

仿鱼形阻流体无阀压电泵混合泵送机理与验证^{*}

纪 晶¹, 李胜多¹, 胡彩旗¹, 胡笑奇², 谢煜喆¹, 李 焱¹

(1. 青岛农业大学机电工程学院 青岛, 266109)

(2. 枣庄学院机电工程学院 枣庄, 277160)

摘要 为提高无阀泵的泵送性能和混合效果, 提出一种仿鱼形复合阻流体致阀、致涡、多输入输出及泵阀分体的无阀压电泵。首先, 通过对正向、反向绕流仿鱼形复合阻流体流阻的比较, 诠释了仿鱼形阻流体致阀、致泵机理; 其次, 数值模拟了仿鱼形复合阻流体绕流场, 指出流体涡的产生及运动是实现高效混合流体的原因; 然后, 分析了振子周期性振动驱动流体传输的工作过程; 最后, 制作泵样机并进行了泵送性能试验。结果表明: 在驱动电压及频率为 180 V 和 10 Hz 时, 泵送纯水的瞬时流量达到 111.24 mL/min, 泵送混合液体的瞬时流量达到 94.10 mL/min, 混合液质量分布均一, 颜色均匀稳定; 仿鱼形复合阻流体及其无阀泵能够实现对流体的混合输送, 且混合输送流体的能力优于同类无阀泵。

关键词 无阀; 压电泵; 压电振子; 仿鱼形复合阻流体; 混合泵送

中图分类号 TH32; TH38

引 言

无阀压电泵(以下简称无阀泵)作为一种新型流体驱动器, 其利用压电振子的逆压电效应使振子产生凸、凹形变而驱动泵腔容积变化, 并辅以特殊的流管、阻流体等致阀结构驱动流体传输^[1-3]。相对于传统泵, 无阀泵结构简单、能耗低并易于集成, 在生物医药^[4-5]、雾化^[6]、水冷^[7-8]等领域都取得了研究成果, 并在混合输送液体方面也具有潜在优势。

无阀泵中的致阀结构使泵腔内经入口、出口同时吸入或排出的流体阻力不等, 进而形成流动阻力差, 通过振子振动形变驱动流体, 因此具备有阀泵中阀的功能。这些致阀结构或与流管一体, 或与泵腔一体, 驱动流体传输; 同时, 某些具有特殊形状的致阀结构还能激发出旋涡和脉动, 使泵在传输液体的同时还能混合液体。

流管类无阀泵中, 如锥形流管^[9]、四方锥形流管^[10]、双曲流管^[11]、流线型流管^[12]、柔顺流管^[13-14]、变截面圆弧流管^[15]及非对称分叉流管^[16]等, 受其结构及管道形状所限, 多存在流量小、容积效率低的问题, 且致阀流管激发的旋涡弱, 因而混合液体能力弱, 仅在微流量流体传输领域存在优势。多级锥形流管^[17]和多级 Y 形流管^[18]因在结构上设置有多分级

流道, 使其流动过程中产生的流阻差和旋涡有所增加, 因而泵流量有较大提升, 并能实现液体的初步混合, 但其出入口管道结构、工艺复杂, 同时外置悬伸的流管不利于结构的集成和优化。腔底、阻流体类无阀泵中的非对称腔底^[19]、半球缺等阻流体^[20-21], 因其特殊的腔底及阵列的半球缺群等特征, 能够形成较大流阻差并使流体产生更强旋涡, 因而泵送性能、混合性能均显著提高。但是, 非对称腔底制作工艺复杂且与泵体加工成一体, 不可更换或优化, 半球缺等阻流体的固装工艺繁琐, 因而影响了该类泵混合输送液体的应用。此外, 也有利用无阀泵作为动力源驱动微混合器进行混合输送液体的研究^[22-23], 在微量流体混合输送方面取得了较好效果, 但其驱动器和混合器是分体的, 增大了结构空间, 且受混合输送量限制, 无法实现小流量液体的混合输送。

为了提高无阀泵的泵送性能和混合效果, 笔者面向小流量液体混合传输的医药、化工、机械及精密渗滴灌领域, 提出一种致阀、致涡效果好的仿鱼形复合阻流体及其无阀泵, 实现了泵阀分体、功能集成的一体化混合输送。首先, 对仿鱼形复合阻流体进行理论和仿真研究, 揭示其致阀、致泵及致涡机理; 其次, 解析压电振子周期性振动驱使泵工作的成因; 最后, 对泵样机进行泵送性能和混合性能的试验。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(31971801); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2020ME250, ZR2020ME252)

收稿日期: 2022-08-02; 修回日期: 2022-10-24

1 泵送与混合机理

1.1 仿鱼形阀及其无阀泵

鱼类身体呈流线型,游动时能显著减小水流阻力。仿燕鱼形阻流体阀如图1所示。燕鱼的扁锥形头部在游动时能起到快速分切水流、减小水流阻力的作用。据此,笔者提出一种致阀、致涡效果好的仿燕鱼形复合阻流体阀及其无阀泵。

仿鱼阀由一组复合阻流体组成,由图1(b)所示的燕鱼形复合阻流体可知,肋条形阻流体、折角形阻流体与V形阻流体围成自左至右的锥形流道a,b和c,形成的流道夹角依次为 α 、 β 和 γ 。

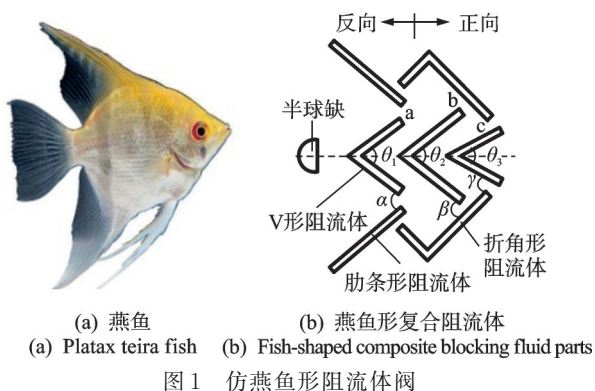


Fig.1 Fish-like composite blocking fluid parts used as valve

仿鱼形复合阻流体无阀泵如图2所示,由螺杆泵盖、压电振子、密封圈、泵体、泵座、固定架和仿鱼形复合阻流体组成。其中,固定架将仿鱼形阻流体固定于泵底座上,实现泵阀分体设计。半球缺的球面正对及斜对的孔口为泵的入口,V形阻流体开口方向正对及斜对的孔口为泵的出口。

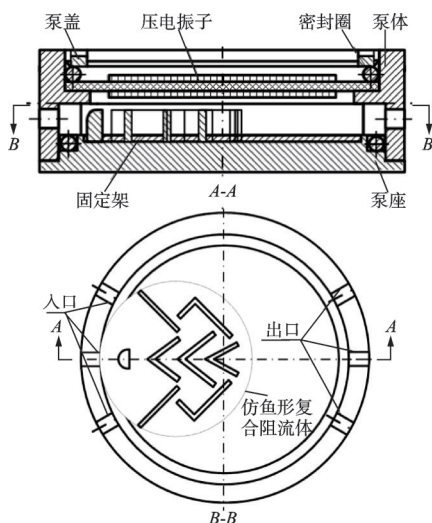


图2 仿鱼形复合阻流体无阀泵

Fig.2 Valveless piezoelectric pump with fish-like blocking fluid parts

为方便解析泵机理和泵工作过程,对图1,2中的流体流动方向做如下规定:流体经入口吸入泵腔,流经锥形区域及流道a,b和c,沿出口排出的流动为正向流动;反之,流体经出口吸入泵腔,经流道c,b和a流入口区域,由入口排出的流动为反向流动。

由于存在反、正向流动阻力差,无阀泵能够泵送液体;由于存在涡流和脉动,其能够混合液体。流阻差及涡流强度越大,无阀泵的泵送、混合性能越好。仿鱼形阻流体阀具有减小正向阻力、增大反向阻力、激发旋涡和脉动的作用。

从正向流动方向看鱼阀及其无阀泵,外部轮廓模仿燕鱼设计成收缩的扁锥形,内部各阻流体交错布置形成锥形流道a,b和c,前部半球缺具有光滑圆顺的球面,对流体阻力小且对流体起分流、导引作用,后部阻流体通过收缩的锥形流道约束流体的正向流动方向。球形表面、收缩的锥形流域及仿鱼形外轮廓均使泵内水流正向流动时产生小阻力。

从反向流动方向看鱼阀,V形阻流体的凹入区域阻截流体流动,迫使流体产生紊流和脉动,同时外侧阻流体与泵体壁面之间形成空腔区及扩张的锥形流道c,b和a,这些特征均使反向流动产生大阻力和强涡旋。因此,仿鱼形复合阻流体理论上能够形成显著的反、正向流动阻力差和较强的旋涡、脉动,这是其致阀、致泵、致涡的原因所在。

1.2 泵送机理

由于泵腔内存在反、正向流动阻力差,仿鱼形复合阻流体能够作为无移动部件阀驱动流体传输,具体分析如下。

1) 肋条形和折角形阻流体对流体的正、反向流动阻力分析。锥形管无阀压电泵中锥角变化与流态有以下关系^[9]:对收缩的锥形流道,锥角在 $20^\circ \sim 80^\circ$ 内处于层流状态,表现为小流阻;对扩张的锥形流道,锥角在 $20^\circ \sim 40^\circ$ 内为层流,表现为小流阻;锥角在 $50^\circ \sim 80^\circ$ 内,产生湍流和脉动,且随着锥角的增加湍流强度增强,流场复杂,表现为大流阻。因此,本研究中的锥形流道夹角 α 、 β 、 γ 取值均设置在 $50^\circ \sim 80^\circ$ 范围内,以使正向层流为小流阻,反向湍流为大流阻。同时,根据文献[9]可知:流体沿正向流经收缩的锥形流道a,b,c时受到各阻流体的阻力均小于反向流经扩张的锥形流道c,b,a时对应的阻力,即有

$$\begin{cases} F_{za} < F_{fa} \\ F_{zb} < F_{fb} \\ F_{zc} < F_{fc} \end{cases} \quad (1)$$

其中: F_{za} , F_{zb} , F_{zc} 分别为流体正向绕流肋条形、折角形阻流体的流动阻力; F_{fa} , F_{fb} , F_{fc} 分别为流体反向绕流肋条形、折角形阻流体的流动阻力。

2) V形阻流体对流体正、反向流动阻力分析。3个V形阻流体的顶角均以小圆弧过渡,小圆弧角对正向来流起分流、导引作用,使水流压力波动小,正向水流阻力变小;而V形槽内的凹入区域能够阻截水流,迫使迂回水流碰撞V形阻流体内壁面激发出旋涡和脉动,导致水流压力损失大,反向水流阻力变大。根据文献[9],3个V形阻流体的夹角 θ_1 , θ_2 , θ_3 取值也设在 $50^\circ \sim 80^\circ$ 范围内,以使正向层流为小流阻,反向紊流为大流阻。 θ_3 位于仿鱼形复合阻流体的最前端,为使其头部廓形更接近鱼嘴形状, θ_3 应取小角度,此处 θ_3 取为 45° 。该值虽超出 $50^\circ \sim 80^\circ$ 的范围,但因其后面2个V形阻流体的夹角 θ_1 和 θ_2 取值均介于 $50^\circ \sim 80^\circ$, 利用前后阻流体遮流效应的影响,同样会得到反向流阻大,正向流阻小的效果。

为验证 θ_3 取 45° 时依然能够形成反、正向流阻差,利用 Ansys CFD 软件,对 $\theta_3 = 45^\circ$ 的V形阻流体的绕流场进行了数值模拟。其中,流场计算模型采用 $K-\epsilon$ 模型,松弛因子采用默认值,流体边界设置为速度入口、边界出口,壁面采用无滑移固体壁面。 45° 的V形阻流体正、反向压力分布云图见图3。

由图3可知:反向流动时在V形阻流体凹槽内因水流淤积形成高压区,水流压力损失大;正向流动

时水流在V形阻流体顶端形成局部小高压区,凹槽内无高压区。模拟结果表明,V形阻流体反向阻流效果显著大于正向,即反向绕流流阻大,正向绕流流阻小,能够形成反、正向流阻差。

同样地,此结论对夹角 θ_1, θ_2 介于 $50^\circ \sim 80^\circ$ 之间的其他V形阻流体也成立,即流体正向、反向绕流3个V形阻流体的总阻力关系为

$$F_{zv} < F_{fv} \quad (2)$$

其中: F_{zv} , F_{fv} 分别为流体正向、反向绕流阻流体的总流动阻力。

3) 半球缺对流体的正、反向流动阻力分析。半球缺具有光滑球面和陡直端面,由流体绕流理论可知:球面对流体的阻力远小于陡直端面对流体的阻力,且其作为半球缺无阀泵中的致阀阻件已得到试验验证^[20],故有

$$F_{zq} < F_{fq} \quad (3)$$

其中: F_{zq} , F_{fq} 分别为流体正向、反向绕流半球缺的流动阻力。

4) 流体正、反向绕流仿鱼形复合阻流体的流阻差比较。汇总以上分析结果,若流体正向绕流各阻流体的总流动阻力以 $\sum F_{zi}$ 表示,反向绕流各阻流体的总流动阻力以 $\sum F_{fi}$ 表示,则

$$\sum_{i=1}^5 F_{zi} = F_{za} + F_{zb} + F_{zc} + F_{zq} + F_{zv} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^5 F_{fi} = F_{fa} + F_{fb} + F_{fc} + F_{fq} + F_{fv} \quad (5)$$

根据式(1)、式(2)和式(3),有

$$\sum F_{fi} - \sum F_{zi} > 0 \quad (6)$$

由式(6)可知,流体反向、正向绕流仿鱼形复合阻流体的流阻差大于0,说明仿鱼形复合阻流体的引入起到了有阀泵中“阀”的作用,可作为致阀阻件,配合压电振子的周期振动驱动流体流入、流出泵腔,所构成的无阀泵具有驱动流体传输的泵的功能。

1.3 混合机理

无阀泵能够混合液体的原因在于泵腔内存在湍流和脉动。依据流体传动原理,当图2中流体沿正向收缩流道出流时,流动趋于层流状态;当沿反向扩张流道出流时,流体流经锥面凹槽、扩展的锥形流道、拐角及陡直壁面等非流线形特征表面时,会产生较强的湍流和脉动,激发出大量的流体涡。仿鱼形阻流体无阀泵通过利用人为设置的鱼阀而产生涡流和脉动,从而达到混合流体的目的。

为验证仿鱼形复合阻流体能够致涡以达到“涡

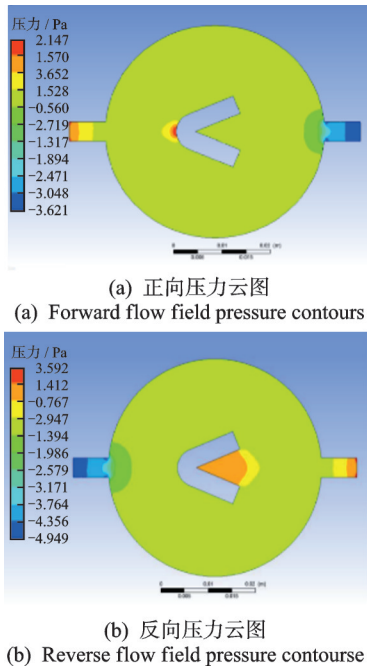


图3 45° 的V形阻流体正、反向压力分布云图

Fig.3 Forward and reverse of flow field pressure contours for V-shaped block at 45°

致混合”效果,利用流体仿真软件Flow simulation对该无阀泵进行仿真分析,仿真模型参数与泵样机参数相同。采用流固耦合接口,流体边界设置为流入口、压力出口,固体边界设置为自由边界,选择移动网格来描述固体变形和流道变化。复合阻流体绕流场压力图如图4所示。可以看到,绕流场内形成大小不一、层层叠叠的涡团。涡团的迂回运动会带动不同相流体质点间的耦合交融,耦合过程即实现了流体的混合过程;当涡团汇集到各个出口,排出的过程又进一步加强了流体间的混合。因此,仿鱼形复合阻流体激发的流体涡及涡运动是该泵能够高效混合流体的根本原因。

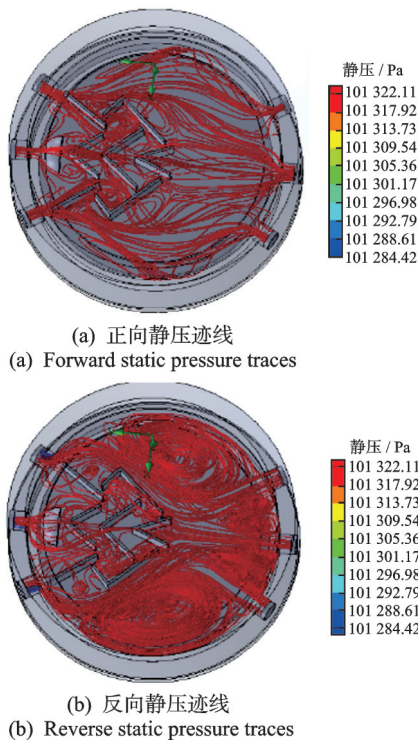


图4 复合阻流体绕流场压力图

Fig.4 Pressure traces of flow field with compound bluff-body group

理论分析和仿真结果表明,仿鱼形复合阻流体能够激发出较强的旋涡和脉动,通过旋涡的运动实现流体间的有效混合。

1.4 角度参数的确定

本研究中需确定的角度参数有:流道夹角 α, β, γ ; V形阻流体夹角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 。除 θ_3 已确定为 45° 外, β 和 γ 是从属变量关系,此处以 β 为主动变量,则 γ 可表示为 $\gamma(\beta)$,于是待确定的角度参数变为4个,即 $\theta_1, \theta_2, \alpha$ 和 β 。

1.4.1 θ_1, θ_2 及 α, β 的关系确定

左侧第1个V形阻流体的作用是配合肋条形阻流体,将腔内流体分流导引至鱼阀内部;第2个V形阻流体的作用是配合折角形阻流体,改变流体流动方向,以激发旋涡和脉动。因此,左边2个V形阻流体的夹角应满足 $\theta_1 < \theta_2$,且第2个V形阻流体长度应大于第1个V形阻流体长度。

同样地,流道夹角 α, β 和 $\gamma(\beta)$ 的取值在考虑流阻的同时还应兼顾流向的改变,使正向、反向来流流经 α, β 和 $\gamma(\beta)$ 流道时产生宽窄交替、曲折变化的效果,为此应满足 $\alpha < \beta, \beta > \gamma(\beta)$ 。

综上分析,确定6个角度参数的关系为: $45^\circ = \theta_3 < \theta_1 < \theta_2 < 80^\circ; 50^\circ < \alpha < \beta < 80^\circ$ 且 $\beta > \gamma(\beta)$ 。

1.4.2 角度参数取值的组合

当对 θ_1, θ_2 及 α, β 以 10° 为间隔取值进行仿真分析时,发现仿真结果对流量及混合性能的影响微弱,增加角度间隔值会使反向遮流效应增强,有利于减少回流,提高流量和混合效率。为此,以 20° 为间隔进行取值。经过分析, $\theta_1, \theta_2, 45^\circ$ 及 $\alpha, \beta, \gamma(\beta)$ 在 $50^\circ \sim 80^\circ$ 区间内存在12种组合。6个角度参数12种组合下仿真流量和混合度统计如表1所示。表1中,角度参数的值依次分别对应 $\theta_1, \theta_2, 45^\circ, \alpha, \beta$ 和 $\gamma(\beta)$ 。通过构建三维模型,当 β 取值为 80° 时, $\gamma(80^\circ) = 62.5^\circ$;当 β 取值为 70° 时, $\gamma(70^\circ) = 52.5^\circ$ 。

1.4.3 仿真分析

以水为流体介质,入口速度设为 0.1 m/s ,出口压力设为0。为分析混合效果,引入混合度参数 σ

$$\sigma = 1.0 - \frac{1}{c_m} \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i - c_m)^2 / N} \quad (7)$$

其中: c_i 为各节点浓度; c_m 为各节点浓度的平均值; N 为节点数

σ 在 $0 \sim 1$ 的范围内数值越大,代表混合效果越好。

仿真混合流场的参数设置与仿真流量的设置相同,入口速度采用流固耦合分析结果的速度,出口压力为0,中间和两侧入口处液体的初始浓度分别设为 $C_1 = 1 \text{ mol/L}$ 和 $C_2 = 0 \text{ mol/L}$,经仿真分析混合绕流场,获得混合流场出口截面处数据,导入Matlab进行计算,即得到混合度 σ 的值。

通过表1可知:仿真流量值介于 $289.11 \sim 297.53 \text{ mL/s}$ 之间;混合度值介于 $80.35\% \sim 92.31\%$ 之间。可见,角度参数的取值对流量和混合效果均有影响。其中,取得最大流量和最大混合度时的角度参数 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \alpha, \beta$ 和 $\gamma(\beta)$ 取值依次为 $70^\circ, 80^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 80^\circ$ 和 62.5° 即为最优值。

表 1 6 个角度参数 12 种组合下仿真流量和混合度统计
Tab.1 Simulation flow rate and mixing degree statistics
of 12 combinations under 6 angles

角度参数/(°)	流量/(mL•min ⁻¹)	混合度/%
50,70,45,50,70,52.5	290.11	80.35
50,70,45,50,80,62.5	289.11	84.64
50,70,45,60,80,62.5	291.32	87.32
50,80,45,50,70,52.5	293.58	86.98
50,80,45,50,80,62.5	293.70	87.87
50,80,45,60,80,62.5	294.72	89.83
60,80,45,50,70,52.5	293.40	89.33
60,80,45,50,80,62.5	293.82	89.79
60,80,45,60,80,62.5	295.26	90.51
70,80,45,50,70,52.5	295.38	90.10
70,80,45,50,80,62.5	295.20	89.76
70,80,45,60,80,62.5	297.53	92.31

综上所述,仿鱼形阻流体无阀泵相对于传统无阀泵有以下优势:仿鱼形阀的设计易于产生大流阻差和强旋涡,有利于提高泵送性能和混合效果;多输入输出流道设计,可满足泵送单一流体、混合流体及多路输出的需要;泵、阀分体可装配设计,便于实现阀件的可拆卸、可替代,也易于阀件的优化和重组。

2 工作过程

压电振子在驱动电压作用下以一定的频率做向上隆起和向下凹入的往复振动。泵在 1 个工作周期内振子的振动过程分为 4 个阶段,如图 5 所示。当振子由负方向最大振幅处(图(d))经由平衡位置向正方向最大振幅处(图(a))运动过程中,泵腔体积增大,压强减小,泵处于吸入流体阶段;反之,当振子由正方向最大振幅处(图(b))经由平衡位置向负方向最大振幅处(图(c))运动过程中,泵腔体积减小,压强增大,泵处于排出流体阶段。

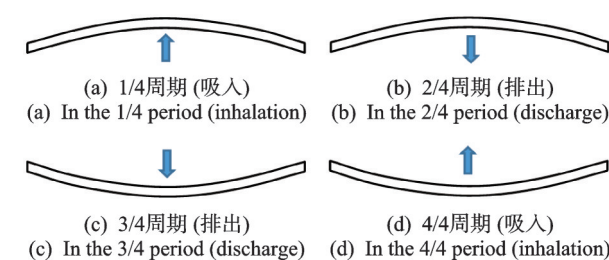


图 5 泵在 1 个工作周期内振子的振动过程
Fig.5 Vibration process of vibrator in one working cycle of the pump

2.1 吸入流体过程

当振子向上振动时(图 5(d)→(a)),液体经入口和出口同时被吸入泵腔而成为流体。由于反向吸入的流体流经复合阻流体时被 V 形阻流体、折角形阻流体、肋条形阻流体及半球缺壁面层层阻碍和遮挡,一部分流体积聚在 V 形阻流体的内凹区域和外侧阻流体与壁面之间围成的区域,产生大涡旋及脉动;另一部分流体经通道 c,b,a 涌入扩张的锥形区域内,产生较强的涡旋及脉动。V 形阻流体的内凹面、扩张的锥形流域及陡直壁面这些轮廓特征均使流动压力损失大,因而反向流动产生大阻力。正向吸入的流体绕流过 1/4 球体后沿收缩的锥形区域流动,经由通道 a,b,c 流出时产生小涡旋。球形表面、收缩的锥形流域均使正向流动产生小阻力。

由此可见,液体正向流动的阻力远小于反向流动,因而正向流动经入口吸入的液体量显著高于反向流动经出口的吸入量,故正向流动能够获得较高的净吸入量。

2.2 排出流体过程

当振子向下振动时(图 5(b)→(c)),腔内流体经出口和入口同时排出泵腔。其中,由入口排出流体的流动路径与吸入阶段中由出口吸入流体至泵腔的流动路径相同,因而反向绕流产生湍流脉动现象呈现大流阻,正向绕流趋于层流表现为小流阻,所以正向流动经出口排出的流体量显著高于反向流动经入口的排出量,故正向流动能够获得较高的净排出量。

由此可知,当泵经由入口、出口同时吸入或排出流体时,因反向、正向流阻差的存在,在振子 1 个周期的振动形变中,由入口吸入的净流量多,且由出口排出的净流量也多,配合振子的周期振动,宏观上实现了单向泵送传输流体的功能,且流阻差越大泵送性能越好。同时,因流体流经角度不等的锥面凹涡、拐角、扩张的锥形通道及陡直壁面等非流线形轮廓,因而能够产生较强的旋涡和脉动现象,易于实现不同相液体间的高效混合。

3 泵样机制作

仿鱼形复合阻流体采用塑料丝经 3D 打印成型,1/4 球体利用钢球经线切割加工成型,泵体、泵座及固定架采用亚克力棒经机械加工成型,压电振子采用双陶瓷片振子,通过外购获得。实验用泵的几何参数如表 2 所示。

表 2 实验用泵的几何参数
Tab.2 Geometric parameters of experimental pump

阻流体尺寸/mm				阻流体角度/(°)			振子直径/mm		泵腔尺寸/mm	
半球直径	阻流体(2,3,4)			流道夹角	阻流体 3 折角	阻流体 4 夹角	陶瓷片	金属片	高度	直径
	长	宽	高							
8	15~20	3	3	60,80,62.5	90	70,80,45	30	50	6	70

4 混合泵送性能测试

4.1 无阀泵泵送性能测试原理

压差测试和流量测试原理如图 6 所示。其中，信号发生器和功率放大器分别为压电振子提供驱动频率和驱动电压。试验中需测试压差随电压的变化情况和流量随频率的变化情况。

压差试验时，取泵中间的入口和出口用作试验接口，其余入口和出口均用胶塞密封，用刻度尺多次测量出口管与入口管的水柱高度差 Δh ，再转换成压差 ΔP 并取其平均值。流量试验时，泵的 3 个入口和 3 个出口同时使用，多次读取单位时间内刻度杯的刻度值或电子秤的质量值，取基平均值。

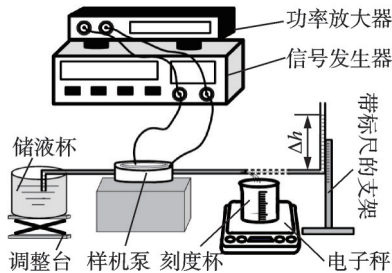


图 6 压差测试和流量测试原理图
Fig.6 Schematic diagram of pressure difference and flow rate test

4.2 泵送单一流体试验

以纯净水作为测试流体，泵水试验如图 7 所示。储水瓶为入口处 3 个量杯持续供水，升降台可调整储水瓶的高度，进而调节出水压力和速度，高精度电子秤能够精确测量泵水质量。通过固定某一电压值并逐渐改变频率，找到低频段最大泵流量时的频率作为低频谐振频率，经测试该泵的低频谐振频率为 10 Hz。

泵压差随驱动电压变化曲线如图 8 所示。随着电压的增加，泵出口管处压差 ΔP 也增加，当电压达到 200 V 时， ΔP 达到 494.06 Pa。表 3 为本研究与文献[20-21]的压差比较。在相同试验条件、相同电压下，本研究分别比文献[20]和文献[21]的压差值提高了 50.14% 和 20.64%。

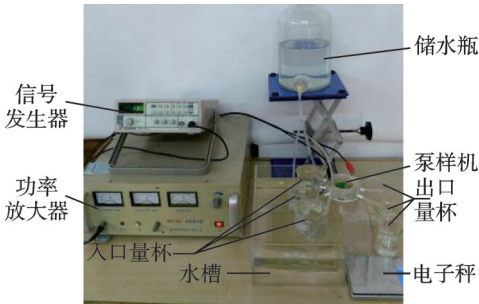


图 7 泵水试验
Fig.7 Pump water test

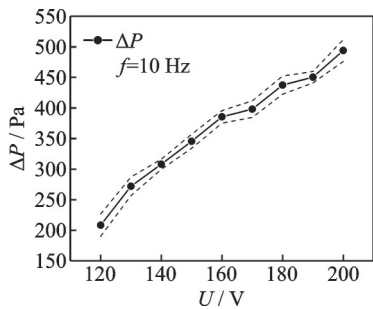


图 8 泵压差随驱动电压变化曲线
Fig.8 Change curve of pump pressure difference along with the change of driving voltage

表 3 本研究与文献[20-21]的压差比较

Tab.3 Data comparison of the pressure differences between this paper and references [20-21]

参数来源	U/V	水柱高度/mm	$\Delta P/Pa$	压差值提高百分比/%
文献[20]	160	26.20	256.76	50.14
本研究	160	39.34	385.51	
本研究	180	44.64	437.45	20.64
文献[21]	180	37.00	362.60	

将本研究与文献[21]进行对比，泵流量随频率变化曲线如图 9 所示。电压取值均为 180 V，本研究低频谐振频率为 10 Hz，文献[21]为 11 Hz。可以看出，在达到谐振频率前，2 个泵的输出流量均随频率的增加而增大，当其谐振频率分别为 10 和 11 Hz 时，流量分别达到 111.24 和 53.7 mL/min。经比较，本研究中泵流量较文献[21]提高了 107.15%。继续增加频率，泵流量逐渐降低，其变化趋势关于谐振频率呈近似对称分布。

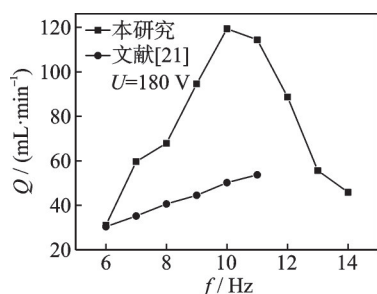


图9 泵流量随频率变化曲线

Fig.9 Change curve of pump flow rate along with different driving frequency

泵送性能试验表明,仿鱼形复合阻流体致阀的新型无阀泵,较固装复杂、能混合泵送的阻流体类无阀泵出流量有明显提高,较其他流管类微流量无阀泵提高的幅度更为显著。

4.3 混合泵送试验

液体混合输送试验选取蔬菜清洁剂(粘稠液体)作为溶质,溶剂选用纯净水。为便于试验观察和分析,向纯净水里滴入蓝墨水,形成蓝色溶剂。试验装置和仪器与图7相同。泵混合液体试验图如图10所示。其中:图10(a)为混合前的溶质和溶剂,作为溶质的蔬菜清洁剂呈黄色粘稠状,透明度差,表面有大量气团,溶剂滴入蓝墨水后呈深蓝色,分装到2个量杯内;图10(b)为混合后得到的混合液及其与混合前的溶质、溶剂的对比图,混合后溶液输出到与泵出口对应的3个量杯内,为便于观察,图中已将3个量杯内的混合液折合到1个量杯内。

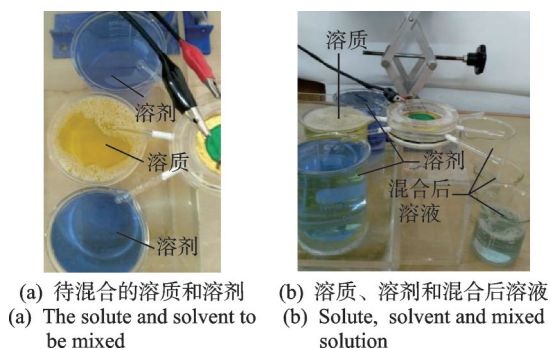


图10 泵混合液体试验图

Fig.10 Pump mixing liquids test

混合后的液体颜色较溶质、溶剂均变淡,液体色泽均匀,通透性高,溶质分布均匀,气泡少而小。同时,在驱动频率及电压分别为10 Hz和180 V时,测得输送混合液体的流量达到94.10 mL/min。

仿真分析和混合试验表明,仿鱼形阻流体无阀泵具有较好的液体混合效果。

5 结 论

1) 提出一种集液体混合输送、泵阀分体的仿鱼形阻流体及其无阀泵,通过解析流阻差和仿真分析泵流量、混合度,论证了仿鱼形阻流体致阀、致涡的原因。

2) 制作了无阀泵样机,在驱动电压和频率分别为180 V和10 Hz时,纯水试验泵的流量达到111.24 mL/min,验证了理论分析的正确性。

3) 取驱动电压和频率分别为180 V和10 Hz,泵送混合液体试验中泵流量达到94.10 mL/min,证明新型泵能够实现对液体的混合泵送。

4) 仿鱼形阻流体致阀、致涡及泵阀分体的无阀压电泵,不仅能够实现液体混合输送,也可实现阀的可优化、可替代,为无阀泵应用于小流量液体的混合输送提供了参考。

参 考 文 献

- [1] ZHAO X L, ZHAO D X, WANG J T, et al. Research on inlet and outlet structure optimization to improve the performance of piezoelectric pump[J]. Micromachines, 2020, 11(8): 735.
- [2] LI H Y, LIU J K, LI K, et al. A review of recent studies on piezoelectric pumps and their applications[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 151: 107393.
- [3] 关炎芳,耿铁,韩莉莉,等. 无阀微泵压电特性分析及性能测试[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(7): 1049-1054.
- [4] GUAN Yanfang, GENG Tie, HAN Lili, et al. Piezo-electric analysis and testing of valve-less micropump[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(7): 1049-1054.(in Chinese)
- [5] ALP K, MEHMET B O, YIGIT T, et al. A novel artificial pancreas: energy efficient valveless piezoelectric actuated closed-loop insulin pump for T1DM[J]. Applied Sciences, 2020, 10(15): 5294.
- [6] CHEN S, LIU H D, JI J, et al. An indirect drug delivery device driven by piezoelectric pump[J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(7): 075030.
- [7] YAN Q F, SUN W T, ZHANG J H. Study on the influencing factors of the atomization rate in a piezoceramic vibrating mesh atomizer[J]. Applied Sciences, 2020, 10(7): 2422.
- [7] WANG D H, TANG L K, PENG Y H, et al. Principle and structure of a printed circuit board process-based piezoelectric microfluidic pump integrated into

- printed circuit board[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2019, 30(17): 2595-2604.
- [8] PENG Y H, WANG D H, TANG L K. Principle and structure of a multichamber piezoelectric pump with large flow rate integrated into printed circuit board[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2022, 33(15):1-15.
- [9] 寇杰. 连续可变锥角的锥形流管无阀压电泵的优化与实验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2006.
- [10] 张伟荣, 陈震林, 陈晓生, 等. 频率控制四锥管压电泵双向流动的流场分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(6): 316-322.
- ZHANG Weirong, CHEN Zhenlin, CHEN Xiaosheng, et al. Flow field analysis of bidirectional flow in four-cone tubes piezoelectric pump through controlling frequency[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(6): 316-322. (in Chinese)
- [11] YANG Q, CHEN J. Entropy analysis of a valveless piezoelectric pump with hyperbolic tubes[J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10(2): 1-8.
- [12] 唐茗, 包启波, 张建辉, 等. 流线形流管无阀压电泵的仿真与实验[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(1): 56-61.
- TANG Ming, BAO Qibo, ZHANG Jianhui, et al. Rolling bearing fault identification based on quantum-behaved particle swarm optimization and multi-scale permutation entropy[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(1): 56-61. (in Chinese)
- [13] BAO Q B, ZHANG J H, TANG M, et al. A novel PZT pump with built-in compliant structures[J]. Sensors, 2019, 19(6): 1301.
- [14] LI K, LIU J M, ZHANG Q, et al. A flexible valve based piezoelectric pump for high viscosity cooling liquid transportation[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 38(6): 993-1002.
- [15] 严秋锋, 孙婉婷, 王红梅. 变截面圆弧形流管无阀压电泵的理论及试验研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(14): 320-327.
- YAN Qiufeng, SUN Wanting, WANG Hongmei. Theoretical and experimental study on valve free piezoelectric pump with variable cross-section circular arc flow tube[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(14): 320-327. (in Chinese)
- [16] 田鹏, 黄俊, 施卫东. 非对称分叉流管无阀压电泵的设计及试验[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(6): 1178-1183.
- TIAN Peng, HUANG Jun, SHI Weidong. Research on crack detection of root groove based on total focusing phased array ultrasonic[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(6): 1178-1183. (in Chinese)
- [17] HE L P, WU X Q, HU D B, et al. Research on output performance of valve-less piezoelectric pump with multi-cone-shaped tubes[J]. Microsystem Technologies, 2021, 27(5): 2091-2102.
- [18] HUANG J, ZHANG J H, XUN X C, et al. Theory and experimental verification on valveless piezoelectric pump with multistage Y-shape treelike bifurcate tubes[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(3): 462-468.
- [19] 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.
- [20] JI J, ZHANG J H, XIA Q X, et al. Theoretical analysis and experimental verification on valve-less piezoelectric pump with hemisphere-segment bluff-body[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(3): 595-605.
- [21] 赵丽清, 纪晶. 新型无阀泵机理与试验验证[J]. 光学精密工程, 2019, 27(12): 2647.
- ZHAO Liqing, JI Jing. Principle and experimental verification of valveless pump[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(12): 2647. (in Chinese)
- [22] 王记波, 刘国君, 马祥, 等. 无阀压电泵驱动的集成式微混合器[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(1): 92-99.
- WANG Jibo, LIU Guojun, MA Xiang, et al. An integrated micro-mixer driven by valveless piezoelectric pump[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(1): 92-99. (in Chinese)
- [23] 李培清. 无阀压电泵驱动的微流体混合器的设计与实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.



第一作者简介: 纪晶, 女, 1974年12月生, 博士、副教授。主要研究方向为压电流体执行器及应用。曾发表《Theoretical analysis and experimental verification on valve-less piezo-electric pump with hemisphere-segment bluff-body》(《Chinese Journal of Mechanical Engineering》2014, Vol.27, No.3)等论文。
E-mail: hcqjjing@163.com

通信作者简介: 胡彩旗, 女, 1974年11月生, 博士、教授。主要研究方向为压电执行器振动分析与控制。
E-mail: hucaiqi@163.com