

文章编号: 1674-8190(2024)03-167-07

新的直升机复合材料涵道制造技术

祁书涛, 吕知先, 郑春阳, 盖喜春

(哈尔滨飞机工业集团有限责任公司, 哈尔滨 150066)

摘要: 为了实现 AC332 民用直升机复合材料涵道结构的高质量、低成本、敏捷快速制造, 针对结构特点和各项设计要求, 开展正向工艺设计, 提出一种新的直升机复合材料涵道制造技术。新的直升机复合材料涵道制造技术包括零件的精准制造技术、涵道结构胶接装配技术、精加工技术, 对直升机复合材料涵道制造技术展开论述, 介绍直升机复合材料涵道制造技术的应用情况; 与传统直升机的涵道制造技术从产品质量、工装需求、操作性、制造成本方面进行对比。结果表明: 新的直升机复合材料涵道制造技术达到了降低成本、缩短制造周期、简化工装、提升质量、保证接口精度的效果, 对其他直升机大部件的精准制造具有参考价值。

关键词: 复合材料; 涵道; 精准制造; 胶接装配

中图分类号: V262

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.03.17

The new helicopter composite duct manufacturing technology

QI Shutao, LYU Zhixian, ZHENG Chunyang, GAI Xichun

(Harbin Aircraft Industry Group Co., Ltd., Harbin 150066, China)

Abstract: In order to realize the high-quality, low-cost, agile and rapid manufacturing of AC332 civil helicopter composite duct structure, a new helicopter composite duct manufacturing technology is put forward by carrying out forward process design according to structural characteristics and various design requirements. The new helicopter composite duct manufacturing technology includes precision manufacturing technology of parts, adhesive assembly technology of duct structure and finishing technology. The helicopter composite duct manufacturing technology is discussed and its application is introduced. The new helicopter composite duct manufacturing technology is compared with the traditional helicopter duct manufacturing technology in the aspects of product quality, tooling requirements, operability and manufacturing costs. The results show that the new helicopter composite duct manufacturing technology has achieved the effects of reducing cost, shortening manufacturing cycle, simplifying tooling, improving quality and ensuring interface accuracy, which is of important reference value for the precision manufacturing of other helicopter parts.

Key words: composite; duct; precision manufacturing; adhesive assembly

收稿日期: 2023-11-03; 修回日期: 2024-03-03

通信作者: 祁书涛(1988—), 女, 学士, 高级工程师。E-mail: 214122394@qq.com

引用格式: 祁书涛, 吕知先, 郑春阳, 等. 新的直升机复合材料涵道制造技术[J]. 航空工程进展, 2024, 15(3): 167-173.

QI Shutao, LYU Zhixian, ZHENG Chunyang, et al. The new helicopter composite duct manufacturing technology[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(3): 167-173. (in Chinese)

0 引言

基于复合材料具有轻质量高强度、弹击/损伤容限、电磁防护能力、防核辐射、防生物、防化学及抗坠毁等优点,近几十年来,直升机的所有结构几乎都开展了复合材料的应用研究,并且大部分取得了研究成果^[1]。机体结构复合材料用量现已成为衡量新一代直升机技术先进水平的重要标志之一^[2]。涵道是直升机大比例应用复合材料的典型例子,因涵道式尾桨前飞时功率低、安全性高、利于低空飞行等优点^[3],涵道结构在 6 t 以下的民用直升机谱系中得到了非常广泛的应用,如海豚、H-135、H-145 等。廖美东^[4]研究了国外海豚直升机的制造工艺技术,虽然实现了复合材料涵道的制造,但存在协调性不佳、操作繁琐、入炉频繁的缺点;甘春诚等^[5]研究了直升机涵道数字化制造工艺,但仅对涵道结构设计进行了数字化未对工艺技术进行优化,仍存在胶接次数多、工装笨重等弊端;徐德鹏^[6]研究了提升直升机先进制造技术与型号科研生产能力的关系;谢岳等^[7]研究了先进制造技术对航空装备的影响,提出了先进制造技术的重要性;寇洁等^[8]提出了飞机研制全过程工艺设计标准,从正向工艺设计的角度开展涵道结构工艺策划。复合材料涵道需经过复合材料零件制造、二次胶接、装配三个过程实现制造。在复合材料零件制造方面,顾轶卓等^[9]研究了复合材料制造技术与工艺理论;李明等^[10]研究了复合材料成型工艺装置;马全胜等^[11]研究了复合材料的模具材料及结构形式;周利霖等^[12]研究了复合材料空间刚架缩比模型;杨曦凝等^[13]研究了复合材料工装变形补偿方法。上述研究使复合材料零件制造技术得到提升,但均为单点技术,无法满足所有涵道结构零件的制造及胶接装配需求。在装配方面,罗振伟等^[14]研究了基于测量数据的飞机数字化预装配技术,但其不适用于涵道结构的胶接装配。

本文针对复合材料零件精准制造技术、胶接加压技术及精加工技术开展深入的研究,提出新的直升机复合材料涵道制造技术,将此技术应用于 AC332 民用直升机,并与传统的直升机涵道制造技术进行对比。

1 直升机复合材料涵道简介

1.1 涵道结构

以 AC332 直升机涵道为例,涵道结构是由涵道前梁、左/右/下蒙皮、内环、内圈支撑类、外圈围形肋等共 26 个零件组成的封闭腔体结构,外扩尺寸 1 900 mm×1 700 mm×300 mm。所有零件通过中温胶膜二次胶接,左/右蒙皮、涵道中部肋及涵道前梁胶接后,在胶接面铆接抽芯铆钉。涵道结构如图 1 所示。

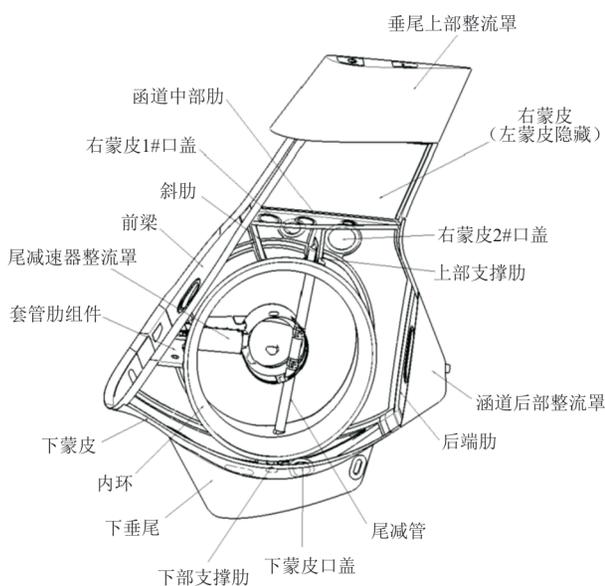


图 1 涵道结构

Fig. 1 Culvert structure

1.2 制造要求

涵道结构为尾减速器提供空间及安装点,同时为传动系统提供通道。针对尾减速器及传动系统的安装精度需求,对涵道结构的制造精度提出了要求,主要包括涵道结构的制造精度要求和安装接口的精度要求,如表 1~表 2 所示。

表 1 对涵道结构提出的制造要求

Table 1 Manufacturing requirements for culvert structure

序号	制造要求	接受标准
1	胶接质量	胶接面单个最大缺陷尺寸 $\Phi \leq 12.7$ mm, 缺陷间距离大于 100 mm
2	胶接间隙	小于 1.5 mm

表2 对涵道结构提出的接口精度要求
Table 2 Interface accuracy requirements for culvert structure

序号	主要接口	接口精度
1	尾减速器连接管安装孔	位置度 0.2 mm
2	内环直径	尾桨与内环间隙 ≥ 3 mm
3	尾减速轴套安装位置平面	与理论平面偏差 ≤ 0.1 mm

2 新的直升机涵道制造技术

为了提升涵道制造技术,本文从正向工艺设计的角度,提出一种新的直升机复合材料涵道制造技术,主要包含复合材料零件精准制造技术、涵道胶接装配技术、精加工技术。

2.1 复合材料零件精准制造技术

涵道结构是全部由复合材料零件胶接装配而成的闭合结构,复合材料零件制造精度直接影响涵道结构的装配协调性,是涵道结构制造技术的重难点之一。

依据复合材料零件不同的结构特点,选用合适的精准制造技术途径,如表3所示。

表3 精准制造技术途径及适用零件
Table 3 Precision manufacturing technical approaches and applicable parts

序号	技术途径	适用零件
1	模具材料缩比系数匹配性	所有复合材料零件
2	模具设计考虑缩比	所有复合材料零件
3	固化仿真测算变形量,模具补偿	下蒙皮、左/右蒙皮
4	使用薄壳工装,优化热分布	下蒙皮、左/右蒙皮
5	非常规结构的缩比试验	涵道内环

内环零件为非常规结构,内环为封闭环形结构,外环为不规则“U”形曲面,如图2所示。虽然於永红等^[15]研究了复合材料U型构件角度收缩及模具补偿,但经验证不适用于内环结构。本文采用位移传感器开展工装热缩比检测,并探索材料、铺层对特殊结构产品最终尺寸的影响,确定工装的缩比系数,实现内环产品的精准制造。

各项精准制造技术的应用,可以提高复合材料零件的尺寸精度、型面精度,保证胶接过程中各零件间协调性,降低胶接内应力。

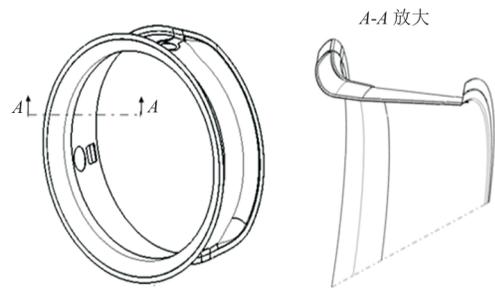


图2 内环结构

Fig. 2 Inner ring structure

2.2 涵道胶接装配技术

涵道胶接技术核心为胶接加压技术,加压技术决定了能否实现工艺分离面的合理划分及胶接流程的合理策划。

2.2.1 弹性销钉胶接加压技术

涵道由20余个零件构成,每个零件存在至少两个胶接面,零件间互相胶接,构成数量庞大的胶接面。所有胶接面胶接时均需加压以完成固化。每个胶接面的加压装置均不可共用,因此需要大量的加压装置。普通的加压装置在胶接时的空间占位较大,其占位的位置复杂,无法实现一次性胶接太多零件,直接导致胶接次数增加。设计合适的加压方法,可实现胶接面的有效加压,并能充分解放空间和通道。

新的直升机涵道制造技术在胶接面使用可持续加压的弹性销钉进行固定和加压(如图3所示),胶接过程中压力可随固化过程胶膜的软化和溢流进行自动适应性调整。

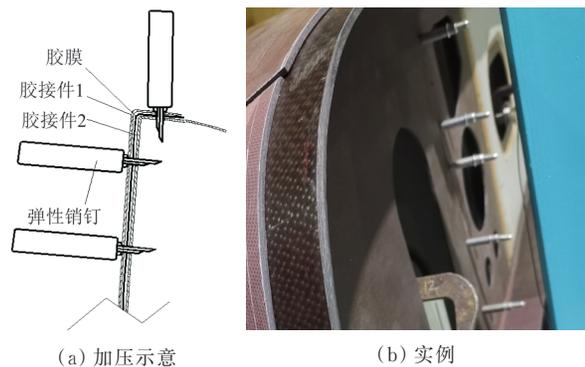


图3 弹性销钉加压示意

Fig. 3 Schematic diagram of pressurization of elastic pin

使用弹性销钉加压,在实现胶接定位的同时实现加压,压力作用于被胶接面间,而非将压力由工装卡板承接,压力精准且均匀,减小误差积累和应力积累,释放工装可施工的空间,增加单次可胶接的零件数量。

2.2.2 工艺分离面划分

涵道结构为闭合结构,不能通过一次胶接装配而成,需设计合理的工艺分离面,实现零件胶接过程的合理、便利。

基于弹性销钉胶接加压技术,新型涵道胶接通道通畅,仅需将结构闭合前的单侧蒙皮拆分离出来为无损检测留出操作通道,无其他分离面,分离面划分示意如图 4 所示。因此本文提出仅划分 1 个工艺分离面,实施两次胶接。

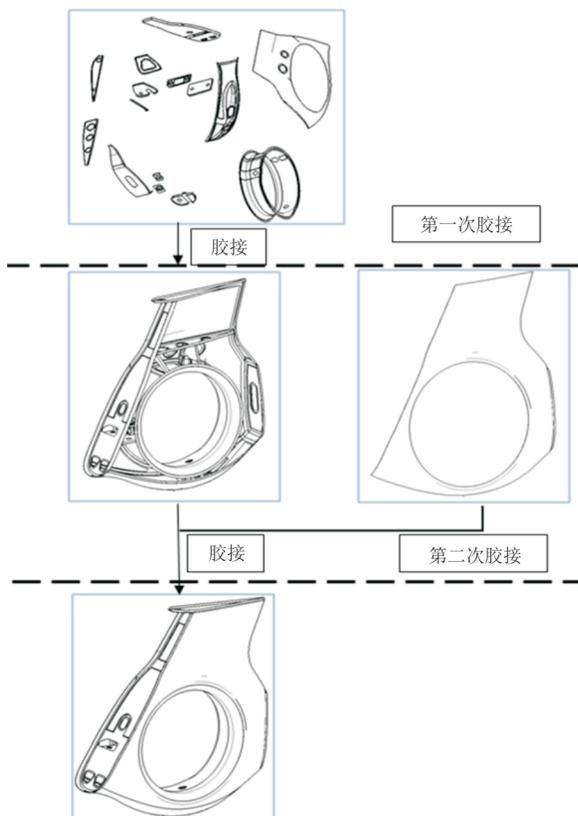


图 4 分离面划分示意

Fig. 4 Schematic diagram of separation plane division

2.2.3 胶接装配流程

胶接流程符合工艺分离面,胶接后所有胶接面可无损检测且实现最少的胶接次数,方便涵道腔内的装配件安装。

遵循工艺分离面,合理设计腔体内装配件的

可实施性,提出新的直升机复合材料涵道结构的胶接装配流程,如图 5 所示。

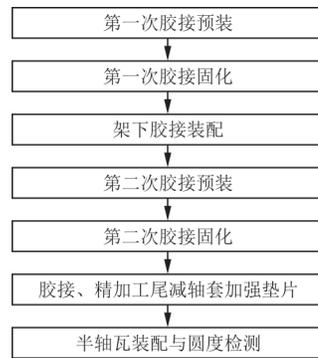


图 5 涵道结构的胶接装配流程

Fig. 5 Adhesive assembly process of culvert structure

2.3 精加工技术

2.3.1 安装端面的精加工

尾减轴套处加强垫片用于补偿偏差,胶接于涵道组件的套管肋加强件,如图 6 所示,为尾减轴套提供安装平面和安装点,如图 7 所示,是尾减速器传动系统的重要接口,尾减轴套安装位置平面与理论平面的偏差 ≤ 0.1 mm。

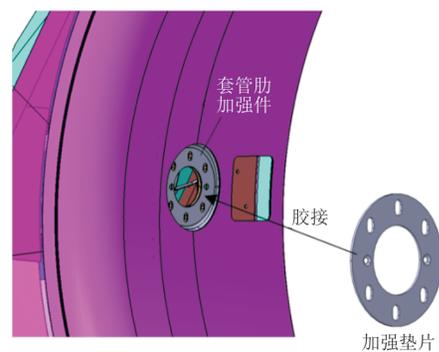


图 6 加强垫片胶接

Fig. 6 Adhesive bonding of reinforcing gasket

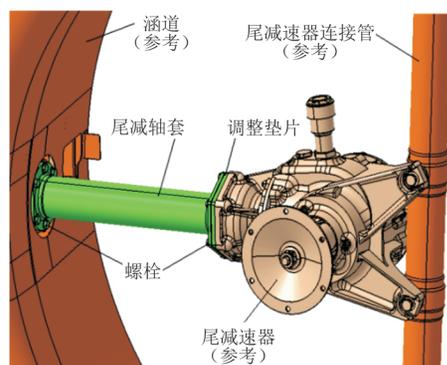


图 7 尾减速器安装示意

Fig. 7 Installation schematic of tail reducer

为保证接口精度,提出以下精加工方案:

1) 后胶接加强垫片

两次中温胶接后内应力释放、温度影响均对加强垫片的胶接位置平面精度有影响,因此提出后胶接加强垫片的方式补偿前期胶接产生的偏差。

由于胶接面积较小,使用局部加热装置仅对胶接位置加热并采用机械加压的方式固化胶膜,完成加强垫片胶接。

2) 胶接后的精加工

在涵道结构定位状态下,对加强垫片的安装平面进行端面铣,保证平面精度要求。

2.3.2 安装孔精加工

尾减管安装孔位置度直接影响尾减速器传动系统的传动效率,孔位置度要求小于0.2 mm。

下支撑肋与尾减管、半轴瓦连接孔的精度直接决定了尾减管的安装精度,其连接方式如图8所示。连接孔在第一次胶接前制定位孔初孔后,经历两次胶接预装配、两次装配和两次中温胶接过程。需设计下支撑与尾减管、半轴瓦连接孔的钻制方案,以避免安装孔在预装、装配、胶接固化过程中的误差积累和变形应力释放造成的孔位偏差。

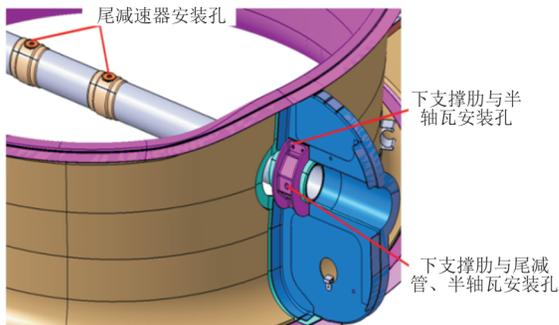


图8 下支撑肋与尾减管、半轴瓦连接结构

Fig. 8 Connection structure of support rib, tail reducer and half bearing bush

本文通过采用分步、协调制孔、最终铰孔的方案,降低连接孔受制造过程影响而产生的误差。

3 新的直升机涵道制造技术应用

2022年,仅进行了2次胶接、5天内即完成了AC332民用直升机首件涵道结构的制造,相比原

制造技术(15天),周期为原制造周期的1/3。应用新的涵道制造技术制造的产品,如图9所示,已完成了装机,并于2023年完成了首飞。新的涵道制造技术实现了涵道结构的高质量、低成本、敏捷快速试制。



图9 新的制造技术在AC332民用直升机应用

Fig. 9 Application of new technology in AC332 civil helicopter.

4 新的直升机涵道制造技术优势

将新的直升机复合材料涵道制造技术与传统的直升机复合材料涵道制造技术进行相比,本文提出了零件精准成型技术,创新了胶接加压技术,改进了精加工技术。对两种制造技术从产品质量、工装需求、操作性、制造成本四个方面对比分析。

1) 产品质量

传统的直升机复合材料涵道的胶接质量常因工装的加压装置(作动筒加压)、工装框架、产品结构三者间协调性不佳而导致缺陷。

新的涵道制造技术开展零件精准成型,且胶接面间直接加压,压力精准,胶接质量稳定。新老技术产品质量对比如表4所示。

表4 新老技术产品质量对比
Table 4 Quality comparison of technologies

缺陷类型	传统技术	新技术
脱粘	200 mm以上的大面积脱粘	缺陷尺寸 $\Phi \leq 12.7$ mm

2) 工装需求

传统的直升机涵道制造技术对工装的各项要求较高,体现在:工装设计较复杂,且因承作动筒压力需要较高强度;要求工装与加压装置协调性好;需要配备作动筒,作动筒施加压力需配备

气源。

新的直升机复合材料涵道制造技术对工装的各项要求均为一般要求,体现在:工装设计较简单,均为常规的托架和卡板,因无需额外承受加压装置的力,对强度要求不高;工装无特殊结构,制造难度低;无需额外增加加压装置及气源。新老技术工装需求对比如表 5 所示。

表 5 新老技术工装需求对比

Table 5 Comparison of tooling requirements of technologies

技术	工装数量	工装结构
传统技术	6	复杂
新技术	2	简单

3) 操作性

传统直升机复合材料涵道制造技术操作性差,繁琐笨重,且因胶接入炉次数多,重复性操作多。

新的直升机复合材料涵道制造技术的操作相对简单和便利,但因涵道结构操作通道狭小,局部操作空间局促。

4) 制造成本

传统的直升机复合材料涵道制造技术的制造成本高,体现在以下方面:工装制造成本高,产品入炉固化次数多,人力成本及能耗高。

新的直升机复合材料涵道制造技术的制造成本较低,体现在以下方面:工装制造成本较低,产品入炉固化次数少,人力成本及能耗较低。新老技术制造成本对比如表 6 所示。

表 6 新老技术制造成本对比

Table 6 Comparison of manufacturing costs

项目	工装成本/ 万元	固化次数	固化成本/ 万元	工时数/ h
传统技术	210	5	2.0	240
新技术	38	2	0.6	80

5 结 论

1) 本文提出了一种新的直升机复合材料涵道制造技术,包含零件精准制造技术、胶接装配技术及精加工技术,通过在 AC332 民用直升机上的应用,新的技术实现了涵道结构高质量、低成本、敏捷快速试制。

2) 通过与传统的直升机复合材料涵道制造技术的对比,新的涵道制造技术具有产品质量稳定、对工装需求低、操作简单、制造成本低的优势。

3) 新的直升机复合材料涵道制造技术可推广应用用于其他复合材料大部件的制造。

参 考 文 献

- [1] 李进卫. 碳纤维增强复合材料性能特点及其应用领域[J]. 化学工业, 2015, 33(8): 13-14.
LI Jinwei. Properties and application fields of carbon fiber reinforced composites[J]. Chemical Industry, 2015, 33(8): 13-14. (in Chinese)
- [2] 徐雯婷. 纤维增强树脂基复合材料在直升机的应用现状[J]. 纤维复合材料, 2021, 38(3): 90-93.
XU Wenting. Application status of fiber reinforced resin matrix composites in helicopter[J]. Fiber Composites, 2021, 38(3): 90-93. (in Chinese)
- [3] 杨福根. 轻型直升机涵道尾桨的研究[J]. 直升机技术, 2005(1): 47-49.
YANG Fugen. Study on ducted tail rotor of light helicopter[J]. Helicopter Technology, 2005(1): 47-49. (in Chinese)
- [4] 廖美东. 法国海豚直升机的工艺特点[J]. 航空制造技术, 1999(3): 35-36.
LIAO Meidong. Technological characteristics of french dolphin helicopter [J]. Aviation Manufacturing Technology, 1999(3): 35-36. (in Chinese)
- [5] 甘春诚, 荆天冬. 直升机尾涵道数字化设计与制造技术研究[C]// 2021 年中国航空工业技术装备工程协会年会. 青岛: 中国航空工业技术装备工程协会, 2021: 41-44.
GAN Chuncheng, JING Tiandong. Research on digital design and manufacturing technology of helicopter tail culvert [C]// 2021 Annual Meeting of China Aviation Industries Technology Equipment Engineering Association. Qingdao: China Aviation Industries Technology Equipment Engineering Association, 2021: 41-44. (in Chinese)
- [6] 徐德鹏. 发展直升机先进制造技术提升型号科研生产能力[J]. 航空制造技术, 2016(1/2): 20-21.
XU Depeng. Developing advanced helicopter manufacturing technology to enhance the research and production capacity of helicopter models[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2016(1/2): 20-21. (in Chinese)
- [7] 谢岳, 郭磊, 徐宁. 先进制造技术及其对陆航装备维修的启示[J]. 航空工程进展, 2018, 9(s1): 3-4.
XIE Yue, GUO Lei, XU Ning, et al. Advanced manufacturing technology and its enlightenment to the maintenance of aviation equipment[J]. Advances in Aeronautical Science

- and Engineering, 2018, 9(s1): 3-4. (in Chinese)
- [8] 寇洁, 许增, 陈建奎. 基于飞机研制全过程的工艺设计标准研究与实践[J]. 航空标准化与质量, 2021(6): 1-3.
KOU Jie, XU Zeng, CHEN Jiankui. Research and practice of process design standards based on the whole process of aircraft development [J]. Aviation Standardization and Quality, 2021(6): 1-3. (in Chinese)
- [9] 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): 2774-2797.
GU Yizhuo, LI Min, LI Yanxia, et al. Progress in manufacturing technology and process theory of composite materials for aircraft structures [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(8): 2774-2797. (in Chinese)
- [10] 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 process equipment [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2012, 28(6): 48-50. (in Chinese)
- [11] 马全胜, 王文义. 先进复合材料用模具材料及结构形式现状与发展趋势[J]. 复合材料科学与工程, 2024(1): 119-128.
MA Quansheng, WANG Wenyi. Present situation and development trend of mold materials and structural forms for advanced composite materials [J]. Composite Materials Science and Engineering, 2024(1): 119-128. (in Chinese)
- [12] 周利霖, 廉永正, 刘财芝, 等. 大型复合材料空间刚架缩比模型设计方法[J]. 国防科技大学学报, 2018, 40(3): 55-60.
ZHOU Lilin, LIAN Yongzheng, LIU Caizhi, et al. Design method of scale model of large composite space rigid frame [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2018, 40(3): 55-60. (in Chinese)
- [13] 杨曦凝, 路明坤, 陈浩然, 等. 复合材料工装变形补偿方法研究[J]. 纤维复合材料, 2014, 31(2): 29-32.
YANG Xining, LU Mingkun, CHEN Haoran, et al. Research on deformation compensation method of composite tooling [J]. Fiber Composites, 2014, 31(2): 29-32. (in Chinese)
- [14] 罗振伟, 梅中义. 基于测量数据的飞机数字化预装配技术研究[J]. 航空制造技术, 2013(20): 99-102.
LUO Zhenwei, MEI Zhongyi. Aircraft digital pre-assembly technology based on measurement data [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2013(20): 99-102. (in Chinese)
- [15] 於永红, 刘兆朋, 尚仰宏, 等. 碳纤维复合材料U型构件角度收缩及模具补偿研究[J]. 航空制造技术, 2018(13): 96-100.
YU Yonghong, LIU Zhaopeng, SHANG Yanghong, et al. Study on angular shrinkage and die compensation of U-shaped carbon fiber composite members [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2018(13): 96-100. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)