

引文格式:刘钧天, 闫超, 邱春亮, 等. 复合材料双曲帽型长桁热模压方案设计与验证[J]. 航空制造技术, 2026, 69(8): 25020171.

LIU Juntian, YAN Chao, QIU Chunliang, et al. Design and verification of the hot-press scheme for composite double-curved omega stringer[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(8): 25020171.

## 复合材料双曲帽型长桁热模压方案设计与验证

刘钧天<sup>1</sup>, 闫超<sup>1</sup>, 邱春亮<sup>1</sup>, 陈萍<sup>1</sup>, 卢鑫<sup>2</sup>

(1. 中国商飞上海飞机制造有限公司, 上海 201324;

2. 常州新创航空科技有限公司, 常州 213127)

[摘要] 针对大尺寸双曲帽型长桁结构特点及工艺难点, 进行热模压预成型方案设计与验证。完成了热模压预成型工装的设计, 通过工装内置水路加热冷却的方案, 保证大拱高长桁预成型的温度均匀性, 通过仿真和试验结果显示, 工装表面温差可保持在  $\pm 5^\circ\text{C}$  范围内。对料片展开方式进行设计, 采用边界外插补偿法实现双曲构型展开, 得到可用于预成型的预浸料平面料片。同时对不同预成型姿态进行仿真分析, 得出以接近料片中间位置进行定位放置更易得到较好的预成型体质量。结合工装方案及料片方案, 确定关键预成型工艺参数, 进行预成型体制造验证, 结果显示预成型后的双曲帽型长桁表面质量良好, 无褶皱缺陷, 各位置厚度偏差均在  $\pm 15\%$  范围内, 纤维角度偏差可控制在  $\pm 2.5^\circ$  范围内, 满足工程要求, 验证了工装设计方案、料片设计方案和工艺参数的有效性。

关键词: 复合材料; 帽型长桁; 双曲长桁; 热模压; 预成型工装; 方案设计

中图分类号: V261; TB332 文献标志码: A DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25020171

### Design and Verification of the Hot-Press Scheme for Composite Double-Curved Omega Stringer

LIU Juntian<sup>1</sup>, YAN Chao<sup>1</sup>, QIU Chunliang<sup>1</sup>, CHEN Ping<sup>1</sup>, LU Xin<sup>2</sup>

(1. COMAC Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China;

2. Changzhou Newtry Aviation Technology Co., Ltd., Changzhou 213127, China)

[ABSTRACT] In response to the structural features and manufacturing challenges associated with large-size double-curved omega stringer, a hot-press preforming process was designed and validated. The preforming tooling was developed with an integrated internal heating and cooling circuit to ensure thermal uniformity during the shaping of high-crown stringer sections. Thermal simulations and experiments confirmed that temperature distribution across the tooling surface remained within a  $\pm 5^\circ\text{C}$  range. A ply-unfolding methodology was established using a boundary extrapolation compensation approach to generate flat prepreg patterns from the double-curved geometry, yielding planar plies suitable for preforming. Simulation-based analysis of various preforming orientations indicated that positioning the ply near its mid-region resulted in favorable preform quality with reduced defect susceptibility. By integrating the tooling configuration and ply-layout strategy, critical preforming parameters were determined and validated through manufacturing trials. The produced preforms exhibited wrinkle-free surfaces, thickness deviations within  $\pm 15\%$ , and fiber orientation deviations within  $\pm 2.5^\circ$ , meeting established engineering specifications. These results verify the efficacy of the tooling design, ply development method, and process parameters.

Keywords: Composites; Omega stringer; Double-curved stringer; Hot-press; Preforming tooling; Process design

收稿日期: 2025-06-04; 退修日期: 2025-09-25; 录用日期: 2025-09-30

通信作者: 刘钧天, 高级工程师, 研究方向为复合材料制造工艺。

碳纤维复合材料具有轻质、高强度、高模量、抗疲劳、耐腐蚀、可设计性好等特点,是理想的航空结构材料,目前复合材料已成为新一代飞行器机体的主体结构材料<sup>[1-2]</sup>。复合材料帽型长桁作为机身主要的支撑结构,具有数量多、结构较为复杂等特点<sup>[3]</sup>。

前期,帽型长桁制造采用手工铺贴成型,其效率低下、纤维角度控制困难、制件质量均一性差,故在后续的批量生产中,需采用自动化制造满足其批量化、规模化的应用需求。热模压预成型是将铺放好的预浸料料片放置于专用热模压成型装置内,经预成型工装加热、加压、保型、冷却,使料片变形为帽型结构预成型体的自动化预成型方法<sup>[4-7]</sup>。采用热模压预成型工艺制造的帽型长桁的预成型体,预浸料压实充分、质量均一性好、制造效率高<sup>[8-9]</sup>。该技术已应用于波音 B787 前机身、中机身及空客 A350 后机身前段等多个机型的机身部段制造中<sup>[10-11]</sup>。

目前,国内针对热模压预成型技术已经开展了一些相关研究。胡江波等<sup>[12]</sup>研究了热模压预成型工艺对复合材料层板力学性能的影响。李哲夫等<sup>[13-14]</sup>研究了热模压预成型工艺参数对复合材料帽型长桁质量的影响,同时研究了预浸料在热模压预成型过程中的黏弹性变形过程。薛向晨等<sup>[15]</sup>进行了帽型长桁热模压预成型制造方案的研究,并采用该工艺制造出了大尺寸等直结构的帽型长桁零件。

但目前该工艺在国内刚刚起步,缺少针对双曲结构帽型长桁热模压预成型的相关研究。机身结构中有大量的双曲帽型长桁零件,对于双曲帽型长桁结构,预成型温度均匀性控制更为困难,对工装设计提出了更高要求。料片方案的设计也至关重要,需要有效控制预成型后的纤维角度,并保证良好的预成型体质量<sup>[16-17]</sup>。

本文以一种典型的大尺寸双曲帽型长桁为研究对象,针对零件构型特点及工艺难点,开展适用于双曲长桁构型的预成型工装方案研究,设计双曲料片展开方案并结合仿真分析确定料片摆放姿态,最终通过热模压预成型工艺制造出满足工程要求的双曲帽型长桁预成型体,全面验证方案的可行性,并为实际工程应用提供参考。

## 1 试验准备

### 1.1 零件构型

复合材料机身典型双曲帽型长桁结构如图 1 所示,零件由帽顶、帽腰、两侧缘条及上下  $R$  角构成。长桁长度为 7473 mm,宽度为 202 mm,拱高为 278 mm;长桁具有明显的双曲特征,扭转角度约  $11.5^\circ$ ,偏转距离约 190 mm;长桁为等截面结构,如图 2 所示,截面特征参数如表 1 所示;零件铺层设计为  $[45/0/0/-45/\overline{90}]_s$ 。

### 1.2 材料与设备

热模压预成型所使用的碳纤维单向带预浸料为 Hexcel 公司的 150 mm 幅宽的 T800 级碳纤维/环氧树脂自动铺带预浸料。由自动铺带机完成预浸料料片铺放后,转移至热模压预成型设备上,进行帽型长桁预成型体制造过程。

预成型设备采用常州新创航空科技有限公司研制的热模压预成型设备样机,如图 3 所示。设备成型速率为  $0.5\sim 50\text{ mm/min}$ ,精度为  $\pm 0.05\text{ mm/min}$ ;升降温速率可调范围为  $1\sim 5\text{ }^\circ\text{C/min}$ ,精度为  $\pm 0.2\text{ }^\circ\text{C/min}$ ;最高加热温度为  $90\text{ }^\circ\text{C}$ ,具有数据存储可记录、统计功能,且生产控制台能够实时监控加热温度、成型速率、各部件执行状态、程序执行状态等。

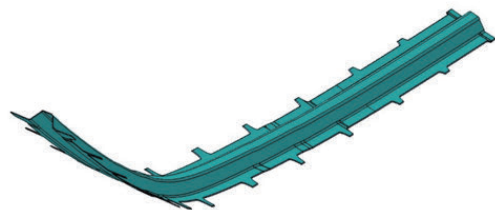


图 1 双曲帽型长桁结构示意图

Fig.1 Drawing of double-curved omega stringer

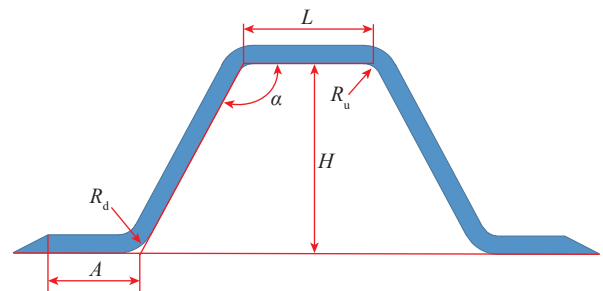


图 2 帽型长桁截面示意图

Fig.2 Drawing of cross-sectional view of the omega stringer

表 1 截面特征参数

Table 1 Characteristic parameters of cross-sectional

参数	$A/\text{mm}$	$L/\text{mm}$	$H/\text{mm}$	$R_u/\text{mm}$	$R_d/\text{mm}$	$\alpha/(\text{ }^\circ)$
数值	24	25	30	5	7	120



图 3 热模压预成型设备

Fig.3 Hot-press preforming equipment

## 2 预成型工装方案设计

预成型工装是热模压预成型工艺中最关键的影响因素之一,热模压预成型需依靠工装尺寸和型面的变化,匹配帽型长桁结构,实现帽型长桁自动化预成型。

预成型工装沿长度方向采用分段设计,每段工装分为6个主要模块:右上模、中上模、左上模、右下模、中下模及左下模。工装型面与零件型面适配。根据零件的结构特征和工艺需求,预成型工装设计方案如图4所示。

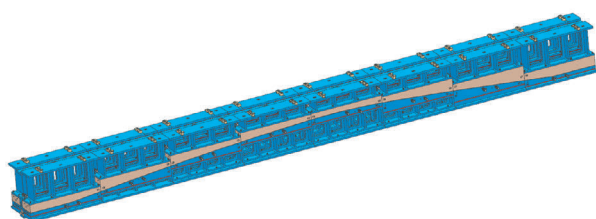
中上模成型部分模仁及安装支架均采用铝合金加工,中间使用隔热板;左上及右上模仁采用代木加工,安装支架采用铸铝;下中模模仁采用代木加工,支架采用铝合金;左下及右下模仁采用铝合金加工,两端段采用铝合金垫板,中间段采用铸铝支架,中间夹隔热板。因双曲长桁具有大拱高特征,工装上下侧支架采用开孔减重设计。所有模仁与支架均采用螺钉固定,销钉定位。

传统的热模压预成型工装,加热单元全部集成在预成型设备上,依靠设备上下的加热板加热,通过预成型工装传递至料片,对于等直结构的帽型长桁,温度均匀性易于满足。而对于该结构的帽型长桁,零件拱高

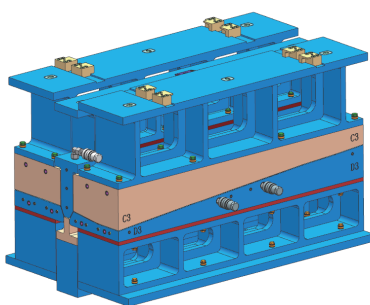
近300 mm,传统的加热方案传热效率低且无法满足预成型温度 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的均匀性要求,故创新采用了工装内置水路加热冷却方案。基于零件的构型,贴近工装的型面设计水路,实现工装型面加热及冷却,且每块工装采用单独温度控制。左下模、右下模及中上模模块中设计了工装加热冷却的流道,流道布置及水路循环方式如图5所示,流道直径为8 mm。因双曲构型曲率较大,流道加工为直线流动道时性价比较高,故下模采用两部分的联通式流道设计。

使用Ansys Fluent软件对工装进行水路加热冷却分析,对于管道内流动场景,选用Standard k- $\epsilon$ 湍流模型,入口边界条件定义为velocity inlet,出口边界条件定义为pressure outlet(高斯压力为0)。以中上模为例,计算结果如图6所示。加热工况下,入口热水流速为0.3 m/s(流量 $0.22\text{ m}^3/\text{h}$ )时,升温速率不超过 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,工装表面温差保持在 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,在加热21 min后可达到 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;冷却工况下,入口冷却水流速为0.4 m/s(流量 $0.29\text{ m}^3/\text{h}$ )时,降温速率不超过 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,工装表面温差保持在 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,在冷却12 min后可达到环境温度( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。同时也对左下模和右下模进行加热冷却分析,均可满足温度均匀性 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的要求。此外还可通过变更水量流速,控制温度变化速率。

同时,使用OptiStruct对预成型工装支架进行有限元仿真分析,工装支架为钢结构,采用各向同性线性弹性材料模型MAT1进行分析。模拟承载1MPa的力,预成



(a) 整体



(b) 局部

图4 双曲帽型长桁热模压预成型工装

Fig.4 Hot-press preforming tooling of double-curved omega stringer

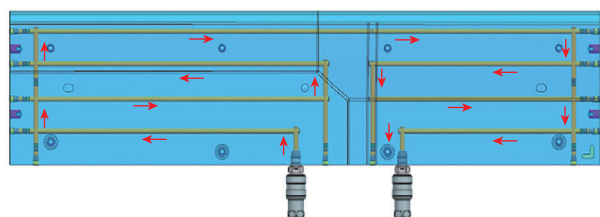
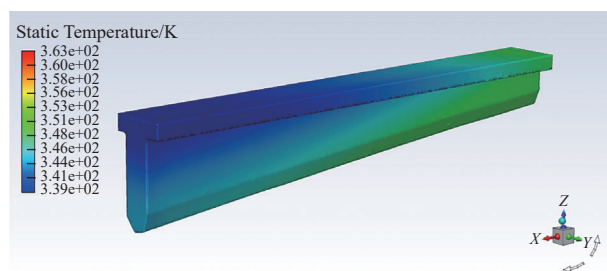
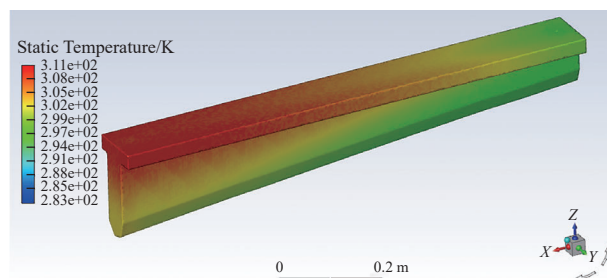


图5 水路循环示意图

Fig.5 Drawing of water circulation



(a) 加热21 min工况温度场



(b) 冷却21 min工况温度场

图6 加热冷却工况预成型工装温度场云图

Fig.6 Simulation diagram of the temperature field of the preforming tooling during heating and cooling conditions

型工况工装支架应变及应力云图如图 7 所示。计算出最大应力为 33.26 MPa, 满足使用需求。

根据设计完成的方案, 完成大尺寸双曲帽型长桁热模压预成型工装的制造, 实物如图 8 所示。同时在每段工装上选取 4 处典型位置, 采用热电偶监测预成型温度, 满足温度均匀性  $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  的要求。

### 3 料片方案设计

#### 3.1 双曲料片展开方案设计

帽型长桁因双曲结构特征, 本身无法在 CATIA 软件中直接进行展开, 如采用等直结构帽型长桁预成型所使用的矩形料片, 会导致预成型后纤维角度偏差过大, 无法满足工程要求。为保证料片展开方式与实际热模压预成型过程相吻合, 保证料片展开的合理性、预成型过程纤维角度的准确性, 对料片展开方案进行了以下设计。

以工装运动方向为基准, 将帽顶中线进行拉伸形成拉伸面, 拉伸面与长桁缘条面相交得到曲面料片中线。测量分割后得到的两侧边界线长度数值分别为  $a$  和  $b$ ,

同时测量曲面交线被中线分开的两端曲线长度分别为数值  $c$  和  $d$ , 如图 9 所示。分别计算左右侧差值, 左侧边界点向左外插延伸  $a-c$ , 右侧边界点外插延伸  $b-d$ , 即为该位置的料片边界端点。

按上述过程重复操作, 分别在帽型长桁各个耳片位置取截面, 得到数个料片曲面展开的端点。将各最外端点按零件曲率连接成顺滑曲线, 得到料片边界。最终, 将曲面料片基于实际铺放的点, 沿曲面料片中线, 展开得到可用于自动铺放的平面, 即为预成型料片的平面轮廓, 如图 10 所示。

#### 3.2 料片预成型姿态设计及质量预测

平板料片在大拱高预成型工装上进行热模压预成型过程, 主要有以下两种摆放姿态, 摆放姿态一以料片近中间位置进行定位放置; 摆放姿态二以料片一端进行定位放置, 如图 11 所示。

使用 Abaqus 软件对不同摆放姿态进行预成型仿真分析, 以确定料片预成型最佳摆放姿态。首先对双曲长桁预成型工装进行网格处理, 只提取工装与预浸料相接触的面, 并对装配孔等位置进行补齐处理, 提高计算效

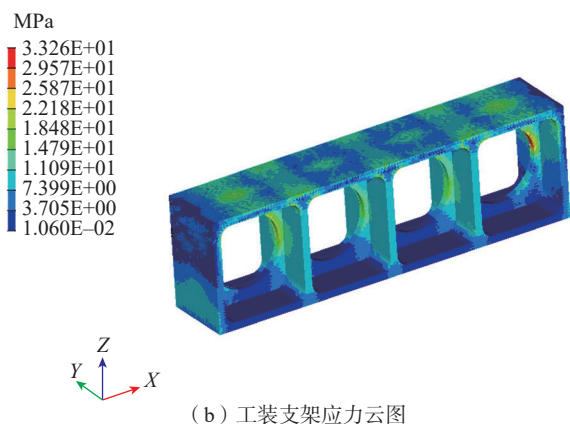
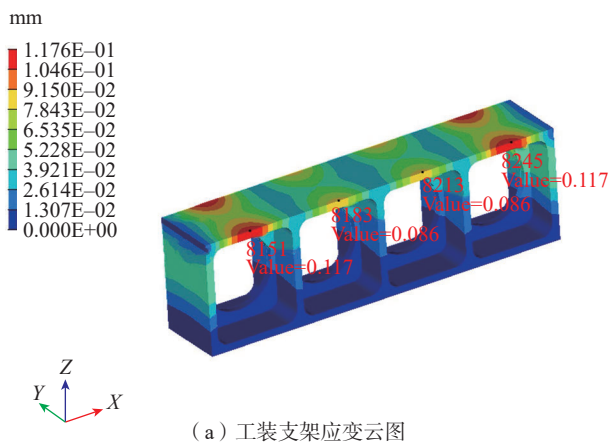


图 7 预成型工况工装支架变形云图

Fig.7 Simulation diagram of tooling holder deformation under preforming conditions

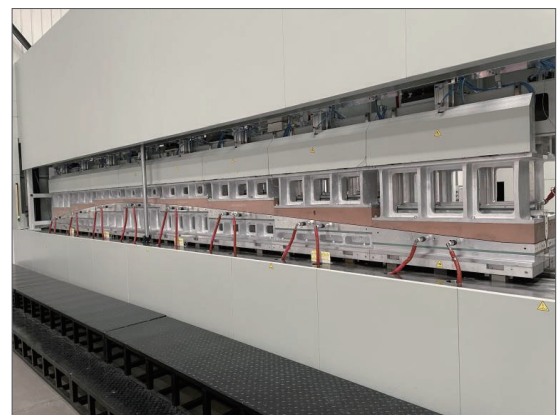


图 8 双曲帽型长桁热模压预成型工装

Fig.8 Hot-press preforming tooling of double-curved omega stringer

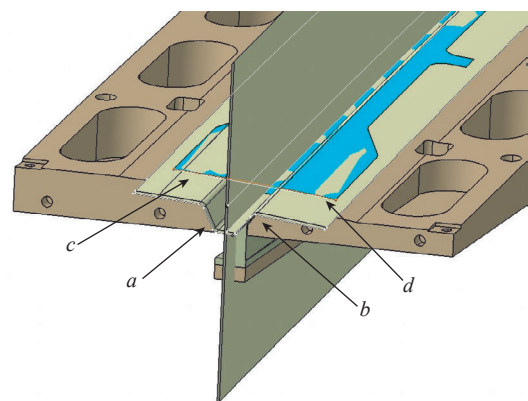


图 9 边界外插补偿

Fig.9 Boundary extrapolation compensation

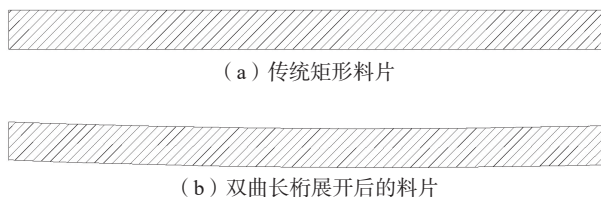


图 10 料片方案对比

Fig.10 Comparison of prepregs scheme

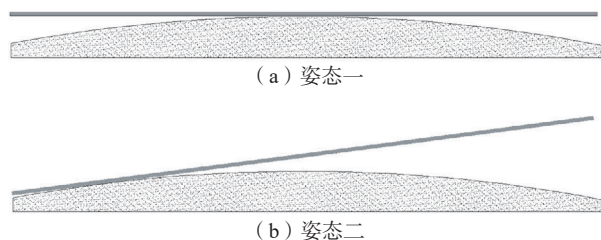


图 11 摆放姿态对比

Fig.11 Posture comparison

率。因工装刚度远大于预浸料,变形远小于预浸料,可将其定义为刚体部件,提升运算效率的同时,使分析更易收敛。

帽型长桁热模压成型体进行有限元模拟时,需要确定材料的刚度矩阵,即需要确定预浸料的弹性模量、剪切模量。预浸料的参数如表 2 所示。该参数由预浸料的力学性能测试结果得出。定义方向 1 为纤维方向;方向 2 为纤维面内法向方向,经实测,预浸料方向 2 上的模量远小于方向 1,即材料模量具有显著的各向异性。受预浸料尺寸影响,方向 2 上的材料模量难以测量。因此,在仿真模拟中,对预浸料方向 2 上的模量赋予一个极小值。

在芯模部分施加向上的压力,用来模拟实际成型过程的芯模压力,压强设置为 0.5 MPa。并在压边装置处施加压力,压强设置为 0.1 MPa。在压头位置给予向下速度同时固定工装,用以模拟实际成型过程中的压头下压过程,如图 12 所示,边界条件如表 3 所示。

Abaqus 软件使用的显式积分求解技术具有条件稳定性,适合模拟非线性动力学问题并且所需计算量较小,可以节省模拟成本。线性缩减积分单元对位移的求解结果对帽型长桁的褶皱分析表达更优秀,分析精度在网格存在扭曲变形时限制性小,在弯曲载荷下剪切自锁现象比较稳定。故预浸料料片由膜单元(M3D4)和壳单元(S4R)制作的“耦合壳”建模,网格设置为 5 mm × 5 mm,层间摩擦系数为 0.2,预浸料与工装的接触层,其层间摩擦系数设置为 0.14。

两种不同摆放姿态各角度铺层的位移云图如图 13 和 14 所示。可以看出相较于摆放姿态一,摆放姿态二

表 2 仿真参数设置

Table 2 Setting of simulation parameters

参数	密度 / (g/cm <sup>3</sup> )	E <sub>1</sub> /MPa	E <sub>2</sub> /MPa	G <sub>12</sub> /MPa	G <sub>23</sub> /MPa	G <sub>13</sub> /MPa
数值	1.58	141620	10	10	10	10

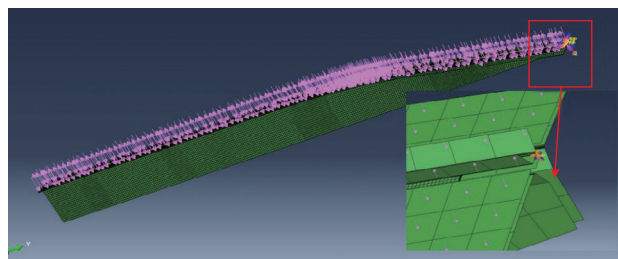


图 12 载荷设置

Fig.12 Setting of load

表 3 边界条件设置

Table 3 Setting of boundary conditions

位置	位移	转角	载荷(Y方向)/MPa
中下模	只释放 Y 方向	完全固定	-0.5
左上上模	只释放 Y 方向	完全固定	0.1
左下下模	完全固定	完全固定	—
中上模	—	—	—

褶皱缺陷更为严重。摆放姿态二在放置时,料片近平直区域更短,整个料层后部与工装相距较远,预成型过程中料片更难随形贴合工装,故在末端位置易出现明显的缺陷问题。

从仿真结果看,无论采用哪种摆放姿态,45° 铺层可能出现褶皱的情况最严重;0° 及 -45° 次之;90° 铺层最小。这是由于根据零件的铺层,45° 铺层位于最外层,层间的相对滑移的距离最长,可能出现的位移错位现象更严重,因此出现褶皱的概率最大;而 90° 铺层位于弯曲的中性层中,在弯曲方向上基本由纤维承力,抗弯能力较强,因此出现褶皱的现象概率较小。

该工艺仿真分析结论仅基于简化的模型。实际操作过程中因料片具有一定的柔性,在预成型前,料片放置时,由于重力作用,不施加外力的情况下,料片也会逐步向工装贴合,故实际的制造结果可能更为理想。以仿真结果为参考,选用摆放姿态一进行料片定位放置,相较于摆放姿态二更易获得良好的预成型体质量。

## 4 预成型体制备及验证

### 4.1 预成型体制备

对设计的双曲帽型长桁预成型工装方案及料片方

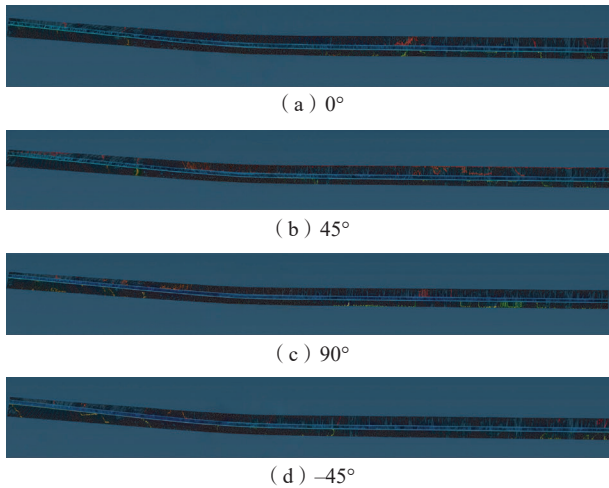


图 13 摆放姿态一不同角度铺层位移云图  
Fig.13 Simulation of layer displacement at different angles for posture 1

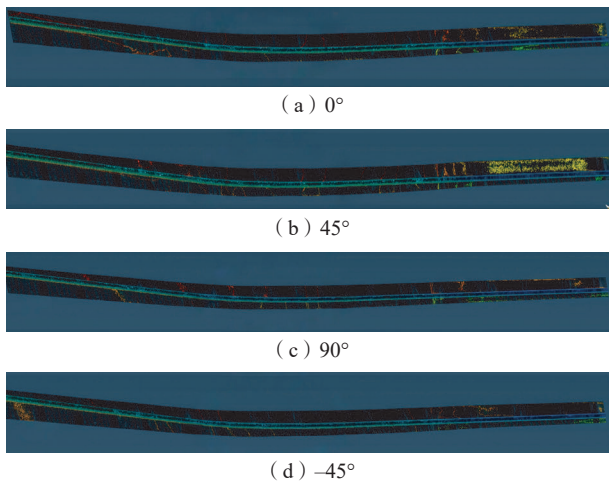


图 14 摆放姿态二不同角度铺层位移云图  
Fig.14 Simulation of layer displacement at different angles for posture 2

案,通过实际制造帽型长桁预成型体进行方案验证。

对于帽型长桁的预成型过程,由工装中上模和中下模夹持帽顶位置向下机械运动,带动预浸料产生层间滑移和受压形变实现预成型。预浸料的层间滑移作用依据为 Górczyca 等<sup>[18]</sup>提出的层间摩擦系数模型,表达式为式(1)。

$$f = c_1 \eta v + F_N c_0 \quad (1)$$

式中,  $\eta$  为树脂黏度;  $v$  为滑移速率;  $F_N$  为压力,  $c_1$  和  $c_0$  为待求系数。该模型为预成型工艺参数选择提供了基本指导方针,预成型过程中下压速度、夹持压力与预成型温度是关键的工艺参数。因双曲帽型长桁结构复杂,预成型过程中纤维需实现充分变形,下压速度越慢,层间滑移和纤维变形越为充分,但过慢的速度无法满足实

际过程中的生产效率,故选用 1.5 mm/min 的下压速度实现两者间的平衡。夹持压力过小时,料片在预成型工装上易产生滑动错位,而过大的夹持压力会将部分树脂挤压至零件  $R$  角区,故选用适中的帽顶气缸压力 3.5 bar。预成型温度基于预浸料的树脂体系选取,温度参数设定如表 4 所示。根据设定的工艺参数,完成双曲帽型长桁预成型体的制造,如图 15 所示。

#### 4.2 质量分析

对制造完成的双曲帽型长桁预成型体进行外观、厚度、纤维角度偏差分析,检验制造出的预成型的质量情况。检验结果如下:

对预成型体表面质量进行目视检查,预成型体表面光滑,各位置均无明显褶皱缺陷。如图 16 所示。同时采用游标卡尺测量预成型体边缘轮廓与工装刻线间距,误差在  $\pm 1$  mm 内,料片展开方式合理。

采用磁力测厚仪测量预成型体厚度,沿长度方向每隔 1 m 选取 1 个测量截面,各个测量截面取点位置如图 17 所示。每个测量截面均测量 9 处位置,涵盖帽型截面的帽顶、帽腰、缘条及  $R$  角。

预成型体厚度测量结果如图 18 所示。预成型体厚度偏差均在  $\pm 15\%$  范围内。帽顶、帽腰及缘条位置较理论厚度偏薄,其中帽顶偏薄最为严重,与理论厚度的偏差为  $-8.9\%$ ; 4 处  $R$  角位置较理论厚度明显偏厚,帽顶两侧  $R$  角厚度偏差最大,达到  $12.6\%$ 。

产生这种趋势的原因是由于帽型长桁预成型过程,树脂受热会产生一定的流动。帽顶位置料片由中上模和中下模夹持向下运动,两侧缘条也由上下模合模夹

表 4 预成型温度参数设置

Table 4 Setting of preforming temperature parameters

参数	设定温度 / $^{\circ}\text{C}$	升温速率 / ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )	保温时间 /min	降温速率 / ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )	冷却温度 / $^{\circ}\text{C}$
数值	75	5	5	5	25



图 15 双曲帽型长桁预成型体制造

Fig.15 Manufacturing of performs with double-curved omega stringer

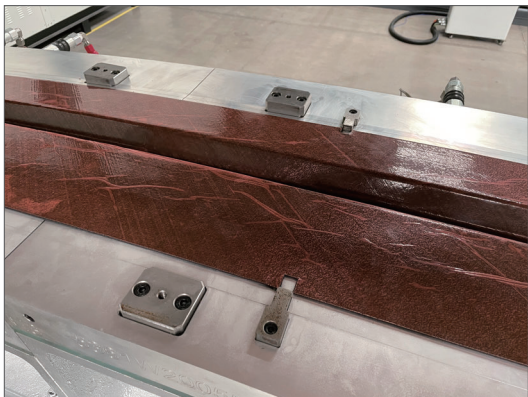


图 16 双曲帽型长桁预成型体外观

Fig.16 Appearance of preforms with double-curved omega stringer

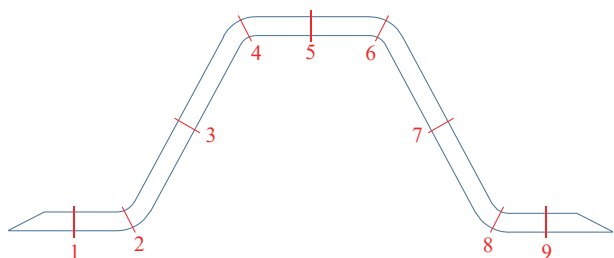


图 17 长桁截面测厚取点位置示意图

Fig.17 Drawing of thickness measurement positions for the stringer

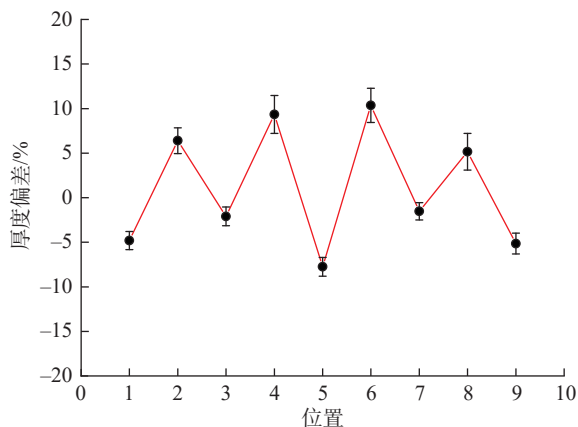


图 18 帽型长桁预成型体各位置的厚度偏差

Fig.18 Thickness deviations at each position of the omega stringer preforms

持,为确保运动中料片不产生滑移错动,需设置一定的夹持压力。该位置的树脂受压会挤向  $R$  角位置。同时在最终合模后,还需进行保温过程,帽顶、帽腰及缘条位置均直接由预成型工装设置的间隙控制,但  $R$  角位置是由料片滑移拉挤成型,厚度并不由工装间隙直接决定,故在  $R$  角位置,更易产生偏厚现象。帽型长桁预成型中间过程示意图如图 19 所示。后续可进一步优化夹持压力、工装间隙等参数,提升预成型体的厚度均匀性。

预成型体的纤维角度偏差也是考量预成型体质量

符合性的重要指标,但相较于表面质量、预成型体厚度,内部铺层的纤维角度偏差较难直接进行测量。

故单独设计了用以验证纤维角度偏差指标的预成型试验件,选取不同铺层角度,在 P04 与 P05 铺层间、P05 与 P06 铺层间以及 P08 与 P09 铺层间涂刷适当脱模剂,并按理论纤维方向绘制基准线,基准线示意图如图 20 所示(此处仅为示意图,实际为带曲率的平板料片,如图 10 所示)。在预成型后将此铺层剥离开,以基准线为参考,测量位置偏差距离并计算  $\tan$  值,最终计算得出预成型后的纤维角度偏差。

得到的预成型体纤维角度偏差计算结果如表 5 所示。从结果上分析, $0^\circ$  铺层的纤维角度偏差可控制在  $\pm 1^\circ$  内; $\pm 45^\circ$  纤维角度偏差最大,因该构型的双曲长桁在预成型过程中会经历结构扭转过程,故  $\pm 45^\circ$  纤维变形量最大,但仍可保证控制在  $\pm 2.5^\circ$  内; $90^\circ$  基本无角度偏差。从结果上看,验证了前期料片方案设计的合理性。

## 5 结论

(1)结合大尺寸双曲帽型长桁结构特点,设计了适用于该构型的热模压预成型工装并完成了工装制造。通过工装内置水路加热冷却的方案,有效解决了大拱高长桁结构温度均匀性差的问题。使用 Ansys Fluent 进行分析并经过测试验证,工装表面温差可控制在  $\pm 5^\circ\text{C}$  范围内。

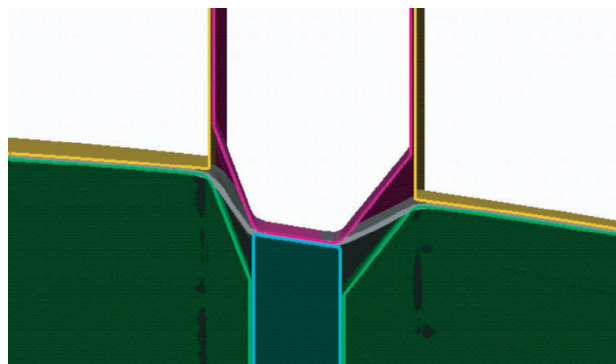


图 19 帽型长桁预成型过程示意图

Fig.19 Drawing of the preforming process of omega stringer

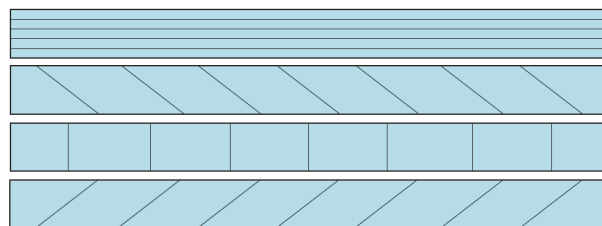


图 20 各角度铺层基准线绘制示意图

Fig.20 Drawing of the drawing of the reference lines for the layers from various angles

表5 各角度铺层纤维角度偏差测量结果  
Table 5 Measurement results of the fiber angle deviations at various angles

位置	纤维角度偏差 / (°)			
	0°	45°	90°	-45°
1	0.034	1.924	0	2.355
2	—	1.576	0	2.306
3	0.338	1.026	0	2.197
4	—	0.826	0	1.806
5	0.046	0.658	0	0.769
6	—	-0.534	0	-0.233
7	0.498	-1.746	0	-0.941

(2) 对料片展开方式进行设计,采用边界外插补偿法得到可用于自动铺放的平面料片,有效解决了双曲长桁料片展开问题。同时进行料片预成型姿态设计及质量预测,使用 Abaqus 对不同预成型姿态进行分析,得出以接近料片中间位置进行定位放置更易得到较好的预成型体质量。

(3) 结合工装方案及料片方案,实施双曲帽型长桁热模压预成型验证,采用 1.5 mm/min 下压速度、3.5 bar 帽顶夹持压力,在 75 °C 保温温度下进行完成预成型体的制造。结果显示,预成型体表面质量良好无褶皱缺陷;厚度偏差均在 ±15% 范围内,帽顶、帽腰及缘条位置偏薄,R 角位置偏厚;纤维角度偏差可控制在 ±2.5° 内。满足工程要求。通过实际制造,验证了工装设计方案、料片设计方案及关键工艺参数的有效性。

### 参考文献

[1] 马立敏,张嘉振,岳广全,等. 复合材料在新一代大型民用飞机中的应用[J]. 复合材料学报,2015,32(2): 317-322.  
 MA Limin, ZHANG Jiazhen, YUE Guangquan, et al. Application of composites in new generation of large civil aircraft[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 317-322.  
 [2] 徐林,刘传军,赵崇书. 复合材料在民用飞机应用与发展趋势[J]. 复合材料科学与工程,2024(9): 98-104.  
 XU Lin, LIU Chuanjun, ZHAO Chongshu. Application and development trends of composite materials in civil aircraft[J]. Composites Science and Engineering, 2024(9): 98-104.  
 [3] 赵海涛,王勇,陈吉安,等. 复合材料结构设计[M]. 北京: 中国铁道出版社有限公司,2021.  
 ZHAO Haitao, WANG Yong, CHEN Jian, et al. Design of composite material structure[M]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd., 2021.  
 [4] 李真,程立平. 复合材料机身帽型长桁加筋壁板压缩屈曲及失效特性研究[J]. 航空工程进展,2021,12(4): 123-130.

LI Zhen, CHENG Liping. Research on compression buckling and failure characteristics of composite fuselage cap-stringer stiffened panel[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(4): 123-130.  
 [5] CAMPBELL F C. Manufacturing Processes for Advanced Composites[M]. Oxford: Elsevier Advanced Technology, 2004.  
 [6] 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.  
 [7] 聂伟成,王德盼,胡静,等. 双曲率复合材料帽型加筋壁板自动化制造技术研究[J]. 纤维复合材料,2023,40(3): 82-86.  
 NIE Weicheng, WANG Depan, HU Jing, et al. Research on automatic manufacturing technology of double curvature composite cap stiffened panel[J]. Fiber Composites, 2023, 40(3): 82-86.  
 [8] 刘军,韩小勇,苏佳智,等. 复材机身帽型长桁预成型体制造技术研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料,2019(9): 119-123.  
 LIU Jun, HAN Xiaoyong, SU Jia zhi, et al. Research progress of preforming omega stringer of composite fuselage[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2019(9): 119-123.  
 [9] 谈源,陈云,张红艳,等. 帽型长桁热模压预成型设备的研制及产品制备[C]// 第二十一届全国复合材料学术会议(NCCM-21)论文集. 呼和浩特,2020: 251-256.  
 TAN Yuan, CHEN Yun, ZHANG Hongyan, et al. Research and development of hat-section stringer pre-molding equipment and product preparation[C]// National Conference on Composite Materials(NCCM-21). Hohhot, 2020: 251-256.  
 [10] PARLAG C, CERESO A M, BLANCO J G, et al. Device and method of manufacturing omega stringers: US9914270B2[P]. 2018-03-13.  
 [11] WILLDEN K, HARRIS C, FLYNN B, et al. Advanced technology composite fuselage manufacturing[R]. NASA Contractor Report, 1997, 4732-4735.  
 [12] 胡江波,薛向晨,郑晓玲,等. 叠层滑移工艺对 M21C 层压板力学性能的影响[J]. 复合材料学报,2020,37(5): 1184-1190.  
 HU Jiangbo, XUE Xiangchen, ZHENG Xiaoling, et al. Influence of stack slippage process on mechanical properties of M21C laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(5): 1184-1190.  
 [13] 李哲夫,谈源,张俭,等. 热模压预成型工艺参数对复合材料帽型长桁质量的影响[J]. 复合材料学报,2021,38(10): 3270-3280.  
 LI Zhefu, TAN Yuan, ZHANG Jian, et al. Effects of hot stamp forming process parameters on quality of the hat-shaped structure preforms of composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(10): 3270-3280.  
 [14] 李哲夫,刘卫平,孙宝忠,等. 未固化预浸料在热模压预成型过程中的黏弹性行为研究[J]. 复合材料科学与工程,2023(2): 84-93.  
 LI Zhefu, LIU Weiping, SUN Baozhong, et al. Investigation of the viscoelastic behavior in the hot press-forming process of uncured prepreg laminates[J]. Composites Science and Engineering, 2023(2): 84-93.  
 [15] 薛向晨,胡江波,王犇,等. 叠层滑移工艺制造大型机身帽型长桁[J]. 航空制造技术,2020,63(4): 62-67.  
 XUE Xiangchen, HU Jiangbo, WANG Ben, et al. Laminated

slip manufacture method for large fuselage hat-section stringer[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63(4): 62–67.

[16] 陈萍, 赵月青, 陈菲, 等. 单向碳纤维 / 环氧树脂预浸料叠层的面内变形行为[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(5): 1049–1055.

CHEN Ping, ZHAO Yueqing, CHEN Fei, et al. In-plane deformation behavior of unidirectional carbon fiber/epoxy prepreg layups[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(5): 1049–1055.

[17] 马开维, 李博, 朱佳强, 等. 工艺参数对复合材料长桁预制体变形成型制件质量的影响[J]. *北京化工大学学报 (自然科学版)*, 2019, 46(6): 36–44.

MA Kaiwei, LI Bo, ZHU Jiaqiang, et al. Effects of deformation forming process parameters on quality of the composites stringers forming parts[J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 46(6): 36–44.

[18] GORCZYCA-COLE J L, SHERWOOD J A, CHEN J L. A friction model for thermostamping commingled glass-polypropylene woven fabrics[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, 38(2): 393–406.

(责编 晓月)