

研究论文

T 形微通道中互不相溶两相流数值模拟

董贺飞¹, 张德良¹, 赵玉潮², 陈光文², 袁 权²(¹ 中国科学院力学研究所, 北京 100080; ² 中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023)

摘要: 采用摄动有限体积 (PFV) 算法和水平集 (level set) 技术对 T 形微通道内互不相溶两相流动进行了数值模拟研究。考察了两相界面张力和微通道壁面润湿性对流动的影响, 精确地捕捉到了油水两相流动的界面。对一些典型的 T 形微通道油水两相流动进行了数值计算, 模拟结果和实验结果吻合较好。分析总结出了微通道内两相流动过程中的一些基本规律, 为微通道内的液液两相流动实验设计和工业应用提供了新的数值预测手段。

关键词: 微通道; 摄动有限体积; 两相流; 微反应器; 微混合器; 油-水

中图分类号: TQ 032

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157(2008)08-1950-08

Numerical simulation of immiscible two-phase
flow in T-shaped microchannelDONG Hefei¹, ZHANG Deliang¹, ZHAO Yuchao², CHEN Guangwen², YUAN Quan²(¹ Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;² Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, Liaoning, China)

Abstract: The immiscible two-phase flow in a T-shaped microchannel was simulated by using the perturbational finite volume (PFV) method and level set technique. The effects of the oil-water interfacial tension and the surface wetting angle between water phase and microchannel wall on the characteristics of oil-water two-phase flow were investigated and the accurate interface configuration of the oil-water flow was also obtained. Some typical oil-water two-phase flow patterns in the T-shaped microchannel were calculated. The numerical results were in good agreement with the experimental data. The discussions of numerical results help to understand the flow mechanisms of oil-water two-phase flow in the microchannel. That provides a new means of numerical prediction for the experimental design and industrial application of liquid-liquid two-phase flow in the microchannel.

Key words: microchannel; PFV; two-phase flow; micro-reactor; micro-mixer; oil-water

引 言

随着 20 世纪 80 年代微电子机械系统 (MEMS) 的提出, 自然科学和工程技术不断向微

型化发展。微流动是微机电系统的一个重要研究方向, 由于其尺度微小、集成度高、功耗低、控制精度高、响应速度快等特点, 在机械、国防、医学、生物工程、航空航天和化学工程等领域有着广泛的

2008-01-02 收到初稿, 2008-02-20 收到修改稿。

联系人: 张德良。第一作者: 董贺飞 (1981—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20490206, 20490208); 国家高技术研究发展计划项目 (2006AA05Z233)。

Received date: 2008-01-02.

Corresponding author: ZHANG Deliang. E-mail: dlzhang@imech.ac.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (20490206, 20490208) and the High-tech Research and Development Program of China (2006AA05Z233).

应用前景。微流动系统已成为当前国内外流体力学中的研究重点和热点。

自 20 世纪 90 年代初以来, 微化工技术的研究备受关注^[1-2], 其主要研究对象为内部通道特征尺度在数微米到数百微米间的微化工系统, 具有微流动特征^[3]。由于系统尺度缩小使得各种化工流体的传热、传质性能与常规系统相比有较大幅度的提高^[4-5]。许多化工过程中均涉及互不相溶两相体系, 过程流动行为复杂, 尤其在流体表面张力成为主要影响因素的微化工系统内。微通道内油水两相流动、传递和反应也已经成为关注的热点之一。

近年来研究大多集中于互不相溶的两相流动^[6]和传质过程^[7]、纳米颗粒^[8]和尺度可控的乳液制备^[9]等, 而油水两相微观流动形态的研究主要集中在分散相液滴形成机理方面^[10]。Guillot 等^[11]认为液滴形成是由于两相流体的收缩-阻断作用, 提出了描述并行流型稳定流动的简单模型, 但 Ismagilov 等^[12]认为这一过程是由于黏性力与表面张力共同作用的结果; Dreyfus 等^[13]在“十”字形交叉微通道内对油水两相流型进行了研究; Anna 等^[14]根据水力学聚焦原理研究了液滴喷洒过程, 即流体经一个狭缝后形成“射流”, 产生 Rayleigh-Plateau 非稳态现象, 以达到均匀液滴喷洒。目前研究工作大多以实验为主, 由于实验研究的复杂性, 至今对于微通道内不同流型的形成机理以及液液两相化学反应过程尚缺乏足够的认识。实验研究可观察反映客观规律的物理现象和获取可靠的测试数据, 但实验设备设计困难、制造周期长、测试仪器调试复杂、实验费用大, 尤其是微通道流动实验, 由于尺度微小, 设计、制造和测试更加困难。近年来, 随着计算流体力学和仿真技术的迅猛发展, 采用计算机数值模拟(数值仿真)微流动和多相流等复杂流动已经成为可能。因此, 微通道复杂两相流动的数值模拟将越来越引起人们关注, 成为研究和开发微通道复杂两相流动的主要方向和途径之一, 并已经取得了一定的成效^[15-18]。

本文采用摄动有限体积(PFV)^[19]算法和水平集(level set)^[20-22]技术对 T 形微通道油水两相流动进行了数值模拟。通过对一些典型的 T 形微通道油水两相流动数值结果分析, 总结出了微通道内两相流动过程中的一些基本规律, 为微通道内的液液两相流动实验设计和工业应用提供了新的数值预测手段。

1 T 形微通道内流动的物理模型

微通道为 T 形管道(图 1), 包含两个入口和一个出口。煤油和水分别由两入口(inlet 1 和 inlet 2)以不同流速注入, 在 A 处附近相遇形成某种特殊形状的流动, 经混合通道流出微流动系统。T 形微通道中的煤油和水的物理性质如表 1 所示^[7]。

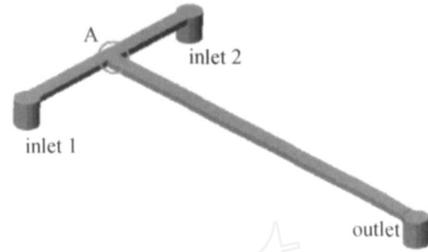


图 1 T 形微通道结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of T-shaped microchannel

表 1 煤油和水的物理性质

Table 1 Physical properties of water and kerosene (293 K and atmospheric pressure)

Working medium	Density / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Viscosity coefficient / $\text{Pa} \cdot \text{s}$	Interfacial tension / $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
water	998.2	0.001	0.045
kerosene	780	0.00115	

2 基本方程组和定解条件

2.1 微流动基本方程组

由于煤油和水的流速不高, 故可认为油水两相流动是不可压缩黏性流动, 油水两相流动的量纲 1、非定常、不可压流体力学方程组分别表示如下: 连续性方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial v_i}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i v_i)}{\partial x} + \frac{\partial(u_i v_i)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial y^2} \right) - \frac{k(\phi) (\phi)}{\text{We}} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i v_i)}{\partial x} + \frac{\partial(v_i v_i)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 v_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_i}{\partial y^2} \right) - \frac{k(\phi) (\phi)}{\text{We}} \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (3)$$

其中, $i=1$ 和 2 , 分别为水和煤油; u_i 、 v_i 和 ρ_i 分

别为水和煤油的速度、密度和黏度。T形微通道的深度为 H 、宽度为 B ，若把水的 u_1 、 p_1 、 ρ_1 、 μ_1 参数作为量纲 1 特征参数，则水和煤油的量纲 1 流动速度、压力、密度、黏度、Reynolds 数和 Weber 数可分别表示为 $\frac{u_i}{u_1}$ 、 $\frac{p_i}{p_0}$ 、 $\frac{\rho_i}{\rho_1}$ 、 $\frac{\mu_i}{\mu_1}$ 和 $\frac{u_i B}{\mu_1}$ 和 $\frac{u_i^2 B}{\sigma}$ 。

式 (2) 和式 (3) 中的最后一项 $\frac{k(\phi)}{We} \frac{(\phi)}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x}$ 和 $\frac{k(\phi)}{We} \frac{(\phi)}{\partial y} \frac{\partial \phi}{\partial y}$ 为水和煤油的界面张力，其中的 ϕ 为处理界面的 level set 函数， $k = \nabla \cdot (\nabla \phi | \nabla \phi|)$ 为界面高斯曲率， (ϕ) 为 delta 函数，表示该项只在界面处存在，离开界面后 $(\phi) = 0$ 。

2.2 定解条件

(1) 入口 水和煤油的流速分别为 u_1 和 u_2 (方向相反)。

(2) 出口 满足 $\frac{\partial u_i}{\partial n} = 0$ ($i = 1, 2$)。

(3) 微通道壁面 由于液固表面张力不可忽略，故微通道中的流动不再满足一般不可压缩黏性流动的壁面条件。水、煤油和壁面三相交界处要形成一定的接触角，接触角大小由水、煤油和壁面材质物性共同决定。图 2 给出了水、煤油、微通道壁面三相交界处的边界条件示意图。在油、水、通道壁面交界处 (A 点) 满足^[23]

$$n = n_w \cdot \cos + n_t \cdot \sin \tag{4}$$

式中 n 为油水两相流界面法向量， n_w 为固壁法向量， n_t 为固壁切向量。油水界面法向量 n 可由 level set 函数 ϕ 得到，即

$$n = - \nabla \phi \tag{5}$$

接触角条件可通过 level set 引入

$$- \nabla \phi = n_w \cdot \cos + n_t \cdot \sin \tag{6}$$

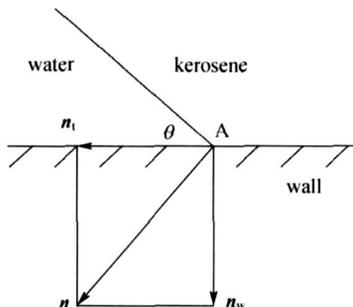


图 2 在微通道壁上水和煤油与壁面的接触角条件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of surface wetting angle between oil-water two-phase and microchannel

3 摄动有限体积算法

摄动有限体积 (PFV) 算法是由摄动有限差分 (PFD) 算法发展而来的一种全新高精度差分算法。PFD 算法和 PFV 算法均具有节点少、精度高 (一般只需要 3 个节点即能得到较高精度)、形式简洁、计算效率高等优点。

摄动有限差分算法的基本思想是：把微分方程离散的概念加以扩充，既离散微商项，又离散非微商项 (包括微商系数和源项)，对方程组中的微商项采用一阶迎风差分格式，直接进行离散，而对方程组中的非微商项和源项以空间步长为参数，摄动展开成幂级数，并通过摄动后的修正方程的截断误差项，获得各阶摄动有限差分格式的系数。

把摄动有限差分算法推广可得到摄动有限体积算法。摄动有限体积算法仍然是对方程组中的微商项采用一阶迎风差分格式，然后把质量流量和源项以网格间距为参数摄动展开成幂级数，幂级数的系数通过利用空间分裂技术，并利用对流量和扩散通量之间的关系得到。

油水两相流动的量纲 1、非定常、不可压流体力学方程组积分形式为

$$\int_s \phi u \cdot nds = \int_s D \nabla \phi \cdot nds + \int_v q dv \tag{7}$$

式中 ϕ 为输运变量，它们是流速分量、质量、温度和能量等； u 为速度矢量； D 为扩散系数； q 为源项； s 和 v 分别为控制单元的表面积和体积。

图 3 为摄动有限体积算法控制单元的某一表面 jf 的示意图。假定控制单元中心节点 P 与相邻控制单元中心节点 P_j 的连线近似垂直于 jf 面， m_{jf} 为通过 jf 面的质量流量，其中 $j = 1, 2, \dots, J$ ， J 为控制单元表面数目。对二维问题，当 J 为 3 和 4 时，分别表示控制单元为三角形单元和四边形单元。 ϕ_P 表示 ϕ 在控制单元中心 P 点的值， ϕ_{P_j} 是相邻的控制单元中心 P_j 点的值， S_j 是 jf 的面积矢量，它的指向从 P 到 P_j ， d_j 为从 P 点到 P_j 点的矢量。

积分式 (7) 的 $(N + 1)$ 阶迎风 PFV 差分格式如下

$$\sum_{j=1}^J \frac{1}{G_j} \left[\frac{D}{|d_j|^2} d_j \cdot S_j - \min(m_{jf} G_j, 0) \right] \phi_P - \left[\frac{D}{|d_j|^2} d_j \cdot S_j + \max(m_{jf} G_j, 0) \right] \phi_{P_j} + q_P = 0 \tag{8}$$

其中

$$G_j = \sum_{n=0}^N \frac{1}{(n+1)!} R_{jf}^n (\text{sign } m_{jf})^n \tag{9}$$

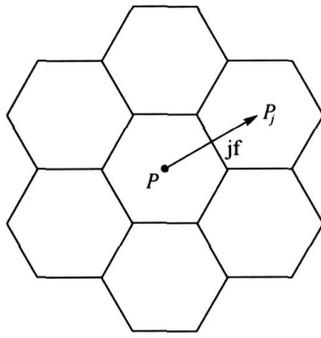


图 3 控制单元 jf 表面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of jf surface of control cell

$$\text{sign } m_{jf} = \begin{cases} +1 & m_{jf} > 0 \\ -1 & m_{jf} < 0 \end{cases} \quad (10)$$

4 界面处理的水平集技术

在油水两相界面张力的作用下，流动过程中界面形状复杂，故界面处理较为困难。Osher 等^[20-21]提出的一种追踪界面的方法——水平集 (level set) 技术是目前处理、追踪物质界面效果最好的方法之一，其主要理念是：引入水平集函数 (level set function)，它的零等值面就是物质界面，水平集函数根据流场中速度变化而演化，任何时刻只要知道水平集函数，并求出其零等值面就可以确定运动界面位置。与通过构造出具体波阵面和采用显示算法的一般波阵面追踪方法相比，水平集技术在处理波阵面的复杂结构变化方面优势明显，经过多年发展现已成为一种适应性强、计算精度高的界面追踪技术。

在空间上计算油水两相流动问题时，采用水平集技术首先需要引入水平集函数 ϕ 来追踪界面。在流动中计算 ϕ ，在任意时刻 $\phi(x, t)$ 的零等值面就是运动界面 $\Gamma(t)$

$$\Gamma(t) = \{x : \phi(x, t) = 0\} \quad (11)$$

一般定义 ϕ 为流场内点到界面的符号距离

$$\phi(x, 0) = \begin{cases} d(x, (0)) & x \in \Omega_1 \\ 0 & x \in \Gamma(0) \\ -d(x, (0)) & x \in \Omega_2 \end{cases} \quad (12)$$

本文取油水界面的水平集函数 ϕ 为 0，油相 ϕ 小于 0，水相 ϕ 大于 0。为追踪界面移动，函数 ϕ 需满足控制方程

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (13)$$

为了避免数值计算不稳定，在界面附近需要对流体物性参数进行光滑处理

$$\bar{\rho}(\phi) = \rho + (1 - \rho) H(\phi) \quad (14)$$

$$\bar{\mu}(\phi) = \mu + (1 - \mu) H(\phi) \quad (15)$$

这里 δ 为光滑带宽度，一般取 $\delta = 1 - 1.5 d$ ； $\rho = \rho_2 / \rho_1$ ， $\mu = \mu_2 / \mu_1$ 分别为油和水的密度比和黏度比。 $H(\phi)$ 为权函数，定义如下

$$H(\phi) = \begin{cases} 0 & \phi < -\delta \\ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\phi}{\delta} + \frac{1}{4} \sin\left(\frac{\pi\phi}{\delta}\right) \right] & |\phi| < \delta \\ 1 & \phi > \delta \end{cases} \quad (16)$$

delta 函数可由权函数求导得出

$$\delta(\phi) = \frac{dH(\phi)}{d\phi} = \begin{cases} \frac{1}{2} [1 + \cos(\frac{\pi\phi}{\delta})] & |\phi| < \delta \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

5 计算网格设置

为了便于计算，需把复杂的 T 形微通道两相流动做适当简化。图 4 为简化的微通道示意图，T 形微通道的宽 B 为 600 μm 、高 H 为 300 μm ，长度 L_1 和 L_2 分别为 30 mm 和 60 mm。

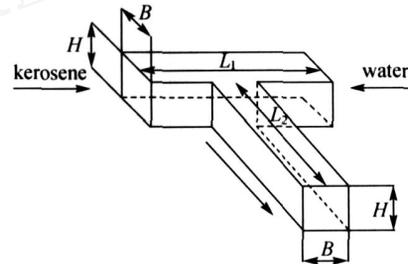


图 4 微通道示意图

Fig. 4 Three-dimensional structure of microchannel

T 形微通道中油水两相微流动应该是一个三维问题，由于计算条件限制，目前把它简化成二维流动问题，采用二维油水两相流动计算模型进行计算，如图 5 所示。计算中网格数为 100 \times 200，计算时间步长为 0.0005。

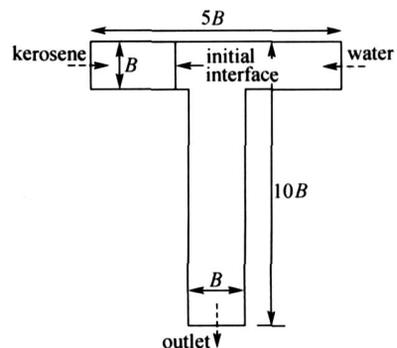


图 5 微通道二维计算模型

Fig. 5 Two-dimensional calculation model of microchannel

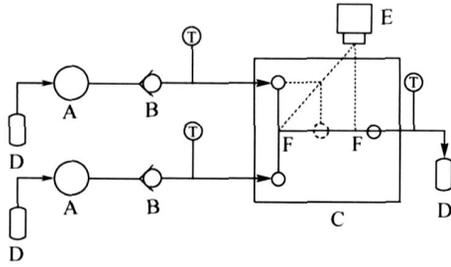


图 6 微流动实验流程图

Fig. 6 Schematic diagram of experimental setup
A—pump; B—check valve; C—T-shaped microchannel;
D—tank; E—CCD camera; F—measure point

6 计算结果分析和实验验证

6.1 微流动实验和摄像

中国科学院大连化学物理研究所采用煤油和煮沸过的去离子水，在 PMMA 微通道中对不同条件下的微流动进行了实验研究，并采用高速摄影机对微流动进行摄像。实验流程如图 6 所示。实验过程中为了增加去离子水和煤油的颜色对比度，把微量亚甲基蓝溶解在去离子水中。采用两台高精度平流泵把两种工作介质注入水平放置的微通道，利用 CCD 摄像系统记录下不同时刻油水两相流动的流动形态。

6.2 微流动数值模拟

本文采用摄动有限体积算法对大连化学物理研究所在微反应器中油水两相微流动实验进行了数值计算^[6]，结果如图 7 所示。

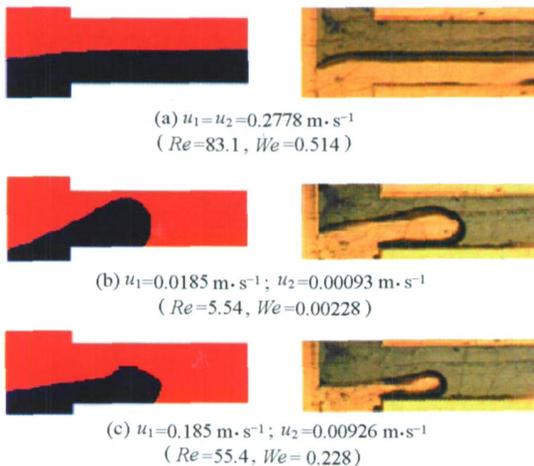


图 7 T 交叉口的两相流流型

Fig. 7 Two-phase flow patterns at T-junction
(left: simulation results; right: experimental results)

由图 7 可知，数值结果和实验观测吻合较好，表明本文所采用的摄动有限体积新算法数值模拟油水两相流动问题是较为合理的方法。

分析上述数值结果和实验观测可以发现：当油水速度比较接近时，油水均为连续相，油水的密度和流速也比较均匀；而当油水速度相差较大时，其中一相会转变为分散相，如当油水速度比为 0.05 1 时（算例 2 和 3），油相呈滴状，向下游流动。油的流态跟油水界面与管道壁面的接触角有关，不同接触角会有不同的油滴状态，流动特性也与流动的 Re 和 We 相关。

6.3 微流动过程分析

本文详细计算了油水流速比为 0.2 ($Re = 55.4$, $We = 0.228$) 的两相流动情况。图 8 给出了本算例在不同时刻的流态图（密度分布图和流线图）。计算结果表明，这种情况下两相均为连续相，油紧贴壁面下滑，没有断裂。

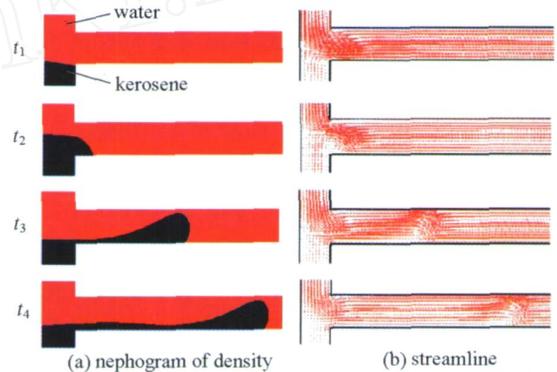


图 8 不同时刻的流态图

Fig. 8 Two-phase flow patterns at different time
($u_2/u_1 = 0.2$, $Re = 55.4$, $We = 0.228$)

图 9 给出了 T 形微通道油水两相流动中界面两侧的压强变化情况（图中左侧为油，右侧为水）。从图中可知，当油水启动后，刚开始在 T 形微通道入口通道中油水界面上半部分左侧压强高于右侧压强，致使油水界面向右推进 [图 9 (b)]; 随着油水继续运动，界面两侧压强发生了变化，左、右两侧压强逐渐接近；最后，在界面右侧形成一个高压区 [图 9 (c)]，右侧压强超过左侧，这样，界面上半部分在高压强的作用下又会反向左侧运动。但是，与此同时，油水界面下半部分绕过拐角，在 T 形微通垂直管道中向出口流动，由图 9 (b)、(c) 可以看出，界面的左侧压强始终高于右侧，而界面右侧的水在绕过拐角后流动速度一直在减小，

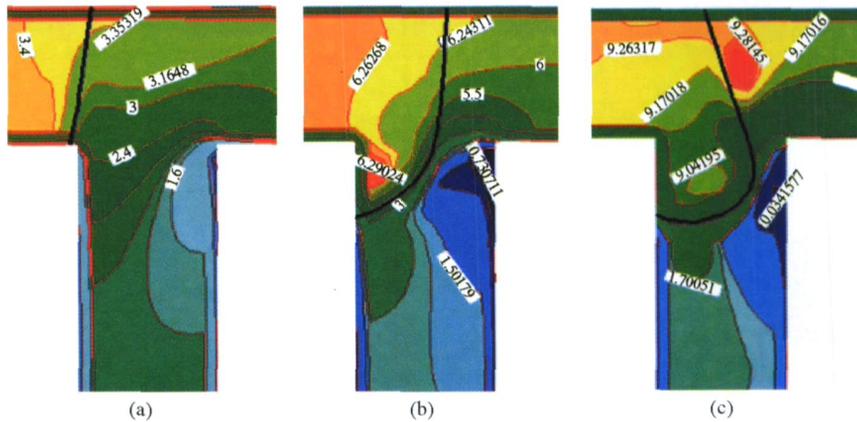


图 9 T 形微通道油水界面两侧压强随时间变化

Fig. 9 Time-varying pressure on both sides of oil-water interface in T-shaped microchannel

由此最后在界面两侧产生了一个高压中心和一个低压中心, 致使油的头部逐步被“鼓”起来, 形成油滴状的流态。

为了说明油水界面形成过程, 在初始界面上设置了两个追踪点 (a、b), 并记录它们在不同时刻沿 x 方向 (油的入口速度方向) 的速度分量 u_a 和 u_b , 图 10 为油水界面上追踪点速度随时间变化过程。

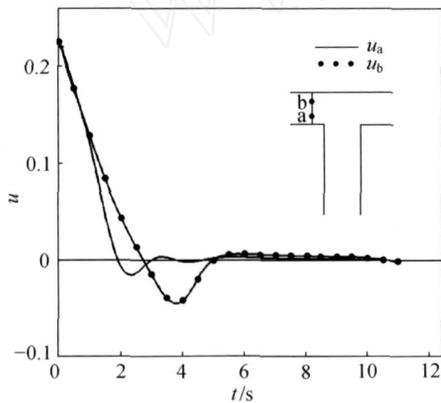


图 10 油水界面上追踪点速度随时间变化

Fig. 10 Time-varying velocity at track point of oil-water interface

当油水两相进入后, 追踪点速度都是正的, 这说明界面是由左向右, 朝着水相运动。最初 a 点的速度要小于 b 点的速度, 说明界面上半部运动比界面下半部快, 于是界面出现倾斜 [见图 9 (b)]; 随后 a 点速度开始减小, 并逐步减少到 0, 即 a 点附近界面停止推进, 最后界面运动速度反向, 开始向反方向运动; b 点的速度变化基本上和 a 点相似, 但是 b 点反向运动的速度要比 a 点大, 时间也比 a 点稍晚, 最后 a 点和 b 点的运动速度都减小到

0, 此时界面已绕过拐角朝出口流动。如果对图中速度进行时间积分, 可以得到油水界面上 a 点和 b 点的位移值。计算表明 b 点最后的实际流动距离要比 a 点小, 即 b 点处在 a 点之后, 这再次证明了油水界面形成油滴状流态的原因。

图 11 是与图 9 (b) 同一时刻的流线图, 图中给出了油绕过拐角后在混合通道内沿管壁向出口流动的过程, 从图 11 可知在图 9 (b) 中的高压区处有涡旋出现, 在这个涡旋的作用下, 油相在流动中逐步形成油滴。

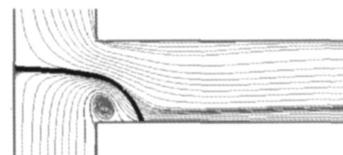


图 11 油在绕过拐角时形成拐角涡旋

Fig. 11 Vortex formed when oil turned round corner

图 12 给出了与图 8 中 4 个相同时刻情况下 T 形微通道内部的压强分布, 图中标出了不同时刻油水界面的形状。从图 12 中可以发现, 在油滴“头部”前后的位置存在一对高低压强区, 在界面后的上游为高压区, 在界面前的下游为低压区, 而在油滴后面的流场中压强是连续的。计算结果表明, 油滴在 T 形微通道内向出口推进时, 油滴“头部”前后的一对高低压强区会始终存在, 一直到油滴流出微流动系统。分析上述各种油水流动状况可知, 若油相速度降低到一定程度, 有可能会出现油滴断裂或再次聚并的现象, 这样在微通道壁面上会受到周期性变化力的作用。

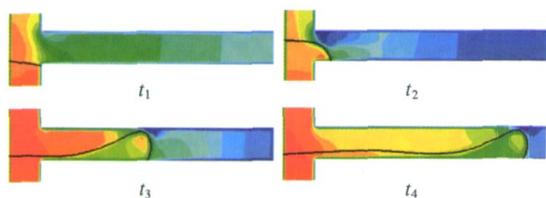


图 12 T形微通内不同时刻压力云图和油水界面
Fig. 12 Pressures and oil-water interfaces
in T-shaped microchannel at different time

为了进一步验证流场计算的正确性, 计算了图 8 中 t_2 和 t_3 时刻在混合通道内的两个截面 A—A、B—B 处的质量流量 $\int v dA$, 见图 13。表 2 给出了 T 形微通道两个截面 A—A、B—B 处的质量流量 $\int v dA$ 的计算值, 与入口流量最大误差为 3.25%。计算结果表明, 采用摄动有限体积算法对 T 形微通道油水两相流动进行数值模拟研究以预测流动状况是较为合理的。

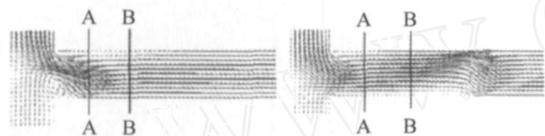


图 13 t_2 和 t_3 时刻 T形微通道两个截面 A—A、B—B
Fig. 13 Two cross sections A—A, B—B in T-shaped
microchannel at t_2 and t_3

表 2 T形微通道两个截面 A—A、B—B 处的
质量流量 / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Table 2 Mass rate of flow of cross sections A—A, B—B
in T-shaped microchannel / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

t	A—A	B—B
t_2	1.1221	1.1195
t_3	1.1329	1.1502

7 结 论

本文采用摄动有限体积算法和水平集技术对 T 形微通道油水两相流动进行了数值模拟研究, 数值模拟结果和实验结果吻合较好。采用摄动有限体积算法对 T 形微通道油水两相流动进行数值模拟研究以预测流动状况是较为合理的, 且摄动有限体积算法的计算精度较高。通过对一些典型油水两相流动状况的数值结果进行分析, 发现了微通道油水两相流过程中的一些基本规律, 为微通道内互不相溶两

相流动的实验设计和工业应用提供了新的研究手段。

符 号 说 明

- B, H, L ——分别为微通道宽度、高度、长度, m
 m ——质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
 p ——压强, Pa
 Re ——Reynolds 数
 t ——时间, s
 u, v ——分别为 x, y 方向速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 We ——Weber 数
 ——油水界面
 ——界面平滑处理尺度, m
 ——壁面接触角
 μ ——黏性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
 ——密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
 ——表面张力系数, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$

下角标

- 1 ——水相
 2 ——油相

References

- [1] Chen Guangwen (陈光文), Yuan Quan (袁权). Microchemical technology. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2003, 54 (4): 427-439
- [2] Jähnisch K, Hessel V, Löwe H, Baerns M. Chemistry in microstructured reactors. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2004, 43 (4): 406-446
- [3] Hetsroni G, Mosyak A, Pogrebnnyak E, Yarin L P. Fluid flow in micro-channels. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2005, 48 (10): 1982-1998
- [4] Kashid M N, Gerlach I, Goetz S, Franzke J, Acker J F, Platte F, Agar D W, Turek S. Internal circulation within the liquid slugs of liquid-liquid slug flow capillary microreactor. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2005, 44: 5003-5010
- [5] Cao Bin (曹彬), Chen Guangwen (陈光文), Yuan Quan (袁权). Conjugated heat transfer in micro-channel heat exchanger. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2005, 56 (5): 774-778
- [6] Zhao Yuchao, Chen Guangwen, Yuan Quan. Liquid-liquid two-phase flow patterns in a rectangular microchannel. *AIChE Journal*, 2006, 52 (12): 4052-4060
- [7] Zhao Yuchao, Chen Guangwen, Yuan Quan. Liquid-liquid two-phase mass transfer in the T-junction microchannels. *AIChE Journal*, 2007, 53 (12): 3042-3053
- [8] Zhao Yuchao (赵玉潮), Ying Ying (应盈), Chen Guangwen (陈光文), Yuan Quan (袁权). Characterization of micro-mixing in T-shaped micro-mixer. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*

- (化工学报), 2006, 57 (8): 1184-1190
- [9] Kobayashi I, Mukataka S, Nakajima M. Production of monodisperse oil-in-water emulsions using a large silicon straight-through microchannel plate. *Ind Eng Chem Res*, 2005, 44 (15): 5852-5856
- [10] Squires T M, Quake S R. Microfluidics: fluid physics at the nanoliter scale. *Rev Mod Phys*, 2005, 77 (3): 977-1026
- [11] Guillot P, Colin A. Stability of parallel flows in a microchannel after a T junction. *Phys Rev E*, 2005, 72 (6): 066301
- [12] Tice J D, Lyon A D, Ismagilov R F. Effects of viscosity on droplet formation and mixing in microfluidic channels. *Analytica Chimica Acta*, 2004, 507 (1): 73-77
- [13] Dreyfus R, Tabeling P, Willaime H. Ordered and disordered patterns in two-phase flows in microchannels. *Phys Rev Lett*, 2003, 90 (14): 144505-144508
- [14] Anna S L, Bontoux N, Stone H A. Formation of dispersions using "flow focusing" in microchannels. *Appl Phys Lett*, 2003, 82 (3): 364-366
- [15] Pfahler J, Harley J, Bau H, Zemel J. Liquid transport in micron and submicron channels. *Sensors and Actuators A*, 1989, 22 (1/2/3): 431-434
- [16] Tatineni M, Zhong X. Numerical study of two-phase flows in microchannels using the level set method, AIAA-2004-0929//42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, 2004
- [17] Darhuber A A, Troian S M. Principles of microfluidics actuation by modulation of surface stresses. *Annu Rev Fluid Mech*, 2005, 37 (1): 425-455
- [18] Shui L L, Eijkel J C T, van den Berg A. Multiphase flow in micro-and nanochannels. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2007, 121 (1): 263-276
- [19] Gao Zhi (高智), Bai Wei (柏威). Perturbational finite volume method for convective diffusion equation and discussion. *Chinese Journal of Theoretical Applied Mechanics (力学学报)*, 2004, 36 (1): 88-93
- [20] Osher S, Sethian J A. Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations. *J. Comput. Phys*, 1988, 79: 12-49
- [21] Osher S, Fedkiw R. Level Set Method and Dynamic Implicit Surfaces. New York: Springer-Verlag New York Inc., 2003: 273
- [22] Liu Ruxun (刘儒勋), Wang Zhifeng (王志峰). Numerical Simulation Method and Moving Interface Tracking (数值模拟方法和运动界面追踪). Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001: 315
- [23] Brackbill J U, Kothe D B, Zemach C. A continuum method for modeling surface tension. *J. Comput. Phys*, 1992, 100 (2): 335-354