

# 夹层结构斜削区蜂窝滑移机理及改善研究

陈超<sup>1\*</sup> 徐东明<sup>1</sup> 张锋<sup>2</sup>

(1. 中国商飞复材中心, 上海 201210; 2. 上海飞机设计研究院, 上海 201210)

**摘要:** 基于蜂窝夹层结构固化原理分析和蜂窝在180℃高温下的力学性能分析,构建了蜂窝滑移受力模型,确定了影响蜂窝滑移的4个关键因素,分别为蜂窝侧向抗压能力、层间摩擦系数、蜂窝芯边缘倒角和固化压差。针对关键因素进一步分析,表明分别影响4个关键因素的子因素及其影响作用。同时提出了抑制蜂窝滑移的有效措施:1)最靠近蜂窝芯的铺层(推荐0/90°织物)延伸至零件边缘以便进行外力(防滑带、玻璃纤维等)拴系;2)工艺手段(浸胶法、胶膜法、隔膜法等稳定化方法)提高蜂窝侧向抗压能力。

**关键词:** 复合材料;蜂窝夹层结构;斜削区;蜂窝滑移;共固化

中图分类号: V258

文献标识码: A

OSID: 

## 0 引言

在常用航空复合材料中,蜂窝夹层结构作为一种“结构型材料”,已广泛应用于飞机制造上,如飞机机翼前后缘壁板、机翼尾翼的操纵面以及机身上的舱门等次承力结构<sup>[1-2]</sup>。蜂窝夹层结构是通过三类基础材料进行固化后成为一个整体,包括面板、蜂窝芯层和胶黏剂。上下面板保证复合材料的弯曲刚度,承受由弯矩引起的面内拉压应力。中间的蜂窝芯材相对较厚但密度低,提供了一条传递剪切力的通道。蒙皮面板与蜂窝芯材之间采用黏合剂粘连。按照这一概念,通过集成优化,可以用最经济的方式和最小的自重使蜂窝夹层结构达到最大的刚度和强度<sup>[3-4]</sup>。

蜂窝芯材增加截面高度带来的一个问题是难以直接与相邻的结构相连,解决的方法是采用斜坡的方式实现从夹层结构到层压板结构的过渡,斜坡区的层板与蜂窝结构被称为蜂窝斜削区。

目前常用的复材成型工艺有共固化、共胶接和二次胶接成型<sup>[5]</sup>。其中,共固化因工艺成熟、制造成本低,且适用于型面复杂的结构的特点,而被广

泛用于蜂窝夹层结构的制造<sup>[6]</sup>,但同时也产生多类质量问题,包括蒙皮表面贫胶富胶、表面凹陷和起皱、内部孔隙密集、蜂窝滑移等缺陷。其中,蜂窝芯材周边向中间塌陷的变形比较常见<sup>[7-8]</sup>。蜂窝滑移引起的蜂窝芯格挤压变形和表面蒙皮的纤维皱褶,会造成产品的报废<sup>[9]</sup>。

目前,民用飞机上采用的蜂窝夹层结构件仍以热压罐共固化成型工艺为主,因此研究蜂窝滑移产生的机理以及改善措施,对于提升蜂窝夹层结构的产品质量具有重大意义。

## 1 蜂窝滑移机理分析

在热压罐共固化成型工艺中,蜂窝夹层结构件的所有裸露面均承受热压罐罐内压力,其外形面(气动面)与工装贴合,如图1所示。

根据常用的正六边形芳纶纸蜂窝力学特性可知,蜂窝芯材在厚度方向(T向)的压缩强度远大于侧向(L向、W向)的压缩强度(蜂窝方向定义详见图2)。也就是说,蜂窝芯材在外力作用下并不容易沿着厚度方向发生塌陷,却更为容易沿着侧向发生挤压或变形。

\* 通信作者. E-mail: chenchao1@comac.cc

引用格式: 陈超,徐东明,张锋.夹层结构斜削区蜂窝滑移机理及改善研究[J].民用飞机设计与研究,2024(2):63-68.CHEN C, XU D M, ZHANG D. Research on the mechanism and improvement methods of honeycomb slide in the chamfer of sandwich structure[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(2):63-68 (in Chinese).

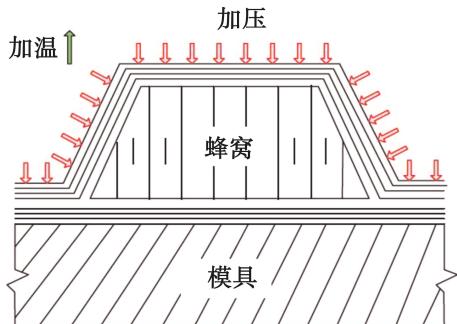


图 1 蜂窝夹芯结构件固化受力

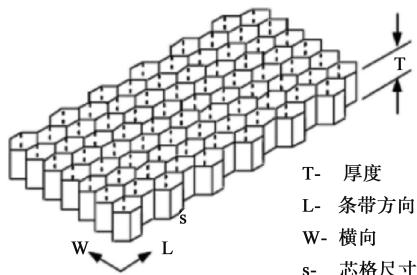


图 2 蜂窝方向定义

当蜂窝芯自身抗压能力不足以抵抗热压罐罐内压力时,蜂窝芯将产生如图 3 所示的侧向滑移现象。

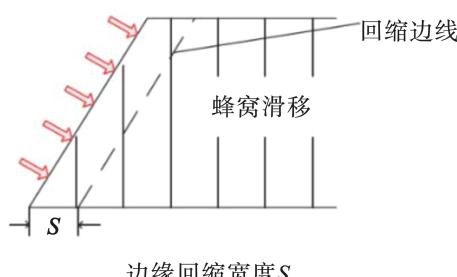


图 3 蜂窝斜削区变形收缩

在固化过程中,树脂黏度随着温度的上升而逐渐降低,流动性增强,导致预浸料与蜂窝芯之间的摩擦系数亦渐降低。当蜂窝芯内压与预浸料对蜂窝斜削区表面的最大静摩擦力的合力小于罐内压力时,将出现蜂窝滑移。蜂窝斜削区滑移的受力模型如图 4 所示。假设蜂窝芯为单位宽度。

受力模型中, $\Delta P$  表示固化压差(即热压罐罐内压力与芯材压力的差值); $F_c$  表示芯材侧向抵抗力; $F_t$  表示固化压差引起的侧向力; $F_d$  和  $F'_d$  表示斜削区芯材表面与预浸料的摩擦力; $F_h$  和  $F'_h$  表示斜削

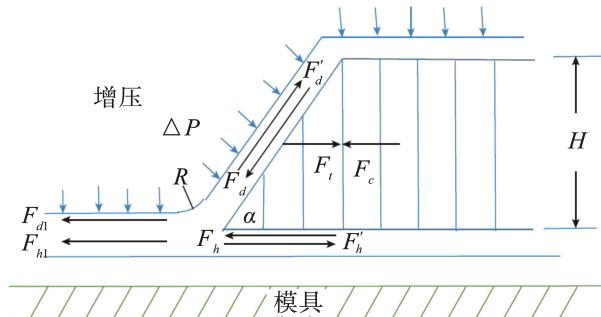


图 4 蜂窝夹层结构固化过程侧向受力分析

区在底部投影区的芯材与预浸料的摩擦力; $F_{d1}$  表示工装对夹层结构上表面预浸料的约束反力; $F_{h1}$  表示工装对夹层结构下表面预浸料的约束反力; $H$  为芯材高度; $\alpha$  为芯材边缘倒角;  $[\sigma_w]$  表示单位面积的芯材侧向抗压能力<sup>[10]</sup>。

根据力的平衡分析,芯材边缘倒角  $\alpha$  越大,芯材承受的侧向力  $F_t$  越大,当芯材侧向抵抗力  $F_c$  以及摩擦力的约束作用之和小于侧向力时,将导致芯材滑移或坍塌,因此,为避免上述现象的发生,构建如下不等式:

$$|F_c + F_d \times \cos\alpha + F_h| \geq |F_t| \quad (1)$$

即:

$$|[\sigma_w]H + \mu\Delta PH / \sin\alpha \times \cos\alpha + \mu\Delta PH \cos\alpha| \geq |\Delta PH|$$

推导得到:

$$\Delta P \leq \frac{[\sigma_w]}{|1 - 2\mu \times \cot\alpha|} \quad (2)$$

## 2 影响蜂窝滑移的关键因素

根据蜂窝滑移受力模型可知,蜂窝滑移与蜂窝侧向抗压能力  $[\sigma_w]$ 、蜂窝与预浸料之间的摩擦系数  $\mu$ 、蜂窝芯边缘倒角  $\alpha$  以及固化压差  $\Delta P$  密切相关。

### 2.1 蜂窝侧向抗压能力

蜂窝侧向抗压能力指的是抵抗滑移能力,也可理解为自身侧向抗压刚度。侧向抗压刚度与弹性模量和结构几何尺寸相关,即与自身材料选择、蜂窝芯格形状、芯格尺寸、芯材高度相关。

#### 2.1.1 蜂窝芯高度的影响

蜂窝高度是芯材的重要尺寸要素,在固定蜂窝(正六边形)芯格尺寸 4.8 mm(3/16 in)的情况下,分别考察了高度为 25 mm 和 6 mm 的蜂窝随环境压力增大的变形情况。结果显示,在环境压力逐渐增大的过程中,高度为 6 mm 的蜂窝几乎不发生变形,

最大真空压力下蜂窝变形程度仅为 0.3%<sup>[8]</sup>; 而高度为 25 mm 的蜂窝发生较明显变形, 达到 10% 变形量时压强为 0.09 MPa(0.9 个大气压)<sup>[8]</sup>。这表明蜂窝高度是影响蜂窝侧向抗压能力的重要因素, 大高度蜂窝更易发生变形。

### 2.1.2 蜂窝芯格尺寸的影响

蜂窝芯格尺寸的大小也可理解为蜂窝公称密度的大小。芯格尺寸越大, 其密度就越小, 蜂窝侧向抗压能力越低。大芯格尺寸的蜂窝自身抗变形能力小, 对外压变化也更加敏感。

## 2.2 层间摩擦系数

蜂窝芯与预浸料之间的摩擦系数与蜂窝芯格尺寸(或公称密度)、预浸料表面粗糙度、预浸料树脂含量和最靠近蜂窝芯的铺层尺寸有关。

蜂窝界面摩擦系数试验证明, 对于常用的纸蜂窝(正六边形、芯格尺寸 3.2 mm), 使用 T300 级碳纤维织物预浸料及其配套胶膜的情况下, 预浸料与蜂窝芯之间的摩擦系数在 0.2~0.23 之间。

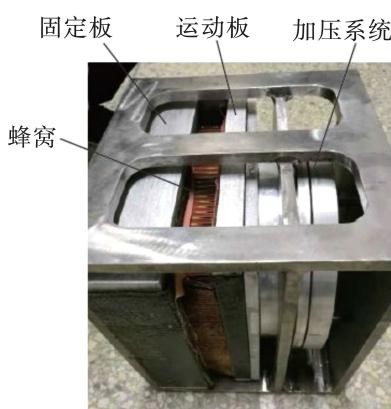


图 5 芳纶纸蜂窝与预浸料摩擦系数试验原理

### 2.2.1 蜂窝芯格尺寸的影响

摩擦系数与表面粗糙度成正比。蜂窝芯格尺寸越小, 蜂窝密度越大, 蜂窝芯格排列越紧密。在单位面积下, 蜂窝芯与预浸料之间的接触面积越大。由于材料表面不平整, 接触面间存在机械咬合, 接触面积越大, 咬合越紧密, 表面粗糙度增加, 因此蜂窝芯与预浸料之间摩擦系数变大。

### 2.2.2 预浸料表面粗糙度的影响

摩擦系数与表面粗糙度成正比。离蜂窝芯最近的预浸料表面越粗糙, 效果越好。预浸料表面粗糙度与纤维丝束方向、编织样式和扭曲程度相关<sup>[11]</sup>。

### 2.2.3 树脂含量的影响

固化过程中随着温度的上升, 预浸料中的树脂部分流动性会变佳, 由于初始的树脂物理分布导致过多的树脂停留表面用于润滑, 从而导致摩擦系数变小。因此, 合理的预浸料树脂含量与内部物理分布是影响蜂窝滑移的因素。

### 2.2.4 最靠近蜂窝芯的铺层的影响

摩擦系数与接触面积无关, 但摩擦力由摩擦系数与压力共同决定, 而压力由罐内压差与接触面积共同决定, 即摩擦力 = 摩擦系数 × 压力 = 摩擦系数 × 固化压差 × 接触面积。

离蜂窝芯最近的铺层尺寸越大, 作用在蜂窝上的摩擦力也越大。大的摩擦力使固化过程中蜂窝不容易发生滑移。

### 2.3 蜂窝芯边缘倒角

在蜂窝固化受力模型中, 针对选定的材料, 其参数信息可由蜂窝参数测定试验得到。

表 1 蜂窝夹层试验件材料选择

组 成	选 材	备 注
面 板	高温固化工纤 维基模环氧树 脂织物预浸料	T300 级平纹织物, 树脂含量 40%±2%, 单层厚度 0.216 mm, Cytac 公司
蜂窝芯	芳纶纸蜂窝	芯格形状正六边形, 芯格尺寸 3.2 mm, 蜂窝密度 48 kg/m <sup>3</sup>
胶黏剂	胶膜 (高温固化)	厚度 0.127 mm, 汉高公司

通过试验测得蜂窝侧向抗压强度  $[\sigma_w] = 0.023 \text{ MPa}$ , 蜂窝与预浸料材料之间的摩擦系数  $\mu$  以及固化压差  $\Delta P = 0.3 \text{ MPa}$ (3 个大气压), 将数值代入到不产生蜂窝滑移条件公式(2)得  $\alpha \leq 25^\circ$ , 即当蜂窝芯边缘倒角满足  $\alpha \leq 25^\circ$  时, 蜂窝不会发生滑移。

### 2.4 固化压差

固化压差指的是热压罐内压与蜂窝芯内压之间的压差。

热压罐罐内压差是蜂窝滑移的原始驱动力。蜂窝夹层结构采用降低成型压力的工艺(如液体成型或罐外成型工艺<sup>[12]</sup>)是预防蜂窝芯滑移的有效方法, 待材料和工艺成熟后可应用于民用航空产品。

## 3 抑制蜂窝滑移的措施

为消除蜂窝滑移可从以下几个方面入手。

### 3.1 提高蜂窝侧向抗压能力

#### 1) 蜂窝芯选材

选用高模量蜂窝芯材料,例如采用高模量芳纶纸芯材替代芳纶纸芯材。

在满足要求的前提下,合理选择蜂窝芯格形状和芯格尺寸。

#### 2) 蜂窝芯高度设计

蜂窝芯高度关系到整个夹层结构的强度和刚度,更多地从整体考虑,一般不会因为斜削区滑移问题而做调整。

#### 3) 浸胶法

蜂窝斜削区可填入灌封胶并预固化以提高蜂窝芯侧向刚度,从而起到防止蜂窝边缘侧向滑移的效果。如图 6 所示,灌封胶填充蜂格,防止蜂格受压变形。

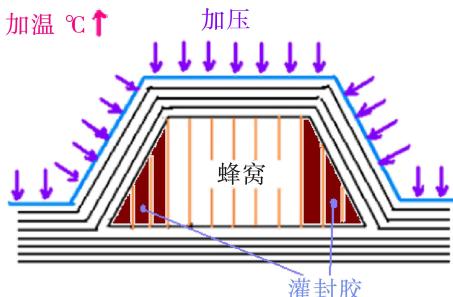


图 6 浸胶法

#### 4) 胶膜法稳定化

使用胶膜分别铺敷在蜂窝芯材的上表面和下表面,并进热压罐进行预固化。其原理是利用胶膜来增强蜂窝的抗压性能,从而实现稳定化。

此方法适用于厚度小的蜂窝。胶膜预固化在真空压力下进行,如图 7 所示。

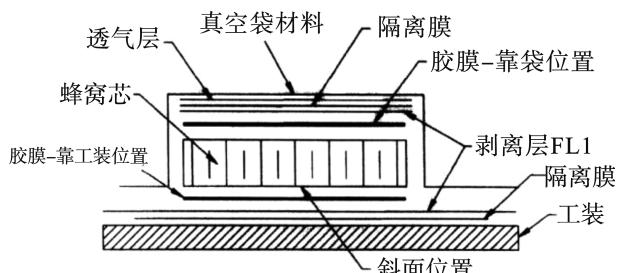


图 7 胶膜法

#### 5) 隔膜法稳定化

将蜂窝芯上下分块,并在分块的蜂窝芯中间

铺设两层胶膜和一层玻璃纤维预浸料(玻璃纤维预浸料铺敷于两层胶膜之间),使之上下拼接成型,从而提高蜂窝侧向刚度,预防蜂窝滑移与变形。

此方法适用于厚度大的蜂窝,如图 8 所示。波音公司和罗罗公司均已采用隔膜法进行夹芯结构件的制造。

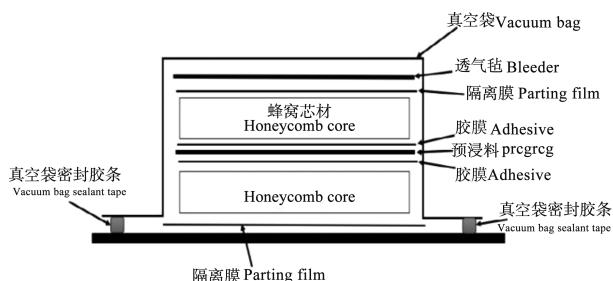


图 8 隔膜法

### 3.2 增大层间摩擦

#### 1) 增大摩擦系数

蜂窝芯选材上,推荐选用小的蜂窝芯格尺寸。

预浸料选材上,推荐最接近蜂窝芯的铺层选用表面粗糙度大的预浸料,如织物优于单向带。

#### 2) 防滑带法

在工装(模具)上固定一圈金属防滑带,将蜂窝上下表面的若干铺层预浸料余量延伸至防滑带上,按一定间隔比例栓系住。其原理是利用防滑带对预浸料纤维产生拉力抵消因固化压力造成的蜂窝侧向摩擦力,如图 9 所示。

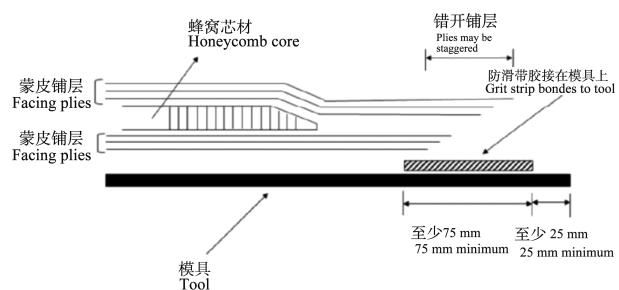


图 9 防滑带法

通常在蜂窝根部存在固化成型的 R 角,R 角的形成是由于预浸料余量因防滑带产生的栓系力与斜削区预浸料表面之间摩擦引起的纤维张紧力两者平衡的结果。平衡关系参见公式(3)。

$$\Delta P \cdot R = F_d \leq \frac{\mu \Delta P H}{\sin \alpha} \quad (3)$$

当蜂窝芯过高时,将导致过大的R角从而发生架桥缺陷,如图10所示。若预计容易发生架桥,则不适合采用此方法。

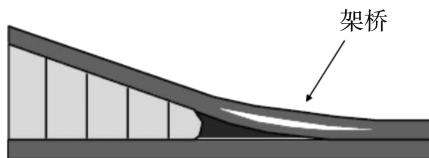


图10 架桥缺陷

### 3) 玻璃纤维系紧法

利用边缘的玻璃纤维吸胶材料对靠近蜂窝的上下铺层进行拴系,起到防止蜂窝滑移的作用,如图11所示,作用原理与防滑带法相同。

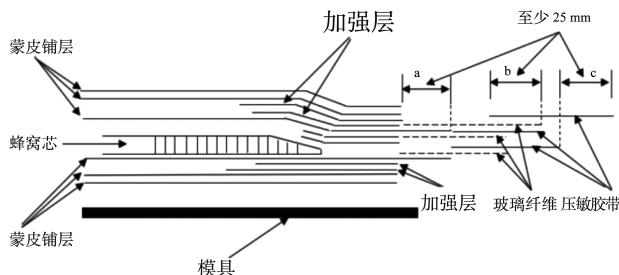


图11 玻璃纤维系紧法

同样的,若蜂窝芯过高时,会引起过大的蜂窝根部R角从而发生架桥缺陷,需根据情况合理选用此方法。

## 4 结论

本文给出了复合材料蜂窝夹层斜削区蜂窝滑移的机理分析并构建受力模型,公式推导出避免出现蜂窝滑移现象需满足的条件。同时也确定了影响蜂窝滑移的4个关键因素,分别为蜂窝侧向抗压能力、层间摩擦系数、蜂窝芯边缘倒角以及固化压差。

在复材铺层设计中,推荐使用织物以增加层间摩擦系数。推荐最靠近蜂窝芯的铺层延伸至零件边缘以方便使用栓系防滑带、玻璃纤维等工艺措施,通过利用防滑带(玻璃纤维)的摩擦力对纤维产生拉力抵消因成型压力造成的蜂窝侧向摩擦力,从而避免产生蜂窝滑移。

对于蜂窝芯高度较大的夹层结构,栓系防滑带等工艺措施容易发生蜂窝斜削区根部架桥,推荐使用胶膜法稳定化和隔膜法稳定化来

提高蜂窝侧向抗压刚度,有效抑制蜂窝滑移的产生。

## 参考文献:

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007(1):1-12.
- [2] 柳敏静, 武湛君. 复合材料蜂窝夹层结构在飞机中的应用[J]. 科技导报, 2016, 34(8):21-25.
- [3] 王莹. 蜂窝夹层结构复合材料应用研究进展[J]. 科技创新与应用, 2014(13):52.
- [4] 曾小苗, 罗琳胤, 邵俊欣, 等. 复合材料夹层结构蜂窝与面板脱粘研究[J]. 航空制造技术, 2015, 58(增刊2): 150-151, 156.
- [5] 毕红艳, 段友社, 谢凯文. 共固化成型蜂窝夹层结构缺陷分析及工艺改进[J]. 航空制造技术, 2014, 57(15): 106-109.
- [6] 梁春生, 邱启艳, 陈静, 等. 蜂窝夹层结构复合材料胶接共固化工艺技术研究[J]. 航空制造技术, 2014, 57(15): 86-89.
- [7] 张剑军, 刘建军, 韩笑. 蜂窝夹层结构复合材料及其研究进展[J]. 化工新型材料, 2021, 49(12):253-258.
- [8] 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.
- [9] HSIAO H M, LEE S M, BUYNY R A. Core crush problem in the manufacturing of composite sandwich structures: mechanisms and solutions [J]. AIAA Journal, 2006, 44(4): 901-907.
- [10] 郝新超, 胡杰. Nomex蜂窝夹层结构侧向变形机理及蜂窝稳定性[J]. 航空制造技术, 2020, 63(13):69-74, 82. DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.13.069.
- [11] 美国CMH-17协调委员会. 复合材料手册第6卷:复合材料夹层结构[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2016.
- [12] 董安琪, 肇研, 赵新青. 自动铺放工艺制备罐外固化复合材料的力学行为[J]. 复合材料学报, 2018, 35(5): 1095-1104.

## 作者简介

陈超 女,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机夹层结构设计与优化工作。E-mail: chencho1@comac.cc

徐东明 男,硕士,正高级工程师。主要研究方向:民用飞机夹层结构设计、垂尾结构设计与验证。E-mail: xudongming@comac.cc

张锋 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞机批生产工程支持。E-mail: zhangduo@comac.cc

## Research on the mechanism and improvement methods of honeycomb slide in the chamfer of sandwich structure

CHEN Chao<sup>1</sup>\* XU Dongming<sup>1</sup> ZHANG Duo<sup>2</sup>

(1. COMAC Composite Center, Shanghai 201210, China;  
2. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** Based on the analysis of cocuring principle of honeycomb sandwich structure and mechanical properties of honeycomb at 180 °C, a force model for honeycomb slide is established, and four key factors affecting honeycomb slide are determined, namely the lateral compressive capacity of honeycomb, inter-layer friction coefficient, angle of core chamfer, and cocuring pressure difference. Further analysis of these key factors reveals the sub factors that affect the four key factors and represent their respective roles. At the same time, the effective measures to restrain the slide of honeycomb are put forward as follows: 1) the layer closest to the honeycomb core (0/90° fabric is better) is recommended to extended to the edge of the part so as to use grit strip, fiberglass tiedown, etc. ; 2) improving the lateral stiffness of honeycomb by the core stabilization methods such as impregnation method, adhesive film method, and septum method.

**Keywords:** composite material; honeycomb sandwich structure; core chamfer; honeycomb slide; cocure process

---

\* Corresponding author. E-mail: chenchao1@comac.cc