多因素影响的铝蜂窝夹层结构热固化变形预测及验证

吴重军[1*] 吴春雪[1] 康坤海[1] 吴鑫锐[2] 秦洪远[2]
1.东华大学机械工程学院,上海,201620
2.上海复合材料科技有限公司,上海,201112

摘要:针对铝蜂窝夹层板在热固化过程中变形机制不清晰的问题,结合理论分析、有限元仿真与实验探讨了蜂窝板结构刚度、界面摩擦力、发泡胶等影响因素。基于铝蜂窝夹层板的结构与制造工艺建立了几何模型与固化理论模型,结合Fourier热传导定律和能量平衡原理描述了胶膜的热反应与化学反应,并用Path-dependent模型分析了固化变形。仿真与实验所得结果吻合度较高,验证了仿真模型的准确性。研究发现,结构刚度与变形量呈显著负相关;变形量随界面摩擦力的减小而减小;发泡胶膨胀系数增大时,埋件周边的局部最大变形量增大,且小膨胀系数更利于保持平面度。

关键词:蜂窝夹层板;固化变形;热压罐;发泡胶;结构刚度;界面摩擦力
中图分类号:TH161
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.07.027 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Prediction and Verification of Thermal Curing Deformation of Aluminum Honeycomb Sandwich Structures under MultiFactor Effects

WU Chongjun[1*] WU Chunxue[1] Kang Kunhai[1] WU Xinrui[2] QIN Hongyuan[2]
1.College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai, 201620
2.Shanghai Compound Materials Technology Co., Ltd., Shanghai, 201112

Abstract: To clarify the deformation mechanism of aluminum honeycomb sandwich panels during thermal curing, the effects of structural stiffness, interfacial friction, and foaming adhesive are investigated through theoretical analysis, finite element simulation, and experimental testing. Based on the structural characteristics and manufacturing process, a geometric model and a curing theoretical model are established. Combined with Fourier's heat conduction law and the energy balance principle, the thermal and chemical reactions of the adhesive film are described, and a path-dependent model is adopted to analyze curing deformation. The simulation results agree well with the experimental data, verifying the accuracy of the proposed model. Results indicate that structural stiffness has a significant negative correlation with deformation magnitude; reducing interfacial friction decreases the deformation; and the local maximum deformation around embedded parts increases with the rise of the expansion coefficient of the foaming adhesive, while a lower expansion coefficient helps maintain surface flatness.

Key words: honeycomb sandwich panel; curing deformation; autoclave; foaming adhesive; structural stiffness; interfacial friction

0 引言

铝蜂窝夹层板[1]的整体结构[2]在保证强度的同时大幅减小了质量[3],其密度仅为同体积铝合金板的23%,但抗弯刚度超过实心铝合金板的5倍,广泛应用于航空航天设备的关键部位[4-5]。

铝蜂窝夹层板通常采用共固化成形工艺[6]生产。共固化成形过程中,多种因素的共同作用导致固化变形[7],其中,内部因素包括材料属性和构件几何形状,外部因素包括模具材料和成形工艺。

对于会产生化学反应的固化材料,AL-DHAHERI等[8-9]依托过膨胀Nomex蜂窝芯与航空预浸料探究了夹芯板固化诱导变形的成因,并结合仿真分析明确U型夹层结构的变形由回弹与翘曲的耦合造成。

YUAN等[10]预测了复合材料制件固化过程中的厚度方向残余应力和翘曲变形。针对蜂窝夹芯复合材料制造过程中胶接压力引起的构件变形

收稿日期:2025-08-19
基金项目:上海市经信委高质量发展专题(CYLGG-2024-1-32)

和压溃问题，SONG等[11]系统研究了黏结压力对变形行为的影响。徐景校等[12]发现变厚度铺层设计对较薄区域面板的固化应力影响较大。

固化部件需利用真空袋保证固化部分的稳定，KRATZ等[13]发现较高温度下固化的夹层板空隙率更大、表皮与芯之间的黏结性能更差。针对蜂窝夹层结构的成形，汪艳金等[14]通过铺层优化、辐射体表面处理、蜂窝预固化和共固化工艺参数调整等措施提高共形天线的质量。TAVARES等[15]通过对预浸料与胶层进行选择性穿孔，探究了蒙皮对空气初始渗透范围的影响，发现借助蜂窝内部压力及胶层的潜在排气作用可调控蒙皮与芯材的黏结强度，并据此确定了真空施压的时间工艺区间，使蜂窝达到最优初始压力状态。GROVE等[16]研究了固结压力、温度固化周期、温度上升速率、空压力施加时间对Nomex蜂窝芯/碳纤维-环氧预浸料蒙皮夹层板剥离强度的影响，发现温度固化周期是主要参数。为保证挖补修理后的复合蜂窝夹层结构有较好的表面平整度，崔立军等[17]发现替换蜂窝芯时的固化保温温度对蜂窝夹层结构背面板平整度的影响。

现有研究围绕铝蜂窝夹层板的固化变形机制、工艺参数影响、数值仿真方法开展了大量工作，明确了固化收缩、热应力、材料各向异性、工艺参数等的作用规律，但存在如下两个关键不足：一是研究对象多集中于无预埋件的平板或简单构型夹层结构，极少关注广泛应用的含预埋件多功能蜂窝夹层结构，预埋件会改变局部结构的刚度分布、引发界面应力集中，但预埋件对固化变形的影响机制尚不明确；二是现有研究多聚焦单一因素的作用，缺乏对界面摩擦、结构刚度、发泡胶膨胀的多因素影响进行系统性探究，难以全面揭示含埋件结构的变形规律。基于此，本文针对胶接装配后的多功能蜂窝夹层结构在热固化过程中产生的固化变形，探究含埋件的铝蜂窝夹层板界面摩擦、结构刚度、发泡胶膨胀因素对于固化变形中板材平面度的影响。

1 几何建模及固化理论模型

1.1 铝蜂窝夹层板几何模型

铝蜂窝夹层板采用热压罐共固化即在工装上依次放置工件、压板、PET层、真空袋进行固化，如图1所示[18]。一般情况下，工装材料与成形材料一致，以避免二者收缩率不同导致的固化误差。在多功能管路内嵌的蜂窝夹层结构周边放置固体或软木挡块，可防止J-47C胶膜从层间边缘的流失，也可减小蜂窝夹层结构的侧面变形。固化板材上的均压板能改善制件表面质量、均匀分散热压罐压力。固化时，工装等多种因素导致板材上下面温度升高速率不同，而PET层（辅助固化层）具有一定的透气作用，可调节板材上下面的温度变化速率。

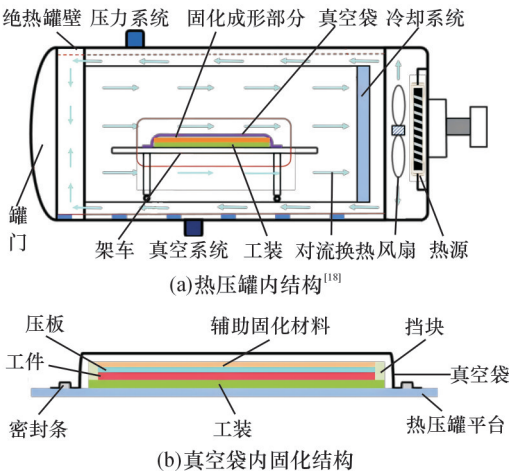


图1 热压罐固化示意图

Fig.1 Autoclave curing schematic diagram

铝蜂窝夹层板试件由上下面板（厚度0.3 mm的铝合金）与蜂窝芯通过胶膜（厚度为0.15 mm）黏结而成。蜂窝芯的材料为铝合金，蜂窝芯（正六边）形边长l、蜂窝芯壁厚d、蜂窝芯层高度h_c分别为4 mm、0.04 mm和19.1 mm。

航空航天领域应用的铝蜂窝夹层板需在板材内部安装埋件，以满足应用需求。包含预埋件的铝蜂窝夹层板尺寸过大，对仿真计算造成困难，于是缩小结构进行研究。如图2所示，埋件与工装材料均为结构钢，板材的长、宽均为100 mm。

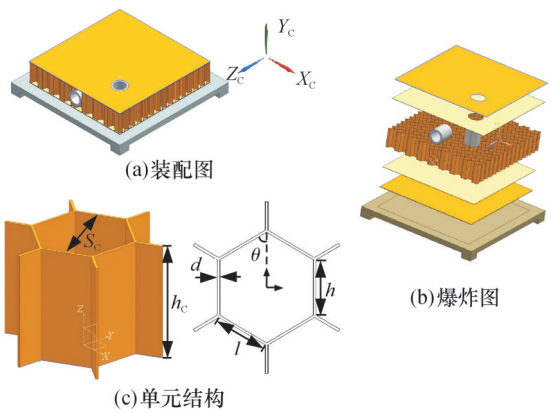


图2 铝蜂窝夹层板几何结构

Fig.2 Geometric structure of aluminum honeycomb sandwich panel

1.2 固化理论模型

铝蜂窝夹层结构固化时，胶黏剂内部发生耦合的热-化学耦合效应。根据Fourier热传导定

律，有[19-20]

$$\rho C\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}(k_x\frac{\partial T}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(k_y\frac{\partial T}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(k_z\frac{\partial T}{\partial z})+\dot{\varphi} \quad (1)$$

$$\dot{\varphi}=\rho_r H_r\frac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}t}$$

$$\frac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}t}=A_0 exp(-\frac{E}{RT'})\alpha^m(1-\alpha^n)$$

式中：ρ、C、k_x、k_y、k_z分别为复合材料的密度和比热容，以及X向、Y向、Z向的热导率；T为某时刻的瞬态温度；t为固化时间；$\dot{\varphi}$为单位体积的热源在单位时间内的生成热；ρ_r为胶膜密度；H_r为胶膜的总反应热；A_0为频率因子；E为活化能由；R为物理学中的普适气体常数；T'为热力学温度；m、n为化学反应中的级数。

由于胶膜的存在，分析铝蜂窝夹层板构件变形需要利用固化力学本构模型[20]。本文采用基于路径依赖理论(path-dependent theory)的数值模型[21-22]预测复合材料的固化变形行为。树脂基体的材料参数在玻璃态与橡胶态为常数，但材料性能在玻璃化转变温度T_g附近会随相变出现不连续跃迁，则基于路径依赖理论的本构方程为

$$\sigma_i=\begin{cases}C_{ij}^{\infty}\varepsilon_j & T'\geqslant T_g\\ \varepsilon_j(2C_{ij}^{0}-C_{ij}^{\infty})|_{t=t_{vit}} & T'<T_g\end{cases} \quad (2)$$

式中：σ_i为此固化阶段的应力张量；C_{ij}^0、C_{ij}^{∞}分别为未松弛和完全松弛时的四阶松弛模量张量；ε_j为应变张量；t_{vit}为树脂达到玻璃化的时间。

复合不同线性热膨胀系数材料[23]时，内部升降温造成的约束应力为

$$\sigma_x=(\alpha_1-\alpha_2)\Delta T\frac{E_1}{1-\mu_1} \quad (3)$$

式中：σ_x为胶膜中的应力；α_1、α_2分别为胶膜层和铝合金板的线性热膨胀系数；ΔT为整体结构的温度变化；E_1、μ_1分别为胶膜的弹性模量和泊松比。

铝合金、胶膜的线性热膨胀系数不同，任何温度变化都会在胶膜内部产生应力σ_x[24]。

恒温固化期间，胶膜内部累积的应力[25]为

$$\sigma_s=-\int_0^{t_{cu}}\varepsilon_s\mathrm{d}t\int_0^{t_{cu}}\frac{E_s}{1-\mu_1}\mathrm{d}t \quad (4)$$

式中：ε_s、E_s、t_{cu}分别为胶膜的常温固化收缩率、弹性模量和常温固化时间。

胶膜在固化温度T_{cu}下完成固化、在使用温度T_u下使用时，胶膜受到铝合金约束而产生应力

$$\sigma_{cu}=\frac{T_u-T_{cu}}{1-\mu_1}(\int_{T_{cu}}^{T_u}\alpha_1\mathrm{d}T-\alpha_2)\int_{T_{cu}}^{T_u}E\mathrm{d}T \quad (5)$$

式中：E为胶膜在T_{cu}与T_u间的弹性模量。

温度变化时，胶膜中的最大应力为

$$\sigma_{all}=\sigma_s+\sigma_{cu}+\sigma_{pc}+\sigma_{tm} \quad (6)$$

式中：σ_{pc}为后固化应力，即常温下完成固化的有机化合物体系在高温二次固化收缩中产生的内部应力[26]。

本文不研究后固化应力σ_{pc}与温度应力σ_{tm}，故二者可忽略不计。

2　仿真模型验证

如图3所示，仿真由几何模型出发，依次定义材料、构建有限元模型、设置边界条件，然后结合相应的理论模型进行求解，最后得到合理的仿真结果。

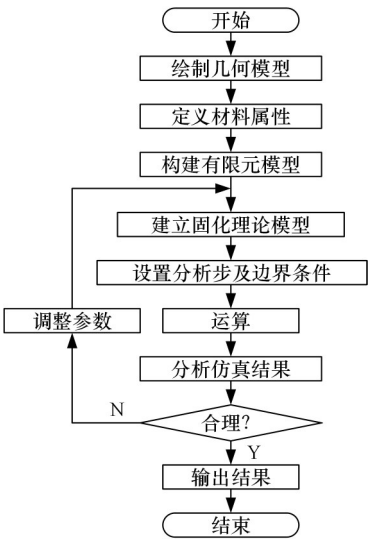


图3　仿真流程图

Fig.3　Simulation flow chart

2.1　实验材料及条件

为确保仿真模型准确反映蜂窝板在固化过程中的实际力学行为，基于文献调研与制造商提供的相关数据，确定表1所示的部件材料。通过分析材料在固化温度区间(20～130 ℃)内的热-力耦合特性，重点考察热膨胀系数、结构刚度等参数的温度依赖关系，形成具有工程可信度的数据。

表1　零部件材料

Tab.1　Parts and components materials

	面板	蜂窝芯	胶膜	发泡胶
材料	2024T3	5A02H	J-47C	J-47D

考虑实际固化的支撑与约束，在模型相应位置施加合理的边界条件，模拟工装对蜂窝板的支持。依据加热装置的特性设定温度边界条件、构建差温场环境，使仿真场景贴近真实固化过程。边界条件设定如下：

(1)设置加热、保温和冷却的3个载荷分析步。如图4所示，加热(20 ℃升温到130 ℃)时间为55 min，升温速率约为2 ℃/min，保温时间为4 h，降温速率约为0.5 ℃/min。

(2)加热20min后的压力为0.5 MPa，保压直到冷却至室温，然后卸载压力至0.1 MPa，如图4所示。

(3)设置热边界条件。施加“对流”于模型表

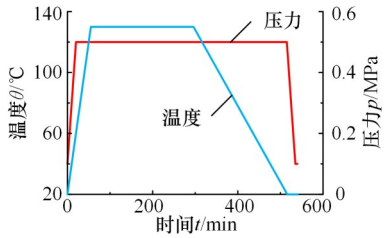


图4 热压固化温度及压力条件

Fig.4 Curing temperature and pressure conditions

面，其中，加热与保温期间的对流为强制对流，冷却过程的对流为自然对流。

(4)设置力学边界条件。通过仿真软件平台的位移约束模块，在工装底部设置“固定支撑”。实际固化时存在压板，故对板材表面施加0.15 MPa压力后叠加标准重力场，以再现固化过程中的力学环境。

2.2 铝蜂窝夹层板固化仿真

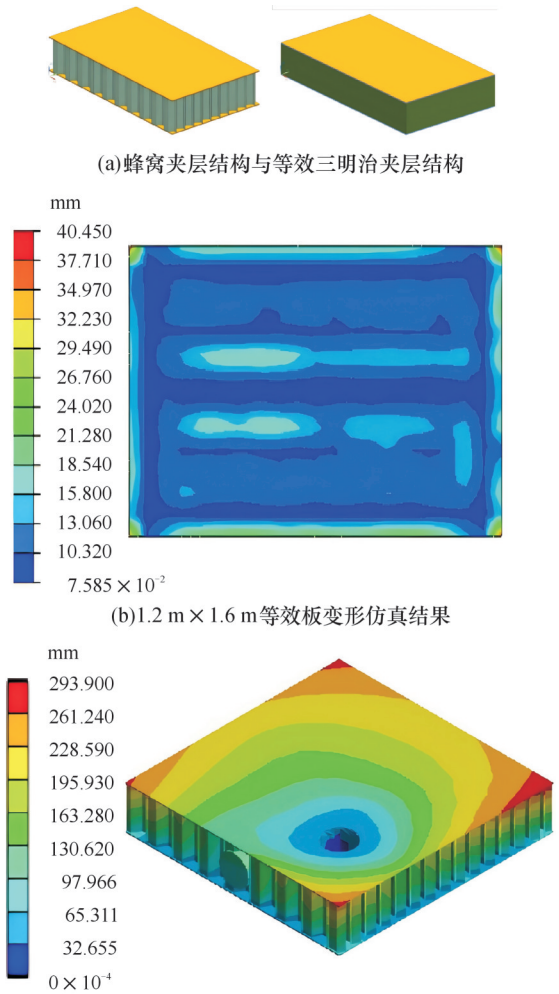
铝蜂窝夹层板蜂窝芯过多导致仿真计算的网格数量庞大，大大增加计算量，因此采用等效法将蜂窝芯等效为三明治夹层结构，如图5a所示。对包含热管预埋件的1.2 m×1.6 m等效铝蜂窝夹层板进行热固化变形仿真，平面度的仿真结果为0.4529 mm，最大偏差集中于工件边缘，如图5b所示。处理实际扫描点云，得到的平面度0.3820 mm与仿真结果的相对误差为15.6%(主要源于仿真中材料的各向同性假设与点云配准精度限制)，处于合理范围内，验证了等效模型的合理性。

为研究铝蜂窝夹层板预埋件的区域变形，对局部精细化模型进行仿真。如图5c所示，四角翘曲且最大位移出现在板件对角线端点，四角相对于中心的位移差最大值为0.02 mm(±5%)，验证了模型设置的合理性。值得注意的是，局部模型采用离散实体单元且未考虑整体结构的边界效应，故局部模型的刚度大于真实值，翘曲变形小于实际变形。

仿真结果显示：在0～55 min的加热阶段，温度从20 ℃非线性上升至130 ℃(峰值偏差为±2 ℃)，平均升温速率为2 ℃/min；保温阶段的温度为(129±2)℃；冷却阶段采用自然对流边界条件，温度最终稳定在30.5 ℃，平均降温速率为0.453 ℃/min。

2.3 实验验证

为验证有预埋件的局部精细化模型的有效性，对比分析图2所示板材(长、宽均为100 mm)的仿真结果与实验结果。使用手持式3D激光扫描仪扫描实验件、获取测量数据。热压罐固化后的板材变形测量结果如图6a所示，相同边界条件下的板材变形仿真结果如图6b所示。



(a)蜂窝夹层结构与等效三明治夹层结构

(b)1.2 m×1.6 m等效板变形仿真结果

(c)小夹层板固化变形仿真结果

图5 蜂窝夹层结构等效模型与变形仿真结果

Fig.5 Equivalent Model and Deformation Simulation Results of Honeycomb Sandwich Structure

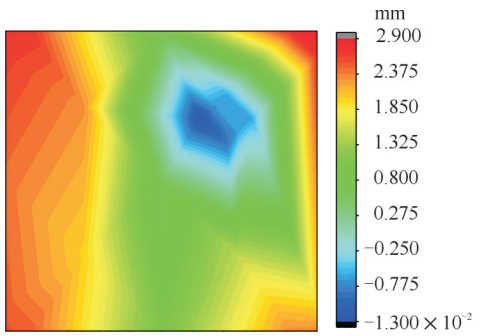
测点位置的布局图及测点编号如图7所示，图8所示为同一位置变形量的测量值与仿真值。图8中，同一位置变形量的测量值与仿真值的最大偏差为0.0103 mm，处于可接受范围内，验证了仿真模型的可靠性与准确性。仿真未完全考虑固化过程温度梯度、材料性能变化等实际条件，故出现局部误差。如图6、图8所示，局部特征点变形量的仿真值与测量值的变化趋势一致，验证了仿真模型的可信度。

3 铝蜂窝夹层板因素对变形影响规律

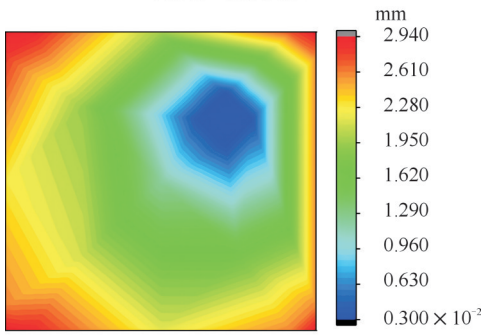
3.1 结构刚度

蜂窝壁厚直接影响芯材整体结构的力学性能(弹性模量、剪切模量)，进而影响夹层板的抗变形能力。因此本节通过改变蜂窝壁厚来改变夹层板的结构刚度，以研究蜂窝壁厚与固化变形的关系。

将铝蜂窝芯的铝箔厚度作为刚度的量化指标，采用“模态分析”计算整体夹层板模型前3阶



(a)实验结果变形量



(b)仿真结果变形量

图6　工件变形量

Fig.6　Deformation of workpiece

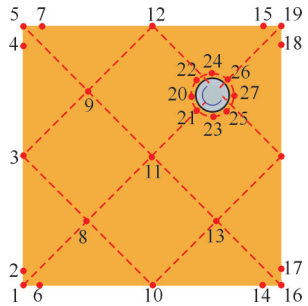


图7　测点布局图及编号

Fig.7　Layout and numbering of measurement points

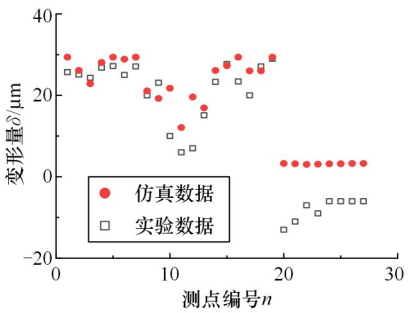


图8　变形量的实验值与仿真值

Fig.8　Experimental and simulated values of deformation

固有频率。如表2所示，蜂窝壁厚从0.04 mm增至0.08 mm时，固有频率近似线性增长，证明壁厚越大，整体结构刚度越大。

采用仿真分析蜂窝板结构刚度对结构变形的影响时，只改变蜂窝芯单元壁厚。蜂窝板单元壁厚为0.04 mm时，结构最大变形量29.39 μm出现在上面板的四角，如图9a所示，其中自左至右，依

表2　不同蜂窝壁厚下板材固有频率

Tab.2　Natural frequencies of plates with different honeycomb wall thicknesses　Hz

壁厚d/mm	一阶频率f_1	二阶频率f_2	三阶频率f_3
0.04	128.5	307.1	319.7
0.06	135.8	323.4	338.2
0.08	141.2	331.9	350.7

次为铝蜂窝夹层板整体变形、蜂窝芯变形与上面板变形情况。蜂窝板单元壁厚升至0.06 mm(蜂窝板单元壁厚增大50%)后，结构最大变形量降低至24.20 μm(减小17.7%)，如图9b所示。蜂窝板单元壁厚增至0.08 mm后，结构最大变形量降低至22.37 μm(减小23.9%)，上面板平均变形均有所减小，如图9c所示。上述结果证实结构刚度与结构变形之间存在显著的负相关性，即随着蜂窝板单元壁厚的增大，结构整体刚度增大，能更有效抵抗加温固化过程中的热-力耦合效应产生的翘曲变形。

3.2　界面摩擦力

工装对铝面板的摩擦力会阻碍面板的自由变形，在界面处产生剪切应力。蜂窝板固化或冷却后移除工装时，摩擦力限制残留在面板中的热应力，形成不均匀的应力分布，引发翘曲。为探索蜂窝板铝面板与工装的界面摩擦力对蜂窝板翘曲变形量的影响，通过仿真得到不同摩擦因数的蜂窝板翘曲变形，如图10所示。蜂窝板铝板与工装间的界面摩擦力对蜂窝板热固化过程中的翘曲变形有显著的影响。摩擦因数从0.3减小至0.2时，最大变形量减小6.8%(由49.299 μm变为45.931 μm)；摩擦因数减小到0.1时，最大变形量再次减小5.5%。仿真结果表明摩擦因数越小，界面摩擦力越小，翘曲变形最大量也越小。减小铝面板与工装间的摩擦因数，会使铝面板在热循环中更好适应工装的热变形，减小非均匀热膨胀/收缩引发的面外翘曲变形。

3.3　发泡胶膨胀

为考察发泡胶膨胀系数对蜂窝板热固化过程的影响，分析不同发泡胶膨胀系数的蜂窝板翘曲变形。如图11所示，发泡胶按填充在蜂窝板埋件周围。变温时，发泡胶的理论自由膨胀量显著大于压紧衬套和铝蜂窝，但法向刚度远低于与铝蜂窝，导致三者无法自由独立膨胀。发泡胶的法向刚度小于铝面板与铝蜂窝，而热膨胀系数大于压紧衬套与铝蜂窝，所以三者变形在交界区域相互影响。发泡胶的形状与尺寸在温度升高后趋于稳定，并在后续降温时产生微量的缩小。上蒙皮的

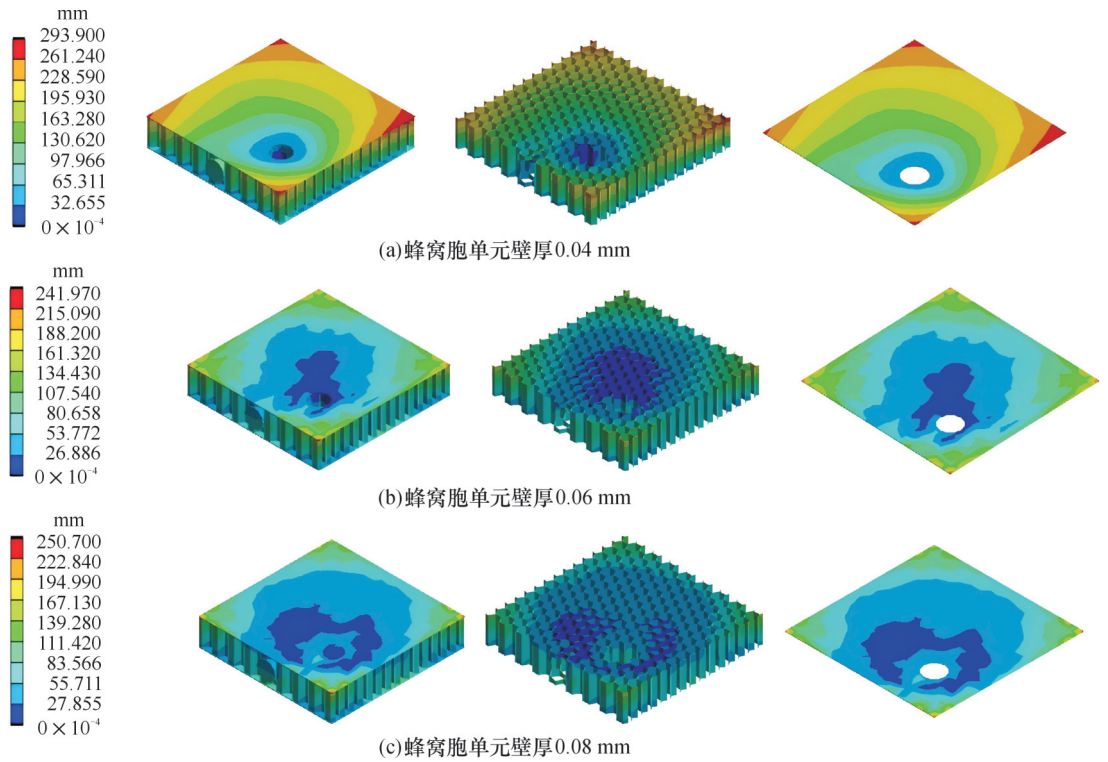


图9　针对结构刚度仿真变形结果图

Fig.9　Deformation simulation result diagrams for structural stiffness

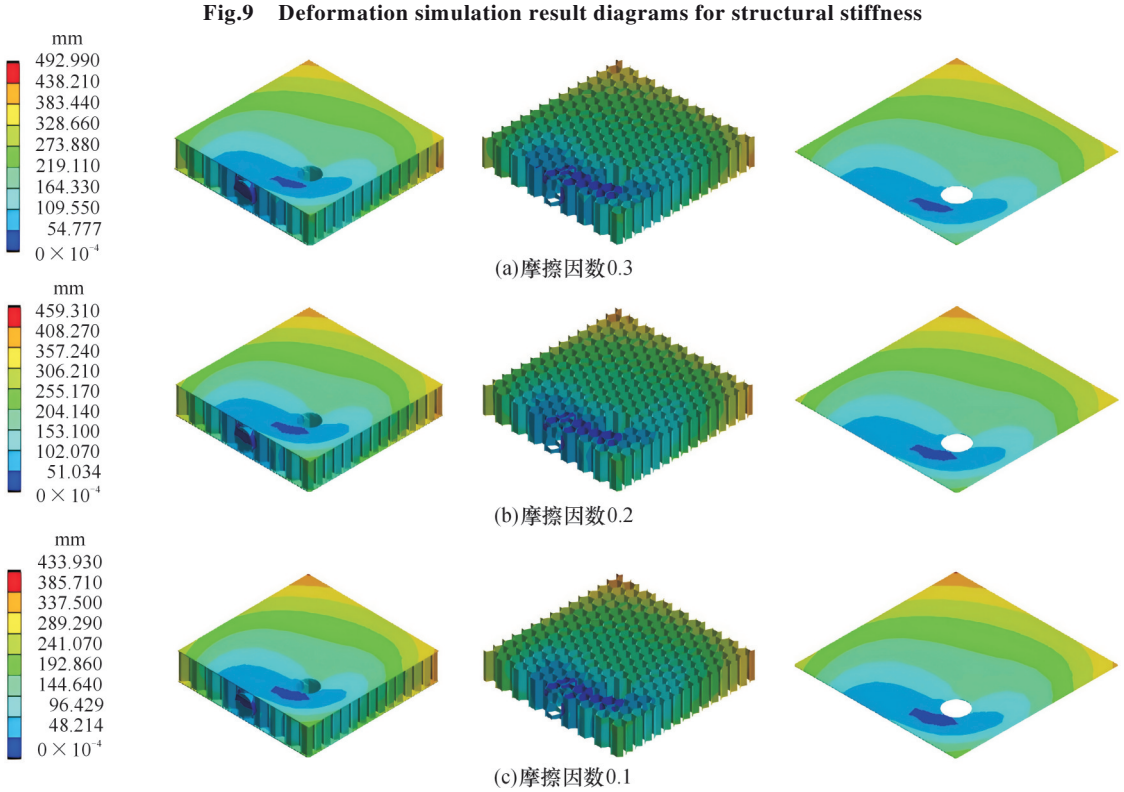


图10　针对工装与板材间摩擦因数仿真变形结果

Fig.10　Simulation deformation of friction coefficient between tooling and plate

法向变形量与发泡胶的变化相同即先变大后减小。

发泡胶内部产生拉应力，进而在周边区域形成收缩牵引力。上蒙皮法向变形“先大后小”的本质是牵引力传递衰减。近埋件区域受变形量受约束影响较大，但远离埋件及发泡胶处的变形约束几乎消失。

由图12所示的仿真结果可知，蜂窝板外形基本保持平整，发泡胶填充附近区域因局部牵引力作用而产生最小形变，但局部牵引力对蜂窝板平整度的影响有限；随着膨胀系数的增大，整体最大变形逐步增大，中间蜂窝芯（与发泡胶接触最多的

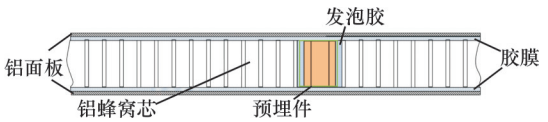


图 11　发泡胶填充位置及方式

Fig.11　Foam filling position and method

埋件区域)的最大变形量也依次增大。膨胀系数为5×10^{-5}、10^{-4}与5×10^{-4}时,埋件区域最大变形量分别为 47.2685 μm、49.1037 μm、50.0284 μm,且最大变形量依次增大 3.9%与 1.91%。

综上分析可知,发泡胶的热膨胀系数对蜂窝板翘曲变形,特别是埋件周边区域的局部变形存在可量化的影响。较小的膨胀系数有助于保持铝蜂窝夹层板的整体形态与平面度,反之则会加大局部变形。发泡胶在结构中用量有限,对整体翘曲变形的影响显著弱于结构刚度和界面摩擦力。

实际工程应用中,可通过优化蜂窝芯设计(适当增加壁厚)增大整体刚度以抑制变形;精细调控工装-面板界面状态(选择摩擦因数合适的工装材料或涂层),以约束面板运动;尽可能选用小膨胀系数的发泡胶以减小局部变形的影响。

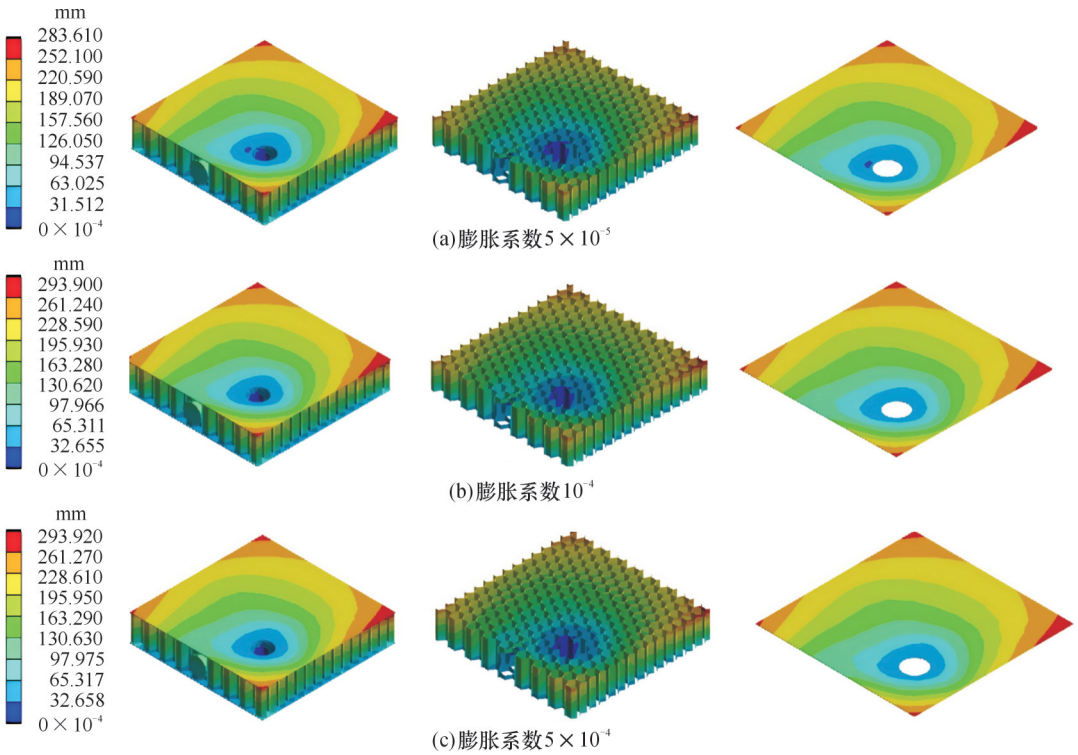


图 12　发泡胶不同热膨胀系数的仿真变形结果

Fig.12　Simulation deformation results of thermal expansion coefficient of foam

4　结语

1)结构刚度是抑制整体翘曲变形的决定性因素之一。仿真结果明确显示,随着蜂窝壁厚的增加(结构刚度增大),板材的最大变形量显著减小。壁厚从 0.04 mm 增至 0.06 mm(增大 50%)时,最大变形量相对减小 17.7%;壁厚从 0.04 mm 增至 0.08 mm(增大 100%)时,最大变形量相对减小 23.9%。这表明提高结构刚度能有效约束固化过程中的非协调变形,减小最终翘曲。

2)界面摩擦力对变形模式与幅度具有一定的调控作用。研究结果揭示:减小摩擦力会抑制翘曲变形,摩擦因数从 0.3 减至 0.2 时,最大变形量减小 6.8%;进一步减至 0.1 时,最大变形量再减小 5.5%。这说明适度的界面摩擦力有助于约束面板在变温过程中的自由变形,减少因面板与芯材或工装间的热失配导致的面外变形。

3)发泡胶膨胀系数对局部变形存在可观测但有限的影响。膨胀系数增大会导致与发泡胶接触区域的蜂窝芯局部变形加大,轻微影响整体平面度。因此,在满足功能要求的前提下,选择较小膨胀系数的发泡胶有利于保持铝蜂窝夹层板的整体形态与平面度。

参考文献:

[1] HE Meifeng, HU Wenbin. A Study on Composite Honeycomb Sandwich Panel Structure[J]. Materials & Design, 2008, 29(3): 709-713.

[2] WANG Mingwei, CAI Zhongyi, ZHANG Xi. Analysis of Core Instability in the Plastic Forming of Honeycomb Sandwich Panels[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 36: 4005-4019.

[3] WAHL L, MAAS S, WALDMANN D, et al. Fatigue in the Core of Aluminum Honeycomb Panels: Lifetime Prediction Compared with Fatigue Tests[J]. International Journal

of Damage Mechanics, 2014, 23(5): 661-683.
[4] YU Jinguang, YANG Zhen, ZHAO Chu, et al. Seismic Performance of Aluminum Honeycomb Sandwich Panel Buckling-restrained Steel Plate Shear Wall[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 215: 108528.
[5] LEE I T, SHI Y, AFSAR A M, et al. Low Velocity Impact Behavior of Aluminum Honeycomb Structures[J]. Advanced Composite Materials, 2010, 19(1): 19-39.
[6] HODGE A, DAMBAUGH G. Analysis of Thermally Induced Stresses on the Core Node Bonds of a Co-cured Sandwich Panel [J]. Journal of Composite Materials, 2013, 47(4): 467-474.
[7] CENTEA T, GRUNENFELDER L K, NUTT S R. A Review of Out-of-autoclave Prepregs-Material Properties, Process Phenomena, and Manufacturing Considerations [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 70: 132-154.
[8] AL-DHAHERI M, KHAN K A, UMER R, et al. Process Induced Deformations in Composite Sandwich Panels Using an In-homogeneous Layup Design[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 137: 106020.
[9] AL-DHAHERI M, KHAN K A, UMER R, et al. Process-induced Deformation in U-shaped Honeycomb Aerospace Composite Structures [J]. Composite Structures, 2020, 248: 112503.
[10] YUAN Zhenyi, WANG Yongjun, PENG Xiongqi, et al. An Analytical Model on Through-thickness Stresses and Warpage of Composite Laminates Due to Tool-Part Interaction[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 91: 408-413.
[11] SONG Yunhe, JI Haonan, YANG Na, et al. Stiffness Check and Deformation Control of Composite Honeycomb Sandwich Structures in Bonding Process [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2025, 3120(1): 012005.
[12] 徐景校，花宏亮，王玉魁，等. 变厚度铺层Nomex蜂窝夹层件固化变形的数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报，2024, 56(8): 56-67.
XU Jingxiao, HUA Hongliang, WANG Yukui, et al. Numerical Simulation of Cure-induced Deformation of Nomex Honeycomb Sandwich Structure with Variable Thickness Layup [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(8): 56-67.
[13] KRATZ J, HUBERT P. Processing Out-of-autoclave Honeycomb Structures: Internal Core Pressure Measurements[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42(8): 1060-1065.
[14] 汪艳金，邱胜，唐义号. 直升机共形天线复合材料蜂窝夹层结构成型技术研究[J]. 现代制造技术与装备，2024, 60(5): 74-76.
WANG Yanjin, QIU Sheng, TANG Yihao. Research on Forming Technology of Composite Honeycomb Sandwich Structure for Helicopter Conformal Antennas[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2024, 60(5): 74-76.
[15] TAVARES S S, CAILLET-BOIS N, MICHAUD V, et al. 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.
[16] 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: Applied Science and Manufacturing, 2006, 37(5): 804-812.
[17] 崔立军，孔娇月，陈海燕，等. 复合材料蜂窝夹层结构挖补修理表面平整度研究[J]. 复合材料科学与工程，2026(1): 102-108.
CUI Lijun, KONG Jiaoyue, CHEN Haiyan, et al. Research on Surface Smoothness of Composite Honeycomb Sandwich Structure Scarf Repair[J]. Composites Science and Engineering, 2026(1): 102-108.
[18] 杜新元. 复合材料热压罐设计与温度和压力解耦控制研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2023.
DU Xinyuan. Composite Autoclave Design and Research on Decoupling Control of Temperature and Pressure[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023.
[19] FABRIZIO M, LAZZARI B. Stability and Second Law of Thermodynamics in Dual-phase-lag Heat Conduction[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 74: 484-489.
[20] LI Yongshan, CHEN Guangchang, GE Jingran, et al. Modeling of Curing Process and Residual Stress Analysis of Thick-section Thermosetting Composites [J]. Acta Mechanica Sinica, 2025, 42(1): 424411.
[21] 周诗雨，安鲁陵，赵聪，等. 几何因素对蜂窝夹层构件固化变形的影响研究[J]. 机械制造与自动化，2023, 52(4): 96-100.
ZHOU Shiyu, AN Luling, ZHAO Cong, et al. Research on Influence of Structural Factors on Curing Deformation of Honeycomb Sandwich Components[J]. Machine Building & Automation, 2023, 52(4): 96-100.
[22] KELLER C. Viscosity Solutions of Path-dependent Integro-differential Equations[J]. Stochastic Processes and Their Applications, 2016, 126(9): 2665-2718.
[23] ASTM. E251-92 Standard Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages [J]. ASTM, 2014.
[24] van BAVEL B, SHISHKINA O, VANDEPITTE D, et al. Reliability-based Composite Pressure Vessel Design Optimization with Cure-induced Stresses and Spatial Material Variability[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2024, 432: 117463.
[25] KAWIAK M, SAJEK A. Failure of the Roller Mill Caused by Rolling Contact, Shrinkage Stress, and Intentionally Introduced Defects[J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 179: 109792.
[26] ZHAO Chunyan, WEN Rongjia, DAI Yuqing, et al. Hydrolysis Degradation Mechanisms of Epoxy Resin Coatings on Concrete in Hydrothermal Environment Resolved by Molecular Dynamic Simulations[J]. Construction and Building Materials, 2025, 479: 141463.

（编辑 张 洋）

作者简介：吴重军*（通信作者），男，1988年生，副教授、博士研究生导师。E-mail：wcjunm@dhu.edu.cn

本文引用格式：
吴重军，吴春雪，康坤海，等. 多因素影响的铝蜂窝夹层结构热固化变形预测及验证[J]. 中国机械工程，2026，37(7)：1771-1778.
WU Chongjun，WU Chunxue，Kang Kunhai，et al. Prediction and Verification of Thermal Curing Deformation of Aluminum Honeycomb Sandwich Structures under MultiFactor Effects[J]. China Mechanical Engineering，2026，37(7)：1771-1778.