

引文格式: 张波, 鲁泳, 刘舒霆, 等. 大厚度复合材料分层自阻电热固化工艺设计研究 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(11): 58-68.

ZHANG Bo, LU Yong, LIU Shuting, et al. Research on process design of layered self-resistance electric heating for thick composite[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(11): 58-68.

# 大厚度复合材料分层自阻电热固化 工艺设计研究\*

张波<sup>1</sup>, 鲁泳<sup>2</sup>, 刘舒霆<sup>1</sup>, 刘强强<sup>1</sup>, 郝小忠<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016;

2. 南京工程学院, 南京 211167)

**[摘要]** 针对大厚度复合材料固化过程中的热冲击和热壳核效应, 提出分层自阻电热固化工艺设计方法, 用以缓解固化热冲击、降低厚向温差和缩短固化周期。建立多物理场耦合的分层自阻电热固化有限元模型, 预测在特定分层工艺参数下固化度和厚向温度分布。在有限元模型基础上, 建立径向基网络代理模型, 并通过遗传算法对固化过程中热冲击峰值温度、厚向最大温差、固化周期进行多目标优化, 最终获得优化的多层独立温控工艺参数。基于多通道自阻电热平台进行了分层自阻电热固化试验。试验结果表明, 采用优化的分层新工艺的固化热冲击峰值温度降低到玻璃化转变温度以下的 132.8℃。相比烘箱固化过冲温度减小 19.7℃, 降低了 60.6%; 相比整体自阻电热固化和推荐工艺的分层自阻电热固化分别减小 54.0% 和 34.7%。固化周期减少约 33min, 缩短 19.6%。优化设计的分层自阻电热工艺可有效降低固化反应热冲击, 提高大厚度复合材料厚度方向温度均匀性。

**关键词:** 厚截面复合材料; 代理模型; 多目标优化; 热冲击; 固化周期

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2021.11.058



张波  
硕士, 研究方向为复合材料结构设计  
与制造。

碳纤维增强树脂基复合材料 (Carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 因具有比强度高、比模量高、比重小、抗疲劳性能好和耐腐蚀性能好等突出优势<sup>[1-2]</sup> 而受到广泛关注。近年来, 复材构件朝着大型化、整体化发展<sup>[3]</sup>, 其使用部位由非承力、次承力构件向主承力构件过渡<sup>[4]</sup>, 随之而来的是大厚度复合材料构件(厚度大于 20mm)<sup>[5]</sup> 在各领域的广泛应用<sup>[6-7]</sup>。目前成型大厚度复材零件包括热压罐成型<sup>[8]</sup>、模压成型<sup>[9]</sup> 等外热源固化方法和以微波固化<sup>[10]</sup>、自阻电热固化<sup>[11]</sup> (Self-resistance electric heating, SRE) 为代表的内热源固化方法。

但是不论外、内热源的固化方法, 由于厚向极低的传热系数和树脂固化剧烈放热<sup>[12]</sup>, 大厚度复材固化过程中不均匀的温度场引起的表层和中心区域不同步固化的“壳核效应”不可避免, 导致材料分层、性能下降<sup>[13-14]</sup>, 严重时甚至导致零件降解、报废<sup>[15-16]</sup>。

针对大厚度复材固化过程中的热壳核效应, 研究人员进行了大量研究。针对外热源方法, 杨洋等<sup>[17]</sup> 在大厚度复材固化过程中增加缓慢升温阶段大幅提高温度均匀性。Kim<sup>[18]</sup> 和 White 等<sup>[19]</sup> 提出阶段固化方法来缓解热冲击。但该方法固化周期长, 各子层独立预固化会破坏结

\* 基金项目: 国家自然科学基金 (51775261)。

构整体力学性能。基于内热源方法,电磁能量<sup>[20-22]</sup>能够瞬间传输、体积加热、温差较小。而碳纤维的热阻效应能够实现快速升温 and 均匀产热。但由于碳纤维复材的导电特性,电磁加热方法受电磁屏蔽<sup>[23]</sup>、穿透深度较低<sup>[24]</sup>等因素制约,距实际应用仍面临诸多瓶颈,而电阻加热严重的热耗散又形成较大温度梯度。因此,外热源方法利用温差进行传热,原理上不可避免存在厚向温度梯度。而均质内热源方法受制于与环境的热交换,厚向温度梯度也难以消除。

针对上述问题,本文课题组前期提出分层自阻电热(Layered self-resistance electric heating, L-SRE)固化方法,如图1所示<sup>[25]</sup>。沿厚向将大厚度复材零件分为不均等的若干子层,各子层独立供能、自适应控温,以实现厚向各层能量的供需平衡,减小固化过程的温度梯度。但目前尚缺乏针对各子层独立的温度工艺的优化设计,各子层虽然温度可独立PID调控,但各目标温度仍旧采用同样的厂商推荐工艺,难以充分发挥分层自阻电热方法特有的分层控温的优势,固化过程中仍存在较大的温度梯度。为最大程度缓解厚截面复材固化过程的“壳核效应”,实现大厚度复材零件优质高效固化,需要设计适用于分层自阻电热固化的各子层独立温控工艺。

近年来,针对复合材料固化工艺优化,研究人员进行了大量研究。在试验研究方面,广泛开展温度场在线监测研究,以指导工艺设计和生产<sup>[26-27]</sup>。而在过程分析和建模方面,研究人员采用计算工具预测大厚度复材固化过程的温度梯度<sup>[28-29]</sup>,并在此基础上进行工艺的优化研究<sup>[30]</sup>,如降低升温速率、设置工艺平台<sup>[31]</sup>、设置升温斜坡<sup>[32]</sup>和先降温再升温<sup>[33]</sup>等。上述研究在一定程度上减小了大厚度复材厚向温度梯度,提升固化性能,对复材固化过程的温度均匀化具有启示意义。近年来,基于神经网络的复材固化工艺优化研究呈现井喷发展<sup>[34-35]</sup>。神经网络与仿真相结合,能有效缩减优化周期,扩展优化目标,提升优化效率。但目前的工艺优化研究多聚焦于单一温度工艺的优化,尚缺乏针对材料温度的分层独立控制的优化方法。

为适应大厚度复材内部非均匀分布且凝胶后剧烈、动态变化的化学热源,本文在各层PID温控的基础上,提出“单层板-多工艺”思想,面向热冲击峰值温度、厚向温度梯度等多目标,优化设计各层非同步的独立温控工艺,进一步缓解大厚度复材热壳核效应。以截面厚度为29.7mm的CFRP平板零件为例,优化设计了分层自阻电热各层独立温控工艺。在有限元模型基础上,建立用于快

速预测的径向基函数模型,通过遗传算法对固化过程中热冲击峰值温度、厚向最大温差、固化周期进行多目标优化,得到优化工艺。

## 有限元建模及准确性评估

为后续设计优化,在COMSOL中对大厚度复材分层自阻电热固化过程进行有限元建模,以预测分析复材成型中厚向温度分布。

### 1 几何模型

层合板采用99层UIN 30000预浸料按 $[0^\circ/90^\circ]$ 的顺序交叉铺叠而成,尺寸为 $290\text{mm} \times 250\text{mm} \times 29.7\text{mm}$ 。模具采用钢化玻璃模具,尺寸为 $450\text{mm} \times 450\text{mm} \times 6\text{mm}$ 。层合板分为上、中、下3层,前期试验选取层厚分别为3mm、23.7mm、3mm。几何模型如图2所示。

### 2 探针放置和工艺曲线设置

建模采用贴近实际固化状态的域点探针。如图3所示,在复材内部设置7个探针点,自上而下记为A、B、C、D、E、F、G。控温探针点的温度值作为反馈信号参与温度控制。蓝色圆点为测温点,实时记录温度数据。采用如图4所示的厂家推荐工艺,工艺曲线标记为SV。

### 3 材料参数及边界条件设置

层合板和模具的性能参数如表1所示。

本文模型涉及电流、一般偏微分

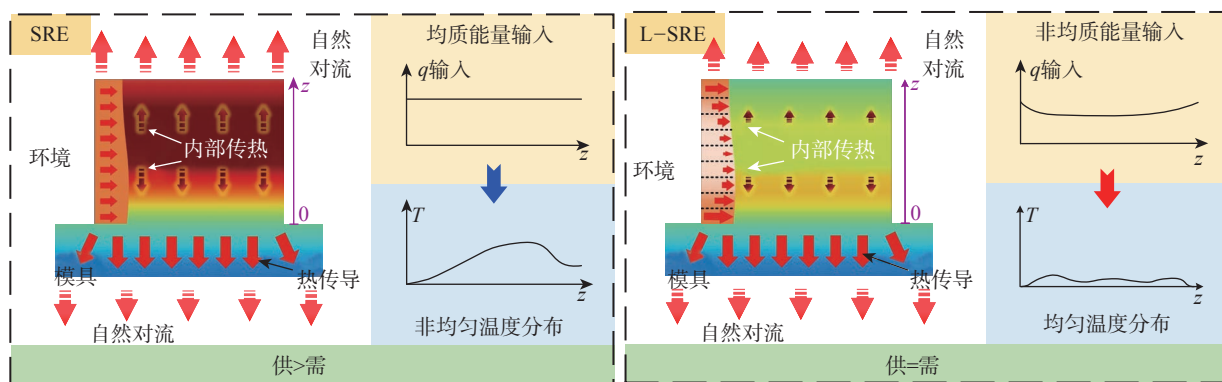


图1 分层自阻电热固化原理图

Fig.1 Schematic diagram of layered self-resistance electric heating

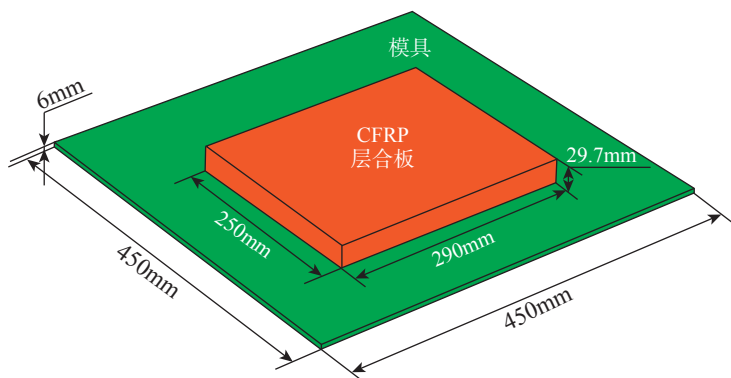


图2 大厚度复合材料层合板和模具的几何模型  
Fig.2 Geometric model of thick CFRP laminate and mold

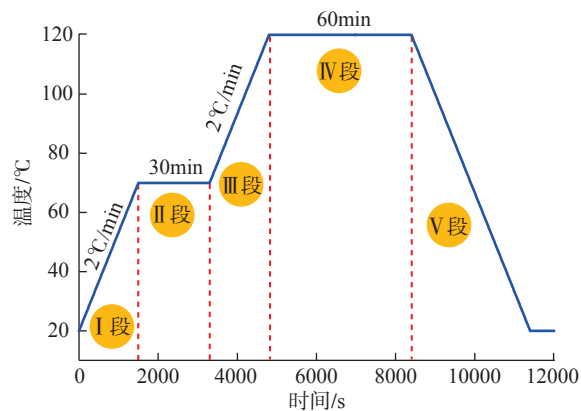


图4 厂商推荐工艺曲线  
Fig.4 Manufacturer recommended cure cycle

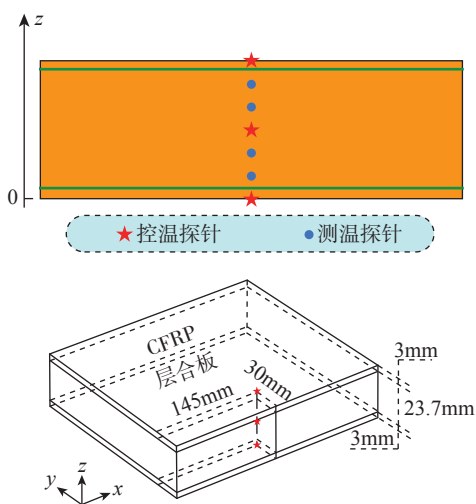


图3 温度探针位置  
Fig.3 Positions of temperature probes

表1 复合材料层合板和模具的性能参数

Table 1 Parameters for thick CFRP laminate and mold

属性	复合材料层合板	模具
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1578	2203
恒压热容 $C / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1260	703
电导率 $\sigma / (\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	{42000,42000,0.2}	$10^{-14}$
相对介电常数 $\epsilon$	3.856	3.75
导热系数 $k / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	{2.33,2.33,0.56}	1.38
指前因子 $A / \text{s}^{-1}$	$3.41 \times 10^{10}$	—
活化能 $E / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	-88549	—
通用气体常数 $R / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	8.314	—
总反应放热 $H_r / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	88000	—
反应级数 $m$	0.851	—
反应级数 $n$	1.323	—

方程和固体传热 3 大模块。电流模块模拟分层自阻电热固化过程中电能馈入过程,其中法向电流密度施加在图 3 中复材  $x$  方向的两端,层合板子层间设置电绝缘;一般偏微分方程用于描述固化反应进程。而固体传热模块模拟固化过程的对外热耗散,其中材料四周边界设定为热绝缘,此外所有边界均设置对流热通量传热系数  $h=10\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  的边界热通量。同时以上模块耦合,实现电能到热能、化学能到热能的转化。

#### 4 有限元模型准确性评估

采用推荐工艺,分别进行 29.7mm

大厚度复材层合板仿真和实际固化,其结果如图 5 所示。 $A$ 、 $D$  分别为层合板中心及上表面点,温差为所有测温点的最大温差。图 5 结果显示,仿真的趋势及数值与试验结果基本吻合,有限元建模精度尚可,可用于后续设计优化。

### 分层自阻电热工艺设计

#### 1 固化工艺参数设置分析

对分层自阻电热工艺进行设计有 3 个方面考虑:(1)新工艺在保证完全固化的同时缩短固化周期;(2)大厚度复材热冲击显著,影响零件固

化性能,因此在原工艺第 III、IV 段增加斜坡,减小热冲击峰值温度;(3)利用分层自阻电热方法各层独立控制的显著特点,基于“单层板-多工艺”的思想,在层合板上、中、下子层采用非同步的温度工艺,利用内外层可控范围的温差增强中间层反应热向外耗散,缓解热冲击。新工艺的设计目标是在较短的固化周期内实现较小热冲击峰值温度、较小厚向温差的固化,其设计示意图如图 6 所示。

大厚度复材分层自阻电热新工艺分为 6 个阶段:

I 为层合板上、中、下 3 层均以

$V_1$  的升温速率加热至  $T_1$ ;

II 为复合材料 3 层在  $T_1$  保温  $t_1$  时间;

III 为复合材料上、中、下 3 层均以  $V_2$  的升温速率分别升至  $T_{21}$ 、 $T_{22}$ 、 $T_{23}$ ;

IV 为复合材料 3 个子层分别以  $V_{31}$ 、 $V_{32}$ 、 $V_{33}$  的升温速率加热至  $T_3$ ;

V 为复合材料 3 层保温  $t_2$  ( $i=1, 2, 3$ ) 时间后同时进入降温阶段;

VI 为复合材料空冷至室温。

## 2 部分工艺参数选取

(1) 升温速率  $V_1$  和  $V_2$ 。如图 7 所示,以图 4 中第 I、III 段工艺的升温速率为变量,利用有限元模型分别模拟了 2 °C/min、3 °C/min、5 °C/min、10 °C/min 4 种不同升温速率对厚向最大温差的影响。结果表明,在 A、C 区域最大温差不随升温速率的增大而变化,即分层自阻电热方法在层合板截面厚度确定的情况下,在推荐工艺的第 I、II、IV 段,最大温差与升温速率基本无关。而 B 区域,随升温速率的增大,最大温差增大有限,即在第 III 段工艺过程前期,升温速率增大对最大温差的影响较小。

基于以上结论,为缩减固化周期,同时考虑电载荷对材料界面性能的影响<sup>[11]</sup>以及本文方法中所用外部设备、电缆的安全性,将  $V_1$  和  $V_2$  定

为 10 °C/min 较为合适。

(2) 保温温度  $T_1$  和  $T_3$ 。图 6 中第 II 段平台是为了让树脂充分浸润纤维,排除层合板中夹杂的气泡,减少孔隙率。基于前期研究成果,本文所用复合材料在 70 °C<sup>[36]</sup>左右时,树脂黏度最低,最有利于实现以上目的,从而  $T_1$  设置为 70 °C。第 V 段将  $T_3$  定为 UIN30000 预浸料的固化温度 120 °C 以保证充分固化。

(3) 保温时间  $t_1$ 。第 II 段保温平台还能让大厚度层合板充分传热,起到均匀温度场的作用。而本文方法作为内热源加热方法,可实现材料快速升温并均匀化。因此可缩短保温时间,此处  $t_1$  为 30min。

(4) 其他参数。除上述参数,温度  $T_{21}$ 、 $T_{22}$ 、 $T_{23}$ ,升温速率  $V_{31}$ 、 $V_{32}$ 、 $V_{33}$ ,以及保温时间  $t_2$  ( $i=1, 2, 3$ ) 共 9 个参数还有待确定。其中  $T_{2i}$  ( $i=1, 2, 3$ ) 和  $V_{3i}$  ( $i=1, 2, 3$ ) 直接影响固化的热冲击峰值温度和最大温差,本文将采取多目标优化方法确定,而  $t_2$  ( $i=1, 2, 3$ ) 在以上参数确定的前提下加以确定。

## 分层自阻电热工艺多目标优化

为避免有限元模型直接参与多目标优化时的计算负担,基于有限元

模型建立代理模型,以大厚度复合分层自阻电热固化过程中的热冲击峰值温度、厚向温差、固化周期为优化目标,通过遗传算法优化得到参数  $T_{2i}$  ( $i=1, 2, 3$ )、 $V_{3i}$  ( $i=1, 2, 3$ ) 和  $t_2$  ( $i=1, 2, 3$ )。以上思路的流程图如图 8 所示。

### 1 多目标优化问题定义

本文优化目标为热冲击峰值温度、厚向最大温差、固化周期。其中复材整体固化度超过 0.95 时可认为完全固化,此时刻记为  $t_{cure}$ 。热冲击峰值温度和最大温差分别记为  $T_{overshoot}$  和  $T_{max\_differ}$ ,其中最大温差指固化开始至降温前的最大温差。

优化参数中温度  $T_{2i}$  ( $i=1, 2, 3$ ) 区间为 80~110 °C,而升温速率  $V_{3i}$  ( $i=1, 2, 3$ ) 设计区间为 0.5~10 °C/min。以上内容的数学表达如下:

$$\begin{aligned} & \text{Find } X = (T_{21}, V_{31}, T_{22}, V_{32}, T_{23}, V_{33}) \\ & \text{Min } T_{overshoot}, T_{max\_differ}, t_{cure} \\ & \text{S.T. } \begin{cases} 80^\circ\text{C} \leq T_{21}, T_{22}, T_{23} \leq 110^\circ\text{C} \\ 0.5^\circ\text{C}/\text{min} \leq V_{31}, V_{32}, V_{33} \leq 10^\circ\text{C}/\text{min} \\ \alpha \geq 0.95 \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

## 2 代理模型的建立

### 2.1 简单随机采样

本文采用简单随机采样方法获取

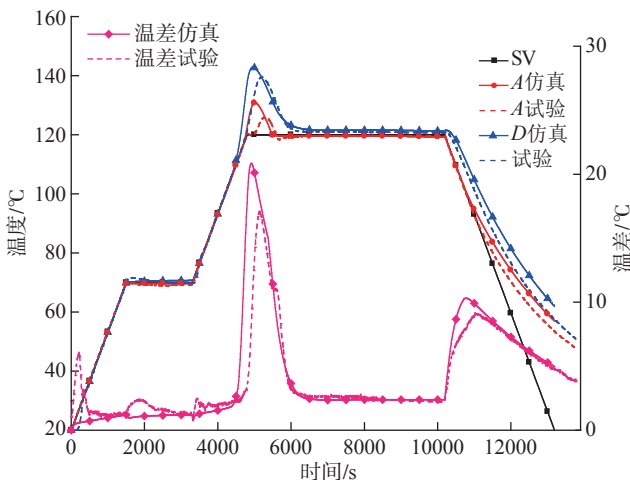


图 5 大厚度复合材料固化温度的仿真和试验结果

Fig.5 Simulation and experimental results of curing temperature for thick CFRP laminate

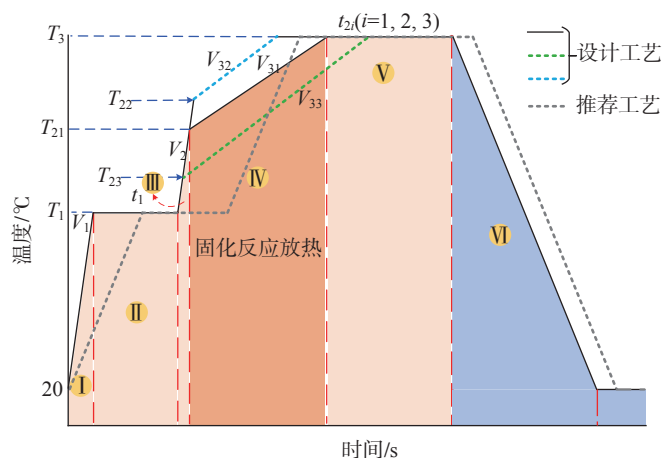


图 6 分层自阻电热固化工艺设计示意图

Fig.6 Design schematic diagram of L-SRE method

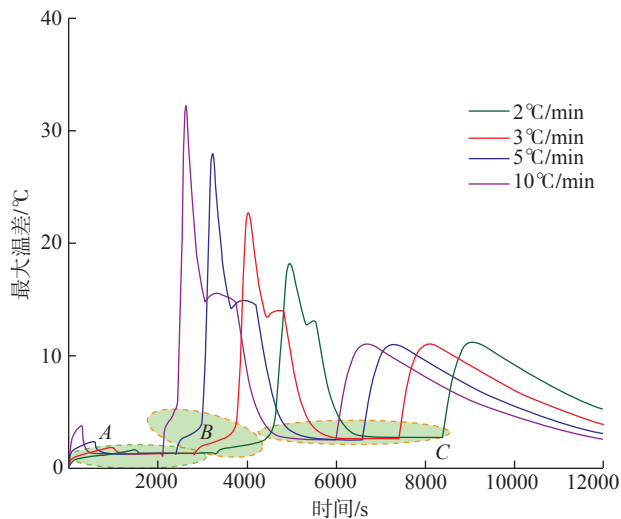


图7 分层自阻电热工艺不同升温速率的最大温差曲线

Fig.7 Maximum temperature difference curves of different heating rates of L-SRE process

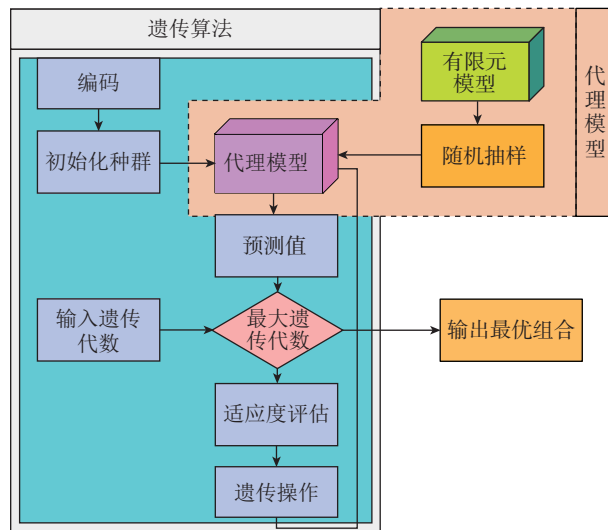


图8 工艺参数优化流程图

Fig.8 Process parameters optimization flowchart

样本数据。为便于抽样和后续计算,对参数  $T_{2i}$  和  $V_{3i}$  进行二进制编码。由  $T_{2i}$  和  $V_{3i}$  的精度分别为  $1^\circ\text{C}$  和  $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ , 确定各参数的编码位数均为 5。编码后参数离散为设计区间内的点,简单随机采样即等概率从以上点中取出样本数据。抽取 3600 组输入数据,并通过有限元得到相应输出数据。

### 2.2 径向基函数模型

基于所得样本数据,建立径向基函数模型。利用 MATLAB 的 newrb 函数设计可用的径向基函数:

$$[\text{net}, \text{tr}] = \text{newrb}(P, T, \text{goal}, \text{spread}, \text{MN}, \text{DF}) \quad (2)$$

其中,  $P$  为输入向量;  $T$  为输出向量。本文输入与输出值数量级存在较大差异,为得到更精准的预测模型,对参数进行归一化。参数  $X_i$  归一化过程如式(3)所示:

$$\hat{X}_i = \frac{X_i - X_i^{\min}}{X_i^{\max} - X_i^{\min}} \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (3)$$

均方误差 goal、扩展速度 spread、最大神经元数目 MN 和每次添加神经元数目 DF 4 个参数对于径向基函数的构建各有针对又相互影响。通过参数优化设计,最终确定 4 个参数为  $10^{-4}$ 、1、1000、25。

### 2.3 代理模型精度验证

为验证代理模型的精度,同方法重新抽取 300 组测试数据,经有限元模拟和代理模型预测分别获得大厚度复材分层自阻电热固化过程的  $T_{\text{overshoot}}$ 、 $T_{\text{max\_differ}}$  和  $t_{\text{cure}}$  的仿真及预测值,并计算相对误差。相对误差和相对误差的平均值分别定义为:

$$\text{RE} = \left| \frac{\gamma_{\text{RBF}} - \gamma_{\text{FEM}}}{\gamma_{\text{FEM}}} \times 100\% \right| \quad (4)$$

$$\overline{\text{RE}} = \frac{1}{300} \sum_{i=0}^{300} \text{RE}_i \quad (5)$$

其中,  $\gamma_{\text{RBF}}$  为代理模型预测结果;  $\gamma_{\text{FEM}}$  为有限元模型仿真结果。

根据式(4)和(5)得到  $T_{\text{overshoot}}$ 、 $T_{\text{max\_differ}}$  和  $t_{\text{cure}}$  的相对误差极值和平均值,误差结果如表 2 所示。

从表 2 可知,代理模型预测的  $T_{\text{overshoot}}$ 、 $T_{\text{max\_differ}}$ 、 $t_{\text{cure}}$  的最大误差小于 8%,平均误差小于 3%,模型预测精度较高,可用于替代有限元进行参数优化。

### 3 多目标遗传算法优化

采用遗传算法对设计参数进行多目标优化。本文优化最终目标是在较短周期内保证固化过程中热冲击峰值温度和最大温差减小。针对上述需求,定义如下的适应度函数:

$$\text{fitness} = - \left[ \omega_1 \left( \frac{T_{\text{overshoot}} - T_{\text{overshoot}_{\min}}}{T_{\text{overshoot}_{\max}} - T_{\text{overshoot}_{\min}}} \right)^2 + \omega_2 \left( \frac{T_{\text{max\_differ}} - T_{\text{max\_differ}_{\min}}}{T_{\text{max\_differ}_{\max}} - T_{\text{max\_differ}_{\min}}} \right)^2 + \omega_3 \left( \frac{t_{\text{cure}} - t_{\text{cure}_{\min}}}{t_{\text{cure}_{\max}} - t_{\text{cure}_{\min}}} \right)^2 \right] \quad (6)$$

其中,  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  和  $\omega_3$  为权重,用于描述各目标的偏重程度。本文  $T_{\text{overshoot}}$  和  $T_{\text{max\_differ}}$  对于零件成型质量更为重要,而  $t_{\text{cure}}$  在重要性上相对较低,通过多次调试,设定  $\omega_1 = \omega_2 = 5$ ,  $\omega_3 = 1$ 。 $T_{\text{overshoot}}$ 、 $T_{\text{max\_differ}}$ 、 $t_{\text{cure}}$  的最大和最小值通过有限元仿真,在温度  $T_{2i}$  和升温速率  $V_{3i}$  的区间极值处获得,结果如表 3 所示。

遗传代数 generation 选取为 1000,求得优选的参数组合如表 4 所示。

优化预测结果与有限元模型求得的仿真结果进行比较,其误差如表 5 所示。

将所得参数进行规整,得到最终的多层独立温控工艺,层合板上层采用同样工艺:从  $20^\circ\text{C}$  室温以  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  的升温速率升至  $70^\circ\text{C}$  保温 30min,然后以  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  的速率加热到  $100^\circ\text{C}$ ,转为  $0.8^\circ\text{C}/\text{min}$  升至

120℃,保温 4420s (约 74min),最后以 2℃/min 的速率降至室温;中间层初始工艺与上下层相同,出第一段保温后以 10℃/min 的升温速率加热到 90℃,继而以 1.2℃/min 的速率加热到固化温度 120℃,保温 4480s 并与上下层工艺同时开始以 2℃/min 的速率降至室温。新工艺曲线如图 9 所示。

## 试验验证及讨论

### 1 新工艺设计的必要性

在课题组前期工作中,分别采用烘箱、整体自阻电热和分层自阻电热工艺配合推荐工艺曲线固化大厚度复材层合板<sup>[25]</sup>(为缩短试验时间,试验中推荐工艺第 2 段保温时间仅进行了 60min),试验布置和试验系统如图 10 所示。整体自阻电热层合板由 UIN30000 预浸料按 [0°/90°] 顺序交叉铺叠,层数为 99,尺寸参照有限元建模部分。尺寸为 20mm(宽)×0.5mm(厚)的紫铜电极施加在层合板两端的所有 [0°] 层。分层自阻电热中层合板在整体自阻电热基础上分为层厚分别为 3mm、23.7mm、3mm 的 3 个子层,并将 3 个子层通过铜条接入 3 个直流电源,铜条间用聚酰亚胺薄膜绝缘。控温及测温热电偶放置方式与有限元一致。

试验结果如图 11 所示<sup>[25]</sup>。图 11 (a) 显示烘箱工艺热冲击显著,过冲温度达 32.5℃。图 11 (b) 显示整体自阻电热工艺有较大温度梯度,最大温差有 32.3℃,且热冲击峰值温度达 147.8℃。而图 11 (c) 中,采用分层自阻电热方法,其最大温差和热冲击峰值温度显著减小,仅为 17.1℃和 139.6℃。分层自阻电热方法的过冲温度和最大温差相比整体自阻电热分别减小 29.5% 和 47.1%;相比烘箱最大温差数值相近,但主要集中在固化反应剧烈放热阶段,过冲温度减小 39.7%。

热冲击峰值温度的大小直接影响材料固化性能。如图 12 所示,对

表 2 代理模型相对误差极值和平均值

Table 2 Extreme values and average values of relative error of the surrogate model %

项目	$T_{overshoot}$	$T_{max\_differ}$	$t_{cure}$
相对误差极值	5.18	7.82	6.86
相对误差平均值	1.07	2.15	1.85

表 3 目标参数的极值

Table 3 Extreme values of target parameters

参数	最大值	最小值
$T_{overshoot}/^{\circ}\text{C}$	48.71	2.32
$T_{max\_differ}/^{\circ}\text{C}$	48.05	6.38
$t_{cure}/\text{s}$	10460	3230

表 4 遗传算法优化所得参数

Table 4 Parameters optimized by genetic algorithm

$T_{21}/^{\circ}\text{C}$	$V_{31}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1})$	$T_{22}/^{\circ}\text{C}$	$V_{32}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1})$	$T_{23}/^{\circ}\text{C}$	$V_{33}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1})$
100.32	0.81	90.65	1.11	99.35	0.81

表 5 优化参数的仿真/预测结果及误差

Table 5 Simulation/prediction results and errors of optimized parameters

结果及误差	$T_{overshoot}/^{\circ}\text{C}$	$T_{max\_differ}/^{\circ}\text{C}$	$t_{cure}/\text{s}$
FEM	12.4	16.8	8110
RBF	13.1	15.6	8369
Error	5.6%	7.1%	3.2%

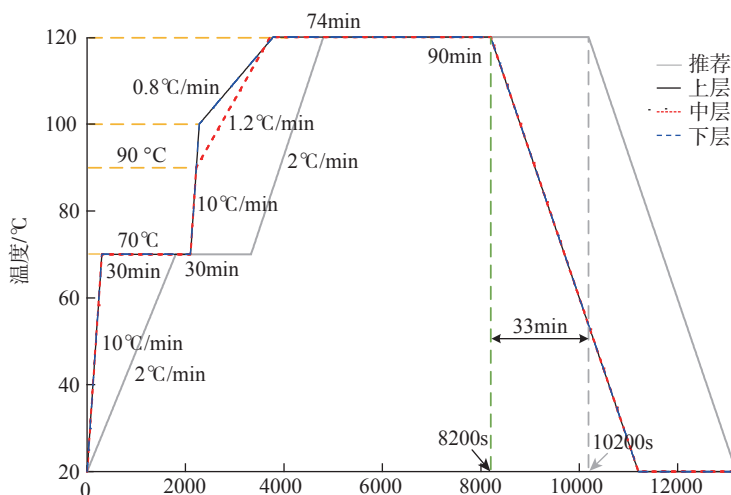


图 9 分层自阻电热固化新工艺

Fig.9 New process of layered self-resistance electric heating



图 10 试验布置和试验系统

Fig.10 Experimental layout and experimental system

截面厚度为 20mm、30mm、40mm、50mm、60mm、70mm、80mm 共 7 种厚度下的热冲击状况进行有限元分析。结果显示,固化热冲击的峰值温度和最大温差均随着截面厚度的增加而增加。30mm 厚复合材料的过冲温度为 23℃,且随厚度的增加,到 60mm 时达 40℃以上。

玻璃化转变温度作为复材零件正常使用的温度上限,是复材零件的一项重要参数。针对本文的低温环氧树脂基体,测试了完全固化件的玻璃化转变温度为 138.8℃,如图 13 所示。

分层自阻电热方法固化大厚度复材零件在提升截面温度均匀性和缓解热冲击方面具有优越表现。但是截面厚度为 30mm 时,其热冲击峰值温度已高于玻璃化转变温度,这样的温度会造成材料老化、性能下降,且厚度增加影响越显著。因此针对

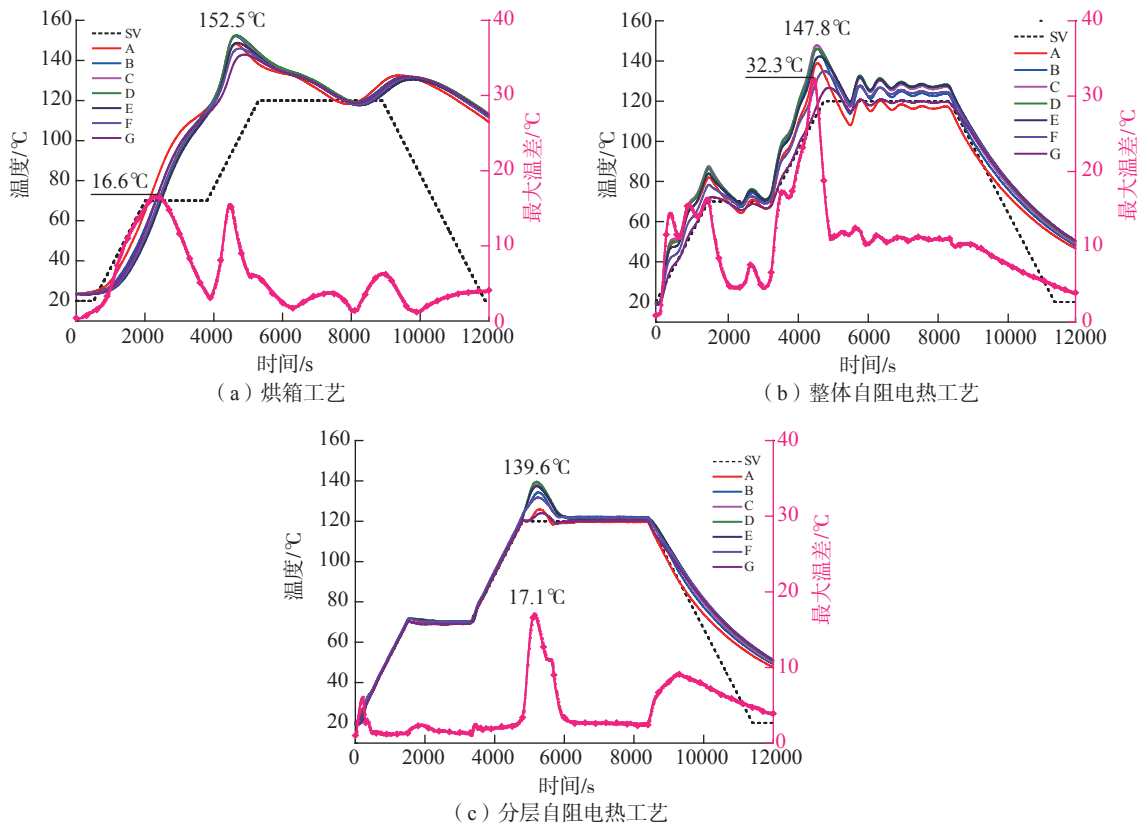


图 11 烘箱、整体自阻电热和分层自阻电热试验结果

Fig.11 Results of oven, integral SRE and L-SRE

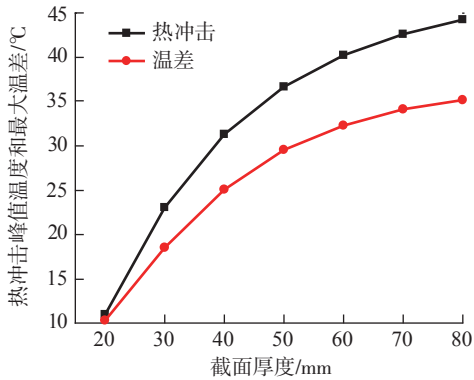


图 12 不同截面厚度复合材料的热冲击峰值温度和温差  
Fig.12 Thermal overshoot peak temperature and temperature difference of composite with different section thicknesses

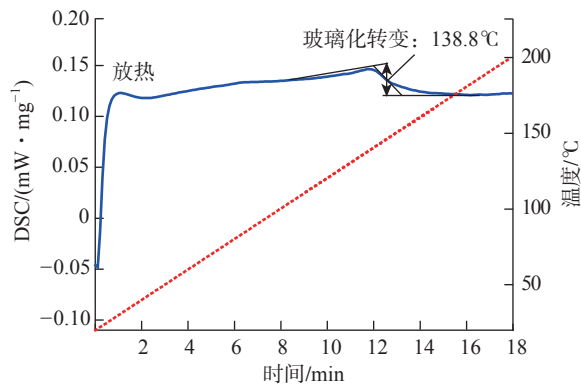
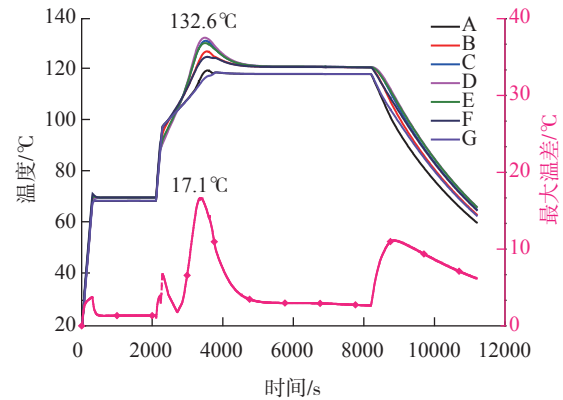
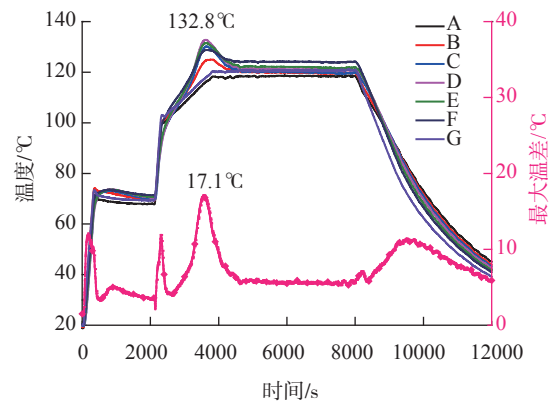


图 13 碳纤维增强树脂基复合材料玻璃化转变温度  
Fig.13 Glass transition temperature of CFRP



(a) 有限元仿真结果



(b) 试验结果

图 14 新工艺的有限元仿真结果和试验结果  
Fig.14 FEM results and experimental results of the new process

大厚度复合材料分层自阻电热方法的工艺设计势在必行。

## 2 新工艺设计的有效性

将优化参数输入有限元,其仿真结果如图 14 (a) 所示,试验结果如图 14 (b) 所示。

可见,有限元结果与试验结果在曲线走势、热冲击峰值温度等方法基本一致。将采用新工艺的固化结果与图 11 采用推荐工艺的结果<sup>[25]</sup>对比,结果如表 6 所示。分层新工艺的热冲击峰值温度为 132.8°C,低于该树脂体系的玻璃化转变温度。分层新工艺过冲温度相比烘箱显著减小 60.6%,相比整体自阻电热减小 54.0%,相比分层推荐工艺降低了 34.7%。固化周期为 8200s,缩短了 19.6%。新工艺在固化放热阶段采用

表 6 新工艺与推荐工艺对比

Table 6 Comparison of new process and recommended process

项目	OVEN+ 推荐工艺	SRE+ 推荐工艺	分层+推荐工艺	分层+新工艺
$T_{overshoot}/^{\circ}\text{C}$	152.5	147.8	139.6	132.8
$T_{max\_differ}/^{\circ}\text{C}$	16.6	32.3	17.1	17.1
$t_{cure}/\text{s}$	10200	10200	10200	8200

非同步的工艺曲线控制固化进程,在中间层与表面的温差可控的前提下,加速热耗散的进行,以便层合板中心的反应热能及时传导释放,缓解固化热冲击。分别测量了新工艺下层合板的上、中、下子层的固化度,结果显示层合板已完全固化。

温度曲线中最大温差在第 I、III 段升温阶段出现显著增加,其主要原因是试验所用 PID 控制器响应速度

较低,电源功率供应未能跟随工艺曲线。该问题可通过调节控制器的比例增益或更换响应频率更高的控制器解决。

如图 15 所示,柱状图更直观地对比出分层自阻电热多层控温工艺的有效性。本文新工艺实现了缓解热冲击和缩短固化周期的目标。而最大温差与未优化工艺相比没有改善的原因有两个:

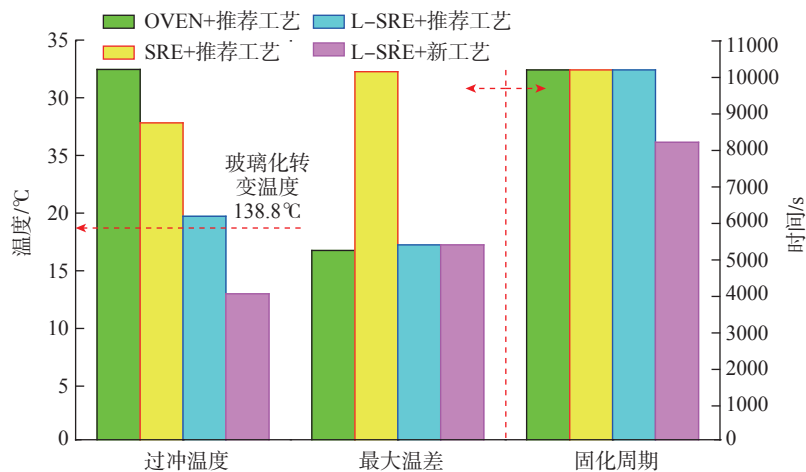


图 15 各工艺效果柱状图  
Fig.15 Histogram of each process effect

(1) 本文优化方法中,将待优化参数的设计区间离散为  $2^5$  个数据点,以代替整个区间。该操作虽缩小了设计区间,减小计算时间,但造成区间的大量数据丢失,由此得出的优选组合仅为有限参数组合中的最优解。

(2) 在遗传算法优化过程中,代理模型精度和遗传代数直接影响到优化结果的准确性。本文代理模型建立过程中采用简单随机抽样,可能面临部分区间抽样不足的问题。遗传算法优化中采用最基本的遗传操作算子,收敛效率不足。遗传代数为 1000,相比  $2^{30}$  的总空间,抽样度仅为 0.0186%。

本文通过以上试验内容,验证优化方法的有效性。而增加各参数设计区间的离散点数、采用连续区间直接优化、提高代理模型精度、增大遗传代数或者优化遗传算法等,在理论上都能进一步优化参数,得到更好的工艺。

## 结论

本文建立了基于多物理场耦合的有限元模型,并评估该模型预测的准确性。设计了分层自阻电热方法的多层温控工艺。建立用于快速预测的径向基函数代理模型。通过遗传算法对固化过程中热冲击峰值

温度、厚向最大温差、固化周期进行多目标优化,获得优选参数,完成新工艺设计。结果表明,针对截面厚度为 29.7mm 的 CFRP 层合板,分层新工艺相比烘箱工艺,热冲击峰值温度从高于玻璃化转变温度的 147.8 °C 降低到安全温度 132.8 °C,过冲温度减小了 60.6%;相比整体自阻电热减小 54.0%;相比分层推荐工艺降低了 34.7%。新工艺固化周期从 10200s 减少到 8200s,减小了约 33min,缩短了 19.6%,并保证复合材料零件在固化过程结束后达到完全固化。综上,优化设计的分层自阻电热工艺可缓解大厚度复合材料零件厚度方向的化学放热冲击,减少厚度方向的温差,并缩短固化周期。

## 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, 24(1): 1-12.  
DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.

[2] ALAM P, MAMALIS D, ROBERT C, et al. The fatigue of carbon fibre reinforced plastics-A review[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 166: 555-579.

[3] 袁铁军, 谭昌柏, 郑伟峰, 等. 大厚度复合材料构件固化成型技术的研究[J]. 机

械设计与制造, 2013(2): 180-183.

YUAN Tiejun, TAN Changbai, ZHENG Weifeng, et al. Research on curing technologies of thick-sectioned composite components[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(2): 180-183.

[4] ALAZARD P, PALUMBO M, GOURDENNE A. Curing under continuous microwaves (2450 MHz) of thermosetting epoxy prepolymers: final statement[J]. Macromolecular Symposia, 2003, 199(1): 59-72.

[5] SHI L. Heat transfer in the thick thermoset composites[D]. Delft: Delft University of Technology, 2016.

[6] 陈绍杰. 浅谈空客 A380 的复合材料应用[J]. 高科技纤维与应用, 2008, 33(4): 1-4, 24.

CHEN Shaojie. Application of composites materials in A380[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2008, 33(4): 1-4, 24.

[7] SÁNCHEZ P J B, PAPAELIAS M, MÁRQUEZ F P G. Autonomous underwater vehicles: Instrumentation and measurements[J]. IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, 2020, 23(2): 105-114.

[8] YOO S H, HAN M G, HONG J H, et al. Simulation of curing process of carbon/epoxy composite during autoclave degassing molding by considering phase changes of epoxy resin[J]. Composites Part B, 2015, 77: 257-267.

[9] KIM D J, YU M H, LIM J, et al. Prediction of the mechanical behavior of fiber-reinforced composite structure considering its shear angle distribution generated during thermo-compression molding process[J]. Composite Structures, 2019, 220: 441-450.

[10] LI N, LI Y G, HANG X, et al. Analysis and optimization of temperature distribution in carbon fiber reinforced composite materials during microwave curing process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214: 544-550.

[11] LIU S T, LI Y G, SHEN Y, et al. Mechanical performance of carbon fiber/epoxy composites cured by self-resistance electric heating method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(9-12): 3479-3493.

[12] HOJJATI M, HOA S V. Curing simulation of thick thermosetting composites[J]. Composites Manufacturing, 1994, 5(3): 159-

169.

- [13] SORRENTINO L, ESPOSITO L, BELLINI C. A new methodology to evaluate the influence of curing overheating on the mechanical properties of thick FRP laminates[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 109: 187–196.
- [14] 刘桂铭, 湛利华, 陈效平, 等. 厚截面复合材料固化温度不均匀性对力学性能的影响[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2018(9): 23–29.
- LIU Guiming, ZHAN Lihua, CHEN Xiaoping, et al. Effects of thick composite curing temperature non-uniformity on mechanical properties[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2018(9): 23–29.
- [15] DANZI F, FANTERIA D, PANETTIERI E, et al. A numerical micro-mechanical study on damage induced by the curing process in carbon/epoxy unidirectional material[J]. *Composite Structures*, 2019, 210: 755–766.
- [16] ESPOSITO L, SORRENTINO L, PENTA F, et al. Effect of curing overheating on interlaminar shear strength and its modelling in thick FRP laminates[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(5–8): 2213–2220.
- [17] 杨洋, 王洪恩, 袁协尧, 等. 碳纤维/环氧超厚度复合材料壁板的固化工艺优化及性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2017, 33(10): 101–107, 113.
- YANG Yang, WANG Hong'en, YUAN Xieyao, et al. Curing process optimization with extra-thickness carbon fiber reinforced epoxy resin matrix composites and their properties[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2017, 33(10): 101–107, 113.
- [18] KIM C, TENG H, TUCKER C L, et al. The continuous curing process for thermoset polymer composites. Part 1: Modeling and demonstration[J]. *Journal of Composite materials*, 1995, 29(9): 1222–1253.
- [19] WHITE S R, KIM Y K. Staged curing of composite materials[J]. *Composites Part A: Applied Science & Manufacturing*, 1996, 27(3): 219–227.
- [20] BAYERL T, DUHOVIC M, MITSCHANG P, et al. The heating of polymer composites by electromagnetic induction—A review[J]. *Composites: Part A*, 2014, 57: 27–40.
- [21] THOSTENSON E T, CHOU T W. Microwave and conventional curing of thick-section thermoset composite laminates: Experiment and simulation[J]. *Polymer Composites*, 2001, 22(2): 197–212.
- [22] HAYES S A, LAFFERTY A D, ALTINKURT G, et al. Direct electrical cure of carbon fiber composites[J]. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 2015, 1(2): 112–119.
- [23] LI Y G, CHENG L B, ZHOU J. Curing multidirectional carbon fiber reinforced polymer composites with indirect microwave heating[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97(1–4): 1137–1147.
- [24] KWAK M, ROBINSON P, BISMARCK A, et al. Microwave curing of carbon-epoxy composites: penetration depth and material characterization[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 75: 18–27.
- [25] ZHANG B, LI Y, LIU S, et al. Layered self-resistance electric heating to cure thick carbon fiber reinforced epoxy laminates[J]. *Polymer Composites*, 2021, 42: 2469–2483.
- [26] QI Y X, JIANG D Z, JU S, et al. Investigation of strain history in fast and conventional curing epoxy matrix composites by FBGs[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 159: 18–24.
- [27] TWARDOWSKI T E, LIN, et al. Curing in thick composite laminates: experiment and simulation[J]. *Journal of Composite Materials*, 1993, 27(3): 216–250.
- [28] MAGUIRE J M, SIMACEK P, ADVANI S G, et al. Novel epoxy powder for manufacturing thick-section composite parts under vacuum-bag-only conditions. Part I: Through-thickness process modelling[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 136: 105969.
- [29] ANANDAN S, DHALI WAL G S, HUO Z, et al. Curing of thick thermoset composite laminates: Multiphysics modeling and experiments[J]. *Applied Composite Materials*, 2018, 25(5): 1155–1168.
- [30] 王俊敏, 郑志镇, 陈荣创, 等. 树脂基复合材料固化过程固化度场和温度场的均匀性优化[J]. *工程塑料应用*, 2015, 43(4): 55–61.
- WANG Junmin, ZHENG Zhizhen, CHEN Rongchuang, et al. Curing degree field and temperature field uniformity optimization during curing process of resin matrix composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2015, 43(4): 55–61.
- [31] SORRENTINO L, POLINI W, BELLINI C. To design the cure process of thick composite parts: Experimental and numerical results[J]. *Advanced Composite Materials*, 2014, 23(3): 225–238.
- [32] ZHOU J, LI Y G, CHENG L B, et al. Indirect microwave curing process design for manufacturing thick multidirectional carbon fiber reinforced thermoset composite materials[J]. *Applied Composite Materials*, 2019, 26(2): 533–552.
- [33] DMITRIEV O, MISCHENKO S. Optimization of curing cycles for thick-wall products of the polymeric composite materials[M]//*Advances in Composite Materials-Ecodesign and Analysis*. Croatia, Rijeka: InTech, 2011.
- [34] STRUZZIERO G, SKORDOS A A. Multi-objective optimisation of the cure of thick components[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 93: 126–136.
- [35] 元振毅, 许英杰, 杨癸庚, 等. 基于多场耦合方法的厚截面复合材料固化过程优化研究[J/OL]. *复合材料学报*, 2021, 38(2): 526–535[2020–11–28]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200603.004>
- YUAN Zhenyi, XU Yingjie, YANG Guigeng, et al. Multi-objective optimization for curing process of thick composite based on multi-physics coupling method[J/OL]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(2): 526–535[2020–11–28]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200603.004>
- [36] 成李冰. 碳纤维增强树脂基复合材料微波间接加热固化工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- CHENG Libing. Research on indirect microwave curing of carbon fiber reinforced polymer composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.

通讯作者: 鲁泳, 副教授、博士, 研究方向为复合材料结构设计与制造。

## Research on Process Design of Layered Self-Resistance Electric Heating for Thick Composite

ZHANG Bo<sup>1</sup>, LU Yong<sup>2</sup>, LIU Shuting<sup>1</sup>, LIU Qiangqiang<sup>1</sup>, HAO Xiaozhong<sup>1</sup>

( 1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**[ABSTRACT]** Aiming at the thermal overshoot and thermal shell-core effect during the curing of thick composite, a layered self-resistance electric heating (L-SRE) process design method is proposed to alleviate the thermal overshoot, reduce the through-thickness temperature difference, and shorten the curing time. In this paper, a multi-physical coupling finite element model (FEM) of L-SRE process is established to predict the degree of curing and the through-thickness temperature distribution under specific layering process parameters. Based on the FEM, a radial basis neural network surrogate model (RBF) is established. The genetic algorithm (GA) is used to optimize the peak temperature of thermal overshoot, the maximum through-thickness temperature difference, and the curing time during the whole process to obtain optimal parameters. Finally, the optimized multi-layer independent temperature control process parameters are obtained. Based on a multi-channel self-resistance electric heating (SRE) platform, L-SRE curing experiments are carried out. The experimental results show that the peak temperature of thermal overshoot using the new process is reduced to 132.8°C below the glass transition temperature. Compared with the oven, the overshoot temperature is reduced by 19.7 °C, which is a 60.6% reduction; Compared with the integrated SRE and the recommended process of L-SRE, the overshoot temperature are reduced by 54.0% and 34.7% respectively. The curing time is reduced by nearly 33min, which is a 19.6% shorter. The optimized L-SRE process parameters can effectively reduce the thermal overshoot and improve the temperature uniformity through thickness.

**Keywords:** Thick composite; Surrogate model; Multi-objective optimization; Thermal overshoot; Curing time

(责编 七七)

(上接第 57 页)

## Comparative Study Between CF/PEKK Thermoplastic Composite by Hot-Press Molding and CF/PEEK Composite Using Automated Fiber Placement Process

LIU Ya'nan, LIU Chenxiao, ZHU Minghao, LI Laixin, FENG Rongxin

(Advanced Material and Structure Laboratory, COMAC Beijing Aircraft Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

**[ABSTRACT]** In this paper, adopting CF/PEKK and CF/PEEK thermoplastic composites as research objects, a preliminary comparative study were conducted between the two systems using corresponding process of low-cost hot-press molding and automated fiber placement (AFP) process. The basic characteristics, obtained composites quality and properties of two thermoplastic composites were explored and analyzed. Firstly, hot press molding process of CF/PEKK system with a prepreg width of 305mm was optimized, which showed that its short beam strength is more affected by molding pressure rather than cooling rate. A satisfactory CF/PEKK composite was fabricated using a process with molding pressure of 2.0MPa, heating temperature of 370 °C, and cooling rate of -15 °C/min, generating a short beam strength up to  $(135.65 \pm 4.72)$ MPa, with fiber volume fraction of 61.8%. Meanwhile, a novel two step in-situ AFP combined with hot press molding process was preliminary explored using 6.35mm width CF/PEEK narrow thermoplastic prepreg. It is found that obtained CF/PEEK laminates using same process parameters revealed satisfactory surface and internal quality and similar failure mode to that of CF/PEKK system, while showed lower short beam strength and different micro-scale failure behavior. The research results can provide basic data and technical reference for the material and process selection of thermoplastic composite used in future aviation structures.

**Keywords:** Thermoplastic composites; Hot press; Automated fiber placement (AFP); PEEK; PEKK

(责编 大漠)