

1D-3D单元耦合模拟穿孔夹芯复合材料中的树脂流动行为

周子维 倪爱清 冯雨薇 王继辉

1D-3D cell coupling simulation of resin flow behavior in perforated sandwich composite materials

ZHOU Ziwei, NI Aiqing, FENG Yuwei, WANG Jihui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240313.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于分层理论的螺栓连接夹芯复合材料加筋结构振动特性

Vibration characteristics of reinforced sandwich composite structure with bolt connection based on layer-wise theory

复合材料学报. 2019, 36(12): 2815–2821 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190111.001>

基于树脂流动的变截面复合材料结构固化过程热-流-固多场强耦合数值仿真

Numerical simulation of heat-flow-solid multi-field strong coupling in curing process of variable cross-section composite structures based on the resin flow

复合材料学报. 2018, 35(8): 2095–2102 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170915.001>

复合材料带筋壁板预成型体压缩性与渗透性对树脂流动的影响

Effect of compaction and permeability of the composite stiffened panel preform on resin flow

复合材料学报. 2019, 36(4): 811–825 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180419.001>

缝合夹层结构复合材料树脂传递模塑成型工艺充模仿真

Filling simulation of stitched sandwich composite by resin transfer molding process

复合材料学报. 2018, 35(12): 3342–3349 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180207.004>

缝绉泡沫夹芯复合材料细观纤维柱破坏行为

Fracture behavior of meso-fiber column in the stitched foam sandwich composites

复合材料学报. 2020, 37(4): 837–844 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190617.003>

真空辅助树脂灌注法制备风电叶片树脂的渗透及缺陷

Resin penetration and defects of wind turbine blades prepared by vacuum assisted resin infusion method

复合材料学报. 2019, 36(12): 2779–2785 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190304.001>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

1D-3D 单元耦合模拟穿孔夹芯复合材料中的树脂流动行为



分享本文

周子维^{1,2}, 倪爱清¹, 冯雨薇², 王继辉^{*2}

(1. 武汉理工大学 材料复合新技术国家重点实验室, 武汉 430070; 2. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 武汉 430070)

摘要: 真空辅助树脂灌注 (VARI) 工艺作为一种高性能、低成本的制造技术, 已广泛应用于大型复合材料零部件的制造。穿孔夹芯复合材料具有比强度比模量高、承载能力强等特点, 然而, 为了准确模拟穿孔夹芯复合材料中树脂的充模过程, 需要对芯材内每个孔洞的树脂流动行为进行三维数值计算, 尤其是对于大厚度构件而言需要大量的开发成本和生产周期。为了降低仿真计算复杂性和时间成本, 本文提出了一种全新的 1D-3D 有限单元耦合计算方法, 利用自开发 ANSYS Fluent UDF (用户自定义函数) 子程序模拟树脂在芯材孔洞中的流动, 避免了对数量巨大的孔洞进行物理建模, 成功优化了穿孔夹芯复合材料真空灌注过程的模型构建和仿真计算过程, 并通过实尺度的灌注实验验证了仿真模拟的可行性。研究结果表明, 数值仿真与实验测得的灌注时间基本吻合, 能够较为准确地模拟穿孔夹芯结构成型过程中树脂的流动。

关键词: 真空辅助树脂灌注工艺; 夹芯复合材料; 芯材孔洞; 单元耦合; 流动仿真

中图分类号: TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2024)12-6450-11

1D-3D cell coupling simulation of resin flow behavior in perforated sandwich composite materials

ZHOU Ziwei^{1,2}, NI Aiqing¹, FENG Yuwei², WANG Jihui^{*2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The vacuum assisted resin infusion (VARI) process, recognized as a high-performance, cost-effective manufacturing technology, has been widely adopted in the production of large composite material components. Perforated core composite materials exhibit characteristics such as a high strength-to-weight ratio and strong load-bearing capacity. However, to accurately simulate the resin infusion process within perforated core composite materials, three-dimensional numerical calculations of resin flow within each hole of the core material are required, especially for thick components, involving substantial development costs and production cycles. To reduce the complexity and time costs of simulation calculations, this study proposed a novel 1D-3D finite element coupling method. Utilizing a self-developed ANSYS Fluent user-defined function (UDF) subroutine to simulate resin flow within the core material holes, the need for physical modeling of a large number of holes is avoided. This approach successfully optimizes the model construction and simulation calculation process of the vacuum infusion process for perforated core composite materials. The feasibility of the simulation was validated through full-scale infusion experiments. The research results indicate that the numerical simulation closely aligns with experimentally measured infusion time, providing a relatively accurate representation of resin flow during the formation process of perforated core structures.

收稿日期: 2024-01-19; 修回日期: 2024-02-29; 录用日期: 2024-03-03; 网络首发时间: 2024-03-13 16:11:32

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240313.001>

通信作者: 王继辉, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为树脂基复合材料力学 E-mail: jhwang@whut.edu.cn

引用格式: 周子维, 倪爱清, 冯雨薇, 等. 1D-3D 单元耦合模拟穿孔夹芯复合材料中的树脂流动行为 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(12): 6450-6460.

ZHOU Ziwei, NI Aiqing, FENG Yuwei, et al. 1D-3D cell coupling simulation of resin flow behavior in perforated sandwich composite materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(12): 6450-6460(in Chinese).

Keywords: vacuum assisted resin infusion process; sandwich composite materials; core material holes; unit coupling; flow simulation

穿孔夹芯复合材料由于其卓越的力学和机械性能,如高比强度和比刚度等,在航空航天、风力涡轮机、船舶和汽车工业中得到了广泛的应用^[1-3]。真空辅助树脂传递(Vacuum assisted resin infusion, VARI)工艺是一种新型的、低成本且高性能的复合材料成型技术,对于制造结构复杂的复合材料发挥着不可替代的作用^[4-5]。在 VARI 工艺中,将纤维预制体放置在刚性模具表面,由真空袋密封模腔。空气通过真空泵排出,随后树脂进入模具并与纤维预制体充分浸润,最后升温固化得到复合材料。实际生产中,通常在预成型体上方铺设导流网或对泡沫进行开槽开孔处理以加速树脂流动^[6-8]。

相较于传统的试错法工艺优化工艺周期长、成本高等问题^[9-10],数值模拟方法是近几十年来更广受青睐的方法。计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)软件对穿孔夹芯复合材料的 VARI 工艺展开研究能够较为全面地评估 VARI 成型的工艺参数,并有助于实现对构件尺寸和质量的精确控制^[11-12]。Yan 等^[13]用 VARI 工艺制造泡沫芯夹层扰流片,根据不同注射方案对树脂流动前沿影响的仿真结果,得到了两种最优的灌注方案,最后采用厚端注射和薄端出口方案来制作扰流片,获得了最优成型质量。为了模拟穿孔泡沫夹芯结构中的树脂流动行为, Falaschetti 等^[14]和 Yan 等^[12]利用 Hagen-Poiseuille 定理计算孔的等效渗透率,并将其芯材孔洞简化为孔隙率为 1 的中空直管多孔介质模型,然后构建了相应的三维模型进行流动仿真。Jhan 等^[15]采用圆形管单元表示芯材的孔槽,在 RTM-Worx 软件中利用 3D 模型模拟树脂流动前沿,模拟结果误差小于 20%。这种方案在一定程度上降低了仿真计算的复杂程度,但对仿真计算的成本与时间并无太大影响。相反,王科等^[16]采用“长条”模型代替缝合芯材中的树脂流动模型,对其灌注成型过程进行模拟,模拟结果与可视化实验中的树脂流动情况非常接近。Poodts 等^[17]针对穿孔夹芯复合材料,利用等截面二维网格代替芯材孔洞和上下面板构建 2.5D 模型进行模拟,并通过实验验证了其可行性。这种方案简化了仿真模型,同时减少了仿真计算的时间与成本。然而,该方案降低了仿真计算的精

度,特别是对于圆柱形孔洞截面的选取,对仿真精度的影响较大。

3D CFD 的数值计算需要庞大的计算能力,同时也会导致仿真计算的时间成本大幅上升^[18]。相比之下,采用 1D 和 3D 单元相结合的仿真计算毫无疑问是一种更为优异的解决方案,既可以降低仿真计算的复杂性和时间周期,同时可以获得树脂灌注流动前沿的精确结果。Jordaan 等^[19]使用 1D 网络单元模拟管内流动,同时采用 3D 单元模拟外部辅助流,分析了具有密集管束的管壳式换热器的换热过程。与全三维仿真计算得到的对数平均温差(Logarithmic mean temperature difference, LMTD)相比,采用 1D/3D 耦合方法计算两者之间误差小于 2%,并且还大幅降低了计算费用。Koekemoer 等^[20]采用六面体 3D 单元模拟加热器壁和立管外壁之间的腔内辐射和对流传热,而反应堆空腔冷却系统(Reactor cavity cooling system, RCCS)的管网则采用 1D 单元进行建模。与需要大量的实际测试数据来准确表征系统的全 1D 仿真计算相比,1D/3D 耦合方法通过在 1D 和 3D 单元之间显式交换边界条件来耦合模型,不仅减少大量的实验测试数据,而且从温度、质量流量和立管功率等方面对比,两者仿真结果也十分吻合。Zhao 等^[21]使用 1D 单元模拟被动余热排出系统(Passive residual heat removal system, PRHRS)空腔前后的管网,同时采用 3D 单元表示空腔,通过耦合模型计算了 10 MW 高温气冷试验堆(High-temperature test reactor, HTR-10) PRHRS 的瞬态特性。Chen 等^[22]通过在 AMESim 和 Fluent 软件中构建环境控制系统(Environmental control system, ECS)的一维系统模型和客舱的三维 CFD 模型来研究飞机客舱内的瞬态温度分布。他们对比了 1D/3D 联合仿真方法和独立的 1D 系统仿真方法对温度分布的计算结果。研究表明,1D/3D 耦合仿真方法能够提供比单独 1D 系统仿真更为详细的信息。Pate 等^[23]将 1D 代码与 3D 模型耦合应用于核电站管道系统。采用 1D/3D 耦合模型,在不影响数值结果精度的情况下,计算时间相较于全 3D 模型减少了 90%。Zhang 等^[24]采用 1D MOC 代码模拟输水系统中的管道,采用 3D CFD 模型来模拟水压缩性模型,通过分析一条 194 km 输水系统的开闭过程,计算结果表明,该方法计算效率高,计算精度高,可用于输水系统、抽水

蓄能电站等水力瞬态分析。为了方便求得准确的数值解, Yang等^[4,25]在对预制体的压实特性和纤维束浸渍特性进行分析的基础上提出了一种新方法。该方法在每个3D单元中引入了两个1D单元, 分别称为汇单元和变形单元, 分别用于计算纤维束的渗透和预成型变形引起的树脂质量变化。通过算例的验证, 证明了这种仿真方法的精确性和广泛适用性, 并分析了预制体的变形和非饱和效应对成型过程的影响。

本文以穿孔夹芯复合材料为研究对象, 通过实验测定穿孔夹芯结构织物的渗透率, 计算了单孔内树脂体积与纤维渗透率和芯材孔洞内压降的关系。然后, 对单孔模型进行三维仿真模拟, 并与理论计算芯材孔洞中的树脂流量进行比较验证。通过UDF计算子程序构建了模拟树脂在芯材孔洞中流动的传递函数, 将其集成到Fluent数值代码中, 构建了一种模拟穿孔夹芯结构灌注过程的仿真方案。最后, 通过实尺度的实验方案验证该方案的可行性, 为进一步预测和分析大型开孔夹芯复合材料的树脂灌注过程提供了可靠支持。

1 数值模型

1.1 树脂流动

假设树脂是不可压缩流体, 因此连续性方程可以描述为

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

其中: ∇ 代表向量算子; $\mathbf{v}$ 代表达西速度(体积平均速度)。

因此, 树脂在VARI工艺中流动的控制方程为

$$\nabla \cdot \left(-\frac{K}{\mu} \nabla p \right) = 0 \quad (2)$$

其中: K 代表纤维渗透率; μ 代表黏度; p 代表流体压力。

通常采用流体体积法(Volume of fluid, VOF)来追踪树脂流动前沿, VOF方法是由Hirt和Nichols在20世纪80年代发展起来的一种相对成熟的欧拉网格多相流界面跟踪技术^[26]。该方法基于体积分数函数, 通过计算单元中的体积分数 F_r 来识别树脂和空气的特定相, 即

$$F_r = \begin{cases} 1 & \text{单元充满树脂} \\ 0 < F_r < 1 & \text{单元包含两相之间的界面} \\ 0 & \text{单元充满空气} \end{cases} \quad (3)$$

在VOF方法中, 各相的速度场是通过求解一组动量方程得到:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} + S_D \quad (4)$$

其中: ρ 代表流体密度; t 代表时间; $\mathbf{g}$ 代表重力加速度; $\mathbf{F}$ 是通过Brackbill等^[27]于1992年提出的方法建模的表面张力; S_D 是黏性损失项, 通常由达西定律表示:

$$S_D = -\frac{\phi^2 \mu}{K} \cdot \mathbf{v} \quad (5)$$

其中, ϕ 代表孔隙度。

空气和树脂之间的界面跟踪由树脂体积分数的连续性方程表示:

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot F_r + \nabla \cdot (F_r \cdot \mathbf{v}) = S_{F_r} \quad (6)$$

其中, S_{F_r} 代表树脂的体积分数源项。

每个单元内流体的密度 ρ 可以通过对每个单元内的流体体积加权平均来确定:

$$\rho = \rho_r F_r + (1 - F_r) \rho_a \quad (7)$$

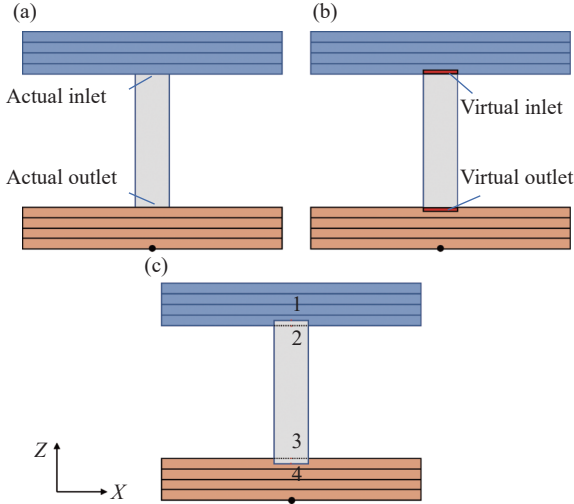
其中, 下标r和a分别表示树脂和空气。

1.2 芯材孔洞分析

在VARI工艺中, 根据芯材孔洞两端流入和流出的流体不同, 芯材孔洞两端的压力差呈现出不同的变化趋势。因此, 可以将树脂流入芯材孔洞的过程分为3个阶段。第一阶段从树脂充模开始到树脂接触到芯材孔洞入口处结束, 此时通过芯材孔洞两端的流体都是空气, 入口端和出口端压力保持恒定, 芯材孔洞两端压力差恒定。第二阶段为树脂仅进入芯材孔洞但仍未流入下层纤维的过程, 其中芯材孔洞入口端的流体为树脂, 出口端的流体为空气。当树脂从入口端流入, 入口端压力的绝对值先骤降, 后保持恒定, 而出口端压力保持不变, 两端压差的绝对值先骤增, 后保持恒定。第三阶段从树脂充满芯材孔洞并且流入下层纤维开始, 一直到灌注过程结束, 此时芯材孔洞两端的流体均为树脂, 芯材孔洞两端压力的绝对值均逐渐减小, 两端压差也小幅度降低。

因此, 在保持纤维渗透率、芯材孔径等参数一定的情况下, 根据树脂流入芯材孔洞的3个阶段, 可以构建传递函数来模拟树脂在芯材孔洞中流动。在构建芯材孔洞中树脂流动的传递函数时, 我们需要计算流过芯材孔洞的流体流量并判断其所属的流动阶段, 将其表示为芯材孔洞入口和出口端3D单元的体积流量函数。由于构建传递函

数的目的是为了对芯材孔洞进行建模,因此芯材孔洞的实际入口和出口截面不能作为传递函数的入口和出口面,如图 1(a) 所示。将与芯材孔洞相邻的纤维层的质心截面作为新的芯材孔洞入口和出口面,而通过芯材孔洞的流体流量则以虚拟入口、出口和实际入口、出口之间 3D 单元的体积流量函数来表示,如图 1(b) 所示。



1 represents the centroid of the fiber layer above the hole; 2 represents the center of the circle of the upper end face of the hole; 3 represents the center of the circle of the lower end face of the hole; 4 represents the centroid of the fiber layer below the hole

图 1 芯材孔洞截面分析: (a) 芯材孔洞实际入口和出口; (b) 芯材孔洞虚拟入口和出口; (c) 芯材孔洞两端压差

Fig. 1 Cross section analysis of core material holes: (a) Actual entrance and exit of core material holes; (b) Virtual entrance and exit of core material holes; (c) Pressure difference at both ends of the core material hole

在 VARI 工艺中,芯材孔洞入口和出口端之间的压降可以通过达西定律和 Hagen-Poiseuille^[28] 来表示。芯材孔洞两端的压差则由入口和出口端的压力损失以及芯孔内部的压力损失相加来计算,如图 1(c) 所示:

$$\Delta P_{14} = \Delta P_{12} + \Delta P_{23} + \Delta P_{34} \quad (8)$$

其中, ΔP_{14} 、 ΔP_{12} 、 ΔP_{23} 、 ΔP_{34} 分别代表两点之间的压差。

芯材孔洞入口 ΔP_{12} 和出口区域的压力损失 ΔP_{34} 可通过达西定律来表示,可得到

$$\Delta P_{12} = \frac{\mu L_{12}}{K_z} \frac{Q}{\pi R^2} \quad (9)$$

$$\Delta P_{34} = \frac{\mu L_{34}}{K_z} \frac{Q}{\pi R^2} \quad (10)$$

其中: L_{12} 、 L_{34} 代表虚拟入口、出口和实际入口、

出口之间的距离; K_z 代表纤维厚度方向上的纤维渗透率; Q 代表通过芯材孔洞的流体流量; R 代表芯材孔洞的半径。根据 Hagen-Poiseuille 可得:

$$\Delta P_{23} = \frac{8\mu L_{23}}{\pi R^4} Q \quad (11)$$

则

$$\Delta P_{14} = \frac{\mu L_{12}}{K_z} \frac{Q}{\pi R^2} + \frac{8\mu L_{23}}{\pi R^4} Q + \frac{\mu L_{34}}{K_z} \frac{Q}{\pi R^2} \quad (12)$$

根据树脂流入芯材孔洞的 3 个阶段,在第一阶段和第三阶段,流过芯材孔洞两端的流体相同,因此芯材孔洞两端的压差保持在同一数量级。而对于第二阶段,芯材孔洞两端流体分别为树脂和空气,可得:

$$\Delta P_{14} = \begin{cases} \frac{(L_{12} + L_{34}/K_z + 8L_{23}/R^2)\mu}{\pi R^2} Q & \text{第一阶段和第三阶段} \\ \frac{(L_{12}\mu_r + L_{34}\mu_a)}{K_z \pi R^2} Q + \frac{8L_{23}\mu}{\pi R^4} Q & \text{第二阶段} \end{cases} \quad (13)$$

根据式 (13) 可知,芯材孔洞入口端与出口端之间的压差主要取决于纤维厚度渗透率 K_z 的倒数和芯材孔洞半径的平方 R^2 的倒数。在本文中,纤维厚度渗透率 $K_z = 2.908 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 比芯材孔洞半径的平方 $R^2 = 9 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 低 10^{-6} 倍,故芯材孔洞的压降相较于入口端和出口端的压降可以忽略。对于第二阶段,因为空气黏度 ($\mu_a = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) 相比于树脂黏度 ($\mu_r = 0.25 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) 低 10^{-4} 倍,所以空气黏度相对于树脂黏度可以被忽略。因此,可以得到一个适用于整个充模过程的方程,并且通过芯材孔洞的流体流量可以由下式计算:

$$Q = \begin{cases} \frac{\pi R^2 K_z}{(L_{12} + L_{34})\mu} \Delta P_{14} & \text{第一阶段和第三阶段} \\ \frac{\pi R^2 K_z}{L_{12}\mu} \Delta P_{14} & \text{第二阶段} \end{cases} \quad (14)$$

1.3 数值求解

为了确保仿真精度和仿真结果的广适性,本研究采用了商业软件 Fluent 中的 VOF 模型,该模型可以通过数值求解式 (11)~(14) 来模拟多相流。用户自定义函数 (User-defined function, UDF) 是用户自己编译的子程序,它可以动态地连接到 Fluent 求解器上来提高求解器性能。UDF 可以使用标准 C 语言的库函数,也可以使用 Fluent Inc. 提供的预定义宏来获取 Fluent 求解器得到的数据。本文式 (5) 所示的黏性损失项和式 (6) 所示的芯材孔洞中的树脂流动分别由 Fluent UDF 中的动量源

项和体积源项来定义。同时，UDF 子程序仍需要完成以下 3 个功能：(1) 通过比较网格单元的坐标与芯材孔洞的坐标来识别芯材孔洞的入口和出口端，计算入口和出口端的 3D 单元体积；(2) 根据当前时间步长值和已经收敛的时间步长里芯材孔洞内累积的树脂体积，计算出当前时间步长虚拟芯材孔洞内的树脂体积；(3) 根据虚拟芯材孔洞内的树脂体积来确定流动所属的阶段。

根据树脂流入芯材孔洞的 3 个阶段，通过芯材孔洞的树脂与空气的体积流量可以通过式 (14) 来计算。当树脂流到芯材孔洞入口端，由于入口端的 3D 单元难以瞬间充满树脂，因此 UDF 子程序必须将入口端每个单元所得的体积流量乘以每个单元的体积分数，则有：

$$Q_c = \begin{cases} \frac{F_c V_c \pi R^2 K_z \Delta P_{14}}{(\sum_{in} V_c)(L_{12} + L_{34})\mu} & \text{第一阶段和第三阶段} \\ \frac{F_c V_c \pi R^2 K_z}{(\sum_{in} V_c)L_{12}\mu} \Delta P_{14} & \text{第二阶段} \end{cases}$$

(15)

其中， V_c 代表每个单元的体积分数，下标 c 表示单个网格单元。

为了保证通过芯材孔洞内流体的质量守恒，在入口端的源项为负值，在出口端的源项为正值，表明了流体从入口端流出，从出口端流入。则从入口流出的体积源项为

$$S_{F_{c,in}} = -\frac{1}{V_c} \rho Q_c$$

(16)

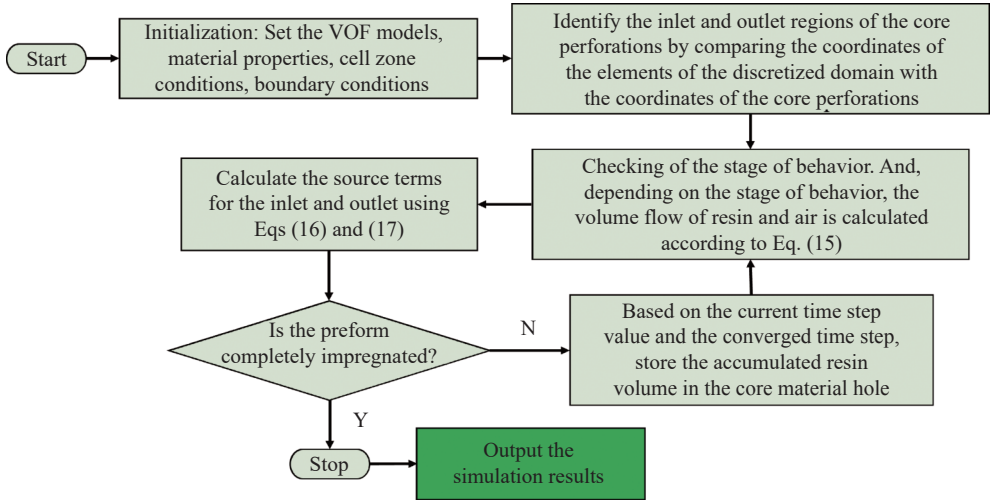
其中， $S_{F_{c,in}}$ 表示入口端流体的体积源项。

而在出口端，由于树脂流入芯材孔洞的 3 个阶段中流出的流体不同，因此必须考虑流出流体的密度和出口端的单元体积，则根据下式计算进口区域的体积源项：

$$S_{F_{c,out}} = \begin{cases} -\frac{\sum_{in}(S_{F_a} V_c)}{\sum_{out} V_c} \\ -\frac{\sum_{in}(S_{F_r} V_c)}{\rho_r} \rho_a \\ -S_{F_{c,in}} \end{cases} \quad \text{第二阶段}$$

(17)

在仿真过程中，为了保证动量和质量守恒，必须在每个时间步长对每个芯材孔洞进行体积源项的计算和应用。整个计算过程如图 2 所示，其中深色的方框表示由 Fluent 自动执行的操作，其他方框表示由子程序执行的操作。



VOF—Volume of fluid

图2 仿真计算流程图

Fig. 2 Flow chart description of the simulation

2 穿孔泡沫夹芯复合材料 VARI 工艺仿真与实验验证

2.1 材料参数测量实验

实验材料：PMX-200-100cs 二甲基硅油，深圳市崇化鑫科技有限公司；E51 环氧树脂，南通星辰合成材料有限公司；玻璃纤维缎纹织物 (Satin

fabric, SF, 单层厚度为 0.1875 mm)，中国巨石股份有限公司。辅助材料：柔性真空袋，玻璃板 (50 cm×50 cm)，玻璃模具，导流网 (厚 1 mm)，单向透气膜，聚氯乙烯 (PVC) 软管 (内径 4 mm)。实验设备：数显测厚表，台州艾测仪器有限公司；真空泵，浙江台州求精真空泵有限公司；采用黏

度计 (Brookfield 公司) 测定实验环境温度 (25℃) 下树脂与硅油的黏度; 采用一维渗透率测试方法测定玻璃纤维织物面内渗透率 K_x 、 K_y [29], 采用实验室自制渗透率测试装置测定厚度方向的渗透率 K_z [30]; 渗透率测试所用液体均为硅油。仿真模型的计算参数如表 1 所示。

表 1 材料参数测试结果

Table 1 Test results of material parameters

	Symbol	Value
Inlet pressure/Pa	P_{in}	0
Outlet pressure/Pa	P_{out}	-101 325
Resin viscosity/(Pa·s)	μ_r	0.25
Resin density/(kg·m ⁻³)	ρ_r	1 100
Silicone oil viscosity/(MPa·s)	μ_s	78.4
Silicone oil density/(kg·m ⁻³)	ρ_s	963
Fiber volume fraction/vol%	V_f	41.1
Permeability/(10 ⁻¹¹ m ²)	K_x	3.41
	K_y	3.77
	K_z	0.2908

Notes: K_x , K_y —In-plan permeability; K_z —Permeability in thickness direction.

2.2 单孔仿真模型建立

单孔夹芯结构模型 A 主要包括 3 个部分: 由下至上依次为下层玻璃纤维蒙皮、用直细管模型替代的芯材孔洞、上层玻璃纤维蒙皮。

如图 3 所示, 在 VARI 工艺中, 由于玻璃纤维蒙皮的渗透率远小于导流网, 且沿流动方向的长度远大于夹层泡沫复合材料的厚度, 则可以假设树脂在瞬间填满导流网, 纤维预制体中的树脂全部从导流网中沿厚度方向渗透 [31]。因此, 边界条件设置为上层玻璃纤维顶部为树脂入口; 另一端下层纤维面板轮廓处设置为出口, 整个模型采用的网格单元类型为六面体单元。

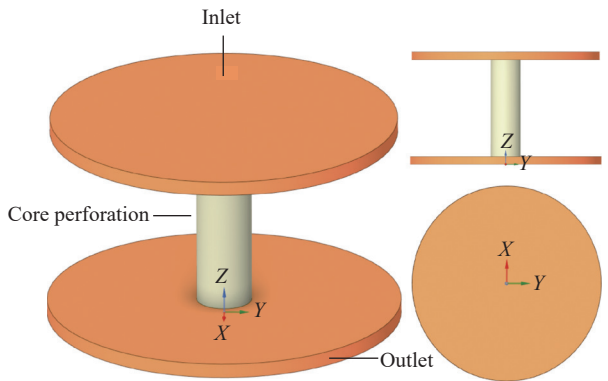


图 3 单孔模型 A

Fig. 3 Single hole model A

针对单孔模型 A 的数值模拟, 在本文中考虑了芯材孔洞入口和出口端之间的压降以及单孔模型 A 的填充时间。通过使用不同数量的网格单元, 对数值结果进行了分析, 以研究网格单元数量对结果的影响, 如表 2 所示。

表 2 不同单元尺寸网格划分方案

Table 2 Meshing scheme of different element sizes

Scheme	Upper and lower fiber panels size/mm	Core size/mm	Element/10 ⁴
a	0.1	0.1	97.2143
b	0.25	0.1	62.4066
c	0.5	0.25	46.4243
d	1	0.5	23.4103
e	1	1	7.8904

网格独立性测试的结果如图 4 所示。可以发现, 当网格方案从 a 到 e 时, 单孔模型 A 的填充时间和压降变化不大。

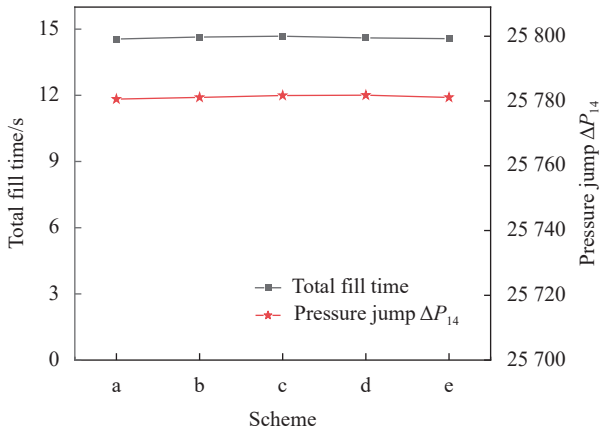


图 4 网格独立性测试

Fig. 4 Grid independence testing

从图 5 可以观察到树脂流入芯材孔洞的 3 个阶段, 在第一阶段, 树脂未流到芯材孔洞处; 第二阶段, 芯材孔洞入口端有均匀的树脂流入, 出口端无树脂流出; 第三阶段, 芯材孔洞两端的树脂流量相等。根据式 (14) 计算流入通过芯材孔洞入口端的树脂流量, 与单孔模型 A 仿真结果之间的误差为 2%。

通过芯材孔洞的树脂和空气流量可以通过数值代码来构建相应的传递函数来代替。在如图 6 所示单孔模型 B 中, 因为使用计算子程序 UDF 模拟芯材芯孔的存在, 所以在单孔模型 B 的构建中, 只包括上层和下层纤维面板, 通过 160 461 个六面体网格单元对单孔模型 B 进行了仿真模拟。

如图 7(a) 所示, 将单孔模型 A 和模型 B 的仿

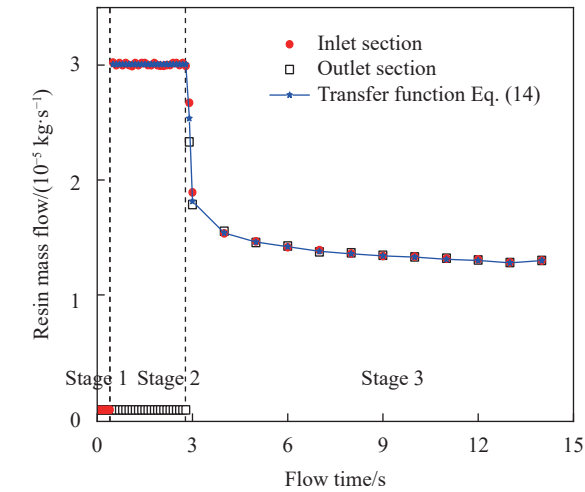


图5 芯材孔洞入口和出口端的树脂流量

Fig. 5 Resin flow at inlet and outlet of core perforation

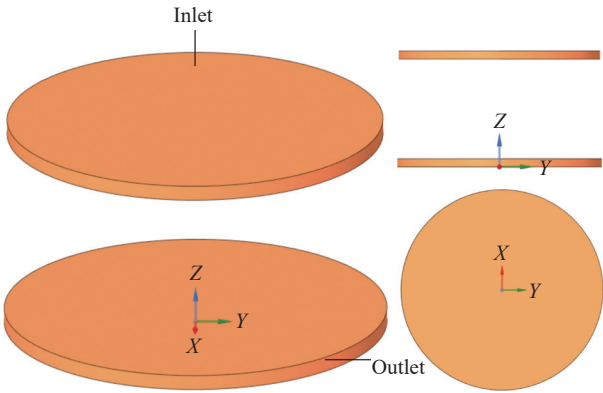


图6 单孔模型B

Fig. 6 Single hole model B

真结果进行对比,通过芯材孔洞入口端的树脂质量流量模拟平均偏差小于4.87%,单孔模型B的充模时间为14.64 s,平均偏差在1%以内。如图7(b)和7(c)在芯材孔洞的上方和下方的玻璃纤维层中,相对压力和速度分量 V_z 在两个模型中保持着相同的变化趋势,相对压力分布的平均偏差为3.6%,速度分量 V_z 的平均偏差为10.74%。仿真结果表明,通过使用UDF子程序能准确的模拟芯材孔洞内树脂的流动,同时减少网格单元的使用,节约了大量的计算资源。

2.3 穿孔泡沫夹芯复合材料三维仿真与验证

三维仿真模型主要由下层纤维、上层纤维和导流网构成,本文通过UDF计算子程序对泡沫夹芯(300 mm×180 mm×10 mm,开孔间距50 mm×30 mm,直细管半径 R 为1.5 mm)进行数值模拟,使用565 224个六面体单元模拟了芯材孔洞中树脂流动,如图8所示。

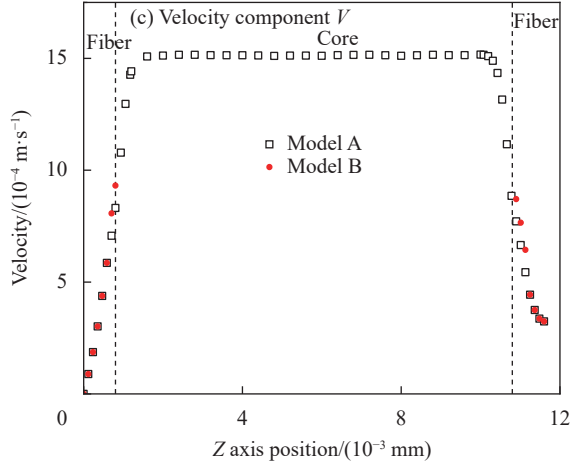
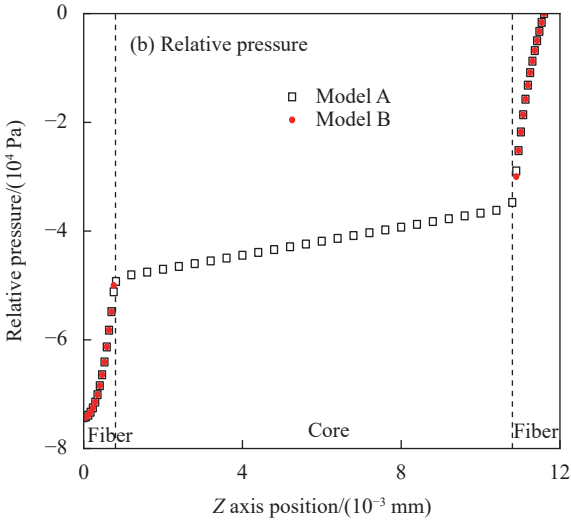
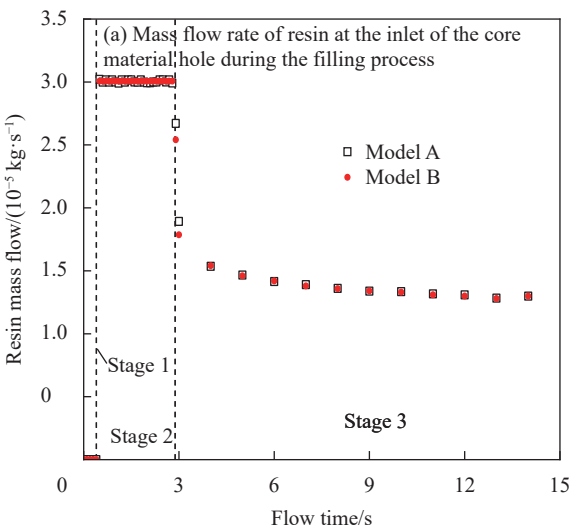


图7 单孔模型A与B的数值结果

Fig. 7 Numerical results of single hole models A and B

2.3.1 实验

穿孔泡沫夹芯复合材料真空灌注成型实验主要分为4个部分:由下至上依次为下层玻璃纤维

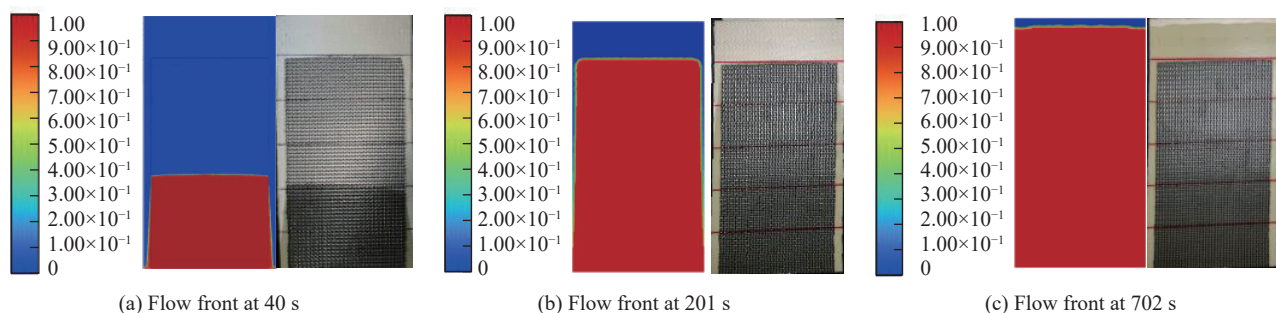


图 11 40 s、201 s 和 702 s 穿孔泡沫夹芯复合材料上表面树脂流动情况对比

Fig. 11 Comparison of resin flow on top surface of perforated foam sandwich composite between simulation and experiment at 40 s, 201 s, 702 s

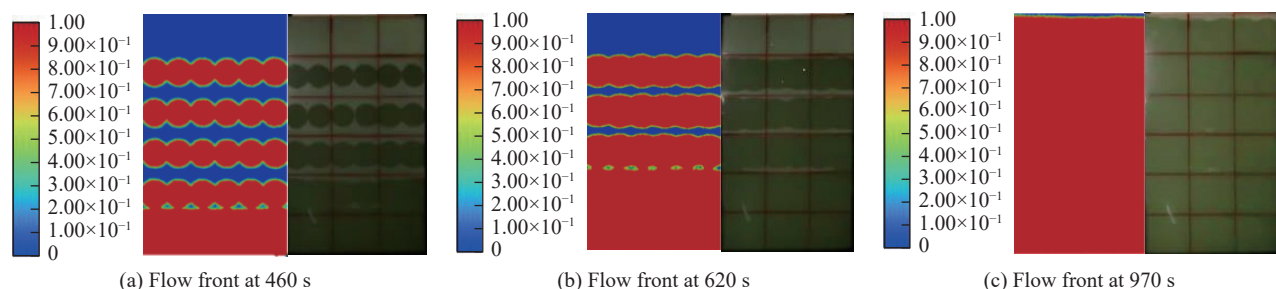


图 12 460 s、620 s 和 970 s 穿孔泡沫夹芯复合材料下表面树脂流动情况对比

Fig. 12 Comparison of resin flow on bottom surface of perforated foam sandwich composite between simulation and experiment at 460 s, 620 s, 970 s

3 结论

提出了一种采用 3D 和 1D 相结合的数值模拟方法,以模拟穿孔夹芯复合材料结构的灌注过程。运用 ANSYS Fluent 软件构建 3D 单元并模拟了树脂在导流网和纤维中的流动情况。同时,利用 1D 单元模拟了树脂在芯材孔洞中的流动。通过将 3D 计算流体动力学 (CFD) 单元和 1D 单元相结合,成功地优化了穿孔夹芯复合材料真空灌注过程的数值模型,从而得到如下结论:

(1) 树脂在芯材孔洞中的流动可以根据芯材孔洞两端流体性质的不同分为 3 个阶段。在每个阶段中,通过芯材孔洞的流体流量与芯材孔洞两端的压差之间呈线性变化趋势;

(2) 通过在穿孔泡沫夹芯复合材料的 3D 仿真模型中引入 1D 单元,成功地模拟了树脂在芯材孔洞中的流动过程。该方法避免了物理建模芯材孔洞,计算每个芯材孔洞内树脂流动前沿的复杂计算步骤,从而减少了计算单元的数量,计算单元的减少率达到了 56%,大幅降低了计算成本;

(3) 引入用户自定义函数 (UDF) 子程序的穿孔夹芯结构灌注过程的仿真结果与实验结果吻合度较高,建立的模型能够较准确地模拟出真空辅助树脂灌注 (VARI) 成型工艺中树脂在穿孔夹芯结构中的流动行为。

参考文献:

- [1] IRFAN S, SIDDIQUI F. A review of recent advancements in finite element formulation for sandwich plates[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(4): 785-798.
- [2] PATEKAR V, KALE K. State of the art review on mechanical properties of sandwich composite structures[J]. *Polymer Composites*, 2022, 43(9): 5820-5830.
- [3] GALOS J, DAS R, SUTCLIFFE M P, et al. Review of balsa core sandwich composite structures[J]. *Materials & Design*, 2022, 221: 111013.
- [4] YANG B, JIN T, BI F, et al. Modeling the resin flow and numerical simulation of the filling stage for vacuum-assisted resin infusion process[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2014, 33(21): 1976-1992.
- [5] ARYASWARA L G, SANTOS G N C, MUFLIKHUN M A. Defect characteristics of unidirectional glass fiber reinforced epoxy manufactured via vacuum assisted resin infusion[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 66(P5): 2796-2800.
- [6] VILÀ J, GONZÁLEZ C, LLORCA J. Fabric compaction and infiltration during vacuum-assisted resin infusion with and without distribution medium[J]. *Journal of Composite Materials*, 2017, 51(5): 687-703.
- [7] ROBINSON M J, KOSMATKA J B. Analysis of the post-filling phase of the vacuum-assisted resin transfer molding

- process[J]. *Journal of Composite Materials*, 2014, 48(13): 1547-1559.
- [8] PARK C H. Numerical simulation of flow processes in composites manufacturing[M]//*Advances in Composites Manufacturing and Process Design*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015: 317-378.
- [9] 施赫荣, 王继辉, 倪爱清, 等. 穿孔泡沫夹芯复合材料灌注工艺仿真与方案优选 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(2): 782-793.
- SHI Herong, WANG Jihui, NI Aiqing, et al. Perforated foam sandwich composite grouting process simulation and scheme optimization[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(2): 782-793(in Chinese).
- [10] SHAH M, CHAUDHARY V. Flow modeling and simulation study of vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) process: A review[C]//*IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Bristol: IOP Publishing, 2020, 872(1): 012087.
- [11] SONG Y S, YOUN J R. Flow advancement through multi-layered preform with sandwich structure[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, 38(4): 1082-1088.
- [12] YAN C, WU H L, REN X M, et al. Experimental and numerical study on the permeation behavior of foam-core sandwich panels in LCM[J]. *Fibers and Polymers*, 2021, 22: 2612-2625.
- [13] 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): 5279.
- [14] FALASCHETTI M P, RONDINA F, ZAVATTA N, et al. Material characterization for reliable resin transfer molding process simulation[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(5): 1814.
- [15] JHAN Y T, LEE Y J, CHUNG C H. Experimental and numerical investigation of the VARTM process with a sandwich structure[J]. *Journal of Composite Materials*, 2012, 46(12): 1417-1430.
- [16] 王科, 赖家美, 鄢冬冬, 等. 缝合泡沫夹芯结构复合材料 VARTM 工艺树脂充填模拟及验证 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2015, 31(11): 124-129.
- WANG Ke, LAI Jiamei, YAN Dongdong, et al. Simulation and verification of resin filling of stitched foam sandwich structure composite VARTM process[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2015, 31(11): 124-129(in Chinese).
- [17] POODTS E, MINAK G, DOLCINI E, et al. FE analysis and production experience of a sandwich structure component manufactured by means of vacuum assisted resin infusion process[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 53: 179-186.
- [18] ALI A A, ARHORE E, GHASEMNEJAD H, et al. Experimental and numerical investigation of multi-layered honeycomb sandwich composites for impact mechanics applications[J]. *Results in Engineering*, 2024, 21: 101817.
- [19] JORDAAN H, HEYNS P S, HOSEINZADEH S. Numerical development of a coupled one-dimensional/three-dimensional computational fluid dynamics method for thermal analysis with flow maldistribution[J]. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2021, 13(4): 041017.
- [20] KOEKEMOER O C, DU TOIT C G, NIEMAND P F. Investigation into different 1D/3D co-simulation methodologies applied to a natural circulation loop[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2022, 390: 111698.
- [21] ZHAO H, ZHENG Y, CHEN X, et al. A one-dimensional code of the passive residual heat removal system for the modular high temperature gas-cooled reactor[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2019, 110: 374-383.
- [22] CHEN X Y, YANG J Z, YU T P, et al. A coupled 1D/3D co-simulation approach in simulating aircraft cabin temperature field[J]. *International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology*, 2016, 17(40): 11.1-11.7.
- [23] PATE S B, SOLOMON I S M, DUNDULIS G, et al. Applications of the FEM to pipe whip analysis using coupled modelling technique[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2024, 418: 112941.
- [24] ZHANG P, CHENG Y, XUE S, et al. 1D-3D coupled simulation method of hydraulic transients in ultra-long hydraulic systems based on OpenFOAM[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2023, 17(1): 2229889.
- [25] YANG B, JIN T, LI J, et al. Simulating the resin flow and stress distributions on mold tools during compression resin transfer molding[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2014, 33(14): 1316-1331.
- [26] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39(1): 201-225.
- [27] BRACKBILL J U, KOTHE D B, ZEMACH C. A continuum method for modeling surface tension[J]. *Journal of Computational Physics*, 1992, 100(2): 335-354.
- [28] PRŮŠA V. On the influence of boundary condition on stability of Hagen-Poiseuille flow[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2009, 57(5): 763-771.

[29] 曹鹏军. 基于 CT 图像的织物渗透率预测及扩张段工艺仿真 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022.

CAO Pengjun. Prediction of fabric permeability and simulation of expansion section process based on CT images[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2022(in Chinese).

[30] 张浩, 李书欣, 王继辉, 等. 基于新型测试装置的网孔板层开孔率对纤维厚度方向渗透率的影响 [J]. 复合材料学报, 2020, 37(5): 1175-1183.

ZHANG Hao, LI Shuxin, WANG Jihui, et al. Influence of ratio of hole area for mesh plate layer on through-thickness permeability based on a new designed test bench[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(5): 1175-1183(in Chinese).

[31] SUN X, LI S, LEE L J. Mold filling analysis in vacuum-assisted resin transfer molding. Part I: SCRIMP based on a high-permeable medium[J]. *Polymer Composites*, 1998, 19(6): 807-817.

[32] 戴福洪, 张博明, 杜善义, 等. RTM 工艺注模过程模拟的有限元/控制体积方法和流动分析网络技术比较 [J]. 复合材料学报, 2004, 21(2): 92-98.

DAI Fuhong, ZHANG Boming, DU Shanyi, et al. Comparison of finite element/control volume method and flow analysis network technology for injection molding process simulation of RTM process[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2004, 21(2): 92-98(in Chinese).