

文章编号: 1674-8190(2023)06-119-06

小口径变截面复合材料进气道结构功能一体化的工艺方法

陈苗苗¹, 徐伟伟¹, 李可², 邓世威¹, 李博¹

(1. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

(2. 四川航天技术研究院 四川航天系统工程研究所, 成都 610100)

摘要: 某小口径变截面复合材料进气道的内腔尺寸小, 表面处理困难, 整体制造难度大, 如何在满足进气道表面质量要求的基础上, 降低工艺难度, 同时赋予零件功能化, 是目前亟待解决的问题。提出一种可实现结构功能一体化的工艺方法, 采用分块组合式的结构设计, 在工艺控制下成型出厚度均匀(表面波纹度不超过 0.5 mm)、变形量小的蒙皮零件, 同时在分块状态下完成喷铝、喷漆处理赋予零件功能化。采用法兰边连接和带板固定连接的协同方式, 解决了分块蒙皮之间的对缝阶差问题。成功制造出满足设计和使用要求的复合材料进气道。

关键词: 复合材料; 进气道; 热压罐成型; 对缝阶差

中图分类号: V261

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.06.13

Manufacturing method on structural and functional integration of the small-diameter and variable section composites inlet

CHEN Miaomiao¹, XU Weiwei¹, LI Ke², DENG Shiwei¹, LI Bo¹

(1. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

(2. Sichuan Institute of Aerospace Systems Engineering, Sichuan Academy of Aerospace Technology, Chengdu 610100, China)

Abstract: The internal dimension of a small diameter variable cross-section composite inlet is small, the surface treatment is difficult, and the overall manufacturing is difficult. How to reduce the process difficulty on the basis of meeting the surface quality requirements of the inlet, and at the same time endow the parts with functionality, is an urgent problem to be solved. A manufacturing method is proposed, which can realize structural and functional integration. The block and combined structure design is adopted, then the skin parts with uniform thickness (surface waviness not exceeding 0.5 mm) and small deformation are formed under the process control. To solve the problem of seam level difference between segmented skins, the synergistic method of flange edge connection and fixed connection with plate is adopted. After assembly alignment, the surface quality of the inlet cavity meets the requirements, and the effective filling of the joint further guarantees the realization of the aircraft function. Then the composite air inlet that meet the design and usage requirements has been successfully manufactured.

Key words: composites; inlet; autoclave molding; seam step difference

收稿日期: 2022-08-02; 修回日期: 2023-02-24

通信作者: 陈苗苗, Chenmiao0104@163.com

引用格式: 陈苗苗, 徐伟伟, 李可, 等. 小口径变截面复合材料进气道结构功能一体化的工艺方法[J]. 航空工程进展, 2023, 14(6): 119-124.

CHEN Miaomiao, XU Weiwei, LI Ke, et al. Manufacturing method on structural and functional integration of the small-diameter and variable section composites inlet[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(6): 119-124. (in Chinese)

0 引言

进气道肩负对气流捕获、压缩、整流等重任,其设计特征和工作特性对发动机的工作效率会产生显著影响^[1]。先进进气道要求气动外形与隐身性能一体化设计,其中,S弯进气道能够有效降低军用飞机的前向 RCS(雷达散射截面),引起了相关研究人员的广泛关注^[2-5]。S弯进气道为变截面结构,要求内型面满足气流无阻碍流通、外型面满足与机身壳体的配合,这便对进气道的制造精度、气动面质量以及隐身性能等提出了较为严苛的要求。

针对此,国内外开展了大量的研究探索^[6-10]。目前 S型变截面进气道的制造多通过模具设计实现整体成型^[11-13]。其中,石磊等^[14]设计出了组合式复合材料模具,实现了复合材料进气道的整体成型;马腾飞等^[15]设计了一种可循环利用的组合模具,工艺控制下成型出满足要求的进气道。而本文所研制的某无人机进气道结构更为复杂,其曲率变化大,在长度上呈现出“两头粗中间细”的特征,内腔尺寸小且长度方向尺寸大,其中,进气道内部宽度最小处为 254 mm。若整体成型虽可满足表面质量要求,但存在三方面限制:一是受限于现阶段表面处理喷枪规格(最小喷枪长度约 265 mm),整体成型后无法进入进气道内部作业,导致内部气动面的表面处理工序无法完成;二是整体成型的模具制造难度和成本较高,与该无人机的优质高效低成本目标相悖;三是整体成型的工艺难度较高。

在这样的技术背景下,针对该小口径变截面复合材料进气道,本文通过结构设计、工艺设计及零件制造与装配三个方面开展方法探索,在工艺控制下成型出满足要求的进气道零件,以期低成本实现结构功能一体化目标。

1 实验

1.1 实验原料

环氧碳纤维织物预浸料 C6442T2-200,碳纤维为 T300,树脂为快速固化环氧树脂,为 2/2 斜纹织物结构,经向织物密度:55 根/10 cm,纬向织物密度:55 根/10 cm;预浸料面密度 (345 ± 12) g/m²,

纤维面密度 (200 ± 10) g/m²;树脂含量 $(42 \pm 2)\%$,单层厚度 (0.23 ± 0.02) mm,购于成都鲁晨新材料科技有限公司。辅助材料(透气毡、真空袋等)购于美国 Airtech 公司。

1.2 实验设备

热压罐:规格 $\Phi 2 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$;

电阻测量仪:BT3562,测量精度 0.01 M Ω ;

三坐标测量仪:ALPHA IMAGE,尺寸测量误差 $\pm(5.0+5.0 L/1\ 000)$ μm ;

超声波探伤仪:Omniscan MX2,购于美国 OLYMPUS 公司;

粗糙度仪:TR200。

1.3 性能测试

1.3.1 无损性能

使用超声波探伤仪对零件进行无损检测。主要检查进气道蒙皮与筋条的共固化粘接情况,以及检查零件制孔后孔周边区域是否存在分层。

1.3.2 表面波纹度

使用三坐标测量仪检测零件表面波纹度。通过对零件实体进行扫描,获取曲面数据,将其与设计数模进行比对,获得表面测量结果。

2 进气道制造工艺

2.1 进气道结构设计

因进气道内部宽度最小处为 254 mm,考虑喷涂设备规格及手工填缝操作可达性(操作人员手臂长度可达约 600 mm),沿连接处将整个 S弯进气道分成 C形蒙皮和 I形蒙皮两部分,C形蒙皮可整体成型,I形蒙皮分成 4 段(如图 1 所示),长度分别为 260、320、240、380 mm,且采用斜分的方式。

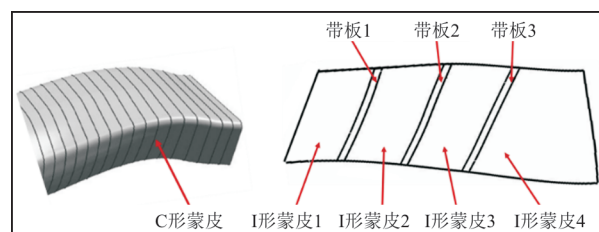
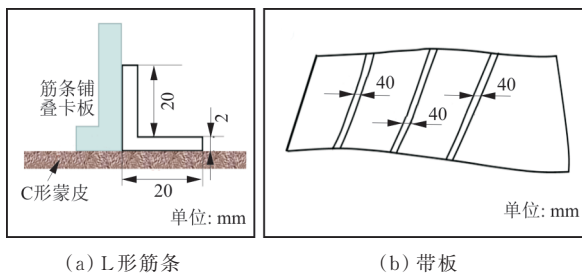


图1 C形蒙皮与I形蒙皮分块示意图

Fig. 1 The block diagram of C and I skin

I形蒙皮各分段之间设置连接带板(带板宽度为40 mm),这是基于蒙皮厚度均匀控制的条件下,采用带板配合分块蒙皮连接,可在一定程度上消除对缝阶差;且在对缝处和钉头处填充密封胶,消除分块连接间隙。上述两项措施确保分块连接方式对气动面的性能影响较小。C形和I形蒙皮外缘处设置法兰翻边,用于后续连接装配。

另外,为进一步提高进气道的结构强度和刚度,C形蒙皮外表面与机身框连接处设置L形加强环筋,其腹板面和底板面高度均为20 mm(如图2所示)。



(a) L形筋条

(b) 带板

图2 L形筋条和带板结构示意图

Fig. 2 The diagram of L rod and connecting plate

2.2 复合材料工艺试验

2.2.1 零件厚度均匀性

因进气道蒙皮为分块组合式结构,各分块蒙皮的厚度波动直接影响整体进气道的表面质量。通过设置工艺试验,确定最佳铺层比例和铺层顺序,实现零件厚度均匀性的有效控制^[16]。

以最上层织物混编方式 0° 方向定义为织物预浸料的经向, 90° 方向定义为织物预浸料的纬向。以纤维织物经向为基准,C6442T2-200织物预浸料铺层角度为 0° 和 90° ,常见的铺层方式包含 0° 同向铺叠和 0° 、 90° 交叉铺叠两种,如图3所示。

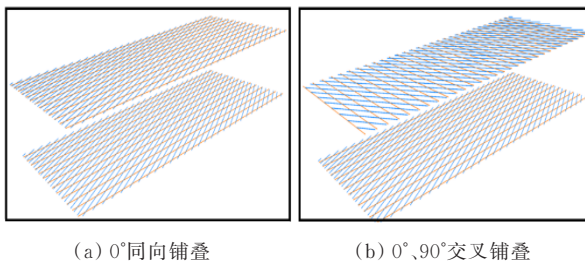
(a) 0° 同向铺叠(b) 0° 、 90° 交叉铺叠

图3 织物预浸料铺叠示意图

Fig. 3 The schematic diagram of prepreg overlay

采用磁力测厚仪对成型后的试样进行选点测厚(零件表面均匀选点不少于50个),测量结果如表1所示,可以看出:相较于 0° 单向铺叠, 0° 、 90° 交叉铺叠成型零件的实际厚度与理论值偏差较小,且厚度均匀性较好。

表1 各试样厚度测量分析数据表
Table 1 The thickness measurement analysis data of different samples

序号	铺叠层数/层	铺叠方式	厚度均值/mm	厚度极差/mm	标准差/mm	理论偏差/mm
1	8	0° 、 90°	1.83	0.06	0.020	0.006
2	10	交叉铺叠	2.31	0.05	0.019	0.008
3	8		1.86	0.26	0.049	0.071
4	9	0° 单向铺叠	2.16	0.32	0.083	0.094
5	10		2.32	0.18	0.057	0.020

注:理论偏差是指厚度均值与理论厚度的差值。

由上述分析可知,采用 0° 、 90° 交叉铺叠工艺能有效控制C6442T2-200复合材料的厚度均匀性,其中,厚度均匀性可控制在0.06 mm以内,厚度理论差值在0.01 mm范围内。根据工艺试验结果和蒙皮厚度要求,结合 0° 、 90° 交叉铺叠设计原则和对称性原则^[17],铺层数设置为9层,铺层角度设计为 $[0, 90, 0, 90, 0, 90, 0, 90, 0]$ (以纤维织物经向为基准)。

2.2.2 喷铝工艺试验

为满足进气道要求,复合材料蒙皮在固化成型后需进行喷铝、喷漆。在喷铝—涂胶固化过程中需要保持一定的温度,可能导致复合材料零件发生变形,影响外形精度,故通过工艺试验验证C6442T2-200复合材料在喷铝工况下的可行性。

采用粗糙度仪对固化前、吹砂后、喷铝后三种状态下的零件进行表面粗糙度测试, R_a 值分别为3.2、13.8和3.8 μm 。经吹砂处理后,表面粗糙度增加,可提高铝层与制件表面间的结合强度。喷铝后零件表面光滑平整,铝层均匀且连续,无目视可见的缺陷,表面形貌如图4所示。喷铝后表面平整度均小于0.5 mm,说明喷铝环境对试样变形影响较小,且试样喷铝后电阻率在0.5~1.5 M Ω 范围内,符合要求(如表2所示)。综合两者可知,C6442T2-200复合材料可满足喷铝工况要求。

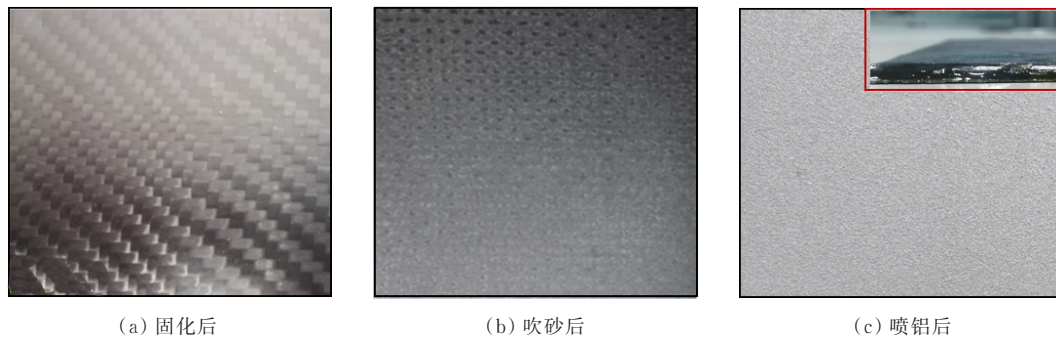


图4 C6442T2-200复合材料喷铝前后表面形貌

Fig. 4 The surface morphology of C6442T2-200 composites before and after spraying

表2 试样件喷铝后测试结果

Table 2 The resistivity results of samples

序号	预浸料	铺层数/层	规格/ (mm×mm)	数量/个	电阻率/MΩ	喷铝前平面 度/mm	喷铝后平面 度/mm	平面度变 化/mm
1	C6442T2-200	8	200×200	3	0.97	0.320	0.520	0.200
2		9		3	1.13	0.180	0.610	0.430
3		10		3	0.66	0.500	0.840	0.340
4		11		3	0.84	0.390	0.760	0.370

注:喷铝前平面度为零件固化后的状态下测试结果。

2.3 进气道蒙皮成型

C形蒙皮及L形环筋共固化成型。在阳模工装上铺叠9层织物预浸料,铺层角度为 $[0, 90, 0, 90, 0, 90, 0, 90, 0]$ (以纤维织物经向为基准)。蒙皮铺叠结束后,在其上铺叠L形筋条。成型模上设计龙门架,并增加筋条定位卡板,待筋条铺叠完成后与C形蒙皮进罐固化。固化参数曲线依据如图5所示(1 bar=100 kPa)。

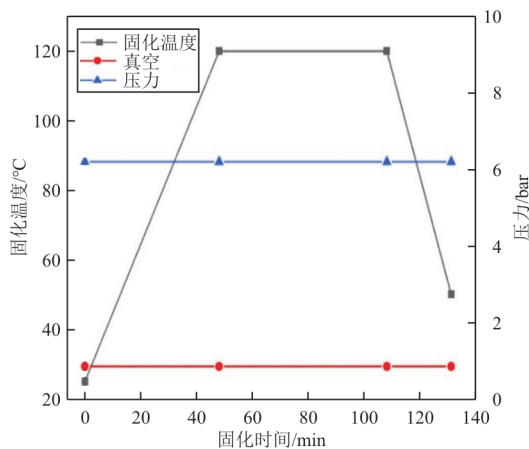


图5 复合材料固化工艺参数曲线图

Fig. 5 The curing process parameter curve of composites

I形蒙皮及带板成型。分别在铺叠工装上完成4块I形蒙皮和3块连接带板铺叠,铺叠角度同上,

采用热压罐固化成型,固化工艺参数同上。

固化结束后,脱模,取下零件,测量零件贴模度和厚度,各分块蒙皮的贴膜度均小于0.5 mm,所有零件厚度公差均满足 $\pm 4\%$ 的要求,表面波纹度不超过0.5 mm,无损检测表征无脱粘分层缺陷,符合结构设计要求。

2.4 进气道表面处理

为满足复合材料进气道气动面所要求的电连续性和隐身性能等功能要求,对成型后的各分块蒙皮表面进行喷铝、喷漆。

2.4.1 进气道喷铝

火焰喷铝操作流程为:检查清洗—吹砂活化—火焰喷铝—测量检查—封孔打磨。

1) 检查清洗。将零件待喷涂表面、边缘部位上的其他多余物清除掉,再采用干净的绸布或棉布蘸取丙酮擦洗。

2) 吹砂活化。采用40~60目的吹砂粒料对指定表面进行吹砂。吹砂喷头角度为与零件表面呈 45° ,压力为2.5 bar,距离为100 mm。吹砂过程中,喷头应沿复合材料表面匀速移动。吹砂结束后,用无水无油的压缩空气吹扫清洁,用丙酮对吹砂表面进行彻底清洗^[18]。

3) 火焰喷铝。利用氧气、乙炔混合气体燃烧时产生的高温火焰(2 630 ℃)将喷涂铝丝熔化成液态或熔融状态,利用高压气体将液态或熔融状态的喷涂材料细化成微粒,并高速喷射在零件表面。

4) 测量检查。采用电阻测量仪对零件喷涂表面电阻进行测量,检查是否在规定电阻范围(0.5~1.5 MΩ)内。测量时对于电阻值大于规定值的区域可进行补喷,直到电阻值合格为止。

5) 封孔打磨。采用封孔胶H01-103H对喷涂表面进行刷涂保护。刷涂完成后,将复合材料制件在(60±5)℃下恒温固化8~10 h以上。

固化完成后,封孔胶干膜应连续、均匀、无明显颗粒或流挂。当出现明显颗粒或流挂时,允许用细砂纸进行打磨或修整。

2.4.2 进气道喷漆

在进气道C形蒙皮和I形蒙皮1~4气动面喷涂功能漆层,漆层包含锌黄底漆+电磁面漆。

2.4.3 表面质量检查

对完成表面喷铝和喷漆的各分块蒙皮,采用强光手电筒检查其表面质量。经检查,各零件表面涂层均匀,光滑平整,无色差、凹坑、针孔等表面缺陷。

2.5 进气道装配

2.5.1 进气道预装配

预装配阶段完成两部分工作,一是检查间隙以及对缝阶差。对于超出公差要求的区域进行手工打磨修配,修配结束后,满足I型蒙皮之间的对缝 ≤ 0.1 mm、阶差 ≤ 0.1 mm的要求;二是完成预制螺钉孔。制孔区域包括:I型蒙皮与带板连接处、C型蒙皮与I型蒙皮配合处的翻边法兰。

2.5.2 进气道装配

采用装配型架进行零部件复位调姿后完成对合装配。首先在装配工装上装夹定位C形蒙皮,并与4块I形蒙皮进行预连接,再次检查间隙以及对缝阶差是否满足要求(不符合要求区域进行手工打磨修配,要求同上)。随后依次连接I形蒙皮与C形蒙皮,带板与连接蒙皮。连接过程中,在I形蒙皮与C形蒙皮对缝处、螺栓连接钉头处填补密封胶,以满足进气道气动面要求。进气道装配详细流程如图6所示。

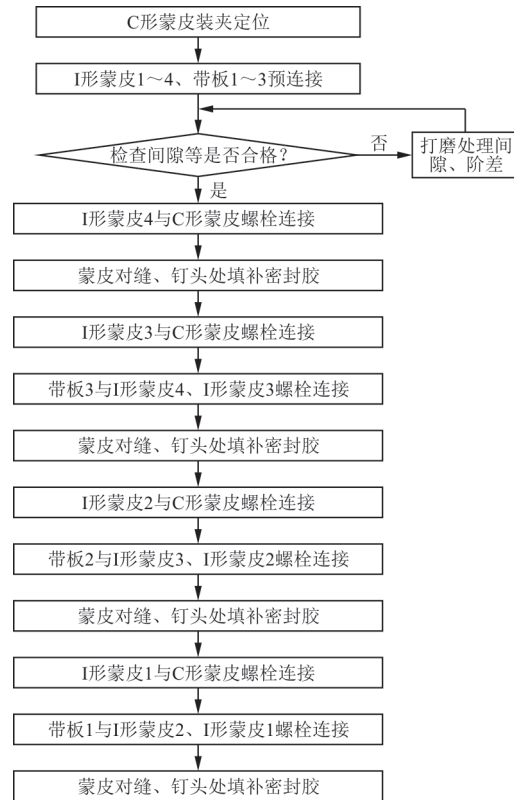


图6 复合材料进气道装配流程图
Fig. 6 The flow chart of inlet assembly

2.5.3 进气道整体性能测试

1) 结构测试。采用三坐标测量仪对装配后的进气道轮廓度进行扫描,经检查,变形量控制在 ± 0.5 mm范围内,满足设计要求。

2) 性能测试。分块蒙皮实施表面处理,加上对缝处、钉头处的密封填充处理,保证了装配后的功能性指标满足要求。同时,无人机整机的电连续性能和RCS测试结果均达标。

3 结论

1) 采用分块组合式设计,保证了复杂异形结构的简单成型和表面处理工况的兼容。

2) 采用法兰边连接和带板固定连接的协同方式,解决了分块蒙皮之间的对缝阶差问题,连接对缝的有效填充处理进一步保障了飞机功能的实现。

3) 低成本制造出表面质量高、隐身性能达标的复合材料进气道,已交付并装机应用。

参考文献

- [1] BEALE D K, CRAMER K B, KING P S. Development of improved methods for simulating aircraft inlet distortion in

- turbine engine ground test[J]. AIAA Journal, 2002, 151: 2002-3045.
- [2] 姬金祖, 武哲, 刘战合. “S”型进气道设计中弯度参数研究[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2009, 36(4): 746-750.
- JI Jinzu, WU Zhe, LIU Zhanhe. Research on the curvature parameter in the S shaped inlet's stealth design[J]. Journal of Xidian University (Natural Science Edition), 2009, 36(4): 746-750. (in Chinese)
- [3] 石磊, 郭荣伟. 蛇形进气道的电磁散射特性[J]. 航空学报, 2007, 28(6): 1296-1301.
- SHI Lei, GUO Rongwei. Electromagnetic scattering characteristics of serpentine inlet[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(6): 1296-1301. (in Chinese)
- [4] 郑日升, 戚开南, 张庆, 等. “X”型布局锯齿唇口进气道的超声速飞行器气动与隐身一体化研究[J]. 推进技术, 2007, 38(11): 2471-2478.
- ZHENG Risheng, QI Kainan, ZHANG Qing, et al. Integrated investigation of aerodynamic shape and stealth performance for supersonic vehicle with “X” sawtooth lip inlet[J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 38(11): 2471-2478. (in Chinese)
- [5] ZHANG J M, WANG C F, LUM K Y. Multidisciplinary design of s-shaped intake[C]// The 26th AIAA Applied Aerodynamics Conference. Hawaii: AIAA, 2008: 7048-7060.
- [6] AMINBAKSHI S, GUNDUZ M, SONMEZ R. Safety risk assessment using analytic hierarchy process (AHP) during planning and budgeting of construction project[J]. Journal of Safety Research, 2013, 46: 99-105.
- [7] 王正峰, 周艺玮. 航空用先进复合材料的主要种类与制造工艺[J]. 仪表技术, 2018(3): 40-43.
- WANG Zhengfeng, ZHOU Yiwei. The main types of composites materials and advanced manufacturing technology for aviation[J]. Instrumentation Technology, 2018(3): 40-43. (in Chinese)
- [8] 杨铁江, 张明, 张剑. 复合材料进气道的模具设计及工艺方案研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2011(6): 57-59.
- YANG Tiejia, ZHANG Ming, ZHANG Jian. Study on mould design and process plan of the composite inlet duct[J]. FRP/Composite, 2011(6): 57-59. (in Chinese)
- [9] 姜年朝, 张志清, 戴勇, 等. 基于 ANSYS 的无人机复合材料机身模具设计[J]. 机械设计与制造工程, 2008(12): 58-59.
- JIANG Nianchao, ZHANG Zhiqing, DAI Yong, et al. Study based on ANSYS of the UAV composite material body mold design[J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2008(12): 58-59. (in Chinese)
- [10] 戈家荣, 范景峰, 蔡念忠, 等. 大尺寸 S 形复合材料进气道整体制造技术[J]. 航空精密制造技术, 2022, 58(6): 1-4.
- GE Jiarong, FAN Jingfeng, CAI Nianzhong, et al. Integral manufacturing technology of large-size S-shaped composite Inlet [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2022, 58(6): 1-4. (in Chinese)
- [11] 何凯. 飞机全复合材料进气道制造工艺[J]. 航空制造技术, 2004(7): 91-92.
- HE Kai. Manufacturing technology of the all-composite inlet duct of an aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004(7): 91-92. (in Chinese)
- [12] 杜龙, 李朝光, 王红飞. 先进复合材料在无人机上的应用及关键技术[J]. 教练机, 2017(2): 10-17.
- DU Long, LI Chaoguang, WANG Hongfei. Application of advanced composites on UVA and key technologies [J]. Trainer, 2017(2): 10-17. (in Chinese)
- [13] 于之帅, 孙家超, 林山, 等. 碳纤维复合材料工艺进气道研制及仿真计算[C]// 第二十一届全国复合材料学术会议. 呼和浩特: 中国航空学会, 2020: 115-121.
- YU Zhishuai, SUN Jiachao, LIN Shan, et al. Development and simulation of carbon fiber composites inlet [C]// The 21st National Academic Conference on Composite Materials. Hohhot: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2020: 115-121. (in Chinese)
- [14] 石磊, 徐晋伟, 柴朋军. 复合材料变截面进气道模具设计及工艺方案研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(5): 91-93.
- SHI Lei, XU Jinwei, CHAI Pengjun. Study on mould design and process plan of the variable cross section composite inlet duct[J]. FRP/Composite, 2016(5): 91-93. (in Chinese)
- [15] 马腾飞, 李伟明, 许向彦. 变截面 S 型复合材料进气道的模具设计及工艺研究[J]. 橡塑技术与装备, 2019, 45(14): 36-38.
- MA Tengfei, LI Weiming, XU Xiangyan. Study on mould and technology of S-shaped composite inlet with variable section [J]. Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2019, 45(14): 36-38. (in Chinese)
- [16] 王尧, 赵树军, 付友波. 工程化复合材料结构优化设计方法[J]. 航空工程进展, 2020, 11(6): 843-850.
- WANG Rao, ZHAO Shujun, FU Youbo. Engineering composite structure optimization design method[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(6): 843-850. (in Chinese)
- [17] 谢富原. 先进复合材料制造技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2017: 52-60.
- XIE Fuyuan. Advanced manufacturing technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2017: 52-60. (in Chinese)
- [18] 李媛媛, 祝君军, 徐伟伟, 等. 复合材料胶接表面的树脂砂吹砂工艺研究[J]. 复合材料科学与工程, 2021(9): 94-98.
- LI Yuyuan, ZHU Junjun, XU Weiwei, et al. Study on resin sandblasting process of composites adhesive surface [J]. Composites Science and Engineering, 2021(9): 94-98. (in Chinese)

作者简介:

陈苗苗(1994—),女,硕士,工程师。主要研究方向:复合材料工程。

徐伟伟(1988—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:复合材料工程。

李可(1994—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞行器结构设计。

邓世威(1992—),男,硕士,工程师。主要研究方向:复合材料工装设计。

李博(1988—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:复合材料工程。

(编辑:马文静)