

引用格式: 王成博, 张代军, 关博文, 等. 基于自动铺放技术的聚芳醚酮复合材料后处理工艺优化[J]. 航空材料学报, 2025, 45(3): 32-42.

WANG Chengbo, ZHANG Daijun, GUAN Bowen, et al. Optimization of post-processing of PAEK composites based on automated placement technology[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(3): 32-42.

## 基于自动铺放技术的聚芳醚酮复合材料 后处理工艺优化

王成博<sup>1,2</sup>, 张代军<sup>1,2\*</sup>, 关博文<sup>1,2</sup>, 辛志博<sup>3</sup>, 刘刚<sup>4</sup>,  
李军<sup>1,2</sup>, 陈祥宝<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国航发北京航空材料研究院 软材料中心, 北京 100095; 2. 先进复合材料国防科技重点实验室, 北京 100095; 3. 西安交通大学 机械工程学院, 西安 710049; 4. 北京化工大学 先进技术与装备研究院, 北京 100029)

**摘要:** 聚芳醚酮热塑性复合材料具有优异的抗冲击性能, 在航空领域具有重要应用价值。针对自动铺放原位成型聚芳醚酮复合材料力学性能欠佳的问题, 系统研究后处理工艺参数(温度、压力和时间)对孔隙消除及力学性能的影响规律。采用聚芳醚酮预浸料, 通过自动铺放技术制备层合板。采用差式扫描量热仪、流变测试及力学性能表征, 建立黏度-压力-时间耦合模型。结果表明, 模型可以合理预测不同工艺参数对孔隙消除的影响规律, 得到后处理临界温度为 340 °C。温度在 340~360 °C 之间, 树脂黏度较低且稳定性良好, 有利于快速排出孔隙缺陷。后处理压力显著影响孔隙排出效率, 360 °C 经过 60 min 完全排出孔隙的临界压力为 0.7 MPa, 压力继续增加对材料性能的提升收益较小。后处理时间对材料性能的影响依赖于后处理压力, 360 °C 和 0.7 MPa 时, 60 min 可以完全消除孔隙缺陷; 360 °C 和 1.6 MPa 时, 仅需 20 min 就可以完全消除孔隙缺陷。360 °C、0.7 MPa 和 60 min 时, 材料拉伸强度、弯曲强度和层间剪切强度分别达到 2844、1653 MPa 和 103 MPa。

**关键词:** 自动铺放; 聚芳醚酮; 复合材料; 后处理; 工艺优化

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2025.000076

中图分类号: V258

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2025)03-0032-11

## Optimization of post-processing of PAEK composites based on automated placement technology

WANG Chengbo<sup>1,2</sup>, ZHANG Daijun<sup>1,2\*</sup>, GUAN Bowen<sup>1,2</sup>, XIN Zhibo<sup>3</sup>, LIU Gang<sup>4</sup>,  
LI Jun<sup>1,2</sup>, CHEN Xiangbao<sup>1,2\*</sup>

(1. Soft Materials Center, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. National Key Laboratory of Advanced Composites, Beijing 100095, China; 3. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4. Institute of Advanced Technology and Equipment, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Poly(aryl ether ketone) (PAEK) thermoplastic composites exhibit exceptional impact resistance and possess significant application potential in the aerospace industry. To address mechanical performance limitations of PAEK composites fabricated through automated *in-situ* placement, this study systematically investigates the impacts of post-processing parameters-including temperature, pressure and time-on pore elimination and mechanical properties. Utilizing the automated fiber placement, PAEK prepregs are processed into laminates. A viscosity-pressure-time coupling model is formulated through differential scanning calorimetry(DSC), rheological assessments and mechanical characterizations. The results demonstrate the model predicts reasonably pore elimination across varying process parameters and the critical post-processing temperature is identified as 340 °C. The pore elimination is facilitated rapidly due to low and stable resin viscosity at 340-360 °C. The post-processing pressure

significantly influences pore removal efficiency, with a critical pressure of 0.7 MPa at 360 °C and requiring 60 min for complete pore elimination. Higher pressures lead to only marginal performance enhancements. The time dependency of material performance depends on pressure: at 0.7 MPa and 360 °C, full pore elimination is achieved within 60 min, whereas at 1.6 MPa, the required time is reduced to 20 min. At 0.7 MPa, 360 °C and 60 min, the tensile strength, flexural strength and interlaminar shear strength are 2844, 1653 MPa and 103 MPa, respectively.

**Key words:** automatic placement; PAEK; composite materials; post-processing; process optimization

高性能热塑性复合材料因其抗冲击、可焊接及可回收等特性,在提升航空结构损伤容限、实现轻量化与降低全寿命周期成本方面展现出显著优势<sup>[1-10]</sup>。其中,聚芳醚酮(poly(aryl ether ketone), PAEK)类热塑性复合材料结合自动铺放技术,通过激光加热原位成型工艺可大幅提升制造效率,这一技术路线已成为研究热点<sup>[11-15]</sup>。

研制初期,高性能热塑性复合材料研究主要集中在聚醚醚酮(poly(ether ether ketone), PEEK)和聚醚酮酮(poly(ether ketone ketone), PEKK),然而,PEEK(熔点 $T_m=343$  °C)、PEKK( $T_m=338$  °C)等传统 PAEK 类树脂因过高的熔融温度导致成型工艺性差,严重制约其在航空领域的工程应用。新型低熔融温度 PAEK 树脂(low-melt PAEK, LMPAEK)( $T_m=305$  °C)的商业化应用之后,这类材料研究取得突破性进展。这种由威格斯公司开发的树脂显著改善成型工艺窗口,东丽 TC1225 预浸料等衍生产品已广泛应用于自动铺放技术研究<sup>[16-18]</sup>。Schiel 等<sup>[19]</sup>研究自动铺放过程工艺参数对原位成型复合材料性能的影响,研究结果揭示模具温度与回火工艺的协同效应,当模具温度升高并在铺放后回火处理,复合材料剪切强度提升 38%,结晶度增加 25%。同时,Islam 等<sup>[20]</sup>对比研究发现,自动铺放原位成型试件的层间剪切强度为 48 MPa,仅为热压成型件(97 MPa)的 49%,表明工艺成熟度仍存在显著差距。Heathman 等<sup>[21]</sup>通过参数优化使孔隙率降至 1% 以下,结晶度达 20%,剪切强度提升至 60 MPa,但相较传统工艺仍有 30% 的力学性能差距。

近年来,虽然欧洲已将自动铺放原位成型技术应用于机身上半部铺放和验证<sup>[22]</sup>,但该技术仍面临两大核心挑战:其一,原位成型复合材料力学性能较热压工艺存在较大差距;其二,大型构件成型质量控制难度较高,自动铺放原位成型技术在航空领域应用仍有一定差距。为此,研究人员提出“自动铺放+后处理”的混合工艺策略,采用一种较为温和的工艺对自动铺放 PAEK 复合材料进行后处理,

与传统高温高压热压罐工艺相比,在降低复合材料制造成本和推广热塑性复合材料应用方面具有重要意义。Zhang 等<sup>[23]</sup>通过自动铺放加非热压罐回火工艺将复合材料层间剪切强度提高到 91 MPa。Swamy 等<sup>[24]</sup>研究真空袋成型工艺中不同孔隙去除机制在先进热塑性复合材料加工中的应用,实现 24 层厚层压板的无孔隙真空袋固化,验证该技术应用于大尺寸构件的可行性,为航空复合材料制造提供“自动铺放+真空后固化”的创新工艺路线。

综上所述,当前 PAEK 热塑性复合材料制造过程仍面临诸多挑战,尤其是预浸料制备、铺放、固化成型等多个工艺步骤<sup>[17]</sup>。基于 PAEK 复合材料自动铺放原位成型技术尚不满足工程化应用的现状,本工作针对 PAEK 复合材料自动铺放技术工程化应用面临的瓶颈,系统研究后处理工艺参数对材料力学性能的影响。通过构建工艺-结构-性能关联模型,解决以下关键问题:(1)后处理温度场对层间结合的调控规律;(2)压力参数与孔隙演化的动态关系;(3)温度-压力-时间对材料性能影响的协同控制方法。这些研究可以优化兼顾性能提升与成本控制的后处理方案,为制造热塑性复合材料航空结构件提供技术支撑。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

采用中国航发北京航空材料研究院制备的 GCT800/PAEK 作为热塑性预浸料,其中增强纤维为 T800 级碳纤维,树脂基体为 PAEK 树脂,预浸料物理性能见表 1。

### 1.2 实验方法

采用铺丝机进行层合板铺放,层合板铺层设计如下:0°拉伸性能试样铺层为 $[0]_7$ ,弯曲性能试样铺层为 $[0]_{14}$ ,层间剪切性能试样铺层为 $[0]_{28}$ 。铺放工艺参数如下:铺放压力为 600 N,铺放温度为 400 °C,铺放速度为 50 mm/s。铺放完成后,按照不

表 1 PAEK 热塑性预浸料物理性能参数  
Table 1 Physical performance of PAEK thermoplastic prepreg

Property	Fiber areal weight/( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	Mass fraction of resin/%	Consolidated ply thickness/mm	Width/mm
Result	145	35	0.14	6.35

同后处理工艺加工得到测试样条。采用 DSC 250 热分析仪并在氮气气氛中进行差式扫描量热仪 (differential scanning calorimetry, DSC) 测试, 温度升至 400 °C, 升温速率为 10 °C/min。采用 DHR-2 高温旋转流变仪进行树脂流变测试, 在升温流变测试中, 温度升至 420 °C, 升温速率为 2 °C/min; 在恒温流变测试中, 分别在 340、350、360、370、380 °C 和 390 °C, 恒温 360 min, 测试树脂黏度曲线。分别按照 ASTM D3039、ASTM D7264、ASTM D2344 和 GB/T 3365 标准测定复合材料 0° 拉伸性能、弯曲性能、复合层间剪切性能和孔隙含量。其中, 复合材料弯曲测试跨厚比为 60:1。

## 2 结果与分析

### 2.1 PAEK 树脂的热性能

树脂的热性能直接决定复合材料后处理温度窗口, 区别于热固性树脂的化学交联过程, 热塑性 PAEK 树脂成型本质上是熔融-浸渍-固结的物理过程。熔融树脂浸渍碳纤维的过程近似于流体对多孔介质的渗透, 根据达西定律建立的多孔介质渗透模型<sup>[25]</sup>为:

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{K}{\eta} \cdot \frac{dP}{dZ} \quad (1)$$

式中:  $Z$  为树脂渗透距离;  $t$  为渗透时间;  $K$  为纤维介质渗透率;  $\eta$  为树脂黏度;  $P$  为后处理压力, 本工作中后处理压力均为相对压力与真空压力之和。式 (1) 积分可得浸渍深度方程:

$$Z = \sqrt{\frac{2KPt}{\eta}} \quad (2)$$

由此可知, 成型质量取决于温度 (通过树脂黏度  $\eta$  表征)、压力  $P$  及时间  $t$  的协同作用, 其中  $K$  值受纤维排布形态影响<sup>[26]</sup>, 这为后处理工艺参数优化提供理论依据。

通过 DSC 分析确定 PAEK 树脂的相变特征 (图 1), 由图 1 得到, PAEK 树脂的熔融峰值温度为 321 °C, 较传统的 PEEK 树脂 ( $T_m=343$  °C) 降低 22 °C, 玻璃化转变温度  $T_g$  为 150 °C, 这说明其后处理温度较 PEEK 复合材料降低 20~30 °C, 同时为

了避免复合材料成型过程中产生变形, 至少需要保压降温至 150 °C 以下。

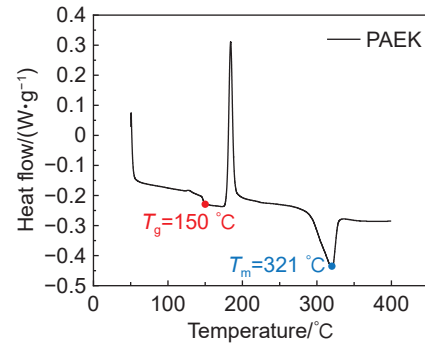


图 1 PAEK 树脂 DSC 曲线  
Fig. 1 DSC curve of PAEK resin

为了进一步确定树脂在高温下的熔体黏度, 测试得到树脂的升温流变曲线 (图 2), 从图中可以看出, 当温度达到 315 °C 时, 树脂黏度开始迅速下降, 这与 DSC 曲线中树脂熔融起始温度相对应。当温度达到 338 °C 时, 树脂黏度降至 443 Pa·s 并进入平台区, 温度为 400 °C 时达到最低黏度 204 Pa·s, 随后树脂黏度回升可能源于高温诱导的分子链交联, 由此确定 PAEK 复合材料后处理温度窗口为 340~400 °C。

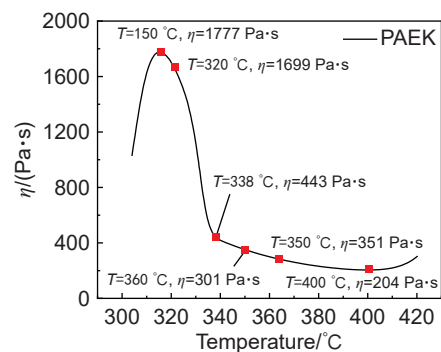


图 2 PAEK 树脂黏度-温度曲线  
Fig. 2 Viscosity-temperature curve of PAEK resin

为了进一步确定合适的后处理温度, 在 340~390 °C 之间每间隔 10 °C 测试树脂的恒温流变曲线, 测试结果如图 3 所示。测试结果表明, 在 340~390 °C 温度范围内, 树脂的起始黏度均小于 450 Pa·s, 但是不同温度对应的树脂黏度增加速率

不同, 温度越高, 恒温过程树脂黏度增加速率越快。温度在 340~360 °C 区间内, 树脂黏度随时间缓慢增加, 60 min 时树脂黏度小于 450 Pa·s, 120 min 时树脂黏度小于 650 Pa·s。而当温度在 370~390 °C 范围内, 树脂黏度随时间迅速增加, 60 min 时树脂黏度已超过 450 Pa·s, 120 min 时树

脂黏度均已超过 1000 Pa·s。树脂黏度不同的变化趋势表明, 在高温条件下, 温度越高, 树脂越容易老化, 黏度越大。在制定 PAEK 复合材料后处理工艺时, 既要考虑树脂的初始黏度, 又要考虑恒温过程树脂黏度的变化。当树脂黏度较高时, 延长恒温时间带来的收益可能是有限的。

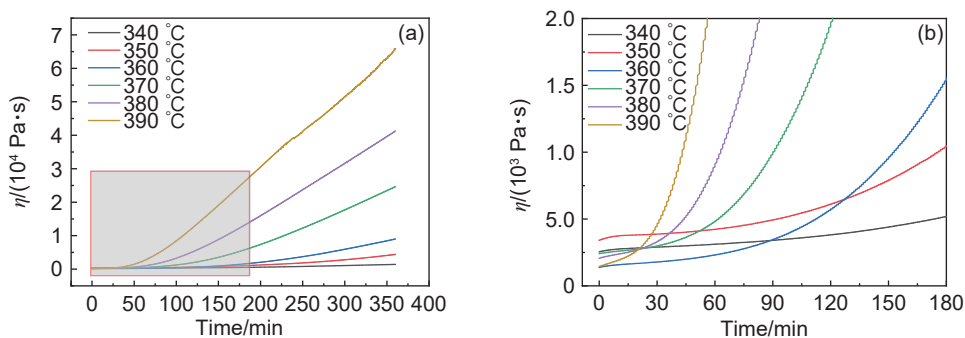


图3 不同温度 PAEK 树脂 360 min 时恒温流变曲线(a)和图(a)中 0~180 min 曲线局部放大图(b)

Fig. 3 Viscosity-time curves of 360 min in PAEK resin under different temperatures(a) and partial enlargement of 0-180 min(b) in Fig.(a)

## 2.2 纤维树脂渗透模型

自动铺放 PAEK 复合材料未处理和热压后处理试样的截面照片如图 4 所示。从图 4(a)可以看出, 未处理时孔隙主要分布在纤维体积分数较高区域, 同时也是预浸料层内孔隙缺陷, 预浸料层间孔隙缺陷较少。从图 4(b)可以看出, 经过热压后处理层内孔隙被消除, 孔隙含量降低。因此, 消除孔隙缺陷就是在高温高压条件下, 树脂充分渗透碳纤维排除孔隙的过程。

使用达西定律分析复合材料成型过程中影响孔隙缺陷消除的因素, 为了确定合理的工艺参数, 由式(2)推导得到式(3):

$$t = \frac{Z^2 \eta}{2KP} \quad (3)$$

从式(3)可以得到, PAEK 复合材料后处理过程中, 孔隙完全消除所需时间与树脂黏度成正比, 与后处理压力成反比。树脂的恒温流变结果表明, 温度低于 340 °C 时, 树脂黏度较高, 温度处于 340~360 °C 范围内时, 在 120 min 内, 树脂黏度较稳定, 温度高于 360 °C 时, 黏度随时间迅速增加。因此, 合理的后处理温度范围为 340~360 °C。通过式(3)还可以得出, 后处理压力的变化对工艺的改善是显著的, 当压力从 0.1 MPa 增加到 1.0 MPa 时, 孔隙完全消除的时间可以缩短为原来的 10%。根据设置的温度和压力参数, 式(3)可以预测完全消除孔隙缺陷所需要的时间。

为了更准确预测孔隙消除所需的时间, 需要对式(3)中  $K$  进行求解。根据文献 [26], 对于单向平

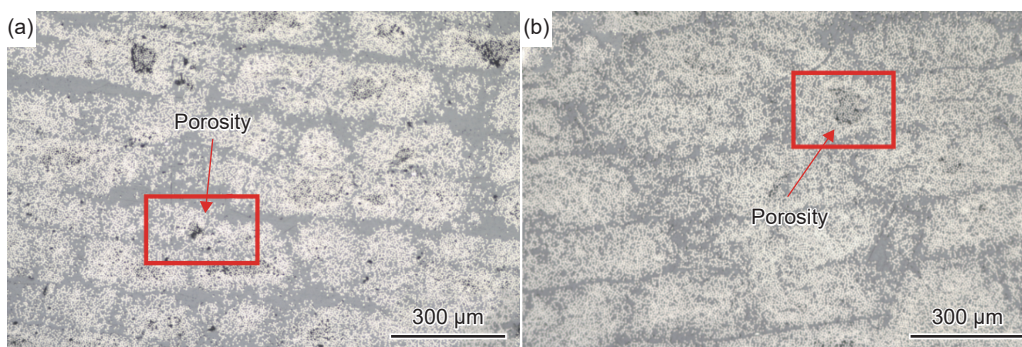


图4 自动铺放 PAEK 复合材料未处理(a)和热压后处理(b)试样截面照片

Fig. 4 Cross-sectional optical micrographs of PAEK composite samples based on automated placement without(a) and with hot press post-processing(b)

行排列的碳纤维,式(3)中渗透系数 $K$ 与纤维直径 $d$ 以及纤维体积分数 $\varphi$ 相关,式(4)给出 $K$ 与 $d$ 和 $\varphi$ 的定量关系为:

$$\frac{K}{d^2} = \begin{cases} \frac{0.16 \left[ \frac{\pi}{4\varphi} - 3\sqrt{\frac{\pi}{4\varphi}} + 3 - \sqrt{\frac{4\varphi}{\pi}} \right]}{\sqrt{1-\varphi}}, & \text{square} \\ \frac{0.16 \left[ \frac{\pi}{2\sqrt{3}\varphi} - 3\sqrt{\frac{\pi}{2\sqrt{3}\varphi}} + 3 - \sqrt{\frac{2\sqrt{3}\varphi}{\pi}} \right]}{\sqrt{1-\varphi}}, & \text{staggered} \\ \frac{0.16 \left[ \frac{\pi}{3\sqrt{3}\varphi} - 3\sqrt{\frac{\pi}{3\sqrt{3}\varphi}} + 3 - \sqrt{\frac{3\sqrt{3}\varphi}{\pi}} \right]}{\sqrt{1-\varphi}}, & \text{hexagonal} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $K$ 与 $d$ 和 $\varphi$ 的定量关系与纤维排列方式相关,纤维排列方式如图5所示,包括正方形(square)、

交错形(staggered)和六边形(hexagonal),本工作使用的碳纤维直径约为 $5\ \mu\text{m}$ ,纤维体积分数平均为56%,根据式(4)计算可以得到 $K$ 值如式(5)所示:

$$K = \begin{cases} 3.19 \times 10^{-8} \text{ mm}^2, & \text{square} \\ 9.60 \times 10^{-8} \text{ mm}^2, & \text{staggered} \\ 3.46 \times 10^{-10} \text{ mm}^2, & \text{hexagonal} \end{cases} \quad (5)$$

自动铺放 PAEK 复合材料截面放大图如图6所示,从图4和图6可以看出,复合材料孔隙含量较高区域纤维排布更密集,这也是形成孔隙的原因。由图6可以发现,孔隙区域纤维排列方式主要为正方形和交错形,其中交错形比例更高,因此本工作按照交错形排列计算 $K$ 值。在预浸料制备过程中,当纤维紧密排列时,树脂更难浸润纤维,从而更容易形成孔隙。图6所示的截面计算得到纤维最密区域体积分数约为80%,因此计算 $K$ 值时,纤维体积分数设置为80%,本工作 $K$ 值取 $2.28 \times 10^{-9} \text{ mm}^2$ 。

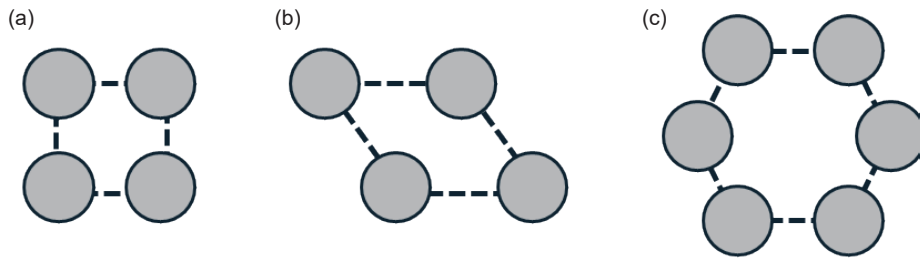


图5 不同纤维排列方式示意图 (a)正方形;(b)交错形;(c)六边形

Fig. 5 Schematic diagram of different fiber arrangements (a)square; (b)staggered; (c)hexagonal

由于复合材料孔隙主要分布于预浸料层间,而预浸料单层厚度为 $0.14\ \text{mm}$ ,因此式(3)中复合材料孔隙完全消除时 $Z$ 值最大为 $0.14\ \text{mm}$ 。由式(3)可以得到复合材料孔隙完全消除所需时间与树脂黏度和后处理压力的关系如式(6)所示:

$$Pt = 0.0717\eta \quad (6)$$

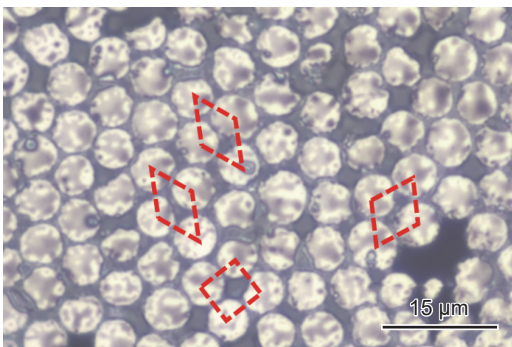


图6 自动铺放 PAEK 复合材料截面放大图

Fig. 6 Enlarged cross-sectional optical micrograph of PAEK composites with automated placement

式中: $\eta$ 单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ; $P$ 单位为 $\text{MPa}$ ; $t$ 单位为 $\text{min}$ 。

### 2.3 原位成型复合材料性能

为了研究不同后处理工艺对 PAEK 复合材料性能的影响,采用自动铺放技术制备不同厚度的复合材料层板成型体,首先将自动铺放原位成型试板作为参照组,对其力学性能和截面孔隙缺陷分布进行表征。自动铺放原位成型复合材料力学性能如图7所示,复合材料 $0^\circ$ 拉伸强度、弯曲强度和层间剪切强度(interlaminar shear strength, ILSS)分别为2233、859 MPa和43.9 MPa。

自动铺放原位成型 PAEK 复合材料截面孔隙缺陷照片如图8所示,可以看出,复合材料中孔隙缺陷主要分布在预浸料层内,表明复合材料的孔隙缺陷主要为预浸料内部孔隙缺陷的遗传,预浸料层间孔隙含量较低,表明自动铺放过程中,预浸料层间粘接性能较好,热压后处理主要是消除层内残留的孔隙缺陷。复合材料内部孔隙存在也是原位成型复合材料各项力学性能偏低的主要原因。

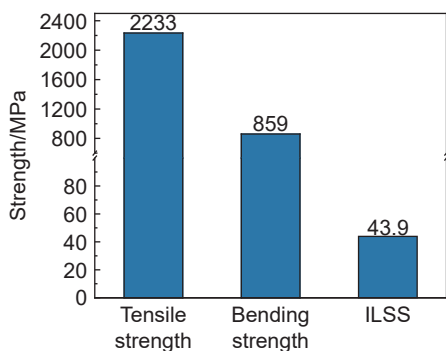


图 7 自动铺放原位成型 PAEK 复合材料力学性能

Fig. 7 Mechanical properties of PAEK composites prepared by automated *in-situ* placement

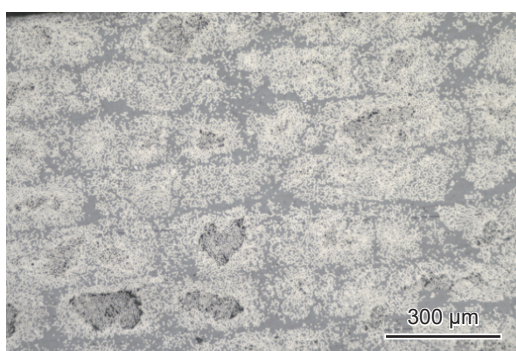


图 8 自动铺放原位成型 PAEK 复合材料截面照片

Fig. 8 Cross-sectional image of PAEK composites prepared by automated *in-situ* placement

### 2.4 后处理温度的影响

在工程实践中,为了提高效率,复合材料成型时间不宜过长,因此首先设置后处理时间为 60 min。基于式(6)建立的黏度-压力-时间关系模型,在后处理时间一定条件下,获得孔隙完全消除所需树脂黏度与后处理压力的对应关系列于表 2(压力值为绝对压力)。数据表明:当压力从 0.1 MPa 梯度增加至 2.6 MPa 时,临界容许黏度阈

表 2 后处理时间为 60 min 孔隙消除工艺的黏度-压力匹配参数

Table 2 Viscosity-pressure mapping in the pore-free consolidation process with post-processing time of 60 min

Post-processing pressure/MPa	Viscosity required for pores elimination/ ( Pa · s )
0.1	84
0.7	586
1.1	920
1.6	1338
2.1	1757
2.6	2178

值由 84 Pa · s 显著提升至 2178 Pa · s, 提高后处理压力可有效降低对树脂低黏度的工艺依赖。由此,重点考察 2.6 MPa 后处理压力(由 2.5 MPa 相对压力叠加 0.1 MPa 真空压力构成)工况下,温度对材料力学性能的调控规律。

2.6 MPa 和 60 min 条件下,系统研究 210、230、320、340、350 °C 及 360 °C 温度梯度对自动铺放 PAEK 复合材料力学性能的影响,并与自动铺放原位成型复合材料性能对比,测试结果如图 9 所示。实验结果表明,后处理温度低于 340 °C 时,复合材料力学性能与原位成型性能相当,后处理引起的力学性能变化不超过 5%。这主要因为此温度区间树脂熔体黏度大于 1000 Pa · s(图 2),导致树脂流动性不足,孔隙消除效率较低。当后处理温度达到 340 °C 时,复合材料力学性能发生阶跃式提升,0°拉伸强度、弯曲强度和层间剪切强度分别达到 2617、1674 MPa 和 97.3 MPa,比原位成型性能分别提高 17%、95% 和 122%。力学性能显著提升主要归因于 340 °C 树脂黏度骤降至 419 Pa · s(图 2),树脂熔体可以充分浸润纤维束从而排除孔隙。当后处理温度增加至 350 °C 时,复合材料 0°拉伸强度进一步提高至 2818 MPa,相对于原位成型性能提高 26%,弯曲强度保持稳定为 1674 MPa,层间剪切强度略有提升达到 101 MPa,相对于原位成型性能提高 130%。继续升高温度至 360 °C,复合材料各项力学性能基本保持稳定。树脂在 350 °C 时黏度为 351 Pa · s,360 °C 时黏度为 301 Pa · s,表明黏度低于 400 Pa · s 时,在 2.6 MPa 和 60 min 条件下,树脂黏度继续降低,对性能增益贡献趋于饱和。通过上述分析,可以得出 340 °C 为后处理临界温度。

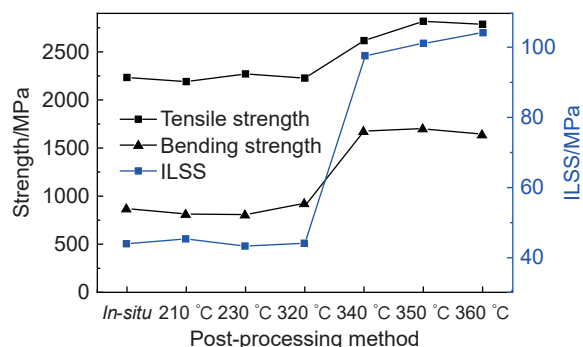


图 9 后处理压力和时间分别为 2.6 MPa 和 60 min 条件下力学性能-后处理温度关系曲线

Fig. 9 Curves of mechanical properties versus post-processing temperature with post-processing pressure of 2.6 MPa and post-processing time of 60 min

通过截面显微组织(图10),系统揭示温度梯度对PAEK复合材料孔隙演化的调控规律。显微观测显示,在低温区(210℃和230℃),试样孔隙分布(图10(a)和(b))与原位成型试样(图8)相近,孔隙含量较高,表明高黏度树脂在此温度下未能充分流动,消除孔隙。320℃时,试样孔隙含量(图10(c))较原位成型试样(图8)明显降低,但仍能观测到孔隙存在,表明在接近临界温度时,树脂具有一定流动性,有助于孔隙消除,但由于流动性有限,孔隙未能完全消除,因而复合材料力学性能未能显著提升。当达到后处理临界温度(340℃),

树脂黏度骤降并处于较低水平,流动性显著改善,在2.6 MPa压力下可以有效排出孔隙,图10(d)中试样截面已经观察不到孔隙,表明达到临界温度时,孔隙已被完全消除,因而复合材料各项性能显著提升。温度继续升高至350℃,孔隙被完全消除的同时,树脂充分浸润纤维(图10(e)),复合材料界面结合性能得到改善,因此,复合材料0°拉伸强度和层间剪切强度提升。温度继续升高至360℃,试样截面状态(图10(f))与350℃时相近,此时,树脂已完全充分浸润纤维,因而复合材料力学性能不再提升。

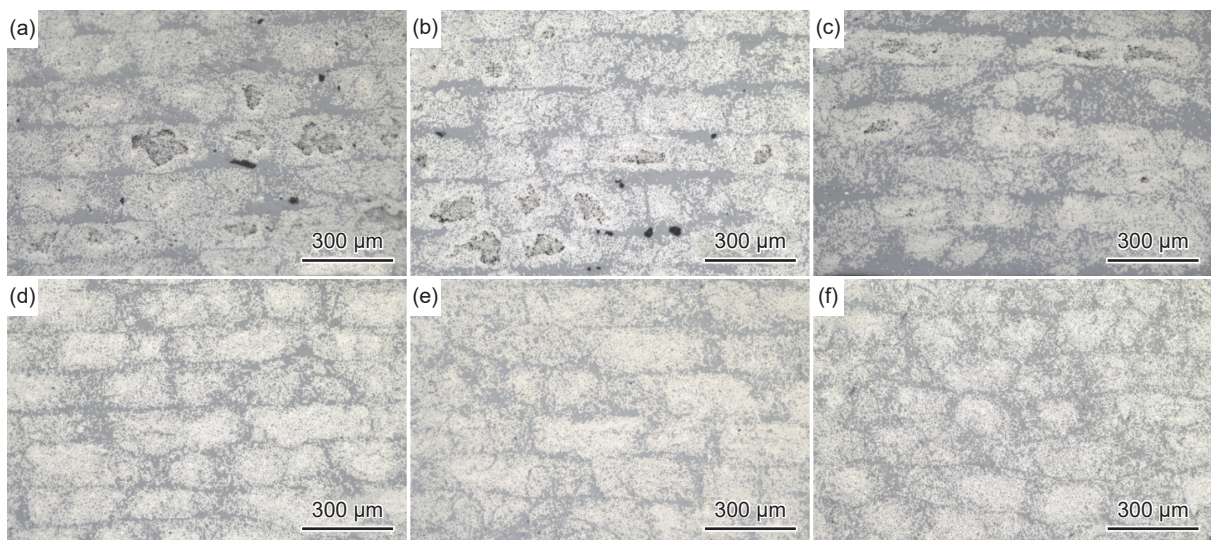


图10 后处理压力和时间分别为2.6 MPa和60 min条件下不同后处理温度复合材料截面照片  
(a)210℃; (b)230℃; (c)320℃; (d)340℃; (e)350℃; (f)360℃

Fig. 10 Cross-sectional images of composites under different post-processing temperatures with post-processing pressure of 2.6 MPa and post-processing time of 60 min (a)210℃; (b)230℃; (c)320℃; (d)340℃; (e)350℃; (f)360℃

## 2.5 后处理压力的影响

研究表明,340℃为后处理临界温度,在340℃、2.6 MPa和60 min条件下,能有效消除孔隙缺陷,显著提升复合材料力学性能。基于黏度-压力-时间耦合模型(式(6)),当树脂黏度为400 Pa·s时,理论计算获得不同压力下孔隙完全消除所需时间(表3)。结果表明:压力从0.1 MPa(真空压力)提升至2.6 MPa时,孔隙完全消除所需时间由287 min大幅缩短至11 min,降幅达96%,表明后处理压力对工艺效率的显著调控作用。

分别在0.1、0.7、1.1、1.6、2.1 MPa和2.6 MPa后处理压力,360℃和60 min条件下,对自动铺放PAEK复合材料进行后处理,评价复合材料力学性能并与自动铺放原位成型复合材料进行对比,结果如图11所示,图中压力0 MPa下对应原位成型力学性能。测试结果表明,当抽真空(后处理压力为

0.1 MPa)时,复合材料0°拉伸强度、弯曲强度和层间剪切强度分别达到2416、1332 MPa和56.8 MPa,较原位成型试样性能分别提高8%、55%和29%,材料各项力学性能表现出不同程度提升,表明仅在

表3 不同压力对应的孔隙完全消除所需时间  
Table 3 Time required for pores elimination under different pressures

Post-processing pressure/MPa	Time required for pores elimination/min
0.1	287
0.7	41
1.1	26
1.6	18
2.1	14
2.6	11

真空压力作用下,复合材料内部质量已明显改善。后处理压力增加至 0.7 MPa 时,力学性能继续提升,0°拉伸强度、弯曲强度和层间剪切强度分别达到 2744、1653 MPa 和 103 MPa,较原位成型试样性能分别提高 23%、92% 和 135%。后处理压力继续增加至 0.7 MPa 以上(1.1、1.6、2.1 MPa 和 2.6 MPa)时,材料力学性能与后处理压力为 0.7 MPa 相比,变化均不超过 5%,表明在 360 °C、60 min 和 0.7 MPa 条件下,复合材料力学性能已达较高水平,继续增加压力对提升复合材料力学性能不再产生收益,因此考虑设备能力和成本效益,后处理温度和时间分别为 360 °C 和 60 min 条件下,合理的后处理压力为 0.7 MPa。

在 360 °C、60 min 和不同后处理压力条件下复

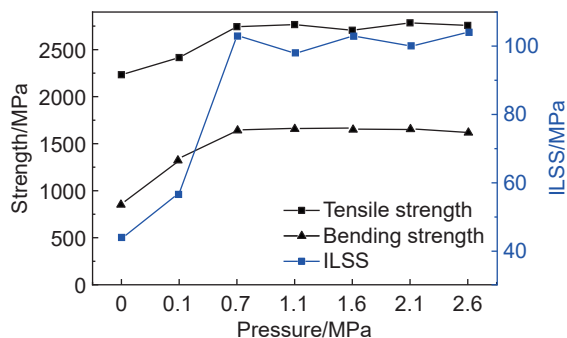


图 11 后处理温度和时间分别为 360 °C 和 60 min 条件下力学性能-后处理压力关系曲线

Fig. 11 Curve of mechanical properties versus post-processing pressure with post-processing temperature of 360 °C and post-processing time of 60 min

合材料截面照片如图 12 所示,对比图 12(a)和图 8 可以看到后处理压力仅为真空压力(后处理压力为 0.1 MPa)时,复合材料内部孔隙缺陷明显减少,因而复合材料 0°拉伸强度、弯曲强度和层间剪切强度均有明显提升。根据表 3,后处理压力仅为真空压力时孔隙完全消除所需时间为 287 min,所以在 60 min 时孔隙未能完全消除。后处理压力继续增加至 0.7 MPa(图 12(b))时,理论计算得到孔隙完全消除时间为 41 min,实验结果也表明保温 60 min 后,孔隙进一步排出至完全消除,所以力学性能进一步提高。后处理压力继续增加至 0.7 MPa 以上,从图 12(c)~(f)可以看出,复合材料截面均已观察不到孔隙缺陷存在,这与后处理压力大于 0.7 MPa 时复合材料力学性能基本稳定的结果一致。显微图像分析结果也表明在 360 °C 和 60 min 条件下,0.7 MPa 为合理的后处理压力。

### 2.6 后处理时间的影响

在工程应用中,提高复合材料生产效率、降低制造成本一直是关注的重点,其中,降低后处理温度、缩短后处理时间都可以降低制造成本。基于黏度-压力-时间耦合模型(式(6)),可以得到复合材料孔隙完全消除时树脂黏度、后处理压力和恒温时间的对应关系。首先研究 360 °C 和 0.7 MPa 的低压模式下,不同后处理时间对复合材料力学性能的影响。根据表 3 计算结果,该条件下孔隙完全消除所需时间为 41 min。不同后处理时间实验测试结果如图 13 所示,图中时间 0 min 对应原位成型力学性能。测试结果表明,360 °C 和 0.7 MPa 时,保温

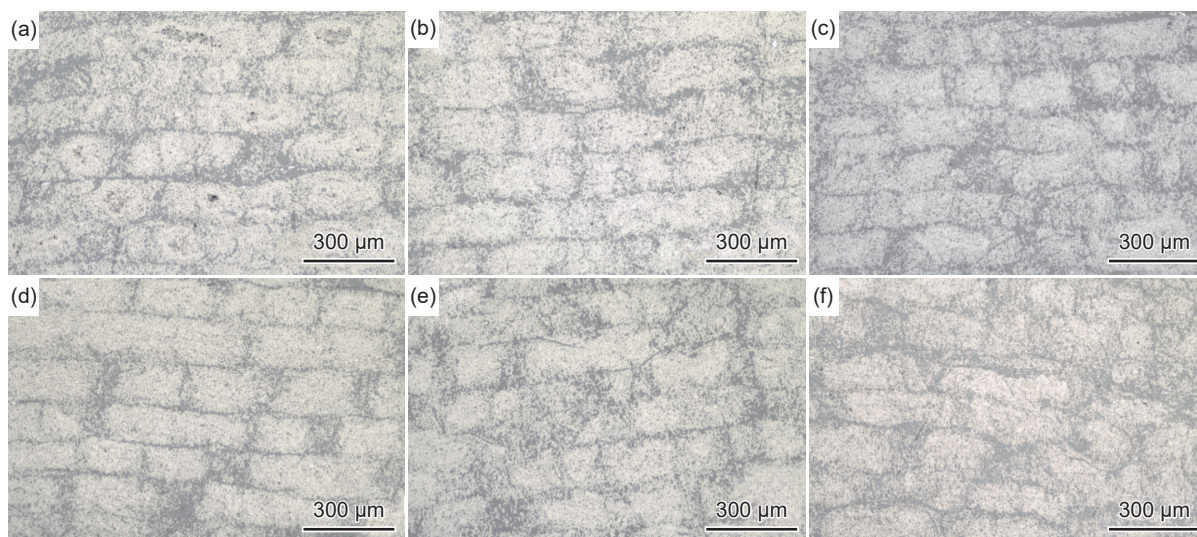


图 12 后处理温度和时间分别为 360 °C 和 60 min 条件下不同后处理压力复合材料截面照片 (a)0.1 MPa; (b)0.7 MPa; (c)1.1 MPa; (d)1.6 MPa; (e)2.1 MPa; (f)2.6 MPa

Fig. 12 Cross-sectional images of composites under different post-processing pressures with post-processing temperature of 360 °C and post-processing time of 60 min (a) 0.1 MPa; (b) 0.7 MPa; (c) 1.1 MPa; (d) 1.6 MPa; (e) 2.1 MPa; (f) 2.6 MPa

20 min, 材料 0° 拉伸强度、弯曲强度和层间剪切强度分别提高到 2345、1479 MPa 和 76 MPa, 与原位成型试样力学性能相比分别提高了 5%、72% 和 73%, 表明 360 °C、0.7 MPa 且 20 min 时, 复合材料内部质量显著改善, 但未达到孔隙完全消除所需时间。保温时间继续延长至 60 min 时, 材料各项性能进一步提升, 0° 拉伸强度、弯曲强度和层间剪切强度分别进一步提高到 2844、1653 MPa 和 103 MPa, 较原位成型试样力学性能分别提升 27%、92% 和 135%, 较保温 20 min 时试样力学性能分别提高 21%、12% 和 36%。保温时间分别继续延长至 120、180 min 和 360 min, 复合材料各项性能基本保持不变(与保温 60 min 时相比, 变化率小于 6%), 表明在 360 °C 和 0.7 MPa 条件下, 60 min 时复合材料力学性能已达最佳状态, 继续延长保温时间对提升材料性能收益较小。

在 360 °C、0.7 MPa 且不同保温时间条件下材料截面照片如图 14 所示, 对比图 14(a) 和图 8 可以看到, 360 °C 和 0.7 MPa 时, 保温 20 min 后复合材料内部孔隙缺陷明显减少, 因而复合材料 0° 拉伸强度、弯曲强度和层间剪切强度均有明显提升。但由于孔隙未能完全消除, 时间继续延长至 60 min, 孔隙被进一步排出至完全消除(图 14(b)), 所以, 保温 60 min 时材料力学性能进一步提高。时间继续延长至 120、180 min 和 360 min, 截面形貌(图 14(c)~(e)) 已无明显变化, 所以材料力学性能保持稳定, 不再提升。

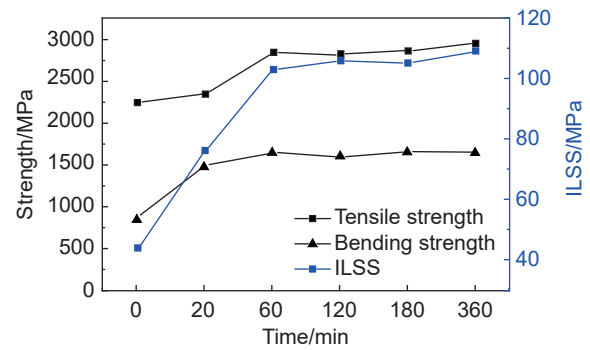


图 13 后处理温度和压力分别为 360 °C 和 0.7 MPa 条件下力学性能-后处理时间关系曲线

Fig. 13 Curves of mechanical properties versus post-processing time with post-processing temperature of 360 °C and post-processing pressure of 0.7 MPa

为了进一步验证高压模式带来的时间缩短效益, 研究在 360 °C 和 1.6 MPa 条件下, 分别保温 20、60 min 和 120 min 复合材料力学性能。根据表 3, 360 °C 和 1.6 MPa 时孔隙完全消除所需时间为 18 min。实验测试结果如图 15 所示, 图中时间为 0 min 时对应原位成型力学性能。结果表明后处理压力增加到 1.6 MPa 时, 保温 20 min 后复合材料 0° 拉伸强度、弯曲强度和层间剪切强度分别达到 2565、1663 MPa 和 101 MPa, 较原位成型复合材料性能分别提高 15%、94% 和 130%。保温时间继续延长至 60 min 和 120 min 时, 较保温 20 min 后材料性能变化率不超过 5%, 表明后处理温度和压力分别为 360 °C 和 1.6 MPa 条件下, 保温 20 min 时材料性能已达最佳状态。在 360 °C 和 1.6 MPa 条件下, 保温

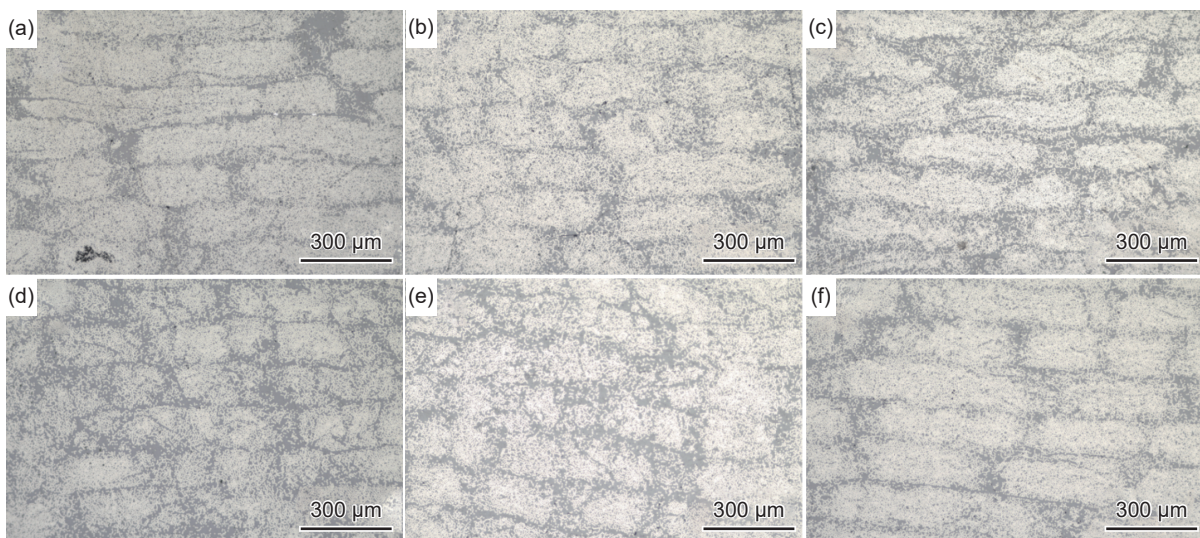


图 14 后处理温度为 360 °C 条件下不同后处理压力和时间复合材料截面照片 (a)0.7 MPa, 20 min; (b)0.6 MPa, 60 min; (c)0.6 MPa, 120 min; (d)0.6 MPa, 180 min; (e)0.6 MPa, 360 min; (f)1.6 MPa, 20 min

Fig. 14 Cross-sectional images of composites under different post-processing pressures and time with post-processing temperature of 360 °C (a)0.7 MPa, 20 min; (b)0.6 MPa, 60 min; (c)0.6 MPa, 120 min; (d)0.6 MPa, 180 min; (e)0.6 MPa, 360 min; (f)1.6 MPa, 20 min

20 min 后复合材料截面照片如图 14(f) 所示, 结果表明, 此时复合材料内部孔隙缺陷已被完全消除, 所以在 360 °C 和 1.6 MPa 条件下, 合理的保温时间为 20 min。

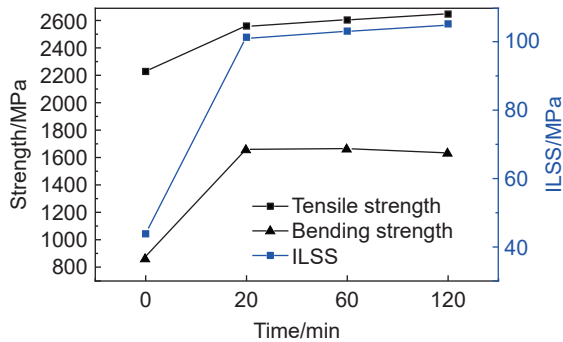


图 15 后处理温度和压力分别为 360 °C 和 1.6 MPa 条件下力学性能-后处理时间关系曲线

Fig. 15 Curves of mechanical properties versus post-processing time with post-processing temperature of 360 °C and post-processing pressure of 1.6 MPa

### 3 结论

(1) 基于自动铺放技术的 PAEK 复合材料后处理温度、压力和时间均影响复合材料孔隙消除, 进一步影响复合材料力学性能, 建立黏度-压力-时间耦合模型, 该模型可以合理预测后处理工艺参数对复合材料孔隙消除的影响规律。

(2) 根据黏度-压力-时间耦合模型, 得到后处理临界温度为 340 °C, 温度低于 340 °C 树脂黏度较高, 不利于树脂流动和孔隙消除; 温度高于 340 °C 树脂黏度显著降低, 有利于快速消除孔隙缺陷, 温度在 340~360 °C 之间, 恒温时间不超过 120 min 时树脂黏度稳定, 340~360 °C 是合适的后处理温度。

(3) 后处理压力会显著影响复合材料孔隙消除效率, 360 °C、60 min 和 0.1 MPa(真空压力)时, 可以降低孔隙含量但未能完全消除孔隙缺陷; 360 °C、60 min 和 0.7 MPa 时, 孔隙完全消除, 复合材料 0° 拉伸强度、弯曲强度和层间剪切强度分别达到 2744、1653 MPa 和 103 MPa, 继续增加压力材料力学性能基本稳定。

(4) 后处理时间对复合材料力学性能的影响与压力有较大关系, 360 °C 和 0.7 MPa 时, 恒温 60 min, 孔隙缺陷完全消除; 后处理压力增加至 1.6 MPa 时, 恒温 20 min, 孔隙缺陷完全消除。适当提高后处理压力有利于缩短成型时间, 从而提高制造效率和降低成本。

### 参考文献:

- [1] SUDHIN A U, REMANAN M, AJEESH G, et al. Comparison of properties of carbon fiber reinforced thermoplastic and thermosetting composites for aerospace applications[J]. *Materials today: proceedings*, 2020, 24: 453-462.
- [2] BALAKUMARAN V, ALAGIRUSAMY R, KALYANA-SUNDARAM D. The synergistic effect and origin of strength in carbon fiber reinforced PAEK, PEEK, and PEKK high-performance thermoplastic composites manufactured by multi-scale aqueous dispersion coating[J]. *Polymer Composites*, 2024, 45(14): 12995-13016.
- [3] BARROETA R J, DUBÉ M, HUBERT P, et al. Repair of thermoplastic composites: an overview[J]. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 2022, 8(2): 68-96.
- [4] MODI V, BANDARU A K, RAMASWAMY K, et al. Repair of impacted thermoplastic composite laminates using induction welding[J]. *Polymers*, 2023, 15(15): 3238.
- [5] MARTI I B, KAYNAK C. Effects of interlayer forms on the resistance welding performance of PAEK/CF thermoplastic composite laminates[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2023, 36(12): 4945-4976.
- [6] 陆承志, 赵乐, 杨雪勤, 等. 碳纤维增强聚醚酮酮模压复合材料结构与性能调控[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(8): 3684-3694.  
LU C Z, ZHAO L, YANG X Q, et al. Study on structure and performance control of carbon fiber reinforced poly(ether ketone ketone) molding composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(8): 3684-3694.
- [7] 李军, 刘燕峰, 倪洪江, 等. 航空发动机用树脂基复合材料应用进展与发展趋势[J]. *材料工程*, 2022, 50(6): 49-60.  
LI J, LIU Y F, NI H J, et al. Application progress and development trend of resin matrix composites for aero engine[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2022, 50(6): 49-60.
- [8] 雷帅, 付善龙, 邢宇, 等. 碳纤维高温退浆处理对聚酰亚胺复合材料热老化的影响[J]. *材料工程*, 2023, 51(4): 132-140.  
LEI S, FU S L, XING Y, et al. Effect of high temperature desizing treatment of carbon fiber on thermal aging of polyimide composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2023, 51(4): 132-140.
- [9] 邢宇, 张代军, 王成博, 等. PEEK 复合材料用碳纤维上浆剂研究进展[J]. *材料工程*, 2022, 50(8): 70-81.  
XING Y, ZHANG D J, WANG C B, et al. Research progress in carbon fiber sizing agents for PEEK composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2022, 50(8):

- 70-81.
- [10] 倪洪江, 邢宇, 戴霄翔, 等. 航空发动机用聚酰亚胺树脂基复合材料固化工艺及热稳定性能[J]. 材料工程, 2022, 50(7): 102-109.
- NI H J, XING Y, DAI X X, et al. Curing process and thermal stability of polyimide-matrix composite for aero-engines[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(7): 102-109.
- [11] SCHIEL I, RAPS L, CHADWICK A R, et al. An investigation of *in-situ* AFP process parameters using CF/LM-PAEK[J]. Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science, 2020, 6(4): 191-197.
- [12] 谢为. 热塑性复合材料增材制造工艺与装备研究进展[J]. 航空材料学报, 2023, 43(3): 1-11.
- XIE W. Research progress of additive manufacturing process and equipment for thermoplastic composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2023, 43(3): 1-11.
- [13] ZHANG C, DUAN Y, JOSHI S C, et al. Laser-assisted AFP-TPC manufacturing of CF/PEEK high-performance thermoplastic composites with low warpage-deformation defects[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 126: 267-284.
- [14] KORAYEM A E, VENKATESAN K, CHEN S, et al. Characterization of interlaminar properties across processing parameters of consolidation of CF/PEEK composites for benchmarking performance[J]. Polymer Composites, 2025, 46(7): 6714-6724.
- [15] 任荣, 李文强, 陈浩, 等. 热塑性复合材料感应植入焊技术研究进展[J]. 材料工程, 2023, 51(7): 22-32.
- REN R, LI W Q, CHEN H, et al. Research progress in induction implant welding of thermoplastic composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(7): 22-32.
- [16] DE ARAUJO G P, DONADON M V, SALEMO G, et al. Temperature effects on the mechanical behaviour of PAEK thermoplastic composites subjected to high strain rates under compression loading[J]. Composite Structures, 2021, 261: 113299.
- [17] ARQUIER R, ILIOPOULOS I, ÉGNIER G, et al. Consolidation of continuous-carbon-fiber-reinforced PAEK composites: a review[J]. Materials Today Communications, 2022, 32: 104036.
- [18] RAPS L, CHADWICK A R, MÖSSINGER I, et al. Characteristics of *in-situ* automated fiber placement carbon-fiber-reinforced low-melt poly aryl ether ketone laminates part 2: effect of prepreg composition[J]. Journal of Composite Materials, 2024, 58(13): 1523-1535.
- [19] SCHIEL I, RAPS L, CHADWICK A R, et al. An investigation of *in-situ* AFP process parameters using CF/LM-PAEK[J]. Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science, 2020, 6(4): 191-197.
- [20] ISLAM F, DONOUGH M J, OROMIEHIE E, et al. Data-driven optimization of additive composite manufacturing using automated fibre placement: a study on process parameters effects and interactions[J]. Composites Part A, 2025, 190: 108599.
- [21] HEATHMAN N, KOIRALA P, YAP T, et al. *In situ* consolidation of carbon fiber PAEK *via* laser-assisted automated fiber placement[J]. Composites Part B, 2023, 249: 110405.
- [22] DIEHL B, KOTHE S M. Investigation of innovative technologies for automated assembly and joining of a full-scale thermoplastic composite fuselage[C]//AIAA SCITECH 2024 Forum. Reston, VA: AIAA, 2024: 0876.
- [23] ZHANG C, DUAN Y, XIAO H, et al. Preparation of MWCNTs/CF/PEEK multi-scale composites with good mechanical and electrical conductivity by a two-step process of AFP and out-of-autoclave tempering[J]. Composites Part C: Open Access, 2022, 9: 100321.
- [24] SWAMY J N, GROUVE W J B, WIJSKAMP S, et al. An experimental study on the role of different void removal mechanisms in VBO processing of advanced thermoplastic composites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2024, 43(3/4): 183-194.
- [25] 袁满, 何亚东, 李锐, 等. 连续纤维增强热塑性复合材料熔融浸渍模型[J]. 塑料科技, 2019, 47(7): 12-17.
- YUAN M, HE Y D, LI R, et al. Melt impregnation model of continuous fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(7): 12-17.
- [26] TAMAYOL A, BAHRAMI M. Transverse permeability of fibrous porous media[J]. Physical Review E, 2011, 83(4): 046314.

收稿日期: 2025-05-06; 录用日期: 2025-05-19

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3709402); 工信部民机专项(MJZ1-11N22)

通讯作者: 张代军(1985—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为树脂基复合材料, 联系地址: 北京市海淀区温泉镇环山村8号(100095), E-mail: 15810534483@139.com; 陈祥宝(1956—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为树脂基复合材料, 联系地址: 北京市海淀区温泉镇环山村8号(100095), E-mail: xiangbao.chen@biam.ac.cn

(本文责编: 陈 卉)