

文章编号 1004-924X(2017)09-2377-10

3D-不对称菱形被动式微混合器混合特性

鲁聪达*, 薛浩, 吴化平, 付强, 文东辉

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江杭州 310014)

摘要:提高微混合器雷诺数的适用范围和混合强度是微混合器设计的发展趋势。本文基于非对称分离重组混合原理设计、制作了一种3D-不对称菱形被动式微混合器,并借助数值分析方法和可视化实验对混合强度和混合状态的变化进行了研究。研究发现:在低 $Re(0.01\sim 10)$ 范围内,两组分间的混合以扩散混合为主,随着 Re 的增加,流速对混合强度的影响有一定下降;在较高 $Re(10\sim 200)$ 范围内,受流速增加的影响,流体间不平衡微流惯性碰撞逐渐成为影响混合的主要因素。此时,混合强度随流速的增加逐渐增强并趋于平稳。对 Re 在 $0.01\sim 200$ 内的微混合器展开研究,分析了宽缝比 W_s/S 、分合角 θ 、宽厚比 H/S 等结构尺寸对混合强度的影响。通过综合考虑流体混合强度和通道压降的变化情况,确定最佳通道结构尺寸为 $W_s/S=0.2$ 、 $\theta=45^\circ$ 、 $H/S=0.5$,此时微混合器的混合强度可维持在78%以上。与传统平面对称分合式混合器相比,设计制作的3D-不对称菱形被动式微混合器混合强度有较大的提高,验证了本文设计结构的有效性。

关键词:微混合器;微通道;3D-菱形;非对称分离重组;数值模拟

中图分类号:TQ027.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172509.2377

Mixing characteristics of passive-type micro-mixer with 3D-asymmetrical rhombus

LU Cong-da*, XUE Hao, WU Hua-ping, FU Qiang, WEN Dong-hui

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology,
Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

* Corresponding author, E-mail: lcd@zjut.edu.cn

Abstract: Increasing applicable scope of Reynolds number and mixing strength is development trend of micro-mixer design. A passive-type micro-mixer of 3D-asymmetrical rhombus was designed and manufactured on the basis of asymmetrical separation and reconstruction mixing principle, and change of mixing strength and mixing state were studied by means of numerical analysis and visualized experiment. Results indicate that in scope of low $Re(0.01\sim 10)$, the mixing between two components is dominated by diffusion mixing, with increase of Re , the influence of flow speed on mixing strength decreases to a certain degree; in higher scope of $Re(10\sim 200)$, influenced by increase of flow speed, the inter-fluid imbalance inertia collision becomes the main factor affecting mixing, and mixture strength gradually increases and tends to be stable with increase of flow speed. Take the micro-mixer with Re scope of $(0.01\sim 200)$ as research object, influence of structural sizes such as width slit ratio

收稿日期:2017-03-15;修订日期:2017-06-22.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51775510, No. 11372280);浙江省科技厅公益项目(No. 2016C31G2020052, No. 2016C31G2020044)

W_s/S , divided-compound angle θ , width-to-thickness ratio H/S , etc on mixing strength was analyzed. By taking into consideration of fluid mixing strength and change of passage pressure drop comprehensively, the optimum structural size of passage was designed as $W_s/S=0.2$, $\theta=45^\circ$, $H/S=0.5$, and mixing strength of micro-mixer can maintain above 78%. Compared with traditional planar symmetrical separation-and-reconstruction mixer, mixing strength of designed passive-type micro-mixer of 3D-asymmetrical rhombus is greatly increased, which verifies the effectiveness of the structure.

Key words: micro-mixer; micro-passage; 3D-rhombus; asymmetrical separation and mixing; numerical simulation

1 引言

微流控芯片(micro-fluidic chip)将传统生化监测过程的分离、富集、加样、混合、检测等功能集成一体,广泛应用于微量分析化学、生物医药、环境监测等领域^[1-3]。微混合器(micro-mixer)是微流控芯片的重要组成部分,其具有高效快速的混合性能,可显著缩短试剂预处理时间,提高微流控芯片的分析、检测效率^[4-6]。根据是否外加能量场,可将微混合器分为主动式微混合器和被动式微混合器^[7-8]。主动式微混合器主要依靠外加扰动源促进混合,而被动式微混合器则主要依赖通道微结构对流体的扰动来实现混合^[9-10]。虽然主动式微混合器的混合效率较高,但其除流体驱动设备外还需要外加扰动源,故结构复杂、不易加工和维护,不利于微流控芯片的集成;而被动式微混合器则除驱动装置外不需其它外接设备,结构相对简单、制造工艺简便,易于微流控芯片的集成,因此在微流控芯片上应用较为广泛^[11-13]。

T形混合器作为微混合器的基础结构之一,其混合主要依赖于分子扩散实现。鉴于T形结构限制了混合效率的提高,研究人员常将其作为混合器进口与其他结构搭配使用^[14]。Bessoth FG等^[15]和Chung CK等^[16]基于分离重组原理,设计了分层混合器。该混合器通过增加流体间接触面积的方式,提高了流体的混合效率。Afzal A等^[17]和Chung CK等^[18]设计了一种菱形分合式微混合器,并借助模拟分析和实验验证了平面菱形分合式微通道结构具有良好的混合性能。Li Jian等^[19]和Sheu TS等^[20]在圆形微混合器的基础上设计了一种圆形不对称分合式微混合器,他们发现流体在流经圆形不对称分合结构再聚合时

有不平衡碰撞现象出现,为微通道的结构设计提供了新思路。Cortes-Quiroz CA等^[21]和Liu K等^[22]在传统T形混合器的基础上提出了一种3D T-maxer,研究发现在流体流经3D通道截面时流体可产生拉伸剪切现象,打破了流体的层流状态,促进了组分间的掺混,提高了流体的混合速率。Viktorov V等^[23]报道的一种分离重组(SAR)“链”形被动式微混合器在低雷诺数范围获得了较好的混合强度。SadAbadi H等^[24]设计、制作了一种3D微混合器,通过实验获取了具有较高尺寸均匀性的金纳米颗粒(AUNPS)。以上研究表明,非对称分离重组结构和3D结构等都可以通过增加对流层扰动的方式增加流体间的接触面积,进而提高混合强度与混合速率。然而,将3D结构应用于不对称分合结构,以及适用于较大雷诺数范围的被动式微混合器的研究尚很少见。

本文在Chung CK等^[16]提出的平面对称菱形结构基础上设计并制作了3D-不对称菱形被动式微混合器,借助数值模拟和可视化实验,在大 $Re(0.01\sim 200)$ 范围内研究了该混合器微通道结构对混合强度的影响。

2 物理模型

图1所示为3D-不对称菱形被动式微混合器结构示意图。从图1(a)可以看出,微混合器结构主要由T形入口通道、出口通道和等距布置的3D-不对称菱形混合单元组成。流体A和B分别由入口1和入口2流入微混合器。当两种不同组分流体从两入口通道等速流入T形通道区域时,会在T形通道内完成少部分混合后再进入主通道,此过程中分子扩散时间较短,混合程度较弱。随后,主通道内的流体分离成两股分别进入3D

分形的两个副通道,因为主副通道内流体的质量流速远大于次副通道内流体的质量流速,质量流速差异将导致两副通道内流体的惯性力产生分化。微通道内流体在流经一半菱形周长聚合时,受通道微结构和惯性力差异的影响,产生的不平衡微流惯性碰撞将导致流层出现延伸剪切和拉伸折叠,并借此强化各流层之间的掺混,从而达到增加流体间接触面积,获得较好混合效果的目的。

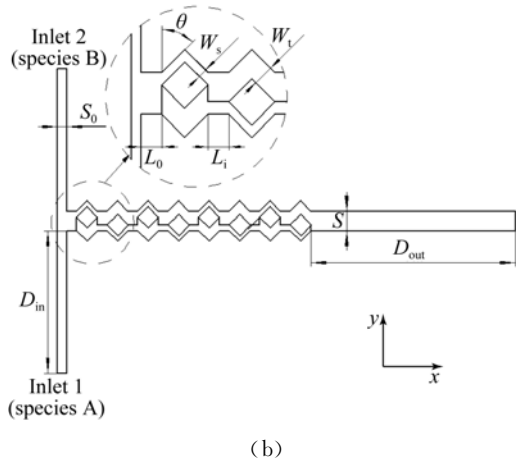
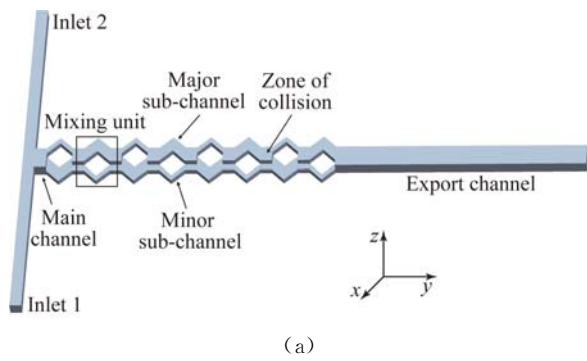


图1 3D-不对称菱形被动式微混合器结构示意图
Fig.1 Structural sketch of 3D-asymmetric rhombus passive micro-mixer

3 数值分析与实验设计

3.1 数值分析

3.1.1 结构参数与数值分析方法

在图1(b)所示的微混合器结构示意图中,微混合器总长为2 cm;微混合器主通道宽度为S,入口1和入口2宽度相同,均为 S_0 ,且 $S_0 = S/2$;不对称分合通道中,通道分合角为 θ ;主副通道宽度为 W_t ,次副通道宽度为 W_s ,定义 W_s/S 为宽缝比;混合单元到入口的轴向距离 L_0 和相邻混合单

元间直通道长度 L_i 相同,且 $L_0 = L_i = S_0$;通道厚度为 H ,定义 H/S 为通道厚宽比;进口通道长度 $D_{in} = 1$ cm,出口通道长度 $D_{out} = 0.8$ cm。

借助COMSOL Multiphysics 5.2a软件对微混合器内的流体流动特性与混合特性进行数值模拟分析。数值模拟时两入口设置为速度边界条件,出口压力设定为零,其余各壁面为绝热边界条件。采用可溶性色素与去离子水混合溶液(DI water,密度 $\rho = 998$ kg·m⁻³,动力粘度系数 $\mu = 1.002 \times 10^{-3}$ N·s·m⁻²,扩散系数 $D = 3.23 \times 10^{-10}$ m²·s⁻¹)^[25]作为流体A,去离子水作为流体B,不引入能量方程。模拟设定流体为稳态、定常流动,无滑移边界条件,混合工质在求解中为不可压缩牛顿流,并处于层流状态,忽略重力影响。微流体控制方程包括连续性方程(1)、动量方程(2)、对流-扩散方程(3):

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

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla C = D \nabla^2 C, \quad (3)$$

式中: C 为流体浓度; D 为流体扩散系数; p 为压力; \mathbf{v} 为流体速度矢量; ρ 为流体密度; μ 为流体动力粘度系数; ∇ 为哈密顿算子。

3.1.2 混合强度量化判据

混合强度需要利用通道内的混合效能来评定^[26]。以往文献主要依据通道横截面组分浓度方差对混合强度进行数值化评定,即定义混合强度指标为同一横截面不同点混合强度的方差指标,其计算公式^[6, 17, 27]如下:

$$\tau = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\omega_i - \omega_\infty)^2}, \quad (4)$$

$$M = 1 - \sqrt{\frac{\tau^2}{\tau_{\max}^2}}, \quad (5)$$

式中: $M(0 \leq M \leq 1)$ 为垂直于流动方向通道横截面的混合强度,0表示组分间无混合发生,1表示组分间完全混合; n 为横截面浓度值采样点个数; ω_i 为横截面上采样点组分浓度; ω_∞ 为完全混合时通道内混合流体的组分浓度,本文中为290 mol/m³; τ 为横截面上组分浓度标准差; τ_{\max} 为横截面初始时刻无混合时的组分浓度偏差,文中为290 mol/m³。

3.1.3 网格独立性验证

在对微通道结构进行网格划分时采用自适应

四面体网格,为减小数值扩散对模拟结果的影响,在尖角结构等特定区域进行网格加密,并进行网格尺寸无关性检验。在结构尺寸 $S=1\ 000\ \mu\text{m}$, $W_s/S=0.2$, $H/S=2$, $Re=0.1$ 条件下,计算混合通道同一横截面在网格数量分别为 17.1 万、26.7 万、42.5 万、54.1 万、64.2 万、78.1 万时混合强度的数值,如图 2 所示。由图 2 可知,在网格数量为 64.2 万和 78.1 万时,通道内各个位置的混合强度相近,相对误差在 2% 之内^[17],考虑计算机性能及运算效率,在数值模拟时选用网格数为 64.2 万。在网格数量为 64.2 万所对应的最小残差(Generalized Minimal Residual Algorithm, GMRES)处在 1×10^{-8} 量级,所得结果可被判定为收敛^[27]。

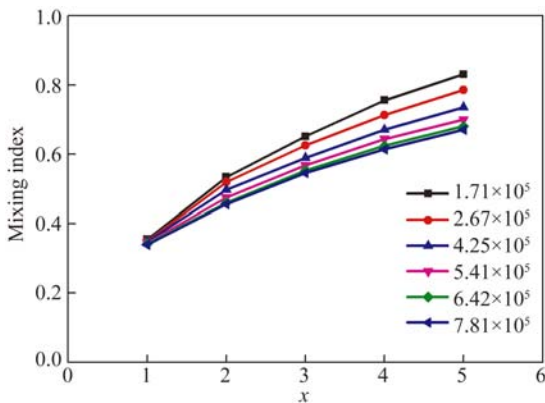


图 2 网格独立性检验

Fig. 2 Test of grid-independency

3.2 实验设计

为进一步对 3D-不对称菱形被动式微混合器的混合过程进行分析,搭建了如图 3 所示的微流体实验平台进行可视化研究。该平台主要由双通微流量注射泵、显微镜、高速摄像机、冷光源、图像处理计算机等组成。3D-不对称菱形被动式微混合器采用聚甲基丙烯酸甲酯树脂(PMMA)作为基体材料,利用二氧化碳激光雕刻机进行微通道结构加工,利用光催化黏合剂对 PMMA 基片密合。实验时,将微混合器安放在显微镜载物台上,调整好外置光源角度,由注射泵将去离子水与色素的混合质溶液(色素含量为 $580\text{mol}/\text{m}^3$)通过 PVC 塑料软管输入到微混合器中,借助显微镜与高速摄像机即可清晰观测流体在通道中的混合过程。实验后借助 MATLAB 图像处理功能对实验拍摄的出口图像进行灰度化处理 and 数值读取,将

结果代入公式(4)和(5)计算可得到微混合器通道出口的混合强度值。实验中,外界压力为标准大气压,环境温度为 $20\ ^\circ\text{C}$ 。

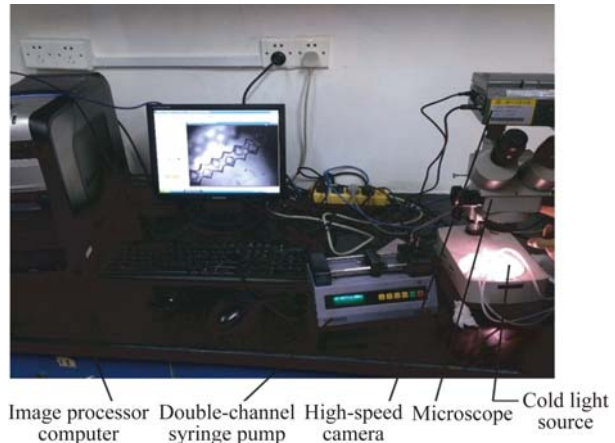


图 3 可视化实验装置

Fig. 3 Visualization experiment device

4 结果与分析

4.1 实验分析

图 4 为通道结构尺寸 $S=1\ 000\ \mu\text{m}$, $W_s/S=0.2$, $\theta=45^\circ$, $H/S=1$ 时,在不同 Re 条件下,经过数值模拟和可视化实验得到的靠近出口通道处最后 6 个混合单元 x - y 截面的混合浓度分布。图 4(a)为数值模拟得到的混合浓度分布图;图 4(b)为借助实验设备采集到的混合浓度分布图。分析图 4 中的组分浓度分布情况可知,虽然同等条件下数值模拟所得流体组分浓度分布与实验结果存在一定的差异,但总体趋势是吻合的。由图 4(a)所示数值分析图可以看出,两入口通道流体介质的浓度分别为 $0\ \text{mol}/\text{m}^3$ 和 $580\ \text{mol}/\text{m}^3$,两混合工质间完全混合的组分浓度为 $290\ \text{mol}/\text{m}^3$ 。在 $Re=0.01$ 时,实验所得混合强度 M 达到 88%,由于此时流体流速小,分子扩散时间长,所以混合强度较高;而在 $Re=0.1$ 时,流体流速相对 $Re=0.01$ 时有较大提高,虽然由于分子扩散时间缩短,混合强度有一定程度下降,但 M 值也达到了 78%,具有不错的混合表现;随着 Re 的增大,当 Re 在 $100\sim 200$ 时,流体流速相对低 Re 时增加很多,导致两流体间的不平衡微流惯性碰撞逐渐增强,对流混合逐渐成为影响混合的主要因素,并且随着流体流速的增加,流层间受微通道结构的影

响产生的延伸剪切和拉伸折叠强化了流层间的掺混,使得出口位置处的流体混合强度得到进一步提高,当 Re 在 100~200 区间时,实验测得混合强度 M 在 80% 以上,较文献[13]有 5% 的提升。

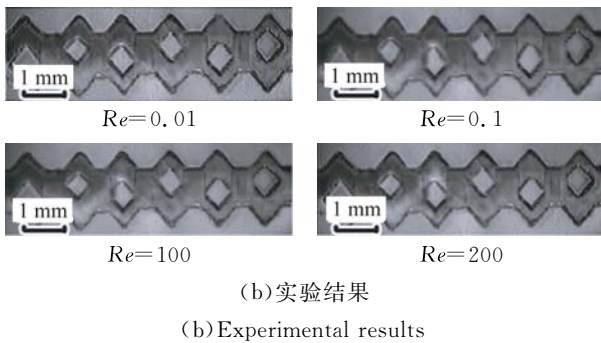
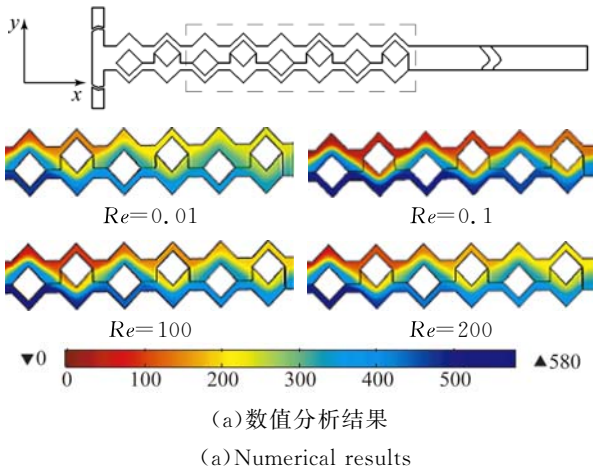


图 4 不同 Re 条件下微混合器 $x-y$ 截面内流体的混合特点
Fig. 4 Mixing characteristics of fluid flow in $x-y$ plans of micro-mixer with different Reynolds numbers

4.2 宽缝比 W_s/S 对混合强度 M 影响的数值分析

为研究通道不对称水平对混合强度的影响, W_s/S 分别取 0.2、0.3、0.4, 比较微通道内 $x-y$ 截面的混合强度 M 、压降 p 和组分浓度分布随 Re 的变化结果, 分别如图 5~7 所示 ($S=1\ 000\ \mu\text{m}$, $\theta=45^\circ$, $H/S=0.5$)。由图 5 和图 7 可知, 当 W_s/S 为 0.2 时, 流体具有较好的混合表现。当 Re 为 0.01~200 时, 混合强度整体维持在 78% 以上; 当 Re 为 0.01 时, 混合强度 M 最高, 达到 92%; 当 Re 为 0.1~10 时, 由于流体流速加快, 分子扩散时间缩短, 导致此阶段 M 值偏小, 最小为 78%; 当 Re 为 10~200 时, 对流混合成为影响混合的主导因素, 混合强度随 Re 的增加逐渐提升并维持在 80% 以上; 当宽缝比增加到 0.3 和 0.4 时, 两主副通道宽度差异减小,

微通道在低 Re 阶段分子扩散程度减弱, 在高 Re 阶段的不平衡微流惯性碰撞强度降低, 导致混合强度随 W_s/S 的增加呈下降趋势。

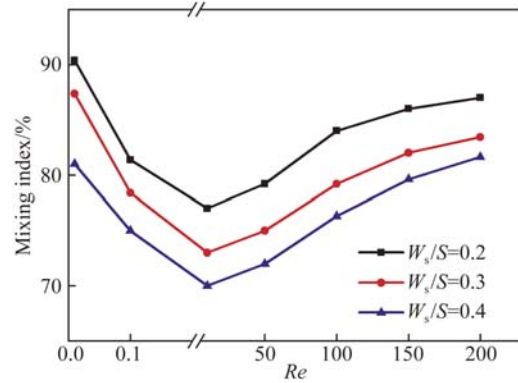


图 5 不同 Re 条件下 W_s/S 对混合强度 M 的影响
Fig. 5 Influence of W_s/S on mixing intensity at different Reynolds numbers

分析图 6 的压力损失可知, 随着 W_s/S 的增加, 受两主副通道宽度差异减小的影响, 流体分离聚合时产生的不平衡微流惯性碰撞减弱, 能量损失减小, 因而当 W_s/S 分别取为 0.2、0.3、0.4 时, 压力损失整体呈减小趋势; 在高 Re 时, 微流体流速很快, 微流体聚合时不平衡微流惯性碰撞强度增加, 受此影响产生的能量损失也大为增加, 因而在高 Re 时的能量损失更大, 微通道内的压降随 Re 的增加呈先缓慢变化后急剧变化的趋势。

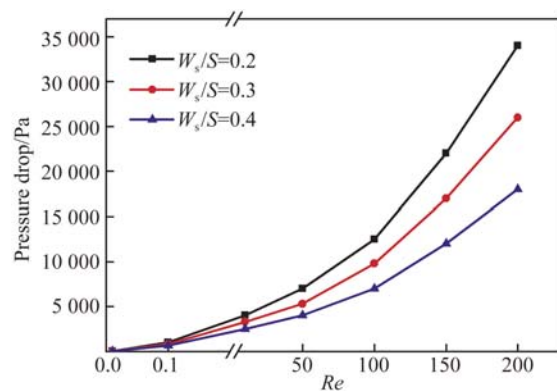


图 6 不同 W_s/S 条件下压力降随 Re 的变化
Fig. 6 Pressure drop varies with Reynolds number under different W_s/S

在 Re 为 0.1、150 时, 沿 x 方向取通道不同位置的 $y-z$ 截面, 比较 W_s/S 分别为 0.2、0.3、0.4

时各截面的流体流动状态的变化,如图 8 所示。在 Re 较小时,在 A-A 截面开始出现 z 方向的涡流及二次流动。但涡形较小,涡形变化缓慢。随着流动过程中能量的损耗,在 C-C 截面上涡形消失,仅存有二次流变化;在 Re 较大时,通道内流体流速较快,截面 A-A 和 B-B 内均可看到较大的涡形变化。对比高、低 Re 时涡形的变化可知,涡流及二次流受流速的影响较大。在低 Re 时,涡

形小且变化缓慢,混合方式以分子扩散为主,在高 Re 时涡流大且变化迅速,因而在此阶段对流混合会取代扩散混合成为影响混合强度的主要混合方式。另外,通过分析图 5 和图 8 可知,混合强度还受通道横截面大小的影响,随着宽缝比的增加,两副通道流体混合的共通区域减小,使得在两流体相遇时流体间的不平衡微流碰撞减弱,流体间的掺混减小。

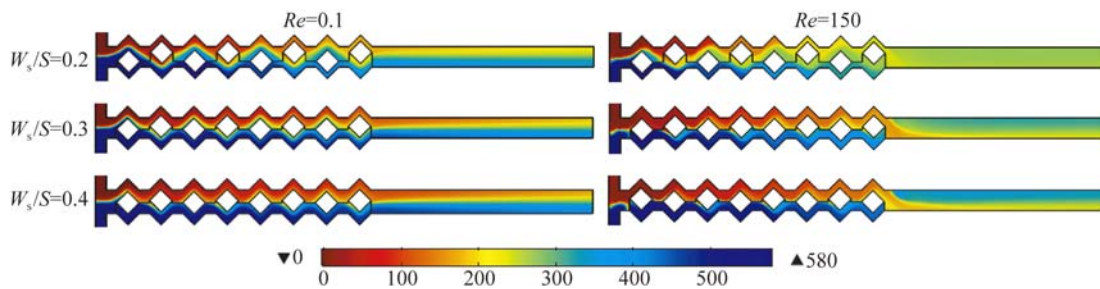


图 7 $Re=0.1, 150$ 时不同 W_s/S 下的微混合器内 $x-y$ 截面上的浓度分布

Fig. 7 Concentration distributions in $x-y$ plans of micro-mixer with varying W_s/S and Re of 0.1, 150

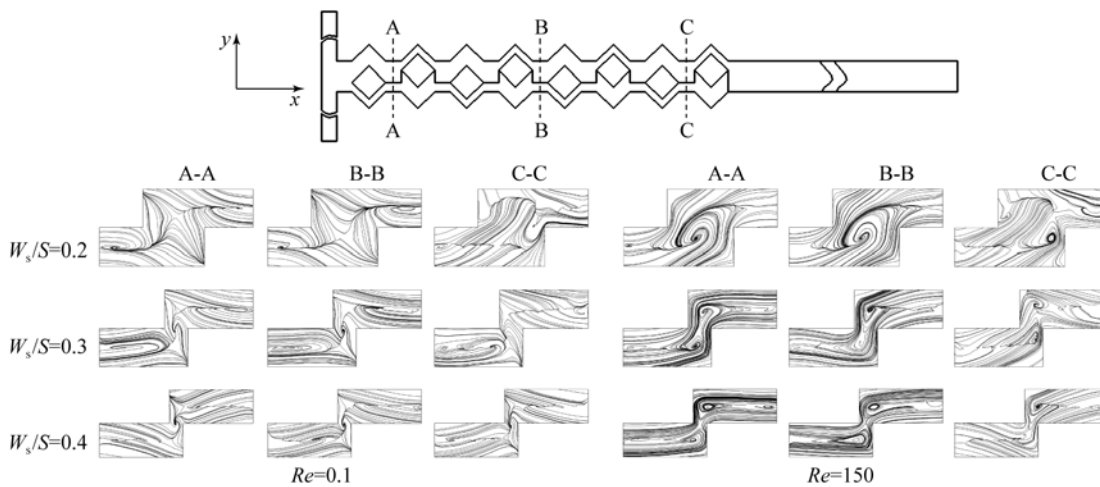


图 8 不同 W_s/S 下微混合器内 $y-z$ 截面上纵向涡及二次流变化 ($Re=0.1, 150$)

Fig. 8 Longitudinal vortex and secondary flow change at different $y-z$ plans of micro-mixer with varying W_s/S and Re of 0.1, 150

4.3 分合角 θ 对混合强度 M 影响的数值分析

考虑到菱形通道尖角结构中分合角 θ 的改变可能会对混合强度 M 、压降 P 和组分浓度分布产生影响,选取 3 种分合角 ($30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$) 进行分析,分别如图 9、图 10 和图 11 所示 ($S=1\ 000\ \mu\text{m}$, $W_s/S=0.2$, $H/S=0.5$)。由图 9 和图 11 可知,当 $\theta=30^\circ$ 和 $\theta=45^\circ$ 时,在 Re 为 $0.01\sim 200$ 范围内混合强度较高,整体维持在 78% 以上,在 $Re=0.01$ 时超过了 90%;当 $\theta=60^\circ$ 时,由于通道尖角

结构的变化,流体聚合时不平衡惯性对流碰撞减弱,使得整体混合强度下降,混合强度维持在 73%~86% 之间。分析图 10 压力损失可知,在菱形尖角为锐角或直角时相比于钝角产生了更大的能量损失。因为流体在锐角或直角通道内流动时相比于在钝角通道内具有更长的扩散距离,会导致沿途的能量损失增加;在高 Re 时流体在流经锐角或直角通道时产生的不平衡惯性碰撞相比于钝角通道更为剧烈,能量损失更大,导致压降在高

Re 时急剧增加,所以压降会随 Re 的增加呈现先缓慢变化后急剧变化的过程。

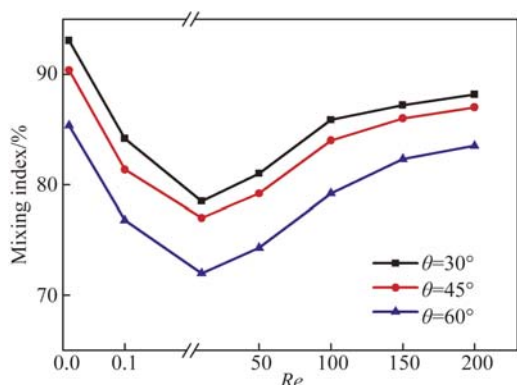


图 9 不同 Re 条件下 θ 对混合强度 M 的影响
Fig. 9 Influence of θ on mixing intensity at different Reynolds numbers

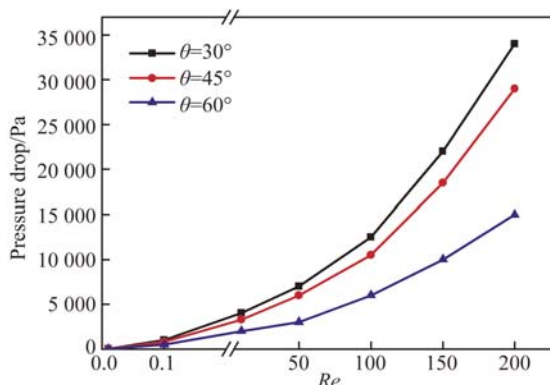


图 10 不同 θ 条件下压力降随 Re 的变化
Fig. 10 Pressure drop varies with Re at different θ

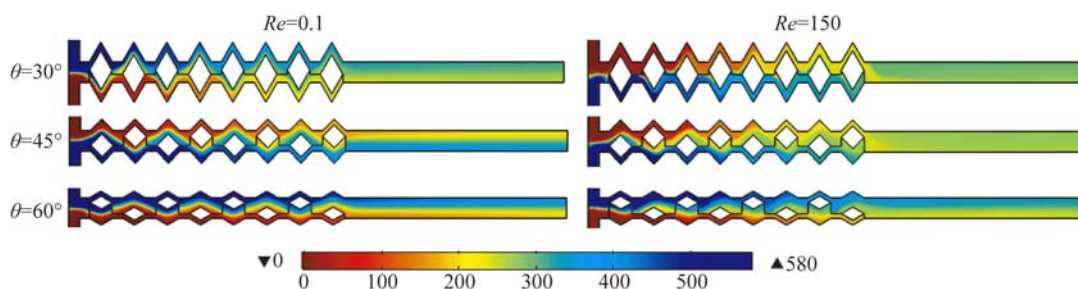


图 11 Re=0.1、150 时不同 θ 下微混合器内 x-y 截面上的浓度分布
Fig. 11 Concentration distributions in x-y plans of micro-mixer with varying θ and Re of 0.1, 150

4.4 宽厚比 H/S 对混合强度 M 影响的数值分析

图 12、图 13 和图 14 分别为不同 Re 时,混合强度 M、压降 p 和组分浓度分布受通道宽厚比 $H/S = 0.5, 1, 2$ 的影响分析($S = 1\ 000\ \mu\text{m}$, $\theta = 45^\circ$, $W_s/S = 0.2$)。由图 12 和图 14 可知,通道内微流体的混合强度 M 在整个 Re (0.01~200) 范围内随通道厚度 H 的增加而降低。其中,在宽厚比 $H/S = 0.5$ 的微通道中表现出了较好的混合强度,当 $Re = 0.01$ 时混合强度可以达到 92%,但随着 Re 的增加,受流速增加的影响分子扩散时间缩短,混合强度呈下降趋势,在 $Re = 10$ 时混合强度仅为 78%,为 Re 在 0.01~200 整个范围最低值;当 Re 处于 10~200 范围时,流体受通道微结构的影响而产生的对流碰撞逐渐增强,使得混合强度逐渐增强并趋于平稳,最终可以稳定在 90%

左右。由此可见,通道厚度对微流体混合强度的提高有一定的影响,但不如分合角或宽缝比对混合强度的影响大。分析图 13 压力损失可知,薄通道相比厚通道产生的能量损失大。这主要因为在低 Re 时,薄通道内流层比厚通道内流层具有更大的比表面积,而流体在分离聚合过程中随着流体接触面积的增加,产生的能量损耗也相应增加,因此压降要稍大于同等条件下较厚通道内的流体;在中、高 Re 时,当同样组分的流体在薄、厚通道内以相同的流速进行分离、聚合时,薄层流体比厚层流体容易产生流层紊乱,在不平衡惯性对流碰撞作用下也更易产生流层的拉伸折叠、延伸剪切,因而会产生更多的能量损失,因此随着 Re 的增加通道内的压降呈现先缓慢增加后急剧增加的变化趋势,且通道越薄,压降变化越明显。

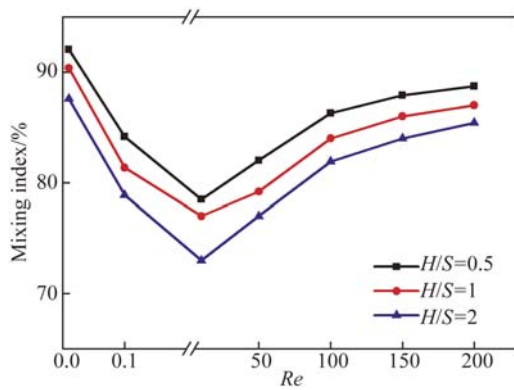


图 12 不同 Re 条件下 H/S 对混合强度 M 的影响
Fig. 12 Influence of H/S on mixing intensity at different Reynolds numbers

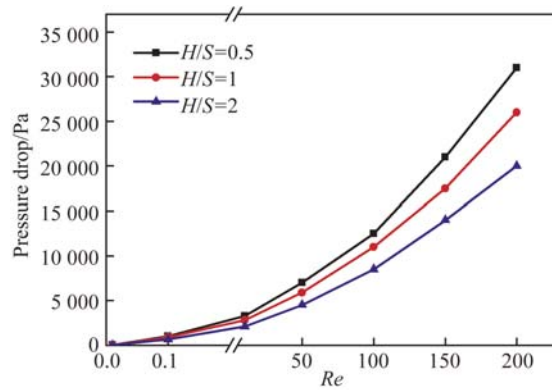


图 13 不同 H/S 条件下压力降随 Re 的变化
Fig. 13 Pressure drop varies with Re at different H/S

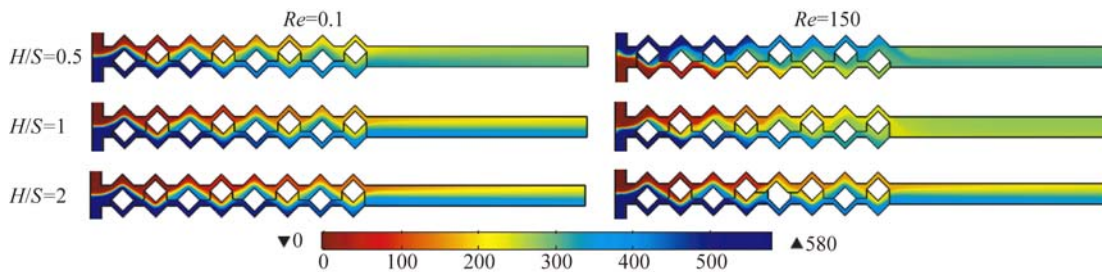


图 14 $Re=0.1, 150$ 时不同 H/S 下微混合器内 $x-y$ 截面上的浓度分布
Fig. 14 Concentration distributions in $x-y$ plans of micro-mixer with varying H/S and Re of 0.1, 150

5 结 论

本文设计制作了一种 3D-不对称菱形被动式微混合器。可视化实验研究和数值模拟分析表明,该混合器结构对 Re 的变化较为敏感,混合强度随 Re 的增大呈先减小后增大的变化趋势。在低 Re 时,流体流速缓慢,两流体间接触时间长,分子扩散充分,混合强度较高;在中、高 Re 时,流速相对较高,混合强度受流体间不平衡微流惯性碰撞的影响明显。通过分析不同宽缝比 W_s/S ,分

合角 θ , 宽厚比 H/S 等结构尺寸对混合强度的影响可知,在 3D-不对称菱形通道中微流体易形成纵向涡流,并产生二次流动,流层在受到微通道结构、涡流及二次流的共同作用下产生延伸剪切和拉伸折叠,从而增进流层间的掺混,强化混合。本文设计的 3D-不对称菱形被动式微混合器,可在较宽的 $Re(0.01 \sim 200)$ 范围内得到较高且稳定的混合强度。在结构尺寸 $S=1\ 000\ \mu\text{m}$, $\theta=45^\circ$, $H/S=0.5$, $W_s/S=0.2$ 时,该微混合器具有较好的混合效果,混合强度整体可维持在 78% 以上。

参考文献:

- [1] 顾雯雯. 微流控细胞芯片 LED 诱导透射式荧光检测微系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2159-2165.
GU W W. LED induced transmitted fluorescence detector integrated in microfluidic cell chip [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2159-2165. (in Chinese)
- [2] 廖锡昌, 郑慧斐, 袁敏, 等. 发光二极管诱导荧光微芯片分析检测器的研制[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12): 2906-2911.
LIAO X CH, ZHENG H F, YUAN M, *et al.*. High-power light-emitting-diode induced fluorescence detector for microfluidic chip analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12): 2906-2911. (in Chinese)
- [3] JEONG G S, CHUNG S, KIM C B, *et al.*. Appli-

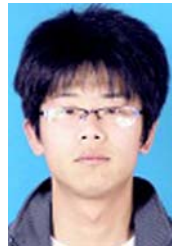
- cations of micromixing technology [J]. *Analyst*, 2010,135(3):460-473.
- [4] HENRY OYF, O'SULLIVAN CK. Rapid DNA hybridization in microfluidics [J]. *TRAC Trends in Analytical Chemistry*, 2012,33:9-22.
- [5] LI Y, ZHANG D L, FENG X J, *et al.*. A microsecond microfluidic mixer for characterizing fast biochemical reactions [J]. *Talanta*, 2012,88:175-180.
- [6] 何秀华, 颜杰, 王岩. 内置周期挡板的 T-型微混合器[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10):2877-2886. HE X H, YAN J, WANG Y. T-shaped micromixer with periodic baffles [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015,23(10):2877-2886. (in Chinese)
- [7] HSIAO K Y, WU C Y, HUANG Y T. Fluid mixing in a microchannel with longitudinal vortex generators [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 235:27-36.
- [8] 赵天, 杨志刚, 刘建芳, 等. 利用压电微泵驱动和脉动混合可控合成金纳米粒子[J]. *光学精密工程*, 2014,22(4):904-910. ZHAO T, YANG ZH G, LIU J F, *et al.*. Controlled synthesis of gold nanoparticles based on PZT micropump and pulsating mixing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014,22(4):904-910. (in Chinese)
- [9] FU L M, FANG W C, HOU H H, *et al.*. Rapid vortex microfluidic mixer utilizing double-heart chamber [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 249: 246-251.
- [10] OZCELIK A, AHMED D, XIE Y, *et al.*. An acoustofluidic micromixer via bubble inception and cavitation from microchannel sidewalls [J]. *Anal Chem*, 2014,86(10):5083-5088.
- [11] 付强, 鲁聪达. 典型被动微混合器对雷诺数变化的敏感度研究[J]. *化学工程*, 2016, 44(6):18-21. FU Q, LU C D. Influence of typical passive micromixer on sensitivity of changing Re [J]. *Chem Eng.*, 2016,44(6):18-21. (in Chinese)
- [12] HOSSAIN S, KIM K Y. Mixing performance of a serpentine micromixer with non-aligned inputs [J]. *Micromachines*, 2015,6(7):842-854.
- [13] VIKTOROV V, MAHMUD M R, VISCONTE C. Numerical study of fluid mixing at different inlet flow-rate ratios in Tear-drop and Chain micromixers compared to a new H-C passive micromixer [J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2016, 10 (1): 182-192.
- [14] 张平, 胡亮红, 刘永顺. 主辅通道型微混合器的设计与制作[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4): 872-879. ZHANG P, HU L H, LIU Y SH. Design and fabrication of micromixer with main-assist channels [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(4):872-879. (in Chinese)
- [15] BESSOTH F G, DEMELLO A J, MANZ A. Microstructure for efficient continuous flow mixing [J]. *Analytical Communications*, 1999, 36 (6): 213-215.
- [16] CHUNG C K, SHIH T R. Effect of geometry on fluid mixing of the rhombic micromixers [J]. *Micromixing and Nanofluidics*, 2008,4(5):419-425.
- [17] AFZAL A, KIM K Y. Passive split and recombination micromixer with convergent-divergent walls [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 203: 182-192.
- [18] CHUNG C K, CHANG C K, LAI C C. Simulation and fabrication of a branch-channel rhombic micromixer for low pressure drop and short mixing length [J]. *Microsystem Technologies*, 2013, 20 (10-11):1981-1986.
- [19] LI J, XIA G, LI Y. Numerical and experimental analyses of planar asymmetric split-and-recombine micromixer with dislocation sub-channels [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2013,88(9):1757-1765.
- [20] SHEU T S, CHEN S J, CHEN J J. Mixing of a split and recombine micromixer with tapered curved microchannels [J]. *Chemical Engineering Science*, 2012,71:321-332.
- [21] CORTES-QUIROZ CA, AZARBADEGAN A, ZANGENEH M. Evaluation of flow characteristics that give higher mixing performance in the 3-D T-mixer versus the typical T-mixer [J]. *Sensors and Actuators B:Chemical*, 2014,202:1209-1219.
- [22] LIU K, YANG Q, CHEN F, *et al.*. Design and analysis of the cross-linked dual helical micromixer for rapid mixing at low Reynolds numbers [J]. *Micromixing and Nanofluidics*, 2015, 19 (1): 169-180.
- [23] VIKTOROV V, NIMAFAR M. A novel generation of 3D SAR-based passive micromixer; efficient mixing and low pressure drop at a low Reynolds number [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2013,23(5):055023.

- [24] SADABADI H, PACKIRISAMY M, WUTH-RICH R. Uniform integration of gold nanoparticles in PDMS microfluidics with 3D micromixing [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2015, 25(9):094006.
- [25] FRANZINI J B, FINNEMORE E J. *Fluid mechanics with engineering applications* [J]. 2003 (1):192-198.
- [26] RITTER P, OSORIO-NESME A, DELGADO A. 3D numerical simulations of passive mixing in a microchannel with nozzle-diffuser-like obstacles [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 101:1075-1085.
- [27] ALAM A, KIM K Y. Analysis of mixing in a curved microchannel with rectangular grooves [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 181-182:708-716.

作者简介:



鲁聪达(1964—),男,浙江慈溪人,博士,教授,博士生导师,1989年于北京农业工程大学获得硕士学位,2007年于浙江工业大学获得博士学位,现为浙江工业大学机械工程学院博士后办公室、工程硕士办公室主任,主要从事模具设计与制造关键技术、燃料电池制造关键技术、机械工程管理等方面的研究。E-mail:lcd@zjut.edu.cn



薛浩(1991—),男,安徽宿州人,硕士研究生,2014年于皖西学院获得学士学位,主要从事微混合器及微反应器件应用研究。E-mail:xuehao_yan@163.com