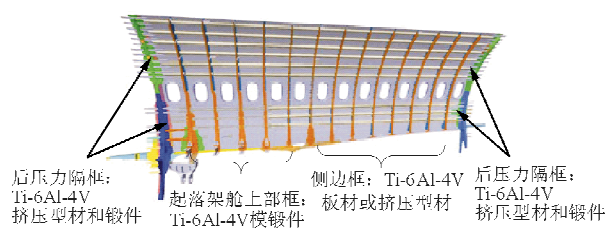


图 3 B787 中机身框结构
Fig. 3 Frames of B787 mid fuselage

B787 大开口加强结构中的加强框,采用了 Ti-6Al-4V 杆状锻件机加结构。相比于复合材料框,钛合金具有良好的抗冲击性,可以避免旅客、货物对门框意外撞击造成损伤。相比于铝合金,钛合金

不仅与复合材料机身壁板具有很好的相容性,结构效率也要高出很多,能够更好的对大开口进行加强,并在一定程度上降低结构高度,节省内部空间。为避免腐蚀,B787 座椅滑轨也采用了钛合金挤压型材。

B787 的其他关键部位,尤其是与复合材料外翼前后梁连接的各类接头,普遍采用了钛合金。包括与发动机吊挂连接的接头、与主起落架连接接头,襟翼滑轨接头、机翼梁接头等,部分接头零件的选材情况如图 4 所示。

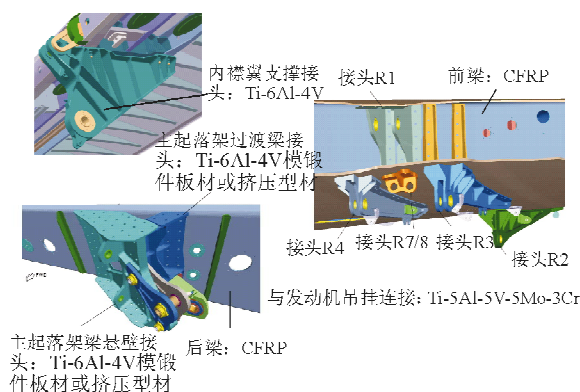


图 4 与 B787 机翼连接的部分钛合金接头
Fig. 4 Titanium fittings attachment with wing on B787

3.2 钛合金在空客飞机上的应用

钛合金在空客系列飞机上的使用量一直比较稳定,低于钢的用量。随着复合材料用量的逐渐增加,钢的用量逐渐减少,在 A350 飞机上复合材料用量达到了 52%,钛合金也超过了钢的用量,达到了 14%,如图 5 所示。

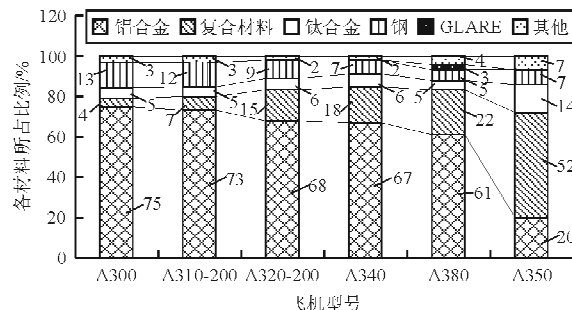


图 5 空客系列飞机结构材料的比例
Fig. 5 Materials ratio on Airbus commercial aircraft

3.2.1 钛合金在 A380 飞机上的应用

A380 是目前世界上最大的民用飞机,以铝合金为主要材料。A380 的选材和设计代表着先进

民用飞机选材和设计的趋势。相较于以往机型，A380 钛合金的使用比例没有明显增加，但由于机身整体重量大，钛合金的总用量是相当大的。在机身的关键部位，都采用了钛合金，尤其是重要的连接位置。A380 飞机钛合金分布情况如图 6 所示^[15]，主起落架采用 Ti-10V-2Fe-3Al，每件重量达 3 120 kg^[16]。



图 6 钛合金在 A380 飞机上的主要分布

Fig. 6 Application of titanium alloys on A380

空中客车公司第一次采用全钛设计了 A380 吊挂的主要结构。主要采用最常用的钛合金 Ti-6Al-4V，如图 7 所示^[15]，其在 β 退火状态下具有最大的断裂韧性和最小的裂纹增长速度，使得吊挂的疲劳性能得到较大改善。

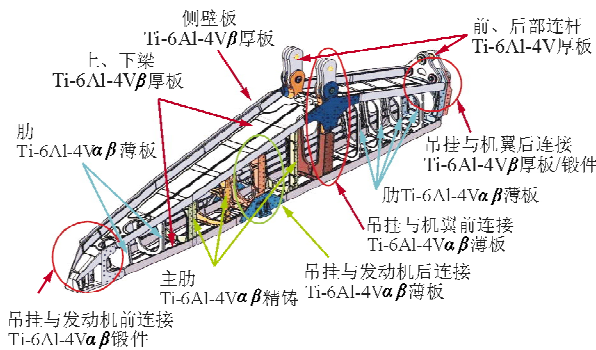


图 7 钛合金在 A380 吊挂结构上的应用

Fig. 7 Application of titanium alloys on A380 slung-load structure

此外，在 A380 上第一次采用了新型钛合金 VST55531，这种新的钛合金是空中客车公司与俄罗斯制造商共同研发的，能够为设计者提供良好的断裂韧性和较高强度的综合性能匹配。该合金目前用于 A380 飞机机翼和挂架之间的连接件，进一步的应用还在研究之中^[17]。

3.2.2 钛合金在 A350XWB 飞机上的应用

A350XWB 是目前世界上除 B787 以外应用复合材料最多的机型。由于钛合金与复合材料良好的相容性，钛合金的用量往往随着复合材料用量的增加而增加。2005 年，A350 计划采用 40% 的复合材料和 9% 的钛合金；2007 年，迫于 B787 的压力，A350XWB 将复合材料用量增加到了 52%，相应地，钛合金的用量也增加到了 14%，如图 8 所示^[18]，两种材料的百分比基本与 B787 持平。

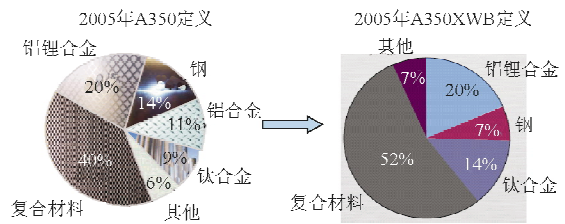


图 8 A350(XWB)钛合金用量随复合材料用量的变化

Fig. 8 Titanium alloys usage change with composite on A350(XWB)

与 A380 相似，A350XWB 飞机将钛合金应用于吊挂主结构，并增加了起落架结构钛合金的用量，在活塞、转向架、扭力臂和侧撑杆等部位也都采用了钛合金(如图 9 所示^[18])。事实证明钛合金具有很好的耐高温、耐腐蚀性能，采用钛合金实现了减重，提供了较高的可靠性和较低的维护费用。

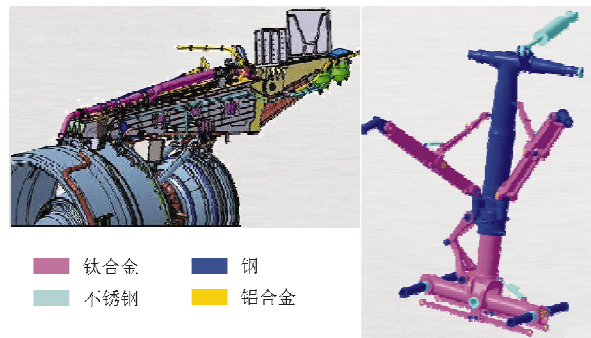


图 9 钛合金在 A350XWB 吊挂与起落架上的应用

Fig. 9 Application of titanium alloys on A350XWB slung-load and landing gear structure

由于大范围使用复合材料，而钛合金与复合材料的相容性比铝合金好，在 A350XWB 飞机上，钛合金在很多结构上代替了传统铝合金，典型的如门加强框。空客认为，选择钛合金的主要原因是门框上存在大量的连接件，如门挡块，这些连接件在安装后可能仍需调整才能达到正确的位置，装配中易

产生划痕和错误的钻孔,钛合金对于这些损伤的敏感度比复合材料低得多。同样,采用钛合金材料,装配后的门框组件也比较容易修理。基于易受损的原因,门上部楣梁及其延伸段和下部槛梁也选择了钛合金作为结构材料,如图 10 所示。A350 还将钛合金用于机翼结构、座椅滑轨、尾锥和 APU 舱防火墙等^[19]。

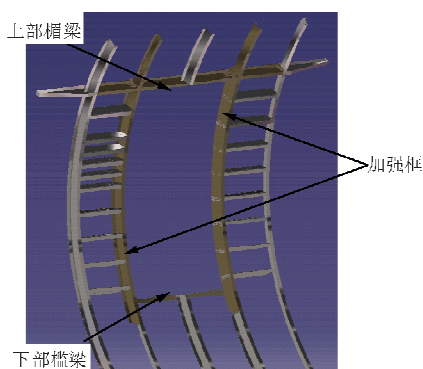


图 10 A350 登机门口框结构

Fig. 10 Cutout structure of A350 boarding hatch

3.3 钛合金在庞巴迪 C 系列 (CS100 和 CS300 型)飞机上的应用

作为即将服役的新机,C 系列飞机钛合金的用量达到了 8% 的较高比例,C 系列飞机材料使用情况如图 11 所示。

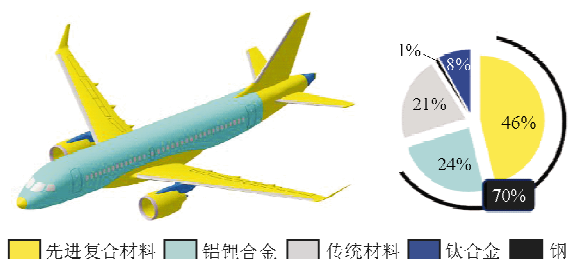


图 11 C 系列飞机材料使用情况

Fig. 11 Application of titanium alloys on C-series aircraft

C 系列也在机身关键位置采用了钛合金,如发动机吊挂、平尾悬挂接头等,中机身后梁框采用了钛合金 Ti-6AlV4V。钛合金后梁框与复合材料中央翼盒相容性好,更重要的是将铝锂合金后梁框更改为钛合金后梁框后,不仅提高了材料的耐腐蚀性和疲劳性能,根据计算还能够减重约 20 kg,这是一个非常可观的数据。在铝锂合金中后机身和复

合材料后机身的界面中,采用了钛合金连接角材与后部复合材料压力隔框进行连接,以避免电化腐蚀现象的发生,并提高疲劳寿命。

根据高温区需要,C 系列 APU 防火墙采用纯钛薄板,尾锥对接框采用 Ti-6Al-4V 厚板机加结构;航灯整流罩、进气道稳压室、APU 消音器等也采用了钛合金;考虑强度、刚度和耐冲击性,一些重要的接头和舱门挡块等普遍选择了钛合金材料。钛合金在 C 系列飞机尾锥上的应用如图 12 所示。

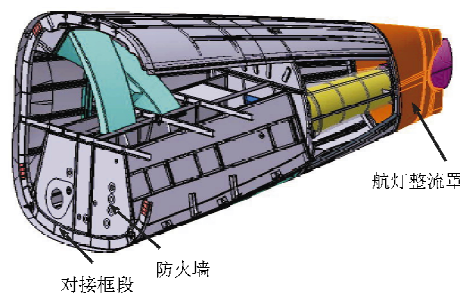


图 12 钛合金在 C 系列尾锥上的应用

Fig. 12 Application of titanium alloys on C-series tail cone

3.4 钛合金紧固件在复合材料结构中的应用

随着现代飞机复合材料用量的急剧增加,钛合金紧固件数量随之大量增加。紧固件材料的选用受到飞机性能、环境、结构等多种因素的影响。对于复合材料结构,其紧固件材料的选择主要从电位和比强度进行考虑。从电位来讲,复合材料紧固件是最适合的,但其难以满足高强度、抗疲劳等性能要求,一般只能用于特殊部位;其次是不锈钢,但其比强度较低,也不适合大量采用。兼顾高比强度和低电位差,钛合金成为复合材料结构用紧固件的最佳材料,无论是铆钉,还是螺栓、单面紧固件等,都大量采用钛合金材料^[20]。通常,对于复合材料的机械连接(包括螺接和铆接),螺接类紧固件材料常选用 Ti-6Al-4V;铆接类紧固件材料常选用纯钛和钛铌合金(55Ti-45Cb),原因是其能防止电偶腐蚀和具有高的比强度,铆接性能(延展性)也较好。

4 结束语

随着复合材料逐渐成为民用飞机机体的主要材料,钛合金在民用飞机上应用的百分比也逐渐增加,钛合金材料应用面临着前所未有的机遇。除了

传统部位,如吊挂、起落架等结构外,也逐渐应用于大开口加强结构、座椅滑轨、APU 防火墙等部位,尤其是机身、机翼上重要的接头零件和界面零件,钛合金的使用范围在不断地扩大。

由于钛合金的固有属性,导致其成本高、加工和成型相对困难,使其在大量应用方面面临着较大的挑战。研发和利用综合高性能的钛合金材料,提高钛合金加工与制造工艺,是现代民用飞机的发展趋势。

参考文献

- [1] 付艳艳,宋月清,惠松晓,等. 航空用钛合金的研究与应用进展[J]. 稀有金属, 2006, 30(6): 850-856.
Fu Yanyan, Song Yueqing, Hui Songxiao, et al. Research and application of typical aerospace titanium alloys[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30(6): 850-856. (in Chinese)
- [2] 曹春晓. 航空用钛合金的发展概况[J]. 航空科学技术, 2005(4): 3-6.
Cao Chunxiao. General development situation of titanium alloys for aviation[J]. Aeronautical Science and Technology, 2005(4): 3-6. (in Chinese)
- [3] 钱九红. 航空航天用新型钛合金的研究发展及应用[J]. 稀有金属, 2000, 24(3): 218-223.
Qian Jiuhong. Application and development of new titanium alloys for aerospace[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2000, 24(3): 218-223. (in Chinese)
- [4] 曹春晓. 钛合金在大型运输机上的应用[J]. 稀有金属快报, 2006, 25(1): 17-21.
Cao Chunxiao. Applications of titanium alloys on large transporter[J]. Rare Metals Letters, 2006, 25(1): 17-21. (in Chinese)
- [5] 曹春晓. 一代材料技术, 一代大型飞机[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 701-706.
Cao Chunxiao. One generation of material technology, one generation of large aircraft[J]. ACTA Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 701-706. (in Chinese)
- [6] 陈亚莉. 从 A350XWB 看大型客机的选材方向[J]. 航空制造技术, 2009(12): 34-37.
Chen Yali. Trend of material selection on large liner through A350XWB[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(12): 34-37. (in Chinese)
- [7] Matthew J Donachie, Jr. Titanium; a technical guide[M]. 2nd ed. USA: ASM International, 2000.
- [8] Richard C Rice. MMPDS-05 metallic materials properties development and standardization[S]. USA: National Technical Information Service, 2003.
- [9] 杨健. 钛合金在飞机上的应用[J]. 航空制造技术, 2006(11): 41-43.
Yang Jian. Titanium application on aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006(11): 41-43. (in Chinese)
- [10] 杨健. 民用飞机机体用钛合金的新技术探讨[J]. 航空制造技术, 2011(13): 51-53.
Yang Jian. New technology research of titanium application on commercial aircraft fuselage[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(13): 51-53. (in Chinese)
- [11] Brian Smith. The Boeing 777[J]. Advanced Materials & Processes, 2003(9): 41-44.
- [12] Dave Watson, DR Tom Bayha, Tom Hofmann, et al. Titanium takes off[J]. Cutting Tool Engineering Magazine, 2007, 59(3): 36-43.
- [13] Boyer Robert R. New titanium applications on the Boeing 777 airplane[J]. JOM, 1992, 44(5): 23-25.
- [14] Stewart Veeck, David Lee, Rodney Boyer, et al. The castability of Ti-5553 alloy[J]. Advanced Material & Processes, 2004(10): 47-49.
- [15] Karl-Heinz Rendigs. Metal Materials in Airbus A380[EB/OL]. (2010-10-06) [2014-03-02]. <http://wenku.baidu.com/view/61c80476f46527d3240ce022.html>.
- [16] 李重河, 朱明, 王宁, 等. 钛合金在飞机上的应用[J]. 稀有金属, 2009, 33(1): 84-91.
Li Chonghe, Zhu Ming, Wang Ning, et al. Titanium application on aircraft [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2009, 33(1): 84-91. (in Chinese)
- [17] 任晓华. A380 飞机结构的先进材料和工艺[EB/OL]. (2007-12-21) [2014-03-02]. http://www.newmaker.com/art_25882.html.
Ren Xiaohua. Advanced material and methods of A380 aircraft structure[EB/OL]. (2007-12-21) [2014-03-02]. http://www.newmaker.com/art_25882.html. (in Chinese)
- [18] Olivier Criou. A350XWB family & technologies[EB/OL]. (2007-09-20) [2014-03-02]. http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text_2007_09_20_A350XWB.pdf.
- [19] 黄张洪, 曲恒磊, 邓超, 等. 航空用钛及钛合金的发展及应用[J]. 材料导报, 2011, 25(1): 102-107.
Huang Zhanghong, Qu Henglei, Deng Chao, et al. Development and application of aerial titanium and its alloys[J]. Materials Review, 2011, 25(1): 102-107. (in Chinese)
- [20] 风雷, 刘丹, 刘健光. 复合材料结构用紧固件及机械连接技术[J]. 航空制造技术, 2012(1): 102-104.
Feng Lei, Liu Dan, Liu Jianguang. Fastener and mechanical joining technology for composites structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(1): 102-104. (in Chinese)

作者简介:

张宝柱(1972—),男,高级工程师。主要研究方向:飞机总体设计。

孙洁琼(1980—),女,高级工程师。主要研究方向:飞机结构设计。

(编辑:马文静)