

# 一种大尺寸复合材料筒状支架成型技术

田桂芝 徐伟丽 张玉生 徐昀鑫 王征

(北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094)

**文 摘** 主要从模具设计、铺层工艺优化、成型压力保证等方面阐述了一种大尺寸厚壁异型复合材料筒状支架的热压罐成型技术。实践表明:采用分块组合模具阴模成型,合理设计铺层时纤维的断开方式,固化时采用梯度循环加压,控制加压点温度、最大施加压力,可以有效地保证该异型厚壁支架各位置加压到位,成型产品表面光滑无褶皱,内部无超出标准的分层、疏松等缺陷,同时尺寸精度、含胶量也满足指标要求。

**关键词** 厚壁,异型,复合材料,筒状支架,成型技术

中图分类号:TB3

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2022.04.011

## Molding Technology of Large Size Composite Tubular Support

TIAN Guizhi XU Weili ZHANG Yusheng XU Yunxin WANG Zheng

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100094)

**Abstract** An autoclave molding strategy in the preparation of a large-size, thick-wall, special-shaped composite tubular support was described, in which the mold design, lay-up process and molding pressure were optimized. Based on the dimensions and quality requirements of the product, a set of split molds with designed dimensions was used. In the lay-up process, the disconnect way of the carbon fiber was designed. Last, in the curing process, a cycling gradient pressure was applied, the pressure at different temperature and the maximum pressure were controlled. The results show that these methods effectively guaranteed the molding pressure of the support. The surface of the prepared support is smooth, and there are no defects such as delamination, porosity and so on. In addition, the dimensional accuracy, content of resin meet the user's requirements.

**Key words** Thick wall, Special-shape, Composite, Tubular support, Molding technology

### 0 引言

高模量碳纤维增强树脂基复合材料由于其质轻、高比刚度等优异的力学性能,在各类航天器结构系统得到广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。碳纤维复合材料支架类产品也越来越多地替代金属材质支架,可以很大程度上提高结构效率。随着航天器功能需求的不断发展,支架的尺寸不断变大,结构型面也日益复杂,对成型技术及其可靠性提出了更高要求。目前国内外对于碳纤维复合材料支架类产品的成型工艺多有报道,但对于大尺寸复合材料筒状支架成型技术鲜有研究。马亚磊<sup>[4]</sup>等采取手工糊制、真空袋-热压罐法制备了一种单侧带法兰的小型支架结构,产品满足设计指标。杨坚等<sup>[5]</sup>采用RTM成型技术,实现了一种航空发动机用复合材料支架的制造,产品力学性能优异。蒋贵刚等<sup>[6]</sup>采用刚性阳模与膨胀橡胶阴模组合式的模具方案,通过真空袋-热压罐的成型方法,完成了一种多型面复合材料支架的制备,产品尺

寸、含胶量均满足设计指标的要求。

本文针对一种大尺寸复合材料筒状支架,根据其产品技术指标,从模具设计、铺层工艺设计、成型压力保证等影响产品成型质量的工艺环节进行分析,制定了成型工艺方案。综合采用分块组合金属阴模以满足产品外表面形位高精度要求,对环向铺层设置错位对接缝,用以兼顾铺层成型密实及产品力学性能。针对支架复杂“凹凸”特征,创新性采用“梯度循环加压法”,较好地平衡铺层加压排气与排气流胶之间的矛盾。通过成型实物验证了以上措施的有效性,对同类结构产品的高可靠性制备具有一定借鉴意义。

### 1 原材料

环氧树脂:648,上海树脂厂;碳纤维:M55JB,6K,日本东丽。

预浸料:自制;单层厚度0.125 mm,树脂含量35%,固化制度:165℃固化2 h。

收稿日期:2021-02-04

第一作者简介:田桂芝,1988年出生,硕士,工程师,主要从事复合材料及其成型技术研究工作。E-mail:tianguizhi0628@163.com

## 2 产品结构特点及技术指标

产品为直径约900 mm,高度约250 mm 双侧带法兰的筒状结构,等壁厚5 mm,筒体柱段从一侧圆形截面到另一侧多边形截面渐变,双侧法兰形成安装面,具有安装接口。筒体柱段与两侧法兰安装面过渡拐角处有多个“凸起”及“凹陷”特征,型面不规则。其结构示意图见图1。

支架主要技术指标为:

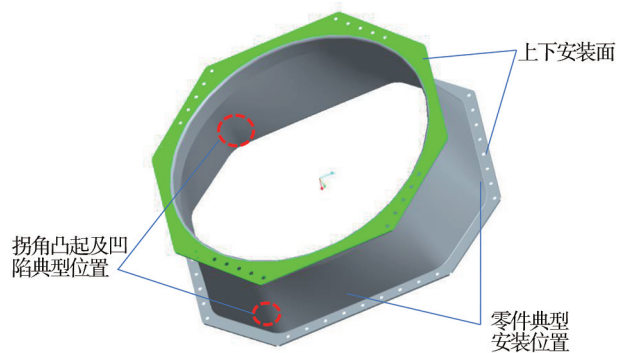


图1 筒状支架示意图

Fig. 1 Diagram of tubular support

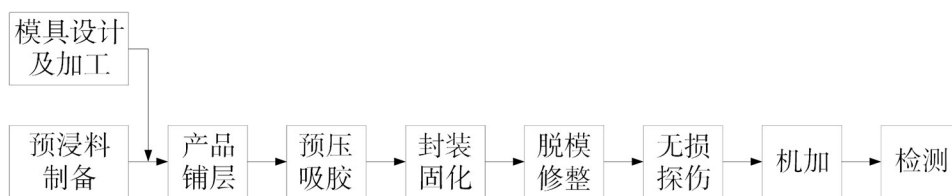


图2 筒状支架成型工艺流程

Fig. 2 Processing flow chart of tubular support

设计组合式金属阴模,模具表面喷涂脱模剂,铺层时设计合理的纤维断开方式,对接缝错位铺叠,逐层阶梯过渡,铺层过程需设置多次预压;铺层完成后在支架两侧法兰面额外铺覆工艺层。最后封真空袋抽真空,热压罐加压固化。固化脱模后,机加支架的上下法兰安装面工艺层,保证平面度与平行度指标,然后机加安装接口。

### 3.2.1 模具设计

根据支架外表面型面精度高指标要求,设计阴模,使支架外表面为贴模面。综合考虑加工、操作性、成本等因素,选用铝合金材质。

考虑到支架为两侧带法兰的筒状结构,为保证产品成型后可顺利脱模,设计可拆卸的分块组合模具:将模具分为四块,装配一体后形成产品成型面,且成型面采用组合加工方式保证尺寸精度要求。分块模具之间用定位销定位,用以保证模具复装时型面的精度。模具示意图见图3。

由于支架尺寸较大,固化温度165℃,与常温温

(1)双侧法兰为安装面,平面度要求 $\leq 0.1$  mm,平行度要求 $\leq 0.1$  mm;

(2)产品外表面为装配面,型面尺寸要求较高,要求平整光滑;

(3)产品成型质量满足 GJB2895—1997 A 级要求。

## 3 工艺设计

### 3.1 制造工艺难点

(1)支架壁厚,铺层多且构型复杂,如何保证铺层密实是难点;

(2)支架尺寸大、含双侧法兰,模具多向加压方案复杂,筒体型面整体感压到位困难,控制精度要求高;

(3)筒体柱段与两侧法兰安装面拐角处“凸起”“凹陷”特征,容易加压不到位致使层间气体无法排出,产生“憋气”,导致产品产生疏松甚至分层等缺陷。

### 3.2 工艺方案

根据支架结构特点、指标要求及工艺难点,选用阴模-真空袋-热压罐成型工艺系统技术。支架成型工艺流程见图2。

差较大,为更好地保证产品尺寸,模具设计需要考虑热膨胀补偿。按照铝合金材料热线膨胀系数 $23.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,模具的热线膨胀率计算公式如下:

$$\alpha = 23.6 \times 10^{-6} \times \Delta T$$

式中, $\alpha$ 是热线膨胀率, $\Delta T$ 是固化温度与室温之差。

铝合金模具设计时需要根据此系数将模具模型进行缩放,缩放系数为 $(1-\alpha)$ ,即0.9967,修正后的模型作为模具加工的基准模型。

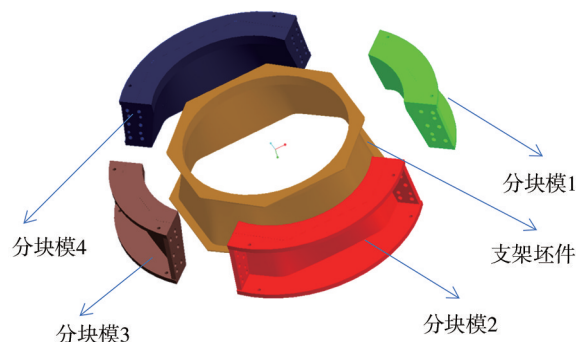


图3 产品铺层模具示意图

Fig. 3 Diagram of laminated mold

### 3.2.2 铺层工艺设计

预浸料铺层角度为 $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_s$ 。铺层时以支架柱段高度方向为纤维铺覆的 $0^\circ$ 方向,其他铺层角度以 $0^\circ$ 方向为基准。铺层时要求纤维从支架柱段到法兰保持连续,不允许断开,用以保证产品的力学性能。

另外,由于产品是筒状结构,且为阴模成型,加热时模具会发生热膨胀,使铺层有脱离模具悬空欠压的趋势,同时固化加压时产品 $90^\circ$ 方向(即支架柱段周向)的连续纤维铺层受拉而强力抵抗外压,容易导致铺层与模具无法压紧的情况。因此,综合权衡铺层对设计性能和工艺方法的影响,将 $90^\circ$ 周向铺层一分为二,同一 $90^\circ$ 层对接且各 $90^\circ$ 层对接缝错开,纤维对接而不搭接,层间断点错开且每层断点呈阶梯状排列,避免应力集中。

产品上下表面平面度要求较高,且产品厚度及尺寸较大,仅仅依靠模具及成型外压无法直接满足平面度等指标要求,因此铺层时在上下法兰表面铺覆工艺层,固化后通过机加方式,保证平面度、平行度要求,同时保证产品的力学性能。

由于产品厚度大,铺覆层数较多,为保证纤维层间紧实,铺层时每10层进行一次预压。

### 3.2.3 成型压力制度设计

复合材料产品固化时的压力大小、加压方式、加压温度以及加压时机等压力制度,对产品的固化质量有决定性影响。

产品铺层完成后进行封装、抽真空加压,然后进热压罐升温固化。由于产品是阴模成型,加热时模具会发生热膨胀,在产品达到固化温度前,模具已经发生一定的膨胀。同时产品壁厚大,相比小厚度的铺层,纤维自身伸展能力较差,成型过程中仅仅依靠真空袋的压力无法使产品与模具很好地贴合,必须增加合适的外压。

同时由于产品形状不规则,筒体与两侧法兰连接处的拐角存在很多“凹凸”,固化过程中排气困难,局部容易“憋气”,而且不规则的产品型面对应模具设计时难以设置透气通道,加剧了缺陷风险。为解决这一难题,采用了梯度循环加压法,即在模具温度达到 $80^\circ\text{C}$ 、树脂可流动状态时,对产品施加由小到大、由大到小的循环外压,最大压力 $0.3\text{MPa}$ ,循环两次,这样可以使产品局部铺层裹挟气体更容易随着树脂的流动而排出,从而避免持续高压使产品拐角“凹凸”处产生“憋气”而导致局部表面纤维未压实、贫胶、分层等缺陷,同时也有助于产品整体与模具贴合紧密,有效地保证产品成型质量。

$80^\circ\text{C}$ 梯度循环加压结束后,模具继续升温,外压也相应增大,待模具温度达到树脂的凝胶温度 $125^\circ\text{C}$ 时,产品需加压到最大压力 $0.7\text{MPa}$ ,保温 $30\text{min}$ ,使产品铺层充分密实。

最后,保持最大压力 $0.7\text{MPa}$ 不变,模具温度升温到 $165^\circ\text{C}$ 后,保温 $2\text{h}$ 固化,产品固化完全。产品固化时的温度-压力曲线示意具体见图4。

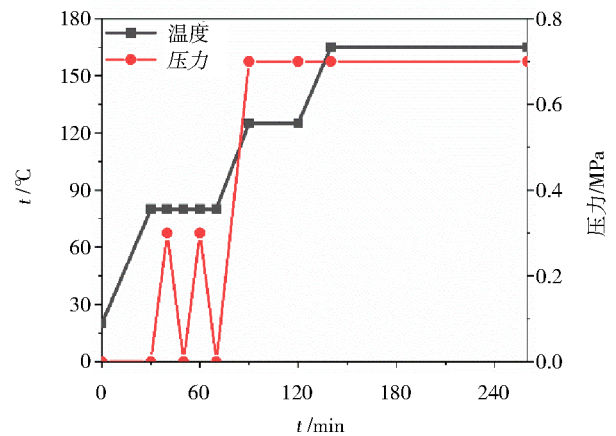


图4 温度-加压曲线

Fig. 4 Diagram of temperature-pressure curve.

### 3.2.4 产品脱模工艺

由于产品为阴模成型,为避免降温时模具收缩,挤压并损伤产品,对产品采用了热脱模工艺,即在 $100^\circ\text{C}$ 热脱模。

## 4 产品性能

### 4.1 产品成型质量

最终成型的复合材料筒状支架表面光滑、平整、无褶皱,产品拐角处的凹凸特征清晰、尺寸准确,未出现分层等缺陷。经超声无损探伤,产品内部质量良好,符合GJB2895—1997A质量要求。经采用重量法计算,产品的含胶量满足 $(31\%\pm 2\%)$ 要求。产品外观见图5、图6。



图5 支架产品实物图

Fig. 5 Photograph of the prepared tubular support

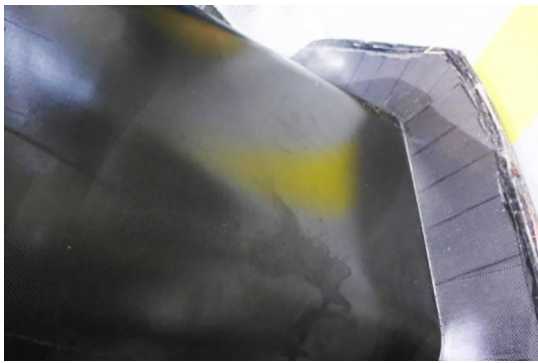


图6 支架产品实物外观图

Fig. 6 Top view of the prepared tubular support

#### 4.2 产品成型精度

经检测,成型后的产品各项尺寸精度都满足设计要求。产品厚度偏差不超过理论厚度的 $\pm 5\%$ 。产品上下面的平面度实测结果分别为0.08、0.06 mm,上下表面平行度实测结果为0.08 mm,满足设计指标中上下面的平行度 $\leq 0.1$  mm的要求。产品各零件试装后与产品型面贴合良好,满足设计要求。表明该产品的工艺方案适用于该支架的成型,进一步验证了该工艺方案的合理性。

以上结果表明:针对该支架产品采用的模具方案、铺层工艺方案、压力-温度制度等系统技术较为科学、合理,特别是压力-温度制度中梯度循环加压方法,较好地平衡了加压排气与排气流胶之间的矛盾,使得产品成型质量、固化含胶量均满足了产品设计指标。

#### 5 结论

针对航天器用高模量碳纤维复合材料带双侧法兰、复杂筒形支架产品,开展了成型工艺技术研究,针对性制定了合理的模具方案、铺层工艺方案、压力-温度制度等系统工艺,完成了实物研制,很好地保证了产品成型表现及内部质量、尺寸精度等性能指标。主要技术点体现在以下几个方面:

(1)采用分块组合模具阴模成型,通过热膨胀率计算对模具进行尺寸补偿设计,可以有效地保证热固化后产品尺寸及外观质量。

(2)筒形支架 $90^\circ$ 周向铺层分段、铺层对接缝错位铺叠,阶梯布置,可以有效解决 $90^\circ$ 纤维铺层伸展

受束缚、无法匹配成型过程受热膨胀的金属阴模,从而导致产品成型缺陷的问题。

(3)通过“梯度循环加压法”可以有效解决产品“凹凸”复杂特征在固化过程中容易“憋气”的问题,较好地平衡了加压排气与排气流胶之间的矛盾,使得产品成型质量、固化含胶量等得到有效保证。

#### 参考文献

- [1] 徐伟丽,张玉生,张璇,等. 大尺寸多格栅复合材料框架共固化成型工艺[J]. 宇航材料工艺,2014,44(6):46-48.
- XU Weili, ZHANG Yusheng, ZHANG Xuan, et al. Co-curing molding technique of large size multi lattice structured composite framework [J]. Aerospace Materials & Technology, 2014,44(6):46-48.
- [2] 张璇,王洋,徐鹤,等. 一种碳纤维复合材料弯曲杆件成型工艺方法[J]. 军民两用技术与产品,2018(22):137-138.
- ZHANG Xuan, WANG Yang, XU He, et al. Technology of curved carbon fiber composite tubes [J]. Dual Use Technologies & Products, 2018(22):137-138.
- [3] 王凯,熊晨曦,贺强. 超轻复合材料机翼结构设计及成型技术研究[J]. 复合材料科学与工程,2020(4):72-78.
- WANG Kai, XIONG Chenxi, HE Qiang. Research on the technology of structure design and forming of ultra-light composite wing [J]. Composites Science and Engineering, 2020(4):72-78.
- [4] 马亚磊,黄云. 某型号复合材料异形结构件的成型工艺研究[C]//航天先进制造技术国际研讨会. 深圳:中国机械工程学会,2017:460-464.
- MA Yalei, HUANG Yun. study on moulding technics of a special-shaped structure of composite material [C]// International Symposium on the Advanced Manufacturing Technology for Aerospace Industry. Shenzhen: Chinese Mechanical Engineering Society, 2017:460-464.
- [5] 杨坚,贺晔红,李嘉禄. 航空发动机用复合材料支架成型工艺探索[J]. 航空精密制造技术,2011,47(4):36-38.
- YANG Jian, HE Yehong, LI Jialu. Research on the forming process of composite support for aeroengine [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2011,47(4):36-38.
- [6] 蒋贵刚,周占伟,郭晓勇,等. 多型面复合材料支架成型技术[J]. 宇航材料工艺,2020,50(4):55-58.
- JIANG Guigang, ZHOU Zhanwei, GUO Xiaoyong, et al. Molding technology of polyhedral composite support [J]. Aerospace Materials & Technology, 2020,50(4):55-58.