

引文格式: 闫恩玮, 刘琦, 薛红前, 等. 复合材料Z型加筋壁板制造技术研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(16): 85-91, 97.

YAN Enwei, LIU Qi, XUE Hongqian, et al. Research on manufacturing process of Z-type stiffened panel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(16): 85-91, 97.

复合材料Z型加筋壁板制造技术研究*

闫恩玮^{1,2}, 刘琦^{1,2}, 薛红前¹, 李玉军¹

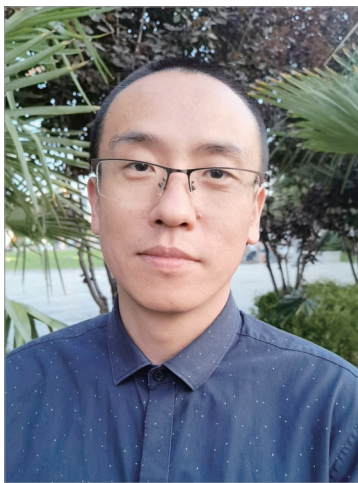
(1. 西北工业大学, 西安 710072;

2. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089)

[摘要] 在总结复合材料T型加筋壁板制造经验的基础上, 针对Z型长桁壁板这一特殊零件的制造工艺, 重点研究了Z型长桁的树脂流动和厚度控制、静不稳定态的Z型长桁轴线度和姿态控制、长桁圆角处压力均匀传导, 壁板组件固化变形分析以及蒙皮自动铺带轨迹规划等问题。通过在圆角处引入未硫化橡胶垫错台式分布模式, 确保长桁圆角处压力均匀传递; 利用Z型长桁半封闭内腔金属芯模合理布局, 实现对长桁固化过程的姿态稳定调控; 利用有限元仿真模型, 结合软件二次开发功能, 完成对加筋壁板固化变形的高效分析。最终实现Z型加筋壁板整体结构成型与内、外部质量的协同控制, 为同类型产品的研制提供经验借鉴。

关键词: Z型加筋壁板; 固化变形; 修型补偿; 自动铺带; 树脂流动

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.16.085



闫恩玮

博士研究生, 研究方向为复合材料高精度成型与质量控制。

复合材料具有高比强度、高比模量、耐腐蚀、可设计性强等诸多优点, 在航空航天、航海等领域得到了广泛应用^[1]。为充分发挥复合材料

可设计性强的优势, 通常将不同结构组分通过共固化或共胶接等方法在复合材料固化过程中结为一体形成整体化结构, 从而进一步减少紧固件数量, 降低结构重量与制造成本。飞机复合材料加筋壁板就是此类整体化组件的典型代表。然而, 复合材料加筋壁板整体化成型工艺流程烦琐, 制造难度大, 不同组件之间定位关系多、型面配合复杂, 易导致复合材料组件之间压力传导不均、长桁轴线偏移、固化变形严重等问题^[2-4]。因此, 亟须针对该类型整体化结构进行工艺研发, 从而提升质量稳定性、降低制造风险。

周长庚等^[5]研究了T型长桁边缘处蒙皮纤维屈曲问题, 建立了蒙皮纤维屈曲程度与长桁缘条边缘倒角及蒙皮厚度的关联模型。彭坚等^[6]进一步将上述模型推广至J型加筋

壁板, 对不同长桁倒角条件下加筋壁板的刚性进行分析, 确定了综合性能最佳的长桁边缘倒角角度。孙勇毅等^[7]针对工型加筋壁板的固化变形问题, 分析了升/降温速率、保温时间等工艺参数对固化变形的影响。邹尧等^[8]以树脂收缩理论和细观动力学模型为基础, 对U型、V型典型结构固化变形进行模拟仿真分析, 并通过模具型面补偿提高长桁成型精度。张鹏等^[9]研究了预浸料铺放间隙产生机理及演化规律, 提出一种基于近似测地线的分层次铺放轨迹规划方法, 充分利用预浸带的合理变形实现了铺放间隙和表面平整性的协同控制。薛向晨等^[10]综合运用自动铺带、叠层滑移成型、自动铺丝等设备, 解决了帽型长桁内/外部均衡传压, 长桁准确定位、填充芯材连续自动化成型等技术难题。韩小勇等^[11]

* 基金项目: 国家自然科学基金(11902256); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2019JQ-479)。

从力学性能、生产速率、制造成本等维度,对比分析了Z型机身隔框的5种制造方案,并对各方案的优点、缺点、技术细节和应用范围做了详细说明。

大量工作推动了复合材料加筋壁板制造质量和自动化程度的稳步提升^[12-15]。然而,现有研究主要针对T型、工型等结构,较少涉及Z型加筋壁板这一特殊结构。T型、工型长桁属于静稳定结构,在曲率变化不大的蒙皮上进行组合时能够维持自身状态的稳定性。而Z型长桁属于静不稳定结构,即使在平板类蒙皮上静置,也无法维持其自身状态的稳定性,从而导致倾倒侧翻现象发生。这种结构的特殊性,对长桁定位、整体结构封装、固化变形控制以及长桁-蒙皮胶接区域的压力传导提出了严峻挑战。

因此,本研究从Z型长桁制造、长桁轴线度控制、固化压力均匀传导、壁板固化变形分析、自动铺带轨迹规划等维度入手,以内/外部质量协同控制为目标,对Z型加筋壁板整体制造技术难点进行分析,为此类静不稳定结构的整体化成型提供经验借鉴。

1 试验及方法

整体结构试验件为Z型加筋壁板,由1张蒙皮和16根Z型长桁组成,如图1所示。试验件为双曲率梯

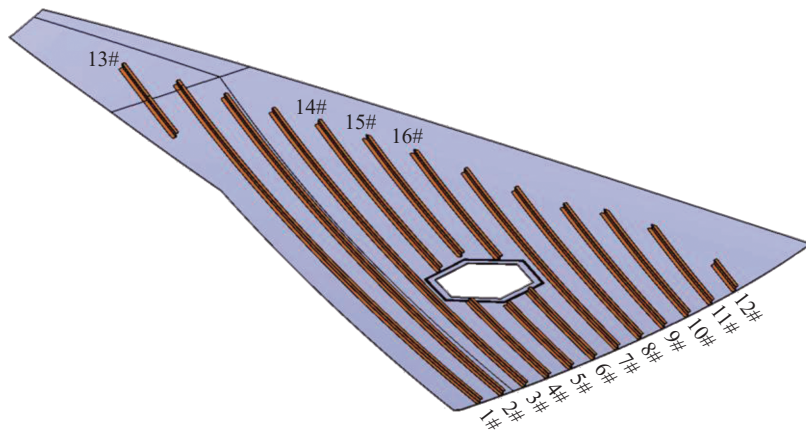


图1 Z型加筋壁板整体结构
Fig.1 Schematic diagram of Z-type stiffened panel

形结构,呈现四周高中间低分布形式,尖部区域局部无长桁。蒙皮长度约7000 mm,根部宽度约3500 mm,尖部宽度约500 mm,根部弓高约120 mm,尖部弓高约30 mm。蒙皮中间有一个六边形的开口,开口区域需铺层加强。蒙皮基准厚度约3 mm,加强区域厚度约5.2 mm。长桁截面为Z型,上窄下宽,顶部缘条宽度约20 mm,底部缘条宽度约25 mm,长桁高度约22 mm。长桁为等厚铺层,厚度约2.5 mm,如图2所示。长桁采用自动下料机下料,利用激光投影辅助手工铺贴,进而利用热压罐加温加压固化。蒙皮采用自动铺带技术实现预成型,而后整体结构采用干长桁+湿蒙皮的共胶接成型工艺,成型之后利用数控铣切外形轮廓。试验件主材料选用中航复材制备的T800级碳纤维单向带及织物,辅助材料选用Airtech公司的真空袋、隔离膜、透气织物等,其中预浸料牌号为AC531/CF8611,单向带牌号为AC531/CCF800,玻璃布牌号为AC531/EW100C,胶膜牌号为J-375。

此外,本文还采用有限元仿真的方法预测壁板的固化变形。复合材料零件在固化过程中将经历多种材料状态。应力-位移分析需要明确环氧树脂的固化力学本构模型。应用本构模型正确地描述复合材料在固化过程中力学性能变化是非常重要的。Path-dependent树脂固化

本构模型中描述树脂性能变化的方程为

$$E_m = \begin{cases} E_m^r & a < \alpha_{gel} \\ E_m^g & a \geq \alpha_{gel} \end{cases} \quad (1)$$

式中 E_m 是树脂的弹性模量; k_m 是树脂的体积模量;上标r和g代表材料处于橡胶态或者玻璃态; α_{gel} 是树脂玻璃化时的固化度,AC531树脂固化度为0.40。

根据树脂玻璃态的模量来进行树脂橡胶态模量计算的过程为

$$k_m^r \approx k_m^g / 2.5 \quad (2)$$

$$G_m^r \approx G_m^g / 100 \quad (3)$$

$$v_m^r \approx (3k_m^r - 2G_m^r) / (6k_m^r + 2G_m^r) \quad (4)$$

$$E_m^r = 2(1 + v_m^r)G_m^r \quad (5)$$

本文所用国产T800级碳纤维和AC531树脂的力学性能如表1所示。

采用模型切分和材料方向定义的方法实现零件铺层方向的定义。采用C3D4进行网格划分,确定网格数目为317800,节点数目为106828。得到的有限元模型如图3所示。

通过有限元计算得到壁板成型结束后构件内部的残余应力,然后释放模具约束,仅对壁板有限元模型的1个单元进行约束避免出现刚体位移,计算应力释放后复合材料构件的固化变形。

2 结果与讨论

2.1 Z型长桁坯料制造及厚度控制

Z型长桁的腹板面和上、下缘条面近似垂直。在常规工装方案中,需

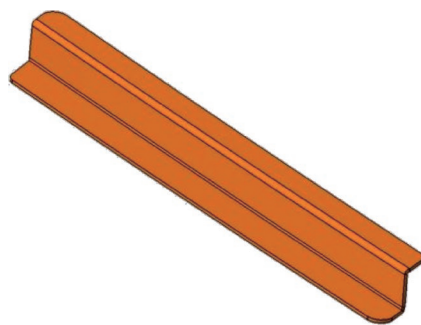


图2 Z型长桁示意图
Fig.2 Schematic diagram of Z-type stringer

将 Z 型长桁腹板面与工装水平面进行垂直设置,便于上、下缘条面的铺贴,如图 4 (a) 所示。然而固化过程中,树脂在重力作用下沿腹板面向下流淌,导致腹板厚度呈现梯度分布和侧向受力不均的状况。最终导致固化后的 Z 型长桁上缘条面外 R 角区域出现贫胶、偏薄,下缘条面内 R 角区域出现富树脂、偏厚等问题,并且腹板面易出现孔隙密集或分层缺陷。为解决此问题,本研究将 Z 型长桁的腹板面与工装水平面由近似垂直调整至约 45° 角,如图 4 (b) 所示。将常规方案中树脂在重力作用下的快速垂直流淌优化为缓慢侧向流淌,从而弱化树脂的梯度分布,并且消除了固化过程中不稳定的侧向受力,确保腹板面和上、下缘条面的受力状态接近,使得 Z 型长桁整体承力更为均衡。

Z 型长桁带有 1 个内 R 角和 1 个外 R 角,外 R 角区域受力集中容易出现铺层滑移;内 R 角区域则容易出现失压现象,诱发纤维皱褶、孔隙密集等缺陷。为解决此问题,通常采用专用工装或假件制造压力垫,从而均匀传导固化压力。但使用此方法,压力垫放置位置的准确性、压力垫软-硬的均衡性都会影响最终的传压效果。为减少成本、均衡固化压力并降低操作难度,本研究在调整长桁成型姿态的基础上,针对 R 角区域的均匀传压,提出了 3 种方案:无压力垫和两种局部简易压力垫(表 2 和图 5) 并进行了对比验证。

采用 3 种方案制造的 Z 型长桁,其内部致密,均无分层、孔隙密集等缺陷,但表面质量略有差异。(1) 方案 1 在密封胶带的边缘区域存在预浸料皱褶现象,这主要是因为是在高温环境下密封胶条逐步变硬,影响其边缘区域的匹配性,从而形成局部低压区域。与 T 型长桁直角边缘类似^[2],预浸料在固化压力作用下向密封胶条边缘滑移,进而产生皱褶。(2) 方

案 2 在 Airpad 的边缘区域存在预浸料轻微皱褶现象,这是因为 Airpad 的厚度约 2 mm,在其边缘区域形成了一个微小内 R 角,预浸料在压力

作用下产生滑移形成轻微皱褶。(3) 在方案 2 的基础上,方案 3 中两层 Airpad 采用错台式铺贴,近似形成一个倒角,弱化了底层 Airpad 边缘区

表 1 CCF800 碳纤维与 AC531 树脂的性能
Table 1 Mechanical properties of CCF800 and AC531

性能参数	AC531	CCF800
纵向弹性模量 E_{11}/GPa	4.74	294
横向弹性模量 E_{22}/GPa	4.74	14
纵向泊松比 ν_{12}	0.38	0.2
横向泊松比 ν_{23}	0.38	0.5
横向剪切模量 G_{12}/GPa	1.72	15
纵向剪切模量 G_{23}/GPa	1.72	5.5
纵向热膨胀系数 $\alpha_1/(10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	35	-0.56
横向热膨胀系数 $\alpha_2/(10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	35	10.1
化学收缩系数 $\beta_1/\%$	-0.6	—

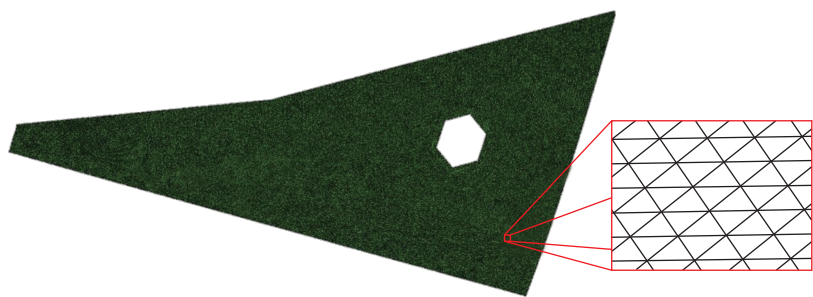


图 3 壁板的网格划分
Fig.3 Mesh model of panel

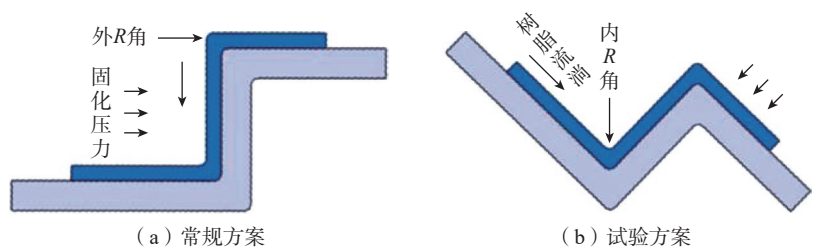


图 4 Z 型长桁成型工装方案
Fig.4 Schematic diagram of tooling scheme for Z-type stringer

表 2 压力均匀传导对比试验
Table 2 Comparison test of pressure uniform conduction

方案	内 R 角区域传压措施	无损检测	表面质量
方案 1	密封胶条	✓	有皱褶
方案 2	1 层未硫化的 Airpad	✓	轻微皱褶
方案 3	2 层未硫化的 Airpad, 错台式铺放	✓	光滑平整

域小内 R 角的影响,有效避免了预浸料的滑移现象,因此方案 3 中 Z 型长桁表面光滑平整。

图 6 为 16 根 Z 型长桁的厚度测量值,图 7 是 2#、3# 长桁分区域厚度测量值。由比对数据可知,Z 型长桁整体厚度均匀,上、下缘条面和腹板面的厚度无明显差异。长桁表面光滑平整,无明显皱褶,说明固化过程中压力传导均衡,树脂未出现明显汇聚。工装调平和方案 3 起到了良好效果,实现零件表面平整性和内部致密性的协同控制。

2.2 Z 型长桁轴线度控制

Z 型长桁特殊的静不稳定结构,导致其放置在蒙皮上时无法稳定维持自身姿态,长桁存在滑移和倾倒的双重风险(图 8),增加了轴线度的控制难度。本研究在 Z 型长桁的半封闭内腔采用殷钢材质的金属芯模实现了支撑维形和轴线度控制的双重目标。为了增加稳定性,抑制滑移趋势,金属芯模采取上窄下宽的梯形结构。

Z 型长桁与蒙皮组合的具体步骤如下:(1)使用激光投影系统,在蒙皮表面标记 Z 型长桁胶接面和金属芯模底面的外形轮廓;(2)按照激光投影线,在 Z 型长桁胶接面铺贴一层胶膜;(3)在胶膜上放置一层无孔隔离膜;(4)按照激光投影线,放置金属芯模和 Z 型长桁;(5)安装卡板,校准 Z 型长桁的位置;(6)抽真空压实;(7)拆除 Z 型长桁和金属芯模,检查胶膜配合状态。在固化过程中,采用真空袋外卡板,控制长桁轴线精度,使用真空袋外卡板固定金属芯模,Z 型长桁在真空和固化压力作用下,与金属芯模紧密贴合,实现控制长桁轴线精度的目标。同时,本研究提出了两种真空袋外卡板固定金属芯模的方案,并进行了应用验证。方案 1 是使用定位销穿透真空袋,插入金属芯模的定位底孔,固定金属芯模;方案 2 是使用压紧器,在真空袋外压紧金属芯模,限制其在固化过程中的滑移。

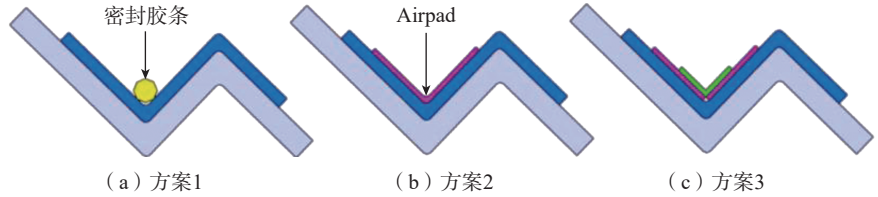
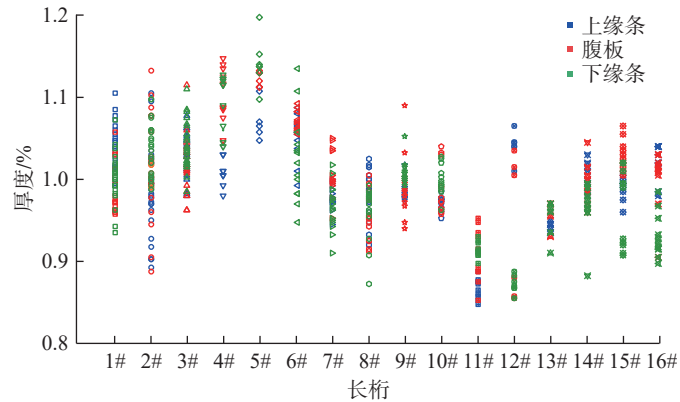


图 5 Z 型长桁传压试验示意图

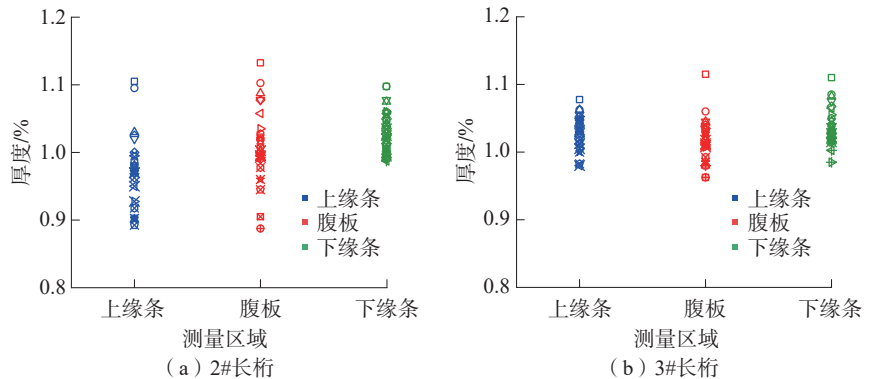
Fig.5 Schematic diagram of pressure transmission test of Z-type stringer



注:不同形状代表不同测量点。

图 6 16 根 Z 型长桁厚度数据(1#~16#)

Fig.6 Thickness measurement data of Z-type stringer (1#~16#)



注:不同形状代表不同测量点。

图 7 2# 和 3# 长桁厚度数据

Fig.7 Thickness measurement data of 2# and 3# stringers

试验表明,两种方案均能实现控制长桁轴线精度的目标,但方案 1 破坏了真空袋膜的完整性,增加了大量潜在漏气风险点,增加了真空袋的制作难度,并且一旦出现真空渗漏,需要重新封装,因此该方案的风险较高、故障排除周期较长;方案 2 对封装过程无影响,且可操作性强、风险较低。因此本试验最终采用方案 2 控制长桁轴线精度。由测量结果可知,长桁轴线精度能够基本控制在 ± 1.0 mm 范围内,如图 9 所示。

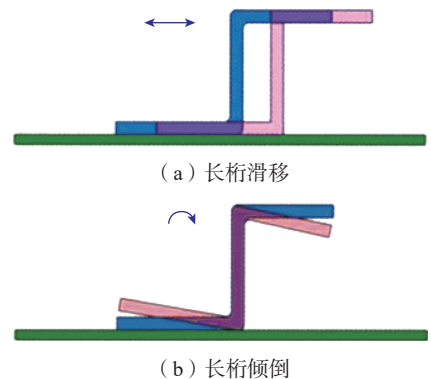


图 8 长桁滑移和倾倒示意图

Fig.8 Schematic diagram of slipping and toppling of Z-type stringer

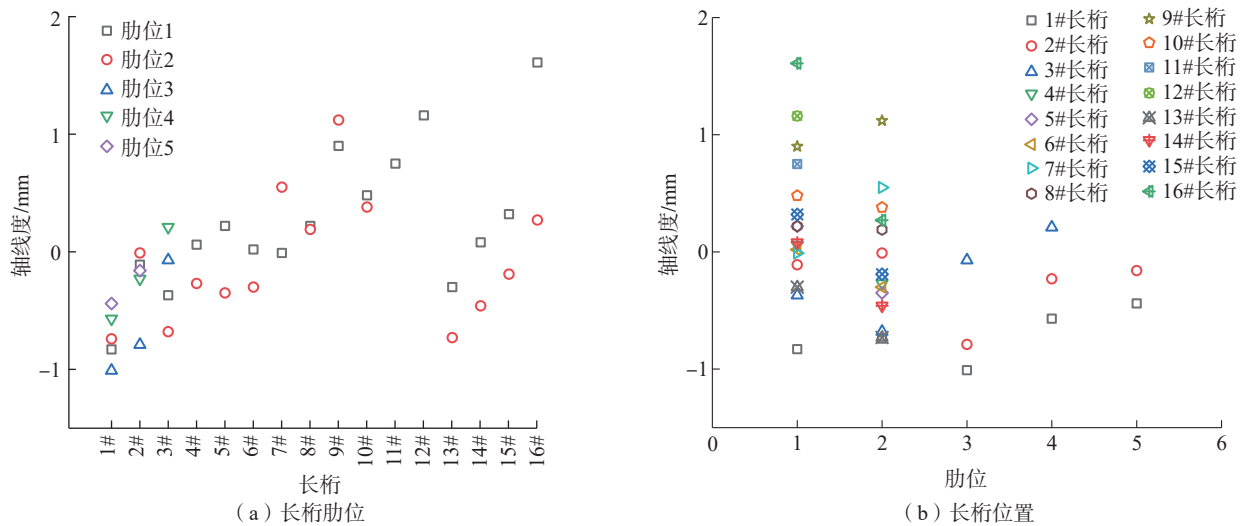


图9 Z型长桁轴线度测量值

Fig.9 Measured value of axiility of Z-type stringer

2.3 固化压力均匀性控制

试验件蒙皮为四周高,中间低的内凹式型面。长桁整体为弧形,高点落差约 110 mm。若长桁芯模采用整体式结构,其大细长比的特点将导致变形量较大、安装及拆除困难的问题。为解决上述问题,本研究采用分段式芯模结构,每段长度约 1~1.5 m。长桁与蒙皮组合时,各段通过连接键,固定连接成为整体。Z型长桁与芯模间无连接、定位关系。

在芯模的对接区域,不可避免地存在不同程度的阶差,影响此区域 Z型长桁与蒙皮的配合状态。并且,由弧形长桁两端头起向内侧延伸,金属芯模的拆除难度不断增加。为此,本研究在芯模对接部位采用小间隙配合,增加对接弹性提高其在固化过程中对蒙皮物理-化学状态变化的适应性。同时,在芯模对接部位设置撬口,组合后使用脱模布进行溢胶保护,降低脱模难度。

与 T型长桁类似,金属芯模放置在蒙皮上方,其底部型面尤其是边缘区域的结构直接影响对应区域蒙皮内部的致密性和表面的平整性^[2]。本研究在采用斜坡式金属芯模的基础上,对比验证了小 R角和无 R角两种设计方案,如图 10 所示。结果

表明,这两种方案芯模下方的蒙皮区域内部致密,均无分层或孔隙密集等缺陷,但是表面平整性存在差异。无 R角方案,芯模边缘仅有少量溢胶,且在脱模过程易于清除,蒙皮表面平整;而小 R角方案,芯模边缘存在大量弧形溢胶,阻碍了芯模的顺利拆除,蒙皮表面存在轻微皱褶。Z型长桁与蒙皮胶接面的 R角区域构成了一个较小的真空区,通常使用单向带将此区域填充,并使用玻璃纤维织物或碳纤维织物封闭。此方法能够保证该区域填充紧密,压力传导均衡。但是,对于 Z型长桁,此方法的操作难度较大。本研究未对此区域进行专门填充或封闭,而是依靠固化过程中蒙皮铺层的溢胶将此区域充满,最终使产品外观光滑、内部致密。

2.4 固化变形分析与控制

Z型长桁可以拆分为两个反向对接的 L型角材。固化后,单侧 L型角材的收口会引起 Z型长桁上、下

缘条面的反向变形。若以下缘条面为基准,固化后 Z型长桁会出现类似“后倒”的固化变形情况,如图 11 所示。本研究对 Z型长桁的固化变形进行了仿真分析,并以此为依据,对 Z型长桁成型模的上缘条面和下缘条面各设置了 1°的修型补偿,以抵消收口变形带来的不利影响。

针对复合材料加筋壁板整体构件,采用商用有限元软件 ABAQUS 进行固化变形分析。仿真模型中采用前述 Path-dependent 本构模型,从而实现复合材料在固化过程中的时变力学特性准确描述,同时兼顾模型计算效率和计算精度,进而利用 ABAQUS 软件的二次开发功能植入 UMAT 子程序。仿真计算过程中,固化制度与制造零件所用工艺曲线保持一致。计算结果如图 12 所示。可以发现整体结构成型之后发生回弹变形,且变形较大区域处于壁板尖部及边缘区域,而零件内部区域的变

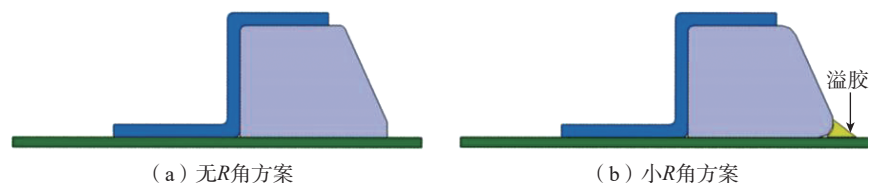


图10 芯模边缘 R角示意图

Fig.10 R-angle of the core edge for Z-type stringer

形值较小。实际整体加筋壁板铣切完成后,使用定位销固定在成型模具上,在自由状态下使用激光跟踪仪测量其内型面。由测量结果可得(表3、4),内型面实测公差为-4.5~4.5 mm。偏差较大的部位集中在壁板尖部和边缘区域,如图13所示。壁板中间

区域型面实测公差在-0.4~0.4 mm范围内。在Z型加筋壁板的边缘,每间隔250 mm均匀施加50 N的力,壁板与工装的贴合间隙约0.3 mm,且间隙均匀。试验测量结果与仿真计算结果规律吻合度较高,后续可以在仿真模型的基础上进一步进行模

具修正与工艺参数优化。

2.5 自动铺带轨迹规划

本试验铺带设备为M.Torres公司的龙门式自动铺带机,配套编程软件为基于CATIA二次开发的Tolay软件。整个编程过程包括设置参数、生成铺贴面、生成起始点、创建轨迹、检查废料及后置处理。Tolay软件中铺带轨迹规划算法共两种,分别是平行法和测地线法。蒙皮铺贴面曲率较缓,采用两种算法分别生成0、45°及90°铺层轨迹,对比分析后发现,两种算法生成的轨迹角度偏差及料带间隙均符合零件制造要求。测地线是曲面上测地曲率为零的曲线,料带沿着测地线轨迹进行铺放可不发生褶皱,具有良好的铺放工艺性。为保证蒙皮的铺放质量,最终采用测地线法进行轨迹规划。同时,为提高铺贴效率,对料带形状进行了优化:(1)使前一条料带末端形状与后一条料带始端形状保持一致,避免铺带头频繁到废料区铺贴废料;(2)修改料片形状,将非满带宽料片更改为满带宽料片,并对轨迹标记点位置进行了调整,如图14所示;(3)调整楔辊与压辊的切换时机,提前使压辊下压,提高铺层间压实程度,保证铺放质量。

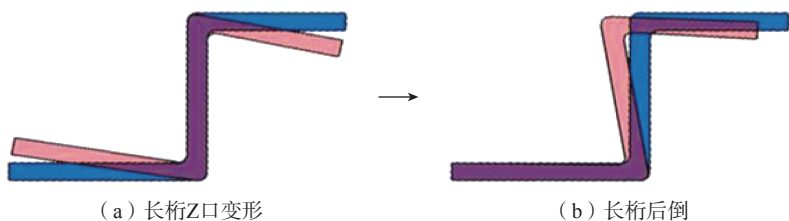


图11 Z型长桁收口变形示意图
Fig.11 Schematic diagram of spring-in deformation for Z-type stringer

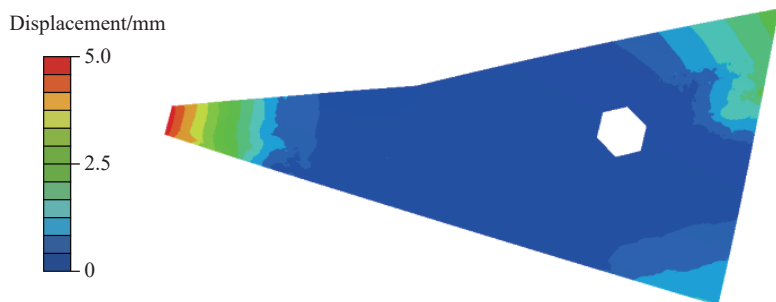


图12 Z型加筋壁板固化变形计算
Fig.12 Simulated result of curing deformation for Z-type stiffened panel

表3 偏差分布统计
Table 3 Statistics of deviation distribution

型面偏差最大值(≥Min)/mm	型面偏差最小值(<Max)/mm	点数	点数百分比/%
-25.0000	-20.9000	1	0.0004
-20.9000	-16.8000	9	0.0032
-16.8000	-12.7000	10	0.0036
-12.7000	-8.6000	10	0.0036
-8.6000	-4.5000	16	0.0058
-4.5000	-0.4000	70393	25.4055
-0.4000	0.4000	65498	23.6388
0.4000	4.5000	123252	44.4828
4.5000	8.6000	6922	2.4982
8.6000	12.7000	2084	0.7521
12.7000	16.8000	1553	0.5605
16.8000	20.9000	1452	0.5204
20.9000	25.0000	1088	0.329

3 结论

(1)将Z型长桁的腹板面与工装水平面由近似垂直调整至约为45°角,从而弱化树脂的梯度分布,使得Z型长桁整体承力更为均衡。在此基础上将两层Airpad橡胶垫采用错台式铺贴,有效避免了预浸料的滑移现象。

(2)在Z型长桁的半封闭内腔,采用殷钢材质的上窄下宽金属芯模

表4 超出临界统计
Table 4 Out-of-critical statistics

指标	超出最大正偏差	超出最小负偏差
点数	4747	43
点数百分比/%	1.7132	0.0155

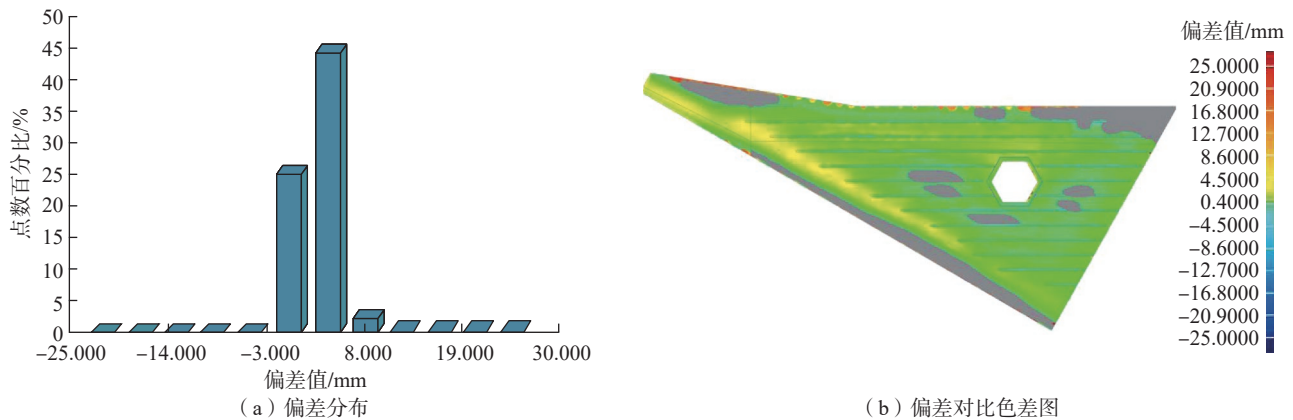


图 13 Z型加筋壁板测量结果

Fig.13 Experimental result of curing deformation for Z-type stiffened panel

实现支撑锥形和轴线度控制的双重目标。

(3) 在采用斜坡式金属芯模的基础上,采用无 R 角边缘设置,从而保证该区域填充紧密,压力传导均衡。

(4) 对Z型长桁成型模的上缘条面和下缘条面各设置了 1° 的修型补偿,以抵消收口变形带来的成型精度问题,并使用ABAQUS软件结合子程序开发功能,实现整体加筋壁板固化变形预测,试验测量结果与仿真计算结果规律吻合度较高。

参考文献

[1] 元振毅,许英杰,杨癸庚,等.基于多场耦合方法的厚截面复合材料固化过程的多目标优化[J].复合材料学报,2021,38(2):526-535.

YUAN Zhenyi, XU Yingjie, YANG Guigeng, et al. Multi-objective optimization for curing process of thick composite based on multi-physics coupling method[J]. Acta Materialia Sinica, 2021, 38(2): 526-535.

[2] PATTERSON J B, GRENESTEDT J L. Manufacturing of a composite wing with internal structure in one cure cycle[J]. Composite Structures, 2018, 206: 601-609.

[3] 熊文磊,苏佳智,刘小林,等.热压罐工艺帽型加筋壁板长桁胶接变形问题[J].航空学报,2019,40(12):423108.

XIONG Wenlei, SU Jiazhi, LIU Xiaolin, et al. Stringer deformation problems of panels stiffened with hat stringer in autoclave process[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(12): 423108.

[4] 马刚,张晓哲,唐文峰.大型复合

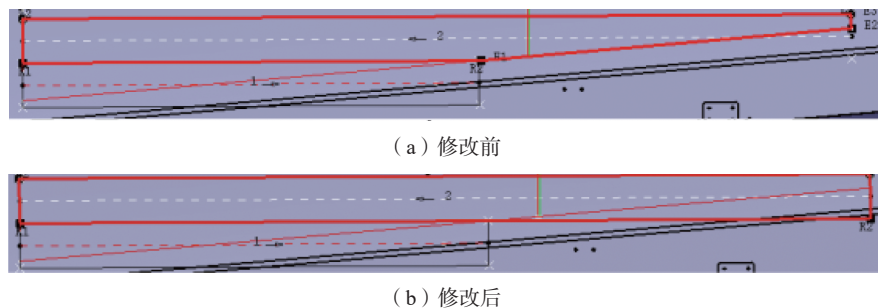


图 14 修改料片形状

Fig.14 Schematic diagram of modification sheet shape

材料加筋壁板自动化制造技术研究[J].航空制造技术,2018,61(14):91-96.

MA Gang, ZHANG Xiaozhe, TANG Wenfeng. Automated manufacturing technology of large stiffened panel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(14): 91-96.

[5] 周长庚,荀国立,邱启艳,等.T型长桁边缘倒角对蒙皮纤维屈曲的影响[J].宇航材料工艺,2021,51(2):92-96.

ZHOU Changgeng, XUN Guoli, QIU Qiyuan, et al. Effects of edge chamfer of T-type stringer on skin fiber buckling[J]. Aerospace Materials & Technology, 2021, 51(2): 92-96.

[6] 彭坚,程勇,祝君军,等.复合材料加筋壁板结构筋条倒角对蒙皮铺层褶皱及纤维屈曲的影响[J].化工新型材料,2021,49(8):169-173.

PENG Jian, CHENG Yong, ZHU Junjun, et al. Influence of the stiffener chamfering on the wrinkle of composite laminate and buckling of the fiber[J]. New Chemical Materials, 2021, 49(8): 169-173.

[7] 孙勇毅,许英杰,唐闻远,等.共固化成型复合材料加筋壁板的固化变形仿真技术研究[J].航空制造技术,2022,65(4):107-114,120.

SUN Yongyi, XU Yingjie, TANG Wenyuan, et al. Simulation of curing deformation for co-

cured stiffened composite panel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(4): 107-114, 120.

[8] 邹尧,蔡豫晋.长桁类复材零件固化变形数值模拟与验证[J].航空制造技术,2020,63(23/24):94-101.

ZOU Yao, CAI Yujin. Numerical simulation and verification of curing deformation for stringer shaped composite parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(23/24): 94-101.

[9] 张鹏,尹来容,周振华,等.基于近似测地线的分层次自动铺带轨迹规划方法[J].机械工程学报,2020,56(23):226-238.

ZHANG Peng, YIN Lairong, ZHOU Zhenhua, et al. A multi-level trajectory planning method based on quasi-geodesic for automated tape placement[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(23): 226-238.

[10] 薛向晨,王犇,胡江波,等.大型机身复合材料加筋壁板制造技术及应用[J].航空制造技术,2019,62(16):88-93.

XUE Xiangchen, WANG Ben, HU Jiangbo, et al. Manufacturing technology and application of large fuselage composite panel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(16): 88-93.

(下转第97页)

Automated Manufacturing Process Study on Composites J-Type Stiffened Panel

YAN Leige, GONG Jiaqian, ZHANG Long, CHENG Yong

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

[ABSTRACT] The most complex J-type stiffener in the composite reinforced panel is manufactured by using automated bending technology, the core material is manufactured by using automated pultrusion molding technology, and then using the co-bonding method to manufacture the composite material that meets the requirements of reinforced panel. The automated molding technology of composite stiffener and core material has been successfully applied to the manufacture of composite reinforced siding parts, which improves production efficiency and stabilizes product quality. It lays a foundation for the establishment of automated production line of composite stiffened panel.

Keywords: J-type stiffener; Composite stiffened panel; Automated manufacturing process; Automated bending stiffeners; Automated pultrusion molding of radius fillers

(责编 七七)

(上接第 91 页)

[11] 韩小勇, 苏佳智, 陈萍, 等. 复材机身隔框制造技术研究进展 [J]. 航空制造技术, 2017, 60(13): 72-76.

HAN Xiaoyong, SU Jiazhi, CHEN Ping, et al. Research progress of manufacturing composite fuselage frame[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(13): 72-76.

[12] 何凯, 龚志红, 徐恒元, 等. T700/3234 预浸料自动铺带工艺研究 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(4): 90-93.

HE Kai, GONG Zhihong, XU Hengyuan, et al. Study on the ATL technology for prepreg T700/3234[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017(4): 90-93.

[13] 刘文, 古武, 刘志杰, 等. 基于自适应配合模具的复合材料加筋壁板共胶接技术研究 [J]. 航空制造技术, 2018, 61(14): 61-66.

LIU Wen, GU Wu, LIU Zhijie, et al. Co-bonding technology of composite stiffened skin based on self-adaptive mould[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(14): 61-66.

[14] 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): 97-100.

HUANG Dangming, NIE Haiping. Application of automatic tape laying technology in the composites wing skin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(4): 97-100.

[15] 任卫安, 马军, 王钰淇, 等. 自动铺带技术在复合材料小尺寸低曲率制件批量化制造上的应用 [J]. 航空制造技术, 2020, 63(13): 83-85, 91.

REN Weian, MA Jun, WANG Yuqi, et al. Application of automatic tape laying technology in quantity production of composite part with small size and low curvature[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(13): 83-85, 91.

通讯作者: 李玉军, 助理教授, 研究方向为复合材料高性能制造技术、制造工艺力学。

Research on Manufacturing Process of Z-Type Stiffened Panel

YAN Enwei^{1,2}, LIU Qi^{1,2}, XUE Hongqian¹, LI Yujun¹

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China)

[ABSTRACT] Based on the experience of T-type composite stiffened panels, technical issues, such as the fabrication of Z-type stringers, the control of thickness and spring-back on Z-type stringers, the curing deformation predictions of the panel, the control of stringer axis and the trajectory planning of ATL, were mainly researched. By introducing the staggered distribution mode of unvulcanized rubber pad at the fillet, the uniform transmission of pressure of the stringer was ensured. The rational layout of the metal core mold in the semi closed cavity of the Z-typed stringer was used to realize the stable attitude control during curing process. Using the finite element simulation model and the secondary development function of the simulation model, the efficient analysis of the curing deformation of the stiffened panel was achieved. Finally, the overall structure molding and the collaborative control of internal and external quality for Z-type stiffened panel are realized, which provides experience for the development of similar products.

Keywords: Z-type stiffened panel; Curing deformation; Compensation of mold; Automated tape laying; Resin flow

(责编 晓月)