

文章编号 1004-924X(2014)08-2166-07

压电式喷头的微滴喷射行为及其影响因素

薛光怀, 贺永*, 傅建中, 吴森洋

(浙江大学 现代制造工程研究所 浙江省先进制造技术重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要:设计并加工了一种压电式微滴喷头,并在微滴喷射平台上进行了微滴喷射实验,用 CCD 相机拍摄到了液滴形成的整个过程。通过激光位移测量平台测量了压电片的振荡曲线,并将位移曲线输入流体模拟求解器,用两相的方法模拟出了微滴形成的过程。模拟显示液滴的形成时间,大小,形状和速度与实验结果拟合得很好。通过对比液滴的形成过程与压电片的振荡曲线,发现主液滴在压电信号为高电平时,已经脱落了微滴喷嘴,基于此提出了通过改变高电平时间和增加压电片的自由振荡衰减阻值提高微滴喷射最高频率的方案。通过微滴喷射行为模拟,解释了微滴喷射实验中出现两条液滴的原因,并通过改变喷腔结构和改变液体黏度,找到了减少额外液滴出现的途径。

关键词:压电喷头;微滴喷射;衰减振荡;喷射频率;黏度

中图分类号:TN384;TH16 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142208.2166

Droplet jetting of piezoelectric printhead and corresponding effect factors

XUE Guang-huai, HE Yong*, FU Jian-zhong, WU Sen-yang

(Zhejiang Province Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Institute of Advanced Manufacturing Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

* Corresponding author, E-mail: yongqin@zju.edu.cn

Abstract: A piezoelectric printhead was designed and fabricated for Drop-On-Demand(DOD)printing. The formation of a droplet was captured by a CCD camera in the jetting experiment on a droplet jetting platform. The deformation curve of a piezoelectric plate was measured by a laser displacement sensor and it then was inputted into a flow simulation solver to simulate the process of droplet jetting with the methodology of free surface volume of fluid. The results show that the formation time, size and the volume and speed of the droplet simulated are in agreement with that of experiments. In the contrast between the formation process of droplet and the displacement curve of piezoelectric plate, it is found that the main droplet has dripped off the nozzle before the end of a high voltage, which can be used to improve the maximum frequency of droplet jetting by reducing the high voltage time and increasing the damping vibration resistance value of piezoelectric plate. The simulation of droplet jetting can also explain the formation mechanism of additional droplets in the experiment, and can successfully reduce the additional droplet by changing the structure of printhead and the viscosity of forming materials.

Key words: piezoelectric printhead; droplet jetting; damping vibration; jetting frequency; viscosity

收稿日期:2013-10-31;修订日期:2014-01-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51375440);浙江省自然科学基金资助项目(No. LY12E05018);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 2013QNA4007)

1 引言

随着工业革命的快速发展,自由成形技术日益成熟,并被广泛应用于产品设计、医疗和工业生产等领域,取得了巨大的经济利益。微滴喷射自由成形(freeform fabrication with micro-droplet jetting)是自由成形技术的一个重要分支,其成形原理主要基于液滴喷射(micro-droplet jetting 或 micro-liquid dispensing),即通过外力迫使成形材料以微细液滴(或者液流)的形式从喷嘴喷射到底材上,形成二维图文或者三维实体^[1]。根据喷射出来的液滴状态,微滴喷射自由成形系统可以分为连续式(Continuous Printing, CP)和按需式(Drop-On-Demand, DOD)两类。当控制器发出一次喷射信号后,连续式喷射系统的喷头能够不断地喷射出由液滴构成的液滴串,而按需式喷头则只能喷射出一滴主液滴以及伴随产生的尾液滴或者若干个分裂的卫星滴。

微滴喷射自由成形集分辨率高,喷射频率快,能实现高精度的喷射容积,超微细控制和结构紧凑,集成度高等特点于一身,现已从常规的图形印刷扩展到很多新的工程领域,如:细胞打印^[2],集成电路印刷^[3],喷印电子元器件^[4-5],制作新材料^[6]和生物医药^[7-8]等。

微滴的形成过程是一个瞬时的流体快速变化的过程。由于微滴喷腔几乎是完全封闭的,故很难观测到内部流场压力和喷腔液面的变化。因此,加强对微滴喷射行为的研究很有必要,而了解微滴的形成机理有助于更好地设计微滴喷射结构和压电信号。魏大忠,张人佶等人通过简化腔体内部的流体运动,得出液滴形成需要满足以下 2 个条件:1、克服液面的表面张力,2、喷腔的形变体积要大于一个液滴的体积。在此基础上,他们还提出了压电驱动器和腔体结构的设计方法^[9]。Changsung Sean Kim 等人用 MEMS 技术制造出一个用于打印工业印刷板的微滴喷头,并用计算流体力学的办法对喷腔进行建模分析,从而优化了喷腔的结构设计。通过多次实验,他们定性得到微滴喷头的最佳结构,如:通过改变输入脉冲宽度,优化了喷射出来的液滴质量;通过改变喷腔中液体的黏度,得到不同黏度下喷射出来的液滴的状态参数^[10]。Herman Wijshoff 从压电喷腔的

驱动、喷腔的声学特性、液滴的形成、喷腔的亲水性和气泡 5 个方面对压电喷头中的动力学特性进行了综述和研究,较为详尽地描述了压电驱动和微滴喷射行为的特性^[11]。

利用压电片的振动作为微滴喷射动力源可使喷头结构简单,易于实现。该种喷头中形成液滴的动力是压电片的弯曲和伸张,这种方法也是引起喷腔中流场变化的决定性因素。文献[12-13]通过实验的方法直接测量出压电片的位移,进而通过模拟求解器研究压电喷腔内部的流场变化,这种方法有助于深入理解微滴喷射行为,解释微滴喷射实验中出现的现象和优化微滴喷射参数。在此基础上,本文主要工作包括:(1)制造压电式微滴喷头;(2)测量和拟合压电片位移;(3)模拟微滴喷射行为;(4)基于实验及模拟结果分析液滴形成过程。

2 微滴喷头的制造

本文参照 Changsung Sean Kim^[10]和 K. C Fan^[14]等人设计的微滴喷头,自行设计了一款压电式微滴喷头,如图 1 所示。该款微滴喷头的主要特点如下:(1)结构简单紧凑,加工方便;(2)严格保证了气密性;(3)喷嘴采用螺纹连接,可随时更换;(4)喷腔为锥形,玻璃喷嘴为流线型,有利于减缓能量耗散。

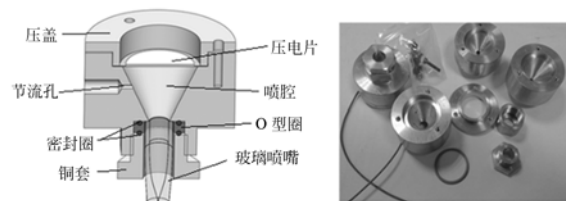


图 1 微滴喷头的装配图和实物图

Fig. 1 Assembly drawing and real picture of droplet printhead

在搭建起来的微滴喷射平台上进行了微滴喷射实验。选用的液体材料为纯净水,施加在压电片上的信号为 JetDriver III 压电陶瓷驱动器发出的梯形波,如图 2 所示。用肉眼观测到的微滴喷射现象如图 3 所示。

在 $t_{\text{rise}} = 20 \mu\text{s}$, $t_{\text{dwell}} = 900 \mu\text{s}$, $t_{\text{fall}} = 20 \mu\text{s}$, 电压 $U = 80\text{V}$, 频率为 20Hz 的梯形波的驱动下,用 CCD 相机拍摄到的液滴如图 4 所示。

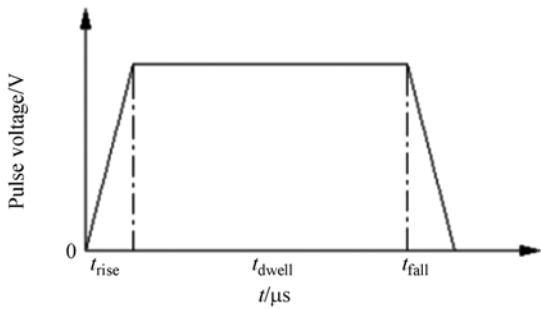


图 2 梯形波信号

Fig. 2 Trapezoidal wave signal

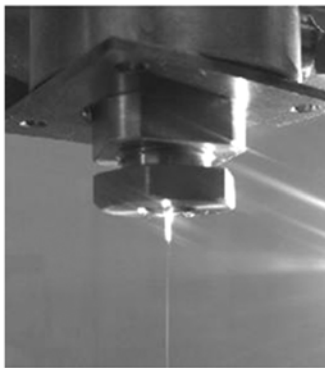


图 3 肉眼观察微滴喷射

Fig. 3 Visually observed droplet jetting

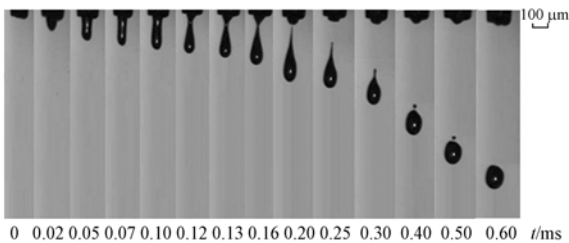


图 4 观测系统拍摄到的液滴形成过程

Fig. 4 Formation of droplet captured by observing system

3 压电片位移测量

实验中用的压电片如图 5 所示。压电片有两层：一层是薄铜片，厚度为 0.2 mm，直径为 28 mm；一层是压电陶瓷片，厚度为 0.2 mm，直径为 20 mm。压电陶瓷片在压电信号的激励下，产生膨胀或收缩变形，带动金属薄膜片产生弯曲变形，从而引起压电腔体内液体体积的变化。正压力状态时，液体在极短的时间内补充进压电腔体中；负压力状态时，液体从喷嘴中喷射出去，如图 6 所示^[9]。

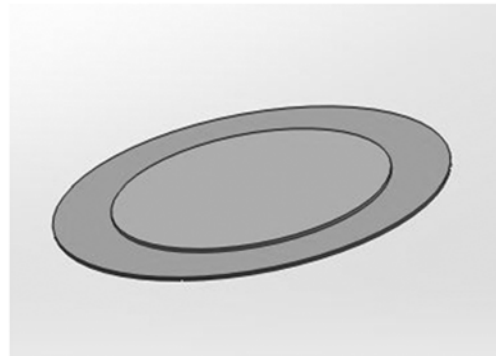


图 5 压电片

Fig. 5 Piezoelectric plate

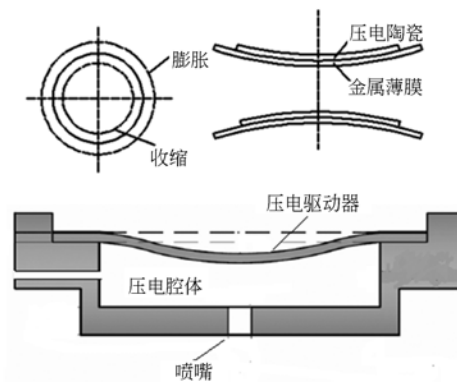


图 6 压电陶瓷驱动原理示意图

Fig. 6 Sketch map of driving principle of piezoelectric plate

位移测量采用的是基恩士 (Keyence) 公司的 LK-G150 激光位移传感器和 LK-G3001(P) 独立控制器，采样周期为 20 μs。装有压电片的喷腔被固定在只有一个自由度的支架上，将激光对准压电片的中心点进行测量，该点的位移曲线如图 7 所示。

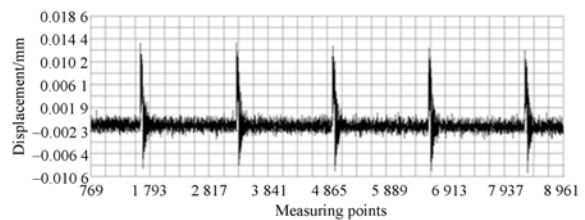


图 7 压电片中心点的位移曲线

Fig. 7 Displacement of central point of piezoelectric plate

将位移曲线的某一段放大，如图 8 所示，可以将一个周期内压电片的位移曲线分为 5 个部

分:拉伸,第一次衰减振荡,回缩,第二次衰减振荡,恢复平稳。结合 CCD 相机拍摄到的液滴的形成过程可知,0~0.11 ms 时,液滴被逐渐挤出喷嘴;在 0.11 ms 时,压电片的位移达到最大,后回缩,液滴被拉断;在 0.20 ms 附近主液滴脱离喷嘴,其不再受压电片振荡的影响。压电片继续做衰减振荡,直到梯形压电信号幅值开始逐渐减少,压电片回缩后,以新的平衡点为中心继续做衰减振荡,直至压电片恢复平稳状态。

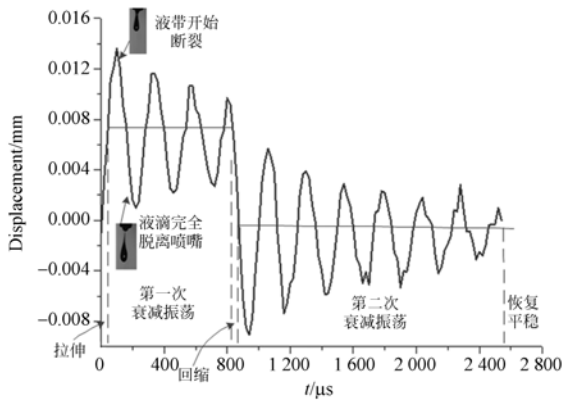


图 8 压电片中心点的一段位移曲线

Fig. 8 A segment of displacement of central point on piezoelectric plate

4 微滴喷射行为模拟

微滴喷腔具有封闭性、不透明性,微滴形成过程还具有瞬时性。因此,很难完全通过实验捕捉到微滴喷腔内部的流场变化和喷嘴处液面的运动。计算流体力学模拟的方法为深入研究微滴喷射行为提供了一个新的途径。自由液面流体体积法(VOF)可用于模拟两种不可混合液体的情况,分析它们之间的表面张力的影响。本文基于质量守恒(式(1))和动量守恒(式(4)),结合一系列的 N-S 方程(式(5)~式(7))进行流体的数值分析。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}u) = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + S_{Mx}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}v) = \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}w) = \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + S_{Mz}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + S_{Mx}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}v) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + S_{My}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}w) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla z) + S_{Mz}. \quad (7)$$

为了便于模拟,在不影响模拟准确性的前提下,做如下假设:

- (1) 模拟中的液体是不可压缩的牛顿流体,流体的特征稳定,不随时间改变;
- (2) 喷腔和玻璃喷嘴都是亲水的,喷嘴外表面是完全疏水的;
- (3) 喷腔结构和压电片的位移都是轴对称的,故可以取任意一个过中心轴的截面进行建模来模拟微滴喷射行为;
- (4) 压电片回缩、储液罐中的液体补充到喷腔的这个过程对液滴形成的影响很小。

根据上述假设,在 ESI-CFD V2013 中建立喷头的几何模型,并划分网格,进行参数设置,如图 9 所示。该模型中,一共有 24 624 个节点,29 180 个网格单元,2 个结构域和 4 个非结构域。用 Sweeps 为 50,收敛精度为 0.001 的 CGS 求解器求解速度变化,用 Sweeps 为 50,收敛精度为 0.1 的

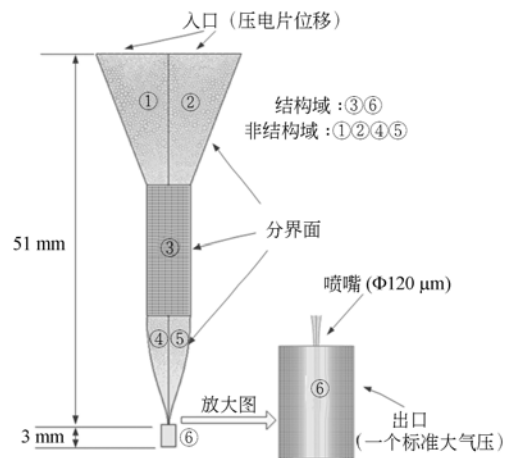


图 9 建立喷腔模型和设置模拟的边界条件

Fig. 9 Geometrical model and boundary conditions of printhead

AMG 求解器求解压力。将激光位移测量仪测量的数据经过拟合后施加到模型中压电片相对应的位置。其他参数设置参见 CFD-ACE+ 用户手册^[15]。

将模拟结果与实验结果放到同一张图中进行对比发现,无论是在液滴的大小,形状,速度,还是液滴的形成时间,模拟结果与实验结果都拟合得很好,这进一步验证了模拟的可靠性。因此,该方法可用于指导微滴喷射的行为研究。

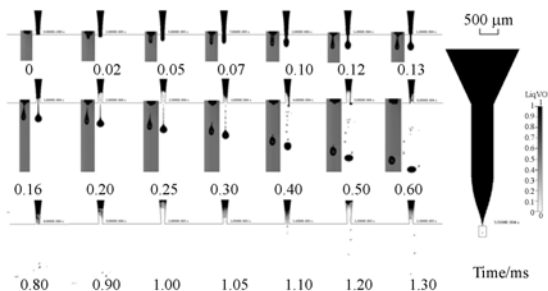


图 10 模拟结果与实验结果对比图

Fig. 10 Comparison of simulation and experiment results

5 基于实验与模拟结果的微滴喷射行为分析

5.1 微滴喷射频率

从压电片位移和液滴形成时间的对应关系上可以看出,在压电片衰减振荡停止前,主液滴已经与喷嘴分离,但电压幅值恢复为零后,压电片还会继续做衰减振荡,因此只有等到压电片完全恢复平稳后,才能将下一个压电脉冲施加到压电片上,否则会影响喷射液滴的一致性,甚至有可能不能保证液滴按照 DOD 喷射。综上所述,微滴的喷射频率与压电片的振荡有直接的关系,通过分析实验结果与模拟结果可知,通过调节压电信号的参数和改变压电片性质两个方面可以提高喷射频率:

(1) 在保证喷射出主液滴的前提下,尽量缩短高电平时间,以尽快恢复低电平,从而让压电片提前进入第二次衰减振荡阶段。

(2) 改变压电片的振动特性,增加其自由衰减振荡的阻值,使其快速恢复平稳状态。

5.2 额外液滴的成因及消除

微滴喷射实验中,在某些压电信号下,液滴会分成两束从喷嘴喷射出来,如图 11 所示。K. C Fan 等人也观测到了这种现象^[14],除主液滴外的另外一条液流是由额外液滴组成的,实验中无法观测其形成的过程;流体模拟求解器展示了额外液滴形成的原因,如图 12 所示。由图 12 可以看出,额外液滴主要在 0.30~0.50 ms 之间形成。对比压电片的位移曲线可知,额外液滴是在第一次衰减振荡阶段第二个振荡峰值附近形成的,此时主液滴已被挤出,由压电片引起的喷腔体积变化不足以再挤出一滴主液滴,而压电片的迅速振荡会导致一滴额外的液滴被甩出来,形成一束额外的液流。



(a) 实验观测图

(b) 原理简图

(a) Observed result in experiment (b) Principle sketch map

图 11 两束液流从喷嘴喷出图

Fig. 11 Two beams of liquid flow ejected from printhead

额外液滴被认为是微滴喷射的一种不稳定现象,给微滴喷射带来很多不可控的因素,影响了打印精度,不能满足 DOD 喷射打印实体的需要。如何避免喷射两束液流是微滴喷射实验中必须解决的问题。目前的研究工作主要集中在改进喷腔结构和增加流体黏度两方面。

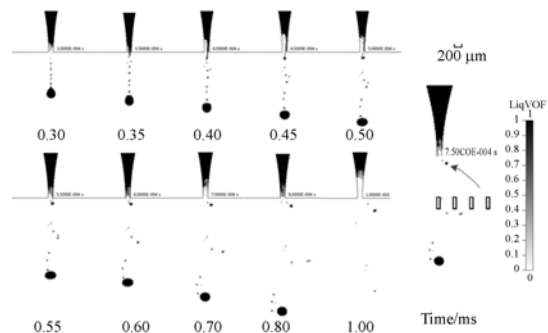


图 12 额外液滴的形成过程

Fig. 12 Formation of an additional droplet

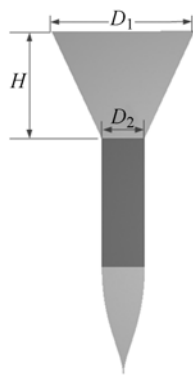


图 13 喷腔结构简图

Fig. 13 Structural schematic diagram of printhead

喷腔结构如图 13 所示。由图 13 可知,可以通过保持喷嘴的 D_1 和 D_2 不变,改变 H 值来研究喷腔结构对微滴喷射的影响。由于 D_1 不变,则压电片的大小和形变量一样,所以不同 H 下喷腔的形变量是一样的。当 H 分别为 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 mm 时,模拟出来的液滴状态如图 14 所示。可以看出,随着 H 的增大时,额外液滴逐渐减小,当 H 为 12~15 mm 时,额外液滴消失;然而,当 H 继续增大时,额外液滴又继续生成。

表 1 甘油-水溶液的物理性质^[16-17]

Tab. 1 Material properties of glycerol-water solution

甘油体积百分比/(%)	甘油密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	表面张力/ $(\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$	黏度/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$
10	1 029.1	70.3	1.26
20	1 059.5	69.1	1.80
30	1 088.6	68.2	2.71
40	1 116.1	67.6	4.28
50	1 142.5	67.1	7.33
100	1 261.1	23.7	1 410

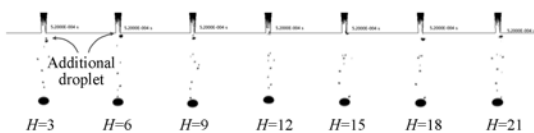


图 14 不同 H 值时的微滴喷射状况

Fig. 14 Droplet jetting in different H

喷射液体的黏度不一样时,喷射效果也会不一样。当 $H=18$ 时,对不同黏度的甘油的喷射效

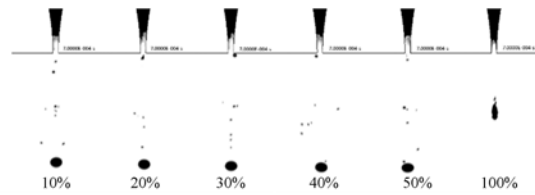


图 15 不同黏度下的喷射效果及额外液滴的形成情况

Fig. 15 Droplet jetting in different viscosities and formation of additional droplet

果进行模拟分析,如图 15 所示。由图 15 可以看出,随着黏度的增加,额外液滴越来越小,当甘油的体积比达到 50% 以上时,额外液滴几乎消失。纯甘油的情况下,由于黏度过大,出现微滴喷射不正常的情况。结合额外液滴产生的原理可知,由于液体黏度增大,压电片衰减振荡时,小液滴不容易被甩出来,故黏度越高,额外液滴越小,甚至消失。

6 结 论

本文制造了一个压电式的微滴喷头,在搭建起来的微滴喷射平台上进行了微滴喷射实验,用 CCD 相机拍摄了液滴形成的整个过程。为了更加深入了解微滴喷射现象,优化微滴喷射的压电信号参数和喷腔结构,对微滴喷头进行了几何建模和流体动力学分析,模拟出了液滴形成的过程。基于实验及模拟结果的分析得出以下结论:(1)在两相流体的仿真结果中,液滴的形成时间,大小,形状和速度与实验结果拟合得很好,模拟求解器对微滴喷射行为的研究具有很好的指导意义;(2)通过对比分析发现,主液滴已经在高电平时脱离了微滴喷嘴。因此,在保证微滴能喷出来的情况下,缩短高电平时间,增加压电片的自由衰减振荡阻率,可以提高微滴喷射的最高频率;(3)通过模拟微滴喷射行为,可以很好地解释实验中观测到的同时出现两条液流的现象,分析不同喷腔结构和不同黏度液体的微滴喷射效果,优化了微滴喷射参数。

下一步工作将主要专注于微滴喷腔的压力场和速度场的分析;结合模拟实验与真实实验深入地分析了微滴喷射现象,提高微滴喷射的稳定度和喷射频率。

参考文献:

- [1] 王运赣,张祥林. 微滴喷射自由成形[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2009.
WANG Y G, ZHANG X L. *Freeform Fabrication with Micro-droplet Jetting* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2009. (in Chinese)
- [2] NOROTTE C, F D M, NIKLASON L E. Scaffold-free vascular tissue engineering using bioprinting [J]. *Biomaterials*, 2009, 30(30): 5910-5917.
- [3] 杨振国. 一种面向 PCB 的全印制电子技术[J]. 印制电路信息, 2008, (9): 9-12.
YANG ZH G. A kind of PCB oriented fully printed electronics technology [J]. *Printed Circuit Information*, 2008, (9): 9-12. (in Chinese)
- [4] RAMZI B, DANIEL M S T. Micro heat pipe fabrication: high performance deposition platform for electronic industry [J]. *International Workshop on Microfactories*, 2006.
- [5] JONATHAN H. Inkjet printing of PLED displays [J]. *Information Display*, 2005, (2): 10-15.
- [6] YU C. Direct digital manufacturing of three-dimensional functionally graded material objects [J]. *Computer-Aided Design*, 2008, 40(12): 1080-1093.
- [7] HOSSAIN S M Z, LUCKHAM R E, SMITH A M, et al.. Development of a bioactive paper sensor for detection of neurotoxins using piezoelectric inkjet printing of Sol gel-derived bioinks [J]. *Analytical Chemistry*, 2009, 81(13): 5474-5483.
- [8] PATEL S A, BARNES A, LOFTUS N, et al.. Imaging mass spectrometry using chemical inkjet printing reveals differential protein expression in human oral squamous cell carcinoma [J]. *Analyst*, 2009, 134(2): 301-307.
- [9] 魏大忠, 张人信, 吴任东, 等. 压电微滴喷射装置的设计[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(8): 1107-1110.
WEI D ZH, ZHANG R J, WU R D, et al.. Design of piezoelectric micro-droplet injector [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2004, 44(8): 1107-1110. (in Chinese)
- [10] KIM C S, PARK S J, SIM W, et al.. Modeling and characterization of an industrial inkjet head for micro-patterning on printed circuit boards [J]. *Computers & Fluids*, 2009, (38): 602-612.
- [11] WIJSHOFF H. *Structure and Fluid-dynamics in Piezo Inkjet Printheads* [M]. University of Twente, 2008.
- [12] 朱猛, 黄战华, 王小军, 等. 显微动态散斑法测量压电陶瓷位移特征曲线[J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 844-849.
ZHU M, HUANG ZH H, WANG X J, et al.. Measurement of piezoelectric displacement characteristic curves using dynamic speckle correlation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 844-849. (in Chinese)
- [13] 刘泊, 郭建英, 孙永全. 压电陶瓷微位移驱动器建模与控制[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1503-1509.
LIU B, GUO J Y, SUN Y Q. Modeling and control for PZT micro-displacement actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1503-1509. (in Chinese)
- [14] FAN K C, CHEN J Y, WANG C H, et al.. Development of a drop-on-demand droplet generator for one-drop-fill technology [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 147(2): 649-655.
- [15] HERRAN C L, WANG W, HUANG Y, et al.. Parametric study of acoustic excitation-based glycerol-water microsphere fabrication in single nozzle jetting [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2010, 132: 051001-1.

作者简介:



薛光怀(1990—):男,广东湛江人,2013年于浙江大学机械工程及其自动化专业获得工学学士学位,主要从事增材制造技术研究。Email: xgh@zju.edu.cn



贺永(1979—):男,江苏盱眙人,博士,副教授,博士生导师,2001年于中国矿业大学理学院工程力学系获得学士学位,2008年于浙江大学获得工学博士学位,2008-2010年于浙江大学力学博士后流动站从事研究工作,主要从事增材制造、微细加工、精密运动控制等方面的研究。Email: yongqin@zju.edu.cn