DOI: 10.3901/JME.2020.09.243

基于微滴喷射 3D 打印的纳米颗粒悬浮墨水 稳定喷射研究*

朱东彬 吴民强 王竹贤 杨伟东
(河北工业大学机械工程学院 天津 300130)

摘要: 微滴喷射 3D 打印工艺中,墨水以单一液滴形式稳定喷射是保证喷墨打印质量的必要条件。但在微滴喷射瞬间,纳米颗粒悬浮墨水的流变学性能会随着剪切速率发生明显变化,对实现墨滴稳定喷射具有重要影响。通过测量墨水黏度与剪切速率之间的关系,建立变黏度喷墨打印有限元模型,并对微滴喷墨打印过程中墨滴黏度、墨滴速度、墨滴形貌的变化规律及影响机理进行研究。得出毛细管力是导致墨滴失稳的重要因素,最后对墨滴稳定喷射进行了数值模拟和物理试验验证,证明毛细管数-奥内佐格倒数(Capillary-ohnesorge reciprocal, CA-Z)纳米颗粒悬浮墨水稳定喷射评价方法的可行性。CA-Z 纳米颗粒悬浮墨水稳定喷射评价方法为微滴喷射 3D 打印墨水的制备及其打印参数的优化提供了理论和试验依据。

关键词: 微滴喷射 3D 打印; 稳定喷射; 数值模拟; 纳米颗粒悬浮墨水; 增材制造

中图分类号: TH145; TB126

Research on Stable Jetting of Nanoparticle Suspension Ink for Inkjet 3D Printing

ZHU Dongbin WU Minqiang WANG Zhuxian YANG Weidong
(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130)

Abstract: In the inkjet 3D printing process, stable jetting of ink in the form of a single droplet is an important factor affecting the quality of inkjet printing. However, at the moment of micro-droplet ejection, rheology of the nanoparticle suspension ink changes with the shear rate significantly, affecting the stable ejection of micro-droplet. The inkjet printing finite element model with variable viscosity is established by building the relationship between ink viscosity and shear rate. And the variation rule and effect mechanism of droplet viscosity, droplet speed and droplet morphology during inkjet printing process are studied. It is confirmed that capillary force is an important factor leading to the instability of droplets. In the end, CA-Z (Capillary-ohnesorge reciprocal, CA-Z) evaluation method for stable jetting of the nanoparticle suspension ink is proved by micro-droplet ejection experiment and numerical simulation, which offered theoretical and experimental basis for the preparation of nanoparticle suspension ink and the optimization of inkjet 3D printing parameters.

Key words: inkjet 3D printing; stable injection; numerical simulation; nanoparticle suspension ink; additive manufacturing

0 前言

微滴喷射 3D 打印技术是一种通过控制喷头位置和喷射状态,选择性沉积功能墨水的增材制造技术。在柔性电子、太阳能电池、有机发光二极管、射频识别等领域具有广阔的应用前景^[1-4]。与丝网印刷、凹版印刷等墨水沉积工艺相比,喷墨打印在诸

多方面具有优势。在沉积图案的灵活性上,丝网印刷和凹版印刷需要掩模进行承印,沉积形状由掩模决定。喷墨打印技术根据计算机图形数据将墨水选择性沉积在基板上,可以根据需求对图案快速调整。在产品质量方面,喷墨打印作为一种非接触印刷方式避免基板因受压力而损坏,保证了产品良品率。在成本方面,喷墨打印省去了掩模的制作过程,且按需喷射的方式避免了墨水浪费。喷墨打印工艺具有工艺简单、节约材料、成本低等优点,是理想的墨水沉积方式^[5-7]。

在喷墨打印工艺中,如何保证墨水能够稳定按

* 河北省自然科学基金资助项目(E2018202200, E2016202297)。20190514
收到初稿,20191119 收到修改稿

需喷射是亟待解决的关键技术难题,即影响喷射过程稳定性的因素有哪些,以及如何控制它们。作为一种打印成形工艺,打印设备、打印材料、打印工艺参数是主要影响因素,即在使用同一机器设备的前提下,墨水的流变学性能以及喷墨打印参数的设置直接影响卫星滴的形成以及墨水的稳定喷射。若卫星滴产生之后,在飞行中无法融入主液滴,且最终撞击在基板上,则喷射过程被认为是不稳定的。不稳定喷射会造成墨水沉积在错误位置,影响打印图案精度,降低打印质量,甚至导致产品失效^[8]。

为了提高喷射过程的稳定性,提高打印质量,研究人员进行了大量研究,包括打印设备、打印墨水、打印过程中的工艺参数设置。WEI 等^[9]针对压力波在喷嘴中会发生多次反射的情况,对铅钛酸铅压电驱动器的结构进行优化,使喷射条件达到要求。HE 等^[10]研究了喷嘴内壁亲疏水性与墨滴形态的关系,指出墨水表面张力与喷嘴的润湿性会对打印质量产生影响。NALLAN 等^[11]从固含量角度对纳米金墨水喷射质量进行了研究,发现低剪切速率下,墨水黏度会随固含量增加而增加。XU 等^[12]以具有黏弹性的溶液为打印材料,根据第一次断裂时墨水形态的差异,将墨水断裂分成四种类型:前端断裂、尾部断裂、中间断裂以及混合断裂。肖渊等^[13]利用硝酸银和抗坏血酸之间的化学反应,在织物表面打印导电线路。通过对双喷头微滴喷射系统进行工艺参数调整,实现了在单一脉冲信号下两种溶液的同时按需喷射。占红武等^[14]对压电喷墨供墨系统进行了研究,采用模糊比例积分微分(Proportion integral differential, PID)PID 算法,实现对墨水温度的快速、平滑控制。DUINEVELD 等^[15]对墨滴喷射过程中无量纲距离随无量纲速度的变化关系进行总结,指出在相同喷射条件下,随着尺寸减小,墨滴受空气阻力的干扰更为明显。YUN 等^[16]采用根系生长算法(Root system growth algorithm, RSGA)优化了压电脉冲波形,减小压电片的残余振动对墨滴的影响。这些研究表明,试验设备的结构设计、墨水材料的不同特性以及所涉及工艺参数的不同选择,都会影响墨水喷射的稳定性。

目前对于墨水稳定喷射的研究中,多采用混合溶液作为墨水,在墨滴形成与飞行过程中,普遍将墨水视为黏度值恒定的牛顿流体。而以纳米银墨水为代表的纳米颗粒悬浮溶液,其流变学性能会随着剪切速率的变化而改变^[17]。与牛顿流体相比,纳米颗粒悬浮墨水的喷射状态会存在一定差异。本文以纳米银墨水为具体研究对象,以墨水稳定喷射为主要研究目的,通过墨水黏度与剪切速率间的数据测

量和关系拟合,建立变黏度喷墨打印有限元模型,对喷墨打印过程中墨水黏度变化趋势进行研究;在仿真模型基础上,从毛细管力角度对墨水喷射失稳原因进行分析,使用毛细管数和奥内佐格倒数对纳米颗粒悬浮墨水稳定喷射需要满足的条件进行总结,最后通过微滴喷墨打印试验对模拟仿真结果进行验证。

1 喷墨打印及其有限元仿真

1.1 喷墨打印试验

在打印试验之前首先制备喷墨打印墨水。选用通过还原硝酸银(AgNO_3 , 天津东聚隆化工技术有限公司)得到的纳米银粉作为墨水导电相,纳米颗粒的中位径约 90 nm,墨水中导电相含量(质量分数)为 16%~35%。选用去离子水作为墨水溶剂。墨水加入 0.6%羧甲基纤维素钠(CMC, 保定市捷克斯特生物科技有限公司)作为分散剂,同时加入少量表面活性剂(十二烷基苯磺酸钠, $\text{C}_{18}\text{H}_{29}\text{NaO}_3\text{S}$, 山东隆汇化工有限公司)调节墨水表面张力,通过反复超声震荡制备纳米银打印墨水。

采用昆山海斯电子有限公司的 IJDAS-300D 型 3D 喷墨打印系统进行试验,喷墨打印头选用 Spectra-128AA 喷头,单个喷孔直径 35 μm 。喷墨打印过程中的压电脉冲选用默认脉冲,脉冲宽度 10 μs ,上升沿和下降沿各占 2 μs ,压电脉冲幅值为 90 V。采用电荷耦合器件(Charge coupled device, CCD)CCD 相机对墨水滴落过程中的图像进行获取,墨滴观测试验的流程如图 1 所示。利用打印系统的延时功能,分别对压电脉冲发出后 10 μs 、30 μs 、60 μs 、90 μs 、120 μs 、150 μs 、180 μs 时墨滴飞行中的形貌进行捕捉,并对每组参数进行十次重复试验,取其平均值作为试验结果。

图 1 墨滴观测示意图

1.2 喷墨打印仿真

1.2.1 喷墨打印的几何模型

由于墨水在喷嘴以及空气中的运动属于低马赫

数流动,采用流体连续性方程以及纳维-斯托克斯方程描述流体之间的运动关系

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

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

式中, ∇ 表示哈密算子; $\mathbf{v}$ 为流体速度; p 为压力; ρ 代表密度; μ 为流体黏度; $\mathbf{F}$ 为外部作用力。由于模型中存在墨水与空气两种流体,因此在仿真中需要对流体之间的界面进行跟踪。目前常用的方法有流体体积法以及水平集法,采用水平集模块追踪两相流界面,根据 OLSSON 和 KREISS^[18]的研究提出的水平集法,两相流界面公式如下

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \mathbf{v}) + \gamma \left[\nabla \cdot \left(\phi (1 - \phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \right] - \varepsilon \nabla \cdot \nabla \phi = 0 \quad (3)$$

式中, ε 为两相流界面层厚度; ϕ 为水平集数。当水平集数大于阈值时,代表该区域流体为墨水,反之则为空气。

模型几何形貌如图 2a 所示,整个喷墨打印模型由墨水槽、喷嘴头、喷墨舱、出口四个部分组成。采用二维轴对称模型进行建模以提高计算效率,将模型沿对称轴旋转一周后就得到三维模型,如图 2b 所示。几何模型采用自由三角形网格进行划分,网格单元大小采用常规大小,同时使用软件中的自适应网格细化功能,对不同时间墨滴可能存在的位置进行网格细化,以提高仿真结果的准确性,细分后的网格划分如图 2c 所示,每张网格平均包括 9 960 个网格单元,最小单元质量 0.641 9,平均质量 0.915 7。最后通过加密网格,确认主要结果的误差均小于 5%。

图 2 喷墨打印几何模型与网格划分

1.2.2 激励源的设置

喷墨打印试验中,压电片在脉冲作用下受迫振动,使墨滴受到压强作用从喷嘴中喷出。由于压电驱动器的结构和压电材料的弹性矩阵未知,采用压电脉冲或者压电片的受迫振动设置激励源进行仿真难以与实际情况相符,且引入其他物理场会使模型收敛困难,导致计算效率大幅下降。采用 POOZESH

等^[19]的方法,在墨水槽顶部的入口处引入竖直方向的速度场代替压电片的振动。入口附近墨水的速度随着时间以及与中心轴之间的距离发生变化,因此入口速度可由下式表示

$$\mathbf{v}(r, t) = T \cdot \mathbf{v}_r(r) \cdot \mathbf{v}_t(t) \quad (4)$$

式中, T 为与脉冲幅值有关速度因子,其值与幅值呈近似线性的关系, $\mathbf{v}_r$ 和 $\mathbf{v}_t$ 分别为与中心轴距离和速度相关的函数,其公式如下

$$\mathbf{v}_r(r) = 1 - \frac{r^2}{r_{comp}^2} \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_t(t) = \text{step} \left(t - \frac{t_{sm}}{2} \right) - \text{step} \left(t - t_{int} - \frac{t_{sm}}{2} \right) \quad (6)$$

式中, r 为距中心的距离; r_{comp} 为入口长度; t 、 t_{sm} 、 t_{int} 分别为脉冲作用时间、平滑时间和持续时间; $\text{step}()$ 为 Heaviside 阶跃函数,用于描述脉冲随时间的变化。入口速度的变化趋势如图 3 所示。

图 3 入口处墨水速度

1.2.3 流变学参数设置

喷墨打印模型中存在空气和墨水两种流体。在初始状态时,模型墨水槽中材料填充为墨水,其他位置为空气。空气的流变学参数从软件材料库中进行添加,墨水的密度、表面张力、动力黏度分别采用电子天平、表面张力仪、流变仪进行测量,并对每组参数进行十次重复试验,取其平均值作为试验结果。

在喷墨打印的研究中,研究人员往往倾向于将墨水当作黏度值恒定的牛顿流体进行处理。但是牛顿流体模型无法准确表示所有类型墨水的流变学性能。PARK 等^[20]研究表明纳米颗粒墨水的黏度会随着剪切速率的改变发生变化。为了能够得到准确的仿真模型,对流变仪测量范围内不同剪切速率下的动力黏度值进行测量,并采用幂律模型、Oldroyd 模型、Carreau 模型分别对黏度变化趋势进行最小二乘法拟合,以得到能够准确描述墨水流变性能的本构方程。最终结果如图 4 所示。

由图 4 可知, Carreau 模型对于测量值的拟合

最好,经过多次迭代,确定最终的模型参数值如式(7)所示。空气和墨水的流变学参数设置如表1所示。

$$\mu = 12 - 9.5 \times [1 + (1.18 \times 10^{-4} \times \dot{\gamma})^2]^{-75.5} \quad (7)$$

图4 黏度测量值与三种拟合模型

表1 模型材料参数设置

材料	密度/(kg·(m³)⁻¹)	动力黏度/(mPa·s)	表面张力/(mN·m⁻¹)
墨水	1 190	公式(7)计算	32.4
空气	1.225	0.017 89	无

2 仿真结果与讨论

2.1 流变学性能仿真

在喷墨打印试验中,对飞行中的墨滴进行实时黏度值测量是难以实现的。采用有限元仿真模型对墨滴黏度变化趋势进行分析。通过测量和拟合,得到了墨水黏度与剪切速率之间的关系,因此,只要计算出墨水飞行过程中剪切速率的实时分布情况,就能够得到墨水的动力黏度值变化趋势。墨水的剪切速率可由式(8)得出^[21]

$$\dot{\gamma} = \left[2 \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中, v_r 和 v_z 分别为流体沿圆柱坐标系径向和轴向的速度,模型内部剪切速率分布如图5所示。

从喷嘴喷出的瞬间,剪切速率迅速升高,10 μs时在喷孔处以及液滴前方的剪切速率高达 $4 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 。随着墨滴喷射速度降低,墨水附近的剪切速率稳定在 $1.4 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 左右,且高剪切速率区域集中在主液滴前方以及液滴颈部。图6给出了180 μs时主液滴内部的剪切速率,以及不同时刻液滴中心轴线上剪切速率的分布情况。与液滴边缘相比,墨水内部剪切速率值较为平稳,随着时间推移,剪切速率呈下降趋势。但是剪切速率值普遍在 2000 s^{-1} 以上。

图5 不同时间段内墨滴附近剪切速率(单位 s^{-1})

图6 液滴内部剪切速率分布情况

由剪切速率分布以及式(7)就可以得到墨滴飞行时动力黏度变化趋势,如图7所示。脉冲电压发出后,墨水从静置时的低黏度状态迅速转变为高剪切速率下的高黏度状态。且在整个飞行过程中,除去30 μs以及180 μs时墨滴内部少部分区域黏度在 $8 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 左右外,其他时间墨水黏度始终维持在 $12 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 左右。

图7 不同时间墨滴黏度分布(单位 $\text{mPa} \cdot \text{s}$)

由图5和图7可以得出以下结论:整个液滴飞行过程中,在高剪切速率作用下,墨水大部分区域的动力黏度始终保持在最大值。因此,当墨水动力

黏度随剪切速率增加而收敛时, 可以将喷墨打印过程近似当作牛顿流体喷墨打印过程, 其黏度值为剪切速率处于极大值时非牛顿流体的动力黏度值。

2.2 动力黏度值验证

通过对非牛顿流体与牛顿流体的喷射过程进行对比, 对纳米颗粒墨水喷射过程中黏度值处于极大值这一结论进行验证。图 8 分别给出了以牛顿流体墨水低剪切速率时黏度($2.5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$)、极高剪切速率时黏度($12 \text{ mPa} \cdot \text{s}$)和超出牛顿流体黏度值范围的黏度($20 \text{ mPa} \cdot \text{s}$)为黏度值的牛顿流体喷射过程, 除动力黏度外, 其他参数保持不变。当墨水黏度值为 $2.5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 时, 由于黏度值过低, 墨水从喷孔飞出时并未耗费过多能量, 墨滴以高速向下飞行, 在 $180 \mu\text{s}$ 前已撞击基板。且低的黏度值导致墨滴之间难以聚合, 在喷射时形成多个卫星滴。当墨水黏度值为 $20 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 时, 由于黏度值过高, 墨水从喷孔喷出耗费了大量的动能, 墨滴的飞行速度较低。在高黏性力作用下, 墨滴聚合成单一液滴稳定喷射, 这与试验和非牛顿流体仿真中液滴的形貌并不相符。当墨水黏度为 $12 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 时, 墨滴的飞行状态和形貌与图 5 变黏度模型结果基本符合。

图 8 不同黏度值墨水滴落过程

除比较液滴形貌外, 对液滴飞行中速度和体积变化进行量化对比。图 9 给出了非牛顿和牛顿流体墨水仿真中墨滴速度和体积的变化情况, 可以看到黏度值为 $12 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 的墨水数值变化与非牛顿模型

数值几乎重合, 证明纳米颗粒墨水在喷射时液滴黏度大多位于极大值的结论是正确的。

图 9 非牛顿和牛顿流体墨水仿真中速度和体积对比

2.3 墨水稳定喷射研究

2.3.1 卫星滴形成过程

为了深入研究卫星滴的形成过程, 对图 5 中液滴形貌与中心轴线处墨滴的速度进行了对比, 如图 10 所示。

从图 10 可看到, 在 $10 \mu\text{s}$ 时, 受压电脉冲影响, 尾部墨滴以较高速度涌向头部, 从而形成主液滴。从 $30 \mu\text{s}$ 开始, 主液滴速度大于尾部液滴, 墨滴轴向尺寸被逐渐拉长。在 $90 \mu\text{s}$ 时尾部液滴与前方液滴发生断裂, 形成卫星滴, 随后墨滴又多次发生断裂, 且头部墨滴与尾部墨滴之间的距离被逐渐拉大, 没有再次融入主液滴的可能。

从墨滴中心轴线速度与液滴形貌的对比中可以看到, 无论是尾部还是头部, 处于颈部的墨滴往往具有很高的速度, 导致颈部墨水涌向墨滴前方; 而颈部后面的墨水速度较低, 难以向颈部及时补充, 导致颈部尺寸越来越小, 最终墨滴发生破裂。这一情况在 $60 \mu\text{s}$ 后的主液滴颈部尤其明显。

对于墨滴颈部飞行速度较高的原因, 可以用毛细管力的作用进行解释^[22]。毛细管力是由于液面弯曲而产生的作用力, 在毛细管力作用下, 墨滴内部会产生压力, 由杨-拉普拉斯公式知, 压力值与表面张力和液滴形貌相关

图10 墨滴形貌及对应中心轴线速度演化过程

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (9)$$

式中, σ 为表面张力; R_1 和 R_2 分别为液滴沿母线和径向的主曲率半径。定义凸液面曲率半径值为正, 凹液面为负。在液滴颈部, 母线上的液面为凹液面, 径向液面为凸液面。由于径向主曲率半径非常小, 因此颈部受到的压力值为正; 在主液滴上, 上述两液面均为凹液面, 因此主液滴内部的压力也为正, 但是主液滴的主曲率半径值远大于颈部, 导致颈部的压力大于主液滴, 造成颈部墨水向主液滴流动。

图11显示了在60 μs 和90 μs 时主液滴及其颈部附近墨滴压力分布情况。可以看到由于颈部附近的压力值大于主液滴, 导致颈部压强大于主液滴内部, 证明毛细管力对墨水喷射稳定性存在影响。

图11 墨滴内部压强分布(kPa)

2.3.2 稳定喷射条件

墨水稳定喷射的研究中, 多采用无量纲数对喷射过程进行定性分析, 并总结液滴稳定喷射需要满足的无量纲数范围。DERBY 等^[23]以韦伯数为横轴、雷诺数为纵轴对墨水适印性参数范围进行总结, 提出墨水喷射过程中奥内佐格倒数(Z)的数值应在1~10的范围内。但是该分析方法仅仅考虑了墨水本身的性质, 没有将墨水参数与液滴飞行状态联系起来, 导致部分试验结果与墨水适印性窗口存在出入。

毛细管数是墨水黏性力与表面张力之间的比值, 反映了分散相流体受毛细管力影响的程度, 可用于预测两相流中发生形变以及破裂的可能性。且毛细管数中包含墨滴速度等信息, 可由此得出液滴飞行状态对稳定性的影响。以奥内佐格数倒数为横轴, 毛细管数为纵轴, 对墨水稳定喷射需要满足的无量纲数范围进行分析。奥内佐格数倒数 Z 和毛细管数 Ca 计算公式^[23]

$$Z = \frac{\sqrt{\rho d \sigma}}{\mu} \quad (10)$$

$$Ca = \frac{\mu v}{\sigma} \quad (11)$$

式中, ρ 为流体密度; d 为喷嘴直径; σ 为表面张力; μ 为黏度; v 为液滴速度。

采用有限元模型对液滴喷射稳定性进行总结。仿真中的参数由一定范围内墨水和喷墨打印相关参数组合得到, 如表2所示。墨水喷射稳定性由卫星滴的状态确定, 若在液滴飞行过程中出现卫星滴, 且卫星滴始终无法融回主液滴, 则认为喷射过程是不稳定的。通过对不同参数组合喷射过程稳定性进行归纳, 得到墨水适印性窗口如图12所示。

图12三角形内部即为满足墨水稳定喷射的参数范围。在 $Ca < 1$ 的区域, 墨水由于初速度过小易受到气流干扰从而沉积在错误位置; 当 $Z < 1$ 时, 墨水黏度过大而难以喷出; 在斜线外部, 由于高毛细力和低黏性力, 墨水滴落过程中易形成卫星滴。将图8中的数据放入墨水适印性窗口中, 其中黏度值为2.5 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 的墨水由于黏度过低而超出了坐标范围, 黏度值12 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 的墨水落在墨水适印性范围外, 黏度值20 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 的墨水位于适印性范围内。可以看到使用毛细管数和奥内佐格数倒数可以准确判断出喷射的稳定性。

2.3.3 喷射参数调整与优化

不稳定的喷射过程可以根据墨水适印性范围进行调整。从图12可以看到, 纳米银墨水的喷射参数位于墨水适印性范围外部, 由式(10)、(11)知, 降低

表 2 仿真中参数组合

密度 /(g/cm ³)	表面 张力 /(mN/m)	黏度 /(mPa·s)	特征 尺寸 /μm	速度 /(m/s)	Z 值	毛细 管数	稳定 喷射
0.9	20	25	39	3.56	1.06	4.45	是
0.9	20	25	38	2.28	1.05	2.85	是
0.9	30	25	38	2.01	1.28	1.68	是
0.9	43	8	42	3.91	5.04	0.73	否
0.9	43	20	40	2.19	1.97	1.02	是
0.9	43	20	43	4.87	2.04	2.27	是
0.9	43	30	40	2.41	1.31	1.68	是
0.9	55	25	41	2.58	1.80	1.17	是
0.9	68	25	44	3.61	2.08	1.33	是
1.4	30	12	38	3.18	3.33	1.27	是
1.4	43	12	42	5.63	4.19	1.57	否
1.4	43	20	38	2.19	2.39	1.02	是
1.4	43	25	39	3.11	1.94	1.81	是
1.4	43	30	30	9.9	1.42	6.91	是
1.4	43	30	34	8.03	1.51	5.6	是
1.4	43	30	36	1.50	1.55	1.05	是
1.4	43	30	40	4.06	1.64	2.83	是
1.4	43	30	40	5.35	1.64	3.73	是
1.4	43	30	43	10.57	1.70	7.37	否
1.4	43	30	45	1.17	1.73	0.82	否
1.4	43	30	48	0.35	1.79	0.24	否
1.4	68	12	44	5.87	5.39	1.04	否
2.0	43	25	38	4.08	2.29	2.37	是
2.0	55	30	40	4.92	2.21	2.68	是
2.5	43	25	38	4.54	2.56	2.64	是
2.7	43	20	40	4.95	3.41	2.3	否
3.0	43	20	38	5.19	3.50	2.41	否

图 12 墨水适印性范围

速度和特征尺寸可降低毛细管数和奥内佐格倒数，使无量纲数位于稳定喷射范围内，达到稳定喷射的要求。

减小脉冲幅值可以实现上述目的，对不同脉冲幅值下墨滴的喷射形貌进行仿真，结果如图 13 所示，墨滴速度和特征尺寸变化如图 14 所示。随着脉

冲幅值的降低，墨滴拖尾尺寸减小，喷射过程逐渐稳定。当压电脉冲小于 72 V 时，卫星滴消失；当脉冲幅值小于 60 V 时，由于压力过小，墨水无法喷出而被收回至墨水腔。

图 13 不同压电脉冲下墨水滴落形貌

图 14 不同压电脉冲下墨滴速度和特征尺寸变化

当脉冲幅值为 72 V、67 V 和 65 V 时墨滴均能够以单一液滴的形式下落，但是由于墨滴成形过

程中耗费了大部分能量,脉冲小于 72 V 后墨滴飞行速度急剧减小,如图 16a 所示。65 V 脉冲下液滴在 60 μs 后的飞行速度仅为 0.46 m/s,此时的毛细管数远小于 1,液滴在飞行中极易受到空气阻力的干扰。压电脉冲设置为 72 V 时既满足稳定喷射又能保证液滴具有一定初速度,是满足打印要求的最为理想的参数。

3 试验验证

通过喷墨打印试验对墨水稳定喷射进行验证。当设置脉冲幅值为 90 V 时,试验与仿真墨滴速度和体积变化由图 15 所示,试验与仿真数据变化总体拟合良好。

图 15 试验与仿真墨滴速度和体积变化

经过试验优化,脉冲幅值改为 72 V,其他参数保持不变,墨滴喷射过程中的形貌、速度和体积变化如图 16 所示。从图 16 可以看出,除去由于试验中墨水第一次断裂时间较晚,导致 90 μs 时墨滴仍具有较长拖尾外,在墨滴形貌、体积和速度等方面,仿真与试验结果具有良好的一致性,且试验中液滴稳定性与仿真结果保持一致,墨水在飞行中形成单一液滴,证明采用毛细管数和奥内佐格倒数对墨水喷射稳定性进行预测和优化是可行的。

10 μs 30 μs 60 μs 90 μs 120 μs 150 μs 180 μs

(a) 墨滴形貌

(b) 墨滴速度和特征尺寸

图 16 72 V 压电脉冲下墨滴形貌、速度和体积变化

4 结论

(1) 通过对纳米颗粒墨水的黏度随剪切速率变化趋势进行测量和拟合,建立了基于 Carreau 模型的非牛顿流体喷墨打印有限元模型,从墨滴形貌、体积和飞行速度等方面对喷墨打印试验和仿真进行对比,证明仿真与试验具有良好的一致性。

(2) 毛细管力是导致墨滴失稳的重要因素。在毛细力作用下,不同曲率液面之间会产生压力差,由于主曲率半径值较小,墨滴颈部压力高于主液滴内部,导致颈部墨水加速流向主液滴,造成颈部出现颈缩现象。

(3) 提出使用毛细管数 Ca 和奥内佐格倒数 Z 作为判定墨水喷射稳定性的依据,总结墨水适印性窗口并对墨水打印参数进行优化,数值模拟和物理试验共同验证了 CA-Z 纳米颗粒悬浮墨水稳定喷射评价方法的可行性。

参考文献

- [1] WU Lei, DONG Zhichao, LI Fengyu, et al. Emerging progress of inkjet technology in printing optical materials[J]. Advanced Optical Materials, 2016, 4(12): 1915-1932.
- [2] BURFORD N, EL-SHENAWE M. Optimization of silver nanotoroid arrays for the absorption enhancement of silicon thin-film solar cells[J]. Plasmonics, 2015, 10(1): 225-232.
- [3] MATSUHISA N, INOUE D, ZALAR P, et al. Printable elastic conductors by in situ formation of silver nanoparticles from silver flakes[J]. Nature Materials, 2017, 16: 834.
- [4] SANCHEZ-ROMAGUERA V, WUNSCHEN S, TURKI B M, et al. Inkjet printed paper based frequency selective surfaces and skin mounted RFID tags: The interrelation

- between silver nanoparticle ink, paper substrate and low temperature sintering technique[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, 3(9): 2132-2140.
- [5] 朱东彬, 楚锐清, 张晓旭, 等. 陶瓷喷墨打印机机理研究进展[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(13): 108-117.
ZHU Dongbin, CHU Ruiqing, ZHANG Xiaoxu, et al. Progress in mechanism of ceramics inkjet printing [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(13): 108-117.
- [6] WOO Jin H, SECOR E B, HERSAM M C, et al. High-resolution patterning of graphene by screen printing with a silicon stencil for highly flexible printed electronics[J]. *Adv. Mater.*, 2015, 27(1): 109-115.
- [7] ALFADHEL A, OUYANG J, MAHAJAN C G, et al. Inkjet printed polyethylene glycol as a fugitive ink for the fabrication of flexible microfluidic systems[J]. *Materials & Design*, 2018, 150: 182-187.
- [8] WOO K, JANG D, KIM Y, et al. Relationship between printability and rheological behavior of ink-jet conductive inks[J]. *Ceram. Int.*, 2013, 39(6): 7015-7021.
- [9] WEI Hongfang, XIAO Xiaolei, YIN Zhifu, et al. A waveform design method for high DPI piezoelectric inkjet print-head based on numerical simulation[J]. *Microsystem Technologies*, 2017, 23(12): 5365-5373.
- [10] HE Bing, YANG Sucui, QIN Zhangrong, et al. The roles of wettability and surface tension in droplet formation during inkjet printing[J]. *Sci. Rep.*, 2017, 7(1): 11841.
- [11] NALLAN H C, SADIE J A, RUNGROT K, et al. Systematic design of jettable nanoparticle-based inkjet inks: Rheology, acoustics, and jettability[J]. *Langmuir the ACS Journal of Surfaces & Colloids*, 2014, 30(44): 13470-13477.
- [12] XU Changxue, ZHANG Zhengyi, FU Jianzhong, et al. Study of pinch-off locations during drop-on-demand inkjet printing of viscoelastic alginate solutions[J]. *Langmuir*, 2017, 33(20): 5037-5045.
- [13] 肖渊, 吴姗, 刘金玲, 等. 织物表面微滴喷射反应成形导电路径基础研究[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(7): 216-222.
XIAO Yuan, WU Shan, LIU Jinling, et al. Basic research on conductive lines by droplets jet and reaction forming on fabric surface[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(7): 216-222.
- [14] 占红武, 胥芳, 郭维锋, 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 Hongwu, XU Fang, GUO Weifeng, et al. Dynamics modeling and ink supply methods of piezoelectric ink-jetting process[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(1): 140-149.
- [15] DUINEVELD P C, DE KOK M M, BUECHEL M, et al. Ink-jet printing of polymer light-emitting devices[C]// *Organic Light-Emitting Materials and Devices V*, July 30-August 1, 2001, California, United States, San Diego: SPIE, 2002: 59-67.
- [16] YUN Jintian, HE Maowei, ZHU Yunlong, et al. Droplet property optimization in printable electronics fabrication using root system growth algorithm[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 125: 592-603.
- [17] CHEN Qian, LIU Mei, XUAN Shouhu, et al. Shear dependent electrical property of conductive shear thickening fluid[J]. *Materials & Design*, 2017, 121: 92-100.
- [18] OLSSON E, KREISS G. A conservative level set method for two phase flow[J]. *Journal of Computational Physics*, 2005, 210(1): 225-246.
- [19] POOZESH S, AKAFUAH N, SAITO K. New criteria for filament breakup in droplet-on-demand inkjet printing using volume of fluid (VOF) method[J]. *Korean J. Chem. Eng.*, 2016, 33(3): 775-781.
- [20] PARK B J, PARK B O, RYU B H, et al. Rheological properties of Ag suspended fluid for inkjet printing[J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, 108(10): 2411.
- [21] GAO Z, KAM N. Temporal analysis of power law liquid jets[J]. *Computers & Fluids*, 2010, 39(5): 820-828.
- [22] DRENCKHAN W, SAINT-JALMES A. The science of foaming[J]. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2015, 222: 228-259.
- [23] DERBY B. Inkjet printing of functional and structural materials: Fluid property requirements, feature stability, and resolution[J]. *Annual Review of Materials Research*, 2010, 40(1): 395-414.

作者简介: 朱东彬, 男, 1975 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为增材制造。
E-mail: zhudongbin@hebut.edu.cn