

doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.2011.04.004

压电无阀微混合器的数值模拟

何秀华, 邓许连, 毕雨时, 王 健, 褚洪彩

(江苏大学能源与动力工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 设计了一种压电无阀微混合器, 对微混合器的结构和工作原理进行了说明和分析, 并对其进行了数值模拟。利用 ANSYS 软件对微混合器的驱动部件圆形复合压电振子进行了瞬态动力学分析, 研究了压电振子中心平面上各点在正弦交变电压驱动下的振动位移随各点半径、驱动电压的变化规律, 发现各点位移呈正弦变化规律, 各点振幅随半径的增大而减小, 随驱动电压的增大而增大。根据压电振子各点位移变化规律拟合得到了压电振子运动位移方程, 并根据位移方程编写了 UDF 程序, 经编译后将 UDF 程序调入到 Fluent 软件中, 以此作为设定压电振子的运动边界条件, 采用动网格模型对微混合器进行了动态数值模拟, 得到了压电无阀微混合器的流量及微混合器不同时刻的微混合器腔内的混合情况。结果表明: 设计的压电无阀微混合器不仅能实现流体泵送, 也可以在较短的时间内实现流体间的均匀混合。

关键词: 压电无阀微混合器; 数值模拟; 压电振子; 运动边界; 动网格

中图分类号: S277.9; TH38 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2011)04-0292-05

Numerical simulation for piezoelectric valve-less micro-mixer

He Xiuhua, Deng Xulian, Bi Yushi, Wang Jian, Zhuo Hongcai

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

Abstract: A piezoelectric valve-less micro-mixer was designed. Structure and working principle of the micro-mixer were illustrated and analyzed. Transient dynamic analysis was done on the round composite piezoelectric vibrator using ANSYS software. Displacement changing laws of the points on the center plane of the vibrator with radius and driving voltage under condition of the piezoelectric vibrator driven by sinusoidal alternating voltage were studied. It is found that displacements of the points behave sinusoidal changing laws. Amplitudes of the points decrease with radius but increase with driving voltage. Motion displacement equation of the piezoelectric vibrator was fitted according to displacement of each point on piezoelectric vibrator. A UDF program was edited and compiled according to the motion displacement equation and then the program was transferred to the Fluent software used as the moving boundary of the piezoelectric vibrator. Dynamic numerical simulation was carried out on the piezoelectric valve-less micro-mixer as well as the flowrate of the micro-mixer and mixing conditions in the micro-mixer at different time were obtained. The results show that the piezoelectric valve-less micro-mixer designed is not only able to pump fluids but also to get fluids mixed well in a short time.

Key words: piezoelectric valve-less micro-mixer; numerical simulation; piezoelectric vibrator; moving boundary; dynamic mesh

收稿日期: 2010-05-25

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2007095)

作者简介: 何秀华(1961—),女,四川成都人,副教授(zddeng@ujs.edu.cn),主要从事流体机械内部流动及性能研究。

邓许连(1984—),女,湖南邵东人,硕士研究生(xulianshift@126.com),主要从事流体机械内部流动研究。

近年来,微混合器已经成为微流体生物医学和生化分析的重要元件.与宏观尺寸的混合装置相比,由于微混合器尺寸小,可大大降低流动系统中的能耗、试样及试剂用量,且其响应速度快、精确度高,因此微混合器在化学分析、生物及化学传感、分子分离、核酸排序及分析、环境监测等领域有着广泛的应用前景.在微流体装置中实现混合是相当困难的,因为雷诺数很小,湍流将不能实现,混合完全靠扩散完成.微混合器混合方式可分为被动式和主动式两种.被动式微混合器种类较多,如T型式、分层复合式、注射式、内置障碍块式^[1]、蜿蜒蛇状式^[2]、弯弧管道式^[3]、人字交叉型式^[4-5]等.被动式微混合器结构简单,易于制造和集成,性能稳定,但其占用空间较大,混合速度慢.主动式微混合器根据其驱动方式的不同,又分为电渗式^[6]、磁致动式^[7]、压力扰动式、声波式、热致动式^[8]等.主动式微混合器混合速度快,易控制,但其结构复杂,加工困难,成本高,需消耗能量,有些驱动力甚至会对生物流体产生损坏,如超声波.近年来,采取措施改善混合效果,减少流体充分混合所需的时间,成为微混合器研究的热点.

文中提出一种新型的无阀压电微混合器,它将无阀压电泵与微混合器相结合,既可实现混合又可实现泵送.采用ANSYS软件对微混合器用复合压电振子进行瞬态动力学分析,并利用Fluent软件,结合动网格模型对混合器进行动态数值模拟,以预测微混合器的流量及混合性能.

1 微混合器结构及工作原理

压电无阀微混合器由压电振子、两倒置的变形Tesla混合管、泵体、泵腔、两个泵进口和一个泵出口等组成,其结构如图1所示.两倒置的变形Tesla混合管组成泵腔的进出口管,微混合器采用平面结构.当压电振子向上运动时,泵腔容积增大,流体经两倒置的Tesla混合管流入泵腔,这时,微混合器处于吸入状态.相反,当压电振子向下运动,流体经两倒置的Tesla混合管流出泵腔,微混合器处于泵出状态.当微混合器处于吸入状态时,由于进口管(左侧管)的流阻比出口管(右侧管)流阻小,从进口管流入的流体较出口管流入的流体多,而当其处于泵出状态时,由于进口管的流阻比出口管大,经出口管流出的流体较进口管多,所以微混合器流体从进口管流入,出口管流出.在左侧设置两个进口,作为两种不同流体的进口,变形Tesla混合管相当于被动混合结构,

流体经过混合管及泵腔后即可实现混合.右侧设置一个出口,作为混合物的出口.

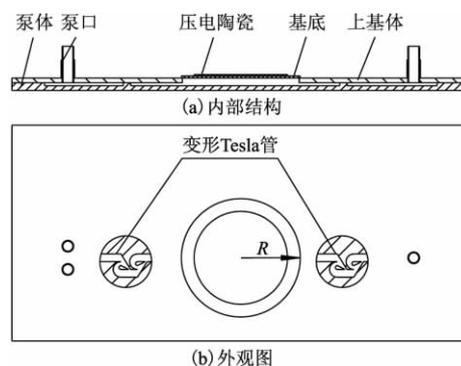


图1 压电无阀微混合器结构示意图

Fig. 1 Structural scheme of piezoelectric valve-less micromixer

由于压电振子的上下运动,使泵腔内压力不断变化,从而加剧流体对流,促进了流体快速均匀混合.

2 压电振子的有限元分析及结果

文中采用圆形复合压电振子^[9],支撑方式为周边支撑.压电陶瓷为PZT4,直径为2.4 mm,基底材料为黄铜,直径3.0 mm.采用ANSYS 10.0的Multiphysics模块对压电振子进行有限元分析.由于电极层厚度很薄,为简化模型,忽略其厚度,将压电振子分为两部分,位于中间的圆形压电复合层板由压电陶瓷与金属基底组成,其分析为结构-电场耦合分析,而不被压电陶瓷所覆盖的环形金属基底分析为结构分析.选用节点六面体的SOLID 5单元作为压电陶瓷材料的结构单元,而基底材料选用SOLID 45单元.建立三维模型时,将压电陶瓷层与基底材料层通过Glue命令粘在一起.采用结构化的六面体网格进行网格划分.

为研究压电振子在正弦电压作用下的运动规律,对压电振子进行了瞬态动力学分析.分析时在压电陶瓷上下表面上施加正弦交变电压,得到压电振子各点位移随时间变化的曲线.图2给出了幅值为100 V的正弦电压,驱动频率为100 Hz,压电振子中心平面内各点在一个周期内的位移曲线.其中:图2a为压电振子上距中心不同半径点在一个振动周期内的位移曲线;图2b为压电振子中心点和3/5半径处的位移曲线与正弦曲线的比较图;正弦曲线1以图2a中振子中心处最大位移为振幅;正弦曲线2以图2b中3/5半径处最大位移为振幅;两者频率均为100 Hz.由图2a可以看出:各点处均以与驱动频率相同频率做正弦运动,中心点振幅最大,且半径越大,振幅越小.由图2b可以看出:位移曲线与正弦曲

线贴合得非常好,压电振子各点处的位移曲线完全看成是正弦曲线。

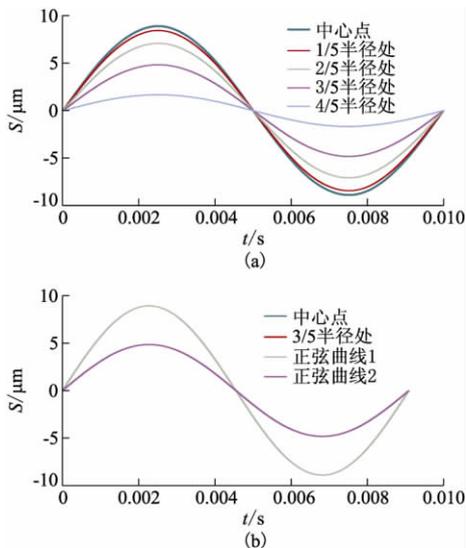


图 2 压电振子各点位移曲线

Fig. 2 Displacement curves of points on piezoelectric vibrator

图 3 给出了驱动频率为 100 Hz,不同电压下,压电振子中心平面不同点处的振幅曲线。其中:图 3a 为不同电压时,不同半径点处的振幅曲线;图 3b 为电压 100 V 时,压电振子各半径点振幅曲线与拟合抛物线的比较图。

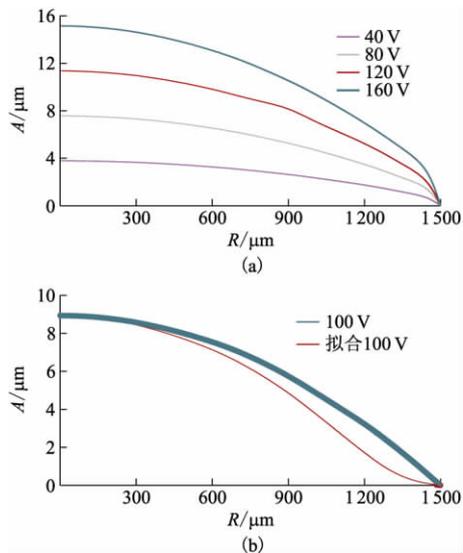


图 3 压电振子各点振幅曲线

Fig. 3 Amplitude curves of points on piezoelectric vibrator

由图 3a 可以看出:同一电压时,不同半径处的振幅大致形成一抛物线,高压电振子中心点越远,半径越大,振幅越小。由图 3b 可以看出:模拟曲线与拟合曲线有一定的差值,且离中心点距离越远,差值越大,但总体差值较小,仍可将压电振子各点振幅看成是一

条抛物线。所拟合抛物线位移方程为 $A_i = A [1 - (r_i/R)^2]$ 其中: A_i 为各点处振幅; A 为 100 V 时压电振子模拟振幅值; r_i 为各点半径; R 为压电振子半径。

图 4 为中心平面内不同半径处振幅随电压的变化曲线。可以看出:各点处振幅随电压的变化趋势均为一直线,即各点处振幅与电压呈现线性变化,电压越大,振幅越大。

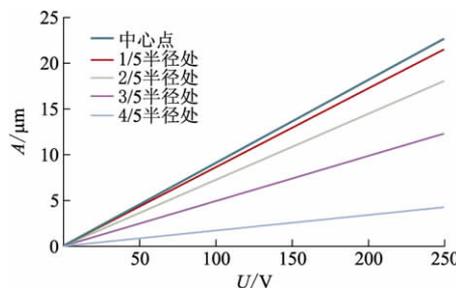


图 4 压电振子各点振幅随电压变化曲线

Fig. 4 Changing curves of amplitude of points on piezoelectric vibrator

由以上分析可知:压电振子各点处在一定频率的正弦电压作用下,均作一定振幅的与驱动电压相同频率的正弦运动,各点处振幅大致成抛物线,中心点振幅最大,边缘点振幅为 0,各点振幅与驱动电压成线性关系。由此,可设定压电振子各点位移变化曲线关系式为

$$S_i = A \sin(2\pi ft) \left[1 - \left(\frac{r_i}{R} \right)^2 \right], \quad (1)$$

式中: S_i 为各点不同时刻位移; f 为驱动电压频率。

3 微混合器的动态模拟及结果

3.1 基本控制方程

文中只考虑流体在压力作用下的流动,忽略其所有的体积力项,认为其仍然满足无滑移条件。

N-S 方程

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \gamma \nabla^2 \mathbf{v}, \quad (2)$$

式中: \mathbf{v} 为速度矢量; ρ 为流体密度; p 为压力; γ 为流体运动黏性系数。

连续性方程

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0. \quad (3)$$

当流体混合时,存在不同流动介质间由于分子布朗运动而产生的扩散作用。根据菲克定律,含有物质的扩散通量,在给定方向单位时间内通过单位面积的含有物质的数量与该方向含有物质的浓度梯度成比例,即

$$q_i = -D \frac{\partial c}{\partial x_i}, \quad (4)$$

式中: q_i 为含有物质的扩散通量; c 为浓度; D 为分子扩散系数.

当流体流动时,含有物质还会随流动而输移,因此其流动的变化应考虑对流和扩散两方面的作用,这个过程由对流扩散方程控制,即

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho Y_i v) = D_i \nabla^2(\rho Y_i), \quad (5)$$

式中: Y_i 和 D_i 分别为第 i 种物质的质量分数和热传导系数.

3.2 边界条件

1) 进出口的边界条件设为压力进口和压力出口,相对压力均设为 0. 两种不同颜色的水从进口中两个不同的半平面流入.

2) 压电振子所在面设置为运动壁面,其余固体壁面满足无滑移边界条件.

3) 在微流体条件下,固体边界对流体将产生显著的影响. 在 $1 \sim 1000 \mu\text{m}$ 的范围内,分子作用力虽然存在,但其并不是影响微流动特性的主要因素. 固壁仍满足无滑移边界条件.

3.3 动边界运动的实现

由上述分析可知:在微混合器的工作过程中,压电振子作为驱动部件,其在正弦压力驱动下,振子上各点均作一定的正弦运动,各点位移方程可由式(1)表示. 由对无阀压电泵的研究分析可知:采用动网格模型对压电泵进行模拟可有效地将压电振子在一个周期内运动特征和流体的运动特征进行间接耦合模拟^[10]. 针对压电振子的这种特性,应用 Fluent 软件中动网格相关的 DEFINE_GRID_MOTION 宏定义编写动边界的 UDF 程序,经编译后,调入 Fluent 程序,并设定压电振子的边界条件,计算开始后 Fluent 将自动搜索所有的边界节点,从而控制变形运动物体的边界动态域上的节点位移,有效地将压电振

子动边界引入流场分析.

3.4 计算结果与分析

图 5 给出了压电振子振幅为 $15 \mu\text{m}$, 频率为 100 Hz 时,微混合器进出口的瞬时流量曲线. 可以看出: $0 < t < 0.25 \text{ s}$ (即 $0 \sim 1/4T$) 和 $0.75 \text{ s} < t < 1.00 \text{ s}$ (即 $3/4T \sim 1T$) 时,腔内压力小于外界压力,为吸入阶段;0 时刻时,压电振子由平衡位置向上运动,此时泵腔容积变化率最大,流入流量达到最大值,进出口的流量均为正,由于变形 Tesla 管正反向流阻系数不同,因此由入口吸入的流量大于从出口吸入的流量;在 $0.25 \text{ s} < t < 0.75 \text{ s}$ (即 $1/4T \sim 3/4T$) 时,腔内压力大于外界压力,流体从泵腔排出;0.50 s 时刻时压电振子回到平衡位置向下运动,泵腔容积变化率再次达到最大值,进出口流出流量均达到最大值,此时流量均为负,且出口流量大于进口流量. 经计算该状态微混合器的流量为 2.78 mL/min .

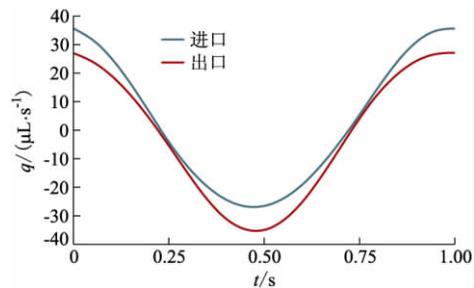


图 5 微混合器一个周期内进出口瞬时流量

Fig. 5 Transient flowrate at inlet and outlet of micromixer in a cycle

微混合器内初始设定只有一种液体. 压电振子开始振动后,两种不同颜色的水经混合器进口的两个半平面进入混合器内. 图 6 给出了压电振子振幅为 $15 \mu\text{m}$, 频率为 100 Hz 时,经过不同时间后混合器内两种流体的混合情况. 可以看出:微混合器在此工作状态下,泵出较理想混合流体的时间大约为 0.40 s.

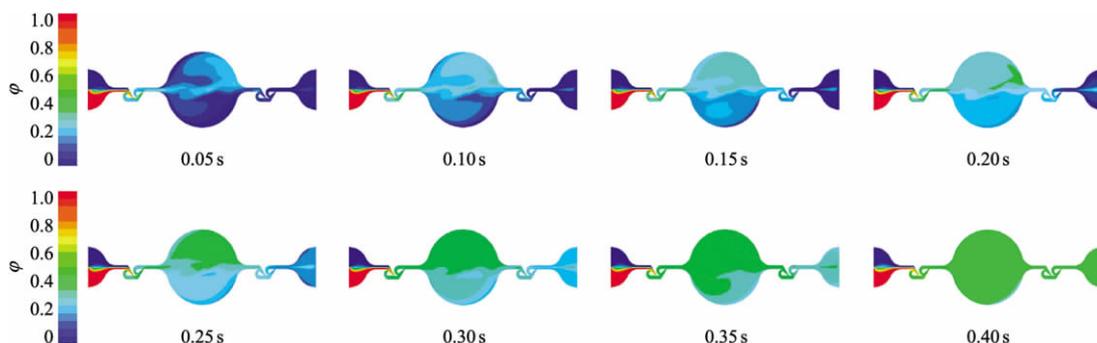


图 6 不同时刻微混合器混合情况

Fig. 6 Mixing condition in micromixer at different times

4 结 论

1) 利用 ANSYS 软件对压电振子进行了瞬态动力学分析,得到了压电振子在正弦交变电压驱动下各点位移呈正弦变化的规律,振幅随电压的增加呈线性增加,振子中心点振幅最大,各点振幅随着半径的增加而减小,各点振幅值大致呈一抛物线。

2) 采用动网格模型,设定压电振子运动边界条件,对微混合器进行了动态模拟,得到了压电振子振幅为 $15\ \mu\text{m}$,频率为 $100\ \text{Hz}$ 时,微混合器一个周期内进出口的瞬时流量,其流量为 $2.78\ \text{mL}/\text{min}$,验证了微混合器实现泵送的功能。

3) 研究了压电振子振幅为 $15\ \mu\text{m}$,频率为 $100\ \text{Hz}$ 时,经过不同时间微混合器内两种液体的混合情况,随着时间的推移,混合器的混合情况逐渐变好,大致经过 $0.40\ \text{s}$,混合器输出较理想的混合流体。

参考文献 (References)

- [1] Wang Ruijin, Lin Jianzhong, Li Huijun. Chaotic mixing on a micro-mixer with barriers embedded [J]. *Chaos*, 2007, 33(4): 1362 - 1366.
- [2] Jang Min Park, Dong Sung Kim, Tae Gon Kang, et al. Improved serpentine laminating micromixer with enhanced local advection [J]. *Microfluid Nanofluid*, 2008, 4(6): 513 - 523.
- [3] Khmar V, Aggararwal M, Nigam K D P. Mixing in curved tubes [J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61(17): 5742 - 5753.
- [4] Mubashshir Ahmad Ansari, Kim Kwang-Yong. Shape optimization of a micro-mixer with staggered herringbone groove [J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62(23): 6687 - 6695.
- [5] Song Hongjun, Yin Xiezhen, Bennett Dawn J. Optimization analysis of the staggered herringbone micro-mixer based on the slip-driven method [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2008, 86(8): 883 - 891.
- [6] 宋红军, 司 廷, 尹协振. 一种棋盘形分布表面电势的电渗微混合器设计 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2007, 37(10): 1242 - 1247.
- Song Hongjun, Si Ting, Yin Xiezhen. Design of an electroosmosis micromixer with a chessboard-like zeta-potential distribution [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2007, 37(10): 1242 - 1247. (in Chinese)
- [7] Wang Yiou, Zhe Jiang, Benjamin T F C, et al. A rapid magnetic particle driven micromixer [J]. *Microfluid Nanofluid*, 2008, 4(5): 375 - 389.
- [8] Olivier Français, Marie Caroline Jullien, Lionel Rousseau, et al. An active chaotic micromixer intergrating thermal acutation associating PDMS and silicon micro-technology [J]. *DTIP of MEMS & MOEMS*, 2006, 8: 26 - 28.
- [9] 张 睿, 何秀华, 蒋权英, 等. “V”型管无阀压电泵用双压电复合振子的振动性能分析 [J]. *液压与气动*, 2009(2): 75 - 77.
- Zhang Rui, He Xiuhua, Jiang Quanying, et al. Research on vibration characters of the bimorph actuator for the valve-less piezoelectric pump with “V”-shaped tube [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2009(2): 75 - 77. (in Chinese)
- [10] 何秀华, 邓许连, 杨 嵩, 等. 涡旋阀压电泵内部空化流动的数值分析 [J]. *排灌机械*, 2009, 27(6): 352 - 356.
- He Xiuhua, Deng Xulian, Yang Song, et al. Numerical analysis of cavitation flow in a vortex-valve piezoelectric micropump [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2009, 27(6): 352 - 356. (in Chinese)

(责任编辑 陈建华)