

基于电渗流驱动的涡流诱导微混合器

汪源¹, 王萍¹, 徐远清²

1. 天津工业大学电气工程及自动化学院, 天津 300160

2. 北京理工大学生命学院, 北京 100081

摘要 以电渗流为驱动, 设计出一种采用涡流诱导增强混合的微米级混合器。通过控制混合方腔上下壁面电渗流的大小和方向, 可诱导腔内流体产生不同的涡流形态, 本文重点研究电渗流驱动下形成一个涡流和两个涡流时的混合特性, 称相应涡流形态诱导混合下的模式为单涡模式和双涡模式, 并采用数学模拟方法定量地研究了两种混合模式下典型的稳态特性和动态特性。研究结果表明: 所设计的混合器具有流道短、结构简单、调控方便, 可实现高效、连续和稳定的混合等特点; 两种混合模式中, 双涡诱导混合模式具有更好的应用价值。

关键词 电渗流; 涡流诱导; 微混合器

中图分类号 TP183

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)11-0086-05

A Vortex-conducted Micromixer Driven by Electroosmosis

WANG Yuan¹, WANG Ping¹, Xu Yuanqing²

1. School of Electrical Engineering or Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China

2. School of Life Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract By taking electroosmosis as the driving force, a micrometer-range micromixer based on vortex-conducted is presented. In the design, a mixing quadrature antrum is placed to be a mixing container, in which the upside and underside wall is placed in a stable horizontal electric field, the electroosmosis flow is formed for the double electrical layers on the inner wall sides. The electroosmosis flow can drive its nearby fluid to move in a certain direction. However, the left and right sides of the mixing quadrature antrum are closed, and there is no electroosmosis taking place, so according to conservation of mass theory, some part of fluid will flow in a reverse direction contrastively to that of electroosmosis flow. By this means, some annular flow configuration are formed, that is, some shapes of vortexes can be created. Based on the above principle, two mixing modes of single-vortex mode and double-vortex mode are studied quantitatively with numerical simulation to discuss the performances of the mixer, especially of the stable and the dynamic mixing characteristic. It is proved with the numerical model that the proposed micromixer can perform high-efficiency, continuous and stable mixing, which has those advantages of short mixing channel, simple structure and convenient operation; as to the two mixing modes, the double-vortex mode is more significative in practical case.

Keywords electroosmosis; vortex-conducted; micromixer

0 引言

在微流控芯片中, 流体通常以层流状态流动, 微流混合主要依赖分子扩散, 混合过程缓慢。近年来, 多种增强微流混合的方法先后被提出, 其中基于电渗流的主动式混合方式因结构简单、操作方便、混合距离短、无须活动机械部件等优点而得到广泛应用。

Lettieri 等^[1]利用交流电压在混合腔内产生振荡的电渗流

以加强混合。Muller 等^[2]采用两对夹角为 45°的交流电场, 使流体产生混沌对流以增强混合。张志彰等^[3]研究了在有障碍物和局部改变壁面 zeta 电势作用下的流体形态及对微混合的改良。Lastochkin 等^[4]通过局部改变流道壁面 zeta 电势以加强混合。Sasaki 等^[5]在平行于混合通道方向上设置蜿蜒变化的电极, 通过改变静电场使电渗流的方向和速度产生周期性变化以加速混合。宋红军等^[6]在流内道内表面布置棋盘形交替

收稿日期: 2010-04-14

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2008AA12A218)

作者简介: 汪源, 研究方向为检测技术与自动化装置; 徐远清(通信作者), 讲师, 研究方向为数学模拟、微流控芯片, 电子信箱: bitxyq@bit.edu.cn

分布表面电势,诱导电渗流产生曲线形运动以增强混合。赵亮等^[7]研究了二维闭口微通道内电渗流的流动形态和混合效率。这些研究成果对微混合器的优化和发展有重要意义,但也存在一些问题。例如,文献[1]、[2],周期性流体驱动方式可能导致混合结果的周期波动;文献[3]、[4],局部改变流道壁面 zeta 电势工序繁琐、工艺难度大^[8];文献[5]、[6],电极设置多,微混合器结构较复杂;文献[7]中未研究对连续混合情况。

本文设计的微混合器以电渗流为诱导混合动力,使流体在相对封闭的混合腔中形成涡流以加速混合。重点研究了两种壁面 zeta 电势设置下的涡流形态,提出了“单涡”和“双涡”诱导混合模式。数值模拟表明,该微混合器可以较好地克服流道长、结构复杂、可控性差、混合效率低等不足,并可实现高效、连续和稳定的混合。

1 基本原理

1.1 微混合器设计

微混合器二维物理模型和几何尺度如图 1 所示。

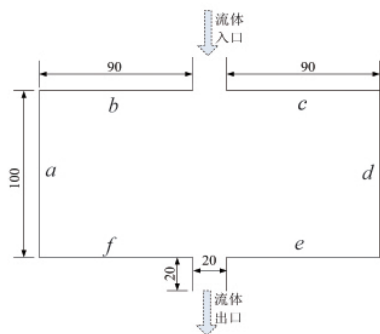


图 1 微混合器设计示意图(单位:μm)

Fig. 1 Design schematic of micromixer (unit: μm)

本微混合器模型可实现微流的连续混合,样品液和稀释液从混合腔中上部流入,从中下部流出。在混合腔内施加横向静电场,则会在 zeta 电势不为 0 的 b、c、e、f 边壁面附近产生电渗流,从而借助流体黏性诱导混合腔内流体形成涡流。

理论上,通过改变 b、c、e、f 边的 zeta 电势,可以形成多种涡流形态,但考虑最大化样品流和稀释流的接触面积和简化结构设计,仅考虑混合腔上下边电渗流同向和相反的情况。本文研究表明,在适当的控制电压下,通过壁面改性使混合腔上下边 zeta 电势相反,则可在混合腔内产生一个涡流,称为单涡诱导混合模式(简称单涡模式);当混合腔上下边壁面 zeta 电势相同时,可在混合腔内产生上下两个基本对称的涡流,称为双涡诱导混合模式(简称双涡模式)。本文主要对这两种模式下的混合特性进行了数值模拟研究。

1.2 数学模型

设样品液和稀释液不可压缩,物理性质相似,两者接触不发生化学反应,混合过程中涉及的主要数学模型如下。

1.2.1 电渗流

忽略离子电泳对流体产生的体积力,流体流动的质量动

力平衡满足 Navier-Stokes 方程^[9]:

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] + \nabla P - \mu \nabla^2 \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

式中, $\mathbf{u}$ 为流体速度, μ 为流体黏度, P 为流体内部压力。

边界条件是: 沟道出入口压力位 0, 其他壁面边界依据 Helmholtz-Smoluchowski 规则直接设为流体速度^[10]:

$$\mathbf{u} = \frac{\varepsilon_w \zeta_0}{\mu} \nabla V \quad (3)$$

式中, ε_w 为溶液的介电常数,数值上 $\varepsilon_w = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, ε_0 为真空介电常数, ε_r 为水的相对介电常数; ζ_0 为 zeta 电势; ∇V 为静电场电位梯度。

1.2.2 静电场

假设载流粒子没有浓度梯度,则可以通过 ohm 定理描述电流的平衡关系^[11]:

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla V) \quad (4)$$

式中, σ 为流体电导率, S/m; $-\sigma \nabla V$ 为带电粒子移动形成的电流密度, A/m²。

边界条件是: 沟道出入口设置为电位能常数。其他沟道壁面设为电绝缘模式。

1.2.3 扩散对流

样品以流体为载体时,在不发生生物化反应的情况下,主要包括输运和扩散运动方式,相应的传输扩散方程^[12]为

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla c) = -\mathbf{u} \cdot \nabla c \quad (5)$$

式中, c 为浓度, D 为扩散系数。

边界条件是: 沟道入口设为摩尔浓度常数,出口设置为对流量,其他边界设置为无穿透边界。

1.2.4 混合效率

为了定量分析混合程度,在混合器出口处定义混合效率公式为^[13]

$$\varepsilon = \left[1 - \frac{\int_0^l |C - C_\infty| dl}{\int_0^l |C_0 - C_\infty| dl} \right] \times 100\% \quad (6)$$

式中, C 为微混合器出口处的实际浓度分布, C_∞ 和 C_0 分别为理论上完全混合和完全未混合的浓度分布。

2 数值模拟

在 COMSOL Script 1.3 中进行编程模拟。设置操作温度为 20℃,混合流体物性与水相同。入口左侧 10μm 为浓度为 0.1mol/L 的样品液,右侧 10μm 为浓度为 0 的稀释液,扩散系数为 3×10⁻⁹m²/s,两种流体均以 0.001m/s 速度流入(雷诺数为 0.02)。设置混合腔左封闭端电势为 10V,右壁接地,墙体的上下壁 zeta 电势为 -100mV。

2.1 无电渗流诱导混合

当没有电渗流时,流体在横向受到的扰动很小,尽管混合腔内流体可在腔体中央自上而下流体的带动下形成涡旋

在一定程度上可加强混合(如图2,箭头只代表流速方向,不代表流速大小),但混合腔中涡流不能有效延长两种流体的接触面积,因而混合效果不理想。

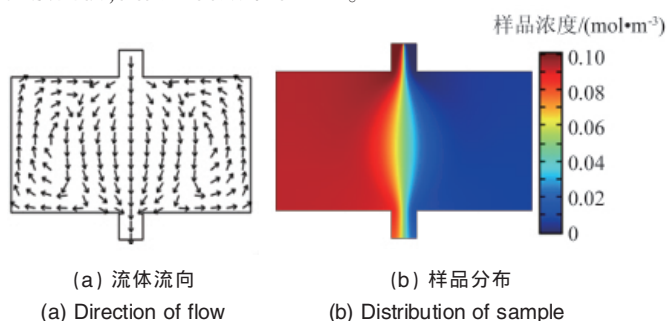


图2 无电渗流诱导混合情况
Fig. 2 Mixing case without electroosmosis-driving

2.2 单涡模式

当在混合腔上下边的 ζ 电势相反时,其相应电渗流方向相反(图3(a)),对于混合腔右封闭端上侧,电渗流受阻造成正压,会使流体向低压区流动,对于右封闭端下侧,流体被电渗流驱离造成负压,这样就使得右封闭端壁面附近流体自上而下流动。同理,左封闭端壁面附近的流体将会自下而上流动,因而,在电渗流驱动下,混合腔内所有壁面附近的流体流向均相同。这样,腔内外围流体带动内部流体一起旋转,即形成一个涡流。

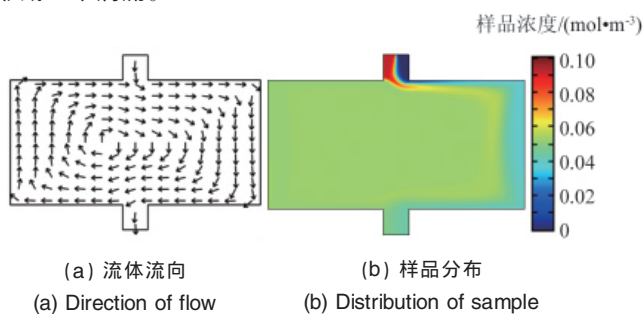


图3 单涡模式混合情况
Fig. 3 Mixing case with single vortex-conducting

2.3 双涡模式

双涡模式与单涡模式的不同之处是在混合腔上下壁面 ζ 电势相同,混合腔上下边附近的电渗流向相同,如图4所示。对于混合腔右封闭端,流体受来自两侧挤压被迫向中部

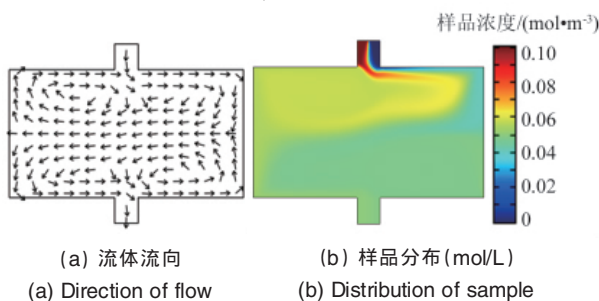


图4 双涡模式混合情况
Fig. 4 Mixing case with double vortex-conducting

集中,造成中部压力增加;对于混合腔左封闭端情况相反,其中部压力减小。因此在压力驱动下,流体会从右封闭端中部流向左封闭端中部,形成一上一下两个转向相反的涡流。

以上3种混合方式下混合器出口处的混合效率分别为66.14%、97.61%和98.43%,说明在相同的混合尺度下,采用电渗流涡流诱导混合可显著提高混合效率。

3 混合特性分析

根据微混合器数学模型,混合过程受到电场强度、入口流速、 ζ 电势、流体性质、混合腔尺寸等因素的影响。本部分主要研究两种涡流诱导混合模式下,改变电场强度和入口速率时微混合器的稳态和动态特性,为定量调控微混合过程提供参考。

3.1 稳态特性

稳态特性是指在一定的操作条件下,微混合器出口处混合效率达到的稳态值。

3.1.1 电压稳态特性

将混合腔左封闭端的电压从1V开始,以1V为增幅依次增加到20V,右封闭端接地,流体以0.001m/s从入口进入混合腔。其他条件在本文数值模拟部分设定,相应的混合效率曲线如图5所示。

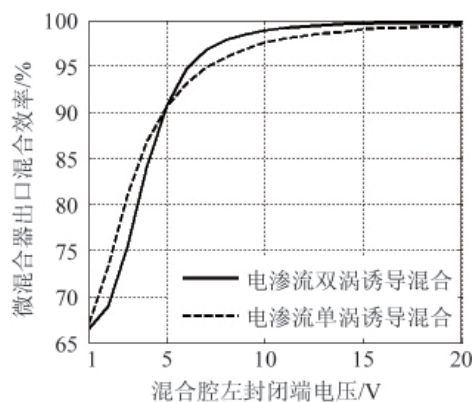


图5 电压稳态特性
Fig. 5 Stable voltage characteristic

由图5可以看出,①采用调节电压的方式可对混合效率进行调节,②在混合趋于充分的情况下,双涡模式的效果稍好一些,但随着调节电压的升高,两种模式的混合效果接近。

3.1.2 入口速率稳态特性

设置混合腔左封闭端电势为10V,右封闭端接地,流体以 1×10^{-4} m/s为增幅从 1×10^{-4} m/s依次增加到 20×10^{-4} m/s,相应流速下两种混合模式的混合效率曲线如图6所示。

由图6可以看出,在设定电压下,①随着混合器入口流速的增大,混合效率呈下降趋势;②低流速下,两种混合模式下的混合效果基本相同,均可完全混合,但混合器入口流速较大时($>6 \times 10^{-4}$ m/s),采用双涡模式可以得到稍好的混合效率。

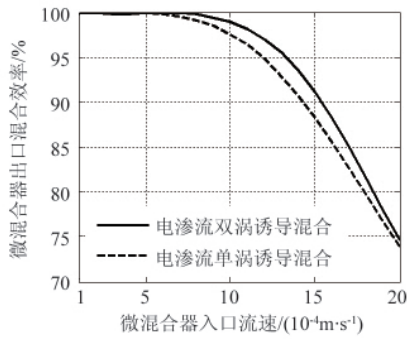
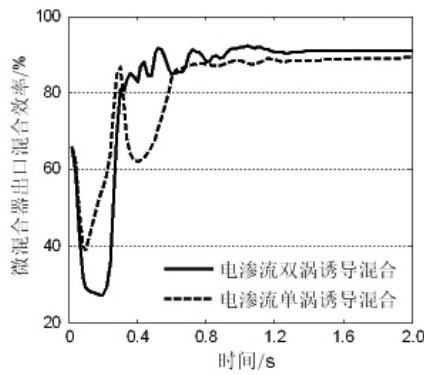
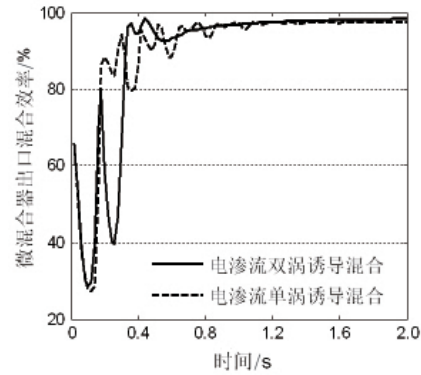


图 6 入口速率稳态特性

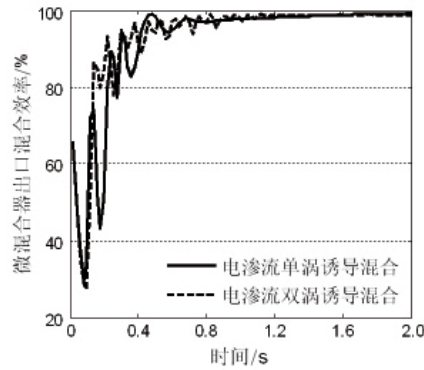
Fig. 6 Stable speed characteristic at entrance



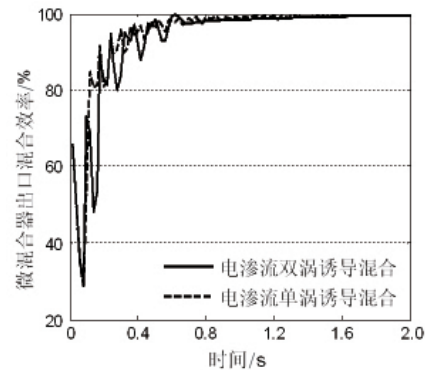
(a) 5V



(b) 10V



(c) 15V



(d) 20V

图 7 电压动态特性

Fig. 7 Dynamic voltage characteristic

3.2.2 入口速率动态特性

设置混合腔左封闭端电压为 10V,右封闭端接地,混合流体分别以 0.0001、0.0005、0.001、0.0015m/s 从入口进入混合腔,其他条件在本文数值模拟部分设定。混合腔内初始浓度为 0,采用两种混合模式得到在不同入口流速下的出口混合效率曲线如图 8 所示。

由图 8 可以看出,① 在低流速下(0.0001m/s),出口处混合效率响应慢。② 混合接近稳态时,双涡模式的混合效率略高于单涡模式。

3.2 动态特性

动态特性指在一定的操作条件下,微混合器出口处混合效率从初始状态到稳态的过渡规律。

3.2.1 电压动态特性

设置混合腔左封闭端电压分别为 5、10、15、20V,右封闭端接地,待混合流体以 0.001m/s 从入口进入混合腔,其他条件在本文数值模拟部分设定。以本文 3.1 节中无电渗流的混合稳态为初始状态,得到两种混合模式下的动态特性曲线如图 7 所示。

由图 7 可以看出,① 随着电压升高,混合效率的波动频率加快,② 在 4 种电压设置下,混合效率在 0~0.6s 内存在较大波动,随着时间增加,波动幅度减小,在 1s 内基本趋于稳定。

4 结论

1) 基于电渗流涡流诱导混合原理,可设计出结构简单,调控方便的微米级流体混合器,此种混合器可实现连续混合,并可获得较高的混合效率。

2) 通过改变混合腔上下壁面电渗流方向,可得到“单涡”和“双涡”两种涡流形态,数值模拟表明:在这两种涡流模式下的混合特性基本相似,但双涡模式不需对混合腔壁面改性,且稳态混合效率略高于单涡模式,这说明双涡模式具有更好的可操作性和实用性。

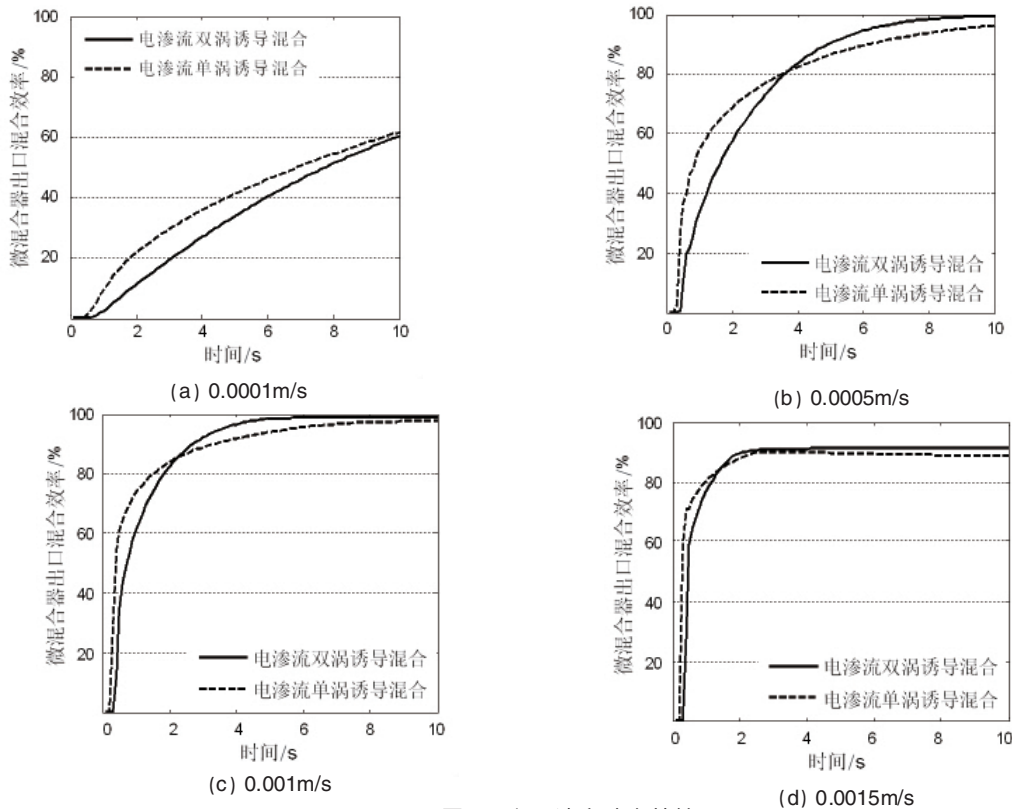


图 8 入口速率动态特性

Fig. 8 Dynamic speed characteristic at entrance

3) 稳态特性分析表明:设定条件下,在未实现完全混合之前,混合效率与电压和速率存在非线性关系,随着电压升高,混合趋于充分;随着入口流体速率增大,混合效率逐渐降低。

4) 动态特性分析表明,设定条件下,从无电渗流混合稳态到电渗流涡诱导混合稳态的过渡时间约为 1s;在控制电压不变及混合腔初始浓度为 0 的情况下,通过调节入口流体速率可调整过渡时间和混合效率。

参考文献 (References)

- [1] Lettieri G L, Dodge A, Boer G, et al. Consequences of opposing electrokinetically and pressure-induced flows in microchannels of varying geometries [C]//Proceedings of Micro Total Analysis Systems. Enschede, NL, 2000: 351-354.
- [2] Muller S D, Mezi I, Walther J H, et al. Transverse momentum micromixer optimization with evolution strategies[J]. *Computers and Fluids*, 2004, 33: 521-531.
- [3] 张志彰. 微管道电渗流物理特性的数值模拟[D]. 台南: 国立成功大学, 2003.
Zhang Zhizhang. Numerical simulation on the physical characteristic of electroosmosis in microchannels [D]. Tainan: National Cheng Kung University, 2003.
- [4] Lastochkin D, Zhou R H, Wang P. Electrokinetic Micropump and Micromixer Design Based on ac Faradaic Polarization [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 96(3): 1730-1733.
- [5] Sasaki N, Kitamori T, Kim H B. AC electroosmotic micromixer for chemical processing in a microchannel[J]. *Lab Chip*, 2006, 6: 550-554.
- [6] 宋红军, 司廷, 尹协振. 一种棋盘形分布表面电势的电渗微混合器设计[J]. *中国科学技术大学学报*, 2007, 37(10): 1242-1248.
Song Hongjun, Si Ting, Ying Xiezheng. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2007, 37(10): 1242-1248.
- [7] 赵亮, 刘林华. 闭口微通道电渗流微混合的数值模拟 [J]. *化工学报*, 2007, 58(12): 3019-3023.
Zhao Liang, Liu Linhua. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2007, 58(12): 3019-3023.
- [8] Biddiss E, Erickson D, Li D Q. Heterogeneous surface charge enhanced micromixing for electrokinetic flows [J]. *Analytical Chemistry*, 2004, 76 (11): 3208-3213.
- [9] 龙天渝, 苏亚欣, 向文英, 等. 计算流体力学 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2007: 13-23.
Long Tianyu, Su Yaxin, Xiang Wenying, et al. *Computational fluid dynamics*[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2007: 13-23.
- [10] 张玉宝, 李强. 基于 comsol multiphysics 的 MEMS 建模与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 159-160.
Zhang Yubao, Li Qiang. *Modeling and application of MEMS based on comsol multiphysics* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007: 159-160.
- [11] Chen H, Zhang Y T, Mezi I, et al. Numerical simulation of an electroosmotic micromixer [C]//Proceedings of Microfluidics 2003 ASME IMECE. Washington DC, 2003.
- [12] Enmakov S V, Jacobson S C, Ramsey J M. Computer simulation of electrokinetic injection techniques in microfluidic devices[J]. *Analytical Chemistry*, 2000, 72: 3512-3517.
- [13] Jeon N L, Dertinger S K W, Chiu D T, et al. Generation of solution and surface gradients using microfluidic systems[J]. *Langmuir*, 2000, 16(22): 8311-8316.

(责任编辑 朱宇)