微流控芯片中交流电渗流、电热效应及自然对流的比较分析

张 峰[1]，陈 瀚[2]

（1. 华中科技大学土木工程与力学学院，武汉 430074；
2. 华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室，武汉 430074）

摘要：研究不同实验参数条件下，交流电渗流（alternating current electroosmosis，ACEO）、电热效应（electrothermal effect，ETE）和自然对流引起微流控芯片中流场特性。首先对ACEO引起的微电极表面滑移速度和ETE造成的流场体积力分别进行量级分析，并采用数值模拟方法研究不同参数条件下ACEO，ETE及自然对流对流场的影响，讨论3种效应在不同条件下造成流场的大小关系，得出自然对流在一般实验条件下可以忽略的结论。

关键词：流体力学；交流电渗流；电热效应；自然对流
中图分类号：O363 **文献标识码**：A **文章编号**：1674-2850(2014)15-1508-11

Comparative analysis of alternating current electroosmosis, electrothermal effect and natural convection in microfluidic chips

ZHANG Feng[1], CHEN Han[2]

(1. *School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan* 430074, *China*;
2. *State Key Lab of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan* 430074, *China*)

Abstract: In this paper, the flow fields in microfluidic devices caused by alternating current electroosmosis (ACEO), electrothermal effect (ETE) and natural convection are investigated under various experimental parameters. The slip velocity on micro electrodes caused by ACEO and fluid volumetric force caused by ETE are firstly studied analytically. Then, numerical simulation is conducted to study the effects of ACEO, ETE and natural convection on the flow fields in microfluidic devices under various experimental parameters, and their relative importance is also analyzed. The conclusion is drawn that natural convection can be neglected under normal experimental conditions.

Key words: fluid mechanics; alternating current electroosmosis; electrothermal effect; natural convection

0 引言

微流控芯片在生物化学和医学等领域得到了广泛的研究和应用[1]。电渗流是微流控芯片中一种常见的驱动模式，一般分为直流电渗流和ACEO 2种方式。直流电渗流需要在微通道施加几百甚至几千伏的电压，这样会导致电极与溶液发生电化学反应，产生气泡、焦耳热效应等现象[2~3]，限制了直流电渗流的运用。因此，近来交流动电现象（alternating current electrokinetic phenomena）逐渐发展成

基金项目：高等学校博士学科点专项科研基金（20090142120007）；教育部回国人员科研启动基金；国家自然科学基金（11172111）
作者简介：张峰（1987—），男，博士研究生，主要研究方向：微流控芯片
通信联系人：陈瀚，副教授，主要研究方向：微流控芯片. E-mail：hanchen@hust.edu.cn

为微流控装置和生物芯片系统中最重要的驱动技术，其中包括介电泳（dielectrophoresis，DEP）和ETE. 自1978年POHL[4]发现交流动电现象后，DEP被用于操作各种微米或纳米级别的颗粒，如微/纳米微球[5~7]、细胞[8~12]、细菌[13]、病毒[14]、DNA[15]及碳纳米管[16]等。ACEO作为近年来被发现的现象[17~19]，广泛地运用于微通道内低雷诺数流动中化学物质的混合[20~22]。同时，通过使用不对称电极，ACEO也能在微通道内产生整体流动[23~24]。ETE被用于微流控装置中的混合部分[22]。

ACEO和ETE均为水动力学现象并能导致流体运动。ACEO产生的流动来自于电场和电极表面双电层的相互作用。如果电场在电极表面有切向分量，则双电层中的离子会横向移动并带动流体运动。动电现象中的ETE由焦耳热导致的温差梯度产生，而焦耳热来自于微通道中施加的电场作用。焦耳热会使流体温度上升并在微通道内产生纵向和径向的温度梯度。同时产生的温度变化又会导致流体性质改变[25~26]，如电解液的介电常数和电导率的改变等。这些物理性质的改变反过来会通过它们与电场的相互作用影响流体运动。

目前，关于动电现象的研究考虑了ACEO和ETE的影响，并在数值计算中忽略了自然对流对电渗流动的影响[5,7]。这里通过数值计算分析在不同情况下动电现象中ACEO，ETE和自然对流对流场的影响，比较三者对流场的影响程度，并通过数值仿真结果讨论自然对流是否可以忽略。这对提高微流控器件的性能，有效、准确地控制ACEO的流动具有重要意义。

1 研究方法

1.1 流场的控制方程与边界条件

微流控装置微通道内的电解液流动满足不可压缩流体的连续方程和Navier-Stokes方程：

$$\nabla \cdot \boldsymbol{v} = 0, \tag{1}$$

$$\rho(\boldsymbol{v} \cdot \nabla)\boldsymbol{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \boldsymbol{v} + \boldsymbol{f}, \tag{2}$$

其中，$\boldsymbol{v}$为速度矢量；ρ为流体密度；p为压强；μ为动力黏性系数；流体受到的体积力为$\boldsymbol{f}=\boldsymbol{f}_E+\boldsymbol{f}_g$，$\boldsymbol{f}_E$为ETE产生的体积力，$\boldsymbol{f}_g$为自然对流产生的浮力。

图1为微通道横截面的模型示意图。如图1所示，在边界1处设置无滑移边界条件，在边界2和3设置因ACEO产生的壁面速度v_{ACEO}，在边界4设置周期边界条件。

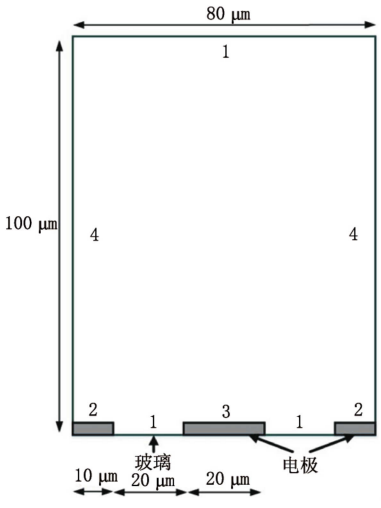


图1 模型示意图

Fig. 1 Sketch map of the model

1.1.1 ACEO引起的滑移速度

RAMOS等[5]推导出两平行ACEO电极表面的壁面速度，假设表面电荷与电压之间为线性关系，并忽略了双电层中的紧密层，ACEO在电极表面的壁面速度表达式如下：

$$v_{ACEO} = \frac{\varepsilon\varphi^2\Omega^2}{8\mu d(1+\Omega^2)^2}, \tag{3}$$

$$\Omega = \frac{1}{2}\pi\kappa d\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right)\omega, \tag{4}$$

其中，φ为初始电压；Ω为关于频率ω的无量纲数；μ为动力黏性系数，取值为0.000 89 Pa·s；d为电极表面上一点到电极空隙中点的距离；κ为Debye长度的倒数。

1.1.2 ETE产生的体积力

为确定温度梯度对流体运动的影响，需要考虑温度改变导致的电导率和介电常数梯度。介电常数和电导率与温度的关系[5]表示为

$$\alpha = (1-\varepsilon)(\nabla\varepsilon/\nabla T) = -0.4\%\ \mathrm{K}^{-1}, \tag{5}$$

$$\beta = (1-\sigma)(\nabla\sigma/\nabla T) = 2.0\%\ \mathrm{K}^{-1}, \tag{6}$$

其中，ε 为介电常数，取值为 7.1×10^{-10} F/m；σ 为电导率。

ETE 产生的体积力是电导率和介电常数梯度导致的，其表达式为[5]

$$\boldsymbol{f}_{\mathrm{E}} = -0.5\left[\left(\frac{\nabla\sigma}{\sigma}-\frac{\nabla\varepsilon}{\varepsilon}\right)\boldsymbol{E}\frac{\varepsilon\boldsymbol{E}}{1+\omega\tau}+0.5|\boldsymbol{E}|^2\nabla\varepsilon\right] = 0.5\cdot\varepsilon\cdot\nabla T\cdot\boldsymbol{E}^2\Pi(\omega), \tag{7}$$

$$\Pi(\omega) = \left(\frac{\alpha-\beta}{1+\omega\tau}-\frac{\alpha}{2}\right), \tag{8}$$

其中，τ 为电荷松弛时间（ε/σ）；ω 为角频率；Π 为关于频率 ω 的无量纲数；$\boldsymbol{E}$ 为电场强度向量。

1.1.3 自然对流产生的体积力

流体中的温度梯度会导致流体密度的改变从而产生浮力（体积力），进而出现自然对流现象。自然对流产生浮力 $\boldsymbol{f}_{\mathrm{g}}$，表达式为

$$\boldsymbol{f}_{\mathrm{g}} = \Delta\rho\boldsymbol{g} = \frac{\partial\rho}{\partial T}\Delta T\boldsymbol{g}, \tag{9}$$

其中，$\boldsymbol{g}$ 为重力加速度；流体密度 ρ 为 996 kg/m^3；$\frac{\partial\rho}{\rho\partial T}$ 为 ρ 随温度改变的变化量，取值为 10^{-4} kg·m^{-3}·℃$^{-1}$[5,7]；ΔT 为温度差。

1.2 电场的控制方程与边界条件

电场的电位势 V 满足 Laplace 方程：

$$\nabla^2 V = 0, \tag{10}$$

$$\boldsymbol{E} = \nabla V, \tag{11}$$

其中，E 为电场强度的大小。

如图 1 所示，在边界 1 处设置零电荷边界条件；在边界 2 处设置电压 $V_2 = V_{\mathrm{rms}}/2$；在边界 3 处设置电压 $V_3 = -V_{\mathrm{rms}}/2$，其中 V_{rms}为外部施加在电极上的均方根电压；在边界 4 处设置周期边界条件。

1.3 温度场的控制方程与边界条件

在 ACEO 现象中同时伴随电热效应，电场作用于流体之中会产生焦耳热现象，满足如下方程：

$$k\nabla^2 T + \sigma E^2 = 0, \tag{12}$$

其中，k 为热导率，取值为 0.6 J·m^{-1}·s^{-1}·K^{-1}[5]；T 为温度；σ 为电导率；E 为电场强度的大小，式（12）忽略了非定常项和对流项。

如图 1 所示，在边界 1 处设置热绝缘边界条件；在边界 2 和边界 3 处设置固定温度为 298 K 的边界条件；在边界 4 处设置周期边界条件。

2 ACEO 引起滑移速度与 ETE 引起流场体积力的理论分析

2.1 ACEO 引起滑移速度的理论分析

根据式（3）可知，v_{ACEO}主要与频率、输入电压及电导率相关。由于真实实验可使用的电压范围区间较小，同时 v_{ACEO}和自然对流产生体积力都与电压的 2 次方成正比关系[5,7]，电压的变化对 ACEO 和自然对流的主次关系影响不大。要使得 v_{ACEO} 最小，令 Ω 取值最小。令 $\Omega = \frac{1}{2}\pi\kappa d\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right)\omega = n$，则 $\omega = \frac{2n\sigma}{\pi\kappa d\varepsilon}$. 已知 $\kappa = \frac{1}{\lambda}$，Debye 长度为 $\lambda = \frac{9.61\times10^{-9}}{c^{1/2}}$，KCl 溶液的浓度为 $c = 0.1\sigma$ mol/L，介电常数为

$\varepsilon=7.1\times10^{-10}$ F/m，$d=10$ μm，可得

$$\omega=\frac{2n\sigma}{\pi\times\frac{(0.1\times\sigma)^{1/2}}{9.61\times10^{-9}}\times10\times10^{-6}\times7.1\times10^{-10}}=2.724\ 866\ 075\times10^{6}\times\sigma^{1/2}\times n. \tag{13}$$

令 $\Omega=n$，根据式（3）并代入已知数据可得 v_{ACEO} 与 n 的关系（如图 2 所示），可知当 $\Omega>2\ 000$ 时，v_{ACEO} 取值趋近于零。令 $\Omega=n=2\ 000$，则 $\omega=5.449\ 732\ 150\times10^{9}\times\sigma^{1/2}$.

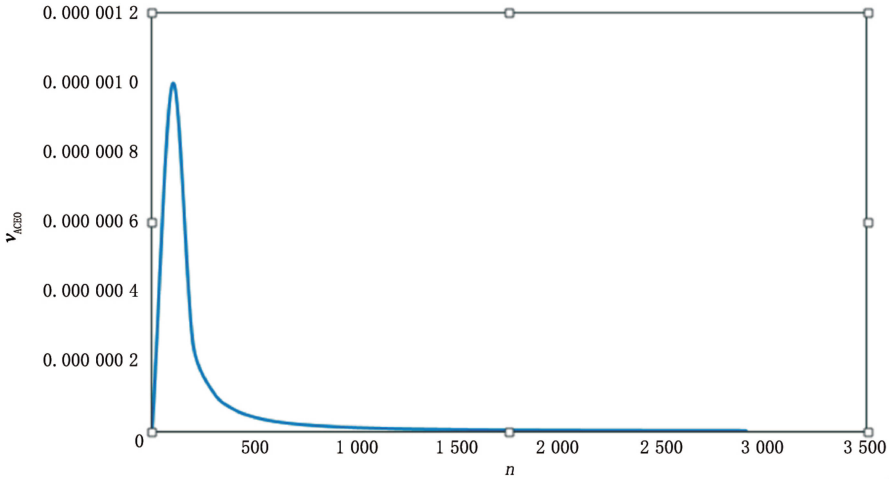


图 2 v_{ACEO} 与 n 的关系

Fig. 2 Relationship between v_{ACEO} and n

实验中常用的电导率范围为 0.000 2～0.05 S/m[5,7]. 当 $\sigma=0.05$ S/m 时，临界频率为 $\omega=1.218\ 597\ 155\times10^{9}$ Hz；当 $\sigma=0.002$ S/m 时，临界频率为 $\omega=2.437\ 194\ 310\times10^{8}$ Hz；当 $\sigma=0.000\ 2$ S/m 时，临界频率为 $\omega=7.707\ 085\ 118\times10^{7}$ Hz. 超过这个临界频率，v_{ACEO} 将取较小时的值。

2.2 ETE 引起流场体积力的理论分析

由式（7）～式（8）可知，ETE 产生的体积力主要与频率、输入电压及电导率有关，由于目前 ACEO 实验中使用的电压范围区间较小[5,7]，频率和电导率的影响最大。令 $\Pi(\omega)=0$，则 ETE 对流场影响最小的临界频率为

$$\omega=\frac{\left[\frac{2(\alpha-\beta)}{\alpha}-1\right]^{1/2}}{\frac{\varepsilon}{\sigma}}=11^{1/2}\times\frac{\sigma}{\varepsilon}, \tag{14}$$

代入已知参数，得

$$\omega=11^{1/2}\times\frac{\sigma}{7.1\times10^{-10}}=4.670\ 58\times10^{9}. \tag{15}$$

当 $\sigma=0.05$ S/m 时，临界频率为 $\omega=2.335\ 29\times10^{8}$ Hz；当 $\sigma=0.002$ S/m 时，临界频率为 $\omega=9.341\times10^{6}$ Hz；当 $\sigma=0.000\ 2$ S/m 时，临界频率为 $\omega=9.341\times10^{5}$ Hz. 当频率小于临界频率时，ETE 产生的体积力方向与温度梯度方向一致；当频率大于临界频率时，ETE 产生的体积力方向与温度梯度方向相反。

3 数值模型的建立与网格划分

为进行模拟，将流场、电场和温度场的控制方程与其边界条件编码到 COMSOL Multiphysics

4.3a 中进行计算，建立使用带有拉格朗日二次型函数的三角单元离散 2D 模型，如图 3 所示，并用有限元方法将其耦合并数值求解。为确保模拟结果的准确性，在相对较薄的区域（如电极的角附近）以及受到大扰动的边界（如电极表面附近）加密网格，如图 4 所示。总共在模型上产生了 17 010 个三角形非结构网格。收敛性研究结果表明：此时解不随网格加密变化。研究求解矩阵组集产生的代数方程组，并重复迭代过程直到 2 个连续的迭代步骤之间的绝对差值小于规定偏差（在研究中取 0.001）为止。

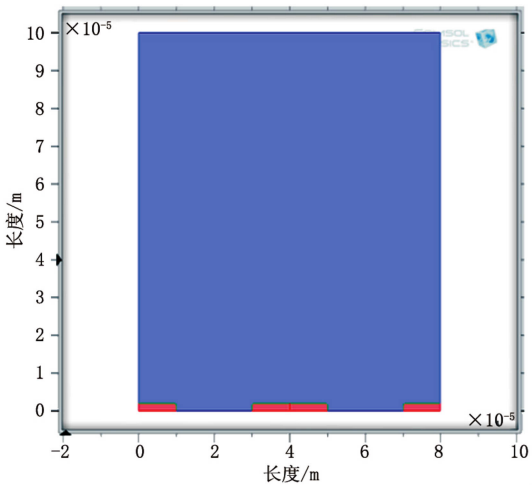


图 3　2D 几何模型
Fig. 3　2D geometric model

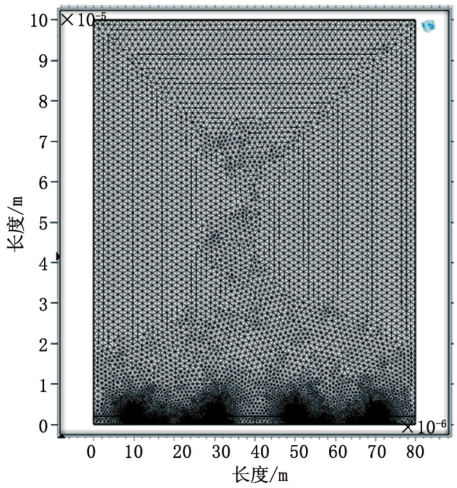


图 4　网格划分
Fig. 4　Mesh generation

4　结果与分析

4.1　电场与温度的结果

在频率为 10^7 Hz、电压为 10 V、电导率为 0.05 S/m 的条件下，数值仿真得到的电压分布如图 5 所示（其中，图 5 的结果为靠近电极部分区域，图 6～图 10 均为模型的局部图），温度分布如图 6 所示。由图 5 和图 6 可以看出：电场的分布与温度的分布情况一致，这是由于电场焦耳热引起的。

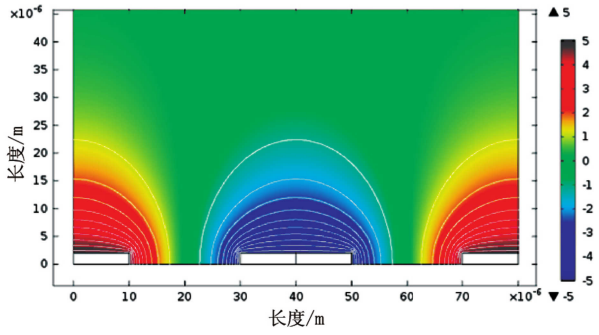


图 5　电压分布（V）
Fig. 5　Distribution of voltage (V)

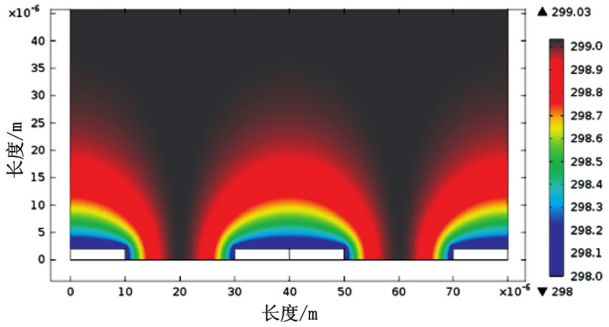


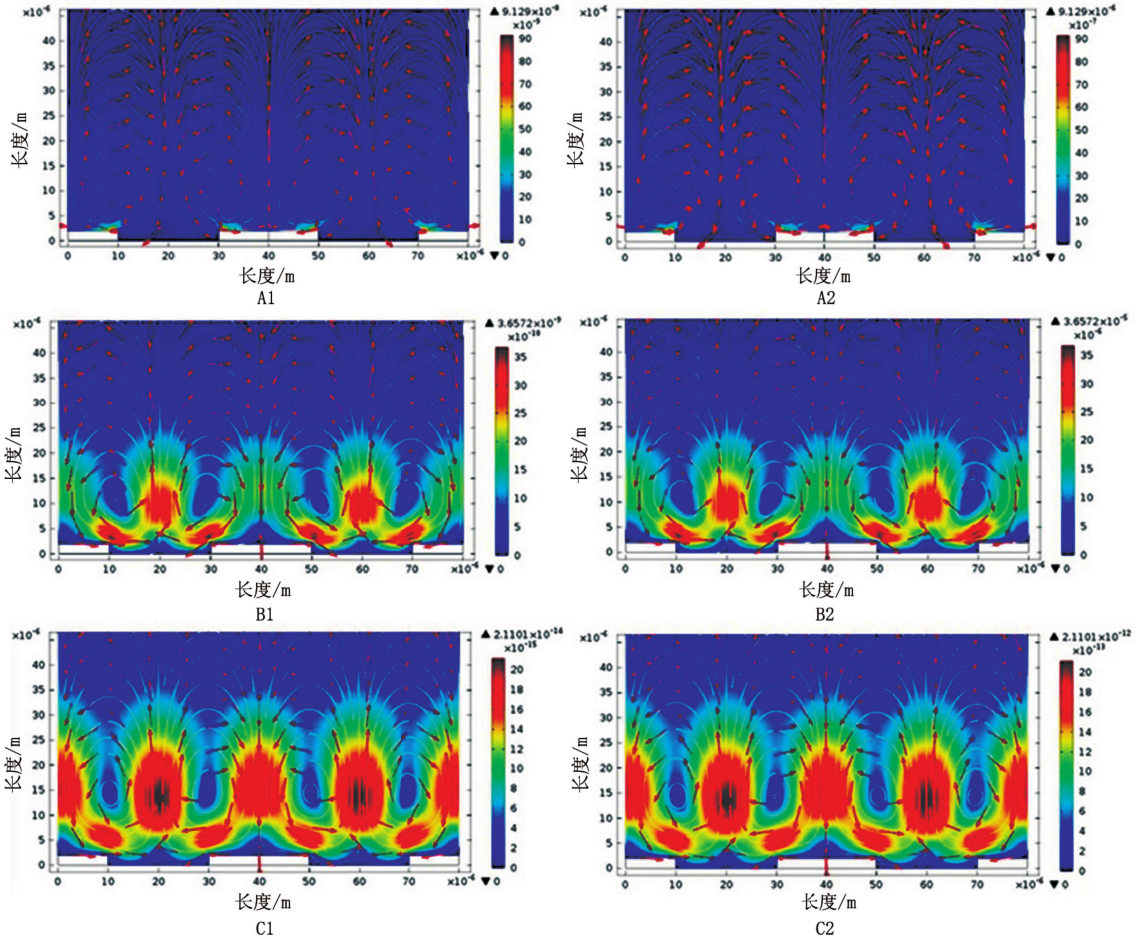
图 6　温度分布（K）
Fig. 6　Distribution of temperature (K)

4.2　不同参数条件下，ACEO，ETE 及自然对流 3 种因素对流场影响的比较分析

4.2.1　不同电压条件下，3 种因素对流场影响的比较

图 7 是在频率为 10^7 Hz、电导率为 0.05 S/m 条件下，分别单独考虑 ACEO（A），ETE（B）和自然对流（C）时下流体的速度大小和方向，比较了外加输入电压为 1 V 和 10 V 的情况。由图 7 中 A1，B1 和 C1 的结果可以看出：在 1 V 输入电压的情况下，ACEO 产生的速度范围高出 ETE 产生的速度范

围 1 个量级，高出自然对流产生的速度范围 6 个量级，ETE 和 ACEO 共同影响流场，自然对流可以忽略。由图 7 中 A2，B2 和 C2 结果可以看出：在 10 V 输入电压的情况下，ETE 产生的速度范围高出 ACEO 产生的速度范围 1 个量级，高出自然对流产生的速度范围 6 个量级，ETE 和 ACEO 共同影响流场，自然对流可以忽略。比较图 7 中 A1 和 A2，电压从 1 V 提高至 10 V，流动速度最大值提高了 2 个量级；比较图 7 中 B1 和 B2，流动速度的最大值提高了 4 个量级；比较图 7 中 C1 和 C2，流动速度的最大值提高了 4 个量级。一般实际常用的均方根电压在 1～10 V 内，在这个电压变化范围内外加输入电压的改变对 ACEO 和 ETE 两者共同影响流场的结果改变不大，自然对流均可以忽略。



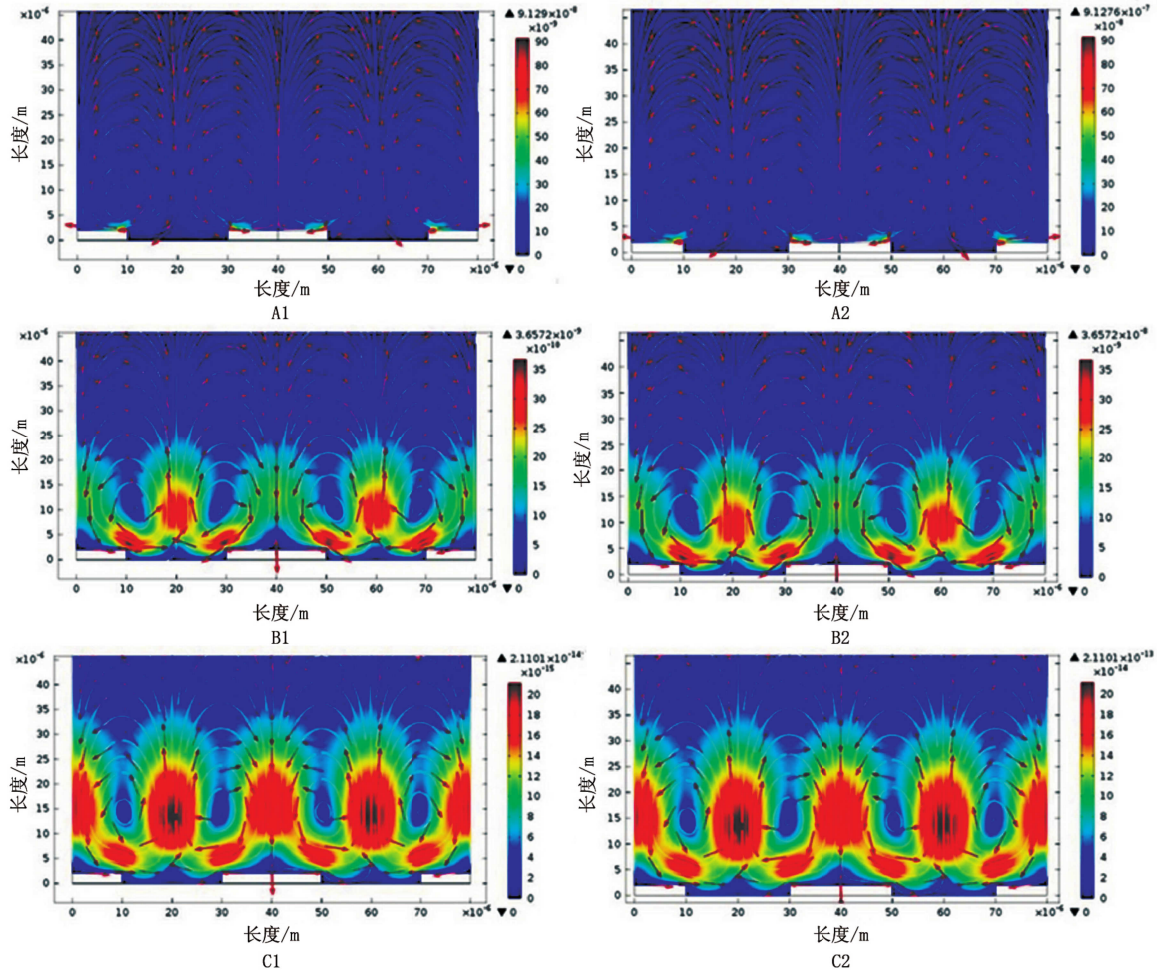
注：A—ACEO，B—ETE，C—自然对流；字母后的数字代表电压，1 表示电压 1 V，2 表示电压 10 V；
图中颜色代表速度大小，箭头代表速度方向

图 7 频率为 10^7 Hz 和电导率为 0.05 S/m 条件下不同电压时流体的速度大小（m/s）和方向

Fig. 7 Magnitude and direction of velocity (m/s) in different voltages when frequency is 10^7 Hz and conductivity is 0.05 S/m

4.2.2 不同电导率条件下，3 种因素对流场影响的比较

图 8 是在频率为 10^7 Hz、电压为 1V 条件下，分别单独考虑 ACEO（A），ETE（B）和自然对流（C）时流体的速度大小和方向，比较了外加电导率为 0.05 S/m 和 0.5 S/m 的情况。由图 8 中 A1，B1 和 C1 结果以及图 8 中 A2，B2 和 C2 的结果可以看出：电导率分别为 0.05 S/m 和 0.5 S/m 的情况下，ACEO 产生的速度范围高出 ETE 产生的速度范围 1 个量级，高出自然对流产生的速度范围 6 个量级，ETE 和 ACEO 共同影响流场，自然对流可以忽略。比较图 8 中 A1 和 A2，可以看出电导率从 0.05 S/m 提高至 0.5 S/m，流动速度的最大值提高了 1 个量级；比较图 8 中 B1 和 B2，流动速度的最大值提高了 1 个量级；比较图 8 中 C1 和 C2，流动速度的最大值提高了 1 个量级。电导率的改变对



注：A—ACEO，B—ETE，C—自然对流；字母后的数字代表电导率，1 表示电导率为 0.05 S/m，2 表示电导率为 0.50 S/m

图 8　频率为 10^7 Hz 和电压为 1 V 条件下不同电导率时流体的速度大小（m/s）和方向

Fig. 8　Magnitude and direction of velocity (m/s) in different electrical conductivities when frequency is 10^7 Hz and voltage is 1 V

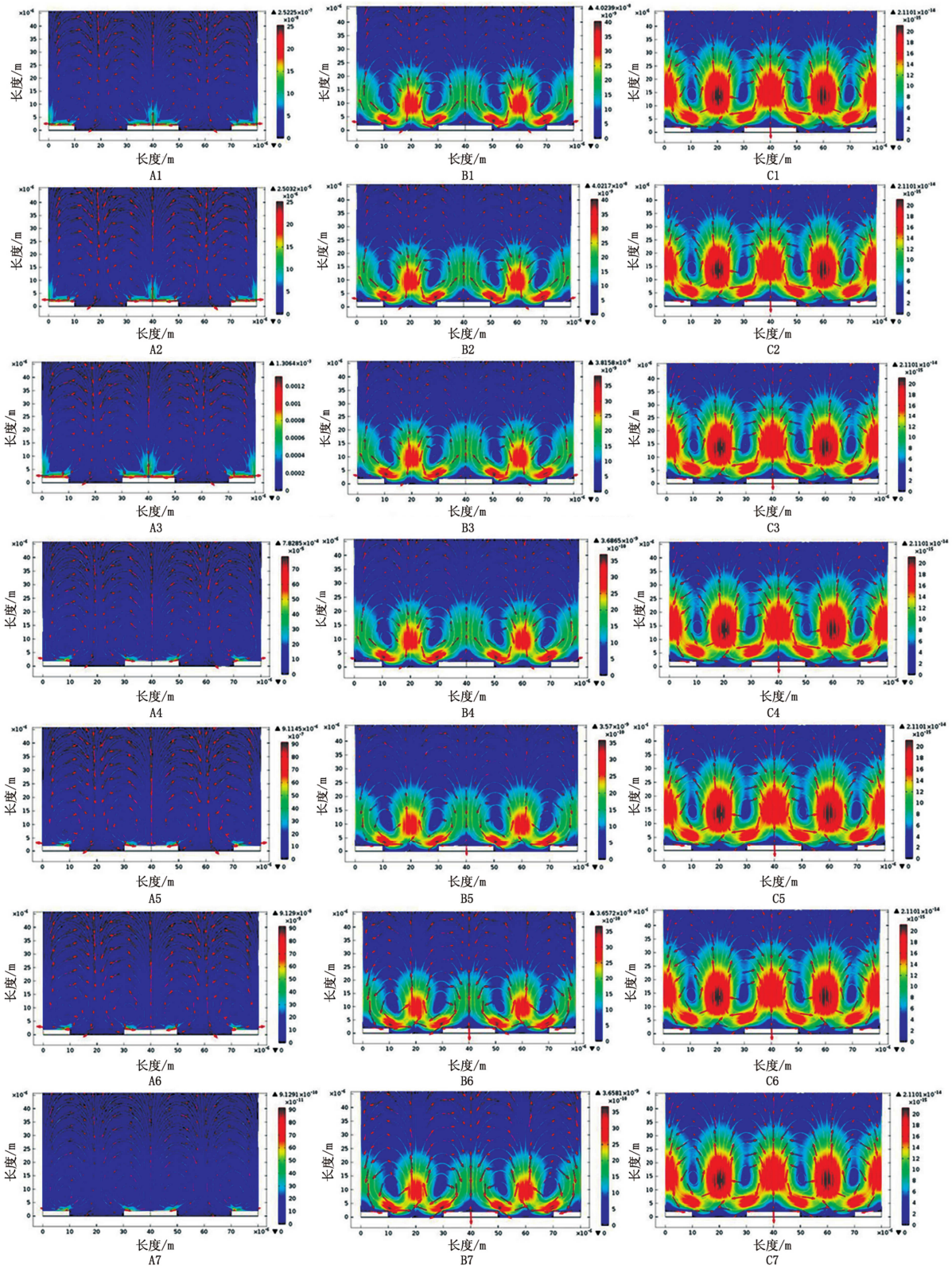
ACEO 和 ETE 两者共同影响流场的结果改变不大，自然对流均可以忽略。

4.2.3　不同频率条件下，3 种因素对流场影响的比较

图 9 是电压为 1 V、电导率为 0.05 S/m 条件下不同频率时，分别单独考虑 ACEO（A），ETE（B）和自然对流（C）流体的速度大小和方向，比较了频率为 10^2，10^3，10^4，10^5，10^6，10^7，10^8 Hz 的情况。由图 9 可以看出：在频率为 10^2～10^7 Hz 之间，ACEO 产生的速度范围高出 ETE 产生的速度范围 2 个以上量级（3～4 个量级），ACEO 对流场的影响占主导作用；在频率 10^7 Hz 和 10^8 Hz 时，ACEO 产生的速度范围和 ETE 产生的速度范围在 1 个量级左右，ETE 和 ACEO 共同影响流场。ETE 造成的流动在频率 10^5 Hz 以下时与 ACEO 导致的流动趋势一致，而频率在 10^6 Hz 以上时与 ACEO 导致的流动趋势相反。

同理在电导率为 0.000 2 S/m 和 0.002 S/m 时，频率为 10^2～10^7 Hz，ACEO 占主导作用；频率为 10^7～10^8 Hz 时，ACEO 和 ETE 共同占主导作用；10^8 Hz 时 ETE 占主导作用。

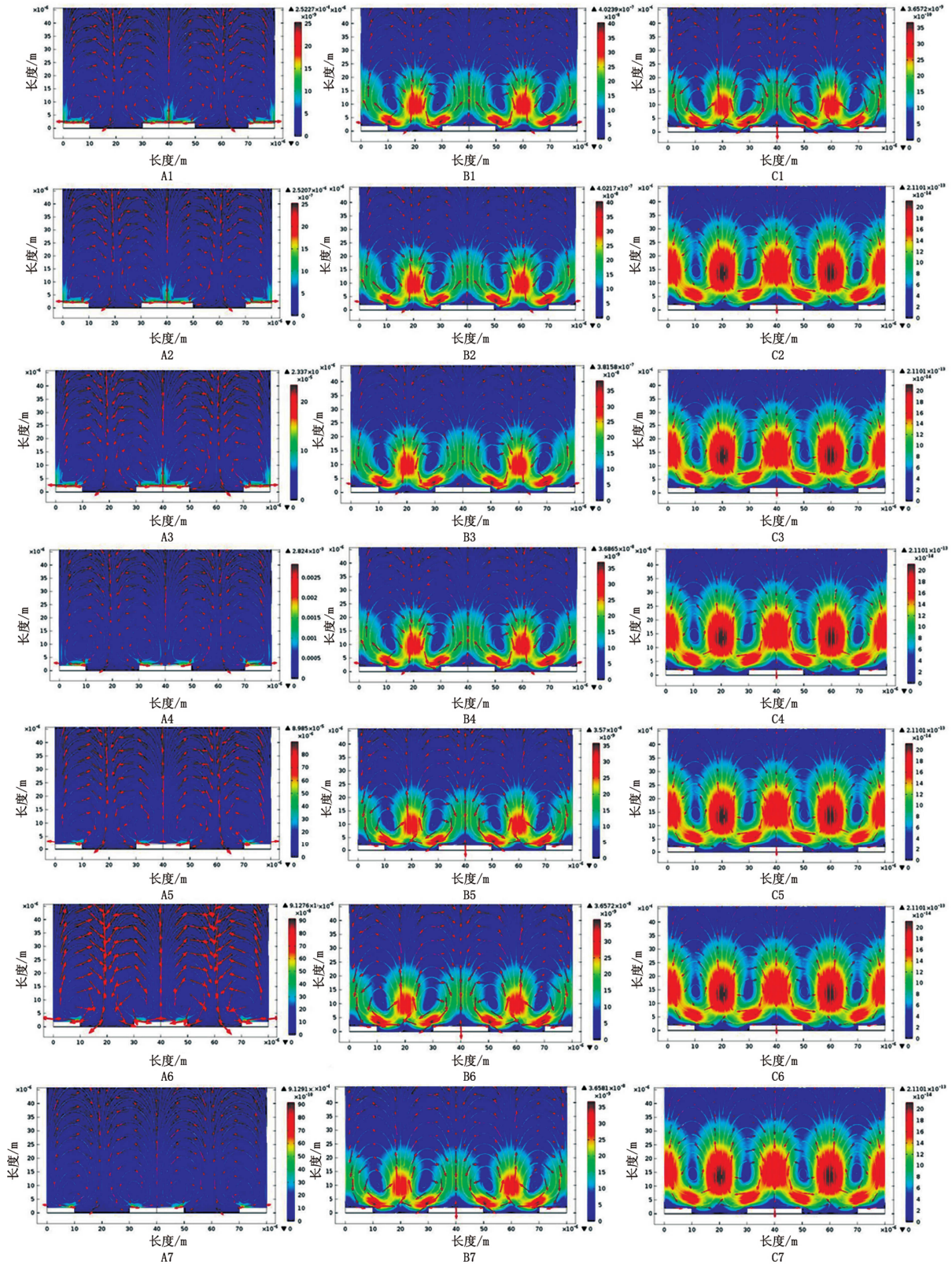
图 10 是电压为 1 V、电导率为 0.5 S/m 条件下不同频率时，分别单独考虑 ACEO（A），ETE（B）和自然对流（C）流体的速度大小和方向，比较了频率为 10^2，10^3，10^4，10^5，10^6，10^7，10^8 Hz 的情况。由图 10 可以看出：在频率为 10^2 Hz 时，ACEO 产生的速度范围低于 ETE 产生的速度范围 1 个量级以上，ETE 对流场的影响占主导作用，ACEO 可以忽略；在频率 10^3 Hz 和 10^4 Hz 时，



注：A—ACEO，B—ETE，C—自然对流；字母后的数字代表频率，数字 1～7 分别表示 10^2，10^3，10^4，10^5，10^6，10^7，10^8 Hz

图 9 电压为 1 V、电导率为 0.05 S/m 条件下不同频率时流体的速度大小（m/s）和方向

Fig. 9 Magnitude and direction of velocity (m/s) in different frequencies when voltage is 1 V and electrical conductivity is 0.05 S/m



注：A—ACEO，B—ETE，C—自然对流；字母后的数字代表频率，数字 1～7 分别表示 10^2，10^3，10^4，10^5，10^6，10^7，10^8 Hz

图 10　电压为 1 V、电导率为 0.50 S/m 条件下不同频率时流体的速度大小（m/s）和方向

Fig. 10　Magnitude and direction of velocity (m/s) in different frequencies when voltage is 1 V and electrical conductivity is 0.50 S/m

ACEO产生的速度范围和ETE产生的速度范围在1个量级内，ETE和ACEO共同影响流场；在频率为10^5 Hz和10^6 Hz时，ACEO产生的速度范围高出ETE产生的速度范围3～5个以上的量级，ACEO对流场的影响占主导作用，ETE可以忽略。10^7 Hz和10^8 Hz时，ACEO产生的速度范围和ETE产生的速度范围在1个量级内，ETE和ACEO共同影响流场。以上情况下，自然对流的影响均可以忽略。ETE造成的流动在频率10^5 Hz以下时与ACEO导致的流动趋势一致，而频率在10^6 Hz以上时与ACEO导致的流动趋势相反。

5 结论

研究通过数值方法分析在不同情况下，动电现象中的ACEO，ETE和自然对流对流场的影响程度，讨论了3种流体驱动机理的主次关系。一般常用的实验参数范围内输入电压和电导率的改变对ACEO和ETE两者对于流场影响大小的主次关系影响不大，自然对流的作用可以忽略。在电场频率为10^2～10^8 Hz，频率较低时ETE占主导，在频率中间时ACEO占主导，频率较高时，ETE对流场的影响占主导作用。ETE存在一个对流场影响最小的临界频率，ETE造成的流动在临界频率以下时与ACEO导致的流动趋势一致，而频率在临界频率以上时与ACEO导致的流动趋势相反。研究结果对提高微流控器件的性能、准确地控制ACEO的流动以及研究影响动电现象性能的因素具有参考价值。

[参考文献] (References)

[1] BAYRAKTAR T, PIDUGU S B. Characterization of liquid flows in microfluidic systems[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(5-6): 815-824.

[2] TANG G Y, YAN D G, YANG C, et al. Joule heating and its effects on electrokinetic transport of solutes in rectangular microchannels[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 139(1-2): 221-232.

[3] MINERICK A R, OSTAFIN A E, CHANG H C. Electrokinetic transport of red blood cells in micocapillaries[J]. Electrophoresis, 2002, 23(14): 2165-2173

[4] POHL H A. Dielectrophoresis: the behavior of neutral matter in nonuniform electric fields dielectrophoresis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1978.

[5] RAMOS A, MORGAN H, GREEN N G, et al. AC electrokinetics: a review of forces in microelectrode structures[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 1998, 31(18): 2338-2353.

[6] GREEN N G, MORGAN H. Separation of submicrometre particles using a combination of dielectrophoretic and electrohydrodynamic forces[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 1998, 31(7): 25-30.

[7] OH J, HART R, CAPURRO J, et al. Comprehensive analysis of particle motion under non-uniform AC electric fields in a microchannel[J]. Lab on a Chip, 2009, 9: 62-78.

[8] MORGAN H, GREEN N G. AC electrokinetics: colloids and nanoparticles[M]. UK: Research Studies Press Limited, 2003.

[9] PETER R C, GASCOYNE X X, VYKOUKAL J. Droplet-based chemistry on a programmable micro-chip electrophoresis[J]. Lap on a Chip, 2002, 23: 1973-1983.

[10] GREEN N G, MORGAN H. Dielectrophoretic investigations of sub-micrometre latex spheres[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 1997, 30(18): 2626.

[11] ROSENTHAL A, VOLDMAN J. Dielectrophoretic traps for single-particle patterning[J]. Biophys. J., 2005, 88(3): 2193-2205.

[12] WANICHAPICHART P, BUNTHAWIN S. Determination of cell dielectric properties using dielectrophoretic technique[J]. Science Asia, 2002, 28: 113-119.

[13] RIEGELMAN M, LIU H, BAU H H. Controlled nanoassembly and construction of nanofluidic devices[J]. Journal of Fluids Engineering, 2006, 128(1): 6-13.

[14] JONES T B. Electromechanics of particles[M]. New York: Cambridge University Press, 1995.

[15] ROSENTHAL A, TAFF B M, VOLDMAN J. Quantitative modeling of dielectrophoretic traps[J]. Lab on a Chip, 2006, 6(4): 508-515.

[16] LIU Y L, CHUNG J H, LIU W K, et al. Dielectrophoretic assembly of nanowires[J]. J. Phys. Chem. B, 2006, 110(29): 14098-14106.

[17] GREEN N G, RAMOS A, GONZALEZ A, et al. Fluid flow induced by nonuniform ac electric fields in electrolytes on microelectrodes I: experimental measurements[J]. Phys. Rev. E, 2000, 61: 4011-4018.

[18] CASTELLANOS A, RAMOS A, GONZALEZ A, et al. Electrohydrodynamics and dielectrophoresis in microsystems: scaling laws[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2003, 36: 2584-2597.

[19] BELISLE A, BROWN M, HUBBARD T, et al. Microelectrode arrays for two-dimensional polar movement of microparticles in water[J]. J. Vac. Sci. Technol. A, 2006, 24: 737-741.

[20] HUANG S H, WANG S K, KHOO H S, et al. AC electroosmotic generated in-plane microvortices for stationary or continuous fluid mixing[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2007, 125(1): 326-336.

[21] JACOBSON S C, MCKNIGHT T E, RAMSEY J M. Microfluidic devices for electrokinetically driven parallel and serial mixing[J]. Anal. Chem., 1999, 71: 4455-4459.

[22] SIGURDSON M, WANG D, MEINHART C D. Electrothermal stirring for heterogeneous immunoassays[J]. Lab on a Chip, 2005, 5(12): 1366-1373.

[23] AJDARI A. Pumping liquids using asymmetric electrode arrays[J]. Phys. Rev. E, 2000, 61: 45-48.

[24] MPHOLO M, SMITH C G, BROWN A B D. Low voltage plug flow pumping using anisotropic electrode arrays[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2003, 92: 262-268.

[25] HARMS T M, KAZMIERCZAK M J, GERNER F M. Developing convective heat transfer in deep rectangular microchannels[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1999, 20(2): 149-157.

[26] WANG B X, PENG X F. Experimental investigation on liquid forced convection heat transfer through microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1994, 37(1): 73-82.