

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.01.015

## 基于光纤光栅监测固化工艺参数对层合板内部 残余应变的影响

胡彦鹏<sup>1</sup>, 侯进森<sup>2</sup>, 郝旭峰<sup>2</sup>, 蔡登安<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 南京 210016;

2. 上海复合材料科技有限公司, 上海 201112)

**摘要:** 复合材料以其比强度、比模量高, 具有较好设计性等优点, 成为轻量化装备的重要材料。复合材料生产过程中产生的残余应变是制约其快速发展和应用的重要因素之一, 因此研究成形过程中材料内部应变变化十分必要。本文采用内埋光纤布拉格光栅(Fiber Bragg grating, FBG)的方法, 对 T700/C11 预浸料在不同工艺参数下成形时内部应变及温度进行实时监测, 探究了工艺条件对其内部应变的影响, 建立了预测层合板残余应变数值分析模型, 从而优化复合材料固化工艺参数。结果表明, 合理地降低升温速率、使用较低热膨胀系数和导热系数的模具材料以及避免铺放误差可以有效降低残余应变。

**关键词:** 光纤布拉格光栅; 工艺参数; 残余应变; 固化监测; 复合材料

中图分类号: TB332 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2024)01-0144-10

## Influences of Curing Process Parameters on Internal Residual Strain of Composite Laminates Based on FBG Monitoring

HU Yanpeng<sup>1</sup>, HOU Jinsen<sup>2</sup>, HAO Xufeng<sup>2</sup>, CAI Deng'an<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics &

Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Shanghai Composite Technology Co. Ltd., Shanghai 201112, China)

**Abstract:** Composite material is one of the important materials for lightweight equipment design because of its high specific strength, high specific modulus and good designability. However, the residual strain generated in the curing process of composite materials is one of the main factors that restrict its development and application. It is necessary to elaborate the mechanism of strain variation during the molding process. In this paper, employing the method of embedding fiber Bragg grating (FBG), real-time monitoring of internal strain and temperature of the T700/C11 prepreg under different curing process is carried out. The influence of curing process on the variation of internal strain is investigated. A numerical analysis model for predicting the residual strain of the laminate is established to optimize the curing process parameters of the composite. The results show that the residual strain can be effectively reduced by reasonably decreasing the heating rate, using the mold with lower thermal expansion and lower thermal conductivity, and avoiding the error of layup.

**Key words:** fiber Bragg grating; process parameters; residual strain; cure monitoring; composite materials

**基金项目:** 国家重点研发计划(2019YFA0708901)。

**收稿日期:** 2023-11-20; **修订日期:** 2023-12-08

**通信作者:** 蔡登安, 男, 副研究员, E-mail: cda@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 胡彦鹏, 侯进森, 郝旭峰, 等. 基于光纤光栅监测固化工艺参数对层合板内部残余应变的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(1): 144-153. HU Yanpeng, HOU Jinsen, HAO Xufeng, et al. Influences of curing process parameters on internal residual strain of composite laminates based on FBG monitoring[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(1): 144-153.

碳纤维复合材料在成形过程中,由于其各组分的物理化学性质不同,不可避免地在材料内部产生残余应变,这种残余应变导致的内应力可能造成构件在使用中失效、产品成形失败等诸多问题<sup>[1-2]</sup>,例如纤维与树脂基体界面上的残余应力过大会导致脱粘和纤维拉出、产生微裂纹;层与层之间残余应力过大会导致结构的翘曲、分层等;模具和固化件热膨胀系数差异过大会导致材料边界的回弹、弯曲等<sup>[3-5]</sup>。因此研究碳纤维复合材料成形阶段内部残余应变变化的规律,通过优化成形工艺、改性材料等技术手段,可以有效减少残余应变和应力的形成,提高碳纤维复合材料的性能和可靠性。

早在 1996 年,文献[6]将光纤布拉格光栅(Fiber Bragg grating, FBG)传感器埋入碳纤维复合材料中,发现其优异的灵敏度可以用于无损测量材料固化应变,首次实现了复合材料成形阶段内部应变变化规律的实时监测。随后文献[7]将 FBG 传感器应用于不同升温速率下的材料成形过程监测,发现升温速率越慢残余应变越小。文献[8]利用 FBG 监测了 AS4/PPS 热塑性材料固化过程,发现模具对单层铺层试样成形后残余应力有重要影响。文献[9]使用 FBG 传感器监测不同保温时间对固化残余应力的影响,发现相较于使用较长保温时间,采用稍短的保温时间材料凝胶点出现时间将会提前。文献[10]利用 FBG 监测到了工艺生产中后固化处理时材料内部应变释放现象。文献[11]使用 FBG 传感器监测了处于自由状态的纯树脂固化过程,得到了自由态下树脂的固化规律。文献[12-13]通过植入 FBG 监测了单向铺层复合材料层合板在不同方向、厚度的固化过程。而后文献[14-15]使用 FBG 监测固化过程,发现升高固化温度和改变升温速率均可降低残余应变。文献[16]利用 FBG 传感器实时在线监测复合材料固化工艺,确定了树脂凝胶点,并以此点为固化工艺加压点,改善了构件成形质量。

上述研究大多数聚焦于一项或两项固化工艺对成形过程中的残余应变影响,目前关于工艺条件对复合材料内部应变及温度影响的研究还需更全面的实验性工作,以获得更具普适性的结论<sup>[17]</sup>,因此本文以 T700/C11 预浸料体系为基础,通过内置 FBG 与热电偶的方式,实时监测构件内部温度及应变水平,较全面地研究了升温速率、固化时间、降温速率、模具材料、工艺铺放误差对成形过程中材料内部应变变化影响,并建立了层合板成形后残余应变预测模型,对于优化生产工艺,降低生产成本及提高复合材

料产品质量和性能方面具有工程应用价值。

## 1 监测方案设计

### 1.1 传感器设计及机制

光纤光栅传感器具备高精度、高灵敏度、耐腐蚀和抗电磁干扰等优势<sup>[18]</sup>,通过使用 FBG 传感器可以提高对复合材料成形过程中残余应变的监测效率和精度,FBG 栅段部位综合影响可表示为

$$\Delta\lambda = K_\epsilon\Delta\epsilon + K_T\Delta T \quad (1)$$

式中: $\Delta\lambda$ 为传感器中心波长变化量; $K_\epsilon$ 为 FBG 传感器的应变灵敏系数; $K_T$ 为 FBG 的温度灵敏系数, $\Delta\epsilon$ 与 $\Delta T$ 分别表示作用于传感器上的应变变化及温度变化量。由式(1)可知,中心波长改变量与外界温度和应变变化有良好的线性关系,适合作为内埋应变传感器。

预浸料在固化周期内材料内部温度与应变均发生变化,因此当 FBG 被用作应变监测时,应在测量点附近设置热电偶作为温度补偿传感器,去除温度对其中心波长的影响,得到测量点实时应变变化量为

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta\lambda - K_T\Delta T}{K_\epsilon} \quad (2)$$

实验使用热电偶型号为 KAIPUSEN-TT-K-36-SLE(丝径直径为 127  $\mu\text{m}$ ,精度可达 0.4%),结构如图 1(a)所示。应变传感器为剥离栅段保护层的裸栅(裸栅段直径为 125  $\mu\text{m}$ ),结构如图 1(b)所示。经实验测得剥离保护层的 FBG 温度灵敏系数为 10.8  $\text{pm}/^\circ\text{C}$ ,应变灵敏系数为 1.2  $\text{pm}/\mu\epsilon$ 。

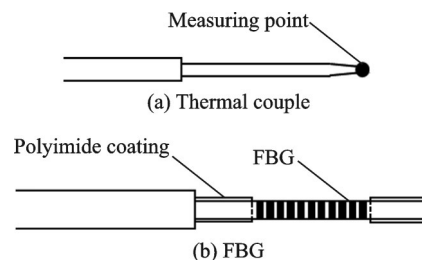


图 1 两类传感器结构

Fig.1 Structures of two sensors

### 1.2 埋入方案设计

试验中使用预浸料为光威复材公司生产的 T700/C11 单向预浸料(纤维比例 75%,单层厚度为 0.150 mm),每层尺寸为 100 mm $\times$ 100 mm 正方形,铺层顺序为 $[90^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ]_s$ 。实验中将 FBG 与热电偶埋入第 4、5 层,各距对角线 5 mm 位置,如图 2 所示。

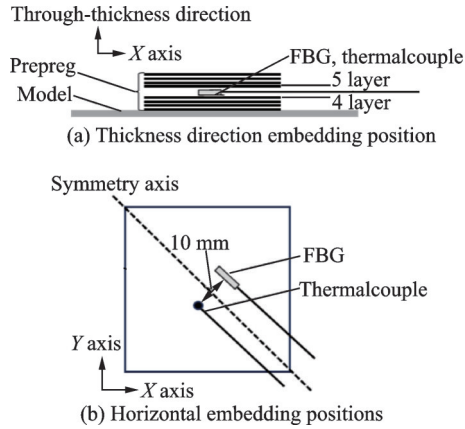


图2 FBG与热电偶埋入位置  
Fig.2 Position of FBG and thermocouple

## 2 层合板成形应变监测试验

试验采用图3所示真空辅助成形,对试验件全程施加0.08 MPa压强,每种工况在同一条件下成形多件试验件,选取3组有效数据,对结果做平均处理。

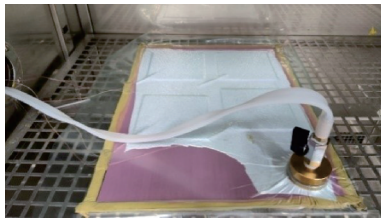


图3 层合板固化成形图  
Fig.3 Vacuum forming of composite laminate

试验探究升温速率、固化时间、降温速率、模具材料以及铺层角度偏差共5种不同工艺参数对构件内部应变的影响,各工况参数如表1所示。

表1 固化工艺参数表  
Table 1 Curing process table

组号	升温速率/ ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ )	固化 时间/h	降温速率/ ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ )	模具 材料	铺放 误差
H1	0.5	7	2		
H2	1	7	2		
H3	2	7	2		
C1	2	7	2		
C2	2	7	5	304 不锈钢	
C3	2	7	自然降温		无误差
S1	2	7	2		
S2	2	5	2		
S3	2	3	2		
M1	2	3	2	6063 铝合金	
M2	2	3	2		
A1	2	3	2	304 不锈钢	
A2	2	3	2		$5^{\circ}$

## 2.1 升温速率

已有研究表明,升温速率直接影响复合材料成形后残余应力大小,主要来自升温及保温阶段树脂的化学交联反应<sup>[19-20]</sup>。为分析升温速率对构件成形过程中内部应变的影响,设置0.5、1、2  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  (H1~H3组)3组不同升温速率,传感器监测应变与温度变化如图4(a~c)所示。由图可知在温度小于80  $^{\circ}\text{C}$ 时,FBG处应变所测为负值,这是因为随着

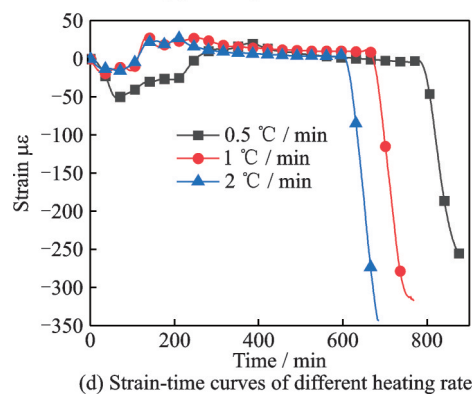
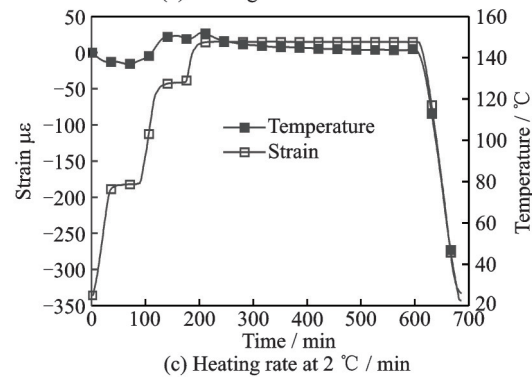
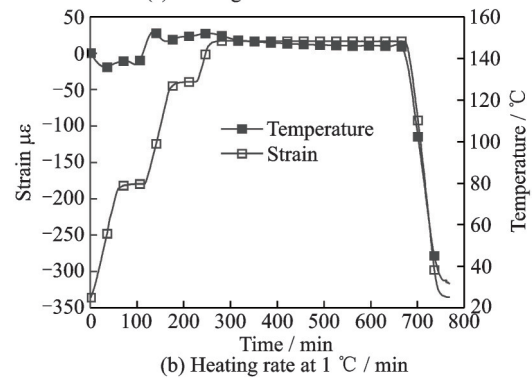
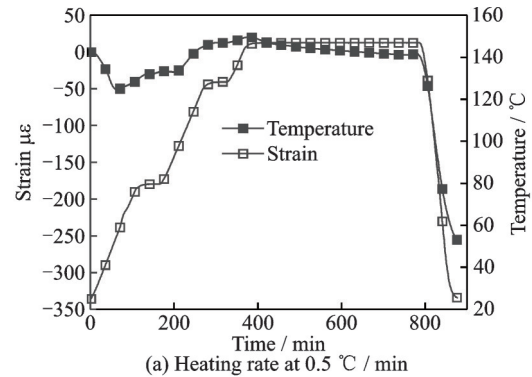


图4 不同升温速率下内部应变及温度图  
Fig.4 Strain and temperature plots at different heating rates

层合板内部温度升高,树脂流动性增强,压强产生的压力主要由纤维和光纤承担,表现在应变传感器上为压应变。当温度超过 110 °C 后,不同升温速率下 FBG 传感器所测压应变均明显减少,此时升温速率越快,树脂凝胶时间越早<sup>[21]</sup>,当树脂达到凝胶点后,化学交联反应速率随着温度升高而变快,基体模量逐步增加,外界压力也由纤维承载逐步变为基体与纤维同时承载。当测量点温度达到 110 °C 左右时,各试样 FBG 均测到明显的拉应变,在此阶段 FBG 所测应变主要由基体的热应变和化学应变叠加而成,树脂化学反应激烈并伴随放热现象,从而表现出拉应变。图 4(d) 给出了不同升温速率下内部应变随时间变化。由图可知,升温速率越快,相同时间下层合板内部温度越高,这也导致基体快速固化,造成内部树脂固化不均匀,引入内应力。

表 2 所示为不同升温速率下层合板内部所测残余应变值,表中所示变化量及变化率均以第一组结果为比较基准。由表中数据可知升温速率增加,层合板内部残余应变水平也在明显升高。0.5 °C/min 相较于 2 °C/min 的试验结果,时间消耗分别为 874 min 与 686 min,总时长虽然增加了 22% 但积累的残余应变减少了 34%,因此在实际生产中可以采取较慢的升温速率,降低内部残余应变的水平。

表 2 不同升温速率下残余应变

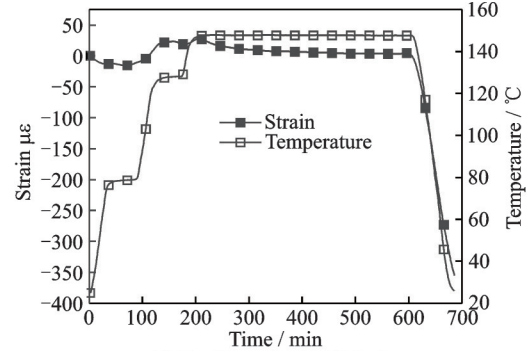
Table 2 Residual strains with different heating rates

升温速率/ (°C·min <sup>-1</sup> )	残余应变 με	变化量 με	变化率/%
0.5	256	0	0
1	317	61	23.8
2	343	87	34.0

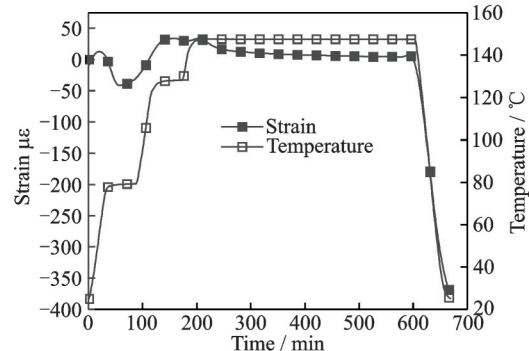
### 2.2 降温速率

图 5 所示为不同降温速率(2, 5 °C/min, 自然冷却, 记为 C1~C3 组)下热电偶与 FBG 所测温度及应变曲线图。如图 5(a~c) 所示,对于完全固化的构件,在降温阶段其内部应变改变量与温度改变量有较好的线性关系,这是因为在热固性树脂化学交联反应结束后,其内部累积的固化收缩应变不再随外界温度改变而发生变化<sup>[22]</sup>,因此构件可以视作热膨胀系数为定值的线性膨胀体,在降温阶段其热应变随着温度的降低而线性下降。

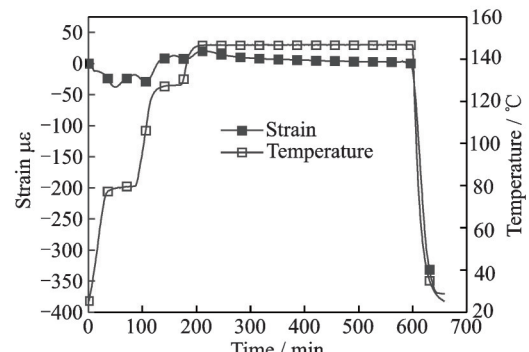
表 3 所示为不同降温速率下层合板内部所测残余应变值。由表可知,对于固化完全的构件,采用较快的降温速率不会显著改变内部残余应变的大小。



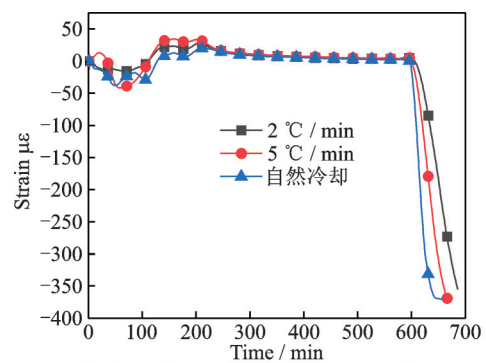
(a) Cooling rate at 2 °C / min



(b) Cooling rate at 5 °C / min



(c) Natural cooling



(d) Strain-time curves of different cooling rates

图 5 不同降温速率下内部应变及温度图

Fig.5 Strain and temperature plots at different cooling rates

表 3 不同降温速率下残余应变

Table 3 Residual strains with different cooling rates

降温速率/ (°C·min <sup>-1</sup> )	残余应变 με	变化量 με	变化率/%
2	355	0	0
5	376	21	5.9
自然冷却	370	15	4.2



### 2.3 固化时间

在实际生产中,固化时间过短可能导致树脂固化不完全,从而产生较大的残余应变和内应力,固化时间过长会降低固化效率。图6为不同固化时间(7,5,3 h,记为S1~S3组)下FBG与热电偶所测应变及温度曲线图。从图6(a~d)可以看出,当外界温度达到150℃后,随着保温时间的延长,应变曲线趋于平缓,FBG所测应变几乎不发生变化,这

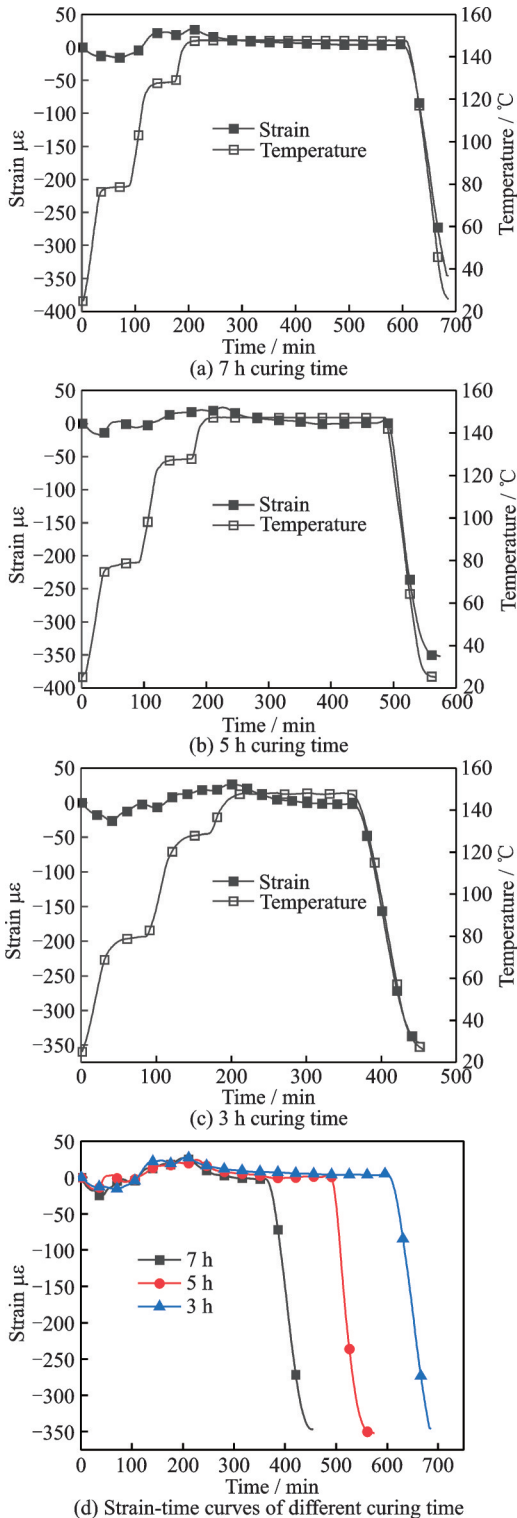


图6 不同固化时间内部应变及温度图

Fig.6 Strain and temperature plots at different curing time

是因为树脂已经固化完全,不再发生化学交联反应。

表4为不同固化时间下构件内部所测残余应变值。由表可知,当树脂完全固化后,延长保温时间不会降低试样内部的残余应变水平,因此在实际生产中可以适当选取保温时间,提高产品生产效率。

表4 不同固化时间内部残余应变对比

Table 4 Residual strains with different curing time

固化时间/h	残余应变 $\mu\epsilon$	变化量 $\mu\epsilon$	变化率/%
7	347	0	0
5	353	6	1.7
3	342	-5	-1.4

### 2.4 模具材料

模具材料的热膨胀系数、导热系数和表面粗糙度等<sup>[23-25]</sup>对复合材料成形后内部残余应变大小均有影响,其中模具与构件间热膨胀系数及导热系数不匹配是导致残余应变的首要因素。

图7所示为M1组使用6063铝合金模具和M2组使用304不锈钢模具成形中构件所测应变与温度趋势图。由图7(a)可知,从80℃到130℃升温阶段刚开始时,使用铝合金模具的试样在相同时间点温度为79.6℃,此时使用不锈钢模具的构件仅为77.8℃,这种现象同样出现在130℃到150℃升温刚开始阶段(图中圈1所示,此时M1组温度为131.6℃,M2组为129.1℃)。由图7(a, b)可知,在

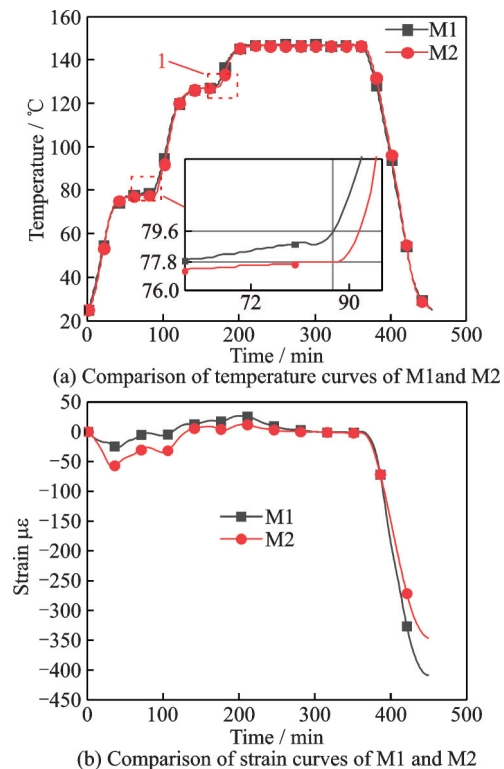


图7 不同模具内部温度及应变图

Fig.7 Strain and temperature plots of M1 and M2

升温阶段当温度达到 150 °C 时,使用铝合金模具的试样内部测量应变较大为 23μ $\epsilon$ ,使用不锈钢模具的试样为 7μ $\epsilon$ 。

表 5 所示为使用铝合金模具及不锈钢模具所测构件内部残余应变值,由表可知当模具热膨胀系数较小时,残余应变也较小,因此合理选择模具材料可以有效减少残余应变和应力的产生,提高复合材料的成形质量和性能。

表 5 不同模具下内部残余应变对比

组别	残余应变 μ $\epsilon$	变化量 μ $\epsilon$	变化率/%
M1	408	0	0
M2	346	-62	-17.9

### 2.5 铺放误差

目前,手工铺贴由于其方便、快捷和较好的经济性,是复合材料生产的主要方法之一,但手工铺贴容易引入铺层误差,因此有必要对由铺放误差引入的残余应力进行试验研究。实验分别设置为无铺放误差组和存在 5° 铺放误差组,分别编号为 A1、A2。无铺放误差组按照 [90°/45°/0°/-45°]<sub>n</sub> 铺层顺序铺放。存在铺放误差组在第 5 层如图 8 所示,旋转 5° 铺放以模拟误差角。

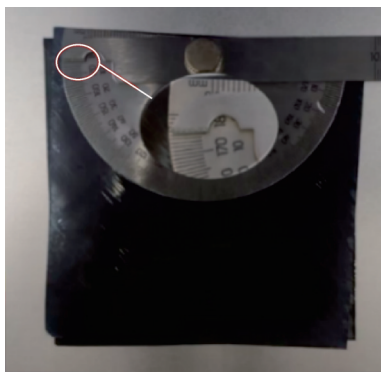
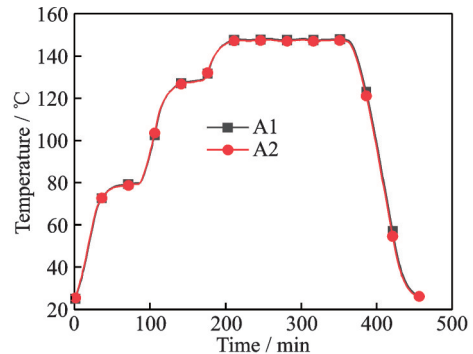


图 8 铺放误差示意图

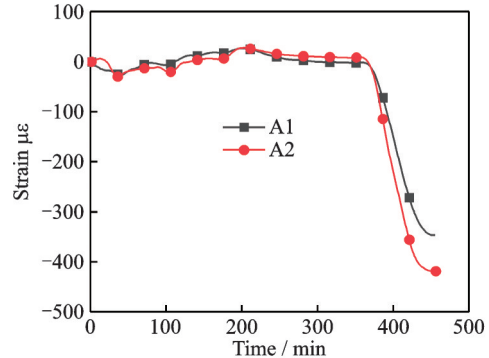
Fig.8 Error of layup

实验所测内部温度及应变结果如图 9 所示。由图 9(a) 可知在固化工艺完全相同的情况下,引入铺放误差构件内部温度不会发生改变。由图 9(b) 可知,在升温 and 保温阶段,两组构件应变变化没有较大差异。在降温阶段,引入铺放误差的试样在降温速率相同的情况下产生了较大的残余应变。

表 6 为 FBG 所测不同工况下构件内残余应变值。由表可知,存在铺放误差的构件内部残余应变增加了 21.1%,说明较小的铺放误差也会引起构件残余应变的增加。



(a) Comparison of temperature curves of A1 and A2



(b) Comparison of strain curves of A1 and A2

图 9 铺放误差 5° 时内部应变及温度图

Fig.9 Strain and temperature plots with layup error of 5°

表 6 存在铺放误差时残余应变对比

组别	残余应变 μ $\epsilon$	变化量 μ $\epsilon$	变化率/%
A1	346	0	0
A2	419	62	21.1

## 3 层合板残余应变预测模型

由试验结果可知,热固性树脂基复合材料内部残余应变主要产生于升温阶段,在降温阶段快速累积,因此本文采用顺序耦合方式,首先基于热传导-固化模型计算节点温度及固化度信息,再将计算结果导入应力应变模型中,计算材料残余应力及变形场。

预测模型包括热传导-固化模型、固化动力学模型、热应变及收缩模型及复合材料力学模型。

### 3.1 预测模型及模型参数

#### (1) 热传导-固化模型

热固性树脂基复合材料成形过程可以看作是一个内部具有非线性热源的传热-固化过程,涉及温度与化学反应的耦合问题,计算模型为

$$k_{11} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_{22} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_{33} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{Q} = \rho_c C_c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

式中: $\rho_c$ 、 $C_c$ 、 $k_{11}$ 、 $k_{22}$ 、 $k_{33}$  分别表示复合材料密度、比热容、各方向上的传热系数; $\dot{Q}$  表示树脂固化反应所放出的热量,计算公式为

$$\dot{Q} = \rho_r(1 - V_f)H_r \frac{d\alpha_r}{dt} \quad (4)$$

式中： $\rho_r$ 、 $\alpha_r$ 、 $H_r$ 、 $\frac{d\alpha_r}{dt}$ 分别表示树脂材料的密度、固化度、固化完全后单位质量放出的总热量及其固化速率； $V_f$ 表示纤维体积含量。

(2) 固化动力学模型

本文采用唯象模型中的  $n$  级反应固化动力学模型来模拟树脂固化过程,该模型适用于 T700/C11 牌号预浸料<sup>[26]</sup>,其固化速率与固化度方程可表示为

$$\frac{d\alpha}{dt} = 6.27 \times 10^5 \exp\left(-\frac{7.412 \times 10^5}{RT}\right) (1 - \alpha)^{0.997} \quad (5)$$

式中:理想气体常数  $R=8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ,  $T$  为环境温度,  $\alpha$  为材料固化度。

(3) 热应变及收缩模型

复合材料在实际生产中会同时经历由外界温度升高导致的体积膨胀和树脂化学收缩导致的体积收缩,可表示为<sup>[27]</sup>

$$\Delta\epsilon_i = \alpha_i^{\text{sh}} \cdot \Delta\alpha + \alpha_i^{\text{th}} \cdot \Delta T \quad i=1, 2, 3 \quad (6)$$

式中:  $\Delta\epsilon_i$ 、 $\alpha_i^{\text{sh}}$ 、 $\alpha_i^{\text{th}}$  分别表示材料  $i$  方向的非机械应变、化学收缩系数及热膨胀系数;  $\Delta\alpha$ 、 $\Delta T$  表示固化度与温度的变化量。

(4) 复合材料力学模型

固化成形中,热固性树脂会经历粘流态、橡胶态及玻璃态 3 个阶段,其力学性能也在发生变化。为了描述成形过程中复合材料力学性能状态,本文采用 CHILE( $\alpha$ ) 线弹性模型,树脂弹性模量表示为固化度的函数,计算公式为

$$E_r = \begin{cases} E_r^0 & \alpha \leq \alpha_{\text{gel}} \\ (1 - \alpha_{\text{mod}})E_r^0 + \alpha_{\text{mod}}E_r^\infty & \alpha > \alpha_{\text{gel}} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $E_r^0$ 、 $E_r^\infty$  分别表示树脂刚开始固化和固化完全后的杨氏模量;固化度函数  $\alpha_{\text{mod}} = \frac{\alpha - \alpha_{\text{gel}}}{1 - \alpha_{\text{gel}}}$ ,其中  $\alpha_{\text{gel}}$  表示树脂凝胶点。

本文使用的模型材料参数及固化完全后复合材料工程常数分别见表 7、8。

3.2 T700/C11 层合板残余应变仿真

基于有限元模型,采用 ABAQUS 软件对试验进行仿真,计算流程如图 10 所示。

为验证模型有效性,图 11 为部分工况测量点实验所测应变曲线与仿真结果对比。由图可知,模型结果与试验结果有较好的吻合性,验证了其有效性。

表 9 所示为试验所测残余应变值与有限元仿真值对比。其中,自然降温组因降温速率无法使用公式表示,难以设置边界条件,因此无仿真值。

表 7 T700/C11 复合材料热参数

Table 7 Thermal properties of T700/C11

参数	数值
$\rho_c/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 500
$C_c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1 580
$k_{11}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	6.20
$k_{22} = k_{33}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.461
$\rho_r/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 220
$V_f$	0.65
$H_r/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	712 940
$\alpha_1^{\text{sh}}/^\circ\text{C}^{-1}$	$-9.14 \times 10^{-7}$
$\alpha_2^{\text{sh}} = \alpha_3^{\text{sh}}/^\circ\text{C}^{-1}$	$-1.01 \times 10^{-6}$
$\alpha_1^{\text{th}}/^\circ\text{C}^{-1}$	$-0.3 \times 10^{-6}$
$\alpha_2^{\text{th}} = \alpha_3^{\text{th}}/^\circ\text{C}^{-1}$	$34.6 \times 10^{-6}$
$\alpha_{\text{gel}}$	0.38
$E_r^0/\text{MPa}$	3.56
$E_r^\infty/\text{GPa}$	3.56

表 8 T700/C11 复合材料工程常数

Table 8 Engineering constants of T700/C11

参数	数值
$E_1/\text{GPa}$	120.0
$E_2 = E_3/\text{GPa}$	8.42
$G_{12} = G_{13}/\text{GPa}$	4.48
$G_{23}/\text{GPa}$	2.0
$\nu_{12} = \nu_{13}$	0.27
$\nu_{23}$	0.43

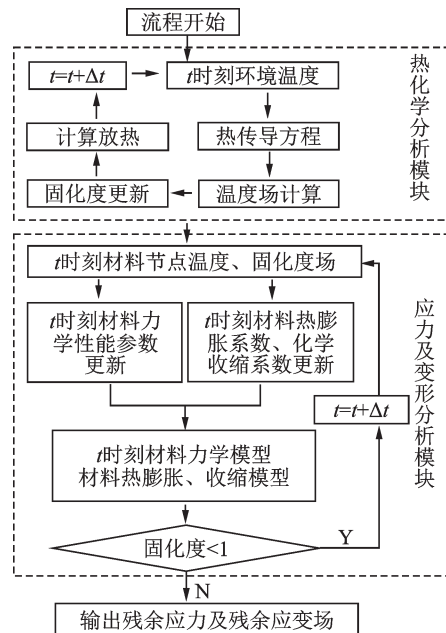


图 10 数值仿真流程图

Fig.10 Calculation diagram of numerical simulation

3.3 结果与讨论

图 12 分别为使用铝合金模具(左)与不锈钢模具(右)成形后,在同一标尺下试件整体及第 1 层(90°方向、接触模具)残余应力对比图,本文模型使



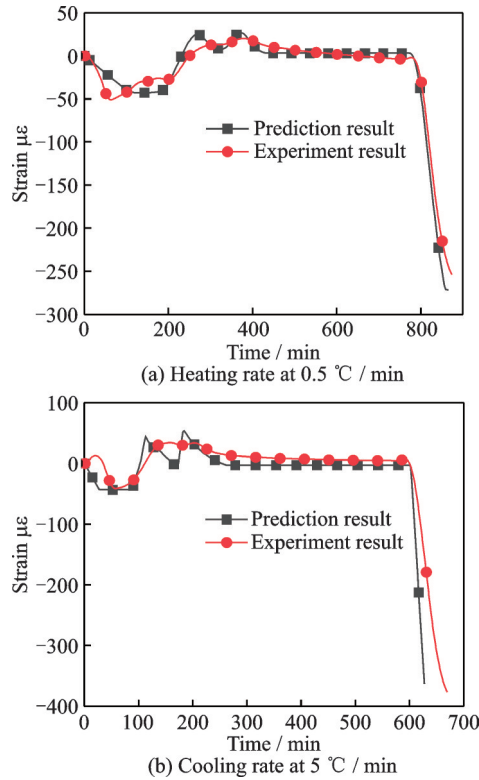


图 11 预测结果与实验结果对比

Fig.11 Comparison of predicted and experimental results

表 9 残余应变实验结果与仿真值对比

Table 9 Comparison of residual strain between experimental results and simulated values

组别	残余应变 $\mu\epsilon$		误差率/%
	试验结果	仿真结果	
H1	256	271	5.9
H2	317	297	6.3
H3	343	334	-1.4
C1	355	334	-5.9
C2	376	363	3.4
C3	370	—	—
S1	347	358	3.2
S2	353	361	2.3
S3	342	366	7
M1	408	384	-6.9
M2	346	326	-5.7
A1	346	335	3.2
A2	419	480	14.5

用米制单位,因此应力单位显示均为 Pa。

由图 12(a)可以看出,使用铝合金模具成形的构件会产生更大的残余应力,相比于使用不锈钢模具,试件整体应力平均增加了 30.4%。由图 12(b)可以看出,铝合金较大的热膨胀系数会导致与模具接触层产生剪应力,在试件边缘垂直于纤维方向( $0^\circ$ 方向)产生更大的应力梯度。

图 13 对比了无铺放误差及存在铺放误差时,

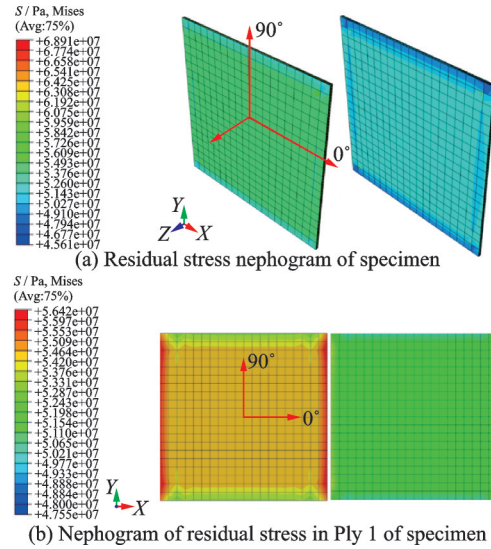


图 12 不同模具成形后试件整体及第 1 层残余应力云图

Fig.12 Diagram of residual stress of the whole component and Ply 1 of different molds

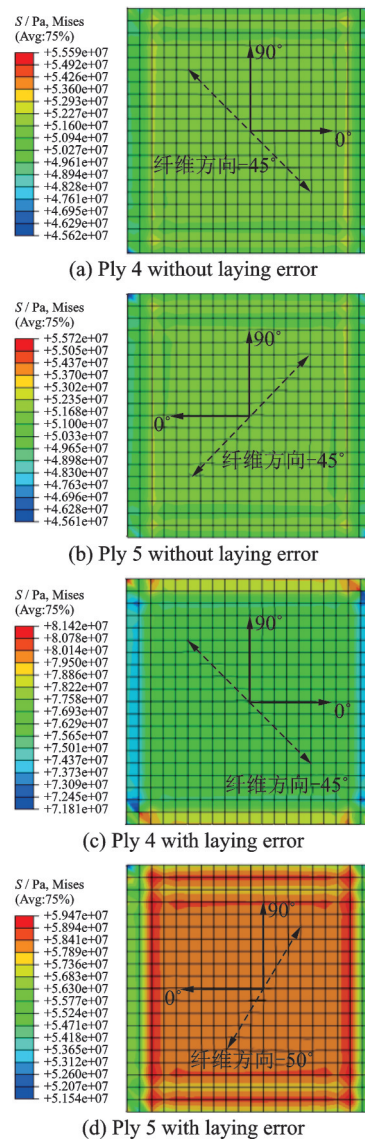


图 13 铺放误差导致层间应力不匹配示意图

Fig.13 Diagram of representation of stress mismatch between Ply 4 and Ply 5 caused by layup error



试件第4、5层(对称层)应力对比图。由图13(a,b)可知,在没有铺放误时,4、5层应力场有较好的对称性,且不会产生较大的内应力。图13(c,d)显示,存在铺层误差会导致4、5层应力场严重不匹配,在两层之间产生较大的内应力,这也是导致复合材料层间破坏的原因之一,因此实际生产中,应当避免这种工艺误差。

## 4 结 论

本文通过内置FBG与热电偶方式,实时监测复合材料成形过程中内部温度及应变变化,探究了不同工艺参数对固化残余应变的影响,并建立了该预浸料体系的温度-固化度-应力仿真模型,结论如下:

(1)升温速率与模具材料对构件成形后残余应变影响最大,较慢的升温速率与较低热膨胀率的模具可以显著降低构件固化后内部残余应变。

(2)对于固化完全的构件,延长保温时间或使用较慢降温速率不会显著降低内部残余应变值,因此可以适当选取较短的保温时间和较快的降温速率,达到降低生产成本及缩短生产时间的目的。

(3)铺放误差会造成层间应力不匹配,产生较大的内应力,导致成形后构件残余应变升高,因此实际生产中应当避免发生。

(4)采用数值分析模型对不同固化工艺下试件成形的残余应变进行了预测,数值模型计算结果与试验数据误差较小。

### 参考文献:

- [1] ZHANG C, ZHANG G, XU J, et al. Review of curing deformation control methods for carbon fiber reinforced resin composites[J]. *Polymer Composites*, 2022, 43(6): 3350-3370.
- [2] PENG X, XU J, CHENG Y, et al. An analytical model for cure-induced deformation of composite laminates[J]. *Polymers*, 2022, 14(14): 2903.
- [3] SEERS B, TOMLINSON R, FAIRCLOUGH P. Residual stress in fiber reinforced thermosetting composites: A review of measurement techniques[J]. *Polymer Composites*, 2021, 42(4): 1631-1647.
- [4] YUAN Z, WANG Y, YANG G, et al. Evolution of curing residual stresses in composite using multi-scale method[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 155: 49-61.
- [5] BIAN L, HUO Y, MENG D. Thermal residual stress and interface binding effects on fiber reinforced composites[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2021, 91(7): 3315-3326.
- [6] LAWRENCE C M, NELSON D V, SPRINGARN J R, et al. Measurement of process-induced strains in composite materials using embedded fiber optic sensors[J]. *Proceeding SPIE*, 1996, 2718: 60-67.
- [7] O'DWYER M J, MAISTROS G M, JAMES S W, et al. Relating the state of cure to the real-time internal strain development in a curing composite using fiber Bragg gratings and dielectric sensors[J]. *Measurement Science & Technology*, 1998, 9(8): 1153-1158.
- [8] LARISSA S, THOMAS G, JOHN B. Residual strain development in an AS4/PPS thermoplastic composite measured using fiber Bragg grating sensors[J]. *Composites Part A*, 2006, 37: 270-281.
- [9] HARSCH M, KARGER-KOCSIS J, HERZOG F. Influence of cure regime on the strain development in an epoxy resin as monitored by fiber Bragg grating sensor[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2007, 292: 474-483.
- [10] PATRICIA P P, BERSEE H E N, BEUKERS A. Measurement of (post-) curing strain development with fiber bragg gratings[J]. *Polymer Testing*, 2010, 29: 291-301.
- [11] 李雪芹,周玉敬,张子龙,等. 光纤布拉格光栅传感器监测环氧树脂固化收缩研究[J]. *材料工程*, 2012, (8): 73-77.  
LI Xueqin, ZHOU Yujing, ZHANG Zilong, et al. Curing shrinkage monitoring in epoxy resin by fiber Bragg grating sensors[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2012(8): 73-77.
- [12] 田恒,王继辉,冀运东,等. 布拉格光栅对固化残余应力的监测[J]. *材料导报*, 2012, 26(20): 111-114.  
TIAN Heng, WANG Jihui, JI Yundong, et al. The monitoring of cure-induced residual stress by fiber Bragg grating sensors[J]. *Materials Reports*, 2012, 26(20): 111-114.
- [13] 田恒,王继辉,冀运东,等. 布拉格光栅监测不同厚度方向的固化残余应力[J]. *功能材料*, 2012, 43(19): 2671-2674.  
TIAN Heng, WANG Jihui, JI Yundong, et al. The monitoring of cure-induced residual stress on different depth direction by fiber Bragg grating sensors[J]. *Journal of Functional Materials*, 2012, 43(19): 2671-2674.
- [14] KIM S S, MURAYAMA H, KAGEYAMA K, et al. Study on the curing process for carbon/epoxy composites to reduce thermal residual stress[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43(8): 1197-1202.
- [15] KIM H S, YOO S H, CHANG S H. In situ monitoring of the strain evolution and curing reaction of composite laminates to reduce the thermal residual stress

- using FBG sensor and dielectrometry[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 44(1): 446-452.
- [16] 卢少微, 马克明, 熊需海, 等. 复合材料真空袋成形加压点的光纤光栅监测及优化[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 175-179.
- LU Shaowei, MA Keming, XIONG Xuhai, et al. Monitoring and optimizing the pressured point of composite vacuum bag molding process with fiber Bragg grating sensors[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(8): 175-179.
- [17] 何靓, 朱攀星, 徐小伟, 等. 复合材料残余应力与固化变形机理及控制研究进展[J]. *复合材料科学与工程*, 2022(7): 121-128.
- HE Liang, ZHU Panxing, XU Xiaowei, et al. A review on mechanism and control methods of residual stress and cured deformation of composite materials [J]. *Composites Science and Engineering*, 2022(7): 121-128.
- [18] 李明辉, 黄鹏宇, 陈诗, 等. 基于光纤光栅的风机叶片应变与振动监测技术[J]. *南京航空航天大学学报*, 2023, 55(5): 898-904.
- LI Minghui, HUANG Pengyu, CHEN Shi, et al. Strain and vibration monitoring technology of wind turbine blades based on fiber optic gratings[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2023, 55(5): 898-904.
- [19] 李建川, 何凯, 彭建, 等. 纤维增强热固性复合材料构件的固化变形研究进展[J]. *纤维复合材料*, 2013, 30(1): 45-48.
- LI Jianchuan, HE Kai, PENG Jian, et al. Research development on the curing deformation of fiber reinforced thermosetting composite materials parts[J]. *Fiber Composites*, 2013, 30(1): 45-48.
- [20] KAPPEL E, STEFANIAK D, HÜHNE C, Process distortions in prepreg manufacturing—An experimental study on CFRP L-profiles[J]. *Composite Structures*, 2013, 106: 615-625.
- [21] KIM Y K, WHITE S R. Stress relaxation behavior of 3501-6 epoxy resin during cure[J]. *Polymer Engineering & Science*, 1996, 36: 2852-2862.
- [22] ZHANG F, YE Y, LI M, et al. Computational modeling of micro curing residual stress evolution and out-of-plane tensile damage behavior in fiber-reinforced composites[J]. *Composite Structures*, 2023, 322: 117370.
- [23] 杨晓波, 湛利华, 蒋成标, 等. 模具材料对复合材料制件固化过程应变的影响分析[J]. *南京航空航天大学学报*, 2018, 50(1): 24-29.
- YANG Xiaobo, ZHAN Lihua, JIANG Chengbiao, et al. Influence of mould materials on curing process and deformation of composite part[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2018, 50(1): 24-29.
- [24] XIAO Y, LI D, QIAN Z, et al. An experimental and numerical study of curing deformation considering tool-part interaction for two-step curing tooling composite materials[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 94: 435-453.
- [25] 花蕾蕾, 安鲁陵, 匡海华, 等. 复合材料构件热压罐成型模具温度均匀性分析[J]. *南京航空航天大学学报*, 2019, 51(3): 357-365.
- HUA Leilei, AN Luling, KUANG Haihua, et al. Analysis of temperature field uniformity of composite mold in autoclave[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2019, 51(3): 357-365.
- [26] 王月友. 碳纤维增强氰酸酯树脂基导热复合材料研究[D]. 北京: 中国航天科技集团公司第一研究院, 2019.
- [27] 闵荣, 元振毅, 王永军, 等. 基于黏弹性本构模型的热固性树脂基复合材料固化变形数值仿真模型[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(10): 2254-2262.
- MIN Rong, YUAN Zhenyi, WANG Yongjun, et al. Numerical simulation for curing deformation of resin matrix thermosetting composite using viscoelastic constitutive model[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(10): 2254-2262.

(编辑:孙静)