

文章编号 1004-924X(2017)03-0672-08

## 微型压电泵中腔高对气泡滞留的影响规律

陈松<sup>1</sup>, 刘勇<sup>2</sup>, 阚君武<sup>1\*</sup>, 周京京<sup>2</sup>, 杨志刚<sup>2</sup>, 程光明<sup>1</sup>

(1. 浙江师范大学精密机械研究所, 浙江金华 321004;

2. 吉林大学机械科学与工程学院, 吉林长春 130025)

**摘要:** 气泡滞留会严重地损害微型压电泵的输出性能, 因此减少气泡滞留将有效地提高压电泵系统的稳定性和可靠性。泵腔作为气泡滞留的主要区域, 同时是决定输出性能的重要元素, 所以改变腔高将对气泡滞留产生重要的影响。本文从气泡压力降和输出压力两个方面建立数学模型, 以此分析腔高对气泡滞留的影响规律, 最后通过气泡滞留实验进行验证。实验结果表明, 腔高为 0.15 mm 时, 压电泵具有优良的输出性能和排气能力, 在进入 120 个 0.02 mL 气泡后, 压电泵仍具有稳定的输出压力(8.1 kPa)和输出流量(4.2 mL/min); 腔高为 0.05 mm 和 0.20 mm 时, 压电泵在进入一个气泡后即丧失了工作能力, 排气能力差, 而腔高为 0 mm 和 0.10 mm 时, 压电泵分别进入 47 和 70 个气泡后丧失了工作能力。实验表明选取合理的腔高可以有效地减少气泡的滞留。

**关键词:** 微型压电泵; 腔高; 气泡滞留; 气泡压降

**中图分类号:** TH38 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172503.0672

## Influence of pump-chamber height on bubble retention in piezoelectric micro-pump

CHEN Song<sup>1</sup>, LIU Yong<sup>2</sup>, KAN Jun-wu<sup>1\*</sup>, ZHOU Jing-jing<sup>2</sup>, YANG Zhi-gang<sup>2</sup>, CHENG Guang-ming<sup>1</sup>

(1. Institute of Precision Machinery and Instrument,  
Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China;

2. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

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

**Abstract:** Since bubble retention may cause serious damage to output performance of piezoelectric micro-pump, properly reducing bubble retention can effectively improve stability and reliability of the piezoelectric pump system. Pump chamber is the main area for bubble retention and an important element determining the output performance, so change in the chamber height will have significant influence on bubble retention. In this paper, a mathematic model was established based on bubble pressure drop and output pressure to analyze the influence rules of chamber height on bubble retention, and then a bubble retention test was carried out verify the results. It indicates that when the chamber is 0.15 mm high, the piezoelectric pump has excellent output performance and ability to exclude bubbles, and after 120 0.02 mL bubbles entering the chamber, the pump still has a stable

收稿日期: 2016-09-10; 修订日期: 2016-10-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51205369, No. 51406065, No. 51507154); 浙江省自然科学基金资助项目(No. LY15E050010)

output pressure (8.1 kPa) and output flow (4.2 mL/min); when the chamber height is 0.05 mm and 0.20 mm, the piezoelectric pump is unable to work after a bubble enters, with a weak ability of excluding bubbles; when the chamber height is 0 mm and 0.10 mm, the piezoelectric pump is unable to work respectively after 47 and 70 bubbles enter. The results show that reasonable chamber height can effectively reduce bubble retention.

**Key words:** piezoelectric micro-pump; chamber height; bubble retention; pressure drop

## 1 引言

由于工作寿命长,制作成本低和功耗小等优点,压电泵在生物工程、小家电和医疗等领域具有广泛的应用前景<sup>[1-6]</sup>。从产品的设计角度,压电泵可分为微型泵和小型泵。其中微型泵以外形尺寸优先,充分发挥了压电泵的小体积优势,性能较低;小型泵是性能优先的产品,在发挥压电泵小体积优势的基础上保证产品具有较高的输出性能<sup>[7]</sup>。

现有微型压电泵对气泡极为敏感,气泡会急剧削弱其输出性能,使之应用受到较大限制<sup>[8-9]</sup>。中国科学院光电所王皓等<sup>[10]</sup>基于物态变化解释对无阀泵中存在的泵腔雾化现象进行了研究,在理论上阐述了微泵中的气泡现象,并且提出了泵腔内的气泡会造成驱动力的缓冲和延迟,使之性能大幅下降。蒋丹等<sup>[11]</sup>通过实验研究发现,气泡容易在微型压电泵腔壁面四周滞留,滞留的气泡使泵腔内流体的有效体积弹性模量降低,对微泵性能损害较大。总体上说,人们已经认识到了压电泵的性能会随着气泡的滞留被严重地削弱,并将去除气泡的能力作为微型压电泵性能的重要指标。

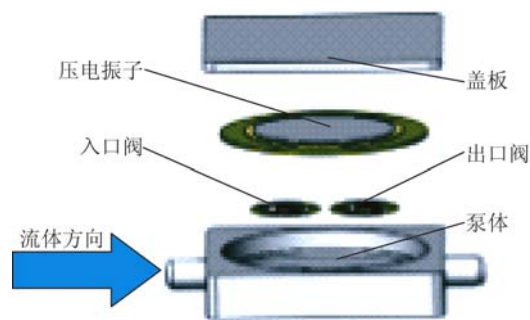
压缩比(驱动体积/死体积)是决定压电泵输出性能的重要参数<sup>[12-14]</sup>,同时压缩比也是一个周期泵腔内液体更换比例的重要指标,在先前的研究中,通过减少压缩比可获得具有一定气泡容忍度的压电泵。Rithter等<sup>[13]</sup>通过改变腔高获得3种不同压缩比的压电泵,实验发现,在压缩比最大时( $\epsilon=0.085$ ),压电泵具有一定的气泡容忍度,其余较小压缩比( $\epsilon=0.017$ 和 $0.002$ )的压电泵,在进入极少气泡后,即丧失了工作能力。Inman等<sup>[14]</sup>设计和制作了一种固定流量的气动微泵,该微泵的压缩比约为1.3,并实际观察了微泵在气泡进入后泵腔的流体情况,发现该泵在气泡进入后,能迅速将气泡排除,具有一定的气泡容忍度。

Dolžan等<sup>[8]</sup>设计了一款具有气泡容忍度的微型压电泵,在实验中,通过5个15 nL的小气泡,流量能较快恢复,而通过2个75 nl的气泡后,输出性能减弱。

实验中发现,通过减小腔高获得大的压缩比,不一定能提高压电泵的气泡容忍度,过小的腔高会使得气泡很难被排除。同时,具有气泡容忍度的压电泵,并不能满足微型压电泵产品的实际需求,微型压电泵在长时间的工作过程中,会排出大部分气泡,但是仍有破裂微小气泡在泵腔内滞留并聚集,减弱了微型压电泵的输出性能。所以研究气泡滞留的机理以及减少气泡滞留的方法,对提高压电泵系统的稳定性与可靠性具有重要意义。泵腔作为气泡滞留的主要区域,同时腔高是决定压电泵输出性能的重要参数,所以改变腔高将对气泡滞留产生重要的影响。本文将从气泡压力降和输出压力两方面建立数学模型,以此分析腔高对气泡滞留的影响规律,最后通过不同腔高的对比实验进行验证。

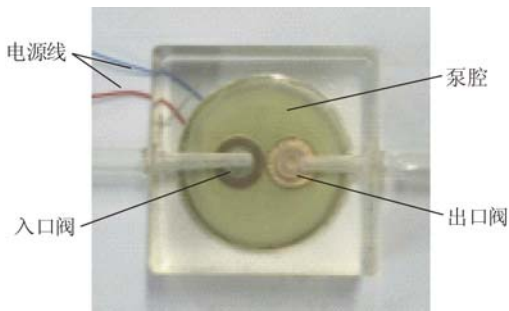
## 2 压电泵的结构及其工作原理

图1所示为实验用的压电泵结构和样机,压电泵由盖板、压电振子、泵体、入口阀和出口阀等组成。其中泵体采用透明的有机玻璃(PMMA)制作,方便观察泵腔内流体情况;出、入口阀采用轮式阀结构,材质为铍青铜,实物如图2所示。



(a) 压电泵结构图

(a) Structure of piezoelectric pump



(b) 压电泵样机

(b) Prototype of piezoelectric pump

图 1 压电泵结构及其样机

Fig. 1 Structure and prototype of piezoelectric pump

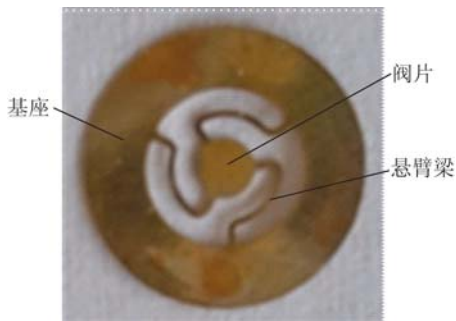


图 2 轮式阀实物

Fig. 2 Wheel check valve

图 3 所示为微型压电泵的工作原理,其中入口阀、出口阀、泵腔和压电振子组成一个密闭腔体。在周期电压驱动下,压电振子往复运动,促使泵腔体积发生变化,形成吸程和排程两个阶段。排程时,腔内体积缩小,入口阀关闭,出口阀打开,流体被排出。吸程时,腔内体积变大,出口阀关闭,入口阀打开,流体吸入泵腔。如此周期循环从而实现流体的单向运动<sup>[15]</sup>。

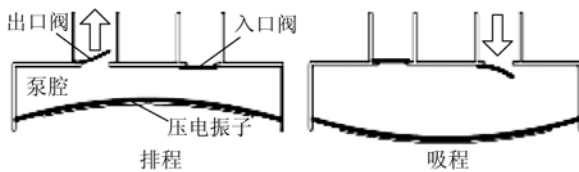


图 3 微型压电泵工作原理

Fig. 3 Working principle of piezoelectric micro-pump

### 3 理论建模与影响因素分析

当压电泵的驱动能力无法克服气泡的运动阻

力或者气泡处在泵腔流动不活跃区域时,气泡易在泵腔内发生滞留。从腔高与压电泵性能关系,以及腔高与气泡运动阻力关系两方面来分析气泡在泵腔内的滞留。

#### 3.1 腔高与输出性能

由于工作流体的可压缩性,微型压电泵在排程中包含液体压缩和液体排出。其中液体压缩阶段,泵腔被压缩,但腔内压力无法使出口阀开启,腔内压力小于出口阀开启压力和所需输出压力之和,出、入口阀均为关闭状态<sup>[16]</sup>。此时,压电振子中心位移量  $x_1$  所引起的泵腔体积变化量为:

$$\Delta V_1 = \pi \left( \frac{a^2}{2} - \frac{x_1^2}{6} \right) x_1, \quad (1)$$

式中:  $a$  为泵腔半径,由于  $\frac{a^2}{2} \gg \frac{x_1^2}{6}$ ,式(1)可简化为:

$$\Delta V_1 = \frac{\pi a^2 x_1}{2}. \quad (2)$$

根据体积模量的定义,当压电泵处于液体压缩阶段时,即无液体输出,有:

$$P_1 = K_e \frac{\Delta V_1}{V_0}, \quad (3)$$

式中:  $V_0$  为泵腔的原始容积,  $V_0 = \pi h a^2$ ;  $K_e$  为腔内液体的等效体积模量。根据式(2)和(3)可得:

$$P_1 = K_e \frac{x_1}{2h}. \quad (4)$$

随着压电振子继续变形,腔内压力逐渐增大,当泵腔压力  $P_1$  等于出口阀的开启压力  $P_v$  与所需输出压力  $P_g$  之和(即  $P_1 = P_g + P_v$ )时,出口阀打开、液体开始排出,设此时压电振子中心位移量  $x_1 = \omega_0$ ,压电泵进入液体排出阶段。此后泵腔内液体不再被进一步压缩,而是保持恒定压力  $P_1$ 。当  $\omega_0$  等于压电振子中心最大位移  $\omega_{\max}$ 时,压电泵提供的输出压力达到最大。所以根据式(4)可知,在腔内液体等效体积模量不变时,随着腔高的减小,压电泵的最大输出压力会增大。

气泡的出现会大大的降低腔内液体的等效体积模量。当工作液体中含有气泡时,气液混合物的等效体积模型为<sup>[17]</sup>:

$$\frac{1}{K_e} = \frac{V_{\text{liquid}}}{V_0} \frac{1}{K_{e,\text{liquid}}} + \frac{V_{\text{gas}}}{V_0} \frac{1}{K_{e,\text{gas}}}, \quad (5)$$

式中:  $K_{e,\text{water}}$  为水的体积弹性模量,  $K_{e,\text{water}} = 2 \times$

$10^9 \text{ N/m}^2$ ;  $K_{e,\text{air}}$  为空气的体积弹性模量,  $K_{e,\text{gas}} = 1.42 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 。由式(5)可知,如果腔内滞留了1%体积的气泡,腔内等效体积模量将变为纯液体时的0.71%。结合式(4)和(5),在驱动电压一定时,即  $\omega_{\text{max}}$  保持一定,减少腔高  $h$  可以使得泵腔容忍更大体积百分比的气泡,有利于腔内气泡的排除。

### 3.2 腔高与气泡压降

气泡经过泵腔时,可视泵腔为细小狭缝,气泡产生的压降为<sup>[18]</sup>:

$$\Delta P = \frac{C_D}{A} \left( \frac{\mu U}{\sigma} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (6)$$

式中:  $\frac{C_D}{A}$  为与管路形状相关的常量,平板缝隙时  $\frac{C_D}{A} = 5.009$ <sup>[18]</sup>,  $\mu$  为液体的运动黏度,  $\sigma$  为表面张力,  $U$  为气泡运动速度。60 °C 时,水的运动黏度  $\mu = 0.00047 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ ,  $\sigma = 0.066 \text{ N/m}$ , 式(6)可以简化为:

$$\Delta P = 0.185 \times U^{2/3}. \quad (7)$$

单个周期内由压电振子引起的最大体积变化为<sup>[19]</sup>:

$$\Delta V_2 = \frac{H\pi a^2 U}{2}, \quad (8)$$

式中:  $H$  为与压电振子材料和安装方式相关的常数,  $U$  为压电振子的驱动电压振幅。则单个周期,液体排出量为:

$$\Delta V = \Delta V_2 - \Delta V_1 = \frac{H\pi a^2 U}{2} - \Delta V_1. \quad (9)$$

为了便于分析,在流体排出过程中,视流体在泵腔的流动为平板间隙流。气泡未到达出口阀前,气泡瞬时速度为:

$$U = \frac{\Delta V f}{2\pi b h} = \frac{H\pi a^2 U f - 2\Delta V_1 f}{4\pi b h}, \quad (10)$$

式中:  $b$  为出口阀孔中央与气泡的距离。当腔内等效体积模量  $K_e$  保持不变,腔高  $h$  变大时,结合式(7)和(10)可知气泡通过泵腔产生的压降  $\Delta P$  减小。为了便于分析,视气泡在泵腔内的移动为平板间隙流动,则气泡在泵腔内移动需要满足条件:

$$P_v - \Delta P - \Delta P' > 0, \quad (11)$$

式中:  $\Delta P'$  为液体通过泵腔时的压力损失。在压电泵结构和驱动条件一定时,  $P_v$  保持不变。在腔

高变大时,  $\Delta P'$  随之急剧减小<sup>[20]</sup>。所以增大腔高可以增大气泡移动时两端的压差。根据3.1节分析结果,在驱动条件一定的情况下,增大腔高  $h$  会降低泵的输出压力和气泡容忍度,而减小腔高会增大气泡移动的阻力,结合式(11),所以选择合适的腔高,能减少气泡在泵腔内的滞留,过大或过小的腔高不利于气泡的排除。

## 4 实验设置

制作了5种不同腔高的压电泵,为了验证不同腔高压电泵的气泡滞留情况,引入如图4所示的制取气泡装置。该装置利用时间继电器控制气缸上下动作,入口管与气缸相连,气泡的大小通过入口在空气中停留的时间来确定。图5所示为气泡滞留实验所用的实验装置,其中利用入口管上刻尺来观测输入气泡的实际体积大小。实验中,气泡大小为0.02 mL。恒温水箱水温保持在55~60 °C。

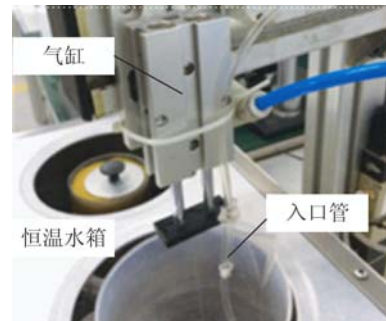


图4 制取气泡装置

Fig. 4 Device of producing air bubble

气泡滞留实验过程中以固定数量气泡作为一组,每个气泡的间隔一定,在每组最后一个气泡完全进入微泵后,立即测量压电泵的输出压力和输出流量,并记录。记录完成后,添加工作液体,使入口液面保持一致,并进行下一组测量,在压电泵发生了气泡阻塞现象(无流量输出)后,实验结束。表1所示为气泡滞留实验的具体参数。实验中为了避免其他结构因素的影响,除腔高以外的所有结构尺寸都保持一致,同时所有压电泵的构件加工以及组装都是在同一次操作中完成。

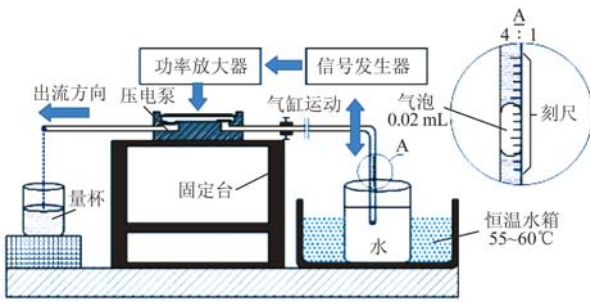


图 5 压电泵气泡滞留实验装置

Fig. 5 Test device for air bubble retention

表 1 实验参数

Tab. 1 Parameters of test

类型	数值和材料
泵外形尺寸	27 mm × 27 mm × 7 mm
泵体材料	有机玻璃
压电振子基板外径/mm	Φ20
压电振子基板厚度/mm	0.2
阀的类型	轮式阀
阀片材料	铍青铜
阀厚度/μm	20
驱动类型	110 V, 方波
泵腔高度 $h$ /mm	0/0.05/0.10/0.15/0.20
输入气泡大小/mL	0.02

### 5 实验结果与分析

图 6 所示为五种腔高压电泵在无气泡时的输出性能曲线,腔高为 0 mm 时,压电泵具有最大的输出压力,达到 16.9 kPa,但是输出流量仅为 5 mL/min;腔高为 0.15 mm 时,压电泵具有较好的综合性能,输出压力为 10.4 kPa,输出流量为 15.2 mL/min。

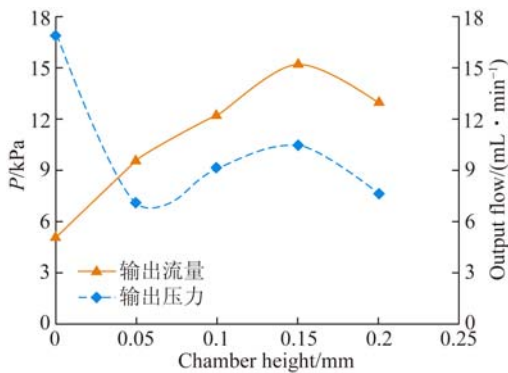


图 6 不同腔高压电泵的输出性能

Fig. 6 Output performance of piezoelectric pump with different chamber height

图 7 和 8 所示为五种腔高压电泵的气泡滞留实验结果。腔高为 0.05 和 0.20 mm 时,压电泵在第一个气泡进入后即发生气泡阻塞现象,气泡排除能力较差。腔高为 0 mm 时,压电泵具有较大的输出压力,但是由于腔高的限制,气泡通过时具有一定难度,容易在阀片处滞留。在进入 47 个气泡时,发生了气泡阻塞现象,需要注意的是,分别在 10 和 30 个气泡进入并完成测试的短时间内,泵腔内部分滞留气泡排出,输出性能波动大。腔高为 0.10 mm 时,压电泵具有一定排除气泡能力,在进入 50 个气泡前,压电泵具有稳定的输出流量和压力,在 70 个气泡进入后,发生了气泡阻塞现象。在 5 组不同腔高压电泵中,0.15 mm 腔高的压电泵展现了最强的排除气泡能力,在进入 120 个气泡后,压电泵仍能正常工作。从实验结果可知:过小的腔高使得气泡很难通过泵腔和阀片,泵体的排气能力差;过高的腔高,气泡极易滞留在泵腔内,进而产生气泡阻塞现象。选择合适的腔高可以有效的加强压电泵的排气能力,腔高为 0.15 mm 的压电泵展示了优良的排气能力。

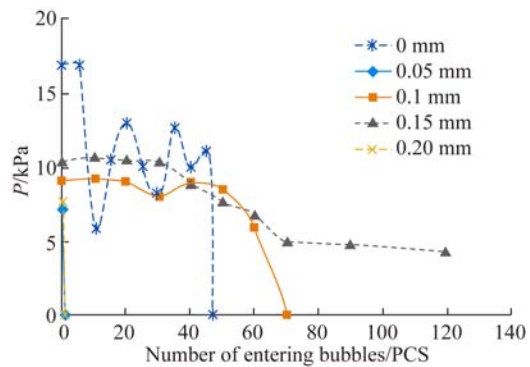


图 7 输入气泡个数与输出压力的关系

Fig. 7 Relationship between the number of entering bubbles and the output pressure

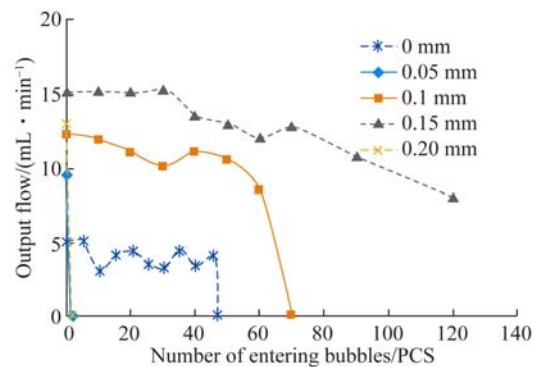


图 8 输入气泡个数与输出流量的关系

Fig. 8 Relationship between the number of entering bubbles and the output flow

图9和图10所示分别为在进入10个和40个气泡后,压电泵性能的损失率(损失性能/无气泡时性能)曲线,展示了在少气泡场合使用时不同腔高压电泵的排除气泡能力。从图9可知,在进入10个气泡后,0.1 mm和0.15 mm腔高的压电泵几乎没有收到任何影响,气泡得到了有效的排除,而0 mm腔高压电泵输出压力损失率高达65.7%,输出流量损失率为40%。由图10可知,在进入40个气泡后,0 mm腔高的压电泵输出性能损失率有所降低,性能得到了一定的恢复;0.1 mm和0.15 mm腔高压电泵输出压力和输出流量损失率都控制在15%以下,表现了强劲的气泡排除能力。

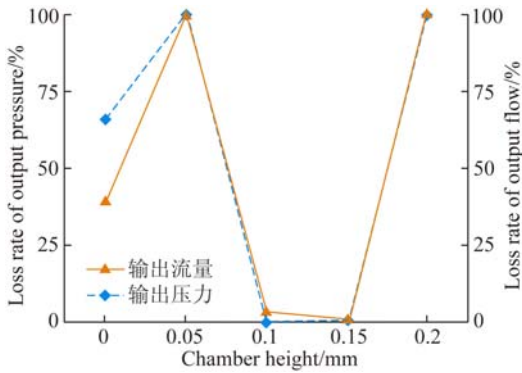


图9 进入10个气泡后,压电泵的性能损失率

Fig. 9 Performance loss rate after entering 10 bubbles

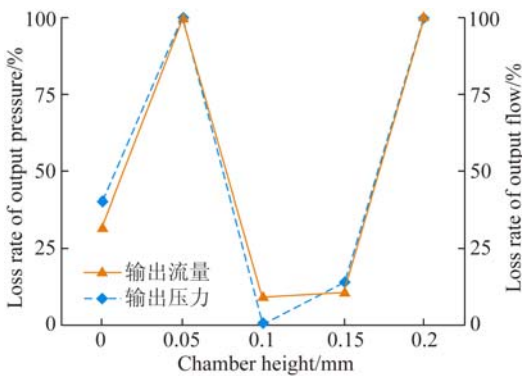


图10 进入40个气泡后,不同腔高的性能损失率

Fig. 10 Performance loss rate after entering 40 bubbles

图11所示为0.15 mm腔高压电泵在进入不同数量气泡后,泵腔内气泡滞留的情况。实验中发现,在气泡经过轮式阀时,气泡会很快的从入口阀和出口阀之间的最短距离排出,但是有极少部

分分裂的微小气泡会在泵腔内滞留。在进入10个气泡时,泵腔的四周滞留了较多的微小气泡,随着实验的进行,有部分微小气泡会被排除,微小气泡聚集成较大气泡,较大气泡的流动性变弱,使得腔内滞留的气泡很难排除,在进入120个气泡后,腔内已经出现了较多的大气泡,压电泵的输出压力降为4.2 mL/min,输出压力降为8.1 kPa。

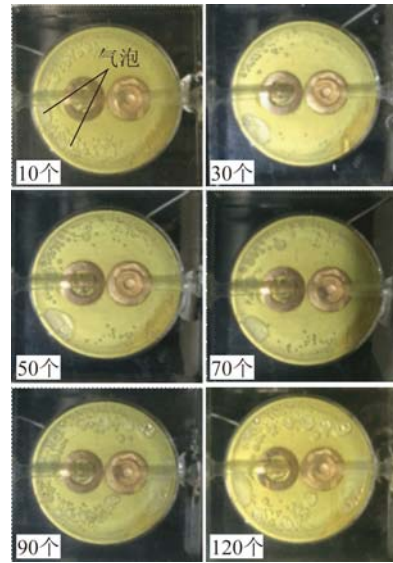


图11 腔高为0.15 mm时,在进入不同数量气泡后,泵腔气泡滞留情况

Fig. 11 After entering different number of bubbles, liquid distribution of piezoelectric pump with 0.15 mm chamber height

## 6 结论

本文首先介绍了液体压电泵的结构和工作原理,并提出了腔高的改变会影响气泡的滞留。然后通过建立数学模型分析了腔高对气泡滞留的影响,分析结果可知:选择合适的腔高,能减少气泡在泵腔内的滞留,过大和过小的腔高不利于气泡的排除。最后通过5组不同腔高的对比实验进行验证,实验结果证明:腔高为0.15 mm的压电泵具有优良的输出性能和排气泡能力,在进入120个0.02 mL气泡后,压电泵仍具有稳定的输出压力(8.1 kPa)和输出流量(4.2 mL/min);0.05 mm和0.20 mm腔高压电泵在进入一个气泡后即丧失了工作能力,排气泡能力差,而0 mm和0.10 mm分别进入47和70个气泡后丧失了工作能力。

## 参考文献:

- [1] MA H K, CHEN R H, HSU Y H. Development of a piezoelectric-driven miniature pump for biomedical applications [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2015, 234:23-33.
- [2] 阙君武, 杨志刚, 程光明, 等. 压电泵的研究与发展 [J]. *光学精密工程*, 2002, 10(6):619-625.  
KAN J W, YANG ZH G, CHENG G M, *et al.*. Research on piezoelectric pump and its development [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(6): 619-625. (in Chinese)
- [3] 彭太江, 杨志刚, 程光明, 等. 双腔体压电泵的设计 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5):1078-1085.  
PENG T J, YANG ZH G, CHENG G M, *et al.*. Design of double-chamber piezoelectric pump [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):1078-1085. (in Chinese)
- [4] 刘勇, 杨志刚, 吴越, 等. 压电泵吸程出流现象及其成因 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5):1104-1109.  
LIU Y, YANG ZH G, WU Y, *et al.*. Analysis on sucking process outflow phenomenon of piezoelectric pump [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1104-1109. (in Chinese)
- [5] WANG X Y, MA Y T, YAN G Y, *et al.*. High flow-rate piezoelectric micropump with two fixed ends polydimethylsiloxane valves and compressible spaces [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2014, 218(10):94-104.
- [6] HUANG J, ZHANG J, WANG S, *et al.*. Analysis of the flow rate characteristics of valveless piezoelectric pump with fractal-like Y-shape branching tubes [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 27(3):628-634.
- [7] 吴越. 压电泵动力学分析与优化设计 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.  
WU Y. *Dynamic Analysis and Optimal Design of Piezoelectric Pump* [D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
- [8] DOLŽAN T, PEČAR B, MOŽEK M, *et al.*. Self-priming bubble tolerant microcylinder pump [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2015, 233:548-556.
- [9] CHEN S, LIU Y, SHEN Y H, *et al.*. The Structure of wheel check valve influence on air block phenomenon of piezoelectric micro-pump [J]. *Micromachines*, 2015, 6(11):1745-1754.
- [10] 王皓. 微流控芯片的微机械往复无阀泵技术研究 [D]. 北京: 中国科学院光电技术研究所, 2005.  
WANG H. *Study on the micro mechanical valveless pump of lab-on-a-chip* [D]. Beijing: China Academy of Sciences Institute of Optoelectronics, 2005. (in Chinese)
- [11] 蒋丹, 李松晶, 杨平. 气泡对无阀微泵动态特性影响的实验研究 [J]. *实验流体力学*, 2010, 24(3): 34-38  
JIANG D, LI S J, YANG P. Experimental study on the influence of bubbles on dynamic characteristics of valve-less micropump [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2010, 24(3): 34-38. (in Chinese)
- [12] 孙晓锋, 姜德龙, 吕兆升, 等. 不同容积比的双腔串联压电泵测试分析 [J]. *液压与气动*, 2015(5): 75-78.  
SUN X F, JIANG D L, LV ZH SH, *et al.*. Test analysis on the piezoelectric pump with two chambers in series of different volume ratios [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2015(5): 75-78. (in Chinese)
- [13] RICHTER M, LINNEMANN R, WOIAS P. Robust design of gas and liquid micropumps [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 1998, 68(1-3): 480-486.
- [14] INMAN W, DOMANSKY K, SERDY J, *et al.*. Design, modeling and fabrication of a constant flow pneumatic micropump [J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2007, 17(5): 102-107.
- [15] 杨树臣, 程光明, 刘国君, 等. 微型压电泵系统的设计研究 [J]. *光学精密工程*, 2005, 13(3): 318-323.  
YANG SH C, CHENG G M, LIU G J, *et al.*. Design of piezoelectric micro pump [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3):318-323. (in Chinese)
- [16] 王淑云, 阙君武, 马继杰, 等. 腔高对压电液压驱动器性能的影响 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2011, 9(6):515-520.  
WANG SH Y, KAN J W, MA J J, *et al.*. Influence of pump-chamber height on performance of piezo-hydraulic actuator [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2011, 9(6):515-520. (in Chinese)
- [17] NIEZRECKI C, SCHUELLER J K, BALASUBRAMANIAN K, *et al.*. Piezoelectric-based Fluid Bulk Modulus Sensor [J]. *Journal of Intelli-*

- gent Material Systems & Structures*, 2004, 15 (15):893-899.
- [18] WONG H, RADKE C J, MORRIS S. Motion of long bubbles in polygonal capillaries. Part 2. Drag, fluid pressure and fluid flow [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1995, 292(-1):95-110.
- [19] 刘勇. 轮式阀微型压电泵的设计理论及试验研究 [D]. 长春:吉林大学, 2012.  
LIU Y. *Theoretical & Experimental Study on Wheel Valve Micro-Piezoelectric Pump* [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [20] 王淑云, 阚君武, 马继杰, 等. 腔高对压电液压驱动器性能的影响 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2011, 9(6):515-520.  
WANG SH Y, KAN J W, MA J J, *et al.*. Influence of pump-chamber height on performance of piezo-hydraulic actuator [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2011, 9(6):515-520. (in Chinese)

## 作者简介:



陈松(1988—),男,江西丰城人,讲师,博士,2011年于浙江师范大学获得学士学位,2016年于吉林大学获得博士学位,主要从事压电驱动与控制技术、微小机械与精密机械的研究。  
E-mail: chensong@zjnu.edu.cn



阚君武(1965—),男,吉林榆树人,教授,博士生导师,2003年于吉林大学获得博士学位,2005年中科院长春光机所博士后出站,主要从事能量回收与自供电技术、精密机械与微小机械等方面研究。E-mail: jutkjw@163.com