

基于直线超声电机的微液滴制造设计与研究

吴必成,姚志远,张百亮

(南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室,江苏 南京 210016)

摘要:为了制造出在生物化学领域中更高精度的微液滴,本文提出了一种新型的微液滴制造系统,该系统由驱动部件(直线超声电机和控制器)、微液滴生成部件(注射器、硅胶软管与玻璃基微米孔)、信号发生器和放大器及微液滴分离部件(弯振振动块和单边固支梁)组成。利用控制器驱动直线超声电机移动,由电机推动注射器,以便在微米孔尖端产生微小液滴。再利用振动块的振动与固支梁的位移放大作用使生成的微小液滴克服粘性力,从微米孔的尖端分离。该系统采用位移精度高的直线超声电机作为驱动元件,并研究微小液滴制造生成的设计方法。实验研究表明,该系统能生成直径小于 $\varnothing 2 \mu\text{m}$ 的微液滴。

关键词:直线超声电机;弯曲振动;微米孔;微液滴

中图分类号:TM922;TH12 **文献标识码:**A

Design and Study on Micro Droplet Fabrication Based on the Linear Ultrasonic Motor

WU Bicheng, YAO Zhiyuan, ZHANG Bailiang

(State Key Lab. of Mechanical Structure Mechanics and Control,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to create the micro droplets with higher precision for the biochemistry, a new kind of micro droplet manufacturing system is presented in this paper. It is composed of the drive component (the linear ultrasonic motor and the controller), the micro droplet generation component (the syringe and the silicone hose, the glass micro hole), the signal generator and amplifier and the micro droplet separation (the bending vibration block and the unilateral clamped beam). Utilizing the drive controller to drive the linear ultrasonic motor, the motor pushes forward the syringe and the micro droplet is produced at the micro hole tip. The generated micro droplet is separated from the micro hole tip by making use of the vibration of the vibration block and the displacement amplification role of the clamped beam to overcome the cohesive force. The linear ultrasonic motor with high precision is adopted as the drive component in the system. The method of producing micro droplets is studied. The experiments show that the micro droplets with a diameter of below $\varnothing 2 \mu\text{m}$ are generated.

Key words: linear ultrasonic motor; bending vibration; micro hole; micro droplet

0 引言

微尺度下的液滴^[1]在喷墨打印、无模具成形、机械制造及材料合成等领域应用广泛,其研究备受关注。

自20世纪80年代始,人们开始研究微液滴,研究涉及流体力学、生物、医学、化学和电子工程等多个学科^[2]。影响微液滴成形和分离的因素有微小孔径的玻璃孔的制作方法等。Steinbock L J, O Ot-

to^[3]和J sha等^[4]均报道了一种使用拉制仪P-2000直接拉伸的方式来制备玻璃锥形纳米孔。但他们使用的拉制设备为美国sutter公司制造的P-2000微电极拉制仪,与本实验的自制拉制设备相比,其设备成本较高,且必需依赖于进口设备。现有的微液滴生成系统大多采用电磁电机作为驱动部件。为了提高驱动精度,传统的电磁电机常选用“伺服电机+滚珠丝杠”的方式^[5],由于具有运动转换环节,不可避

收稿日期:2016-10-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275229);国家重大仪器设备开发专项基金资助项目(2012YQ100225)

作者简介:吴必成(1992-),男,江苏盐城人,硕士生,主要从事振动工程方面的研究。通信作者:姚志远(1962-),男,江苏镇江人,博士生导师,主要从事振动测试与分析,结构动力学建模和仿真及超声电机技术的研究。

免地存在间隙误差,虽然经过预紧后可实现良好的传动精度,但这种方式成本太高。滚珠丝杠副^[6-7]的位移精度为 20 μm ,这样的精度不能满足要求。如市场上的保定兰格实验室型注射泵结构复杂,其行程分辨率仅为 156 nm,不能满足高精尖行业对微液滴的精度要求。另外,液体的粘度也会对喷射效果产生影响。喷射时,喷射能转化为液滴的动能,还伴随着液体的粘滞耗散和克服液体表面张力的能量,因此,微液滴生成系统要克服液体的粘性力,使生成的微液滴分离。吴森洋设计的一种适合于微液滴喷射成形的压电式喷头仅能制造出 40 μm 的颗粒^[8]。综上所述可知,研究生成具有更高精度的微液滴具有重大的工程意义^[9-11]。

先进的微液滴制造系统要突破三项关键的技术,即

1) 如何制造出内径足够小的玻璃基通孔。目前采用的方法是加热大尺寸的玻璃管^[12],然后拉伸玻璃管,使玻璃管收缩,在拉伸的断面形成微小内径的通孔。

2) 微液滴的生成与精密控制进给量。采用高精度的直线超声电机^[13]可以有效地控制生成部件的位移量,使微液滴在微米孔尖端生成且不会形成喷射。

3) 使尖端生成的微液滴克服液体的粘性力^[14-16],从尖端分离出来,落在可控的位置内。

本项研究设计并制作了一种基于直线超声电机驱动的微液滴制造系统。其中,驱动部件采用 V 型直线超声电机和相应的控制器,该直线超声电机的位移分辨率为 50 nm,它可以提高驱动的精度,使注射器的位移精度在纳米级别。实验研究表明,该系统能生成直径小于 $\varnothing 2 \mu\text{m}$ 的微液滴。

1 微液滴制造系统整体设计

1.1 总体设计与组装

图 1 为设计流程图。

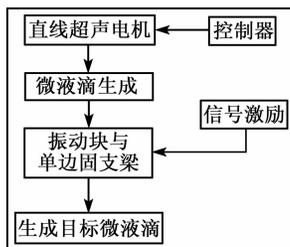


图 1 设计流程图

由图 1 可知,该系统分为驱动部件(直线超声电机和控制器)、微液滴生成部件(注射器、硅胶软管与玻璃基纳米孔)、信号发生器和放大器以及微液滴分

离部件(弯振振动块和单边固支梁)4 部分。

按照上述思路制作出实物图,如图 2 所示。

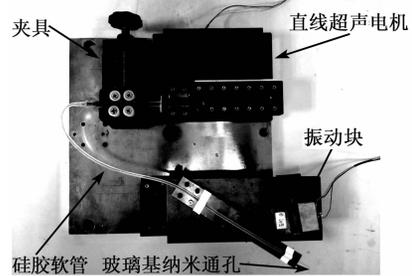


图 2 微液滴制造系统

1.2 驱动部件(直线超声电机和控制器)

驱动部件采用 V 型直线超声电机,该电机的定子由两个垂直的、连续变截面的 Langevin 振子组成,每个 Langevin 振子的长度为 60 mm。电机的最大推力为 50 N,位移分辨率为 50 nm。控制器用于控制电机的运行,其控制方式有连续运动和间歇步距运动两种。

1.3 微液滴生成部件(注射器、硅胶软管与玻璃基纳米孔)

注射装置采用的注射器规格为 0.6 mm \times 25 mm,容积为 1 mL,标记 1 mL 的液柱长度为 58 mm。纳米孔与注射器采用硅胶软管密封连接,软管内径为 $\varnothing 0.6 \text{ mm}$ 。对于玻璃基纳米孔的制造,实验中使用的是华西医科大学仪器厂生产的毛细玻璃管,其外径为 $\varnothing 1.2 \sim 1.4 \text{ mm}$,内径为 $\varnothing 0.6 \sim 0.9 \text{ mm}$,长 200 mm。采用自主研发的基于激光加热的玻璃基毛细管拉伸装置拉制出纳米通孔。通过显微镜的测量与筛选,采取孔尖端内径小于 $\varnothing 2 \mu\text{m}$ 的纳米孔作为生成微液滴的纳米孔。

1.4 信号发生器和放大器

振动块由 RIGOL 公司生产的型号为 DG1032Z 的信号发生器和南京佛能科技实业有限公司生产的 HFVA-153 系列信号放大器驱动(见图 3)。信号发生器产生正弦信号,并通过信号放大器激励微液滴分离部件的振动,振动并使液滴从纳米孔尖端分离。发生器与放大器如图 3 所示。



图 3 信号发生器与放大器

1.5 微液滴分离部件(弯振振动块和单边固支梁)

微液滴分离部件由弯振振动块和单边固支梁组成。振动块是激振源,结构上分为前端矩形块、压电陶瓷片、夹持元、铜片和后端矩形块,并通过内六角螺栓紧固而成,如图 4 所示。

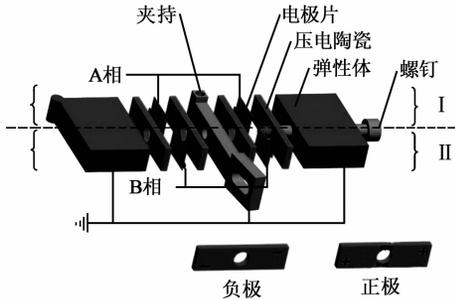


图 4 振动块

振动模块以往大多采用压电陶瓷片的逆压电效应来激发矩形块的振动。此种方法的一个缺点是纵向振动的振幅非常小,在纳米数量级上。而本次实验的方案是利用振动块的弯振模态。激发弯振所需频率比激发纵振所需信号频率低,且低频驱动使振动块具有更高的振动能量,振幅更大。通过显微镜的测量,此弯振在接触点的振幅 $s=300\ \mu\text{m}$ 。

单边固支梁的作用是将振动块的振动效应传递到玻璃基纳米孔上,使尖端生成的微液滴克服液体的粘性力,从尖端分离出来,落在可控的位置内。固支梁与振动块如图 5 所示。

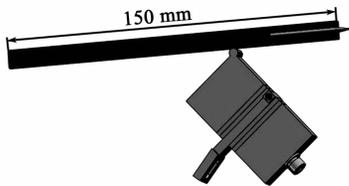


图 5 固支梁与振动块

由图 5 可知,梁的左端为固支端,右端自由,右端固定连接玻璃基纳米孔。其中,弯振在接触点的振幅 $s=300\ \mu\text{m}$,梁左端固支处到接触点的距离 $d=95\ \text{mm}$,梁长 $D=150\ \text{mm}$ 。梁与振动块的夹角为 45° 。计算梁的右端纳米孔的振幅 s_1 为

$$s_1 = \frac{s \times \sin 45^\circ \times D}{d} = 335\ (\mu\text{m}) \quad (1)$$

由式(1)可得纳米孔尖端的振幅为 $335\ \mu\text{m}$,可以使其尖端生成的微液滴克服液体粘性力,从尖端分离。

2 微液滴生成尺寸计算与实验

采用基于激光加热的玻璃基毛细管拉伸装置拉制出纳米通孔。通过显微镜的观测,选取尖端内径

小于 $\varnothing 2\ \mu\text{m}$ 的玻璃基纳米通孔作为实验对象。采用 $0.5\ \text{mol/L}$ 的 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 溶液作为生成微液滴的液体,实物拍摄与显微镜下的测量图如图 6、7 所示。



图 6 单个玻璃基纳米孔

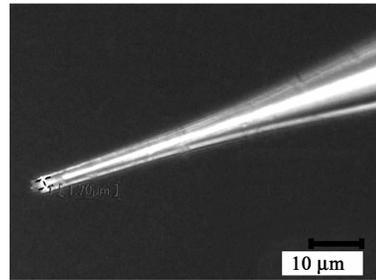


图 7 显微镜下的纳米孔

由图 7 可知,选取内径为 $\varnothing 1.70\ \mu\text{m}$ 的纳米孔作为实验对象。每当电机行经一个最小步距 $d_1=50\ \text{nm}$ 时,纳米孔内液体会向前推进,最终在纳米孔的尖端形成附着的微液滴。图 8 为纳米孔尖端附着的微液滴。

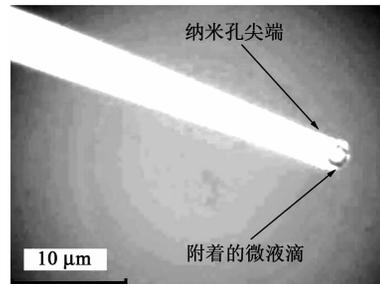


图 8 生成的微液滴

通过显微镜可以测量尖端的微液滴的直径,得到该系统生成的微液滴的直径大小分布规律。图 9 为微液滴直径的分布规律。

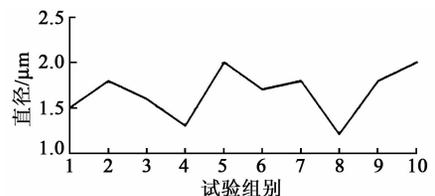


图 9 微液滴生成的直径

由图 9 可知,尖端生成的微液滴直径小于 $\varnothing 2\ \mu\text{m}$ 。另外,通过微液滴分离部件中的振动块的弯曲振动,连带单边固支梁的振动,使附着于纳米孔

尖端的微液滴从尖端分离出去,制造出具有更高精度的微液滴。

3 结论

1) 提出了一种新型的微液滴制造系统,该系统利用直线超声电机作为驱动元件,能够提高位移精度,以便控制与生成出更小的微液滴。

2) 设计了微液滴分离部件,该分离器由弯振振动块和单边固支梁组成,弯振振动块产生振动,并通过固支梁放大振动。弯振振动块采用了矩形结构,并利用它的弯曲振动,以便有高的振动效率与能量,使微液滴克服液体粘性力从纳米孔尖端分离。

3) 设计和制造了一种新的微液滴生成系统。试验表明,该微液滴生成系统,结构简单,能够产生更小的微滴液,微滴液的平均直径小于 $\varnothing 2 \mu\text{m}$ 。

参考文献:

- [1] WHITESIDES G M. The origins and the future of microfluidics[J]. *Nature*, 2006, 442(7101): 368-373.
- [2] LEE C Y, LIN Y H, LEE G B. A droplet-based microfluidic system capable of droplet formation and manipulation[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2009, 6(5): 599-610.
- [3] STEINBOCK L J, OTTO O, SKARSTAM D R, et al. Probing DNA with micro- and nanocapillaries and optical tweezers[J]. *Journal of Physics Condensed Matter An Institute of Physics Journal*, 2010, 22(45): 454113.
- [4] SHA J, NI Z, LIU L, et al. A novel method of fabricating a nanopore based on a glass tube for single-molecule detection [J]. *Nanotechnology*, 2011, 22(17): 4400-4408.
- [5] 王金娥. 滚珠丝杠驱动的杠杆-肘杆二次增力数控压力机设计[J]. *兰州理工大学学报*, 2015, 41(5): 37-39.
- [6] 汤文成, 徐楠楠. 滚珠丝杠副发展及研究现状[J]. *机械设计与制造工程*, 2016, 45(4): 11-14.
- [7] 王民, 孙瑞, 张巍, 等. 滚珠丝杠副精度保持性加速退化试验方法[J]. *北京工业大学学报*, 2016, 42(11): 1629-1633.
- [8] 吴森洋. 微液滴喷射成形的压电式喷头研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [9] SUZUKI T, HIOKI A, KURAHASHI M. Precision in chelatometric titrations of barium(II)[J]. *Bunseki Kagaku*, 1999, 48(4): 441-447.
- [10] 王磊, 淮秀兰, 陶毓伽, 等. 喷雾冷却中微液滴碰撞薄膜的流动与换热[J]. *工程热物理学报*, 2010, 31(6): 987-990.
- [11] 覃加念. 微液滴驱动连续变形镜镜面仿真及工艺探索[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [12] 陈麒. 基于超声电机的微纳米玻璃管拉伸系统[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [13] 王金鹏. 超声电机驱动的大行程、高精度二维运动平台关键技术的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [14] 时运来. 新型直线超声电机的研究及其在运动平台中的应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [15] 杨磊, 杨向龙. 黏性应力对液体扩张抛撒影响的实验研究[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(8): 146-149.
- [16] 陈彬剑. T型微通道内液滴及气泡生成机理的研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [16] HAMRIT S, DJESSAS K, BRIHI N, et al. Study and optimization of Al-doped ZnO thin films deposited on PEN substrates by RF-magnetron sputtering from nanopowders targets[J]. *Journal of Materials Science Materials in Electronics*, 2016, 27(2): 1730-1737.
- [17] TSUJI T, HIROHASHI M. Influence of oxygen partial pressure on transparency and conductivity of RF sputtered Al-doped ZnO thin films[J]. *Applied Surface Science*, 2000, 157(1/2): 47-51.
- [18] 李林娜, 陈新亮, 孙建, 等. 溅射气压对直流电源磁控溅射制备掺铝氧化锌薄膜性能的影响[J]. *人工晶体学报*, 2010, 39(suppl. 1): 118-122.
- LI Linna, CHEN Xinliang, SUN Jian, et al. Effect of sputtering pressure on the properties of ZnO thin films prepared by direct current magnetron sputtering[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2010, 39(suppl. 1): 118-122.
- [19] ZHAO B, TANG L D, WANG B, et al. Optical and electrical characterization of gradient AZO thin film by magnetron sputtering [J]. *Journal of Materials Science Materials in Electronics*, 2016, 27(10): 1-5.
- [20] 刘丹, 吴云龙, 刘超英, 等. 磁控溅射法制备 AZO 薄膜/玻璃结构物性研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2010(22): 160-162.
- LIU Dan, WU Yunlong, LIU Chaoying, et al. Research on the structure and properties of AZO film/glass by magnetron-sputtering [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010(22): 160-162.
- [21] 丁宇, 蒋百灵, 田亚萍, 等. 氧气流量对磁控溅射 AZO 薄膜光电性能的影响[J]. *西安理工大学学报*, 2011, 27(3): 306-310.
- DING Yu, JIANG Bailiang, TIAN Yaping, et al. Influence of oxygen flux on optoelectronic properties of AZO films deposited by magnetron sputtering method [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2011, 27(3): 306-310.

(上接第 568 页)