

“V”型无阀压电泵的流阻特性^{*}

何秀华 张睿 杨嵩 邓许连

(江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013)

【摘要】 基于扩散/渐缩管流动特性,提出一种用于无阀压电泵的“V”型管,以满足微型全分析系统等应用需求。阐述了“V”型无阀压电泵的结构,对“V”型无阀压电泵内的流阻特性进行理论分析。通过采用有限元法对“V”型管进行模拟计算,研究“V”型管的结构参数对其流阻特性的影响。研究表明:“V”型管的分流角、扩散角以及进口宽度对其流阻特性影响较大,“V”型管的长度对其流阻特性影响较小;较大的“V”型管深度有利于提高泵的效率。

关键词: 压电泵 “V”型管 流阻特性 有限元法

中图分类号: TH38 **文献标识码:** A

Property of Flow Resistance for Piezoelectric Pump with “V”-shape Tube

He Xiuhua Zhang Rui Yang Song Deng Xulian

(College of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

Based on the flow characteristics of diffuser/nozzle used in valve-less piezoelectric pump, a new type of “V”-shape tube was presented for micro total analysis systems. The structure and flow property of the valveless piezoelectric pump with “V”-shape tube was analyzed. Finite element method was applied to simulate the flow in the “V”-shape tube for the flow characteristics. And the ANSYS was employed to analyze numerically the effects of the “V”-shape tube structure on the flow resistance property. The results show that, compared with the splitter angle, diffuser angle and the inlet width of “V”-shape tube, the effect of the length of the “V”-shape tube on the flow resistance property is smaller. And a large depth benefits to improve the pump efficiency.

Key words Piezoelectric pump, “V”-shape tube, Property of flow resistance, Finite element method

引言

基于压电驱动技术的无阀压电泵^[1],是利用流体在其新用的无活动部件阀中流动时正反方向的流阻不同的原理而实现流体的单向输送。其中,无活动部件阀先后经历了扩散/渐缩管(锥型管)^[2]、TESLA 阀^[3]以及漩涡阀^[4]等结构。这些阀结构的特点是:结构简单的流阻特性比较差;而流阻特性好的结构复杂,不利于微型化,同时也容易产生漩涡,从而影响其应用范围。为了提高泵送流量,Olsson A等提出了无阀压电泵用双腔体并联扩散管结

构^[5],但该结构复杂、制作成本高,不利于在经常更换的场合使用。针对上述情况,提出一种无活动部件阀——“V”型管^[6],旨在研究更加适合应用于生物芯片、微流控芯片等微型全分析系统以及临床药物微量输液系统等领域的无阀压电泵。

本文阐述“V”型无阀压电泵的结构,对其流阻特性进行理论分析;通过建立“V”型管的有限元模型,研究“V”型管的结构参数对其流阻特性的影响。

1 “V”型无阀压电泵的结构

“V”型无阀压电泵的结构如图1所示,它主要

包括压电振子、泵盖和泵体结构。

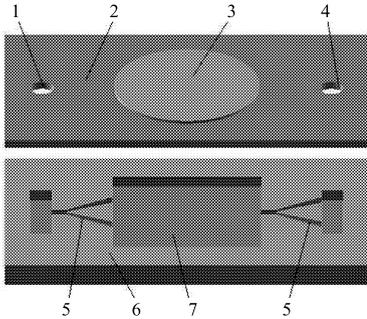


图 1 “V”型无阀压电泵结构图

Fig.1 Draft of the valveless piezoelectric pump with “V”-shape tube structure

- 1. 进水口 2. 泵盖 3. 压电振子 4. 出水口 5. “V”型管
- 6. 泵体 7. 泵腔

“V”型管结构示意图如图 2 所示。“V”型管包括两个分流管 1、2(扩散/渐缩管)以及合流管 3(直管),其中分流管 1 和 2 关于“V”型管中心对称,交汇于合流管 3。进口阀为正“V”形,两分流管与泵腔相连,合流管与外接管路相连;出口阀为倒“V”形,合流管与泵腔相连,两分流管与外接管路相连。设分流管长度为 a ,合流管宽度为 b ,长度为 c ,分流角为 θ ,扩散角为 Φ ,管的深度为 h ,其中 BC 是分流管的中线。

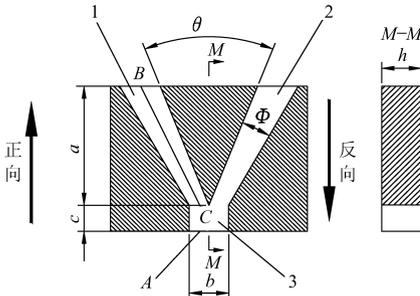


图 2 “V”型管结构示意图

Fig.2 Scheme of “V”-shape tube structure

2 “V”型无阀压电泵流阻特性的理论分析

“V”型无阀压电泵的工作状态示意图如图 3 所示,其中假设泵的进出口处的压强分别为 p_{in} 和 p_{out} ,泵腔内压强为 p 。为研究方便,认为进出口压强相等且与外界大气(大气压为 p_0)相通,即 $p_{in} = p_{out} = p_0$,由于泵腔体积比“V”型管大得多,泵腔内流速较为均匀,因此可认为腔内压强分布均匀一致。

根据 Singhal 等^[7]的理论,无阀压电泵的性能取决于其流管的特性。对于“V”型无阀压电泵来讲,进出口管的压力损失 $\Delta p_z = \Delta p_f = p - p_0$ 。“V”型管中,其正反方向上的压力损失系数分别表示为

$$\xi_z = \frac{2\Delta p_z}{\rho v_z^2} \quad (1)$$

$$\xi_f = \frac{2\Delta p_f}{\rho v_f^2} \quad (2)$$

- 式中 ρ ——流体密度, kg/m^3
- v_z ——图 2 中截面 A 处“V”型管正方向上的平均速度, m/s
- v_f ——图 2 中截面 A 处“V”型管反方向上的平均速度, m/s
- ξ_z ——“V”型管正方向流动的压力损失系数
- ξ_f ——“V”型管反方向流动的压力损失系数
- Δp_z ——“V”型管正方向流动的压力损失, Pa
- Δp_f ——“V”型管反方向流动的压力损失, Pa

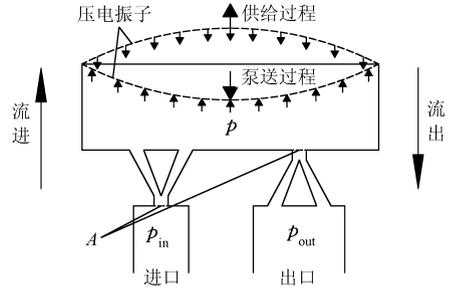


图 3 “V”型无阀压电泵工作状态示意图

Fig.3 Scheme of the the valveless piezoelectric pump with “V”-shape tube structure

假设驱动电压为正弦变化,则“V”型无阀压电泵平均流量与效率^[8]分别为

$$\bar{Q} = \frac{2V_0 \sqrt{\lambda} - 1}{T \sqrt{\lambda} + 1} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{\sqrt{\lambda} - 1}{\sqrt{\lambda} + 1} \quad (4)$$

- 其中 $\lambda = \xi_f / \xi_z$
- 式中 V_0 ——腔体体积变化幅度, m^3
- T ——周期, s

由式(3)、(4)可知,压电泵的流量 \bar{Q} 和效率 η 与“V”型管正反方向的压力损失系数比 λ 有关,其中,当 $\lambda > 1$ 时,即 $\xi_f > \xi_z$ 时, $\bar{Q} > 0$,泵就产生了单向的净流;并且 λ 越大,泵的效率就越高。因此,“V”型管的流阻特性影响着泵的性能。由于“V”型管的流阻特性不易通过解析方法得到,因此,本研究采用有限元方法对“V”型管进行数值模拟,研究结构参数对其流阻性能的影响。

3 “V”型管的流阻特性

3.1 有限元模型建立与边界条件

利用 ANSYS 软件的 FLOTRAN 分析功能,选用 FLUID142 单元建立三维“V”型管模型,网格划分后的“V”型管模型如图 4 所示。其具体尺寸分别为 $a = 0.6 \text{ mm}$, $b = 0.2 \text{ mm}$, $c = 0.15 \text{ mm}$, $\Phi = 4^\circ$,

$\theta = 45^\circ$, 深度 $h = 80 \mu\text{m}$ 。选用水为流体介质, 密度 ρ 为 1000 kg/m^3 , 动力粘度系数 μ 为 $0.001 \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$ 。采用压力进口, 自由出流的边界条件, 固壁采用无滑移速度边界条件。

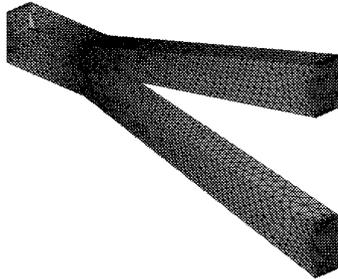


图4 “V”型管有限元网格

Fig.4 Mesh of finite element

3.2 结构参数对流阻特性的影响

3.2.1 进口宽度 b

在模拟计算过程中, 改变“V”型管进口宽度 b , 使其在 $80 \sim 260 \mu\text{m}$ 之间变化, 保持其他结构参数不变, 计算结果如图5所示。从图中可以看出, 随着进口宽度 b 的不断增大, λ 值不断减小, 并有小于1的发展趋势。因此, 在设计“V”型管时, 进口宽度 b 不能太大。图6和图7分别是进口宽度 b 为 $80 \mu\text{m}$ 和 $150 \mu\text{m}$ 时, 分流管中线 BC 上的压力和速度变化曲线图。

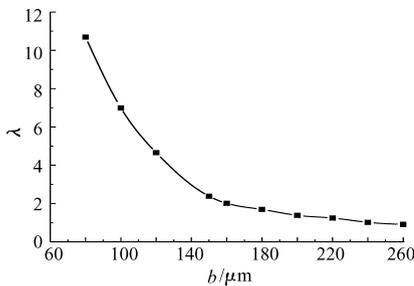


图5 进口宽度 b 与 λ 的关系曲线

Fig.5 Relation curve of b and λ

由图6可知, 在进口宽度 $b = 80 \mu\text{m}$ 时, λ 较大, 但在分流管进口处, 流体的速度与压力有很大的波动, 说明在此处流体流动的稳定性很差, 尤其是在输送高分子溶剂等流体时, 容易对高分子物质造成破坏。而且在整个“V”型管内, 流体在合流管内的相对压力减小为负压, 过大的负压容易引起空穴现象的发生而影响泵的性能。由图7可知, 当进口宽度适当增大后, 即 $b = 150 \mu\text{m}$, 分流管内的压力和速度变化的梯度不是很大, 流动较为稳定。因此, 在选取进口宽度 b 时, 应根据实际应用的要求进行合理选择。

3.2.2 合流管长度 c

“V”型管是一种三通式管路, 合流管长度 c 与 λ 关系曲线如图8所示。由图可知, 随着 c 的增加, λ

逐渐减小, 这主要是合流管长度的增加, 流体的沿程阻力系数增大, 从而使 λ 降低。因此, 在设计制作“V”型管时, 过长的合流管会降低“V”型无阀压电泵的效率。

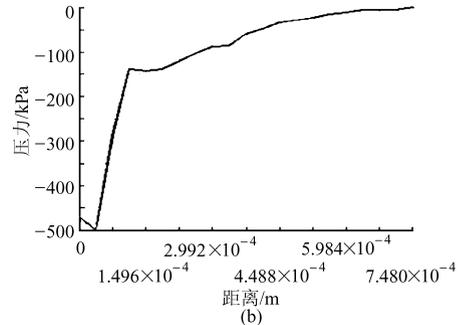
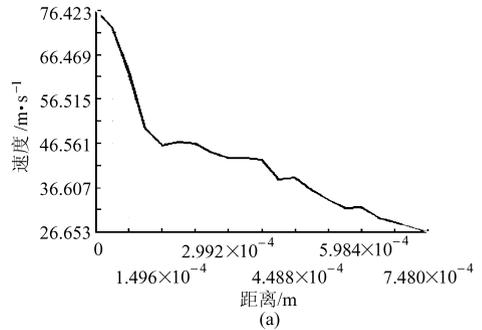


图6 BC 上的速度与压力变化曲线 ($b = 80 \mu\text{m}$)

Fig.6 Velocity and pressure distribution curve of BC ($b = 80 \mu\text{m}$)

(a)速度 (b)压力

3.2.3 分流管长度 a

“V”型管中的分流管采用的是扩散/渐缩管结构。合流管长度不变, 分流管长度 a 与压力损失系

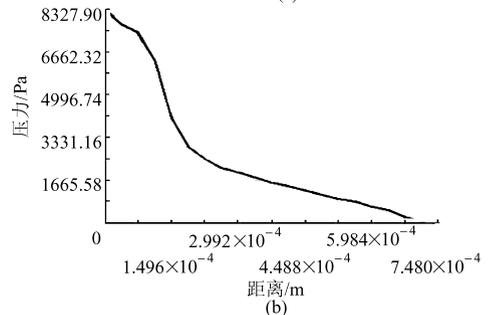
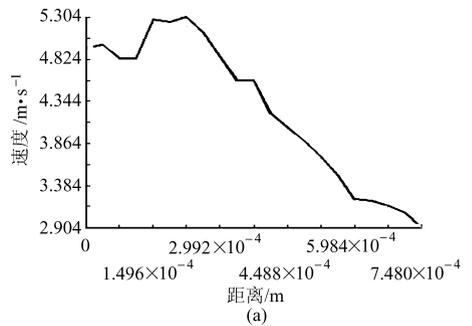


图7 BC 上的速度与压力变化曲线 ($b = 150 \mu\text{m}$)

Fig.7 Velocity and pressure distribution curve of BC ($b = 150 \mu\text{m}$)

(a)速度 (b)压力

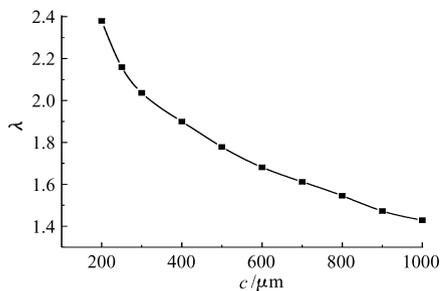


图 8 合流管长度 c 与 λ 关系曲线

Fig. 8 Relation curve of c and λ

数比 λ 的关系曲线如图 9 所示。

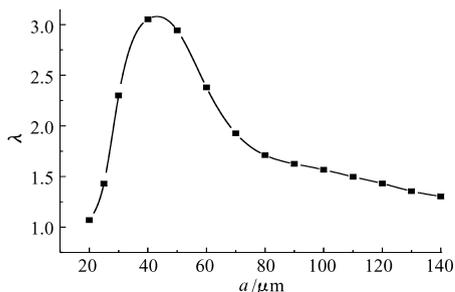


图 9 分流管长度 a 与 λ 的关系曲线

Fig. 9 Relation curve of a and λ

由图 9 可知,起初随着分流管长度的增加, λ 也在增加,这主要是由于分流管长度较小时,流体的动能与压能之间的转换不够完全;当分流管长度达到某个值时,分流管内的动能与压能之间的转换程度达到最佳,此时 λ 达到最大,从而泵的效率最高。但随着分流管长度的继续增加,“V”型管内沿程阻力系数不断增大,造成过多的能量损失, λ 值降低,从而使泵的工作效率降低。

3.2.4 深度 h

“V”型管的深度 h 对 λ 的影响关系曲线如图 10 所示。从图中可以看出,随着“V”型管深度 h 的增加, λ 值不断增大,从而泵的效率越高。这是由于浅薄型的“V”型管的粘性阻力太大,因而效率不高。因此,在允许范围内,尽量选取较大深度的“V”型管,有利于提高泵的效率。

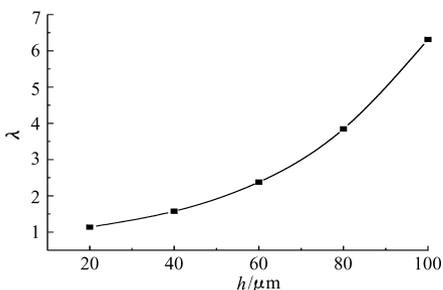


图 10 “V”型管深度 h 与 λ 的关系曲线

Fig. 10 Relation curve of h and λ

3.2.5 扩散角 Φ

在保持其他结构参数不变的情况下,“V”型管的分流管扩散角 Φ 与 λ 之间的关系曲线如图 11 所

示。

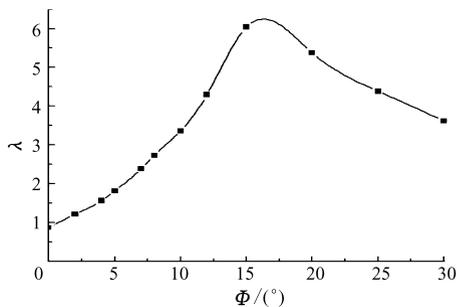


图 11 “V”型管扩散角 Φ 与 λ 的关系曲线

Fig. 11 Relation curve of Φ and λ

当扩散角 Φ 在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 范围变化时,随着扩散角 Φ 的不断增大,压力损失系数比先随之增大而后随之减小,当 $\Phi = 15^\circ$ 左右时,压力损失系数比 λ 达到最大值。随着扩散角的继续增大,“V”型管的流阻比不断降低,这是由于扩散管内发生边界层分离现象,在扩散管内形成漩涡。扩散角 Φ 为 20° 时“V”型管的速度矢量如图 12 所示。其中,图 12b 是图 12a 中圆圈处的局部放大图,可明显看出在扩散管内的漩涡区域。由模拟计算可知,扩散角度越大,漩涡发生的可能性越大,而漩涡的存在,一方面会引起能量的损失;另一方面,容易对所输送的高分子物质造成破坏。因此,扩散角选用范围一般在 $5^\circ \sim 20^\circ$ 之间。

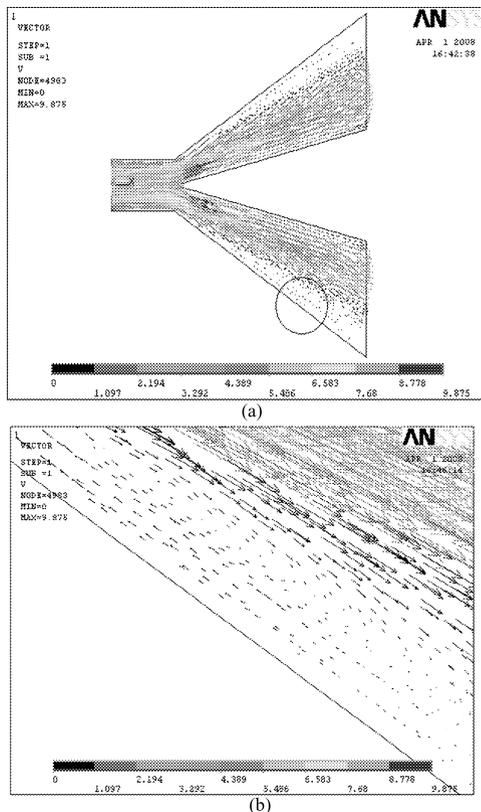


图 12 “V”型管速度矢量图 ($\Phi = 20^\circ$)

Fig. 12 Velocity vector graph in “V”-shape tube ($\Phi = 20^\circ$)

(a)“V”型管速度矢量图 (b)漩涡区的速度矢量图

3.2.6 分流角 θ

“V”型管分流角 θ 对其流阻性能的影响如图 13 所示。起初,随着 θ 的不断增大, λ 值呈递增趋势;当 θ 在 15° 左右时, λ 值达到最大,“V”型管流阻特性最佳,随着 θ 的继续增大, λ 值呈下降趋势。所以,在

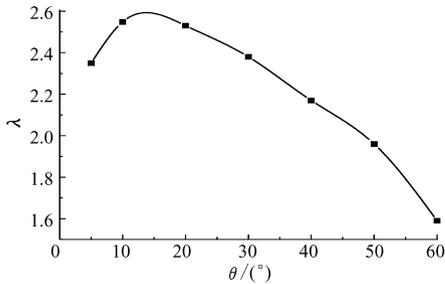


图 13 分流角 θ 与 λ 的关系曲线

Fig. 13 Relation curve of θ and λ

制备“V”型管时,分流角一般取 15° 左右。

4 结论

(1) 阐述了“V”型管压电泵及“V”型管的结构,并对“V”型管压电泵的流阻特性进行了理论分析。

(2) 建立了“V”型管的有限元模型,通过模拟计算,研究了“V”型管的结构参数对其流阻特性的影响,发现进口宽度对“V”型管的流阻特性影响较大,应根据实际应用进行选择;合流管的长度尽量取得小以减小沿程阻力对流阻特性的影响;在允许范围内,尽量选取较大的深度有利于提高泵的效率;当扩散角以及分流角在 15° 左右时,“V”型管的流阻特性最优,而过大的扩散角容易产生漩涡。

参 考 文 献

- 1 Stemme E, Stemme G. A valveless diffuser/nozzle based fluid pump[J]. Sensors and Actuators A, 1993, 39(2): 159~167.
- 2 Chen Yutang, Kang Shungwen, Wu Lungchi, et al. Fabrication and investigation of PDMS micro-diffuser/nozzle[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 198(1~3): 478~484.
- 3 Morris C J, Forster F K. Low-order modeling of resonance for fixed-valve micropumps based on first principles[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2003, 12(3):325~334.
- 4 Izzo I, Accoto D, Menciass 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.
- 5 Olsson A, Stemme G, Stemme E. A valve-less planar fluid pump with two pump chambers[J]. Sensors and Actuators A, 1995, 47(1~3): 549~556.
- 6 何秀华,张睿,杨嵩,等. V型无阀压电泵的流场分析[J]. 农业机械学报,2008,39(10):218~221.
- 7 Singhal V, Garimella S V, Murthy J Y. Low Reynolds number flow through nozzle-diffuser elements in valveless micropumps[J]. Sensors and Actuators A, 2004, 113(2):226~235.
- 8 李军,吴博达,程光明,等. 收缩管/扩张管型无阀压电泵的工作原理[J]. 压电与声光,2000,22(6):376~378.
Li Jun, Wu Boda, Cheng Guangming, et al. The principle of diffuser/nozzle based valveless piezoelectric pump [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2000, 22(6):376~378. (in Chinese)