

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.02.014

复合材料夹层构件的 RTM 工艺仿真及验证

田楠, 卢政斌, 杜子林, 周亚南, 李闻达

(连云港中复连众复合材料集团有限公司, 江苏连云港 222000)

摘要: 为解决复合材料异型夹层构件在树脂传递模塑(RTM)成型中普遍面临的树脂渗流不均、结构性干斑及孔隙聚集等难题,本文围绕复杂曲率夹层构件的树脂流动浸润行为开展了系统研究。针对现有研究多集中于常规层板和简单夹层结构的局限性,构建了“注胶管直径-厚度向芯材开孔协同设计”的多尺度三维仿真框架,并揭示其在提升流动均匀性、改善排气效率和抑制宏观孔隙方面的机理。为解决曲率连续变化、低渗透性芯材和多源压力耦合作用导致的仿真不稳定性,采用区域分级建模、局部高渗透率等效定义及三维通道耦合等策略,实现了复杂构型下树脂渗流的高精度预测。探讨了注胶管直径及芯材开孔对充模效果的影响,并进行了实际 RTM 工艺验证。此外,结合企业批量化生产经验,对注胶管不同尺寸、开孔参数及真空压力稳定性的工程可行性进行了归纳,形成可直接指导工业应用的工艺窗口。仿真分析结果表明,增大注胶管直径可显著缩短充模时间,芯材开孔可显著降低宏观孔隙率。工艺验证结果表明,所构建仿真模型的充模时间预测相对误差绝对值控制在 20% 以内,且干斑、孔隙等缺陷的分布趋势与实际情况高度一致,验证了该方法适用于复杂曲率异型夹层构件的 RTM 工艺优化。

关键词: 复合材料; 夹层构件; 树脂传递模塑; 孔隙缺陷; 工艺仿真

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)02-0108-08

Simulation and verification of RTM process for composite sandwich components

TIAN Nan, LU Zhengbin, DU Zilin, ZHOU Yanan, LI Wenda

(Lianyungang Zhongfu Lianzhong Composites Group Co., Limited, Lianyungang 222000, China)

Abstract: To address the challenges in resin transfer molding (RTM) of composite special-shaped sandwich components, such as uneven resin flow, structural dry spots, and void aggregation, in this paper, the resin flow infiltration behavior of the sandwich components with complex curvature was systematically studied. In response to the current research focusing primarily on conventional laminates and simple sandwich configurations, a multi-scale three-dimensional simulation framework based on the synergistic design of the injection tube diameter with through-thickness core perforation was constructed, and the mechanisms of its improvement in flow uniformity, enhancement of venting efficiency, and suppression of macroscopic voids were revealed. To address the simulation instability caused by continuous curvature changes, low-permeability core materials, and the coupling effect of multiple sources of pressure, strategies such as regional hierarchical modeling, local high-permeability equivalent definition, and three-dimensional channel coupling were employed to achieve high-precision prediction of resin permeation in complex configurations. The influences of the injection tube diameter and the core material perforation on the filling effect were explored, and the actual RTM process was verified. Furthermore, based on the experience of large-scale batch production in enterprises, the engineering feasibility of various injection tube dimensions, perforation parameters, and vacuum pressure stability was summarized, forming a process window that can directly guide industrial applications. The simulation analysis results show that increasing the diameter of the injection tube can significantly shorten the filling time, and the perforation of the core material can significantly reduce the macroscopic porosity. The process verification results indicate that the absolute values of the relative error in predicting the filling time of the developed simulation model are controlled within 20%, and the trends in defect distribution, such as dry spots and void, show high consistency with actual measurements. This validates the applicability of the proposed method for optimizing RTM processes in complex curved sandwich components.

Keywords: composite ; sandwich component ; resin transfer molding ; void defect ; process simulation

通信作者: 卢政斌, 硕士, 高级工程师, 研究方向为复合材料性能及应用

收稿日期: 2025-12-11

引用格式: 田楠, 卢政斌, 杜子林, 等. 复合材料夹层构件的 RTM 工艺仿真及验证[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(2): 108-115.

TIAN Nan, LU Zhengbin, DU Zilin, et al. Simulation and verification of RTM process for composite sandwich components[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(2): 108-115.

复合材料凭借轻质、高强、耐热、耐腐蚀及可设计性强等核心优势,能够精准匹配不同应用场景下的多样化性能需求,当前已广泛应用于航空航天、船舶制造、风电叶片制备、汽车工业等关键领域^[1-5]。针对表面精度要求严苛的复合材料异型夹层构件,树脂传递模塑成型(RTM)工艺展现出显著技术优越性。该工艺采用闭合模具结构,一方面可有效保障构件的尺寸精度与表面质量稳定性,另一方面能大幅降低树脂挥发量,契合现代工业的环保标准要求。然而,在复杂纤维夹层构件的RTM成型过程中,仍面临多重技术难点,如流道系统设计难度大、树脂在模腔内流动均匀性差、成型构件孔隙率偏高,以及整个成型过程的动态调控与状态预测难度较大等问题^[6-8]。随着RTM工艺在高端制造领域应用范围的持续拓展,通过树脂流动模拟技术实现成型过程中树脂流动行为的可视化,并对构件成型状态进行精准预测,已成为缩短工艺开发周期、降低生产成本、提升产品合格率的关键技术路径。

当前,国内外学术界与工业界已围绕复合材料液体成型工艺仿真开展了大量系统性研究与实证验证工作,形成了多维度、多方法的技术研究体系^[9-16]。邹文涛等^[17]以PAM-RTM软件为核心仿真工具,构建了碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)构件RTM成型过程的充模行为分析模型,实现了对模腔内树脂流动状态的动态仿真,还开展了双尺度孔隙缺陷的预测研究;陈星宇等^[18]聚焦碳纤维叶片大梁的真空灌注工艺,对灌注过程中的树脂流动前锋推进、压力分布及气泡排出路径进行仿真分析,并结合实体试验完成工艺验证;高猛等^[19]通过多变量仿真试验,系统探究了注胶方案、树脂黏度动态变化、模具压缩速度等关键参数对充模时间的影响规律,为压缩RTM(CRTM)工艺的参数标准化提供了数据支撑;Stieber等^[20]将数值仿真与智能算法相结合,以PAM-RTM软件的基础仿真数据为训练样本,引入机器学习模型对RTM过程中预成型件的干斑缺陷进行预测,准确率可达90%以上;Tifkisis等^[21]基于大量仿真与试验数据,构建了RTM工艺中树脂流动前锋位置与填充时间的回归预测模型,该模型可快速估算不同工艺参数下的成型关键指标,为工艺方案初步设计提供了高效计算工具;此外,Obertscheider等^[22]开发了新型液体成型专用仿真软件,并通过与成熟的PAM-RTM软件在相同工艺条

件下的仿真结果进行对比验证,验证了新软件在流动预测、缺陷分析等方面的可靠性,进一步丰富了液体成型工艺的仿真工具选择。

现有RTM工艺仿真研究多围绕常规结构,如单层板、对称夹层或平板类构件,研究重点主要放在树脂黏度、注胶压力、模腔温度等通用参数的影响分析。然而,对于大曲率、非对称、厚度变化显著的异型夹层结构,仍缺乏以“结构几何特征-流道设计-厚度向渗流通道”为核心的系统研究。特别是芯材低渗透性与厚度方向流动受限,使得成型缺陷在复杂夹层结构中呈现显著聚集效应,导致传统二维流动分析无法准确反映树脂在型腔内的真实行为。基于此,本文提出两个核心创新点:(1)构建了适用于复杂曲面夹层构件的三维RTM仿真框架,在传统表面流动模型基础上引入厚度向穿孔结构,使复杂夹层结构的“二维受限渗流”转化为“多路径三维渗流”,显著提升对结构性干斑的预测能力;(2)建立了“注胶管直径-芯材开孔”的协同调控机理模型,系统揭示了不同几何参数对流动速度、排气能力和孔隙演化的耦合影响,为复杂夹层结构的工艺窗口选择提供理论依据和工程参考。

1 RTM工艺理论基础

达西定律是描述流体在多孔介质(纤维预制体)中渗流运动的宏观经验定律,见式(1)。

$$K = \frac{x^2 \cdot \varphi \cdot \mu}{2 \cdot t \cdot \Delta P} \quad (1)$$

式中: K 表示渗透率; φ 表示纤维孔隙率; μ 表示流体黏度; ΔP 表示压差; x 表示流体前沿在 t 时运动的距离。

哈根-泊肃叶定律是描述流体在管道/间隙中渗流运动的宏观经验定律,见式(2)。

$$v = \frac{D^2 \Delta P}{32 \mu L} \quad (2)$$

式中: v 表示平均流速; D 表示水力直径; L 表示管道长度。

管道和模具间隙的流量 Q 计算公式见式(3)和式(4)。

$$Q_i = v \cdot A = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8 \mu L} \quad (3)$$

$$Q_g = v \cdot A = \frac{wh^3 \Delta P}{12 \mu L} \quad (4)$$

式中: Q_i 和 Q_g 分别表示管道流量和模具间隙流量; A 表示横截面积; r 表示管道半径; w 表示缝隙宽

度; h 表示缝隙高度。

基于达西定律,在稳态流动条件下,渗透率 K 计算公式见式(5)。

$$K = \frac{Q \cdot \mu \cdot L}{A \cdot \Delta P} \quad (5)$$

根据式(3)、式(4)、式(5)得到树脂在模具间隙和注胶管中渗透率的计算公式,见式(6)和式(7)。

$$K_l = \frac{r^2}{8} \quad (6)$$

$$K_g = \frac{h^2}{12} \quad (7)$$

式中: K_l 和 K_g 分别表示注胶管和模具间隙的渗透率。

Labat等^[23]提出的宏/微观孔隙方程用于分析RTM成型工艺填充过程中双尺度孔隙形成及分布情况,见式(8)和式(9)。

$$V_m = -A - B \log(C_a^*) \quad (8)$$

$$V_m = A' + B' \log(C_a^*) \quad (9)$$

式中: V_m 表示宏观孔隙含量; V_m 表示微观孔隙含量; C_a^* 表示毛细数; A 、 B 、 A' 、 B' 为常数。

2 建模与可行性验证

2.1 几何模型与网格划分

高精度复合材料异型夹层构件是整体尺寸约为1450 mm×570 mm×270 mm的大曲率非对称异型结构,由复合材料蒙皮与PET泡沫芯材共同构成。考虑到PET泡沫芯材的低树脂渗透性,若完整建模将导致计算量激增且无法反映关键流动行为,本文采用区域分级网格、局部曲面细化及共节点连接方式,提高树脂前沿追踪稳定性。对芯材进行针对性简化,仅保留构件外形面作为仿真区域,重点聚焦树脂在蒙皮材料中的流动规律;对于存在芯材开孔的局部区域,引入厚度向开孔并建立等效三维通道,使原本受限的二维流动转化为三维渗流,以表征厚度方向的渗透路径,从而在降低计算复杂度的同时,兼顾真实流动行为。其次,实际灌注过程中存在模具间隙、导流槽及注胶/出胶管道等无纤维区域,这些结构显著影响树脂流动的均匀性与路径。为真实反映工艺条件,模型中精确引入了上述几何特征(如图1所示),并将其定义为高渗透率材料区域,以区别纤维预制体的流动阻力。

此外,构件具有连续变化的曲面形态与非对称结构,为兼顾仿真精度与计算效率,网格尺寸统一设定为5 mm,同时对几何曲率较大区域进行局部细

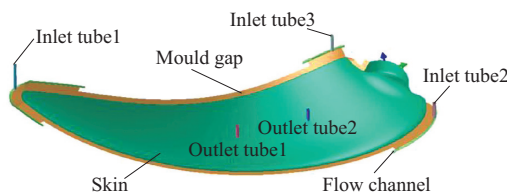


图1 高精度复合材料异型夹层构件

Fig. 1 High-precision composite special-shaped sandwich component

化,并修正畸变单元,最终生成约93 400个三角形单元。网格设计需确保高渗透率区域与蒙皮区域的平滑过渡,管道、模具间隙等几何特征与蒙皮之间通过共节点连接,避免因网格衔接问题影响树脂流动前沿模拟的准确性。在注胶策略上,设定注胶管3关闭,仅由位于构件两端的注胶管1和2进行注胶,同时由出胶管1和2执行抽真空操作。通过表面建模、多区域渗透率设置、曲面网格优化及“多端注胶+中心抽真空”的边界条件定义,为复杂复合材料构件的浸润过程分析与工艺优化提供可靠仿真手段。

2.2 材料参数与方案设计

纤维增强材料:江苏杰博复合材料有限公司生产的±45°玻璃纤维双轴布(面密度800 g/m²)、中国巨石股份有限公司生产的无碱玻璃纤维短切毡(面密度450 g/m²);

树脂基体:AOC力联思树脂有限公司生产的牌号为Atlac 430LV GT250的环氧乙烯基树脂;

芯材:保定维赛新材料科技股份有限公司生产的牌号为PET100的PET泡沫芯材(芯材的密度为100 kg/m³)。

复合材料异型夹层构件的蒙皮由四层双轴布与四层短切毡按顺序铺贴灌注而成。将划分好的异型构件网格模型导入PAM-RTM软件开始模拟,相关参数设置见表1。

表1 材料及工艺基本参数

Tab. 1 Basic parameters of materials and processes

Material and process	Value of parameters
Resin (430LV)	Viscosity (23 °C): 180~250 mPa·s
Biaxial fabric	Permeability: $K_x=K_y=1.12 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, $K_z=1.1 \times 10^{-13} \text{ m}^2$
Chopped strand mat	Permeability: $K_x=K_y=2.58 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, $K_z=2.5 \times 10^{-13} \text{ m}^2$
Filling process	Injection pressure: 0.1 MPa, Temperature: 300 K, Gravitational acceleration: 9.81 m/s ²

Notes: K_x , K_y and K_z are permeability in the x , y , z directions respectively.

为研究注胶管直径对复合材料异型夹层构件充模时间和成型质量的影响,保持出胶口直径恒定为12 mm,分别采用 $\varnothing 20$ mm、 $\varnothing 12$ mm及 $\varnothing 8$ mm三种规格的注胶管,在注射压力恒定的条件下进行灌注,通过改变注胶管直径以调节树脂注入流速。此外,在注胶管直径为8 mm的条件下对比分析芯材厚度方向开孔对树脂流动与渗透行为的影响,在芯材区域按照50 mm $\times$ 50 mm线性阵列排布开设直径为5 mm的通孔,各灌注方案设计见表2。

表2 灌注方案设计

Tab. 2 Design of infusion scheme

Scheme	Diameter of injection tube/mm	Core material perforation (Yes/No)
Scheme 1	20	No
Scheme 2	12	No
Scheme 3	8	No
Scheme 4	8	Yes

2.3 仿真可行性验证

采用非稳态法对关键仿真参数(渗透率)进行测试,测试方式如图2所示,裁剪3层尺寸为350 mm $\times$ 150 mm的玻璃纤维双轴布,树脂从长度方向一侧向另一端灌注,注意纤维布两侧用填充物(如密封胶条)压紧避免边缘效应,通过记录恒压下树脂流动前沿在不同时刻流经双轴布长度方向的距离,获取线性拟合如图3所示,拟合方程为 $x^2=2.24\times 10^{-5}t-2.66\times 10^{-4}$ 。代入式(1)计算得到玻璃纤维双轴布沿长度方向的渗透率 $K=1.12\times 10^{-11}$ m²。

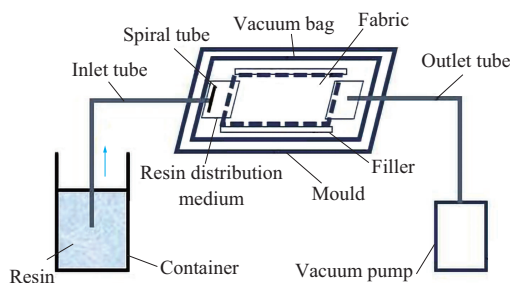


图2 渗透率测试装置

Fig. 2 Permeability testing device

参数的准确表征对仿真过程至关重要,为验证测试参数的准确性与仿真模拟方法的可行性,通过建立与试验纤维试样尺寸一致的二维仿真模型,代入玻璃纤维双轴布与430LV树脂的相关参数进行仿真分析。对比不同时间段仿真与试验树脂流动前沿的位置,如图4和图5所示,由此可知,采用测试的工艺参数预测树脂填充时间基本可行。

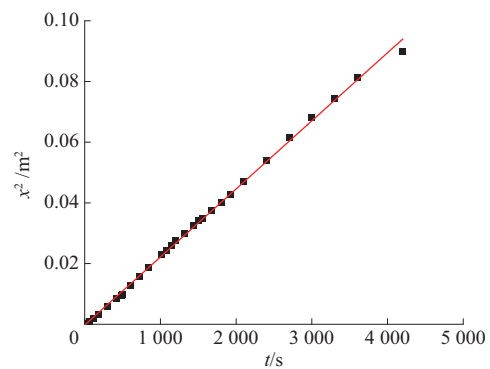


图3 线性拟合图

Fig. 3 Linear fitting chart

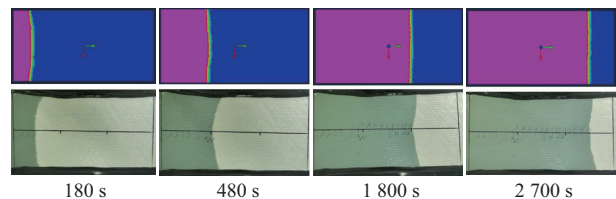


图4 不同时刻仿真与试验树脂流动对比示意图

Fig. 4 Comparison diagram of simulated and experimental resin flow at different times

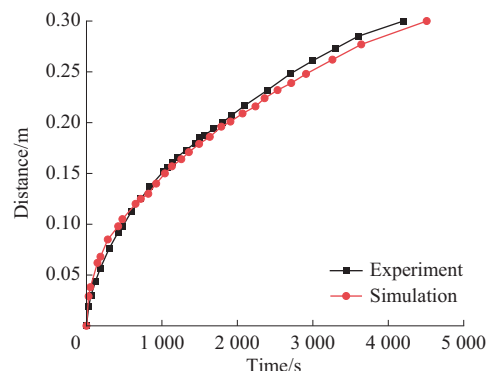


图5 不同时刻仿真与试验树脂流动前沿位置

Fig. 5 Front positions of simulated and experimental resin flow at different times

3 结果与讨论

3.1 注胶管直径对充模过程的影响

在恒压注射条件下,对三种不同直径注胶管方案的树脂充模过程开展仿真模拟,图6为最终的树脂充模时间和充模完成时的压力分布情况。通过仿真结果分析可见,注胶管直径对充模时间具有显著影响,且随注胶管直径的增大,充模时间呈明显缩短趋势:其中 $\varnothing 20$ mm注胶管的充模效率最高,所需充模时间最短,约为28 s; $\varnothing 12$ mm注胶管的充模时间相较于 $\varnothing 20$ mm注胶管明显延长,约为156 s; $\varnothing 8$ mm注胶管的充模时间最长,达到约234 s,表明注胶管直径与树脂充模速率成正相关关系。压力梯度是树脂在干态纤维预制体内流动的驱动力,理想工况下注

射口的高压和排气口的低压形成均匀且稳定的压力梯度,推动树脂前锋平稳、匀速地向前推进。然而受几何形状、纤维渗透率、注射压力、树脂黏度、注射口/排气口位置等多种因素的影响,树脂往往难以完全平稳地充满型腔。压力分布是决定充模时间的决定性因素,并通过对流动过程的控制成为影响成型质量的关键要素之一。仿真结果表明,压力场中低压区域的充模时间最长,一旦低压区域远离排气口则极易因树脂填充不充分产生气泡、干斑。

图7为三种注胶方案在不同时刻的树脂流动前沿形态。受模具间隙及导流槽结构影响,树脂注入后会迅速填充模具间隙,随后沿四周向构件中心区域渗透。尽管出胶管1大致处于注胶管1与注胶管2的中间位置,但因注胶管1侧对应的灌注面积更

小,树脂优先流经出胶管1,间隔一段时间后才在出胶管2位置出胶。在此过程中,树脂流速过快,易出现树脂尚未完全流经整个构件表面便提前出胶的情况,进而导致部分区域树脂供给不足,形成贫胶现象,最终造成成型产品缺陷。

从仿真结果进一步分析可知,三种不同直径注胶管工况下均存在树脂未充分浸透的潜在区域,但其缺陷位置与面积存在明显差异:Ø20 mm注胶管因树脂流速最快,在迅速流经两个出胶管后,最终在构件端部靠近注胶管3的区域易出现干斑或气泡;Ø12 mm与Ø8 mm注胶管的树脂流速相对较慢,缺陷主要集中在出胶管2附近;其中Ø8 mm注胶管可能产生缺陷的区域与Ø12 mm注胶管基本相近,但缺陷面积更小,成型稳定性更好。

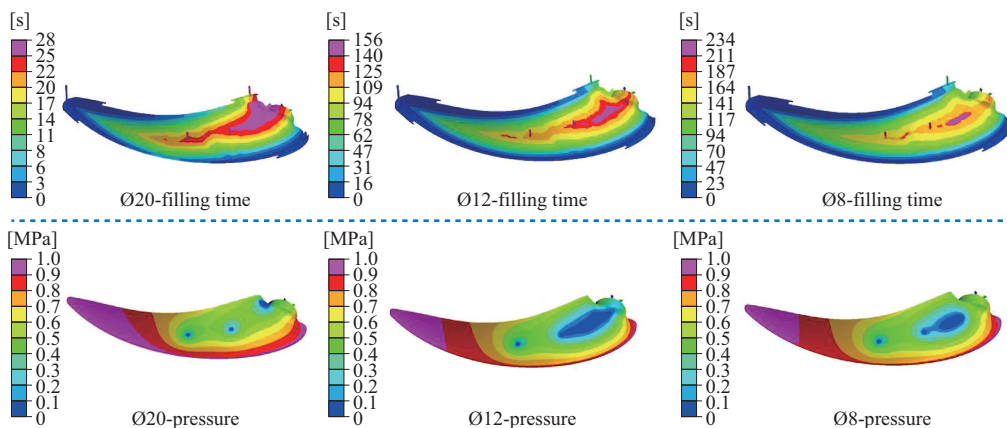


图6 三种不同直径注胶管的最终充模时间和压力分布

Fig. 6 Final filling time and pressure distribution of three types of injection tubes with different diameters

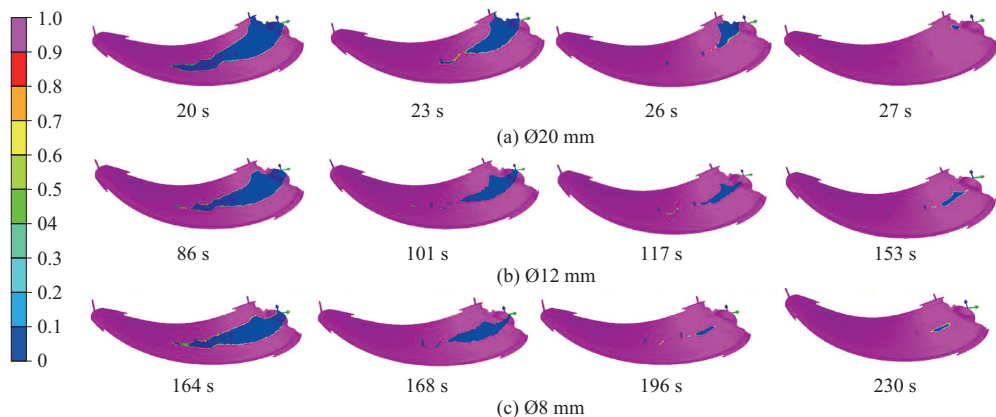


图7 三种不同直径注胶管在不同时刻的流动前沿

Fig. 7 Evolution of flow fronts for three types of injection tubes with different diameters

3.2 芯材开孔对充模过程的影响

为进一步研究芯材开孔对树脂渗透行为的影响,在注射条件不变的情况下对采用芯材开孔设计的构件进行了模拟。图8为芯材开孔前后的上下模

宏观和微观孔隙分布,芯材未开孔的情况下,树脂已到达上模面的出胶口,而下模面的纤维还未被浸透,造成大面积的高孔隙率区域,这意味着下模面可能存在大量的干斑与密集的气泡缺陷。芯材开

孔前被芯材覆盖的下模区域宏观孔隙率基本在46%以上,几乎占据整个蒙皮范围的26%,芯材开孔后下模区域宏观孔隙率大部分降低到22%~44%,宏观孔隙率超过44%的区域仅占整个蒙皮范围的0.1%以下。通过开孔设计,在上下模面之间建立了短程通道,使树脂从原本受限的二维流动转变为高效的三维流动,树脂可以通过设计孔抵达难

以填充的区域从而避免大面积的结构性干斑;开孔还为模具腔体和纤维中的气泡提供了通道,在树脂压力驱动下可以沿孔洞排出,避免气泡滞留,从而显著降低产品的孔隙率;另外,开孔还有利于平衡上下模面的树脂压力,保持纤维预成型体在预设位置的稳定,同时避免压力差造成面板的局部凹陷等。

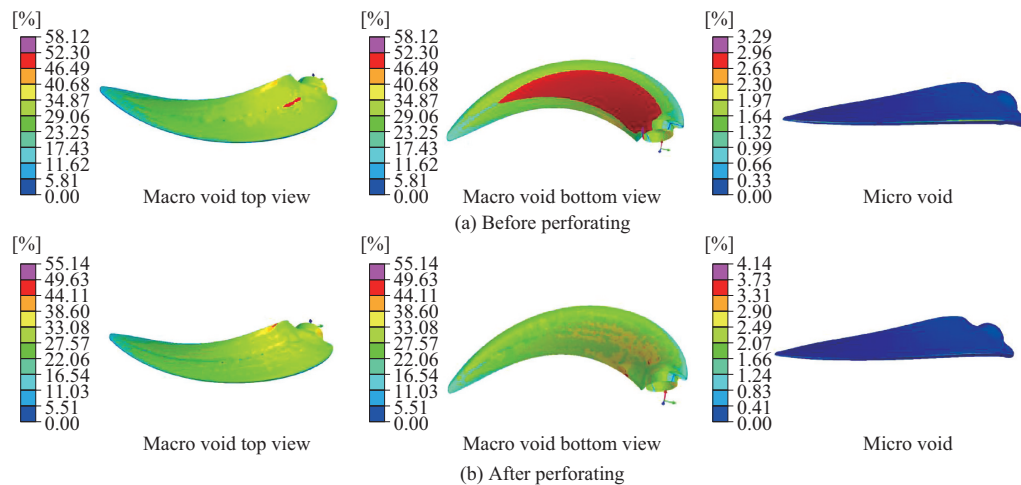


图8 芯材开孔前后的上下模宏观和微观孔隙分布

Fig. 8 Macro and micro void distribution of the upper and lower moulds before and after perforating core material

3.3 复材夹层构件RTM工艺验证

鉴于RTM闭模成型工艺的特性,树脂在模具型腔内的实时流动过程难以被直接观测。因此,试验重点监测树脂从注胶到出胶的充模时间,以及构件固化脱模后的最终成型状态。为确保试验数据与仿真结果具备可比性,试验严格采用与仿真模型一致的参数设定:包括材料体系、纤维铺层方案及注胶工艺;同时,模具型腔的尺寸与几何形状均与数字模型保持一致。具体采用的成型模具实物如图9所示。仿真分析与工艺验证结果对比见表3。



图9 复合材料异型夹层构件成型模具

Fig. 9 Mould for forming composite special-shaped sandwich component

试验观测表明,不同直径注胶管灌注过程中,树脂均优先从出胶管1渗出,间隔数秒至数十秒后再流经出胶管2;整体充模时间随注胶管直径增大呈递减趋势,该规律与仿真结果完全吻合,具体数据为:Ø20 mm注胶管充模用时约35 s,Ø12 mm注胶管用约135 s,Ø8 mm注胶管用约276 s。尽

表3 仿真分析与工艺验证结果对比

Tab. 3 Comparison between simulation analysis result and process verification result

Diameter of injection tube/mm	Filling time of simulation analysis/s	Filling time of process validation/s	Relative error/%
20	28	35	-20
12	156	135	16
8	234	276	-15

管受铺层定位偏差、真空度波动及实验室温度波动等实际操作因素影响,工艺验证结果与仿真分析存在固有的相对误差,但绝对值在20%以内,故仿真分析对灌注试验仍具备明确指导意义。

脱模后构件的表面缺陷与仿真预测高度一致,印证了此前关于树脂流动行为的分析。具体表现如图10所示:在树脂流动至注胶管3附近因排气不畅在构件端部形成大气泡;在出胶口附近因流动前沿压力下降导致干斑与微小气泡,尤其是出胶口2周围;构件下模面由于缺乏有效的树脂渗透路径,呈现气泡聚集,严重影响了表面成型精度。这些结果一致验证了仿真方法的准确性。

3.4 工程经验与产业化应用指导

基于大量复合材料风电、船舶及轨道交通部件的实际生产经验,针对此类中等尺寸异型夹层构

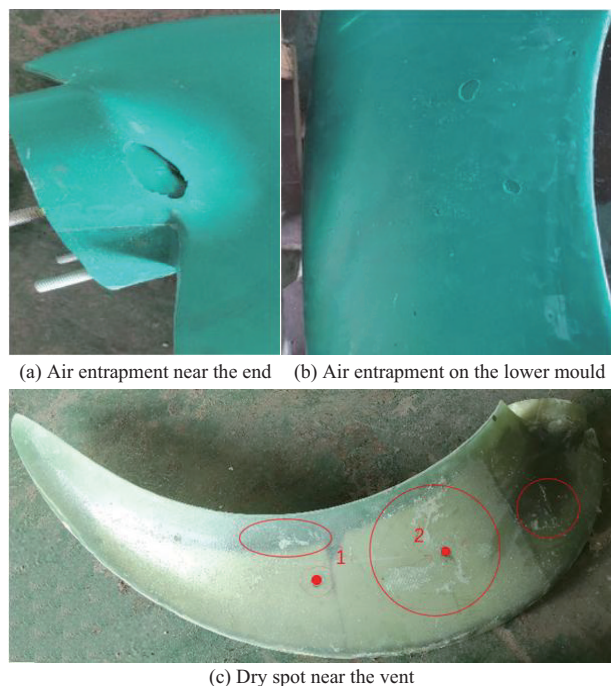


图10 复合材料异型夹层构件表面缺陷

Fig. 10 Surface defects in composite special-shaped sandwich component
件,总结出以下可实施的工艺经验。

(1)注胶管直径需与树脂黏度及构件尺寸匹配:采用低黏度环氧或乙烯基树脂灌注中等尺寸构件时,注胶管直径过大易导致快速出胶与贫胶现象。工程上推荐直径8~12 mm作为稳定窗口。

(2)芯材开孔设计应统筹排气效率与结构性能:在保证芯材剪切刚度不明显降低的前提下,采用 $\varnothing 5$ mm通孔配合50 mm $\times$ 50 mm阵列排布,可在多数中等尺寸曲面构件中实现排气通道与树脂渗透路径的优化匹配。具体开孔密度需依据树脂流动性、真空度水平及构件曲率变化进行动态调整。

(3)真空压力稳定性是控制复杂夹层流动均匀性的关键:对于具有曲面封闭结构的夹层构件,真空压力波动超过 ± 0.02 MPa将引起树脂前锋速度显著波动,进而导致局部干斑或孔隙聚集。建议使用双向稳压控制系统,实现注胶与排气过程的动态平衡。

(4)构建“仿真-工艺-数据”闭环迭代体系:通过多尺度流动仿真结果与上述工艺窗口进行耦合验证,形成“仿真预测→样件试制→参数反馈→数据库更新”的循环优化流程,可逐步建立企业内部的工艺知识库,有效支持同类构件的快速工艺开发与风险预判。

4 结论

(1)本文提出的“注胶管直径-芯材开孔协同优化”策略显著改善了异型夹层结构RTM工艺的流动均匀性,并揭示了其对树脂推进速度、压力场平衡和孔隙演化的耦合机理。

(2)仿真分析结果显示,随着注胶管直径增大,树脂流动速度加快,充模时间相应缩短, $\varnothing 8$ mm注胶管充模时间为234 s, $\varnothing 20$ mm注胶管充模时间直接骤减到28 s;芯材开孔通过重构树脂流动路径、优化排气系统和平衡内部压力可有效抑制结构性干斑,提高成型可靠性,开孔后夹层结构的宏观孔隙率超46%的区域从总面积的26%降低至0.1%以下。

(3)通过仿真与工艺试验验证,异型夹层结构在不同工况条件下的充模时间预测相对误差绝对值在20%以内,且预测的产品缺陷位置与试验结论基本一致。

参考文献

- [1] 周何,李小兵,张婷,等.航空发动机复合材料风扇叶片制造工艺应用进展[J].航空制造技术,2022,65(13):84-91.
ZHOU He, LI Xiaobing, ZHANG Ting, et al. Application progress on manufacturing technology of composite fan blades for aero-engine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(13): 84-91.
- [2] ZHANG S, SONG H, XU L Y, et al. Application research on the lightweight design and optimization of carbon fiber reinforced polymers (CFRP) floor for automobile[J]. Polymers, 2022, 14(21). DOI: 10.3390/polym14214768.
- [3] 李晓文,朱兆一,李妍,等.复合材料-金属混合船舶极限强度研究综述[J].船舶力学,2020,24(5):681-692.
LI Xiaowen, ZHU Zhaoyi, LI Yan, et al. A review on ultimate strength of composite-metal hybrid ships[J]. Journal of Ship Mechanics, 2020, 24(5):681-692.
- [4] 彭苗娇,黄锦文,胡殿印,等.航空发动机CFRP复合材料界面力学性能、损伤机理与强化策略研究进展[J].航空学报,2025,46(16). DOI:10.7527/S1000-6893.2025.31600.
PENG Miaoqiao, HUANG Jinwen, HU Dianyin, et al. Research progress on interfacial mechanical properties, damage mechanisms, and reinforcement strategies of CFRP composites for aero-engines[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(16). DOI: 10.7527/S1000-6893.2025.31600.
- [5] 熊健,倪庆雅.复合材料在人形机器人中的应用进展与趋势[J/OL].复合材料学报,2025:1-18[2025-10-29]. <https://link.cnki.net/doi/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250909.004>.
XIONG Jian, NI Qingya. The application progress and trends of composite materials in humanoid robots[J/OL]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025: 1-18[2025-10-29]. <https://link.cnki.net/>

- doi/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250909.004.
- [6] ZADE A, KUPPUSAMY R R P. A review on numerical optimization in liquid composite moulding processes[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 19(2):329–332.
- [7] YAN C, LI Y S, SU X, et al. Resin flow analysis for the foam core sandwich spoiler by vacuum-assisted resin injection process[J]. *Materials*, 2022, 15(15). DOI:10.3390/ma15155279.
- [8] ADHIKARI D, GURURAJA S, HEMCHANDRA S. Resin infusion in porous preform in the presence of HPM during VARTM: Flow simulation using level set and experimental validation[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 151. DOI: 10.1016/j.compositesa.2021.106641.
- [9] 马彦旭,王继辉,倪爱清,等.大厚度复合材料曲面典型构件的工艺优化[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(10):3 302–3 313.
- MA Yanxu, WANG Jihui, NI Aiqing, et al. Process optimization of typical composite cambered components with large thickness[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(10):3 302–3 313.
- [10] 孙煜,刘强.复合材料出口导向叶片RTM成型流场仿真模拟研究[J]. *科技与创新*, 2023(16):42–45.
- SUN Yu, LIU Qiang. Simulation study on RTM molding flow field of composite outlet guide vane[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2023(16):42–45.
- [11] FALASCHETTI M P, RONDINA F, ZAVATTA N, et al. Material characterization for reliable resin transfer molding process simulation[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(5). DOI: 10.3390/app10051814.
- [12] YANG W K, LU S H, LIU W H. Numerical simulation of edge effect in resin transfer molding for plain-weave fabric[J]. *Fibers and Polymers*, 2020, 21(9):2 068–2 075.
- [13] 杨张韬,倪爱清,王继辉,等.孔槽泡沫夹芯复合材料真空辅助树脂传递工艺仿真与优化[J]. *材料导报*, 2024, 38(2):253–261.
- YANG Zhangtao, NI Aiqing, WANG Jihui, et al. Optimization and simulation of vacuum assisted resin infusion process for perforated and grooved foam sandwich composite[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(2):253–261.
- [14] 胡昊,薛小锋,宋祉岑,等.面向液体成型结构的双尺度孔隙率分区刚度折减方法[J/OL]. *复合材料学报*, 2025:1–13[2025-10-29]. <https://link.cnki.net/doi/10.13801/j.cnki.fhclxb.20251009.009>.
- HU Hao, XUE Xiaofeng, SONG Zhicen, et al. Dual-scale porosity-based zonal stiffness reduction method for liquid composite molded structures[J/OL]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025:1–13[2025-10-29]. <https://link.cnki.net/doi/10.13801/j.cnki.fhclxb.20251009.009>.
- [15] SOMRANI S, JACQUES E, WEISS B, et al. Modelling the permeabilities of dry filament wound cylindrical reinforcements for RTM simulation[J]. *Processes*, 2025, 13(4). DOI: 10.3390/pr13041071.
- [16] SIMACEK P, KERMANI N N, ADVANI G S. A comprehensive framework for modeling volatile transport and bubble dynamics in liquid composite molding processes[J]. *Composites Science and Technology*, 2025, 269. DOI:10.1016/j.compscitech.2025.111254.
- [17] 邹文涛,孟宪明,程从前,等.基于PAM-RTM的CFRP平板RTM工艺及孔隙缺陷仿真[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(3):76–82.
- ZOU Wentao, MENG Xianming, CHENG Congqian, et al. Simulation of RTM process and void defect for CFRP flat plate based on PAM-RTM[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(3): 76–82.
- [18] 陈星宇,王遵,卜继玲,等.碳纤维叶片大梁真空灌注工艺仿真和验证[J]. *复合材料科学与工程*, 2020(7):110–113.
- CHEN Xingyu, WANG Zun, BU Jiling, et al. Process simulation and verification of carbon spar cap by VARTM process[J]. *Composites Science and Engineering*, 2020(7):110–113.
- [19] 高猛,程从前,孟宪明,等.基于PAM-RTM的复合材料电池箱上盖板CRTM工艺填充仿真[J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(11): 55–60.
- GAO Meng, CHENG Congqian, MENG Xianming, et al. Filling simulation of CRTM process for upper cover plate of composite battery box based on PAM-RTM[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(11):55–60.
- [20] STIEBER S, SCHRÖTER N, SCHIENDORFER A, et al. Flow-FrontNet: Improving carbon composite manufacturing with CNNs [C]//DONG Y, MLADENIĆ D, SAUNDERS C. *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases: Applied Data Science Track*. Cham:Springer, 2021:411–426.
- [21] TIFKITSIS K I, SKORDOS A A. Real time uncertainty estimation in filling stage of resin transfer molding process[J]. *Polymer Composites*, 2020, 41(12):5 387–5 402.
- [22] OBERTSCHEIDER C, FAUSTER E, STIEBER S. Experimental validation of a new adaptable LCM mold filling software[J]. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 2023, 9(1). DOI:10.1080/20550340.2023.2282310.
- [23] LABAT L, BRÉARD J, PILLUT-LESAYRE S, et al. Void fraction prevision in LCM parts[J]. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2001, 16(2):157–164.