

文章编号 1004-924X(2017)11-2914-09

铍型开槽式阀压电泵的设计

黄俊¹, 朱宜超¹, 施卫东^{1*}, 潘波²

(1. 江苏大学 国家水泵及系统工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013;

2. 山东星源矿山设备集团有限公司, 山东 济宁 272300)

摘要: 由于有阀压电泵内部阀体所受应力过大易导致阀体失效, 本文提出了铍型开槽式截止阀来减小有阀压电泵内部阀体所受应力。基于铍型开槽式截止阀设计了有阀压电泵, 分析了铍型开槽式阀压电泵的工作原理。对铍型开槽膜片进行了受力分析, 研究了该压电泵的输出性能及耦合作用下的膜片应力。加工制作了铍型开槽式阀压电泵样机, 建立了铍型开槽式阀压电泵的有限元模型, 数值计算了流固耦合作用下的阀体应力值。计算结果表明: 在压电泵正常输出的驱动频率范围内, 当驱动频率为 418 Hz 时, 膜片所受应力的计算值也达到最大, 为 81.74 MPa。最后, 进行了压电泵性能试验。试验结果显示: 该压电泵的输出流量最大值和振子振幅最大值均出现在低频段; 当驱动电压为 160 V, 驱动频率为 5 Hz 时, 输出流量达到最大, 为 6.6 g/min; 驱动频率为 4 Hz 时, 压电振子振幅达到最大, 为 165.8 μm 。文中的研究验证了铍型开槽式阀压电泵的有效性, 并得出当铍型开槽式阀压电泵工作在低频段时, 阀门所受应力远小于高频段时阀门的应力值。

关键词: 铍型开槽; 有阀压电泵; 应力; 流固耦合

中图分类号: TH38; TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172511.2914

Design of cymbal shape slotted valve based piezoelectric pump

HUANG Jun¹, ZHU Yi-chao¹, SHI Wei-dong^{1*}, PAN Bo²

(1. National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Shandong Xingyuan Mining Equipment Group Co., Ltd., Jining 272300, China)

* Corresponding author, E-mail: Wdshi@uj.s.edu.cn

Abstract: The valve inside a piezoelectric pump was easy to be failure when it was suffered too much stress concentration. A cymbal-shape slotted check valve was proposed to reduce the stress concentration of the piezoelectric pump. A valve-based piezoelectric pump was designed by using the cymbal-shape slotted check valve, and the working principle of the cymbal-shape slotted check valve based piezoelectric pump was introduced. The stress of the cymbal-shape slotted diaphragm was analyzed, the output performance of the piezoelectric pump was discussed and the stress of diaphragm on fluid-solid coupled interaction was calculated. Then, a prototype for the pump was fabricated. The finite element model of the cymbal-shape slotted check valve based piezoelectric pump was established and the stress of the cymbal-shaped slotted diaphragm on fluid-solid coupled interaction were calculated numerically. The calculation results indicate that the calculated value of the diaphragm is

收稿日期: 2017-05-18; 修订日期: 2017-06-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51605200); 江苏省自然科学基金资助项目 (No. BK20150518); 江苏省博士后科研资助计划项目 (No. 1501108B); 江苏大学高级人才启动基金资助项目 (No. 14JDG145)

the maximum when the driving frequency is 418 Hz, and it is 81.74 MPa in the normal driving frequency range of the piezoelectric pump. Finally, the performance of the piezoelectric pump was tested, and results show that the maximum output flow of the pump and the maximum amplitude of the oscillator are in the low frequency band. The maximum flow rate is 6.6 g/min driving by 160 V (5 Hz), and the maximum amplitude of the piezoelectric vibrator is 165.8 μm (160 V, 4 Hz). The experimental results validate the feasibility of the cymbal-shaped slotted valve based piezoelectric pump. Moreover, it concludes that the stress of the diaphragm working in high frequencies is larger than that working in low frequencies.

Key words: cymbal-shaped slotted; valve piezoelectric pump; stress; fluid-solid coupling interaction

1 引言

压电作动型容积泵是利用压电元件的往复运动来改变泵腔容积从而实现对流体定向输送的一种新型流体驱动装置。其驱动部件-压电振子可以省去传动单元直接作用于流体介质,具有结构简单、高效率、高集成和低成本等特点。同时,由于压电泵有着可精确控制输出流体的优点,因而在生物检测、胰岛素注入、航空航天和机器人控制等领域都有着广泛的应用前景^[1-10]。

按照内部有无截止阀进行分类,压电容积泵可以分为有阀压电泵和无阀压电泵,而有阀压电泵又可分为主动阀压电泵和被动阀压电泵。其中被动阀压电泵由于结构简单、易于微型化,吸引了众多研究学者的青睐^[11-18]。2006年,韩国机械材料研究院的 Ham 等针对有阀压电泵的阀体做了优化处理,设计出一种弯曲链杆结构的板阀,增大了阀门的响应速度^[12];2010年,HWANG 等设计了用于燃料电池的往复型压电泵,该压电泵结构紧凑、能耗低,在低频驱动信号下也能稳定地输出^[13];2010年,张建辉等提出了内外不等锥度的软质锥壳形单阀体压电泵,以减小阀体开合产生的撞击效应并增大了输出流量^[14];2014年,Liu 等提出了基于 PZT 驱动的有阀压电泵,并据此设计了一种胰岛素给药系统。该压电泵含有 2 个泵腔和 3 个被动阀,通过电压和驱动频率的调节,实现了药物的精确供给^[15];2014年,杨志刚等提出了一种两腔三阀结构的压电微泵,并以此作为驱动源,结合 Y 形微混合器实现了金纳米粒子的可控合成^[16];2015年,MA 等提出了一种适用于药物传输的可分离式压电泵,驱动部件与药物传输单元的分离式设计,有效避免了药物输送中的二

次污染,并着重研究了该压电泵在低频驱动下的工作特性^[17];2016年,Zhang 等为了消除压电泵的回流现象,提出了一种单压电振子、多个被动阀的压电泵。当该泵内的被动阀数量固定时,通过改变进出口阀的配置,抑制输出压力的波动,从而有效减少压电泵的回流^[18]。

然而,作为有阀压电泵的核心部件-单向截止阀,频繁地往复开关运动容易使其产生疲劳损伤;特别当截止阀和流体作用后,所受流体惯性力较大,加之阀体结构和尺寸等因素的影响,容易造成应力集中,进而加重阀体的疲劳受损情况,最终导致阀体失效,压电泵也随之不能正常工作。并且,有关有阀压电泵的研究多以提高泵流量为目的,而分析阀体应力、提高压电泵可靠性的研究却极少。为此,张丛春、丁桂甫等人^[19]借鉴人体心脏瓣膜的结构,设计了瓣膜型被动起止阀,以提高阀体形变、降低所受应力。据此仿生结构,本文则提出了铍型开槽式截止阀,以期在同等级加载条件下可进一步降低阀体所受应力。同时,将该阀用于压电泵内,从而提高压电泵的作动可靠性,使得压电泵可更好地被应用于生物医学、航空航天等领域。并基于该阀体设计出铍型开槽式阀压电泵;理论分析该压电泵的流量特性;试验研究铍型开槽式阀压电泵的泵特性及振子振动特性;建立铍型开槽式阀压电泵的有限元模型,数值计算流固耦合作用下的阀体应力值,验证设计方案的有效性。

2 结构设计

如图 1 所示,铍型开槽式阀主要由支撑层的铍型隔栅及铍型开槽膜片组成。当流体沿隔栅-

膜片方向流过阀体时, 阀体处于开启状态; 当流体沿膜片-隔栅方向流过阀体时, 阀体处于关闭状态。膜片的位移将随着流体压力作用的大小而发生变化, 从而被动地调节了流速大小。整个铍型开槽式阀压电泵主要由压盖、压电振子、泵腔、铍型开槽式阀及进出口流管组成, 如图 2 所示。

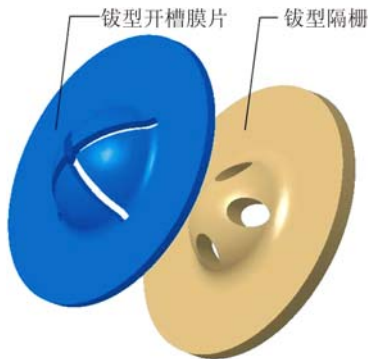


图 1 铍型开槽式阀体结构示意图
Fig. 1 Structure of cymbal-shaped slotted valve

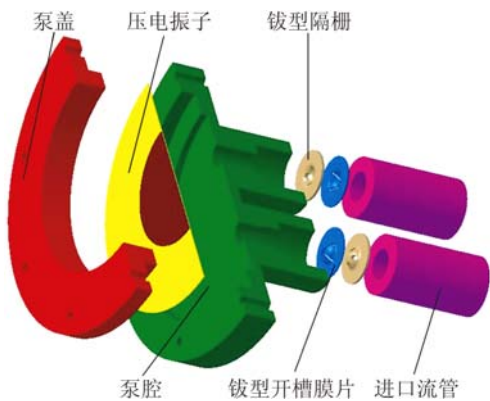


图 2 铍型开槽式阀体压电泵结构图
Fig. 2 Structure diagram of cymbal-shaped slotted valve piezoelectric pump

对压电振子施加交变电压, 使其产生法向的往复振动, 从而引起泵腔的容积变化。当压电振子向外运动时, 泵腔容积增大、内部压强减小, 在内外压差作用下, 进口段流体会经由隔栅-膜片流入泵腔。由于此时出口段的阀体处于关闭状态, 则该阶段为压电泵的吸程。同理, 当压电振子向内运动时, 泵腔容积减小、内部压强增大, 在内外压差作用下, 流体经出口段阀门流出泵腔。此时进口段的阀体处于关闭状态, 则该阶段为压电泵的排程。

3 理论分析

3.1 膜片受力分析

铍型开槽膜片的运动状态决定了阀体的开合

及可靠性, 因此对其进行受力分析。图 3 所示为铍型开槽膜片的力学分析示意图, 任选铍型开槽膜片上一夹角为 $d\beta$ 的扇形区。

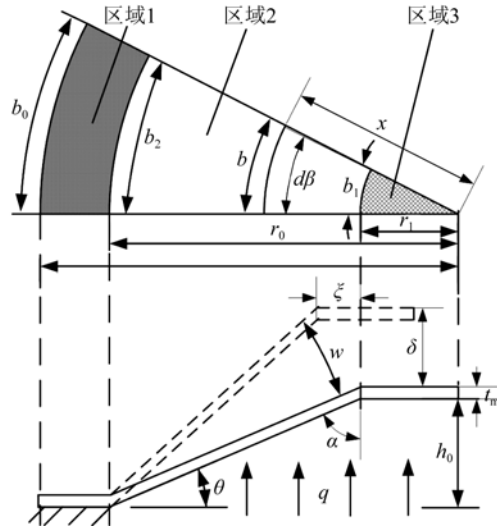


图 3 铍型开槽膜片力学分析示意图
Fig. 3 Mechanics analysis diagram of cymbal-shaped slotted diaphragm

其中, ξ 为铍型开槽膜片径向位移, w 为铍型开槽膜片弯曲位移, δ 为铍型开槽膜片轴向位移, Δ 为铍型开槽膜片拉伸变形, h_0 为铍型开槽膜片高度, t_m 为膜片厚度, E 为弹性模量, θ 为锥面角, r_1, r_2, r_0 分别为铍型开槽膜片顶部半径、底部半径和整体半径, b_1, b_2, b_0 为 $d\beta$ 的扇形区对应距离为 r_1, r_2, r_0 处的弧长。 F_e 为区域 2 上任一点的虚功, q 为作用在铍型开槽膜片上的均布载荷, a 为从铍型开槽膜片的顶点到膜片上任一点的径向平面投影距离, b 为任意距离 x 处的弧长:

$$b = \frac{x b_1}{r_1} = \varphi(x), \tag{1}$$

该处的惯性矩 I_x 为:

$$i_x = \frac{b t_m^3}{12} = \frac{t_m^3}{12} \varphi(x), \tag{2}$$

利用虚功原理求解可得, 总的能量为:

$$U' = \frac{1}{2E} \left[\int_a^{r_1} \frac{F_e(x-a) q x^2}{I_x} dx \right] + \frac{1}{2E} \int_0^{r_1} \frac{\left(\frac{1}{2} q x^2 \right)^2}{I_x} dx + \frac{1}{2E} \int_{r_1}^a \frac{\left[q r_1 \left(x - \frac{1}{2} r_1 \right) + q \frac{1}{2} (x - r_1)^2 \right]^2}{I_x} dx + \int_a^{r_2} \frac{\left[q r_1 \left(x - \frac{1}{2} r_1 \right) + q \frac{1}{2} (x - r_1)^2 + F_e(x-a) \right]^2}{I_x} dx, \tag{3}$$

则,铍型开槽膜片的弯曲位移为:

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{\partial U'}{\partial F_c} \Big|_{F_c} = \frac{1}{2E} \int_a^{r_1} \frac{qx}{\frac{t_m^3}{12}\varphi} dx + \\ & \frac{6q}{Et_m^3\varphi} \left(\frac{1}{3}r_2^3 - \frac{1}{2}r_1r_2^2 + \frac{1}{6}r_1^3 \right) = \\ & \frac{6q}{Et_m^3\varphi} \left(\frac{1}{3}r_1^3 - \frac{1}{2}ar_1^2 + \frac{1}{6}a^3 + \frac{1}{3}r_2^3 - \frac{1}{2}ar_2^2 + \frac{1}{6}a^3 \right). \end{aligned} \quad (4)$$

当 $a=0$ 时,

$$\omega = \frac{6q}{Et_m^3\varphi} \left(\frac{1}{3}r_1^3 + \frac{1}{3}r_2^3 \right) = \frac{2q}{Et_m^3\varphi} (r_1^3 + r_2^3). \quad (5)$$

根据边界条件可得到阀体的拉伸变形为:

$$\Delta = \int_{r_1}^{r_2} \frac{qr_2 \cos \theta}{Et_m \varphi} dx = \frac{qr_2 \cos \theta}{Et_m \varphi} \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (6)$$

径向位移:

$$\begin{aligned} \xi &= \omega \sin \theta + \Delta \cos \theta = \\ & \frac{2q}{Et_m^3\varphi} (r_1^3 + r_2^3) \sin \theta + \frac{qr_2 \cos^2 \theta}{Et_m \varphi} \ln \frac{r_2}{r_1}, \end{aligned} \quad (7)$$

轴向位移:

$$\begin{aligned} \delta &= \omega \cos \theta - \Delta \sin \theta = \\ & \frac{2q}{Et_m^3\varphi} (r_1^3 + r_2^3) \cos \theta - \frac{qr_2 \sin \theta \cos \theta}{Et_m \varphi} \ln \frac{r_2}{r_1}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{r_2 - r_1}{h_0} = \tan \theta, \quad (9)$$

其中 r_2, r_1 可视作定值, $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ 。即在相同外部条件下,当铍型开槽膜片高度 θ 越低时,铍型开槽膜片的轴向位移 δ 先减小后增大,而径向位移 ξ 逐渐增大, Δ 拉伸变形逐渐增大。由此可以发现,取极限情况,当 $\theta=0^\circ$,即为平板开槽膜片时, δ 达到最大,预示着在同等外部条件下,平板开槽膜片轴向位移大于铍型开槽膜片。而当 θ 趋向于 90° 时,膜片将只有径向位移。由此可知, θ 角的存在,一定程度上抵消了膜片的轴向位移,膜片变形位移的减小也使得膜片在运行过程中的应力减小。上述推导为同等载荷条件下,铍型开槽膜片所受应力小于平板开槽膜片提供理论依据。

3.2 泵流量分析

由于铍型开槽式阀压电泵的流量不仅取决于压电振子的振幅,跟铍型开槽膜片的变形也密不可分。因此,本研究将通过铍型开槽膜片的开合度来计算压电泵的输出流量。为了计算简便,将铍型隔栅和铍型开槽膜片进行简化,简化后的结构横截面示意图如图 4 所示。

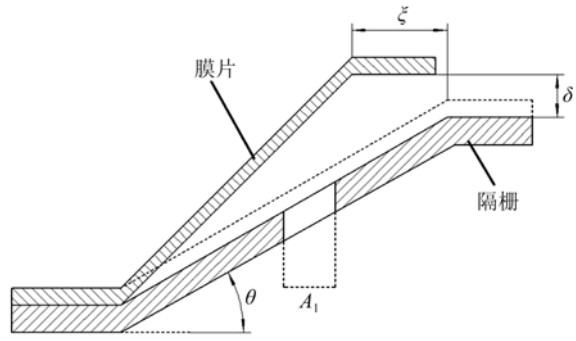


图 4 铍型隔栅和铍型开槽膜片截面简化示意图
Fig. 4 Cross section simplified schematic diagram of cymbal-shaped grille and diaphragm

其中, δ 是膜片轴向位移; ξ 是膜片径向位移; A_1 为隔栅孔的投影面积。压电泵的流量可以简化为隔栅 4 个进水孔的进水量,即为隔栅孔的斜面积乘以对应的斜位移。因隔栅上 4 个进水孔孔径的尺寸相同,所以在压电振子振动的一个周期内压电泵的流量可表示为:

$$Q = \frac{2 \times 4 \times f \times A_1}{\cos \theta} \times \sqrt{\delta^2 + \xi^2}. \quad (10)$$

假设作用于铍型开槽膜片上的载荷力为 F_v , 其大小为铍型开槽膜片上的均布载荷 q 与受力面积作积,如公式(11)所示:

$$F_v = q\pi r_2^2. \quad (11)$$

由于压电泵所加载的是正弦电信号,因此将压电振子的运动简化为正弦位移变化,则一个周期 T_0 内的振子运动可以分成 4 个部分:从平衡位置运动到最高点;从最高点回到平衡位置;从平衡位置运动到最低点;最后再从最低点回到平衡位置。每一部分都为 $T_0/4$,则设 $T_0/4$ 内泵腔的容积变化为 ΔV ,且泵腔内始终充满流体,则流入泵腔的流体作用于铍型膜片上的载荷力可表示为:

$$F_v = \rho_1 g \Delta V, \quad (12)$$

其中, ρ_1 为流体密度 (kg/m^3), g 为重力加速度 (m/s^2)。

当压电泵的作动频率远低于振子谐振频率时,压电振子中心的变形量可视为常数,则加载交流信号时,泵腔的容积变化量 ΔV 为:

$$\Delta V = \frac{A_0 \pi d^2}{8} = \frac{3\pi d_{31} U d^4}{32 h_1^2}, \quad (13)$$

其中, $A_a = \frac{3d_{31}Ud^2}{4h_1^2}$, d_{31} 为压电陶瓷的介电常数, U 为加载的交流电压, d 为压电振子的直径, h_1 为压电振子的位移。

将公式(7)~(8)和公式(11)~(13)带入到公式(10)中, 可得铍型开槽式阀压电泵的流量表达式:

$$Q = \frac{8fA_1q}{E\varphi\cos\theta} \left\{ \left[\frac{2}{t_m^3}(r_1^3 + r_2^3)\sin\theta + \frac{r_2\cos^2\theta}{t_m} \ln\frac{r_2}{r_1} \right]^2 + \left[\frac{2}{t_m^3}(r_1^3 + r_2^3)\cos\theta - \frac{r_2\sin\theta\cos\theta}{t_m} \ln\frac{r_2}{r_1} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} = \frac{\rho_l g f A_1 R_f d_{31} U d^4}{4 E \varphi h_1^2}, \quad (14)$$

其中:

$$R_f = \frac{1}{r_2^2 \cos\theta} \left\{ \left[\frac{2}{t_m^3}(r_1^3 + r_2^3)\sin\theta + \frac{r_2\cos^2\theta}{t_m} \ln\frac{r_2}{r_1} \right]^2 + \left[\frac{2}{t_m^3}(r_1^3 + r_2^3)\cos\theta - \frac{r_2\sin\theta\cos\theta}{t_m} \ln\frac{r_2}{r_1} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}},$$

为铍型膜片的形状和尺寸系数。

由公式(14)可得, 铍型开槽式阀压电泵的流量大小与压电振子所受的电压 U 和驱动频率 f 有关, 同时还与振子参数(介电常数 d_{31} , 直径 d 和厚度 h_1)、流体密度 ρ_l 、铍型隔栅孔面积 A_1 、铍型膜片的形状和尺寸参数 R_f 以及铍型膜片的弹性模量 E 等存在着关联性。

4 试验研究

采用光敏树脂材料通过 SLA 激光快速成型技术加工制作了铍型开槽式阀压电泵的泵盖、泵腔和进、出口流管; 同时, 利用铍青铜和钢分别冲压、切割出了铍型开槽膜片和铍型隔栅, 如图 5 所示。将各个部件组装, 进行压电泵输出特性的试验研究。其中, 铍型开槽膜片厚度为 0.2 mm, 投影直径为 9.6 mm, 槽宽为 0.5 mm, 槽长为 4 mm, 隔栅厚度为 0.5 mm, 泵腔直径为 40 mm, 深度为 1.5 mm, 进出口流管的管径为 5 mm, 长为 12 mm。整个压电泵的直径为 65 mm, 厚为 12 mm。试验用压电振子的基底直径为 50 mm, 压电陶瓷的直径为 35 mm。

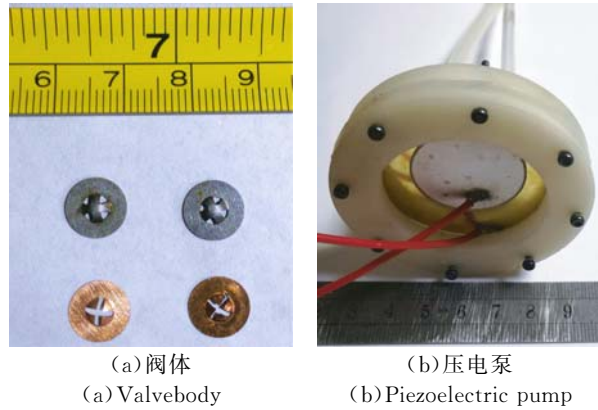


图 5 铍型开槽式阀和压电泵

Fig. 5 Photograph of valve and piezoelectric pump

图 6 所示为泵特性试验图。为避免试验中传输介质中有气泡产生, 影响试验的准确性, 因此采用去离子水作为工作介质。试验驱动电压为单峰 160 V, 通过改变压电振子的驱动频率, 测量单位时间内压电泵的输出质量流, 从而得出该压电泵流量随频率变化的关系曲线。同时, 利用激光位移传感器测量压电振子的中心位移, 以得到不同驱动频率下压电振子的振幅变化关系。

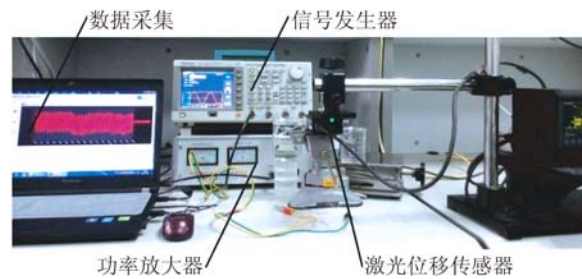


图 6 试验示意图

Fig. 6 Schematic diagram of experiment

5 计算与分析

5.1 有限元计算

由于通过泵特性试验无法测得铍型开槽膜片所受应力值, 因此本研究采用流固耦合方法对铍型开槽式阀压电泵进行计算, 分析铍型开槽膜片在耦合作用下的应力变化状况。为减少计算量, 重点观察阀体的应力变化, 采用文献[20]提出的简化数值分析法对压电泵进行建模分析。因压电泵的泵腔水体部分结构规整, 所以对其采用结构

化网格划分,如图 7(a)所示。对于压电泵进、出口流管水体而言,由于其内部含有铍型隔栅和铍型开槽膜片,结构较为复杂,因此对其进行非结构网格划分,如图 7(b)所示。对铍型开槽膜片则进行非结构网格划分,如图 7(c)所示。

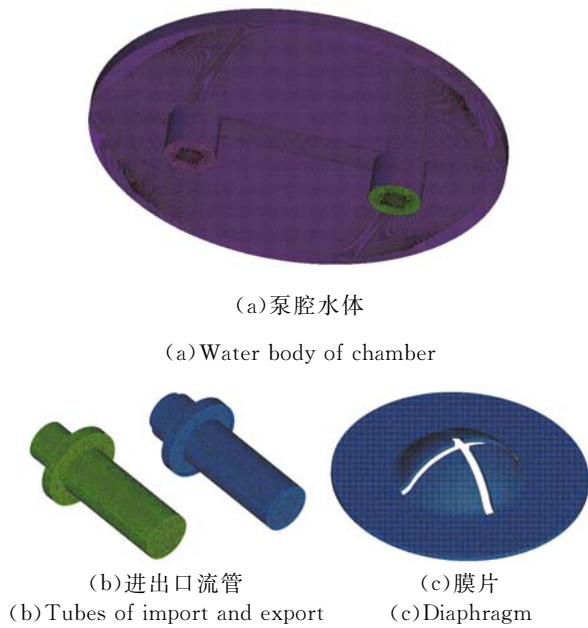


图 7 有限元模型

Fig. 7 Finite element model

为保证计算精度,对有限元模型进行网格无关性验证。对压电振子施加 160 V、400 Hz 的电压载荷,计算不同网格数下的铍型开槽式阀压电泵的输出流量,直至泵流量趋于稳定。压电泵的水体网格绘制密度与泵流量之间的关系如图 8 所示。考虑到网格划分对模拟结果的影响以及网格划分的经济性,本研究中压电泵水体的网格数最终定为 576 090,膜片的网格数定为 32 125。

采用流固耦合分析方法计算铍型开槽式阀压电泵内阀体应力时,将铍型开槽膜片的周边设为固定面,其余均设置为流固耦合面;同时,将进出口流管内与膜片相对应的水体部位也设置为流固耦合面;进、出口流管的端面设为开放界面,压力为一个标准大气压;其余表面设置为无滑移壁面。对泵腔的水体表面施加随时间变化的位移载荷,以获得阀体膜片在耦合作用下所受的应力值大小。

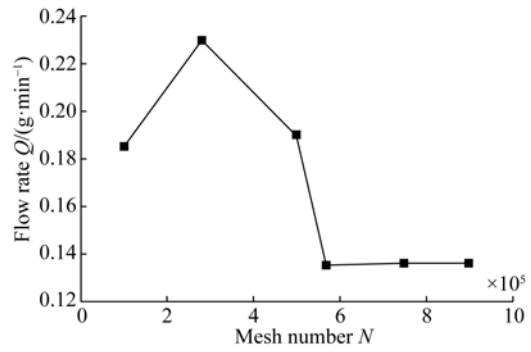
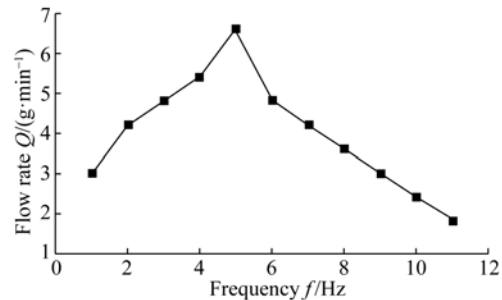


图 8 网格无关性验证

Fig. 8 Mesh independence verification

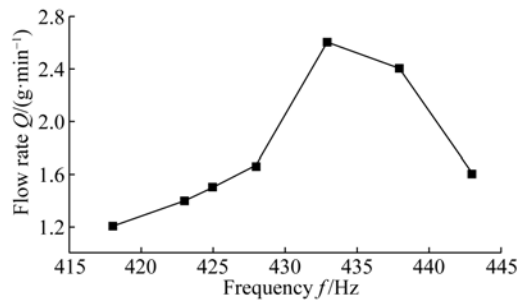
5.2 结果分析

图 9 所示为泵流量的测试结果。由图 9 可知,当振子作动在低频段和高频段时,压电泵的输出流量都随着驱动频率的增加呈先增大后减小的趋势。驱动频率为 5 Hz 时,压电泵输出流量达到最大,为 6.6 g/min;当驱动频率为 433 Hz 时,压电泵输出流量在该工作频段内达到最大,为 2.6 g/min。



(a) 低频段

(a) Low frequency region



(b) 高频段

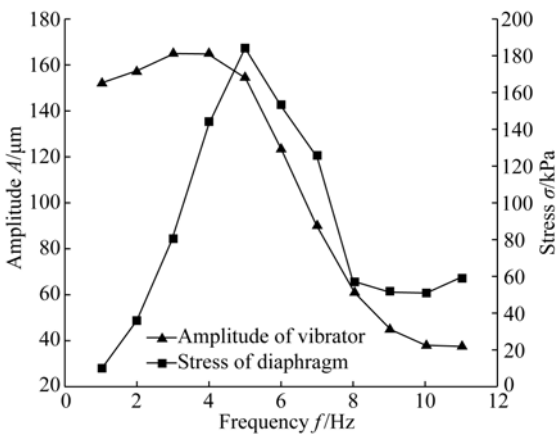
(b) High frequency region

图 9 流量与驱动频率曲线图

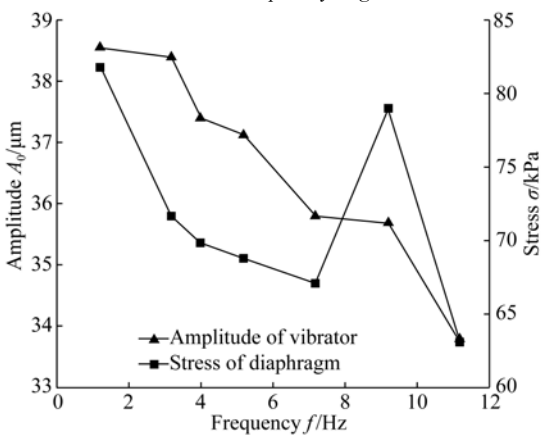
Fig. 9 Curves between flow rate and driving frequency

图 10 所示为不同驱动频率下的压电振子中中心点振幅和流固耦合作用下的膜片应力计算值。

由图 10(a)可知,铍型开槽式阀压电泵在低频段运行,驱动频率为 4 Hz 时,振子中心的振幅达到最大,为 $165.8 \mu\text{m}$,驱动频率为 5 Hz 时,铍型开槽膜的应力计算值达到最大,为 184.7 kPa ;铍型开槽式阀压电泵在高频段运行,驱动频率为 418 Hz 时,振子中心的振幅达到最大,为 $38.55 \mu\text{m}$,在此频率下,膜片所受应力的计算值也达到最大,为 81.74 MPa ,如图 10(b)所示。



(a) 低频段
(a) Low frequency region



(b) 高频段
(b) High frequency region

图 10 振幅、应力与驱动频率曲线图

Fig. 10 Curves between the amplitude, stress and the driving frequency

对比在低频段和高频段时计算所得的膜片应力大小,可发现在高频段时铍型开槽膜片所受应力远大于在低频段时的膜片应力。这是由于当铍型开槽式阀压电泵在低频段运行时,虽然振子振幅较大,但作动频率低,使得内部流场较为平缓。此时,膜片所受应力的大小与其应变相关,因此,在低频段时,膜片所受的应力值与压电泵输出流量都在 5 Hz 时达到最大。而当铍型开槽式阀压电泵在高频段运行时,压电振子的高频振动使得流场的流态复杂,流体频繁地往复冲击对膜片附加了流体的惯性力,因此,铍型开槽式阀压电泵在高频段运行时,膜片所受应力高于低频段运行时的应力。

6 结 论

针对有阀压电泵内部阀体所受应力较大、易损坏等缺点,提出了铍型开槽式截止阀,并根据此阀设计了铍型开槽式阀压电泵。通过对铍型开槽膜片进行受力分析,可知铍型开槽膜片的位移变化(即阀门开合度)与膜片的高度存在着相关性,并以此推导了铍型开槽式阀压电泵的输出流量。随后,加工制作了铍型开槽式阀压电泵样机,并进行了泵性能试验。试验结果表明:该压电泵的输出流量最大值和振子振幅最大值均出现在低频段;当驱动电压为 160 V,驱动频率 5 Hz 时,输出流量达到最大,为 6.6 g/min ;驱动频率 4 Hz 时,压电振子振幅达到最大,为 $165.8 \mu\text{m}$ 。采用流固耦合方法对铍型开槽式阀压电泵进行计算,分析了铍型开槽膜片在耦合作用下的应力变化状况。结果表明:在压电泵正常输出的驱动频率范围内,当驱动频率为 418 Hz 时,膜片所受应力的计算值也达到最大,为 81.74 MPa 。该研究验证了铍型开槽式阀体压电泵的有效性。

参考文献:

- [1] ZHANG J H, WANG Y, HUANG J. Advances in valveless piezoelectric pump with cone-shaped tubes [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 30(4):766-781.
- [2] 刘国君, 范尊强, 董景石, 等. 用于胰岛素推注的

压电微泵[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2007, 37(2):372-376.

LIU G J, FAN Z Q, DONG J SH, *et al.*. Piezoelectric micro-pump for insulin injection[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2007, 37(2):372-376. (in Chinese)

- [3] 徐莹, 胡正添, 郭森. 基于微生物代谢成分的电化

- 学多参数检测平台微泵设计[J]. 传感技术学报, 2015, 28(1):1-8.
- XU Y, HU ZH T, GUO M. Design of micropump for parallel multi-parameter detection of microbial metabolic components based on electrochemical platform[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2015, 28(1):1-8. (in Chinese)
- [4] ZHANG CH S, XING D, LI Y Y. Micropumps, microvalves, and micromixers within PCR microfluidic chips: advances and trends[J]. *Biotechnology Advances*, 2007, 25(5):483-514.
- [5] XIA Q X, ZHANG J H, LEI H, *et al.*. Analysis on flow field of the valveless piezoelectric pump with two inlets and one outlet and a rotating unsymmetrical slopes element[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 25(3):474-483.
- [6] 张蕊华, 张建辉, 朱银法, 等. 三棱柱阻流体无阀压电泵的设计与试验[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2):327-334.
- ZHANG R H, ZHANG J H, ZHU Y F, *et al.*. Design and experiment of valveless piezoelectric pump with triangular prism bluff body[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2):327-334. (in Chinese)
- [7] 曾平, 李立安, 胥锋, 等. 无阀压电泵的流固耦合仿真及试验验证[J]. 光学精密工程, 2016, 24(1):112-118.
- ZENG P, LI L A, XU F, *et al.*. Structural-fluid coupling simulation and experimental verification on valveless piezoelectric pump [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(1):112-118. (in Chinese)
- [8] HUANG J, ZHANG J H, WANG SH Y, *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.
- [9] 梁莉, 马旭, 张铁民. 圆环型压电蠕动泵的结构设计与仿真[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11):40-44.
- LIANG L, MA X, ZHANG T M. Structure design and simulation of circular ring piezoelectric peristaltic pump[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(11):40-44. (in Chinese)
- [10] 黄俊, 张建辉, 王守印. 多级“Y”型流管无阀压电泵的原理与试验验证[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2):423-430.
- HUANG J, ZHANG J H, WANG S Y. Theory and experimental verification on valveless piezoelectric pump with multistage Y-shape tubes[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2):423-430. (in Chinese)
- [11] ZHANG J H, WANG Y, FU J, *et al.*. Advances in Technologies of Piezoelectric Pumping with Valves. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2016, 33(3):260-273.
- [12] HAM Y B, SONG J J, PARK J H, *et al.*. A study on the small size PZT pump for cooling water circulation [C]. *SICE-ICASE International Joint Conference, IEEE*, 2006:4126-4129.
- [13] HWANG J Y, SHIN K Y, LEE S H, *et al.*. Periodic fuel supply to a micro-DMFC using a piezoelectric linear actuator[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2010, 20(8):85023-85029.
- [14] 张建辉, 郭宗信, 黄毅, 等. 内外不等锥度的软质锥壳形单阀体压电泵的原理与试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(24):143-149.
- ZHANG J H, GUO Z X, HUANG Y, *et al.*. Theory and experiment on the soft texture and conning shaped single valve piezoelectric pump with different interior and exterior taper[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(24):143-149. (in Chinese)
- [15] LIU G J, YANG Z G, LIU J F, *et al.*. A low cost, high performance insulin delivery system based on PZT actuation[J]. *Microsystem Technologies*, 2014, 20(12):2287-2294.
- [16] 赵天, 杨志刚, 刘建芳, 等. 利用压电微泵驱动和脉动混合可控合成金纳米粒子[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4):904-910.
- ZHAO T, YANG ZH G, LIU J F, *et al.*. Controlled synthesis of gold nanoparticles based on PZT micropump and pulsating mixing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4):904-910. (in Chinese)
- [17] MA H K, LUO W F, LIN J Y. Development of a piezoelectric micropump with novel separable design for medical applications[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2015, 236:57-66.
- [18] ZHANG R H, FENG Y, LV ZH H, *et al.*. Development and characterization a single-active-chamber

piezoelectric membrane pump with multiple passive check valves[J]. *Sensors*, 2016, 16(12):2108.

- [19] 张丛春, 郭泰, 丁桂甫. 基于 SU-8 胶的新型被动式微型阀[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4):1011-1016.

ZHANG C CH, GUO T, DING G F. Passive mi-

cro-valve based on SU-8 [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4):1011-1016. (in Chinese)

- [20] HUANG J, ZHANG J H, SHI W D, *et al.*. 3D FEM analyses on flow field characteristics of the valveless piezoelectric pump[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 29(4):825-831.

作者简介:



黄俊(1981—),男,安徽芜湖人,博士,助理研究员,2014年于南京航空航天大学获得博士学位,主要从事压电型微流体作动器的设计及流固耦合模拟仿真。E-mail:huangjun@ujs.edu.cn



施卫东(1964—),男,江苏如东人,博士,教授,博士生导师,2006年于江苏大学获得博士学位,主要从事流体机械的设计及工程应用研究。E-mail:Wdshi@ujs.edu.cn