

布置错位通道的微混合器内流体热混合特性

张 伟¹, 杨文杰², 何伟伟³

(1. 石家庄铁道大学 机械工程学院 河北 石家庄 050043; 2. 呼和浩特铁路局 呼和浩特电务段, 内蒙古 呼和浩特 010057; 3. 中国大秦铁路股份有限公司 大同湖东电力机务段 山西 大同 037005)

摘要: 基于常规平面微混合器内流体混合特性的研究, 对布置错位通道的微混合器进行了三维数值模拟, 分析了指定 Reynolds 数范围内微通道内流体的热混合特性。计算模型采用有限体积法离散、SIMPLEC 算法进行层流计算。结果表明, 温度在指定范围变化时, 其对混合性能的扰动作用较小。此外, 由于错位通道结构所产生的漩涡在促进混合的同时降低了流体工质的温度。

关键词: 错位通道; 微混合器; 热混合; 数值模拟

中图分类号: TK121 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2013)02-0083-05

0 引言

20 世纪 90 年代以来, 自然科学和工程技术趋向微型化发展。微流控系统(microfluidics)在化学分析、生物分析等方面表现出高效性和兼容性^[1-2]。在生物化学分析、核酸测序与合成、微电子器件冷却等领域, 都需要流体快速完成质量和热量传递, 因此微混合器成为微流控系统中重要的组成部分。微混合器表面积与体积比较大且流体输运路径短, 因此在提高传热、传质速率, 实现流体间快速高效混合方面具有巨大潜力。微混合器分为主动式微混合器和被动式微混合器^[3]。主动式微混合器借助外界动力源促进流体快速混合。被动式微混合器不需要提供额外动力, 而是借助各类不同形状和结构来控制混合过程, 因此结构简单且加工方便。平行层流微混合器是一种结构简单的被动式微混合器^[4]。

以往关于微混合器的研究均将重点放在两种流体的质量混合上, 很少涉及微混合器内热量混合特性的研究。Kockmann et al^[5]利用两种温度不同的流体在微混合器内进行热混合来产生纳米尺度的液滴。冷流体的温度从 25 °C 增加到 85 °C, 极高的温度梯度使生成的液滴直径分布均匀。Xu et al^[6]通过数值模拟, 分析微混合器中冷热流体的热混合特性并通过改变冷热流体的流量比研究其对热混合特性的影响。Xu et al^[7]通过外加电压加热流体, 研究矩形微通道内热量混沌混合情况。

由微混合的应用前景可知, 微通道内流体热混合特性及传热现象的研究至关重要, 更多的研究工作开始致力于实现微通道内热量的快速混合。具体方法由: 改变微混合器的结构, 实现混沌对流, 促使流体在较短路程内完成快速混合^[7]; 在通道中布置障碍物改变流场, 产生漩涡, 从而形成混沌混合^[8]。基于常规微通道内热混合过程的特点, 对低 Reynolds 数下布置错位通道的微混合器内的热混合过程进行数值模拟, 研究不同温度下水和乙醇的热混合性能与流动特性。

1 数值模型

对布置错位通道结构的平面被动式微混合器进行数值模拟, 错位通道布置在该微混合器的主次通道上, 如图 1 所示。数值模拟利用 Gambit 划分结构化网格, 采用 Fluent 三维双精度、非耦合隐式求解器求解, 利用 SIMPLEC 算法处理压力与速度耦合项, 空间离散采用二阶迎风格式。在数值模型过程中, 动量方程、连续性方程的计算迭代精度设置为 10^{-6} 。

收稿日期: 2012-12-21

作者简介: 张伟 男 1955 年出生 高级工程师

变物性牛顿流体在微通道内层流流动的数学模型由连续性方程、Navier-Stokes 方程、能量方程如下:

连续性方程

$$\nabla(\rho u) = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$(u \cdot \nabla) u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \eta \nabla^2 u \quad (2)$$

若忽略粘性耗散项, 能量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i c_p T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

动量方程采用二阶迎风格式。

其结果的收敛标准

$$\sum \sum |u_i(x, y, z) - u_{i,0}(x, y, z)| \leq 10^{-6} \quad (4)$$

能量方程的收敛标准

$$\sum \sum |T_i(x, y, z) - T_{i,0}(x, y, z)| \leq 10^{-7} \quad (5)$$

选用水和乙醇作为热混合工质, 首先对水和乙醇的物理性质进行分析。乙醇是一种无色、透明、易挥发、具有特殊香味的液体, 密度比水小, 能跟水以任意比互溶(一般不能做萃取剂)且不与水反应, 是一种重要的溶剂, 其物理性质(熔沸点、溶解性)与大气压力有关。在常温常压下, 乙醇的熔点 -117.3°C , 沸点 78.5°C , 密度为 0.7893 g/cm^3 。本文数值模拟过程采用的乙醇设定为无水乙醇。在数值模拟过程中采用的另一种混合工质为水。水对很多物质的溶解能力很强。考虑水的物性稳定且沸点较高, 在对微混合器混合工质变温度的数值模拟过程中改变入口工质水的温度, 而保持入口乙醇的温度不变为 293 K 。

在数值模型设定过程中, 考虑在变温度下水的物性将发生改变, 将数值模型设定中, 工质物性中水的各种参数设为 piecewise-linear。由于本文研究的是两种不发生化学反应的工质之间的混合, 无反应热产生, 在设定过程中, 需考虑水的密度、比定压热容、导热系数及粘度的变化。考虑温度对扩散系数的影响, 在流体组分设定中对密度、比定压热容、粘度及扩散系数进行逐点拟合。

2 结果及讨论

2.1 变温下微混合器性能比较

乙醇在标准大气压下, 沸腾温度为 78.3°C , 在数值模拟设定中, 混合液体温度应保持在乙醇沸点以下。设定乙醇的入口温度为 293 K 保持不变, 改变水的温度分别为: 288 K 、 298 K 、 303 K 、 313 K 、 323 K 、 333 K 、 343 K , 即: 温差分别为 $\Delta t = -5^\circ\text{C}$ 、 5°C 、 10°C 、 20°C 、 30°C 、 40°C 和 50°C 。分析在入口流体温度存在差异的情况下, 错位通道结构微混合器内流体工质的混合性能及流动特性的是否发生改变。

2.1.1 温度对流动的影响

为了说明温度对微混合器内部流体流态的影响, 选取三种具有代表性的情况进行分析, 即: $\Delta t = -5^\circ\text{C}$ 、 $\Delta t = 0^\circ\text{C}$ 、 $\Delta t = 40^\circ\text{C}$ 。研究表明, 当改变入口工质水的温度时, 尽管水的物性参数发生了改变, 但是并未根本改变微通道内流体的流动形式, 在 xoy 平面内, 主次通道上错位通道处及循环单元间混合腔处在不同温度下均会有漩涡产生; 而沿通道高度方向上, 除第一个循环单元外均产生两对儿反向漩涡; 故在本文的研究温度范围内温度对微通道内流体流型的影响可基本忽略不计。

图 2 所示为当改变流体力工质-水入口温度时, 不同雷诺数下混合强度的变化关系。结果表明, $R_e = 0.01$ 时微混合器混合效果最好, 而当 $R_e = 1$ 、 $R_e = 5$ 和 $R_e = 20$ 时微混合器混合性能均优于 $R_e = 10$ 。这再次证明了微混合器内主导混合因素的改变在 $R_e = 10$ 时发生, 此时微通道内流体流型会发生改变, 说明 R_e 数是影响微通道内混合工质流动形态的主要因素, 温度对流体力工质流动形态的影响较小。

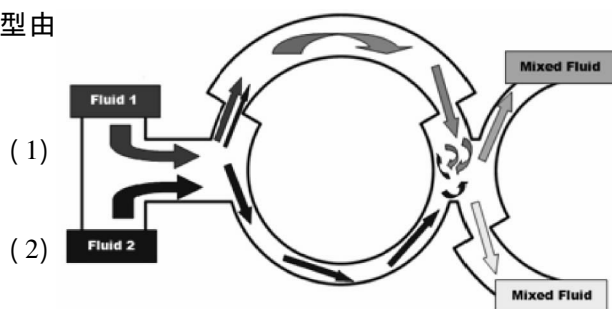


图 1 微通道的几何结构轮廓图

2.1.2 温度对混合性能的影响

图2同时表明,在不同雷诺数下,当改变流体工质入口温度时,由于流体的扩散系数及粘度等物性参数受到影响,流体工质的混合性能会有轻微改变,但这种变化极其微弱,各雷诺数下混合性能图像在图中近似呈现为直线。

为了深入分析不同入口流速下微混合器内部的温度场情况,图3给出了保持入口乙醇温度不变,在去离子水入口温度为333 K,速度分别为0.003 75 m/s、0.037 5 m/s、0.075 m/s、0.15 m/s、0.225 m/s和0.3 m/s时在微混合器通道入口截面处工作介质的温度分布。从图中可以看出,沿着流体流动方向,乙醇的温度逐步升高,水的温度逐步降低,在通道汇合口处,两种液体发生初步混合。但在入口流速不同的情况下,通道内部等温线分布曲线形状存在差异:在较小雷诺数下,等温线绝大部分呈近似光滑的曲线分布;随着雷诺数的增大,等温线形状发生改变,呈现出不规则形式,这是由于在较高的入口流速下,流体间温度分布受流体粘性和扩散系数的影响,没有足够的时间在每个横断面内达到温度的均匀分布,故温度分布形式也随主流区域呈现出不规则形状。

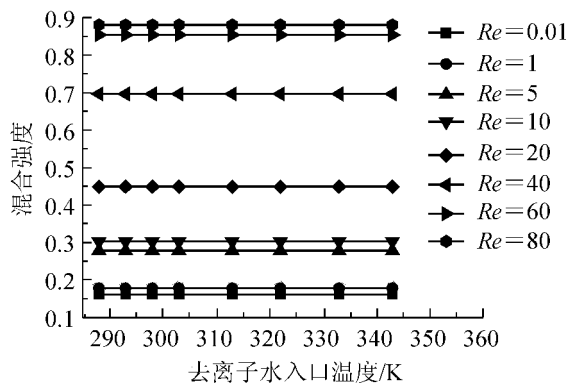


图2 不同雷诺数下混合强度
与入口温度间变化关系

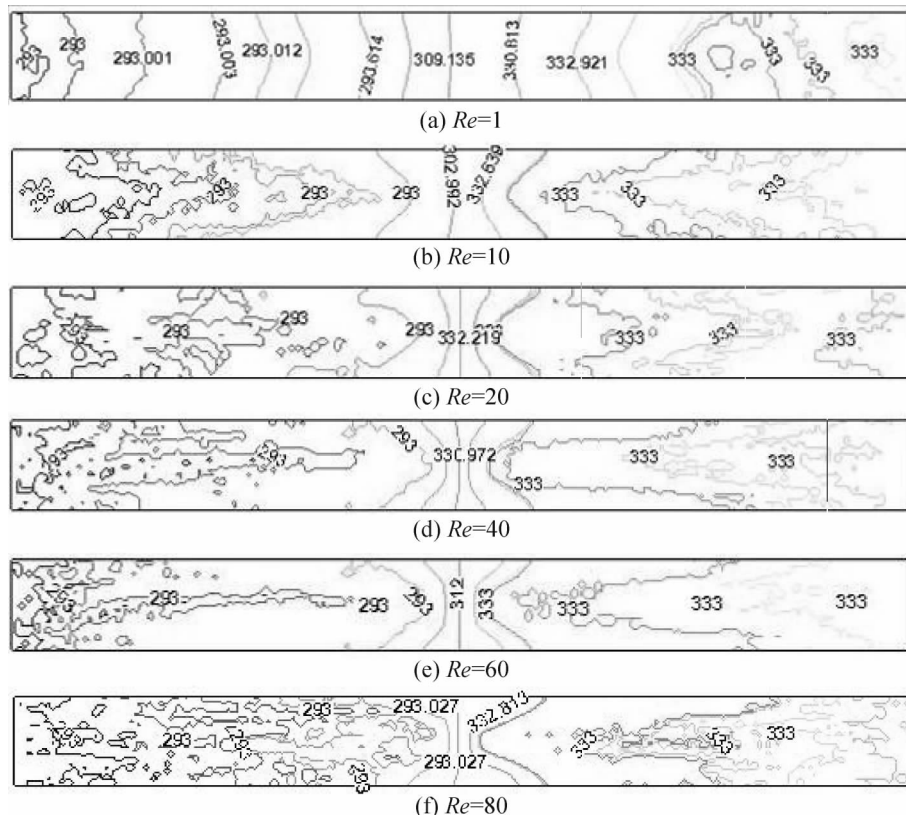


图3 T型通道区域等温线分布

当改变混合工质-去离子水的入口温度时,微混合器出口混合工质的温度发生相应的变化,如图4所示,为不同入口温度下,微混合器出口混合工质的温度变化情况。由图2分析可知,微混合器的混合性能受温度影响极小,而数值模拟分析结果显示,在给定入口工质温度,改变雷诺数时,微混合器出口处温度变化也近似为一条直线,故图4仅选取 $Re = 60$ 的情况进行研究。结果表明:混合工质的出口温度与去离子水的入口温度变化关系可近似拟合为一条直线,入口温度对出口温度影响因子的确立也再次证明错位

通道结构微混合器混合性能的稳定。

在不同温差下,微混合器的出口基本已经达到了温度的均匀分布;为了定量分析微混合器内部温度场的具体分布,本文对不同温差下温度场分布加以说明:在微混合器入口处,两股流体经过少部分的混合后,接触面上部分流体发生温度改变,此时流体间扰动较小,两股流体间基本保持分层流动状态,变温流体进入第一循环单元的主次通道内,定温流体进入第一循环单元的副次通道;在次通道内,沿着流体流动的方向,两个次通道内的流体温度逐渐降低;在两个循环单元间的混合腔处,由主次通道流出的温度较低的流体和副次通道内流出的温度较高流体发生不对称碰撞,在混合腔内出现温度介于两股流体之间的混合区域,再次证明错位通道混合腔处存在漩涡强化混合;此后混合腔内的流体发生分离,以相同的循环方式进入下一循环单元。

2.2 温度对压降的影响

压力损失作为微混合器性能的一个重要考虑因素,受到微通道几何结构及微通道内部流体的物理性质的影响,当改变微通道内部流体温度场分布时,错位通道微混合器出入口的压降变化也是本文关心的一个问题。

如图 5 所示,为不同 Re 数下,微通道出入口压降 ΔP 与入口流体去离子水温度之间的变化关系。结果表明,在不同 Re 数下,微通道内部的出入口压力损失几乎不受微通道内部温度场的影响,尽管去离子水的温度在 288 ~ 343 K 的温度范围内波动,但当 Re 数相同,去离子水入口温度不同时,压力损失曲线几乎保持为一条直线,这说明微通道内的温度场并未显著改变流体的速度场,故压力损失值波动较小。

由于在数值模拟过程中,微混合器出口设定为压力出口,而且在相同 Re 数下,微混合器内部的压力损失不受温度影响,为了更好研究压力损失的沿程变化值,如图 6 所示,为去离子水温度为 $T = 333$ K 时,沿流动方向微混合器内部的压力分布曲线。沿着流体流动的方向,各截面内压力值逐渐减小,这说明在流体流动过程中收到了沿程阻力损失及局部损失损失的作用,通过数据分布可知,这种压力损失受温度的影响较小;本文分析中截取的各点分别为入口处和其他循环单元中心处。通过数据计算可知相邻循环单元间压力损失值分别为 2 332 Pa、2 255 Pa 和 2 328 Pa,说明循环单元结构相同,其压力损失基本保持不变。

3 结论

本文研究了变温度下混合工质水的物性变化,通过改变入口水的温度,利用 Fluent 软件对布置错位通道的微混合器进行了三维数值模拟,并分析了温度对于微混合器内部流动、换热及混合的影响,得到如下结论:

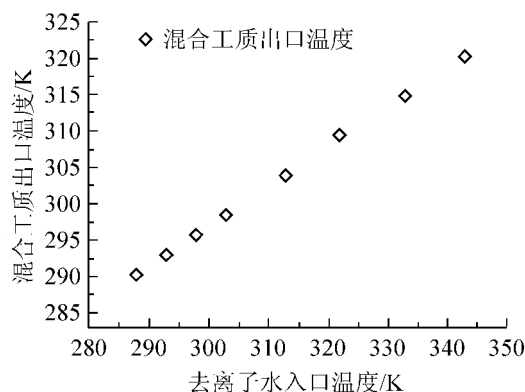


图 4 微混合器混合工质出口温度与去离子水入口温度间的关系

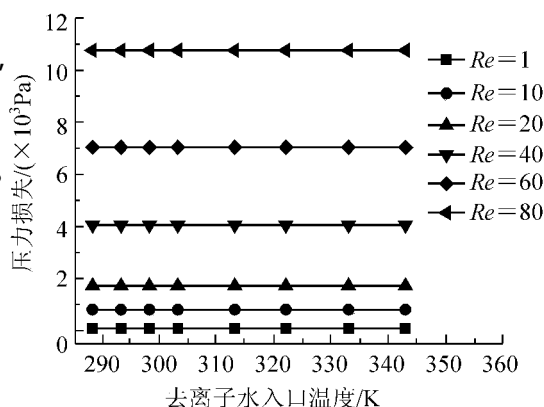


图 5 不同雷诺数下去离子水入口温度与压力损失值的关系

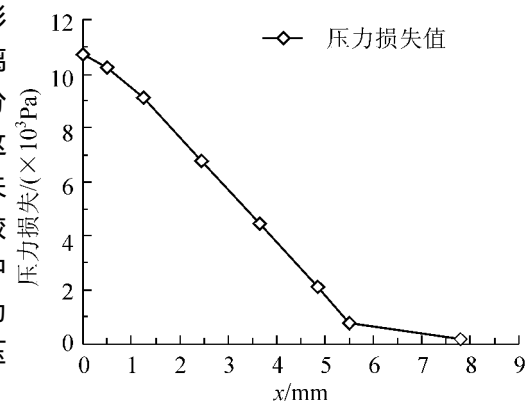


图 6 $T = 333$ K 沿流动方向压力分布

(1) 通过分析给定雷诺数下, 当温度的变化范围为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta t \leq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 温度对于混合工质流动形态的影响可忽略不计; 混合强度作为衡量微混合器性能的重要参数, 当改变微混合器入口流体工质的温度时, 错位通道的混合强度值, 在不同雷诺数下均未发生明显改变, 其混合强度几乎保持为一条水平直线, 这再次证明了该微混合器混合性能的稳定性, 入口流体的温度对混合性能的扰动作用较小。

(2) 在水平面内, 循环单元间混合腔内存在流体低温区及微通道高度方向上反向漩涡的中心流体温度相对较低, 这均可以证明漩涡在促进混合的同时降低了流体工质的温度。

(3) 微混合器内的压力损失包括沿程阻力损失及局部阻力损失, 两种压力损失均与流体工质的速度有关, 当保持入口流速保持不变时, 改变入口流体温度对微混合器出入口的压力损失影响甚微。

参 考 文 献

- [1] Nguyen N T, Wu Z. Micromixers—review [J]. J. Micromech. & Microeng 2005, 15: 1-16.
- [2] Hessel V, Lowe H, Schonfeld F. Micromixers—a review on passive and active mixing principles [J]. Chemical Engineering Science 2005, 60: 2479-2501.
- [3] Elmabruk A, Mansur, Mingxing Y E, WANG Yundong et al. A State-of-the-Art Review of Mixing in Microfluidic Mixers [J]. Journal of Chemical Engineering 2008, 16(4): 503-516.
- [4] Wong S H, Ward M C L, Wharton C W. Micro T-mixer as a rapid mixing micromixer [J]. Sensors and Actuators 2004, 100(3): 359-379.
- [5] Kockmann N, Dreher S, Engler M et al. Simulation and characterization of microreactors for aerosol generation [J]. Microfluid Nanofluid 2007, 3: 581-589.
- [6] Bin Xu, Teck Neng Wong, Nam-Trung Nguyen et al. Thermal mixing of two miscible fluids in a T-shaped microchannel [J]. Biomicrofluidics 2010, 4(4): 044102.
- [7] Bin Xu, Teck Neng Wong, Nam-Trung Nguyen. Experimental and numerical investigation of thermal chaotic mixing in a T-shaped microchannel [J]. Heat Mass Transfer, 2011, 47: 1331-1339.
- [8] 黄志勇, 姚梅生, 马昌文, 等. 高温气冷实验堆堆底流道的热混合性能 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1995, 35(6): 1-5.

Thermal Mixing Performance of Micromixer with Dislocation Sub-channel

Zhang Wei¹, Yang Wenjie², He Weiwei³

(1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Huhhot Electricity Section of Huhhot Railway Administration, Hohhot 010057, China;

3. Hudong Locomotive Depot, Daqin Railway Co., Ltd, Datong 037005, China)

Abstract: Based on the mixing performance analysis of fluids in the passive micromixer, the thermal mixing performance of T-shaped micromixer with dislocation sub-channel has been analyzed numerically with three-dimensional Navier-Stokes equations under particular range of Reynolds numbers in this paper. The finite volume method is used to disperse the three-dimensional steady incompressible N-S equations. The result shows that the temperature has a small role in the disturbance of the mixed performance when it is changed within a specified range. Furthermore, the vortex generated by the dislocation sub-channel structure facilitates mixing as well as reduces the temperature of the working fluid.

Key words: dislocation sub-channel; micromixer; thermal mixing; numerical simulation

(责任编辑 刘宪福)