

锥形微通道内液滴自输运特性及 力学驱动机制研究*

逢明华^{1,2}, 刘焜¹, 刘小君¹

(1. 合肥工业大学 摩擦学研究所, 合肥 230009;

2. 河南科技学院 机电学院, 河南 新乡 453003)

摘要: 针对液体在微通道内的自输运特性,采用数值仿真与能量解析相结合的方法研究了液滴在锥形微通道内的自输运特性及力学驱动机制,得到微通道的锥形角、液滴与微通道内壁的接触角及微通道的润湿性对液滴自输运特性的影响关系.分析表明,微通道的锥形角、液滴与微通道内壁的接触角均能影响液滴的自输运方向及驱动力大小.对于亲水性微通道,微通道的锥形角、液滴与微通道内壁的接触角其作用效果呈现整体形态;对于疏水性微通道,微通道的锥形角、液滴与微通道内壁的接触角其作用效果呈现局域形态.这可为研究液体在微通道内的自输运机理及界面内液体细观流动机制奠定理论基础.

关键词: 锥形微通道; 自输运特性; 接触角; 润湿性

中图分类号: TB17

文献标志码: A

doi: 10.21656/1000-0887.370158

引 言

液体在微通道内的自输运是自然界中存在的重要物理现象^[1-6],涉及界面的各种物理、化学过程,是基础科学研究的重要内容^[7-8].由于液体在微通道内的自输运具有易于控制、不易失效、无需外界能量输入等优点,在微机电^[9]、喷墨打印^[10]、药物检测^[11-12]、DNA技术^[13]、油水分离^[14]、界面润滑与密封^[15-17]等领域都具有重要的意义及实际工程价值,由此引起国内外学者的广泛关注,并给予研究.Chen等^[1]对猪笼草表面的液体自输运特性进行了研究,得出猪笼草特有的微通道结构是液体产生自输运的原因.Ju等^[2]对仙人掌刺的微观结构进行了研究,发现仙人掌刺特有的微观结构能捕捉沙漠中存在的小雾滴,并定向输运至仙人掌根部,从而保证了仙人掌在沙漠中生存.Parker等^[3]对沙漠甲虫体表的水收集、输运特性进行了研究,发现沙漠甲虫背部的微观形貌能单向的将水输运至甲虫嘴边缘,保证了沙漠甲虫在恶劣环境下的生存.Zheng等^[4-5]对蛛丝雾中水收集特性进行了研究,发现蛛丝锥形节点结构能使粘附的水滴在结构梯度的驱动下相向或相反运动,从而形成不断增大的液滴.

以上研究均表明,特有的微通道结构能产生能量梯度,驱动液滴自输运.如何对微通道进行设计,从而对表面张力进行调控,得到所需的液流特性成为目前制约这一技术在工程中应用

* 收稿日期: 2016-05-23; 修订日期: 2016-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(51375132)

作者简介: 逢明华(1977—),男,博士生(E-mail: pangminghua909@163.com);

刘焜(1963—),男,教授,博士生导师(通讯作者. E-mail: liukun@hfut.edu.cn).

的瓶颈,为此国内外学者对液体的自输运机理开展了研究.林林等^[18]利用格子法研究了粗糙梯度表面液滴的自驱动特性,研究表明固体表面的结构梯度是液滴自输运的动力来源.殷雅俊等^[19]对表面曲率驱动的数学模型进行了分析,为液滴自输运的量化研究奠定基础.LÜ 等^[20-21]利用分子动力学方法研究了液滴在锥形微通道内、外的自输运特性,通过分析指出,液滴在变曲率表面上总是沿着能量减小的梯度方向运动.Liu 等^[22]利用能量方法研究了锥形微通道内液滴的自输运特性,分析表明锥形微通道的能量梯度是液滴产生自输运的原因.

尽管微通道内液体自输运特性具有重要的科学意义及工程价值,然而相关研究报道仍然较少,其内部机理还不是很清楚,制约了液体自输运特性在工程中的应用.鉴于实验方法在此研究中的限制及现有设备的不足,在此采用数值仿真与能量解析相结合的方法对锥形微通道内液滴自输运特性进行了研究.探讨了微通道的锥形角、液滴与微通道内壁的接触角等参数对液滴自输运特性的影响机理,为研究液体在微通道内的自输运及界面内液体细观流动机制奠定理论基础.

1 数值仿真模型

1.1 锥形微通道模型

数值仿真模型如图 1 所示.微通道大端直径 D_1 ,小端直径 D_2 ,微通道长 2 mm,锥形角为 α .液滴在微通道内的初始形状为圆形,半径 r ,与两侧边界相切,液滴中心距大端长度为 0.5 mm,忽略液滴体积变化影响.微通道两端与大气连通,忽略大气压力影响.上下两边为固体润湿边界,接触角 θ_Y ,仿真平台采用 COMSOL 5.0,具体参数见表 1.

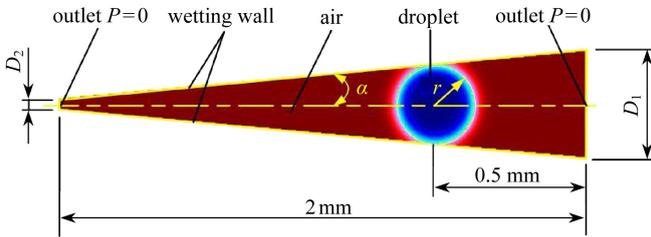


图 1 锥形微通道数值仿真模型

Fig. 1 The numerical simulation model for a conical microchannel

表 1 锥形微通道数值仿真参数

Table 1 The numerical simulation parameters for the conical microchannel

parameter	value				
conical angle $\alpha / (^\circ)$	4	5	6	7	8
droplet radius r / mm	0.13	0.15	0.18	0.21	0.23
large end diameter D_1 / mm	0.16	0.2	0.24	0.27	0.31
small end diameter D_2 / mm	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
contact angle $\theta_Y / (^\circ)$	30	60	90	120	150

1.2 液滴控制方程及边界条件

液滴为不可压缩 Newton 流体,满足 Navier-Stokes 方程及连续性条件:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)] + F_{st}, \tag{1}$$

$$\nabla \cdot u = 0. \tag{2}$$

为体现表面张力作用,在 Navier-Stokes 方程中加入表面张力项,忽略重力影响:

$$F_{st} = \nabla \cdot \mathbf{T}, \quad (3)$$

式中, $\mathbf{T} = \sigma(\mathbf{I} - \mathbf{nn}^T)\delta$; ρ 表示液体密度, kg/m^3 ; μ 表示液体动力粘度, $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$; p 表示液体压强, Pa ; σ 表示液体表面张力, mN/m ; \mathbf{I} 表示单位矩阵; \mathbf{n} 表示液-气界面法线方向; δ 表示 Dirac (狄拉克) 函数, 在液-气界面上非零。

忽略液-气界面切向力, 仅考虑液-气界面法向作用, 界面采用 level set 模型追踪. 为真实地反映液滴在固-液界面上的速度, 在此采用 Navier 滑移模型 (图 2):

$$u_n|_w = 0, \quad (4)$$

$$u_\tau|_w = b\left(\frac{\partial u}{\partial n}\right)_w, \quad (5)$$

式中, $u_n|_w$ 为固-液界面法向速度, m/s ; $u_\tau|_w$ 为固-液界面切向速度, m/s ; w 为固-液界面; b 为固-液界面滑移长度, 其值大小通常按经验确定, 在此取网格长度值的一半。

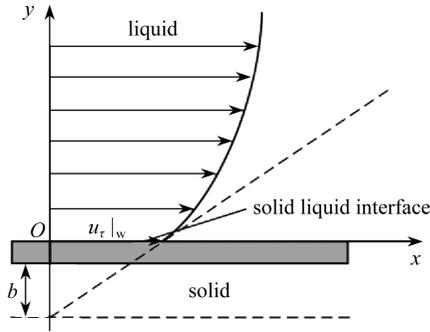


图 2 固-液界面 Navier 滑移模型

Fig. 2 The Navier slipping model for the solid-fluid interface

2 数值实验结果分析

2.1 数值仿真模型验证

为验证数值仿真模型的准确性, 在此将仿真结果与文献[22]的实验结果进行对比. 图 3 为文献[22]的实验结果, 实验参数为: 液滴杨氏接触角 θ_Y 为 30° , 锥形角 α 约为 5° . 图 4 为数值仿真结果, 仿真参数为: 杨氏接触角 θ_Y 为 30° , 锥形角 α 为 5° , 微通道大端直径 D_1 为 0.2 mm , 小端直径 D_2 为 0.02 mm , 液滴初始形状为圆形。

由图 4 可看出, 随着时间的变化, 液滴先从圆形逐渐演变为双月牙形 (这主要由于液滴在表面张力作用下, 其内部能量趋于最小的结果), 并自发向锥顶输运, 约 2.5 ms 后到达锥顶静止 (此时液滴下端出现抖动现象, 这是由于液滴到达锥顶时仍具有一定的动能, 由此引发液滴下端局部回流, 液滴下端局部抖动直到粘性阻力将其多余动能消耗完才静止, 本文忽略此现象). 该仿真结果 (图 4) 与文献[22]的实验结果吻合 (图 3), 表明该仿真模型能够反应液滴在微通道内的自输运特性, 且仿真结果准确、可行。

2.2 微通道内壁亲/疏水性对液滴输运方向的影响分析

锥形微通道内壁的亲/疏水性对液滴自输运方向的影响目前国内外研究较少, 为探究其内部机制, 在此建立如下数值仿真模型. 固定微通道的锥形角, 改变锥形微通道内壁与液滴的接触角, 依次得到不同接触角下液滴的自输运仿真结果. 建立液滴在锥形微通道内的能量解析方程, 分析能量变化. 用上述两种方法得到锥形微通道内壁的亲/疏水性对液滴自输运方向的影

响关系,分析锥形微通道内壁的亲/疏水性对液滴自输运方向的影响机制。

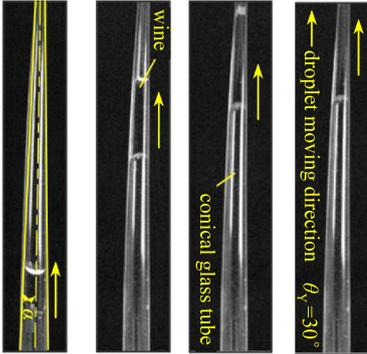


图3 锥形微通道内液滴自输运实验结果^[22]

Fig. 3 Experimental results of directional motion of a droplet in a conical microchannel^[22]

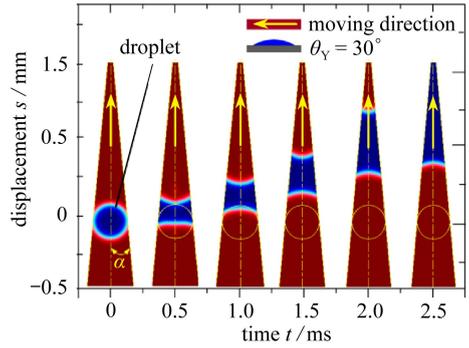
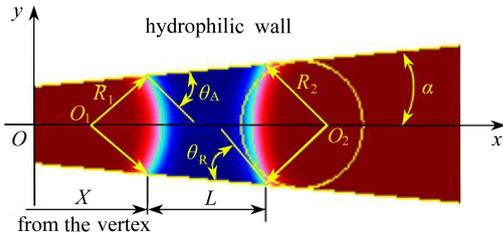


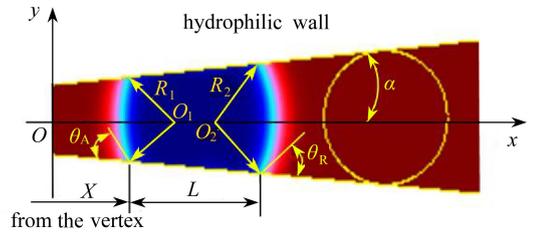
图4 锥形微通道内液滴自输运数值仿真结果

Fig. 4 Simulated directional motion of a droplet in a conical microchannel



(a) 亲水性锥形微通道液滴计算参数模型

(a) The model for a hydrophilic case



(b) 疏水性锥形微通道液滴计算参数模型

(b) The model for a hydrophobic case

图5 锥形微通道液滴计算参数模型

Fig. 5 The calculation models for droplets in conical microchannels

根据图5 计算参数模型及文献^[22]的锥形微通道液滴无量纲能量解析方程:

$$\tilde{U}_t = \frac{U_t}{\gamma \kappa^{-2}} = \kappa^2 (S_{11} + S_{12} - S_{13} \cos \theta_Y), \quad (6)$$

其中,液-气界面、固-液界面表面积为

$$S_{11} = \frac{2\pi(X + x_0)^2 \sin^2 \alpha [1 - \sin(\theta_A - \alpha)]}{\cos^2(\theta_A - \alpha) \cos^2 \alpha}, \quad (7)$$

$$S_{12} = \frac{2\pi(X + x_0 + L)^2 \sin^2 \alpha [1 - \sin(\theta_R + \alpha)]}{\cos^2(\theta_R + \alpha) \cos^2 \alpha}, \quad (8)$$

$$S_{13} = \frac{\pi(2(X + x_0)L + L^2) \sin \alpha}{\cos^2 \alpha}, \quad (9)$$

式中, \tilde{U}_t 为液滴无量纲能量; S_{11} 为液滴小端液-气界面表面积, mm^2 ; S_{12} 为液滴大端液-气界面表面积, mm^2 ; S_{13} 为固-液界面表面积, mm^2 ; θ_Y 为固-液界面杨氏接触角, ($^\circ$); κ 为毛细管长度, $\kappa^{-1} = \sqrt{\gamma/(\rho g)}$, γ 为液-气界面张力, mN/m 。

液-气界面球缺体积公式在文献^[22]的基础上考虑了微通道润湿性的影响,其具体形式如下:

$$V_{11} = \frac{1}{\pm 3 \cos(\theta_A - \alpha)^3 \cos \alpha^3} \times$$

$$\{ \pi X^3 \sin \alpha^3 [1 - \sin(\theta_A - \alpha)]^2 \cdot [2 + \sin(\theta_A - \alpha)] \}, \quad (10)$$

$$V_{12} = \frac{1}{\pm 3 \cos(\theta_R + \alpha)^3 \cos \alpha^3} \times \{ \pi (X + L)^3 \sin \alpha^3 [1 - \sin(\theta_R + \alpha)]^2 \cdot [2 + \sin(\theta_R + \alpha)] \}, \quad (11)$$

$$V_{13} = \frac{\pi}{3} (3LX^2 + 3L^2X + L^3) \tan \alpha^2, \quad (12)$$

式中,+用于亲水性锥形微通道($\theta_Y \leq 90^\circ$),-用于疏水性锥形微通道($\theta_Y > 90^\circ$); V_{11} 为液滴小端液-气界面球缺体积, mm^3 ; V_{12} 为液滴大端液-气界面球缺体积, mm^3 ; V_{13} 为固-液界面圆锥体积, mm^3 ; θ_A 为液滴前进接触角, $(^\circ)$; θ_R 为液滴后退接触角, $(^\circ)$ (由于液滴的粘性滞后效应(即 $\theta_A - \theta_R$ 值)与液滴粘度及表面粗糙度因素等相关,在本仿真过程中忽略这些参数变化的影响,设定 $\theta_A - \theta_R$ 值均为 10°); α 为微通道锥形角, $(^\circ)$; X 为锥顶到微通道小端固-液界面的距离, mm ; R_1 为液滴在小端液-气界的面曲率半径, mm ; R_2 为液滴在大端液-气界面的曲率半径, mm 。

由于液滴在锥形微通道内运动时,固-液界面、液-气界面的表面积随液滴所在微通道的位置及液滴体积变化而变化。为此,先根据液滴体积及式(10)~(12)求出液滴在锥形微通道不同位置 X 处的液滴长度 L ,再由式(7)~(9)求出固-液界面、液-气界面表面积。将上述所得结果代入式(6)中,得到锥形微通道内液滴的无量纲能量,具体计算流程见图6。

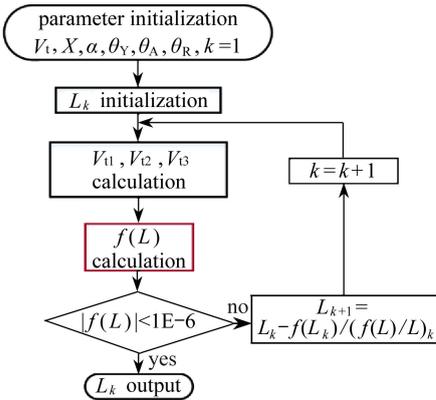


图6 锥形微通道内液滴能量计算流程图

Fig. 6 The program flowchart for the potential energy calculation of droplets in conical microchannels

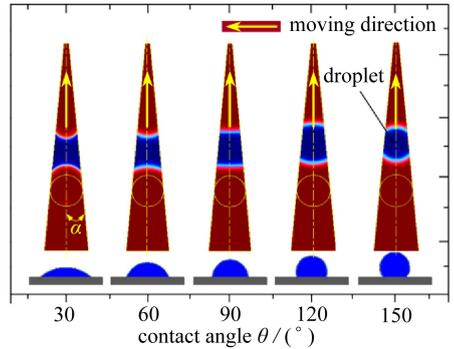


图7 不同接触角的液滴自输运方向($\alpha = 5^\circ$)

Fig. 7 Moving directions of the droplets with different contact angles, $\alpha = 5^\circ$

所得结果如图7~11所示,其中图7~9为数值仿真结果,图10、11为能量解析结果。将数值仿真结果与能量解析结果进行对比可以看出两者变化趋势基本一致,表明所得结果准确。

图7、8表明,不同润湿性的锥形微通道其液滴自输运位移均为正(指向锥形微通道的小端方向),表明液滴在锥形微通道内的自输运方向(在仿真研究范围内)均指向锥形微通道小端,没有出现回流现象。由此可得,液滴在疏水性锥形微通道中的自输运方向与亲水性锥形微通道中的自输运方向可以相同。图9表明,不同润湿性的锥形微通道,其液滴自输运速度具有很大差异。其中,亲水性锥形微通道其液滴输运速度呈指数形式增大,液滴自输运速度较快,并呈加速运动形态。而疏水性锥形微通道其液滴自输运速度基本趋于不变,且速度值较小,基本呈匀速运动状态。由此表明,锥形微通道的亲/疏水性对其液滴的自输运速度存在明显影响。

图10、11为微通道内不同位置及润湿性的液滴能量曲线,图10为亲水性微通道,图11为

疏水性微通道.图 10 表明,在亲水性微通道内,液滴能量均随 X 的减小呈现递减状态,且接触角越大能量降低程度越低.图 11 表明,在疏水性微通道内(接触角小于 140°),液滴能量均随 X 的减小而降低,对于超疏水性微通道(接触角大于 140°),液滴能量随 X 的减小开始呈现增大趋势.按照液滴能量趋于最小理论^[20,22],液滴应向锥形微通道大端方向运动.为验证结论的可靠性,在此对超疏水性微通道内液滴自输运方向进行了数值仿真,结果如图 12 所示.

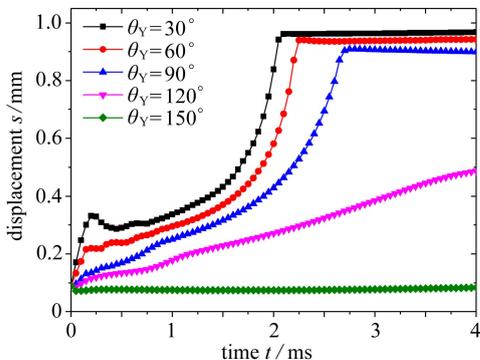


图 8 锥形微通道内液滴自输运位移-时间曲线

Fig. 8 The displacement-time curves for the directional motions of droplets in conical microchannels, $\alpha = 5^\circ$

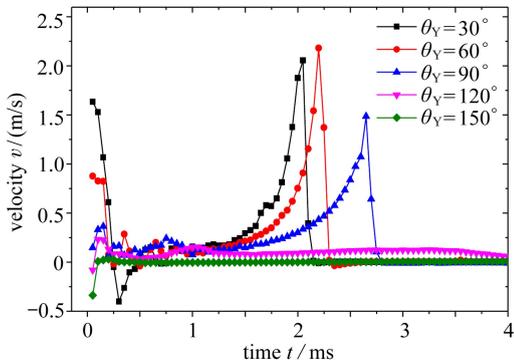


图 9 锥形微通道内液滴自输运速度-时间曲线

Fig. 9 The velocity-time curves for the directional motions of droplets in conical microchannels, $\alpha = 5^\circ$

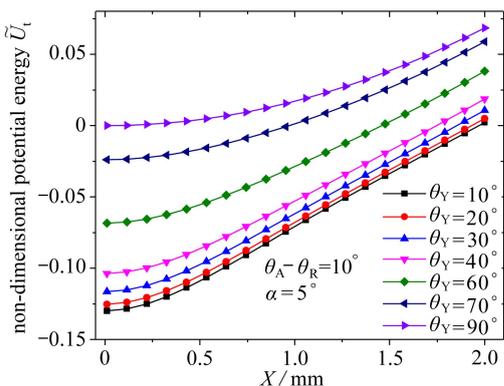


图 10 亲水性锥形微通道不同位置处液滴能量变化曲线

Fig. 10 The potential energy-position curves for droplets in hydrophilic conical microchannels, $\alpha = 5^\circ$

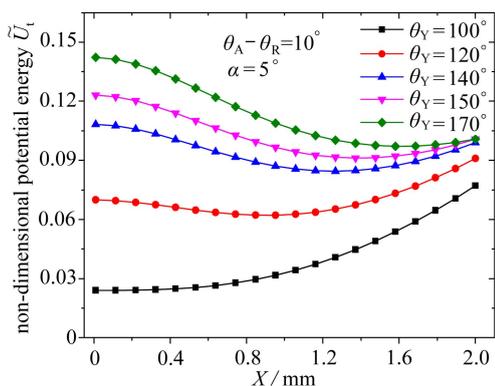


图 11 疏水性锥形微通道不同位置处液滴能量变化曲线

Fig. 11 The potential energy-position curves for droplets in hydrophobic conical microchannels, $\alpha = 5^\circ$

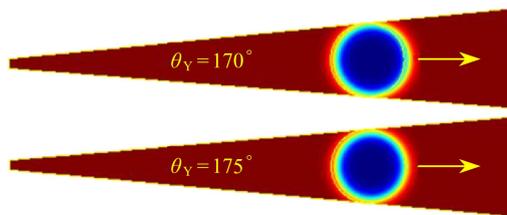


图 12 超疏水性锥形微通道内液滴自输运方向

Fig. 12 The droplets' directional motions in super-hydrophobic conical microchannels

图 12 表明,液滴在超疏水性锥形微通道内均向大端运动(黄色圆表示液滴初始位置,蓝色表示液滴运动后的位置).表明同一锥形微通道,液滴与微通道内壁的润湿性变化会影响液

滴的自输运方向.在本文研究条件下,液滴与锥形微通道内壁的接触角在 $0^\circ \sim 140^\circ$ 范围内,液滴在锥形微通道内的自输运方向均相同;当液滴与锥形微通道内壁的接触角大于 140° 后,液滴的自输运方向将发生改变.

2.3 微通道锥形角对液滴自输运方向的影响分析

锥形角作为锥形微通道的主要参数,也是锥形微通道设计的主要考虑因素.为探究锥形角对液滴的自输运方向及能量的影响,在此采用数值仿真及能量解析相结合的方法分析了锥形角对液滴自输运方向的影响机制.为更好地体现锥形角的作用效果,在此仅选择两组接触角变量 30° 和 170° ,微通道锥形角变化范围 $4^\circ \sim 8^\circ$,所得结果如图 13、14 所示.

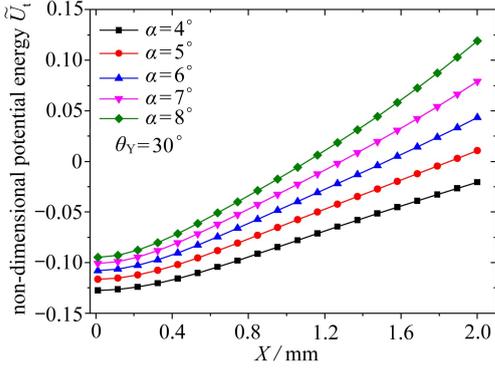


图 13 亲水性微通道锥形角对液滴能量影响

Fig. 13 Droplets' potential energy-conical angle curves in hydrophilic conical microchannels

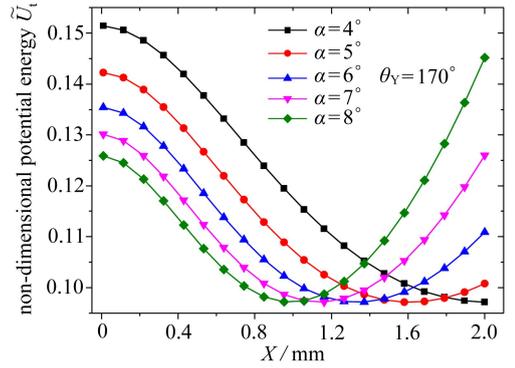


图 14 疏水性微通道锥形角对液滴能量影响

Fig. 14 Droplets' potential energy-conical angle curves in hydrophobic conical microchannels

图 13 表明,在亲水性微通道内,液滴能量随锥形角的增大(从 4° 增加到 8°)呈现整体增大趋势,同时,液滴在锥形微通道两端的能量差也增大.当微通道锥形角 $\alpha = 4^\circ$ 时,液滴在锥形微通道两端的无量纲能量差为 0.107;当微通道锥形角 $\alpha = 8^\circ$ 时,液滴在锥形微通道两端的无量纲能量差为 0.214,其无量纲能量差值增加一倍.根据前述分析,微通道两端能量差越大,液滴所受驱动力越大,运动速度越快.表明锥形角越大越有利于液滴在微通道内部自输送.

图 14 表明,在疏水性微通道内,液滴能量随锥形角的增大(从 4° 增加到 8°)整体呈现大端的能量增大、小端的能量减小的趋势,且液滴能量极值点向小端方向发生偏移.当微通道锥形角 $\alpha = 4^\circ$ 时,液滴在锥形微通道两端的无量纲能量差为 -0.054 (负号表明小端的能量大于大端),其液滴能量极值点位于 X 为 2.0 mm 处;当微通道锥形角 $\alpha = 8^\circ$ 时,液滴在锥形微通道两端的无量纲能量差为 0.019 3 (能量差值由负号变为正号),且液滴能量极值点偏移至 X 为 1.0 mm 处.由此表明,液滴在疏水性锥形微通道内向小端方向运动的可能性随锥形角的增大而增加,同时液滴停留在锥形微通道中间位置的趋势更加明显.

2.4 锥形微通道内液滴所受驱动力的影响分析

液滴在微通道内所受驱动力是判定液滴能否克服粘滞阻力开始自输运的主要依据.在此采用能量解析法分析微通道的润湿性对液滴所受驱动力的影响,根据文献[22]中能量与驱动力的关系:

$$\tilde{F} = \frac{d\tilde{U}_l}{d\tilde{X}} = \frac{d}{d\tilde{X}} \kappa^2 (S_{1l} + S_{12} - S_{13} \cos \theta_Y), \quad (13)$$

式中, \tilde{U}_l 为液滴无量纲能量; \tilde{X} 为无量纲位移; \tilde{F} 为液滴在微通道内所受无量纲作用力.

图 15~18 为微通道内液滴所受驱动力结果,其中图 15、16 为液滴在亲水性微通道内所受

驱动力随锥形角、接触角的变化曲线,图 17、18 为液滴在疏水性微通道内所受驱动力随锥形角、接触角的变化曲线。

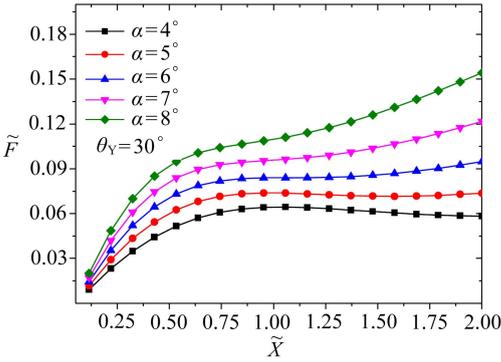


图 15 亲水性微通道内锥形角对液滴驱动力影响
Fig. 15 Droplets' driving force distributions with different conical angles in hydrophilic conical microchannels

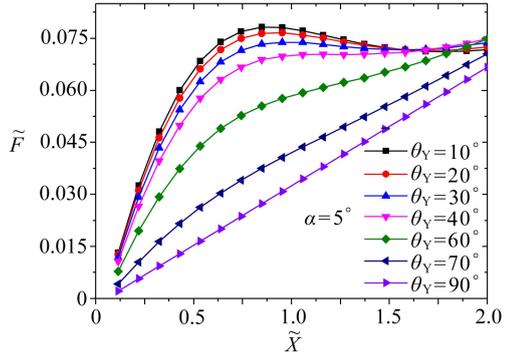


图 16 亲水性微通道内接触角对液滴驱动力影响
Fig. 16 Droplets' driving force distributions with different contact angles in hydrophilic conical microchannels

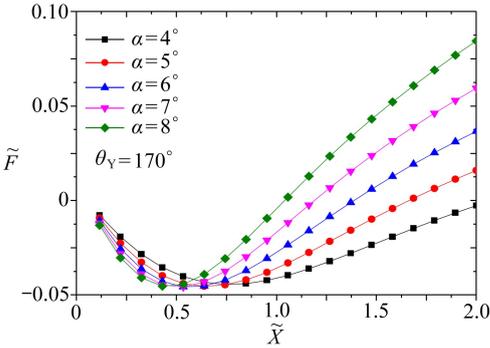


图 17 疏水性微通道锥形角对液滴驱动力影响
Fig. 17 Droplets' driving force distributions with different conical angles in hydrophobic conical microchannels

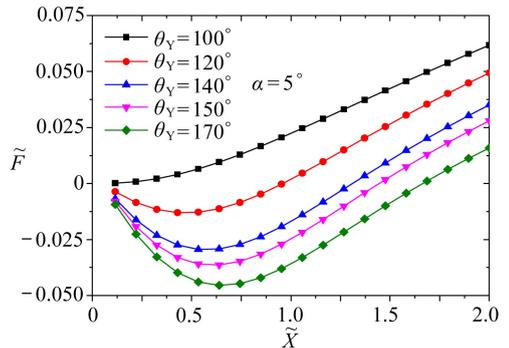


图 18 疏水性微通道接触角对液滴驱动力影响
Fig. 18 Droplets' driving force distributions with different contact angles in hydrophobic conical microchannels

图 15 表明,对于亲水性微通道,在锥形微通道润湿性相同的条件下,锥形角越大则液滴所受驱动力越大,其增大趋势与坐标 \tilde{X} 无关。由此表明,微通道的锥形角对液滴的驱动力存在影响,且锥形角越大则驱动力越大,其增大的趋势与微通道直径无关。对比不同微通道直径下液滴的驱动力增加值,可以看出,微通道直径越大,锥形角的变化所引起的液滴驱动力增加值就越大。由此表明,锥形角的作用效果随着微通道的直径变化而不同,直径越小其增大效果越差,直径越大其增大效果越好。

图 16 表明,接触角对液滴所受驱动力的影响存在区域性质,在锥形微通道的大端和小端,其影响效果很小;在锥形微通道中间部分 ($0.5 < \tilde{X} < 1.5$) 其影响效果明显。表明接触角对液滴驱动力的影响存在极值性,微通道直径太大、太小时,接触角对液滴驱动力的影响有限,在合适的量纲下,其作用效果才凸显。

图 17 表明,对于疏水性微通道,在锥形微通道润湿性相同的条件下,液滴所受驱动力随锥形角的增大并没有呈现整体增大趋势。表明锥形角对液滴驱动力的影响随着微通道的亲/疏水

性变化而有所差异.在靠近锥形微通道小端区域($\tilde{X} < 0.55$),液滴所受驱动力随锥形角的增大呈现降低趋势,这与亲水性微通道内液滴所受驱动力呈相反趋势;在靠近锥形微通道大端区域($\tilde{X} > 0.55$),液滴所受驱动力随锥形角的增大呈现整体增大趋势,且随坐标值的增大其效果增强.由此表明,锥形角对疏水性微通道内的液滴驱动力影响存在局域性,在不同量纲下作用效果可能完全相反,这对微通道的设计具有重要的意义.

图 18 表明,对于疏水性微通道,随接触角的减小液滴所受驱动力呈现整体增大趋势,且驱动力最小极值点逐渐消失.表明在疏水性微通道内,接触角对液滴所受驱动力的影响不存在局域性,均随接触角的减小,液滴所受驱动力增大.

3 结 论

液体在微通道内的自输运是自然界中存在的重要物理现象,其机理的研究具有重要的科学意义和工程实用价值.在此利用数值仿真与解析相结合的方法对锥形微通道内液滴的自输运特性及力学驱动机制进行了研究,通过论证分析得到如下结论:

1) 将液滴在锥形微通道内的数值仿真结果、实验结果及能量解析结果进行对比,发现这 3 种方法所得结论一致,表明数值仿真及能量解析法不仅能描述亲水性微通道内的液滴自输运特性,同样也适用于疏水性微通道内液滴的自输运研究.

2) 在亲/疏水性锥形微通道内,液滴自输运方向可能相同、也可能相反,具体取决于液滴与微通道内壁的接触角、锥形微通道直径及锥形角等因素的综合作用结果.在本文研究条件下,当液滴与微通道内壁的接触角在 $0^\circ \sim 150^\circ$ 时,液滴在锥形微通道内的输运方向相同,当液滴与微通道内壁的接触角大于 150° 时,液滴在亲/疏水性微通道内自输运方向相反.

3) 锥形角对液滴自输运特性具有明显的影响.对于亲水性微通道,其锥形角越大,液滴自输运特性越强;对于疏水性微通道,其锥形角越大,大端的能量越大,小端的能量越小,两端能量差值减小,且在微通道中间部位出现最小能量值,说明液滴更趋向于停留在微通道中间部位.

4) 接触角对液滴所受驱动力有明显影响.对于亲水性微通道,接触角对液滴驱动力的影响存在极值性,在合适的量纲下,其作用效果才凸显;对于疏水性微通道,接触角对液滴驱动力的影响不存在局域性,均随接触角的减小,液滴所受驱动力增大.

参考文献(References):

- [1] CHEN Hua-wei, ZHANG Peng-fei, ZHANG Li-wen, et al. Continuous directional water transport on the peristome surface of *Nepenthes alata*[J]. *Nature*, 2016, **532**: 85-89.
- [2] JU Jie, ZHENG Yong-mei, JIANG Lei. Bioinspired one-dimensional materials for directional liquid transport[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2014, **47**(8): 2342-2352.
- [3] Parker A R, Lawrence C R. Water capture by a desert beetle[J]. *Nature*, 2001, **414**: 33-34.
- [4] ZHENG Yong-mei, BAI Hao, HUANG Zhong-bing, et al. Directional water collection on wetted spider silk[J]. *Nature*, 2010, **463**: 640-643.
- [5] BAI Hao, JU Jie, SUN Rui-ze, et al. Controlled fabrication and water collection ability of bioinspired artificial spider silks[J]. *Advanced Materials*, 2011, **23**(32): 3708-3711.
- [6] Scriven L E, Sterling C V. The Marangoni effects[J]. *Nature*, 1960, **187**: 186-188.
- [7] 赵亚溥. 表面与界面物理力学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.(ZHAO Ya-pu. *Physical Mechanics of Surfaces and Interfaces*[M]. Beijing: Science Press, 2012.(in Chinese))

- [8] 赵亚溥. 纳米与介观力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.(ZHAO Ya-pu. *Nano and Mesoscopic Mechanics*[M]. Beijing: Science Press, 2014.(in Chinese))
- [9] Stone H A, Stroock A D, Adjari A. Engineering flows in small devices: microfluidics toward a lab-on-a-chip[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2004, **36**: 381-411.
- [10] Velev O D, Prevo B G, Bhatt K H. On-chip manipulations of free droplets[J]. *Nature*, 2003, **426**: 515-516.
- [11] Gennes P G, Brochard-Wyart F, Quéré D. *Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves*[M]. Reisinger A, transl. Berlin: Springer, 2003.
- [12] Srivastava N, Davenport R D, Burns M A. Nanoliter viscometer for analyzing blood plasma and other liquid samples[J]. *Analytical Chemistry*, 2005, **77**(2): 383-392.
- [13] Di C D, Wu L Y, Lee L P. Dynamic single cell culture array[J]. *Lab Chip*, 2006, **6**(11): 1445-1449.
- [14] Kota A K, Kwon G, Choi W, et al. Hygro-responsive membranes for effective oil-water separation[J]. *Nature Communications*, 2012, **3**: 1025.
- [15] 隋涛, 蒋亮, 汪家道, 等. 润湿性梯度表面上液滴运动的数值模拟[J]. 润滑与密封, 2011, **36**(10): 16-19.(SUI Tao, JIANG Liang, WANG Jia-dao, et al. Numerical simulation of droplet movement on surface with gradient wetting property[J]. *Lubrication Engineering*, 2011, **36**(10): 16-19.(in Chinese))
- [16] ZHAO Bin, Moore J S, Beebe D J. Surface-directed liquid flow inside microchannels[J]. *Science*, 2001, **291**(5506): 1023-1026.
- [17] Kim S H, Yang Y, Kim M, et al. Simple route to hydrophilic microfluidic chip fabrication using an ultraviolet (UV)-cured polymer[J]. *Advanced Functional Materials*, 2007, **17**(17): 3493-3498.
- [18] 林林, 袁儒强, 张欣欣, 等. 液滴在梯度微结构表面上的铺展动力学分析[J]. 物理学报, 2015, **64**(15): 154705-1-154705-8.(LIN Lin, YUAN Ru-qiang, ZHANG Xin-xin, et al. Spreading dynamics of liquid droplet on gradient micro-structured surfaces[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(15): 154705-1-154705-8.(in Chinese))
- [19] 殷雅俊, 陈超, 吕存景, 等. 曲率的形状梯度和经典梯度: 微纳米曲面上的驱动力[J]. 应用数学和力学, 2011, **32**(5): 509-521.(YIN Ya-jun, CHEN Chao, LÜ Cun-jing, et al. Shape gradient and classical gradient of curvatures: driving forces on micro/nano curved surface[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2011, **32**(5): 509-521.(in Chinese))
- [20] LÜ Cun-jing, CHEN Chao, CHUANG Yin-chuan, et al. Ultrafast drop movements arising from curvature gradient[J/OL]. ArXiv: 1108.4590v1, 2011[2016-10-17]. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1108/1108.4590.pdf>.
- [21] ZHENG Quan-shui, LÜ Cun-jing, HAO Peng-fei, et al. Small is beautiful, and dry[J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2010, **53**(12): 2245-2259.
- [22] LIU Jian-lin, XIA Re, LI Bing-wei, et al. Directional motion of droplet in a conical tube or on a conical fibre[J]. *Chinese Physics Letters*, 2007, **24**(11): 3210-3213.

Droplets' Directional Motion Characteristics in Conical Microchannels and Driving Mechanisms

PANG Ming-hua^{1,2}, LIU Kun¹, LIU Xiao-jun¹

(1. *Institute of Tribology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, P.R.China;*

2. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan 453003, P.R.China*)

Abstract: The droplets' directional motion characteristics in conical microchannels with different wetting properties and driving mechanisms were studied with the numerical simulation method and the energy-based analytical method to clarify the mechanisms for directional motions of liquid in nature. The effects of the conical angle, the contact angle between the droplet and the microchannel wall as well as the microchannel wetting property on the directional motion characteristics of the droplet in the conical microchannel, were obtained. The energy-based theoretical analysis and the numerical simulation both indicate that, the conical angle and the contact angle substantially influence the motion direction and the driving force of the droplet, but with different effectivenesses. The effectiveness is in holistic consistency in the hydrophilic conical microchannel, but local features emerge in the hydrophobic conical microchannel. The study provides a theoretic base for the research of directional motion mechanisms and microfluidic flow mechanisms in the solid interface.

Key words: conical microchannel; directional motion; contact angle; wetting property

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(51375132)

引用本文/Cite this paper:

逢明华, 刘焜, 刘小君. 锥形微通道内液滴自输运特性及力学驱动机制研究[J]. 应用数学和力学, 2017, **38**(3): 284-294.

PANG Ming-hua, LIU Kun, LIU Xiao-jun. Droplets' directional motion characteristics in conical microchannels and driving mechanisms[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2017, **38**(3): 284-294.