

液体模塑成型工艺二维径向非饱和流动数值模拟

谢翔宇, 李永静, 晏石林*

(武汉理工大学 新材料力学理论与应用湖北省重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 通过引入沉浸函数建立了双尺度多孔介质非饱和流动模型, 并采用有限元/控制体积法实现了恒压及恒流注射条件下液体模塑成型(LCM)工艺二维径向非饱和流动的数值模拟, 得到了不同注射条件下纤维织物内的压力场分布及半饱和区域长度随时间的变化规律, 并将双尺度非饱和理论结果与单尺度饱和理论结果进行对比。结果表明: 非饱和流动过程中, 半饱和区域内的压力和压力梯度明显下降; 半饱和区域长度随时间逐渐增加随后保持稳定, 当流动前沿到达出口后半饱和区域长度开始逐渐减小; 当两个主方向渗透率不同时, 沿主方向半饱和区域长度也不同, 渗透率越大该方向的半饱和区域长度也越大, 纤维织物完全浸润时间取决于较小的渗透率。研究结果对合理预测树脂填充过程中压力分布及纤维预制件的浸润具有指导意义。

关键词: 液体模塑成型(LCM); 非饱和流动; 饱和理论; 半饱和区域; 二维径向流动; 数值模拟

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2018)12-3386-07

Numerical simulation of 2-dimensional radial unsaturated flow in liquid composite molding processes

XIE Xiangyu, LI Yongjing, YAN Shilin*

(Hubei Key Laboratory of Theory and Application of Advanced Materials Mechanics, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: A dual-scale unsaturated flow model was established by introducing the sink function, and the finite element/control volume method was employed to simulate numerically 2-dimensional radial flow in liquid composite molding(LCM) processes under the conditions of constant pressure and constant flow. The pressure distribution and time-varying resin flow front were obtained and compared with the results of theoretical prediction of single-scale model. The simulation results show that during unsaturated flow process, pressure and pressure gradient drop significantly in the unsaturated region; the length of unsaturated region increases firstly and then keeps constant, when the saturated flow front reaches the exit, the length begins to decrease; when there is a difference in permeability of two principal direction, the length of unsaturation region in the direction of higher permeability is longer and the time to completely infiltrate the fabric depends on the smaller permeability. The research results have significance to reasonably predict the pressure distribution and the infiltration of the fiber preform in the resin filling process.

Keywords: liquid composite molding(LCM); unsaturated flow, saturated flow theory; unsaturated region; 2-dimensional radial flow; numerical simulation

复合材料液体模塑成型技术(Liquid Composite Molding, LCM)是一种制造高性能大型复合材料构件的方法, 其工艺过程环保高效, 制件力学性能优良, 广泛应用于飞机、汽车的大型构件及风力叶片的制造中^[1-2]。LCM 工艺中树脂填充纤维的过程

中, 纤维的浸润情况直接影响着制件的最终性能^[3-4]。树脂对纤维的浸润过程通常被视为牛顿流体在单尺度多孔介质中的流动问题, 这种理论在一些特定的织物(比如短切纤维毡)中是适用的, 但是对于由纤维束编织或缝合成的纤维织物, 该饱和理

收稿日期: 2017-12-25; 录用日期: 2018-03-04; 网络出版时间: 2018-03-20 12:54

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180319.006>

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: 谢翔宇, 李永静, 晏石林. 液体模塑成型工艺二维径向非饱和流动数值模拟[J]. 复合材料学报, 2018, 35(12): 3386-3392.

XIE X Y, LI Y J, YAN S L. Numerical simulation of 2-dimensional radial unsaturated flow in liquid composite molding processes [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(12): 3386-3392 (in Chinese).

论失效。这是由于上述纤维织物的孔隙具有双尺度特性,分别为纤维束间毫米尺度的宏观孔隙和纤维束内纤维单丝之间的微米尺度的微观孔隙。这种孔隙的双尺度特性使树脂在纤维束间与纤维束内的流速难以保持一致,因此树脂的浸润区域将不再完全饱和,而是在流动前沿附近形成一个非完全浸润的半饱和区域^[5]。

目前,针对非饱和流动特性的研究主要有以下两种方法:(1)基于 Buckley-Leverett 方程直接求解两相(空气,树脂)流动模型,这种方法最初由 Pillai 等^[6]提出。之后,Chui 等^[7]采用跟踪流动前沿的方法,预测了沿渗透方向孔隙的分布情况。最近,L.Gascón 等^[8]采用此方法并引入空气的压缩性方程,建立了较准确的两相流动模型,研究了 LCM 过程中树脂饱和度的变化规律,其模拟结果与实验结果呈现出较高的一致性。(2)Parnas 等^[9]和 Pillai 等^[10]根据纤维织物结构宏观尺度与微观尺度的差异,提出用沉浸项来表示树脂向纤维束内的渗透情况,建立了双尺度流动模型。随后又有学者在双尺度模型的基础上引入了纤维束中气泡迁移或溶解的模型^[11-12]。在国内,戴福洪等^[13]、李德权^[14]、晏石林等^[15]通过纤维单胞的浸润模拟得出沉浸函数,以此建立树脂浸润的控制方程,实现了 LCM 非饱和和流动的数值模拟。

直接求解多相流方程的方法一般都要求通过实验来确定一系列参数来表述饱和度与相对渗透率的关系及压力对饱和度的影响,而采用双尺度模型引入沉浸函数可以有效避免这些复杂的实验参数给 LCM 充模模拟带来困扰^[16]。目前对于双尺度非饱和和流动的研究主要集中在一维单向流动模型,有关二维径向流动模型的研究相对较少,且主要存在以下几个问题:(1)计算沉浸项时将纤维束内的树脂浸润过程简化为一维的单向流动模型,具体来说就是在传统的控制体有限元法的基础上在每个节点附加一个杆状单元代表纤维束内的孔隙进行求解^[17-18],这种过度的模型简化在纤维织物结构普遍复杂多样的情况下必将影响沉浸项的预测精度。(2)目前多数的模拟方法都需要在纤维束间与纤维束内不同的尺度上用有限元法分别求解两套相互耦合的控制方程^[19],这种算法不仅计算成本高而且计算效率低下。

本文的沉浸项由周期性单胞填充浸润的数值模拟确定,单胞的几何模型与纤维织物的实际结构相

符,求得的沉浸函数精度较高。且在算法上仅需通过有限元法求解纤维束之间树脂流动的控制方程,纤维束内的浸润情况由有限元网格上每个节点的沉浸项直接确定。基于以上方法,本文通过数值模拟获得了不同注射条件下二维径向非饱和流动过程中纤维织物中的压力分布、流动前沿及半饱和区域长度等流动特性的变化规律,以期指导工程应用。

1 双尺度纤维织物浸润理论模型

1.1 基本求解方法

有限元/控制体积法是用于 LCM 工艺数值模拟的常用方法^[20-21]。连接单元质心和单元边界线中点将单元分割成若干个子单元,并将这些子单元分配到与之距离最近的节点上组成控制体。为了描述树脂在整个纤维织物中的流动状况,引入填充系数 f 来表示纤维束间树脂的浸润情况,其物理意义是纤维束间宏观孔隙的树脂体积分数。整个流场中所有 $f > 0$ 的节点对应的控制体即为求解域,求解域中控制体内的压力场、速度场等物理参数就该节点的物理参数表示。

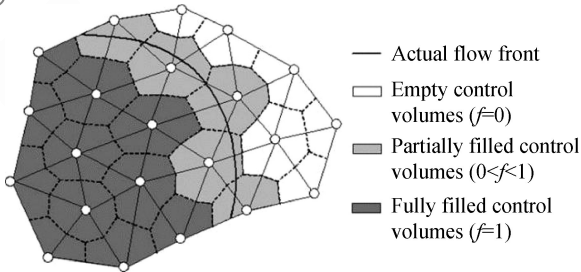


图 0 控制体积法示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of control volume method

1.2 基本控制方程

树脂浸润纤维的过程可看作不可压缩牛顿流体在多孔介质中的流动问题,树脂流速与压力的关系满足达西定律:

$$\vec{u} = -\frac{K}{\mu} \nabla p$$
 (1)

其中: $\vec{u}$ 为树脂流速; K 为渗透率张量; μ 为树脂黏度; ∇p 为压力梯度。

双尺度非饱和和流动过程中,树脂在纤维束间流动的同时也会向纤维束内渗透,因此纤维束间宏观孔隙中树脂的流动将不再满足质量守恒微分方程,而是在等式右端产生了沉浸项:

$$\nabla \cdot \vec{u} = -S$$
 (2)

其中, S 即为沉浸函数,其物理含义是单位体积内

树脂流入纤维束内的体积流量。

沉浸函数的引入使双尺度非饱和流动问题成为一个纤维束间流动与纤维束内流动相互耦合的问题。而解耦的关键就是确定能准确表示纤维束间向纤维束内渗流流量的沉浸函数。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填充浸润过程中的沉浸函数为^[15]

$$S = \epsilon_{\text{tow}} (1 - \epsilon_{\text{gap}}) \frac{P_{\text{gap}}}{a\mu} a_1 (e^{a_2(a_3 - S_{\text{tow}})^{a_4}} - 1) \tag{3}$$

其中： ϵ_{gap} 、 ϵ_{tow} 分别是纤维束间与纤维束内的孔隙率； P_{gap} 为纤维束间的压力； S_{tow} 为饱和度，表示纤维束内树脂体积分率； a 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 为拟合系数。

结合式(1)和式(3)，双尺度纤维织物中宏观流动的基本控制方程即为

$$\nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{K}}{\mu} \nabla p \right) = S \tag{4}$$

对求解域进行离散，压力场函数近似表示为

$$\mathbf{P} = \mathbf{N}^T \mathbf{p} \tag{5}$$

其中： $\mathbf{p}$ 为节点压力； $\mathbf{N}$ 为形函数矩阵。

由伽辽金加权余量法得到式(4)的等效积分弱形式如下：

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \mathbf{N} \frac{\mathbf{K}}{\mu} \nabla (\mathbf{N}^T \mathbf{P}) d\Omega \\ = \int_r \mathbf{N} \frac{\mathbf{K}}{\mu} (\nabla \mathbf{P} \cdot \vec{n}) d\Gamma - \int_{\Omega} \mathbf{N} S d\Omega \end{aligned} \tag{6}$$

将上式表示为矩阵的形式为

$$\mathbf{A} \mathbf{P} = \mathbf{F} \tag{7}$$

$$\mathbf{A} = \int_{\Omega} \nabla \mathbf{N} \frac{\mathbf{K}}{\mu} \nabla \mathbf{N}^T d\Omega \tag{8}$$

$$\mathbf{F} = \int_r \mathbf{N} \frac{\mathbf{K}}{\mu} (\nabla \mathbf{P} \cdot \vec{n}) d\Gamma - \int_{\Omega} \mathbf{N} S d\Omega \tag{9}$$

数值模拟过程中计算模型采用的边界条件如下：

恒压注射入口压力：

$$\mathbf{P} = P_{\text{in}} \tag{10}$$

其中， P_{in} 为入口入压力。

恒流注射入口流量：

$$\int_{\Gamma_{\text{in}}} \vec{n} \cdot \frac{\mathbf{K}}{\mu} \nabla \mathbf{P} ds = Q \tag{11}$$

式中： Q 为注射口流量； Γ_{in} 为注射口边界。

流动前沿压力：

$$\mathbf{P} = P_{\text{out}} \tag{12}$$

其中， P_{out} 为出口处压力。

1.3 求解算法

在计算压力场时，方程中同时包含压力及饱和度两个未知变量，需要采用迭代的方法求解，具体迭代步骤如下：(1)第一步迭代参数(压力场、填充系数、饱和度等)由初始条件给出，之后每一步的初始迭代参数为上一时间步迭代得到的参数。(2)确定计算域内所有填充系数或饱和度不为 1 的控制体，根据初始压力场计算速度场，求得充满每一个控制体宏观孔隙与微观孔隙所需要的时间，为提高计算精度与速度确保每个时间步只填满一个节点的宏观或微观孔隙，取宏观与微观流动前沿时间步中较小者作为最终迭代时间步 Δt 。(3)在 Δt 时间步内更新饱和度，并由式(3)求出沉浸函数。(4)将沉浸函数代入式(7)计算出新的压力场，并判断新压力场是否满足要求，若不满足则再次迭代，直至满足要求为止。(5)根据新的压力场求解速度场，并求出每个控制体在 Δt 时间步内的流量，得到新的填充系数，重复整个迭代过程至所有控制体的饱和度都等于 1，求解结束。

2 纤维织物二维径向流动数值算例

依据上述求解思想，本文建立的二维径向流动模型如图 2 所示。该模型为内半径为 0.015 m、外半径为 0.3 m 的四分之一圆盘形预制体，网格划分如图 2 所示，其中单元数为 1 216，节点数为 660。计算过程中模型参数如表 1 所示。

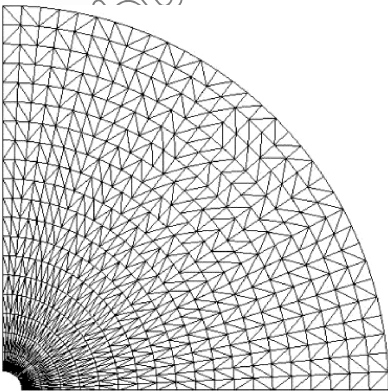


图 2 纤维织物二维径向流动数值模拟计算模型网格示意图
Fig. 2 Mesh diagram of numerical simulation model of fiber fabric for 2-dimensional radial flow

2.1 恒压力注射

恒压注射时，计算模型注射口的压力为 70 kPa。在不考虑边缘效应及毛细效应时，单尺度饱和模型流动前沿半径 R 与时间 t 的关系及压力场

表 1 纤维织物非饱和和填充浸润数值模拟浸润参数

Table 1 Parameters of unsaturated filling for numerical simulation of fiber fabric	
Parameter	Value
Permeability/ m^2	5.84×10^{-10}
Porosity of fabric	0.38
Porosity between fiber tows	0.23
Viscosity/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$	0.059

的分布满足^[22-23]:

$$t = \frac{\epsilon K}{K P_{in}} \left\{ \frac{R_{in}^2}{2} \ln \left(\frac{R}{R_{in}} \right) - \frac{R^2}{4} + \frac{R_{in}^2}{4} \right\} \quad (13)$$

$$P = P_{in} - \frac{P_{in} - P_{out}}{\ln \left(\frac{R_{out}}{R_{in}} \right)} \ln \left(\frac{R}{R_{in}} \right) \quad (14)$$

其中: ϵ 为纤维孔隙率; K 为纤维渗透率; R_{in} 为注射口半径; R_{out} 为出口半径。

针对纤维织物的双尺度特性, 分别用非饱和和流动前沿与饱和流动前沿来表示树脂在纤维束间与纤维束内的流动状态。如图 3 所示, 非饱和和流动前沿的树脂饱和度为 0, 而饱和流动前沿的树脂饱和度为 1, 树脂饱和度在 0 到 1 之间的区域即为半饱和区域。可以看出, 当两个主方向渗透率相同时, 树脂浸润区域呈扇形扩散。由此得到饱和流动和非饱和流动半径随时间变化曲线如图 4 所示, 及压力场随流动半径变化曲线如图 5 所示。

分析可知, 纤维织物的整个浸润过程分为 3 个阶段: (1) 在填充的初始阶段, 织物中的压力梯度较大, 注射口附近纤维束间与纤维束内的孔隙被树脂快速浸润, 非饱和流动现象并不明显。这一阶段压力场、非饱和流动前沿半径的数值解与单尺度模

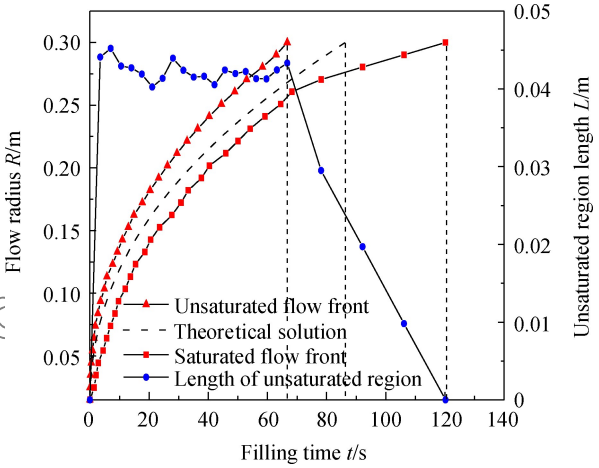


图 4 恒压条件下纤维织物内流动半径与半饱和区域长度随时间变化曲线

Fig. 4 Variation curves of the flow radius and the length of unsaturated region vs. filling time in fiber fabric for constant pressure

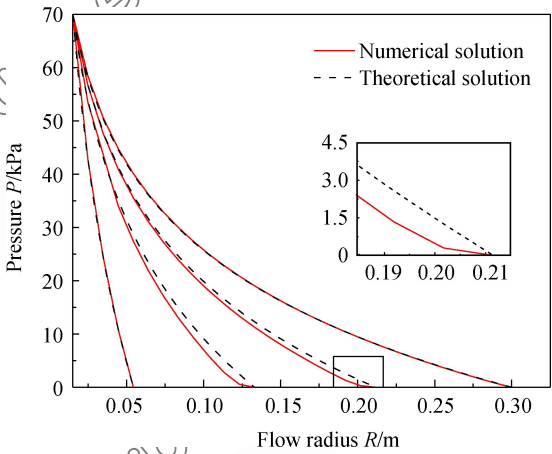


图 5 恒压条件下纤维织物内压力随流动半径变化曲线

Fig. 5 Variation curves of pressure along the radius of flow in fiber fabric for constant pressure

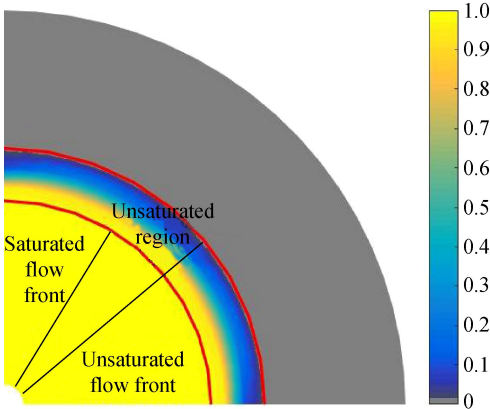


图 3 数值模拟浸润过程中纤维织物内某时刻饱和度云图
Fig. 3 Saturation contour of fiber fabric during numerical simulation infiltration process at a given time

型预测结果基本吻合。(2) 随着填充的进行, 流动前沿逐渐推进, 饱和流动前沿与非饱和流动前沿两条曲线纵向的差值不断增大, 在较短的时间内半饱和区域达到一个稳定的状态, 半饱和区域长度在小范围内波动, 这与一维单向非饱和流动中半饱和区域长度的变化趋势基本相同^[20, 24]。在这一阶段, 受沉浸效应影响, 半饱和区域内的压力出现了明显的下降, 但是饱和区域的压力梯度略有提高, 这是由于树脂在纤维束间流动的同时需要更大的流量来渗入纤维束内的孔隙, 纤维束间整体流速较快, 导致非饱和和流动前沿曲线位于单尺度模型预测曲线的上方, 即非饱和和流动前沿快于单尺度理论预测前

沿。双尺度模型非饱和流动前沿到达时间为 66.7 s, 单尺度模型流动前沿到达时间为 86.3 s。(3)在树脂填充的最后阶段, 非饱和流动前沿已经到达制件末端, 纤维织物内所有的宏观孔隙都被树脂填满。此时半饱和区域开始慢慢减小, 饱和流动曲线斜率也基本保持稳定, 树脂在较低的压力作用下需要很长一段时间来浸润其后方的半饱和区域, 整个填充时间约为 120.2 s。

2.2 恒流率注射

恒流注射时, 注射口树脂的流速为 0.015 m/s。同理, 恒流注射情况下, 流动前沿半径随时间的变化关系及注射口压力随流动前沿半径变化关系分别为^[23]

$$R(t) = \left(\frac{Qt}{\pi\epsilon} + R_{in}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \tag{15}$$

$$P_{in} = \frac{\mu Q}{2\pi K} \ln \frac{R}{R_{in}} \tag{16}$$

其中, Q 为注射流量。

图 6 为恒流注射时注射口压力-时间曲线。数值模拟时, 双尺度非饱和理论所得的压力-时间曲线一直处于与单尺度模型理论预测曲线下方, 这与 Pillai 等^[25]的实验及数值模拟结果相符。从非饱和流动的机制分析, 树脂在纤维束间流动的同时也会向纤维束内渗透, 当纤维束间的流速相同时, 双尺度非饱和流动模型所需要的注射压力相对单尺度模型较小, 沉浸函数越大, 这种差异越明显。

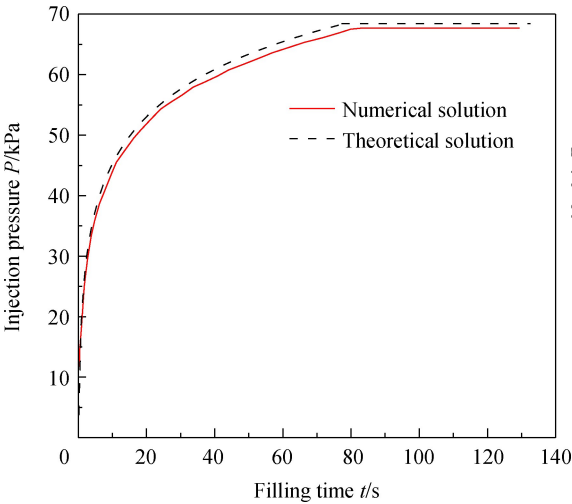


图 6 恒流条件下注射口压力随时间变化曲线

Fig. 6 Variation curves of the inlet pressure vs. filling time for constant flow

图 7 为恒流注射条件下流动半径随时间变化曲线。图中饱和流动前沿半径与非饱和流动前沿半径随时间的变化趋势与恒压注射条件基本一致。在相同的注射流量下, 非饱和流动模型纤维束间树脂会向纤维束内渗透, 因此非饱和流动半径曲线位于单尺度模型预测值下方, 即单尺度理论预测前沿略快于非饱和流动前沿, 并没有出现恒压情况下偏离较大的情况。

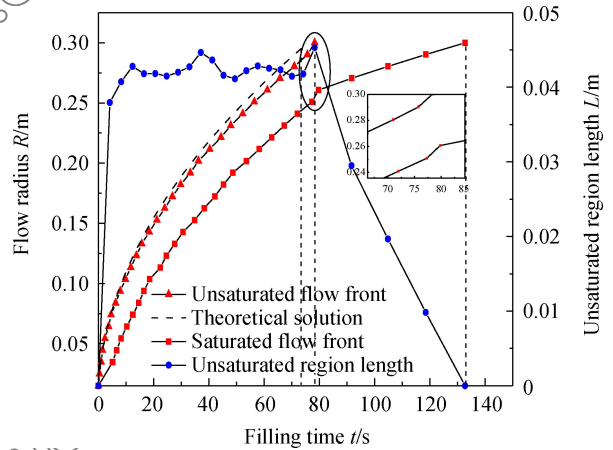


图 7 恒流条件下纤维织物内流动半径与半饱和区域长度随时间变化曲线

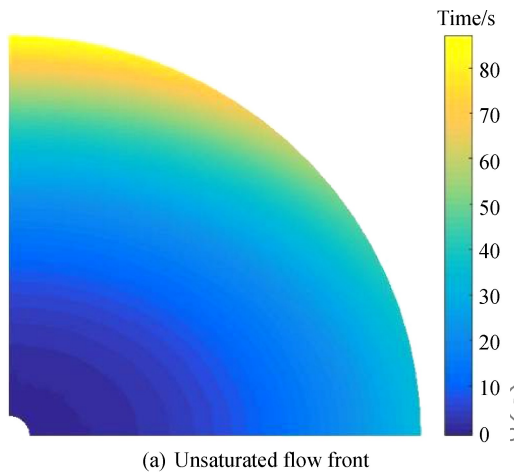
Fig. 7 Variation curves of the flow radius and the unsaturated region length vs. filling time in fiber fabric for constant flow

值得注意的是, 不论是恒压注射还是恒流注射, 在填充的初始阶段, 随着注射时间的增加, 流动前沿逐渐向前推进, 浸润区域的压力梯度不断降低, 饱和流动半径曲线与非饱和流动半径曲线的斜率随着时间的增加呈现出不断减小的趋势。但是在浸润后期, 如图 7 局部放大图所示, 二者的斜率会有明显的小幅度上升。这是由于当非饱和流动前沿到达出口时, 半饱和区域开始逐渐变小, 沉浸效应的影响逐渐削弱, 半饱和区域的压力梯度和压力都将逐渐增加趋近于饱和流动。根据达西定律, 压力梯度上升, 纤维束间流速加快, 非饱和流动曲线斜率增加; 而根据沉浸函数的式(3), 纤维束间压力上升, 单位时间内流入纤维束内的流量增加, 饱和流动曲线斜率也相应增加。

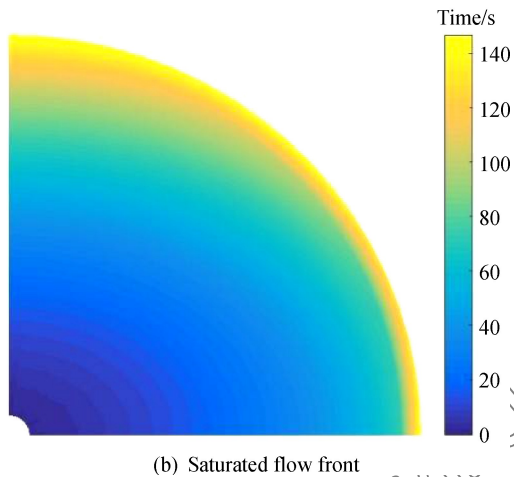
2.3 渗透率对非饱和浸润的影响

为考虑渗透率对非饱和流动特性的影响, 将横向渗透率设为纵向渗透率的二分之一, 其他参数保持不变, 以恒压注射为例。

当两个主方向渗透率不同时, 树脂流动前沿的形状由圆形变为椭圆形, 非饱和流动和饱和流动前



(a) Unsaturated flow front



(b) Saturated flow front

图 8 恒压条件下渗透率各向异性纤维织物内流动前沿时间云图
Fig. 8 Contours of the flow front with filling time in permeability anisotropy fiber fabric for constant pressure

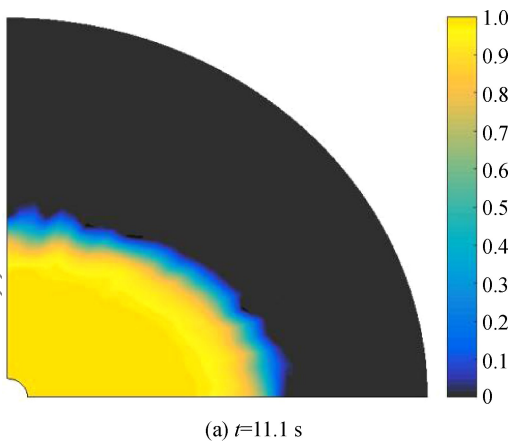
沿时间云图如图 8(a)和图 8(b)所示,两种前沿到达时间分别为 88.5 s 和 146.7 s,与 2.1 节中渗透率相同时的模拟结果相比较,可知树脂完全浸润的时间取决于渗透率较小的方向。

图 9(a)和图 9(b)分别为填充时间为 11.1 s 和 33.7 s 时的饱和度分布云图。当两个主方向渗透率不同时,半饱和区域的分布也是不均匀的,渗透率大的方向半饱和区域也相对较大。

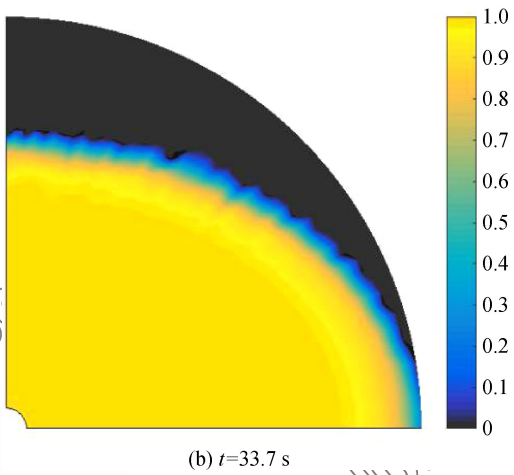
3 结 论

(1) 通过引入沉浸函数建立了双尺度多孔介质二维非饱和和流动模型,采用有限元/控制体法完成了液体模塑成型(LCM)工艺二维径向非饱和和流动的数值模拟。

(2) 非饱和流动模型中的压力分布与单尺度饱和流动的压力理论预测解对比结果表明,恒压注射条件下,半饱和区域内的压力与压力梯度相较于单



(a) $t=11.1\text{ s}$



(b) $t=33.7\text{ s}$

图 9 恒压条件下渗透率各向异性纤维织物不同时刻饱和度云图
Fig. 9 Saturation contour at different time in permeability anisotropy fiber fabric for constant pressure

尺度模型有明显下降,恒流注射条件下,非饱和流动的注射口压力小于单尺度模型理论预测值。

(3) 非饱和流动模型中半饱和区域的发展经历了 3 个阶段,在注射的初始阶段,半饱和区域长度在短时间内迅速增大,随后基本保持稳定,当非饱和流动前沿到达模型出口时,半饱和区域长度开始逐渐减小直至消失。

(4) 非饱和流动模型中流动前沿与单尺度饱和流动的理论预测流动前沿对比表明,恒压注射条件下,非饱和流动前沿快于单尺度理论预测前沿;恒流注射条件下,单尺度理论预测前沿略快于非饱和流动前沿。当半饱和区域开始减小时,非饱和流动前沿与饱和流动前沿流动速度会有小幅度的上升。

(5) 当纤维织物两个主方向渗透率不同时,渗透率较大方向的半饱和区域较长,纤维织物完全浸润的时间取决于渗透率较小的方向。

参考文献:

- [1] 仲伟虹, 梁志勇, 张佐光, 等. RTM 工艺及其在我国航空工业的应用前景[J]. 材料工程, 1995(1): 9-11.
ZHONG W H, LIANG Z Y, ZHANG Z G, et al. RTM and the application prospect of RTM in aviation industry[J]. Journal of Materials Engineering, 1995(1): 9-11 (in Chinese).
- [2] 景新荣, 刘向丽, 苏霞. RTM 成型工艺技术应用及加工工艺性研究浅析[J]. 橡塑技术与装备, 2015(24): 132-135.
JING X R, LIU X L, SU X. Application and processing technology research of RIM molding process[J]. Plastics Technology and Equipment, 2015(24): 132-135 (in Chinese).
- [3] 冯武. RTM 工艺缺陷形成机理与控制方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
FENG W. Study on the defects formation mechanism and control methods in resin transfer molding[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005 (in Chinese).
- [4] STEENKAMER D A, MCKNIGHT S H, WILKINS D J, et al. Experimental characterization of permeability and fibre wetting for liquid moulding[J]. Journal of Materials Science, 1995, 30(12): 3207-3215.
- [5] 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.
- [6] PILLAI K M, ADVANI S G. Modeling of void migration in resin transfer molding process[C]//American Society of Mechanical Engineers. Proceedings of the 1996 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exhibition. Atlanta: American Society of Mechanical Engineers, 1996.
- [7] CHUI W K, GLIMM J, TANGERMAN F M, et al. Process modeling in resin transfer molding as a method to enhance product quality[J]. Siam Review, 1997, 39(4): 714-727.
- [8] GASCÓN L, GARCÍA J A, LEBEL F, et al. Numerical prediction of saturation in dual-scale fibrous reinforcements during liquid composite molding[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 77: 275-284.
- [9] PARNAS R S, SALEM A J, SADIQ T A K, et al. The interaction between micro-and macro-scopic flow in RTM preforms[J]. Composite Structures, 1994, 27(1-2): 93-107.
- [10] 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.
- [11] PATEL N, LEE L J. Effects of fiber mat architecture on void formation and removal in liquid composite molding[J]. Polymer Composites, 1995, 16(5): 386-399.
- [12] PARK C H, WOO L. Modeling void formation and unsaturated flow in liquid composite molding processes: A survey and review[J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 2011, 30(11): 957-977.
- [13] 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).
- [14] 李德权. 双尺度孔隙纤维织物中树脂流动的数值模拟[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
LI D Q. Simulation of resin flow in dual-scale porous fiber fabrics[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015 (in Chinese).
- [15] LEE Y J, YAN S L, LEE D Q, et al. The sink term to different kinds of fibrous mat during the unsaturated filling process[J]. Applied Composite Materials, 2015, 23(3): 1-15.
- [16] MICHAUD V R. A review of non-saturated resin flow in liquid composite moulding processes[J]. Transport in Porous Media, 2016, 115(3): 581-601.
- [17] 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.
- [18] LAWRENCE J M, NEACSU V, ADVANI S G. Modeling the impact of capillary pressure and air entrapment on fiber tow saturation during resin infusion in LCM[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009, 40(8): 1053-1064.
- [19] 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 & Manufacturing, 2008, 39(5): 843-855.
- [20] 陈晓江, 徐文彬, 晏石林, 等. 恒压下树脂在双尺度多孔介质中的流动特性[J]. 复合材料学报, 2012, 29(4): 63-68.
CHEN X J, XU W B, YAN S L, et al. Characteristics of resin flow at constant pressure in dual-scale porous media[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(4): 63-68 (in Chinese).
- [21] 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).
- [22] 史德军, 冉红, 胡福增, 等. RTM 二维径向流动模型的理论概况及研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2004(3): 38-41.
SHU D J, LU H, HU F Z, et al. Survey and study on model of 2-dimension radial flow in RTM[J]. Fiber Reinforced Plastics Composites, 2004(3): 38-41 (in Chinese).
- [23] MOHAN R V, NGO N D, TAMMA K K. On a pure finite-element-based methodology for resin transfer molds filling simulations[J]. Polymer Engineering & Science, 1999, 39(1): 26-43.
- [24] 李永静, 晏石林, 严飞, 等. 注射条件对 LCM 工艺非饱和流动特性影响[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 Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(11): 2688-2697 (in Chinese).
- [25] PILLAI K M, ADVANI S G. Numerical simulation of unsaturated flow in woven fiber preforms during the resin transfer molding process[J]. Polymer Composites, 1998, 19(1): 71-80.