

自动铺带技术在某型机壁板中的应用研究

唐珊珊, 王浩军, 芦 彬, 郭俊刚

(航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司, 西安 710089)

[摘要] 随着航空产业的不断发展, 先进复合材料凭借其出色的减重性能和高度的可设计性, 逐渐成为未来航空器的主要材料。复合材料的用量和应用部位已经成为衡量飞机结构先进性的重要标志之一。论述了当前复合材料构件纤维自动铺放技术制造现状及发展前景, 并介绍了复合材料构件自动铺带技术在新舟 700 飞机壁板零件上的应用情况。

关键词: 复合材料; 自动铺带技术; 飞机壁板; 高效加工轨迹; 多加强结构

Application of Composites Automatic Tape Laying Technology in Aircraft Panel

TANG Shanshan, WANG Haojun, LU Bin, GUO Jungang

(AVIC Xi'an Aircraft Industrial (Group) Company Ltd., Xi'an 710089, China)

[ABSTRACT] With the continuous development of the aviation industry, advanced composite materials have gradually become the main materials for aircraft in the future because of their excellent weight-loss performance and high degree of designability. Its usage and application in aircraft have become one of the important symbols to measure the advances of aircraft. This paper discussed the present situation and development prospect of composites fiber automatic laying technology, and introduced the application of composites automatic tape laying technology on the MA700 aircraft panel.

Keywords: Composites; Automated tape laying technology; Aircraft panel; High-efficient machining trajectory; Multi-reinforced structure

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.23/24.068

先进复合材料具有轻质、高强度、高模量、抗疲劳、耐腐蚀、可设计性强、易于实现自动化整体化制造等特点, 已被广泛应用于工业生产的各个领域, 特别是航空航天等尖端技术领域^[1-5]。

自动铺放技术包括自动铺带技术(Automated Tape Laying, ATL)和自动铺丝技术(Automated Fiber Placement, AFP), 是近 30 年来发展和广泛应用的自动化制造技术^[6]。其原理见图 1^[7]、图 2。

自动铺带技术采用的预浸带宽度为 75mm、150mm、300mm, 且呈硬挺状, 可变范围很小, 在铺放构件时, 单向预浸带间距恒定, 纤维间彼此滑移, 铺放轨迹中心线只有沿着特定的轨迹才能使预浸带变形最小, 否则会导致预浸带曲皱或撕裂, 影响产品质量。

自动铺丝是综合纤维缠绕技术和自动铺带技术的优势发展而来的一种复合材料自动化制造技术, 具有独立操作每根预浸丝束的能力, 同时集束而成的预浸带可根据曲面特征和工艺要求进行宽度调整^[8]。预浸纱丝

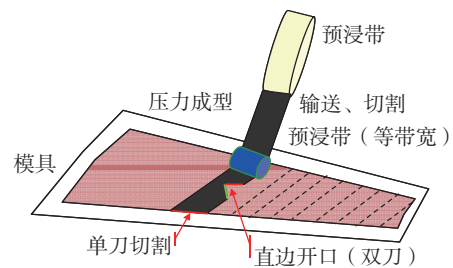


图1 自动铺带原理图

Fig.1 ATL schematic diagram

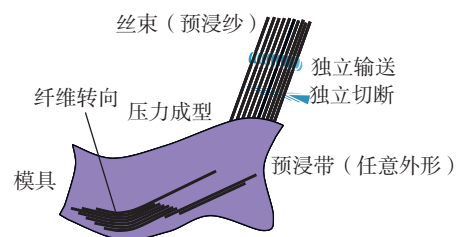


图2 自动铺丝原理图

Fig.2 AFP schematic diagram

束的宽度一般为 3.12mm (1/8 英寸)、6.35mm (1/4 英寸) 和 12.7mm (1/2 英寸), 每一根丝束都可以独立实现夹紧、切断和重送, 各丝束可独立地各自控制, 并根据构件形状自动切纱以适应边界, 减小废料率, 并可以局部加厚、铺层开口来满足多种设计要求, 适应于大曲率复杂构件的自动化成形。

目前国内以自动铺带技术为主, 是针对机翼壁板等大尺寸、中小曲率部件的一项复合材料自动化制造技术, 鉴于在航空航天等军工领域的敏感性和国外的技术封锁, 我国自动铺丝技术尚处于自主研发的起始阶段, 仅在少数几个高校和科研院所展开相关研究工作^[9-11]。国内的自动铺带技术也仅仅在试验件及型号预研中使用, 航空工业沈飞李林等^[12]在某民机中央翼试验件中使用, 航空工业成飞黄当明等^[13]在某无人机机翼中使用, 在国内军民机中尚未有零件装机。技术基础薄弱, 通过在新舟 700 飞机壁板上进行自动铺带技术的研究, 实现该技术的工程化、批量化应用。

1 试验目的

MA700 飞机尾翼壁板试验件为多加强结构蒙皮, 在壁板的边缘处还有减薄区域, 典型铺层结构图如图 3 所示。

使用材料为“M21/34%/UD134/AS7/150MM ATL”, 设备为 M.TORRES 自动铺带机, 铺层为 38 层。

通过试验件的制造, 对 MA700 飞机尾翼正式零件提供技术支持, 并对工程化应用提供经验。

2 试验内容

壁板采用的是共固化成型工艺, 蒙皮使用西班牙 M.TORRES 龙门 11 轴自动铺带机铺贴成形, 长桁手工铺贴, 在未固化状态与蒙皮组合, 一次进罐成型。零件产品如图 4 所示, 铺贴设备如图 5 所示。

3 自动铺带技术应用及关键控制点

自动铺带技术是一种自动化成型技术, 其成本与铺贴效率及铺贴质量密切相关, 在试验过程中, 如何在保证铺贴质量的前提下提高铺贴效率, 分别从以下 4 个方面进行了研究。

3.1 基于复合材料自动铺带工艺性的高效加工轨迹设计研究

3.1.1 基准轨迹规划研究

基准轨迹基于铺层强度或给定角度方向设计, 决定了该铺层轨迹的整体走势, 同时为保证覆盖性轨迹的质量, 该轨迹的测地曲率应该设计得非常小, 保证自动铺放工艺质量。

要达到变形最小就得使 $W_1=W_2$ 、 $L_1=L_2$, 见图 6。通过在工艺设计允许的对铺放方向进行调整, 满足了自动铺带过程中预浸带不褶皱、不撕裂的要求, 优先保证了可铺性。对于可展曲面, 可以通过调整铺放轨迹规划的起始点位置, 使得铺放轨迹满足铺放间隙要求。

3.1.2 轨迹覆盖性分析与仿真显示

在完成曲面的覆盖性轨迹设计之后, 各个轨迹工艺性需要给出判断, 比如铺带间隙、偏差角度等, 对于不符

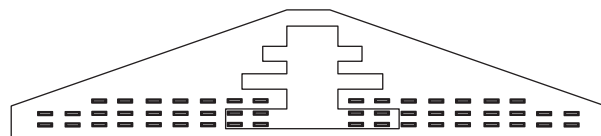


图3 典型结构铺层图

Fig.3 Typical structure layer chart



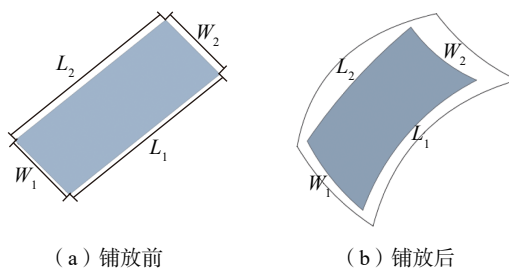
图4 MA700尾翼壁板

Fig.4 MA700 wing skin



图5 西班牙M.TORRES龙门铺带机

Fig.5 M.TORRES ATL machine



(a) 铺放前

(b) 铺放后

图6 预浸料在铺放前后的变形示意图

Fig.6 Schematic prepreg before and after laying

合要求的轨迹需要进行优化处理。为配合轨迹的覆盖性分析,进行所见即所得设计,仿真显示能够直观地反映出优化的效果。

在铺带轨迹生成后可进行分析,可以按照 PART、SEQUENCE、PLY、TAPE 这 4 种选项进行分析(图 7),可以选择间隙、角度、边界等参数进行查看,当满足预设参数时,表现为绿色;当超出预设参数时,表现为红色。当出现红色时,需要调整铺带轨迹,使其满足预设参数。在本试验件中,角度公差设定为 $\pm 1^\circ$,间隙设定为 0~2mm。

在 TOLAY 软件的间隙仿真、角度仿真后,可输出程序在第三方软件再次进行碰撞仿真。仿真界面见图 8。

3.1.3 高效加工轨迹设计研究

自动铺带设备在启动、切割、停止、切废料时的效率较低,不足预浸带铺放效率的 10%。在进行轨迹设计时,需尽量减少设备去废料台切废料的次数及时间。根据零件制造时跟产情况,得到不同尺寸量级零件的同一条轨迹设备转头时间与设备空跑时间的对应关系。根据以上数据,进行基于高效加工的轨迹设计,同等条件下

提高铺贴效率 30% 以上。

(1) 减少废料次数。

在生成轨迹时,一般是按照零件的轮廓线以及设备的最小铺贴能力自动生成,生成的轮廓线不考虑废料情况。在零件的边缘可以根据实际的铺贴情况进行调整,减少了切割、铺贴废料的时间及材料,但是在零件内部的轮廓线是不允许调整的。典型铺层见图 9。

图 9 中白色为铺层的轮廓线,红色、黑色为调整后的轮廓线,调整后大大减少了铺贴和切割废料的时间,提高了铺贴效率。

(2) 设备转头与空跑关系。

本试验使用的自动铺带机没有双向铺贴功能,当一条轨迹铺贴完成后,需要设备转头或空跑至起始点再次铺贴,转头或空跑由铺贴轨迹的起始方向决定。对试验的数据进行了整理,500mm 是分界线,轨迹长度小于 500mm 时,设备转头时间大于同向空跑时间,对应关系见表 1。

典型铺带轨迹见图 10。

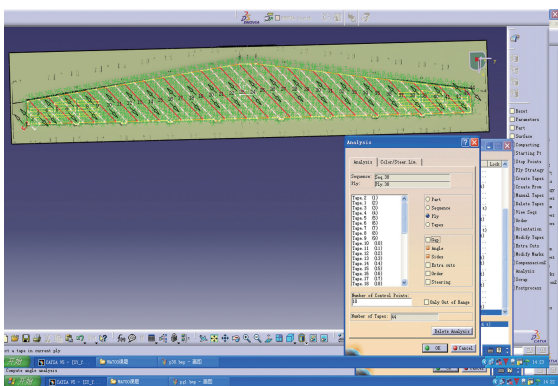


图7 铺带轨迹分析图
Fig.7 ATL trajectory analysis map

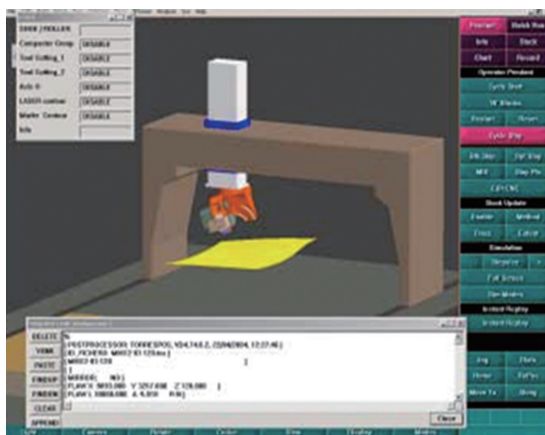


图8 铺带过程碰撞仿真
Fig.8 ATL run simulation

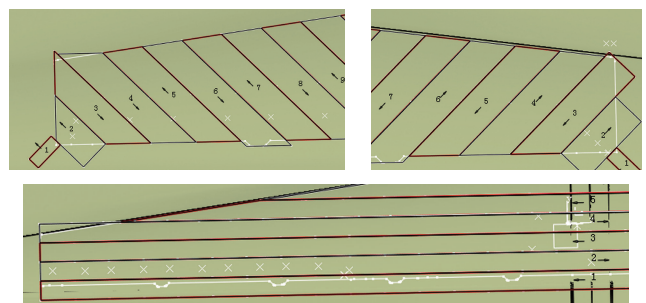


图9 调整后的铺带轨迹
Fig.9 ATL trajectory after adjustment

表1 对应关系表

Table 1 Correspondence table

长度/mm	转向	同向
$X \leq 500$	—	✓
$500 \leq X \leq 2000$	✓	✓
$X \geq 2000$	✓	—

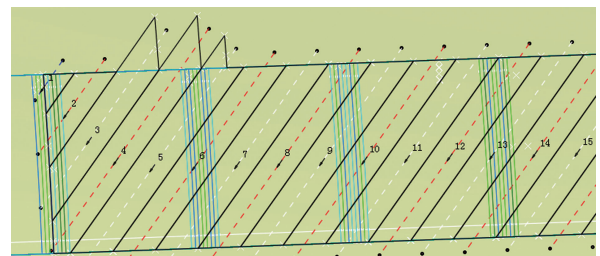


图10 典型铺带轨迹示意图
Fig.10 ATL trajectory for typical structure schematic diagram

黑色箭头表示铺贴轨迹的运动方向,可以通过软件设置按需进行修改。在本试验件中,0° 选用转向方式,90° 和 ±45° 选用同向方式。

3.1.4 基准面选择

通过试板级试验件铺贴,验证铺贴面对零件的影响,结果显示铺贴厚度 ≤ 1.5mm 时,对零件铺贴效果无影响。综合工装误差、材料厚度以及预留余量,确定本零件铺贴时每 5 层选择一个基准面。基准面选择如图 11 所示。

3.2 多加强结构蒙皮自动铺带工艺技术研究

3.2.1 材料铺贴工艺参数的适用性研究

通过对铺设间隙、铺设压力、施压参考面、加热温度、真空预压实厚度 5 个方面进行了试验,获得该材料

铺贴工艺参数数据库,并优化出最优铺贴参数,向其他零件予以推广。新材料开工前都应先进行材料铺贴工艺参数的适用性研究,试验方案见表 2。

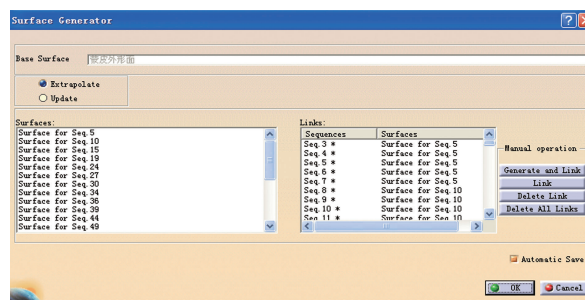


图11 基准面选择

Fig.11 Choosing the base surface

表2 自动铺带工艺性验证表

Table 2 ATL material manufacturability parameter table

试验分类	试验内容	铺层	试板尺寸	试板数量	测试内容	试样个数
铺设间隙	1.25mm 1.25.TNC	[45/0/-45/90] _{2S}	500×500	1	拉伸强度 / 模量 (ASTM D 3039) 短梁剪切强度 (ASTM D 2344) 无损检测 (孔隙 / 分层) CPS8500 面孔隙率 GB3365 压缩强度 / 模量 (ASTM D6641)	5 10 — 5 5
	1.75mm 1.75.TNC	[45/0/-45/90] _{2S}	500×500	1	同上	同上
	2.25mm 2.25.TNC	[45/0/-45/90] _{2S}	500×500	1	同上	同上
	2.75mm 2.75.TNC	[45/0/-45/90] _{2S}	500×500	1	同上	同上
	3.25mm 3.25.TNC	[45/0/-45/90] _{2S}	500×500	1	同上	同上
铺设压力	30% Y30.TNC	[45/0/-45/90] _{2S}	500×500	1	同上	同上
	50% Y50.TNC	[45/0/-45/90] _{2S}	500×500	1	同上	同上
	80% Y80.TNC	[45/0/-45/90] _{2S}	500×500	1	同上	同上
	100% Y100.TNC	[45/0/-45/90] _{2S}	500×500	1	同上	同上
施压参考面	第 1 层 1.TNC	[45/0/-45/90] _{4S}	500×500	1	同上	同上
	每 4 层 4.TNC	[45/0/-45/90] _{4S}	500×500	1	同上	同上
	每 8 层 8.TNC	[45/0/-45/90] _{4S}	500×500	1	同上	同上
	每 16 层 16.TNC	[45/0/-45/90] _{4S}	500×500	1	同上	同上
加热温度	0℃ (不加热)	[45/0/-45/90] _{2S}	500×500	1	同上	同上
	35℃	[45/0/-45/90] _{2S}	500×500	1	同上	同上
	45℃ 1.25.TNC	[45/0/-45/90] _{2S}	500×500	1	同上	同上
	60℃	[45/0/-45/90] _{2S}	500×500	1	同上	同上
	70℃	[45/0/-45/90] _{2S}	500×500	1	同上	同上
	80℃	[45/0/-45/90] _{2S}	500×500	1	同上	同上
预压实厚度	不压实 YYS.TNC	[+/-/0/0/+/-/0/+/-/0/0/0/+/-/+0/0/-/+/-/90/+0/-/90] _S	500×500	1	同上	同上
	第 1 层预压实	同上	500×500	1	同上	同上
	每 10 层预压实	同上	500×500	1	同上	同上
小计				22		550 件

3.2.2 铺贴基准建立研究

复杂构件的坐标系与装备坐标系对应,需要装备基准系统的支持。装备精准获取基准点装备坐标系坐标,利用矢量匹配原理实现找正。因此,找正精度决定铺贴质量。装备坐标系与工装坐标系的对应与统一是实现精准铺设轨迹的前提,而复杂工装的整体精度以及基准点的选择和制造精度决定基准建立的质量。通过一整套完善的坐标变换算法,实现工装数模基准点与实际工装基准点的对应。

设备带有坐标旋转功能,即可根据其在工装上的基准点的实测值,在机床控制系统中进行坐标转换,将输出的程序按照转换后的坐标系进行校准,机床按照校准后的程序执行铺贴程序。

铺贴工装三个角上各打一个十字叉,如图 12、13 所示,作为铺带机建立坐标系的基准,要求提供 3 个十字叉中心点在工装坐标系的实测坐标值。也可利用铺贴工装机加数控基准孔、激光定位铺层系统靶标孔进行坐标找正及转换。

3.2.3 多加强结构蒙皮铺贴成型技术

对该零件铺层的设计可达性进行了分析,该零件一共有铺层 38 层,其中前 13 层为玻璃布和防雷击铝网,14~38 层碳纤维单向带,其中有 11 层为加强层。

典型的不可机器铺贴的层数及示意图如图 14 所示。

图 14 中数字所示部位要求在一条带宽内扣出一个减薄区域,为机器无法铺贴部位。

图 15 中数字所示部位铺层料片过小,超出设备能力范围,机器无法铺贴。

对于以上两种情况,0° 层可通过移动激光定位铺层系统工位的方式,采用自动铺带机+手工铺贴相结合的方式进行铺贴;±45° 层,可由数控下料机下好等宽的±45° 料条,按照设备已铺贴过的料片位置进行定位,手工补贴。当使用手工铺层后需进行制袋抽真空冷压实。这种相结合的方法既满足了设计需求,又在同等条件下最大限度地提高了铺贴效率。

表3 M21铺带材料最优参数表

Table 3 Best manufacturability parameter table for M21

项目	数值
铺设间隙	≤ 2mm
铺设压力	80%
施压参考面	≤ 1.5mm, 每 5 层使用同一个面
加热温度	不加热, M21 材料黏性较大, 在铺贴时不开红外加热
真空预压实厚度	变化不明显, 不需过程中进行冷抽压实

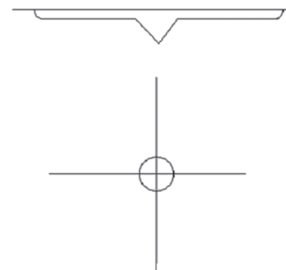


图12 工装找正基准点

Fig.12 Bench point for tool

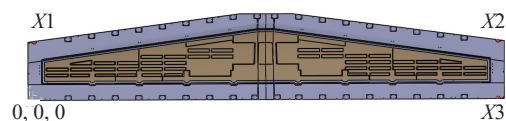


图13 工装找正示意图

Fig.13 Schematic diagram of finding the bench point

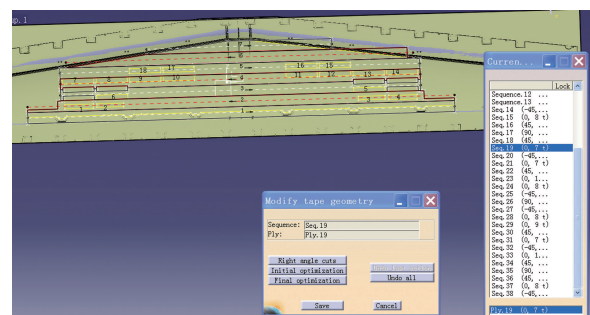


图14 0° 铺层 (P₁₉、P₂₁、P₃₁、P₃₃)

Fig.14 0° layer (P₁₉、P₂₁、P₃₁、P₃₃)

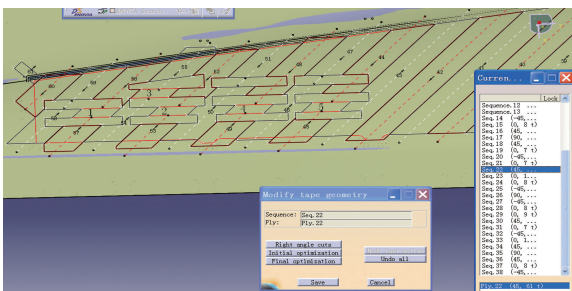


图15 ±45° 铺层 (P₂₂、P₃₀)

Fig.15 ±45° layer (P₂₂、P₃₀)



一个整层的铺贴时间为 20min, 带有多孔洞结构的加强层的一层的铺贴时间约 300min, 使用手工方式铺贴需制袋抽真空冷压实, 时间约为 60min。多孔洞加强结构手工铺贴是设备铺贴时间的 18 倍。

自动铺带机的材料利用率高达 92%, 而手工铺贴的材料利用率仅为 70% 左右, 在材料的成本上, 手工铺贴是设备铺贴的 1.32 倍。

基于本次试验件的铺贴情况, 向产品设计提出改进意见, 铺层时兼顾工艺性、铺贴效率及材料成本、人工成本。在研制批下发的图纸中已经进行了修改, 放弃了多孔洞结构, 在铺层变化区域均为整块铺层, 所有铺层均可用设备进行铺贴, 零件正在研制过程中。

4 结论

通过尾翼壁板自动铺带技术研究, 得到以下结论:

(1) 通过对 MA700 尾翼壁板的铺贴验证, 可以实现自动化的铺贴, 并符合复合材料工艺制造要求, 无损检测合格。

(2) 对于多孔洞加强结构的蒙皮, 可以采用自动铺贴 + 激光投影 + 自动下料 + 手工铺贴的混合制造方式实现零件制造, 但效率不高, 不能将设备效能有效发挥。

(3) 自动铺带技术铺贴质量与材料性能有关, 每种材料的铺贴参数不尽相同, 在新材料使用前应进行材料性能测试, 才能高质量地应用自动铺带技术制造出低成本、高质量、高效率的复合材料零件。

(4) 自动铺带机铺贴材料成本、人工成本远低于手工铺贴, 产品一致性好。

通过在 MA700 飞机尾翼壁板的工程化应用, 快速有效地推进了复合材料零件制造技术发展, 解决了大型复合材料结构高质量、高效率制造问题, 并已成功推广于国内其他飞机的复合材料构件, 使国内的复合材料制造技术与国际接轨。

参考文献

- [1] SHIRINZADEH B, CASSIDY G, OETOMO D, et al. Trajectory generation for open-contoured structures in robotic fiber placement[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2007, 23(4): 380-394.
- [2] 肖军, 李勇, 李建龙. 自动铺放技术在大型飞机复合材料构件制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2008, 51(1): 50-53.
- XIAO Jun, LI Yong, LI Jianlong. Automatic laying technology application in large aircraft composite structures manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(1): 50-53.
- [3] 唐见茂. 航空航天复合材料发展现状及前景[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(4): 352-359.
- TANG Jianmao. Current status and trends of advanced composites in aerospace[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, 30(4): 352-

359.

[4] 梁宪珠, 张铨. 浅谈降低国内航空复合材料结构成本的途径[J]. 航空制造技术, 2011, 54(3): 40-44.

LIANG Xianzhu, ZHANG Cheng. Approaches to reducing cost of composites in domestic aviation[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(3): 40-44.

[5] 朱晋生, 王卓, 欧峰. 先进复合材料在航空航天领域的应用[J]. 新技术工艺, 2012(10): 76-79.

ZHU Jinsheng, WANG Zhuo, OU Feng. Applications of advanced composite materials in aerospace[J]. New Technology & New Process, 2012(10): 76-79.

[6] 李俊斐, 王显峰, 肖军, 等. 面向柱面结构的自动铺带四轴联动成形研究[J]. 航空学报, 2013, 34(5): 1232-1240.

LI Junfei, WANG Xianfeng, XIAO Jun, et al. Research on four-axis simultaneous motion controlled automated tape laying for cylindrical structures[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(5): 1232-1240.

[7] 还大军, 肖军, 李勇. 基于弧长的复合材料自动铺带统一边界处理方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(5): 645-649.

HUAN Dajun, XIAO Jun, LI Yong. Uniform boundary treatment in automated tape-laying based on arc-length[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(5): 645-649.

[8] 黄威, 王显峰, 姚锋. 复合材料平板变刚度轨迹规划及铺放工艺性[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(12): 29-33.

HUANG Wei, WANG Xianfeng, YAO Feng. Placement manufacturability of fiber steer trajectory planning for composite flat[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017(12): 29-33.

[9] 富宏亚, 邵忠喜. 七自由度纤维铺丝样机研制[J]. 航空制造技术, 2010, 53(17): 46-48.

FU Hongya, SHAO Zhongxi. Development of the 7-DOF fiber placement sample machine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(17): 46-48.

[10] 乔珍珍. 纤维丝铺放靴控制系统的设计研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.

QIAO Zhenzhen. Design and research of the control system of fiber placement foot[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.

[11] 马丁, 王显峰, 肖军, 等. 关于复杂类回转构件铺丝成型对刀策略的研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(6): 68-71.

MA Ding, WANG Xianfeng, XIAO Jun, et al. Research on fiber placement tool presetting strategy of complex similar rotation component[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(6): 68-71.

[12] 李林. 大型复合材料壁板先进制造技术研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(11): 105-109.

LI Lin. Advanced manufacture technology and application of large-sized composite panels[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(11): 105-109.

[13] 黄当明, 聂海平. 自动铺带技术在复合材料机翼蒙皮的应用[J]. 航空制造技术, 2017, 60(4): 105-109.

HUANG Dangming, NIE Haiping. Application of automatic tape laying technology in the composites wing skin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(4): 105-109.

通讯作者: 唐珊珊, 高级工程师, 研究方向为大型复合材料制件数字化、自动化制造应用技术研究, E-mail: 149431359@qq.com.

(责编 阳光)