

注射条件对 LCM 工艺非饱和和流动特性影响

李永静, 晏石林*, 严飞, 鲍睿

(武汉理工大学 理学院, 武汉 430070)

摘要: 双尺度多孔纤维预制体填充过程中延迟浸润的非饱和和流动现象, 对基于树脂流过区域为完全饱和区域的充模理论及模拟方法提出了挑战。通过控制体/有限单元(CV/FE)法结合沉浸函数实现了液体模塑成型工艺(LCM)中非饱和和填充浸润的数值模拟, 并对比了恒压下的实验结果, 验证了其可靠性。分析讨论了注射口压力、流量和液体黏度对双尺度多孔纤维织物非饱和和填充浸润特性的影响。结果表明: 在允许误差内, 该数值模拟结果可靠, 可用于分析讨论各因素对双尺度多孔纤维织物非饱和和流动特性的影响; 填充浸润过程中, 纤维织物内部非饱和和区域长度并非保持不变, 而是随着填充浸润的进行经历了 4 个变化过程; 不同注射条件下, 压力、流量及黏度对非饱和和流动特性影响不同。研究结果对合理控制注射条件及流体特性实现双尺度多孔纤维预制件的完全浸润具有指导意义。

关键词: 控制体/有限单元法; 沉浸函数; LCM; 非饱和和流动; 数值模拟

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2016)11-2688-10

树脂基复合材料由于成本低、质量轻、耐腐蚀、绝缘性好及良好的力学性能, 已广泛应用于航空航天、化工、电气、汽车及建筑等领域^[1-2]。液体模塑成型(LCM)是高性能复合材料的低成本制备技术, 其技术关键是在不影响已铺放好的增强材料且模具不承受过大压力的前提下, 实现树脂对模具腔内增强材料的完全浸渍^[3-4]。LCM 工艺中的纤维预制件一般由纤维束编织或缝合而成, 而纤维束又由纤维单丝构成。该工艺使得纤维预制件内存在 2 种不同尺度的孔隙^[5-7]——纤维束内尺寸为微米的微观孔隙与纤维束间尺寸为毫米的宏观孔隙。在填充浸润过程中, 树脂在增强纤维预制件中的浸润流动包括纤维束内的微观流动及纤维束间的宏观流动。若注射条件控制不当, 上述 2 种流动行为将出现前沿不一致的非饱和和流动现象。为描述上述非饱和和流动现象, 以 Pillai 为代表的学者, 提出以沉浸函数^[8-11]代表非饱和和浸润区域内的延迟浸润流量, 将其代入连续性方程得到其宏观流动的控制方程。近年来, 随着计算技术的发展, 沉浸理论越来越受重视, 得到很多学者的认可。利用非饱和和流动理论指导成型工艺数值模拟准确性的关键因素之一是沉浸函数表达

式的准确性。Wang 和 Grove^[12]、Pillai 等国外学者通过纤维织物单胞在特定结构下浸润的数值模拟得到沉浸函数为树脂浸润饱和度及注射压力的函数的结论。国内以戴洪福等^[11, 13]为代表的课题组也得出沉浸函数与注射压力相关, 在此基础上, 重新建立树脂填充浸润的控制方程, 求解并编程实现了树脂填充浸润的数值模拟。本课题组也采用数值模拟方法研究了纤维织物结构、填充液体特性及注射条件等因素对沉浸函数的影响, 并针对不同的纤维织物获得了其相应的沉浸函数^[14], 将沉浸函数引入纤维织物填充浸润过程中的控制方程, 编制程序实现了纤维织物非饱和和填充浸润的数值模拟。而本文研究的主要目的是在本课题组已取得的研究成果基础上进一步探讨纤维织物非饱和和填充浸润特性, 运用本课题组开发的计算程序讨论在恒压及恒流下流体黏度, 及恒定黏度下注射口压力、注射口流量对 LCM 工艺中纤维织物非饱和和填充浸润的影响。

1 纤维织物非饱和和填充浸润数值模拟理论

现有研究表明 LCM 工艺中纤维织物非饱和和填充浸润现象是由纤维织物双尺度多孔特性引起

收稿日期: 2015-11-25; 录用日期: 2016-02-24; 网络出版时间: 2016-03-17 10:55

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20160317.1055.002.html

通讯作者: 晏石林, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为复合材料力学。 E-mail: yanshl507@126.com

引用格式: 李永静, 晏石林, 严飞, 等. 注射条件对 LCM 工艺非饱和和流动特性影响[J]. 复合材料学报, 2016, 33(11): 2688-2697.

LI Y J, YAN S L, YAN F, et al. Influences of injection conditions on unsaturated flow characteristic of LCM process[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2016, 33(11): 2688-2697 (in Chinese).

的^[15-16]。在一定压力作用下, 树脂一部分流入孔隙较大的宏观孔隙, 一部分流入孔隙较小的微观孔隙。在浸润过程中, 纤维束间宏观孔隙中的流动主要由模具中压力控制, 而纤维束内微观孔隙中的流动主要由毛细压力控制。当纤维束内毛细压力高于纤维预制件中宏观孔隙中压力时, 纤维束间宏观流动滞后于纤维束内微观流动, 即宏观流动前沿滞后于微观流动前沿; 当纤维束内毛细压力低于纤维预制件中宏观孔隙中压力时, 纤维束内微观流动滞后于纤维束间宏观流动, 即微观流动前沿滞后于宏观流动前沿。当树脂在纤维束内及纤维束间流动不一致时, 在宏观上就表现为未完全浸润的非饱和流动。实际工艺操作中, 构件模腔注射口处的压力一般多高于毛细压力, 因此仅讨论纤维束内微观流动前沿滞后于纤维束间宏观流动前沿的情况。该情况下的非饱和流动现象多是由于在流动过程中, 纤维束内未完全浸润, 树脂会源源不断地从已经填充浸润的纤维束间流入纤维束内, 直到纤维束内孔隙被流体完全填满, 纤维束内微观流动示意图如图 1 所示。其物理含义表现为流体力学中的汇。数值模拟纤维预制件成型过程时, 宏观流动的连续性方程中流体的质量将不再守恒, 因此需在控制方程的右边引入沉浸函数, 表示从纤维束间隙流入纤维束内部的流体。

沉浸函数的物理含义是单位体积内, 流入纤维束内流体的体积流量, 可用物理量 R 来表示。其数值大小与纤维束间隙内流体流动速度(或流入纤维束内的体积流量)有关:

$$R = \frac{1}{V} \int_{A_{gt}} \mathbf{v}_{gap} \cdot \mathbf{n}_{gt} dA = \frac{Q_{in}}{V} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{v}_{gap}$ 为纤维束间隙内流体速度; $\mathbf{n}_{gt}$ 为纤维束表面法向量; A_{gt} 为计算区域内纤维束与纤维束间间隙的交界面面积; A 为计算区域的面积; V 为计算区域的总体积; Q_{in} 为流入纤维束内的流体体积

流量总和。由式(1)可知, 沉浸项 R 与单位体积内流入纤维束内的流量相关。将沉浸函数引入不可压缩牛顿流体流动的微分形式连续性方程可得纤维束间填充浸润流动的控制方程为

$$\nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{K}_{macro}}{\mu} \nabla \mathbf{P}_{gap} \right) = R \quad (2)$$

式中: $\mathbf{K}_{macro}$ 为纤维预制件渗透率张量; $\mathbf{P}_{gap}$ 为纤维束间隙压力; μ 为流体黏度。以上述理论为基础采用有限单元法对方程进行离散。引入权函数 φ , 则可得式(2)等效积分形式为

$$\int_{\Omega} \varphi \left[\nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{K}_{macro}}{\mu} \nabla \mathbf{P}_{gap} \right) - R \right] d\Omega = 0 \quad (3)$$

式中: Ω 为控制体体积。对式(3)进行分部积分可得

$$\int_{\Gamma} \varphi \frac{\mathbf{K}_{macro}}{\mu} (\nabla \mathbf{P}_{gap} \cdot \mathbf{n}) d\Gamma = \int_{\Omega} \left(\nabla \varphi \frac{\mathbf{K}_{macro}}{\mu} \nabla \mathbf{P}_{gap} + \varphi R \right) d\Omega \quad (4)$$

式中: $\mathbf{n}$ 为法向量; Γ 为控制体表面边界。引入形函数 M_i , 则单元压力 $\mathbf{P} = \sum P_i M_i$, $\varphi_i = M_i$, 将形函数及节点压力代入式(4)可知在每个单元上有

$$\int_{\Gamma} M_i \frac{\mathbf{K}_{macro}}{\mu} (\mathbf{P}_{gap} \cdot \mathbf{n}) d\Gamma = \left[\int_{\Omega} \left(\nabla M_i \frac{\mathbf{K}_{macro}}{\mu} \nabla M_j + M_i R \right) d\Omega \right] P_i \quad (5)$$

则对整个求解域有

$$\mathbf{AP} = \mathbf{B} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \sum \int_{\Omega} \left(\nabla M_i \frac{\mathbf{K}_{macro}}{\mu} \nabla M_j + M_i R \right) d\Omega \\ \mathbf{B} = \sum \int_{\Gamma} M_i \frac{\mathbf{K}_{macro}}{\mu} (\nabla \mathbf{P}_{gap} \cdot \mathbf{n}) d\Gamma \end{cases} \quad (7)$$

同时采用控制体法^[17-19]追踪数值模拟过程中纤维织物非饱和流动时的流动前沿。引入填充系数 f_i (与每个控制体相关的节点参数) 来表征控制体的填充情况, 其数值大小为树脂体积与原控制体内孔隙体积的比值, 即

$$f_i = V_r / (\epsilon V_i) \quad (8)$$

式中: V_i 为控制体体积; ϵ 为预制件孔隙率; V_r 为控制体中填充的树脂体积, 表征树脂对控制体的浸润程度。若控制体为空: $f = 0$; 若流动前沿正流经控制体: $0 < f < 1$; 若控制体被完全填满: $f = 1$ 。则

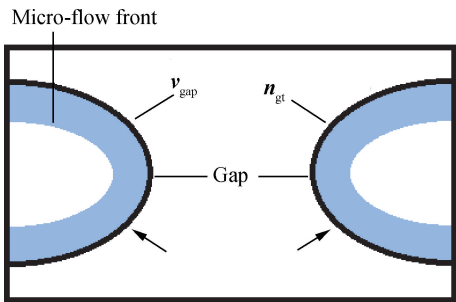


图 1 纤维束内微观流动示意图

Fig. 1 Micro-flow schematic within fiber bundle

控制体 i 的体积流量可为

$$Q_i = \int_{\Gamma_{cv}} -(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) d\Gamma_{cv} = \sum_k \int_{\Gamma_k} -(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) d\Gamma_k \quad (9)$$

式中: Γ_{cv} 为控制体的边界; Γ_k 为控制体的第 k 个边界; $\mathbf{v}$ 为流入控制体 i 的速度, 则控制体完全填满的时间 (Δt_i) 为

$$\Delta t_i = (1 - f_i) \epsilon V_i / Q_i \quad (10)$$

在采用上述非饱和流动理论实现纤维预制件非饱和流动浸润模拟时, 需获得纤维织物非饱和和填充浸润过程中的沉浸效应强度, 即纤维织物内的沉浸函数。沉浸函数表示单位时间内流入单位体积纤维束内流量, 可知沉浸函数与纤维束内的浸润饱和度有关。为推导沉浸函数引入物理量饱和度 S_{tow} 表示填充浸润过程中纤维束内孔隙体积的变化。当 $S_{tow} = 1$ 时, 表明纤维束内孔隙被流体完全填满; 当 $0 < S_{tow} < 1$ 时, 表明纤维束内孔隙未被流体完全填满, 正在填充; 当 $S_{tow} = 0$ 时表明纤维束内孔隙还未被填充。其数学关系式为

$$\dot{S}_{tow} = dS_{tow} / d\tau = Q_{in} / (\epsilon_{tow} V_{tow}) \quad (11)$$

式中: V_{tow} 为纤维束体积; Q_{in} 为流入纤维束内的体积流量, 又因 $dS_{tow} / d\tau = (dS_{tow} / dt) t_{in}$, τ 为无量纲时间。恒压下纤维束内孔隙被完全填充浸润的时间 t_{in} 与间隙内流体的压力 P_{gap} 、流体的黏度 μ 、纤维束内孔隙率 ϵ_{tow} 、纤维束体积 V' 及渗透率 K_{micro} 有关, 可表示为

$$t_{in} = \Phi(P_{gap}, \mu, \epsilon_{tow}, V', K_{micro}) \quad (12)$$

将式(12)引入沉浸函数可得

$$\begin{aligned} R &= \frac{\epsilon_{tow} V_{tow}}{V} \frac{dS_{tow}}{dt} \\ &= \frac{\epsilon_{tow} (1 - \epsilon_{gap})}{t_{in}} \frac{dS_{tow}}{d\tau} \\ &= \frac{\epsilon_{tow} (1 - \epsilon_{gap})}{\Phi(P_{gap}, \mu, \epsilon_{tow}, V', K_{micro})} \frac{dS_{tow}}{d\tau} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: ϵ_{gap} 为纤维束间孔隙率。以三向缝合纤维织物为例, 通过其周期性单胞填充浸润的数值模拟获得三向缝合纤维织物非饱和和填充浸润过程中的沉浸函数^[14]为

$$R = \epsilon_{tow} (1 - \epsilon_{gap}) \frac{P_{gap}}{a\mu} a_1 (e^{a_2(a_3 - S_{tow})^{a_4}} - 1) \quad (14)$$

式中: 系数取值为 $a = 6.465 \times 10^6$, $a_1 = 21.145\ 43$, $a_2 = 3.395\ 3$, $a_3 = 1$, $a_4 = 1.001\ 73$ 。将该沉浸函数代入式(6)、式(7)并结合相应的计算模型及边界条件即可实现纤维织物非饱和和填充浸润的数值模拟并讨论各因素对非饱和和填充浸润的影响。

2 纤维织物非饱和和填充浸润数值模拟

2.1 非饱和和填充浸润计算模型及可靠性验证

依据非饱和和填充浸润理论将以 $0^\circ/\pm 45^\circ$ 玻璃纤维织物一维单向流动模型为例, 首先验证数值模拟结果的可靠性, 其次分析不同因素对纤维织物非饱和和填充浸润的影响。纤维织物一维单向流动数值模拟计算模型如图 2 所示, $0^\circ/\pm 45^\circ$ 玻璃纤维织物非饱和和填充浸润数值模拟初始参数如表 1 所示。

当计算模型进口压力为 70 kPa, 流体黏度为 0.059 Pa·s 时纤维织物内非饱和区域长度及不同测点处压力分布如图 3~图 5 所示。图 3 为实验浸润过程中纤维织物内某时刻非饱和区域长度。该时刻下测得非饱和区域的长度沿流动截面并非保持不变, 其最大约为 0.032 m, 最小约为 0.01 m, 而相同条件下数值模拟测得非饱和区域长度最大为

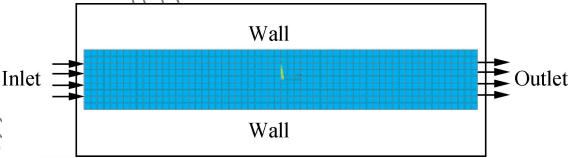


图 2 纤维织物一维单向流动数值模拟计算模型
Fig. 2 Numerical simulation calculation model of fiber fabric for one dimensional unidirectional flow

表 1 $0^\circ/\pm 45^\circ$ 玻璃纤维织物非饱和和填充浸润数值模拟初始参数

Table 1 Initial parameters of unsaturated filling and infiltration for numerical simulation of $0^\circ/\pm 45^\circ$ glass fiber fabric

Parameter	Value
Model size/m ²	0.09×0.57
Permeability of fabric/m ²	5.84×10 ⁻¹⁰
Porosity inside fiber tow, 0° direction	0.195
Porosity inside fiber tow, ±45° direction	0.233
Porosity of fabric	0.51
Porosity between fiber tows	0.38

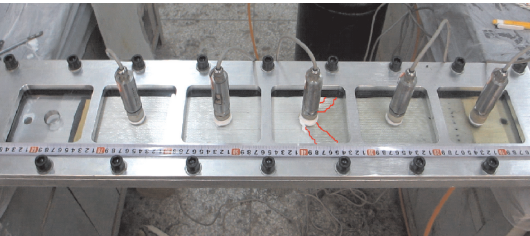


图 3 实验浸润过程中纤维织物内某时刻非饱和区域长度
Fig. 3 Unsaturated area length of fiber fabric during experiment filling and infiltration process at a given time

0.042 m, 如图 4 所示。实验结果值与数值模拟结果稍有不同, 主要是由于模具中纤维织物裁剪铺敷不均匀性, 在填充浸润过程中出现竞流效应, 流动前沿形状为曲线; 此外, 实验中纤维织物存在一定厚度, 其内部是否完全浸润, 肉眼无法判定, 在测量非饱和和区域长度时存在误差。

图 5(a) 为纤维织物中不同测点压力随填充时间变化的实验结果, 与图 5(b) 数值模拟结果相比

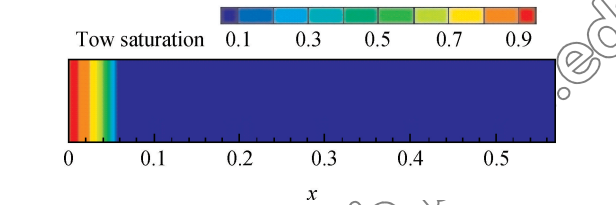


图 4 数值模拟浸润过程中纤维织物内某时刻非饱和和区域长度
Fig. 4 Length of unsaturated region of fiber fabric during numerical simulation infiltration process at a given time

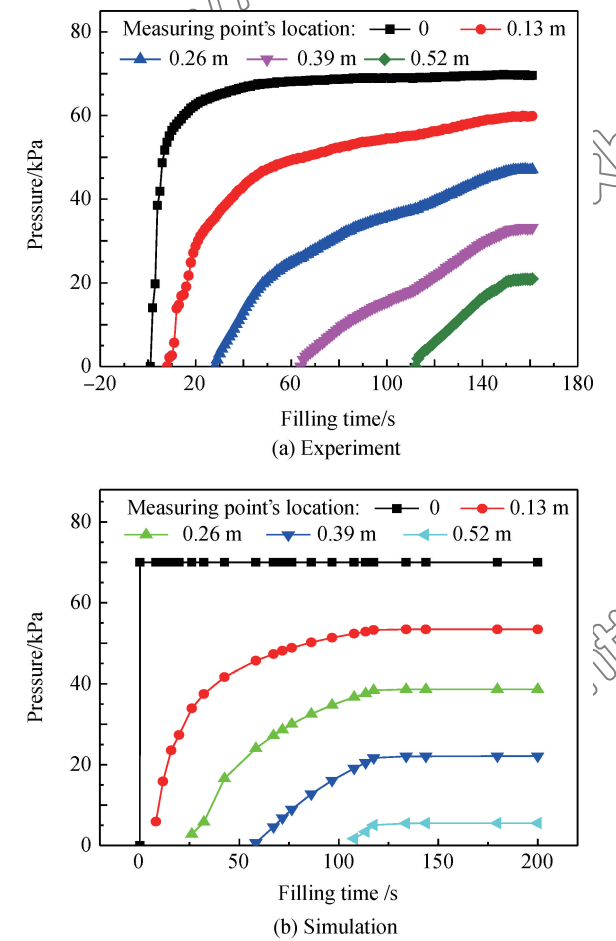


图 5 纤维织物中不同测点压力随填充时间变化的实验与数值模拟结果
Fig. 5 Experiment and numerical simulation results for pressure of different measuring points of fiber fabric with time

可知: 不同测点处压力随时间的变化与饱和理论及非饱和理论数值模拟结果几乎相同, 距离注射口越远, 压力随时间的增长越缓慢, 纤维预制件的浸润越困难。实验测得三向缝合纤维织物完全浸润时间为 161 s, 而数值模拟时间为 164.6 s。这是因为数值模拟时纤维织物的渗透率从实验获得, 渗透率值的准确性直接影响了数值模拟填充时间。但在可允许的误差范围内, 本文的数值模拟结果是可靠的, 可依据该方法分析非饱和和流动特性的影响因素。

2.2 恒压下流体黏度对非饱和和填充浸润影响

保持计算模型中进口的压力 70 kPa 不变, 流体的黏度分别为 0.02 Pa·s、0.20 Pa·s, 考察恒压下黏度对计算模型非饱和和填充浸润特性的影响。

图 6(a) 与图 6(b) 分别为注射口压力为 70 kPa, 流体黏度为 0.02 Pa·s、0.20 Pa·s 时, 纤维织物内饱和度、填充系数及非饱和区域长度随填充时间的变化曲线。填充系数代表织物内部宏观流动前

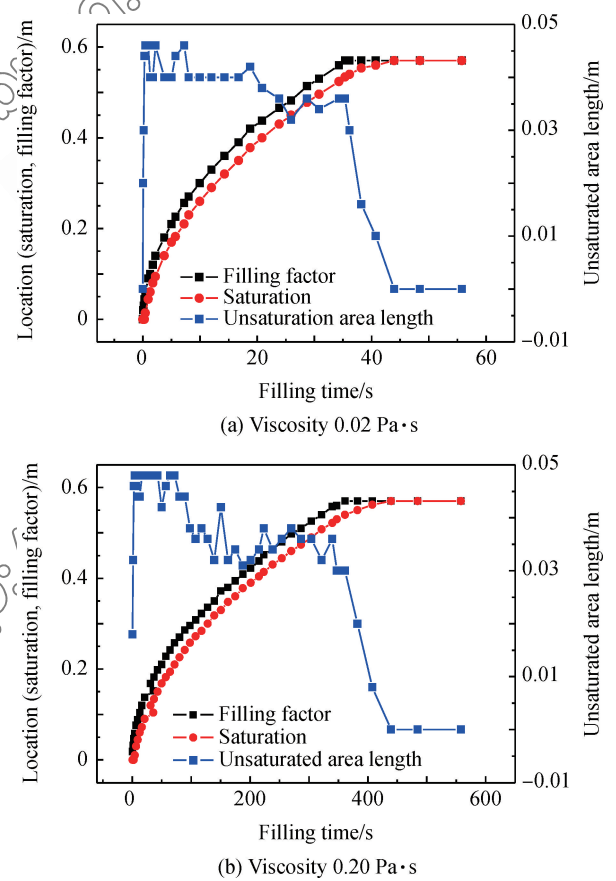


图 6 不同黏度下纤维织物内饱和度、填充系数及非饱和区域长度随填充时间的变化曲线(70 kPa)
Fig. 6 Variation curves of saturation, filling factor and unsaturated area length along filling time in fiber fabric for different viscosities(70 kPa)

沿, 纤维束饱和度代表织物内部微观流动前沿, 由变化曲线可获得相同时刻下织物内宏观流动前沿与微观流动前沿所到达位置。分析可知: 在压力为 70 kPa 时, 纤维织物非饱和和填充浸润过程中, 非饱和区域长度的变化趋势先是逐渐增大, 再在某一值附近波动, 该阶段波动较小, 可认为非饱和区域长度保持不变。当纤维织物中的填充系数全为 1 时即宏观流动前沿到达织物出口时, 非饱和长度逐渐变小直到填充浸润结束非饱和长度消失。此外, 恒定压力不同黏度下纤维织物中的非饱和区域长度最大值几乎相同, 约为 0.055 m, 所不同的是非饱和区域长度达到最大值的时间不同, 即黏度不影响填充浸润过程中非饱和区域长度最大值, 仅影响填充时间。图 7(a)与图 7(b)分别为注射口压力为 70 kPa, 流体黏度为 0.02 Pa·s、0.20 Pa·s 时, 纤维织物内压力随流动距离变化曲线。在非饱和填充浸润过程中织物中的压力并非随距离线性分布, 而是存在一个非线性分布区域。这是由于纤维束内的微观浸

润使得填充系数后方区域压力降低。此外, 在本文的数值模拟过程中未考虑毛细压力对沉浸函数的影响, 非饱和区域内压力虽表现出一定的非线性, 但黏度对其影响较小。而非饱和区域的形成与模腔内的压力分布有关, 在宏观上就表现为相同压力不同黏度下非饱和区域最大长度几乎不变。当黏度为 0.02 Pa·s 时计算模型完全填满时间为 55.76 s, 黏度为 0.2 Pa·s 时计算模型完全填满时间为 57.9 s, 黏度扩大 10 倍时, 填充时间也扩大 10 倍。

2.3 恒流下流体黏度对非饱和和填充浸润的影响

保持计算模型中进口流量 $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 不变, 流体的黏度分别为 0.02 Pa·s、0.20 Pa·s, 考察恒流下黏度对计算模型非饱和和填充浸润特性的影响。

图 8(a)与图 8(b)分别为注射口流量 $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, 流体黏度为 0.02 Pa·s、0.20 Pa·s 时, 纤维织物内饱和度、填充系数及非饱和区域长

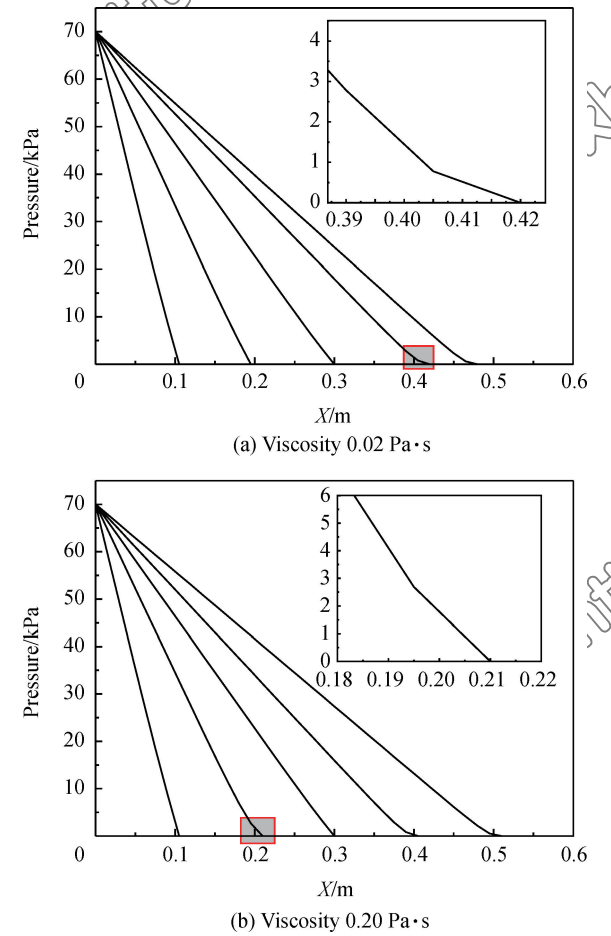


图 7 不同黏度下纤维织物内压力随流动距离变化曲线(70 kPa)
Fig. 7 Variation curves of pressure along flow distance in fiber fabric for different viscosities(70 kPa)

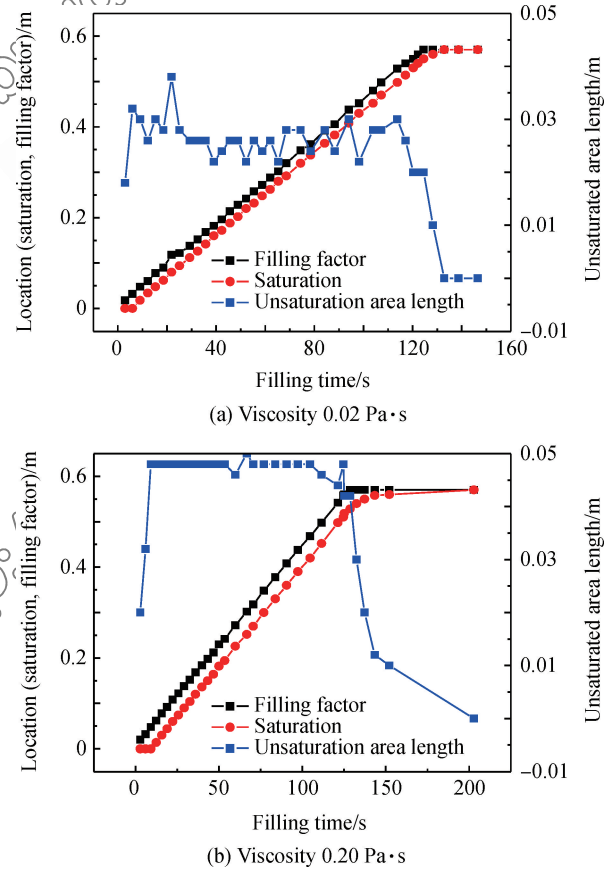
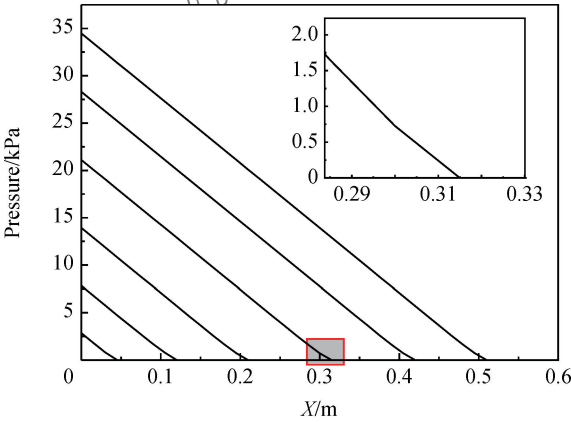
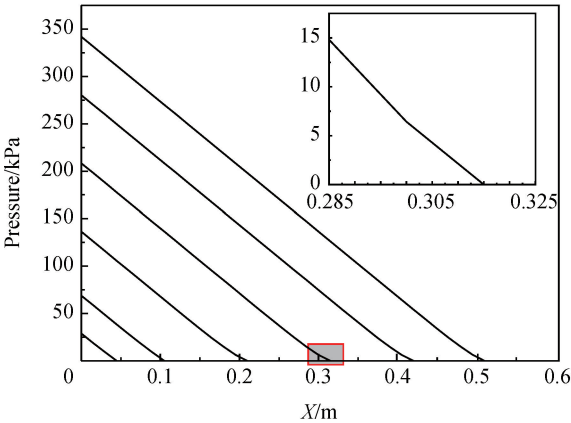


图 8 不同黏度下纤维织物内饱和度、填充系数及非饱和区域长度随填充时间变化曲线($2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)
Fig. 8 Variation curves of saturation, filling factor and unsaturated area length along filling time in fiber fabric for different viscosities ($2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)

度随填充时间变化曲线。可知在流量为 $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 的纤维织物非饱和填充浸润过程中, 非饱和长度的变化趋势同恒压下相同, 由小逐渐增大并保持不变, 当纤维织物中宏观流动前沿到达织物出口时, 非饱和长度逐渐变小直到填充浸润结束非饱和长度消失。黏度为 $0.02 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、 $0.20 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时注射口流量为 $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 时非饱和区域长度最大值分别为 0.042 m 、 0.062 m 。相同条件下, 黏度越大, 纤维织物内非饱和区域长度的最大值越大。这是因为黏度越大, 树脂浸润纤维织物越困难, 纤维束内微观浸润与纤维束间宏观浸润流动行为相差越大, 非饱和区域的长度也越大。黏度为 $0.02 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时, 纤维织物完全浸润时间为 146.6 s , 黏度为 $0.20 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时纤维织物完全浸润时间为 202.9 s , 黏度越大前沿到达相同位置的时间越长。即恒定流量下黏度不仅影响填充浸润过程中非饱和区域长度最大值, 还影响填充时间。图 9(a) 与



(a) Viscosity $0.02 \text{ Pa} \cdot \text{s}$



(b) Viscosity $0.20 \text{ Pa} \cdot \text{s}$

图 9 不同黏度下纤维织物内压力随流动距离变化曲线
($2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)

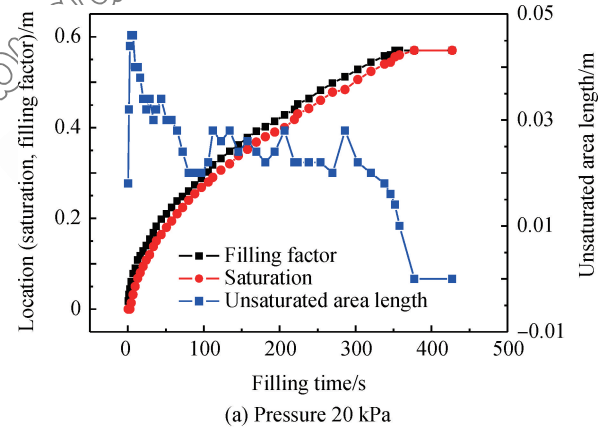
Fig. 9 Variation curves of pressure along flow distance in fiber fabric for different viscosities($2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)

图 9(b)为黏度为 $0.02 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、 $0.20 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时, 纤维织物内压力随流动距离变化曲线。可知在非饱和填充浸润过程中在宏观流动前沿后方附近同样存在一个较小的非线性分布区域。黏度越大, 非线性区域越大。

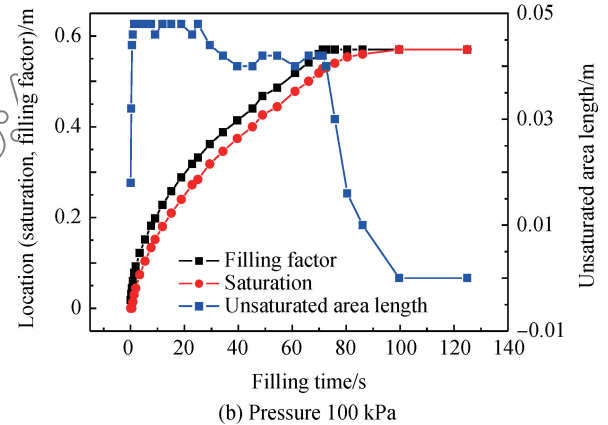
2.4 注射口压力对非饱和和填充浸润的影响

保持计算模型中流体黏度 $0.059 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 不变, 计算模型中注射口的压力分别为 20 kPa 、 100 kPa , 考察恒定黏度下注射压力对计算模型非饱和和填充浸润特性的影响。

图 10(a)与图 10(b)为黏度为 $0.059 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 注射口的压力分别为 20 kPa 、 100 kPa 时, 纤维织物内饱和度、填充系数及非饱和区域长度随填充时间变化曲线。可知在相同黏度不同注射口压力下, 纤维织物中的非饱和长度变化趋势与恒压及恒流作用下相同, 由无到有再保持恒定直到填充浸润结束逐渐消失。 20 kPa 作用下非饱和长度最大值约为 0.4 m , 100 kPa 作用下非饱和长度最大值约为



(a) Pressure 20 kPa



(b) Pressure 100 kPa

图 10 不同压力下纤维织物内饱和度、填充系数及非饱和区域长度随填充时间变化曲线($0.059 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)

Fig. 10 Variation curves of saturation, filling factor and unsaturated area length along filling time in fiber fabric for different pressures ($0.059 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)

0.55 m。恒定黏度下，纤维织物内压力分布越大，非饱和区域长度最大值也越大。压力为 20 kPa 时前沿到达时间为 427.3 s，压力为 100 kPa 时前沿到达时间为 124.9 s。非饱和填充时间与注射口的压力有关，压力越大填充时间越短。恒定黏度下，注射口压力不仅影响非饱和区域长度，也影响填充时间。图 11(a)与图 11(b)分别为注射口的压力为 20 kPa、100 kPa 时，纤维织物内压力随流动距离变化曲线。结果表明注射口压力越大，织物中压力也越大，非饱和流动过程中饱和区域与非饱和区域内的压力梯度越大。

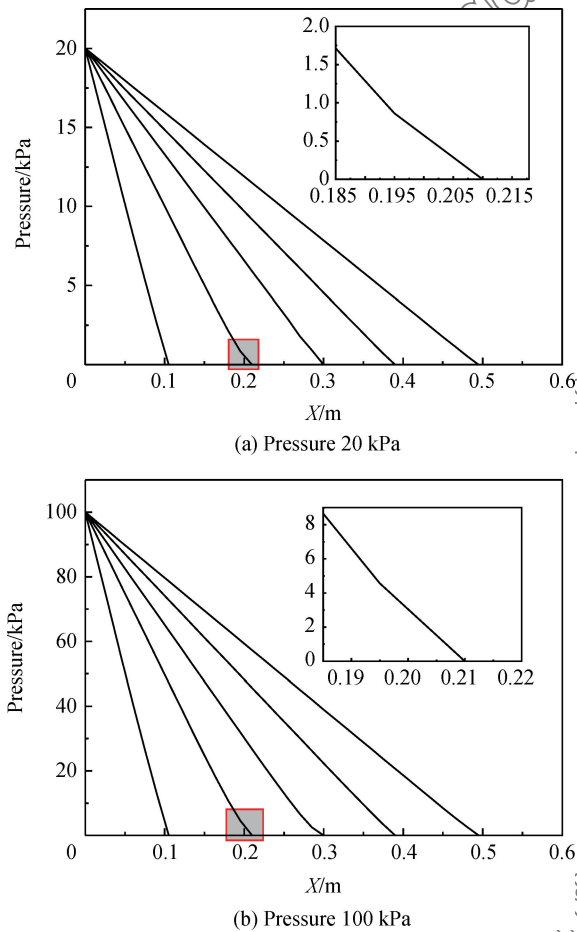


图 11 不同压力下纤维织物内压力随流动距离变化曲线
Fig. 11 Variation curves of pressure along flow distance in fiber fabric for different pressures

2.5 注射口流量对非饱和填充浸润的影响

保持计算模型中流体黏度 0.059 Pa·s 不变，计算模型中注射口流量分别为 $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ ，考察恒定黏度下注射口流量对计算模型非饱和和填充浸润特性的影响。

图 12(a)与图 12(b)为黏度 0.059 Pa·s，注射

口流量分别为 $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ 时，纤维织物内饱和度、填充系数及非饱和区域长度随填充时间变化曲线。其变化趋势与黏度及压力作用下相同由无到有再保持恒定直到填充浸润结束逐渐消失。表明在不同注射条件下纤维织物非饱和和填充浸润过程中，织物内非饱和区域长度变化趋势相同：逐渐增大—保持恒定—逐渐减小—消失 4 个阶段。 $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 作用下，纤维织物中非饱和长度最大约为 0.055 m， $1 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ 作用下纤维织物中非饱和长度最大为 0.06 m。表明恒定黏度下，注射口流量影响非饱和区域长度，但其影响不似注射口压力对非饱和长度效果明显。流量为 $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 时前沿到达时间为 174.2 s，流量为 $1 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ 时前沿到达时间为 41.97 s。流量越大，填充时间越短。

图 13(a)与图 13(b)为注射口流量分别为 $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ 时，纤维织物内压力随流

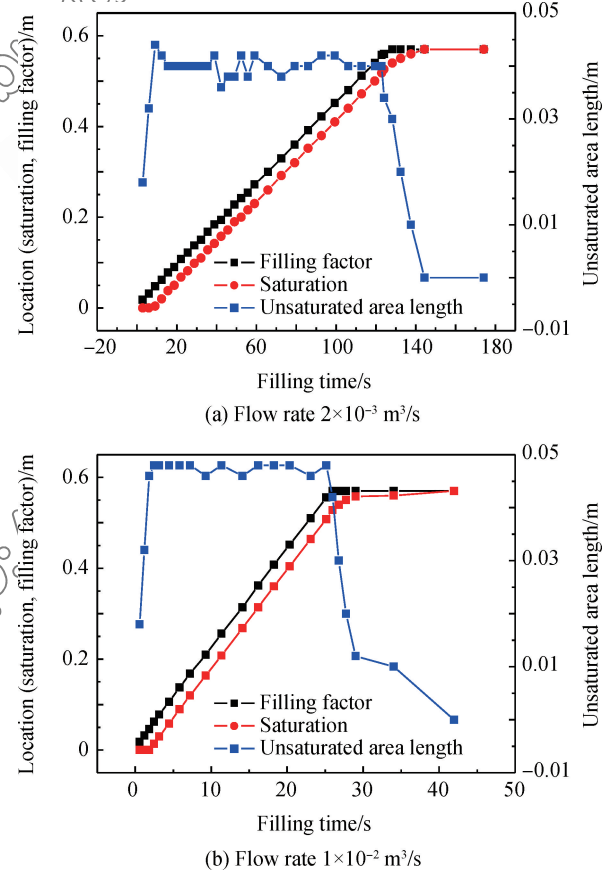


图 12 不同注射流量下纤维织物内饱和度、填充系数及非饱和区域长度随填充时间变化曲线
Fig. 12 Variation curves of saturation, filling factor and unsaturated area length along filling time in fiber fabric for different flow rates

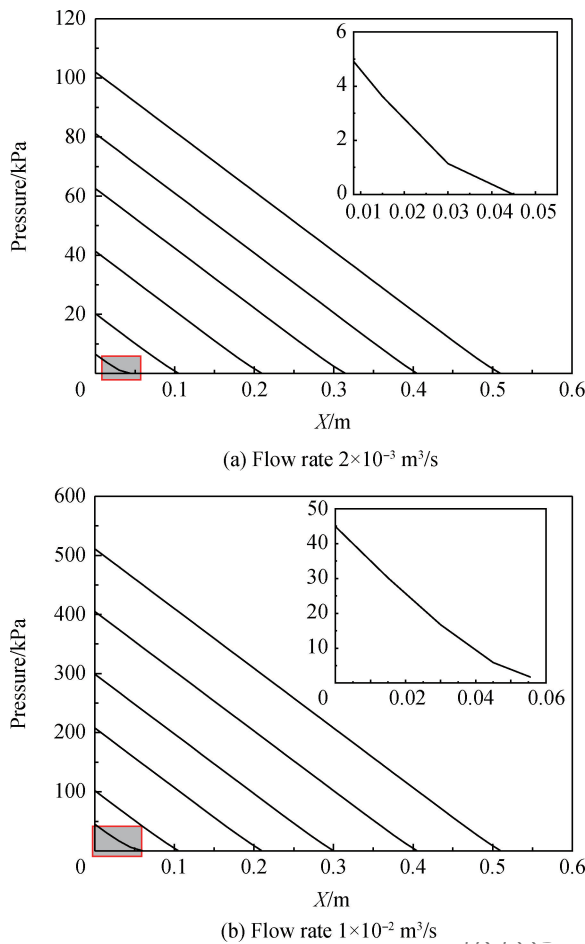


图 13 不同流量下纤维织物内压力随流动距离变化曲线
Fig. 13 Variation curves of pressure along flow distance in fiber fabric for different flow rates

动距离变化曲线。结果表明注射口流量越大, 织物中压力越大, 非饱和流动过程中饱和区域与非饱和区域内的压力梯度越大。

3 结 论

(1) 双尺度纤维织物非饱和填充浸润过程中, 纤维织物内的非饱和区域长度并非一直保持不变, 而是分为 4 个阶段。在浸润的初始阶段, 随着填充浸润的进行逐渐增大, 最后保持在一定的数值间较小的波动, 在填充结束阶段, 非饱和长度随着填充浸润的进行逐渐减小, 直到纤维织物完全浸润非饱和和长度消失。

(2) 恒定注射压力下, 浸润流体黏度对双尺度纤维织物填充浸润过程中非饱和区域长度最大值影响较小, 对填充浸润时间影响较大。浸润流体黏度越大, 纤维织物完全浸润时间也越大。

(3) 恒定注射流量下, 浸润流体黏度不仅影响双尺度纤维织物填充浸润时间, 而且影响填充浸润过程中的非饱和区域长度最大值。黏度越大, 纤维织物完全浸润时间越大, 填充浸润过程中非饱和区域长度最大值也越大。

(4) 恒定黏度下, 注射口压力和流量同时影响双尺度纤维织物填充浸润时间及非饱和区域长度最大值。注射口压力和流量越大, 纤维织物完全浸润时间越小, 填充浸润过程中非饱和区域长度最大值越大, 但注射口流量对非饱和区域长度最大值影响弱于注射口压力对非饱和长度影响。

(5) 填充浸润过程中, 注射口压力、流量及注射流体黏度对双尺度多孔纤维预制件非饱和和填充浸润特性影响结果既有共性又有不同之处, 在实际的工程应用中应合理控制上述参数使得纤维预制件充分浸润, 实现生产工艺低费高效的目的。

参考文献:

[1] 赵渠森. 先进战斗机用复合材料树脂基体[J]. 高科技纤维与应用, 2000, 25(6): 10-18.
ZHAO Q S. Resin matrix of composite for advanced military aircraft[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2000, 25(6): 10-18 (in Chinese).
[2] 拉德 C D, 朗 A C, 肯德尔 K N, et al. 复合材料液体模塑成型技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 5.
RUDD C D, LONG A C, KENDALL K N, et al. Liquid moulding technologies [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 5 (in Chinese).
[3] LEBEL F, FANAIEI A E, ÉDU R, et al. Prediction of optimal flow front velocity to minimize void formation in dual scale fibrous reinforcements[J]. International Journal of Material Forming, 2014, 7(1): 93-116.
[4] PARK C H, LEBEL A, SAOUAB A, et al. Modeling and simulation of voids and saturation in liquid composite molding processes[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42(6): 658-668.
[5] AMICO S, LEKAKOU C. Flow through a two-scale porosity, oriented fibre porous medium[J]. Transport in Porous Media, 2004, 54(1): 35-53.
[6] ZHOU F, ALMS J, ADVANI S G. A closed form solution for flow in dual scale fibrous porous media under constant injection pressure conditions[J]. Composites Science and Technology, 2008, 68(3-4): 699-708.
[7] CENDER T A, SIMACEK P, ADVANI S G. Resin film impregnation in fabric prepreps with dual length scale permeability[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013, 53(53): 118-128.

- [8] TAN H, PILLAI K M. Fast liquid composite molding simulation of unsaturated flow in dual-scale fiber mats using the Imbibition characteristics of a fabric-based unit cell[J]. *Polymer Composites*, 2010, 31(10): 1790-1807.
- [9] SIMACEK P, ADVANI S G. A numerical model to predict fiber tow saturation during liquid composite molding [J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63(12): 1725-1736.
- [10] CENTEA T, HUBERT P. Modelling the effect of material properties and process parameters on tow impregnation in out-of-autoclave preregs[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43(9): 1505-1513.
- [11] 戴福洪, 卢守舟, 杜善义. 树脂传递模塑工艺中的非饱和流动过程模拟与实验研究[J]. *复合材料学报*, 2010, 27(2): 84-89.
- DAI F H, LU S Z, DU S Y. Simulations and experiments of unsaturated flow in resin transfer molding process[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2010, 27(2): 84-89 (in Chinese).
- [12] WANG Y, GROVE S M. Modelling microscopic flow in woven fabric reinforcements and its application in dual-scale resin infusion modelling[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2008, 39(5): 843-855.
- [13] 武玉芬, 张博明. RTM的非饱和流动监测与数值模拟[C]//第十五届全国复合材料学术会议论文集. [S. l.]: [s. n.], 2008: 582-585.
- WU Y F, ZHANG B M. Numerical simulation of unsaturated flow monitoring in RTM[C]//National Conference on Composite Materials-15th proceeding. [S. l.]: [s. n.], 2008: 582-585 (in Chinese).
- [14] LEEY J, YAN S L, LEE D Q, et al. The sink term to different kind of fibrous mat during the unsaturated filling process[J]. *Applied Composite Materials*, 2015, 23(3): 239-253.
- [15] PILLAI K M. Governing equations for unsaturated flow through woven fiber mats. Part 1. Isothermal flows[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2002, 33(7): 1007-1019.
- [16] SLADE J, PILLAI K M, ADVANI S G. Investigation of unsaturated flow in woven braided and stitched fiber mats during mold-filling in resin transfer molding [J]. *Polymer Composites*, 2001, 22(4): 491-505.
- [17] 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 F H, ZHANG B M, DU S Y, et al. Comparison of the finite element/control volume method with flow analysis network technology in mould-filling simulation of RTM process [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2004, 21(2): 92-98 (in Chinese).
- [18] 江顺亮, 任燕, 梁声灼. RTM充模过程的自适应隐式控制体积法[J]. *复合材料学报*, 2005, 22(2): 91-97.
- JIANG S L, REN Y, LIANG S Z. Adaptive implicit algorithm for RTM mold filling simulation[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2005, 22(2): 91-97 (in Chinese).
- [19] 江顺亮, 万志国. RTM充模分析控制体积法的求解方法[J]. *纤维复合材料*, 2006(3): 32-35.
- JIANG S L, WAN Z G. Solving approach for control-volume method of RTM mold filling analysis[J]. *Fiber Composites*, 2006(3): 32-35 (in Chinese).

Influences of injection conditions on unsaturated flow characteristic of LCM process

LI Yongjing, YAN Shilin*, YAN Fei, BAO Rui

(School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The delayed impregnation of dual-scale porous fiber preform during unsaturated flow process presents a challenge for the molding theory and simulation method which based on the assumption that the region nearing the flow front was completely filled and the flow was saturated during the filling process. Combined with sink function, the numerical simulation of unsaturated filling and infiltration for liquid composites molding (LCM) was realized by control volume/finite element (CV/FE) method, and the validity of the results was proven by the comparison of experimental results under the constant pressure, and the influences of injection pressure, flow rate and fluid viscosity on the unsaturated filling and infiltration characteristics of dual-scale porous fabric were also discussed. The results show that the numerical results are reliable and can be used to analyze different factors' impact on unsaturated flow characteristics of dual-scale porous fiber preform within permissible error; and the length of unsaturated region isn't constant during the whole filling process in fiber fabric which experiences four stages; pressure, flow rate and viscosity have different influence on unsaturated flow characteristic; the research results have guiding significance on appropriate manipulated injection conditions and fluid characteristic to realize the fully impregnation of dual-scale porous fiber preform.

Keywords: control volume/finite element method; sink function; LCM; unsaturated flow; numerical simulation