

研究论文

结构参数对布置窄缝和挡板的微混合器内流体流动和混合的影响

李艺凡, 夏国栋, 王军

(北京工业大学环境与能源学院强化传热与过程节能教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 基于混沌对流原理设计了一种布置窄缝和挡板结构的被动式微混合器, 并采用三维数值模拟和可视化实验对该微混合器内流体流动与混合特性进行了研究。窄缝和挡板的共同作用使微混合器水平面内形成了扩展涡和分离涡, 垂直流动方向的截面内形成了对称的反向旋涡, 多维度涡系显著提高了混合效率。窄缝和挡板的结构尺寸对流体流动和混合有重要影响。综合考虑混合强度和压降, 利用场协同原理分析窄缝宽度、窄缝长度、挡板高度对微混合器综合性能的影响并得到了不同 Reynolds 数条件下的最优结构参数。

关键词: 微尺度; 混合; 场协同原理; 结构优化; 数值模拟

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20150086

中图分类号: TQ 027.1

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2015) 10—3857—09

Effect of structural parameters on fluid flow and mixing characteristics in micromixer with gaps and baffles

LI Yifan, XIA Guodong, WANG Jun

(Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation Ministry of Education, School of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A passive micromixer with gaps and baffles was proposed based on the principle of chaotic mixing and the fluid flow and mixing characteristics in the micromixer were studied by three-dimensional numerical simulation and visualization experiment. Expanded vortices and separated vortices were generated in the horizontal plane and counter-rotating vortices formed in the cross-sectional plane perpendicular to the flow direction by the combination of gaps and baffles. The mixing efficiency was significantly improved by the multidirectional vortices. The geometrical parameters of gaps and baffles had great effect on the fluid flow and mixing. Based on the consideration of mixing efficiency and pressure drop, the effect of gap width, gap length and baffle height on the comprehensive performance of the micromixer was investigated by the field synergy principle. The optimal structural parameters were presented with varying Reynolds number.

Key words: microscale; mixing; field synergy principle; structural optimization; numerical simulation

引 言

近年来, 微流控芯片 (microfluidic chip) 由于

具有比表面积大, 流体表面张力和黏性力作用强, 试剂用量少等特点, 广泛应用于生物化工领域。对于生物分析、化学合成而言, 大多需要试剂快速高

2015-01-20 收到初稿, 2015-05-07 收到修改稿。

联系人: 夏国栋。第一作者: 李艺凡 (1988—), 女, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51176002); 国家重点基础研究发展计划项目 (2011CB710704); 北京市自然科学基金项目 (3142004)。

Received date: 2015-01-20.

Corresponding author: Prof. XIA Guodong, xgd@bjut.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (51176002), the National Basic Research Program of China (2011CB710704) and the Natural Science Foundation of Beijing (3142004).

效混合, 因此微混合器成为微流控系统的关键部分^[1]。微尺度下流体流动通常为层流, 混合时间较长, 因此提高微混合器的混合性能成为研究重点^[2]。

被动式微混合器通过优化设计微通道结构对流体形成扰动, 增加流体间的接触面积, 从而提高混合效率, 不需要附加动力源^[3-6], 因此更加稳定且易于集成。混沌对流 (chaotic advection) 是指利用特殊的通道形式使流体在层流条件下, 产生扩散特性接近于湍流的流动状态, 这种流动状态下流体粒子轨迹为混沌态^[7]。利用混沌对流原理使原本平行的流体层发生拉伸、分割、扭曲、折叠等现象, 促使流体产生横向流动和旋涡区, 可显著强化混合^[3-4]。在微通道中设置障碍物是实现混沌对流的方法之一^[8-9]。许多研究者对障碍物的形状、布置方式、几何尺寸等进行研究, 结果表明, 障碍物的结构参数对微混合器的混合性能有很大影响, 通过结构优化能够极大提高混合效率^[10-11]。混合强度和压降是微混合器的重要性能参数, 实际应用中往往希望混合效率高且压降较小。已有文献^[6,12-13]大多为研究结构参数对混合效率和压降的影响, 不能够综合评价微混合器的整体性能。对流传质的场协同原理是从流体速度场和组分浓度场内在联系的角度分析强化传质机理, 证明了减小速度矢量和组分浓度梯度间的夹角是强化混合的有效措施, 提出了通过改善速度场与浓度场的协同关系控制对流混合的方法^[14-16]。利用该原理能够从传质的角度对混合机理进行分析, 并对微混合器的综合性能进行评价, 但目前尚缺乏相关报道。

本文设计了一种布置窄缝和挡板结构的微混合器, 通过三维数值模拟和可视化实验分析该微混合器内流体的流动和混合特性。综合考虑混合性能和压降两个因素, 利用场协同原理分析窄缝宽度、窄缝长度及挡板高度对微混合器综合性能的影响。

1 混合器设计

图 1 为布置窄缝和挡板结构的微混合器。该微混合器由“十字形”入口和一系列窄缝 (G_1 、 G_2) 和挡板 (B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4) 组成。流体 1 由入口 1 和入口 2 进入微混合器, 流体 2 由入口 3 流入微混合器。微混合器高 $100\ \mu\text{m}$, 总长度为 $1.9\ \text{mm}$, 入口 1 和入口 2 通道宽度相等且均为入口 3 通道宽度的一半, 以保证不同组分流体等量注入通道便于比较。窄缝 G_1 、 G_2 的宽度 W_d 、长度 S_d 和挡板 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 的高度 H 作为结构优化的 3 个参数。为保证

微混合器总长度不变, 窄缝长度 S_d 改变时, 图 1 中 L_1 和 L_2 不变, 直通道长度 L_3 随 S_d 变化。本文对结构参数不同的微混合器进行比较均以微混合器总长度一定为基准, 比较一定混合长度内的混合效率和压降。保持不变的结构参数为 $W_a=W_b=80\ \mu\text{m}$; $W_c=160\ \mu\text{m}$; $W_e=30\ \mu\text{m}$; $W_f=100\ \mu\text{m}$; $W=290\ \mu\text{m}$; $B=50\ \mu\text{m}$; $L_1=100\ \mu\text{m}$; $L_2=510\ \mu\text{m}$ 。

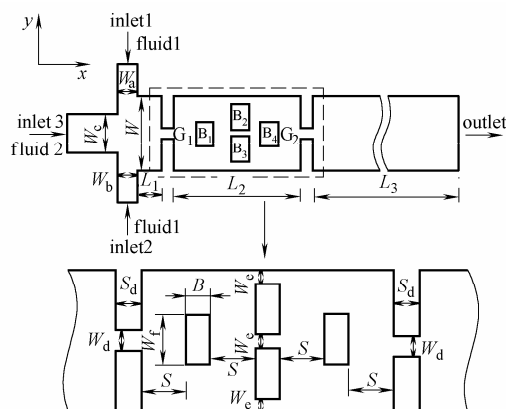


图 1 布置窄缝和挡板结构的微混合器

Fig.1 Schematic diagram of micromixer with gaps and baffles

2 数值模拟

本文利用 Fluent 6.3 软件对微混合器内的流体流动与混合特性进行三维数值模拟。采用去离子水和黑色墨水溶液作为两种可无限互溶的流体质。数值模拟中去离子水的密度 $\rho = 998\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 动力黏度系数 $\mu = 0.97 \times 10^{-3}\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 扩散系数 $D = 3.23 \times 10^{-10}\ \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ^[8]。两种混合工质间不发生化学反应, 可忽略溶解热效应。通常用 Knudsen 数来判断宏观尺度的数学模型及边界条件是否适用于微尺度。本文模拟条件下 Knudsen 数远小于 10^{-3} , 因此 N-S 方程及无滑移条件仍适用。流动为稳态、层流, 流体为不可压缩牛顿流体, 忽略重力作用, 控制方程包括连续性方程、动量方程和组分浓度方程, 分别为

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (2)$$

$$\mathbf{V} \cdot \nabla C = D \nabla^2 C \quad (3)$$

式中, $\mathbf{V}$ 为速度矢量; $\nabla \mathbf{V}$ 为速度梯度; ρ 为工质的密度; μ 为动力黏度系数; p 为压力; D 和 C 分别表示组分扩散系数和组分浓度。

微混合器 3 个入口均为速度入口边界条件, 出口相对压力为零, 壁面设为绝热边界条件。采用 SIMPLEC 方法耦合压力项, 空间离散采用二阶迎风

格式。采用六面体结构化网格进行网格划分。本文 Reynolds 数变化范围为 0.1~60, 根据去离子水的物性参数和入口 3 的当量直径进行计算。 $Re=40$ 时, 网格数为 19.6 万、41.5 万、63.9 万个的计算单元分别与网格数为 151.5 万个的微混合器计算单元得到的进出口压降比较, 最大误差分别为 3.2%、0.9% 和 0.005%。因此微混合器计算单元取总网格数 63.9 万个。当各变量间相对残差小于 10^{-8} 时, 数值结果被判定为收敛。

3 微混合器性能评价方法

大多数文献中采用混合强度对微混合器的混合性能进行评价^[10,13,17-19], 计算公式如下

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (c_i - c_\infty)^2} \quad (4)$$

$$M = 1 - \sqrt{\frac{\sigma^2}{\sigma_{\max}^2}} \quad (5)$$

式中, n 为微通道横截面上浓度值采样点个数, 本文为 1160; c_i 为任意垂直于流动方向的截面上某组分在采样点上的组分质量分数; c_∞ 为充分混合时的组分质量分数, 为 0.5; σ 为垂直于流动方向的横截面上组分质量分数的偏差; $\sigma_{\max}$ 为截面上初始时刻无混合时质量分数的偏差, 本文为 0.5; $M(0 \leq M \leq 1)$ 为横截面上的混合强度。混合强度 M 为 0 表示组分间完全不混合, 混合强度 M 为 1 表示不同组分流体间完全混合。本文统一选取微混合器出口截面 (距入口 1.9 mm 的 y - z 截面) 计算混合强度 M , 对不同结构参数的微混合器的混合效率进行比较。实验结果也是选取距离入口 1.9 mm 处得到的, 与数值模拟中出口截面的位置相同。

进出口压降是微混合器实际应用中的一个重要参数, 压降过高的微混合器不仅消耗较高的泵功且不利于封装和集成。因此综合考虑混合强度和压降, 得到混合效率高且压降较小的结构是被动式微混合器结构优化的关键。本文根据场协同原理对微混合器的混合效率和压降进行综合评价。

对稳态、无组分源项、层流、三维组分浓度方程, 即式(3), 进行积分可得

$$\iiint_{\Omega} \rho \mathbf{V} \cdot \nabla C dV = \iint_{\Gamma} \mathbf{n} \cdot (\rho D \nabla C) dS = \iint_{\Gamma_{ms}} \mathbf{n} \cdot (\rho D \nabla C) dS \quad (6)$$

速度矢量和组分浓度梯度的点积可表示为

$$\mathbf{V} \cdot \nabla C = |\mathbf{V}| |\nabla C| \cos \beta_m \quad (7)$$

式中, β_m 为速度矢量和组分浓度梯度间的协

同角。

根据动量方程, 压降可以表示为

$$\Delta p = \int_V \rho (\mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V}) dV + \int_0^L \tau_w dL \quad (8)$$

式中, τ_w 代表壁面剪切力。速度矢量和速度梯度的点积表示为

$$\mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = |\mathbf{V}| |\nabla \mathbf{V}| \cos \alpha \quad (9)$$

式中, α 为速度矢量和速度梯度间的协同角。

可见, 协同角 β_m 越小, 速度矢量方向和浓度梯度方向之间的偏差越小, 对强化传质越有利; 协同角 α 越大, 速度矢量方向和速度梯度方向之间的偏差越大, 对减小压降越有利。

此外, 速度梯度与组分浓度梯度之间的点积可表示为

$$\nabla C \cdot \nabla \mathbf{V} = |\nabla C| |\nabla \mathbf{V}| \cos \gamma \quad (10)$$

对于层流流动, 有 $\gamma = |\alpha - \beta_m|$ ^[20]。速度梯度与组分浓度梯度之间的协同关系可用协同角 γ 表示。 γ 增大, 表示协同角 α 增大或协同角 β_m 减小, 也就是说, 协同角 γ 越大, 表示微混合器的压降越小且传质性能越好, 因此协同角 γ 越大, 微混合器的综合性能越好。本文利用协同角 γ 将混合效率和压降联系起来, 为评价微混合器的综合性能提供新思路。实际应用中, 应兼顾混合效率、压降和场协同角 γ 来评价微混合器。

4 结果与讨论

4.1 实验分析

本文借助微流体实验平台进行可视化实验研究, 对微混合器内流体混合特性进行定性和定量分析, 并与数值模拟结果对比。微混合器实验件采用聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 材质, 利用软刻蚀法加工。实验前, 先将去离子水放入真空环境中静置除气, 避免水中气泡影响流型。实验中, 为了便于观察混合现象, 采用去离子水和黑色墨水溶液 (用去离子水稀释到 $0.025 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$) 作为两种流体质, 扩散系数为 $D = 3.23 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 墨水颜色变化反映混合程度^[8,11]。利用微注射泵 (Harvard PHD22/2000) 分别将去离子水和黑色墨水溶液等速注入微混合器。使用荧光显微镜 (尼康 Eclipse 80i) 结合 CCD 照相机 (尼康 DS-Fi1) 捕捉流体混合过程的光学图像。实验中, 环境压力和温度分别为 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 和 20°C 。

图 2(a) 为不同 Re 下, 实验得到的光学图像。图 2(b) 为相同参数下数值模拟得到的浓度、流线分布。

本文研究不同结构微混合器所选取的 x - y 截面均为微通道高度方向上的中心截面, 即 $z=50\ \mu\text{m}$ 的平面。该微混合器的结构参数为 $W_d=40\ \mu\text{m}$ 、 $S_d=50\ \mu\text{m}$ 、 $H=100\ \mu\text{m}$ 。由图可知, 实验和模拟得到的流体流动形态、混合效果均吻合良好。 $Re=0.1$ 时, 流体流动速度非常慢, 在给定的混合长度内分子扩散较充分, 因此混合效果较好。 $Re=1$ 时, 流速比 $Re=0.1$ 时大, 混合时间缩短, 两种流体交界面变得清晰, 混合强度降低。 Re 继续增大, 对流混合逐渐取代分子扩散成为混合的主导作用, 窄缝和挡板结构对混合效果的影响增强, 通道内产生了旋涡区。

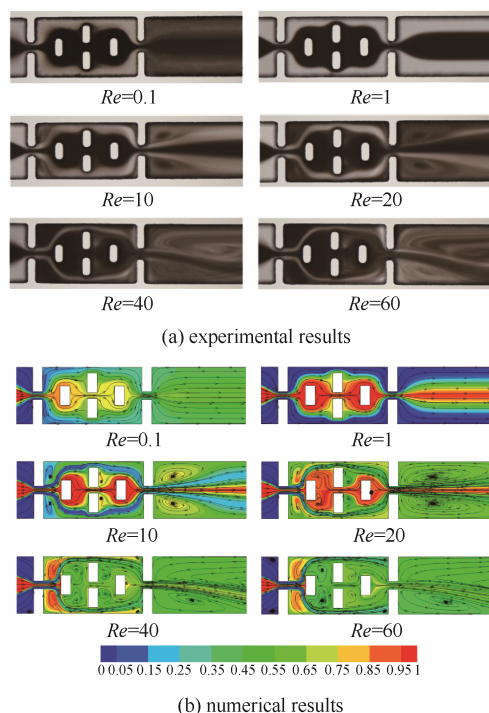


图 2 不同 Re 下微混合器 x - y 截面内流体流动和混合特点
Fig.2 Characteristics of fluid flow and mixing in x - y planes of micromixer with different Re

利用 Image J 软件提取混合图像的灰度值, 代入式(4)和式(5)中计算得到混合强度, 并和数值模拟结果比较, 见图 3。可以看出, 在所研究的 Re 范围内, 实验得到的数据与数值模拟结果吻合度较好, 验证了该数值模拟方法的有效性。模拟数据与实验数据的平均相对误差为 8.65%, 存在误差的原因: 模拟中假设用墨水标记的去离子水和纯净去离子水物性参数相同; PDMS 微混合器有一定的粗糙度, 由于钝化作用不能形成精确的直角。通道内流体的混合强度随 Re 的增大先减小后增大, $Re=1$ 时, 混合强度最小 (数值模拟结果为 0.481, 实验结果为 0.407)。 $Re=0.1$ 和 $Re \geq 40$ 时, 模拟和实验结果均

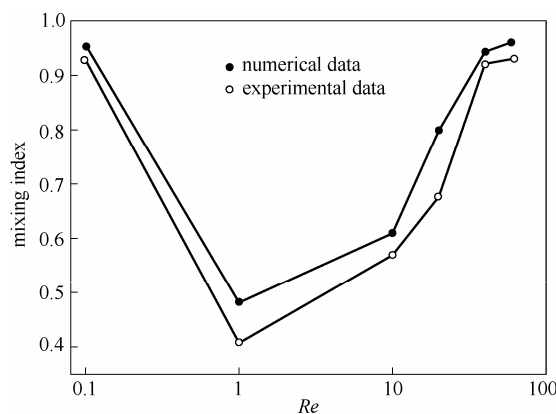


图 3 实验数据和模拟数据的对比

Fig.3 Comparison between numerical and experimental results

大于 0.9。

4.2 窄缝宽度 W_d 对微混合器影响的数值分析

图 4 比较了不同 W_d 时, 混合强度和压降随 Re 的变化 ($S_d=50\ \mu\text{m}$, $H=100\ \mu\text{m}$)。由图可知, 随着 W_d 减小, 混合强度显著增加。 W_d 减小使分子扩散向对流混合的转变点提前。 $W_d=10\ \mu\text{m}$ 时, 分子扩散与混沌对流间的转换不明显, 混合强度均大于 95%。随着 Re 增加, 压降逐渐增加。 W_d 越小, 混合器压降越大。 $W_d=10\ \mu\text{m}$ 时流体的惯性碰撞和旋涡区的运动造成了较大的能量损失。窄缝宽度是影响该微混合器性能的重要结构参数。

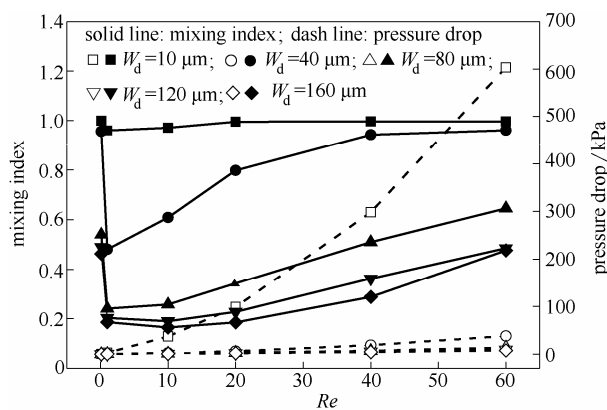
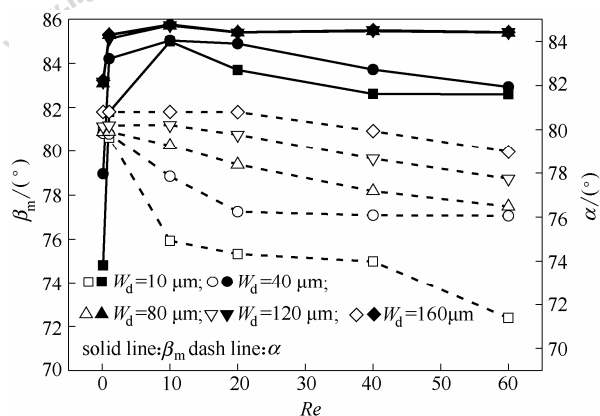


图 4 不同 Re 下窄缝宽度对混合强度和压降的影响

Fig.4 Effect of gap width on mixing index and pressure drop with different Re

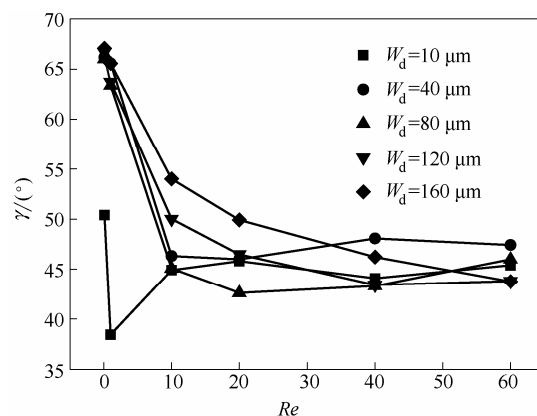
图 5 为平均场协同角 β_m 和 α 随 Re 的变化。如图所示, $W_d=10\ \mu\text{m}$ 时, β_m 最小; $W_d=160\ \mu\text{m}$ 时, β_m 最大。 W_d 越小, 流体在垂直流动方向上的运动越剧烈, 速度矢量与浓度梯度间的夹角越小, 混合效率越高, 这与混合强度的结果一致。随着 W_d 减小, α 减小, 说明微混合器压降增大, 这与压降的结果一

图5 平均场协同角随 Re 的变化Fig.5 Average field synergy angle varied with Re

致。图4和图5的一致性说明利用场协同角能够准确评价微混合器的混合性能和压降。

对 $W_d=10$ 、40、160 μm 的微混合器内浓度及流线分布进行比较, 见图6。 $Re=1$, $W_d=10$ μm 时, 节流作用很强, 在窄缝后产生了回流。 $Re=20$ 时, 微混合器内产生旋涡区, W_d 越大旋涡区越小。 $Re=60$ 时, $W_d=10$ μm 的微混合器内流动最紊乱, 流体经过窄缝 G_2 后, 在直通道内形成4个旋涡区; $W_d=40$ μm 的微混合器内形成了成对的扩展涡和分离涡; $W_d=160$ μm 时, 扩展涡较小且靠近通道侧壁, 混合效果较差。

不同 W_d 下场协同角 γ 的变化如图7所示。 Re 较小且窄缝较宽时, 窄缝对流体的阻挡作用小, 微混合器的压降较低, 因此有利于提高混合器的整体性能, $W_d=160$ μm 时 γ 较大。对于 $Re \geq 40$, $W_d=40$ μm 时 γ 最大。这是由于减小 W_d 能够增强混沌对流, 速度梯度和浓度梯度协同关系更好。因此 $W_d=40$ μm 时微混合器的整体性能较好。若 $W_d > 160$ μm , $Re < 40$ 时, 窄缝宽度对 γ 的影响较小; $Re \geq 40$, $W_d=40$ μm 时 γ 仍最大。

图7 不同窄缝宽度条件下平均场协同角 γ 随 Re 的变化Fig.7 Variations of average field synergy angle γ with Re for different gap width

4.3 窄缝长度 S_d 对微混合器影响的数值分析

图8为不同窄缝长度下混合强度和压降随 Re 的变化(取 $W_d=40$ μm , $H=100$ μm , 图中空心方形、圆形、上三角、下三角、菱形分别代表 $S_d=20$ 、50、100、150、200 μm)。 $S_d=20$ μm 时窄缝对流体的挤压作用弱, 混合效率始终最低。对于 $Re=0.1 \sim 10$, $S_d=100$ μm 时混合强度最大; $Re=20 \sim 60$, S_d 不同时

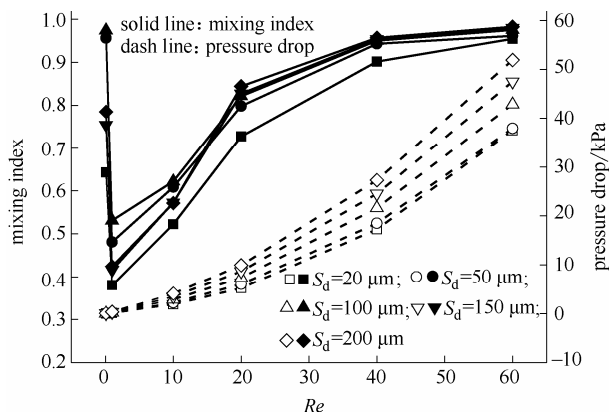
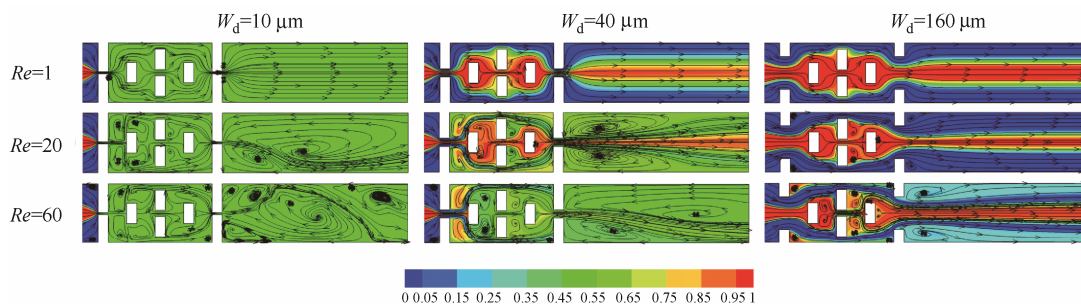
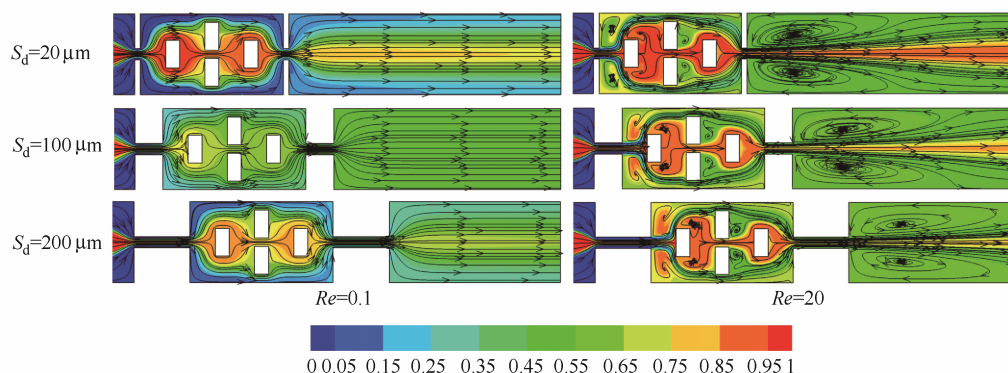


图8 窄缝长度对混合强度和压降的影响

Fig.8 Effect of gap length on mixing index and pressure drop

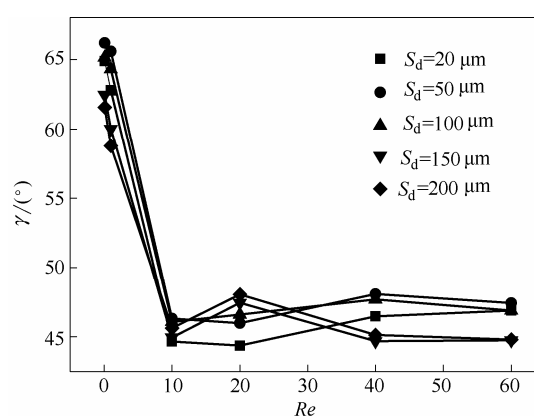
图6 $Re=1$ 、20、60 时不同 W_d 的微混合器内 x - y 截面上浓度和流线分布Fig.6 Concentration and streamline distributions in x - y planes of micromixers with varying W_d at $Re=1$, 20, 60

图 9 微混合器 x - y 平面内浓度和流线分布Fig. 9 Concentration and streamline distributions on x - y planes of micromixers ($S_d=20, 100, 200 \mu\text{m}$, $Re=0.1, 20$)

混合强度相差较小, $S_d=200 \mu\text{m}$ 时混合强度略大于其他结构。如图所示, 随着 S_d 增大, 窄缝对流体的挤压时间增长, 阻力损失增加。

图 9 为 $S_d=20, 100, 200 \mu\text{m}$ 时混合工质在 x - y 平面内的浓度和流线分布。当 $Re=0.1$, $S_d=100 \mu\text{m}$ 时混合效果最好, $S_d=200 \mu\text{m}$ 次之, $S_d=20 \mu\text{m}$ 最低; $Re=20$ 时, 混合强度随 S_d 增加有所提高。一方面, 窄缝对流体的挤压作用可以缩短扩散距离, 使分子扩散更加充分; 另一方面, 窄缝产生喷射节流效应, 有益于混沌对流。 Re 较小时, 窄缝过长会使流体处于高速流动的时间延长, 流体流经微混合器的总时间缩短, 流体接触不充分, 对分子扩散为主导的混合不利, 因此不是窄缝越长混合效果越好。 S_d 越大, 流动阻力越大, 流体静压值降低越多。通道中心处速度比壁面处高, 分子扩散效果较好。而 Re 较大时, 窄缝越长形成的扩展涡越大, 在旋涡区内形成逆向压力梯度且流速较低, 流体充分掺混、碰撞, 较强的喷射效应有利于混沌对流。

不同窄缝长度时协同角 γ 随 Re 的变化如图 10 所示。对于 $Re=0.1 \sim 10$, $S_d=50 \mu\text{m}$ 时 γ 值最大; $S_d=20 \mu\text{m}$ 时, 窄缝缩短扩散距离的作用小; $S_d \geq 100 \mu\text{m}$, 微混合器压降较大, 因此微混合器整体性能较差。 $Re=20$ 时, $S_d=200 \mu\text{m}$ 的微混合器 γ 最大。对于 $Re=40, 60$, $S_d=50 \mu\text{m}$ 时协同角 γ 最大, 原因是增加窄缝长度虽然增强混沌对流, 但压降增加更明显。若 $S_d > 200 \mu\text{m}$, $Re=10, 20$ 时, 混合强度随 S_d 增加进一步增加。 $S_d=505 \mu\text{m}$ ($L_3=0$), 即挡板之后完全变为窄通道时, 混合效率较低, 这是由于失去了原来的突扩结构, 不能形成扩展涡。由于 S_d 越大, 压降越大, $S_d > 200 \mu\text{m}$ 时, 协同角 γ 值较小, 窄缝长度继续增加对微混合器综合性能最佳值无影响。

图 10 不同窄缝长度条件下平均场协同角 γ 随 Re 的变化Fig. 10 Variations of average field synergy angle γ with Re for varying gap length

4.4 挡板高度 H 对微混合器影响的数值分析

挡板高度 $H=0 \mu\text{m}$ 时, 表示微混合器内无挡板结构; $H=100 \mu\text{m}$ 表示挡板高度与微通道高度相同。取 $H=0, 25, 50, 75, 100 \mu\text{m}$ 进行数值模拟 ($W_d=40 \mu\text{m}$, $S_d=50 \mu\text{m}$), 如图 11 所示。在所研究的 Re 范围内, $H=100 \mu\text{m}$ 时混合强度最高。当 $Re=0.1$, $H=25, 50, 75 \mu\text{m}$ 时混合效率相差不大, 均比 $H=0 \mu\text{m}$ 时的混合效率低。对于 $Re > 1$, $H=0 \mu\text{m}$ 时混合效果最差, 且分子扩散和混沌对流的转换点推迟。由图可知, 随着 H 增加, 挡板对流体的阻碍作用增大, 压降逐渐升高。

图 12 为挡板高度不同的微混合器的浓度及流线分布。 $Re=0.1$ 时, 流动非常缓慢, $H=0 \mu\text{m}$ 时流体进行了充分的分子扩散, 加之窄缝的挤压作用, 混合效果优于 $H=50 \mu\text{m}$ 的混合器。 $H=50 \mu\text{m}$ 时挡板不能将流体完全分离, 一部分流体由挡板上方流过, 且挡板使流动截面积减小, 缩短了混合时间, 混合

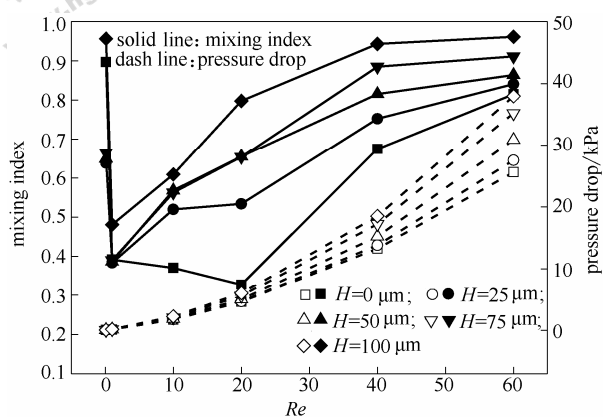


图11 不同挡板高度条件下混合强度和压降随 Re 的变化
Fig.11 Variations of mixing index and pressure drop with Re under varying baffle height

效果不佳。 $H=100\ \mu\text{m}$ 时, 流体被挡板完全分离, 挡板 B_2 、 B_3 之间及其与通道侧壁间的缝隙对流体挤压, 混合效果最好。 $Re=60$, $H=0\ \mu\text{m}$ 时由于缺乏挡板的扰流作用, 窄缝 G_1 后只产生了一对扩展涡, 且涡系主要位于流体 1 内, 混合效果最差; $H=50\ \mu\text{m}$ 时, 旋涡主要在窄缝处产生; $H=100\ \mu\text{m}$ 时, 挡板后产生了分离涡, 混合性能最好。

沿 x 方向取微混合器不同位置处 y - z 截面, 比较 $H=0$ 、 50 、 $100\ \mu\text{m}$ 时 y - z 截面上的流线分布, 如图 13 所示。 Re 很小时, $H=0$ 、 $100\ \mu\text{m}$ 的微混合器内基本不存在 z 方向上的运动。 $H=100\ \mu\text{m}$ 时, 流体被分离成几股绕过挡板流动, 截面 B - B 、 C - C 上流线较 $H=0\ \mu\text{m}$ 时复杂; $H=50\ \mu\text{m}$ 时, 流体在截面 B - B 、 C - C 上存在 z 方向的运动。对于 $Re=60$, 微混合器内均产生旋涡。 $H=0\ \mu\text{m}$ 时, 截面 A - A 、 B - B 、 C - C 内, x - y 平面内的扩展涡使流体产生 y 方向上的流动。 D - D 截面处, 由于窄缝的阻挡,

流动方向改变, 产生很小的回流区。 $H=50\ \mu\text{m}$ 时, 截面 A - A 上出现了一对方向相反的旋涡, 在截面 B - B 上演变为两对大小不等的反旋涡, 在垂直流动方向的平面内产生了涡系。这是因为窄缝 G_1 的挤压作用和挡板对底部流体的分离作用, 使微通道下部流体与上部流体流速不同。随着窄缝作用减弱, 截面 C - C 、 D - D 内旋涡减小。 $H=100\ \mu\text{m}$ 时, 水平面内形成的扩展涡使截面 A - A 内流体由微通道侧壁向通道中央汇聚。截面 B - B 内出现两对大小相等方向相反的旋涡。截面 C - C 内, 经过挡板 B_2 、 B_3 的 3 股流体重新汇合。在 D - D 截面内, 流体向通道中心流动。3 个微混合器内窄缝 G_2 作用相同, 因此截面 E - E 内流线分布相似。挡板能够使流体在垂直流动方向的截面内产生旋涡, 促进微通道高度方向上流体的掺混。

图 14 为不同 Re 下挡板高度对平均场协同角 γ 的影响。 $Re=0.1$ 、 1 时, H 对协同角 γ 的影响不大。 $Re<40$ 时, 压降最小的 $H=0\ \mu\text{m}$ 的微混合器 γ 最大。随着 Re 增大, 流体产生垂直 x 方向的流动, 挡板在水平面及竖直截面内诱发涡系。 $Re\geq 40$ 时, $H=100\ \mu\text{m}$ 的微混合器综合性能最佳。因此 $Re<40$ 时, 可以仅布置窄缝使微混合器获得较好的综合性能, 但这种结构的混合效率较低。 $Re\geq 40$ 时, 挡板高度与微通道高度相等时最优。

5 结 论

本文对布置窄缝和挡板结构的微混合器内流体流动和混合特性进行了数值模拟和实验研究。根据场协同原理对不同窄缝宽度、窄缝长度和挡板高度的微混合器的混合性能进行分析比较。结果表明,

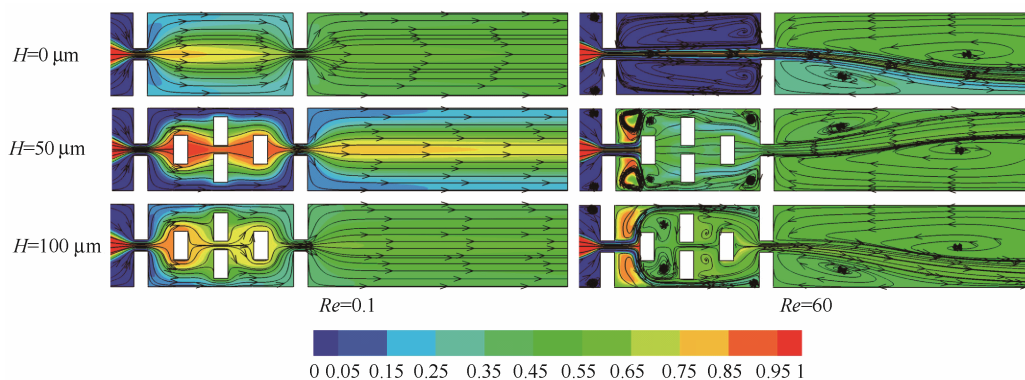
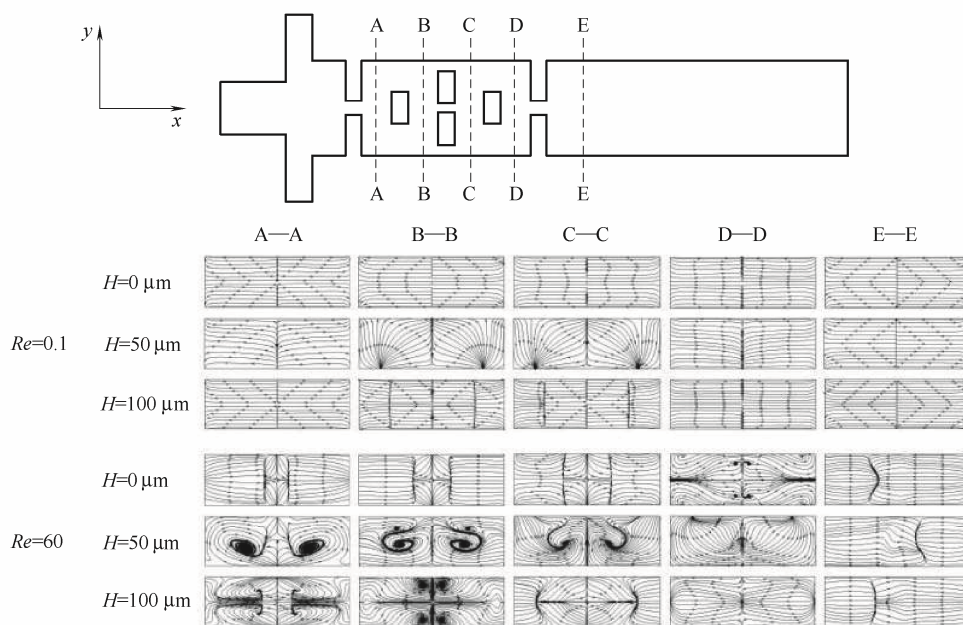
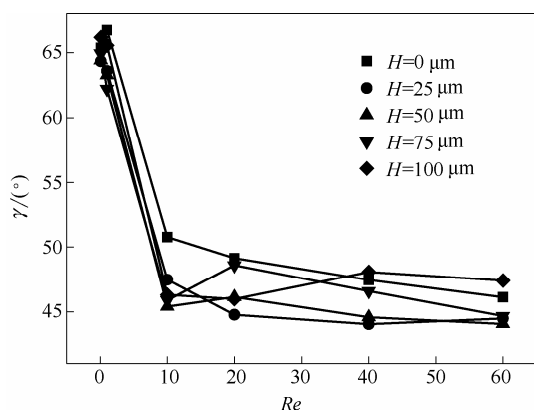


图12 挡板高度不同的微混合器内 x - y 截面上浓度和流线分布($Re=0.1$ 、 60)

Fig.12 Concentration and streamline distributions on x - y planes of micromixers with different baffle heights at $Re=0.1$, 60

图 13 不同挡板高度条件下微混合器内 y - z 截面上流线分布 ($Re = 0.1$ 、60)Fig. 13 Streamline distributions at different y - z planes of micromixers with varying baffle height for $Re = 0.1$ 、60图 14 挡板高度对平均场协同角 γ 的影响Fig. 14 Effect of baffle height on average field synergy angle γ

窄缝和挡板结构对流体的挤压加速作用、分离重组作用以及在微混合器内形成的多维度涡系，有效地增加了流体的接触面积，能够显著强化混合。 Re 较小和较大时，该新型微混合器的混合效率较高，其原因分别是由于分子扩散作用（小 Re ）和混沌对流作用（大 Re ）。窄缝较窄或较长时虽然混合效率有所提高，但压降太大，降低挡板高度虽然可以降低压降但混合效率太低，因此微混合器结构设计和优化时应综合考虑混合效率和压降。本文引入场协同角 γ ，综合分析了混合器的混合性能和压降，为微混合器综合性能评价提供了新方法，从传质角度揭示了该微混合器利用混沌对流强化混合的机理。

References

- [1] Li Y, Xu F, Liu C, Xu Y, Feng X, Liu B F. A novel microfluidic mixer based on dual-hydrodynamic focusing for interrogating the kinetics of DNA-protein interaction [J]. *Analyst*, 2013, **138**: 4475-4482.
- [2] Hardt S, Drese K S, Hessel V, Schönfeld F. Passive micromixers for applications in the microreactor and μ TAS fields [J]. *Microfluid. Nanofluid.*, 2005, **1**: 108-118.
- [3] Wu C Y, Tsai R T. Fluid mixing via multidirectional vortices in converging-diverging meandering microchannels with semi-elliptical side walls [J]. *Chem. Eng. J.*, 2013, **217**: 320-328.
- [4] Sabotin I, Tristo G, Junkar M, Valentinčič J. Two-step design protocol for patterned groove micromixers [J]. *Chem. Eng. Res. Des.*, 2013, **91**: 778-788.
- [5] Xia G D, Li J, Tian X P, Zhou M Z. Analysis of flow and mixing characteristics of planar asymmetric split-and-recombine (P-SAR) micromixers with fan-shaped cavities [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2012, **51**: 7816-7827.
- [6] Li J, Xia G D, Li Y F. Numerical and experimental analyses of planar asymmetric split-and-recombine micromixer with dislocation sub-channels [J]. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 2013, **88**: 1757-1765.
- [7] Ottino J M. *The Kinematics of Mixing: Stretching, Chaos, and Transport* [M]. New York: Cambridge University Press, 1989.
- [8] Shih T R, Chung C K. A high-efficiency planar micromixer with convection and diffusion mixing over a wide Reynolds number range [J]. *Microfluid. Nanofluid.*, 2008, **5**: 175-183.
- [9] Cheri M S, Latifi H, Moghaddam M S, Shahraki H. Simulation and experimental investigation of planar micromixers with short-mixing-length [J]. *Chem. Eng. J.*, 2013, **234**: 247-255.
- [10] Hossain S, Husain A, Kim K Y. Shape optimization of a micromixer with staggered-herringbone grooves patterned on opposite walls [J].

- Chem. Eng. J.*, 2010, **162**: 730-737.
- [11] Li Jian (李健), Xia Guodong (夏国栋). Fluid flow and mixing characteristics in micromixer with vortex-generated structures [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2013, **64**: 2328-2335.
- [12] Wang L J, Wu W, Li X. Numerical and experimental investigation of mixing characteristics in the constructal tree-shaped microchannel [J]. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2013, **67**: 1014-1023.
- [13] Afzal A, Kim K Y. Passive split and recombination micromixer with convergent-divergent walls [J]. *Chem. Eng. J.*, 2012, **203**: 182-192.
- [14] Guo Z Y, Li D Y, Wang B X. A novel concept for convective heat transfer enhancement [J]. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 1998, **41**: 2221-2225.
- [15] Chen Q, Wang M, Guo Z Y. Field synergy principle for energy conservation analysis and application [J]. *Adv. Mech. Eng.*, 2010, **9**: 129313.
- [16] Tian L T, He Y L, Lei Y G, Tao W Q. Numerical study of fluid flow and heat transfer in a flat-plate channel with longitudinal vortex generators by applying field synergy principle analysis [J]. *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 2009, **36**: 111-120.
- [17] Ren Y, Leung W W F. Numerical and experimental investigation on flow and mixing in batch-mode centrifugal microfluidics [J]. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2013, **60**: 95-104.
- [18] Hossain S, Ansari M A, Kim K Y. Evaluation of the mixing performance of three passive micromixers [J]. *Chem. Eng. J.*, 2009, **150**: 492-501.
- [19] Tsai R T, Wu C Y. An efficient micromixer based on multidirectional vortices due to baffles and channel curvature [J]. *Biomicrofluidics*, 2011, **5**: 014103.
- [20] Liu W, Liu Z C, Ming T Z, Guo Z Y. Physical quantity synergy in laminar flow field and its application in heat transfer enhancement [J]. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2009, **52**: 4669-4672.