

铝蜂窝夹芯带铜网复合材料壁板胶接技术研究

吴利敏,杨永忠,潘晓莉,李亚龙,喻钟男

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司,成都 610073)

[摘要] 针对铝蜂窝夹芯带铜网复合材料壁板胶接过程中遇到的实际问题,主要通过金属与复合材料的混杂成型工艺、蜂窝芯收缩变形控制技术、选择合适的胶粘剂、胶结质量验证等几个方面进行了研究。最终通过可操作性、消除铜网与预浸料织物热膨胀系数不同所带来的影响、防止蜂窝芯收缩工艺、选择合适的胶膜及固化参数的确定 4 个方面对铝蜂窝夹芯带铜网复合材料壁板胶接技术进行研究,并通过随炉试板的测试和无损检测技术验证了该工艺方法的可行性。

关键词: 铜网; 铝蜂窝芯; 复合材料; 收缩; 固化; 无损检测

Research on Bonding Technology of Aluminum Honeycomb Sandwich Panel Covered With Copper Wire Netting

WU Limin, YANG Yongzhong, PAN Xiaoli, LI Yalong, YU Zhongnan

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610073, China)

[ABSTRACT] This paper focused on practical problems in manufacturing processes of aluminum honeycomb sandwich panel covered with copper wire netting. Improving folding process of copper wire netting, choosing suitable prepreg, adjusting heating rate, decreasing the diameter of copper wire netting and ameliorating folding means were used to reduce the impact on thermal expansion and to polish up bonding performance of copper netting and prepreg. Meanwhile, choosing suitable coating films and curing molding process of aluminum honeycomb sandwich panel was used in dry glass fabric to clasp layers and improve contraction in marginal areas of aluminum honeycomb sandwich. The practicability of the improvements was confirmed by the test of procession control panel and non-destructive test technology, which could give a reference for the manufacturing processes of aluminium honeycomb sandwich panel covered with copper wire netting.

Keywords: Copper wire netting; Aluminum honeycomb; Composite material; Shrinkage; Cure; Non-destructive test

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.12.080

复合材料夹芯结构由于其结构合理、质量轻、绝热、隔音、刚度大等优良性能而被广泛使用^[1-3]。目前国内在芳纶纸蜂窝芯夹芯复合材料夹芯方面展开了广泛研究,但是对铝蜂窝芯夹芯结构复合材料的研究却很少。

相比芳纶纸蜂窝芯来说,铝蜂窝芯夹芯结构复合材料具有较高的力学性能,且铝蜂窝芯的制造成本也相对较低。作为复合材料夹芯板所用的蜂窝芯,在一定条件下,铝材质与碳布预浸料会导电,为了解决这一难题,选用玻璃布预浸料将蜂窝芯和碳布预浸料隔离开。为了防雷击,在外蒙皮表面膜下夹有铜网。本文所制造的复合材料夹芯壁板由碳布、铝蜂窝芯、玻璃布、铜网等混杂

胶接而成,其典型壁板如图 1 所示。

铝蜂窝夹芯结构的大面积粘接一直是夹芯结构批量生产的难题,且铜网由于自身的特性用于复合材料胶接本身也是一种挑战。本文对铝蜂窝夹芯带铜网复合材料胶接成型工艺出现的主要难点进行探讨,通过改变胶接工艺要求,选用合适的胶膜及固化成型参数,为其广泛应用进行初步探索。

1 铝蜂窝夹芯带铜网复合材料壁板铺叠工艺

本文从铜网操作性及消除其与预浸料织物热膨胀系数不同所带来的影响、防止蜂窝芯收缩工艺研究、所用胶膜的验证及其固化成型的具体参数 4 个方面对铝

蜂窝夹芯带铜网复合材料胶接成型工艺进行了研究。

1.1 混杂结构复合材料成型工艺

1.1.1 材料热膨胀系数差异对复合材料零件外形的影响及解决措施

由于铜网与碳布预浸料具有不同的热膨胀系数,且本文所采用的成型工艺需要在加热加压的条件下完成。因此,变形问题不容忽视,制造难度大。

热膨胀系数(Coefficient of thermal expansion, CTE)是指物质在热胀冷缩作用之下,几何特性随着温度的变化而发生变化的规律性系数,在一定的温度范围内变化很小,可看作定值,一般用线性热膨胀系数表示一个物体的热胀冷缩的变化规律,表示为^[4-5]:

$$\alpha = 1/L \times \Delta L / \Delta T$$

式中, α 为物体的线性热膨胀系数; L 为物体的初始长度; ΔT 为温度变化的范围; ΔL 为在 ΔT 下长度变化值,即 ΔT 下的线性热膨胀量。

如表1所示,铜的热膨胀系数比碳纤维和玻璃纤维的热膨胀系数高1~2个数量级,在高温下易造成壁板变形。为了消除由热膨胀系数不一致带来的影响,本文从以下几个方面入手,以求消除铜网与碳布、玻璃布预浸料热膨胀不一样带来的影响:

(1)线性热膨胀系数 α 为定值,在长度不变的情况下, ΔT 越大, ΔL 就越大,即线性热膨胀量越大。由于复合材料需要在加热加压下成型,为了尽量消除铜网与碳布、玻璃布预浸料热膨胀系数不一致带来的影响,故应选择中低温条件下固化的材料体系。综合考虑,本文最终选择为135℃固化的材料:E-765/3K70PW碳布预浸料和(C3687)120-F155玻璃布预浸料。

(2)升温速度也是影响热膨胀量的一个主要因素,为消除各个材料热膨胀系数不同所带来的影响,因此应该选择较小的升温速率,但是升温速率越小,占用热压罐的时间越长,生产成本就越高。综合考虑,本文选用的升温速率应在1~4.5℃/min范围内,实际生产固化程序设置升温速率设为1℃/min。

(3)铜丝的粗细不一样,相同温度变化下,热膨胀量也不一样,为了消除热膨胀不同所带来的影响,尽可能选择较细的铜丝,本文选用的铜网每单位面积的网重只有73g/m²。

1.1.2 铝蜂窝夹芯铜网复合材料零件铺叠控制要点

本文选用Astrosel公司生产的110退火电解铜,其主要性能参数如表2所示。

在实际铺叠过程中,存在以下难点:

(1)铜网本身为金属材料,与碳布预浸料织物之间的贴合性较差;

(2)铜网表面未浸胶,与工装的贴合性较差;

(3)由于铜网的主要作用是防雷击,故铜网本身不允许拼搭接,但是该铜网厚度很小,在现场铺叠过程中易撕裂,增加了铺叠时的操作难度。

针对以上难点,结合实际生产经验,本文按照铺层铺叠时先后顺序,从3个方面入手,以求改善铜网的可操作性,见表3。

图2是壁板铜网侧固化后的效果,可以看到,固化后的铜网与碳布、玻璃布预浸料粘贴性较好,未发现变形等现象,表明此工艺的可行性。

1.2 铝蜂窝芯收缩变形控制方法研究

本文采用的蜂窝夹芯成型,其中成型过程中会有以下原因造成蜂窝芯收缩:

(1)蜂窝芯由于自身成型工艺特点,后续胶接过程中拉伸方向易收缩;

(2)在整体成型的设计结构中,蜂窝芯边缘一般有

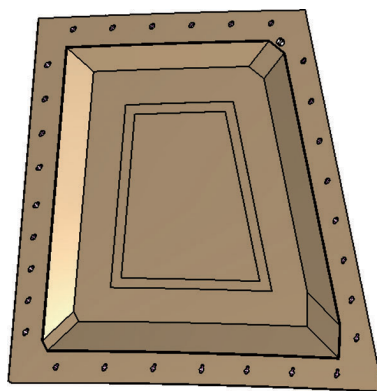


图1 壁板的典型结构

Fig.1 Typical structure of panel

表1 不同物质的线性热膨胀系数

Table 1 Linear thermal expansion coefficient of different material

物质	线性热膨胀系数 / (10 ⁻⁶ m·°C ⁻¹)
铜	17
碳纤维	-0.7
玻璃纤维	2.9

表2 所选铜网的性能参数

Table 2 Performance parameters of selected copper network

性能	参数
每单位面积的网重 / (g·m ⁻²)	73
单层厚度/mm	0.102
线性热膨胀系数 / (m·°C ⁻¹)	17 × 10 ⁻⁶

表3 铺叠改善要点

Table 3 Shop fold improvement points

铺叠顺序	铺叠要点	作用
铺叠表面膜	铺叠表面膜铺叠、预压实	使不带胶的铜网与碳布预浸料粘接良好
铺叠铜网	(1) 铺叠时均匀用力; (2) 完全铺叠后 4 周, 用可接触耐高温胶带固定在工装上; (3) 对铜网铺层进行预压实	(1) 避免局部用力致使铜网撕裂(由于铜网不允许拼搭接, 故撕裂的铜网只能丢弃), 减少材料浪费; (2) 防止铜网在工装上移动; (3) 使铜网很好地与表面膜贴合
铺叠碳布铺层(第 1 层)	(1) 铺叠后预压实; (2) 采用可接触性耐高温胶带固定	(1) 与铜网完全贴合; (2) 防止之后的预浸料在铺叠定位时与已经铺叠的预浸料粘在一起, 导致表面膜、铜网等铺层一同粘离工装, 铺层定位不准确

一个斜坡, 如图 3 所示, 热压罐固化过程中加压、抽真空的情况下所受力为 F , 蜂窝芯收缩所受力为 F_1 , 蜂窝芯垂直向下的力为 F_2 , 受力分析如图 4 所示。

根据受力分析发现, 在热压罐固化过程中加压、抽真空时, 蜂窝芯在侧面所受分力 F_1 会导致蜂窝芯收缩、滑移, 这也是蜂窝夹芯结构零件的常见的缺陷之一。解决上述问题, 经常使用如下 3 种方法。

(1) 抓紧条法。工装设计时, 在工装铺叠面零件净边线外制造抓紧条, 如图 5 所示。在零件制造过程中, 将织物铺层铺到抓紧条上, 并且铺到抓紧条上面的织物铺层比下面的织物铺层每层多出约 13mm。采用这种方式预防蜂窝芯收缩的效果很好, 其缺点在于零件在固化成型后会在抓紧条上面残留固化后的树脂, 工装每次清洁时比较繁琐且耗时较长。

(2) 贴纸法。采用一种特殊的贴纸, 该贴纸特点为: 一面具有黏胶, 可以粘附在工装上, 另一面表面特别粗

糙。在零件制造时具有粘胶的一面粘贴在工装上(零件净边线以外), 在零件铺层铺叠时将全铺层(预浸料织物)铺到该贴纸上面。用此方法抓紧铺层来防止蜂窝芯的效果良好, 但是此贴纸为一次性物品, 且价格昂贵, 会导致生产成本增加。

(3) 干玻璃布法。在零件铺叠的过程中, 针对邻近蜂窝芯上下的全铺层, 用干玻璃布来抓紧, 并用耐高温胶带将干玻璃布固定在工装上, 如图 6 所示。此方法的优点为无需每次清洁抓紧条, 且干玻璃布的成本比较低。

结合以上 3 种方法, 本文采用干玻璃布抓紧铺层的方法防止蜂窝芯收缩。图 7 为零件固化后经过 X 光检测图, 此图的零件是采用干玻璃布抓紧全铺层以防止蜂



图2 壁板铜网侧固化后效果
Fig.2 Curing effect of copper mesh side of panel

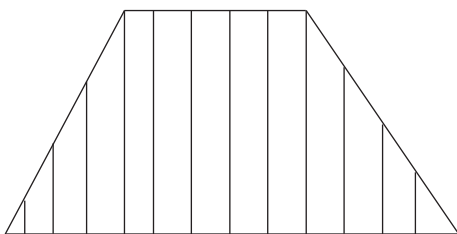


图3 典型蜂窝芯侧视图
Fig.3 Profile of typical honeycomb structure

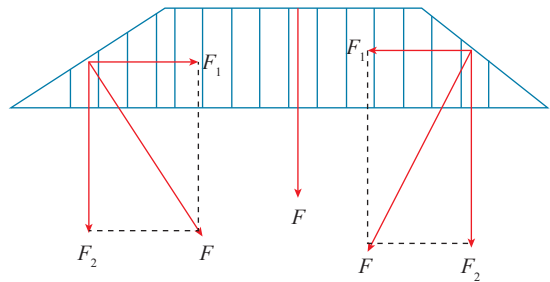


图4 对蜂窝芯施加压力的受力分析
Fig.4 Force analysis of honeycomb

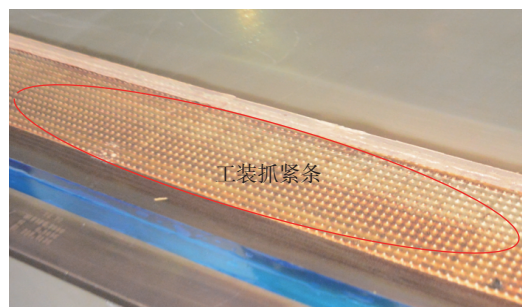


图5 工装上的抓紧条
Fig.5 Grip on tooling

窝芯收缩的方法。从图 2~6 可以看出,此方法效果良好,蜂窝芯没有收缩。

1.3 胶膜选择

胶膜性能是铝蜂窝夹芯复合材料零件胶接成型的关键因素之一。本文采购了 Cytec 公司的 FM-73M 和 3M 公司的 AF-163 两种胶膜。并对两种胶膜进行对比,如表 4 所示。

FM-73M 胶膜只能采用手工下料,会导致材料的利用率降低,且此胶膜的黏性较大,在铺叠过程中胶膜本身易粘在一起,胶膜定位难度大,不利于铺叠操作;而 AF-163 胶膜可以采用自动下料机下料,且操作性良好,故本文最

终选择了 AF-163 胶膜。对 AF-163 胶膜的滚筒剥离试验和平拉试验结果如表 5 和表 6 所示。对于滚筒剥离试验,相关规范上允许的平均值 ≥ 37 (N·mm)/mm,个别试验数值不得小于 33 (N·mm)/mm,对比表 5 与规范要求发现,此胶膜的滚筒剥离强度很高。

一般胶膜的平拉强度要求不小于 47kPa,其中 1~4 号试样的平拉强度分别为 4888kPa、6094kPa、5557kPa、5322kPa,可以看出此胶膜的平拉强度远高于一般的胶膜。图 8 为平拉测试后的图片。

对固化后的夹芯复合材料壁板进行剖视,发现此胶膜的爬升性能特别好,如图 9 所示。

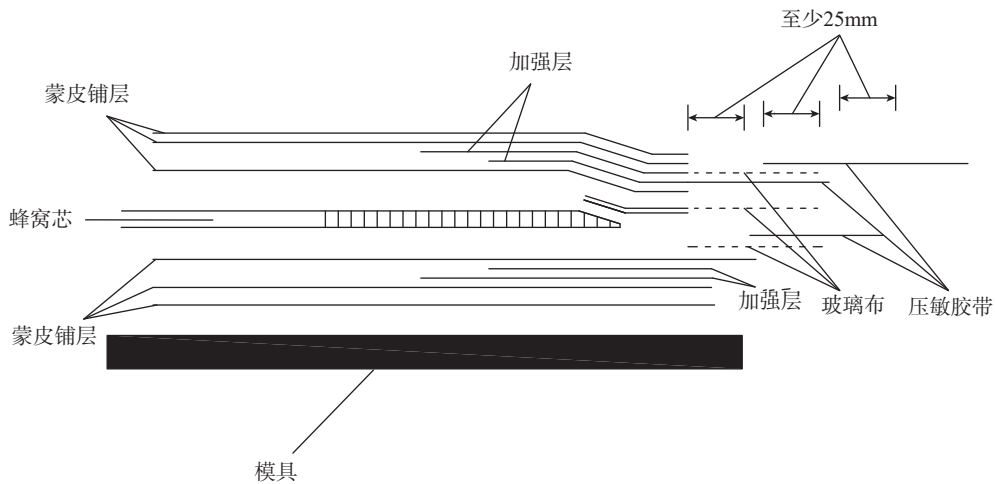


图6 用抓紧的方法稳定蜂窝芯
Fig.6 Stabilize honeycomb core by gripping

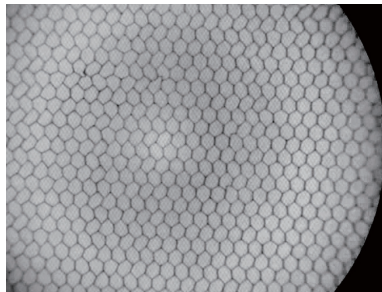


图7 铝蜂窝夹芯复合材料零件的X光检测图
Fig.7 X-ray detection of aluminum honeycomb sandwich panel



图8 FM-73M平拉试验后图片
Fig.8 Image after FM-73M Ping-pull test

表4 胶膜情况对比
Table 4 Comparison of film

性能	FM-73M	AF-163
被衬状况	单面被衬	双面被衬
可采用自动下料机下料	否	是
黏性	较大	适中

表5 滚筒剥离试验测试结果
Table 5 Roller peeling test results

试样编号	测试时拉伸的一侧	滚筒剥离强度 / (N·mm·mm ⁻¹)	平均值 / (N·mm·mm ⁻¹)
1	成型模侧	36.7	43.1
2	成型模侧	38.3	
3	袋侧面	48.2	
4	袋侧面	49.2	

1.4 热压罐固化成型参数确定

热压罐固化成型工艺是目前应用于蜂窝夹芯结构胶接的主要成型工艺之一,压力和温度是其固化成型的关键因素。本文从压力和温度这两个方面对混杂结构复合材料成型工艺参数进行了研究。

(1) 压力的选择。

铝蜂窝芯本身材质较软、刚度较低,过高的压力或者加压速率过大会对铝蜂窝芯本身造成很大的冲击力,导致铝蜂窝芯压塌或者收缩,致使零件表面出现凹坑或

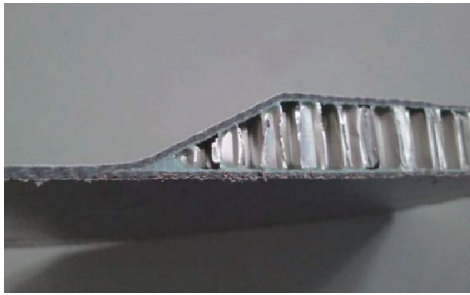


图9 使用FM-73M胶膜固化后零件的剖视图
Fig.9 Profile view of parts cured using FM-73M film

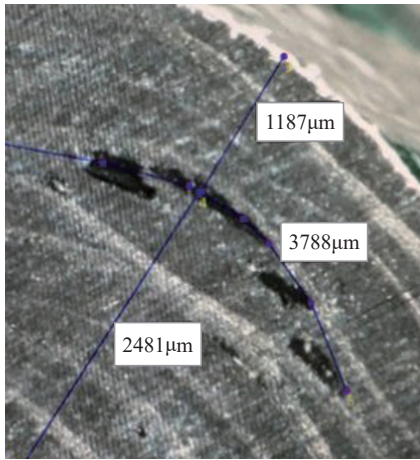


图10 密集孔隙分层径相图
Fig.10 Dense porosity stratification phase diagram

者褶皱而影响零件的性能导致客户拒收。但是压力过低会造成铝蜂窝芯与预浸料织物胶接时造成分层、孔隙、弱黏接等零件内部缺陷,直接导致因零件无损检测不合格而报废。

通过选择多组方案进行试验,对比固化后零件的表面质量和无损结果,见表6。

经过反复试验,最终确定最合适的压力为300kPa(公差为-20~50kPa)。

(2) 升温速率的选择。

由前文可知,为了消除铜网与碳布、玻璃布预浸料热膨胀系数不一致带来的影响,在固化程序中升温速率设置为1℃/min。

1.5 混杂结构复合材料成型工艺方法验证

本文从多次随炉试板的测试结果验证了该工艺的稳定性,并利用无损检测技术对零件内部质量进行了分

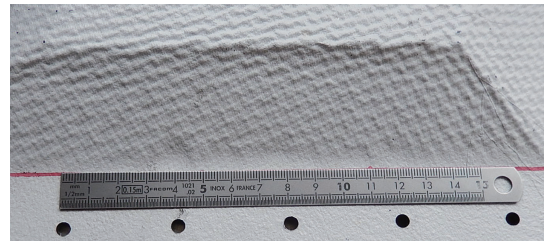


图11 固化后蜂窝芯收缩图
Fig.11 Condensation of honeycomb after curing

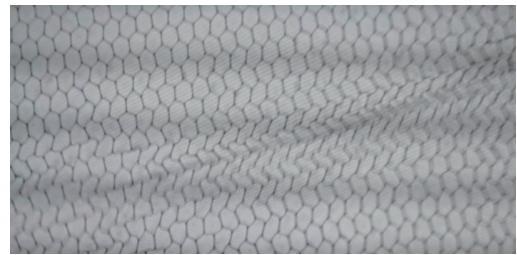


图12 X光检测图
Fig.12 X-ray map

表6 压力对比试验
Table 6 Pressure test

性能	方案 1	方案 2	方案 3
热压罐固化时的压力值 /MPa	0.1	0.3	0.4
固化后表面质量	完好	完好	零件表面收缩(图 11),通过 X 光检测发现蜂窝芯芯格明显收缩(图 12)
无损检测结果	无损 C 扫结果显示部分区域出现密集孔隙分层,经过剖视后做径相扫描(图 10)	合格	合格

注:(1)本次试验的压力公差均是-20~50kPa;(2)其余参数(例如升温速率、降温速率、恒温时间等)均一致。

析,以判断该工艺方法制造的零件内部质量是否满足相关的规范要求。

1.5.1 随炉试板性能验证

按照相关规范要求,一个真空袋里固化成型至少有一套随炉试板,且要求对随炉试板做滚筒剥离试验、剪切测试、纤维体积含量测试、孔隙率测试、密度及单层厚度测试,对目前生产的随炉试板测试结果统计如图 13~18 所示(离散系数分别为 0.1306066、0.10089686、0.037846、0.535532、0.007264296、0.02008966)。

对比发现,随炉试板均满足相关规范测试要求,即该工艺方法制造的零件在力学性能、物理性能等方面满足相关规范要求,且零件性能稳定。

如图 18 所示,单层厚度测试值一直处于上限,因此后续采用了均压板用于随炉件的固化,改进后其离散系数变得更少,杜绝了可能超差的风险。

1.5.2 无损检测验证

本文利用无损检测技术对零件内部质量进行分析,以判断该工艺方法是否满足相关的规范要求。图 19 和

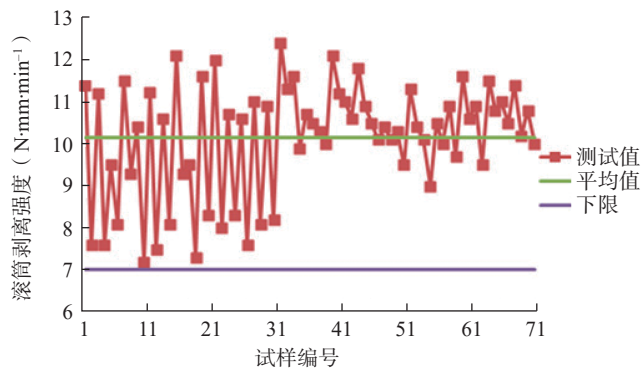


图13 滚筒剥离测试结果统计
Fig.13 Statistics about test results of roller stripping

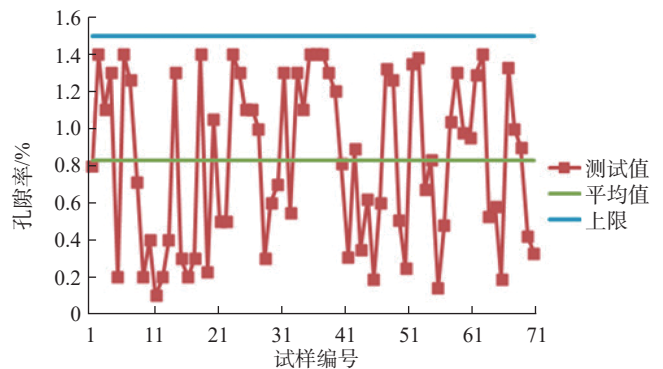


图16 孔隙率测试结果统计
Fig.16 Statistics of porosity test results

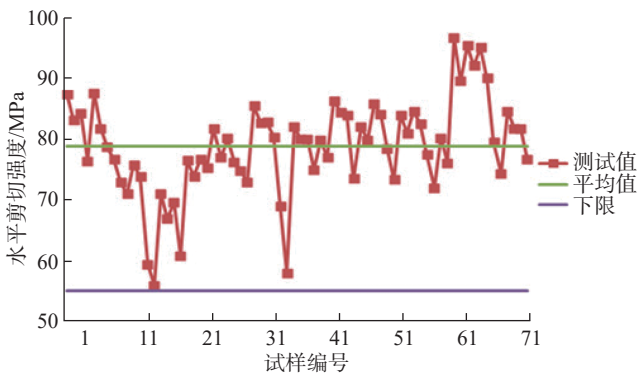


图14 剪切测试结果统计
Fig.14 Statistics of shear test results

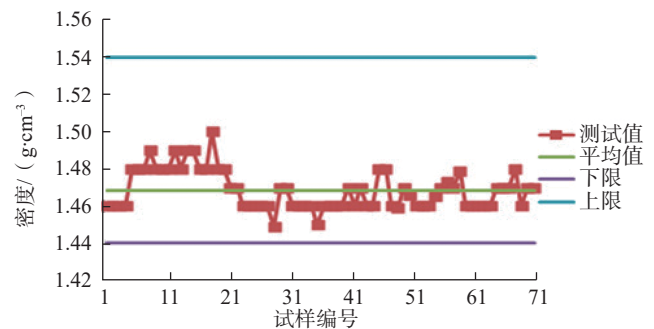


图17 密度测试结果统计
Fig.17 Statistics of density test results

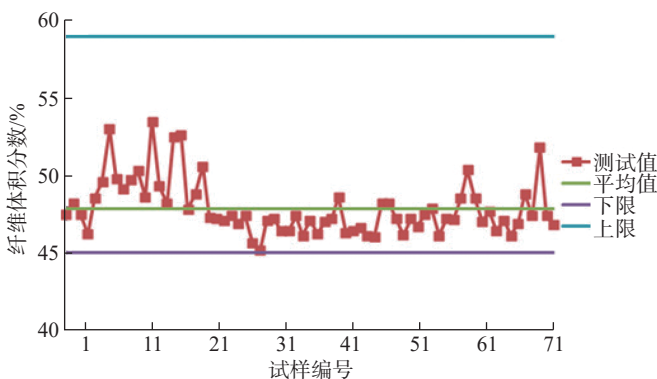


图15 纤维体积含量测试结果统计
Fig.15 Statistics of fibre volume content test results

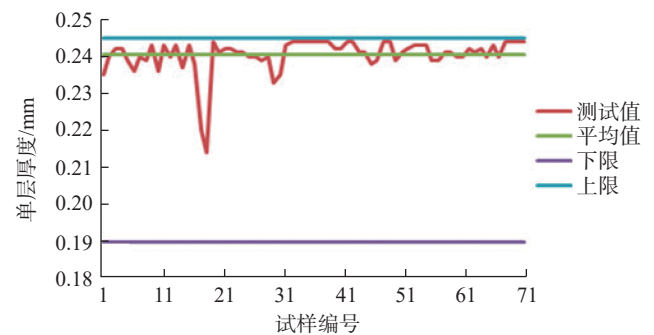


图18 单层厚度测试结果统计
Fig.18 Statistics of single layer thickness test results

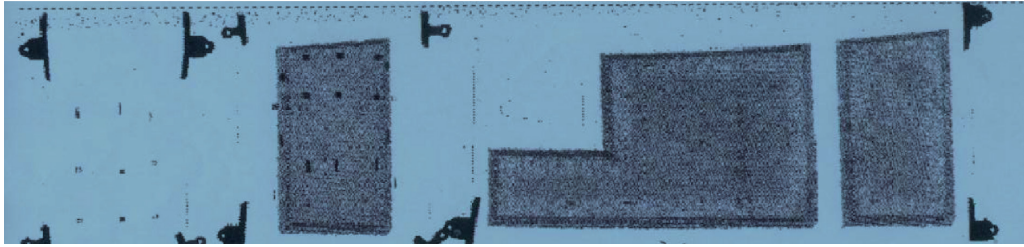


图19 板芯区域的超声波扫描
Fig.19 Ultrasonic scan of core area

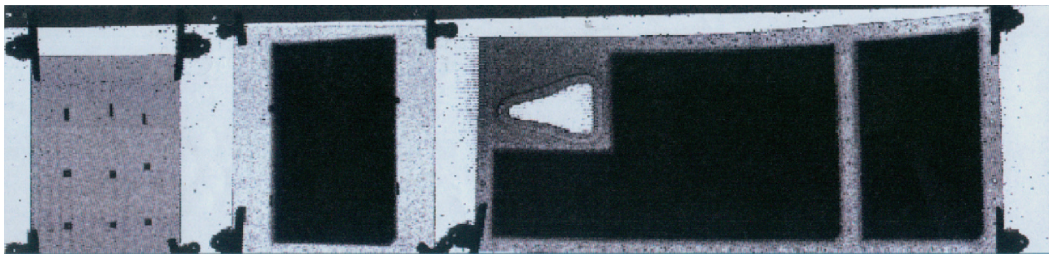


图20 板板区域超声波扫描
Fig.20 Ultrasonic scan of plate area

20 分别为零件的板芯区域和板板区域的超声波扫描,表明该零件的内部质量满足相关的规范要求,即再次证明该工艺方法制造的零件满足相应的规范要求。

2 结论

本文对混杂复合材料成型工艺的各个方面进行分析及试验验证,得出以下结论:

- (1) 对不同材料的热膨胀性能及铜网本身特性的分析研究,解决了零件变形问题及铺叠难点;
- (2) 通过防止蜂窝芯收缩的常用3种工艺的对比验证,确定了干玻璃布法抓紧工艺方案;
- (3) 经两种胶膜材料的性能对比,并对AF-163胶膜的试验参数验证,最终确定选用AF-163胶膜;
- (4) 经分析及生产试验,确定固化参数为加压速率不大于17kPa,最大压力为300kPa(公差为-20~50kPa),升温速率为1℃/min。
- (5) 随炉试板的测试及无损检测结果表明该工艺方法的可行性及工艺稳定性。

参考文献

[1] RAJESHWAR K, TACCONI N R D, CHENTHAMARAKSHAN C R. ChemInform abstract: semiconductor-based composite materials: preparation, properties, and performance[J]. Chemistry of Materials, 2001, 13(9): 2765-2782.

[2] KARPOUZIAN G, LIBRESCU L. Three-dimensional flutter solution of aircraft wings composed of advanced composite materials[C]// Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Boston, 2013.

[3] 房晓斌,孟翠翠. 某型机复合材料U形蒙皮固化成型厚度控制[J]. 橡塑技术与装备, 2016, 42(2): 79-80.

FANG Xiaobin, MENG Cuicui. Thickness control of cured U-shape composite machine skins[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2016, 42(2): 79-80.

[4] 程勇,彭建,罗辑,等. 复合材料加筋蒙皮的研制[J]. 航空制造技术, 2011, 54(11): 80-82.

CHENG Yong, PENG Jian, LUO Ji, et al. Study on the composite material of stiffened panel type[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(11): 80-82.

[5] 王莹,武彬彬,王浩军. 复合材料“J”型加筋壁板成型工艺研究[J]. 粘接, 2017(2): 61-63.

WANG Ying, WU Binbin, WANG Haojun. Study on the forming process of “J” type stiffened panel composite material[J]. Splice, 2017(2): 61-63.

[6] ANOSHKIN A, ZUIKO V, SHIPUNOV G, et al. Technologies and problems of composite materials mechanics for production of outlet guide vane for aircraft jet engine[J]. PNRPU Mechanics Bulletin, 2014, 1(4): 5-44.

[7] ANDREW A. An integrated model of the development of process-induced deformation in autoclave processing of composite structure[D]. Canada: The University of British Columbia, 1997.

通讯作者: 吴利敏,高级工程师,主要研究方向为复合材料胶接成型, E-mail: wulimin168@126.com。

(责编 大漠)