

柔性基底喷墨打印墨滴数值模拟与实验

刘洪哲¹, 李松¹, 周勇¹, 鄂晓征¹, 徐国强²

(1.武汉理工大学, 武汉 430063; 2.昆山海斯电子有限公司, 苏州 215300)

摘要: 目的 研究喷墨过程中流体物性参数对喷墨质量的影响。**方法** 采用数值模拟方法, 基于流体体积法建立仿真模型, 以不同粘度和表面张力的流体为研究对象, 通过分析墨滴形成及铺展过程的形态变化, 探索流体的物性参数(粘度、表面张力)对于墨滴成形过程的影响, 得出高质量喷墨印刷的流体物性参数范围, 并在柔性基底上印刷UHF(超高频)天线来验证模拟结果的可靠性。**结果** 使用无量纲常数Z表征流体的可喷印性能, 数值模拟结果表明表面张力为40 mN/m, 粘度为10 Pa·s的墨水能达到良好的喷印状态。**结论** 通过实验观测墨水的喷射过程, 与模拟结果对比具有较高的重合度, 数值模拟结果可以较准确地预测墨水印刷质量, 经测量可知印制天线满足使用要求。

关键词: 喷墨打印; 墨滴成形; 数值模拟; 超高频天线

中图分类号: TS801.8; TS802.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)05-0173-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.05.033

Numerical Simulation and Experiment of Inkjet Printing Droplet on Flexible Substrate

LIU Hong-zhe¹, LI Song¹, ZHOU Yong¹, E Xiao-zheng¹, XU Guo-qiang²

(1.Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2.Kunshan Hisense Electronics Co., Ltd., Suzhou 215300, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effects of physical parameters of the fluid on the inkjet quality during the inkjet process. Through the numerical simulation, a simulation model was established based on the method of volume of fluid. With the fluids of different viscosity and surface tensions as the study objects, the effects of the physical parameters (viscosity and surface tension) of the fluid on the ink droplet formation process based on the analysis of the ink droplet formation and morphologic change of the spreading process were studied. In such case, the range of physical parameters of the fluid for the high-quality inkjet printing was obtained, and a UHF (ultrahigh frequency) antenna was printed on the flexible substrate to verify the reliability of the simulation results. The fluid jet printing performance was expressed by the dimensionless constant Z. The numerical simulation results indicated that, the ink with good quality of jet printing was obtained, of which the surface tension was 40 mN/m and the viscosity was 10 Pa·s. Through the experimental observation of the ink jetting process, the measurement result is in high concordance with the simulation results. The numerical simulation results can predict the quality of ink printing with better accuracy. Based on the experiment, the printed antenna can meet operation requirements.

KEY WORDS: inkjet printing; droplet forming; numerical simulation; UHF antenna

在信息技术高速发展的时代背景下, 微电子技术特别是近年来蓬勃发展的柔性电子技术得到了广泛的关注。作为信息产业的核心和基石, 日常生活中的

电子产品需要使用大量的微电子元件, 传统的微电子制造工艺往往存在工艺环节复杂、成本高及环境污染严重等问题。针对传统工艺存在的问题, 使用印刷电

收稿日期: 2017-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(51175394)

作者简介: 刘洪哲(1993—), 男, 武汉理工大学硕士生, 主攻物联网及智能制造技术。

通信作者: 李松(1975—), 男, 博士, 武汉理工大学副教授, 主要研究方向为微机电和柔性电子。

子技术制备微电子器件，替代传统制备工艺成为研究热点。喷墨打印被认为是印刷电子技术中替代传统工艺的关键技术，具有非接触、材料利用率高、无需刻板等特点，近年来在电子制造、增材制造、太阳能电池等工业印刷领域得到普及^[1-4]。

应用喷墨打印技术制备电子元器件，最重要的是器件质量是否能满足使用的要求。对于喷墨打印技术，墨滴铺展在基材上形成的墨点是组成印制图形的基本单元，单个墨滴的成形情况一定程度上能决定整体的图形状态。墨滴从喷嘴喷出到铺展形成墨点，包含墨滴形成、墨滴在介质中飞行、墨滴撞击基材及在基材上的铺展4个阶段，将这一系列墨滴形态变化定义为墨滴成形过程，每个阶段对墨滴最后的成形状态有重要影响，关系到印刷电子器件的性能。由于墨滴体积微小，工作过程中的变量难以精确控制，单纯使用实验的方法来研究墨滴成形的问题需要耗费大量的时间和人力，会大大增加研究成本。

CFD（计算流体力学）的数值模拟方法近年来被广泛应用于喷墨打印过程分析中，杨敏官等^[5]使用数值模拟的方法，通过模拟一个周期内液滴的形成发展，并通过改变系统变量，研究喷嘴入口条件对微液滴形成的影响。唐正宁等^[6]以不同性质流体为对象，研究墨滴喷射过程影响因素。肖渊等^[7]建立二维轴对称计算模型对气动式微滴喷射过程进行仿真。魏大忠等^[8]通过分析喷头内部流体运动状态，用一组微分方程描述喷头内部的流体运动过程，建立喷头数学模型。周金华等^[9]分析了不同压力波情况下水滴喷射行为的变化。周诗贵等^[10]通过数值仿真分析按需喷射的机理并总结经验公式。杨利军^[11]等利用数字化微喷技术制备射频识别天线并测试其性能。邝曼翩等^[12]研究基材表面特性对印制图案精度影响。国内外研究人员对喷头喷射的数学模型，喷头结构参数、驱动压力波及自身参数对墨滴影响有一定研究，但缺乏从墨滴—墨点—印制成品的柔性电子工艺整个流程的分析研究。文中采用数值模拟的方法，研究流体物性参数对于墨滴成形阶段与飞行过程及墨滴在基材上铺展的影响，分析墨滴稳定喷射及良好铺展的参数范围，并使用CCD（电荷耦合元件）工业相机观测墨滴形成过程验证模拟结果的可靠性，使用导电银墨水在PET（聚对苯二甲酸乙二醇酯）基材上印制柔性UHF天线，并测量天线性能。

1 墨滴成形过程的数值模拟方法

1.1 压电喷墨系统

一个典型的喷墨打印系统见图1，由供墨系统、墨路、墨腔及喷嘴组成。在脉冲电压驱动下，压电材

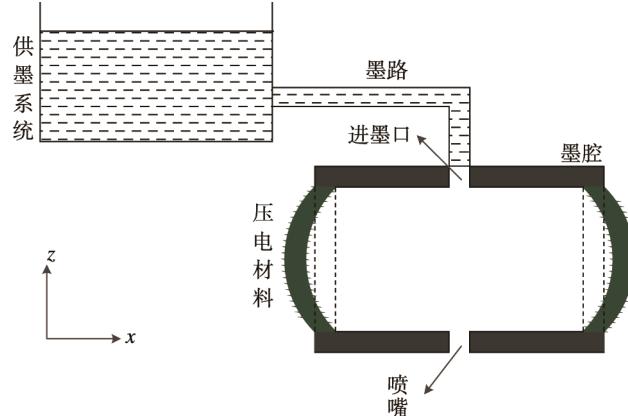


图1 喷墨系统

Fig.1 Inkjet system

料周期性收缩/膨胀，均匀喷出墨滴。

1.2 流体流动的数值分析方法

在墨滴成形过程中，液态墨滴在气态空气介质中飞行或在固态基材上铺展，涉及多相流动及质量传递，关键问题是追踪自由表面的位置。VOF（流体体积法）模型在各相间不可混合的前提下，通过求解单独的动量方程来处理一定区域内流体的体积分数，适合处理墨滴成形过程的界面模拟^[13]。在VOF模型中，在流场中定义流体体积函数 $C(\bar{V}, T)$ ，函数可以描述流体在流体域内的体积分布并满足守恒定律。根据函数 C 的数值，目标流体在单个网格内共有3种状态：流体网格 ($C=1$)、界面网格 ($0 < C < 1$)、空网格 ($C=0$)。通过计算每个网格内的 C 值，构建目标流体的自由运动界面，模拟目标流体的运动过程，其控制方程为：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\bar{V} \times \nabla)C = 0 \quad (1)$$

假设流体为不可压缩牛顿流体，流体的流动状态满足能量守恒定律，以此来描述流体的流动：

质量守恒：

$$D = \nabla \times \bar{V} = 0 \quad (2)$$

式中： ∇ 为分散度； \bar{V} 为速度向量。

动量守恒：

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \times \nabla) \bar{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\mu}{\rho} \nabla \times (\nabla \bar{V} + \nabla \bar{V}^T) + \bar{g} + \bar{f}_b \quad (3)$$

式中： $\frac{\partial \bar{V}}{\partial t}$ 为单位时间内系统累积的动量；

$(\bar{V} \times \nabla) \bar{V}$ 为由于流体流动造成的动量变化； $-\frac{1}{\rho} \nabla P$ 为

压力影响； $\frac{\mu}{\rho} \nabla \times (\nabla \bar{V} + \nabla \bar{V}^T)$ 为粘滞力影响； \bar{g} 为重

力影响； $\frac{1}{\rho} \bar{f}_b$ 为体作用力影响。

1.3 模型计算方法

墨滴成形过程的 N-S 方程采用有限体积法进行离散, 流体的流动状态属于层流, 压力场计算采用体积力分数计算方法, 对于计算面压力具有较好的效果。速度压力耦合采用非迭代时间推进结合基于交错网格的 PISO (隐式压力分裂算子) 算法进行求解。墨滴成形过程中, 墨滴受表面张力影响较大, 需要考虑表面张力影响以获得准确的速度与压力, 采用连续表面力模型将表面张力视为连续、横跨界面的作用力, 等于动量方程中的体作用力。液滴表面破碎问题使用 PLIC (分段线性界面重构) 来重建界面以保证计算精度。

2 几何模型建立与网格划分

墨滴成形过程可以分为 2 个阶段: 墨滴形成阶段及墨滴撞击基材与铺展阶段。墨滴形成阶段又包括束流的形成与断裂及墨滴在介质中飞行过程, 对于墨滴形成阶段不仅要构建喷嘴处的几何模型, 还应考虑到墨滴飞行的气相区域。墨滴在气相区域飞行一段时间后以一定初速度和角度撞击基材, 在墨滴速度、接触角等条件合适的情况下, 在基材上进行铺展。模型为对称回转体结构, 将模型转化为二维轴对称结构来减少模拟计算量, 所建立的几何模型见图 2。

几何模型的尺寸参数根据相关喷头尺寸资料设定, 墨滴形成过程中, 取喷嘴直径为 30 μm, 墨腔回转直径为 60 μm, 墨腔长度为 180 μm, 空气区域回转直径为 90 μm, 长度为 900 μm。墨滴铺展过程中, 取墨滴直径为 80 μm, 以 2 m/s 的速度撞击基材。根据几何模型结构特征, 建立计算网格区域并设定边界条件, 网格划分结果见图 3。

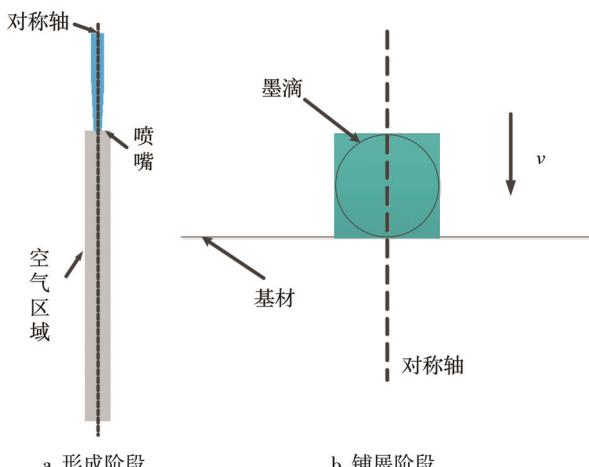


图 2 墨滴形成阶段和铺展阶段几何模型
Fig.2 Geometric model of droplet formation stage and spreading stage

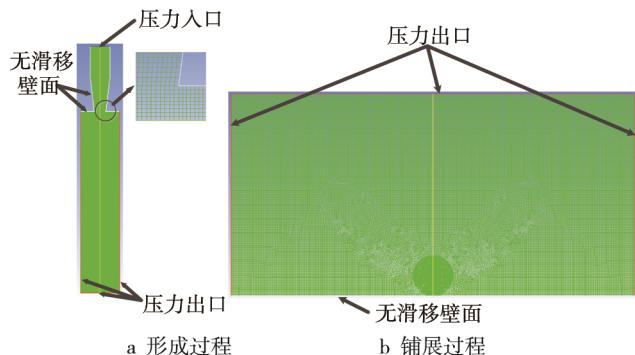


图 3 墨滴形成过程和铺展过程模型网格划分
Fig.3 Model mesh generation of droplet formation process and spreading process

3 墨滴成形过程数值模拟

3.1 墨滴形成过程

高质量的喷墨印刷要求墨滴喷射稳定, 形状呈饱满圆球状且不携带卫星墨滴。墨滴的形成过程受多种因素影响, 可以将这些因素大致分为 3 类: 喷头结构参数、喷头驱动参数、流体物性参数。在喷头类型确定的情况下, 喷头参数难以改变, 驱动参数确定后, 流体物性参数是决定墨滴形成质量的重要因素。针对墨水粘度及表面张力对于墨滴形成过程的影响, 通过数值模拟得到良好喷印的墨水物性参数范围。

墨水的可喷印性能可以用奥内佐格数来评判^[14], 奥内佐格数关联粘性力与表面张力, 一般来说奥内佐格数为小于 1 的常数, 为便于直观表示, 设常数 Z 为奥内佐格数的倒数, 则 Z 可以表示为:

$$Z = \frac{1}{Oh} = \frac{\sqrt{\rho\sigma L}}{\mu} = \frac{Re}{\sqrt{We}} \sim \frac{\sqrt{\text{惯性力} \times \text{表面张力}}}{\text{粘性力}} \quad (4)$$

式中: μ 为流体的粘度; ρ 为流体的密度; σ 为流体的表面张力; L 为特征长度; Re 为雷诺数; We 为韦伯数; Oh 为奥内佐格数; Z 为常数, 表征墨水的物性参数 (粘性力与表面张力) 与可喷印性能之间的关系。

为得到稳定喷射且形状饱满的液滴, 达到较好的喷印效果, 需要分析墨水表面张力与粘度对墨滴形成的影响。首先需要确定模拟流体物性参数的大致范围, 目前市场上墨水主要分为水基型、非水基型、相变型和反应型 4 类, 文中研究的导电墨水属于溶剂型墨水, 墨水的表面张力范围约为 20~40 mN/m, 粘度约为 2~10 Pa·s, 仿真流体的物性参数见表 1。

墨水表面张力造成墨滴束流颈缩, 在墨滴形成过程中, 表面张力是墨滴形成的前提, 推动墨滴与束流分离。在相同墨水粘度值情况下, 选取流体 1, 2, 3 进行数值模拟, 分析流体表面张力对墨滴形成过程的影响。从图 4 的仿真结果中可以看到, 在相同的喷头结

表 1 仿真流体物性参数
Tab.1 Physical parameters of simulation fluid

流体编号	粘度/(Pa·s)	表面张力/(mN·m ⁻¹)
流体 1	10	20
流体 2	10	30
流体 3	10	40
流体 4	2	30
流体 5	5	30

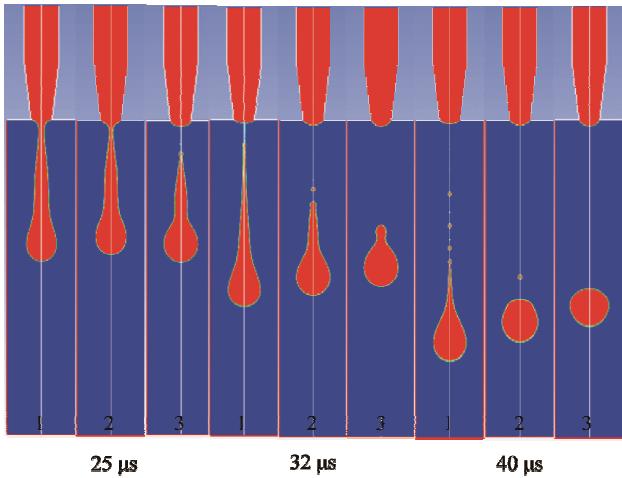


图 4 表面张力变化对墨滴形成过程影响

Fig.4 Influence of surface tension changes on ink droplet formation

构及驱动压力下, 表面张力增加会加快墨滴束流形成颈缩, 加速墨滴束流断裂形成墨滴, 墨滴束流的断裂时间提前。随着表面张力增大, 液滴需要克服更大的表面张力, 因此喷出的液滴长度减小。在低表面张力情况下, 墨滴尾部存在较长的拖尾, 拖尾破碎会形成卫星墨滴, 由于速度差的缘故, 会影响墨滴体积均匀度, 使墨滴的速度和动能发生变化, 影响打印质量。

墨滴形成过程中, 墨水自身粘度所产生的粘滞阻力会削减压电材料所发出的压力波, 要完成墨滴喷射必须克服墨水粘度造成的影响。当粘度达到一定值之后, 墨水流动通畅性会受到阻碍, 甚至发生喷头堵塞的现象。墨水粘度过低可能会让束流过长易破碎, 难以形成墨滴, 因此需要寻找与喷头结构尺寸相匹配的墨水粘度范围, 保证喷头能良好工作。保证流体表面张力值不变, 选取流体 2, 4, 5 进行数值模拟。流体粘度变化会影响墨滴形成的仿真结果见图 5。由于流体粘滞力会造成驱动压力能量损失, 因此流体粘度越大喷出的墨滴越短, 而流体粘度对于墨滴束流的断裂时间没有明显影响。另一方面, 随着粘度增大, 液滴内部内聚力增加, 更容易形成单个完整墨滴。从结果来看, 粘度较大的流体形成墨滴携带的尾液滴在内聚力作用下聚向主墨滴, 最终形成一个较完整的墨滴。

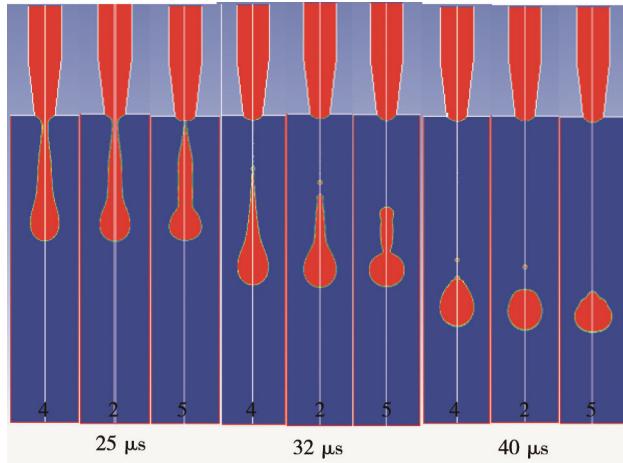


图 5 粘度变化对墨滴形成过程影响
Fig.5 Influence of viscosity changes on ink droplet formation

3.2 墨滴铺展过程

墨滴被喷出后在空气介质中飞行一段时间, 墨滴形态逐渐稳定, 以一定的速度与基材发生碰撞并在基材表面铺展形成墨点。对于喷墨印刷技术, 墨滴与基材的碰撞及铺展结果与打印品的质量息息相关, 关系到图形还原程度及打印品膜层厚度。墨滴铺展过程涉及三相的变化, 是一个非常复杂的非线性运动过程, 使用数值模拟方法是目前液滴撞击壁面问题的主流研究方法。文中使用数值模拟的方法研究墨水物性参数对于墨滴铺展的影响, 在保证墨滴良好喷射的基础上进一步确定墨水的物性系数范围。从图 6 中可以看出, 表面张力越大, 墨滴形态变化越快, 达到最大铺展半径及最终平衡的时间越短, 且影响最终的铺展半径和膜厚, 但液滴最大铺展半径基本不受表面张力的影响。达到最终平衡状态时, 表面张力越大的流体形成的墨点半径越小, 膜层厚度越大。

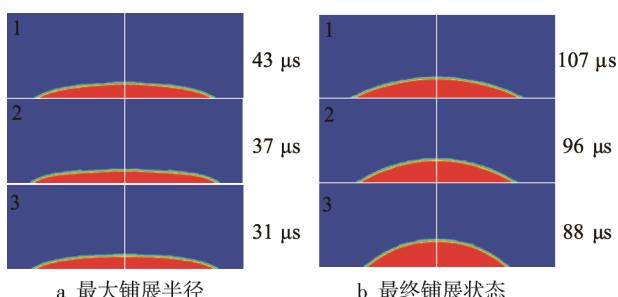


图 6 不同表面张力下墨滴的形态变化
Fig.6 Morphologic change of ink droplet under different surface tensions

流体粘度会影响墨滴铺展过程见图 7。当流体粘度越大, 其内部流动的粘滞力也会增加, 墨滴在铺展和回缩的过程中受到阻碍, 另一方面内部的粘滞力也会消耗墨滴部分能量, 墨滴最大铺展半径及达到最大铺展半径的时间随流体粘度增加而减小, 且墨滴会更

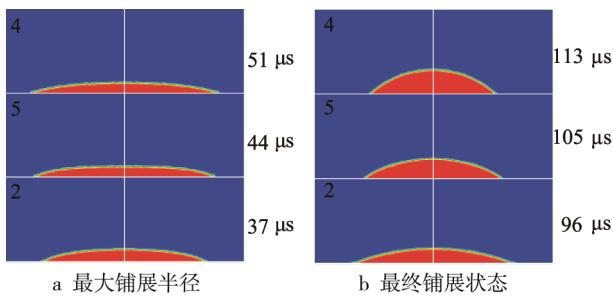


图 7 不同粘度下墨滴的形态变化

Fig.7 Morphologic change of ink droplet of different viscosity

快达到最终平衡状态, 达到平衡状态墨点的最终铺展半径减小, 膜厚增加。

3.3 分析讨论

在一定的范围内, 较大的表面张力和粘度更容易形成饱满、不携带多余卫星墨滴的球状墨滴, 有助于提高喷墨打印质量。在墨水制备过程中, 满足喷嘴要求的情况下可以适当提高墨水的粘度和表面张力值来改善墨滴的喷射效果。对于印制电子器件, 膜层厚度和银层连续性是评判印制器件性能的重要参数, 关系到器件的导电性能。从模拟结果可以看到, 墨滴铺展最终形成的墨滴厚度与墨水的表面张力值呈正相关, 与粘度值呈负相关, 可以通过合理增大墨水表面张力或减小墨水的粘度来增加膜层厚度以保证器件性能。在模拟流体物性参数范围内, 粘度为 10 Pa·s, 表面张力为 40 mN/m 的流体液滴能达到最佳的成形状态。

4 实验验证

根据墨水物性参数对于墨滴成形过程影响的研究结论, 综合考虑墨水粘度与表面张力的影响, 使用粘度为 10 Pa·s, 表面张力值为 40 mN/m 的导电银墨水在 PET 基材上制备 UHF 天线。根据墨水的可喷印性能判断标准, 计算可得墨水的可喷印指数 Z 值为 4.24, 满足适合喷印的墨水 Z 值范围 ($0 < Z < 10$)。使用 CCD 工业相机观测墨滴的滴落状态与模拟结果对比见图 8, 从图 8 中可以看到, 墨滴的形成状态良好, 可以得到形态饱满不携带卫星点的球状墨滴, 且与模拟结果有较高的重合度。

为验证所选物性参数墨水具有良好的喷印性能, 设计 UHF 天线作为打印器件。优化喷墨打印工艺流程可以提高印制品质量^[15]。打印过程中重复打印 2 次, 以增加印制天线的膜层厚度, 保证银层连续性, 提高天线的导电性能。打印完成经过后期热处理使溶剂挥发, 墨水中的纳米银沉积为连续的银层, 形成 UHF 天线, 制得天线见图 9。使用矢量网络分析仪测量印制天线的性能, 在 915 MHz 中心频率下, 天线的回波损耗值达到 -25 dB 以下, 满足天线的使用要

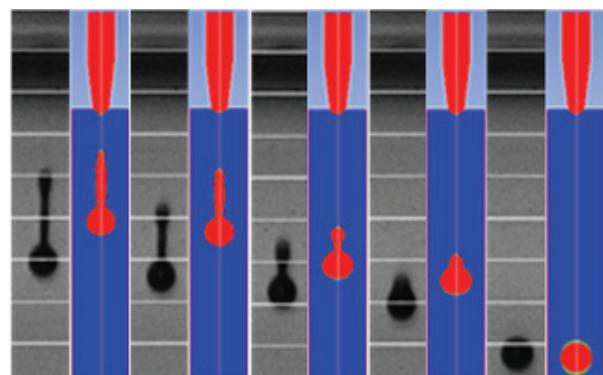


图 8 实验与数值模拟结果对比

Fig.8 Comparison of experimental and numerical simulation results



图 9 制备的 UHF 天线

Fig.9 UHF antenna prepared

求 ($S(1,1) < -10 \text{ dB}$)。

5 结语

采用数值模拟的方法研究流体物性参数对于墨滴成形过程的影响, 对所得的模拟结果进行分析。在墨滴形成过程中, 为得到体积均匀, 形态饱满, 能保证喷印质量的球形墨滴, 在合理范围内可以适当增加墨水的粘度和表面张力。对于墨滴铺展过程, 最终的铺展半径及膜层厚度与流体的物性参数有密不可分的联系, 其中, 最终形成墨点的半径与表面张力值负相关, 与粘度值正相关; 膜层厚度与表面张力正相关, 与粘度值负相关。仿真结果与实际观测结果相合性较好, 说明数值模拟的方法可以用于判断墨滴的成形性能, 可以为墨水的制备提供参考数据, 同时制备的天线也满足使用要求。

参考文献:

- [1] SINGH M, HAVERINEN H M, DHAGAT P, et al. Inkjet Printing—Process and Its Applications[J]. Advanced Materials, 2010, 22(6): 673—685.
- [2] TORRISI F, HASAN T, WU W, et al. Inkjet-printed Graphene Electronics[J]. ACS Nano, 2012, 6(4): 2992.
- [3] ZHANG F, TUCK C, HAGUE R, et al. Inkjet Printing of Polyimide Insulators for the 3D Printing of Dielectric Materials for Microelectronic Applications[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 133(18): 63—74.

- [4] GALAGAN Y, COENEN E W C, ABBEL R, et al. Photonic Sintering of Inkjet Printed Current Collecting Grids for Organic Solar Cell Applications[J]. *Organic Electronics*, 2013, 14(1): 38—46.
- [5] 杨敏官, 闫龙龙, 王育立, 等. 喷嘴入口条件对微液滴生成的影响[J]. *灌溉机械工程学报*, 2015, 33(3): 226—232.
YANG Min-guan, YAN Long-long, WANG Yu-li, et al. Effects of Nozzle Inlet Conditions on Micro-droplet Formation[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2015, 33(3): 226—232.
- [6] 王振宁, 唐正宁. 液体表面张力和粘度对压电喷射液滴形成过程影响的数值模拟[J]. *包装工程*, 2010, 31(13): 24—27.
WANG Zhen-ning, TANG Zheng-ning. Numerical Simulation of the Effect of Liquid Surface Tension and Viscosity on the Droplet Formation of Piezoelectric Ejection[J]. *Packaging Engineering*, 2010, 31(13): 24—27.
- [7] 肖渊, 黄亚超. 气动式微液滴喷射过程仿真与尺寸均匀性试验研究[J]. *中国机械工程*, 2014, 25(21): 2936—2941.
XIAO Yuan, HUANG Ya-chao. Simulation of Pneumatic Driven Microdroplet Jetting Process and Experimental Study of Microdroplet's Uniformity[J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(21): 2936—2941.
- [8] 魏大忠, 张人佶, 吴任东, 等. 压电驱动微液滴喷射过程的数学模型[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(7): 611—614.
WEI Da-zhong, ZHANG Ren-ji, WU Ren-dong, et al. Mathematical Model of Piezoelectric Actuated Micro-droplet Jetting Process[J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(7): 611—614.
- [9] 周金华, 汪焰恩, 魏生民, 等. 压力波型态对液滴压电喷射行为影响的数值研究[J]. *西安工业大学学报*, 2012, 32(2): 106—111.
ZHOU Jin-hua, WANG Yan-en, WEI Sheng-min, et al. Numerical Simulation of the Effect of Pressure Wave form on Drop Formation of Piezoelectric Ejection[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2012, 32(2): 106—111.
- [10] 周诗贵, 习俊通. 压电驱动膜片式微滴喷射仿真与尺度一致性试验研究[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(8): 178—185.
ZHOU Shi-gui, XI Jun-tong. Simulation and Experiment Study on Piezoelectric Actuated Diaphragm-driven Micro-droplet Jetting[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(8): 178—185.
- [11] 杨利军, 李茜, 朱晓阳, 等. 射频识别标签天线的按需微喷射制备[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(1): 73—82.
YANG Li-jun, LI Qian, ZHU Xiao-yang, et al. Fabrication of RFID Tag Antennas Based on Drop-on-Demand Technology[J]. *Optical Precision Engineering*, 2016, 24(1): 73—82.
- [12] 邝曼翩, 王京霞, 王利彬, 等. 喷墨打印高精度图案研究进展[J]. *化学学报*, 2012, 70(18): 1889—1896.
KUANG Min-xuan, WANG Jing-xia, WANG Li-bin, et al. Research Progress of High-precision Patterns by Directly Inkjet Printing[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2012, 70(18): 1889—1896.
- [13] 占红武, 胥芳, 郭维峰, 等. 压电喷墨过程动力学建模与供墨方法[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(1): 140—149.
ZHAN Hong-wu, XU Fang, GUO Wei-feng, et al. Dynamics Modeling and Ink Supply Methods of Piezoelectric Ink-jetting Process[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(1): 140—149.
- [14] MCKINLEY G H, RENARDY M. Wolfgang Von Ohnesorge[J]. *Physics of Fluids*, 2011, 23(12): 355—365.
- [15] 杨雷, 程涛, 曾文进, 等. 导电聚合物薄膜的喷墨打印制备及其光电器件[J]. *化学进展*, 2015, 27(11): 1615—1627.
YANG Lei, CHENG Tao, ZENG Wen-jin, et al. Inkjet-Printed Conductive Polymer Films for Optoelectronic Devices[J]. *Progress in Chemistry*, 2015, 27(11): 1615—1627.