

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.11.013

双马来酰亚胺/碳纤维蜂窝夹层结构孔隙优化

庞新强, 成艳娜, 陈舸, 肖光明, 王越挺

(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089)

摘要: 双马来酰亚胺(BMI)树脂/碳纤维(CF)预浸料作为蒙皮结构与芳纶纸蜂窝芯共固化工艺既要控制蒙皮的成型质量,又要控制蜂窝与蒙皮的黏接质量,同时蜂窝芯零件的耐压较小,因此针对共固化工艺过程中经常出现的孔隙问题进行研究。通过对孔隙数学模型进行分析,基于BMI树脂预浸料高挥发分和高流动的特性,对成型过程中预浸料铺层数、袋内真空压力、预浸料树脂含量调节不断优化。以无损检测和金相分析为手段,分析了成型工艺过程中的影响因素。研究发现,BMI/CF预浸料在蜂窝夹层结构中的孔隙率与铺层层数、袋内真空压力和BMI树脂含量有关。孔隙的产生主要是由于挥发分在预浸料和胶膜界面处的浓度差异引起的,当预浸料铺层层数 ≤ 10 层时,蜂窝夹层件孔隙 $< 1.5\%$;当预浸料铺层层数 > 10 层时,蜂窝夹层件孔隙 $> 1.5\%$ 。通过吸胶工艺及调节袋内真空压力能够有效地降低蜂窝夹层结构中的孔隙含量。

关键词: 双马来酰亚胺;碳纤维;孔隙;预浸料铺层;工艺过程;树脂含量;挥发分

中图分类号: V214.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)11-0078-06

Optimization of Pores in BMI/CF Honeycomb Sandwich Structure

Pang Xinqiang, Cheng Yanna, Chen Ke, Xiao Guangming, Wang Yueting

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

Abstract : As the co-curing process of skin structure and aramid paper honeycomb core, bismaleimide (BMI) resin/carbon fiber (CF) prepreg not only needed to control the forming quality of skin, but also the bonding quality of honeycomb and skin, and the pressure resistance of honeycomb core parts was small. Therefore, the pore problems that often occur in the co-curing process were studied. By analyzing the mathematical model of pores and based on the high volatility and high flow characteristics of BMI resin prepreg, the number of prepreg layers, vacuum pressure inside the bag, and resin content adjustment of the prepreg during the molding process were continuously optimized. By means of non-destructive testing and metallographic analysis, the influencing factors on the forming process were analyzed. The study shows that the porosity of BMI/CF prepreg in honeycomb sandwich structure is related to the number of layers, vacuum pressure inside the bag, and resin content. The porosity is mainly caused by the concentration difference of volatile matter at the interface between prepreg and adhesive film. When the number of prepreg layers is less than 10, the porosity of honeycomb sandwich is less than 1.5%. When the number of prepreg layers is more than 10, the porosity of honeycomb sandwich is more than 1.5%. The porosity content in honeycomb sandwich structure can be effectively reduced by glue absorption process and adjusting the vacuum pressure in the bag.

Keywords : bismaleimide ; carbon fiber ; pores ; prepreg layer ; process ; resin content ; volatile matter

夹层结构因为具有高比刚度、高比强度、性能可设计等优点,在航空工业领域中得到了广泛的应用。双马来酰亚胺(BMI)/碳纤维(CF)预浸料、芳纶纸蜂窝夹层结构具有优异的热稳定性、耐辐照性、力学性能和尺寸稳定性^[1-3],随着新一代航空航天材

料对于使用温度要求的提高,对于BMI夹层结构的质量提升研究势在必行。在飞机发动机短舱、固定前后缘等部位由于耐高温需求,BMI蜂窝夹层结构的用量不断增加。在BMI复合材料蜂窝夹层结构制造中,对质量要求一般有以下3点:(1)面板孔隙率

通信作者: 庞新强,高级工程师,主要从事先进复合材料制造及维修工艺研究

收稿日期: 2023-09-11

引用格式: 庞新强,成艳娜,陈舸,等. 双马来酰亚胺/碳纤维蜂窝夹层结构孔隙优化[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(11): 78-83.

Pang Xinqiang, Cheng Yanna, Chen Ke, et al. Optimization of pores in BMI/CF honeycomb sandwich structure[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(11): 78-83.

低、无分层、外面板表面光滑;(2)面板与芯材胶接处要形成良好的胶瘤;(3)最终成型尺寸满足设计要求^[4]。

在蜂窝夹层结构共固化过程中最容易出现的是蜂窝芯滑移、孔隙缺陷超标等缺陷。蜂窝芯滑移通过蜂窝芯稳定化、防滑条等方法进行试验^[5],取得了成功。但是孔隙受材料、环境、固化工艺、铺贴操作等影响一直存在于零件的制造工艺中。

为了改善 BMI/CF 材料的夹层结构孔隙问题,需要对孔隙的主要来源和孔隙的增长进行研究。复合材料蜂窝夹层零件中孔隙的形成主要有三方面因素:(1)预浸料和胶膜中树脂吸湿的水分;(2)预浸料和胶膜中含有的挥发分;(3)零件在铺贴过程中层与层之间夹裹的气体及材料自身制造中产生的孔洞。

Centea 等^[6]、Grunenfelder 等^[7]比较了树脂含水率对纯真空袋(VBO)和热压罐法固化预浸料孔隙率的影响。他们的研究得出结论,不同的初始溶解水分含量导致不同的最终孔隙率和孔隙体积分数。Plessix 等^[8]通过现场实时三维孔隙度观测,证实了预浸料含水率是孔隙度的重要来源。Arefmanesh 等^[9]假设在气泡界面附近的边界层内存在一个抛物型挥发分浓度分布,用于描述挥发分在气泡周围树脂中的扩散。前人基于 Wood 等^[10]实验的研究中另一个合理的假设是忽略表面张力的影响。虽然引起扩散生长的溶解性、挥发性物质通常被认为是树脂内部的溶解性水分,但其他类型的材料,如氮气和二氧化碳(用于泡沫成型工艺)或反应副产物材料也可能有助于扩散生长^[11-13]。蜂窝芯夹层结构共固化过程中黏接线内空洞的主要来源是胶黏剂与贴面之间的夹持空气、真空袋内低压导致预浸树脂或胶黏剂内空洞成核以及胶黏剂和预浸料面内的初始孔隙率(初始空洞)^[14-16]。由于周围液体施加的流体静力或由于扩散诱导过程,这些空隙可能会增大或缩小。在后一种情况下,周围液体中的溶解挥发物(如水分)可能会根据周围的压力和温度而扩散到空隙中^[7-8]。

彭公秋等^[17]对蜂窝夹层结构真空袋共固化的加压时机与孔隙的关系进行了研究,合适的加压时机有利于孔隙的下降。由于 BMI/CF 预浸料与其他树脂纤维预浸料存在高挥发分和高流动性的差异,导致了其孔隙的产生规律与一般预浸料存在差异。

笔者主要在前人对孔隙形成、扩展规律的基础上,开展 BMI/CF 预浸料的层数、加压抽真空状态及吸胶对孔隙的影响试验。BMI/CF 蜂窝夹层共固化的典型固化周期为两个温度梯度(120 °C/190 °C)。选择罐压(P_0)和真空袋内压(P_v)以加速上下面板固化和排气过程。在共固化过程中的压力平衡,通过蜂窝芯格与真空袋连通使得蜂窝芯格内压力(P)与真空袋内压相等。通过对不同铺层和加压方式对蜂窝夹层板层压区域孔隙研究,以期获得较低的孔隙率零件,提升 BMI/CF 蜂窝夹层结构的固化质量。

1 试验方案

1.1 试验件材料及结构形式

BMI/CF 预浸料: QY8911/CF3031, 其中 QY8911 为 185 °C 固化的 BMI 树脂, CF3031 为 CF 斜纹织物, 中航复合材料有限责任公司;

BMI 胶膜: J-188, 黑龙江省科学院石油化学研究院;

芳纶纸蜂窝芯: NH-1-2.7-48-HB5435-1989, 孔格长度为 2.7 mm, 蜂窝芯质量为 48 kg/m³, 蜂窝芯高度为 20 mm, 中航复合材料有限责任公司;

试验件: BMI/CF 复合材料蜂窝夹层结构, 由外蒙皮+蜂窝芯+内蒙皮构成, 蜂窝芯四周倒角约为 25°, 采用共固化成型工艺, 长方形结构。

1.2 主要仪器及设备

扫描仪: S647 型, 英国 ULTRASONIC SCIENCES LTD 公司;

金相试样研磨机: GP-2DE 型, 上海川禾实业发展有限公司;

显微镜: BX53M 系统, 日本 OLYMPUS 公司。

1.3 试验件的固化参数

固化前零件需进行预压实, 全过程抽真空, 110 °C 下保温 20 min, 压力 0.15 MPa; 蜂窝夹层零件固化的压力参数按照图 1 所示。BMI 材料的黏度采用热熔法测定^[18], 黏温曲线见图 2。

对夹层件选取不同的铺层及不同的真空方式

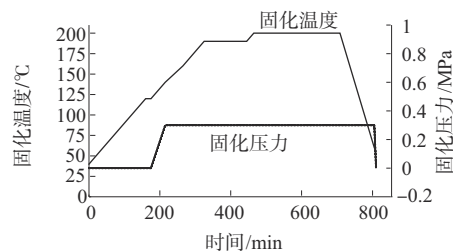


图1 BMI/CF 材料夹层结构固化制度

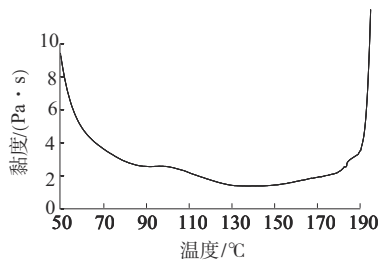


图2 热熔法BMI的温度-黏度曲线

开展工艺试验,上下蒙皮材料为BMI/CF预浸料、J-188胶膜与蜂窝芯NH-1-2.7-48-HB5435-1989采用共固化成型工艺,上下面板铺层均选择[45/90/45/0], [45/45/90/45/90], [45/45/90/90/90/45]三种形式进行铺贴,具体铺层层数见表1,胶膜仅铺贴至蜂窝芯上下面边界延伸不超过5 mm,采用防滑条防止蜂窝芯产生滑移,然后按照图1和表1的固化参数进行固化。

表1 工艺方案试验表

试样编号	试样铺层	工艺方案		
SY-8	8层	通大气	预压实	吸胶
SY-10	10层	通大气	预压实	吸胶
SY-12-1	12层	通大气	预压实	吸胶
SY-12-2		抽真空	预压实	不吸胶
SY-12-3		抽半真空	预压实	吸胶
SY-12-4		抽真空	预压实	吸胶

Tavares等^[9]对蜂窝芯格内压力进行了测试并提出第一温度台阶开始,蜂窝芯格内测量的压力值维持在约40 kPa, P_c 通过内外压力平衡, $P_c=40$ kPa, 蜂窝孔格压力增大,树脂中的气泡压力(P_b)小于 P_c 时,根据勒夏原理,导致预浸料树脂中的气泡不再向胶线移动,滞留在预浸料中,形成层间孔隙。

笔者在相同铺层预浸料层时,设计了以下四种工艺方案:①采用0.15 MPa进行预压实吸胶,固化时真空通大气;②采用0.15 MPa进行预压实,固化时全过程抽真空,真空度0.08 MPa以上;③采用0.15 MPa进行预压实吸胶,固化时全过程抽半真空不大于0.04 MPa;④采用0.15 MPa进行预压实吸胶,固化时全过程抽真空,真空度0.08 MPa以上。试验时其余固化参数均按BMI/CF预浸料的固化参数,先对三种铺层选择相同固化参数实验并进行无损检测,仅选取无损缺陷零件进行后续工艺试验。

1.4 测试方法

(1)超声扫描检测方法。

利用超声A-扫描回波的基础信息,结合机械编码器及软件算法,在二维平面内移动并获取平面的每个点的超声A-扫描,将每个点的A-扫描转化为不

同色阶的像素点,把每个点的信息合成二维图像,将被检测物体的内部质量信息投影在平面图像上。用于复合材料检测结构损伤检测的超声频率一般在1~10 MHz,选用5 MHz探头,初始灵敏度0dB。

(2)孔隙率检测。

采用抛光研磨一体机对试样进行打磨,转速为50~600 r/min。

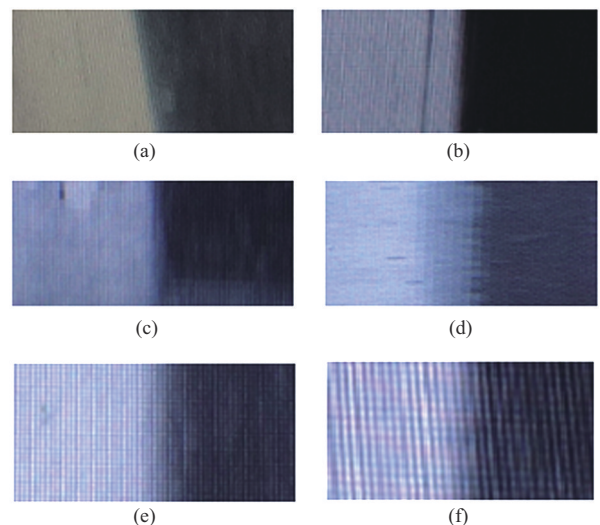
按照GB/T 38537-2020进行无损检测,按照GB/T 3365-2008进行孔隙检测。

用显微镜观察试样抛光面,试样的孔隙含量即用孔隙总面积与被测试样剖面面积之比求得。

2 结果与讨论

2.1 无损检测结果

试样SY-8,SY-10在第一种工艺方案试验后测得无损结果合格,因此不再进行后续的试验。仅对SY-12进行后续的三种工艺方案实验,用以验证不同铺层数及不同固化条件下夹层结构面板的无损质量。图3为各夹层面板的SEM图。图3a~图3c所示分别为SY-8,SY-10,SY-12在相同固化参数下的蜂窝区及面板区的无损检测结果;图3c~图3f分别为SY-12在4种不同工艺方案下的无损检测结果。蜂窝夹层区域显示出了较深的色差,层压区域显示出较浅的色差。



左侧阴影区域为层压区,右侧区域为蜂窝区的无损图

a—SY-8;b—SY-10;c—SY-12-1;d—SY-12-2;

e—SY-12-3;f—SY-12-4

图3 各夹层面板的SEM图

图4为不同工艺方案对超声衰减的影响。由图4可见,正常零件的无损衰减在-26~-33 dB之间,随着孔隙含量的增加,超声波在零件内部的反

射衰减减小。

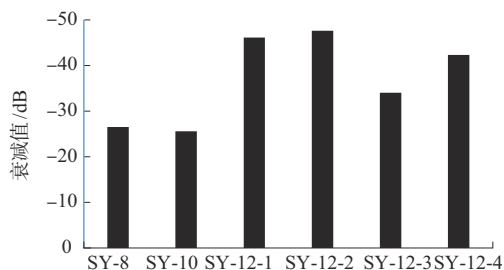


图4 不同工艺方案对超声衰减的影响

2.2 金相试验结果

6种工艺方案的孔隙含量如图5所示。图6为试样孔隙图片。在铺层为8层、10层时,孔隙率小于1%,在金相图片中只有个别的小圆孔,而当铺层为12层时,孔隙率则大于1%,且不同的工艺条件对于零件的孔隙影响很大,不进行吸胶的零件孔隙率为12.6%,其金相照片中出现了大量扁长条的孔隙,气孔四周的环境不能近似为各向同性,气孔左右为树脂,上下为纤维层。

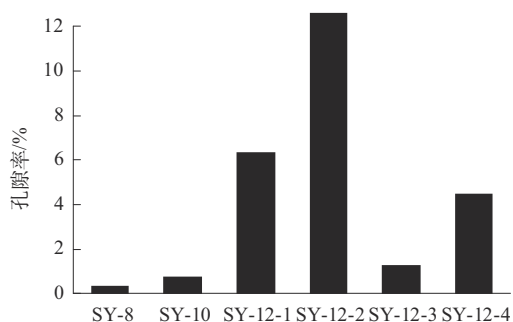
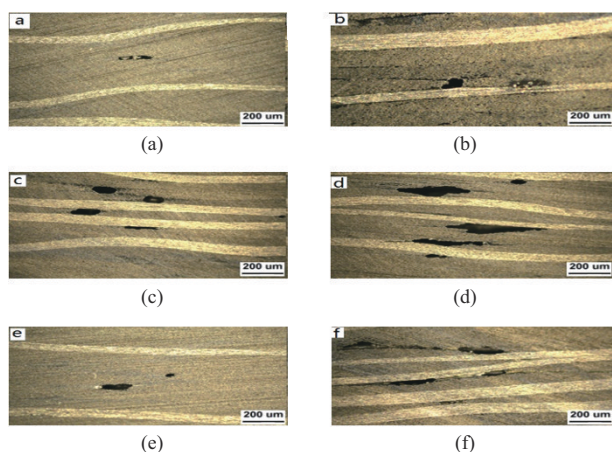


图5 不同工艺方案对孔隙率的影响



a—SY-8;b—SY-10;c—SY-12-1;d—SY-12-2;e—SY-12-3;f—SY-12-4

图6 试样孔隙图片

2.3 孔隙原因分析

预浸料制成的零件夹杂孔隙的原因,一是层与层之间因挥发分夹裹的气泡,二是纤维中树脂流出

过多引起的静压降低产生的层间空隙,三是铺贴过程中预浸料层间夹裹的空气。在此次实验过程中,对于铺层采用了预压实工艺,消除了铺贴过程中的空气夹裹,因此笔者不再对空气夹裹进行讨论。其余两种途径产生的孔隙可以通过固化过程排除气泡,需通过挥发分的扩散途径和压力的作用相互促进。

树脂在黏流态的时间保持足够长,并通过真空、压力作用向真空袋外和蜂窝芯空格中排出气泡,是固化过程中降低孔隙的关键因素。这个过程通常与树脂的特性相关,不同的树脂具有不同的固化特性。

与预浸料中的树脂相比,由于胶膜与预浸料的孔隙界面处的挥发分浓度较低,因此发生了挥发分向孔隙中的扩散。利用菲克扩散定律,挥发分在孔隙界面的扩散通量可以表示如公式(1):

$$J = -\rho D_{(T)} \frac{\partial C}{\partial r} \bigg|_r = R \quad (1)$$

其中: J 是扩散通量,单位 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; D 是扩散系数,单位 $1/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,它是温度的函数; ρ 是树脂密度, g/cm^3 ; C 是挥发分浓度($\text{g}_{\text{密质}}/\text{g}_{\text{溶液}}$), R 是孔隙半径。此处, $r=R$ 。求扩散通量的关键参数是孔隙界面处的浓度梯度 $\frac{\partial C}{\partial r}$ 。扩散的方向与孔隙和树脂界面处的浓度值(C_s)以及树脂本体中的浓度(C_0)有关。根据公式(1),扩散通量用 $C=C_s$ 和 $C=C_0$ 分别计算。如果 $C_s < C_0$ 挥发分扩散到界面中,导致扩散诱导的生长。由于胶层界面厚度约0.2 mm,随着挥发分向胶层界面移动,在较薄的胶层界面中挥发分浓度迅速升高,通过加温形成气体,一部分突破张力的限制,进入蜂窝孔格中,另一部分不足以破坏胶膜的表面张力,在胶层中形成气孔。胶层中 C_s 与预浸料树脂中 C_0 达成动态平衡后,挥发分将不再向蜂窝孔格侧移动,其排放方式只能是排出至零件表面或者是在零件层间形成孔隙。

BMI是一种挥发分含量较高的材料,BMI/CF预浸料的挥发分质量分数 $\leq 1.5\%$,其高挥发分更易于在固化周期的高温环节中产生挥发分,随着树脂浓度梯度发生变化,气态挥发分在无法排出的情况下形成孔隙。

(1)铺层对孔隙的影响。

表2为相同工艺参数下铺层对孔隙的影响。从表2可以看出,在SY-8预浸料层数为8层铺和SY-10

预浸料层数为10层铺层时,孔隙率<1%,但是当铺层厚度达到12层时,孔隙率迅速增加至6.37%。从SY-8和SY-10的金相图中可以看出,仅能看到少量小孔,且这些孔为圆孔状态,这是由于预浸料气孔四周的压力已逐渐趋于相同,气孔不再向胶线移动,最终被残留在树脂中。SY-12预浸料层数为12层,随着预浸料铺层的增加,挥发分通过向胶黏剂侧扩散和热压罐施压后,仍有大量挥发分残留,在升温过程中再次扩展形成条状孔隙。对于蜂窝夹层件的层压区域,在相同温度、压力、真空条件下随着铺层层数的增加,孔隙数量不断增加。

表2 相同工艺参数下铺层对孔隙的影响

试样编号	试样铺层/层	孔隙率/%
SY-8	8	0.37
SY-10	10	0.78
SY-12-1	12	6.37

(2)抽真空对孔隙的影响。

SY-12-1,SY-12-3和SY-12-4是在相同铺层预浸料时,对整个固化过程中选取了袋内真空压力为通大气、半真空和全真空的袋内真空压力制备零件,固化真空示意图如图7所示。第一升温阶段,通过抽真空将预浸料侧的树脂及挥发分向真空袋外抽出,降低了树脂侧的挥发分浓度;通过第二升温阶段的升温加压,将挥发分一部分扩散至胶黏剂一侧,另一部分通过热压罐罐压挤至零件边缘。

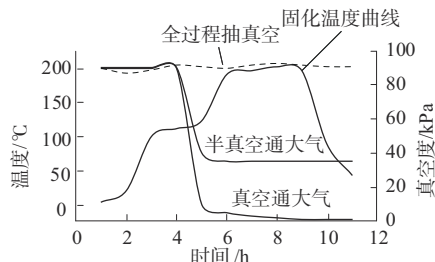


图7 固化真空示意图

SY-12-1试样采用的工艺是真空通大气。在120℃保温阶段结束时,真空通大气,即袋内真空压力 $P_b=0$,袋内零件的真空压力消失,预浸料层仅受罐压 P_{bag} 和芯格压力 P_c ,预浸料中的树脂仅受到挤压力,缺少侧向及表面向外抽的力,减少树脂及挥发分向零件边缘流动,树脂中挥发分浓度增加,导致 $C_s < C_0$,挥发分向胶黏剂一侧移动,当胶黏剂一侧的挥发分 C_s 与蜂窝孔格边缘表面张力与 C_0 形成动态平衡时,预浸料中仍有大量挥发分残留。由图6可见,挥发分会从胶膜界面扩散到树脂中,从而使

其挤压收缩,形成长条形孔隙,导致孔隙率>1.5%,超声波检测信号衰减53%。

SY-12-3试样采用的工艺是半真空,在120℃保温阶段结束时,将真空度降至0.03~0.04 MPa,保持至固化结束,通过抽真空降低零件中的树脂含量和部分挥发分,使零件厚度减薄,挥发分实际含量降低,而由于零件体积减少,其挥发分浓度 C_0 仍保持较高浓度, $C_s < C_0$,因此在第二阶段固化过程中,树脂侧的挥发分仍继续向胶黏剂侧扩散,持续降低树脂侧挥发分含量,再通过抽真空在罐压的作用下将零件压实,进而降低零件中的孔隙含量。

SY-12-4采用的工艺是全过程抽真空,从零件固化开始到固化结束持续保持全真空压力 P_b 。当罐压为0.3 MPa,真空度达到0.08 MPa以上时,树脂大量向外挤出,而零件厚度减小到极限后不再降低,在体积不变的情况下,树脂含量减小,内部静压减小,挥发分浓度降低, $C_0 < C_s$,胶黏剂侧的孔隙逐渐向树脂侧移动,胶黏剂侧的树脂含量和气孔均比通大气的树脂含量和气孔要少。由于内部静压减小,树脂及挥发分不再向外挤出,表面张力随着温度的升高而下降,重新膨胀,形成条状孔隙,致使内部孔隙率>1.5%,超声波检测信号衰减41%。

通过这三种工艺的无损和金相结果对比,再次验证了真空压力对于BMI/CF预浸料蜂窝夹层结构件的固化质量的影响。由于预浸料的高挥发分特性,导致了蜂窝夹层孔隙的变化与低挥发分预浸料的差异性。对于高挥发分材料需要通过实验摸索树脂与挥发分之间的关联,运用菲克扩散定律可以很好地解释孔隙出现的现象。

(3)预吸胶工艺对孔隙的影响。

SY-12-2没有采取吸胶工艺,SY-12-4采用吸胶工艺。SY-12-4的蒙皮采用了吸胶的工艺,吸胶零件的剖面上实体胶瘤出现较少,剖面胶线上的气孔很少,主要是由于表层预浸料的树脂被吸走导致下蒙皮表层处于贫胶的状态,在后续固化周期中下蒙皮预浸料中的树脂优先填充表层预浸料,导致溢出胶线的树脂减少。

而未采取吸胶措施的零件剖面上出现了数量和尺寸都较大的胶瘤,且胶瘤中有大量的气泡。蒙皮表面受真空袋压力影响树脂在110℃时向上流动,在零件的表层形成了一层0.003~0.01 mm的树脂层,而下表面由于受芯格内压力的影响,树脂逐

渐向下蒙皮与芯格黏接的胶线处移动,最终导致下蒙皮产生较大胶瘤。胶瘤主要是树脂堆积产生的,而树脂又由于水分、挥发分等产生气孔将其从预浸料中挤出,因此过多的胶瘤既影响了零件层压区的树脂含量,又因为大胶瘤自身重力的问题导致气孔排出不畅。层压区的金相图片显示在不同的纤维层上出现了大量的长条形孔隙。通过无损检测也证明了这一现象,即吸胶工艺明显优于不吸胶工艺。

3 结论

(1)通过三种铺层层数的试验,验证了BMI/CF零件预浸料层数 ≤ 10 层时,采用通大气、吸胶固化工艺,其蜂窝夹层零件制造中无损质量较好,零件整体孔隙率小于1.5%,而当预浸料层数 > 10 层时,相同固化工艺条件下零件整体孔隙率大于1.5%。

(2)菲克扩散定律和表面张力很好地解释了通大气、半真空及全真空的无损结果和孔隙结果,真空对于挥发分含量较高的预浸料有较大的影响,其结果表明,在半真空固化条件下的孔隙含量最低。

(3)吸胶工艺明显降低了BMI/CF材料中的孔隙含量,降低了蜂窝孔格中的胶瘤含量。

参考文献

- [1] Iredale R J, Ward C, Hamerton I. Modern advances in bismaleimide resin technology: A 21st century perspective on the chemistry of addition polyimides[J]. *Progress in Polymer Science*, 2017, 69:1–21.
- [2] Sun P, Zhao Y, Luo Y, et al. Effect of temperature and cyclic hygro-thermal aging on the inter laminar shear strength of carbon fiber/bismaleimide(BMI) composite[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(8–9):4 341–4 347.
- [3] Park J M, Kim J W, Yoon D J. Interfacial evaluation and micro failure mechanisms of single carbon fiber/bismaleimide(BMI) composites by tensile and compressive fragmentation tests and acoustic emission[J]. *Composites Science and Technology*, 2002, 62(6):743–756.
- [4] Hsiao H M, Lee S M, Buyny R A. Core crush problem in manufacturing of composite sandwich structures: Mechanisms and solutions [J]. *AIAA Journal*, 2006, 44(4):901–907
- [5] 陈蔚,成理,叶宏军,等. Nomex蜂窝夹层复合材料的成型工艺研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2017(7):70–73.
Chen Wei, Cheng Li, Ye Hongjun, et al. Study on the forming process of composites filled with nomex honeycomb sandwich structure[J]. *Fiberglass Reinforced Plastic/Composite Material*, 2017(7):70–73.
- [6] Centea T, Grunenfelter L K, Nutt S R. A review of out-of-autoclave prepregs-material properties, process phenomena, and manufacturing considerations[J]. *Composites Part A*, 2015(70): 132–154.
- [7] Grunenfelter L K, Nutt S R. Void formation in composite prepregs-effect of dissolved moisture[J]. *Composites Science and Technology*, 2010, 70(16):2 304–2 309.
- [8] Plessix BDPD, Lefebvre P, Boyard N, et al. In situ real-time 3D observation of porosity growth during composite part curing by ultra-fast synchrotron X-ray microtomography[J]. *J Compos Mater*, 2019, 53(28-30). DOI:10.1177/0021998319846260.
- [9] Arefmanesh A, Advani S G, Michaelides E E. A numerical study of bubble growth during low pressure structural foam molding process [J]. *Polymer Engineering and Science*, 1990, 30(20):1 330–1 337.
- [10] Wood J R, Bader M G. Void control for polymer-matrix composites (1): theoretical and experimental methods for determining the growth and collapse of gas bubbles[J]. *Composites Manufacturing*, 1994, 5(3):139–147.
- [11] Arefmanesh ALI. Numerical and experimental study of bubble growth in highly viscous fluids[D]. Newark: University of Delaware, 1991.
- [12] Amon M. Theoretical & experimental study of foam growth dynamics with application to structural foam molding[D]. Newark: University of Delaware, 1983.
- [13] Han C D, Yoo H J. Studies on structural foam processing. IV. Bubble growth during mold filling[J]. *Polym Eng Sci*, 1981, 21(9). DOI:10.1002/pen.760210903.
- [14] Bascom W D, Cottingham R L. Air entrapment in the use of structural adhesive films[J]. *The Journal of Adhesion*, 1972, 4(3): 193–209.
- [15] Pearce P J, Arnott D R, Camilleri A, et al. Cause and effect of void formation during vacuum bag curing of epoxy film adhesives [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 1998, 12(6): 567–584.
- [16] 原崇新,李敏,顾轶卓,等. 蜂窝夹层结构真空袋共固化工艺过程实验研究[J]. *复合材料学报*, 2008, 25(2):42–45.
Yuan Chongxin, Li Min, Gu Yizhuo, et al. Experimental study on the co curing process of honeycomb sandwich structure vacuum bags[J]. *Journal of Composite Materials*, 2008, 25(2):42–45.
- [17] 彭公秋,杨进军,曹正华,等. T700S/QY8911 复合材料界面匹配研究[J]. *航空材料学报*, 2011, 31(2):43–48.
Peng Gongqiu, Yang Jinjun, Cao Zhenghua, et al. Study on interface compatibility of T700S/QY8911 composite[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2011, 31(2):43–48.
- [18] Tavares SS, Michaud V, Manson JAE. Through thickness air permeability of prepregs during cure[J]. *Composites Part A*, 2009, 40:1 587–1 596.