

不同工艺参数下干纤维预制体面内渗透特性分析及仿真模拟验证

宋 豪¹ 杜 薇¹ 周芷言¹ 贺立喆² 蒋民强¹ 岳书静³ 何佳捷³ 史 磊³
张 辉¹ 俞建勇^{1c}

1. 东华大学 a. 材料科学与工程学院, b. 先进纤维材料全国重点实验室, c. 民用航空复合材料协同创新中心, 上海 201620;
2. 长三角碳纤维及复合材料技术创新中心, 江苏 常州 213126;
3. 中车成型科技(青岛)有限公司, 山东 青岛 266111

摘 要:干纤维预制体渗透特性是影响干纤维增强复合材料成型质量的关键因素,探究成型工艺参数对干纤维预制体渗透特性的影响十分必要。通过模拟碳纤维干纤维自动铺放过程,在不同工艺参数下制备干纤维预制体;采用二维非饱和径向法测试不同工艺参数下干纤维预制体的面内渗透率,系统研究铺层温度和铺层压力对干纤维预制体面内渗透特性的影响;建立干纤维预制体树脂渗透宏观仿真模型,对比试验数据和仿真结果,验证宏观仿真模型的可行性。研究表明:干纤维预制体面内渗透率随着铺层温度的升高先减小后增大,110 ℃时定型剂完全熔融并渗入碳纤维丝束中,同时网纱发生软化,渗透效果提升,干纤维预制体面内主、辅方向渗透率达到最大值。干纤维预制体面内渗透率随着铺层压力的增大而减小,这与铺层压力增大使得干纤维预制体纤维体积分数提高有关。将仿真得到的树脂流动前沿演化过程与试验观测结果进行对比分析,发现二者在流动形态和推进速度方面具有良好一致性,最大相对偏差小于10%。

关键词:干纤维预制体;自动铺放;面内渗透率;铺层温度;铺层压力;液体成型;树脂流动模拟

中图分类号:TB 332

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2026)03-0001-10

Analysis and simulation verification of in-plane permeability characteristics of dry fiber preforms under different process parameters

Song Hao¹, Du Wei¹, Zhou Zhiyan¹, He Lizhe², Jiang Minqiang¹, Yue Shujing³, He Jijie³, Shi Lei³,
Zhang Hui¹, Yu Jianyong^{1c}

1. a. College of Materials Science and Engineering, b. State Key Laboratory of Advanced Fiber Materials, c. Center for Civil Aviation Composites, Donghua University, Shanghai 201620, China;
2. Yangtze River Delta Carbon Fiber and Composite Technology Innovation Center, Changzhou 213126, Jiangsu, China;
3. CRRC Advanced Composites Co., Ltd., Qingdao 266111, Shandong, China

Abstract: The permeability characteristics of dry fiber preforms are key factors that affect the forming quality of dry fiber-reinforced composites. Therefore, it is essential to investigate the effects of processing parameters on the permeability behavior of dry fiber preforms. Dry fiber preforms were

基金项目:国家科技重大专项(2024ZD0602200)

收稿日期:2026-01-12

作者简介:宋豪,男,2002年生,在读硕士研究生,主要研究方向为纤维织物渗透特性, songhao0338@163.com

通信作者:蒋民强,博士后,研究方向为碳纤维复合材料液体成型技术, jiangminqiang@dhu.edu.cn

fabricated under various processing conditions by simulating the automatic placement process of carbon fiber dry fibers. The in-plane permeability of the dry fiber preforms prepared with different processing parameters was measured using a two-dimensional unsaturated radial flow method. The influences of lay-up temperature and lay-up pressure on the in-plane permeability characteristics of the dry fiber preforms were systematically investigated. In addition, a macroscopic resin infiltration simulation model for dry fiber preforms was established, and its feasibility was validated by comparing experimental data with simulation results. The results indicated that the in-plane permeability of dry fiber preforms first decreased and then increased with increasing lay-up temperature. At 110 °C, the binder was fully melted and penetrated into the carbon fiber tows, meanwhile, the supporting mesh softened, enhancing the penetration effect and resulting in the maximum principal and transverse in-plane permeability. The in-plane permeability of dry fiber preforms decreased with increasing lay-up pressure, as higher lay-up pressure increased the fiber volume fraction of the preforms. The evolution of the resin flow front predicted by the simulation showed good agreement with the experimental observations in terms of flow morphology and propagation velocity, with a maximum relative deviation of less than 10%.

Keywords: dry fiber preform; automatic placement; in-plane permeability; lay-up temperature; lay-up pressure; liquid molding; resin flow simulation

碳纤维增强复合材料(CFRP)有着轻质、高强度和抗腐蚀等优良特性,在航空航天、轨道交通、汽车、船舶、风电等领域应用广泛,是实现产品轻量化的重要材料^[14]。干纤维自动铺放-液体成型技术融合了干纤维自动铺放预制体成型效率高和质量稳定性好的优势,以及液体成型工艺成本低与适应性强的特点,已成为复合材料大规模、低成本制造的关键技术^[5-7]。该技术首先利用自动铺放设备将干态的纤维束精确铺叠成设计的预制体结构,随后通过树脂传递模塑(RTM)、真空辅助树脂灌注(VARI)等液体成型工艺,实现树脂对预制体的注入、浸润与固化,最终制得复合材料制件^[8]。

液体成型工艺的基本原理即在一定外界压力驱动下,将液态树脂注入并完全浸润干燥的纤维预制体,随后固化成型,制得纤维增强复合材料^[9-10]。这一过程的物理本质是流体在多孔介质中的流动。因此,渗透率是决定液体成型工艺成败的关键参数,它能精确量化树脂在纤维预制体内部流动的难易程度,并最终决定复合材料制件能否实现均匀、无缺陷的浸润^[11]。

传统液体成型工艺的优化以经验法与试错法为主,需经历经验设计和试验迭代等流程,耗时且成本高昂,在大型及超大型制件的制备中该问题

尤为突出。数值模拟技术作为突破该瓶颈的核心手段,其通过构建物理驱动数学模型,模拟树脂流动、填充、固化等关键过程,可替代多数实体试验,能实现前期对工艺方案的精准优化^[12]。渗透率也是液体成型工艺仿真过程中不可或缺的参数,只有准确获取这一参数,才能为复合材料成型工艺设计提供可靠的计算依据,从而保证液体成型工艺的成型质量^[13]。

然而,干纤维预制体渗透特性的影响因素具有较强的复杂性,其优劣与预制体的宏观、微观结构密切相关,而这些结构特征又受制备工艺参数的显著调控^[14]。Aziz等^[15]基于碳纤维干纤维预制体,研究了不同铺放间隙对预制体渗透率的影响,发现在相同的纤维材料与丝束规格条件下,引入铺放间隙可显著提高预制体的整体渗透性。Grisin等^[16]以相同规格碳纤维干纤维丝束构建预制体,并在丝束之间设置2 mm间隙后发现,树脂注入速率较无间隙时提高约4倍,说明间隙结构对渗透通道的形成起到了主导作用。Ehsani等^[17]使用碳纤维干纤维自动铺放预制体,并在纤维材料和丝束规格不变的前提下,引入0.4 mm和0.8 mm的铺放间隙,发现面外渗透率较未引入铺放间隙时分别提高了17倍和48倍,但抗压强度和模量等力学性能有所降低。

Yong 等^[18]研究了压实行为对碳纤维织物预制体渗透率的影响,发现压实行为主要通过提高纤维体积分数、降低孔隙总体积,显著抑制渗透率。

另外,王珏等^[19]研究了剪切变形对渗透率及填充浸润性等的影响,结果表明:在恒定液体流量下,剪切角增大,织物主渗透率减小,渗透率各向异性程度增加,同时数值模拟能精准预测填充浸润性。耿奕等^[20]采用由图像采集系统和树脂流动仿真软件集成的 3D 渗透率测试装置,研究了缝线对织物铺层预制件渗透率的影响规律。结果表明,缝线结构的引入降低了预制体面内渗透率,提高了预制体厚度方向的渗透率。Rimmel 等^[21]研究了缝纫工艺对预制体面外渗透特性的影响,结果表明,由于缝纫工艺在厚度方向上形成了介观渗透通道,树脂流动速度大幅提升,渗透率较未缝纫预制体提升约 50 倍。吕良等^[22]采用代表元方法开展多尺度渗透过程的表征与模拟,成功实现了干纤维材料渗透特性的数值模拟仿真。研究结果显示:采用多尺度结构辅助建模运算,结合均匀化多孔介质代表元,能准确获取干纤维渗透数据,仿真结果与实际情况契合度较高;基于多相流模型呈现的树脂流动前锋,可有效分析并验证相同试验条件下,仿真结果对宏观实际情况的反映效果。然而,关于不同工艺参数对干纤维预制体渗透特性的影响规律,目前尚未开展系统深入的研究。明确该影响规律对于干纤维预制体液体成型工艺的优化设计,具有重要的理论指导与工程实践意义。

本研究将以国产自动铺放用干纤维材料为研究对象,制备不同工艺参数的干纤维预制体,测量并分析其面内渗透性能,系统探究铺层压力和铺层温度等工艺参数对干纤维预制体面内渗透特性的影响规律,并建立干纤维预制体树脂渗透宏观仿真模型,验证试验结果的准确性及渗透宏观仿真模型的可行性,以期为液体成型过程中干纤维预制体铺层工艺的优化改进和结果验证提供参考依据。

1 试验与方法

1.1 试验材料

主要材料:C-L196DF 干纤维丝束(新创碳谷),

牌号为 231016FH,由单向碳纤维丝束、网纱和定型剂组成(图 1),下文简称“干纤维”。其中,网纱在铺放与压实过程中起支撑作用,并在树脂渗透阶段提供面内渗透通道;定型剂基于热熔工艺实现对纤维的临时加固。CeTePox AM 3325 环氧树脂(余通达新材),20℃条件下黏度为 0.837 Pa·s。

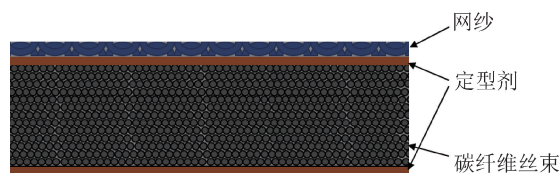


图 1 C-L196DF 干纤维丝束结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of C-L196DF dry fiber tow structure

辅助材料:脱模布(PU85, Granudan),真空袋膜(VBF204, Granudan),真空密封胶带(丁基橡胶,宏聚复合材料),真空管(内径 9 mm,聚四氟乙烯,宏聚复合材料),螺旋管(聚乙烯,宏聚复合材料),T 型三通(外径 10 mm,浙江奇爱),球阀(外径 10 mm,浙江奇爱),脱模剂(PMR-EZ, Chem-Trend),真空泵(V-i120SV, 飞跃)。

1.2 干纤维预制体的制备

采用平板硫化仪(HT-LH-10),通过加热、加压工艺制备干纤维预制体(图 2)。首先,将干纤维裁剪成尺寸为 200 mm×200 mm 的试样,并沿碳纤维丝束方向依次铺放 4 层,形成干纤维铺层结构。然后,将铺放完成的干纤维材料置于平板硫化仪中,在设定的铺放温度与铺放压力条件下进行加压处理,并保压 5 s,获得结构稳定的干纤维预制体。



图 2 平板硫化仪与干纤维预制体

Fig. 2 Plate vulcanizer and dry fiber preform

为研究不同工艺参数对干纤维预制体渗透特性的影响,分别设置了不同的铺放温度和铺放压力。各干纤维预制体的制备工艺参数如表 1 所示。

1.3 干纤维预制体面内渗透特性测试

干纤维预制体可视为各向异性的多孔介质,其

表 1 干纤维预制体制备工艺参数

Tab. 1 Processing parameters for dry fiber preforms fabrication

预制体编号	铺放温度/℃	铺放压力/MPa
1 [#]	25	0.5
2 [#]	25	1.0
3 [#]	25	2.0
4 [#]	90	0.5
5 [#]	90	1.0
6 [#]	90	2.0
7 [#]	110	0.5
8 [#]	110	1.0
9 [#]	110	2.0

内部树脂流动满足不可压缩连续流体的质量守恒方程,并可由达西定律进行描述。对于各向异性多孔介质,流体的表观速度 v 与流体在多孔介质中的压力梯度 ∇P 之间的关系可表示为:

$$v = -\frac{1}{\mu} K \nabla P \quad (1)$$

式中: μ 为流体黏度; K 为渗透率张量。

对于面内渗透过程,压力梯度 ∇P 可近似表示为:

$$\nabla P = \frac{\Delta P}{L} \quad (2)$$

式中: ΔP 为驱动树脂流动的压力差; L 为树脂流动特征长度。

试验采用二维非饱和径向法测定干纤维预制体的面内渗透率,如图 3 和图 4 所示。在该方法中,树脂从干纤维预制体中心注入口进入,并在压力差的作用下沿面内方向向四周扩散。由于干纤维预制体通常具有明显的各向异性特征,树脂流动前沿在面内呈椭圆形,其长轴和短轴分别对应面内主渗透方向和辅渗透率方向。

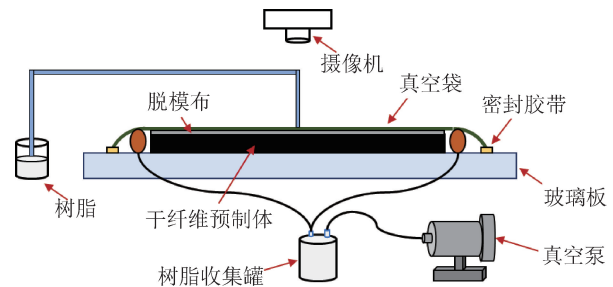


图 3 干纤维预制体面内渗透率测试装置

Fig. 3 In-plane permeability test device for dry fiber preforms

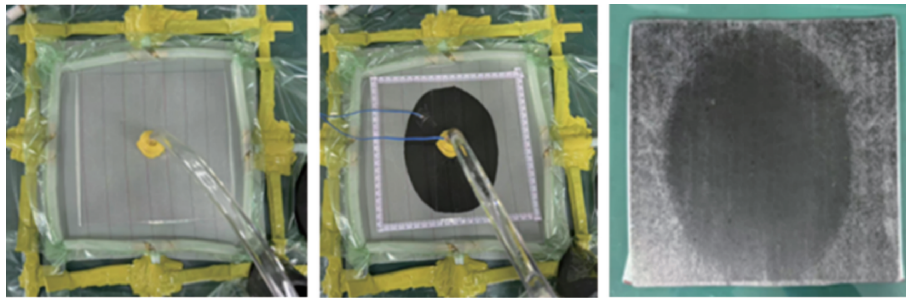


图 4 干纤维预制体面内渗透率测试过程照片

Fig. 4 Images of in-plane permeability test process for dry fiber preforms

设面内主方向和辅方向的渗透率分别为 K_1 和 K_2 ,对应的树脂流动前沿半径分别为 r_1 和 r_2 。根据达西定律并结合径向流动边界条件,可推导得到面内主方向和辅方向的渗透率计算式^[23]:

$$K_1 = \frac{\mu \varepsilon}{4t \Delta P} \left\{ r_1^2 \left[2 \ln \left(\frac{r_1}{r_0} \right) - 1 \right] + r_0^2 \right\} \quad (3)$$

$$K_2 = \frac{\mu \varepsilon}{4t \Delta P} \left\{ r_2^2 \left[2 \ln \left(\frac{r_2}{r_0} \right) - 1 \right] + r_0^2 \right\} \quad (4)$$

式中: ε 为干纤维预制体孔隙率; r_0 为注胶口半径; t 为树脂流动时间。

为便于试验数据处理与渗透率计算,对上述计

算式进行整理,引入中间变量 T_i ^[24]:

$$T_i = \left\{ r_i^2 \left[2 \ln \left(\frac{r_i}{r_0} \right) - 1 \right] + r_0^2 \right\} \quad (5)$$

式中: T_i 为 t 时刻由 i 方向流动前沿位置计算得到的特征参数, $i=1$ 表示主方向, $i=2$ 表示辅方向。

由式(3)和式(4)可知, T_i 与时间 t 呈线性关系,其斜率与对应方向的面内渗透率成正比。因此,对试验过程中记录的流动前沿位置数据进行线性拟合,可分别获得干纤维预制体面内主方向渗透率 K_1 和辅方向渗透率 K_2 。

干纤维预制体面内渗透率测试在二维径向渗透

试验装置上进行。将制备的干纤维预制体铺设于洁净的玻璃平板模具上,覆盖脱模布和真空袋膜,采用密封胶带、三通阀门及导流管构建密封系统。抽真空至稳定状态后,同时开启摄像系统与中心注胶口阀门,记录树脂在干纤维预制体面内的流动前沿演化过程。充模过程中,试验所用树脂被视为不可压缩牛顿流体。试验时环境温度保持在 20 °C,以减小温度波动对树脂黏度及流动行为的影响,此时树脂黏度为 0.837 Pa·s。充模过程中,驱动压力由真空与环境压力差提供且保持恒定,为 0.1 MPa。充模过

程中忽略重力效应及树脂惯性的影响。

2 结果与讨论

2.1 不同工艺参数下干纤维预制体面内渗透率的计算

通过摄像机记录干纤维预制体面内渗透过程中树脂的流动,并每隔一段时间记录树脂流动前沿的位置,从而得到树脂流动时间与树脂流动前沿位置的关系,如图 5 所示。

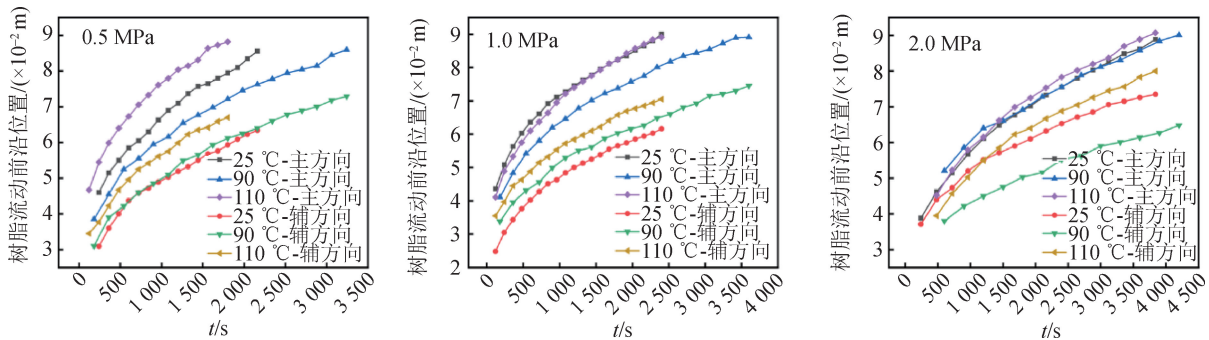


图 5 不同工艺参数下干纤维预制体中树脂流动前沿位置

Fig. 5 Positions of resin flow front in dry fiber preforms under different process parameters

对主、辅方向树脂流动前沿位置进行处理后,得到树脂流动前沿位置特征参数 T_1 和 T_2 , 然后将其与树脂流动时间 t 进行线性拟合,结果如图 6 所示。其中, R_i^2 反映了试验数据与拟合函数之间的吻合程度, R_i^2 越接近 1, 则吻合程度越高。

图 7 展示了不同工艺参数下干纤维预制体面内主、辅方向渗透率 K_1 和 K_2 。由图 7 可知,在相同的铺层温度下,随着铺层压力的增大,干纤维预制体面内主、辅方向渗透率逐渐降低。其中,2.0 MPa 的铺层压力下面内渗透率最小。在 25 °C 的铺层温度下:当铺层压力由 0.5 MPa 提高至 1.0 MPa 时,干纤维预制体主方向渗透率 K_1 由 $1.38 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ 降低至 $1.28 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ (减小了约 7.2%),辅方向渗透率 K_2 由 $6.84 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 降低至 $5.84 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ (减小了约 14.6%);在 2.0 MPa 的铺层压力下,干纤维预制体面内渗透率 K_1 、 K_2 分别为 $7.90 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 和 $4.72 \times 10^{-12} \text{ m}^2$,其相较于铺层压力 1.0 MPa 时分别降低了约 38.3%和 19.2%。由图 7 还可知,在相同的铺层压力下,随着铺层温度的升高,干纤维预制体面内主、辅方向渗透率先降低后升高。其中,110 °C 铺层

温度下面内渗透率显著高于其他铺层温度下面内渗透率。在 0.5 MPa 的铺层压力下:当铺层温度由 25 °C 提高至 90 °C 时,干纤维预制体主方向渗透率 K_1 由 $1.38 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ 降低至 $9.10 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ (减小了约 34.1%),辅方向渗透率 K_2 由 $6.84 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 降低至 $6.39 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ (减小了约 6.6%);在 110 °C 的铺层温度下,干纤维预制体的面内渗透率 K_1 、 K_2 分别为 $1.80 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ 和 $9.84 \times 10^{-12} \text{ m}^2$,相较于 90 °C 铺层温度时分别增加了约 97.8%和 54.0%。

2.2 不同工艺参数对干纤维预制体面内渗透特性的影响

2.2.1 铺层温度对干纤维预制体面内渗透特性的影响

由前述研究可知,在铺层压力保持不变的条件下,铺层温度升高,干纤维预制体的面内主渗透率和辅渗透率均呈现出先降低后升高的变化趋势。图 8 为不同铺层温度条件下干纤维预制体表面形貌的显微镜观察结果。

从图 8 可以看出:当铺层温度由 25 °C 升高至 90 °C 时,面内优先渗透通道受到破坏,树脂流动阻

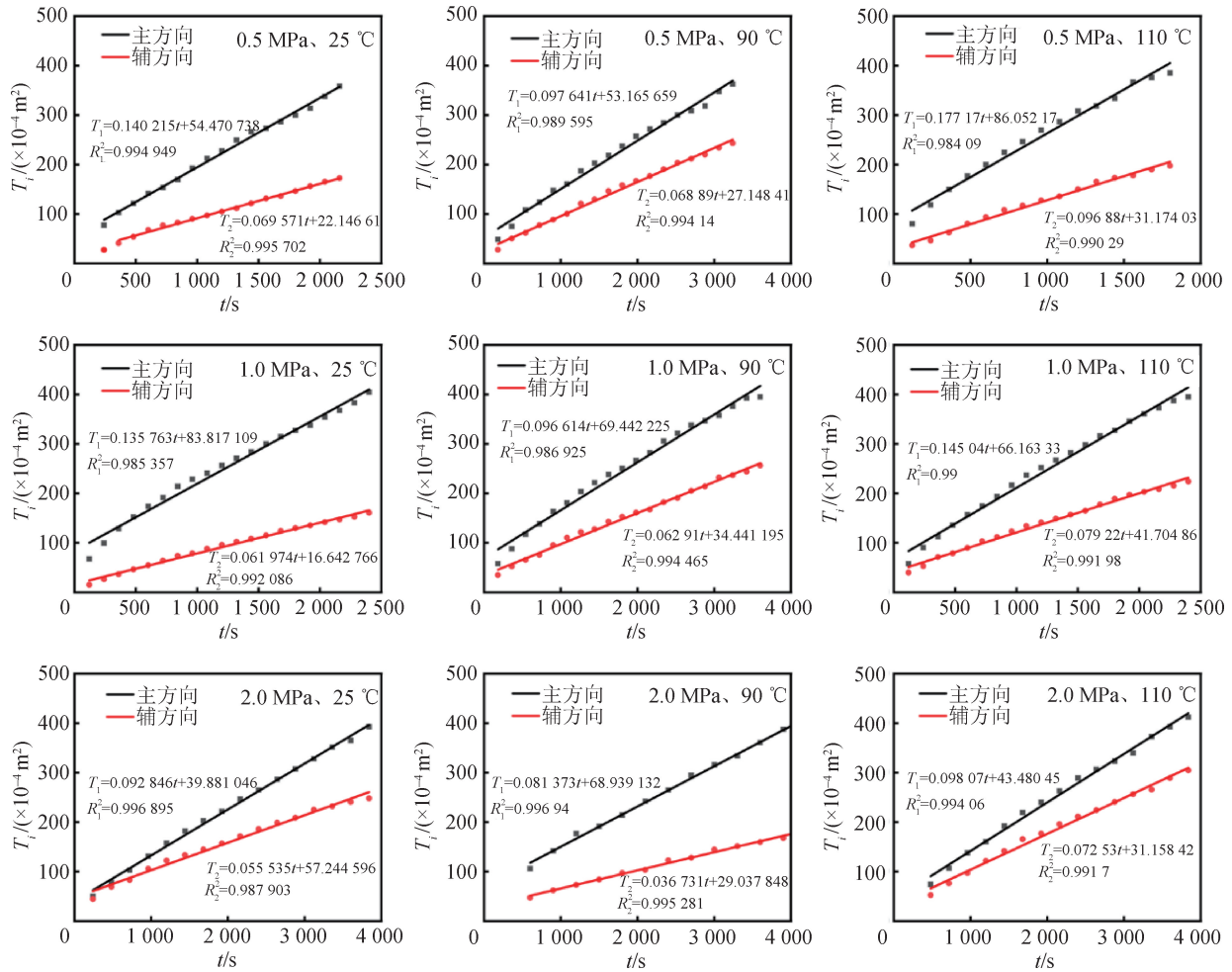


图6 不同工艺参数下干纤维预制体树脂流动前沿位置特征参数拟合结果

Fig. 6 Fitting results of characteristic parameters for resin flow front positions in dry fiber preforms under different process parameters

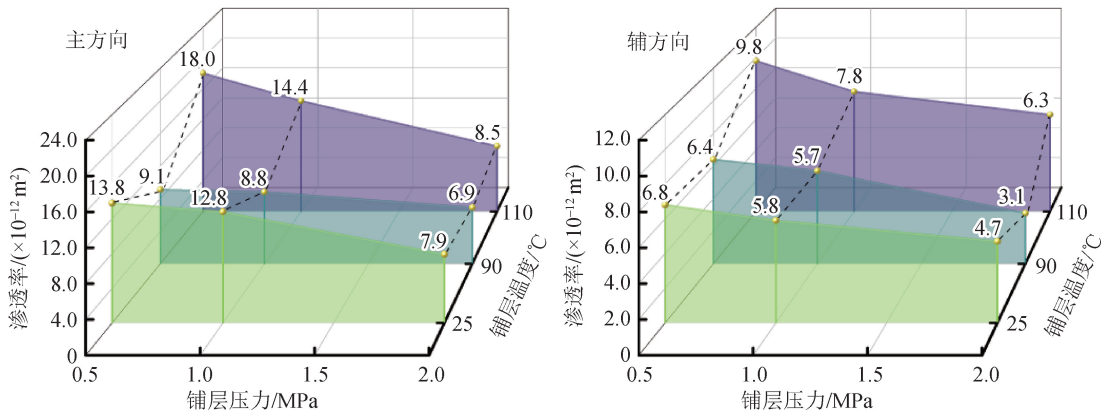


图7 不同工艺参数下干纤维预制体主、辅方向渗透率

Fig. 7 Principal and transverse direction permeability of dry fiber preforms under different process parameters

力增大,面内渗透率下降。这与温度接近定型剂熔融温度范围时,定型剂发生局部熔融并重新聚集,在网纱交叉节点及纤维表面形成块状富集区域,造成局部孔隙堵塞,网纱的有效孔隙率及孔隙连通性降

低有关。当铺层温度进一步升高至110 °C时,定型剂完全熔融并充分渗入碳纤维丝束内部,丝束表面及层间孔隙中的定型剂显著减少,面内渗透通道得到有效恢复。同时,网纱材料开始发生软化,

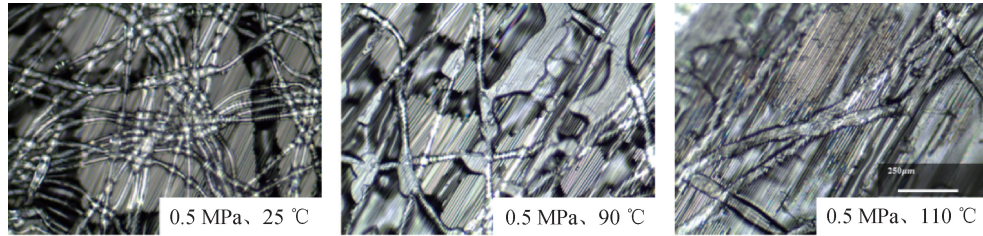


图 8 不同铺层温度下干纤维预制体表面显微镜图片

Fig. 8 Microscopic images of dry fiber preform surfaces under different lay-up temperatures

柔顺性增强,其与干纤维铺层的贴合程度明显提高,面内渗透通道变得更加连续和稳定。此外,网纱软化还能够在局部高压区域保留一定的面内孔隙结构,降低树脂流动过程中的局部阻滞效应,从而显著增强面内导流能力,使面内主、辅渗透率同步提升。

2.2.2 铺层压力对干纤维预制体面内渗透特性的影响

在不同铺层压力条件下,干纤维预制体的纤维体积分数变化如图 9 所示。在铺层温度相同的条件下,随着铺层压力的增加,干纤维预制体的面内主渗透率和辅渗透率均呈现逐渐降低的趋势。这一变化趋势主要与铺层压力的增大导致干纤维预制体内部结构与形态发生改变有关。

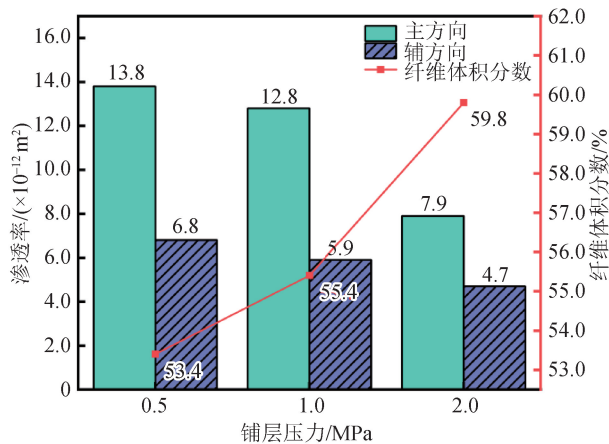


图 9 不同铺层压力条件下干纤维预制体面内主、辅方向渗透率和纤维体积分数(铺层温度 25 °C)

Fig. 9 In-plane principal and transverse direction permeability and fiber volume fraction of dry fiber preforms under different lay-up pressures (lay-up temperature, 25 °C)

当铺层压力升高时,干纤维预制体受压缩作用发生变形,其微观组织结构随之发生变化,碳纤维丝束之间以及网纱纤维束之间的孔隙逐渐被压

缩,相邻丝束相互靠近,原本相对松散的纤维排布逐渐变得紧密。同时,纤维之间出现更多的局部接触点,部分纤维束可能发生弯曲或重新取向。且随着压缩过程的持续,干纤维预制体中原本存在的大尺寸孔隙被压扁、分割,并转变为数量更多但尺寸更小的孔隙单元。这种孔隙结构的细化与整体孔隙率的下降直接导致纤维体积分数提高,渗透通道曲折度增加,树脂在渗透过程中的流动阻力显著增加,干纤维预制体面内主、辅方向渗透率降低。

2.3 干纤维预制体面内树脂渗透过程仿真模拟分析

2.3.1 干纤维预制体树脂渗透仿真模拟的建立

利用三维建模软件 Solidworks 建立干纤维预制体树脂渗透宏观仿真模型;然后将建立的仿真模型导入 Hypermesh 软件中进行网格划分,如图 10 所示,网格尺寸选择 1.5 mm,网格单元共 634 489 个;最后将划分好网格的模型导入 PAM-RTM 软件中进行仿真模拟。

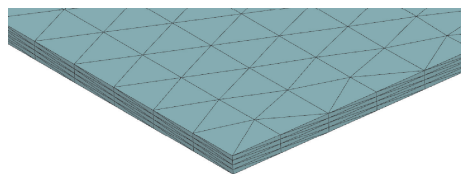


图 10 模型网格划分

Fig. 10 Model meshing

2.3.2 干纤维预制体树脂渗透仿真参数的设置

在 PAM-RTM 软件中严格按照试验条件设置材料参数及工艺参数,如纤维体积密度、渗透率及树脂黏度等,如表 2 所示;然后进行注胶口和出胶口等边界条件的设置,如图 11 所示;最后运行软件进行计算,得到的干纤维预制体树脂渗透流动前沿位置、流动时间及压力分布仿真云图如图 12 所示。

表 2 模拟仿真相关参数

Tab. 2 Parameters related to simulation

干纤维 预制体编号	树脂黏度/ Pa·s	纤维体积密度/ (g·cm ⁻³)	压力差/Pa	纤维体积 分数/%	主方向渗透率 K ₁ /m ²	辅方向渗透率 K ₂ /m ²
7 [#]	0.837	1.76	99 000	51.9	1.80×10 ⁻¹¹	9.84×10 ⁻¹²

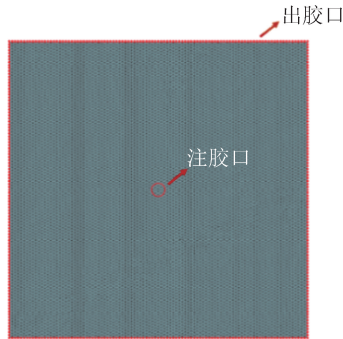


图 11 注胶口与出胶口边界条件设置

Fig. 11 Boundary condition setting for resin injection port and outlet

2.3.3 干纤维预制体树脂渗透仿真结果分析

观察图 13 所示的干纤维预制体树脂渗透过程仿真模拟发现,树脂流动前沿呈明显的椭圆状,且随着渗透的进行,椭圆不断扩大,主方向树脂流动前沿位置超前于辅方向,且不同时刻的树脂渗透流动前沿与实际试验情况基本保持一致。

运用软件中的“measure”功能,每隔一段时间测量填充液在 X 与 Y 方向即主、辅方向的流动前沿位置,结果于表 3 和图 14 所示,并与实际试验数据进行对比,可以看出:仿真与试验的树脂流动前沿位置大致重合,X 与 Y 方向的误差均保持在 10% 以内。

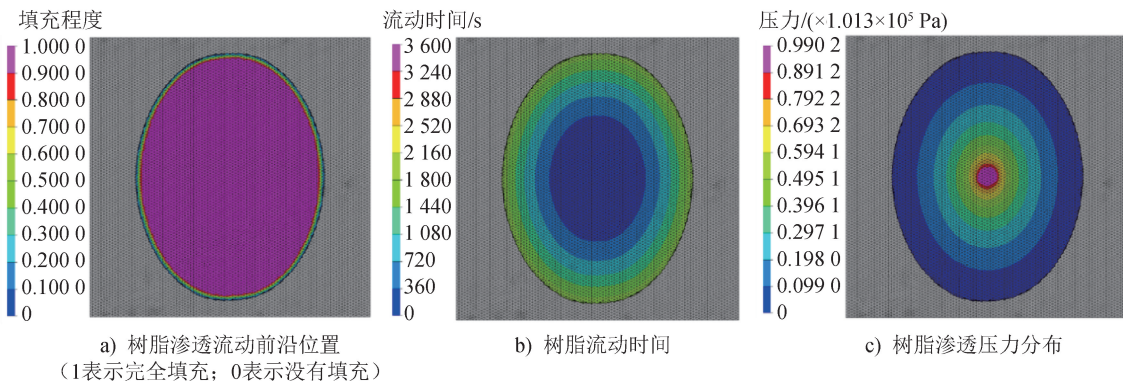


图 12 干纤维预制体树脂渗透仿真云图

Fig. 12 Contour plots of resin infiltration simulation for dry fiber preforms

干纤维预制体树脂渗透过程仿真得到的树脂流动前沿位置整体略小于试验观测结果,且在面内 X、Y 方向均呈现相似的变化趋势。在渗透初期,仿真结果相对于试验值存在一定负偏差,X 方向和 Y 方向的最大相对误差分别约为 7.8% 和 6.4%;随着渗透过程的推进,二者之间的差异逐渐减小;渗透后期,X 方向和 Y 方向的相对误差均降低至 3.0% 以内,仿真结果与试验结果表现出良好一致性。

差异的原因主要在于宏观渗透仿真模型在建模过程中采用了理想化假设。宏观仿真模型通常基于均匀等效的预制体结构,并假设面内渗透率在渗透过程中保持恒定,而实际干纤维预制体内部不可避免地存在局部纤维分布不均、孔隙尺寸差异以及局

部高渗透等非理想结构特征。故在渗透初期,树脂优先沿阻力较小的局部高渗透路径快速推进,从而导致试验观测到的流动前沿位置略微领先于仿真结果;而宏观仿真中,对上述细观不均匀性的均匀化处理使得计算得到的流动前沿位置相对保守。随着渗透过程的推进,树脂逐渐进入稳定渗透阶段,流动逐步由局部主导转变为整体控制,局部孔隙结构差异对宏观流动行为的影响减弱,试验结果与仿真结果的符合度明显提高,误差随之减小。总体而言,仿真结果在流动形态、推进趋势及时间演化规律上均与试验结果保持良好的一致性,最大相对误差始终控制在 10% 以内,表明所建立的干纤维预制体树脂渗透宏观仿真模型具有良好的可靠性与工程适用性。

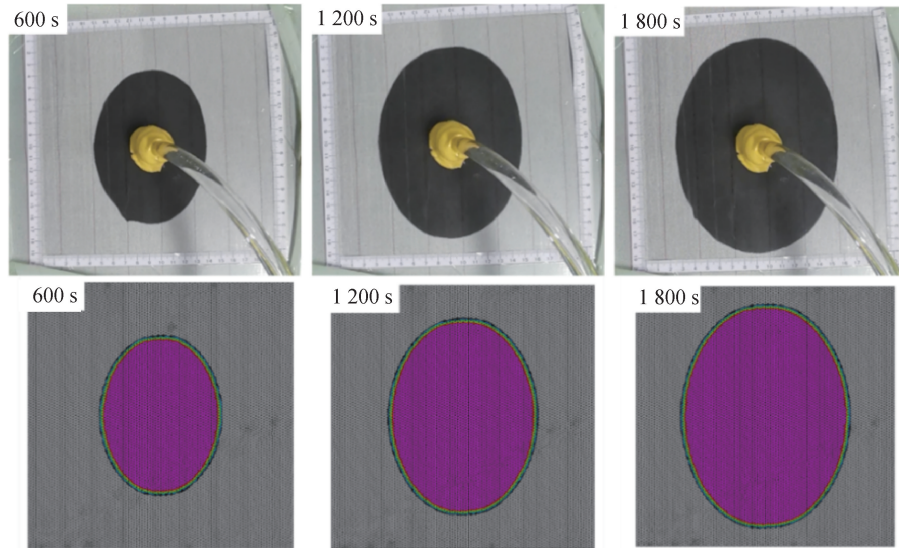


图 13 不同时刻干纤维预制体树脂渗透仿真模拟与实际渗透过程流动前沿对比

Fig. 13 Comparison of resin infiltration flow front between simulation and actual infiltration process of dry fiber preforms at different moments

表 3 干纤维预制体主、辅方向树脂流动前沿位置试验与仿真数据对比

Tab. 3 Comparison of experimental and simulated data of resin flow front positions along principal and transverse directions of dry fiber preforms

流动时间/ s	X 方向流动前沿位置/cm		X 方向试验与 仿真误差/%	Y 方向流动前沿位置/cm		Y 方向试验与 仿真误差/%
	试验值	仿真值		试验值	仿真值	
120	4.67	4.40	-5.8	3.45	3.23	-6.4
360	5.99	5.53	-7.7	4.23	4.14	-2.1
720	7.06	6.51	-7.8	5.25	4.95	-5.7
1 080	7.80	7.42	-4.8	5.75	5.53	-3.8
1 440	8.31	8.13	-2.2	6.35	6.20	-2.4
1 800	8.82	8.71	-1.2	6.70	6.50	-3.0

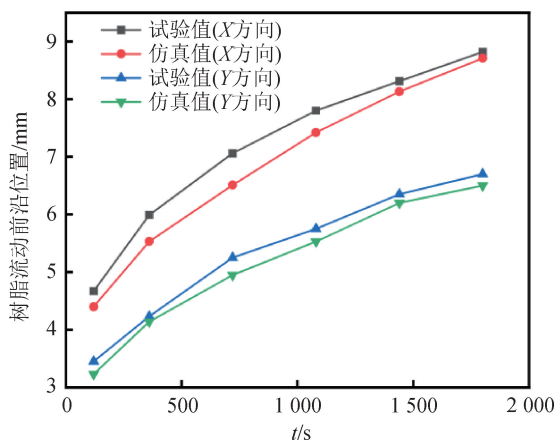


图 14 干纤维预制体树脂流动前沿位置试验与仿真数据对比

Fig. 14 Comparison of experimental and simulation of data for resin flow front positions in dry fiber preforms

3 结论

本文系统研究了不同工艺参数对干纤维预制体面内渗透特性的影响,结果表明:

(1)改变铺层压力和铺层温度等工艺参数,可以显著改变干纤维预制体面内渗透率。2.0 MPa、90 °C 工艺参数下,干纤维预制体面内渗透率最低,其主方向渗透率为 $6.9 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 、辅方向渗透率为 $3.1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$;0.5 MPa、110 °C 工艺参数下,干纤维预制体面内渗透率最高,其主方向渗透率为 $1.8 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ 、辅方向渗透率为 $9.8 \times 10^{-12} \text{ m}^2$,相比于 2.0 MPa、90 °C 工艺参数下的干纤维预制体,主、辅方向渗透率分别提高了 161%、216%。

(2) 干纤维预制体面内渗透率随着铺层温度的升高先降低后上升。90 ℃时定型剂发生熔融,其黏结成块并阻碍树脂流动,导致面内主、辅渗透率较25 ℃时下降;110 ℃时定型剂完全熔融并完全渗入碳纤维丝束中,同时网纱发生软化,导流效果得到提升,面内主、辅渗透率达到最大。干纤维预制体面内渗透率随着铺层压力的增大而减小。铺层压力增大,干纤维预制体结构变得更紧密,孔隙细化且曲折度增加,纤维体积分数提高,面内主、辅渗透率均下降。

(3) 利用 PAM-RTM 软件模拟仿真干纤维预制体树脂渗透过程,树脂流动前沿仿真结果与试验结果误差保持在 10%以内,且渗透过程进入稳定渗透阶段后,误差将进一步降低,表明该模型可用于分析验证树脂对干纤维预制体的渗透过程。

致谢

感谢国家科技重大专项(2024ZD0602200)对本研究的资助。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

[1] WANG Y S, THORN T D S, LIU Y, et al. A review on energy-efficient manufacturing for high-performance fibre-reinforced composites [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2025, 192: 108779.

[2] 吕淑扬, 郑凯, 赵英男, 等. 碳纤维增强复合材料在航空航天领域的应用 [J]. *聚酯工业*, 2024, 37(3): 71-73.

[3] 韩善灵, 王涛, 光新杰, 等. CFRP 在汽车轻量化与安全中的应用进展 [J]. *复合材料科学与工程*, 2024 (2): 119-128.

[4] 邹一鸣. 碳纤维增强复合材料在航空航天领域的应用 [J]. *信息记录材料*, 2025, 26(10): 11-13.

[5] 王凯, 刘寒松, 肇研. 连续纤维增强热塑性树脂基复合材料自动铺放技术研究进展 [J]. *航空制造技术*, 2021, 64(11): 41-49.

[6] CAROSELLA S, HÜGLE S, HELBER F, et al. A short review on recent advances in automated fiber placement

and filament winding technologies [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 287: 111843.

[7] KADIYALA A K, PORTELA A, DEVLIN K, et al. Mechanical evaluation and failure analysis of composite laminates manufactured using automated dry fibre tape placement followed by liquid resin infusion [J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 201: 108512.

[8] LIU Y N, YUAN C X, LIU C X, et al. Study on the resin infusion process based on automated fiber placement fabricated dry fiber preform [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 7440.

[9] CHEN Z X, HUAN G R, MA Y L. Computational methods for multiphase flows in porous media [M]. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2006.

[10] SEYEDNOURANI M, YILDIZ M, SAS H S. A two-stage optimization methodology for gate and vent locations and distribution media layout for liquid composite molding process [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 149: 106522.

[11] YANG B, WANG J H, FENG Y W, et al. Concurrent measurement of local and global in-plane permeability of reinforcement fabrics through real-time image processing [J]. *Polymers*, 2023, 15(15): 3233.

[12] 杨波. 复合材料 RTM 工艺充模过程数值仿真与缺陷预测研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

[13] 刘昊鑫, 贺鹏飞, 李文晓, 等. RTM 工艺纤维预制体渗透率研究进展 [J]. *工程塑料应用*, 2019, 47(9): 149-152.

[14] BARNETT P R, COOK Z A, HULETT B M, et al. Influence of processing parameters on permeability and infiltration of compression molded discontinuous carbon fiber organosheet composites [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, 152: 106682.

[15] AZIZ A R, ALI M A, ZENG X, et al. Transverse permeability of dry fiber preforms manufactured by automated fiber placement [J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 152: 57-67.

[16] GRISIN B, CAROSELLA S, MIDDENDORF P. Dry fibre placement: the influence of process parameters on mechanical laminate properties and infusion behaviour [J]. *Polymers*, 2021, 13(21): 3853.

(下转第 31 页)