

文章编号 1004-924X(2012)10-2251-09

驱动电压波形修圆对微流体脉冲 惯性力和驱动效果的影响

王洪成*, 侯丽雅, 章维一

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要:介绍了微流体脉冲驱动-控制技术,分析了微流体脉冲驱动-控制过程,指出在这一过程中影响微流体流动的主要因素是微流道固壁加速度和流体内部的黏性力。采用“椭圆修圆法”对方波驱动电压进行修圆,针对修圆点的位置决定微流体的驱动方向,获得了不同修圆位置和修圆系数的驱动电压修圆波形。通过实验探索了波形修圆对微流道固壁运动加速度、微流体脉冲惯性力和流体驱动效果的影响规律并进行了机理分析。所得流体体积流量可在 0~15.4 pl/min 连续变化,远小于现有的微流体驱动技术。本文的研究成果可为微流体脉冲驱动-控制在微流体系统中的进一步应用提供参考。

关键词:微流体系统;微流体驱动与控制;压电驱动器;椭圆修圆法

中图分类号:O35;TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122010.2251

Influence of rounded driving voltage waves on micro-fluidic pulse inertial force and driving effects

WANG Hong-cheng*, HOU Li-ya, ZHANG Wei-yi

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of
Science and Technology, Nanjing 210094, China)

* Corresponding author, E-mail: whch31@163.com

Abstract: Pulse driving and controlling technology of micro-fluids was introduced. The pulse driving and controlling process of micro-fluids was analyzed in detail and it points out that the acceleration of micro channel solid wall and the viscosity force of micro-fluidic are the main factors that influence on the flow of the micro-fluids. A method of "elliptic rounding" was adopted to round driving voltage waves. As the driving directions of the micro-fluids were determined by the locations of rounding points, a series of waves with different rounding locations and rounding coefficients were obtained. The influence rules of rounded waves on the acceleration of micro channel solid wall, micro-fluidic pulse inertial force and driving effects were researched by experiments. The experimental result indicates that the flow rate of micro fluidic volume can be in the range of 0~15.4 pl/min, which is more better than that of the current micro driving technology. The research results can provide a reference

收稿日期:2012-06-26;修订日期:2012-08-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51175268, No. 11102090);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20113219110004)

for the research on the further application of pulse driving and controlling technology of micro-fluids in micro-fluidic systems.

Key words: micro-fluidic system; micro-fluidic drive and control; piezoelectric actuator; elliptic rounding method

1 引言

微流体的驱动与控制是微系统,尤其是微流体系统发展需要解决的关键技术之一,它在集成电路的冷却、流体的微量配给、细胞工程^[1-3]、微型传感器、微反应器^[4]、微混合器^[5-6]、微推进器的燃料输送等涉及微流体运输的各种场合中具有广泛的应用前景^[7]。

在微尺度下,宏观经典理论并不完全适用,所以微流体的驱动技术也随着研究的不断深入而逐步变化。目前,微流体驱动大致可分为两类,一类是从宏观流体驱动移植过来的驱动方式,另一类是根据微尺度下流体特性(尺度效应和表面效应)设计的驱动方式。前者主要包括机械压差驱动、外部压力驱动^[8]、气动驱动^[4,9]、离心力驱动和电水力(EHD)驱动等;后者主要包括表面张力驱动^[1,10]、电渗式驱动^[11]、热气泡驱动^[12]、磁流体驱动和超声行波驱动等。但当前这些驱动技术均存在各自的缺点,很难满足对微流体驱动的工程需求。例如,表面张力驱动的宏观表现为固-液之间的界面润湿性梯度,一般说来,影响固体表面润湿性的因素主要有两个:一是表面的化学组成,二是表面粗糙度。然而,具有润湿性梯度的表面,在使用过程中易改性,因此对微流体的驱动效果在长时间工作的情况下稳定较差且不能实现双向驱动^[13];电渗驱动被广泛应用于生物芯片等微型化学分析系统中样品的传输控制和分离,是目前较成熟的微流体驱动技术。但由于这种方法对管壁材料和被驱动流体的物理化学性质的敏感、产生电渗流所需的高压电源带来的不安全以及功耗及所占空间大等问题限制了它的使用场合^[11]。

在微流体驱动技术中,流体在单位时间内的体积流量是衡量驱动效果的主要参数。一般地,微流体的流量趋向于更低流量水平(pl/min)上的驱动,例如:流动注射、毛细管电动色谱等分析系统要求微流体的流量为 50 pl/min ~ 200 μ l/min^[14]。然而,现有的微流体驱动技术中微流体

的流量以 100 pl/min ~ 100 μ l/min 范围为主^[2,15-16],要实现更低流量的微流体驱动仍存在一定的困难。

微流体脉冲驱动-控制技术(也称流体数字化技术)作为一种无内嵌微可动件、控制方法简单、对流体物理性质无影响的一种微流体驱动方法,以脉冲流动为微流动基本形态、以脉冲惯性力为主动力、适用于各种液体和粉体,液体喷射量分辨率可达飞升级^[17]。近年来,南京理工大学微系统研究室对微流体数字化技术在细胞-基因工程的应用及相应微流体器件制备上展开了研究^[18-20]。

微流体脉冲驱动-控制技术中,作为主动力的脉冲惯性力产生方式有多种,其中,使用压电器件产生脉冲惯性力的方式具有电压-位移动态响应好、响应频率高等特点,且压电器件驱动电压的波形、幅值、频率等可作为微流体脉冲(数字化)流动的驱动-控制参量。文献[21]提出了通过修正驱动电压波形获得不同微流体脉冲惯性力和驱动效果的思想,其中,以方波为基本形的驱动电压波形修正方法包括 2 种:(1) 改变方波占空比;(2) 修圆方波突变点。本文根据驱动电压波形修正方法(2)提出了驱动电压波形的“椭圆修圆法”,通过实验探索了驱动电压波形修圆对微流道固壁运动加速度和微流体脉冲驱动-控制效果的影响规律,并根据实验结果对上述影响规律的机理进行了理论分析。

2 实验

2.1 微流体脉冲驱动-控制过程

以压电驱动器作为微流体脉冲惯性力产生方式的微流体脉冲驱动-控制装置如图 1 所示,其核心组成部分包括机架、微流道、微流道基底和压电驱动器(型号:德国 PI 公司生产的 P-844.10 型压电陶瓷)及其控制系统(包括工控机、波形发生器和功率放大器)。

其中,压电驱动器左侧(固定端)固定在机架

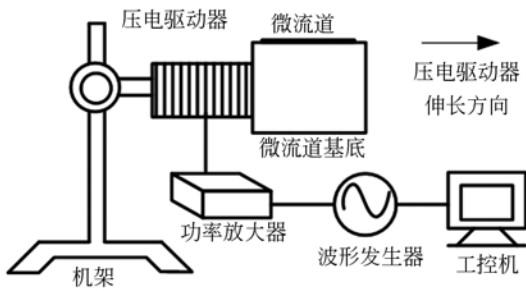


图 1 微流体脉冲驱动-控制装置示意图

Fig. 1 Schematic drawing of micro-fluidic pulse driving and controlling apparatus

上,右侧(可动端)通过微流道基底与微流道固壁刚性连接。驱动器可在驱动电压信号作用下沿极化轴方向在原长 L 的基础上瞬间产生伸长量 ΔL 。驱动电压信号由信号发生器经功率放大器产生,其波形、幅值、频率可调。本文所使用的流体为不具有任何特殊物理或化学性质的去离子水。

微流道由普通硼硅酸盐玻璃毛细管(外径 $1.5 \mu\text{m}$,内径 $0.9 \mu\text{m}$)经拉制器^[22]拉制而成,其截面为圆形,图 2 所示为内径 $d=200 \mu\text{m}$ 的微流道。



(a) 横截面 (b) 轴向剖面
(a) Cross section (b) Axial section

图 2 基于玻璃热成型工艺制作的微流道显微照片

Fig. 2 Micrograph of the micro channel manufactured by glass heat process

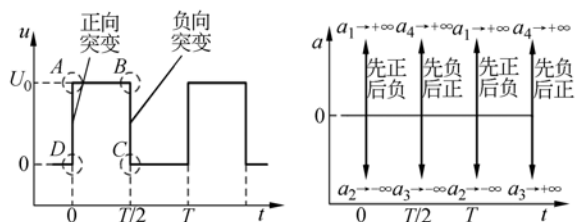
微流体脉冲驱动-控制效果包括流体的驱动方向和驱动速度 2 个方面,其中,在一维微流道中,流体的驱动方向包括:(1)前进:驱动方向与压电驱动器伸长方向相同;(2)后退:驱动方向与压电驱动器伸长方向相反。

压电器件具有电压-位移动态响应好、响应频率高等特点,因此,可认为压电驱动器的驱动电压 U -时间 t 曲线与驱动器可动端(包括与驱动器可动端固定连接的微流道固壁)位移 s -时间 t 曲线相似。

当压电驱动器的驱动电压波形为方波(图 3

(a))时,在一个脉冲驱动周期中,流体的脉冲驱动-控制过程如下:

当 $t=0$ 时,电压(位移)发生正向突变,微流道固壁速度 v 在该时刻变化过程为 $0 \rightarrow +\infty \rightarrow 0$,因此,加速度 a 在该时刻将产生一个先正后负的无穷加速度,即 a 的变化过程为 $0 \rightarrow +\infty \rightarrow -\infty \rightarrow 0$,如图 3(b)所示。当 $a = a_1 \rightarrow +\infty$ 时,流体在黏性力 f 的作用下,相对于机架获得速度 v ,其方向与 f 相同,此时,黏性力 f 为主动动力;当 $a = a_2 \rightarrow -\infty$ 时,流体在相对于固壁的惯性力 F_2 方向相反的黏性力 f' 作用下向前运动,此时,黏性力 f' 为阻力;相反,当 $t=T/2$ 时,电压(位移)发生负向突变,微流道固壁产生先负后正的无穷加速度,流体向后运动。



(a) 电压(位移)-时间曲线 (b) 加速度-时间曲线
(a) Voltage (displacement)-time curve (b) Acceleration-time curve

图 3 驱动电压为方波时微流道固壁理论运动学特性

Fig. 3 Theoretical kinematic characteristics of micro channel solid wall when the driving voltage wave is square wave

由微流体脉冲驱动-控制过程可知,影响微流体脉冲驱动效果的主要因素包括:流体内部的黏性力和流体的脉冲惯性力;理论上,驱动电压正向突变和负向突变均会产生一正一负的无穷加速度,正向突变时产生的先正后负的 2 个无穷加速度均有利于流体的前进运动,负向突变时产生的先负后正的 2 个无穷加速度均有利于流体的后退运动。根据牛顿第二定律可知,流体在微流道中所受的脉冲惯性力大小等于流体质量与微流道固壁运动加速度的乘积,方向与微流道固壁运动加速度方向相反,因此本文分别采用 $|a_1| + |a_2|$ 和 $|a_3| + |a_4|$ 表征驱动电压正向突变和负向突变时产生的单位质量流体的脉冲惯性力大小(也称为微流体脉冲惯性力)。

2.2 椭圆修圆法

如图 3(a)所示,波形修圆是指对方波中产生

电压(位移)突变的“*A*”、“*B*”、“*C*”和“*D*”4 点中的一点或多点进行平滑处理,使驱动电压在经修圆处理后的突变点处过渡平缓。其中,“*A*”和“*D*”点处于电压正向突变的 2 端,故称为电压正向突变点,“*B*”和“*C*”点则称为电压负向突变点。本文提出了“椭圆修圆法”对方波进行修圆,其方法是使用椭圆公式(1)对方波中产生电压突变的 4 点进行修圆,在波形上,用椭圆的相应四分之一圆周代替上述某一突变点。例如,对“*A*”点采用椭圆修圆法进行修圆时,使用修圆系数 $k_A (0 \leq k_A \leq 1)$ 来表征波形在“*A*”点处修圆的程度。特别地, $k_A = 0$ 表示波形在“*A*”点未修圆;当 $k_A \neq 0$ 时,椭圆中心坐标为 $[k_A T/4, U_0(1 - k_A/2)]$,长半轴和短半轴分别如式(2)和式(3)所示。根据式(1)~式(3)可得修圆系数为 k_A 时“*A*”点的修圆公式(4)。在波形上,以式(4)的第二象限 1/4 圆周代替方波中“*A*”点突变。因此, k_A 越大,波形在“*A*”点过渡越平滑。

$$\frac{(t-t_0)^2}{a^2} + \frac{(u-u_0)^2}{b^2} = 1, \quad (1)$$

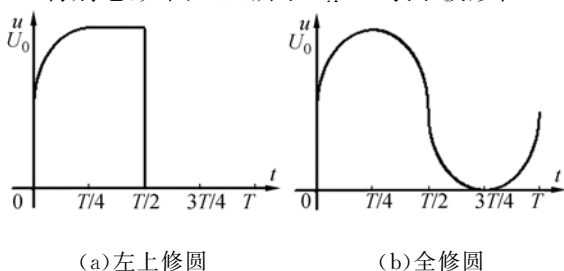
$$a = k_A \cdot \frac{T}{4}, \quad (2)$$

$$b = k_A \cdot \frac{U_0}{2}, \quad (3)$$

$$\frac{\left[t - \frac{k_A T}{4}\right]^2}{\left[\frac{k_A T}{4}\right]^2} + \frac{\left[u - \frac{U_0}{2}(2 - k_A)\right]^2}{\left[\frac{k_A U_0}{2}\right]^2} = 1, \quad (4)$$

式(1)~式(4)中, t 为修圆波形的横轴; u 为修圆波形的纵轴; U_0 为驱动电压幅值; T 为驱动周期;同理,波形在“*B*”、“*C*”和“*D*”点的修圆系数分别为“ k_B ”、“ k_C ”和“ k_D ”,且修圆系数越大,在该点的过渡越平滑。

特别地,如图 4(a)所示 $k_A = 1$ 表示波形在“*A*”



(a) Upper left rounded wave (b) All-rounded wave
图 4 修圆系数等于 1 的不同驱动电压修圆波形

Fig. 4 Rounded waves in different driving voltages when the rounding coefficient is equal to 1

点完全修圆。此时,波形在一个周期内的函数表达式如式(5)所示。同样,按此方法可实现对“*B*”、“*C*”和“*D*”点的修圆并可任意组合上述 4 种修圆类型。本文将对方波“*A*”、“*B*”、“*C*”和“*D*”点的修圆系数等于 1 的修圆分别称为“左上修圆”、“右上修圆”、“右下修圆”和“左下修圆”,若对“*A*”和“*B*”2 点同时修圆则称为“左上右上修圆”。其中,图 4(b)所示为上述 4 点同时修圆时得到的全修圆波形。

$$u = \begin{cases} \frac{U_0}{2}(2 - k_A) + \frac{U_0 k_A}{2} \sqrt{1 - \left[\frac{4t - k_A T}{k_A T}\right]^2} & t \in \left[0, \frac{k_A T}{4}\right] \\ U_0 & t \in \left[\frac{k_A T}{4}, \frac{T}{2}\right] \\ 0 & t \in \left[\frac{T}{2}, T\right] \end{cases} \quad (5)$$

2.3 微流体脉冲惯性力测量实验

本文通过测量与微流道固壁固定连接的驱动器可动端的加速度 a -时间 t 曲线来间接获得波形修圆对微流体脉冲惯性力的影响规律。

图 5 所示为微流道固壁运动加速度测量装置。其中,压电式加速度计(型号:CA-YD-103,灵敏度:1.82 CP/(m · s⁻²),江苏联能电子有限公司)与压电驱动器可动端固定连接。加速度计输出信号经电荷放大器(型号:YE5852)放大后在示波器(型号:TDS-2022)上显示出来。

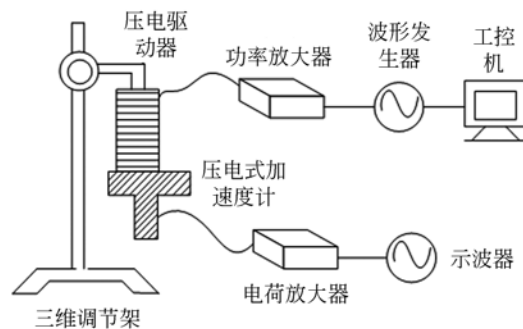


图 5 微流道固壁加速度测量装置示意图

Fig. 5 Acceleration measuring apparatus of micro channel solid wall

2.4 微流体脉冲驱动效果实验

为了探索微流体脉冲驱动-控制技术中驱动电压波形修圆对微流体脉冲驱动效果的影响规律并研究驱动电压波形修圆、微流体脉冲惯性力和微流体脉冲驱动效果三者之间的关系,本文进行

了波形修圆对微流体脉冲驱动效果的影响规律实验。实验装置如图 1 所示,微流道水平放置并保持其轴线与压电驱动器伸缩方向平行。

3 实验结果与分析

3.1 波形修圆对微流体脉冲惯性力的影响

图 6 为驱动电压波形为方波,频率 $f_0 = 2$ Hz 时,幅值 U_0 对电压正向突变时和负向突变时微流体脉冲惯性力的影响规律。由图 6 可以看出,微流体脉冲惯性力随驱动电压的增大而增大;在相同驱动电压幅值下,电压正向突变产生的脉冲惯性力比负向突变时产生的脉冲惯性力大。例如,当 $U_0 = 80$ V 时,电压正向突变和负向突变产生的脉冲惯性力分别为 $660 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 和 $440 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

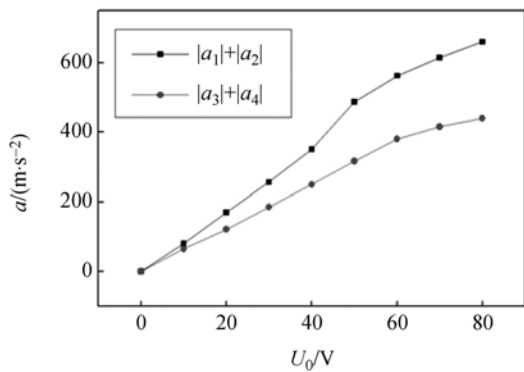


图 6 驱动电压幅值对微流体脉冲惯性力的影响

Fig. 6 Micro-fluidic pulse inertial force varies with driving voltage amplitude

图 7 所示为驱动电压波形为方波,幅值 $U_0 = 80$ V,频率 f_0 对电压正向突变和负向突变产生的微流体脉冲惯性力的影响规律。由图 7 可以看出,微流体脉冲惯性力随驱动频率的增大而缓慢降低,即:当 $f_0 = 2$ Hz 时,电压正向突变和负向突变产生的惯性力均取得最大值。

图 8 所示为当驱动电压幅值 $U_0 = 80$ V,驱动频率 $f_0 = 2$ Hz 条件下测量所得不同驱动电压修圆波形下微流道固壁运动加速度曲线(图中 1 V 表示 $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$);图 9 所示为修圆系数 k_A 、 k_B 、 k_C 和 k_D 分别对微流体脉冲惯性力大小的影响规律曲线。

由图 8(a)~8(c)可以看出,方波修圆前后,压电驱动器在电压突变点均存在 2 个“一正一负”

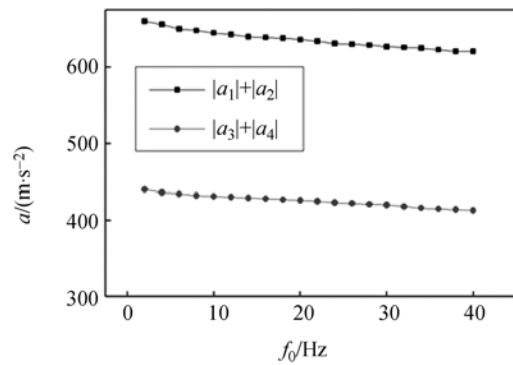
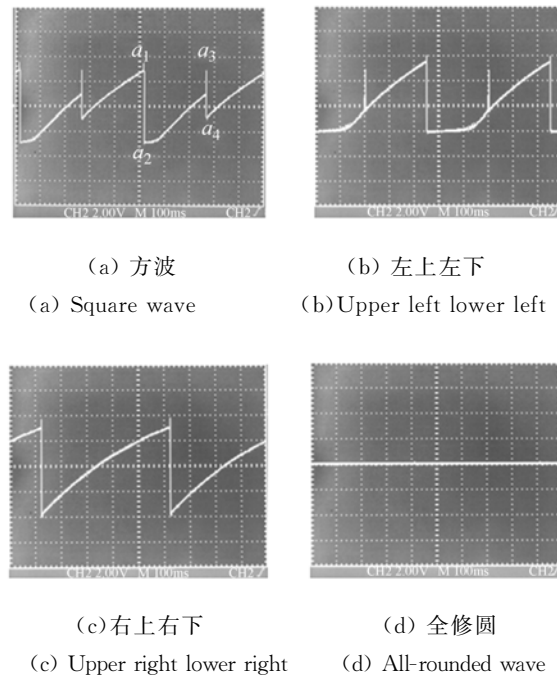


图 7 驱动电压频率对微流体脉冲惯性力的影响

Fig. 7 Micro-fluidic pulse inertial force varies with driving voltage frequency

的加速度,但在修圆处的正负加速度绝对值之和明显下降。由图 8(b)并结合图 9 可以看出,对方波进行“左上左下修圆”时,电压正向突变点产生的微流体脉冲惯性力 $|a_1| + |a_2|$ 明显下降,由方波的 $660 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 减小为 $560 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;类似地,由图 8(c)并结合图 9 可以看出,对方波进行“右上右下修圆”时,电压负向突变点产生的微流体脉冲惯性力 $|a_3| + |a_4|$ 明显下降,由方波的 $440 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 减小为 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。



(a) 方波 (a) Square wave
(b) 左上左下 (b) Upper left lower left
(c) 右上右下 (c) Upper right lower right
(d) 全修圆 (d) All-rounded wave

图 8 驱动电压波形修圆对微流体脉冲惯性力的影响
Fig. 8 Micro-fluidic pulse inertial force varies with different rounded waves

由上述实验结果可知:对方波中电压正向突

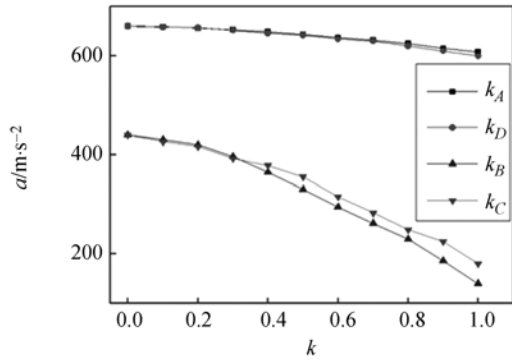


图 9 修圆系数对微流体脉冲惯性力的影响

Fig. 9 Micro-fluidic pulse inertial force varies with rounding coefficient

变点进行修圆时削弱了流体在电压正向突变时微流体脉冲惯性力的大小;对方波中电压负向突变点进行修圆时削弱了流体在电压负向突变时脉冲惯性力的大小,而波形修圆的修圆系数则决定了在该突变点处所产生脉冲惯性力的削弱程度。

3.2 波形修圆对微流体脉冲驱动效果的影响

驱动波形分别为“左上左下修圆”和“右上右下修圆”,驱动电压幅值 $U_0 = 80 \text{ V}$,驱动频率 $f_0 = 2 \text{ Hz}$ 时,微流道尺寸 d 对流体体流量的影响规律如图 10 所示。由图中可以看出,当微流道尺寸 $d = 200 \mu\text{m}$ 时,2 种修圆波形下的流体体流量最大,且在相同微流道尺寸条件下,与“右上右下修圆”相比,“左上左下修圆”波形时获得的流体体流量较大。 d 较大(例如 $d = 300 \mu\text{m}$)或较小(例如 $d = 20 \mu\text{m}$)均会出现流体相对微流道静止的现象。

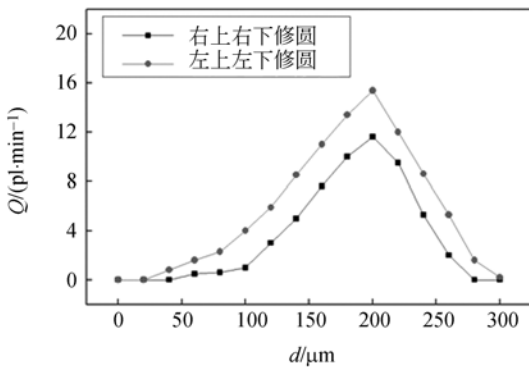


图 10 微流道尺寸对流体体流量的影响

Fig. 10 Fluidic volume flow rate varies with the inner diameter of micro channel

在提出的“椭圆修圆法”中,修圆点的位置决定了流体的驱动方向,两者对应关系如表 1 所示。

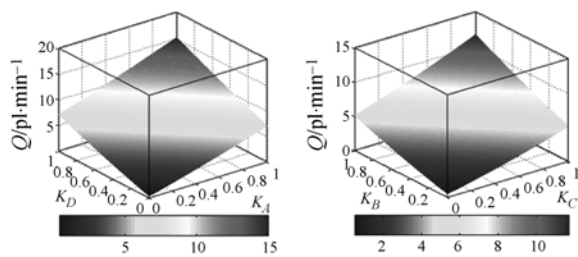
表 1 驱动电压修圆位置与流体驱动方向真值表

Tab. 1 Truth value table of the driving voltage rounding locations and micro-fluidic driving directions

| k_A | k_B | k_C | k_D | 驱动方向 |
|-------|-------|-------|-------|------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | — |
| 1 | 1 | 1 | 1 | — |

(注: k_A, k_B, k_C 和 k_D 中“1”表示修圆系数等于 1,“0”表示修圆系数等于 0;驱动方向中“1”表示流体前进,“0”表示流体后退,“—”表示流体近似静止)

驱动电压正向突变点“ A ”和“ D ”修圆,负向突变点“ B ”和“ C ”不修圆的情形下,由表 1 可知,流体作后退运动。图 11(a)所示为在此情形下通过实验建立的电压正向突变修圆系数(K_A 和 K_D)对微流体脉冲驱动速度的影响规律曲面,不难看出,修圆系数越大,微流体驱动速度越快,当 $K_A = 1$ 和 $K_D = 1$ 时,流体在微流道中的微流动过程显微照片如图 12(a)所示,此时驱动速度为最大值 $490 \mu\text{m}/\text{min}$,结合圆形微流道尺寸 $d = 200 \mu\text{m}$,流体在此情形下的最大流量 Q 为 $15.4 \text{ pl}/\text{min}$ (实验过程中以流体右侧凹液面最高点“ O ”为测量对象)。

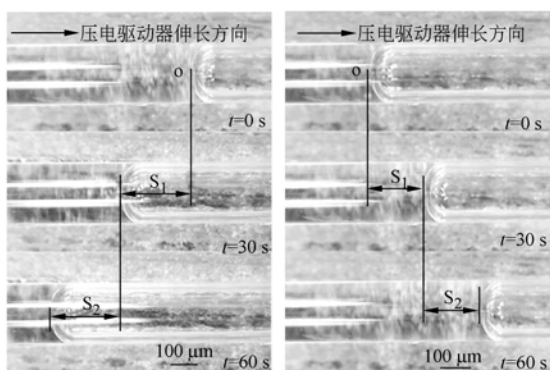


(a) 方波正向突变点修圆 (b) 方波负向突变点修圆
(a) Forward catastrophe rounded (b) Negative catastrophe rounded

图 11 修圆系数对流体驱动速度的影响

Fig. 11 Micro-fluidic driving velocity varies with rounding coefficient

类似地,驱动电压负向突变点“B”和“C”修圆,正向突变点“A”和“D”不修圆的情形下,由表 1 可知,流体作前进运动。图 11(b)所示为在此情形下通过实验建立的电压负向突变修圆系数(K_B 和 K_C)对微流体脉冲驱动速度的影响规律曲面,不难看出,修圆系数越大,微流体驱动速度越快,当 $K_B=1$ 和 $K_C=1$ 时,流体在微流道中的微流动过程显微照片如图 12(b)所示,此时驱动速度为最大值 $370\ \mu\text{m}/\text{min}$,即:流体的最大流量 Q 为 $11.6\ \text{pl}/\text{min}$ 。



(a) 左上左下

(b) 右上右下

(a) Upper left lower left (b) Upper right lower right

图 12 微流体在修圆波形驱动下微流动显微照片

Fig. 12 Micro flow micrograph of microfluidic driven by rounded waves

参考文献:

- [1] KHNOUF R, BEEBE D J, FAN Z H. Cell-free protein expression in a microchannel array with passive pumping [J]. *Lab Chip*, 2009, 9:56-61.
- [2] XU ZH R, YANAG CH G, LIU C H, *et al.*. An osmotic micro-pump integrated on a microfluidic chip for perfusion cell culture [J]. *Talanta*, 2010, 80: 1088-1093.
- [3] 江小宁,周兆英,李勇,等. 微流体运动的试验研究 [J]. *光学精密工程*, 1995, 3(3):51-55.
JIANG X N, ZHOU ZH Y, LI Y, *et al.*. Study on microfluid flow behavior [J]. *Opt. Precision Eng.*,

4 结 论

本文通过理论分析和实验研究微流体脉冲驱动-控制过程中驱动电压波形修圆对微流道固壁运动加速度、微流体脉冲惯性力和流体驱动效果的影响规律,得出了如下结论:

(1) 在微流体脉冲驱动-控制技术中,影响微流体流动的主要因素包括微流道固壁加速度和流体内部的黏性力;当驱动电压为方波时,电压正向突变和负向突变均会使微流道固壁产生一正一负的无穷加速度,正向突变时产生的先正后负的 2 个无穷加速度均有利于流体的前进运动,负向突变时产生的先负后正的 2 个无穷加速度均有利于流体的后退运动。

(2) 在提出的驱动电压“椭圆修圆法”中,修圆点的位置决定了微流体的驱动方向,即:对方波中电压正向突变点进行修圆时削弱了驱动流体前进的脉冲惯性力大小,从而使微流体向后运动,对方波中电压负向突变点进行修圆时削弱了驱动流体向后的脉冲惯性力大小,从而使微流体向前运动;修圆系数 k (包括 k_A 、 k_B 、 k_C 和 k_D)反应了波形的修圆程度并决定了微流道固壁在修圆点的正负加速度绝对值之和的大小(微流体脉冲惯性力大小),进而决定了微流体的驱动速度。

(3) 所得微流体体积流量 Q 可在 $0\sim 15.4\ \text{pl}/\text{min}$ 内连续变化,远小于现有的微流体驱动技术,为微流体脉冲驱动-控制在微流体系统中的进一步应用提供了参考。

1995,3(3):51-55. (in Chinese)

- [4] WANG X, CHEN X M, MA X F, *et al.*. Fast DNA hybridization on a microfluidic mixing device based on pneumatic driving [J]. *Talanta*, 2011, 84:565-571.
- [5] YOON D S, LEE Y S, LEE Y S, *et al.*. Precise temperature control and rapid thermal cycling in a micromachined DNA polymerase chain reaction chip [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2002, 12:813-823.
- [6] GUO ZH X, ZENG Q, ZHANG M, *et al.*. Valve-based microfluidic droplet micromixer and mercury (II) ion detection [J]. *Sens. Actuators A.*, 2011, 172:546-551.

- [7] GREEN N G, RAMOS A, GONZALEZ A, *et al.*. Fluid flow induced by nonuniform ac electric fields in electrolytes on microelectrodes. III. Observation of streamlines and numerical simulation [J]. *Physical Review E*, 2002, 66: 026305-1-026305-11.
- [8] KÖHLER J M, KIMER T. Nanoliter segment formation in micro fluid devices for chemical and biological micro serial flow processes in dependence on flow rate and viscosity [J]. *Sens. Actuators A.*, 2005, 119:19-27.
- [9] LUQUE A, QUERO J M, HIBERT C, *et al.*. Integrable silicon microfluidic valve with pneumatic actuation [J]. *Sens. Actuators A.*, 2005, 118:144-151.
- [10] DARHUBER A A, VALENTINO J P, DAVIS J M, *et al.*. Microfluidic actuation by modulation of surface stresses [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 82(4):656-659.
- [11] WANG X Y, CHENG CH, WANG SH L, *et al.*. Electroosmotic pumps and their applications in microfluidic systems [J]. *Microfluid Nanofluid*, 2009, 6:145-162.
- [12] BÜSTGENS B, BACHER W, MENZ W. Micropump manufactured by thermoplastic molding [J]. *IEEE*, 1994:18-21.
- [13] CHO B S, SCHUSTER T G, ZHU X Y, *et al.*. Passively driven integrated microfluidic system for separation of motile sperm [J]. *Anal. Chem.*, 2003, 75:1671-1675.
- [14] 李清岭, 陈令新. 微流体驱动与控制技术[J]. *化学进展*, 2008, 20(9):1406-1415.
LI Q L, CHEN L X. Delivery and control techniques for microfluids [J]. *Process in Chemistry*, 2008, 20(9):1406-1415. (in Chinese)
- [15] KIM H H, OH J H, LIM J N. Design of valveless type piezoelectric pump for micro-fluid devices [J]. *Procedia Chemistry*, 2009, 1:353-356.
- [16] BENARD W L, KAHN H, HEUER A H. Thin-film shape-memory alloy actuated micropumps [J]. *J. Microelectromech. Syst.*, 1998, 7(2): 245-251.
- [17] 科技导报编辑部. 2004 年中国重大科学、技术与工程进展[J]. *科技导报*, 2005, 23(2):58-61.
THE EDITORIAL OFFICE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY REVIEW. Important progress of science, technology and engineering in China in 2004 [J]. *Science & Technology Review*, 2005, 23(2): 58-61. (in Chinese)
- [18] 耿鑫, 侯丽雅, 王洪成, 等. 微流体数字化技术制备基因芯片微阵列[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(6):1344-1351.
GENG X, HOU L Y, WANG H CH, *et al.*. Preparation of genechip microarrays using microfluid digitalization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6):1344-1351. (in Chinese)
- [19] 李清, 侯丽雅, 王洪成, 等. 微流体数字化技术制备鱼卵微胶囊[J]. *化工学报*, 2011, 62(4):1042-1047.
LI Q, HOU L Y, WANG H CH, *et al.*. Preparation of fish reo microcapsules by using micro-fluidics digitalization [J]. *CIESC Journal*, 2011, 62(4):1042-1047. (in Chinese)
- [20] 侯丽雅, 王振琪, 章维一, 等. 金属微粉体脉冲输送的微特性实验[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 1030-1038.
HOU L Y, WANG ZH Q, ZHANG W Y, *et al.*. Experiments of micro characteristics of pulse-transfer for metallic powders [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5):1030-1038. (in Chinese)
- [21] 章维一, 侯丽雅. 影响流体流动的方法及其装置和应用: 中国, ZL03152948. 8[P]. 2004.
ZHANG W Y, HOU L Y. Method, apparatus and application of affecting fluid flow: China, ZL03152948. 8[P]. 2004. (in Chinese)
- [22] 穆莉莉, 侯丽雅, 章维一. 石英微流体器件制备仪的研制与实验研究[J]. *中国机械工程*, 2010, 21(13):1581-1585.
MU L L, HOU L Y, ZHANG W Y. Development and experimental study of a quartz microfluidic device preparation apparatus [J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 21(13):1581-1585. (in Chinese)

作者简介:



王洪成(1985—),男,江苏淮安人,博士研究生,2008年于南京工程学院获得学士学位,主要从事微流体驱动-控制技术及其应用、机电一体化系统设计等方面的研究。E-mail: whch31@163.com.



章维一(1943—),男,浙江临海人,博士,教授,1982年于中国纺织大学获得硕士学位,1990年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事微系统与纳米系统、微流体数字化技术、医学工程等方面的研究。E-mail: zhangweiyi_email@163.com

导师简介:



侯丽雅(1954—),女,江西余干人,博士,教授,博士生导师,1984年于北京航空航天大学获得硕士学位,1995年于(日)法政大学获得博士学位,主要从事微系统与纳米系统、微流体数字化技术、生物制造工程等方面的研究。E-mail: hou_liya@hotmail.com

(本栏目编辑:马 健)

● 下期预告

交变磁场对激光熔覆铁基复合涂层宏观形貌的影响及其微观组织演变

刘洪喜*,蔡川雄,蒋业华,张晓伟,王传琦
(昆明理工大学 材料科学与工程学院,云南 昆明 650093)

采用自制磁场装置研究了不同磁场强度对激光熔覆铁基涂层宏观形貌和显微组织的影响。结果表明:在交变磁场作用下,熔池金属液表面产生的趋肤效应和交变电磁力使凝固后熔覆层的表面形态呈波浪式,熔高和横截面积均随磁场电流的增加而减小,但熔宽变化不大。熔池内部产生的电磁力驱动熔体流动使树枝晶熔蚀和机械折断,游离的破碎枝晶成为新的形核核心,增加了形核率,从而促使熔覆层顶部组织由树枝晶向等轴晶转变。随着磁场电流的增加,等轴晶区扩大,但涂层底部的组织变化不大。运用电磁学及金属凝固原理,揭示了交变磁场对激光熔覆凝固过程的影响及磁场诱发熔覆涂层柱状枝晶向等轴晶转变的主要机制。