

# 几何因素对蜂窝夹层构件固化变形的影响研究

周诗雨, 安鲁陵, 赵聪, 张永明  
(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**针对热压罐固化工艺复合材料蜂窝夹层构件的固化变形问题,以L型蜂窝夹层构件为研究对象,分析蜂窝夹层结构中蜂窝的几何因素对该构件固化变形影响规律。利用有限元仿真的方法,以L型构件的回弹角为评价指标,对蜂窝相对L型构件圆角的距离、蜂窝倒角和蜂窝厚度这3个几何因素对复合材料蜂窝夹层构件固化变形的影响进行研究。结果表明:蜂窝倒角对固化变形的影响最为显著,在设计蜂窝结构时,倒角应取 $30^\circ$ ;回弹角随蜂窝倒角增大而减小,固化变形随蜂窝位置远离圆角先增大后减小,随着厚度的增大而先增大后减小。

**关键词:**复合材料;蜂窝夹层结构;固化变形;有限元法;优化

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)04-0096-05

## Research on Influence of Structural Factors on Curing Deformation of Honeycomb Sandwich Components

ZHOU Shiyu, AN Luling, ZHAO Cong, ZHANG Yongming

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** To solve the curing deformation of composite honeycomb sandwich members with hot-pressing tank co-curing process, with the L-type honeycomb sandwich member as the research object, analyzes the influence of honeycomb geometric factors on the curing deformation of the component. By finite element simulation and with the springback angle of L-shaped component as the evaluation index, the influence on the curing deformation of composite honeycomb sandwich component by three geometric factors like the distance between honeycomb and L-shaped component, honeycomb chamfer and honeycomb thickness is studied. The results show that the honeycomb chamfer has the most obvious influence over the curing deformation, and the springback angle decreases with the increase of honeycomb chamfer, and the chamfer should be set as  $30^\circ$  in the design of honeycomb structure. The curing deformation increases first and then decreases with the honeycomb position away from the fillet, and increases first and then decreases with the thickness.

**Keywords:** composite; honeycomb sandwich composite; cure-induced deformations; finite element method; optimization

## 0 引言

复合材料蜂窝夹层结构是一种特殊的复合材料结构,通常由上、下两层较薄的复合材料面板和中间的蜂窝芯材组成。因其具有低密度、高强度、高刚度等优点,被广泛应用于航空航天、通信卫星、汽车等领域<sup>[1]</sup>。针对蜂窝夹层结构复合材料的成型,通常采用胶接成型和共固化成型等方式。其中,前者是先通过热压罐工艺固化两侧面板,再将蜂窝与其胶接在一起。后者是将未固化的上、下面板和蜂窝芯按顺序铺放在一起,通过热压罐工艺一次固化成型,其步骤较之胶接成型更为简单,制造周期短,成本低<sup>[2]</sup>。

在采用热压罐工艺固化成型时,多种因素共同作用导致了复合材料固化变形的产生,其中内因有材料的属性和构件的几何形状等,外因有模具材料和成型工艺等<sup>[3]</sup>。针对蜂窝夹层结构的共固化过程分析多集中在蜂窝塌陷、滑移等结构缺陷上<sup>[4-5]</sup>。在对蜂窝夹层结构固化变形的

综合分析方面,AI-DHAHERI M等<sup>[6]</sup>针对基于织物预浸料和Nomex蜂窝芯的U型夹层结构,表明蜂窝夹层结构的固化变形比层合结构的变形小。AI-DHAHERI M等<sup>[7]</sup>也针对平面夹层板结构进行了研究,表明铝蜂窝芯可有效减少夹芯板的翘曲。

综上所述,大部分以复合材料蜂窝夹层结构固化变形为对象进行的研究,对蜂窝的几何因素对整体夹层结构的固化变形鲜有涉及。因此,本文以基于织物预浸料和Nomex蜂窝芯的L型蜂窝夹层构件为研究对象,研究分析了蜂窝夹层结构中蜂窝的几何因素(蜂窝相对L型构件圆角的距离、蜂窝倒角的角度和蜂窝厚度)对构件固化变形的影响规律,为蜂窝夹层结构的设计和制造提供参考。

## 1 几何建模及数学模型

在飞行器的结构设计中,为了提高整体大型壁板的刚性和强度,常会采用在壁板内部增加J形梁的方式<sup>[8]</sup>。J形

基金项目:国防基础科研计划项目(JCKY2019283-WSZC006)

第一作者简介:周诗雨(1997—),女,河南漯河人,硕士研究生,研究方向为复合材料成型工艺模拟,m13703442418@163.com。

梁的截面如图 1 所示,提取该结构的主要特征,即相互之间呈一定角度的面板与其中一个面板上的蜂窝夹层,将其抽象为如图 2 所示的 L 型蜂窝夹层构件作为本文的研究对象。

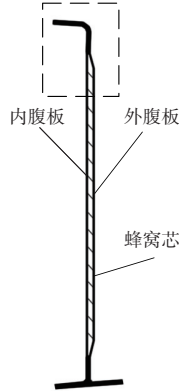


图 1 J 形梁截面图

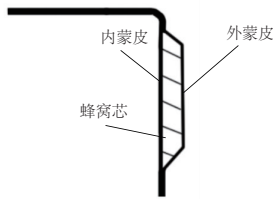


图 2 L 型蜂窝夹层构件

为了提高成型质量,从制造的角度为蜂窝夹层结构设计提供借鉴,本文分析了蜂窝相对于 L 型结构圆角的距离、蜂窝芯上的倒角大小和蜂窝芯厚度这 3 个几何因素对 L 型蜂窝夹层构件固化变形的影响。本文基于有限元仿真方法,利用 Pam-Distortion 软件建立 L 型蜂窝夹层构件共固化成型的有限元模型。通过正交实验法设计实验,分析了上述 3 个几何因素对固化变形量的影响,优化结构参数组合,提高固化成型精度。

### 1.1 L 型蜂窝夹层构件几何模型

使用软件 Catia 建立 L 型蜂窝夹层构件的几何模型。为降低模型结构的复杂性,对蜂窝夹层结构采用等效结构建模<sup>[9]</sup>。L 型蜂窝夹层构件和模具的几何模型见图 3。其中,L 型结构的一侧面板上含有蜂窝夹层,一侧面板不含。L 型结构的边长为 170 mm,宽度为 230 mm,不含蜂窝处的厚度为 3.2 mm,圆角半径 10 mm。采用含蜂窝一侧的面板回弹量  $\Delta\theta$  衡量固化变形值。

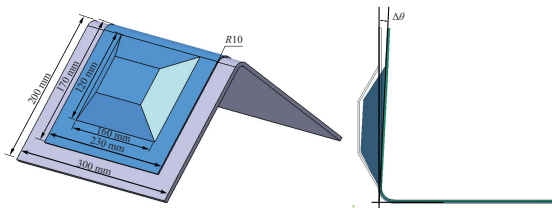


图 3 L 型蜂窝夹层复合材料构件的几何模型

## 1.2 基本方程

在热固性树脂基复合材料的固化过程中,会发生相互耦合的热反应与化学反应,其数学模型可根据 Fourier 热传导定律结合能量平衡原理表示如下:

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

式中: $\rho$  为复合材料的密度; $C$  为复合材料的比热容; $k_x$ 、 $k_y$ 、 $k_z$  分别为复合材料沿全局坐标系  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的导热系数;上述材料参数可按照混合率计算得到; $T$  为某一时刻下的瞬态温度; $t$  为固化时间; $\dot{\Phi}$  为单位时间内单位体积中内热源的生成热,其数值可由下式确定。

$$\dot{\Phi} = \rho_r (1 - V_f) H_r \frac{d\alpha}{dt} \quad (2)$$

式中: $\rho_r$  为树脂密度; $V_f$  为纤维的体积分数; $d\alpha/dt$  为树脂的固化反应速率; $H_r$  为树脂的总反应热。

固化动力学方程:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A_0 \exp\left(-\frac{E}{RT'}\right) \alpha^m (1-\alpha)^n \quad (3)$$

式中: $A_0$  为频率因子; $E$  为活化能; $R$  为普适气体常数; $T'$  为热力学温度; $m$ 、 $n$  表示化学反应的级数。

对复合材料构件变形进行分析时需要利用固化力学本构模型,本文利用具有较高的计算精度与效率的 Path-dependent 模型分析复合材料固化变形。在 Path-dependent 模型中,在橡胶态和玻璃态时,树脂和复合材料的材料性能参数(如弹性模量、热膨胀系数等)均为常数;在温度达到玻璃态转变温度  $T_g$  时,树脂和复合材料的材料性能参数发生阶跃变化。

Path-dependent 本构方程为

$$\sigma_i = \begin{cases} C_{ij}^\infty \varepsilon_j & T' \geq T_g(\alpha) \\ C_{ij}^0 \varepsilon_j - (C_{ij}^\infty - C_{ij}^0) \times \varepsilon_j |_{t=t_{vit}} & T' < T_g(\alpha) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $C_{ij}^\infty$  和  $C_{ij}^0$  分别是完全松弛时和未松弛时的四阶松弛模量张量; $\varepsilon_j$  是应变张量; $t_{vit}$  是树脂达到玻璃化点的时间。

## 2 模型验证

### 2.1 实验材料

本文使用的模型为 L 型蜂窝夹层构件,其中蒙皮使用的复合材料是某研究所提供的碳纤维增强环氧树脂编织预浸料,单层厚度 0.2 mm,以 [0/45/0/45]<sub>s</sub> 的铺层顺序在上、下表面各铺 8 层,纤维密度  $\rho_f$  为  $1790 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,树脂密度  $\rho_r$  为  $1130 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。蜂窝材料为蜂窝单壁厚为 0.08 mm,孔径尺寸边长为 2.75 mm 的正六边形 Nomex 蜂窝,成型模具材料为不锈钢。

热-化学分析、热-力学分析相关的材料参数分别见表 1、表 2。

表 1 热-化学分析相关的材料参数

热性能参数				固化动力学参数						
$C_{p,c}/$ ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	$K_{p,11}, K_{p,22}/$ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	$K_{p,33}/$ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	$\rho_m/$ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	$C_m/$ ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	$K_c/$ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	$A/$ ( $s^{-1}$ )	$E/$ ( $J \cdot mol^{-1}$ )	$m$	$n$	$H_R/$ ( $J \cdot kg^{-1}$ )
1 140	4.63	0.75	7 800	470	49.8	9 930.76	60 030	0.36	1.25	403 500

表 2 热-力学分析相关的预浸料材料参数

热力学性能参数	数值	热力学性能参数	数值
树脂橡胶态弹性模量 $E_{r,r}/GPa$	0.039	树脂玻璃态弹性模量 $E_{r,g}/GPa$	3.6
树脂橡胶态泊松比 $\nu_{r,r}$	0.497	树脂玻璃态泊松比 $\nu_{r,g}$	0.38
树脂橡胶态切变模量 $G_{r,r}/GPa$	2.0	树脂玻璃态切变模量 $G_{r,g}/GPa$	5.0
纤维弹性模量 $E_{f,11}/GPa$	294	纤维弹性模量 $E_{f,22}, E_{f,33}/GPa$	15
纤维泊松比 $\nu_{f,12} = \nu_{f,13}$	0.4	纤维泊松比 $\nu_{f,23}$	0.3
纤维切变模量 $E_{f,12}, E_{f,13}/GPa$	30	纤维切变模量 $E_{f,23}/GPa$	7
预浸料化学收缩系数 $\alpha_{p,11}, \alpha_{p,22}$	0	预浸料化学收缩系数 $\alpha_{p,33}$	-0.016
预浸料热膨胀系数 $\beta_{p,11}, \beta_{p,22}/(\times 10^{-6}/^{\circ}C)$	-0.05	预浸料热膨胀系数 $\beta_{p,33}/(\times 10^{-6}/^{\circ}C)$	33.6
模具弹性模量 $E_m/GPa$	210	模具切变模量 $G_m$	79.3
模具泊松比 $\nu_m$	0.3	模具热膨胀系数 $\beta_m/(\times 10^{-6}/^{\circ}C)$	0.13

### 2.2 L型蜂窝夹层构件固化过程仿真

采用顺序耦合的方法,依次使用热-化学模块和热-力学模块计算构件的变形量。首先,根据热传导方程和固化动力学方程对带模具的构件进行热传导-固化分析,求得每个增量步中构件各个网格节点上的温度和固化度。将含有固化度场和温度场的结果文件导入热-力学模块,根据 Path-dependence 模型对构件在模具上固化过程中的残余应力和残余应变进行计算,最后脱模计算得出固化变形量。

考虑到夹层构件的对称性,取构件的 1/2 进行网格划分。某工程实际所采用的固化工艺曲线包含 3 个阶段:升温阶段,升温速率为  $0.4^{\circ}C/min$ ,从  $25^{\circ}C$  升温至  $165^{\circ}C$ ;保温阶段,在  $165^{\circ}C$  保温 360min;降温阶段,降温速率为  $0.3^{\circ}C/min$ 。固化压力为  $0.3 MPa$ 。不锈钢阳模成型,模具几何尺寸为  $300 mm \times 200 mm \times 10 mm$ 。有限元仿真得到的脱模后位移云图如图 4、图 5 所示。可知 L 型蜂窝夹层构件的固化变形主要表现为回弹,趋势为向内收缩。

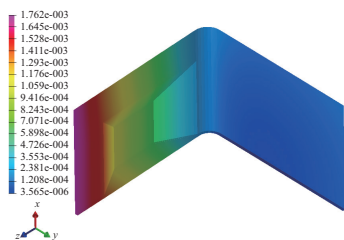


图 4 脱模后位移云图

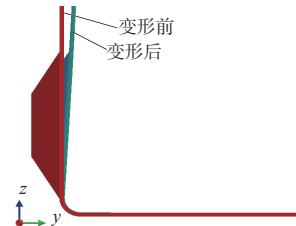


图 5 脱模后构件的回弹

### 2.3 实验验证

采用热压罐共固化成型工艺,在模具上依次铺贴预浸料与蜂窝芯。热压罐的参数及固化完成后进行脱模处理得到的构件如图 6 所示。

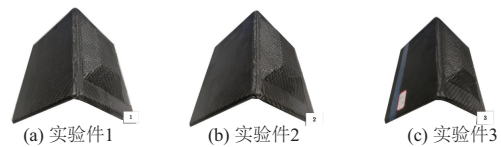
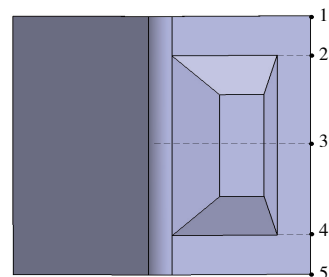
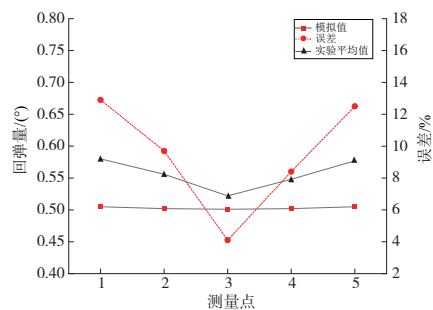


图 6 脱模后的 3 个实验件

将使用手持式 3D 扫描仪扫描实验件和模具得到点云数据对比,得到如图 7 所示 1—5 测量点处的变形量。图中实验值为 3 个实验件在 1—5 位置处的回弹角平均值。仿真与实验所得结果的吻合度较高,最大误差为 13.5%,平均误差 9.5%。



(a) 测量点分布



(b) 仿真结果与实验结果对比

图 7 测量点处仿真结果与实验结果对比

### 3 蜂窝几何因素对变形的影响规律

本节主要从蜂窝相对 L 型构件圆角的距离、蜂窝的倒角以及蜂窝的厚度这 3 个因素入手,通过正交实验法研究蜂窝夹层结构件中各几何参数对固化变形量的影响规律,从制造的角度为蜂窝夹层结构设计提供了借鉴依据。待研究的几何参数如图 8 所示( $X$  为蜂窝相对圆角的距离, $D$  为蜂窝倒角; $H$  为蜂窝厚度)。蜂窝夹层的倒角小于  $30^\circ$ ,需降低倒角面上的胶接压力<sup>[10]</sup>。

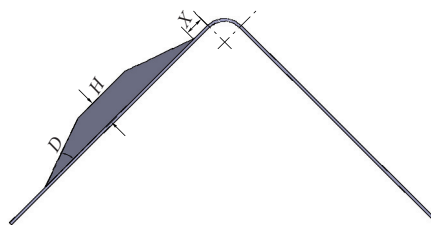


图 8  $X$ 、 $D$ 、 $H$  在构件上的表示

#### 3.1 正交实验法的设计

根据实验需求设计正交实验表,包含 3 个三水平因素。三因素分别为蜂窝相对 L 型构件圆角的距离  $X$ 、蜂窝倒角的角度  $D$ 、蜂窝厚度  $H$ 。其中  $X=1,2,3$  分别代表蜂窝相对圆角的距离为 0 mm、10 mm、20 mm; $D=1,2,3$  分别代表蜂窝倒角的角度为  $20^\circ$ 、 $25^\circ$ 、 $30^\circ$ ; $H=1,2,3$  分别代表蜂窝厚度为 10 mm、15 mm、20 mm。本文设计的正交实验表见表 3。

表 3 正交实验表

实验方案	因素		
	蜂窝位置 $X$	蜂窝倒角 $D$	蜂窝厚度 $H$
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

#### 3.2 各实验的有限元模拟

根据正交实验表列出的实验方案分别建立几何模型。并根据第 2 节经过验证的有限元仿真方法,计算得到每个实验方案中 L 型蜂窝夹层构件的固化变形见表 4。

表 4 方案 1—方案 9 构件固化变形量最大值  
单位: mm

方案	固化变形	
	最大值	最小值
1	1.883	0.057
2	1.841	0.006
3	1.762	0.004
4	2.285	0.028
5	1.907	0.127
6	1.912	0.005
7	2.013	0.008
8	1.992	0.009
9	1.834	0.002

#### 3.3 数据处理及分析

对正交实验获得的最大变形量结果进行极差分析,结果如表 5 所示。其中  $K_i$  分别对应各因素在第  $i$  水平的实验指标值之和, $k_i$  分别对应各因素在第  $i$  水平的实验指标值的平均值, $T$  和  $S$  分别表示各因素的极差和倍数。

表 5 正交实验获得最大变形量的极差分析结果

实验方案 或名称	因素			回弹角/ ( $^\circ$ )
	蜂窝位置 $X$ /mm	蜂窝倒角 $D$ /( $^\circ$ )	蜂窝厚度 $H$ /mm	
1	0(1)	20(1)	10(1)	0.540
2	0(1)	25(2)	15(2)	0.528
3	0(1)	30(3)	20(3)	0.505
4	10(2)	20(1)	15(2)	0.655
5	10(2)	25(2)	20(3)	0.547
6	10(2)	30(3)	10(1)	0.548
7	20(3)	20(1)	20(3)	0.577
8	20(3)	25(2)	10(1)	0.571
9	20(3)	30(3)	15(2)	0.526
$K_1$	1.572	1.772	1.659	—
$K_2$	1.749	1.645	1.708	—
$K_3$	1.674	1.579	1.629	—
$k_1$	0.524	0.591	0.553	—
$k_2$	0.583	0.548	0.569	—
$k_3$	0.558	0.526	0.543	—
$T$	0.059	0.064	0.027	—
$S$	1.113	1.122	1.049	—

从表 5 可以看出,蜂窝倒角( $D$  因素)对应的极差最大,为 0.064,其次是蜂窝相对圆角的距离( $X$  因素)和蜂窝厚度( $H$  因素)。其中极差反映了各几何因素对变形量的影响大小,因此可排出因素的影响顺序: $D>X>H$ 。为了比



较分析各几何因素对最大变形量的影响程度和趋势,并获取最优几何参数组合,根据表5中的 $K_i$ 随着回弹角随各因素的变化趋势可知,随着 $X$ 的变化,当蜂窝靠近L型构件的圆角时,构件的回弹角较小。当蜂窝逐渐远离构件圆角时,回弹角先增大后减小。随着 $D$ 逐渐增大,构件的回弹角逐渐减小。随着 $H$ 逐渐增大,构件的回弹角先逐渐增大,后逐渐减小。结合表5中各几何因素对回弹角的影响程度比较,选择最优几何参数组合为:蜂窝相对圆角的距离为0 mm,蜂窝倒角为 $30^\circ$ ,蜂窝厚度为20 mm,即为正交实验中的方案3。

## 4 结语

1)将蜂窝等效理论应用到复合材料蜂窝夹层构件的固化变形分析中,通过有限元软件模拟了构件的固化成型过程,该仿真结果与实验结果的最大误差为13.5%,平均误差为9.5%。

2)蜂窝倒角对L型蜂窝夹层构件固化变形具有显著影响。随着蜂窝位置逐渐远离圆角,回弹角先增大后减小,在10 mm处最大;随着蜂窝倒角逐渐增大,回弹角逐渐减小。

### 参考文献:

- [1] 王梓桥,王兆慧,周秀燕,等.民用飞机用蜂窝夹层结构及成型工艺发展现状[J].纤维复合材料,2020,37(3):87-90,94.

### (上接第89页)

态阻尼均会增大,但低于该激励频率和幅值时不受影响;激励幅值越大,受影响的频率范围越宽。激励幅值2.0 mm,卸荷速度从0.01 m/s增大到0.04 m/s时,动态刚度和动态阻尼的最大差异分别增加24.4%和65.1%。

4)保持卸荷速度不变,增大静态阻尼曲线卸荷力,动态阻尼显著增大,激励频率大于4 Hz后动态刚度也明显增大,且增幅随着激励幅值的增大而增大。卸荷力增大2倍时,激励幅值0.5 mm的动态刚度平均增幅16.7%,动态阻尼平均增幅72.8%,激励幅值2.0 mm时则分别达到35.0%和189.2%。

### 参考文献:

- [1] FAN Y Q, ZHU S, WU Y M, et al. Modelling and experimental validation of the dynamic damping characteristics of a high-speed train hydraulic damper [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1877(1): 012028.
- [2] 杨国桢,王福天.机车车辆液压减振器[M].北京:中国铁道出版社,2003.
- [3] 黄彩虹,曾京,宋春元.高速列车抗蛇行减振器的简化物理参数模型[J].铁道学报,2021,43(7):47-56.
- [4] KASTEEL R V, WANG C G, QIAN L X, et al. A new shock absorber model for use in vehicle dynamics studies[J]. Vehicle System Dynamics, 2005, 43(9): 613-631.
- [5] 王文林.高速列车可调式线性液压减振器的设计理论与应用研究[D].杭州:浙江大学,2001.
- [6] 徐高新.高速列车液压减振器的参数化建模研究[D].南昌:

- [2] 程文礼,袁超,邱启艳,等.航空用蜂窝夹层结构及制造工艺[J].航空制造技术,2015,58(7):94-98.
- [3] 花蕾蕾,安鲁陵,赵一鸣,等.复合材料构件成型模具型板改进设计[J].机械制造与自动化,2020,49(6):56-60.
- [4] 郝新超,胡杰. Nomex 蜂窝夹层结构侧向变形机理及蜂窝稳定化[J].航空制造技术,2020,63(13):69-74,82.
- [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] 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.
- [7] 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.
- [8] 袁超. 复合材料蜂窝夹层结构 J 形梁共固化成型技术研究[J]. 科技与创新, 2018(22): 102-103, 105.
- [9] 杨稳,张胜兰,李莹.蜂窝夹层结构等效模型研究进展[J].复合材料科学与工程,2020(10):122-128.
- [10] 牛春匀(Michael C. Y. Niu)美.实用飞机复合材料结构设计与制造[M].程小全,张纪奎,译.北京:航空工业出版社,2010.

收稿日期:2022-03-02

南昌大学,2010.

- [7] 黄盈.抗蛇行油行减振器的非线性服役模型及其对电力机车动力学性能的影响[D].南昌:南昌大学,2011.
- [8] 秦剑生.基于物理参数的抗蛇行减振器力学模型研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [9] HUANG C H, ZENG J. Dynamic behaviour of a high-speed train hydraulic yaw damper [J]. Vehicle System Dynamics, 2018, 56(12): 1922-1944.
- [10] RICHARD VAN KASTEEL, 钱立新,王成国,等.铁道车辆液压减振器的工作原理和数值模型[J].铁道学报,2005, 27(2): 28-34.
- [11] WANG W L, HUANG Y, YANG X J, et al. Non-linear parametric modelling of a high-speed rail hydraulic yaw damper with series clearance and stiffness [J]. Nonlinear Dynamics, 2011, 65(1/2): 13-34.
- [12] HUANG C H, ZENG J. Comparison of the Maxwell model and a simplified physical model for a railway yaw damper in damping characteristics and vehicle stability assessment [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2022, 236(3): 275-287.
- [13] TB/T 1491—2004 机车车辆油压减振器技术条件 [S].
- [14] BS EN 13802—2013, Railway applications - suspension components-hydraulic dampers [S]. London: British Standards Institution, 2013.

收稿日期:2021-12-31