

文章编号: 1000-8055(2008)12-2286-05

微混合器内混合过程的数值模拟

刘湘云^{1,2}, 张仁元¹, 柯秀芳¹, 李石栋¹

(1. 广东工业大学 材料与能源学院, 广州 510006;

2. 华中科技大学 能源与动力工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 对一个双向进口的微型圆柱混合器的混合过程进行了数值模拟, 并与实验结果进行了对照。结果表明, 该微混合器没有设置专门的扰流装置, 仅采用两侧切向进流体, 两种流体在混合器内产生了较好的混合效果。研究表明, 混合效果并不是随着雷诺数增大而增强, 只有在雷诺数小于 90 的范围内, 才能够得到均匀的混合效果。

关 键 词: 混合过程; 微混合器; 微尺度; 切向进口; 雷诺数

中图分类号: TQ051.71

文献标识码: A

Numerical simulation of micromixing process inside micro mixer

LIU Xiang-yun^{1,2}, ZHANG Ren-yuan¹, KE Xiu-fang¹, LI Shi-dong¹

(1. Faculty of Material and Energy,

Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Energy and Power Institute,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper simulated numerically and experimentally the micromixing process inside a micro mixing channel without any flow turbulated ribs or spins. Results show that fluid flow into the two tangent direction inlet of the model produces vortex, and increases the mixing process. The mixing process is not well proportioned with the increasing Reynolds Numbers. The mixture is equally in the suitable extent of Reynolds number. The detailed distributions of mixture volume fraction inside the channel could be obtained.

Key words: process of mix; micro-mixer; micro-scale; tangent direction inlet; Reynolds number

微型化、集成化的微流体控制系统在航天技术以及医学微量、化学分析与检测、微量液体或气体配给、IC 芯片的散热与冷却、微型部件的润滑等领域有着广阔的应用前景。微混合器已经在国内外引起了广泛的研究兴趣。其核心部件为完全或部分采用微加工技术制造出的微型系统, 通道特征尺度在数毫米至数百微米范围。微系统中, 由于通道特征尺度在微米级, 表面积/体积的比例较大, 混合过程主要靠分子扩散, 过程进行的较慢,

一般微混合器都加工出一些扰流装置。Koch 等^[1]最早通过缩减 T 型通道尺寸, 液层厚度仅为 5 mm, 在较短长度内实现了氨水和酚酞溶液的理想混合。Bokenkamp 等^[2]在硅片上蚀刻 2 个串联的 T 型微混合器, 调控第 1 个混合器出口通道长度和流体流速, 可在 10 s 内实现氯乙酸苯酯水解反应的引发和终止。数值模拟与实验研究结果表明^[3-5], 低雷诺数时, 黏性力为主要作用力, 两液体成平行分层流动, 混合主要通过分子扩散, 混合效

收稿日期: 2007-11-28; 修订日期: 2008-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50576014)

作者简介: 刘湘云 (1968 -), 女, 山西河曲人, 讲师, 博士, 主要从事强化传热、流体流动等的研究。

果随 Reynolds 数增加而下降;高 Reynolds 数时,惯性力作用增强,流动易受人口腔和 T 形混合区的扰动影响,出现漩涡流和缠绕流动,即对流混合的作用明显,混合效果随 Reynolds 数增加而保持在一定水平甚至有所提高.总体看来,国内外关于微混合器件内的流动研究由于实验和加工技术的限制,大多数的实验是测量宏观参数,涉及腔内流动状态的研究较少.对所得实验结果与宏观尺度流体流动的吻合程度及差异的解释也有很大的争议.由而数值模拟具有更直观有效地揭示微器件内的流动规律的优点,因此采用数值模拟进行微混合器内流动机理研究具有重大意义.本文设计了用于航空航天以及化工测试领域的双向进口的圆柱型微混合器,该圆柱型微型混合器圆柱混合器内没有设置任何扰流装置,比较容易加工.本文主要工作是通过对该微混合器应用数值模拟方法对不同雷诺数流动进行分析来获得微尺度流动的规律,并利用该模拟结果指导实验过程.

1 数学物理模型

本文设计的模型为一个纵向尺度为微米级的圆柱,需要混合的液体分别从圆柱两侧进入混和腔,混合以后的液体从中间出口流出.模型见图 1 所示.混合圆盘直径为 5 mm,高度 0.3 mm,出口直径 0.3 mm,两侧进口水力直径为 0.15 mm.圆柱形混合腔的尺寸在半径方向仍为宏观尺度,在高度方向为微米级尺度.面积/体积的比值大于 $1/\text{m}$,特征尺度为 $150\mu\text{m}$,属于微尺度范畴.

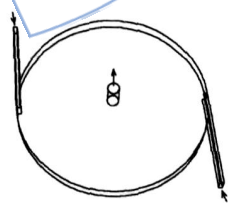


图 1 物理模型

Fig. 1 Physical model

根据微流动的理论,在微米级范围内,液体具有连续介质的扩散特性,纳维-斯托克斯方程组是有效的.另外,在微尺度范围内,由于面积/体积的比值增大,使得通道表面的活性增强,表面力的作用远远大于以重力表示的体积力项,故在 N-S 方程中将体积力项略掉,流体为不可压流体,同时该模型需要观测混合过程,因此属于非稳态问题,控制方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0 \quad (1)$$

$$\rho_k \frac{D u}{D t} = - \nabla p + \mu \nabla^2 u \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} + (u \cdot \nabla) C_k = D_k \nabla^2 C_k \quad (3)$$

其中 C_k, ρ_k, D_k 分别为组分 k 的浓度,密度和质扩散系数.

定解条件有边界条件和初始条件两部分:

在圆柱上下壁面上

$$u = 0, \quad \frac{\partial C_k}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

进口壁面

$$u = u_{in}, \quad \frac{\partial C_k}{\partial n} = 0 \quad (5)$$

出口引出部分壁面

$$u = u_{out}, \quad \frac{\partial C_k}{\partial n} = 0 \quad (6)$$

其次,对于入口边界条件

$$u_y = \text{Const}, \quad C_y = \text{Const} \quad (7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

其中 u_y 为入口法向速度, y 为入口法向, x 为入口切向.

出口边界条件

$$p_{out} = \text{Const} \quad (9)$$

初始化条件

初始速度和浓度都设为零,标准工况下进行,进口的一侧是水,另一侧的液体的密度为 900 kg/m^3 ,动力粘度为 $0.00781 \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

2 网格划分

网格采用非结构化网格,内结点法离散,在计算前进行了网格无关解计算,网格数目为 6 万.

为了直观的反应混合过程,采用图 1 中的一个截面显示混合过程的速度场和浓度分布.

3 模拟结果

根据层流混合理论,产生混合的主要原因是由于对流作用而形成的不同流体之间相对位置的重新分布,从而导致各种流体相互混杂的过程,这是一个机械过程,由混合器内流场的流动特性决定;另一方面,由于分子运动而产生扩散作用,驱动流体分子从浓度高处向浓度低处扩散,促使流体达到分子之间的均匀混合.也就是说混合可以分为两个过程:机械扩散和分子扩散.

为了比较不同工况混合器内的流动状况,本文按照进口处的水利直径为特征参数,以水为基

准,定义雷诺数如下:

$$Re = \frac{u_{in} d_{in}}{\nu_{water}}$$

其中 u_{in} 表示进口处水的平均速度下标. d_{in} 表示进口水力直径.

计算过程中,两侧流体的入口速度相同. 图 2 (a)~(d) 4 个图是两种液体进入混合腔后 2 s 时,混合腔内水在雷诺数在 50,90 和 120 和 180 时,水的体积分数分布示意图,可以看出,两侧流体进入这种混合腔,由于混合腔结构使得流体在短时间内,在混合腔的中心区域能够达到较好的混合效果.但是随着雷诺数大于 120,局部区域产生混合不均匀的现象.

图 3(a)~(d) 4 个图是混合 6 s 时,混合腔内水在雷诺数在在 50,90 和 120 和 180 时,水的体积分数分布示意图,可以看出,在经过 6 s 后,在雷诺数为 50 和 90 的时候,混合腔中心两种流体混合均匀,但是随着雷诺数为 120 和 180 时,两种流体在靠近进口处局部产生浓度分布不均匀的现象.

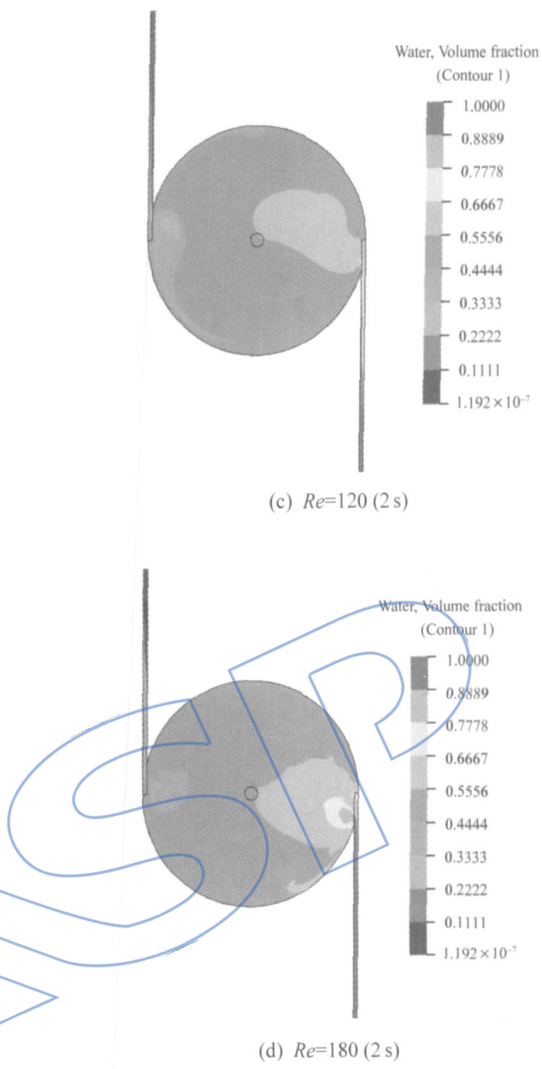
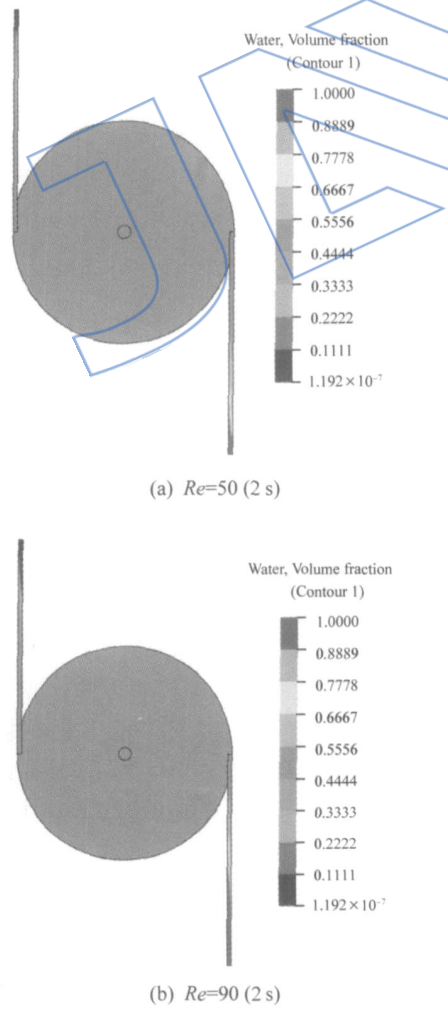


图 2 混合腔内 2 s 时不同雷诺数下水的体积分数分布
Fig. 2 Volume fraction distributions inside the micro-mixer at different Reynolds number (2 s)

为了观测混合腔内的实际流动过程,图 4 的 (a)~(d) 给出了混合 6 s 时,混合腔内水在雷诺数为 50,90 和 120 和 180 时,水的速度场分布示意图,结合图 2 和图 3 的体积分数图可以看出,在经过 6 s 后,当雷诺数为 50 时,两种流体在混和腔内产生对称旋转流动,取得了很好的混合效果.当雷诺数为 90 时,两种流体在进口处局部产生漩流,但是并不影响混合腔内的混合,混合仍然很均匀.但是当雷诺数为 120 和 180 时,两种流体在混合腔内靠近晋口处产生不对称的漩涡,从而使得在混合腔内两种流体各自所占的体积份额有所改变,混和腔内局部混合溶液变得很不均匀.

图 5 是实验室条件下,微混合器在 $Re=70$, 时间 6 s 时的实验拍摄效果图.该实验模型采用蚀刻的方法加工而成,实验模型与模拟模型尺寸相同.两侧进口液体采用微型泵注入,两侧进口分别

是标准工况下着色的水溶液以及和模拟采用的同样的溶液,试验模型外表面由有机玻璃加工而成,透光效果好,进口处采用特制的管接头,透明度差,因此实验拍摄出来图片在进口处颜色发暗.从混合器内部的情况,观测到模型实验在 2~6 s 的时间内,在雷诺数较小的情况下,可以取得较好的混合效果.这表明模拟的结果与实验的结果一致.

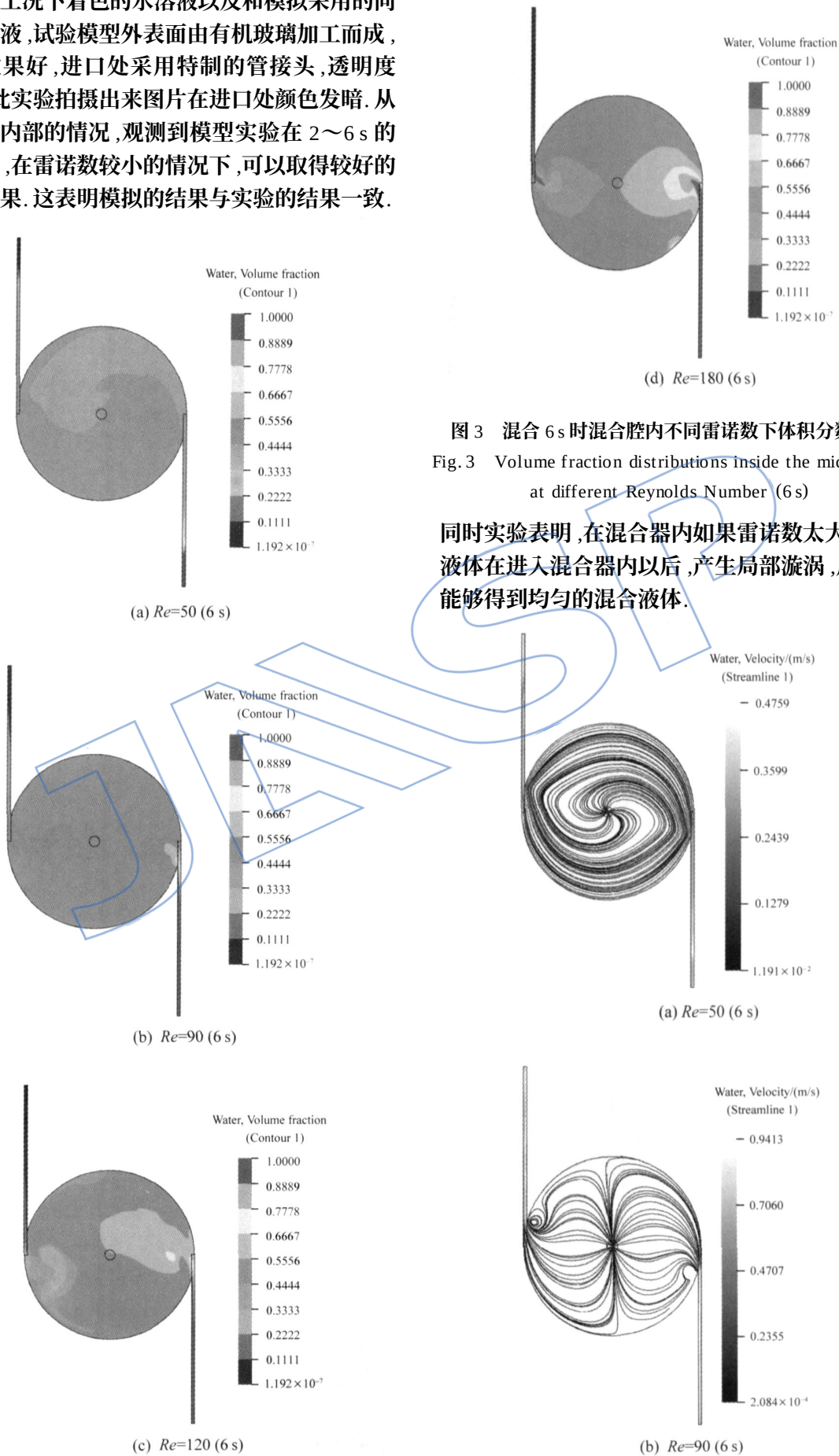


图 3 混合 6 s 时混合腔内不同雷诺数下体积分数分布
Fig. 3 Volume fraction distributions inside the micro-mixer at different Reynolds Number (6 s)

同时实验表明,在混合器内如果雷诺数太大,两种液体在进入混合器内以后,产生局部漩涡,反而不能够得到均匀的混合液体.

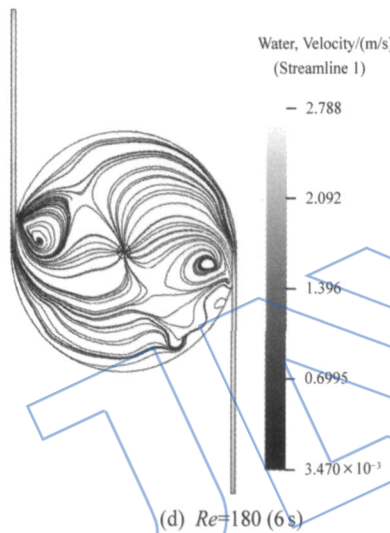
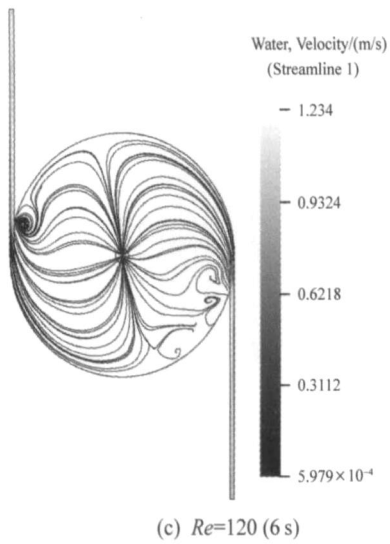


图 4 混合腔内 6s 时不同雷诺数下速度场分布
Fig.4 Velocity streamlines inside the micro-mixer
at different Reynolds Number (6s)

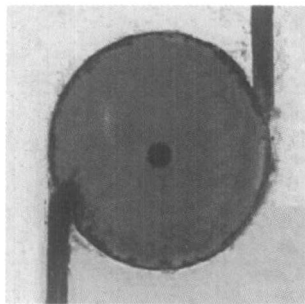


图 5 时间为 6s 雷诺数为 70 时微型混合器实验效果图
Fig.5 Experimental effect of the mixer
($Re = 70, t = 6s$)

4 结 论

通过对圆形微混合器进行模拟,该装置在没有加工扰流装置的情况下,得到了很好的混合效果.与实验结果对照表明,该模拟是合理可行的.模拟得到的流体体积分布和速度场分布能够反应实际混合过程的流动状况.结果表明,在本文设计的微混合器内,虽然没有设置专门的扰流装置,采用切向进口设计,在短时间内可以达到很好的混合效果.研究表明,混合效果并不是随着雷诺数增大而增强,只有在一定的雷诺数范围内,才能够取得均匀的混合效果;如果雷诺数太大,两种液体在进口处附近区域产生漩涡,使得混合腔内的混合溶液变得不均匀.

参考文献:

[1] Koch M.,Chatelain D,Evans A G R,et a1. Two simple micro mixers based on silicon [J]. Micromechanics Micro-eng,1998, 8(1) :123-128.

[2] Bokenkamp D,Desai A ,Yang X,et al , Micro-fabricated silicon mixers for sub millisecond quench flow analysis[J]. Analysis Chemical,1998,70(2) :232-238.

[3] FU Xin,LIU Sufen, RUAN Xiaodong, et al. Research on staggered oriented ridges static micro mixers[J]. Sensors and Actuators B,2006,114(2) : 618-624.

[4] Yang R, DWilliams J, Wang W J. A rapid micro-mixer/ reactor based on arrays of spatially impinging micro-jets [J]. Journal of Micromechanics and Micro Engineering, 2004,14 (2) : 1345-1351.

[5] 李创,陈天宁. 基于格子 Boltzmann 方法的混沌微混合器仿真研究[J]. 系统仿真学报,2004,16(7) : 1369-1371.

LI Chaung, CHEN Tianning. A simulation research for chaotic micro mixer based on lattice Boltzmann method [J]. Journal of System Simulation, 2004,16(7) : 1369-1371. (in Chinese)