

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.07.005

非对称电极交流电热泵的流体输运及混合

郎琦, 任玉坤, 姜洪源

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 为满足微流控芯片在化学分析、细胞培养、药物测试等领域中流体驱动与混合的需要,对传统经典非对称交流电热泵进行改进,提出多种样式具有混合功能的非对称电极交流电热泵。通过COMSOL三维建模,对不同种类的电热泵在不同电压下的输运效率、温度和混合效率进行定性及定量分析,并对其中混合效率最高的交替倾斜偏向电极的角度偏转参数进行讨论。结果表明:几种改进的非对称电极交流电热泵可实现输运与混合双功能,其中倾斜交替偏向电极的混合效率明显优于其他样式;在有限的区域内以 25° 倾斜度时交替偏向电极的混合效率最高,此时在有效值为 7.070 V 交流电压下,泵送速度可达 $69.53\ \mu\text{m/s}$,比传统无混合功能的非对称交流电热泵速度 $67.16\ \mu\text{m/s}$ 高出 3.5% 。

关键词: 微流控;微型泵;微混合器;交流电热;非对称电极;流体输运;混合效率

中图分类号: O361

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)07-0033-06

Microfluidic transport and mixing by AC electrothermal with asymmetric electrodes

LANG Qi, REN Yukun, JIANG Hongyuan

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To meet the requirements of driving and mixing on the microfluidic devices for chemical analysis, cell culture, and pharmaceutical test, multi types of AC electrothermal pump with mixing function were developed. A three-dimensional model was built for the study on the qualitative analysis for transport and mixing efficiency of the multi types of AC electrothermal pump with different driving voltages. We found that the electrodes with deflection angles have the best mixing efficiency. The results indicate that the new types of the asymmetric electrodes could have both functions of transport and mixing. At the limited size of microchannel, the electrodes with deflection angles of 25° were more outstanding on mixing than any other types, and the type of the electrodes with deflection angles is the best type in mixing efficiency. The velocity of $69.53\ \mu\text{m/s}$ could be driven at the applied voltage of 7.070 V for this type, and it was 3.5% faster than the velocity of the traditional micropump with asymmetric electrodes ($67.16\ \mu\text{m/s}$).

Keywords: microfluidics; micropump; micromixer; AC electrothermal; asymmetric electrodes; fluid transport; mixing efficiency

微流控芯片技术的响应快、耗材少等优点,使其成为满足人类实验需要的一种微尺度平台与重要手段^[1-3]。动态的试验环境在化学分析与细胞及组织培养方面有着巨大的优势^[4-5]。微流体芯片又因其尺寸限定常以低雷诺数的层流为主^[6],所以需要混合器来加速生物化学反应。另一方面,商业化外接泵,如

注射泵、蠕动泵是现阶段微流控芯片的主要动力来源^[7-8]。但其体积偏大,将会被芯片上芯片集成泵取代。Wagner等^[9]通过气压控制PDMS薄膜微型气动阀阵列以实现蠕动效果,并开发了采用该技术的芯片集成微型泵用于输运生物流体,但由于薄膜的使用寿命而无法长期使用。Feng等^[10-11]人通过改变通道的几何条件,可打破层流条件,引入湍流及漩涡以实现混合功能,但此方法加工困难同时难于集成。

利用同一器件实现驱动和混合双功能可有效解决复杂加工以及集成难题。目前,交流电动技术在操控流体方面受到了越来越多的关注^[12]。交流电渗,

收稿日期: 2015-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(51305106; 11372093)

作者简介: 郎琦(1985—),男,博士研究生;

姜洪源(1960—),男,教授,博士生导师

通信作者: 姜洪源, jhy_hit@sina.com

是交流电动的一种形式,可对低电导率的流体操控^[13-15];交流电热作为交流电动的另一种形式,可实现对高电导率流体的操控,适合于生物流体及化学反应相关溶液^[16-17].

本文以传统的经典非均匀电热泵为基础,提出并研究了 5 种具有驱动及混合功能的交流电热泵.通过三维(3D)仿真建模,对不同种类电极样式的驱动效率、温升及混合效率及电极相关参数进行分析与讨论.给出了最优泵送条件与混合样式.并对该样式的相关参数进行具体分析,得出了最优泵送与混合方案,提高了泵送与混合效率.为微流控芯片上的生物与化学实验,提供了一种简便高效的驱动及混合方式.

1 交流电热理论与电热泵原理

1.1 交流电热理论

交流电热是多物理场耦合的现象,主要包括交流电场、温度场及流体流场.施加在微电极上的交流电信号在溶液中产生焦耳热,焦耳热使溶液中产生温度梯度,改变溶液的电导率形成电导率梯度并诱导自由电荷.在非均匀交流电场的作用下,自由电荷移动产生了电热流.首先,对于同种介质,流体中的各点电位可用 Laplace 方程表示为

$$\nabla^2 V = 0, \quad (1)$$

电场强度可以表示为

$$\mathbf{E} = -\nabla V. \quad (2)$$

式中: V 为流体中的各点电位, \mathbf{E} 为流体中的电场强度.

由电极产生的焦耳热作为溶液中的热源引入温度场,温度场 T 由热平衡方程给出:

$$k \nabla^2 T + \langle \sigma \mathbf{E}^2 \rangle = 0. \quad (3)$$

式中: k 为热传导系数, T 为流体温度, σ 为溶液电导率, $\langle \rangle$ 表示为时均值.

温度梯度引起的电导率梯度,在交流电场的作用下产生电热体积力:

$$\langle \mathbf{F}_{et} \rangle = \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon(\alpha - \beta)}{1 + (2\pi f \varepsilon / \sigma)^2} (\nabla T \cdot \mathbf{E}) \mathbf{E} - 0.25 \varepsilon \alpha |\mathbf{E}|^2 \nabla T. \quad (4)$$

式中: $\langle \mathbf{F}_{et} \rangle$ 为时均流体体积力, ε 为溶液介电常数, f 为正弦电压频率;并有

$$\alpha = (\partial \varepsilon / \partial T) / \varepsilon = -0.004 (K^{-1}),$$

$$\beta = (\partial \sigma / \partial T) / \sigma = 0.02 (K^{-1}).$$

电热体积力作为流体驱动力,对于低雷诺数的不可压缩流体 Navier-Stokes 公式,由电热力充当的流体体积力可表示为

$$-\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{u} + \langle \mathbf{F}_{et} \rangle = 0. \quad (5)$$

式中: p 为压强, η 为液体黏度, \mathbf{u} 为流体速度矢量,且 $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$.

1.2 非均匀交流电热泵工作原理

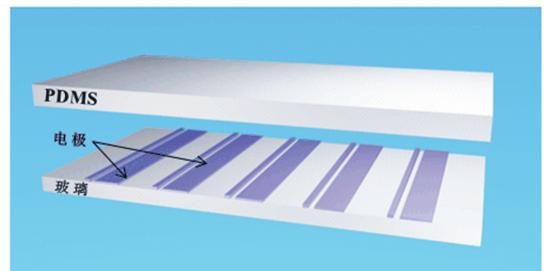
经典非对称电极交流电热泵是一种加工简单、泵送效率高的交流电热泵送形式.当对非对称电极施加交流电压,在流体中产生的非均匀焦耳热,使流体中产生相应的温度梯度并改变溶液中的电导率.电导率的非均匀变化相应产生了电导率梯度,诱导的自由电荷在非均匀交流电场的作用下移动形成电热流^[18].从宏观角度,流体流动的主要方向是由窄电极流向宽电极.因此,可以通过改变电极的样式,打破沿通道方向单一的流体驱动方式,以实现边泵送边混合的效果.

2 仿真模型的建立

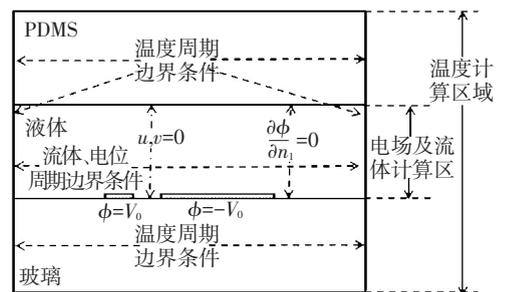
2.1 泵送仿真建模与边界条件

通过 COMSOL Multiphysics V4.4 建立 3D 数值仿真模型.仿真步骤:方程(1)与方程(2)通过静电学模块(Electrostatics module)建模计算;方程(3)通过热传导模块(Heat transfer module)计算温度场;电热流体积力方程(4)与 Navier-Stokes 方程(5)通过层流模块(laminar flow module)计算.

图 1(a) 为非对称电极交流电热泵的 3D 示意图.系统由 PDMS 通道、流体、玻璃组成,为简化计算,将 200 nm 厚的电极简化为平面,根据前文论述,流体的流动方向为由左至右.图 1(b) 为数值仿真沿通道方向切面图的边界条件切面示意图.



(a) 非对称电极交流电热泵 3D 图



(b) 仿真边界条件

图 1 非对称电极交流电热泵示意图与仿真边界条件

图中 u, v 分别表示沿通道与垂直通道方向的速度, ϕ 表示电势, V_0 表示瞬时电位.通道左右设置为温度、流场、电位的周期边界条件.对于通道上下两

侧,分别为较薄的 PDMS 与玻璃基底,两者与流体共同引入热传导的计算,PDMS 上端与玻璃底部简化为恒温 293.15 K.而通道两侧的 PDMS 外壁较厚,为

简化模型,提高运算效率,可设定通道两侧为热绝缘、电绝缘且流速为 0.为更清晰地展示仿真模型,相关参数如表 1 所示.

表 1 数值仿真分析中的参数设定

流体通道高度/ μm	流体通道宽度/ μm	通道周期长度/ mm	PDMS 厚度/ μm	玻璃厚度/ μm	窄电极间隙/ μm	
200	500	2	2	1	2	
窄电极宽度/ μm	宽电极宽度/ μm	1 周期内电极对数量	溶液电导率/ $(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	正弦电信号振幅/V	两电极相位差/ $(^\circ)$	
20	120	4	0.2	1~5	180	
频率/ kHz	导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$			室温(基准温度)/K	溶液密度/ $(\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	溶液黏度/ $(\text{mPa} \cdot \text{s})$
	溶液	PDMS	玻璃			
200	0.6	0.2	1.1	293.15	1	1

2.2 多样式非对称电极泵送的混合方法

利用非对称电极电热泵的原理及泵送方式,对非对称电极的几何形状进行改变,可实现混合效果,图 2 所示为非对称电极的 6 种样式.

进,为鱼鳞状混合电极结构,上下部分通道均可实现流体波动,达到混合效果.样式 D 将样式 C 的棱角磨去,变成圆弧形状.样式 E 与 F 为两对泵送电极附加两对旋转电极,其中,泵送电极为传统非对称电极,旋转电极采用上下反向泵送的方式在此电极上形成流体漩涡,达到混合的效果,样式 E 与样式 F 的区别为电极的排列方式;样式 E 的排列方式为泵-转-转-泵(PFFP),由于是周期边界条件也可写为泵-泵-转-转(PFPF),样式 F 为泵-转-泵-转(PFPF).

2.3 混合仿真研究方法

针对不同的混合方式,在 COMSOL 中附加物质混合模块(Transport of Diluted Species module),将周期模型的流体入口以中点为界,两侧设定为不同浓度($0, 1 \text{ mol/m}^3$)流体流入,周期出口为混合模块出口,流速设定为电热流流速,溶质分子扩散系数为 $2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$.

为了对比各种样式电极的输运效率(即流体沿通道方向流速)及混合效率,对 6 种电极的仿真模型电极上分别施加振幅为 1、2、3、4 及 5 V(即两电极电压有效值分别为 1.414、2.828、4.242、5.656 及 7.070 V)的正弦交流电信号.通过仿真计算出单位周期体积内沿通道反向的平均流速,及最高温度,并讨论驱动规律.对临近单周期通道出口平行于电极阵列距电极高度 $100 \mu\text{m}$ 的截面进行混合浓度计算,生成图像用 Image J 进行灰度分析,得出混合结果.

2.4 样式 B 电极倾斜角度对泵送及混合效率影响的研究方法

样式 B 电极的倾斜角度会影响电热泵的泵送速度及混合效率,对与竖直方向偏转 10° 、 15° 、 20° 及 25° 等 4 种偏转角度的电极上同样施加振幅为 1、2、3、4 及 5 V 的正弦交流电信号,并计算出单位周期体积内沿通道反向的平均流速及最高温度.对平行于电极阵列距电极高度 $100 \mu\text{m}$ 的截面进行混合浓度计算,利用 Image J 的灰度分析,评价混合效果.

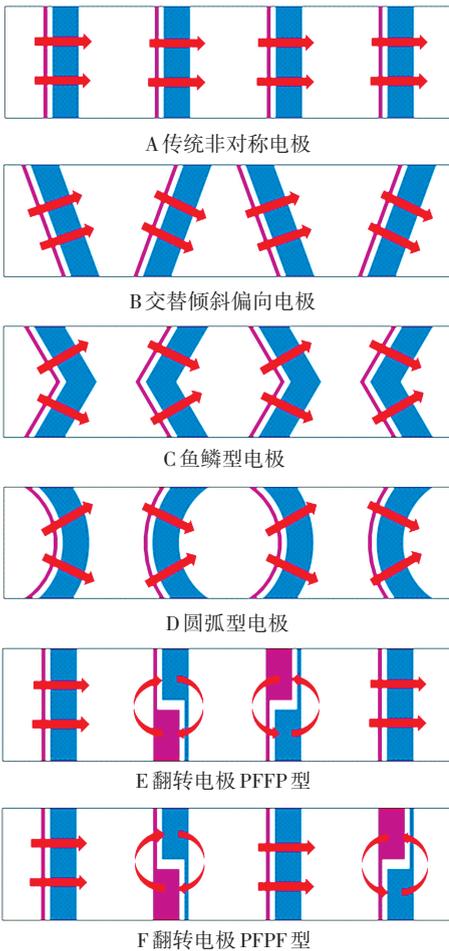


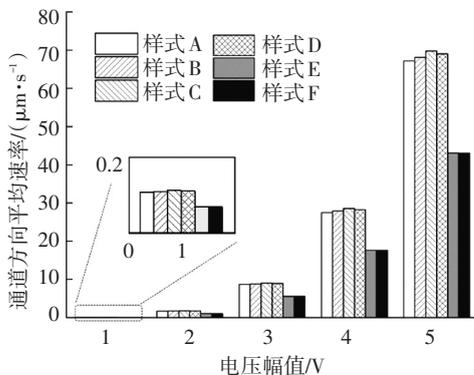
图 2 不同种类电极的混合方法

其中样式 A 为传统非对称电极,无混合功能.样式 B 为交替倾斜偏向电极,上下倾斜泵送可实现混合功能,如图中箭头所示,图示电极倾斜角度与竖直方向夹角为 20° .样式 C 在样式 B 的基础上进行改

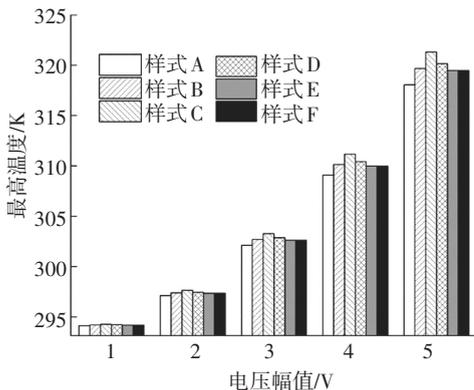
3 结果与讨论

3.1 不同电极形式的泵送效率

在 6 种电极样式中,样式 A 所有电极完全作用于泵送;而样式 B、样式 C 与样式 D 的驱动力与泵送方向成一定角度;样式 E 与样式 F 各只有两对电极参与泵送,其余两对电极参与流体的偏转.从表面上看,样式 A 的泵送速率应为最高,即样式 A > 样式 B > 样式 C > 样式 D > 样式 E > 样式 F. 如图 3(a) 所示为不同电极样式不同电压下的仿真结果,此结果否认了上述观点,对于相同电极对数同一电压下不同电极样式的速率,结果显示有:样式 C > 样式 D > 样式 B > 样式 A > 样式 E = 样式 F.



(a) 输运速率仿真结果



(b) 最高温度仿真结果

图 3 不同电极样式不同电压下的仿真结果

明显,样式 A 的速率要低于样式 C、样式 D 及样式 B,为探究其原因,求解各样式不同电压下在流体中产生的最高温升,结果如图 3(b) 所示.温度排序与速度排序稍有不同:样式 C > 样式 D > 样式 B > 样式 E = 样式 F > 样式 A.

根据电热流理论,在电位相同的条件下,温度梯度直接影响电热流的速度.虽然最大温度与电热流速度无直接关系,但最大温度高则侧面反映出相应样式电极的温度梯度高,相应的泵送速率也高.对于样式 B、样式 C 与样式 D,虽然每对电极泵送方向不平行于通道,但每对电极在通道内的有效长度大,造

成的焦耳热多,形成了相对大的温度梯度,从而提高了电热流的速度.即使样式 A 的全部泵送速率都贡献于通道方向的流动速率,由于其形成的焦耳热低,所以输运速率偏低.对于样式 E 与样式 F,分别有 2 对电极参与泵送,对于相同的流体而言,输运速率应不大于样式 A 输运速率的 1/2. 然而,其两对旋转电极只参与偏转而不参与泵送,但其产生的焦耳热也会对泵送电极附近的流体温度梯度产生作用,同时旋转电极的电极间隙会增加焦耳热,增大温度梯度,从而增大了输运速率.故样式 E 与样式 F 的速率大于样式 A 速率的 1/2.

综上,通过改良非对称电极电热泵电极的样式设计,除了样式 E、F 的速度有较大衰减外,其余样式均一定程度地提高了流速,但流速成体差别不大.

3.2 不同电极形式的混合效率

在微通道内施加了具有旋转功能的交流电热泵,可实现一定的混合作用,对于周期流体,在单周期入口处通入以中心为分界线浓度为 0 与浓度为 1 mol/m^3 的流体,流速设定为交流电热流的流速.图 4(a) 所示为有效值 7.070 V (电压幅值 5 V) 电压下不同电极样式的混合通道中的浓度分布,其中上部表示浓度为 1 mol/m^3 ,下部表示为浓度为 0.从图中可以看出,流体经过电极时均产生了一定的混合作用,流体由于扩散作用在中间会一定程度地自动进行混合.流速越低自动混合时间越长,自动混合效果越明显;反之,流速越高,自动混合时间短,自动混合效果越差.从颜色定性来看,样式 E 与样式 F 的混合效果最强,但由于其流体流速低(低于其他流速的 $2/3$),不能说明其混合效率高于其他样式,但其混合的灵活性较强,可根据需要调整泵送电极与混合电极的对数比例,以达到最优的泵送与混合效果.对样式 E 与样式 F 而言,样式 E 的混合效果要稍好于样式 F,即 PPTT 型要稍优于 PTPT.

如图 4(b) 所示为不同样式电极混合效率临近通道出口处垂直于通道方向的彩色灰度定量表达.数据显示,样式 E 与样式 F 的混合效果好.但由于流速差距大无法与其余四种样式直接比较混合效率.就近似流速的样式 A、样式 B、样式 C 及样式 D 的两相流混合效率而言,有:样式 B > 样式 C > 样式 D > 样式 A.

数据显示,具有 20° 偏角的样式 B 的混合效率,明显高于具有 30° 偏角的样式 C.虽然样式 C 的泵送速率略高于样式 B,但差别不大.故综合泵送与混合效果而言,样式 B 效果最好,样式 A 效果最差.

3.3 样式 B 电极倾斜角度对相关参数的影响

样式 B 的综合泵送与混合效果要好于其他形式的电极,其于通道垂直方向夹角 (θ) 也影响泵送

速率与混合效率. 通道宽度不变时, θ 增加, 接入流体中的电极有效长度增加, 泵送速率越快. θ 增加, 垂直于通道方向流速越大, 混合效率也增加. 为了证实这一假设, 对样式 B, θ 为 10° 、 15° 、 20° 及 25° 在不同电压下进行仿真. 其中, 25° 为样式 B 在 2 mm 周期通道条件下的最大偏角, 如果继续增大偏角, 相邻两对电极将发生巨大干涉甚至重合现象.

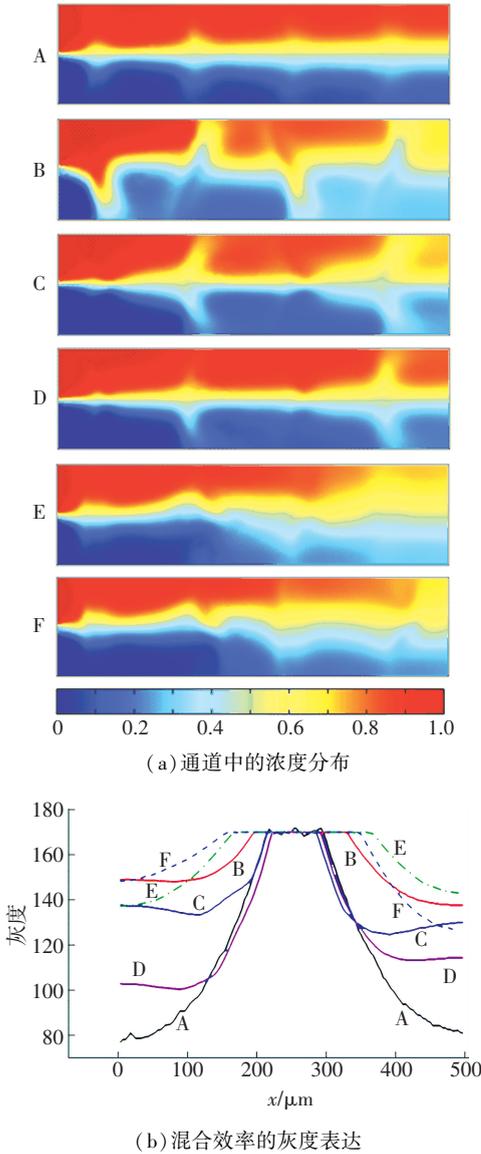


图 4 有效值 7.070 V 电压下不同电极样式的混合效果

图 5 为样式 B 在不同 θ 不同电压下的仿真结果, 证实了前面对速度的假设.

结合图 4(a), 输运速率排序为: 样式 C > 样式 B (25°) > 样式 D > 样式 B (15°) > 样式 B (10°) > 样式 A.

图 6 为有效值 7.070 V 电压下样式 B 不同倾斜角度的混合效率. 从图 6(a) 中通道内的浓度分布可以定性看出, 随着 θ 增大, 混合效率增高. 图 6(b) 为不同 θ 条件下混合效率在临近通道出口处垂直于通道方向的灰度定量表达. 数据显示, 不是所有 θ 的样式 B 的混合效率都要好于样式 C 及样式 D, 结合

图 5(b), 有: 样式 B (25°) > 样式 B (20°) > 样式 B (15°) > 样式 C > 样式 D > 样式 B (10°) > 样式 A.

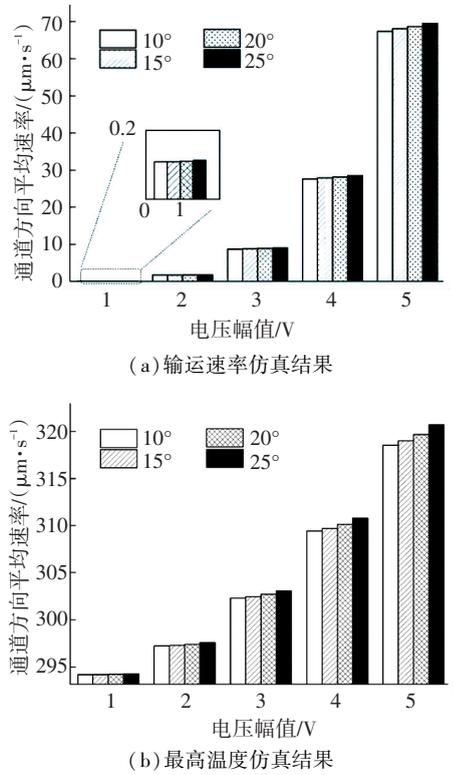


图 5 样式 B 不同倾斜角度不同电压下的仿真结果

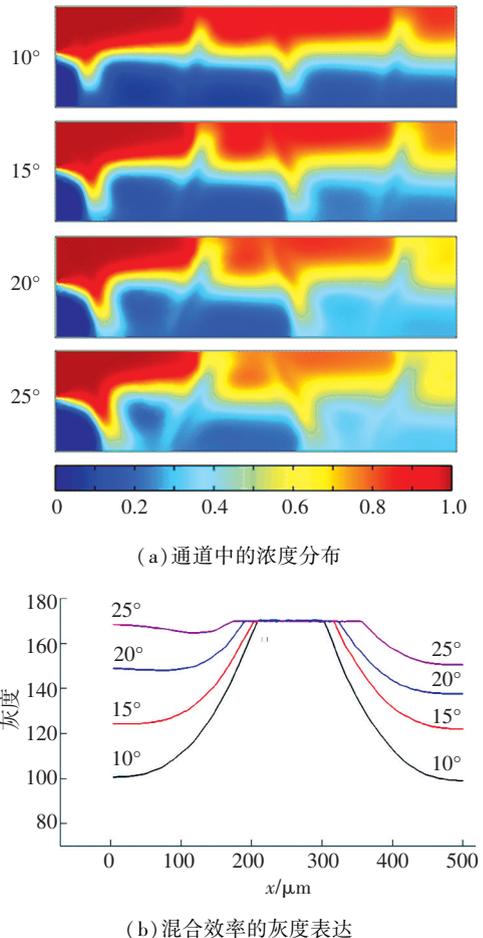


图 6 有效值 7.070 V 电压下样式 B 不同倾斜角度的混合效率

4 结 论

1) 电极倾斜一定角度增大了电极接入通道的电极长度,使焦耳热增加,温度梯度与电导率梯度也随之的增加,反而提高了沿通道方向的驱动速度,完全纠正了前期假设具有混合功能的驱动电极电热泵驱动速率将降低的错误。

2) 具有一定倾斜角度($20^{\circ} \sim 25^{\circ}$)的交替偏向电极样式的非对称电极电热泵在输运速率上要优于传统非均匀电极、圆弧电极、PPTT 型及 PTPT 型电极样式,略低于鱼鳞状电极样式。

3) 在两相流的混合方面,具有倾斜角度的交替偏向电极样式交流电热泵的混合效率明显高于其他样式。

4) 对于具有倾斜角度的交替偏向电极交流电热泵,流体输运速度与混合效率随倾斜角度的增加而增加。但在几何尺寸与电极对之间不过多干涉的要求下, 25° 倾斜角度的交替偏向电极样式的交流电热泵在驱动及混合效率达到最高。且在有效值为 7.070 V 交流电压下泵送速度可达 $69.53 \mu\text{m/s}$,比传统无混合功能的非对称交流电热泵速度 $67.16 \mu\text{m/s}$ 高出 3.5%。

参 考 文 献

- [1] 李战华,吴健康,胡国庆,等.微流控芯片中的流体流动[M].北京:科学出版社,2012:2-4.
- [2] TIAN Hongmiao, SHAO Jinyou, Ding Yucheng, et al. Electrohydrodynamic micro-/nanostructuring processes based on prepatterned polymer and prepatterned template [J]. *Macromolecules*, 2014, 47(4): 1433-1438.
- [3] DING Haitao, LIU Weiyu, SHAO Jinyou, et al. Influence of induced-charge electrokinetic phenomena on the dielectrophoretic assembly of gold nanoparticles in a conductive-island-based microelectrode system [J]. *Langmuir*, 2013, 29(39): 12093-12103.
- [4] 杨敬松,左春桢,连静,等.基于数字微流控生物芯片的液滴调度算法[J].吉林大学学报(工学版),2007,37(6):1380-1385.
- [5] LI Xiaokang, ZHANG Xinyong, DU Yanan, et al. Microscaffold array chip for upgrading cell-based high-throughput drug testing to 3D using benchtop equipment [J]. *Lab on a chip*, 2014, 14(3): 471-481.
- [6] GREEN N J, RAMOS A, GONZALEZ A, et al. Electrothermally induced fluid flow on microelectrodes[J]. *Lab on a chip*, 2015, 15(4): 1110-1115.

- [7] AU A, BHATTACHARJEE N, HOROWITZ L F, et al. 3D-printed microfluidic automation [J]. *Lab on a chip*, 2015, 15(8): 1934-1941.
- [8] CAO Jun, CHENG Ping, HONG Fangjun. A numerical study of an electrothermal vortex enhanced micromixer[J]. *Microfluid Nanofluid*, 2008, 5(1): 13-21.
- [9] WAGNER I, MATERNE E M, BRINCKER S, et al. A dynamic multi-organ-chip for long-term cultivation and substance testing proven by 3D human liver and skin tissue co-culture [J]. *Lab on a chip*, 2013, 13(18): 3538-3547.
- [10] FENG Xiangsong, REN Yukun, JIANG Hongyuan. Effect of the crossing-structure sequence on mixing performance within three-dimensional micromixers[J]. *Biomicrofluidics*, 2014(8): 034106.
- [11] FENG Xiangsong, REN Yukun, JIANG Hongyuan. An effective splitting-and-recombination micromixer with self-rotated contact surface for wide Reynolds number range applications [J]. *Biomicrofluidics*, 2013(7): 054121.
- [12] WU Jie, LIAN Meng, YANG Kai. Micropumping of biofluids by alternating current electrothermal effects [J]. *Applied physics letters*, 2007, 90: 234103.
- [13] 姜洪源,杨胡坤, RAMOS A 等.行波电渗微流体驱动理论模型与实验[J].光学精密工程,2009,17(5): 1093-1098.
- [14] CAO Qianqian, ZUO Chuncheng, LI Nan, et al. Electroosmotic flow in a nanofluidic channel coated with neutral polymers[J]. *Microfluid Nanofluid*, 2010, 9(6): 1051-1062.
- [15] CAO Qianqian, ZUO Chuncheng, LI Nan, et al. Controlling electroosmotic flow by polymer coating: a dissipative particle dynamics study [J]. *Microfluid Nanofluid*, 2011, 10(5): 977-990.
- [16] WU Jie, YUAN Quan. Thermally biased AC electrokinetic pumping effect for Lab-on-a-chip based delivery of biofluids [J]. *Biomed Microdevices*, 2013, 15(1): 125-133.
- [17] HONG Fangjun, CAO Jun, CHENG Ping. A parametric study of AC electrothermal flow in microchannels with asymmetrical interdigitated electrodes [J]. *International Communications in heat and mass transfer*, 2011, 38(3): 275-279.
- [18] LIU Weiyu, REN Yukun, SHAO Jinyou, et al. A theoretical and numerical investigation of travelling wave induction microfluidic pumping in a temperature gradient [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47(7): 075501.

(编辑 杨波)