

气溶胶直写实验研究

赵二晶¹, 蒋小珊^{1,2,3*}, 李文超¹, 钟海天¹

¹北京印刷学院机电工程学院, 北京

²北京印刷学院数字化印刷装备北京市重点实验室, 北京

³北京印刷学院印刷装备北京市高等学校工程研究中心, 北京

收稿日期: 2025年11月17日; 录用日期: 2025年12月10日; 发布日期: 2025年12月18日

摘要

气溶胶直写技术(Aerosol Jet Direct Writing)作为一种高分辨率非接触式图案沉积方法, 在柔性电子与微纳器件制造中展现出巨大潜力。然而, 直写分辨率与图案质量在很大程度上受限于气溶胶射流在喷头内聚焦行为的影响, 该过程中的多物理场耦合机制尚不明确。本文通过自主搭建气溶胶直写实验平台, 系统研究了载气与鞘气流速对直写形貌与分辨率的定量影响。研究结果表明, 载气和鞘气是主导射流聚焦效果的关键因素。载气流速为0.5 mL/min时, 将鞘气流速从0.5 mL/min提升至0.7 mL/min, 可获得最优的聚焦效果, 此时聚焦比为1.3, 聚焦率为40%, 且边缘清晰度得到改善。该研究为优化气溶胶直写工艺参数提供了明确的实验依据, 对推进该技术在微细图形制造中的应用具有重要指导意义。

关键词

气溶胶直写, 聚焦结构, 鞘气流速, 载气流速, 气溶胶微滴

Experimental Research on Aerosol Direct Writing

Erjing Zhao¹, Xiaoshan Jiang^{1,2,3*}, Wenchao Li¹, Haitian Zhong¹

¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing

²Beijing Key Laboratory of Digital Printing Equipment, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing

³Beijing Higher Education Engineering Research Center, Beijing Institute of Graphic Communication Printing Equipment, Beijing

Received: November 17, 2025; accepted: December 10, 2025; published: December 18, 2025

Abstract

Aerosol Jet Direct Writing technology, as a high-resolution non-contact pattern deposition method,

*通讯作者。

has shown great potential in the manufacturing of flexible electronics and micro/nano devices. However, the direct writing resolution and pattern quality are largely limited by the focusing behavior of aerosol jets inside the nozzle, and the multi physics coupling mechanism in this process is not yet clear. This article systematically studied the quantitative effects of carrier gas and sheath gas flow rates on the morphology and resolution of direct writing by building an aerosol direct writing experimental platform independently. The research results indicate that the carrier gas and sheath gas are the key factors that dominate the focusing effect of the jet. When the carrier gas flow rate is 0.5 mL/min, increasing the sheath gas flow rate from 0.5 mL/min to 0.7 mL/min can achieve the optimal focusing effect, with a focusing ratio of 1.3, a focusing rate of 40%, and improved edge clarity. This study provides clear experimental evidence for optimizing aerosol direct writing process parameters and has important guiding significance for promoting the application of this technology in micrographic manufacturing.

Keywords

Aerosol Direct Writing, Focusing Structure, Sheath Gas Velocity, Carrier Gas Flow Rate, Aerosol Droplet

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着新一轮科技和产业变革的深入推进，微纳制造、柔性电子及便携传感器等前沿领域对高精度材料沉积技术提出了迫切需求[1]。传统印刷技术如丝网印刷与喷墨印刷受限于分辨率及基材适应性，难以满足新型电子器件的微细图形化要求[2]。气溶胶直写技术作为一种非接触式打印技术，通过墨水雾化、载气输送与鞘气聚焦气溶胶，实现微米级图案沉积，具备分辨率高、材料适用性广等优势，在柔性电子与嵌入式器件领域展现出重要潜力[3] [4]。

众多国内外科研机构对气溶胶直写技术开展研究。多伦多大学 Bussmann 团队建立了液滴碰撞跟踪模型和液滴撞击飞溅模型来得到气溶胶喷射情况。乔治亚理工学院 Hèaly 等建立了液滴冲击固体表面扩散的理论模型，并进行了实验验证，理论与实验结果基本相符[5]。崔冀新等人采用 CFD-DEM 耦合方法精确模拟了气溶胶液滴与纤维的相互作用过程，系统地研究了气溶胶液滴在通过纤维介质时的动态行为、捕集机理和效率[6]。金文等人采用 VOF-to-DPM 耦合模型对微尺度双射流撞击雾化过程进行了系统模拟，为气溶胶直写中喷头优化与参数控制提供了微观机理支持[7]。这些研究为气溶胶直写技术发展提供了必要的理论支撑。Yuan Gu 提出通过墨盒阵列与称重法校准沉积速率，Roozbeh Salary 利用 CCD 相机在线采集线条形貌，结合流体动力学模型验证了在线与离线监测结果的一致性，为动态调整参数提供了可能[8]。Santanu Bag 则通过优化工艺，将钙钛矿薄膜应用于太阳能电池，能量转换效率达 15.4% [9]。陈赛等人通过正交实验系统分析了载气流量、喷印速度等参数对气溶胶喷印线条形貌的影响，明确了各参数对喷印质量的影响优先级[10]。苏框逾使用气溶胶喷射打印制备了两种柔性温度传感器，验证了该技术在微细图形化、高分辨率、材料兼容性方面的优势，提供了气溶胶打印在柔性传感器制造中的成功案例[11]。亓凯通过 CFD 仿真系统研究了喷印头结构参数与运行参数对聚焦性能的影响，采用正交试验法优化结构设计，使射流直径显著减小，并指出滴管型喷头具有最优聚焦性能[12]，为本研究在喷头结构优化与参数控制方面提供了重要参考。气溶胶直写技术虽取得进展，但喷头结构的优化设计以及工艺参数的精确控

制仍面临挑战，这主要源于对气溶胶聚焦行为缺乏系统的实验研究。为解决这一问题，本文通过气溶胶发生、气流控制与运动平台等模块，建立气溶胶直写实验系统；研究载气与鞘气流速对直写分辨率与线条形貌的作用，明确喷头结构与气流参数对气溶胶直写的影响规律。

2. 气溶胶直写系统构建

2.1. 系统总体架构

本研究搭建的气溶胶直写系统，主要包括气溶胶发生、气流控制与三维运动平台三大模块。该系统工作时，首先气溶胶发生模块通过雾化器将墨水转化为微纳米级液滴，随后气流控制模块通过载气和鞘气控制气溶胶稳定喷射，并在运动平台上逐点逐线直写成图案或微纳结构，其系统结构如图 1 所示。

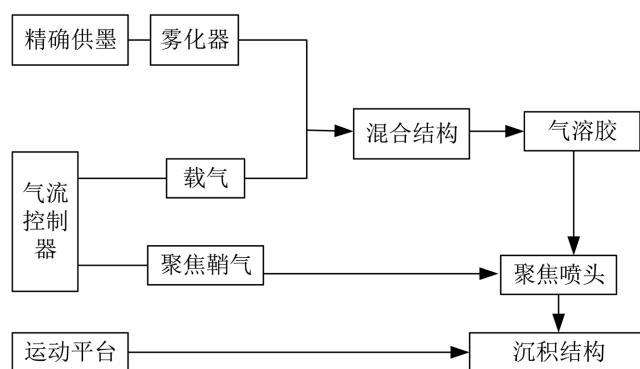


Figure 1. Schematic diagram of aerosol direct writing system

图 1. 气溶胶直写系统示意图

2.2. 气溶胶发生模块

2.2.1. 雾化装置

精确供墨采用步进电机控制，实现精确定量给墨，行程分辨率 $0.2 \mu\text{m}$ ，流量调节范围 $0.1\sim50 \mu\text{L}/\text{min}$ ，确保墨水供给的稳定性。墨水经过超声雾化形成大量含有微纳米级的液滴。

2.2.2. 混合结构

雾化产生的液滴存储在混合腔体内，利用载气经过混合结构形成气溶胶，该结构如图 2 所示。当载气从左侧管口进入，随着管径收缩，其横截面积逐渐减小。根据质量守恒原理和连续性方程可知，在相同时间内流过横截面的流体体积相等，载气流速经过收缩内径后，其流速增大。根据伯努利方程可知，随着流体的动能增加，其势能和压强逐渐减小。在收缩处，载气压强降至最低；周围环境压强大于载气压强。因此，雾化液滴在压强作用下从管口周边进入气溶胶输送管路，通过控制载气流速，可形成稳定的均匀气溶胶气流。

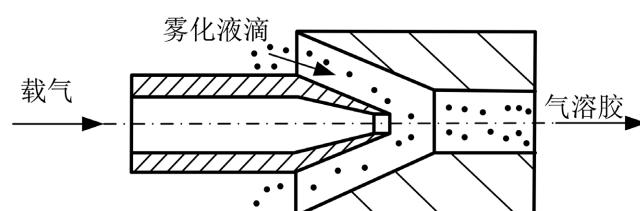


Figure 2. Hybrid structure

图 2. 混合结构

2.2.3. 气流控制模块

气流控制模块采用流量计分别控制载气和鞘气流速。通过控制载气流速，使得气溶胶微滴随载气通过喷孔喷出，形成气溶胶射流。通过控制鞘气流速与载气流速实现对气溶胶射流沉积质量及直写分辨率的控制。

2.2.4. 多轴运动平台

多轴运动平台采用三维运动控制器实现空间运动，X/Y/Z 轴采用伺服电机，重复定位精度 $\pm 1 \mu\text{m}$ 。通过 G 代码编程控制气溶胶直写路径，可完成复杂三维结构的逐层直写。测试数据显示，系统在 4 mm/s 移动速度下，定位误差 $< 5 \mu\text{m}$ ，满足气溶胶直写需求。

据上述系统架构，气溶胶直写装置如图 3。为了探究气溶胶直写质量的影响规律，采用 UV 墨，其粘度 100 cP，承印基材为打印纸，厚度 120 μm ，喷头直径 1 mm，对不同气体流速进行气溶胶直写实验。

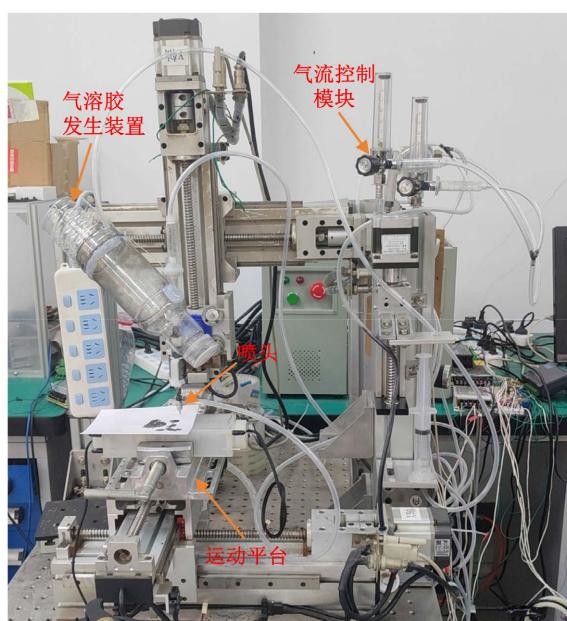


Figure 3. Aerosol direct writing platform
图 3. 气溶胶直写平台

3. 聚焦理论基础与分析

3.1. 流态判别与雷诺数

为深入理解载气与鞘气对气溶胶直写过程的调控机制，基于流体动力学基本原理，建立气溶胶射流的理论分析框架。

气溶胶射流的稳定性是获得高精度打印线条的前提。流体的流动状态(层流或湍流)具有的随机性和混沌性，在时间和空间上不断变化，由无量纲的雷诺数(Re)决定。雷诺数 $Re = \rho v L / \mu$ ， ρ 、 μ 为流体密度和动力粘性系数， v 、 L 为流场的特征速度和特征长度。 $Re < 2000$ 时为层流；在 $2000 < Re < 4000$ 时，向湍流过渡； $Re > 4000$ 为湍流。在产生雾化液滴的过程中， Re 大于 4000，因此，需要考虑湍流过程。

标准 $k-\omega$ 模型是一种常用的湍流模型，其计算公式(3-1)和(3-2)所示：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k u) = \nabla \cdot ((\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k) - \rho \beta^* \omega k + P_k \quad (3-1)$$

其中, k 是湍动能, ρ 是密度, \mathbf{u} 是速度向量, μ 是动力粘性系数, μ_t 是涡粘性系数, σ_k 是模型参数, P_k 是由于压力梯度对湍动能产生的输运项, ω 是湍流耗散率, β^* 是经验常数。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \nabla \cdot (\rho\omega\mathbf{u}) = \nabla \cdot ((\mu + \sigma_\omega\mu_t)\nabla\omega) + \gamma\rho\frac{\omega}{k}\nabla \cdot \left(k\nabla\frac{\omega}{k}\right) - \rho\alpha_1\omega\frac{k}{\max(C_\mu, \omega)} + \alpha_2P_k \quad (3-2)$$

其中, ω 是湍流耗散率, μ 是动力粘性系数, μ_t 是涡粘性系数, γ 是经验常数, C_μ 是涡粘性系数与动力粘性系数的比值, α_1 和 α_2 是经验常数。

3.2. 鞘气聚焦的物理机制：伯努利原理与动量守恒

伯努利原理是流体动力学中的基本定律, 描述了理想流体在作稳态流动时, 其机械能沿流线守恒的规律。该原理的核心内涵是: 在一条流线上, 流体的流速越大, 其静压则越小; 反之, 流速越小, 其静压则越大。这种动能与压力势能之间的反变关系, 构成了鞘气聚焦技术的物理基础。气溶胶在喷射过程中的流动行为遵循流体力学的基本守恒定律(动量守恒)。

动量守恒方程描述了流体微元的动量变化与作用力之间的关系, 其微分形式为:

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g + S_M \quad (3-3)$$

其中, ρ 为流体密度, p 为静压, τ 为应力张量, g 为重力加速度, S_M 为离散相对连续相的作用力。该方程体现了动量在流场中的传递和守恒规律。

4. 结果与讨论

4.1. 载气流速对气溶胶直写质量的影响

为保证直写时气溶胶射流稳定喷射, 需要对载气气流和聚鞘气流进行测定。本次实验选用喷头孔径结构如图 4 所示, 喷头结构中不含鞘气结构。通过脉冲信号控制供墨系统每次进给的墨滴量约为 0.05 ml, 通过调整浮子流量计控制载气流速, 气溶胶直写时间为 5 秒, 通过显微观察分析得出最佳的载气气流大小, 直写线条的效果如图 5 所示。

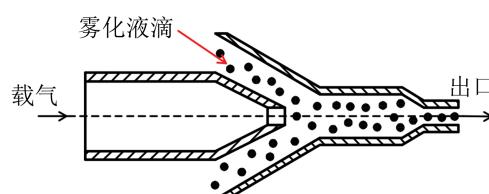


Figure 4. Schematic diagram of nozzle structure without focusing structure
图 4. 不含聚焦结构的喷头结构示意

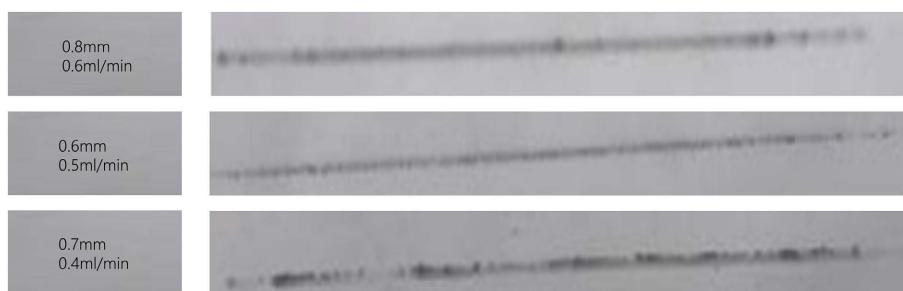


Figure 5. Direct writing lines of aerosols at different carrier gas flow rates
图 5. 不同载气流速下的气溶胶直写线条

在不加鞘气结构的喷头结构中，当载气流速为 0.4 ml/min ，气溶胶直写线条宽度为 0.7 mm ；当载气速度增加到 0.5 ml/min 时，直写线条宽度减小为 0.6 mm 。由实验可得，在一定范围内增大载气速度，气溶胶直写的线条有明显的变细趋势，线条均匀且边界清晰，这是因为随着载气逐渐变大，伯努利效应逐渐增强，使得单位时间内载气带携带的微纳米液滴量增多，随着载气速度升高，喷头内部的颈缩段对载气的压力增强，使得喷头内部的气溶胶液滴向内聚集，形成层流。当流速超过一定值之后，如载气流速为 0.6 ml/min 时，直写的线条宽度增大为 0.8 mm ，线条边缘比较模糊。这是因为随着载气流速逐渐增大。载气与气溶胶液滴的湍流程度增强，混合度提高，而过高的载气又会在喷口处发生膨胀效应，使得气溶胶液滴扩散面积增大，增大线条的宽度、线条边缘逐渐模糊。

4.2. 聚焦结构对气溶胶直写的影响

在不加聚焦结构的直写打印实验中，载气流速 0.5 ml/min 可以获得较好的直写效果。为了进一步减小线条宽度，提高气溶胶直写的沉积精度，采用鞘气聚焦结构如图 6 所示，探索喷头鞘气聚焦结构对气溶胶射流作用的影响。采用脉冲信号控制供墨量，通过流量计改变鞘气流速，在纸张上得到气溶胶直写墨点如图 7 所示。不同聚焦气流作用下，直写墨点的直径变化如图 8 所示。

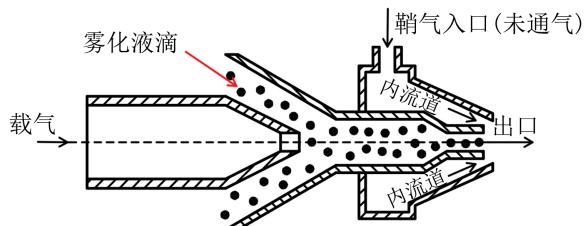


Figure 6. Schematic diagram of nozzle with sheath gas focusing structure
图 6. 带鞘气聚焦结构的喷头示意图

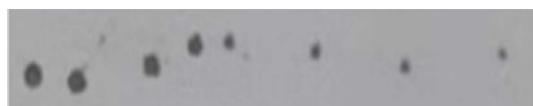


Figure 7. Effect diagram of focused direct writing ink dots under different focused airflow velocities
图 7. 不同聚焦气流速度下的聚焦直写墨点效果图

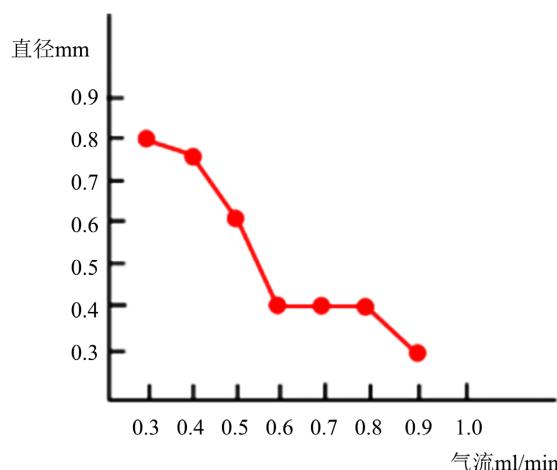


Figure 8. Diameter lines of ink dots written directly under different focused airflow velocities
图 8. 不同聚焦气流速度下直写墨点的直径折线

由实验可知，随着鞘气流速逐渐增大，直写墨点的直径呈现逐步降低的趋势，且颜色深度逐渐变浅。这是由于在载气气流不变的情况下，提高聚焦鞘气流速，使得气溶胶流速在喷口处的喷射速度提高。但由于鞘气的聚焦作用，气溶胶射流直径变小，使得直写墨点的直径逐渐变小。由于气溶胶射流变细，单位时间内通过的微纳米级液滴数量减少，导致直写墨点的颜色变浅。设鞘气流速与载气流速之比为聚焦比，墨点直径与喷嘴直径之比为聚焦率，不同流速鞘气作用下的直写墨点聚焦比和聚焦率与聚焦率如表 1 所示。

Table 1. Direct ink dot focusing ratio under different sheath gas flow rates
表 1. 不同鞘气流速作用下的直写墨点聚焦比

| 鞘气流速 ml/min | 墨点直径 mm | 聚焦比 | 聚焦率 |
|-------------|---------|-----|-----|
| 0.4 | 0.3 | 0.3 | 30% |
| 0.5 | 0.4 | 0.6 | 40% |
| 0.6 | 0.4 | 1 | 40% |
| 0.7 | 0.4 | 1.3 | 40% |
| 0.8 | 0.6 | 1.6 | 60% |
| 0.9 | 0.75 | 2 | 75% |
| 1.0 | 0.8 | 2.3 | 80% |

4.3. 气溶胶直写实验优化

为了使得聚焦率在 50% 范围之内，采用聚焦气流流速为 0.7 ml/min，聚焦比为 1.3，此数据供后续直写使用。图 9 为有无聚焦鞘气直写线条的情况。

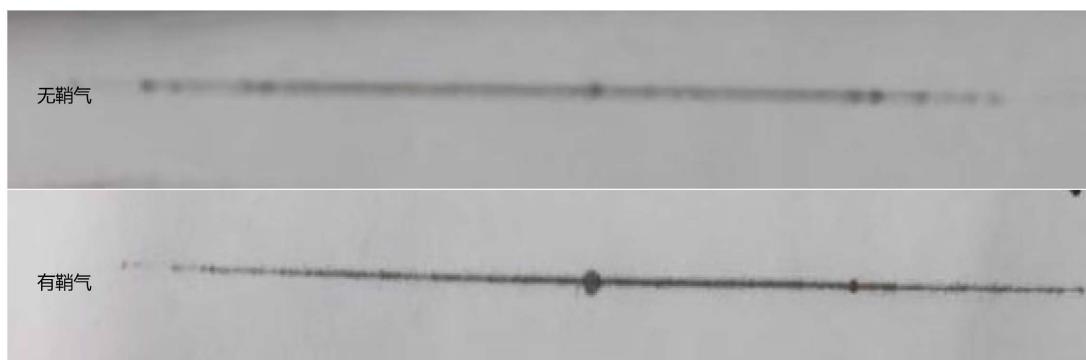


Figure 9. Straight lines with/without focused sheath gas
图 9. 有无聚焦鞘气的直写线条

如图 9 所示，气流速度为 0.5 ml/min，不加鞘气所得线条宽度较大，平均宽度为 0.8 mm，形貌粗糙，且光学对比度较低。相比之下，加鞘气的线条平均宽度约为 0.4 mm，均匀性较好，颜色深，但存在少量直径约 1.2 mm 的异常液滴。该现象是由于单次直写所成墨层过薄，需多次沉积以构建清晰图案；在重复直写过程中，由于鞘气速率和载气速率差异较大，两者之间形成的压力梯度升高，此压力梯度使得内部气溶胶液滴向管壁面移动被壁面捕获，与此同时喷头内部的气溶胶液滴在径向方向上的浓度不同，导致浓度扩散现象，使得中心的气溶胶液滴向壁面扩散，随着打印时间的累积，附着在内壁上的气溶胶粒子过多沉积，部分在喷嘴处的 UV 墨水液滴，最终在重力作用下脱离并落于基材，形成观测到的大墨滴缺陷。

在加上聚焦鞘气后，其对载气和气溶胶液滴的混合相态进行包覆，使得直写线条边缘更加细腻和均匀。因为鞘气对载气和气溶胶液滴混合相态的压缩包覆作用，使得单位时间内，沉积线条在横截面上的线堆积密度提高，且同时因为聚焦气流在喷口处喷射速度快于载气，所以在单位时间内带出的气溶胶更多使得直写线条的颜色浓度变深，实验结果证明了带鞘气结构的喷头符合气溶胶直写的需求。

5. 结论

为提升微米级气溶胶直写的精度与聚焦性能，本研究提出了一种集成鞘气聚焦结构的喷头设计方案，并通过系统实验分析了关键工艺参数的影响。

成功搭建了气溶胶直写实验系统，该系统由气溶胶发生、精密气流控制与运动平台等模块构成。通过优化供墨与雾化过程，实现了微纳米级液滴的稳定生成；借助载气与鞘气协同控制，保证了气溶胶射流的稳定喷射。

实验研究表明，喷头结构及气流参数对直写线条形貌具有显著影响。当喷孔直径为 1 mm，载气流速为 0.5 ml/min，鞘气流速为 0.7 ml/min 时，可获得最佳聚焦效果，此时聚焦比为 1.3，聚焦率达 40%，直写线条边缘清晰，满足高精度气溶胶直写要求。

鞘气流速是影响射流聚焦行为的关键参数。在一定范围内，增大鞘气流速可有效减小气溶胶束流直径，提高直写分辨率，为喷头结构优化与工艺参数调整提供了明确指导。

本研究通过实验证明了鞘气聚焦喷头在提升气溶胶直写质量方面的有效性，为后续技术优化与工程应用奠定了基础。

基金项目

北京市教委科技计划项目(No. KM201710015002)。

参考文献

- [1] 尹周平, 黄永安. 柔性电子制造; 材料、器件与工艺[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [2] Wang, F.Y., Li, X., Duan, Y.N., et al. (2016) Inkjet Printing of Copper Wire on PET Substrate. *Applied Nanoscience*, **6**, 575-580. <https://doi.org/10.1007/s13204-015-0461-3>
- [3] 吴常健. 气溶胶喷射打印系统设计及实验研究[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 厦门理工学院, 2020.
- [4] Kopola, P., Zimmermann, B., Filipovic, A., et al. (2012) Aerosol Jet Printed Grid for ITO-Free Inverted Organic Solar Cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **107**, 252-258. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.06.042>
- [5] Kahn, B.E. (2007) The M3D Aerosol Jet System, an Alternative to Inkjet Printing for Printed Electronics. *Organic and Printed Electronics*, **1**, 14-17.
- [6] 崔冀新. 基于 CFD-DEM 方法纤维介质对气溶胶液滴捕集效率研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津城建大学, 2025.
- [7] 金文. 基于 VOF-to-DPM 耦合模型的微尺度双射流撞击雾化过程数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2022.
- [8] Salary, R.R., Lombardi, J.P., Rao, P.K., et al. (2017) Online Monitoring of Functional Electrical Properties in Aerosol Jet Printing Additive Manufacturing Process Using Shape-from-Shading Image Analysis. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **139**, Article 101010. <https://doi.org/10.1115/1.4036660>
- [9] King, B.H. and Bames, S.M. (2008) Aerosol Jet® Printing System for High Speed, Non-Contact, Front Side Metallization Helping Improve Efficiencies of Silicon Solar Cells. *Proceedings of the NLP & Digital Fabrication Conference*, **24**, art00117_2. https://doi.org/10.2352/ISSN.2169-4451.2008.24.1.art00117_2
- [10] 陈赛, 舒霞云, 常雪峰, 等. 纳米颗粒气溶胶喷印参数的正交实验研究[J]. 微纳电子技术, 2025, 62(1): 150-157.
- [11] 苏框逾. 气溶胶喷射打印制备柔性温度传感器及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 赣州: 江西理工大学, 2024.
- [12] 亓凯. 气溶胶喷印系统聚焦性能仿真及结构优化[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2024.