

文章编号 1004-924X(2011)08-1852-07

# 基于 PDMS 和玻璃材料的毛细管被动阀临界压力分析

杜 新<sup>1,2,3</sup>, 张 平<sup>1</sup>, 刘永顺<sup>1</sup>, 吴 一辉<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 长春理工大学 机电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 针对现有的数值仿真方法不能够准确地计算矩形截面毛细管用亲水性很好的玻璃作盖板时的临界压力, 提出了一种分析复合壁面毛细管被动阀临界压力的方法。使用 Surface Evolver(SE) 自由软件, 通过设置和实际流动相符的边界条件, 并监测在扩张段入口处接触角的变化范围, 实现了对由玻璃盖板和 PDMS 微通道构成的被动阀的临界压力的计算。此时, 接触线应该设置为可以进入到扩张段的侧壁上, 而不能固定在扩张段入口处。对于深度为 25  $\mu\text{m}$ , 宽深比为 2, 4, 8, 16 的毛细管被动阀, 得到的临界压力分别为 0.77, 0.45, 0.33, 0.24 kPa。仿真结果和转台实验结果基本相符, 证实了 SE 方法的有效性。文中分析了接触角对毛细管有效性的影响, 指出当通道和平板材料的接触角之和大于 90 时, 毛细管才能控制流动。

**关键词:** 微流体; 毛细管; 附加压力; Surface Evolver

中图分类号: T Q022.1; TH 138.52 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20111908.1852

## Burst pressure of capillary burst valve based on glass and PDMS

DU Xin<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Ping<sup>1</sup>, LIU Yong-shun<sup>1</sup>, WU Yi-hui<sup>1,2\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;  
3. Department of Mechanics Engineering, Changchun University of  
Science and Technology, Changchun 130022, China)

\* Corresponding author, E-mail: yihuiwu@ciomp.ac.cn

**Abstract:** As the current simulation methods for capillary burst valves can not exactly calculate the burst pressure when the passive valve is limited by a glass flat cover with good hydrophilicity, a method to analyze the critical pressure of the passive valve was proposed. The Surface Evolver (SE) was used to simulate the burst pressure of the microvalve composed of a glass cover and PDMS microchannels by setting the properly boundary conditions and monitoring the variation of the contact angle at the entrance of expansion section. In simulation, the liquid contact line should be set up the entrance of expansion section and come into the expansionary walls that connect the glass cover. Experiments show that the capillary burst pressures are 0.77, 0.45, 0.33 and 0.24 kPa, respectively, for the mi-

收稿日期: 2010-09-26; 修订日期: 2011-01-11.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划 B 类资助项目(No. 2006AA04Z367); 国家 863 高技术研究发展计划重点资助项目(No. 2007AA042102)

crovalves with the depth of 25  $\mu\text{m}$  and the aspect of 2, 4, 8 and 16. The obtained simulation data are well in agreement with that obtained by a rotating platform. The effect of the contact angle for the capillary burst valve was also discussed, which points out that the valves do work until the sum of the contact angles on both the flat cover and the channel wall is greater than 90  $^\circ$ .

**Key words:** microfluidic; capillary burst valve; burst pressure; surface evolver

## 1 引 言

在微流系统中, 微阀的准确设计是实现流动控制的关键。近年来, 一种使用离心力作为主要驱动力, 用毛细管被动阀阻止流动的旋转平台微流体系统由于易于控制、集成和制作而在生化分析、个人医疗等领域得到广泛关注<sup>[1-2]</sup>。这种毛细管被动阀没有活动部分, 依靠截面或表面润湿性质的突变使液体的自由液面产生阻力。

这种旋转平台微流体系统, 由于受制作工艺的限制, 往往是先制作出敞口的微通道, 再用平面盖板封装起来, 两者使用的材料一般并不相同。受微通道尺寸、形状及壁面润湿性质的影响, 液体自由液面的形状非常复杂。为求解弯曲液面的临界压力, 对于由单一材料组成的圆截面管道的毛细管被动阀已有解析解; 而对于这种有平面盖板的矩形截面毛细管微阀, 尚无解析解<sup>[3]</sup>。

Man 根据气-液-固界面的能量变化, 推导出二维情况下微阀临界压力的近似公式<sup>[4]</sup>。Liu 和 Chen 用同样理论得到了三维情况的近似公式<sup>[5-6]</sup>。Cho 根据接触线理论也得到了三维情况的近似公式<sup>[7]</sup>。在数值仿真方面, Zeng 和 Gliere 分别用 CFD 法求解 N-S 方程和有限元法求解液面的拉普拉斯方程来计算临界压力<sup>[3, 8]</sup>。在使用聚合物制作平面盖板时, 接触角通常大于 60 $^\circ$ , 这时上述计算方法和实验符合较好。然而, 当平面盖板是亲水性很好的玻璃时(接触角约 20 $^\circ$ ), 即使不施加外界压力, 也会有部分接触线越过扩张段入口, 进入到侧壁上。此时, 上述方法的边界设置和实际流动不符, 从而导致计算和实验结果相差较大。

如果微通道具有很好的亲水性, 则有利于实现微流体系统的自动进样等分析过程, 因此, 研究由亲水性好的玻璃平板封装的被动阀很有意义。

Surface Evolver (SE) 是 K. A. Brakke 开发的一种研究自由液面的高速算法, 在航天、焊接等方面得到了实际应用<sup>[9-10]</sup>。由于 SE 算法在设定接触角时只能给固定值, 而根据被动阀原理, 在扩张段入口的接触角是变化的, 因此 SE 算法不能直接得到被动阀的临界压力。本文结合接触线理论, 通过设置和实际流动相符的边界条件, 用 SE 算法实现了被动阀仿真, 通过和实验结果以及已公布的论文比较可知, 仿真结果是可信的。最后, 针对由 PDMS 和玻璃盖板组成的毛细管, 分析了毛细管的临界压力及微通道截面形状、接触角等参数的影响。

## 2 被动阀原理和 SE 计算模型

考虑一个微通道, 连接一个扩张段, 如图 1 所示。由于存在接触角滞后现象, 由 Concus-Finn 公式<sup>[11-12]</sup>可知, 在扩张段入口处, 当接触角满足  $\theta < \theta_{+}$ , 接触线停止不动。增大液体压力, 液面凸起, 当接触角满足  $\theta = \theta_{+}$ , 接触线流过扩张段, 此时毛细管达到临界压力。其中,  $\theta_{+}$  是扩张角,  $\theta_{-}$  是前进接触角。

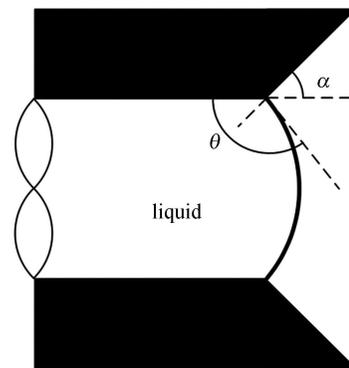


图 1 被动阀结构示意图

Fig. 1 Schematic representation of capillary burst valve in tube

SE 算法求解在给定接触角和体积(或压力)情况下,满足一定约束条件时的系统能量最小值,可看作是一种交互式有限元。在忽略重力情况下,系统总能量包括气、液、固三相之间的表面能

$$U_T = \gamma_{sg} A_{sg} + \gamma_{sl} A_{sl} + \gamma_{lg} A_{lg}, \quad (1)$$

其中,  $\gamma_{lg}$ ,  $\gamma_{sl}$ ,  $\gamma_{sg}$  和  $A_{lg}$ ,  $A_{sl}$ ,  $A_{sg}$  分别是气-液、液-固和气固相之间的表面张力和面积。

由 Young 方程,

$$\gamma_{sg} = \gamma_{sl} + \gamma_{lg} \cos \theta, \quad (2)$$

其中,  $\theta$  是接触角,代入上式可以得到

$$E = (\gamma_{sl} + \gamma_{sg}) A_{sg} - \gamma_{sl} A_{sl} \cos \theta + \gamma_{lg} A_{lg}. \quad (3)$$

上式右边第一项是常数,第二项和润湿面积有关,第三项是自由液面的表面能。

SE 算法考虑的是系统能量的极值,因此式(3)中第一项不考虑;对自由液面,SE 自动计算;对润湿界面,根据

$$E = \int_s \gamma_{sg} - \gamma_{lg} \cos \theta \, dA, \quad (4)$$

由斯托克斯定理,可将面积分转化为线积分,即计算由接触线位置(水平集约束)决定的润湿表面的能量积分。

针对三面是扩张段,一面是平面盖板的矩形截面被动阀,计算模型如图 2 所示,扩张角是 90°。对平面盖板,设置接触线可在平面上自由移动;对扩张段上壁面,接触线停留在扩张段入口;对侧壁,根据壁面的亲水情况,接触线或全部停留在入口处,或有部分进入到扩张段侧壁。

对于体积约束,由散度公式有

$$V = \int_v dV = \int_k \mathbf{k} \cdot \mathbf{n} \, dA, \quad (5)$$

其中,  $\mathbf{k}$  是盖板法线方向单位矢量。对图 2 中毛细阀,由于亲水的平面盖板在自由液面下方,液体流入到扩张段的体积可用自由液面沿  $-\mathbf{k}$  方向投影围成的体积来计算。

当计算收敛时,液面满足平衡条件,总能量达到最小,有

$$2 \gamma H N + G z N = N, \quad (6)$$

其中,  $\lambda$  是体积约束的拉格朗日乘子,  $H$  是平均曲率,  $N$  是自由液面的法向量。当不考虑重力  $G$  时,  $\lambda = 2 \gamma H$  是弯曲液面产生的附加压力。

首先给定一个较小的液体体积,当液面平衡后,用 SE 软件的  $v$  命令得到平衡时的液面附加压力。同时,检测 A 或 B 点的液面角度。不断增加液体的体积,当附加压力达到最大,或者接触线

上有一点超过前进接触角(指对扩张段壁面)时,毛细阀达到临界压力。

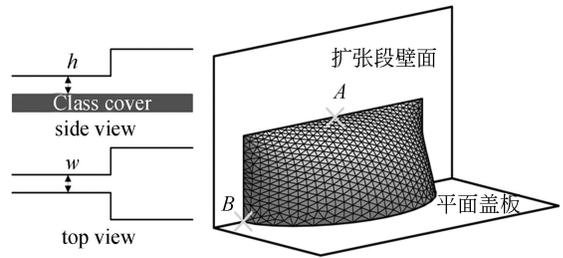


图 2 三面扩张的被动阀及液面形状

Fig. 2 Capillary burst valve expanding along channel width, depth and liquid meniscus at entrance of expansion section

### 3 实验设计

#### 3.1 微流体芯片的制作

以 PDMS 和玻璃为材料制作微流体芯片,主要工艺步骤如下<sup>[13]</sup>:用光刻、干法刻蚀等工艺步骤制得硅基模具;将与固化剂混合过的液态 PDMS 涂于钝化处理( $C_4F_8$  等离子体)后的硅模具上,加热固化、脱模,得到 PDMS 阳模;再次将与固化剂混合过的液态 PDMS 涂于钝化处理后的阳模上,加热固化、脱模,得到含有敞口微通道的 PDMS 阴模;最后将微通道与玻璃键合后得到实验所用的微流体芯片(见图 3)。

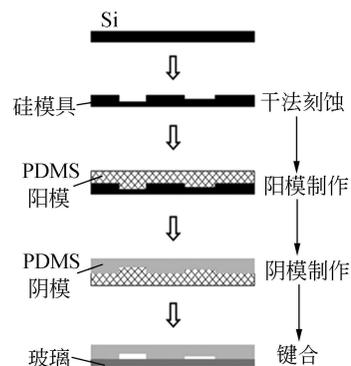


图 3 微流体芯片制作工艺示意图

Fig. 3 Process diagram of microfluidic system

#### 3.2 实验方法

本文用转台实验测量毛细阀的临界压力。把微流体芯片放在转台上(见图 4),在入口注入染色的去离子水,转台高速转动,液体受离心力作用

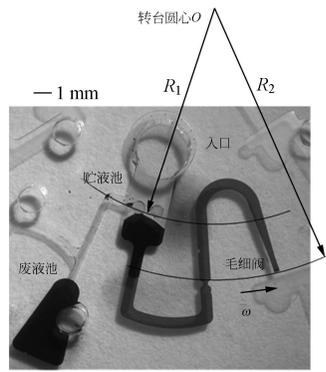


图 4 转台实验示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental device

进入贮液池, 多余液体流到左侧废液池, 液面在  $R_1$  处停下。停止转动, 在表面张力作用下, 液体通过微通道, 到达毛细阀 ( $R_2$  处) 后停下。转台再次转动, 当离心力足够大时, 毛细阀打开, 液体进入扩张段。离心力的计算如下:<sup>[2]</sup>

$$p = \frac{1}{2} \omega^2 (R_2^2 - R_1^2), \quad (7)$$

其中,  $\omega = 2\pi n/60$  是角速度,  $n$  是转速,  $R_2$  和  $R_1$  是液体两端距离转台圆心的距离。

当微阀打开时, 液柱两端压差为

$$p = p_{\text{valve}} + p_{\text{capillary}}, \quad (8)$$

其中,  $p_{\text{valve}}$  是微阀临界压力;  $p_{\text{capillary}}$  是液柱末端液面 ( $R_1$  处) 产生的附加压力, 可根据下式得出<sup>[7]</sup>:

$$P_{\text{capillary}} = \lg \left[ \frac{\cos \theta_{\text{PDMS}} (w + 2h) + \cos \theta_{\text{glass}} w}{wh} \right], \quad (9)$$

其中,  $\theta_{\text{PDMS}}$ ,  $\theta_{\text{glass}}$  是 PDMS 和玻璃的接触角;  $w$ ,  $h$  是通道宽度和高度。

由公式 (7) ~ (9), 可得到微阀打开时的临界转速。

$$n = \sqrt{\frac{1800(p_{\text{valve}} + p_{\text{capillary}})}{2(R_2^2 - R_1^2)}}. \quad (10)$$

## 4 结果和讨论

### 4.1 验证

为验证 SE 算法的正确性, 本文以文献 [3] 中公布的具体参数和实验及有限元仿真结果为例, 和 SE 仿真结果进行比较 (图 5)。微阀结构如图 2 所示, 敞口微通道和平面盖板的材料分别是 Si 和 PDMS, 接触角  $\theta_A$  分别取 60 和 80。毛细阀扩

张角是 90°, 深 15  $\mu\text{m}$ 。试剂为去离子水。从给出的实验结果看 (文献 [3] 中图 6), 由于盖板的接触角较大, 微阀打开前, 接触线几乎不会从扩张段侧壁流出, 因此在边界设置时可认为除平面盖板以外的接触线全部停留在扩张段入口。

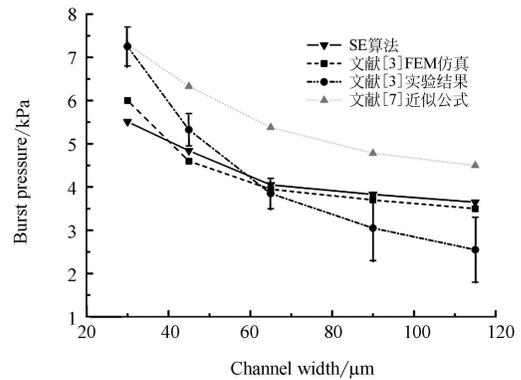


图 5 微阀临界压力和微阀宽度的关系

Fig. 5 Burst pressure vs. channel width

通过图 5 可以看到, 随着通道宽度的增加, 实验测得的毛细阀临界压力和仿真结果都逐渐减小。SE 计算结果和有限元计算结果是接近的; 当宽度在 45~ 90  $\mu\text{m}$  时, 和实验符合较好。当毛细阀宽度 > 90  $\mu\text{m}$  时, 计算结果偏大。考虑 PDMS 比较软, 在压力作用下会鼓起, 横截面积增大导致实验测得的附加压力要小于仿真结果, 因此计算结果是合理的。当宽度 < 30  $\mu\text{m}$  时, 两者相差较大, 说明当尺度较小时, 还有更复杂的机理需要研究。

图 5 中还加入近似公式<sup>[7]</sup> (点线) 的计算结果。在宽度 > 30  $\mu\text{m}$  时, 近似公式的值比实验结果大。由图 2 可知, 在扩张段入口的液面, 并不是所有位置的接触角都相同, 而近似公式采用固定接触角, 实际上是假设在接触线所有位置上接触角都达到  $\theta_A + 90^\circ$ , 因此近似公式的计算结果总体上偏大。

### 4.2 基于 PDMS-玻璃的毛细阀的压力

设对 PDMS 和玻璃的前进接触角  $\theta_A$  为 120° 和 20°, 后退接触角为 105° 和 8°。实验表明, 对于由 PDMS 通道和玻璃盖板构成的微通道, 液体在毛细力作用下前进到阀处停止, 液面位置如图 6 所示。因为液柱后端在尺寸较大的注入室, 附加压力可近似为 0, 由液面前后压力平衡可知, 在毛细阀处液柱前端液面产生的附加压力也为 0。同时可以看到, 靠近玻璃平板的液体已经流过毛细

阀,进入到扩张段的侧壁,接触线不会全部停留在扩张段入口位置。

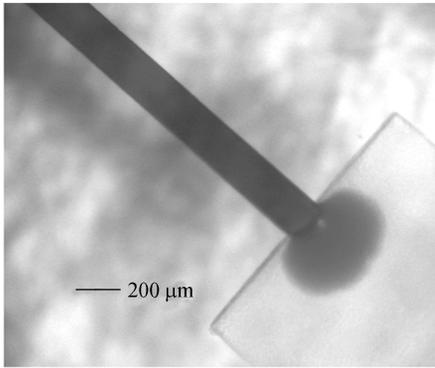


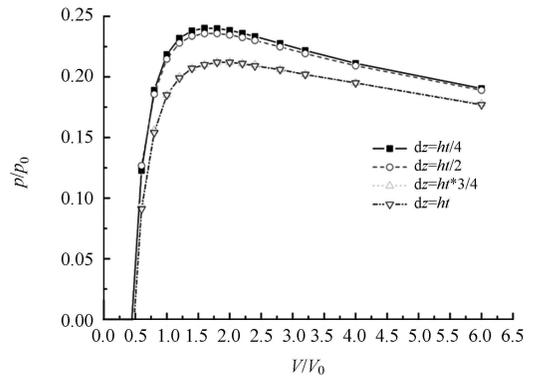
图 6 在有玻璃盖板的毛细阀上的液面位置

Fig. 6 Liquid meniscus at microvalve with a glass cover

目前的数值方法都是假设微通道上的接触线全部停留在扩张段入口,显然和实际情况不符。事实上,对于这种情况下的毛细阀,如果接触线停留在侧壁上,使用 SE 算法是无法收敛的。本文将其设在侧壁上,部分接触线可以沿着扩张段的侧壁前进,可更好地模拟实际流动。

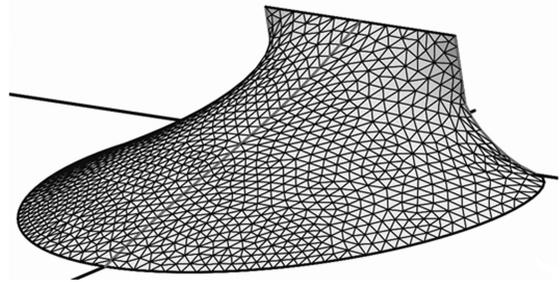
在仿真中发现,如果设置在侧壁的接触线全部可动,在体积很小的时候,计算很容易发散。由于实验中也看不清楚接触线是否完全流过侧壁,本文分别假设在扩张段入口的垂直侧壁,接触线最多有  $ht/4$ ,  $ht/2$ ,  $3ht/4$  和  $ht$  部分进入扩张段,  $ht$  指侧壁高度。图 7 (a) 给出不同体积下压力的变化关系,图 7 (b) 是在限制高度为  $3ht/4$  条件下,达到临界压力时的自由液面。可以看到,当进入扩张段的液体体积较小时,4 种假设得到的压力几乎相等,说明开始只有少部分接触线流过侧壁,上述限制不起作用。随着体积增大,压力增加。对于限制为  $3ht/4$  和  $ht$  两种情况,曲线几乎重合,得到的压力极值也是最小的。这说明当该种毛细阀达到临界压力时,接触线还有部分停留在扩张段入口的侧壁上,因此本文限制接触线在侧壁最多有  $3/4$  高度部分可动不会影响仿真结果。当压力达到极值时, A 点的接触角(指对扩张段壁面)小于前进接触角,因此仿真时,在上壁面的接触线可设为停留在扩张段入口不动。

图 8 给出对于不同宽深比的毛细阀的实验和仿真结果的比较。毛细阀深度为 25 μm,宽度为 50~ 400 μm。液柱设计尺寸  $R_2$  和  $R_1$  分别是



(a) 毛细阀临界压力和体积的关系

(a) Burst pressure vs. liquid volume



(b) 临界压力时的液面

(b) Meniscus under burst pressure

图 7 毛细阀的临界压力

Fig. 7 Burst pressure of capillary burst valve

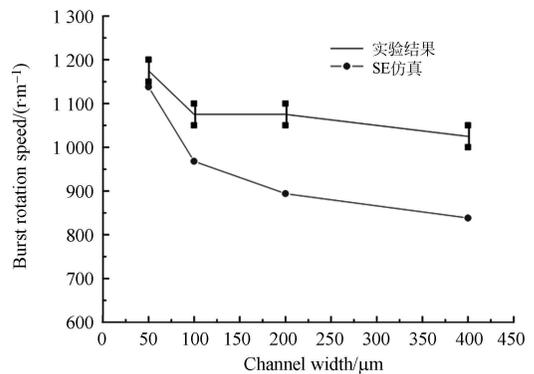


图 8 临界转速和阀宽度的关系

Fig. 8 Burst rotational speeds vs. channel width

20, 15 mm。贮液池( $R_1$  处)宽度和深度是 3 mm, 125 μm。经过两次脱模,PDMS 微通道约有 4% 的收缩。液体是染色后的去离子水。对宽深比 2, 4, 8 和 16 的毛细阀,得到的临界压力分别为 0.77, 0.45, 0.33 和 0.24 kPa。实验和仿真结果都表明,阀打开所需的转速随着宽深比的增加而

不断减小。对于宽度为 50, 100  $\mu\text{m}$  的阀, 实验和仿真结果复合很好; 通道为 200, 400  $\mu\text{m}$  时, 偏差约 20%。总体上仿真结果要小于实验结果, 认为这是由于在试验中转台转动停止后, 液体从  $R_1$  处前进到  $R_2$  处时, 由于液体体积不变, 贮液池的液面会偏离  $R_1$  一些, 导致液柱径向长度变短。阀宽度越大, 这种偏离越大一些。

#### 4.3 对平板毛细阀接触角的限制

当接触线流过侧壁, 毛细阀是否还具有控制流动的功能不仅和平板的接触角有关, 还和壁面的接触角有关。图 9 给出不同接触角下毛细阀状态的仿真结果。阴影部分为失效范围。可以看到两个接触角的和需要大于  $90^\circ$ , 毛细阀才能有效

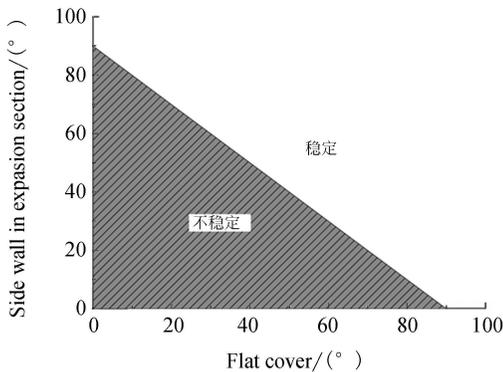


图 9 毛细阀稳定性

Fig. 9 Stability of capillary burst valve

工作。当接触线流过侧壁时, 相当于液体在由侧壁和平板构成的直角沟槽内流动, 在百微米尺度下, 可忽略重力影响, 此时流动与微重力下流动类似, 因此符合 Finne 第二定律<sup>[4]</sup>。文献[15-16]表明此时液体将沿着直角沟槽一直前进, 这种毛细阀总是失效的。

## 5 结 论

本文提出一种分析复合壁面毛细管被动阀临界压力的新方法。使用 Surface Evolver 算法对不同体积下扩张段入口处的液面进行仿真, 并根据接触线理论, 通过监测在扩张段入口处的接触角的变化范围来判断微阀是否打开。对于由 PDMS 通道和玻璃平板组成的毛细阀, 由于玻璃盖板具有很好的亲水性, 有部分接触线会越过扩张段入口, 进入到侧壁上。SE 仿真时, 需要设置和实际流动相符的边界条件。以 PDMS 微通道和玻璃平板构成的毛细阀为例, 对于深度为 25  $\mu\text{m}$ , 宽深比为 2, 4, 8 和 16 的毛细阀, 计算出临界压力分别为 0.77, 0.45, 0.33, 0.24 kPa。制作了相应的微流体芯片, 并通过转台实验进行了验证, 实验和仿真结果基本相符, 证明 SE 算法是有效的。本文还分析了毛细阀的有效性, 指出当通道和平板材料的接触角之和大于  $90^\circ$  时, 平板毛细阀才能控制流动。

#### 参考文献:

- [1] DUCR E J, HAEBERLE S, LUTZ S, *et al.*. The centrifugal microfluidic Bio-Disk platform[J]. *Microchem. Microeng.*, 2007, 17 (7): 103-115.
- [2] SIEGRIST J, GORKIN R, CLIME L, *et al.*. Serial siphon valving for centrifugal microfluidic platforms [J]. *Microfluid Nanofluid.*, 2010, 9(1): 55-33.
- [3] GLIERE A, DELATRE C. Modeling and fabrication of capillary stop valves for planar microfluidic systems[J]. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2006, 130-131: 601-608.
- [4] MAN P F, MASTRANGELO C H, BURNS M A, *et al.*. Microfabricated capillary driven stop valves and sample injector, in: MEMS Conference, Heidelberg, Germany, January 25-29, 1998.
- [5] LEU T S, CHANG P Y. Pressure barrier of capillary stop valves in micro sample separators [J]. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2004, 115(2-3): 508-515.
- [6] CHEN J M, HIANG P C, LIN M G. Analysis and experiment of capillary valves for microfluidics on a rotating disk[J]. *Microfluid Nanofluid.*, 2008, 4 (5): 427-437.
- [7] CHO H, KIM H Y, KANG J Y, *et al.*. How the capillary burst microvalve works[J]. *J. Colloid Interface Sci.*, 2007, 306(2): 379-385.
- [8] ZENG J, BANERJEE D, DESHPANDE M, *et al.*. Design analysis of capillary burst valves in centrifugal microfluidics[C]. *Micro Total Analysis Systems 2000, Enschede: Kluwer Academic Publishers*, 2000: 579-582.
- [9] BRAKKE K A. The surface evolver, Version 2.30. <http://www.susqu.edu/brakke/>. January 1,

- 2008.
- [ 10] 王毅, 常小庆. 微重力环境下推进剂贮箱中三维气液平衡界面的数值模拟[J]. 火箭推进, 2007, 33(3): 31-35.  
WANG Y, CHANG X Q. Numerical simulation of three-dimensional gas-liquid equilibrium interfaces in the propellant tank under microgravity condition [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2007, 33(3): 31-35. (in Chinese)
- [ 11] BONN D, EGGERS J, INDERKEU J, *et al.*. Wetting and spreading [J]. *Reviews of modern physics*, 2009, 81(2): 739-805.
- [ 12] CONCUS P, FINN R. On capillary free surfaces in the absence of gravity[J]. *Acta. Math.*, 1974, 132(1): 177-198.
- [ 13] 张平, 胡亮红, 刘永顺. 主辅通道型微混合器的设计和制作[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(4): 872-879.  
ZHANG P, HU L H, LIU Y S. Design and fabrication of micromixer with main-assist channels[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 872-879. (in Chinese)
- [ 14] WEISLOGEL M M, LICHTER S. Capillary flow in an interior corner[J]. *J. Fluid Mech.*, 1998, 373(1): 349-378.
- [ 15] SEEMANN R, BRINKMANN M, KRAMER E J, *et al.*. Wetting morphologies at microstructured surface[J]. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2005, 102(6): 1848-52.
- [ 16] ZIMMERMANN M, HUNZIKER P, DELMARCHE E. Valves for autonomous capillary systems[J]. *Microfluid Nanofluid.*, 2008, 5(3): 395-402.

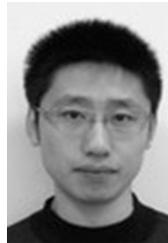
#### 作者简介:



杜新(1975-),男,山东潍坊人,博士研究生,2001年于中国科学院力学所获得硕士学位,主要研究方向为微流体控制。E-mail: duxin@cust.edu.cn



张平(1958-),女,吉林长春人,副研究员,硕士生导师,1982年于吉林大学获得学士学位,主要研究方向为硅与非硅 MEMS 工艺技术。E-mail: zhangpingres@163.com



刘永顺(1982-),男,吉林长春人,助理研究员,2005年于吉林大学获得学士学位,主要研究方向为 MEMS 微加工工艺。E-mail: liuyongshun@hotmail.com

#### 导师简介:



吴一辉(1965-),女,浙江温州人,研究员,博士生导师,1996年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要研究方向为微机电系统。E-mail: yihuiwu@ciomp.ac.cn