

温度制度对纤维增强复合材料 挖补修复过程的温度场影响

曹 正 李树健 龙习坤

(湖南科技大学机电工程学院, 湘潭 411201)

文 摘 借助有限元模拟仿真的方法,开展纤维增强复合材料结构在挖补修复过程的补丁固化行为研究。基于材料的温变特性,建立了复合材料结构挖补修复的补丁固化模型,探讨了升温速率和保温时间对挖补修复过程的温度场影响。结果表明,相比于保温时间,升温速率对补丁的固化行为影响更大;在升温速率增大一倍后,补丁固化中心点的温度峰值增加1.1%;温度变化速率和固化反应速率均随升温速率的提高而增加,固化区域产生明显的温度梯度;在本研究中,修复区域的最大温差高达8℃。

关键词 复合材料结构,挖补修复,固化过程,数值仿真

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2022.06.003

Effect of Cure Cycle on Temperature Field of Fiber Reinforced Composites During Scarf Repair

CAO Zheng LI Shujian LONG Xikun

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

Abstract The patch curing behavior of fiber reinforced composite structures during scarf repair was studied via finite element simulation. A patch curing model of scarf repaired composite structures was established based on the temperature-dependent material parameters. The effect of heating rate and hold time on the temperature field in scarf repair was discussed. The results show that the influence of heating rate on the curing behavior of scarf repair is greater than that of hold time. When the heating rate increased one time, the curing temperature peak of the center increases by 1.1%. Moreover, the temperature change rate and curing reaction rate increase as the heating rate increases with an obvious temperature gradient generated in the curing area. In this work, the maximum temperature difference in the repaired area is up to 8℃.

Key words Composite structure, Scarf repair, Curing process, Numerical simulation

0 引言

纤维增强复合材料具有轻质、高强度、耐腐蚀、可设计性强等优点,被广泛应用于航空航天、汽车和风力发电等领域^[1]。相较于传统的金属材料,纤维增强复合材料具有明显的各向异性,在复杂交变载荷或冲击的作用下易产生裂纹、分层等损伤^[2-3],严重的甚至导致整个承载结构的直接失效。

为避免损伤扩展,有必要及时对损伤区域进行

修复处理。目前,复合材料构件的修复常采用挖补法^[4-5],该方法首先采用机械切削去除损伤区域材料,在对挖补槽边缘进行切削打磨后,填入与母体材料一致或相近的胶膜和补丁,最后通过胶接共固化实现对原损伤结构的修复处理。在挖补修复过程中,补丁的固化常采用真空升温加压的方式^[6],其中,温度制度和压力制度是主要的工艺参量,对胶膜和补丁的固化质量以及复合材料构件最终的修复效果

收稿日期:2022-01-21

基金项目:国家自然科学基金(51975208);湖南省自然科学基金(2020JJ4301)

第一作者简介:曹正,1997年出生,硕士研究生,主要研究方向为纤维复合材料成型。E-mail:caozhengmail@qq.com

通信作者:李树健,副教授,研究方向为纤维复合材料成型与切削加工。E-mail:smart0110@126.com

具有直接影响^[7-8]。在实际修复中,压力制度主要是指真空袋提供的一个定值标准大气压,而温度制度则包含了固化温度及其直接相关的升降温速率和保温时间等^[9-11]多工艺因素在内的耦合参量,对补丁固化区域的温度场、固化度场以及固化应力场等均存在重要影响。因此,研究温度制度对复合材料结构挖补修复过程的固化行为影响,对开展挖补修复工艺的制定和优化具有指导意义。

针对复合材料固化温度制度的研究,在工程实践中常采用“搭积木”式的试凑法。通过大量的工程实验来研究各固化参量的影响并确定适当的工艺参量,成本高且效率低,难以满足实际工程需求。计算机数值模拟仿真方法具有成本低、效率高等优势,对于探究复合材料挖补修复过程的固化行为简洁有效。目前,对于复合材料固化行为的仿真研究,相关学者主要从结果预测和参数优化两个方面开展了工作。在结果预测方面,主要通过耦合固化过程各类影响因素,来预测复合材料的固化温度和固化度。庞杰^[12]在忽略材料热物性参数的变化的前提下,建立了复合材料补片固化过程的三维仿真模型,发现在固化周期中间时段的固化温度和升温速率对补片固化行为影响较大。BEHZAD等^[13]考虑了复合材料固化过程中热物性参数的变化,结合混合率公式建立了复合材料结构的三维固化模型,有效预测了该部件固化过程中的温度分布和固化度分布。ABDELAL等^[14]在忽略树脂流动性的前提下,通过对L型截面复合材料制件的固化过程进行仿真分析,获得了该制件固化过程中温度和固化度分布。研究发现,通过降低复合材料制件和模具之间的传热系数可降低树脂固化放热的外散,并有效降低制件厚度方向的温度梯度。在参数优化方面,主要结合相关算法对固化过程中的工艺参量进行优化,以确定合适的工艺参量。MATSUZAKI等^[15]借助数据同化的方式对碳纤维增强复合材料的热固化状态进行了仿真分析,并通过局部加热方法进行多目标优化,有效地缩短了固化时间,降低了固化度分布的不均匀性。VAFAYAN等^[16]借助一种耦合有限元/遗传算法对复杂复合材料构件的固化温度曲线进行了优化,仿真结果表明,在优化后的固化周期下得到的复合材料部件的温度和固化度梯度较小。元振毅等^[17]针对厚截面的复合材料结构固化过程建立了多场耦合的多目标优化模型,通过对固化工艺参数进行最佳组合匹配,降低了厚截面复合材料结构的温度峰值和固化时间。

然而,对于复合材料挖补修复的固化过程,其热传导方式及路径都与传统复合材料固化过程的热传

导存在较大差异。如图1所示,一方面,挖补修复中的待修母板相当于一个传热模具,其传热性能、结构尺寸、线胀系数都与传统的复合材料固化所用的模具不同;另一方面,挖补修复中部分热量的传导并非直接作用于待固化补丁和胶黏剂上,而是通过待修母板和待固化区域的接触槽面传递热量,进而导致固化温度场更加不均匀。目前,关于复合材料固化过程的相关研究主要集中在构件的固化成型阶段,而在构件损伤后的挖补修复中的补丁固化行为方面,还缺乏足够的重视和研究。本文借助有限元模拟仿真的方法,主要从影响补丁固化过程的温度制度方面出发,对复合材料结构挖补修复过程的补丁固化行为开展研究。基于材料温变特性并考虑了温度和固化度对热物性参数影响的基础上,建立复合材料结构挖补修复的补丁固化模型,重点探讨了升温速率和保温时间对挖补修复中温度场的影响。

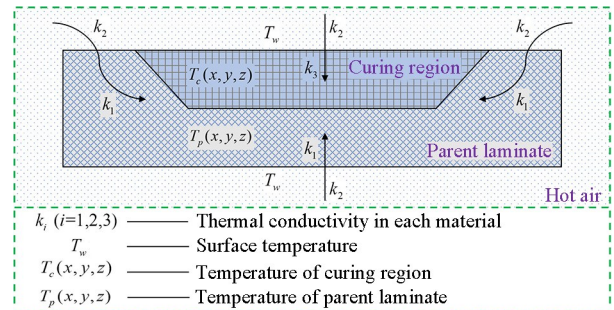


图1 挖补修复过程的传热示意图

Fig. 1 Schematic diagram of heat transfer during scarf repair

1 理论模型

1.1 热-化学模型

复合材料挖补修复过程的材料热传导和补丁固化放热,会形成复杂温度梯度,其温度场可利用含内热源的傅里叶热传导方程表示:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q \quad (1)$$

式中, ρ 为复合材料补丁的密度; C 为复合材料补丁的比热容; k_{xx} , k_{yy} 和 k_{zz} 为分别复合材料补丁在不同方向上的热传导系数; t 为固化时间; T 为温度。内热源 Q 可以表示为:

$$Q = \rho_r V_r H_u \frac{d\alpha}{dt} \quad (2)$$

式中, ρ_r 为树脂密度, V_r 为树脂体积分数, H_u 为树脂的总反应热, α 为树脂的固化度。

1.2 固化动力学模型

复合材料补丁中的树脂基体的固化过程常采用唯相模型描述,其一般形式可以表示为:

$$\frac{d\alpha}{dt} = K(T)f(\alpha) \quad (3)$$

式中, $d\alpha/dt$ 为树脂的固化反应速率, $K(T)$ 为随温度

变化的固化反应速率常数, $f(\alpha)$ 为机理函数。依据 $f(\alpha)$ 的不同, 唯相模型可分为 n 级动力学模型和自催化模型, 本文采用自催化模型:

$$\frac{d\alpha}{dt} = K_1(T)\alpha^m(1-\alpha)^n \quad (4)$$

或

$$\frac{d\alpha}{dt} = [K_2(T) + K_3(T)\alpha^m](1-\alpha)^n \quad (5)$$

式中, m 和 n 均为反应级数。

不同树脂体系的固化动力学模型存在较大差异, 为保证仿真结果的可靠性, 本文采用材料参数较完善的 AS4/3501-6 材料体系进行研究。其固化动力学模型满足自催化模型, 可表示为^[18]:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \begin{cases} (K_1 + K_2\alpha)(1-\alpha)(0.47-\alpha) & (\alpha \leq 0.3) \\ K_3(1-\alpha) & (\alpha > 0.3) \end{cases} \quad (6)$$

$$K_i = A_i \exp(-\Delta E_i/RT) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (7)$$

式中, K_i 为自催化模型的反应速率常数, A_i 为频率因子, ΔE_i 为活化能, R 为理想气体常数。

1.3 热物性参数模型

随着固化时间的推进, 复合材料补丁固化区域的温度和固化度随之发生改变, 补丁中的树脂基体和纤维的热物性参数会随温度和固化度的改变而改变。由于复合材料基体与增强相在热物性参数上存在较大差异, 为提升计算效率, 需得到复合材料在各方向上的等效参数。在忽略树脂流动条件下, 可认为树脂基体和纤维增强相局部处于热平衡状态。借助混合率公式, 由树脂和纤维的热物性参数推导复合材料关于温度和固化度变化的热物性参数。其中, 复合材料补丁的密度可表示为:

$$\rho(\alpha) = V_f \rho_f + V_r \rho_r(\alpha) \quad (8)$$

式中, V_f 为纤维体积分数, ρ_f 为纤维密度, 为树脂密度 $\rho_r(\alpha)$ 。复合材料补丁的比热容可表示为:

$$C(T, \alpha) = \frac{V_f \rho_f C_f(T) + V_r \rho_r(\alpha) C_r(T, \alpha)}{\rho(\alpha)} \quad (9)$$

表1 3501-6的固化动力学参数^[21]

Tab. 1 Curing kinetic parameters of 3501-6^[21]

$A_1/10^9 \text{ min}^{-1}$	$A_2/10^9 \text{ min}^{-1}$	$A_3/10^5 \text{ min}^{-1}$	$\Delta E_1/10^4 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$\Delta E_2/10^4 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$\Delta E_3/10^4 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$H_u/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
2.101	-2.014	1.960	8.07	7.78	5.66	473.6

表2 AS4/3501-6的材料参数^[21]

Tab. 2 Material parameters of AS4/3501-6^[21]

密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	比热容/ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	热传导系数/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$
$\rho_r = \begin{cases} (90\alpha + 1232)(\alpha \leq 0.45) \\ 1272 & (\alpha > 0.45) \end{cases}$	$4184[0.468 + 5.975 \times 10^{-4}T - 0.141\alpha]$	$0.04184[3.85 + (0.035T - 0.141)\alpha]$
$\rho_f = 1790$	$750 + 2.05T$	$\begin{aligned} k_f^l &= 7.69 + 0.0156T \\ k_f^t &= 2.4 + 0.00507T \end{aligned}$

验证仿真模型将热-化学模型、固化动力学模型和热物性参数模型相耦合, 如图3所示。其中, 热-化

式中, $C_f(T)$ 为纤维比热容, $C_r(T, \alpha)$ 为树脂比热容。

沿纤维方向的复合材料补丁的热传导系数为:

$$k^l(T, \alpha) = k_f^l(T)v_f + k_r(T, \alpha)V_r \quad (10)$$

式中, $k_f^l(T)$ 为纤维纵向的热传导系数, $k_r(T, \alpha)$ 为树脂的热传导系数。

垂直于纤维方向的复合材料补丁的热传导系数可表示为^[19]:

$$k^t(T, \alpha) = k_r(T, \alpha) \left[\left(1 - 2\sqrt{\frac{V_f}{\pi}} \right) + \frac{1}{D(T, \alpha)} \left(\pi - \frac{4}{\sqrt{1 - \frac{D(T, \alpha)^2 V_f}{\pi}}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{1 - \frac{D(T, \alpha)^2 V_f}{\pi}}{1 + D(T, \alpha) \sqrt{\frac{V_f}{\pi}}}} \right) \right] \quad (11)$$

$$D(T, \alpha) = 2 \left(\frac{k_r(T, \alpha)}{k_f^t(T)} - 1 \right) \quad (12)$$

式中, $k_f^t(T)$ 为纤维横向的热传导系数。

在挖补修复过程中, 由于补丁固化区域所占待修件的比重较小, 为节省计算量, 本文不再考虑复合材料结构在固化过程中的体积变化和纤维体积分数的变化以及树脂的流动性的影响。

2 模型验证

本文通过建立验证仿真模型并与文献[20]中的实验结果进行对比, 来验证理论模型的可靠性。验证仿真几何模型采用三维复合材料层合板, 其几何尺寸为 $10.16 \text{ cm} \times 10.16 \text{ cm} \times 2.54 \text{ cm}$ 。材料选用 AS4/3501-6, 纤维体积分数 40.383%, 固化动力学参数和材料参数如表1和表2所示。验证仿真模型的网格划分和边界条件如图2所示, 采用六面体网格单元, 划分单元数为 6728。忽略固化过程的辅材和模具所导致的传热滞后影响, 在层合板上下表面添加固化工艺温度, 同时设定层合板上表面与加热环境存在自然对流换热, 其余面为热绝缘状态。

学模型主要控制补丁固化区域的温度 (T), 而固化动力学模型主要控制补丁固化区域的固化度 (α), 两个

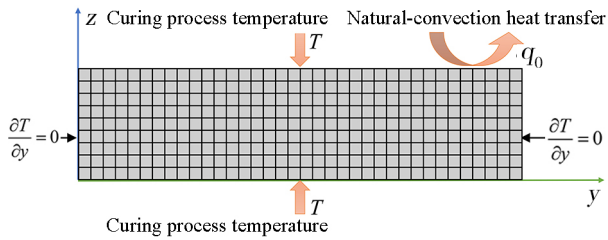
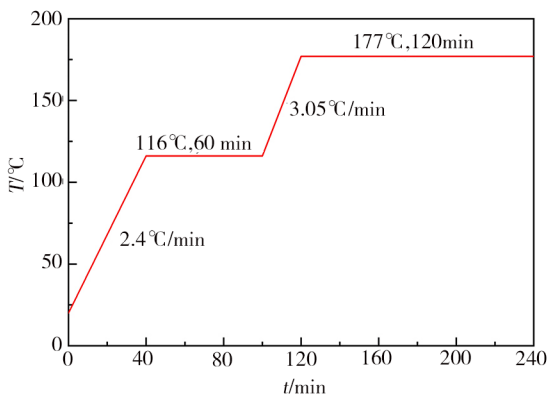


图2 验证模型的网格划分和边界条件

Fig. 2 Mesh generation and boundary conditions of the verification model

模型借助温度和固化度来实现耦合。同时,热物性参数模型对固化区域复合材料的密度、比热容和传热系数进行控制,并受到热-化学模型和固化动力学模型中温度和固化度的影响。最终,热物性参数模型所控制的变量值反馈到热-化学模型,从而实现三个模型的强耦合。

采用图4(a)所示的固化工艺曲线,采用二级升温,第一级升温速率为 $2.40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,第二级为 $3.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,在 $116\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下保温 60 min ,在 $177\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下保温 120 min 。选取层合板的中心点作为验证模型的参考



(a) 固化工艺曲线

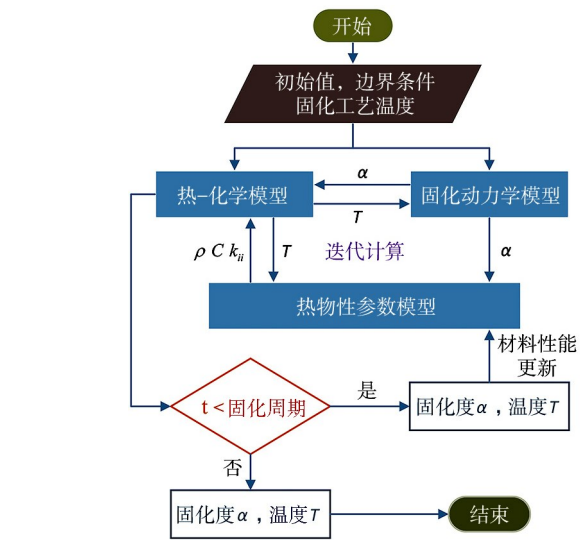
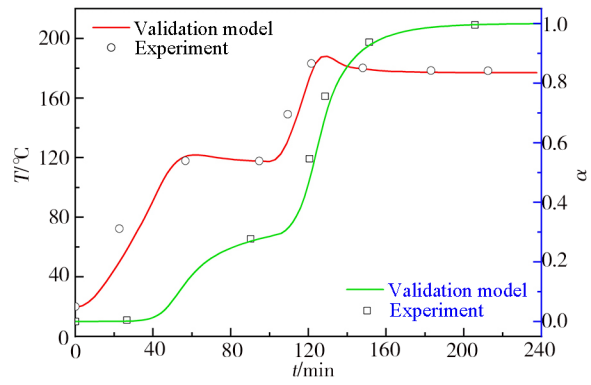


图3 数值仿真程序流程图

Fig. 3 Flow chart of the numerical simulation program

点,提取固化温度与固化度的仿真结果与实验测量值进行对比,由图4(b)可见,验证模型的计算结果与文献[20]中的实验结果基本一致,从而验证了理论模型的可靠性。



(b) 中心点的温度和固化度

图4 AS4/3501-6层合板的固化工艺曲线设定与仿真结果验证

Fig. 4 Curing curve of AS4/3501-6 laminate and verification of simulation results

3 挖补修复仿真算例的建立

为研究温度制度对挖补修复中补丁固化的影响,本文采用验证的数学模型,来创建挖补修复仿真算例并进行分析。仿真中所创建的待修母板为厚度 2 cm 、直径 22 cm 的圆台体,挖补槽深度为 1 cm ,挖补角度为 10° ,修复补丁的几何尺寸如图5(a)所示。为节省计算资源和提高计算效率,本文从母板中提取 $1/16$ 的扇面结构来进行仿真分析,如图5(b)所示。对于其边界条件,忽略模具和辅材对传热的阻隔影响,忽略真空袋压对树脂的流动压实作用,模型上表面和下表面的温度和固化工艺温度相同。同时,将模型上表面与环境之间的热交换设定为自然对流换热,侧面设置为绝热状态,扇形结构的剖面设置为对称条件。几何模型的网格划分主要采用四面体单

元,并对胶接面附近的网格进行细化,分析单元数为 $44\ 042$ 。模型的边界条件和网格划分的具体情况如图5(c)所示。待修母板的材料选用碳纤维增强复合材料,铺层顺序为 $[0/90]_2$,其材料属性如表3所示。实际修复中常采用环氧树脂体系的补丁和胶膜,验证模型使用的AS4/3501-6体系同为环氧树脂体系,且材料参数较完善,故仿真算例补丁和胶膜依旧选择此体系。补丁采用 0° 和 90° 复合材料交替铺设的正交铺层方式,单层厚度设置为 0.125 mm ,共 78 层,胶粘剂厚度设置为 0.25 mm 。

对于AS4/3501-6材料体系的固化,目前主要采用两级升温的加热方式。即,先进行一级升温 and 保温,在达到一定温度后进行二级升温直至达到设定的固化温度,再进行二级保温。最后,进行自然冷却

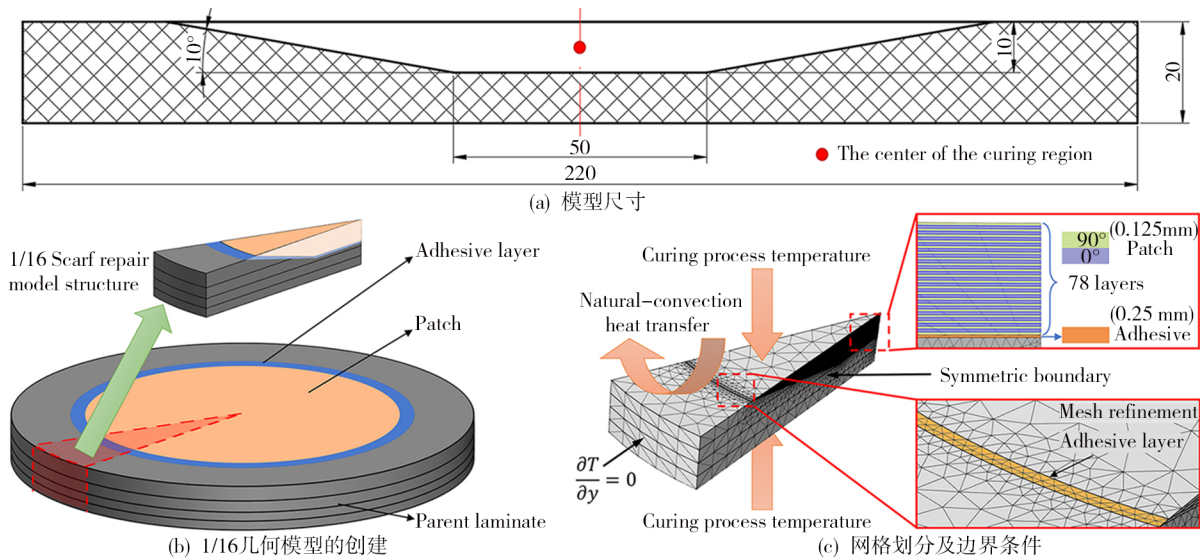


图5 挖补修复固化仿真有限元模型条件

Fig. 5 Finite element model for curing simulation of scarf repair

降温。以供应商推荐的AS4/3501-6固化温度曲线作为参考基准^[23],设为F3,选取温度制度中升温速率和保温时间两个主要工艺参量为研究对象,通过改变固化周期中的两级升温速率、第一级保温时间和第二级保温时间来探究温度制度对挖补修复中补丁固化的影响。升温速率按F1、F2、F3、F4、F5依次递增方式设定,第一级保温时间按F6、F7、F3、F8、F9依次递增方式设定,第二级保温时间按F10、F11、F3、F12、F13依次递增方式设定。固化初始温度均设为20℃,具体温度制度设置情况如表4所示。

表3 母板材料属性^[22]

Tab. 3 Material properties of parent laminate^[22]

密度 /kg·m ⁻³	比热容 /J·(kg·K) ⁻¹	传热系数/W·(m·K) ⁻¹	
		纵向	横向
1578	862	12.83	0.4135

表4 温度制度设置

Tab. 4 Setting of the curing system

温度制度	第一级		第二级		冷却方式
	升温速率 /°C·min ⁻¹	116°C保温时间 /min	升温速率 /°C·min ⁻¹	177°C保温时间 /min	
F1	1.4	60	1.4	120	自然冷却
F2	1.8	60	1.8	120	自然冷却
F3	2.2	60	2.2	120	自然冷却
F4	2.6	60	2.6	120	自然冷却
F5	3.0	60	3.0	120	自然冷却
F6	2.2	30	2.2	120	自然冷却
F7	2.2	45	2.2	120	自然冷却
F8	2.2	75	2.2	120	自然冷却
F9	2.2	90	2.2	120	自然冷却
F10	2.2	60	2.2	90	自然冷却
F11	2.2	60	2.2	105	自然冷却
F12	2.2	60	2.2	135	自然冷却
F13	2.2	60	2.2	150	自然冷却

4 结果和分析

4.1 升温速率的影响

图6展示的是不同升温速率下复合材料补丁固化中心点的固化情况。可以看出,不同升温速率下,固化中心点的温度和固化度的变化存在明显差异。随升温速率增大,固化中心点的温升增大,不同升温速率条件下的温度峰值呈现递增趋势,最大增幅为1.1%,如图6(a)所示。同时,固化度同步增加补丁完成固化所需的时间减少,时间最长可节省22.7% [图6(b)]。这是因为补丁固化中心点的温度变化速率和固化反应速率均随升温速率的提高而增加 [图6(c)(d)]。其中,固化工艺曲线由F1增至F5后,在第一级升温阶段,温度变化速率最大增幅为112.4%,固化度变化速率最大增幅为29.5%;在第二级升温阶段,升温速率由F1增至F5后,温度变化速率最大增幅为118.2%,固化度变化速率最大增幅为63.9%。温度变化速率与固化度变化速率的增加,导致补丁的固化反应放热量增加,进而使完成固化所需的时间缩短。此外,受限于挖补修复过程中的材料损伤容限要求,补丁固化区域占待修母板的比例相对较小,且挖补修复区域的固化热传导存在阻滞现象,造成固化反应过程滞后,补丁的固化温度峰值普遍低于传统的复合材料固化温度峰值。

图7为第二级升温结束时刻不同升温速率下的修复区域温度仿真云图。可见,在较低升温速率下,高温区域主要集中在修复补丁的中心附近 [图7(a)],这表明此时固化反应热对温度峰值产生较大影响。随着升温速率的增加,高温区域逐渐向上表面转移 [图7(b)~(e)],表明此时外部热场对固化区域的影响逐渐超过树脂的固化反应热的影响。

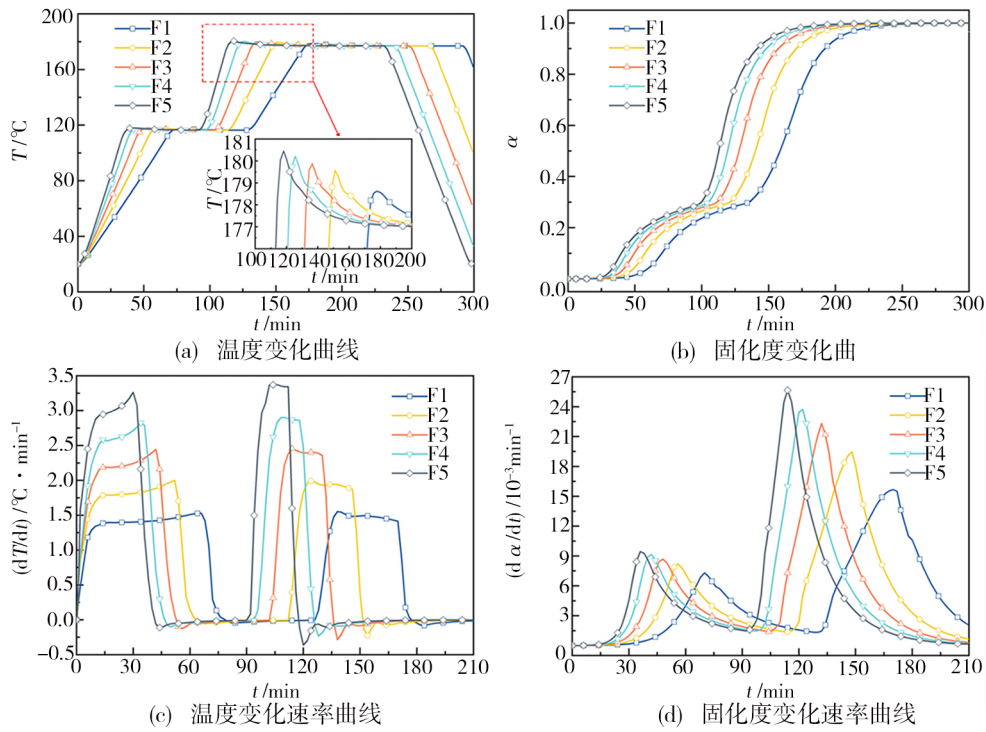


图6 不同升温速率下固化中心点的固化情况

Fig. 6 Curing condition of curing center point at different heating rates

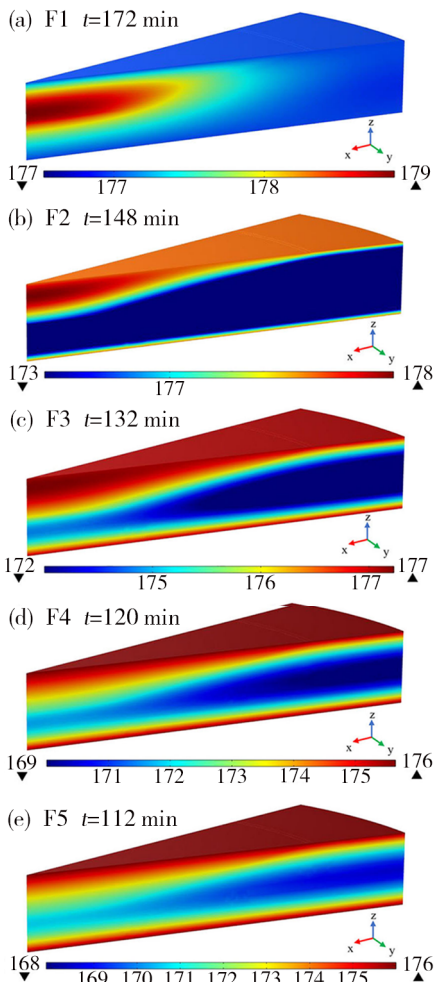


图7 第二级升温结束后的修复区域的温度云图

Fig. 7 Temperature nephogram of the repair area after the second stage heating up

图8所示为不同温度制度下整个修复区域温度的最大值和最小值,可以看出,随着升温速率的增加,温度最大值和最小值都出现下降的趋势,但温差呈现增大的趋势。在升温速率由 $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 增加到 $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 后,相应达到设定固化温度所需的升温时间缩短了 34.88% ,导致固化区域外部的热量不能及时传递到固化区域中心,从而产生明显的温度梯度。在本研究中,修复区域的最大温差高达 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

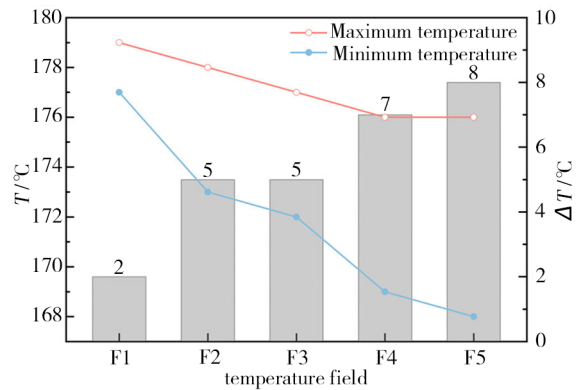


图8 不同温度制度下修复区域的最大温差

Fig. 8 Maximum temperature difference in repair area under different curing systems

4.2 保温时间的影响

图9展示的是第一级保温时间对复合材料补丁固化区域的影响。可以看出,随着第一级保温时间的增大,固化中心点的升温并无明显差异,各温度制度下的固化峰值温度接近,为 $(179.4\sim 180.2\text{ }^{\circ}\text{C})$,如

图9(a)所示。但随第一级保温时间增加,会使补丁完成固化所需的时间增加,相对于F6时的保温时间,F9时到达完全固化所需的时间实际增加了35.7%,如图9(b)。另外,第一级保温时间由30 min增至90 min后,第二级升温阶段的温度变化速率峰值降低8.6%,固化度变化速率降低22.8%,分别如图9(c)(d)所示。这表明,修复区域的固化反应随第一级保温时间的增大而放缓,有利于提高固化区域的固化温度分布的均匀性。

在经过第二级保温后,补丁固化基本完成,相比于第一级保温时间对固化温度场影响显然会降低。为分析第二级保温时间对固化区域温度场的影响,本文对各温度制度下固化区域的平均温度和固化度进行分析,如图10所示。可以看出,在第二级保温阶段结束时,各温度制度下的固化区域温度均已达到177°C,固化度值均已超过0.98,表明第二级保温时间对补丁固化的影响相对较小。因此本文主要对第一级保温时间对固化区域的影响展开分析。

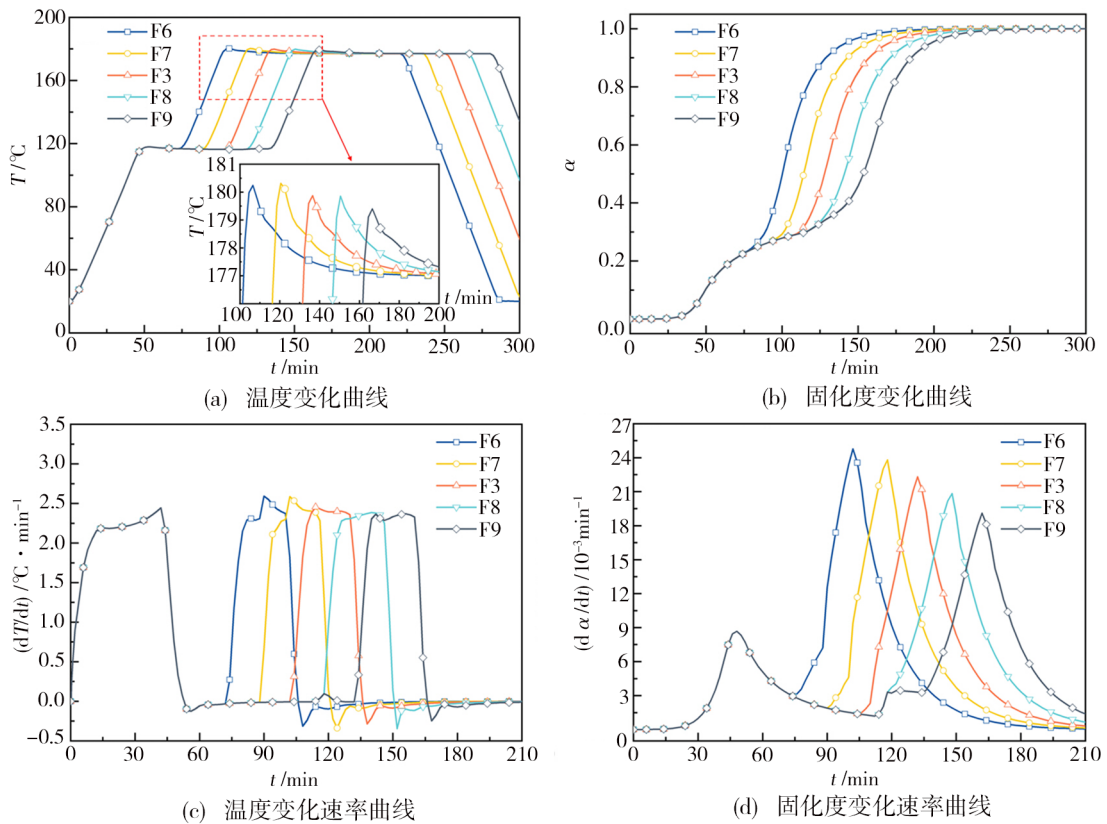


图9 不同第一级保温时间下固化中心点的固化情况

Fig. 9 Curing condition of curing center point at different first stage holding time

图11所示为不同第一级保温时间下仿真模型的最大温差,温差均在5~6°C波动,但整体上受第一级

保温时间的影响相对较小。这是由于第一级保温阶段结束后进行了第二级升温,使得第一级保温时间

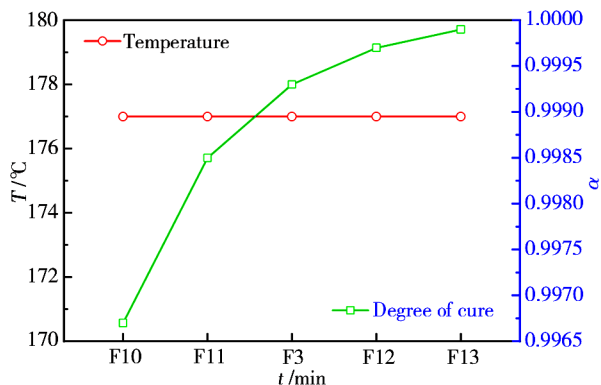


图10 不同温度制度下固化区域的平均温度和固化度

Fig. 10 Average temperature and curing degree of curing area under different curing systems

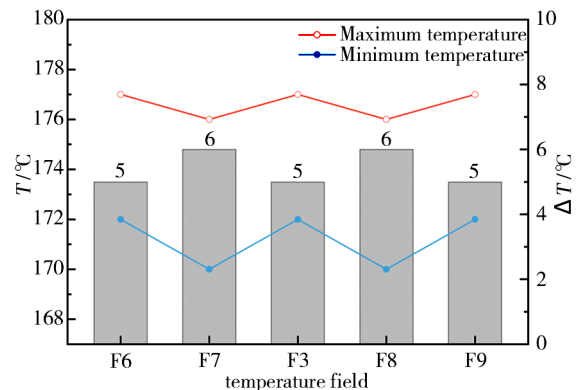


图11 不同温度制度下修复区域的最大温差

Fig. 11 Maximum temperature difference in repair area under the different curing systems

对修复区域的温度场造成的影响基本消除。图12所示为不同第一级保温时间下修复区域在第二级升温结束时的温度云图。可以看出,各温度云图中的温度分布相近,待修母板中心温度低于上下表面,修复区域的固化温度高于周围区域。

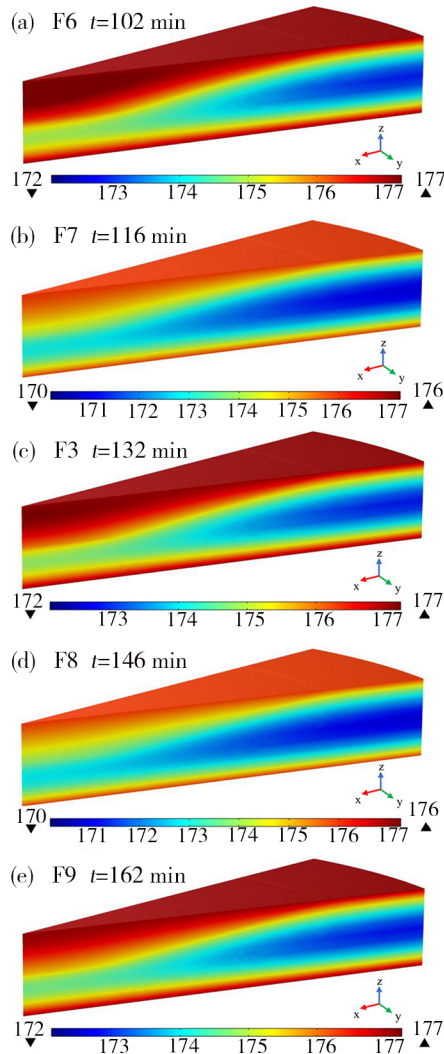


图12 第二级升温结束后的修复区域的温度云图

Fig. 12 Temperature nephogram of the repair area after the second stage heating up

5 结论

本文建立了复合材料挖补修复的三维实体固化模型,基于该模型分析了升温速率和保温时间对挖补修复中温度场的影响情况。可以得到以下结论:

(1)挖补修复过程中,待修母板对补丁固化的传热存在较大的阻滞作用;

(2)升温速率增大一倍,固化中心点的温度峰值增加1.1%,补丁固化中心温度变化速率和固化反应速率均随升温速率的提高而增加,固化区域产生明显的温度梯度;

(3)保温时间对挖补修复温度场的影响较小,在保证固化质量的前提下可适当缩减供应商推荐的保

温时间。

参考文献

[1] KATNAM K B, DA S L F M, YOUNG T M. Bonded repair of composite aircraft structures: a review of scientific challenges and opportunities[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2013, 61:26-42.

[2] 王春浩,李鹏南,李树健,等. CFRP 钻削加工过程的分层缺陷研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(06): 109-115.

WANG C H, LI P N, LI S J, et al. Research progress on delamination defect in CFRP cutting process [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019, 42(06): 109-115.

[3] 陈艳,高尚君,于哲峰,等. 复合材料翼盒低速冲击分层阈值力模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(01): 186-192.

CHEN Y, GAO S J, YU Z F, et al. Delamination threshold load of low-velocity impact of composite wing box [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(01): 186-192.

[4] LIU B, XU F, FENG W, et al. Experiment and design methods of composite scarf repair for primary-load bearing structures [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 88:27-38.

[5] KUMARI P, WANG J. Tensile after impact test of scarf-repaired composite laminates [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2019, 44(9):7677-7697.

[6] ZHANG J, CHENG X Q, ZHANG J K, et al. Effect of curing condition on bonding quality of scarf-repaired composite laminates [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(08): 2257-2267.

[7] MURALIDHARA B, BABU S P K, URESHA B. Utilizing vacuum bagging process to prepare carbon fiber/epoxy composites with improved mechanical properties [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 27:2022-2028.

[8] MAHOOR M, LARISSA G, IGNAAS V, et al. Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance [J]. Journal of Composite Materials, 2019, 53(12):1579-1669.

[9] FU Y T, GAO X H, YAO X F. Mesoscopic simulation on curing deformation and residual stresses of 3D braided composites[J]. Composite Structures, 2020, 246:112387.

[10] MADHUKAR M S, GENIDY M S, RUSSELL J D. A new method to reduce cure-induced stresses in thermoset polymer composites, part I: test method[J]. Journal of Composite Materials, 2000, 34(22):1882-1904.

[11] SARRAZIN H, KIM B, AHN S H, et al. Effects of processing temperature and layup on springback [J]. Journal of Composite Materials, 1995, 29(10):1278-1294.

[12] 庞杰. 固化工艺参数对复合材料补片温度场的影响[J]. 宇航材料工艺, 2016, 46(02):9-12.

PANG J. Effect of curing process parameters on temperature field of composite patch [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2016, 46(02):9-12.

[13] BEHZAD T, SAIN M. Finite element modeling of polymer curing in natural fiber reinforced composites [J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67 (7-8) : 1666-1673.

[14] ABDELAL G F, ROBOTHAM A, CANTWELL W. Autoclave cure simulation of composite structures applying implicit and explicit FE techniques [J]. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2013, 9(1):55-63.

[15] MATSUZAKI R, YOKOYAMA R, KOBARA T, et al. Multi-objective curing optimization of carbon fiber composite materials using data assimilation and localized heating [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 119:61-72.

[16] VAFAYAN M, GHOREISHY M H R, ABEDINI H. et al. Development of an optimized thermal cure cycle for a complex-shape composite part using a coupled finite element/genetic algorithm technique [J]. *Iranian Polymer Journal*, 2015, 24:459 - 469.

[17] 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的多目标优化 [J]. *复合材料学报*, 2021, 38(02):526-535.

YUAN Z, XU Y J, YANG G G, et al. Multi-objective

optimization for curing process of thick composite based on multi-physics coupling method [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(2):526-535.

[18] LOOS A C, SPRINGER G S. Curing of epoxy matrix composites [J]. *Journal of Composite Materials*, 1983, 17 (2) : 135-169.

[19] SPRINGER G S, TSAI S W. Thermal conductivities of unidirectional materials [J]. *Journal of Composite Materials*, 1967, 1(2):166-173.

[20] KIM Y K, WHITE S R. Viscoelastic analysis of processing-induced residual stresses in thick composite laminates [J]. *Mechanics of Composite Materials and Structures an International Journal*, 1997, 4(4):361-387.

[21] SHIN D D, HAHN H T. Compaction of thick composites: simulation and experiment [J]. *Polymer Composites*, 2004, 25(1): 49-59.

[22] ZHU Q, GEUBELLE P H, LI M, et al. Dimensional accuracy of thermoset composites: simulation of process-induced residual stresses [J]. *Journal of Composite Materials*, 2001, 35 (24):2171-2205.

[23] MADHUKAR M S, GENIDY M S, RUSSELL J D. A new method to reduce cure-induced stresses in thermoset polymer composites, part I: test method. *Journal of Composite Materials*, 2000, 34(22):1882-19.