复合材料学报 第30卷 第4期 8月 2013年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 30 No. 4 August 2013

文章编号：1000-3851(2013)04-0156-07

一种新型自粘接预浸料-Nomex蜂窝板面-芯结合强度关键影响因素试验研究

米莹娟[1]，王 伟[2]，张冬梅[3]，白光辉[1]，张博明*[1]
（1. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院，空天先进材料与服役教育部重点实验室，北京 100191；
2. 航天材料及工艺研究所 先进功能复合材料重点实验室，北京 100076；3. 上海飞机制造有限公司，上海 200122）

摘 要： 以Nomex蜂窝和新型自粘接预浸料作为试验材料，通过采用均压板的共固化工艺制备蜂窝夹层板。采用滚筒剥离方法测试其面-芯结合性能，采用电子显微镜等方法观察其蒙皮-蜂窝粘接面、剥离后蒙皮表面结构及蜂窝壁端面的微观形态，并测试了蜂窝壁厚度与蜂窝壁浸渍的树脂成分。结合以上测试结果研究了在采用均压板的制备过程中工艺参数和蜂窝特征对蜂窝夹层板面-芯结合强度的影响规律，并考察了蜂窝夹层板的粘接形式。结果表明：在采用均压板模具的共固化工艺中，一定的升温速率范围内，蜂窝板的面-芯结合强度随着升温速率的减小而增大；而加压时机对蜂窝板的面-芯结合强度的大小没有明显的影响；蜂窝壁端面越粗糙、蜂窝壁树脂层厚度越小，夹层板的面-芯结合强度越好。

关键词： 复合材料；蜂窝夹层结构；共固化工艺；剥离强度；滚筒剥离
中图分类号： TB332 **文献标志码：** A

Experimental investigation of key factors on adhesive properties of skin - core for honeycomb sandwich panel with self-adhesive prepreg

MI Yingjuan[1], WANG Wei[2], ZHANG Dongmei[3], BAI Guanghui[1], ZHANG Boming*[1]
(1. Key Laboratory of Aerospace Advanced Materials and Performance (Ministry of Education), School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Advanced Functional Composite Material Laboratory of Aerospace Materials and Technology Research Institute, Beijing 100076, China; 3. Shanghai Aircraft Manufacturing Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: Nomex honeycomb and smart self-adhesive prepreg were used to manufacture honeycomb sandwich panels with uniform platen by co-curing process in autoclave. Climbing drum peel test was used to measure their peel strength, and scanning electron microscope was used to observe micromorphology of bonding interface of skin-honeycomb, and the structure of the skin surface after peel and cellular wall ends. Moreover, thickness of cellular wall and composition of impregnated resin were also measured. Combined with the above test results, effects of processing parameters and character of cellular wall ends on the peel strength of honeycomb sandwich panels were studied and types of the adhesive bonding between skin and core were also investigated. It is found that the bond strength increases with the decrease of the temperature ramp rate within a certain range during the co-curing process with uniform platen. However, the pressure-applied moment has no significant effect on bond strength between the skin and core. The honeycomb sandwich panel has higher bond strength when the cellular wall end is rougher or the thickness of the resin layer on the cellular wall is smaller.

Keywords: composite; honeycomb sandwich structure; co-curing process; peel strength; climbing drum peel

复合材料蜂窝夹层结构主要由两个薄且刚度高的复合材料面板与一个厚且密度低的蜂窝芯材粘接组成，可看作是一种多孔复合材料结构，其质量轻、强度高，具有最优比强度、比刚度与抗弯刚度

收到初稿日期： 2012-07-04；**收到修改稿日期：** 2012-11-07；**网络出版时间：** 2013-01-18 13:52:29
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20130118.1352.031.html
DOI： CNKI：11-1801/TB.20130118.1352.031
基金项目： 国家科技部重大基础研究项目
通讯作者： 张博明，教授，主要从事复合材料工艺、健康监测、固化变形、界面性能及力学性能研究 E-mail：zbm@buaa.edu.cn

较佳等性能优点[1-5]。因此轻质高强的复合材料蜂窝夹层结构在需要高强度与高刚度/质量比的航空航天等领域得到广泛应用，且越来越多地作为主承力及次承力结构替代传统材料，如飞机副翼、扰流板、机舱内饰等[6]

蜂窝夹层结构主要是由只能提供较小面积的蜂窝壁与蒙皮粘接而成，蜂窝夹层结构的性能(尤其平拉强度、层内剪切强度等)强烈依赖于面-芯结合情况[7]，因此增大蒙皮与芯材间的面-芯结合强度是提高蜂窝夹层结构性能的基本目标之一。Grove[7]在碳纤维/环氧预浸料与 Nomex 蜂窝体系下，通过滚筒剥离及微观界面的观察，讨论了工艺参数对蜂窝板面-芯结合强度的影响；原崇新等[8]研究了树脂流动对胶瘤面积和面板孔隙缺陷的影响及胶接强度与胶瘤面积的关系；Tavares 等[9]在真空袋工艺条件下分析了压力大小对蜂窝夹层板蒙皮质量与胶瘤的影响；Choi 与 Jang[10]分析了不同工艺及湿热环境对蜂窝夹层板面-芯结合强度的影响；由于蜂窝壁只能提供较小的面积用于粘接，在蒙皮与蜂窝壁间形成较好的胶瘤有助于提高蜂窝夹层板的面-芯结合性能，Rion 等[11]给出了二次共固化工艺下使用胶膜进行制备蜂窝夹层板的胶瘤预测模型；Okada[12]研究了树脂胶瘤对蜂窝夹层板剥离性能的影响。

在共固化工艺中采用均压板技术制备自粘接预浸料-Nomex 蜂窝夹层板，针对工艺参数、芯材特性等因素对于层板面-芯结合强度作用机制与影响规律的研究还未见公开报道。为满足工程实践过程中对于自粘接预浸料-Nomex 蜂窝夹层板面-芯结合强度预报与评价的迫切需求，本文中以一种自粘接预浸料-Nomex 蜂窝夹层板为对象，采用均压板共固化工艺，结合光学电子显微镜观察和滚筒剥离实验等手段，研究了共固化工艺条件下采用均压板技术制备蜂窝层板过程中，升温速率、加压时机等关键工艺参数和蜂窝壁端面微观形貌、蜂窝壁厚度、蜂窝浸渍树脂等材料参数对于层板面-芯结合部位微观结构特征和粘结强度的影响规律。研究结果将对实际工程中采用均压板共固化工艺制备蜂窝夹层板的工艺参数选择及蜂窝芯材选材方面具有指导意义。

1 实验材料及方法

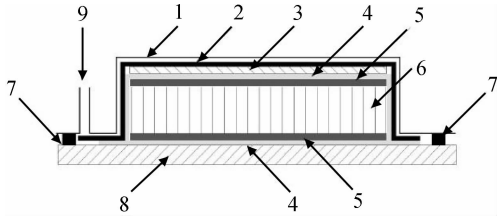
1.1 原材料

1581 玻璃纤维/酚醛预浸料，航天材料及工艺研究所；Nomex 蜂窝：规格 1.83～48 mm(孔径 1.83 mm，密度 48 kg/m^3)，北京航空材料研究院与 Hexcel 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 蜂窝夹层板的制备

裁剪预浸料与蜂窝成一定大小，在蜂窝的上下表面各铺放一层预浸料，其中预浸料树脂含量稍高且略显不均匀的纬纱面与蜂窝芯粘接，预浸料纬向与蜂窝条带方向一致，在蜂窝夹层板上加盖一层与制备件大小相同的均压板。然后按照图 1 所示的真空袋密封方法进行组合密封体系，放入热压罐中加热加压成型。



1－Vacuum bag；2－Breather/bleeder cloth；3－Uniform platen；4－Porous release film；5－Skin；6－Core；7－Sealant tape；8－Mould tool；9－Vacuum pump

图 1 蜂窝夹层板制备结构示意图

Fig. 1 Schematic of honeycomb sandwich panel manufacture

固化工艺如图 2 所示，温度从室温升至 80 ℃恒温 60 min，然后升至 130 ℃恒定 70～80 min，成型全程抽真空，在 80 ℃恒温平台上加压 0.3 MPa，在降温阶段卸掉外压，同时保持真空，降温至 50 ℃以下即可出罐。本实验中考察了工艺参数对蜂窝夹层板面-芯结合强度的影响，分别研究了升温速率与加压时机两个工艺参数对蜂窝夹层板面-芯结合强度的影响，设计实验如表 1 所示。

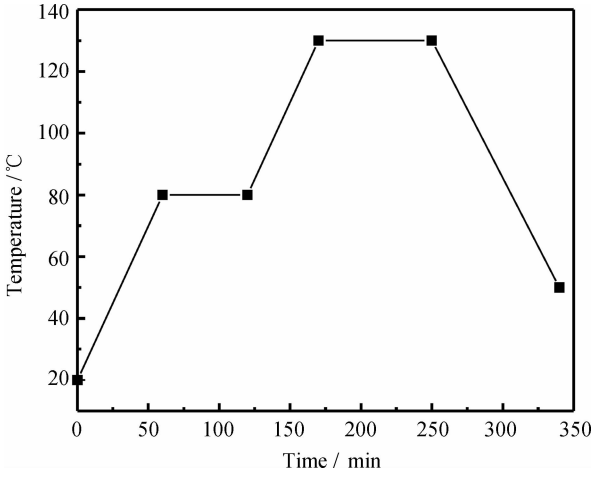


图 2 蜂窝夹层结构的共固化温度制度

Fig. 2 Temperature profile in co-curing process of honeycomb sandwich structure

表 1　试验设计方案

Table 1　Experimental design form

Test number	Temperature ramp rate/(℃·min^{-1})	Pressure application time at 80 ℃/min
1	1.5	0
2	1.0	30
3	1.5	30
4	2.0	30
5	1.5	60

1.2.2　蜂窝板面-芯结合强度测试

蜂窝夹层板的面-芯结合强度通过滚筒剥离实验，采用 ASTM D1781 标准进行测试，该标准要求试样宽 76 mm，长度至少 305 mm(包括在同一侧两端各 25 mm 用于夹紧的蒙皮，如图 3 所示)，由于力学试验机的限制，长度缩减到 235 mm，这仍能提供得到剥离载荷稳定值的有效长度[8]。根据标准，切割长度方向沿着蜂窝条带方向及垂直条带方向相同数量的试样。剥离试样在 WDW－300 微控电子万能试验机(最大载荷 30000 kg，长春可信试验仪器有限公司)上进行，加载速率 25.4 mm/min，实验结构如图 4 所示。本文中改变了加压时机与升温速率两个参数，研究这两个工艺参数对蜂窝夹层板面-芯结合强度的影响。在自动记录的载荷-位移曲线上选取有效数据计算剥离力，并按照标准中的校准方法，计算蜂窝板的净剥离力。

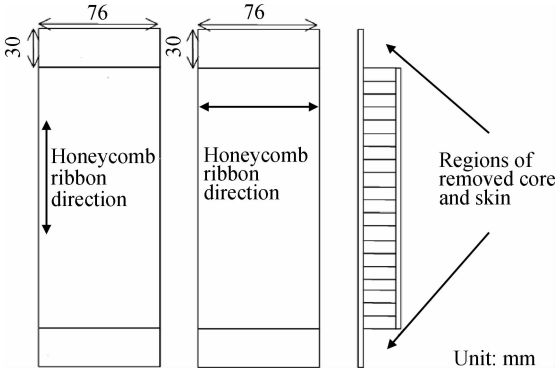


图 3　滚筒剥离试样结构示意图(不按比例)

Fig. 3　Test samples for climbing drum peel test (not to scale)

1.2.3　界面观察及蜂窝性能测试

把切割得到的小块蜂窝夹层板的外侧面用酒精清洗干净并吹干，采用 VHX－900 光学显微镜(KEYENCE 公司)观察蜂窝壁与蒙皮的粘接界面。将剥离实验结束后剥离下来的蒙皮用单反数码相机

图 4　试验机上滚筒剥离试验结构

Fig. 4　Climbing drum peel test fixture installed in tensile machine

(佳能 40D)进行拍照观察。蜂窝芯材端面的微观形貌使用 VHX－900 光学显微镜(KEYENCE 公司)进行观察；对蜂窝壁进行切割处理，保证切割后端面平滑整齐，采用 VHX－900 电子显微镜对蜂窝壁厚度进行测量，每种蜂窝分 15 组，每组测 4 个值，共测出 60 组进行统计计算蜂窝壁的厚度。裁剪一小块蜂窝壁与溴化钾一起研磨后压片，在 Spectrum400 型红外光谱仪(PE 公司)上测试蜂窝壁浸渍的树脂化学结构。

2　结果与讨论

2.1　工艺参数对面-芯结合强度的影响

蜂窝夹层板制备过程中的参数控制很大程度上决定了其性能的好坏，其剥离试验结果如图 5 所示，图中误差耙为三组数据中最大和最小值。

由图 5 可知，对比纵向和横向剥离试验的结果，总体趋势一致，但对蜂窝板进行横向剥离的力大于纵向的剥离力，可解释为：沿蜂窝纵向，即试样长度方向与蜂窝条带方向相同，进行剥离试验时，剥离的是蒙皮与蜂窝间有限的点接触；而沿着蜂窝横向进行剥离试验时，剥离的是蒙皮与蜂窝间的线接触，所需要的剥离力要大于剥离点接触的力。

对于加压时机相同，而升温速率不同的 2、3、4 组试验，由试验结果(如图 5 所示)可知，在试验范围内，随着升温速率的升高，蜂窝板的剥离强度减小。升温速率较低时，预浸料中的小分子及反应过程中产生的小分子等有足够的时间挥发出去；而升温速率较高时，使得气体挥发通道过早地关闭，

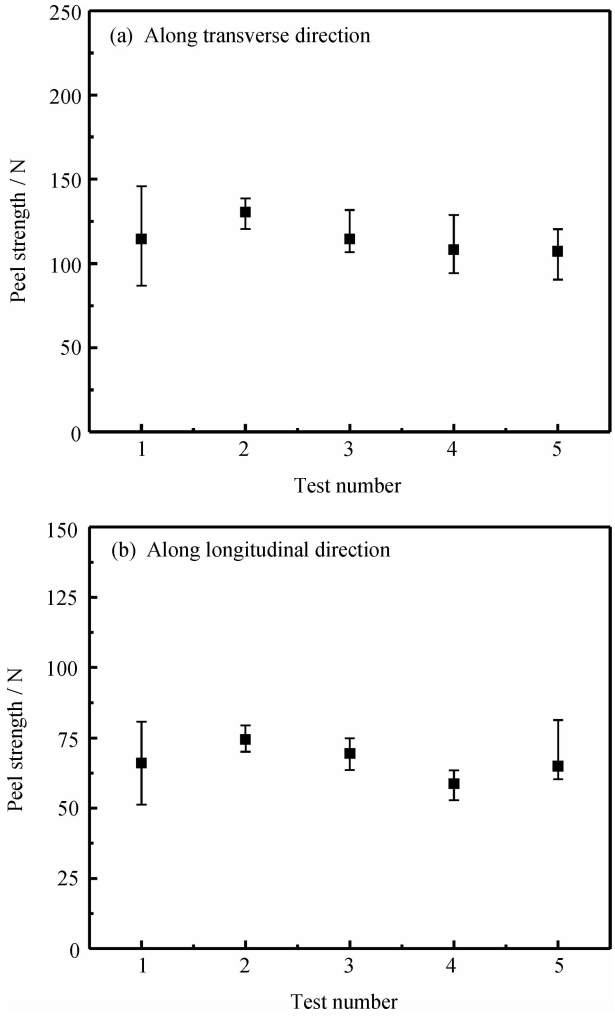


图 5　蜂窝剥离试验结果

Fig. 5　Experimental results of peel test for honeycomb sandwich panel

且预浸料局部固化较快，挥发分及小分子不能及时地挥发出去而残留在材料中形成气泡，影响胶瘤的形成及其质量。

升温速率相同时，加压时机对蜂窝板面-芯结合强度的影响如图 5 中第 1、3、5 组试验结果所示，当改变加压时机时，蜂窝板的剥离力变化不大，加压时机的改变对蜂窝板剥离强度的影响很小，制备蜂窝板时蜂窝板上加盖一层模具——均压板，当温度达到 80 ℃时，树脂已经熔融，并全程抽真空，此时外压及均压板的重力全部作用在与蜂窝壁相接触的预浸料上，而蜂窝胞范围内的预浸料几乎没有受到压力，这样使得蜂窝壁嵌入到预浸料中，树脂大面积流动受到阻碍，树脂流动限制在蜂窝胞大小的面积内。因此采用均压板情况下，加压阻碍树脂的大面积熔融流动，使得不同加压时机对蜂窝板的胶瘤形成及面-芯结合强度影响较小。

2.2　蜂窝壁对面-芯结合强度影响

蜂窝夹层板的芯材性能对其性能也有一定影响，与蒙皮相粘接的蜂窝壁端面微观结构、厚度及表面树脂等均会对蒙皮/蜂窝壁间胶瘤的形成及粘接形式造成一定的影响，进而影响蜂窝夹层板面-芯结合强度。图 6 为两种规格相同的 Nomex 蜂窝制备蜂窝夹层板的蜂窝壁对面-芯结合强度影响的实验结果。可以看出，在相同工艺条件下制备的蜂窝板，采用 Hexcel 公司的蜂窝制备的蜂窝板面-芯结合强度明显要高于北京航空材料研究院的蜂窝制备的蜂窝板性能。图 7 为蜂窝壁端微观形貌。可以看出，Hexcel 公司的蜂窝壁端面有较多的纤维露出，界面比较粗糙(图 7(a))，而北京航空材料研究院的蜂窝壁端面虽也有少量的纤维露出(图 7(b))，但明显比 Hexcel 公司的蜂窝壁端面露出纤维少很多。蜂窝壁与蒙皮接触采用预浸料中的树脂粘接时，蜂窝端面纤维露出越多，界面越粗糙，会有较多的纤维进入到树脂中，同时也有较多树脂进入到蜂窝壁内，致使粘接更好，从而使整个蜂窝夹层板的面-芯结合强度增大。

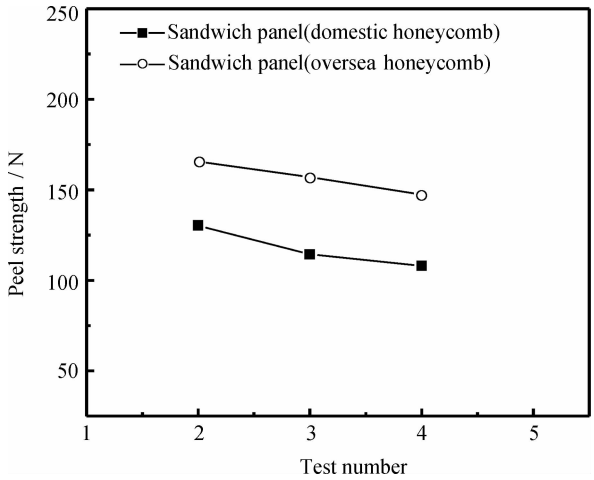
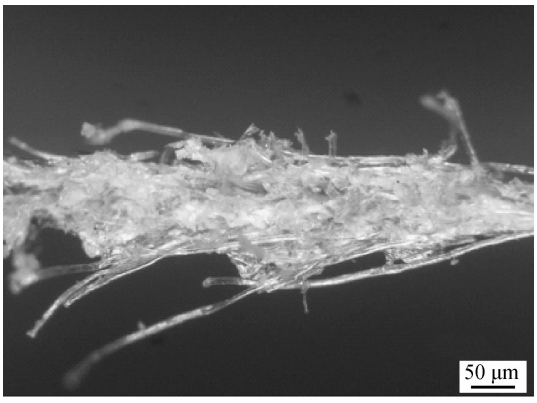


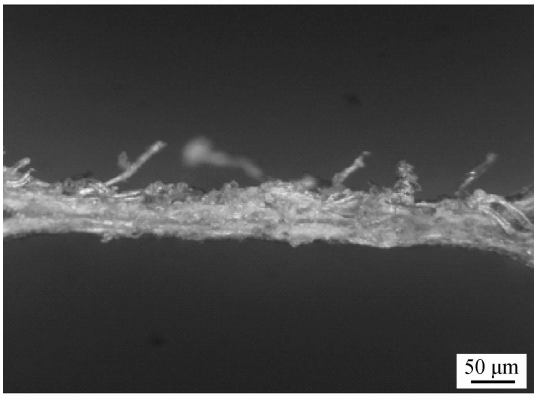
图 6　不同工艺条件下蜂窝夹层板剥离试验结果

Fig. 6　Results of peel test for different honeycomb sandwich panels

对 Hexcel 公司的蜂窝进行测量，测得其蜂窝壁厚度为 55.04 μm；测量北京航空材料研究院制备的蜂窝，其蜂窝壁厚度为 58.52 μm。由实验结果结合图 6 剥离试验结果可知：蜂窝壁厚度越厚，蜂窝夹层板的面-芯结合强度越小。蜂窝是由芳纶纤维浸渍树脂固化而制备的，蜂窝壁可认为是纤维



(a) Oversea honeycomb



(b) Domestic honeycomb

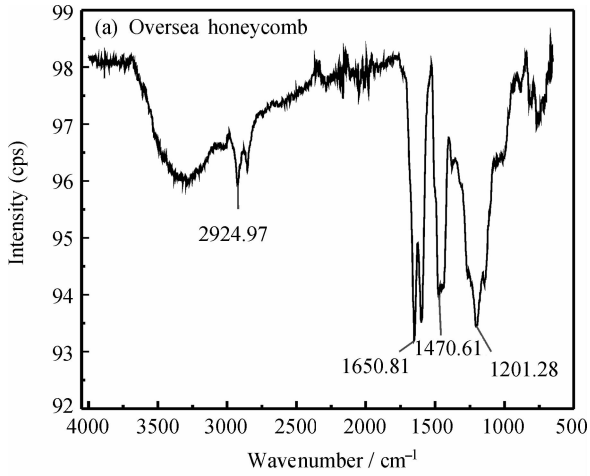
图 7　蜂窝壁端面微观形貌

Fig. 7　Morphologies of cellular wall end

浸渍部分树脂固化形成的蜂窝壁与蜂窝壁表侧的过多树脂形成的树脂层两部分，蒙皮与蜂窝壁粘接时，若蜂窝壁上的树脂层厚度越大，则会使其面-芯结合强度降低[13]。

图 8 为蜂窝壁浸渍树脂的红外测试结果。可以看出，具有相同的主要基团特征峰：3286.97 cm^{-1} 处是 O—H 的伸缩振动吸收峰；2924.97 cm^{-1} 是 C—H 的伸缩振动吸收峰；1599.21、1436.16 cm^{-1} 是苯环 C═C 双键的伸缩振动吸收峰。这些特征峰与固化后酚醛树脂的特征峰相符，且两种蜂窝浸渍使用的酚醛树脂的化学结构基本相同。

基于以上分析，两种相同规格的蜂窝所浸渍的树脂成分基本相同，蜂窝壁端面的粗糙度与蜂窝壁厚度不同。蜂窝壁端面短纤维露出越多端面越粗糙，蜂窝板的面-芯结合强度越好；而当蜂窝壁越厚即蜂窝壁上树脂层的厚度越厚时，所制备的蜂窝板的面-芯结合强度相应降低；因此蜂窝壁端面的粗糙度及蜂窝壁上树脂层厚度对蜂窝板面-芯结合强度的影响有重要作用。



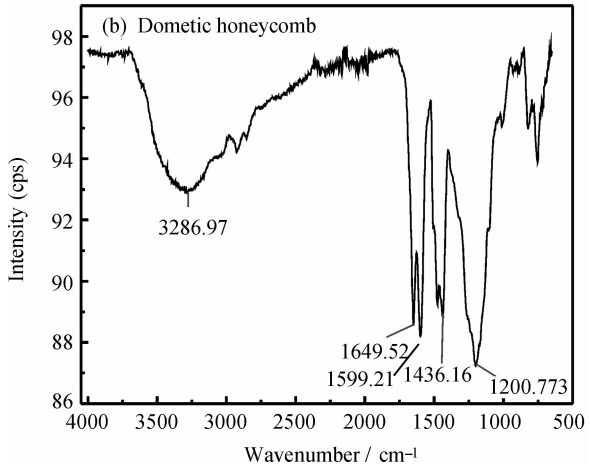


图 8　蜂窝壁浸渍树脂的红外谱图

Fig. 8　FTIR spectra of resin on honeycomb cell wall

2.3　蜂窝夹层板粘接形式

面-芯结合强度是蜂窝夹层板的主要性能之一，主要靠蜂窝壁与蒙皮较小的面积用于粘接，如何用较小的粘接面积得到最大的面-芯结合强度，需要清楚了解蜂窝壁与蒙皮间的粘接形式。

图 9 为蒙皮-蜂窝粘接界面微观形貌照片。可以看出，蜂窝与蒙皮间主要靠树脂在蜂窝壁上形成的胶瘤进行粘接，形成的胶瘤越大形状越规则，蜂窝板的剥离强度越大，4# 实验升温速率 2 ℃/min，相对较大，气泡没有足够的时间溢出而留在了胶瘤内部，使得蜂窝板的剥离强度受到气泡的影响而降低。

图 10 为剥离后蒙皮表面结构照片。可知，剥离破坏区主要发生在胶瘤底部与面板接触处及部分蜂窝壁处。面-芯剥离强度较好的 2# 实验蜂窝板的蒙皮表面上留有相对较多的树脂，且有部分的蜂窝

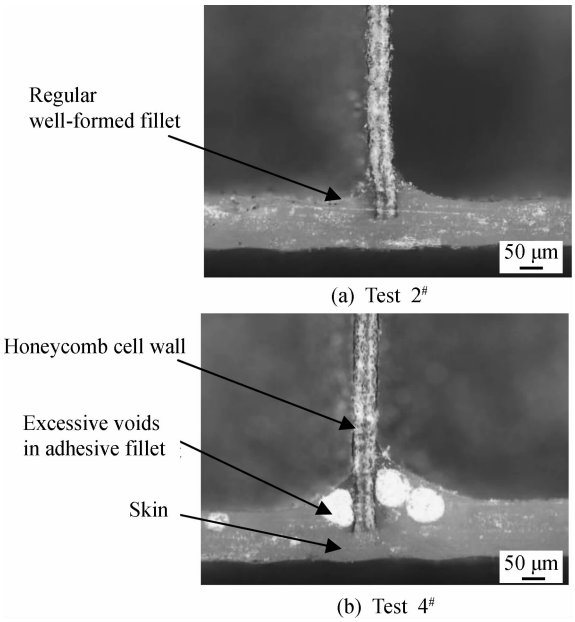


图 9　蒙皮-蜂窝粘接界面微观形貌

Fig. 9　Sample micrographs of bonding interface between skin and honeycomb

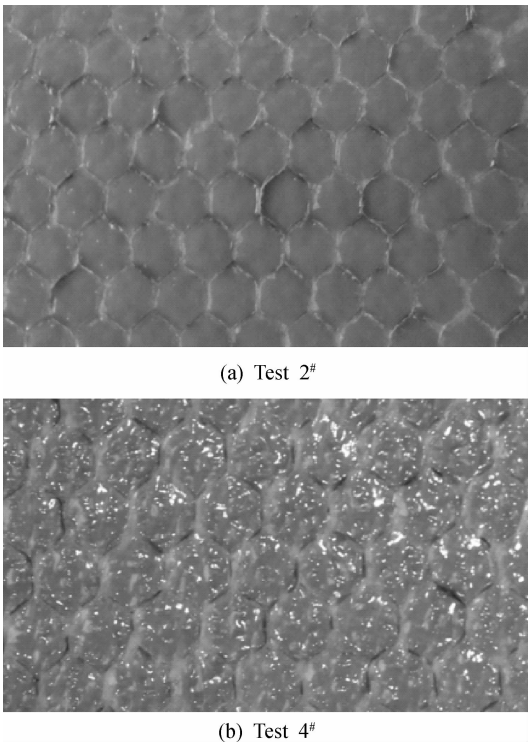


图 10　剥离后蒙皮表面结构

Fig. 10　Surface structure of skin after peeled

壁留在蒙皮上。4# 实验蜂窝板虽然也有树脂及部分蜂窝壁留在蒙皮上，但有很明显的气泡留在上面，与粘接界面的观察结果相符。

结合剥离后蒙皮表面结构特征可知，胶瘤底部主要是靠蜂窝壁端面与蒙皮上树脂粘接，蜂窝壁处的断裂是由于形成了胶瘤。蜂窝壁的端面较为粗糙、短纤维露出较多，进入到树脂中，增加蜂窝壁与蒙皮的面-芯结合强度；形成胶瘤越大越规则，蜂窝壁与蒙皮粘接越好。由此可知：蜂窝夹层板的粘接形式主要是树脂在蜂窝壁上形成一定大小和形状的胶瘤，蜂窝壁端面露出短纤维能够增强其面-芯结合强度。

3　结　论

采用 Nomex 蜂窝、自粘接预浸料在使用均压板的共固化工艺下制备蜂窝夹层板，就工艺参数及蜂窝芯材性能等主要影响因素对蜂窝夹层板面-芯结合强度的影响关系进行研究分析，得到以下结论。

（1）实验升温速率范围内，蜂窝夹层板的面-芯结合强度随着升温速率的减小而增大；加压时机对蜂窝夹层板的面-芯结合强度没有明显影响。

（2）由蜂窝夹层板的滚筒剥离及微观界面观察实验可知：蜂窝夹层板沿蜂窝横向的面-芯结合强度大于沿纵向的结合强度；蜂窝夹层板面-芯主要靠蒙皮中树脂浸入并沿着蜂窝壁所形成的胶瘤与蜂窝壁端面露出并进入到蒙皮树脂中的短纤维进行粘接。

（3）对比两种蜂窝壁性能，蜂窝壁端面露出的短纤维越多，制备出的蜂窝夹层板面-芯结合强度越高；蜂窝壁上树脂层厚度越大，蜂窝夹层板面-芯结合强度越低。

参考文献：

[1] Abbadi A, Koutsawa Y, Carmasol A. Experimental and numerical characterization of honeycomb sandwich composite panels [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2009, 17(10): 1533-1547.

[2] Aktay L, Johnson A F, Kröplin B H. Numerical modelling of honeycomb core crush behavior [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(9): 2616-2630.

[3] Othman A R, Barton D C. Failure initiation and propagation characteristics of honeycomb sandwich composites [J]. Composite Structures, 2008, 85(2): 126-138.

[4] Heimbs S, Schmeer S, Middendorf P. Strain rate effects in phenolic composites and phenolic - inpregnated honeycomb structures [J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(13): 2827-2837.

[5] 郭兴旺，许文浩. 复合材料蜂窝板脉冲热像检测和调制热像

检测的比较研究 [J]. 复合材料学报，2012，29(2)：172-180.
Guo Xingwang，Xu Wenhao. Comparative study on pulsed thermography and modulated thermography of composite honeycomb panels [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2012，29(2)：172-180.

[6] Giglio M，Manes A，Gilioli A. Investigations on sandwich core properties through an experimental - numerical approach [J]. Composites Part B，2012，43(2)：361-376.

[7] Grove S M，Popham E，Miles M E. An investigation of the skin/core bond in honeycomb sandwich structures using statistical experimentation techniques [J]. Composites Part A，2006，37(5)：804-812.

[8] 原崇新，李　敏，顾轶卓. 蜂窝夹层结构真空袋共固化工艺过程试验研究 [J]. 复合材料学报，2008，25(2)：57-62.
Yuan Chongxin，Li Min，Gu Yizhuo. Experimental study of the cocure process with the vacuum bag method for honeycomb sandwich structure [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2008，25(2)：57-62.

[9] Tavares S S，Caillet - Bois N，Michaud V. Vacuum - bag processing of sandwich structures：Role of honeycomb pressure level on skin - core adhesion and skin quality [J]. Composites Science and Technology，2010，70(5)：797-803.

[10] Choi H S，Jang Y H. Bondline strength evaluation of cocure/procured honeycomb sandwich structures under aircraft hygro and repair environments [J]. Composites Part A，2010，41(9)：1138-1147.

[11] Rion J，Leterrier Y，Månson J E. Prediction of the adhesive fillet size for skin to honeycomb core bonding in ultra - light sandwich structures [J]. Composites Part A，2008，39(9)：1547-1555.

[12] Okada R，Kortschot M T. The role of the resin fillet in the delamination of honeycomb sandwich structures [J]. Composites Science and Technology，2002，62(14)：1811-1819.

[13] 杨宝林，顾　军，郑　涛. 泥饼厚度对固井二界面胶接强度的影响 [J]. 钻井液与完井液，2009，26(1)：43-46.
Yang Baolin，Gu Jun，Zheng Tao. The influnences of mud cake thickness on bonding strength of the cement-formation interface [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid，2009，26(1)：43-46.