复合材料学报 第26卷 第4期 8月 2009年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 26 No. 4 August 2009

文章编号：1000-3851(2009)04-0029-07

Nomex 蜂窝夹层结构真空袋共固化过程蜂窝变形

郑义珠，顾轶卓*，孙志杰，李 敏，张佐光
（北京航空航天大学 材料科学与工程学院 空天材料与服役教育部重点实验室，北京 100191）

摘 要： 针对蜂窝夹层板的共固化工艺，以玻璃纤维120斜纹织物/环氧5224体系为面板，以Nomex蜂窝为夹芯材料，研究了蜂窝侧向抗压刚度的影响因素，并通过自行建立的成型过程气压测试装置，分析了芯材内压的影响因素及蜂窝的变形情况。结果表明：对于孔格边长和芯材高度较大的情况，蜂窝侧向抗压能力较小，在真空压力的作用下容易发生变形；芯材内压与芯材内气体的膨胀和预浸料铺层的渗透性直接相关，因此芯材内压受温度制度、预浸料层数和胶膜影响较大；芯材内压对抵抗蜂窝变形起到重要作用，预浸料凝胶前较大的芯材内压有利于抑制蜂窝变形的发生。

关键词： 蜂窝夹层结构；共固化工艺；芯材变形；芯材内压
中图分类号： TB332 **文献标志码：** A

Core crush of Nomex honeycomb sandwich structure during cocuring process with vacuum bag

ZHENG Yizhu, GU Yizhuo*, SUN Zhijie, LI Min, ZHANG Zuoguang
(Key Laboratory of Aerospace Materials and Performance (Ministry of Education), School of Materials Science & Engineering, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: By using glass fiber 120 twill fabric/epoxy 5224 as the panel and Nomex honeycomb as the core, the ability of resisting the lateral distortion of honeycomb cores was investigated. For cocuring process with the vacuum bag, a gas pressure measuring method was established and was used to study the influence factors of core internal pressure and the relationship between core internal pressure and core crush. It is found that the ability of the honeycomb core to avoid core crush is limited, especially for large core grid length and core thickness. Core internal pressure has close relation with the expansion of core gas and permeability of prepreg stack, so core internal pressure is affected significantly by the temperature cycle, the number of prepreg plies and adhesive film. Moreover, the core internal pressure plays an important role in avoiding core crush. Larger internal core pressure before prepreg gelation is helpful to preventing core crush.

Keywords: honeycomb sandwich structure; cocuring process; core crush; core internal pressure

Nomex蜂窝夹层结构由于比强度高、质轻、隔热、隔音等优点，在飞机上用于多种部位，如雷达罩、机翼、储油箱、垂直安定面、水平安定面等。但由于蜂窝芯材结构和承力上的特点，若工艺控制不当，将会产生各种成型质量问题，如孔隙、表面凹陷、起皱、蜂窝芯材位移等缺陷[1-3]，尤其对于面板与夹层结构同时成型的共固化工艺，容易出现蜂窝变形的现象。热压罐和真空袋共固化工艺中，蜂窝芯材四边向其中间部位塌陷的变形(Core crush，见图1)比较常见，因此受到了广泛的关注[1,4-6]。

国内外学者通过对蜂窝变形原理的研究，认为外压作用在蜂窝上的水平分力是引起蜂窝滑移、最后导致其变形的驱动力，而预浸料摩擦力、蜂窝侧向抗压刚度及芯材内压对变形起抑制作用[1,4-5]。目前，针对摩擦力与蜂窝变形的关联规律研究较多，如Martin等人[7]建立了预浸料摩擦力的测试方法，并得出树脂黏度及树脂在预浸料表面的分布是影响预浸料摩擦力的2个重要因素；Martin等人[8]还通过分析热熔法预浸料制造过程中纤维张力、线速度、浸润温度和压力对预浸料摩擦阻力的

收稿日期： 2008-09-10；**收修改稿日期：** 2008-12-23
基金项目： 北京航空航天大学博士研究生创新基金
通讯作者： 顾轶卓，博士，主要从事树脂基复合材料方面的研究工作 E-mail：benniegu@buaa.edu.cn

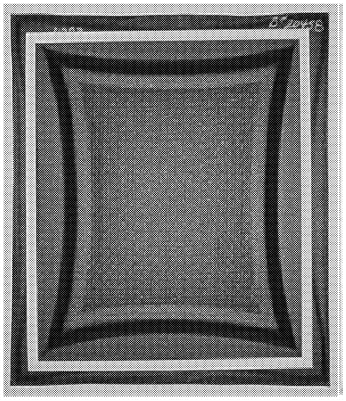


图 1　蜂窝变形形式

Fig. 1　Form of core crush

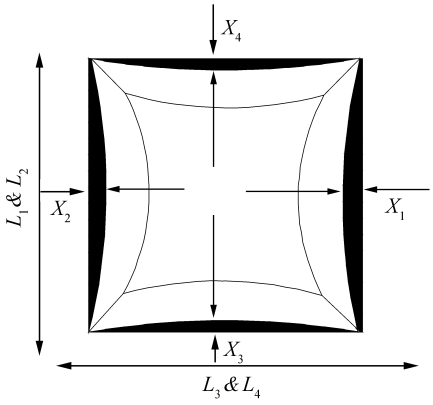


图 2　蜂窝芯材整体变形面积计算示意图

Fig. 2　Schematic of calculation of crushed area of the honeycomb core

影响，发现纤维张力对预浸料摩擦阻力的影响较大；Hsiao 等人[4,9-10]通过改变纤维织物结构与纤维丝束形状等方法增大预浸料的摩擦力，从而减小了蜂窝变形程度。

目前对于蜂窝侧向抗压刚度和芯材内压对蜂窝变形影响的研究工作较少，尚未清楚前两者与蜂窝变形之间的关联程度。为了提高蜂窝夹层结构成型质量的工艺可控性，有必要进行相关的研究。本文作者针对 Nomex 蜂窝夹层板的真空袋共固化工艺，探讨了蜂窝侧向抗压能力的影响因素，并通过自行建立的成型过程气压测试装置研究了芯材内压的影响因素及其对蜂窝变形的影响。

1　实验内容

1.1　实验原材料

玻璃纤维 120 斜纹织物/环氧 5224 预浸料，北京航空材料研究院；NH－1－5.5－32(高 25 mm、壁厚 0.2 mm)、NH－1－2.75－32(高 25 mm、壁厚 0.2 mm)、NH－1－2.75－32(高 6 mm、壁厚 0.2 mm)3 种芳纶纸蜂窝，北京航空材料研究院；胶膜 J－99B，黑龙江省石油化学研究院。

1.2　表征及测试方法

1.2.1　蜂窝变形程度及蜂窝侧向抗压刚度表征方法

用透气毡和真空袋包裹蜂窝芯材并抽真空，利用大气与真空气压差向芯材施加外力，芯材在压差下发生如图 2 形变。以蜂窝芯材塌陷数(D_{HCCN})表征蜂窝芯材整体变形程度[1]：测量蜂窝芯材变形量 X_1、X_2、X_3、X_4的大小，并利用式(1)、(2)计算蜂窝的变形程度。蜂窝变形面积为

$$A = \sum_{n=1}^{4} \frac{2}{3} X_n L_n \tag{1}$$

式中：A 为芯材变形面积；X_n为芯材四边最大变形量；L_n为芯材边长。

蜂窝芯材塌陷数 D_{HCCN}为蜂窝变形面积 A 与变形前的面积之比，计算式如下：

$$D_{\mathrm{HCCN}} = \frac{A}{L_1 \times L_3} \times 100\% \tag{2}$$

式中，L_1、L_3 表示蜂窝芯材发生变形面的长宽大小。

以 D_{HCCN}达到 10%时对应的真空压力 $P_{10\%}$表征蜂窝侧向抗压刚度，该值越大表示蜂窝抵抗外压变形的能力越大。

1.2.2　共固化工艺

用小型电磨机将蜂窝芯材四边切成约 45°楔角，将玻璃纤维 120 斜纹织物/环氧 5224 树脂预浸料铺放于蜂窝上下表面，铺放时预浸料边缘带留出 10 mm 宽度，将真空袋成型体系放入鼓风烘箱加热成型。温度制度如图 3 所示：以 2℃/min 的升温速率从室温升至 130℃，30 min 后以 1.3℃/min 的升温速率升至 180℃并恒定 1 h，之后以 2.09℃/min 降温速度降至接近室温。实验中采用 BH315－3D 温度场采集系统对预浸料铺层温度进行测试。

1.2.3　预浸料流变特性测试

采用 Gemini 200 流变仪的固体扭转模式测试玻璃纤维 120 斜纹织物/环氧 5224 预浸料动态模量与固化时间的关系，应变控制模式，应变设为 0.05%，扭转频率定为 1 Hz。为了反映工艺过程中预浸料的流变特性变化，实验采用的温度制度与共固化工艺温度制度相同(如图 3 所示)。

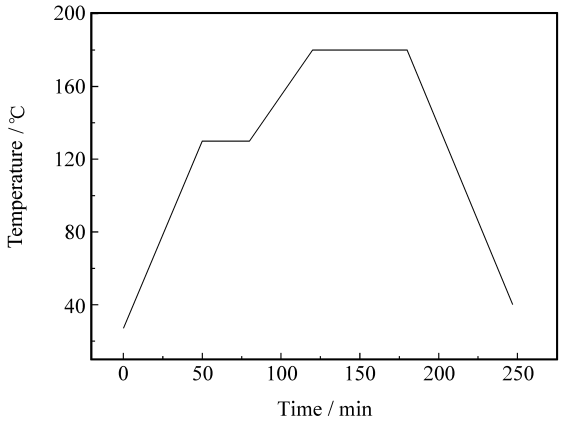


图 3　蜂窝夹层结构的共固化温度制度

Fig. 3　Temperature profile in cocuring process of honeycomb sandwich structure

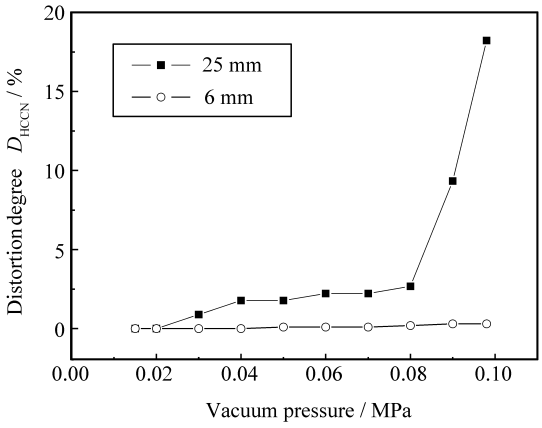


图 4　芯材高度对蜂窝变形程度的影响

（芯材高度 2.75 mm、楔形角 90°）

Fig. 4　Effect of core thickness on core crush

（2.75 mm grid length and 90° bevel）

2　结果与讨论

2.1　蜂窝侧向抗压刚度影响因素分析

蜂窝本身有一定的侧向抗压刚度，并与蜂窝的结构尺寸有关，为此考察了孔格边长、芯材高度、楔形角等因素对蜂窝侧向抗压能力的影响。

2.1.1　高度的影响

蜂窝高度是芯材的重要尺寸要素，在孔格边长 2.75 mm、楔形角 90°的情况下，考察了 2 种高度（25、6 mm）蜂窝随真空压力增大的变形情况，结果如图 4 所示。从图 4 可以看出，在真空压力增大过程中，高度为 6 mm 的蜂窝几乎不发生变形，0.1 MPa最大真空压力下蜂窝变形程度 D_{HCCN} 仅为 0.3%；而高度为 25 mm 的蜂窝发生较明显变形，$P_{10\%}$ 为0.09 MPa。说明蜂窝高度是影响蜂窝侧向抗压能力的重要因素，高度大的蜂窝在较小真空压力下就能发生明显变形。

2.1.2　孔格边长的影响

孔格边长的不同亦有可能导致蜂窝侧向抗压能力不同，为此在芯材高度和楔角角度相同的情况下（25 mm 高、90°楔角），比较了 5.5、2.75 mm 大小 2 种孔格边长蜂窝在真空压力增大过程中的变形情况。结果发现随着真空压力的增大，孔格边长为 5.5 mm 芯材的变形程度显著增大，$P_{10\%}$ 为 0.03 MPa；而 2.75 mm 孔格边长的蜂窝在真空压力达到 0.08 MPa 时才开始发生明显形变，$P_{10\%}$ 为 0.09 MPa。说明蜂窝孔格边长是影响蜂窝侧向抗压能力的重要因素，大孔格边长蜂窝自身抗变形能力小，对外压变化更加敏感。

2.1.3　楔形角的影响

工艺生产中为了利于预浸料的铺放，往往将蜂窝四边切成一定角度。在此考察了楔角对蜂窝变形程度的影响：将高度 25 mm、孔格边长 5.5 mm 蜂窝的四边切成 90°和 45°楔形角，对比了两者的侧向抗压能力。结果发现，90°楔形角蜂窝的 $P_{10\%}$ 为 0.03 MPa，而切有 45°楔形角蜂窝的 $P_{10\%}$ 为 0.036 MPa。楔形角角度的减小使蜂窝产生侧向变形的水平分力减小[3]，因此变形程度减小。

2.1.4　温度的影响

以上蜂窝侧向抗压刚度影响因素的研究均在室温下进行，而共固化过程中，蜂窝的侧向抗压能力可能随着温度的升高有所变化。为此研究了温度对蜂窝侧向抗压刚度的影响。图 5 为孔格边长 5.5 mm、高度 25 mm、楔形角 90°的蜂窝在 0.025、0.03、0.04 MPa 3 个真空压力下，从室温升至 90℃过程中芯材塌陷数 D_{HCCN} 随温度的变化。

由图 5 可知，在实验范围内温度对蜂窝侧向抗压刚度的影响较小，因此在室温下测得的蜂窝侧向抗压刚度可表征工艺过程中蜂窝的侧向抗压能力。

通过上述实验结果可知，蜂窝自身的抗侧压能力低，特别是对于孔格边长、楔角角度、高度较大的蜂窝，在较低的外压下就能发生明显形变，因此对于此类蜂窝可以忽略蜂窝侧向抗压刚度对蜂窝变形的抑制作用。

2.2　芯材内压测试方法的建立

根据成型过程中芯材内压和外压的变化可以得

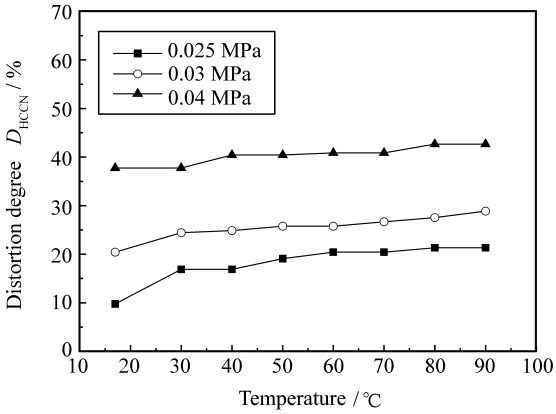


图 5　温度对蜂窝变形程度的影响
（孔格边长 5.5 mm、高度 25 mm、楔形角 90°）
Fig. 5　Effect of temperature on core crush
(5.5 mm grid length, 25 mm thickness and 90°bevel)

到芯材内外气体压力差，而该压力差是蜂窝变形的主要驱动力。为此本文中自行建立了一套可以在线测试芯材内压的方法，主要原理是通过探针将芯材内气体导出至压力传感器内，再由传感器将芯材气压值转换成电流值，最后根据电流-气压的定量关系得到芯材内压。图 6 为芯材内压测试系统示意图，该测试系统由毛细管探针(不锈钢针管，内径为 0.2 mm)、MSS2 通用型压力传感器、XSL/A-08BS1VO 巡检仪采集系统以及计算机显示系统组成。

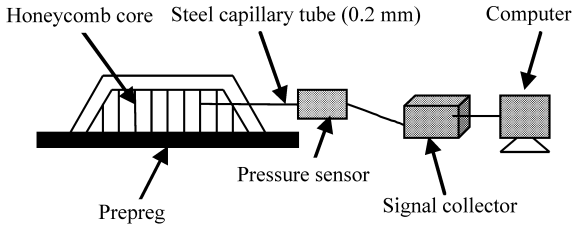


图 6　芯材内压测试装置示意图
Fig. 6　Schematic of measurement of core internal pressure

为了得到电流与气压的定量方程并考察测试系统的迟滞性，分别对气压升高过程中电流值的变化，及气压降低过程中电流值的变化进行了标定，结果如图 7 所示。从图 7 可以看出，气压与电流具有很好的线性定量关系，且迟滞性小，可以用于工艺过程中芯材内压的测试。

2.3　芯材内压影响因素分析

采用 2.2 建立的芯材内压在线测试系统，测试成型过程中芯材内部气体压力的变化规律并探讨其

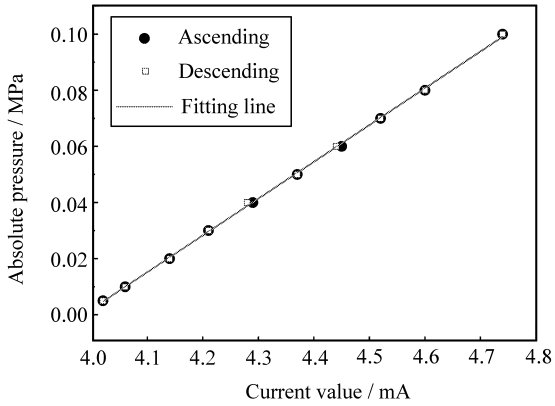


图 7　电流随绝对压力变化曲线
Fig. 7　Current value vs vacuum pressure curve

影响因素。实验采用高度 6 mm、孔格边长 2.75 mm、楔形角 90° 的蜂窝，全程抽真空 0.095 MPa，其他共固化工艺及材料铺放方法如 1.2.2 所述。图 8 表示蜂窝上下表面各 5 层预浸料且无胶膜情况下芯材内压与固化时间的关系。

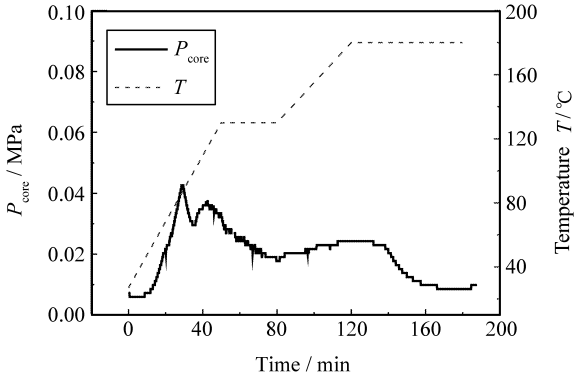


图 8　芯材内压随固化时间变化曲线
（5 层预浸料且无胶膜）
Fig. 8　Core internal pressure vs curing time curve with prepreg of 5 plies and without adhesive film

由图 8 可以看到，在第 1 个升温阶段，内压随着温度的升高而增大，而在第 2 个升温阶段，内压稍有增大但增大幅度较第 1 阶段小；在第 1 个和第 2 个恒温阶段，内压随着固化的进行而下降。

芯材内压与芯材内气体的膨胀和预浸料铺层的渗透性有关，内压的变化是二者共同作用的结果。气体在第 1 个升温阶段，温度升高气体膨胀的作用大于气体透过预浸料铺层向外渗透(使内压降低)的作用，所以内压随着温度升高而增大；而第 2 个升温阶段的温度差比第 1 个升温阶段小，同时气体依然可以通过预浸料铺层向外渗透，所以内压的增大

不明显；而在 2 个恒温阶段，只存在气体通过预浸料铺层的渗透过程，所以芯材内气体压力在这 2 个阶段持续下降。

图 9 给出了共固化温度制度下预浸料流变特性的测试结果，可以看到预浸料在第 2 个恒温阶段刚开始时发生凝胶，而蜂窝变形发生在预浸料凝胶前[2]，所以在本实验中芯材内压对蜂窝变形的影响发生在共固化第 2 个恒温阶段之前。

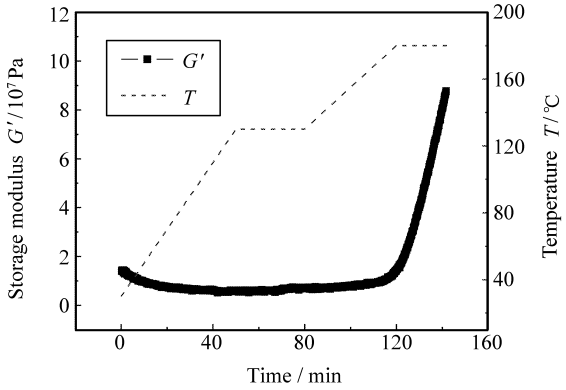


图 9　预浸料储能模量与固化时间曲线图
（玻璃纤维 120 斜纹织物/环氧 5224）
Fig. 9　Storage modulus of prepreg vs curing time curve
(glass fiber 120 twill fabric/epoxy 5224)

结合图 8 和图 9 可知，预浸料凝胶前芯材内压在第 1 个恒温阶段达到最大值 0.042 MPa，预浸料凝胶前内压最小值为 0.017 MPa。由于共固化过程中预浸料摩擦力亦随着固化的进行发生变化，因而不能只根据内压的变化探讨蜂窝变形的情况，但可知凝胶前内压越大，蜂窝变形的驱动力越小，故蜂窝变形的可能性越小。

图 10 为无胶膜时预浸料不同层数(5 层和 10 层)对芯材内压的影响图，温度制度与图 8 相同。

由图 10 可知，10 层预浸料时芯材内压大于 5 层预浸料时芯材的内压，且预浸料凝胶前二者的最大差值为 0.059 MPa。说明预浸料的层数对芯材内压有较大影响，预浸料的层数增多，预浸料铺层的渗透性变小，芯材内气体的逸出速度放缓，从而使内压增大。

为了减少缺陷并增强芯材与面板的胶接性能，工程上经常在芯材与面板之间放置一层胶膜。由于胶膜的黏度较大，它的存在有可能使气体更好地密封在芯材内。为此测试了有、无胶膜 2 种情况下芯材内压的大小，如图 11 所示。

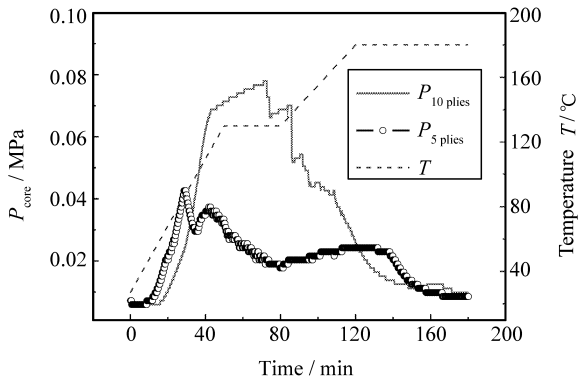


图 10　预浸料层数对芯材内压的影响(无胶膜)
Fig. 10　Effect of number of prepreg plies on core internal pressure(without adhesive film)

结果发现，有胶膜时芯材的内压大于无胶膜时芯材的内压，且在预浸料凝胶前，二者最大差值达到 0.043 MPa。如前所述，因胶膜的黏度较大，其可使面板渗透气体能力减小，使气体更好地密封在芯材内，从而增大了芯材内压。

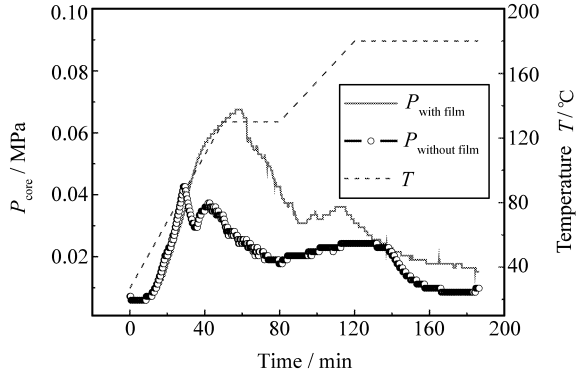


图 11　胶膜对内压的影响(5 层预浸料)
Fig. 11　Effect of adhesive film on core internal pressure(5 plies)

2.4　芯材内压对蜂窝变形的影响

由 2.3 可知，共固化过程芯材内压与真空压力存在较大差异，预浸料凝胶前芯材内压大于真空压，且不同情况下内压的大小有较大差异，这可能会对蜂窝的变形产生影响。为此研究了不同芯材内压情况下蜂窝夹层结构的变形情况，采用改变预浸料层数的方法改变芯材内压的大小，分别采用 5 层和 10 层，为了更明显地观察蜂窝的变形情况，采用了高度为 25 mm 的蜂窝。共固化过程材料铺放和温度制度如 1.2.2 所述，在温度达到 123℃之前加 0.025 MPa 真空压，温度达到 123℃时加

0.095 MPa真空压，结果如图 12 所示。

图 12 给出了面板预浸料为 5 层和 10 层时，芯材内压随时间的变化情况。面板为 10 层预浸料时，加全压后内压缓慢下降，内压始终大于真空压，且在预浸料凝胶前芯材内压大于 0.028 MPa；而面板为 5 层预浸料时，加全压后芯材内气压亦同时降 0.005 MPa，其内压曲线几乎与真空压曲线重合，芯材内外压差始终为 0.095 MPa。

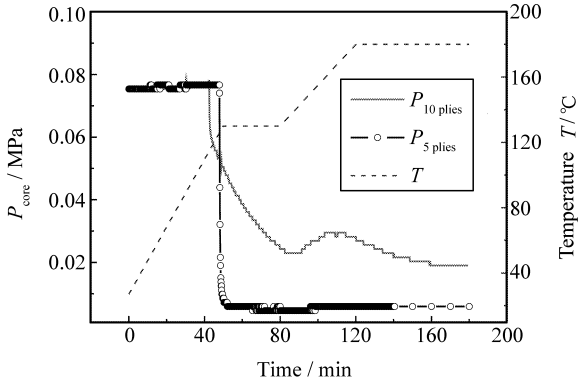
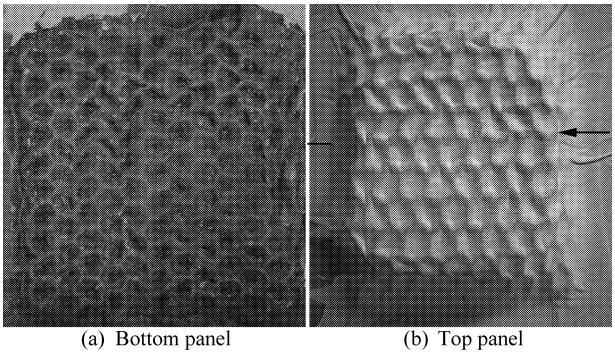


图 12　不同预浸料层数下芯材的内压变化曲线

Fig. 12　Core internal pressure profiles with different number of prepreg plies

通过观察可以发现 2 种情况下蜂窝变形程度有明显差异。图 13 为预浸料为 5 层时上下面板蜂窝的变形情况，发现蜂窝发生明显变形：蜂窝侧向发生内凹变形，上下面板的高度方向有明显凹陷现象，且正六边形的蜂窝格子发生严重的扭曲变形。

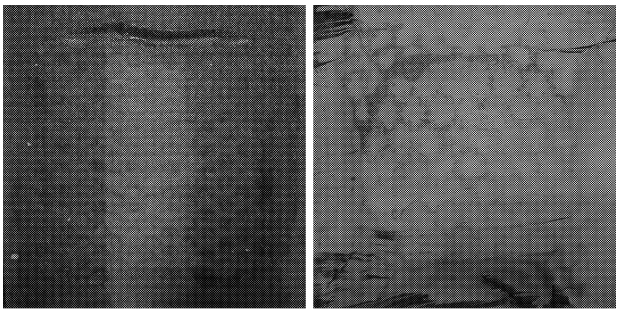


(a) Bottom panel　　(b) Top panel

图 13　面板为 5 层预浸料时夹层结构表面状况（箭头处蜂窝发生侧向内凹）

Fig. 13　Surface status of sandwich structure for panel with five prepreg plies(lateral distortion occurring in arrow directions)

上下面板为 10 层预浸料时，夹层结构表面平滑，无高度和侧向方向上的凹陷，且蜂窝格子基本保持正六边形(见图 14)。



(a) Bottom panel　　(b) Top panel

图 14　面板为 10 层预浸料时夹层结构表面状况

Fig. 14　Surface status of sandwich structure for panel with ten prepreg plies

对于同种蜂窝和预浸料，摩擦力和蜂窝刚度对蜂窝变形的影响可看作相同，由此可知芯材的内压对抵抗蜂窝变形起到重要作用，预浸料凝胶前芯材内压越大，蜂窝变形程度越小。可见，在共固化工艺中应重视芯材内压对蜂窝变形的控制作用。

3　结　论

(1) Nomex 蜂窝自身抵抗变形能力较小，特别是对于孔格边长和芯材高度较大的蜂窝，在较小的外压下就能发生明显的侧向凹陷，因此可以忽略蜂窝侧向抗压刚度对蜂窝变形的抑制作用。

(2) 采用自行建立的芯材内压测试装置可对工艺过程中芯材内压的变化规律进行研究，测试结果具有较好的准确性和较小的迟滞性，为蜂窝夹层结构成型过程研究提供了测试手段。

(3) 芯材内压与芯材内气体的膨胀和预浸料铺层的渗透性直接相关：温度升高芯材内气体膨胀，面板渗透性小则气体容易密封在芯材内，这 2 种作用都可使芯材内压增大，因此芯材内压受温度、预浸料层数和胶膜影响较大。

(4) 芯材内压对抵抗蜂窝变形起到重要作用，预浸料凝胶前芯材内压越大，越有利于减小蜂窝变形的驱动力，可通过增加预浸料层数、加入胶膜等方法增大芯材内压，从而有效地抑制蜂窝变形的产生。

参考文献：

[1]　Zeng S, Seferis J C, Ahn K J, Pederson C L. Mode test panel for processing and characterization studies of honeycomb composite structures [J]. Journal of Advanced Materials, 1994, 25(2): 9-21.

[2] 原崇新，李 敏，顾轶卓，张佐光. 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)：57-62 .
Yuan Chongxin，Li Min，Gu Yizhuo，Zhang Zuoguang. 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.

[3] 盛 磊. 蜂窝夹层结构芯子塌陷的工艺分析 [J]. 航天工艺，1994(6)：27-30.
Sheng Lei. Core crush study of honeycomb sandwich structure [J]. Aerospace Manufacturing Technology，1994(6)：27-30.

[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] Renn D J，Tulleau T，Seferis J C. Composite honeycomb core crush in relation to internal pressure measurement [J]. Journal of Advanced Materials，1995，27(1)：31-40.

[6] Buyny Robert A，Martin Cary J. Elimination of core crush in sandwich structures：Material and autoclave process options [C] // International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings，Vol 49). Long Beach，CA，United States：Society for the Advancement of Material and Process Engineering，2004：3023-3027.

[7] Martin C J，Seferis J C. Frictional resistance of thermoset prepregs and its influence on honeycomb composite processing [J]. Composites Part A，1996，27(10)：943-951.

[8] Martin C J. Effect of impregnation condition on prepreg properties and honeycomb core crush [J]. Polymer Composite，1997，18(1)：90-99.

[9] Hsiao H M，Lee S M，Buyny R A，et al. Core-crush resistant fabric and prepreg for fiber reinforced composite sandwich structures：US，6261675 [P]. 2001-07-17.

[10] Pelton T L，Schneider，T L，Martin R. Material factors influencing composite part producibility in relation to prepreg frictional measurement [C] // 31st International Technical Conference(Vol 31). Covina，CA，United States：Society for the Advancement of Material and Process Engineering，1999：463-477.