

文章编号 1004-924X(2017)04-0954-08

圆管式压电喷头的液体分配

常家庆, 黄博*, 刘亚欣

(哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对用于喷墨打印的圆管式压电喷头建立了计算模型, 并且根据它的驱动特点选择了合适的边界条件。介绍了仿真软件针对自由表面流动问题的计算原理。然后, 以乙二醇水溶液为例, 计算了压电喷头分配该溶液的分配过程; 利用液滴成像系统获取了不同时刻的液滴图像, 验证了建立的模型和数值算法的正确性。最后, 计算了压电喷头在不同输入位移、不同黏度以及不同表面张力下的液体分配过程。仿真结果显示: 液体分配性能与激励位移密切相关, 在 72.5 mN/m 的表面张力作用下, 10 nm 的输入位移很难分配黏度为 4.0 mPa·s 的液体, 而 15 nm 的输入位移在分配黏度为 4.0 mPa·s 液体时却能够产生卫星液滴。因此, 对于某种液体寻找一个合适的激励条件非常重要, 过小的激励产生不了液滴, 过大的激励则会产生较大甚至多个卫星液滴; 增大黏度会延缓或阻滞液滴形成过程, 增大表面张力却能加快液滴形成过程。本文的计算方法对于研制新式喷头或者研究喷头的喷射能力均具有指导意义。

关键词: 印刷电子; 喷墨打印; 压电喷头; 液体分配; 液滴分离

中图分类号: TP69 ; TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172504.0954

Liquid distribution of tubular piezoelectric print head

CHANG Jia-qing, HUANG Bo*, LIU Ya-xin

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: huangbo74@163.com

Abstract: A calculation model of droplet ejection process for tubular piezoelectric print heads was established according to its structural parameters. Appropriate boundary conditions were chosen based on driving characteristics of the print head. Then, the calculation principles of simulation software on free surface flow problem were introduced. By taking the mixed solution of ethylene glycol and water as an example, the droplet formation processes were simulated. Pictures of droplets at different moments were obtained by a droplet imaging system and the correctness of the modeling and numerical algorithm was verified. Finally, the droplet formation processes of the print head for different input displacements, different viscosities and different surface tensions were simulated. The simulation shows that the liquid distribution performance is closely related to excitation displacement. With the surface tension fixed at 72.5 mN/m, the liquid with the viscosity of 4.0 mPa·s is difficult to be distributed by a 10 nm input displacement; however, that can be distributed into satellite droplets by a 15 nm input displacement. The results demonstrate that it is very important to find appropriate excitation conditions for liquid distribution. Droplets cannot be produced with too small excitation, while

收稿日期: 2016-07-18; 修订日期: 2016-09-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51105116); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. HIT-IBRSEM. 2013038)

larger or many satellite droplets will be produced with bigger excitation. Increasing viscosity will postpone or restrain droplet formation while increasing surface tension can fasten droplet formation. The proposed calculating method in the paper has guiding significance on developing new print heads or studying the ejection capacities of print heads.

Key words: printed electronics; ink-jet printing; piezoelectric print head; liquid distribution; droplet breakup

1 引言

喷墨打印技术已经广泛应用于生物芯片打印、药物筛选、微胶囊制作、微型传感器制作等各个工业领域,而将喷墨技术用于印刷电子行业是喷墨打印技术的一个极具前景的产业方向^[1,2]。

印刷电子,是利用快速、高效和灵活的喷墨打印技术在基板上形成导电路径和图形,或形成整个印制电路板的过程。在印刷电子领域,存在各种导电墨水、半导体墨水、绝缘墨水,它们的物理性质和化学性质各异。比如,可以用来喷制导电电极的不同浓度下的聚乙烯二氧噻吩/聚苯乙烯磺酸(PEDOT/PSS)有机溶液,其黏度为 $3\sim 40\text{ mPa}\cdot\text{s}$,表面张力为 $45\sim 80\text{ mN/m}$ ^[3-5]。用于喷制有机半导体薄膜层的TIPS并五苯与邻二氯苯墨混合溶液,其表面张力为 $20\sim 40\text{ mN/m}$ ^[6]。通过反复打印有机溶液形成一种有效厚度的绝缘薄膜可以有效应用于微电子制造和封装领域,文献^[7]列出了几种用于绝缘薄膜打印的高分子聚合溶液,其黏度为 $1\sim 30\text{ mPa}\cdot\text{s}$,表面张力为 $20\sim 40\text{ mN/m}$ 。此外,打印高温焊料也需要特制的耐高温喷头,Chang^[8]实验的高温焊料的黏度在 $2\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 左右,表面张力高达 497 mN/m 。

由于印刷电子等领域存在着各种溶液试剂并且它们的黏度范围和表面张力范围各不相同甚至性能迥异,在实际应用中往往需要针对特定应用研制特定的打印喷头或者调整溶液物理属性。此外,针对一种特定的喷头,也需要能够快速分析得出该打印头在某种激励波形下的分配能力。在设计喷头时或者在进行分配实验时,利用可靠快速的数值模拟方法可以预先得到某种驱动形式喷头的驱动能力,或者获得喷头针对各种流体的分配性能,由此可以缩短设计周期、节省设计成本以及提高实验效率。

在液滴形成计算方面,早期的理论模型和数值计算为液滴仿真打下了坚实的基础,但是早期的理论模型做了很多简化,边界条件也过于简单,在液滴演变的时间精度上并不准确^[9-11]。近年来,Lai^[12]分析了压电片的输入位移量和变形速率对于液滴分离过程的影响。Chang^[8]利用牛顿流体假设分析了熔化状态下的焊料在驱动压力波形下的喷射情况和液滴形成情况,仿真得出单个利落的液滴分离、多个卫星液滴的分离以及喷嘴口积聚一个大型液滴的情况。Wu^[13]利用仿真技术分析了喷头的激励波形与喷管内部压力声波的关系,并解释了雾化液滴、卫星液滴以及单个液滴的形成原因。Zhang^[14]利用仿真技术发现一种不同于卫星液滴的伴随液滴,伴随液滴可以从喷射液柱的前缘面剥落,并且会严重影响分配的方向和定位精度。薛光怀^[15]仿真模拟了不同浓度下甘油和水的混合溶液在其设计的一种压电片喷头下液滴的产生过程。范增华^[16]在COMSOL Multiphysics环境下,利用压电设备模型、流固耦合模型和两相流模型分析了压电陶瓷变形、胶体挤压和胶体流出过程,并利用CMOS相机和光学显微镜观察液滴的形态。Sen^[17]利用Flow3D软件仿真计算了热打印喷头的液滴形成过程,并分析了结构参数和流体性能参数对于液滴性能的影响。此外,开源程序包Gerris近年来经常被用于表面流体力学的仿真。Tan^[18]利用该程序包的自适应网格技术,并且利用真空腔体代替气泡生长,模拟了热打印喷头的液滴形成过程。Fuster^[19]较为综合地分析了液滴分离、液膜分裂的机理和相关数值计算技术,对于深入研究液滴分离行为有较大的参考价值。

尽管不少研究者对于液滴分离进行了有效的模拟仿真,然而针对圆管式压电喷头建立的计算模型大多属于二维模型,结构和边界条件过于简化,也没有对液体的物理属性对分配过程的影响

进行有效总结。本文针对一种圆管式压电喷头,建立了一个相对完整的计算模型,分析计算了该喷头在各种输入位移条件下喷射液滴的情况,并且研究了该喷头对于各种流体的分配特性。本文的研究方法和结论既可以指导设计某种结构形式的喷头以分配某种特定的液体,也可为研究其他类型喷头的液体分配能力提供有效的参考。

2 计算模型

2.1 液滴分离的计算原理

假设待分配液体为牛顿流体,这在大多数情况下是有效的,因为印刷电子领域的聚合物溶液很多情况下是浓度很低的水性液体。三维不可压缩假设下的质量方程和动量方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla \cdot (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) + \mathbf{g} + \frac{1}{\rho} \mathbf{F}_b, \quad (2)$$

这里 ∇ 为哈密顿算子, ρ 为密度, μ 为动态黏度, \mathbf{v} 为速度矢量, p 为压力, \mathbf{F}_b 为体积力。

对于互不相溶的两种流体流动问题,通常采用 VOF(流体体积分数)方法处理。假设第二相流体(比如水)在某个计算网格中占有的体积率为 F ,所有处于两相流体边界上的网格的 F 值将处于 0 和 1 之间,而非边界上的网格的值将为 0(完全被第一相占有,比如空气)或者 1(完全被第二相占有,比如水)。

对于特定流场其体积率的分布和变化情况符合公式(3)。

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{v}F = 0. \quad (3)$$

对于混合相(比如水和空气混合相)的网格,单元的密度和黏度计算公式如下:

$$\rho_{\text{mix}} = F\rho_L + (1-F)\rho_G, \quad (4)$$

$$\mu_{\text{mix}} = \frac{F\rho_L\mu_L + (1-F)\rho_G\mu_G}{\rho_{\text{mix}}}, \quad (5)$$

这里 $\rho_L, \rho_G, \mu_L, \mu_G$ 分别代表液体和气体的密度及动态黏度。

对于液滴分离问题而言,表面张力是液柱或液滴表面上的一种主要作用力,从计算表面曲率

出发从而计算表面张力并将其作为一种边界条件不仅计算过程繁杂,而且在液滴分离点附近将面临着局部曲率趋于无限大的问题,需要一些特殊的近似处理手段,这无疑加大了求解的难度。Brackbill^[20]提出了用一种体积力代替表面力的方法——连续面力法。这意味着可以通过公式(6)将表面张力转换为动量方程中的体积力项 \mathbf{F}_b 。

$$\mathbf{F}_b = \sigma \cdot \kappa \cdot \mathbf{n} \cdot |\nabla F|, \quad (6)$$

这里 σ 为表面张力, κ 为平均曲率, \mathbf{n} 为单位法向。

利用有限体积法将质量方程和动量方程离散化,并利用 SIMPLEC 算法对压力和速度进行耦合求解。计算出流体体积率 F 后,在混合相网格(即两相交界面)利用分段线性表面重构技术(PLIC)构造出液柱或液滴的形状。

2.2 圆管式压电喷头计算模型的建立

本文的喷头以 MicroFab 公司的 MJ-AL 喷头为实验和三维仿真原型,该公司的喷头内部结构参数如图 1 所示,喷嘴口内径为 $50 \mu\text{m}$,玻璃管内径为 $254 \mu\text{m}$ 。在玻璃管中部利用导电环氧树脂将压电管和玻璃管黏接在一起,并且压电管内壁面作为压电管的一个电极,通过导电的环氧树脂将内壁面电极涂抹并覆盖至压电管外壁面 2 mm 处,以利于连接导线,这 2 mm 部分(CD 段)是没有驱动效果的。压电管的其余 8.4 mm 的外壁面(BC 段)作为另一个电极,这部分是具有驱动效果的。

在 CFD-GEOM 中建立的整体仿真网格图位于压电喷头结构尺寸图的正下方,只建立液体部分和空气部分的网格模型。全部网格均为六面体结构化网格,利用该前处理软件中的蝴蝶面网格划分法划分二维圆形区域,并利用线性和非线性网格拉伸生成技术生成了较高质量的六面体网格。由于 A 端口连接液体管路,而且 A 端口截面积远大于喷嘴口的截面积, A 端口在压力声波下引起的内部质点的振动速度相对很小,模拟计算时将 A 端口设置为封闭,这样并不会对喷嘴口的喷射效应产生影响。对喷嘴口而言,由于直接与外界空气接触,设定喷嘴口前端空气网格出口处的边界条件为压力出口,其相对压力值为零。单元总数目为 519805,最小网格为 $1.5 \mu\text{m}$,求解时

间为 0 至 120 μs , 在 3.3G 主频, 4G 内存的处理 器上进行一次仿真的计算时间大约为 84 h。

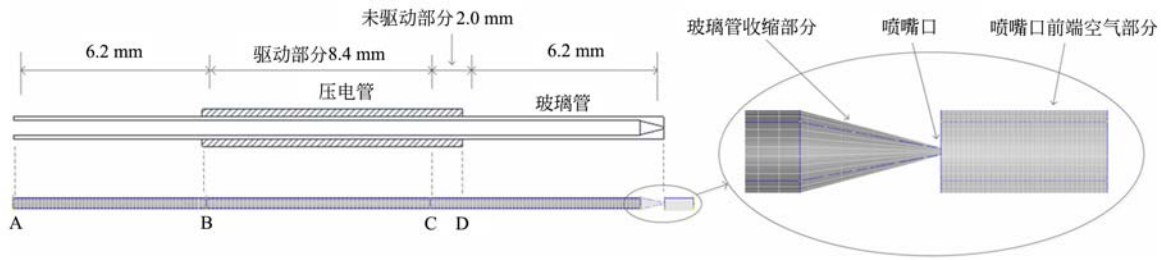


图 1 圆管式压电喷头的结构尺寸以及对应的仿真计算模型

Fig. 1 Structure size chart of tubular piezoelectric print head and its simulation model

对于有驱动效应的压电管部分, 因为压电管的响应速度很快, 玻璃管在压电管的驱使作用下一起收缩或扩张, 可以认为输入电压波形和产生的位移曲线形状相同^[21]。文献^[22]较为详尽地描述了该喷头内部的驱动机制。本文假设输入波形是常见的双极性梯形波, 与驱动压电管黏接的玻璃管其部分内壁段(BC段)的位移曲线也为同样形状的梯形波。该梯形波随时间变化曲线如图 2 所示; 在零时刻至 4 μs , 玻璃管将在输入电压的激励下扩张。从 4 μs 至 20 μs , 玻璃管壁不产生位移, 但是其内部流体中的压力波在不停的传递。从 20 μs 至 28 μs , 玻璃管壁从正向位移 D_s (扩张状态) 转为负向位移 $-D_s$ (收缩状态)。在 44 μs 至 48 μs , 玻璃管壁恢复至原始状态(既不扩张也不收缩)。这些随时间变化的玻璃内壁的位移条件通过用户自定义子程序来定义。玻璃管的变形将导致内部流体产生压力声波, 压力声波传递至喷嘴口将引起液体液面的振荡。

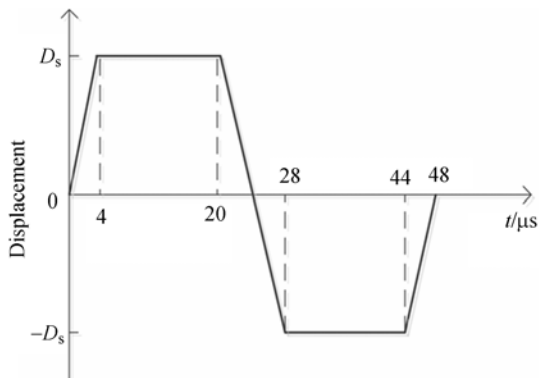


图 2 输入位移曲线

Fig. 2 Curve of input displacement

3 算例和实验验证

为了验证仿真计算的正确性, 设计了相关的验证实验。实验装置如图 3 所示, 带有模拟输出卡的计算机, 可以产生三路微秒级别的触发脉冲序列, 分别提供给发光二极管(LED)控制器、CCD 相机和信号发生器。信号发生器设置为触发模式, 每个输入的脉冲将控制信号发生器产生一个双极性梯形波, 经过波形放大器提供给喷头。其他两路脉冲触发信号相对于第一路有设定的延迟时间, 并分别控制 CCD 相机和 LED 灯进行液滴成像。获取的图片经过图像采集卡存储在计算机上, 并且可以实时处理这些图像, 以获取想要的信息。

实验和计算流体均为体积分数为 20% 的乙二醇水溶液, 其密度为 1 064 kg/m^3 , 动态黏度为 1.46 $\text{mPa} \cdot \text{s}$, 表面张力为 51.3 mN/m 。

计算和实验获得的一些图片如图 4 所示, 图 4(a) 中仿真结果为在 12 nm 双极性激励波下(参考图 2)的液滴形成情况, 图 4(b) 中仿真结果为在 10 nm 双极性激励波下的液滴形成情况, 其中喷头的激励电压和输入位移的关系可以参考文献^[22, 23]。图中较上位置的线代表距离喷嘴口 50 μm 处, 较下位置的线代表距离喷嘴口 200 μm 处。

从图中可以发现仿真求解计算精度很高, 不但时间精度在 1 μs 左右, 而且液滴分离轮廓与实验符合得也很好。与实验结果对比, 仿真分析结果在液柱长度, 以及液滴分离后其下端点距离喷嘴口的距离等信息有些偏大, 不过位置精度也能

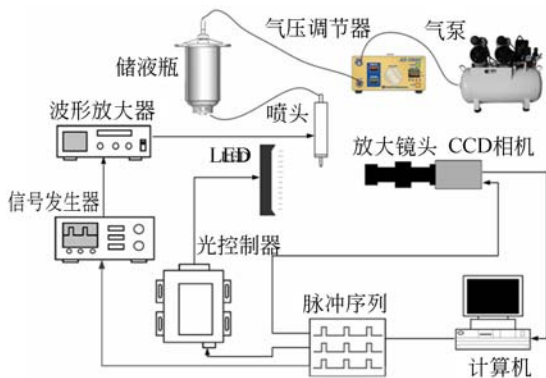


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

保持在 $5 \mu\text{m}$ 左右。另外,仿真分析在卫星液滴的预测方面也与实际符合得很好。因此,本文的仿真计算模型和计算方法可以用来预测液体分配情况。

4 液体分配特性研究

为了进一步研究激励位移和液体物理参数对于该圆管式压电喷头的分配过程的影响,本文进行了多组参数的仿真计算对比,仿真计算参数列于表 1。

不同激励位移幅度和黏度条件下液滴分配过程如图 5 所示,图中两条横线分别也代表距离喷嘴口 $50 \mu\text{m}$ 和 $200 \mu\text{m}$ 处。图 5(a)为保持表面张力和激励位移不变,改变黏度获得的求解结果。从图 5(a)的比较可以发现,随着黏度的增加,液滴分离所需时间变长,分离长度逐渐减小,其中对液滴分离长度和分离时间的计算结果也列于表 1 中。在该激励位移下,一旦黏度达到 $4.0 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,动能不足以克服流体的黏性力和表面张力,此时将不能产生液滴。但是如果将激励位移增大至

15 nm (如图 5(b)所示),不仅在 $4.0 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 的黏度下可以产生分离,而且此时驱动力足以产生较长的液尾,并产生多个卫星液滴。

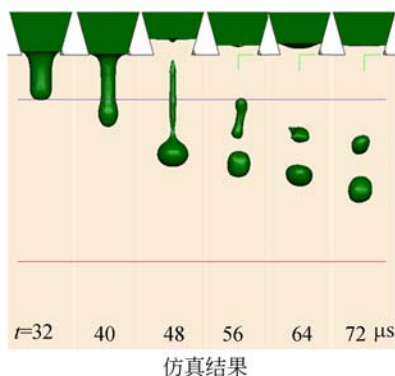
同样,从图 5(b)可以发现,增大激励位移,可以分配黏度更大的液体。但是,如果激励位移过大,则会产生很长的液尾以及较大或多个卫星液滴。比较表 1 中的案例 3 和案例 5 可以发现,同等条件下,较大的激励位移往往意味着更短的分

离时间和更长的分离长度。
图 6 为固定激励位移为 10 nm ,固定动态黏度为 $1.0 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,改变表面张力条件得到的液体分配过程情况图。图中两条横线也分别代表距离喷嘴口 $50 \mu\text{m}$ 和 $200 \mu\text{m}$ 处。可以发现,随着表面张力的增加,液滴越早分离,分离长度会缩得越短。相对于某个激励位移来说,过小的表面张力将导致较长的液尾和卫星液滴的产生;同时,如果表面张力过大,则动能不足以克服表面能,最终导致无法产生液滴。

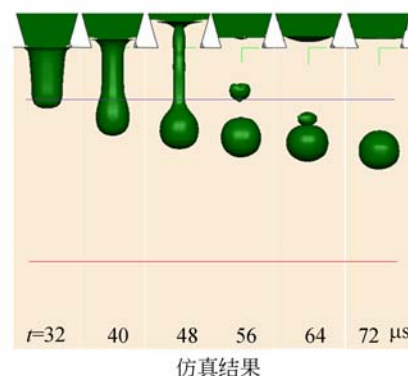
表 1 仿真模拟的案例分布

Tab. 1 Case distributions of the simulation

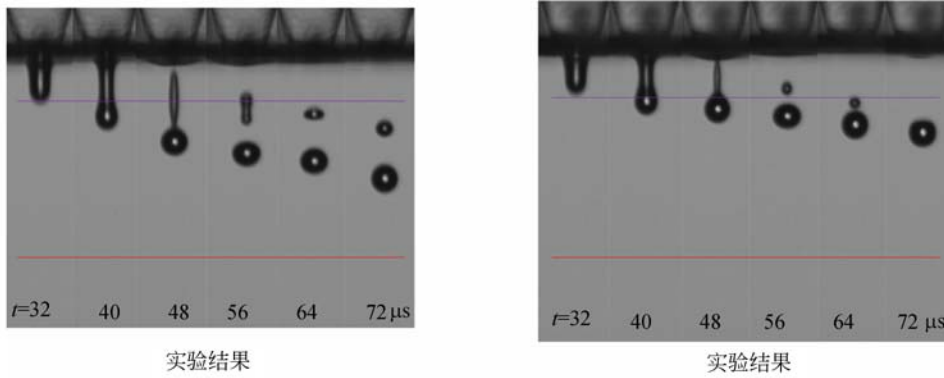
案例	激励幅度 D_c/nm	黏度 $\mu/\text{mPa} \cdot \text{s}$	表面张力 $\sigma/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	分离长度 $L_s/\mu\text{m}$	分离时间 $t_s/\mu\text{s}$
1	10.0	0.5	0.0725	123.18	51.4
2	10.0	1.0	0.0725	106.83	53.1
3	10.0	2.0	0.0725	85.60	54.3
4	10.0	4.0	0.0725	-	-
5	15.0	2.0	0.0725	164.10	49.5
6	15.0	4.0	0.0725	161.22	52.0
7	15.0	6.0	0.0725	141.72	56.8
8	15.0	8.0	0.0725	-	-
9	10.0	1.0	0.02	175.84	77.5
10	10.0	1.0	0.06	109.20	55.0
11	10.0	1.0	0.10	102.63	53.1
12	10.0	1.0	0.20	59.04	44.0



仿真结果



仿真结果

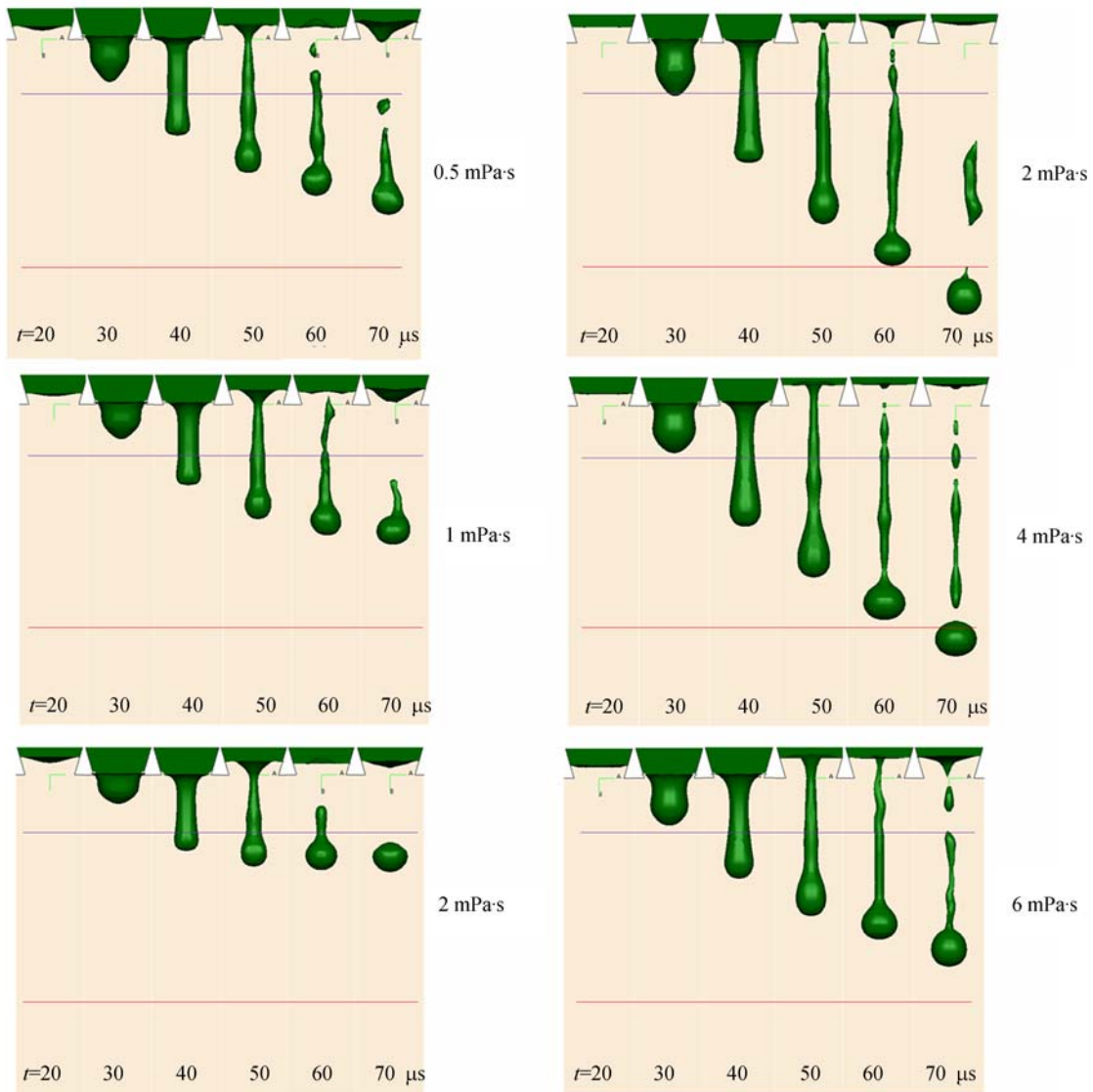


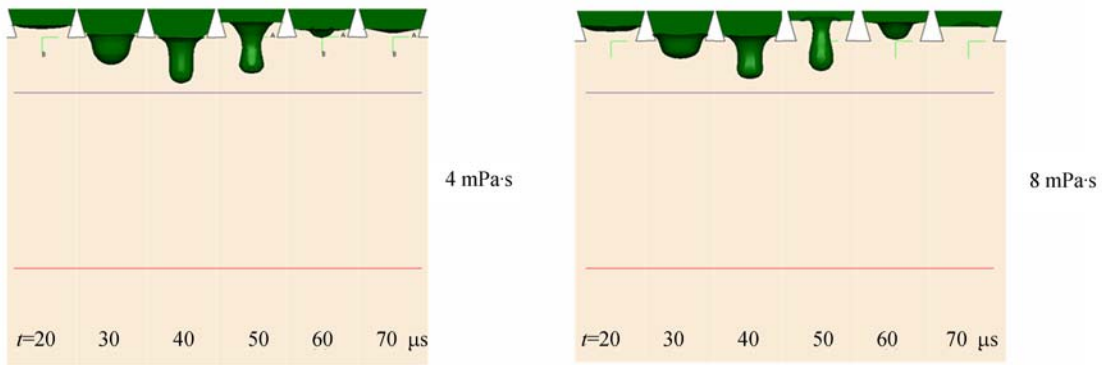
(a) $D_s = 12 \text{ nm}$

(b) $D_s = 10 \text{ nm}$

图 4 计算结果和实验比对情况

Fig. 4 Comparison between simulation results and experimental results



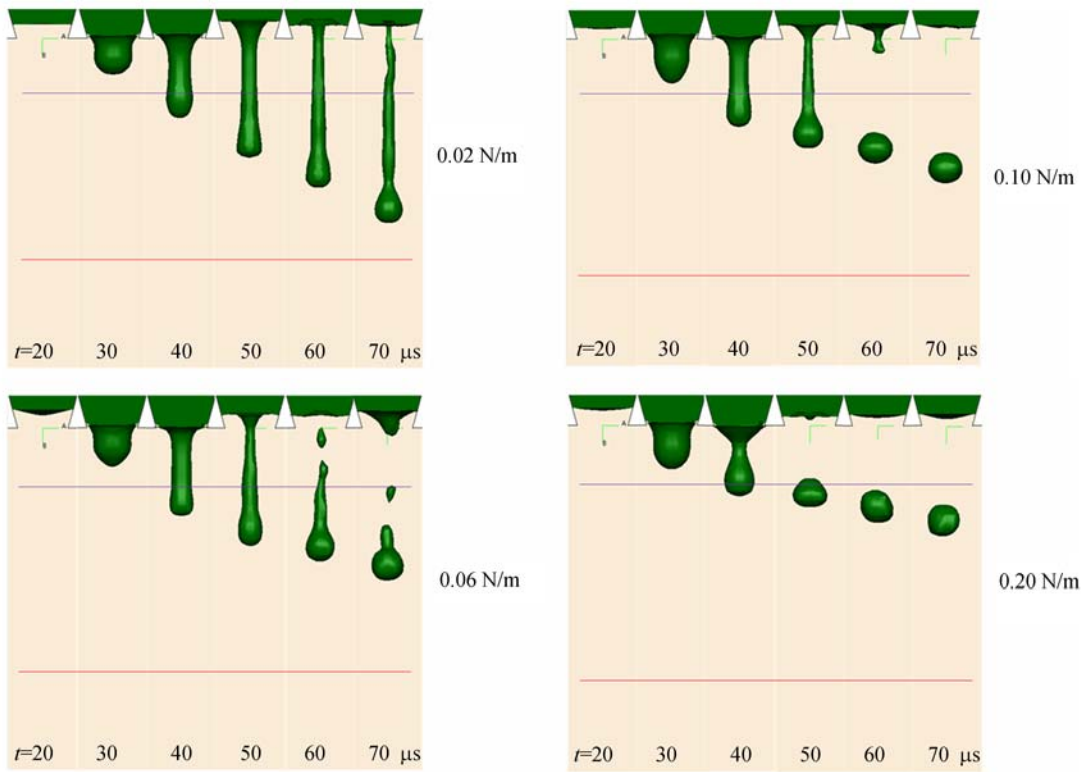


(a) $D_s = 10 \text{ nm}, \sigma = 0.0725 \text{ N/m}$

(b) $D_s = 15 \text{ nm}, \sigma = 0.0725 \text{ N/m}$

图 5 不同输入位移和不同黏度下的液体分配情况

Fig. 5 Liquid distribution statuses under different input displacements and different viscosities



$D_s = 10 \text{ nm}, \mu = 1.0 \text{ mPa} \cdot \text{s}$

$D_s = 10 \text{ nm}, \mu = 1.0 \text{ mPa} \cdot \text{s}$

图 6 不同表面张力下的液体分配情况

Fig. 6 Liquid distribution status with different surface tensions

5 结 论

本文针对一种圆管式压电喷头建立了合适的仿真计算模型,并且分析了该喷头在不同激励位移下的分配特性。结果表明,在 10 nm 输入位移下,该喷头很难分配黏度大于 4 mPa · s 的液体;

如果将输入位移增大至 15 nm,虽然可以分配 4 mPa · s 的溶液,但是却产生了多个卫星液滴。因此,针对某种待分配液体,为其选择合适的激励波形也是十分重要的。需要说明的是,输入位移也会受特定喷头的驱动原理和结构参数的限制。

本文的研究验证了以下结论:在相同的实验条件下,单纯增大黏度将减缓液滴形成的过程,缩

短分离长度,甚至阻滞液滴产生;单纯增大表面张力可以加快液滴形成过程,缩短分离时间,但是过

大的表面张力也会导致液滴无法形成。

参考文献:

- [1] 吴美兰,周雪琴,李巍,等. 纳米金属喷墨导电墨水研究进展[J]. 化工进展,2012,31(8): 1806-1810, 1860.
WU M L, ZHOU X Q, LI W, *et al.*. Development of inkjet conductive ink [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2012, 31(8): 1806-1810, 1860. (in Chinese)
- [2] LIM S. *Inkjet printability of electronic materials important to the manufacture of fully printed OTFTs* [D]. Kalamazoo: Western Michigan University, 2012.
- [3] 史永晶. 基于喷墨印刷的 OTFT 的制备与性能研究[D]. 无锡:江南大学,2009.
SHI Y J. *Preparation of organic thin-film transistors using inkjet printing technology* [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009. (in Chinese)
- [4] 杨利军,陆宝春,朱晓阳,等. 数字化微喷射技术制备聚合物薄膜电阻[J]. 光学精密工程,2015,23(6): 1598-1604.
YANG L J, LU B CH, ZHU X Y, *et al.*. Fabrication of polymer thin film resistors by a drop-on-demand technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6):1598-1604. (in Chinese)
- [5] TSENG H Y, SUBRAMANIAN V. All inkjet-printed, fully self-aligned transistors for low-cost circuit applications [J]. *Organic Electronics*, 2011, 12(2):249-256.
- [6] 熊贤凤. 绝缘衬底表面修饰在喷墨打印有机薄膜晶体管中的应用[D]. 合肥:合肥工业大学,2014.
XIONG X F. *The application of insulating substrate surface modification in organic thin-film transistors* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.
- [7] MENGEL M, NIKITIN I. Inkjet printed dielectrics for electronic packaging of chip embedding modules [J]. *Microelectron Engineering*, 2010, 87(4): 593-596.
- [8] CHANG H J, TSAI M H, HWANG W S. The simulation of micro droplet behavior of molten lead-free solder in inkjet printing process and its experimental validation [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2012, 36(7): 3067-3079.
- [9] ASAI A, HARA T, ENDO I. One-dimensional model of bubble growth and liquid flow in bubble jet printers [J]. *Jpn. J. Appl. Phys., Part 1*, 1987, 26(10): 1794-1801.
- [10] CHEN P H, PENG H Y, LIU H Y, *et al.*. Pressure response and droplet ejection of a piezoelectric inkjet print head [J]. *Int. J. Mech. Sci.*, 1999, 41(2): 235-248.
- [11] FROMM J E. Numerical calculation of the fluid dynamics of drop-on-demand jets [J]. *IBM J. Res. Develop.*, 1984, 28(3): 322-333.
- [12] LAI J M, LIN J D, LINLIU K. Numerical investigation of the effect of a transducer pulse on the microfluidic control of a piezoelectric printhead [J]. *J. Micro/Nano lith. MEMS MOEMS.*, 2010, 9(3): 033010.
- [13] WU CH H, HWANG W S. The effect of the echo-time of a bipolar pulse waveform on molten metallic droplet formation by squeeze mode piezoelectric inkjet printing [J]. *Microelectronics Reliability*, 2015, 55(3-4): 630-636.
- [14] ZHANG H Y, WANG J, LU G D. Numerical investigation of the influence of companion drops on drop-on-demand ink jetting [J]. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 2012, 13(8): 584-595.
- [15] 薛光怀,贺永,傅建中,等. 压电式喷头的微滴喷射行为及其影响因素[J]. 光学精密工程,2014,22(8): 2166-2172.
XUE G H, HE Y, FU J ZH, *et al.*. Droplet jetting of piezoelectric printhead and corresponding effect factors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2166-2172. (in Chinese)
- [16] 范增华,荣伟彬,王乐锋,等. 压电驱动微点胶器的控制与实验[J]. 光学精密工程,2016,24(5): 1042-1049.
FAN Z H, RONG W B, WANG L F, *et al.*. Control and experiment of micro-dispenser by piezoelectric drive [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 1042-1049. (in Chinese)
- [17] SEN A K, DARABI J. Droplet ejection performance of a monolithic thermal inkjet print head [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2007, 17: 1420-1427.
- [18] TAN H. An adaptive mesh refinement based flow

- simulation for free-surfaces in thermal inkjet technology [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2016, 82: 1-16.
- [19] FUSTER D, AGBAGLAH G, JOSSERAND C, *et al.*. Numerical simulation of droplets, bubbles and waves: state of the art [J]. *Fluid Dyn. Res.*, 2009, 41(6): 065001.
- [20] BRACKBILL J U, KOTHE D B, ZEMACH C. A continuum method for modeling surface tension [J]. *J. Comput. Phys.*, 1992, 100: 335-354.
- [21] SHIN D Y, GRASSIA P, DERBY B. Numerical and experimental comparisons of mass transport rate in a piezoelectric drop-on-demand inkjet print head [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2004, 46(2):181-199.
- [22] CHANG J Q, LIU Y X, HUANG B. Steady state response analysis of a tubular piezoelectric print head [J]. *Sensors*, 2016, 16(1): 81.
- [23] BUGDAYCI N, BOGY D B, TALKE F E. Axisymmetric motion of radially polarized piezoelectric cylinders used in ink jet printing [J]. *IBM J. Res. Develop.*, 1983, 27(2): 171-180.

作者简介:



常家庆(1985—),男,湖南衡阳人,博士研究生,主要从事界面流体力学、液体分配技术等方面的研究。E-mail: cjq2018@163.com

导师简介(通讯作者):



黄博(1974—),男,湖南汨罗人,教授,博士生导师,1996年、1998年、2007年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事液体分配技术、机器人技术等方面的研究。E-mail: huangbo74@163.com