

文章编号: 1672-9897(2010)03-0034-06

气泡对无阀微泵动态特性影响的实验研究

蒋丹¹, 李松晶², 杨平¹

(1. 电子科技大学机电学院, 成都 611731; 2. 哈尔滨工业大学机电学院, 哈尔滨 150001)

摘要:采用高速摄像机拍摄了收缩管/扩张管型无阀压电微泵泵腔中气泡的变化,包括进入、移动、合并和分离等过程。同时,采用压阻式微型压力传感器测试无阀压电微泵泵腔的压力脉动。实验结果表明气泡进入泵腔之后,流体有效体积弹性模量和无阀微泵压力脉动幅值明显减少,气泡的进入使无阀微泵的工作性能大大降低,甚至导致微泵无法正常工作;而气泡移动、合并和分离对流体有效体积弹性模量和微泵的动态特性影响较小。

关键词:无阀微泵; 气泡; 高速摄像; 压力脉动

中图分类号: TH137.51 **文献标识码:** A

Experimental study on the influence of bubbles on dynamic characteristics of valve-less micropump

JIANG Dan¹, LI Song-jing², YANG Ping¹

(1. School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The actions of bubbles in a piezoelectric valve-less nozzle/diffuser micropump, including entrance, movement, combination and separation in the pump chamber, are recorded by a high speed video camera. A piezoresistive micro pressure transducer is used to measure the pressure pulsations in the piezoelectric valve-less micropump chamber. Experimental results show that the effective bulk modulus of fluid and the amplitude of pressure pulsations in the valve-less micropump decrease significantly with the bubbles into the pump chamber. The entrance of bubbles can lead to performance deterioration and even complete failure of the micropump. However, the movement, combination and separation of bubbles have little effect on the effective bulk modulus of fluid and the dynamic characteristics of micropump.

Key words: valve-less micropump; bubble; high-speed video; pressure pulsation

0 引言

无阀微泵可以实现微小流量流体的精确输运,是微流控系统的重要组成部分。由于具有体积小、结构简单和响应快等优点,无阀微泵在微机电系统、医疗器械和生化工程等领域具有越来越广阔的应用前景^[1-3]。但是,当泵腔中存在气泡时,气泡对微泵输出性能有很大的影响。当泵腔中气泡达到一定体积时,微泵甚至无法正常工作,因此研究气泡对微泵性能的影响是很重要的^[4-5]。

Richter 等^[6]为了研究微泵的抗气泡能力,将气泡(体积为 8 μl)从入口送入泵腔,压缩比(泵腔死区体积/泵腔总体积)小的微泵立即停止工作,而压缩比

大的微泵却可以继续泵送液体。Wijngaart 等^[7]研制了第一个可自灌装的无阀微泵,该微泵可用于泵送液体和气体,并具有抗气泡能力。中科院光电技术研究所王皓^[8]从热力学角度出发,采用气泡的卡诺循环和空化激波的热效应对微泵中气泡现象进行理论解释。同时指出泵腔气泡将造成微泵的动力缓冲与滞后,但是文章没有做相应的实验研究。

为了研究气泡对微泵动态性能的影响,设计制作以超精密加工为基础的收缩管/扩张管型无阀压电微泵,并介绍实验装置和测试系统。同时对泵腔中气泡进行实验研究,包括气泡运动的拍摄和泵腔压力脉动测试。

1 实验装置与测试系统

无阀压电微泵由入口/出口、收缩管/扩张管、振动薄膜和泵腔组成。由于流体通过收缩管和扩张管时所受的阻力不同,所以存在一定的流量差,使收缩管和扩张管能够动态控制流体流动方向,最终在宏观上实现微泵连续定向输送流体^[5]。

为了观察泵腔中气泡体积的变化,收缩管/扩张管型无阀压电微泵采用无色透明的有机玻璃为基材。整个泵体采用机械加工,泵腔和收缩管/扩张管通过超精密加工设备“精雕机”制作完成(由吉林大学机械科学与工程学院加工制造)。安装微型压力传感器的无阀微泵外观如图1所示,其中黑色的O型圈起密封作用。微泵的锥管尺寸示意图如图2所示,几何参数如表1所列,其压电薄膜选用直径为7mm的压电陶瓷片PZT-5H,黄铜基片的直径为12mm。

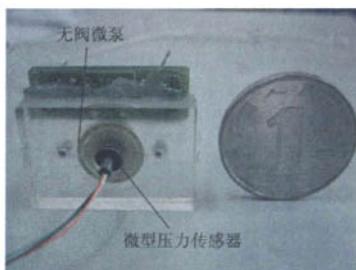


Fig. 1 Outside view of valve-less micropump

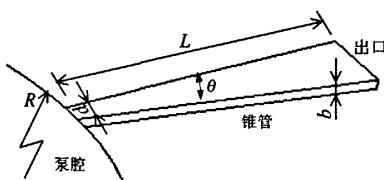


Fig. 2 Schematic of micropump cone tube

表 1 微泵几何参数

参数	值
锥管最小宽度 $d/\mu\text{m}$	150
锥管长度 L/mm	3
锥管角度 $\theta/(^\circ)$	8
锥管深度 $b/\mu\text{m}$	200
泵腔深度/ μm	500
泵腔半径 R/mm	5

实验原理图如图3所示,包括气泡的观测以及泵腔压力脉动测试。该实验系统由驱动电源、检测部件、图像采集等组成。无阀微泵的驱动电源采用XFD-8B超低频信号发生器,本实验采用占空比为1:1的连续方波作为驱动电压。检测部件为美国

Kulite公司的压阻式微型压力传感器XCL-080,用来测量微泵泵腔的压力脉动。它具有体积小、响应快、测量精度高等优点,可以满足泵腔压力脉动测试要求。该传感器头部直径为2mm,其工作量程为0~ $1.7 \times 10^5 \text{ Pa}$ (绝压)。该微型压力传感器要求流体介质为非导电性、无腐蚀性的液体或气体,因此本实验采用去离子水作为无阀微泵的工作介质。图像采集采用高速摄像机(Fastcam Ultima APX)记录微泵泵腔气泡的变化,其最高拍摄速度可达120000帧/s。

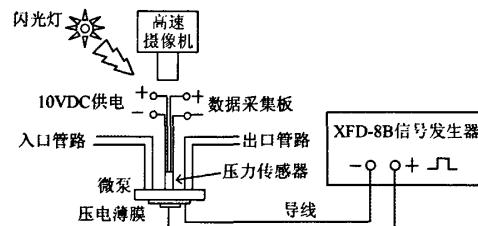


图3 无阀微泵气泡实验原理图
Fig. 3 Principle scheme for the experiment of bubbles in the valve-less micropump

2 实验结果与分析

实验中对气泡的进入、移动、合并和分离等过程进行了图像拍摄以及泵腔压力脉动测试。由于泵腔处需要安装微型压力传感器和考虑密封问题,因而无法观测到泵腔中心处的气泡体积变化。

流体有效体积弹性模量 K_e 可表示为^[9]:

$$K_e = \frac{K_g K_l}{\frac{V_b}{V}(K_l - K_g) + K_g} \quad (1)$$

其中, K_g 为气体的体积弹性模量, K_l 为液相体积弹性模量, V_b 为气泡体积, V 为流体体积。由此可见,当气泡体积 V_b 增加时,液体的有效体积弹性模量 K_e 降低,将会影响系统动态过程。

2.1 气泡的进入

对两个气泡先后进入泵腔的整个过程进行压力脉动测试和气泡图像拍摄,其驱动电压幅值为50V,频率为500Hz。第1个气泡体积约为0.009ml,第2个气泡体积约为0.030ml。图4为两个气泡进入泵腔整个过程的压力变化(p_c)实验曲线;图5~9为各时间段放大图,可以看出气泡体积的增加导致流体有效体积弹性模量降低,对微泵压力动态特性和工作性能影响很大。

图5和6分别为开启驱动电源时泵腔压力脉动曲线及其放大图,可以看出初始泵腔压力为大气压($1 \times 10^5 \text{ Pa}$),当启动电源之后,泵腔压力脉动幅值逐渐

增加,最大压力为 $1.073 \times 10^5 \text{ Pa}$,最小压力为 $9.164 \times 10^4 \text{ Pa}$,其脉动幅值为 $1.566 \times 10^4 \text{ Pa}$ 。

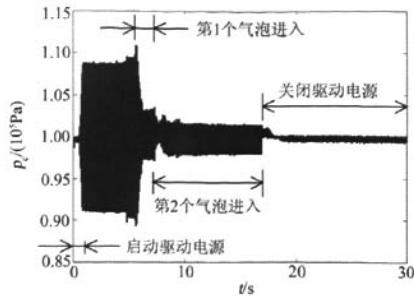


图4 两个气泡进入泵腔时压力变化曲线

Fig. 4 Pressure pulsations with two bubbles into the pump chamber

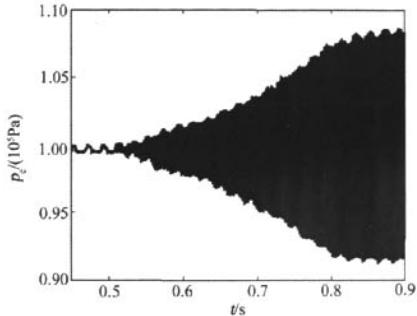


图5 开启电源时压力脉动曲线

Fig. 5 Pressure pulsations when turning on power

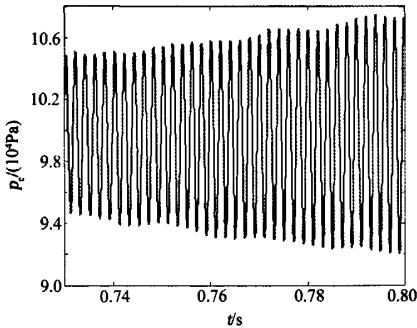


图6 开启电源时压力脉动曲线放大图

Fig. 6 Zoomed figure of pressure pulsations when turning on power

图7为第1个气泡进入时泵腔压力脉动曲线。由图可知,当第1个气泡进入时,压力脉动振幅减小。在5.54s时刻,最大压力为 $1.093 \times 10^5 \text{ Pa}$,最小压力为 $8.996 \times 10^4 \text{ Pa}$,其脉动幅值为 $1.934 \times 10^4 \text{ Pa}$;在5.64s时刻,泵腔最大压力为 $1.058 \times 10^5 \text{ Pa}$,泵腔最小压力为 $9.514 \times 10^4 \text{ Pa}$,泵腔压力脉动幅值为 $1.066 \times 10^4 \text{ Pa}$ 。当第1个气泡完全进入泵腔之后,最大压力为 $1.028 \times 10^5 \text{ Pa}$,最小压力为 $9.695 \times 10^4 \text{ Pa}$,其泵腔压力脉动幅值减少到 $5.85 \times 10^3 \text{ Pa}$ 。

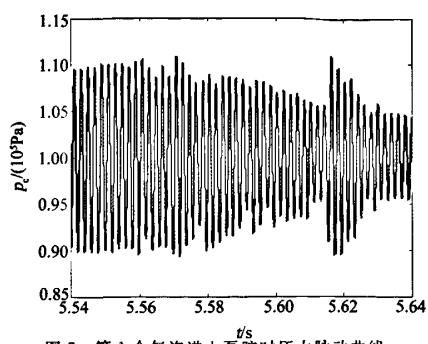


图7 第1个气泡进入泵腔时压力脉动曲线

Fig. 7 Pressure pulsations with the first bubble into the pump chamber

图8为第2个气泡进入时泵腔压力脉动曲线。由图可知,当第2个气泡进入时,泵腔压力脉动振幅进一步减小。在7.35s时刻,最大压力为 $1.015 \times 10^5 \text{ Pa}$,最小压力为 $9.943 \times 10^4 \text{ Pa}$,压力脉动幅值为 $2.07 \times 10^3 \text{ Pa}$ 。

图9为关闭驱动电源时泵腔压力脉动曲线。在16.91s时刻,驱动电源关闭,此时泵腔压力恢复到大气压。通过以上实验可知,气泡进入泵腔会引起微泵压力脉动幅值明显减小。因此,为了使微泵工作性能稳定,须尽可能避免气泡进入泵腔。

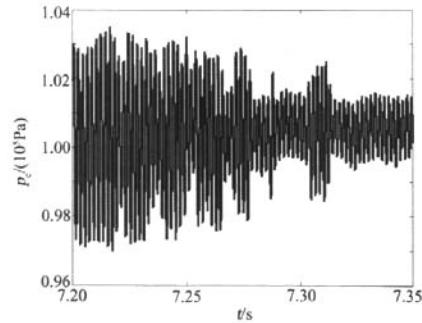


图8 第2个气泡进入泵腔时压力脉动曲线

Fig. 8 Pressure pulsations with the second bubble into the pump chamber

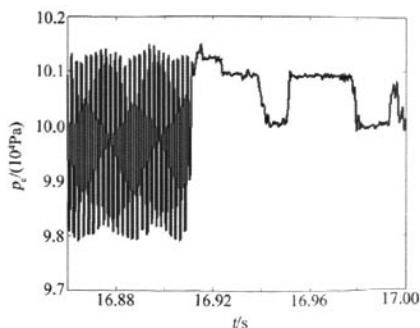


图9 关闭电源时压力脉动曲线

Fig. 9 Pressure pulsations when turning off power

图 10(a)~(i) 为高速摄像机拍摄的两个气泡进入微泵泵腔全过程, 其拍摄速度为 2000 帧/s。图 10(a)~(d) 为第 1 个气泡进入全过程, 图 10(e)~(i) 为第 2 个气泡进入全过程。在初始时刻, 泵腔中存在很多小气泡, 泵腔右侧为入口锥管, 左侧为出口锥管, 如

图 10(a)所示; 第 1 个气泡通过入口锥管进入, 如图 10(b)所示; 第 1 个气泡继续进入泵腔, 泵腔中气泡体积迅速增加, 如图 10(c)所示; 第 1 个气泡完全进入泵腔, 气泡的体积约为泵腔体积(0.04ml)的 1/4, 这与第 1 个气泡实际体积基本吻合, 如图 10(d)所示。

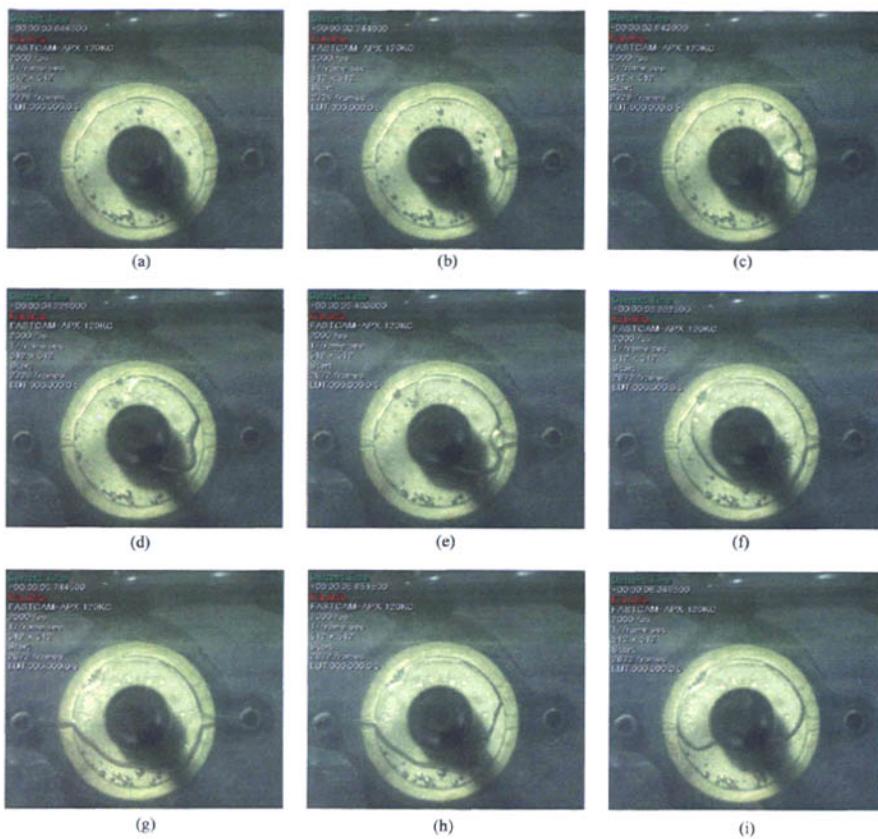


图 10 两个气泡进入泵腔过程
Fig. 10 Two bubbles into the pump chamber

第 2 个气泡开始通过人口锥管进入泵腔, 如图 10(e)所示; 当第 2 个气泡继续进入泵腔时, 泵腔中气泡体积继续增加, 如图 10(f)所示; 当气泡运动到泵腔出口处, 部分气泡从出口锥管流出, 如图 10(g)所示; 当第 2 个气泡已经完全进入微泵泵腔时, 部分气泡继续从微泵出口流出, 如图 10(h)所示; 当达到平衡时, 整个大气泡滞留在泵腔中, 如图 10(i)所示。

2.2 气泡的移动

由于微泵泵腔壁面四周为低流速区域, 泵腔中的气泡在压电薄膜的驱动下往泵腔壁面移动, 其移动过程如图 11 所示, 拍摄速度为 4000 帧/s。驱动电压幅值为 80V, 驱动频率为 250Hz。初始时刻, 气泡位于靠近泵腔中心位置, 如图 11(a)所示; 图 11(b)为在压

电薄膜振动过程中, 气泡向泵腔边壁移动; 图 11(c)为气泡到达泵腔边壁。

2.3 气泡的合并

如图 12 所示, 泵腔中两个气泡合并为一个大气泡, 其拍摄速度为 4000 帧/s。驱动电压幅值为 80V, 频率为 250Hz。初始时刻, 泵腔左侧两个气泡距离约为 1mm, 如图 12(a)所示; 在薄膜振动过程中, 两个气泡开始合并, 如图 12(b)所示; 最后时刻, 两个气泡合成为一大气泡, 如图 12(c)所示。

2.4 气泡的分离

在微泵泵腔中, 大气泡有时被分离为很多小气泡, 如图 13 所示, 其拍摄速度为 4000 帧/s。驱动电压幅值为 80V, 驱动频率为 250Hz。初始时刻, 大气

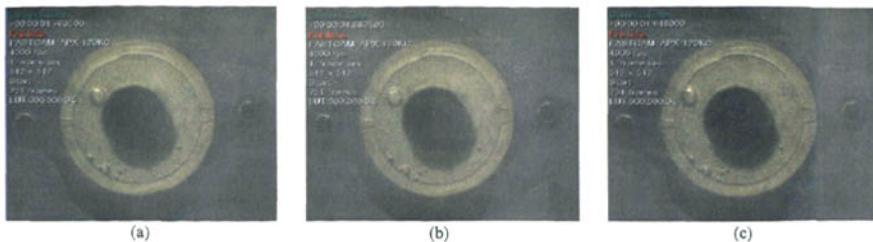


图 11 泵腔中气泡的移动过程
Fig. 11 Movement of bubble in the pump chamber

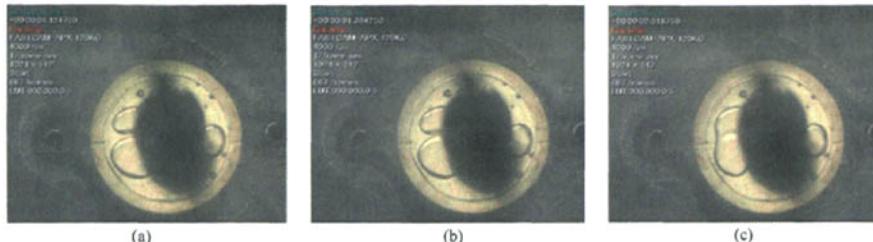


图 12 泵腔中气泡的合并过程
Fig. 12 Combination of bubble in the pump chamber

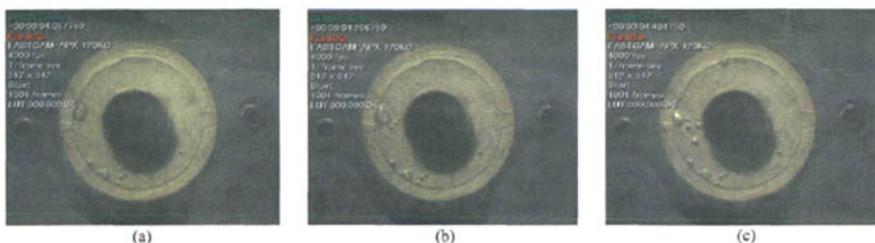


图 13 泵腔中气泡的分离过程
Fig. 13 Separation of bubble in the pump chamber

泡位于泵腔的边壁,如图 13(a)所示;当大气泡运动到微泵出口锥管处,由于出口处流速很大,大气泡被分离为很多小气泡,分离出的小气泡或直接进入锥管并从泵腔出口泵出,或向泵腔中心处运动,如图 13(b)所示;由于小气泡的分离,大气泡体积明显减小,如图 13(c)所示。

通过以上实验可知,由于泵腔中流体的有效体积弹性模量没有改变,气泡在收缩管/扩张管型无阀压电微泵泵腔中移动、合并和分离的过程中,压阻式微型压力传感器测量到的泵腔压力脉动幅值和频率没有明显变化。因此泵腔中气泡移动、合并和分离过程对收缩管/扩张管型无阀压电微泵压力动态特性影响较小。

3 结 论

实验结果表明当第 1 个气泡(体积为 0.009ml, 约为泵腔体积的 1/4)进入泵腔时,泵腔压力脉动幅值从 1.934×10^4 Pa 减少到 5.85×10^3 Pa;其后第 2

个气泡(体积为 0.030ml)进入,压力脉动幅值进一步减小到 2.07×10^3 Pa。可见由于气泡体积的增加导致流体有效体积弹性模量降低,对微泵动态特性和工作性能影响较大,甚至使微泵无法正常工作。因此,为了保证微泵工作性能稳定,须尽可能避免气泡进入泵腔。

在气泡移动、合并和分离的过程中,由于泵腔中流体的有效体积弹性模量没有改变,因此压阻式微型压力传感器测量到的泵腔压力脉动幅值和频率没有明显变化。

参 考 文 献:

- [1] WOIAS P. Micropumps-past, progress and future prospects[J]. Sensors and Actuators B. 2005, 105(1): 28-38.
- [2] IZZO I, ACCOTO D, MENCIASSI A, et al. Modeling and experimental validation of a piezoelectric micropump with novel no-moving-part valves[J]. Sensors and Actuators A, 2007, 133(1): 128-140.

(下转第 62 页)

型。这是由于二者表面粗糙度不同造成的,柔性模型的表面粗糙度大于刚性模型;

(5) 刚性模型的尾翼对俯仰力矩的影响较大。

参考文献:

- [1] LI Y W, MEYER Nahon and INNA Sharf. Dynamics modeling of flexible airships[C]//48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 2007.
- [2] PARSONS R R. Development and flight experience of a manned thermal airship[C]// Proceedings of the AIAA lighter than air technology conference, AIAA, 1975: 75-925.
- [3] LIU J M, LU C J, XUE L P. Investigation of airship aeroelasticity using fluid-structure interaction[J]. Journal of Hydrodynamics, 2008, 20(2):164-171.
- [4] 顾正铭. 平流层飞艇蒙皮材料的研究[J]. 航天返回与遥感, 2007, 28(1):62-66.
- [5] 王文隽, 李勇等. 飞艇气囊压力与蒙皮张力的估算[J]. 宇航学报, 2007, 28(5):1109-1112.
- [6] 谢飞, 叶正寅. 蒙皮波动对飞艇阻力的影响[J]. 工程力学, 2009, 1(26):250-256.

作者简介:



陈 华(1979-),女,研究实习员,博士生。主要研究方向为低速风洞实验技术、飞行器大振幅运动非定常气动力等。通信地址:江苏省南京市南京航空航天大学航空宇航学院空气动力学系(210016);电话:13770613775;E-mail: huachen@nuaa.edu.cn。

(上接第38页)

- [3] LIU R H, YANG J N, LENIGK R, et al. Self-contained, fully integrated biochip for sample preparation, polymerase chain reaction amplification, and DNA microarray detection[J]. Analytical Chemistry, 2004, 76 (7): 1824-1831.
- [4] LINNEMANN R, WOIAS P, SENFFT C D, et al. A self-priming and bubble-tolerant piezoelectric silicon micropump for liquids and gases[C]// Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) 1998: 532-537.
- [5] ANDERSSON H, VAN DER WIJNGAART W, NILSSON P, et al. A valve-less diffuser micropump for microfluidic analytical systems[J]. Sensors and Actuators B, 2001, 72(3):259-265.
- [6] RICHTER M, LINNEMANN R, WOIAS P. Robust design of gas and liquid micropumps[J]. Sensors and Actuators A, 1998, 68(1-3):480-486.
- [7] VAN DER WIJNGAART W, ANDERSSON H, ENOKSSON P, et al. The first self-priming and bi-directional valve-less diffuser micropump for both liquid and gas[C]// Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2000: 674-679.
- [8] 王皓. 微流控芯片的微机械往复无阀泵技术研究[D]. 中国科学院光电技术研究所博士论文, 2005: 89-98.
- [9] WYLIE E B, STREETER V L. Fluid transients in systems[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1993.

作者简介:



蒋 丹(1980-),女,四川遂宁人,电子科技大学机电学院讲师。研究方向:流体传动与控制。通讯地址:成都市高新区西源大道2006号电子科技大学机电学院;E-mail: jdan2002@163.com。