

U 型蜂窝夹芯前缘制造技术研究

闫恩玮, 杨绍昌

(航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司, 西安 710089)

[摘要] 为解决 U 型蜂窝夹芯前缘制造过程中常见的脱粘、铺层皱褶、蜂窝芯尺寸超差等技术质量问题, 从调整蜂窝芯展开基准面、优化蜂窝芯热定型工艺、控制铺层滑移等角度入手、完善此类零件的制造工艺流程。经过多个典型件验证, 零件表面平整, 外形尺寸符合要求, 内部无缺陷, 研究结果给相似零件的制造提供了借鉴。

关键词: U 型前缘; 蜂窝夹芯; 展开基准面

Manufacture of U Shape Honeycomb Sandwich Leading Edge

YAN Enwei, YANG Shaochang

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

[ABSTRACT] This research is aiming to resolve the technical matters such as unstick, prepreg fold and dimension deviation of honeycomb core in the U shape sandwich leading edges manufacture process. The choice of developed surface, the honeycomb core heat setting, the prevention of prepreg gliding are analyzed and the process is optimized. Several products are inspected carefully, the surface and the dimension are qualified. The result of this research is helpful to the manufacturing of similar products.

Keywords: U shape leading edge; Sandwich; Developed surface

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.17.080

复合材料具有比强度、比模量高, 耐腐蚀, 可设计性强等诸多优势, 近年来, 在航空、航天等高新技术产业得到了广泛的应用, 其用量在飞机结构总体重量的占比不断提升, 全复合材料飞机逐步涌现。复合材料的用量已逐步成为衡量飞机先进程度的重要标志之一^[1]。

随着复合材料用量的不断增加, 其应用范围也不断拓展, 由最初的内装饰零件逐步延伸至次承力件, 直至主承力件。前缘零件是飞行器中较为常见的结构形式, 主要起到整流、载力等作用, 广泛应用于机翼、尾翼和运动翼面等部位。复合材料前缘零件一般分为层压、蜂窝(泡沫)夹芯两种结构形式。由于采用了蜂窝(泡沫)芯, 产品重量得以大幅降低, 因此, 蜂窝(泡沫)夹芯前缘零件逐渐受到了设计人员的青睐。

但是, U 型蜂窝夹芯前缘(图 1)具有一定的制造难度:(1)由于其结构的特殊性, U 型前缘在制造过程中, 预浸料容易向其底部滑移, 从而引起铺层皱褶;(2)蜂窝芯原材料为片状, 具有一定的刚性, 当其弯折成 U 型时, 易出现蜂窝芯与蒙皮配合程度差的现象, 导致脱粘或分层等缺陷的产生;(3)复合材料零件不同于钣金类零件, 无法在装配过程中对零件的外形进行修配。因此,

为满足后续装配需求, 复合材料零件的精确制造势在必行。然而, 受固化反应收缩、温度梯度场等多种因素的影响, U 型零件脱模后, 会出现不同程度的“收口”变形效应, 影响其外形精度^[2-3]。

为解决上述问题, 本研究从蜂窝芯展开基准面选择, 蜂窝芯热定型工艺改进和产品外形控制等几个方面完善技术细节, 优化工艺方案, 通过增加铺层防滑移装置等措施, 提高了产品的外形精度及内部质量。

1 试验

1.1 材料与设备

试验件主材料为碳纤维织物 5228A/CF3031, 蜂窝芯为柔性蜂窝芯。

1.2 试验件结构

试验件为 U 型蜂窝夹芯结构, 长度约 1000mm, 宽度约 400mm, 深度约 300mm, 蜂窝芯高度 10mm, 层压区厚度约 2.7mm。

1.3 试验件制造方案

试验件采取数控下料, 激光投影系统辅助手工铺贴, 热压罐固化, 手工切割的制造方案, 具体流程见图 2。

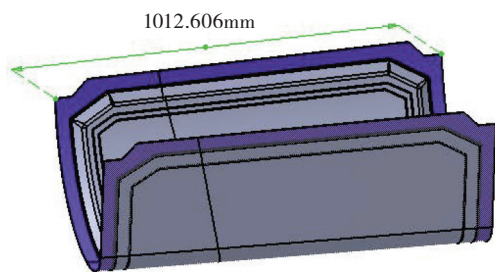


图1 试验件
Fig.1 Test part

2 试验结果与分析

2.1 蜂窝芯展开基准

蜂窝芯原材料一般为平面结构,但 U 型前缘曲率变化较大,因而,必须按数模将蜂窝芯展开至平面,再加工其外形。展开基准面的选择尤为重要,它决定了平面状蜂窝芯弯折成 U 型后,其实际外形与理论外形的符合程度,影响蜂窝芯与预浸料铺层的配合状态^[4-5]。由表 1 数据可以看出,当选择不同展开基准面时,蜂窝芯的外形尺寸会有非常明显的差异。通常在零件制造时,会按照理论外形轮廓线放置蜂窝芯。展开基准面选择过高,展开后的蜂窝芯外形将小于其理论外形,若按理论外形放置蜂窝芯,在 U 型底部会出现蜂窝芯孔格过度拉伸,蜂窝芯与预浸料间隙过大,易出现空腔或脱粘。展开基准面选择过低,展开后的蜂窝芯外形将大于其理论外形,若按理论外形放置蜂窝芯,在 U 型底部会出现蜂窝芯孔格过度压缩,蜂窝芯与预浸料间隙过小,易出现纤维屈曲(图 3)。

在选择展开基准面时,还必须考虑蜂窝芯弯折后的实际状态。弯折后,在 U 型底部,蜂窝芯自身构成一个近似圆环的结构,其内、外表面的弧长相差较大。本研究中,蜂窝芯厚度为 10mm, U 型底部 R 接近 68mm,以 1/4 个圆计算,截面处蜂窝芯外表面弧长约为 106.8mm,蜂窝芯内表面弧长约为 91.1mm,相差 15.7mm。由于这

表1 展开基准对蜂窝芯尺寸的影响

展开基准面	蜂窝芯最大宽度 /mm
下表面	901.97
沿下表面上 1/8 处	891.48
沿下表面上 1/4 处	880.86
沿下表面上 1/2 处	858.36
上表面	824.95

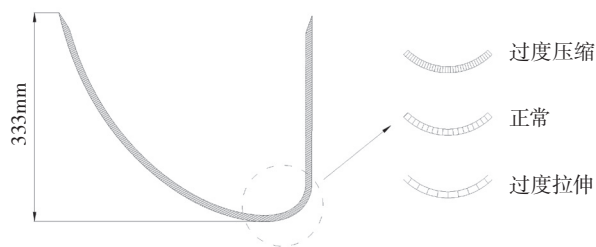


图3 蜂窝芯状态图
Fig.3 State of honeycomb core

种特殊现象,在 U 型底部,蜂窝芯的内表面呈现出轻微的压缩,而蜂窝芯外表面则呈现出轻微的拉伸。因此,展开基准面选择不合理,蜂窝芯将呈现出过度压缩或拉伸的状态,内部应力集中,影响产品质量。

本研究中,通过软件模拟,结合实际验证,试验件选择从蜂窝芯底面沿厚度向上 1/4 处为基准面展开。按此展开方式加工的蜂窝芯,当其弯折成 U 型时,各处蜂窝芯孔格均能基本保持其原有形状,未发生孔格的过度拉伸或压缩。经目视检查和超声波检测,固化后的试验件表面光滑,无褶皱;内部密实,无局部空腔或脱粘。

2.2 蜂窝芯热定型

由于蜂窝芯原材料为平面状,当其弯折成为 U 型后,存在回弹至平面状的趋势。即使采用了具有一定弯折能力的柔性蜂窝芯,这种趋势也是无法消除的。在其影响下,蜂窝芯可能出现局部的变形或移动,从而影响与预浸料的贴合程度^[6-7]。

一般而言,可通过蜂窝芯热定型工艺解决此问题:

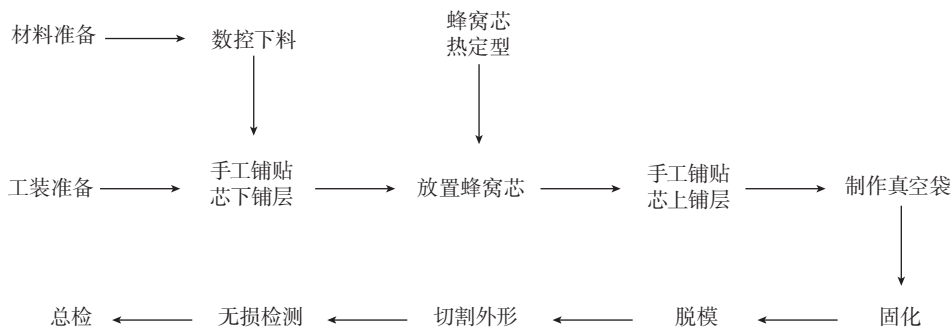


图2 试验件制造流程
Fig.2 Manufacture process of test part

在蜂窝芯任一表面或上、下两面粘贴一层胶膜,进热压罐固化。在高温、高压环境下,蜂窝芯的内应力将得到一定程度的释放,其回弹至平面的趋势得以减缓。固化后的胶膜变硬,起到了维型的作用。同时,胶膜增大了蜂窝芯与预浸料的接触面积,摩擦力随之增大,限制了蜂窝芯的移动。但这种方法会大幅增加产品重量,并且,牺牲了蜂窝芯的弹性。蜂窝芯与预浸料之间的配合方式由“软-软”配合变为“硬-软”配合,配合弹性降低,易出现局部分层或脱粘的缺陷(表2)。

本研究对蜂窝芯热定型工艺进行了改进:仅在蜂窝芯下表面曲率平缓的区域放置一层胶膜,进热压罐固化。采用这种方式,既可以释放蜂窝芯弯折成U型后的内应力,又最大程度地保留了蜂窝芯的弹性。在U型的底部,蜂窝芯与预浸料之间仍为“软-软”配合,二者在固化过程中能够同步变化,匹配程度更高。局部放置胶膜在增大了蜂窝芯与预浸料接触面积的同时,又没有显著增加产品重量(图4)。

2.3 铺层及蜂窝芯固定

预浸料主要由树脂和纤维组成,在高温、高压环境下,树脂经由玻璃态、粘流态、高弹态最终达到三维网络结构。在固化的某一阶段,预浸料会出现软化的现象,在重力作用下,树脂会向型面最低处流动,并可能带动纤维发生屈曲。因此,在铺贴过程中,应当对预浸料的位置加以限定。对于蜂窝夹芯零件,在固化过程中,蜂窝芯可能发生收缩,进而带动预浸料滑移,导致铺层褶皱、分层及脱粘等缺陷的产生^[8-9]。

对于U型前缘类零件,由于其结构的特殊性,在铺贴、制袋及固化过程中,预浸料极易在重力作用下向U

型底部滑移。如果不采取任何措施,在U型底部必然出现铺层皱褶,蜂窝芯也会发生明显的收缩,产品合格率极低。为解决此问题,本研究在成型模上加装了防滑条(约50mm宽),增大了预浸料的摩擦阻力,起到了“抓紧”的效果,从而限制了预浸料的滑移。制件固化后,表面平整,内部无分层或脱粘缺陷(表3)。

但必须指出的是,对于U型前缘类零件,防滑条应按照图5所示位置放置,在前缘两端U型槽内不放置。这是因为:(1)U型槽曲率变化较大,不易安装防滑条;(2)需要将预浸料沿工装型面铺贴,并确保各铺层之间充分贴合,若在U型槽内安装防滑条,会极大限制预浸料的移动,使预浸料处于“紧绷”的状态,降低了预浸料在U型底部区域的铺贴性能,进而影响各铺层间的配合状态,甚至在铺贴过程中就会出现局部架桥,无法压实的问题,最终产品出现分层缺陷。

2.4 外形控制

由于固化反应收缩,温度梯度场等因素的影响,U型复合材料零件在脱模后,会出现较为明显的“收口”变形效应,即零件宽度的实际测量值会明显小于其理论值^[10-12]。一般而言,可将固化脱模后的零件返回工装,通过在自由状态下测量其各部位与工装之间的间隙值,来评估零件固化后的变形程度。

本研究将U型蜂窝夹芯前缘与U型层压前缘的贴胎间隙进行对比,数据见表4。由测量数据可知,U型层压蜂窝芯前缘在自由状态下的贴膜间隙平均值为7mm,而U型蜂窝夹芯前缘在自由状态下的贴膜间隙平均值为2mm。即U型蜂窝夹芯前缘的“收口”变形程度较小,外形更为准确,这可能得益于本研究所采取的

表2 蜂窝芯热定型工艺改进效果

衡量标准	改进前	改进后
胶膜重量/g	313.17	82.68
匹配方式	硬-软	软-软
内部质量	易出现分层、脱粘	内部致密
蜂窝芯弹性	弹性较差	弹性适宜

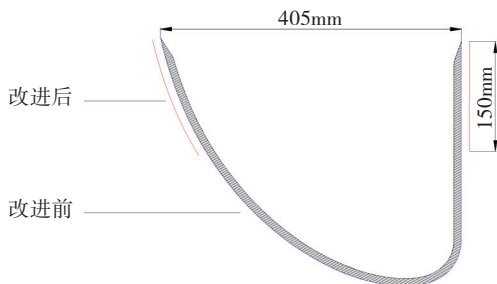


图4 胶膜放置位置示意图

Fig.4 Position of adhesive film

表3 防滑条使用效果

衡量标准	无防滑条	四周装防滑条	仅平缓区域装防滑条
表面质量	皱褶	局部皱褶	平整
内部质量	纤维屈曲、空腔	分层、脱粘	致密
蜂窝芯质量	收缩	无收缩	无收缩

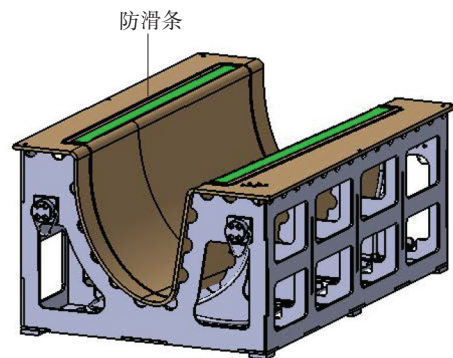


图5 防滑条位置示意图

Fig.5 Position of grip strips

表4 试验件贴模间隙 mm

试样	U型层压前缘	U型蜂窝夹芯前缘
1#	7	2
2#	8	2
3#	7	2

注: U型层压前缘零件的长度为约 830mm, 宽度为约 140mm, 开口深度为约 140mm, 厚度为约 2.3mm。

制造方案:(1)蜂窝芯为整块结构,未在任何方向上进行拼接;(2)采用改进后的蜂窝芯热定型工艺,蜂窝芯保留有适宜的弹性。在以上两种因素的共同作用下,蜂窝芯轻微展开成平面的趋势部分抵消了U型零件的“收口”变形效应,从而使零件脱模后的外形更为准确。

如果采用蜂窝芯拼接的工艺方法,蜂窝芯不具备整体性,缺乏展开成平面的趋势。同样,如果热定型时在蜂窝芯底面放置一整层胶膜,其外形被固化,也将缺乏展开成平面的趋势。

上述试验结果为解决U型蜂窝夹芯前缘的“收口”变形问题提供了新的思路。

3 结论

本研究以U型蜂窝夹芯前缘为对象,通过理论分析及试验件制造,初步得到了一些结论:

(1)U型蜂窝芯展开基准面的选择对产品质量至关重要;

(2)改进后的热定型工艺提高了蜂窝芯与预浸料的匹配程度;

(3)试验件的制造方案为解决U型蜂窝夹芯零件的“收口”变形提供了新的思路。

参考文献

- [1] 杜善义, 关志东. 我国大型客机先进复合材料应对策略思考[J]. 复合材料学报, 2008, 25(1): 1-10.
- [2] DU Shanyi, GUAN Zhidong. Strategic for development of advanced composite technology for large commercial aircraft in China[J]. Acta Materiae Composite Sinica, 2008, 25(1): 1-10.
- [3] 寇哲君, 龙国荣, 万建平, 等. 热固性树脂基复合材料固化变形研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2006(S1): 7-11.
- [4] KOU Zhejun, LONG Guorong, WAN Jianping, et al. Progress of study on curing induced shape distortion for resin matrix thermosetting composites[J]. Aerospace Materials & Technology, 2006(S1): 7-11.
- [5] 元振毅, 王永军, 王俊彪, 等. 基于模具-制件相互作用的复合材料制件固化变形数值模型[J]. 复合材料学报, 2016, 33(4): 902-909.
- [6] YUAN Zhenyi, WANG Yongjun, WANG Junbiao, et al. Numerical model on curing deformation of composite part based on tool-part interaction[J]. Acta Materiae Composite Sinica, 2016, 33(4): 902-909.

[4] 李兴德, 周春萍, 王敏, 等. 雷达罩变厚度蜂窝展开加工的几何学方法[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(4): 58-61.

LI Xingde, ZHOU Chunping, WANG Min, et al. Geometrical method for expanded planar milling of honeycomb core material with changing thickness for radome[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(4): 58-61.

[5] 张菊霞, 田卫. 浅谈蜂窝芯零件的数控加工[J]. 航空制造技术, 2010(6): 87-89.

ZHANG Juxia, TIAN Wei. Brief analysis on digital manufacturing of honeycomb core parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(6): 87-89.

[6] 蒲永伟, 宋扬, 齐芳, 等. U型多区域蜂窝夹层复合材料构件制造工艺研究[C]// 第十届沈阳科学学术年会, 沈阳, 2013.

PU Yongwei, SONG Yang, QI Fang, et al. Study on process of U shape honeycomb sandwich composite structure[C]// The tenth annual conference of science in Shenyang. Shenyang, 2013.

[7] 郑义珠, 顾轶卓, 孙志杰, 等. Nomex蜂窝夹层结构真空袋共固化过程蜂窝变形[J]. 复合材料学报, 2009, 26(4): 29-35.

ZHENG Yizhu, GU Yizhuo, SUN Zhijie, et al. Core crush of Nomex honeycomb sandwich structure during cocuring process with vacuum bag[J]. Acta Materiae Composite Sinica, 2009, 26(4): 29-35.

[8] 汪亮, 孙玲. 变截面蜂窝夹层结构复合材料胶接工艺研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(3): 65-67.

WANG Liang, SUN Ling. Study on bonding process of typical honeycomb sandwich composite structure[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009(3): 65-67.

[9] 梁春生, 邱启艳, 陈静, 等. 蜂窝夹层结构复合材料交接共固化工艺技术研究[J]. 航空制造技术, 2014(15): 86-89.

LIANG Chunsheng, QIU Qiyang, CHEN Jing, et al. Study on cobonding process of honeycomb sandwich composite structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(15): 86-89.

[10] 张纪奎, 郦正能, 关志东, 等. 热固性复合材料固化过程三维有限元模拟和变形预测[J]. 复合材料学报, 2009, 26(1): 174-178.

ZHANG Jikui, LI Zhengneng, GUAN Zhidong, et al. Three-dimensional finite element simulation and prediction for process-induced deformation of thermoset composites[J]. Acta Materiae Composite Sinica, 2009, 26(1): 174-178.

[11] 杨云仙, 刘军, 周敏, 等. 复合材料构件热压罐成型温度场研究[J]. 航空制造技术, 2016(15): 82-86.

YANG Yunxian, LIU Jun, ZHOU Min, et al. Research on temperature field of composite structure based on autoclave processing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(15): 82-86.

[12] 贾云超, 关志东, 李星, 等. 热压罐温度场分析与影响因素研究[J]. 航空制造技术, 2016(1): 90-95.

JIA Yunchao, GUAN Zhidong, LI Xing, et al. Analysis on temperature field distribution and study on influence factor in autoclave process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(1): 90-95.

通讯作者: 闫恩玮, 工程师, 研究方向为先进复合材料制造工艺, E-mail: enweiyuan@126.com. (责编 大漠)