

复杂型腔充模中纤维取向的动态模拟*

杨斌鑫¹⁾²⁾ 欧阳洁^{1)†} 栗雪娟¹⁾

1) (西北工业大学理学院应用数学系, 西安 710129)

2) (太原科技大学数学系, 太原 030024)

(2011年3月18日收到; 2011年5月10日收到修改稿)

基于描述短纤维增强复合材料充模过程的气-固-液三相模型及同位网格有限体积法, 实现了纤维增强复合材料沿复杂型腔水平中面充模过程的动态模拟. 不仅得到了界面位置、各物理量的信息, 而且得到了纤维在型腔中的运动情况 (包括纤维的平动和取向). 结果表明, 与沿型腔厚度方向纤维取向的表层-芯层结构不同, 纤维沿型腔水平中面的取向与型腔结构有关, 入口处纤维取向环绕型腔入口, 沿水平或竖直方向纤维取向与来流方向垂直, 型腔拐角处纤维取向指向拐点.

关键词: 纤维, 复合材料, Level Set 方法, 有限体积法

PACS: 47.85.-g, 81.05.Qk

1 引言

纤维是聚合物复合增韧材料的主要承力组分, 而纤维悬浮聚物流的瞬时特性又是纤维瞬时取向分布的函数. 尤其当纤维长径比较大时, 纤维取向分布对悬浮流的流变特性具有较大影响, 且短纤维悬浮聚合物熔体流动体系的流变特性直接影响聚合物制品的最终性能, 因而对纤维取向特征以及纤维参数的研究^[1]受到了人们的广泛关注. 然而, 目前人们对短纤维增强复合材料的研究大部分集中在成品制件的力学性能测试上, 且多是采用实验的方法^[2-4], 而对于短纤维增强复合材料成型过程的实验研究和数值模拟较少. 已有的一些文献虽然研究了纤维在充模过程中的取向^[5-12], 但都是以 Euler 方式对纤维取向进行描述, 即给出计算区域各网格点上的纤维取向椭圆, 该取向椭圆描述的是所有位于该位置的纤维的取向分布, 并不涉及纤维在型腔中的运动, 即不能动态追踪单个纤维在型腔中的运动和取向情况. 动态数值模拟的困难在于短纤维增强聚合物复合材料的研究属于交叉性交叉学科范畴, 涉及到热力学、聚物流变学、材料力学、流体力学、应用数学等诸多学科.

Yang 等^[13]建立起了描述短纤维增强复合材

料充模过程的气-固-液三相模型. 该模型引入颗粒流体体系模拟的颗粒轨道模型^[14]思想, 在 Euler 坐标系下考察连续流体的运动, 在 Lagrange 坐标系下考察纤维的运动. 即将流体处理为连续介质, 而将纤维处理为离散体系. 并且, 该模型中聚合物流动由两相耦合、体积平均的流体动力学方程描述, 而纤维的运动通过跟踪纤维的运动轨迹进行描述. Yang 等^[13]通过求解该模型, 得到了充模实验中观察到的沿型腔厚度方向纤维取向的表层-芯层结构. 但由于模具型腔的形状往往较为复杂, 纤维沿型腔水平中面的取向情况根据型腔形状的变化而有所不同. 本文通过对气-固-液三相模型的求解, 实现了纤维增强复合材料沿复杂型腔水平中面充模过程的动态模拟. 不仅得到了界面位置、各物理量的信息, 而且得到了纤维在型腔中的运动情况 (包括纤维的平动和取向).

2 充模过程熔体流动的气-固-液三相模型^[13]

2.1 界面捕捉方程

本文采用 Sussman 等人提出的修正的 level set

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2012CB025903), 国家自然科学基金项目 (批准号: 10871159) 和太原科技大学基金 (批准号: 20112011) 资助的课题.

† E-mail: jieouyang@nwpu.edu.cn

方法^[15]捕捉熔体前沿界面. level set 及其重新初始化方程如下:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \varphi = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial t_r} + \text{sign}(\varphi_0)(|\nabla \varphi| - 1) &= \omega \delta_\varepsilon(\varphi) |\nabla \varphi|, \\ \varphi(x, y, 0) &= \varphi_0(x, y), \end{aligned} \quad (2)$$

其中 φ 是界面, $\mathbf{u} = (u, v)$ 是速度矢量, t 是时间, ω 为权系数, t_r 是重新初始化的人工时间, $\text{sign}(\varphi_0)$ 是 φ 的符号函数, 定义为

$$\text{sign}(\varphi_0) = \frac{\varphi_0}{\sqrt{\varphi_0^2 + [\min(\Delta x, \Delta y)]^2}}, \quad (3)$$

其中, Δx 与 Δy 分别是沿 x 与 y 方向的网格宽度, $[\min(\Delta x, \Delta y)]^2$ 用以避免分母被零除. $\delta_\varepsilon(\varphi)$ 是 Dirac 函数, 定义为

$$\delta_\varepsilon(\varphi) = \begin{cases} \frac{1}{2\varepsilon} (1 + \cos(\pi\varphi/\varepsilon)), & |\varphi| < \varepsilon, \\ 0 & \text{其他,} \end{cases} \quad (4)$$

其中 ε 是一个小正数, 约为一个网格宽度.

2.2 纤维动力学

纤维的运动包括平动与取向, 通过熔体施加在纤维上的合力以及牛顿第二运动定律体现.

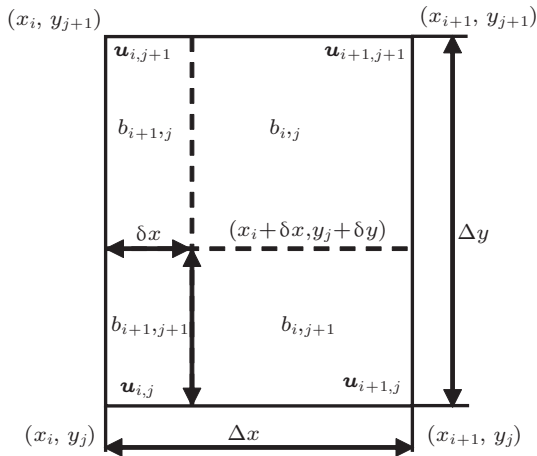


图1 双线性插值示意图

2.2.1 平动

纤维 i 的平动方程由牛顿第二运动定律描述, 即

$$\mathbf{F}_i = m_i \frac{d\mathbf{u}_i}{dt}, \quad (5)$$

其中, $\mathbf{F}_i = ((F_x)_i, (F_y)_i)$ 是施加在纤维 i 上的合力, m_i 是纤维 i 的质量, $\mathbf{u}_i = (u_i, v_i)$ 是纤维 i 的速

度. 若 \mathbf{F}_i 已知, 则在时刻 $n+1$ 的速度 \mathbf{u}_i^{n+1} 可由如下差分近似得到:

$$\mathbf{u}_i^{n+1} = \mathbf{u}_i^n + \frac{\mathbf{F}_i \Delta t}{m_i}, \quad (6)$$

其中 \mathbf{u}_i^n 是纤维 i 在时刻 n 的速度, Δt 是时间步长.

施加在纤维上的力有多个, 本文考虑两个主要作用力, 即曳力与压力梯度力.

曳力的表达式为^[16]

$$(\mathbf{F}_d)_i = (C_d)_i (A_p)_i \rho_l |\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_i| (\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_i) / 2, \quad (7)$$

其中 $(C_d)_i$ 是纤维 i 的曳力系数, $(A_p)_i$ 是纤维 i 在垂直于运动方向上的投影面积, \mathbf{u}_1 是聚合物熔体的速度. 曳力系数 C_d 的选择对于计算曳力非常重要, 本文采用 Tran-Cong 等人^[16]给出的公式计算曳力系数, 即

$$\begin{aligned} C_d = \frac{24}{\text{Re}_f} \frac{d_A}{d_n} \left(1 + \frac{0.15}{\sqrt{c}} \left(\frac{d_A}{d_n} \text{Re}_f \right)^{0.687} \right) \\ + \frac{0.42 \left(\frac{d_A}{d_n} \right)^2}{\sqrt{c} \left(1 + 4.25 \times 10^4 \left(\frac{d_A}{d_n} \text{Re}_f \right)^{-1.16} \right)}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $d_A = \sqrt{4A_p/\pi}$ 是纤维的表面等效直径, $d_n = \sqrt[3]{6V_f/\pi}$ 是纤维的体积等效直径或称为公称直径, V_f 是纤维体积, c 是纤维球形度. 纤维球形度 c 和纤维长径比 r_c 的关系为 $c = 2.62r_c^{2/3}/(1 + 2r_c)$. 纤维 i 的 Reynolds 数 $(\text{Re}_f)_i$

$$(\text{Re}_f)_i = \frac{\rho_l |\mathbf{u}_{\text{vir}} - \mathbf{u}_i| (d_n)_i}{\eta}, \quad (9)$$

其中, d_n 是纤维 i 的直径, η 是流体黏度, \mathbf{u}_{vir} 是纤维 i 质心处的虚拟速度. 文献 [17] 中采用图 1 所示的双线性插值计算流场中任一位置的流速, 即通过已知网格节点处的流速可求得微元中任意位置所具有的流速. 设 (x_i, y_j) , (x_{i+1}, y_j) , (x_i, y_{j+1}) 与 (x_{i+1}, y_{j+1}) 分别为一个控制容积的四个角点, 流场在其上的速度分别为 $\mathbf{u}_{i,j}$, $\mathbf{u}_{i+1,j}$, $\mathbf{u}_{i,j+1}$ 及 $\mathbf{u}_{i+1,j+1}$. 设纤维 i 的质心位于 $(x_i + \delta x, y_j + \delta y)$, 则该点处的虚拟流速为

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{\text{vir}} = (b_{i,j}\mathbf{u}_{i,j} + b_{i+1,j}\mathbf{u}_{i+1,j} + b_{i,j+1}\mathbf{u}_{i,j+1} \\ + b_{i+1,j+1}\mathbf{u}_{i+1,j+1}) / (\Delta x \Delta y), \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$b_{i,j} = (\Delta x - \delta x) (\Delta y - \delta y), \quad (11)$$

$$b_{i+1,j} = \delta x (\Delta y - \delta y), \quad (12)$$

$$b_{i,j+1} = (\Delta x - \delta x) \delta y, \quad (13)$$

$$b_{i+1,j+1} = \delta x \delta y. \quad (14)$$

压力梯度力的计算公式为 $(V_f)_i \nabla p_i$. 故施加在纤维 i 上的合力 \mathbf{F}_i 的表达式为

$$\mathbf{F}_i = (F_d)_i + (V_f)_i \nabla p_i. \quad (15)$$

计算出纤维所受合力, 则可由 (6) 式计算 \mathbf{u}_i^{n+1} , 进而由下式计算纤维 i 在 $n+1$ 时刻的位置:

$$\mathbf{W}_i^{n+1} = \mathbf{W}_i^n + \mathbf{u}_i^{n+1} \Delta t, \quad (16)$$

其中 $\mathbf{W}_i = (W_x, W_y)$ 是纤维 i 的位置矢量.

2.2.2 取向

纤维在 Decartes 坐标系中的取向可由图 2 描述. 图中 \mathbf{R} 是沿纤维主轴的单位矢量, ϕ 是纤维在 xy 平面投影与 x 轴夹角, θ 是纤维与 z 轴夹角. 假设纤维不可拉伸, 故由 ϕ 与 θ 可确定其取向, 即

$$\mathbf{R} = \begin{Bmatrix} \sin \theta \cos \phi \\ \sin \theta \sin \phi \\ \cos \theta \end{Bmatrix}.$$

Jeffery 发现, 处在简单剪切流场中的圆柱状颗粒会受到流体的作用力而转动, 其转动角速度可由如下的 Jeffery 方程描述^[18]:

$$\dot{\mathbf{R}} = \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{R} + \lambda_f (\boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{R} - \boldsymbol{\varepsilon} : \mathbf{R} \mathbf{R} \mathbf{R}), \quad (17)$$

其中 $\boldsymbol{\omega} = (\nabla \mathbf{u}^T - \nabla \mathbf{u})/2$ 是流体涡度张量, $\boldsymbol{\varepsilon} = (\nabla \mathbf{u}^T + \nabla \mathbf{u})/2$ 是流体应变率张量, $\lambda_f = (r_c^2 - 1)/(r_c^2 + 1)$, r_c 是纤维的长径比. Jeffery 通过求解方程 (17), 给出了纤维在简单剪切流场中的转动情况. Zhou 和 Lin^[19] 给出了纤维在一般二维流场中的三维取向. 为方便, 记 $\partial u/\partial y = \dot{\gamma}$, $\partial v/\partial x = k\dot{\gamma}$, $\partial u/\partial x = j\dot{\gamma}$ 及 $\partial v/\partial y = -j\dot{\gamma}$, 则 ϕ 与 θ 的变化率可由如下方程描述^[19].

$$\dot{\phi} = \frac{1}{2} [\lambda_f (k+1) \cos(2\phi) + k - 1 - 2\lambda \sin(2\phi)] \dot{\gamma}, \quad (18)$$

$$\dot{\theta} = \frac{1}{4} \lambda_f \sin(2\theta) [2j \cos(2\phi) + (k+1) \sin(2\phi)] \dot{\gamma}. \quad (19)$$

2.2.3 纤维对熔体的作用

纤维对熔体的作用体现在流场动量方程中动量交换源项 $\mathbf{S}_p = ((S_p)_x, (S_p)_y)^T$ 上. 考虑纤维作用的流场控制方程为连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (20)$$

u 动量方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} \\ & - \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2(\mu u)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\mu u)}{\partial y^2} \right) \\ & = - \frac{\partial p}{\partial x} H_\varepsilon(\varphi) + \frac{(\beta-1)}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2(\mu u)}{\partial x^2} \right. \\ & \quad \left. + \frac{\partial^2(\mu u)}{\partial y^2} \right) H_\varepsilon(\varphi) + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} H_\varepsilon(\varphi) \\ & \quad + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} H_\varepsilon(\varphi) - (S_p)_x H_\varepsilon(\varphi). \end{aligned} \quad (21)$$

v 动量方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} \\ & - \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2(\mu v)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\mu v)}{\partial y^2} \right) \\ & = - \frac{\partial p}{\partial y} H_\varepsilon(\varphi) + \frac{(\beta-1)}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2(\mu v)}{\partial x^2} \right. \\ & \quad \left. + \frac{\partial^2(\mu v)}{\partial y^2} \right) H_\varepsilon(\varphi) + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} H_\varepsilon(\varphi) \\ & \quad + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} H_\varepsilon(\varphi) - (S_p)_y H_\varepsilon(\varphi). \end{aligned} \quad (22)$$

其中 Reynolds 数 $\text{Re} = \rho_1 L U / \mu_1$, $\rho(\varphi) = \xi + (1-\xi) H_\varepsilon(\varphi)$, $\mu(\varphi) = \eta + (1-\eta) H_\varepsilon(\varphi)$, $\xi = \rho_g / \rho_l$, $\eta = \mu_g / \mu_l$, β 为牛顿黏性与总黏性的比, 下标 l 与 g 分别表示液相与气相, L 与 U 为长度和速度的无量纲化参数.

本构方程

$$\boldsymbol{\omega} \frac{\partial \psi}{\partial t} + \nabla \cdot (\boldsymbol{\omega} \mathbf{u} \psi) - \nabla \cdot (\Lambda \nabla \psi) = S_\psi. \quad (23)$$

本文选取具有 XPP(eXtended Pom-Pom) 本构关系的本构方程, 方程中各参数的定义由表 1^[20] 给出, 其中 Weissenberg 数定义为 $We = \lambda_{0b} U / L$, λ_{0b} 表示聚合物分子链的取向松弛时间.

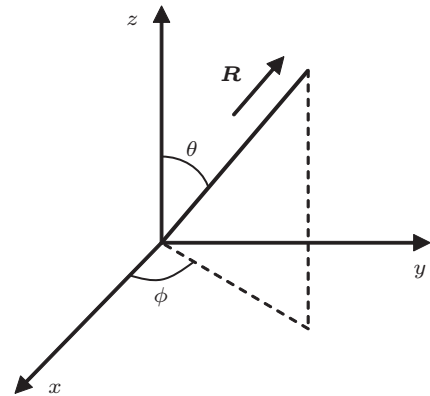


图 2 Decartes 坐标系下的纤维取向矢量

表 1 本构方程中的参数 [20]

方程	m	ψ	Λ	S_ψ
正应力 τ_{xx}	We	τ_{xx}	0	$2(1-\beta)\frac{\partial u}{\partial x} + 2We\tau_{xx}\frac{\partial u}{\partial x} + 2We\tau_{xy}\frac{\partial u}{\partial y} - f(\lambda, \tau)\tau_{xx}$ $-[f(\lambda, \tau) - 1]\frac{1-\beta}{We} - \alpha\frac{We}{1-\beta}(\tau_{xx}^2 + \tau_{xy}^2)$
剪应力 τ_{xy}	We	τ_{xy}	0	$(1-\beta)\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right) + We\tau_{xx}\frac{\partial v}{\partial x} + We\tau_{yy}\frac{\partial u}{\partial y}$ $-f(\lambda, \tau)\tau_{xy} - \alpha\frac{We}{1-\beta}\tau_{xy}(\tau_{xx} + \tau_{yy})$
正应力 τ_{yy}	We	τ_{yy}	0	$2(1-\beta)\frac{\partial v}{\partial y} + 2We\tau_{yy}\frac{\partial v}{\partial y} + 2We\tau_{xy}\frac{\partial v}{\partial x} - f(\lambda, \tau)\tau_{yy}$ $-[f(\lambda, \tau) - 1]\frac{1-\beta}{We} - \alpha\frac{We}{1-\beta}(\tau_{yy}^2 + \tau_{xy}^2)$
应力 τ_{zz}	We	τ_{zz}	0	$-f(\lambda, \tau)\tau_{zz} - [f(\lambda, \tau) - 1]\frac{1-\beta}{We} - \alpha\frac{We}{1-\beta}\tau_{zz}^2$

一个控制容积 (长和宽分别是 Δx 和 Δy) 中动量交换源项 S_p 的计算公式为

$$S_p = \frac{1}{V_{cell}} \sum_{i=1}^{N^*} F_i, \quad (24)$$

其中, N^* 是该控制容积中的纤维数量, F_i 是控制容积中第 i 个纤维受到的合力, $V_{cell} = \Delta x \Delta y$ 是控制容积的面积.

方程组 (1),(2),(20)—(23) 共同构成了纤维增强复合材料充模模拟的数学模型.

3 数值方法

3.1 纤维生成算法

本文按照如下步骤生成纤维, 并实现纤维的可视化.

第1步 首先生成长度为 l_f 的纤维. 具体做法为: 随机生成纤维初始角度 θ 和 ϕ , 用 $b_s + 1$ 个点 (本文取 $b_s = 30$) 来描述一根纤维, 纤维的质心为第 $b_s/2$ 个点 ($b_s + 1$ 个点的标号为 $0, \dots, b_s$). 则该纤维在空间按照图 2 分别旋转 θ 和 ϕ 角度后第 i 个点在 xy 平面上投影的坐标 (x_i, y_i) 为

$$x_i = \frac{i}{b_s} l_f \sin \theta \cos \phi,$$

$$y_i = \frac{i}{b_s} l_f \sin \theta \sin \phi, \quad (i = 0, \dots, b_s).$$

第2步 随机生成纤维质心 $(x'_{b_s/2}, y'_{b_s/2})$, 将纤维平移到该质心, 各点坐标的计算公式为

$$x'_i = x_i + (x'_{b_s/2} - x_{b_s/2}),$$

$$y'_i = y_i + (y'_{b_s/2} - y_{b_s/2}), \quad (i = 0, \dots, b_s).$$

3.2 流场求解数值方法

动量方程及本构方程由同位网格有限体积法求解, 压力 - 速度与应力 - 速度失耦问题运用插值方法 [13] 得以解决. Level Set 及其重新初始化方程采用高分辨率格式求解, 其中空间离散采用五阶 WENO(Weighted Essentially Non-Oscillatory) 格式, 时间离散采用三阶 TVD-Runge-Kutta 格式.

3.3 充模模拟计算过程

第1步 给定初始熔体区域及边界条件, 在熔体区域内生成初始纤维;

第2步 用同位网格有限体积法求解流场控制方程, 得到速度、应力及压力等物理量分布;

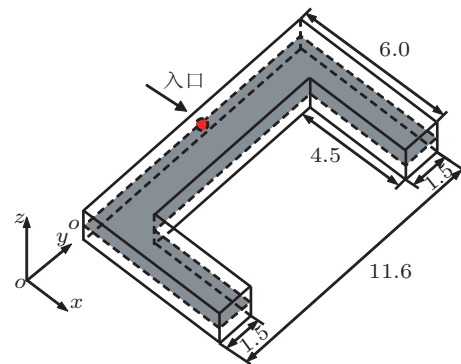


图 3 复杂型腔示意图

第3步 根据 (7)—(15) 式计算每个纤维受到的合力 F_i , 根据 (6),(16) 式分别计算出纤维的速度和位置;

第4步 根据 (24) 式计算出体现纤维对流场作用的动量交换源项 S_p ;

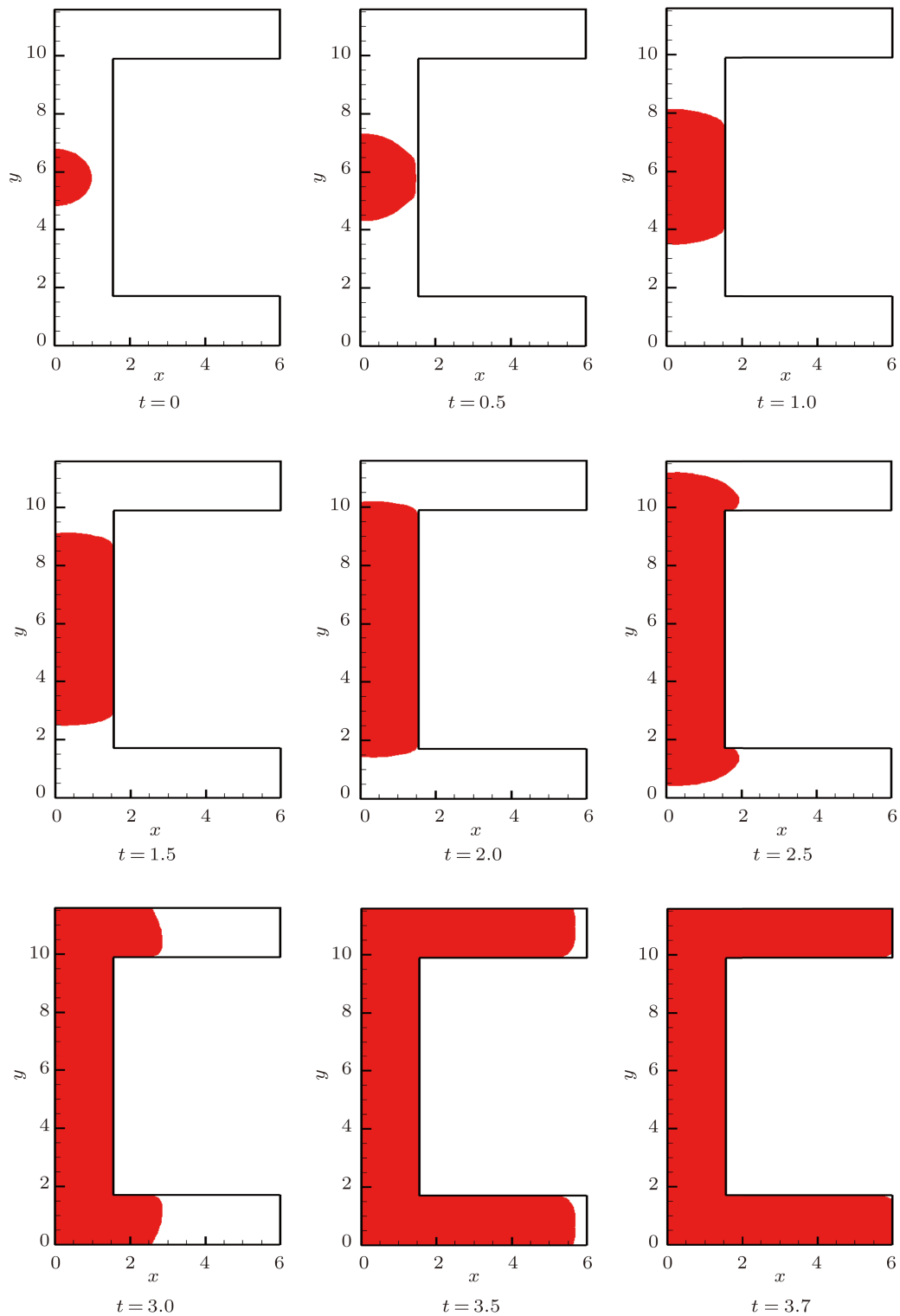


图4 不同时刻熔体前沿界面位置

第5步 求解 Level Set 及其初始化方程, 得到界面位置;

第6步 判断型腔是否充满, 如是则停止, 否则转第 2 步.

整个模拟由自编 Fortran 程序实现.

4 模拟结果

考虑如图 3 所示的复杂型腔的充模过程. 型腔由三部分组成, 第一部分是沿 y 方向的矩形腔, 第二、三部分是沿 x 方向的矩形腔. 型腔总长

度 11.6, 总宽度 6.0, 注射口中心位置为 (0,5.8), 图中阴影部分为型腔水平中面, 即计算区域. 注射速度 $u = 10.0$.

图 4 给出了不同时刻熔体前沿界面的位置. 可以看出, 熔体首先沿 y 方向流动, 而后沿 x 方向流动,

最终充满整个型腔.

图 5 分别给出了型腔充满时刻的压力、应力与速度矢量. 可以看出, 入口处压力最大, 而后沿型腔深度逐渐减小. 型腔两拐角处有明显的应力集中现象.

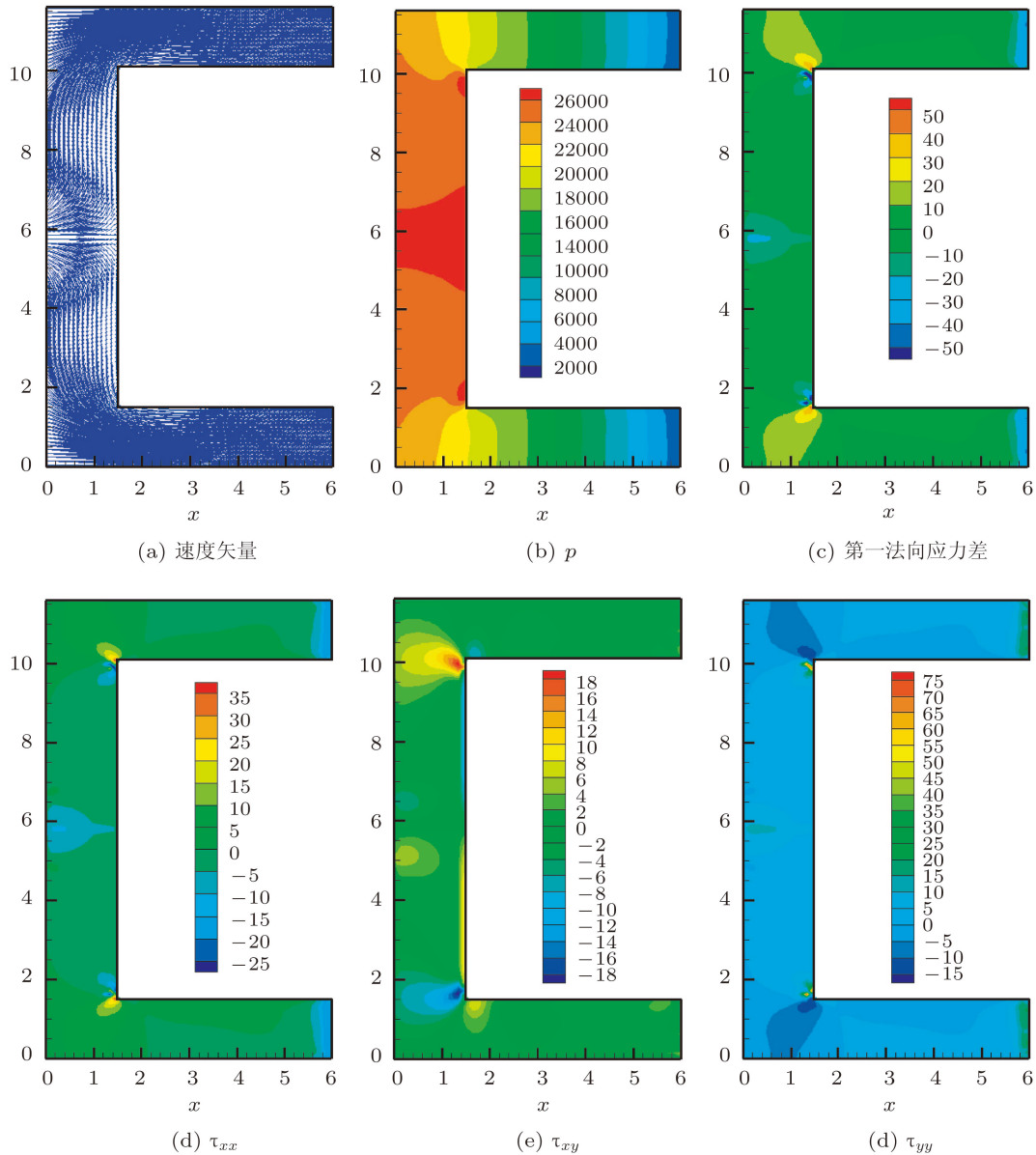


图 5 型腔充满时刻的物理量分布

图 6 给出了不同时刻纤维在型腔中的运动和取向. 可以看出, 在入口附近区域 ($y \in [4.8, 6.8]$), 由于速度矢量呈辐射状分布, 因此纤维环绕注射口分布. 当纤维离开入口区域沿 y 方向运动且尚未达到型腔拐角部分 ($y \in [1.5, 4.8] \cup [6.8, 10.1]$) 时, 由于水平速度 u 几乎为零, 故纤维取向与 x 轴平行. 当纤维运动至型腔拐角区域时, 垂直速度 v 开始

减小, 水平速度 u 开始增大, 熔体开始转向, 此处纤维取向指向拐角顶点. 当纤维完全进入水平区域 ($x \in [1.5, 6]$), 由于 v 速度很小, 故纤维取向与 y 轴平行. 总之, 纤维在型腔中的取向状态可以分为四部分, 图 7 给出了型腔充满时刻纤维取向的四种情况, 从而表明纤维沿型腔水平中面的取向与型腔形状有关.

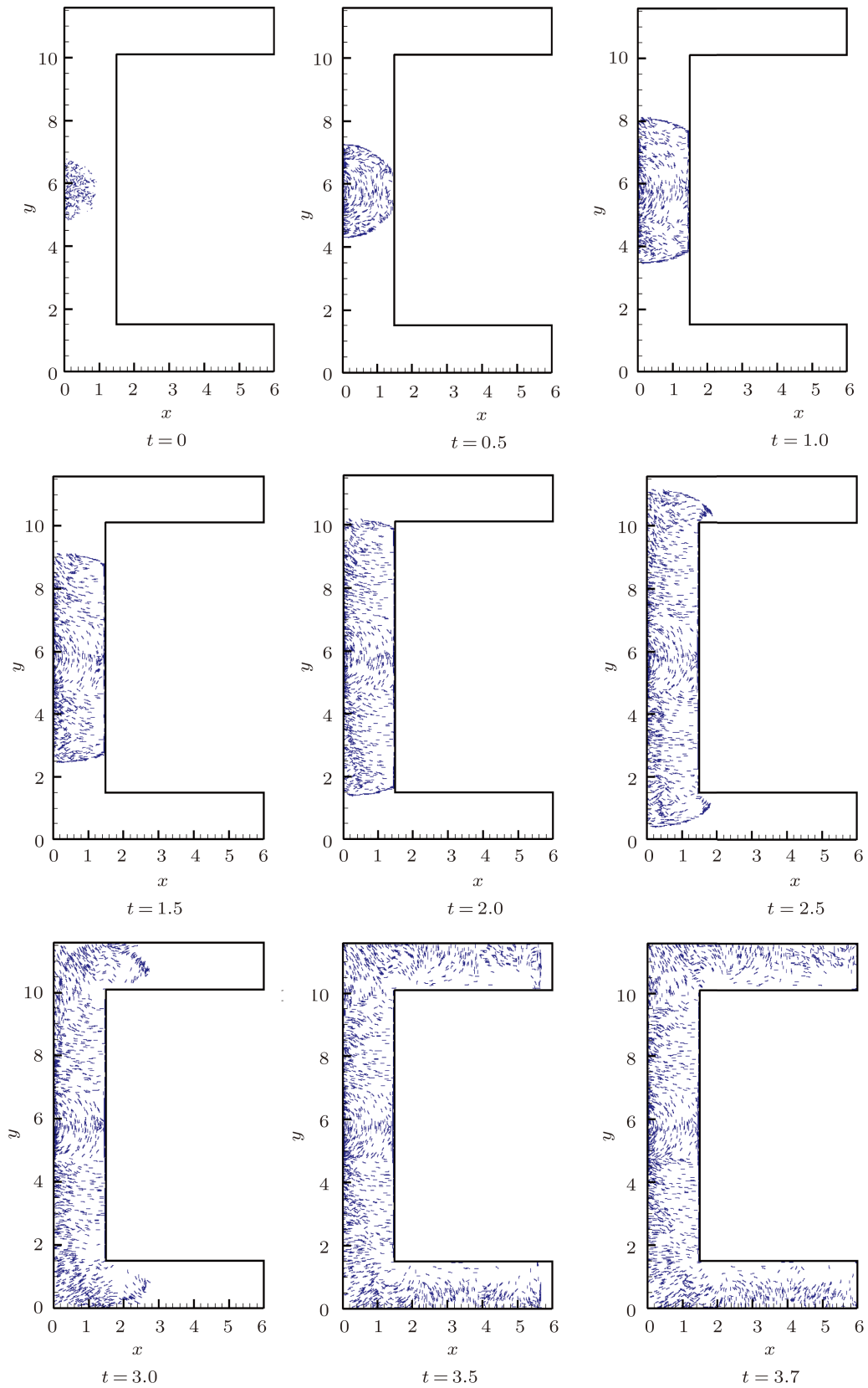


图6 不同时刻纤维在型腔中的运动和取向

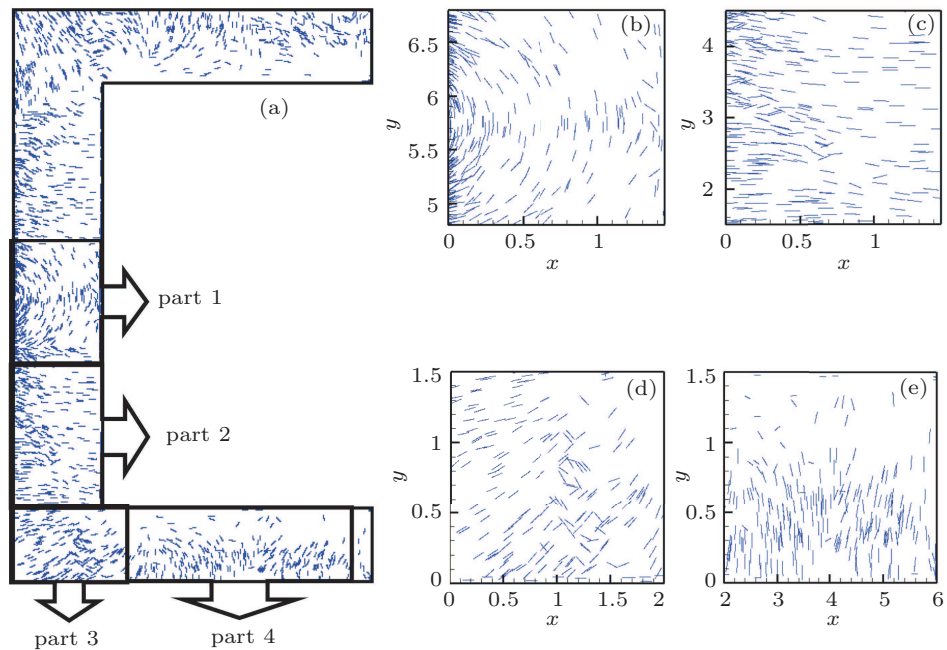


图7 型腔充满时刻纤维取向的四种情况 (a) 纤维取向的四部分区域划分; (b) part1 放大图; (c) part2 放大图; (d) part3 放大图; (e) part4 放大图

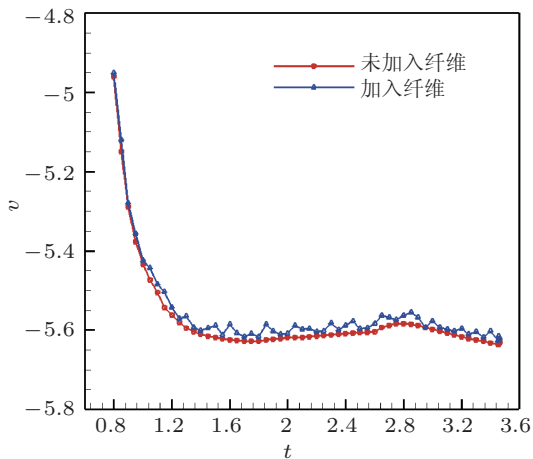


图8 型腔参考点 (0.45, 3.88) 处垂直速度 v 在加入纤维与未加入纤维两种情况下随时间的变化情况

图8给出了型腔参考点 (0.45, 3.88) 处垂直速度 v 在加入纤维与未加入纤维两种情况下随时间的变化情况. 可以看到, 纤维对流场有明显的扰动

作用. 由于纤维的加入在一定程度上阻碍了熔体的流动, 因此加入纤维后的速度绝对值略小于未加入纤维后的速度绝对值.

5 结论

基于描述短纤维增强复合材料充模过程的气 - 固 - 液三相模型及同位网格有限体积法, 实现了纤维增强复合材料沿复杂型腔水平中面充模过程的动态模拟. 不仅得到了界面位置、各物理量的信息, 而且得到了纤维在型腔中的运动情况 (包括纤维的平动和取向). 结果表明, 本文中的气 - 固 - 液三相模型不仅可以模拟沿型腔厚度方向的充模过程并确定纤维取向, 而且对复杂型腔水平中面的充模过程以及纤维取向也能成功模拟. 纤维沿厚度方向的取向与型腔水平中面内的纤维取向不同, 水平中面内纤维取向与型腔形状有关.

[1] Zhang H P, Ouyang J, Ruan C L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 0619 (in Chinese) [张红平, 欧阳洁, 阮春蕾 2009 物理学报 **58** 0619]
 [2] Yerramalli C S, Waas A M 2007 *CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences* **6** 1
 [3] Verbis J T, Tsinopoulos S V, Polyzos D 2002 *CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences* **3** 803
 [4] Pyo S H, Lee H K 2009 *CMES: Computer Modeling in Engineer-*

ing & Sciences **40** 271
 [5] Henry De Frahan H, Verleye V, Dupret F, Crochet M J 1992 *Polymer Engineering and Science* **32** 254
 [6] McGrath J J, Wille J M 1995 *Composites Science and Technology* **53** 133
 [7] Kim E G, Park J K, Jo S H 2001 *Journal of Materials Processing Technology* **111** 225

- [8] Chung D H, Kwon T H 2002 *Korea-Australia Theology Journal* **14** 175
- [9] Zhou W, Wang L G, Fan X J, Li Y J, Chen Y H 1995 *CIESC Journal* **46** 493 (in Chinese) [周伟, 王立刚, 范西俊, 李玉景, 陈一泓 1995 化工学报 **46** 493]
- [10] Ye H Y, Zhou C X 1994 *Polymer Material Science and Engineering* **10** 73 (in Chinese) [叶红宇, 周持兴 1994 高分子材料科学与工程 **10** 73]
- [11] Lin L F 1998 *Materials Science and Technology* **16** 28 (in Chinese) [林兰芬 1998 材料科学与工艺 **16** 28]
- [12] Zhang H P, Ouyang J 2007 *Acta Materiae Compositae Sinica* **24** 153 (in Chinese) [张红平, 欧阳洁 2007 复合材料学报 **24** 153]
- [13] Yang B X, Ouyang J, Jiang T, Liu C T 2010 *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences* **63** 191
- [14] Tsuji Y, Morikawa Y, Tanaka T 1987 *International Journal of Multiphase Flow* **19** 187
- [15] Sussman M, Fatemi E, Smereka P, Osher S 1998 *Computational Fluids* **27** 663
- [16] Tran-Cong S, Gay M, Efstathios E 2004 *Powder Technology* **139** 21
- [17] Ouyang J, Li J H 1999 *Chemical Engineering Science* **54** 2077
- [18] Jeffery G B 1992 *Proceedings of the Royal Society of London Series A* **102** 161
- [19] Zhou K, Lin J Z 2008 *Fibers and Polymers* **9** 39
- [20] Aboubacar M, Aguayo J P, Phillips P M, Phillips T N, Tamaddon-Jahromi H R, Snigerev B A, Webster M F 2005 *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* **126** 207

Dynamic simulation of fiber orientation in mold filling process in a complex cavity*

Yang Bin-Xin¹⁾²⁾ Ouyang Jie^{1)†} Li Xue-Juan¹⁾

1) (Department of Applied Mathematics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

2) (Department of Mathematics, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

(Received 18 March 2011; revised manuscript received 10 May 2011)

Abstract

A dynamic simulation of fiber reinforced composite mold filling process in a complex cavity is presented based on the gas-solid-liquid three-phase model for mold filling and the finite volume method on non-staggered grids. The interface evolution and the information about physical quantities, such as velocity, stresses, pressure, etc, are given. The motions of fibers, including transformation and orientation, are obtained as well. Numerical results show that fiber orientation in the horizontal mid-plane is related to the shape of the cavity, which is quite different from the case of the skin-core-skin structure orientation along cavity thickness. In the inlet region, fibers encircle the cavity inlet, and fiber orientation is vertical to the incoming flow direction along the horizontal and the vertical regions of the cavity, while around the corners of the cavity, fibers point to the corners of the cavity.

Keywords: fibers, composites, Level Set method, finite volume method

PACS: 47.85.-g, 81.05.Qk

* Project supported by the National Key Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB025903), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10871159) and the Taiyuan University of Science and Technology Foundation, China (Grant No. 20112011).

† E-mail: jieouyang@nwpu.edu.cn