

# T 型微混合器内混合强化的数值模拟\*

肖水云<sup>1</sup>, 李 鸣<sup>2</sup>, 杨大勇<sup>2</sup>

(1. 南昌大学 机电工程学院, 南昌 330031;  
2. 南昌大学 信息工程学院, 南昌 330031)

**摘要:** 为了研究不同混合强化方式对微混合的影响,采用有限元法对 T 型微混合器内增加壁面非均匀 Zeta 电势的主动式混合以及嵌入肋板的被动式混合进行了数值模拟.对比分析了 3 种 T 型微混合器内流场、速度场和浓度场的分布,并研究了不同 T 型微混合器内溶液混合效率与  $Re$  和  $Sc$  之间的关系.研究表明,两种溶液的混合效率随着  $Re$  和  $Sc$  的增加非线性减小,且减小趋势变缓;嵌入肋板的被动式 T 型微混合器内的混合效率沿水平微通道方向上存在较大的波动;增加壁面非均匀 Zeta 电势的主动式 T 型微混合器内的混合效率沿水平微通道方向上的波动较小,且这种波动在高  $Re$  或低  $Sc$  时会被抑制. $Re$  对混合方式的强化效果也有很大的影响.当  $Re$  较小时,增加壁面非均匀 Zeta 电势的主动式混合能更好地提高溶液的混合效率,但当  $Re$  较大时,嵌入肋板的被动式混合的混合效果更好.

**关键词:** T 型微混合器; 混合强化; 电渗流; 混合效率

**中图分类号:** TQ027.1      **文献标志码:** A

doi: 10.3879/j.issn.1000-0887.2016.03.008

## 引 言

微尺度流动下流体的  $Re$  非常低 ( $Re \ll 1$ ), 自然条件下的混合主要依靠分子的扩散作用,需要较长的混合距离和时间,不利于微流控芯片的小型化和集成化.微混合器作为微流控系统中的重要部件参与化学试剂的制备、反应物混合等过程,大大地减少了样品的消耗,节约了成本<sup>[1]</sup>.

通常,微混合器可分为被动混合和主动混合两类<sup>[2]</sup>.被动混合无外部能源设备,主要是利用特殊的微通道几何结构来破坏微流体的层流状态,以此增加流体之间的接触面积,许多学者做了一些有意义的研究工作.Wong 等<sup>[3]</sup>在十字型微混合器中嵌入凸块实现了两种溶液的快速混合.Mouza 等<sup>[4]</sup>提出了一种新型的混沌式微混合器,即通过波形微通道的拆分和重组诱导二次流,从而快速实现溶液的混合或分离.王昆等<sup>[5]</sup>研究了内置阻块的排布和个数对波浪型微混合器内流体混合强化效果的影响.Mouheb 等<sup>[6]</sup>通过实验研究了 T 型和十字型微混合器内流体传质过程,研究发现十字型微混合器相比 T 型微混合器能产生更大的漩涡以及更小的压降.Parsa 等<sup>[7]</sup>对不同波长和振幅的正弦波形微通道内溶液的混合特性进行了实验研究.主动混合

\* 收稿日期: 2015-10-08; 修订日期: 2015-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(11302095)

作者简介: 肖水云(1991—),女,硕士生(E-mail: timnty@qq.com);

杨大勇(1978—),男,副教授,博士(通讯作者. E-mail: dayongyang@ncu.edu.cn).

主要通过引入外部能量来提高混合效率,如外加的电场、磁场、压力场等。电场驱动下的电渗流 (electroosmotic flow, EOF) 是指微通道内双电层扩散区带电离子在外加电场驱动下使电解质溶液相对于静止壁面运动<sup>[8]</sup>,其无需机械部件、成本低、便于控制和系统集成,被广泛应用于微流控系统液体的输送和混合<sup>[9]</sup>。如 Cho 等<sup>[10]</sup>采用随时间非周期性变化的表面 Zeta 电势来强化 EOF 的混合。唐桂华等<sup>[11]</sup>比较了均匀和非均匀表面电势对溶液混合效率以及混合时间的影响,研究表明非均匀对称电势分布的通道出口效率最高。Jeong 等<sup>[12]</sup>在微通道中嵌入电极诱导了周期性二次电位,从而提高了 EOF 的混合效率。Lin 等<sup>[13]</sup>采用格子 Boltzmann 方法研究了交变电场和压力场作用下壁面非均匀 Zeta 电势附近漩涡的变化,实现了 EOF 混合的调控。Alizadeh 等<sup>[14]</sup>在微通道中设置带温度的板块,通过温度差来控制 EOF 的混合。Ebrahimi 等<sup>[15]</sup>采用有限体积法研究了 T 型微混合器中电渗压力驱动下溶液的混合与传热特性。

以上研究主要是针对被动或主动混合中的某一种方式,对两种混合方式的对比研究较少。为了研究主动混合与被动混合对微混合的影响,本文采用有限元法研究了 T 型微混合器内增加壁面非均匀 Zeta 电势的主动式混合以及嵌入肋板的被动式混合对溶液混合的影响。

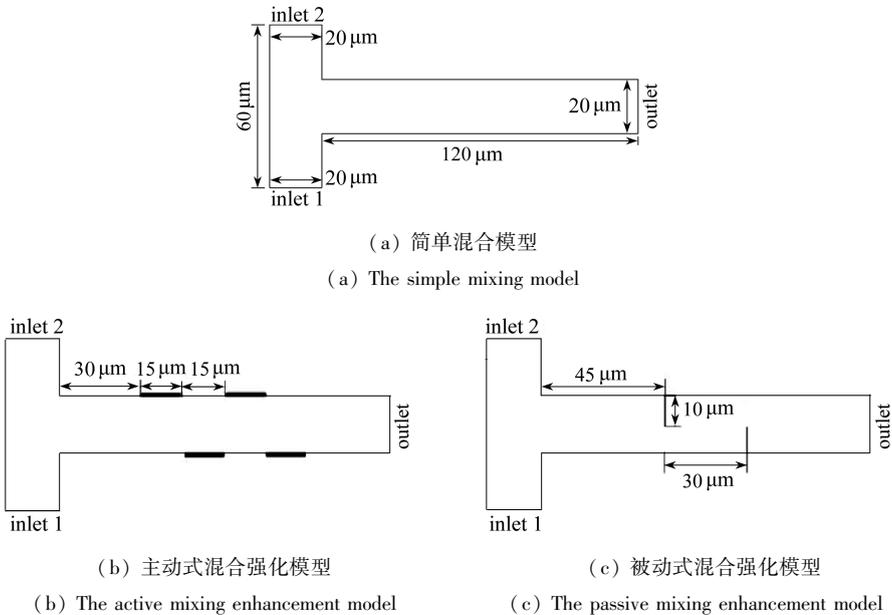


图 1 T 型微混合器结构示意图

Fig. 1 Schematic illustration of the T-shaped micromixers

## 1 数学模型

对于所要研究的两种混合强化方式,为了简化模型,本文采用二维 T 型微混合器模型,研究对象为稳态不可压缩 Newton(牛顿)流体。相比于三维模型,二维模型极大地减少了计算量,同时也能较直观地描述流场、速度场及浓度场的分布情况。3 种 T 型微混合器结构如图 1 所示。图 1(a)为简单 T 型微混合器,横向微通道长  $120\ \mu\text{m}$ ,两入口间距  $60\ \mu\text{m}$ ,入口和出口宽为  $20\ \mu\text{m}$ ;图 1(b)中 T 型微混合器进出口存在电势差,同时在横向微通道上下壁面设置了非对称 Zeta 电势,即图中黑色加粗部分,长为  $15\ \mu\text{m}$ ,其他部分为电中性,属于主动式混合强化;图 1(c)在简单 T 型微混合器的横向微通道上下壁面嵌入了两块肋板,肋板长  $10\ \mu\text{m}$ ,宽度小于微通道宽度,属于被动式混合强化。为了避免进口段速度变化对混合过程产生影响,流体在进入

水平微通道之前速度已达到完全发展。

### 1.1 Poisson-Boltzmann 方程

绝大多数的固体与电解质溶液接触时,表面会发生电离,带电表面吸引溶液中的异性离子,在壁面附近形成双电层(electric double layer, EDL). EDL 电位满足 Poisson 方程<sup>[16]</sup>:

$$\nabla^2 \psi = -\frac{\rho_e}{\varepsilon_r \varepsilon_0}, \quad (1)$$

式中,  $\psi$  为 EDL 电势,  $\varepsilon_0$  为真空介电常数,  $\varepsilon_r$  为溶液相对介电常数,  $\rho_e$  为壁面附近形成的体积电荷密度. 在热平衡状态下, 电解质溶液中正负离子浓度满足 Boltzmann 分布规律, 对于单价对称电解质溶液 ( $z_1 = -z_2 = z = 1$ ):

$$\rho_e = -2ezn_0 \sinh\left(\frac{ze\psi}{k_B T}\right), \quad (2)$$

式中,  $e$  为单位电荷,  $z$  为离子化合价,  $n_0$  为远离壁面的离子数量浓度,  $k_B$  为 Boltzmann 常数,  $T$  为电解质溶液的热力学温度. 将方程(2)代入方程(1)中, 得到控制双电层电势的 Poisson-Boltzmann (PB) 方程:

$$\nabla^2 \psi = \frac{2zen_0}{\varepsilon_r \varepsilon_0} \sinh\left(\frac{ze\psi}{k_B T}\right). \quad (3)$$

### 1.2 Navier-Stokes 方程

根据不可压缩的假设条件, 得到控制流体流动的连续性方程和动量方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0, \quad (4)$$

$$\rho(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \rho_e \mathbf{E}, \quad (5)$$

式中,  $\rho$  为溶液密度,  $\mathbf{V}$  为速度矢量,  $P$  为压力,  $\mu$  为溶液动力学粘度,  $\mathbf{E}$  为总的电场强度, 由外加电场强度和 EDL 电场强度叠加而成, 即

$$\mathbf{E} = -\nabla(\varphi + \psi), \quad (6)$$

式中,  $\varphi$  为外加电场电势, 可由 Laplace 方程描述为

$$\nabla^2 \varphi = 0. \quad (7)$$

### 1.3 电解质输运方程

对于两种或多种电解质溶液混合, 在稳态流动下, 溶液浓度可由对流-扩散方程描述为

$$(\mathbf{V} \cdot \nabla) C = D_i \nabla^2 C, \quad (8)$$

式中,  $C$  为溶液浓度,  $D_i$  为溶液离子扩散系数. 为了定量地描述微通道内不同截面处溶液的混合程度, 引入混合效率  $\sigma$  为<sup>[17]</sup>

$$\sigma(x) = \left[ 1 - \frac{\int_0^H |C - C_\infty| dy}{\int_0^H |C_0 - C_\infty| dy} \right] \times 100\%, \quad (9)$$

式中,  $H$  为微通道宽度,  $C_0$  和  $C_\infty$  分别为溶液在混合前和完全混合时的浓度.  $\sigma$  的取值范围为 0 到 100%, 其值越大, 说明溶液混合越充分。

### 1.4 边界条件

对于图 1 所示的 3 种 T 型微混合器, 进出口、壁面、肋板处采用的边界条件如下:

入口 1:  $u = 0, v = v_0, \partial\psi/\partial y = 0, \varphi = \varphi_0, C = C_1, \partial P/\partial y = 0;$

入口 2:  $u = 0, v = -v_0, \partial\psi/\partial y = 0, \varphi = \varphi_0, C = C_2, \partial P/\partial y = 0;$

出口:  $\partial u/\partial x = 0, \partial v/\partial x = 0, \partial \psi/\partial x = 0, \varphi = 0, \partial C/\partial x = 0, P = 0;$

水平壁面:  $u = 0, v = 0, \psi = 0$  或  $\zeta, \partial \varphi/\partial y = 0, \partial C/\partial y = 0, \partial P/\partial y = 0;$

垂直壁面:  $u = 0, v = 0, \psi = 0, \varphi = \varphi_0, \partial C/\partial x = 0, \partial P/\partial x = 0;$

肋板:  $u = 0, v = 0, \psi = 0, \partial \varphi/\partial \mathbf{n} = 0, \partial C/\partial \mathbf{n} = 0, \partial P/\partial \mathbf{n} = 0;$

其中,  $u, v, C_1$  和  $C_2, \zeta, \mathbf{n}$  分别为入口速度分量、入口溶液浓度、壁面 Zeta 电势、肋板壁面法向向量, 方向由肋板指向溶液。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型验证

使用 COMSOL Multiphysics 软件, 对外加电场下 EOF 的 PB 方程有限元模型进行验证。假设一长为  $50 \mu\text{m}$ , 宽为  $4 \mu\text{m}$  的平板微通道上下壁面存在均匀 Zeta 电势, 电解质溶液在外加电场强度  $E_0 = 10\ 000 \text{ V/m}$  的作用下产生 EOF, 进出口采用无压差边界条件, 壁面采用无滑移边界条件, 相关模拟参数如表 1。模拟结果与 Zhao 等<sup>[18]</sup> 推导的解析解进行对比验证, 即

$$V(y) = \left( -\frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 \zeta E_0}{\mu} \right) \frac{\int_{\kappa y}^{\kappa H} \sinh(\kappa y) d(\kappa y)}{\cosh(\kappa H)}, \quad (10)$$

式中,  $\kappa = \sqrt{2z^2 e^2 n_0 / (\varepsilon_r \varepsilon_0 k_B T)}$  为 Debye (德拜) 长度的倒数。

图 2 为微通道中心截面 EOF 速度的数值解与解析解对比图。从图中可知, 两条速度曲线完全重叠, 验证了本文 EOF 有限元模型的正确性。

其次, 基于有限元法对上述 3 种 T 型微混合器模型所对应的控制方程以及边界条件进行求解。计算网格采用非均匀三角形网格, 同时对进出口、壁面存在 Zeta 电势段、肋板处进行加密处理, 加密处选择最大网格尺寸分别  $0.2 \mu\text{m}, 0.1 \mu\text{m}$  和  $0.05 \mu\text{m}$  进行网格无关性验证, 验证结果表明  $0.1 \mu\text{m}$  的最大网格已能很好地满足计算要求。

表 1 数值模拟参数

Table 1 The numerical simulation parameters

parameter	value	parameter	value
density $\rho / (\text{kg/m}^3)$	1 000	dynamic viscosity $\mu / (\text{Pa}\cdot\text{s})$	$1 \times 10^{-3}$
vacuum permittivity $\varepsilon_r / (\text{C}^2 / (\text{N}\cdot\text{m}^2))$	$8.854 \times 10^{-12}$	relative dielectric constant of solution $\varepsilon_0$	80
electron charge $e / \text{C}$	$1.602\ 18 \times 10^{-19}$	ion valence $z$	1
Avogadro's number $N_A / \text{mol}^{-1}$	$6.023 \times 10^{23}$	Boltzmann constant $k_B / (\text{J/K})$	$1.380\ 65 \times 10^{-23}$
ion concentration $C_0 / (\text{mol/m}^3)$	0.1	zeta potential $\zeta / \text{V}$	-0.1
temperature $T / \text{K}$	300	ion diffusion coefficient $D / (\text{m}^2/\text{s})$	$1 \times 10^{-9}$

### 2.2 流场和浓度场

对于图 1 所示的微混合器, 假设两种溶液的离子浓度分别为  $C_1 = 0 \text{ mol/m}^3, C_2 = 0.1 \text{ mol/m}^3$ , 外加电场电势  $\varphi_0 = 2.4 \text{ V}$ , 壁面 Zeta 电势  $\zeta = 0.1 \text{ V}$ 。两种溶液的混合效率受溶液的性质、离子扩散系数、入口速度等因素的影响, 定义两个无量纲参数, 分别为  $Re$  和  $Sc$ :

$$Re = \frac{\rho U H}{\mu}, \quad Sc = \frac{\mu}{\rho D}, \quad (11)$$

式中,  $U$  为溶液入口速度,  $H$  为入口通道宽度。在本文的研究中,  $Re$  的取值范围为  $2 \times 10^{-3} \sim 2.4 \times 10^{-2}$ ,  $Sc$  的取值范围为  $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$ 。

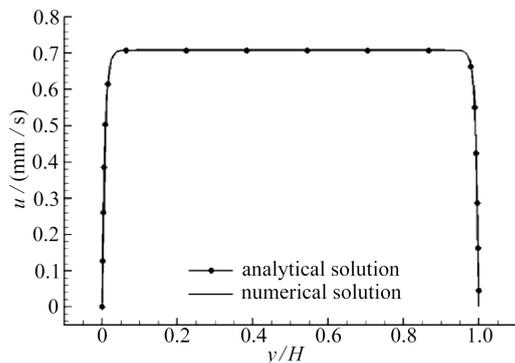
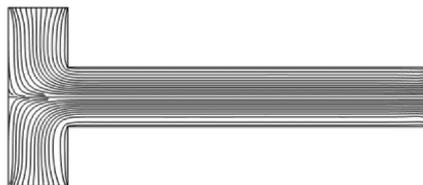


图2 EOF速度的数值解和解析解对比图

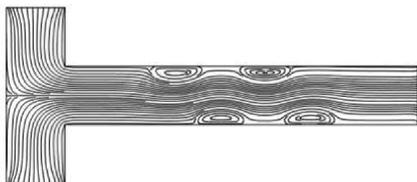
Fig. 2 Comparison of EOF velocity profile for numerical and analytical solutions

图3为 $Re = 1 \times 10^{-2}$ ,  $Sc = 1 \times 10^4$ 时3种T型微混合器内流场流线图。图3(a)中简单T型微混合器水平微通道内的流线为直线,且相互平行;图3(b)中主动式T型微混合器内流线发生了扭曲,在近壁面存在Zeta电势的局部区域出现回流并产生漩涡,其主要是因为存在正Zeta电势的壁面会吸引溶液中的负离子,使得壁面局部区域的负离子浓度增大,在外加电场力的作用下,负离子朝着与流体运动方向相反的方向运动,使得近壁面附近流体速度减小甚至反向;图3(c)中被动式T型微混合器内肋板会对流体产生阻碍作用,使流道截面积减小,流体被挤压,流线变得密集,同时在肋板附近产生较大的压降,从而形成漩涡。



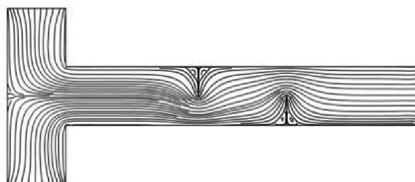
(a) 简单混合模型

(a) The simple mixing model



(b) 主动式混合强化模型

(b) The active mixing enhancement model



(c) 被动式混合强化模型

(c) The passive mixing enhancement model

图3 T型微混合器内的流场流线图

Fig. 3 Streamlines in the T-shaped micromixers

图4为 $Re = 1 \times 10^{-2}$ ,  $Sc = 1 \times 10^4$ 时3种T型微混合器内速度矢量图。图4(a)中简单T型微混合器内流体速度在水平微通道内呈现较好的抛物线型;图4(b)中主动式T型微混合器内存在壁面Zeta电势附近的流体速度既不呈现抛物线型也不呈现出图2的塞型,而是这两种速度的叠加,同时在壁面附近可以看到明显的反向速度;图4(c)中被动式T型微混合器内流体通过肋板时速度变大,但肋板背后的流体速度为0,这种情况易引起流体分离。

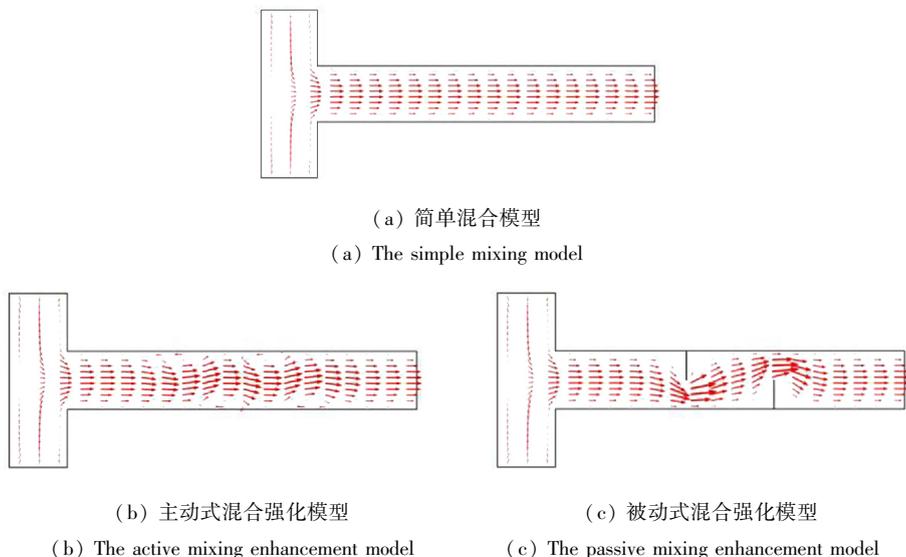


图4 T型微混合器内的速度矢量图

Fig. 4 Velocity vectors in the T-shaped micromixers

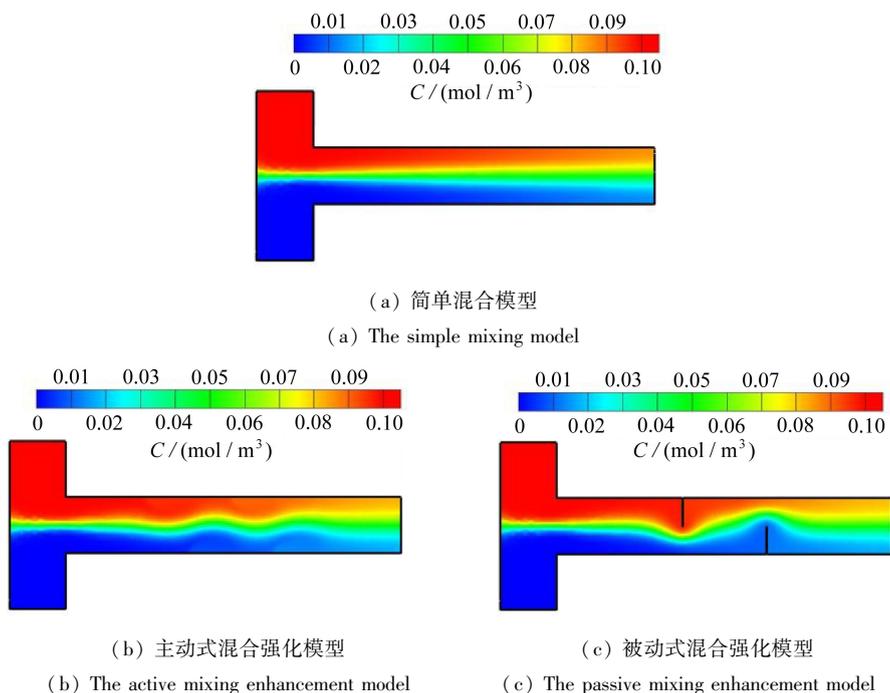


图5 T型微混合器内的浓度分布图

Fig. 5 The concentration distributions in the T-shaped micromixers

图5为 $Re = 1 \times 10^{-2}$ ,  $Sc = 1 \times 10^4$ 时3种T型微混合器内浓度分布图,在微通道出口处两种溶液的混合效率分别为:42.13%,46.05%和47.44%。图5(a)中两种溶液的混合过程主要依靠离子的扩散作用,混合效率较低;图5(b)中漩涡扰乱了流体的层流状态,增大了两种溶液的接触面积,因而混合效率有所提高,混合效率与壁面非均匀Zeta电势的分布有关;图5(c)中突变的流道面积使得溶液被挤压,也增加了两种溶液的接触机会,提高了混合效率,混合效率与

肋板的长度、个数、肋板之间的距离有关,但此时也需要注意过大的压力损失不利于溶液的输送.要获得更明显的混合强化效果,可以增加壁面非均匀 Zeta 电势的段数或肋板个数,但本文的重点在于对两种强化方式进行比较分析.

### 2.3 $Re$ 的影响

图 6 比较了  $Sc = 1 \times 10^4$  和  $Re$  分别为  $5 \times 10^{-3}$ ,  $1 \times 10^{-2}$ ,  $2 \times 10^{-2}$  时 3 种 T 型微混合器内溶液混合效率沿水平微通道的分布情况.由图 6 可知,  $Re$  越小,微混合器中溶液的混合效率越高.对于简单 T 型微混合器(case(a)),溶液刚进入水平微通道时,由于较大的离子浓度差,混合效率迅速增加,经过一段的混合距离之后溶液的混合效率沿着水平微通道方向线性增加;对于主动式 T 型微混合器(case(b))和被动式 T 型微混合器(case(c)),两种溶液的混合效率刚开始和 case(a) 中相同,主要依赖离子的扩散进行混合;但是 case(b) 中由于漩涡的影响,溶液的混合效率沿水平微通道方向并不呈线性增加,而是存在轻微的波动,且  $Re$  数越小,波动越大,此时其对溶液混合效率的提高也越明显;case(c) 中由于流体受到挤压,溶液的混合效率在水平微通道方向上出现了明显的波动.比较 case(b) 和 case(c) 中出口处溶液的混合效率,当  $Re = 5 \times 10^{-3}$  时,case(b) 中溶液出口混合效率要高于 case(c),但当  $Re = 1 \times 10^{-2}$  和  $2 \times 10^{-2}$  时,case(c) 中溶液出口混合效率要高于 case(b).

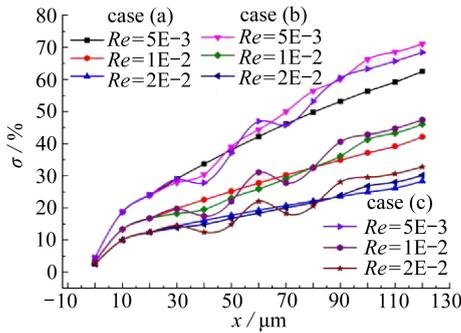


图 6 不同  $Re$  下 T 型微混合器内溶液混合效率沿水平微通道的分布

Fig. 6 The mixing efficiency along the microchannel for different  $Re$  values in the T-shaped micromixers

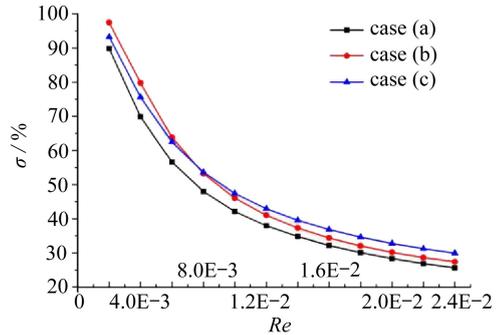


图 7 T 型微混合器溶液出口混合效率与  $Re$  的关系

Fig. 7 The mixing efficiency vs.  $Re$  curves at the exits of the T-shaped micromixers

图 7 比较了  $Sc = 1 \times 10^4$  时 3 种 T 型微混合器通道出口处溶液的混合效率与  $Re$  的关系.从图中可以看出,微混合器中两种溶液的混合效率随着  $Re$  的增加非线性减小,且减小趋势随着  $Re$  的增加变缓.相比于 case(a), case(b) 和 case(c) 均能一定程度地提高溶液的混合效率;比较 case(b) 和 case(c) 可知,当  $Re$  较小时,case(b) 能更好地提高溶液的混合效率,但当  $Re > 8 \times 10^{-3}$  时,case(c) 的混合效果更好.

### 2.4 $Sc$ 的影响

图 8 比较了  $Re = 2 \times 10^{-2}$  和  $Sc$  分别为  $2 \times 10^3$ ,  $1 \times 10^4$ ,  $1 \times 10^5$  时 3 种 T 型微混合器内溶液混合效率沿水平微通道的分布情况.由图可知,  $Sc$  越小,微混合器内溶液的混合效率越高.同样地,在两种溶液刚进入水平微通道的一段距离,3 种 T 型微混合器内溶液的混合效率相同,但是当溶液靠近非均匀 Zeta 电势壁面或肋板时,溶液的混合效率明显不同.对于 case(b) 中主动式 T 型微混合器,溶液混合效率沿水平微通道有轻微的波动,但这种波动在低  $Sc$  时会被抑制;对于 case(c) 中被动式 T 型微混合器,溶液的混合效率沿水平微通道有较大的波动,且  $Sc$  越

小,波动越大.对比 case(b) 和 case(c) 出口处溶液的混合效率,case(c) 中溶液的混合效率总是大于 case(b).

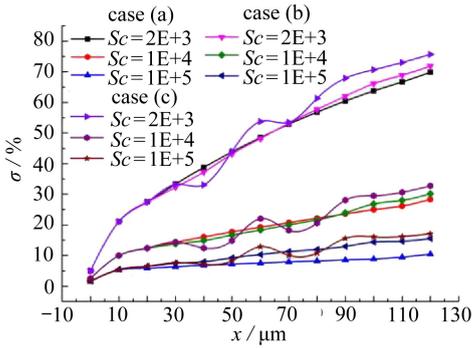


图8 不同  $Sc$  下 T 型微混合器内溶液混合效率沿水平微通道的分布

Fig. 8 The mixing efficiency along the microchannel for different  $Sc$  values in the T-shaped micromixers

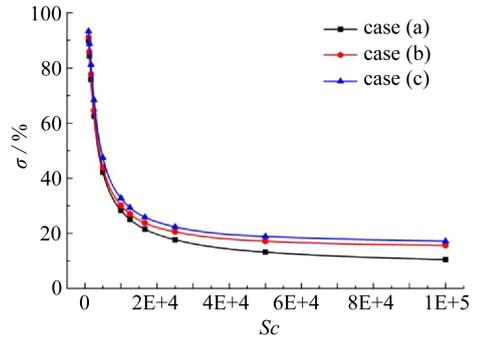


图9 T 型微混合器溶液出口混合效率与  $Sc$  的关系

Fig. 9 The mixing efficiency vs.  $Sc$  curves at the exits of the T-shaped micromixers

图9 比较了  $Re = 2 \times 10^{-2}$  时 3 种 T 型微混合器通道出口处溶液的混合效率与  $Sc$  的关系. 从图中可知,两种溶液的混合效率也随着  $Sc$  的增加非线性减小,且减小趋势在  $Sc = 1 \times 10^4$  时由快速减小变为缓慢减小.当  $Sc$  较小时,离子的扩散速率较大,溶液单纯地依赖离子的扩散也能达到较好的混合效果,但是随着  $Sc$  的增大,溶液的扩散速率很小,此时增加壁面非均匀 Zeta 电势的主动式混合或嵌入肋板式的被动式混合都能明显地提高溶液的混合效率.比较 case(b) 和 case(c) 可知,在此时的  $Re$  下,case(c) 的混合效果要比 case(b) 更好.

### 3 结 论

研究结果表明:

1) 低  $Re$  下的微尺度流动,溶液的混合效率随着  $Re, Sc$  的增加非线性减小,且  $Re$  或  $Sc$  越大,混合效率减小得越慢.

2) 相比简单的 T 型微混合器,增加壁面非均匀 Zeta 电势或嵌入肋板皆能提高溶液的混合效率.当  $Re$  较低时,增加壁面 Zeta 电势的主动式混合强化要比嵌入肋板的被动式混合强化更能提高溶液的混合效率,当  $Re$  较高时,反之.

3) 增加壁面 Zeta 电势的主动式 T 型微混合器内溶液的混合效率沿水平微通道方向存在轻微的波动,且这种波动在低  $Re$  或高  $Sc$  时有所加强;嵌入肋板的被动式 T 型微混合器内溶液的混合效率沿水平微通道方向波动较大,且  $Sc$  越小,波动越强.因而在选择强化混合方式时应综合考虑微混合器结构、 $Re$  以及  $Sc$  的影响.

参考文献 (References):

- [1] Wong S H, Ward M C L, Wharton C W. Micro T-mixer as a rapid mixing micromixer[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2004, **100**(3): 359-379.
- [2] Nguyen N T, Wu Z. Micromixers—a review[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, **15**(2): R1-R16.
- [3] Wong S H, Bryant P, Ward M, Wharton C. Investigation of mixing in a cross-shaped mi-

- chromixer with static mixing elements for reaction kinetics studies[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2003, **95**(1/3): 414-424.
- [4] Mouza A A, Patsa C M, Schönfeld F. Mixing performance of a chaotic micro-mixer[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2008, **86**(10): 1128-1134.
- [5] 王昆, 王嘉骏, 冯连芳, 顾雪萍. 内置阻块型微混合器内流体混合强化的数值模拟[J]. 化学工程, 2010, **38**(12): 30-34. (WANG Kun, WANG Jia-jun, FENG Lian-fang, GU Xue-ping. Numerical simulation of fluid mixing reinforcement in micro-mixers with barriers embedded[J]. *Chemical Engineering(China)*, 2010, **38**(12): 30-34. (in Chinese))
- [6] Mouheb N A, Malsch D, Montillet A, Sollicec C, Henkel T. Numerical and experimental investigations of mixing in T-shaped and cross-shaped micromixers[J]. *Chemical Engineering Science*, 2012, **68**(1): 278-289.
- [7] Parsa M K, Hormozi F, Jafari D. Mixing enhancement in a passive micromixer with convergent-divergent sinusoidal microchannels and different ratio of amplitude to wave length[J]. *Computers & Fluids*, 2014, **105**: 82-90.
- [8] 杨大勇, 王阳. 微通道中电渗流及微混合的离子浓度效应[J]. 应用数学和力学, 2015, **36**(9): 981-989. (YANG Da-yong, WANG Yang. Effects of ion concentration on electroosmotic flow and micromixing in microchannels[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2015, **36**(9): 981-989. (in Chinese))
- [9] 李战华, 吴健康, 胡国庆, 胡国辉. 微流控芯片中的流体流动[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 53-57. (LI Zhan-hua, WU Jian-kang, HU Guo-qing, HU Guo-hui. *Fluid Flow in Microfluidic Chips*[M]. Beijing: Science Press, 2012: 53-57. (in Chinese))
- [10] Cho C C, Ho C J, Chen C K. Enhanced micromixing of electroosmotic flows using aperiodic time-varying zeta potentials[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, **163**(3): 180-187.
- [11] 唐桂华, 王斐斐, 毕成, 陶文铨. 微尺度电渗混合强化的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2010, **31**(10): 1721-1723. (TANG Gui-hua, WANG Fei-fei, BI Cheng, TAO Wen-quan. Numerical study of electroosmotic mixing enhancement[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, **31**(10): 1721-1723. (in Chinese))
- [12] Jeong S, Park J, Kim J M, Park S. Microfluidic mixing using periodically induced secondary potential in electroosmotic flow[J]. *Journal of Electrostatics*, 2011, **69**(5): 429-434.
- [13] Lin T Y, Chen C L. Analysis of electroosmotic flow with periodic electric and pressure fields via the lattice Poisson-Boltzmann method[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, **37**(5): 2816-2829.
- [14] Alizadeh A, Zhang L, Wang M. Mixing enhancement of low-Reynolds electro-osmotic flows in microchannels with temperature-patterned walls[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2014, **431**: 50-63.
- [15] Ebrahimi S, Hasanzadeh-Barforoushi A, Nejat A, Kowsary F. Numerical study of mixing and heat transfer in mixed electroosmotic/pressure driven flow through T-shaped microchannels [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, **75**: 565-580.
- [16] Kandlikar S, Garimella S, Li D, Colin S, King M R. *Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels*[M]. Elsevier, 2005.
- [17] Erickson D, Li D. Influence of surface heterogeneity on electrokinetically driven microfluidic mixing[J]. *Langmuir*, 2002, **18**(5): 1883-1892.
- [18] Zhao C, Yang C. An exact solution for electroosmosis of non-Newtonian fluids in microchan-

nels[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2011, **166**(17): 1076-1079.

## Numerical Simulation of Mixing Enhancement in T-shaped Micromixers

XIAO Shui-yun<sup>1</sup>, LI Ming<sup>2</sup>, YANG Da-yong<sup>2</sup>

(1. *School of Mechanical & Electrical Engineering, Nanchang University,  
Nanchang 330031, P.R.China;*

2. *Information Engineering School, Nanchang University,  
Nanchang 330031, P.R.China*)

**Abstract:** To study the effects of different mixing enhancement modes on micromixing, numerical simulations with the finite element method were carried out on the simple T-shaped micromixers, the active T-shaped micromixers with surface heterogeneous Zeta potential and the passive T-shaped micromixers with embedded ribs. The flow fields, velocity fields and concentration fields in the 3 kinds of T-shaped micromixers, as well as the relationships between the mixing efficiency and 2 dimensionless parameters  $Re$  and  $Sc$ , were investigated. The results show that the mixing efficiency decreases with  $Sc$  and  $Re$ , fast at first and then slowly. The mixing efficiency in the passive T-shaped micromixer with embedded ribs has large undulation along the microchannel, while that in the active T-shaped micromixer with surface heterogeneous Zeta potential has only gentle undulation, and this undulation will be restrained in the cases of high  $Re$  values or low  $Sc$  values. The  $Re$  value also notably influences the improving effect of different mixing enhancement modes. For relatively lower  $Re$  values, the outlet mixing efficiency is improved more evidently in the active mixing enhancement mode with surface heterogeneous Zeta potential; otherwise, for relatively higher  $Re$  values, that happens instead in the passive mixing enhancement mode with embedded ribs.

**Key words:** T-shaped micromixer; mixing enhancement; electroosmotic flow;  
mixing efficiency

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China(11302095)

---

引用本文/Cite this paper:

肖水云, 李鸣, 杨大勇. T型微混合器内混合强化的数值模拟[J]. 应用数学和力学, 2016, **37**(3): 301-310.

XIAO Shui-yun, LI Ming, YANG Da-yong. Numerical simulation of mixing enhancement in T-shaped micromixers[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, **37**(3): 301-310.