

# 微通道中电渗流及微混合的离子浓度效应\*

杨大勇, 王 阳

(南昌大学 信息工程学院, 南昌 330031)

**摘要:** 电渗流广泛应用于微流控芯片中的流体输运与混合, 该文提出了一种离子浓度梯度对电渗流及微混合产生影响的变量模型, 采用有限元分析方法对微通道中电渗流及微混合的离子浓度效应进行了数值模拟, 分别讨论了 zeta 电势、介电常数对微通道内流场和浓度场的影响规律, 定量分析了微混合效率。结果表明, 当 zeta 电势和介电常数随浓度变化时, 微通道中流场分布不均匀, 离子分布不对称, 当溶液浓度趋近 1 mol/L 时, 溶液基本无法进入微通道。微混合效率随溶液间浓度差的增大而减小, 而且浓度差越大越能在较短距离内到达充分混合。

**关键词:** 电渗流; 离子浓度; 介电常数; zeta 电势

**中图分类号:** O351      **文献标志码:** A

**doi:** 10.3879/j.issn.1000-0887.2015.09.009

## 引 言

电渗流 (electroosmotic flow, EOF) 是指微通道内双电层扩散区内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。在生物、化学等诸多领域都能看到这个现象<sup>[1]</sup>。由于 EOF 具有操控方式简单、流型成扁平状、可降低和消除液体驱动过程中的分散效应等优点, 是微流控芯片分析系统中研究和用最广的驱动和控制技术<sup>[2]</sup>。

微通道内电渗流是低 Reynolds (雷诺) 数层流, 惯性力影响小, 粘性力起主导作用, 系统几乎不产生涡流, 溶液之间的混合主要取决于分子对流扩散以及电场迁移。一般而言, 根据装置中流体是否受外力作用, 微混合器分为被动式和主动式。为提高溶液间的混合效率, 大多数被动式微混合器都有比较复杂的几何特性<sup>[3-4]</sup>。如 Jeon 等<sup>[5]</sup>设计了两种类型的被动式微混合器, 通过在微通道内布置圆形、矩形和菱形障碍物与 Z 字形通道来提高混合效果。这类混合器的缺点是在微观尺度上难以制造和封装。

主动式微混合器则引入可动部件、交流电场或者诱导电渗流来提高混合效果。如 Zhang 等<sup>[6]</sup>通过诱导电渗产生涡流以控制通道内溶液的流速, 设计了一种能够提高混合效果的主动式微混合器。尽管上述的微混合器能在较短时间使溶液达到充分混合, 但由于存在可动部件或者需要外加变频泵, 使得微混合器的集成较为困难<sup>[7]</sup>。Wang 等<sup>[8-9]</sup>应用格子 Boltzmann (玻尔兹曼) 方法对表面存在异构 zeta 电势的微通道内流体流动和混合进行了数值模拟研究。Alizadeh

\* 收稿日期: 2015-05-15; 修订日期: 2015-07-12

基金项目: 国家自然科学基金 (11302095)

作者简介: 杨大勇 (1978—), 男, 安徽人, 副教授, 博士 (通讯作者。E-mail: dayongyang@ncu.edu.cn); 王阳 (1988—), 男, 江西人, 硕士生 (E-mail: w573235417@qq.com)。

等<sup>[10-11]</sup>利用格子 Boltzmann 方法模拟了温度不平衡对电渗微混合的影响,然而,以上所有这些研究都没有考虑离子浓度对电渗流及混合过程的影响。

本文使用有限元方法来研究微通道中溶液离子浓度对电渗流及其混合的影响,引入与离子浓度有关的 zeta 电势和介电常数,分别讨论变量模型和常量模型对电渗流及微混合的影响。

## 1 控制方程

图 1 为简化后流体混合系统模型,在外加入口电势  $V_1$  和出口电势  $V_2$  产生的电场驱动下,两种不同浓度的溶液进入微通道中。微通道尺寸长  $1\ 200\ \mu\text{m}$ ,宽  $150\ \mu\text{m}$ ,深  $50\ \mu\text{m}$ 。假设两种溶液均为 NaCl 溶液,浓度分别为  $C_1$  和  $C_2$ ,微通道深度方向上不存在浓度梯度,系统简化为 2D 模型,经验证不会影响结论的正确性。

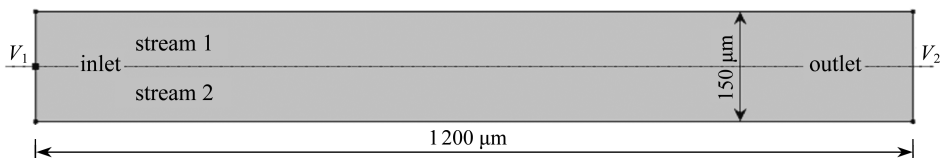


图 1 微流动及微混合系统示意图

Fig. 1 Schematic of the microflow and micromixing system

### 1.1 流场

由于电解质溶液是不可压流体,并且该流动为层流,用 Navier-Stokes (N-S) 方程来描述该流场<sup>[12]</sup>:

$$\rho \left[ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla \mathbf{u} \right] = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + E \rho_e - \frac{1}{2} \mathbf{E} \nabla^2 \varepsilon, \quad (1a)$$

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

式中,  $\rho$  为溶液密度,  $t$  为时间,  $\mathbf{u}$  为速度矢量,  $\mu$  为动力粘度,  $\nabla P$  为压力梯度,  $\rho_e$  为净电荷密度,  $\mathbf{E}$  为外加电场强度。式(1a)等号右边第 3 项为净电荷引起的体积力,第 4 项为介电常数梯度引起的介电力。由外加电场产生的净电荷移动能使微通道内流体趋于不稳定<sup>[13]</sup>,同时介电力会加剧该不稳定现象。造成这种不稳定的一个必要条件是高强度的外加电场<sup>[14]</sup>,由于本文中只讨论低电场强度情况,因此,可忽略微通道溶液中的 Coulomb(库仑)力和介电力。

对于薄双电层微通道,采用 Helmholtz-Smoluchowski (H-S) 滑移速度公式来描述电渗流,在微通道壁面上:

$$\mathbf{u} = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r(c) \zeta(c)}{\mu} \mathbf{E}, \quad (2)$$

式中,  $\varepsilon_0$  为真空介电常数,  $\varepsilon_r(c)$  为相对介电常数,  $\zeta(c)$  为 zeta 电势,  $\varepsilon_r(c)$  和  $\zeta(c)$  均为溶液离子浓度的函数。

考虑到通道中流体是稳态下的电渗流,且沿壁面无压力梯度,边界条件如下:

入口处和出口处均有

$$P = 0, \quad (3a)$$

微通道壁面上压力梯度为 0

$$\mathbf{n} \cdot \nabla P = 0, \quad (3b)$$

式中,  $\mathbf{n}$  为垂直于微通道壁面的单位法向量,其方向指向溶液。

## 1.2 浓度场

按照离子传递理论,用 Nernst-Plank (N-P) 方程描述微通道内离子浓度分布,考虑离子在电场中的迁移<sup>[15]</sup>:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla C_i + D_i \nabla^2 C_i + \frac{z_i F D_i}{RT} [\nabla \cdot C_i \nabla (\varphi + \psi)] + R_i, \quad (4)$$

式中,  $C_i$  为溶液中  $i$  离子的浓度,  $D_i$  为  $i$  离子的扩散系数,  $z_i$  为  $i$  离子的化合价,  $F$  为 Faraday (法拉第) 常数,  $R$  为气体常量,  $T$  为温度,  $\varphi$  为外加电势,  $\psi$  为双电层电势. 方程(4) 等号左边为  $i$  离子的堆积速率, 等号右边分别为在传质过程中的对流、扩散、电场迁移传递和  $i$  离子的化学反应速率.

由于研究的是稳态情况下的离子分布, 且 NaCl 溶液间不存在化学反应, 式(4) 中的离子堆积速率和反应速率可忽略, 该控制方程可简化为

$$\mathbf{u} \cdot \nabla C_i - D_i \nabla^2 C_i - \frac{z_i F D_i}{RT} (\nabla \cdot C_i \nabla \varphi) = 0. \quad (5)$$

边界条件可设为:

入口处溶液 1

$$C = C_1; \quad (6a)$$

入口处溶液 2

$$C = C_2; \quad (6b)$$

微通道壁上

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_i = 0, \quad (6c)$$

式中,  $N_i$  为  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  的 mole(摩尔) 通量.

为了定量、精确地分析微混合过程, 引入一个混合指数  $M^*$  (mixing index) 来评价混合效率, 其计算式如下:

$$M^* = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i - C_\infty)^2}, \quad (7)$$

式中,  $C_i$  为某截面内无量纲化  $\text{Cl}^-$  离子浓度;  $C_\infty$  为混合时微通道内的离子浓度, 取  $C_\infty = 0.5$ . 微通道内两溶液完全没有混合时,  $M^* = 0.5$ , 即混合效率为 0; 完全混合时,  $M^* = 0$ , 即混合效率为 100%.

## 1.3 浓度相关参数

### 1.3.1 介电常数

Peyman 等<sup>[16]</sup> 通过实验测得浓度范围为 0.001~5 mol/L 的 NaCl 溶液在 5~35 °C 时的相对介电常数. 介电常数与温度、离子浓度之间的关系如下:

$$\varepsilon_r(c) = \varepsilon_w (1.0 + 3.742 \times 10^{-4} Tc + 0.034c^2 - 0.178c + 1.515 \times 10^{-4} T - 4.929 \times 10^{-6} T^2) \quad (0 < c < 1 \text{ mol/L}), \quad (8a)$$

$$\varepsilon_r(c) = 84.328 + 0.117Tc + 0.77c^2 - 13.257c - 0.207T - 4.859 \times 10^{-3} T^2 \quad (1 \text{ mol/L} \leq c < 5 \text{ mol/L}), \quad (8b)$$

式中,  $T$  为溶液温度, °C;  $c$  为溶液中离子浓度, mol/L;  $\varepsilon_w$  为 25 °C 时水的相对介电常数. 依据微通道内局部离子浓度, 用该方程来计算相对介电常数.

这里所使用的离子浓度  $c$  为平均浓度:

$$c = \frac{C_{\text{Na}^+} + C_{\text{Cl}^-}}{2}. \quad (9)$$

### 1.3.2 zeta 电势

以玻璃或者二氧化硅为材料的微通道中,在较大的浓度范围内,zeta 电势与离子浓度成线性关系<sup>[17]</sup>:

$$\zeta(c) = a_0 + a_1 p C_i, \quad (10)$$

式中,  $a_0$  和  $a_1$  为温度、pH 值、基材、平衡离子种类的函数,  $p C_i = -\lg \sum_i C_i$ ,  $C_i$  为  $i$  离子浓度。

当溶液中正离子基本是  $\text{Na}^+$  或者  $\text{K}^+$  时,  $a_0 \approx 0$ . 当溶液呈中性时 (pH=7) 且正离子为  $\text{Na}^+$  或者  $\text{K}^+$  时, Revil 等<sup>[18]</sup> 通过实验得到  $a_1 \approx -20 \text{ mV}$ . 因此, 当  $10^{-6} \text{ mol/L} < C_{\text{Na}^+} < 1 \text{ mol/L}$  时, 上式可改写成

$$\zeta(c) = 20 \lg(C_{\text{Na}^+} + C_{\text{H}^+}). \quad (11a)$$

对于中性溶液 (pH=7),  $C_{\text{H}^+}$  (大约为  $10^{-7} \text{ mol/L}$ ) 比  $C_{\text{Na}^+}$  要小得多. 当  $C_{\text{Na}^+} > 10^{-6} \text{ mol/L}$  时,  $C_{\text{H}^+}$  可忽略不计, 则上式还可改写为

$$\zeta(c) = 20 \lg(C_{\text{Na}^+}). \quad (11b)$$

当离子浓度比较高时, 比如大于或等于  $1 \text{ mol/L}$ , 微通道表面电荷基本呈电中性, 可忽略双电层. 因此, 当离子浓度大于或等于  $1 \text{ mol/L}$  时, 可认为 zeta 电势为 0:

$$\zeta(c) = 0 \text{ mV}. \quad (11c)$$

## 2 结果与讨论

为了研究离子浓度梯度对电渗流及其混合效果的影响, 本文使用有限元软件 COMSOL Multiphysics 对流场、浓度场等控制方程进行直接耦合求解. 网格划分采用规则化网格结构, 计算区域包含 2 400 个矩形单元, 200 个边界单元. 经验证, 足以满足网格无关性和计算精度的要求.

在统一外加电场作用下, 分析两溶液存在浓度差时微通道内速度分布、离子浓度分布、zeta 电势、介电常数和混合效率. 本文所使用的参数如表 1 所示.

表 1 数值模拟参数

Table 1 The parameters of numerical simulation

parameter	value
temperature	$T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
vacuum permittivity	$\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
relative dielectric constant of water	$\varepsilon_w = 78$
density	$\rho = 998 \text{ kg/m}^3$
dynamic viscosity	$\mu = 1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
diffusion coefficient of $\text{Na}^+$	$D_{\text{Na}^+} = 1.344 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$
diffusion coefficient of $\text{Cl}^-$	$D_{\text{Cl}^-} = 2.03 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$
valence of $\text{Na}^+$	$z_{\text{Na}^+} = +1$
valence of $\text{Cl}^-$	$z_{\text{Cl}^-} = -1$
Faraday constant	$F = 9.649 \times 10^4 \text{ C/mol}$
gas constant	$R = 8.31 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$

根据上述内容,定义两种模型:常量模型(介电常数和 zeta 电势为常量)和变量模型(介电常数和 zeta 电势随离子浓度变化).在常量模型中,25 °C 氯化钠溶液的相对介电常数设为 78, Gu 等<sup>[19]</sup>测得玻璃-水界面处的 zeta 电势为 -62.6 mV.表 2 列出了两种模型所使用的相对介电常数、zeta 电势.此外,两种模型中入口 1 的 NaCl 溶液浓度为 0.1 mol/L,入口 2 的 NaCl 溶液浓度为  $10^{-6}$  mol/L,外加电场为 100 V/cm,温度为 25 °C.

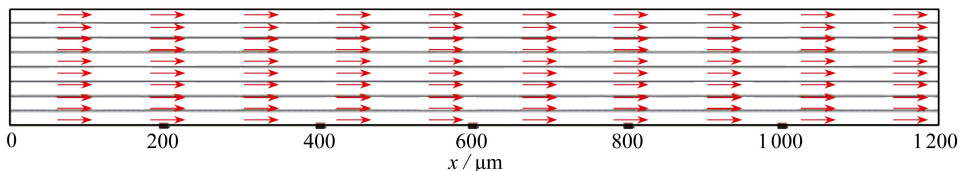
表 2 两种模型参数

Table 2 The parameters in the 2 models

parameter	model	
	variable model	constant model
relative permittivity $\varepsilon_r$	$\varepsilon_r = \varepsilon_r(c)$	$\varepsilon_r = 78$
zeta potential $\zeta$	$\zeta = \zeta(c)$	$\zeta = -62.6$ mV
electric field $E$	100 V/cm	

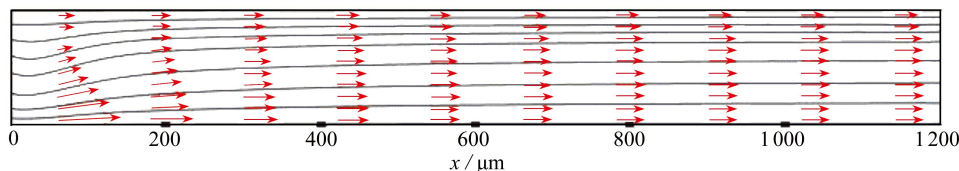
## 2.1 流场

图 2(a), (b) 分别为常量模型、变量模型下微通道内速度矢量和流线分布.常量模型中,速度是均匀分布的;变量模型中,速度是不均匀的,宽度方向上的速度随着局部浓度的增加而减小.变量模型中,入口处溶液 2 壁面附近的浓度最低,该区域的电渗流速度最大;溶液 1 壁面附近的浓度最高, zeta 电势最低,该区域速度最小.在微通道出口区域,速度分布比较均匀.显然,常量模型高估了电渗流效应,而变量模型更符合客观实际.



(a) 常量模型

(a) Constant model



(b) 变量模型

(b) Variable model

图 2 微通道内速度矢量和流线分布

Fig. 2 The velocity vectors and streamlines in the microchannels

## 2.2 浓度场

图 3(a), (b) 分别为常量模型与变量模型的  $\text{Cl}^-$  浓度分布.可以发现,常量模型中出口浓度(约  $50 \text{ mol/m}^3$ )高于变量模型(约  $24 \text{ mol/m}^3$ ).此外,常量模型中,微通道宽度方向上离子浓度分布基本是对称的,这说明任意横截面上两种溶液的量是相等的.在变量模型中,只有少量的高浓度溶液进入微通道.显然,相比于变量模型中考虑离子浓度对 zeta 电势、相对介电常数的影响,常量模型过高估计了流体的电渗流及其混合过程.

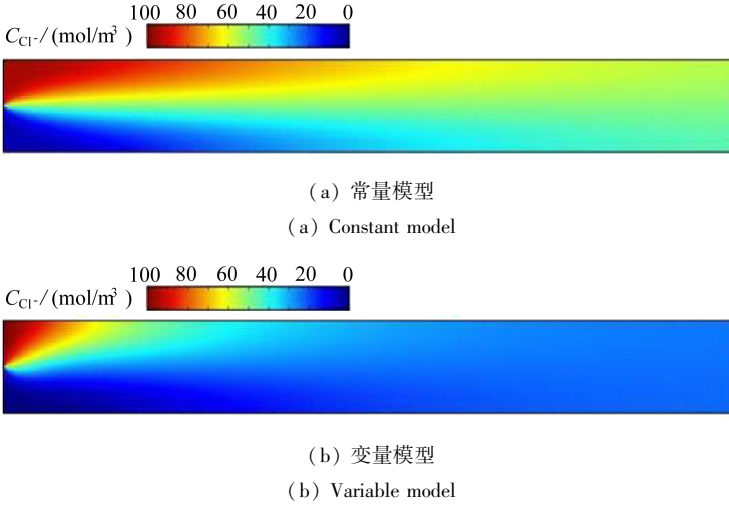


图3 微通道内 Cl<sup>-</sup> 浓度分布

Fig. 3 Distributions of the Cl<sup>-</sup> ion concentration in the microchannels

### 2.3 离子浓度对介电常数和 zeta 电势的影响

#### 2.3.1 介电常数

如前所述,介电常数为离子浓度的函数,见式(8).图4为溶液1、溶液2壁面附近的相对介电常数.在微通道入口处,两者相差最大,一个约78.1,另一个约76.6,即0.1 mol/L溶液的介电常数要比10<sup>-6</sup> mol/L的小1.96%,这么小的差距可以忽略.当溶液间浓度差较大时,则不应忽略该差距(例如,当溶液1的浓度变为1 mol/L而溶液2的浓度仍为10<sup>-6</sup> mol/L时,溶液1的介电常数比溶液2的小14.67%).由于电渗流速度与介电常数成正比,因此,在研究溶液间存在浓度差的电渗流时,应该考虑离子浓度影响.

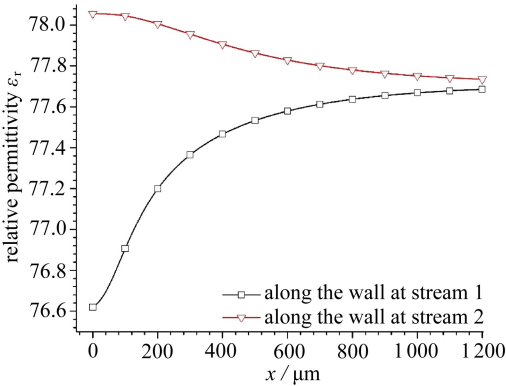


图4 微通道内壁面附近相对介电常数

Fig. 4 The relative permittivity profile along the channel wall

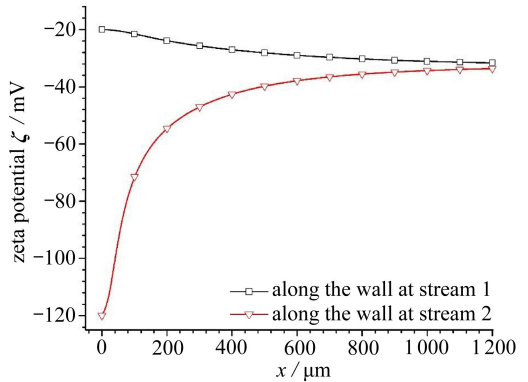


图5 微通道内壁面附近 zeta 电势

Fig. 5 The zeta potential profile along the channel wall

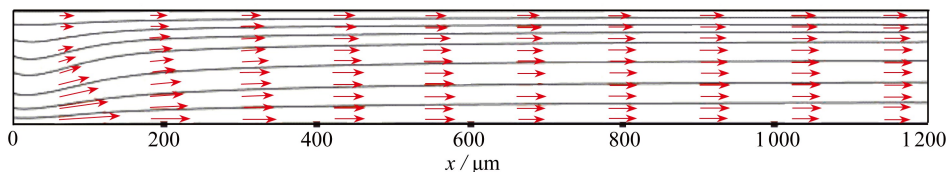
#### 2.3.2 Zeta 电势

两溶液混合时,在微通道长度方向上,离子浓度是变化的.根据式(10),离子浓度越高,zeta电势就越小.图5为微通道壁面附近 zeta 电势分布.微通道入口处浓度相差较大,入口处壁面附近的 zeta 电势也相差较大.对于溶液1入口处壁面,计算 zeta 电势得-20 mV,与 Gu 等<sup>[19]</sup>实际测量得到的数值(-22.7 mV)相当接近.而计算溶液2入口处壁面的 zeta 电势得-120 mV.随

着溶液逐步混合,溶液 2 的浓度逐渐变大,其壁面附近 zeta 电势迅速降低,在出口处降到  $-34$  mV。而溶液 1 壁面的 zeta 电势增长相对缓慢,在出口处达到  $-32$  mV。

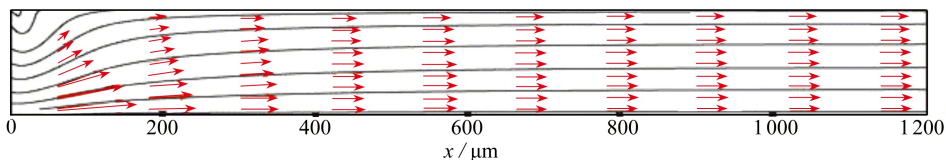
## 2.4 高浓度差溶液的电渗流及其混合

图 6 为不同浓度微通道内速度矢量和流线分布。显然,图 6(a)中流体平均速度比图 6(b)中的要大一些。正如前面所讨论的,当溶液浓度接近  $1$  mol/L 时,zeta 电势趋近于 0,溶液 1 几乎不能进入微通道,而溶液 2 的离子浓度相当低( $10^{-6}$  mol/L),壁面附近的 zeta 电势和电渗流速度要高得多。因此,进入微通道的溶液绝大多数为较稀的溶液,而且在入口处产生了回流漩涡。这个现象严重干扰了研究人员对电渗流混合的期望。



(a) 溶液 1(1 mol/L),溶液 2( $10^{-6}$  mol/L)

(a) Stream 1(1 mol/L) and stream 2( $10^{-6}$  mol/L)



(b) 溶液 1(0.1 mol/L),溶液 2( $10^{-6}$  mol/L)

(b) Stream 1(0.1 mol/L) and stream 2( $10^{-6}$  mol/L)

图 6 不同浓度差时微通道内速度矢量和流线分布

Fig. 6 The velocity vectors and streamlines of different concentration differences in the microchannels

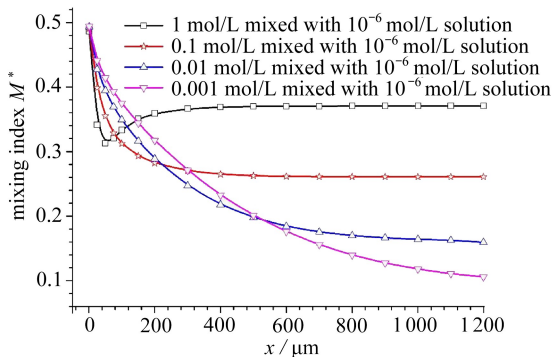


图 7 微通道内不同浓度差时的混合指数

Fig. 7 The mixing indexes of different concentration differences in the microchannels

图 7 为微通道内沿长度方向混合指数的变化曲线。总体上,随着两溶液间浓度差的增大,微通道内溶液的混合效率逐渐降低。当两溶液存在相当大的浓度差时,如  $1$  mol/L 和  $10^{-6}$  mol/L 的 NaCl 溶液, $1$  mol/L 溶液无法通过电渗效应进入微通道( $\zeta = 0$  V),只能通过粘附进入微通道,在入口处漩涡作用下与溶液 2 达到充分混合;同时,由于部分  $1$  mol/L 溶液从入口处回流,使得整个微通道内离子数减少,表现为混合指数先下降后增大。另外,溶液间浓度差不同,达到完全混合时所需要的微通道长度也不相同。浓度差越大,所需的距离越短。

### 3 结 论

本文提出了一种微通道内离子浓度梯度对电渗流及微混合过程的变量模型,考虑了离子浓度对 zeta 电势和介电常数的影响,进而分析该参数对流场和浓度场的影响,并定量分析混合效率.结果表明,当考虑离子浓度梯度影响时,微通道内速度分布是非均匀的,尤其在入口处最为明显,且离子分布也不对称.由于极低的离子迁移率,高浓度溶液基本无法进入微通道.因此,电渗流效应不适用于高浓度溶液的传输及其与低浓度溶液的混合.微混合效率随溶液间浓度差的增大而减小.有趣的是,浓度差越大越能在较短距离内到达充分混合.研究结论可以为微混合器的优化设计提供参考.

#### 参考文献(References):

- [1] Tian F, Li B, Kwok D Y. Tradeoff between mixing and transport for electroosmotic flow in heterogeneous microchannels with nonuniform surface potentials[J]. *Langmuir*, 2005, **21**(3): 1126-1131.
- [2] Dutta P, Beskok A. Analytical solution of combined electroosmotic/pressure driven flows in two-dimensional straight channels; finite Debye layer effects[J]. *Analytical Chemistry*, 2001, **73**(9): 1979-1986.
- [3] Hessel V, Löwe H, Schönfeld F. Micromixers—a review on passive and active mixing principles[J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, **60**(8/9): 2479-2501.
- [4] Capretto L, CHENG Wei, Hill M, ZHANG Xun-li. Micromixing within microfluidic devices [C]//LIN Bing-cheng, ed. *Microfluidics: Topics in Current Chemistry*, Vol **304**. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011: 27-68.
- [5] Jeon W, Shin C B. Design and simulation of passive mixing in microfluidic systems with geometric variations[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, **152**(2/3): 575-582.
- [6] ZHANG Fang, Daghighi Y, LI Dong-qing. Control of flow rate and concentration in micro-channel branches by induced-charge electrokinetic flow[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011, **364**(2): 588-593.
- [7] Nayak A K. Analysis of mixing for electroosmotic flow in micro/nano channels with heterogeneous surface potential[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, **75**: 135-144.
- [8] WANG Jin-ku, WANG Mo-ran, LI Zhi-xin. Lattice Boltzmann simulations of mixing enhancement by the electro-osmotic flow in microchannels[J]. *Modern Physics Letters B*, 2005, **19**(28/29): 1515-1518.
- [9] WANG Jin-ku, WANG Mo-ran, LI Zhi-xin. Lattice Poisson-Boltzmann simulations of electro-osmotic flows in microchannels[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, **296**(2): 729-736.
- [10] Alizadeh A, Wang J K, Pooyan S, Mirbozorgi S A, Wangd M. Numerical study of active control of mixing in electro-osmotic flows by temperature difference using lattice Boltzmann methods[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2013, **407**: 546-555.
- [11] 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.
- [12] Saville D A. Electrohydrodynamics: the Taylor-Melcher leaky dielectric model[J]. *Annual Re-*



- view of Fluid Mechanics*, 1997, **29**(1): 27-64.
- [13] Kang K H, Park J, Kang I S, Huh K Y. Initial growth of electrohydrodynamic instability of two-layered miscible fluids in T-shaped microchannel[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, **49**(23/24): 4577-4583.
- [14] LIN Hao, Storey B D, Oddy M H, CHEN Chun-hua, Santiago J G. Instability of electrokinetic microchannel flows with conductivity gradients[J]. *Physics of Fluids*, 2004, **16**(6): 1922-1935.
- [15] Masliyah J H, Bhattacharjee S. *Electrokinetic and Colloid Transport Phenomena*[M]. John Wiley & Sons, 2006.
- [16] Peyman A, Gabriel C, Grant E H. Complex permittivity of sodium chloride solutions at microwave frequencies[J]. *Bioelectromagnetics*, 2007, **28**(4): 264-274.
- [17] Kirby B J, Hasselbrink Jr E F. Zeta potential of microfluidic substrates—1: theory, experimental techniques, and effects on separations[J]. *Electrophoresis*, 2004, **25**(2): 187-202.
- [18] Revil A, Pezard P A, Glover P W J. Streaming potential in porous media—1: theory of the zeta potential[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1999, **104**(B9): 20021-20031.
- [19] GU Yong-an, LI Dong-qing. The  $\zeta$ -potential of glass surface in contact with aqueous solutions [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2000, **226**(2): 328-339.

## Effects of Ion Concentration on Electroosmotic Flow and Micromixing in Microchannels

YANG Da-yong, WANG Yang

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

**Abstract:** Electroosmotic flow is widely used to transport and mix fluids in microfluidic chips. A variable model for the ion concentration gradient effects on the electroosmotic flow and micromixing in microchannels was presented. The effects were investigated numerically with the finite element method. The impacts of the zeta potential and the dielectric constant on the flow field and concentration field were also analyzed. The micromixing efficiency in the microchannel was evaluated quantitatively. The results show that the flow field is inhomogeneous, and the distribution of the ion concentration will be asymmetric in the microchannel while the zeta potential and the dielectric constant vary with the ion concentration. When the concentration of the electrolyte solution is approximate to 1 mol/L, the solution essentially couldn't be driven into the microchannel. The micromixing efficiency decreases with the ion concentration difference between the electrolyte solutions, and the larger the difference is, the shorter the distance is needed to reach perfect mixing.

**Key words:** electroosmotic flow; ion concentration; dielectric constant; zeta potential

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