

# 基于混合网格方法的 VARTM 工艺 充模仿真与实验验证

杨波<sup>\*1</sup>, 王时龙<sup>1</sup>, 毕凤阳<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 黑龙江工程学院 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对 VARTM 工艺的特点, 建立了充模过程树脂流动和预成型体变形行为数学模型。提出了基于混合网格方法的 VARTM 充模仿真算法, 在该算法中, 模具型腔几何模型进行二维或三维网格划分, 在每个真空袋表面单元上增加一个一维附属单元, 用于在仿真过程中实时地吸收或挤出因真空袋变形而产生的局部树脂体积变化, 形成混合网格仿真模型; 求解过程中, 对树脂流动和预成型体变形分别进行求解后, 基于上述混合网格模型进行两者耦合操作, 实现了仿真精度和速度的统一。搭建了 VARTM 充模实验平台, 进行了一维充模实验, 通过仿真结果与实验测量结果对比, 验证了本文算法的正确性。最后, 通过三维仿真算例, 验证了算法对三维复杂结构和顺序浇口策略仿真的可行性。

**关键词:** 真空辅助树脂传递成型; 充模过程; 混合网格; 数值模拟; 实验验证

**中图分类号:** TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2017)08-1736-09

## Simulation and experimental validation for the mold-filling process of VARTM based on mixed grid approach

YANG Bo<sup>\*1</sup>, WANG Shilong<sup>1</sup>, BI Fengyang<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. School of Mechatronics Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** According to the characteristics of VARTM, the mathematical models of resin flow and preform deformation during the mold filling process were built. A mold filling simulation algorithm based on mixed grid approach was proposed. In this approach, the geometry model of the mould cavity was meshed by 2D or 3D grid, and then a 1D affiliate element was added on each surface element of the vacuum bag to absorb or extrude some resin in real time caused by the vacuum bag deformation, so the mixed grid simulation model was established. During the simulation, resin flow and preform deformation were solved separately, then they were coupled using the above-mentioned mixed grid simulation model, the unity of simulation precision and velocity was achieved. A mold filling experimental platform for VARTM was built and a 1D mold filling experiment was implemented, according to the comparison between simulation and experiment results, the validity of the algorithm was verified. At last, the feasibility of the above-mentioned algorithm on 3D complex structure and sequential injection strategy was validated by 3D simulation example.

**Keywords:** VARTM; mold filling process; mixed grid; numerical simulation; experimental validation

收稿日期: 2016-09-05; 录用日期: 2016-10-26; 网络出版时间: 2016-11-15 15:50

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20161115.1550.016.html

基金项目: 国家自然科学基金(51605057); 重庆市基础与前沿研究计划(cstc2016jcyjA0456); 中国博士后科学基金(2016M600721); 黑龙江省自然科学基金(E2015027)

通讯作者: 杨波, 博士, 讲师, 研究方向为复合材料数字化设计制造一体化技术 E-mail: yangbo61@cqu.edu.cn

引用格式: 杨波, 王时龙, 毕凤阳. 基于混合网格方法的 VARTM 工艺充模仿真与实验验证[J]. 复合材料学报, 2017, 34(8): 1736-1744.  
YANG Bo, WANG Shilong, BI Fengyang. Simulation and experimental validation for the mold-filling process of VARTM based on mixed grid approach[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(8): 1736-1744 (in Chinese).

纤维增强树脂基复合材料(下文简称复合材料)因其卓越的性能,如比强度、比刚度高、可设计性强、抗疲劳断裂性能好、耐腐蚀等,在航空航天、汽车及建筑领域的应用越来越广泛。以飞机为例,波音 787 客机的复合材料用量已经达到整机材料的 50% 以上。复合材料液态模塑成形工艺(Liquid Composite Molding, LCM)是继热压罐、缠绕工艺之后的又一复合材料成形工艺。相对于后两者,LCM 工艺成本低、质量高,尤其是针对结构复杂、尺寸精度要求高的复合材料制件,LCM 工艺是不可替代的。LCM 工艺过程主要分四步:(1)将长纤维预成型体铺放并固定在模具上,闭合并密封模具;(2)通过注射口向模具中注射低黏度热固性树脂,树脂通过流动完成浸润预成型体;(3)填充完成后树脂在加热或不加热的情况下固化;(4)树脂固化完全后脱模,获得复合材料制件。通过在第 1、2 步的不同处理,可以获得不同亚类的 LCM 工艺:若上下模均为刚性模,则为树脂传递模塑成形(Resin Transfer Molding, RTM)工艺;若上模采用柔性模取代刚性模具,并采用真空辅助充模,则为真空辅助树脂传递模塑成形(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding, VARTM)工艺。由于采用柔性模取代刚性模具,VARTM 工艺相对于其他 LCM 工艺的成本更低、工艺灵活度更高、模具设计制造更加简单,而且特别适合制造大尺寸的复合材料制件,其制件面积可达数百平米。因而,VARTM 目前已成为最受欢迎的 LCM 工艺之一。

由于 VARTM 中预成型体上面采用柔性的真空袋覆盖,它的充模过程与传统 LCM 工艺(如 RTM 工艺)相比有如下几个不同点:(1)充模前增强体是通过真空袋内外的压强差来压实的,因此最大压实应力为一个大气压,增强体的最大纤维体积分数受到限制;(2)VARTM 树脂注入的动力为注射口和通气孔的压力差,不能额外施加注射力,因此最大注射压强为一个大气压。当预成型体渗透率较低时,会导致过长的充模时间。为解决这一缺点,可以铺放高渗透率介质来加速树脂流动或者采用顺序注射策略,通过依次打开(和关闭)注射口的方法加速充模<sup>[1]</sup>;(3)充模过程中由于型腔内树脂压强对真空袋外大气压强的抵消作用,预成型体的局部压实应力会发生的变化,进而产生随时间和位置变化的预成型体渗透率和厚

度分布。目前 VARTM 还主要是通过试错法来进行工艺参数设计和制件质量估计,误差大而且成本高。采用数值模拟技术预测 VARTM 工艺过程中的树脂流动和预成型体变形,进而优化工艺参数、提高制件质量是改变上述现状的重要手段之一。

目前已经有大量针对传统 RTM 工艺充模仿真方法研究<sup>[2-13]</sup>,然而,由于前文所述 VARTM 工艺充模过程的特点,这些方法无法直接应用于 VARTM 工艺<sup>[14]</sup>。Joubaud L 等<sup>[15]</sup>分析了 VARTM 充模过程中预成型体的膨胀以及孔隙率和渗透率升高的现象,为真空袋内的树脂流动和预成型体变形耦合场建立了统一的数学方程,并采用不相容有限元法实现了上述耦合方程的数值求解。Correis N C 等<sup>[16]</sup>在分析文献中 VARTM 充模控制方程的基础上,提出了一种表达树脂流动和预成型体变形的更加通用的数学模型,并采用有限差分法求解了上述模型,获得了一维树脂流动的数值解。Trochu F 等<sup>[17]</sup>建立了 VARTM 工艺充模过程中包含厚度项的树脂流动控制方程,并采用有限元/控制体积法进行了求解。Govignon Q 等<sup>[18]</sup>首先进行了一组实验获得了增强体的压实及松弛模型,并基于该模型建立了 VARTM 充模过程的控制方程。基于 Galerkin 有限元法实现了上述方程的数值求解,并通过一维算例演示了算法的正确性。Young W B<sup>[19]</sup>提出了一种双层模型对铺有高渗透介质的 VARTM 充模进行了二维仿真,研究了厚度方向上树脂流动的重要性。

可以看出,目前 VARTM 的充模仿真主要采用直接求解树脂流动/预成型体变形耦合方程的方法,该方法无法求解复杂的控制方程,文献均以幂律模型表达预成型体压实行为,简化求解难度,但是大大降低了仿真精度。另外,目前的算法大多仅用于一维或二维几何构件,无法应用于三维构件和大尺寸构件的顺序浇口策略仿真。而且,文献中算法仅进行了与解析值的对比验证,没有进行实验验证,影响了算法的可信度。为此,本文提出一种基于混合网格方法的 VARTM 充模仿真方法,该方法在构件网格表面增加一维单元,用于处理预成型体厚度变化导致的树脂局部流动,在保证仿真精度的同时实现复杂控制方程的快速数值求解。最后,通过搭建实验装置,进行充模实验验证上述算法的正确性。

## 1 数学建模

### 1.1 树脂流动

树脂对纤维预成型体的浸润过程通常被建模为黏性流体在多孔介质中的流动。树脂被看作牛顿流体,其流动采用 Darcy 定律表达<sup>[5-10]</sup>:

$$\bar{u} = -\frac{K}{\mu} \cdot \nabla p \quad (1)$$

式中,  $K$  表示预成型体渗透率, 与其变形状态有关<sup>[20]</sup>;  $\mu$  表示树脂黏度;  $p$  表示树脂压强;  $\nabla$  为梯度符号;  $\bar{u}$  表示体积平均流速, 即 Darcy 速率, 与物理流速  $u$  有如下关系:

$$\bar{u} = u \cdot (1 - v_f) \quad (2)$$

式中,  $v_f$  表示预成型体纤维体积分数。

由于 VARTM 充模过程中预成型体厚度会发生变化, 因此连续性方程用下式表达<sup>[16-18]</sup>:

$$\nabla(h\bar{u}) = -\frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

式中:  $t$  表示时间;  $h$  表示型腔厚度, 也就是预成型体厚度, 它与预成型体纤维体积分数有如下关系:

$$v_f = \frac{h_{ini} \cdot v_{f,ini}}{h} \quad (4)$$

式中,  $h_{ini}$  和  $v_{f,ini}$  分别表示充模开始时的预成型体厚度和纤维体积分数。

假设预成型体仅有厚度方向的膨胀或压缩变形, 其余方向不变形, 而且不同位置变形量的变化缓慢, 可以将连续性方程式(3)简化为<sup>[16, 21-23]</sup>

$$\nabla\bar{u} = -\frac{1}{h} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5)$$

将式(1)代入式(5), 获得 VARTM 工艺充模过程树脂流动控制方程:

$$\nabla\left[\frac{K}{\mu} \cdot \nabla p\right] = -\frac{1}{h} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (6)$$

### 1.2 预成型体压实模型

VARTM 充模过程中, 预成型体的压实应力由真空袋两侧大气压强  $p_{atm}$  和树脂压强之间的差值决定, 也就是

$$\sigma_f = p_{atm} - p \quad (7)$$

式中:  $\sigma_f$  表示预成型体压实应力;  $p_{atm}$  表示大气压强。

由式(7)得到预成型体所受压实应力后, 其厚度变化需要从压实模型中计算。目前 VARTM 仿真大多采用幂律模型表达预成型体变形, 虽然方便, 但是该模型无法体现润滑效应、应力松弛以

及预成型体的动态压实特性。本文分别采用混合弹性模型和黏弹性模型表达预成型体的静态和动态特性, 可以充分解决幂律模型存在的问题。

混合弹性模型采用如下所示的四次多项式来表达预成型体压实应力与纤维体积分数的关系<sup>[24]</sup>:

$$\sigma_f(v_f) = a_0 v_f^4 + a_1 v_f^3 + a_2 v_f^2 + a_3 v_f + a_4 \quad (8)$$

式(8)中的五个常量参数  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  和  $a_4$  可通过实验获得。该模型针对每一种材料需要准备两组参数, 分别针对干预成型体和湿预成型体, 体现润滑效应对预成型体压实行行为的影响。

黏弹性模型将预成型体压缩应力分解为速度函数和纤维体积分数函数的相乘<sup>[25-26]</sup>:

$$\sigma_f = f_a(u_c) f_\beta(v_f) \quad (9)$$

式中:  $f_a$  是预成型体变形速率  $u_c$  的函数;  $f_\beta$  表示纤维体积分数  $v_f$  的函数。

设  $\sigma_\beta(v_f)$  为在该参考速率下的压实应力与纤维体积分数的关系曲线, 具体形式为

$$\sigma_\beta(v_f) = \sum_{i=0}^{N_\beta} \beta_i (v_f - v_f^{dat})^i \quad (10)$$

式中:  $N_\beta$  表示多项式次数;  $v_f^{dat}$  表示一个基准体积分数。在本文中,  $v_f^{dat} = 0.425$ 。

设第二个函数  $\sigma_a(u_c)$  为在参考纤维体积分数下的压实应力与压缩速率之间的关系, 其具体形式由式(11)给出:

$$\sigma_a(u_c) = \sigma_a(\infty) - [\sigma_a(\infty) - \sigma_a(0)] \frac{1}{N_a} \sum_{i=1}^{N_a} e^{-a_i (u_c/u_c^{ref})} \quad (11)$$

式中,  $\sigma_a(0)$  和  $\sigma_a(\infty)$  分别为在非常慢和非常快压缩速率下在参考纤维体积分数下的应力;  $N_a$  为所需的指数项的数量。

在任意纤维体积分数和压实速率下的应力可以表达为

$$\sigma_f(v_f, u_c) = \frac{1}{\lambda} [\sigma_a(u_c) \sigma_\beta(v_f)] \quad (12)$$

式(12)是式(9)的普通形式, 其中  $\lambda = \sigma_a(u_c^{ref}) = \sigma_a(v_f^{ref})$ 。

对于应力松弛过程, 采用下式表达:

$$\sigma_f(t_{comp}) = \frac{\sigma^R}{\sigma_\beta(v_f)} \cdot \left[ \sigma_{eq}(v_f) + \left[ A \left( t_{comp} \frac{u_c}{u_c^{ref}} \right)^n + (\sigma_\beta(v_f) - \sigma_{eq}(v_f))^{-m} \right]^{-\frac{1}{m}} \right] \quad (13)$$



式中:  $\sigma^R$  为松弛开始时的应力;  $\sigma_{eq}(v_f)$  为均衡应力也就是预成型体以极慢的速率压缩至  $v_f$  时的应力, 可以通过式(12)计算。  $A(v_f)$  是一个纤维体积分数  $v_f$  的多项式函数:

$$A(v_f) = A_0 v_f^2 + A_1 v_f + A_2 \quad (14)$$

式中,  $A_0$ 、 $A_1$  和  $A_2$  为模型参数。

预成型体渗透率是 VARTM 充模仿真的关键输入参数之一, 随着预成型体的压实, 纤维体积分数逐渐增加, 渗透率随之减小。渗透率与预成型体纤维体积分数之间的关系用下式表示:

$$K(v_f) = a e^{bv_f} \quad (15)$$

式中,  $a$  和  $b$  表示模型参数。

在仿真过程中, 要实时根据预成型体厚度变化计算其纤维含量, 进而根据式(15)获得当前渗透率。

## 2 基于混合网格的 VARTM 充模仿真算法

式(6)为 VARTM 充模过程中树脂流动与预成型体变形耦合控制方程, 其中, 预成型体的变形(即厚度变化  $\partial h / \partial t$ ) 需要从预成型体压实模型中求解。然而, 由于预成型体压实模型(式(8)~式(14))的复杂性, 要实现流动与变形的耦合求解是非常困难的。为此, 本文对树脂流动和预成型体变形分别进行求解, 最后基于混合网格的方法实现两者耦合, 保证仿真精度和可行性。

VARTM 工艺充模过程中, 型腔内部不可能达到绝对真空, 因此同时存在树脂和空气的流动, 属于气液两相流过程, 可以采用 VOF (Volume of Fluid) 方法进行求解<sup>[27]</sup>。VOF 方法通过求解整个区域内的单一的动量守恒方程获得速度场, 这个速度场是由各相共享的。对于 VARTM 充模中的树脂空气两相流动, 动量守恒方程可由下式表达<sup>[28]</sup>:

$$\rho_{\text{fluid}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho_{\text{fluid}} \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} = -\nabla p + \mu_{\text{fluid}} \Delta \bar{u} - \frac{\mu_{\text{fluid}} \bar{u}}{K} \quad (16)$$

式中, 下标 fluid 表示该物性参数为流体参数, 即可以为树脂、空气或两相混合流体(在相界面上)。同样的, 连续性方程和相函数输运方程分别为

$$\nabla \bar{u} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \bar{u} C = 0 \quad (18)$$

对于上述方程中的密度和黏度等物性参数可用下述方程统一表示:

$$\Phi_{\text{fluid}}(x, t) = F(x, t) \Phi_r + [1 - F(x, t)] \Phi_g \quad (19)$$

式中:  $x$  表示空间坐标;  $\Phi(x, t)$  代表密度、黏度或其他物性参数; 下标 r 和 g 分别为树脂和空气。

在树脂流动方程的求解中获得树脂压强后, 可根据式(7)计算预成型体压实应力, 进而从压实模型中计算预成型体变形量。对预成型体变形量计算时, 由于树脂对增强体的润滑作用, 干增强体和湿增强体力学性能有所差距, 因此不能仅根据其受力状态就断定变形状态(静止、膨胀或收缩)。需要根据其静态压实特性式(8)来判断其当前压实应力下的最终纤维体积分数  $v_{\text{ffinal}}$ , 如果  $v_{\text{ffinal}} < v_f$ , 增强体处于膨胀过程中; 反之, 如果  $v_{\text{ffinal}} > v_f$ , 增强体处于收缩过程中。然后再根据黏弹性模型式(12)或式(13)计算变形速率  $u_c$ 。

预成型体变形与树脂流动是通过真空袋膨胀(或收缩)造成局部树脂存储(或挤出)来耦合的, 同时伴随着预成型体渗透率的变化。如图 1 所示, 树脂压强增大, 预成型体压实应力降低, 真空袋膨胀, 局部孔隙率升高, 存储部分树脂, 同时, 预成型体渗透率增大; 反之, 真空袋压缩, 挤出部分树脂, 预成型体渗透率降低。图 1 中, 由于预成型体厚度在  $x$  方向变化很缓慢, 可以认为在  $x$  到  $x + \Delta x$  的区间内预成型体厚度在流动方向上是不变的, 而且在时间增量  $\Delta t$  后, 该区间内的真空袋均匀地膨胀  $\Delta h$ 。

通过上述分析, 可以做出以下假设: 在 VARTM 充模仿真过程中, 在模具型腔仿真模型单个表面单元的范围, 预成型体均匀膨胀。为此, 建立如图 2 所示的混合网格仿真模型, 图中以二维模型为例, 三维模型类似。在混合网格模型中, 对模具型腔进行正常的二维/三维网格划分, 而对模具表面(真空袋), 在每个表面单元(表面单元为一维或二维)上, 增加一个一维附属单元, 用于在仿真过程中实时地吸收或挤出因该表面单元的真空袋变形

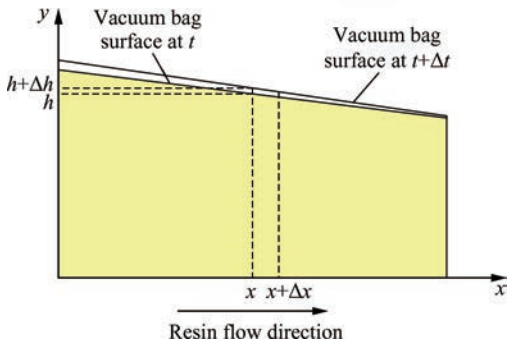


图 1 树脂流动与预成型体变形耦合示意图

Fig. 1 Coupling of resin flow and perform deformation

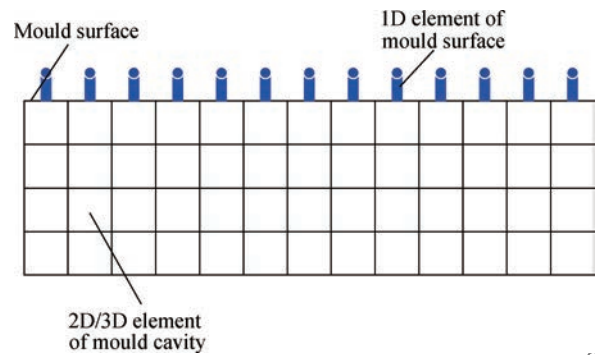


图 2 VARTM 充模混合网格仿真模型示意图  
Fig. 2 Mixed grid simulation model for mold-filling of VARTM

而产生的局部树脂体积变化。

若表面单元面积为  $S_e$ ，在时间增量  $\Delta t$  后，此处真空袋膨胀  $\Delta h$ ，那么，该表面单元附属一维单元应吸收的树脂体积  $\Delta V_e$  为

$$\Delta V_e = S_e \cdot \Delta h \tag{20}$$

那么，在  $t$  至  $t + \Delta t$  的时间间隔内，该一维单元吸收树脂的流量  $Q_e$  为

$$Q_e = \frac{S_e \cdot \Delta h}{\Delta t} \tag{21}$$

在仿真过程中，树脂、空气两相流控制方程(式(16)~式(19))可采用有限元法进行数值求解，在每个时间步都要重新计算预成型体变形速率和表面附属一维单元吸收(挤出)树脂的流量，同时根据式(4)和式(15)更新预成型体纤维体积分数和渗透率。

3 实验验证

通过一维 VARTM 充模仿真与实验结果对比来验证上述基于混合网格方法的 VARTM 工艺充模仿真算法的正确性。预成型体采用短切毡(Chopped Strand Mat, CSM)，其压实模型参数如表 1~表 3 所示<sup>[24-26]</sup>，渗透率模型参数  $a$  和  $b$  分别为 3.07 和 -12.97<sup>[29]</sup>。仿真和实验采用食用油代替树脂，食用油的黏度在实验之前采用 NDJ-8S 型旋转黏度仪(上海)进行测量。经过五次测量求平均值以减小误差，测量结果为在室温下食用油黏度为 0.1 Pa·s。

表 1 CSM 混合弹性模型参数  
Table 1 Mixed-elastic compaction model parameters for CSM

Type	$a_0/10^7$	$a_1/10^7$	$a_2/10^7$	$a_3/10^6$	$a_4/10^5$
Dry	2.97	-3.60	1.72	-3.68	2.94
Wet	4.55	-5.80	2.84	-6.17	4.95

Notes:  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ —Parameters of mixed-elastic compaction model.

表 2 干 CSM 黏弹性模型参数  
Table 2 Viscoelastic model parameters for dry CSM

Parameter	Value	Parameter	Value
$\alpha_1$	8 000	$\beta_2$	7 890 000
$\alpha_2$	2.9	$\beta_3$	2 825 300
$\alpha_3$	0.8	$\beta_4$	47 027 000
$\alpha_4$	0.85	$A_0$	-0.0233
$\sigma_a(\infty)$	90 000	$A_1$	0.0197
$\sigma_a(0)$	30 000	$A_2$	-0.0036
$\beta_0$	76 129	$m$	0.5
$\beta_1$	1 193 200	$n$	0.5

Notes:  $u_c^{\text{ref}} = 2\text{mm/min}$ ;  $v_l^{\text{ref}} = 0.425$ ;  $N_a = 4$ ;  $N_\beta = 4$ ;  $v_l^{\text{dat}} = 0.425$ .

表 3 湿 CSM 黏弹性模型参数  
Table 3 Viscoelastic model parameters for wet CSM

Parameter	Value	Parameter	Value
$\alpha_1$	80	$\beta_2$	7 786 100
$\alpha_2$	1.5	$\beta_3$	2 395 900
$\alpha_3$	1.28	$\beta_4$	30 040 000
$\alpha_4$	1.25	$A_0$	0.0421
$\sigma_a(\infty)$	94 000	$A_1$	-0.0428
$\sigma_a(0)$	30 000	$A_2$	0.0111
$\beta_0$	79 721	$m$	0.5495
$\beta_1$	1 249 100	$n$	0.5331

Notes:  $u_c^{\text{ref}} = 2\text{mm/min}$ ;  $v_l^{\text{ref}} = 0.425$ ;  $N_a = 4$ ;  $N_\beta = 4$ ;  $v_l^{\text{dat}} = 0.425$ .

实验装置如图 3 所示，采用平板模具，模具上铺放 15 层 CSM 玻纤布，玻纤布上覆真空袋并在边缘密封。预成型体初始厚度和纤维体积分数分别为 5.53 mm 和 0.494。预成型体尺寸为 300 mm×150 mm，在模具入口处采用导流管作为间隙，形成一维流动，流动距离为 300 mm。模具入口接储油瓶，出口接树脂收集器和真空泵，树脂收集器上安装真空表，用于测量真空袋内部压强。充模过程中流动前沿和预成型体厚度的变化通过两个相机来监测。图中相机 1 通过支架悬挂于模具上方，监测树脂流动

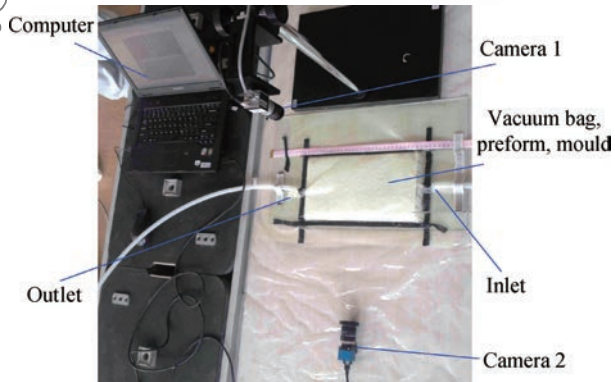


图 3 VARTM 实验装置  
Fig. 3 Experimental apparatus of VARTM

前沿; 相机 2 在模具侧方, 监测预成型体厚度的变化。两相机采集的视频数据采用计算机存储。为了降低实验测量和随机误差, 本文通过三次实验取平均值的方法获得实验数据。充模仿真采用二维网格划分的型腔模型和附属一维单元的混合网格, 树脂入口压强为一个标准大气压(101 325 Pa), 出口压强根据实验过程中的真空表读数, 设置为 0.05 个标准大气压(50 662 Pa)。

图 4 所示为充模过程中相机 1 采集到的流动前沿图像, 可以看出, 流动前沿形状近似为直线, 并与模具边缘平行, 没有产生明显的流道效应。图 5 将实验测量的不同时刻流动前沿位置与仿真结果进行了对比, 可以看出两者趋势一致, 最大相对误差为 13%。分析可知, 上述误差的产生主要有两点原因: (1) 密封条对真空袋有一定的粘接, 对真空袋的变形有一定的阻碍作用, 因此充模过程中预成型体无法充分膨胀, 限制了孔隙率和渗透率的升高, 降低了流速; (2) 液体从储油瓶中经导流管流入模具型腔, 导流管对流体流动有一定的阻碍, 在导流管中的流动会消耗部分压差, 因此降低了模具入口处的压强, 导致充模时间偏长。

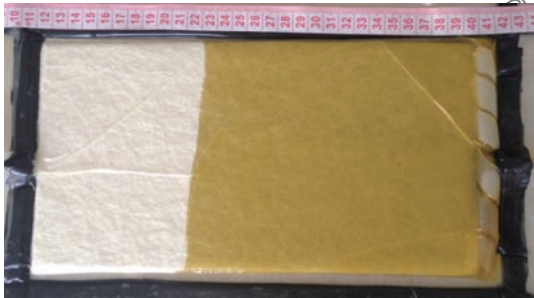


图 4 VARTM 充模实验流动前沿

Fig. 4 Flow front of the VARTM mold-filling experiment

图 6 所示为充模前后预成型体的厚度变化, 图中红线表示预成型体上表面的近似形状。充模前预成型体厚度分布近似为一条直线, 而充模完成时由于型腔内压强的不同, 形成了从注射口到排气孔厚度逐渐降低的现象。仿真与实验结果的对比如图 7 所示。由于密封条对真空袋变形的阻碍作用, 预成型体无法完全膨胀, 不仅造成了图中所示厚度仿真结果与实验结果的差距, 而且导致预成型体渗透率相对较低, 减慢了流体的流动速度, 一定程度上导致了实验充模时间偏长, 如图 5 所示。

#### 4 三维仿真算例与讨论

VARTM 工艺相对于传统 RTM 工艺的一大优

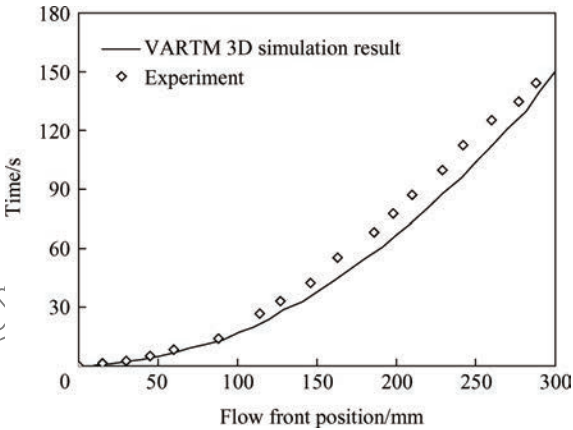


图 5 VARTM 充模过程仿真与实验流动前沿位置对比  
(预成型体为短切毡, 初始厚度  $h_{ini}=5.53$  mm,  
初始纤维体积分数  $v_{fni}=0.494$ )

Fig. 5 Comparison of flow front position between simulation and experiment of VARTM mold filling (The preform is CSM, initial thickness  $h_{ini}=5.53$  mm, initial fiber volume fraction  $v_{fni}=0.494$ )

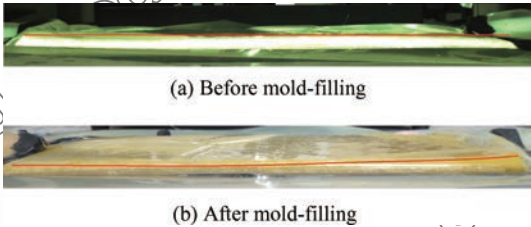


图 6 VARTM 充模前后预成型体厚度变化(预成型体为短切毡, 初始厚度  $h_{ini}=5.53$  mm, 初始纤维体积分数  $v_{fni}=0.494$ )

Fig. 6 Variation of preform thickness before and after VARTM mold filling (The preform is CSM, initial thickness  $h_{ini}=5.53$  mm, initial fiber volume fraction  $v_{fni}=0.494$ )

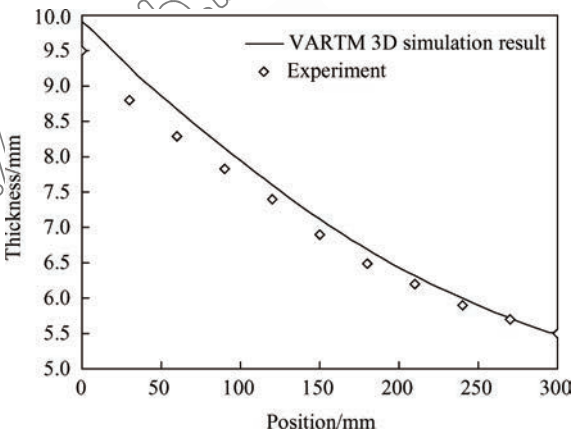


图 7 VARTM 充模完成时预成型体厚度分布对比(预成型体为短切毡, 初始厚度  $h_{ini}=5.53$  mm, 初始纤维体积分数  $v_{fni}=0.494$ )

Fig. 7 Comparison of preform thickness between simulation and experiment at the end of VARTM mold-filling (The preform is CSM, initial thickness  $h_{ini}=5.53$  mm, initial fiber volume fraction  $v_{fni}=0.494$ )



势就是它可以大大降低模具制造费用,因而经常用于制造大尺寸复合材料制件。当制造大尺寸复合材料制件时,由于充模面积大,可达上百平米,单注射口的充模策略会导致充模时间大大增加,造成生产率下降、缺陷增多等问题。在这种情况下,通常采用顺序注射策略,通过依次控制注射口的开关来提高充模速度。

采用图 8 所示八分之一球面制件来验证本文算法对顺序注射策略和三维充模流动的仿真能力。制件半径为 300 mm,模型厚度为 5.53 mm,充模仿真所用材料参数与上一节相同。注射口设置如图所示,共 4 个注射口。充模开始时,注射口 1 打开,2、3、4 关闭。当树脂流动前沿到达注射口 2、3、4 时,打开它们并关闭注射口 1。

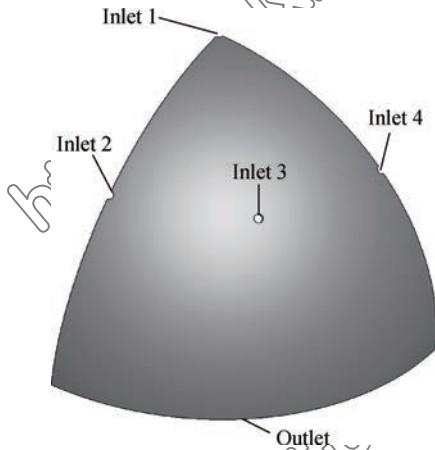


图 8 三维 VARTM 充模仿真模型  
Fig. 8 Simulation model of three dimensional mold filling

顺序注射策略的使用大大提高了充模速度,降低了充模时间。图 9 所示为充模时间分布和树脂流动前沿速度分布。从图 9(a)可看出,充模时间  $t=307.3$  s 时,流动前沿到达注射口 2、3、4,此时关闭注射口 1,打开注射口 2、3、4,实现注射口转换; $t=471.8$  s 时,整个制件充模完成。从树脂流动前沿速度分布图 9(b)可以看出,注射口附近的充模速度较快,但是随着前沿逐渐远离注射口,充模速度快速下降。注射口的切换大大提高了后半段充模的速度,本算例中总充模时间缩短了一半以上。

图 10 所示为不同时刻的预成型体厚度分布。顺序注射策略中树脂压强的复杂变化造成了复杂的预成型体变形状态,同样的,预成型体厚度分布的变化也远比单注射口策略要复杂。另外需要强调的

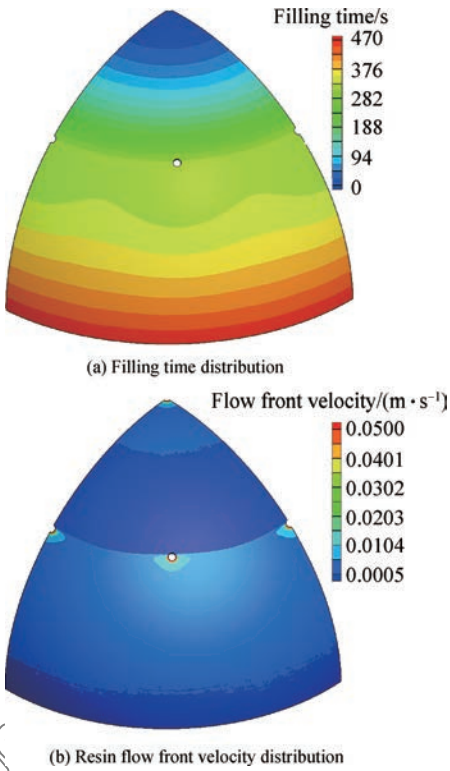


图 9 三维 VARTM 充模时间和流动前沿速度分布  
Fig. 9 Filling time and flow front velocity distributions of 3D VARTM mold filling

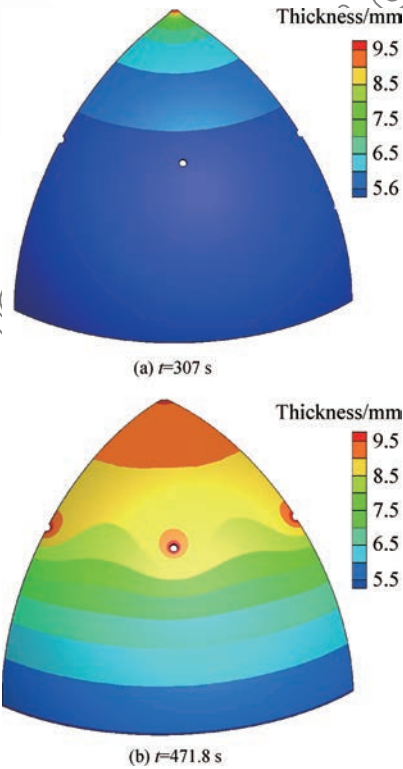


图 10 三维 VARTM 充模厚度分布  
Fig. 10 Thickness distributions of three-dimensional VARTM mold filling

一点是,当充模完成时,预成型体的变形并没有达到平衡状态,这是由于本文采用的预成型体压实模型考虑了压实过程的动态特性造成的。

## 5 结 论

(1) 针对 VARTM 工艺充模过程中随着树脂流动,预成型体发生变形的特点,建立了流动控制方程,并采用混合弹性模型和黏弹性模型来分别表达预成型体变形的静态和动态特性。

(2) 提出了基于混合网格方法的 VARTM 充模仿真算法,实现了上述数学模型的精确及快速求解;对模具型腔几何模型进行二维或三维网格划分,在每个真空袋表面单元增加一个一维附属单元,形成混合网格仿真模型;求解过程中,对树脂流动和预成型体变形分别进行求解后,基于上述混合网格模型进行两者耦合操作,实现了仿真精度和速度的统一。

(3) 通过搭建 VARTM 充模实验平台并进行一维充模实验和结果对比,验证了上述算法的正确性。通过三维仿真算例,验证了算法对三维复杂结构和顺序浇口策略仿真的可行性。

## 参考文献:

- [1] BROUWER W D, HERPTE C F C, LABORDUS M. Vacuum injection moulding for large structural applications[J]. *Composites: Part A*, 2003, 34: 551-558.
- [2] UM M K, LEE W I. A study on the mold filling process in resin transfer molding[J]. *Polymer Engineering and Science*, 1991, 31(11): 765-771.
- [3] YOO Y E, LEE W I. Numerical simulation of the resin transfer mold filling process using the boundary element method[J]. *Polymer Composites*, 1996, 17(3): 368-374.
- [4] LAM Y C, JOSHI S C, LIU X L. Numerical modeling of mold-filling process in resin-transfer moulding[J]. *Composites Science and Technology*, 2000, 60: 845-855.
- [5] SIMACEK P, ADVANI S G. A numerical model to predict fiber tow saturation during liquid composite molding [J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63: 1725-1736.
- [6] 戴福洪, 卢守舟, 杜善义. 树脂传递模塑工艺中的非饱和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 Fuhong, LU Shouzhou, DU Shanyi. Simulations and experiments of unsaturated flow in resin transfer molding process[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2010, 27(2): 84-89 (in Chinese).
- [7] 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: 1790-1807.

- [8] TAN H, PILLAI K M. Multiscale modeling of unsaturated flow in dual-scale fiber preforms of liquid composite molding I: Isothermal flows[J]. *Composites: Part A*, 2012, 43(1): 1-13.
- [9] TAN H, PILLAI K M. Multiscale modeling of unsaturated flow of dual-scale fiber preform in liquid composite molding II: Non-isothermal flows[J]. *Composites: Part A*, 2012, 43(1): 14-28.
- [10] TAN H, PILLAI K M. Multiscale modeling of unsaturated flow in dual-scale fiber preforms of liquid composite molding III: Reactive flows[J]. *Composites: Part A*, 2012, 43(1): 29-44.
- [11] CHEN X, ZHANG Y, YAN S. Two-dimensional simulations of resin flow in dual-scale fibrous porous medium under constant pressure [P]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2013, 32(22): 1757-1766.
- [12] VANEGAS J D, PATIÑO I D, VARGAS C A. Boundary element approaches for filling simulations of anisotropic reinforced preforms used in the resin transfer molding process [P]. *Journal of Composite Materials*, 2014, 48(21): 2603-2629.
- [13] GASCN L, GARCA J A, LEBEL F, et al. A two-phase flow model to simulate mold filling and saturation in Resin Transfer Molding[J]. *International Journal of Material Forming*, 2016, 9(2): 241.
- [14] 王庆涛, 朱家强, 李炜. VARTM 和 RTM 工艺模拟仿真比较[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2013(22): 12-15.  
WANG Qingtao, ZHU Jiaqiang, LI Wei. Comparison of VARTM and RTM process by simulation[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2013(22): 12-15 (in Chinese).
- [15] JOUBAUD L, ACHIM V, TROCHU F. Numerical simulation of resin infusion and reinforcement consolidation under flexible cover [J]. *Polymer Composites*, 2005, 26(4): 417-427.
- [16] CORREIA N C, ROBITAILLE F, LONG A C, et al. Analysis of the vacuum infusion moulding process I: Analytical formulation[J]. *Composites: Part A*, 2005, 36: 1645-1656.
- [17] TROCHU F, RUIZ E, ACHIM V, et al. Advanced numerical simulation of liquid composite molding for process analysis and optimization [J]. *Composites: Part A*, 2006, 37: 890-902.
- [18] GOVIGNON Q, BICKERTON S, KELLY P A. Simulation of the reinforcement compaction and resin flow during the complete resin infusion process[J]. *Composites: Part A*, 2010, 41: 45-57.
- [19] YOUNG W B. A two-layer model for the simulation of the VARTM process with resin distribution layer[J]. *Applied Composite Materials*, 2013, 20: 1305-1319.



- [20] 杨波, 金天国, 毕凤阳, 等. 预成形体渗透率预测及剪切变形的影响[J]. 材料工程, 2014(11): 7-14.  
YANG Bo, JIN Tianguo, BI Fengyang, et al. Preform permeability prediction and influence of shear deformation[J]. Journal of Materials Engineering, 2014(11): 7-14 (in Chinese).
- [21] SIMACEK P, ESIK O, HEIDER D, et al. Experimental validation of post-filling flow in vacuum assisted resin transfer molding processes[J]. Composites: Part A, 2012, 43: 370-380.
- [22] HAMMAMI A, GEBART B R. Analysis of the vacuum infusion moulding process[J]. Polymer Composites, 2006, 21(1): 28-40.
- [23] GUTOWSKI T G, MORIGAKI T, ZHONG C. The consolidation of laminate composites[J]. Journal of Composite Materials, 1987, 21(2): 172-188.
- [24] BUNTAIN M J, BICKERTON S. Modeling forces generated within rigid liquid composite molding tools. Part A: Experimental study[J]. Composites: Part A, 2007, 38: 1729-1741.
- [25] KELLY P A, UMER R, BICKERTON S. Viscoelastic response of dry and wet fibrous materials during infusion process[J]. Composites: Part A, 2006, 37: 868-873.
- [26] KELLY P A. A viscoelastic model for the compaction of fibrous materials[J]. Journal of the Textile Institute, 2011, 102(8): 689-699.
- [27] 杨俊英, 贾玉玺, 丁妍羽, 等. 基于 VOF/PLIC 界面追踪方法的 RTM 工艺充模过程数值模拟[J]. 材料研究学报, 2009, 23(6): 622-627.  
YANG Junying, JIA Yuxi, DING Yanyu, et al. Numerical simulation of mold filling stage in resin transfer molding processes based on VOF/PLIC method[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2009, 23(6): 622-627 (in Chinese).
- [28] 金天国, 杨波, 李建广, 毕凤阳. 基于多相流的 LCM 工艺气泡生成仿真[J]. 复合材料学报, 2014, 31(3): 725-732.  
JIN Tianguo, YANG Bo, LI Jianguang, et al. Numerical simulation on bubble formation of LCM process based on multiphase flow[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(3): 725-732 (in Chinese).
- [29] WALBRAN W A, VERLEYE B, BICKERTON S, et al. Prediction and experimental verification of normal stress distributions on mould tools during liquid composite moulding [J]. Composites: Part A, 2012, 43: 138-149.