

# 大型机身复合材料加筋壁板制造技术及应用

薛向晨<sup>1</sup>, 王 犇<sup>1</sup>, 胡江波<sup>1</sup>, 梁宪珠<sup>1</sup>, 郑晓玲<sup>2</sup>, 陈 萍<sup>3</sup>

(1. 中航复合材料有限责任公司, 北京 101300;

2. 上海飞机设计研究院, 上海 200436;

3. 上海飞机制造有限公司, 上海 200436)

**[摘要]** 复合材料机身是我国新研制的大型民用客机的重要结构之一,其制造工艺直接影响产品的质量一致性、产能、成本等,传统手工为主的制造技术已远远不能满足当前要求。为了验证大型机身复合材料帽型加筋壁板的自动化成型工艺进行了多方位的研究探索和验证,通过串联自动铺带、自动铺丝、长桁毛坯的叠层滑移成形、填充芯材自动成形、长桁定位等工艺,完成了大型壁板的制造。研究表明,选择的壁板制造工艺技术风险低,质量一致性高,为大型复合材料机身帽型加筋壁板的自动化制造提供了基础。

**关键词:** 复合材料; 机身壁板; 帽形长桁; 叠层滑移; 自动化

## Manufacturing Technology and Application of Large Fuselage Composite Panel

XUE Xiangchen<sup>1</sup>, WANG Ben<sup>1</sup>, HU Jiangbo<sup>1</sup>, LIANG Xianzhu<sup>1</sup>, ZHENG Xiaoling<sup>2</sup>, CHEN Ping<sup>3</sup>

(1. AVIC Composites Co., Ltd, Beijing 101300, China;

2. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 200436, China;

3. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

**[ABSTRACT]** The composite fuselage is one of the important structures of the new large commercial aircraft. The manufacturing process directly affects the product quality consistency, production capacity, cost, etc. The traditional manual-based manufacturing technology cannot meet the current requirements. In order to verify the automatic forming process of the large-size composite hat-section stringer reinforced panel, a multi-faceted research and verification were carried out, through the technologies of ATL, AFP, the laminated slip, the stringer positioning. The process of automatic forming and other processes has completed the manufacture of the large panel. Studies have shown that the selected panel manufacturing process technology has low risk and high quality consistency, which provides the basis for the automated manufacturing of large-size panel.

**Keywords:** Composites; Fuselage panel; Hat-section stringer; Laminated slip; Automation

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.16.088

近年来,随着复合材料技术的发展突飞猛进,复合材料在新一代大型民用客机上大量采用,在最新一代的民用大型客机,如波音 787 和空客 A350 以及正在研发的国产宽体客机 CR929 中,先进复合材料的用量均超过了 50%,整个飞机的外表面几乎都是先进复合材料<sup>[1-4]</sup>。

我国在复合材料自动化制造技术方面已经有了初步的积累,如自动铺带与自动铺丝技术方面已经进入了应用验证阶段;长桁毛坯的叠层滑移自动化制备技术已经完成了初步验证。

近期中航复材完成了某大型机身复合材料帽形加筋壁板的研制,在制造过程中运用了多项先进制造技

术,本文对其采用的技术进行了解析。

## 1 制造技术应用

### 1.1 壁板结构介绍

(1) 研制的大型机身复合材料壁板长约 15m,宽度方向弧长约 6m,零件总重量约 700kg (图 1)。

(2) 零件内侧分布有 30 根帽形长桁站位,其上含有客舱舱门及货舱舱门,有些长桁在舱门开口处截断。

(3) 壁板最厚区域约 12mm (60 层),最薄区域约 2.4mm (12 层),为了保证结构刚度的同时尽量减重,蒙皮设计有 10 个不同的厚度分区。

(4)长桁采用等厚整铺层帽形结构,采用胶膜与蒙皮胶接,在帽形空腔的两个底角有填充芯材进行填充。

## 1.2 制造工艺方案及流程

### 1.2.1 壁板制造工艺方案

复合材料加筋壁板成型方案主要分为共固化、共胶接和二次胶接(图2)<sup>[6]</sup>。采用共固化的工艺方案可以减少一次进热压罐的成本,但是成型模具相对复杂。采用二次胶接的工艺方案可以很好地掌握长桁和蒙皮的质

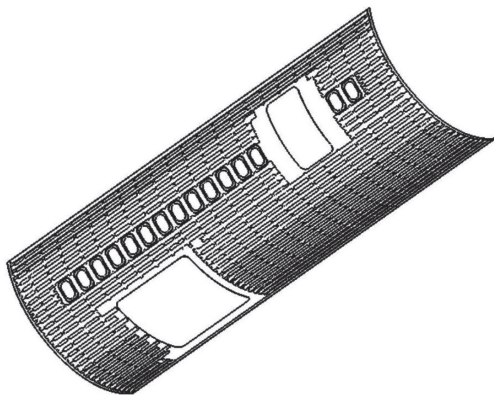


图1 大型机身复合材料帽形加筋壁板示意图  
Fig.1 Large fuselage hat-section stiffened panel

量,但是对于胶接配合的质量较难控制。考虑到由于该加筋壁板上长桁数量众多,长桁在固化时要尽量简单,所以采用了先制造长桁再将长桁与未固化的蒙皮进行共胶接的工艺方案。这样可以在长桁制造完成后对其进行完整的检测,特别是对于带双曲率外形的壁板在共胶接时不需要长桁模具,大幅度降低了模具配合引起的工艺风险。

在制造工艺上针对工艺稳定性和生产效率的要求,采用了现有的自动铺丝、自动铺带、长桁叠层滑移成形等自动化制造技术,这些自动化技术严格的控制了工艺参数,消除了人工影响因素,大幅度提高了工艺稳定性。壁板的制造工艺流程如图3所示。

### 1.2.2 长桁制造

众所周知手工铺叠长桁效率低、质量稳定性差,尤其是长桁圆角部分的质量一致性不易控制。随着长桁尺寸的增长及数量的增多需求,手工铺叠已经明显不能满足产能、质量一致性、适航及成本的要求。为解决这一难题,长桁毛坯的制备采用了基于自动化的叠层滑移工艺。

制造长桁时首先采用自动铺带机铺叠预浸料的平面毛坯,然后采用超声刀将其分切为单块的长桁毛坯。

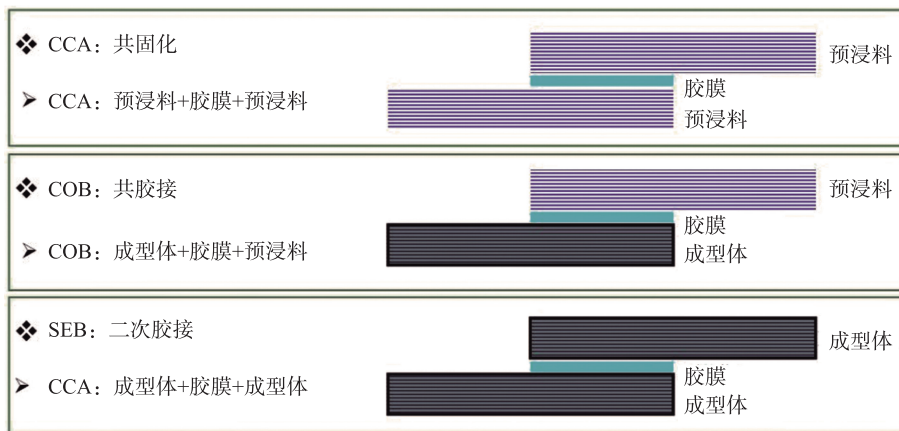


图2 加筋壁板主要成型方案示意图  
Fig.2 Several major programs of stiffened panels forming

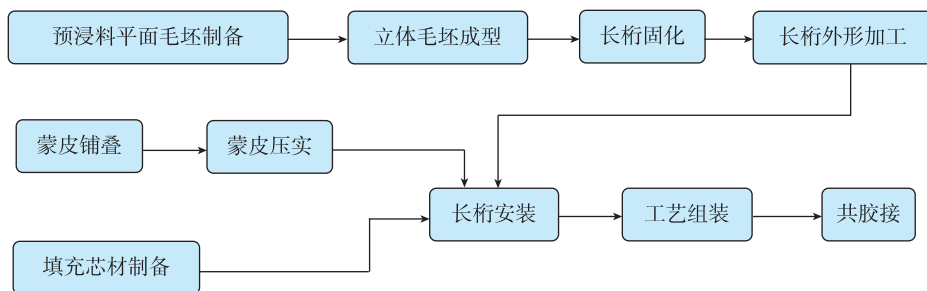


图3 壁板的制造工艺流程图  
Fig.3 Manufacturing process flow chart

铺叠预浸料平面毛坯的过程如图 4 所示。

再将分切好的平面毛坯通过专用的叠层滑移设备弯折为帽形的立体毛坯(叠层滑移设备如图 5 所示)。在成形过程中利用预浸料平面毛坯各铺层间产生了相对滑移从而避免了毛坯中纤维褶皱的产生,从而保证了良好的长桁铺层结构。立体毛坯成形完成后,再安放在长桁固化模具上进行固化。

### 1.2.3 蒙皮的铺叠与壁板组合

蒙皮采用了自动铺丝工艺铺叠(图 6),并且在铺叠完成后对铺层进行了预压实。

由于长桁与蒙皮组合时有粘贴胶膜和安放辅助材料的工作,这一工序还没有找到合适的自动化工艺,所以依旧采用了手工操作的方法完成,但是从多个方面加强了工艺稳定性的控制。

#### (1)长桁胶接面处理。

长桁胶接面没有采用打磨的工艺进行胶接前处理,而是采用了粘贴胶膜前撕去可剥布的方法。不仅消除了打磨工艺中的表面质量难以量化、容易污染的缺点,而且使得表面处理的质量从工艺控制转变为材料控制,消除了工艺风险。

#### (2)填充芯材的制备。

长桁与蒙皮之间填充的填充芯材采用了常州新创公司制造的专用填充芯材连续成型设备,如图 7 所示。该设备可以实现多种截面形状的单向带芯材的自动化制备。

#### (3)长桁空腔处的辅助材料。

帽形长桁空腔处的辅助材料很难在长桁组装到蒙皮上之后再安放,于是在长桁胶接面粘贴胶膜之后便安放在长桁的凹槽之中。辅助材料依次为隔离膜、透气材料和真空袋(图 8)。这样的辅助材料与空腔外的辅助材料保持一致,使得空腔区域的加压方式均匀、直接,与其他部分的加压方式也保持一致。为了保持辅助材料的形状,在安放辅助材料时先将一根橡胶支撑物穿入筒形的辅助材料空腔中,将辅助材料撑起,保证在空腔的 4 个顶角不产生架桥的现象。由于该橡胶支撑物在固化时时处于真空袋之外的,不直接接触复合材料,所以相比气囊其重复利用率大大提高。

#### (4)长桁下凸缘的倒角处理。

小型加筋壁板一般采用在长桁之间填充工艺盖板的方法控制蒙皮与长桁下凸缘结合处的纤维褶皱,



图4 铺带机铺叠预浸料平面毛坯  
Fig.4 ATL machine preparing the flat blank

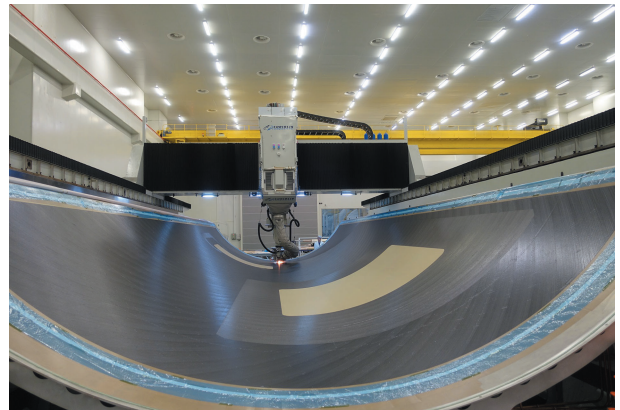


图6 正在铺叠的机身蒙皮  
Fig.6 AFP machine laying the skin



图5 叠层滑移设备  
Fig.5 Laminated slip machine



图7 填充芯材连续成型设备  
Fig.7 Molding equipment for core filling material

该工艺盖板在固化过程中密封在真空袋中并且可以对长桁的进行定位。这种方法可以解决小型的、长桁数量不多的情况。但是对于大型机身壁板,要安装不同形状的几百个工艺盖板并确保安放质量是非常困难的。为了避免安放如此多的工艺盖板,对长桁的下凸缘进行了倒角处理,倒角的角度为  $30^\circ$  (图9)。这样封装时可以直接将辅助材料覆盖在壁板的内形面上,大幅减少了人工操作,大幅度提高了工艺稳定性。

(5)长桁的定位。

长桁的定位采用了传统的卡板形式,卡板的卡槽具

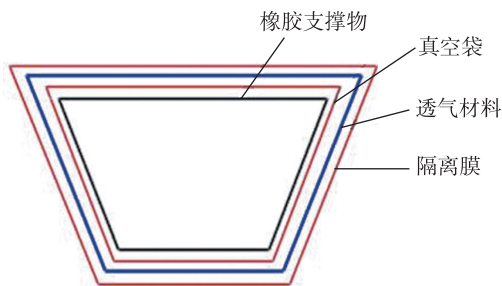


图8 长桁空腔区预先安装的辅助材料示意图  
Fig.8 Auxiliary material in the stringer hollow



图9 长桁下凸缘倒角示意图  
Fig.9 Chamfer of the edge of the flange

有伸缩的功能,可以使得长桁在安放时按照胶接面的法线定位在蒙皮上。由于壁板外形两侧较陡,两侧的长桁在固化过程中有向下滑动的趋势,于是在完成辅助材料安放之后,重新将卡槽扣在覆盖了真空袋的长桁之上,使得卡板在胶接共固化过程中仍然保持对长桁进行限位,如图10所示。

1.2.4 壁板的共胶接

壁板的固化工艺具有常温加压、带保温平台、保留部分真空的特点:在共胶接开始保持一个大气压的真空度,热压罐加压至7个大气压,在加压过程中逐渐将真空度降低到0.2个大气压;在升温过程中在  $135^\circ\text{C}$  存在一个时长1h的保温平台,最后在  $180^\circ\text{C}$  下保温2h以完成最终的固化。工艺曲线如图11所示。

完成共胶接的大型机身复合材料壁板如图12所示。

1.2.5 壁板翻转工装

由于该壁板尺寸和重量大,刚度相对低,必须采用

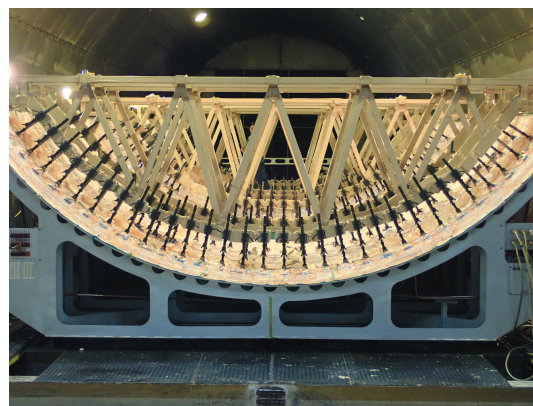


图10 胶接共固化过程中卡板对长桁的限位  
Fig.10 Positioning tooling in the curing

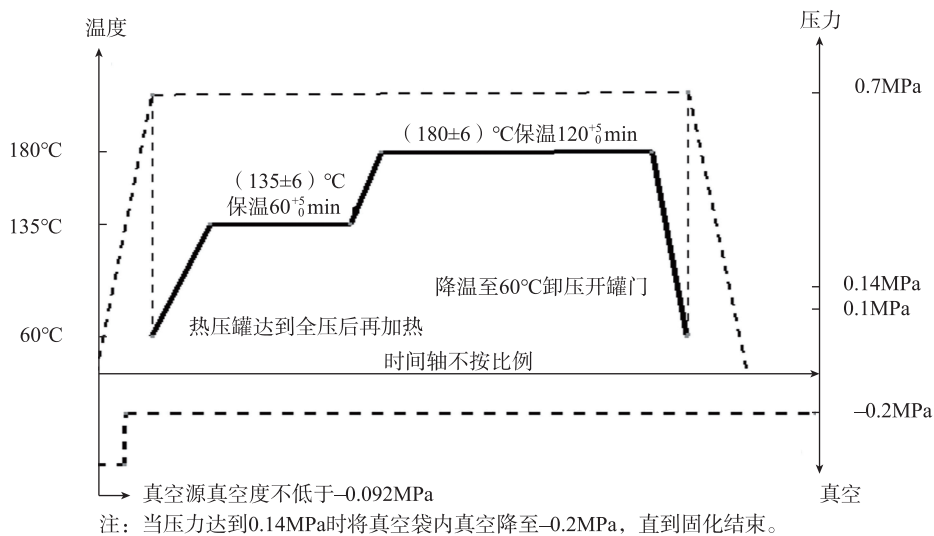


图11 共胶接工艺曲线  
Fig.11 Co-bonding process curve

专用工装进行脱模。另外在后续的转运、加工、检测等也都需要专用工装进行保形,于是采用了专用的翻转工装如图 13 所示。该工装的主框架是两端架在支座上的一个大刚度的圆筒,其上具有与壁板的内形面相配合的支撑卡板,壁板采用绑带绷紧在卡板之上,在支座上集成了驱动系统可以控制主框架自动旋转,从而达到调整壁板姿态的目的。壁板在工位间转运时采用 AGV 托起翻转工装连同壁板一起转移到下一个工位,然后旋转壁板至需要的姿态便可以 and 下一道工序对接。

## 2 结果与讨论

(1)无损检测:固化后的长桁、蒙皮以及蒙皮与长桁之间的共胶接界面经过无损检测未发现超标缺陷。

(2)厚度:长桁的平面区域厚度和圆角区域厚度均满足设计要求;蒙皮的厚度均满足设计要求。

蒙皮无损检测和厚度质量满足设计要求,得益于自动铺丝技术的应用;长桁无损检测和厚度质量满足设计要求,得益于自动铺带和叠层滑移制备技术的应用。上述技术大幅提高了壁板的质量一致性。

(3)长桁的站位:经测量长桁的位置有 98% 的在  $\pm 2\text{mm}$  的要求范围内,说明采用的长桁定位方式基本满足要求,在共胶接过程中卡板对长桁位置的保持起到了一定的效果。

(4)剖切检查:胶接面的胶膜厚度均匀,长桁下凸缘边缘处的蒙皮没有出现褶皱现象。经过分析如果长桁下凸缘不进行倒角处理,长桁安装在蒙皮内形面上后,与蒙皮之间的接合处会有一个台阶,当辅助材料覆盖在壁板内形面上时,很难在台阶的死角处将辅助材料完全贴附在复合材料上,从而在长桁凸缘与蒙皮之间会产生架桥(图 14),引起蒙皮铺层的褶皱(图 15)。长桁下凸缘倒角之后,长桁下凸缘与蒙皮之间的过渡变的平缓,使得辅助材料可以自然的贴附在壁板的内形面上(图 16),消除了蒙皮与长桁下凸缘结合处辅助材料的架桥,从而避免了蒙皮的褶皱产生(图 17)。

## 3 结论

(1)自动铺带/铺丝技术是大型复合材料构件质量的保证;基于自动化的长桁毛坯叠层滑移技术不仅解决了长桁制造的工艺稳定性和质量一致性问题,而且与人工铺叠比较,降低成本的潜力很大。

(2)帽形长桁空腔区的组合方式能够保证热压罐中气压对复合材料的均匀加压;长桁下凸缘倒角,提高了共胶接时的工艺可靠性,降低了壁板封装的工作量。

(3)已经具备了制造该类型大型壁板的关键技术,

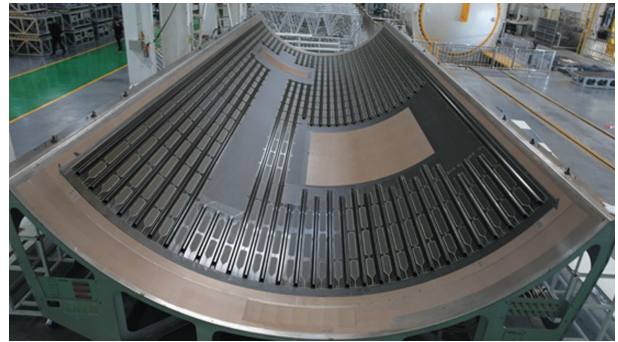


图12 大型机身复合材料壁板

Fig.12 Large fuselage hat-section stiffened panel after curing



图13 壁板翻转工装

Fig.13 Panel rotation tooling

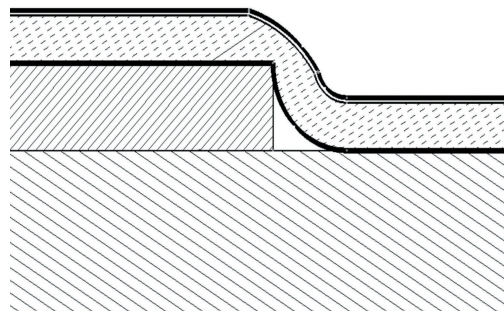


图14 辅助材料的架桥

Fig.14 Bridging of auxiliary materials

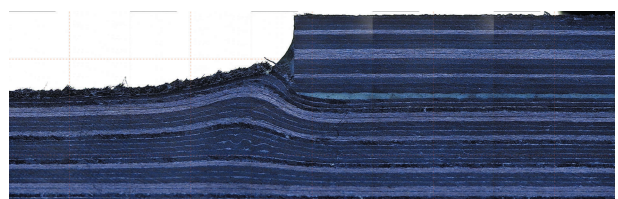


图15 蒙皮与长桁下凸缘边缘结合处的纤维褶皱

Fig.15 Skin fiber arch at the edge of the flange

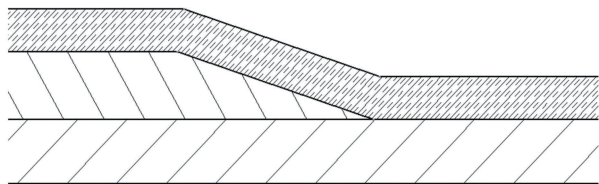


图16 没有架桥的辅助材料  
Fig.16 Auxiliary material without bridge

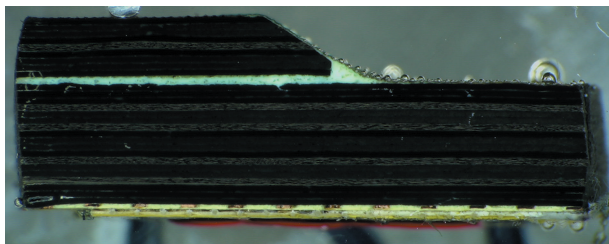


图17 蒙皮与长桁下凸缘边缘结合处无褶皱  
Fig.17 No fiber arch at the edge of the flange

但是长桁的定位、无损检测等由于厂房条件的限制没有采用自动化的方式,还需要进一步建立自动化的生产线,进一步提高质量和效率。

### 参 考 文 献

- [1] 段友社,周晓芹,侯军生.大飞机复合材料机翼研制技术现状[J].航空制造技术,2012,55(18):34-37.
- DUAN Youshe, ZHOU Xiaoqin, HOU Junsheng. Status of manufacturing technology in large aircraft composites wing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(18): 34-37.
- [2] 杨乃宾.新一代大型客机复合材料[J].航空学报,2008,44(3):596-604.
- YANG Naibin. Composite Structure for new generation large commercial jet[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 44(3): 596-604.
- [3] 王彝.复合材料的应用与展望[J].中国新技术新产品,2018(6):40-41.
- WANG Ben. Application and prospect of composite materials[J]. New Technology & New Products of China, 2018(6): 40-41.
- [4] 顾轶卓,李敏,李艳霞,等.飞行器结构用复合材料制造技术与工艺理论进展[J].航空学报,2015,36(8):2773-2797.
- GU Yizhuo, LI Min, LI Yanxia, et al. Progress on manufacturing technology and process theory of aircraft composite structure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(8): 2773-2797.
- [5] SONG M G, KWEON J H, CHOI JH, et al. Effect of manufacturing methods on the shear strength of composite singlelap bonded joints[J]. Composite Structures, 2010, 92(9): 2194-2202.
- [6] 王平.先进复合材料在航空领域的应用[C]//第17届全国复合材料学术会议论文集.北京:航空制造技术杂志社,2012.
- WANG Ping. Application of advanced composite materials in aviation field[C]//Proceedings of the 17th National Conference on Composite Materials. Beijing: Aeronautical Manufacturing Technology Magazine, 2012.
- [7] 周晓芹,曹正华,郑广强.复合材料自动铺带技术研究与应用[J].航空制造技术,2011,54(15):40-41.
- ZHOU Xiaoqin, CAO Zhenghua, ZHENG Guangqiang, et al. Research and application of automated tape laying technology of composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(15): 40-41.
- [8] 郑广强,吴文贵.自动铺带技术在航空复合材料制造领域的应用[J].航空制造技术,2013,56(15):40-43.
- ZHENG Guangqiang, WU Wengui. Application of ATL in aircraft composites structure manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(15): 40-43.
- [9] 周晓芹,段友社,薛向晨,等.飞机复材构件制造装备应用现状[J].航空制造技术,2013,56(17):53-56.
- ZHOU Xiaoqin, DUAN Youshe, XUE Xiangchen, et al. Application of manufacturing equipment for aircraft composites component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(17): 53-56.
- [10] 梁宪珠,薛向晨,王永贵,等.叠层滑移工艺制备L型、I型、Z型、Ω型毛坯[J].航空制造技术,2009,52(12):34-37.
- LIANG Xianzhu, XUE Xiangchen, WANG Yonggui, et al. Preparation of L-shaped, I-, Z-, Ω-shaped blanks by lamination slip process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(12): 34-37.
- [11] 马刚,张晓哲,唐文峰.大型复合材料加筋壁板自动化制造技术研究[J].航空制造技术,2018,61(14):91-96.
- MA Gang, ZHANG Xiaozhe, TANG Wenfeng. Automated manufacturing technology of large stiffened panel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(14): 91-96.
- [12] TENNEY D R, DAVIS J G, JOHNSTON N J, et al. Structural framework for flight: NASA's role in development of advanced composite materials for aircraft and space structures: NASA/CR-2011-217076[R]. NASA, 2011.
- [13] GEORGE M. Composites lift off in primary aerostructures[J]. Reinforced Plastics, 2004, 48(4): 22-27.
- [14] 王增新,王卫朝.面向大型航空构件的国产高档数控机床和专用装备[J].航空制造技术,2015,58(16):48-53.
- WANG Zengxin, WANG Weichao. Domestic advanced CNC machine tool and special equipment oriented to large aviation component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(16): 48-53.
- [15] 李明,席晗.复合材料成型工艺装置探讨[J].电子机械工程,2012,28(6):48-50.
- LI Ming, XI Han. Discussion on composite material forming devices[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2012, 28(6): 48-50.

通讯作者:薛向晨,硕士,高级工程师,主要从事复合材料研究, E-mail: c31050201@sina.com。

(责编 大漠)