

气溶胶直写过程数值模拟研究

李鑫莲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9月29日; 录用日期: 2025年10月29日; 发布日期: 2025年11月7日

摘要

作为新兴的增材制造技术, 气溶胶直写技术在柔性电子、半导体封装等领域得到应用。但其过喷、卫星液滴等问题仍未完全解决, 在气溶胶直写过程中, 往往会使用尺寸较小的喷头, 喷射过程中的流场、速度与压强等物理量难以直接观测或者测量。本研究对气溶胶直写系统进行三维几何模型并划分网格, 建立了气溶胶喷射的离散相模型。通过数值模拟分析得到了气溶胶颗粒的运动轨迹以及气溶胶射流的压强与速度分布, 在此基础上, 分析了载气及鞘气对气溶胶聚焦作用的影响。研究揭示了气溶胶射流的运动规律和相互作用机制, 为喷头结构优化和工艺参数调整提供了依据。

关键词

气溶胶直写打印, 离散相模型, 颗粒运动轨迹, 聚焦结构

Numerical Simulation of Aerosol Jet Writing Process

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

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

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

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

Received: September 29, 2025; accepted: October 29, 2025; published: November 7, 2025

Abstract

As an emerging additive manufacturing technology, aerosol jet writing technology has been applied

*通讯作者。

文章引用: 李鑫莲, 蒋小珊, 李文超, 钟海天. 气溶胶直写过程数值模拟研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(11): 94-101.

DOI: 10.12677/mos.2025.1411642

in fields such as flexible electronics and semiconductor packaging. However, issues such as overspray and satellite droplets have not been fully resolved. In the aerosol direct writing process, small-sized nozzles are often used, making it difficult to directly observe or measure physical quantities such as flow field, velocity, and pressure during the spraying process. This study conducted a three-dimensional geometric model of the aerosol jet writing system and divided it into grids, and established a discrete phase model of aerosol injection. The motion trajectory of aerosol particles and the pressure and velocity distribution of aerosol jets were obtained through numerical simulation analysis. Based on this, the influence of carrier gas and sheath gas on the focusing effect of aerosols was analyzed. The study revealed the motion laws and interaction mechanisms of aerosol jets, providing a basis for optimizing nozzle structures and adjusting process parameters.

Keywords

Aerosol Jet Writing, Discrete Phase Model, Particle Motion Trajectory, Focusing Structure

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

气溶胶直写技术(Aerosol Jet Writing)作为一种非接触式的增材制造技术,凭借其高图形分辨率、广泛的材料适应性以及能够在复杂 3D 基底上实现共形打印的能力,在柔性电子、半导体封装和生物传感器等领域展现出显著优势[1]。该技术的核心过程涉及将功能性油墨(如银纳米颗粒悬浮液)雾化成气溶胶微滴,并通过鞘气聚焦形成准直射流,最终沉积到距喷嘴数毫米外的基底上[2]。

美国 Optomec 公司较早开展了系统仿真与实验结合的研究,利用 Open FOAM 软件分析了气动雾化器的流场特性,发现液滴粘度对沉积形态影响显著:低粘度液滴沉积后表面振荡明显,高粘度液滴则更稳定。该公司还通过可视化观察证实,当雷诺数 ≥ 4000 且喷嘴与衬底间距小于 12 倍喷嘴直径时,气溶胶流束可保持层流状态,为稳定喷印提供了理论依据[3]。过喷现象(超出理想区域的微滴沉积)是制约气溶胶直写打印精度的关键问题。在气溶胶喷射打印中,工艺参数对卫星液滴行为和打印线条形貌有显著影响。周健等通过实验探讨了同轴气流对微滴喷射过程的影响,发现随着同轴气流强度的增大,卫星液滴体积会增大[4]。西北工业大学张开富教授团队通过发展环形声场辅助聚焦的气溶胶喷墨打印策略,实现了高分辨率打印,有效抑制了过度喷涂(过喷),获得的打印线宽可小于 $6\text{ }\mu\text{m}$ [5]。

综上所述,气溶胶直写技术在很多领域已取得显著进展,但过喷、卫星液滴等问题仍未完全解决,限制了其在更高精度场景中的应用。气溶胶直写技术使用的喷头尺寸较小,喷射过程中的流场、速度与压强等物理量难以直接观测或者测量。现在一些流体仿真分析软件为多物理场分析提供了手段,本文对气溶胶直写系统进行三维几何模型,然后使用对气溶胶直写的流体喷射过程进行物理场分析,为喷头的设计与改进提供参考,可有效提高设计效率,减少实验时间,提升气溶胶直写打印喷头的设计质量。

2. 气溶胶喷射过程的数学模型

在气溶胶直写过程中,雾化后的油墨微滴在载气的携带下形成稳定的气溶胶混合体系。油墨微滴作为离散相,其运动状态受到连续相(载气)流动的影响。同时液滴颗粒自身的物理性质(如粒径、密度)和外

部作用力(如重力、拖曳力)也会显著影响其运动轨迹。

2.1. 流体力学基本方程

气溶胶流体在运动过程属于质量守恒、动量守恒和能量守恒过程。气溶胶密度基本不变, 将其简化为不可压缩流体, 其连续性方程可表示为:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2-1)$$

式中 $\mathbf{u}$ 为连续相的速度矢量。该方程表明在稳态流动中, 流体的质量在流场中处处守恒, 没有质量的源或汇。

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:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{S}_M \quad (2-2)$$

其中, ρ 为流体密度, p 为静压, $\boldsymbol{\tau}$ 为应力张量, $\mathbf{g}$ 为重力加速度, $\mathbf{S}_M$ 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。

在不考虑热传导和能量源的情况下, 能量守恒方程可简化为:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{u}) = -\nabla p \cdot \mathbf{u} + \phi \quad (2-3)$$

e 为流体的比内能, ϕ 为粘性耗散函数。能量守恒方程反映了流体流动过程中的能量转换和守恒关系。

2.2. 离散相颗粒受力分析

离散相微滴在连续相中受到多种作用力的共同影响, 其运动遵循牛顿第二定律:

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_B + \mathbf{F}_{VM} + \mathbf{F}_{PG} + \mathbf{F}_G \quad (2-4)$$

式中 $\mathbf{u}_p$ 为颗粒速度矢量, 其所受作用力分别为:

曳力 $\mathbf{F}_D$: 由连续相流体与颗粒之间的相对运动引起, 是颗粒运动的主要阻力, 其表达式为:

$$\mathbf{F}_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D R_e}{24} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) \quad (2-5)$$

其中, μ 为流体动力黏度, ρ_p 为颗粒密度, d_p 为颗粒直径, R_e 为相对雷诺数, C_D 为曳力系数。

重力 $\mathbf{F}_G$: 颗粒受到的重力作用, 表达式为:

$$\mathbf{F}_G = \rho_p g \mathbf{V}_p \quad (2-6)$$

其中, $\mathbf{V}_p$ 为颗粒体积。

浮力 $\mathbf{F}_B$: 连续相流体对颗粒的浮力, 大小为

$$\mathbf{F}_B = \rho g \mathbf{V}_p \quad (2-7)$$

虚拟质量力 $\mathbf{F}_{VM}$: 由于颗粒加速运动时周围流体的惯性作用产生的力, 表达式为:

$$\mathbf{F}_{VM} = \frac{\rho V_p}{2} \left(\frac{D\mathbf{u}}{Dt} - \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} \right) \quad (2-8)$$

压强梯度力 $\mathbf{F}_{PG}$: 由流场压强梯度引起的力, 表达式为:

$$\mathbf{F}_{PG} = m_p \frac{\rho}{\rho_p} (\nabla p) \quad (2-9)$$

其中 m_p 为颗粒质量。

2.3. 气溶胶喷射的离散相模型

湍流的速度场和压力场具有随机性和混沌性，在时间和空间上不断变化的。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，它可以更好地描述边界层中的湍流行为。其计算公式(2-10)和(2-11)所示：

对于 k 方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{u}) = \nabla \cdot ((\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k) - \rho \beta^* \omega k + P_k \quad (2-10)$$

其中， k 是湍动动能， 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。

对于 ω 方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \nabla \cdot (\rho \omega \mathbf{u}) = \nabla \cdot ((\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega) + \gamma \rho \frac{\omega}{k} \nabla \cdot \left(k \nabla \frac{\omega}{k} \right) - \rho \alpha_1 \omega \frac{k}{\max(C_\mu, \omega)} + \alpha_2 P_k \quad (2-11)$$

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. 建模与仿真

3.1. 几何建模

以气溶胶喷射系统为基础建立三维几何模型，如图 1 所示。模型包括气溶胶发生模块、载气入口、鞘气入口和喷射出口等部分。喷头内部结构如图 2 所示，喷头内径为 $250 \mu\text{m}$ ，载气孔和鞘气孔内径皆为喷头内径的 2 倍即 $500 \mu\text{m}$ 。

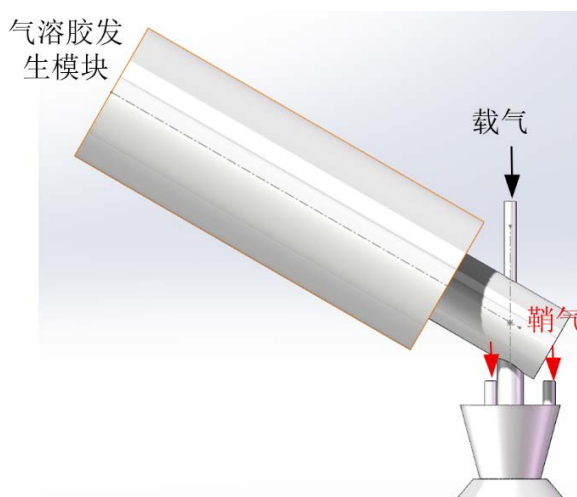


Figure 1. Geometric model of aerosol spray system
图 1. 气溶胶喷射系统几何模型

对以上几何模型进行网格划分,考虑到喷头内部流道结构复杂,对喷嘴区域进行局部网格加密,以提高计算精度。整体网格采用多面体网格(polyhedra)的方式,网格数量控制在 46,787 左右,最小正交质量为 0.37,满足计算要求,如图 3 所示。

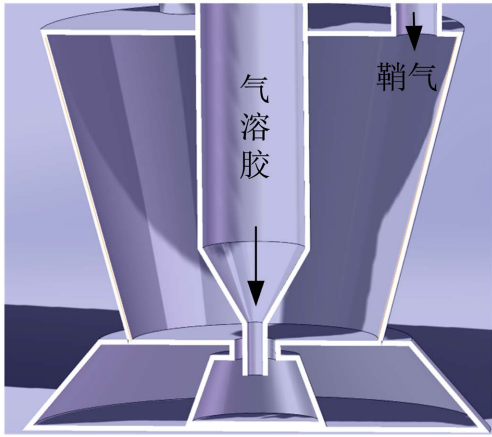


Figure 2. Aerosol nozzle structure
图 2. 气溶胶喷头结构

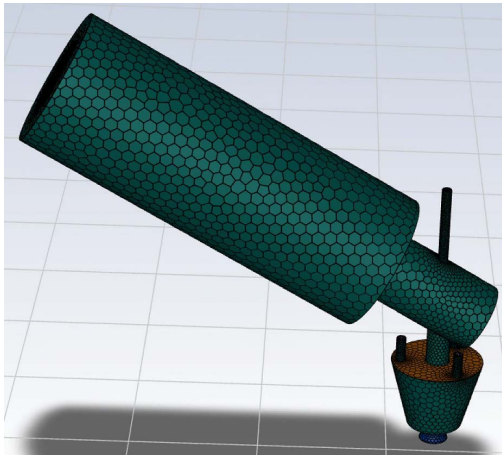


Figure 3. Aerosol jet mesh model
图 3. 气溶胶喷射网格模型

3.2. 求解设置

在仿真分析中,载气和鞘气为连续相,采用大气,其密度为(1.225 kg/m^3),动力黏度为($1.7894 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$)。雾化微滴看作离散颗粒作为离散相,其密度为 1000 kg/m^3 ,粒径范围为 $0.1\sim 10 \mu\text{m}$ 。

载气和鞘气入口均设为速度入口。喷射出口设为压力出口,静压为 0 Pa 。喷头内壁设为无滑移壁面,颗粒与壁面的作用方式为反射。边界条件如图 4 所示。

求解器采用压力和速度耦合的方法进行数值模拟,首先进行连续相流场的稳态计算,获得稳定的流场分布,然后引入离散相模型,进行瞬态计算,追踪颗粒的运动轨迹。

采用离散相模型,选择拉格朗日坐标系下的颗粒追踪方法,考虑颗粒与连续相的单向耦合作用,即连续相影响颗粒的运动,而颗粒对连续相的影响忽略不计。设置颗粒注入方式为面注入,从气溶胶入口均匀注入。

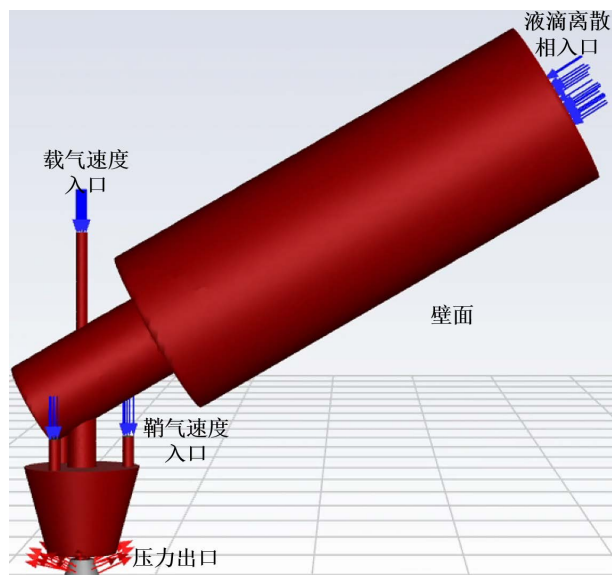


Figure 4. Calculate boundary conditions
图 4. 计算边界条件

4. 结果与分析

4.1. 颗粒运动轨迹分析

通过仿真获得离散相液滴在系统内的运动轨迹，如图 5 所示。墨水在雾化器的作用下逐渐喷入混合腔内，在载气作用下进入喷头。经过聚焦鞘气的压缩作用，形成较细的气溶胶流束，最终以较高的速度从喷嘴喷出。

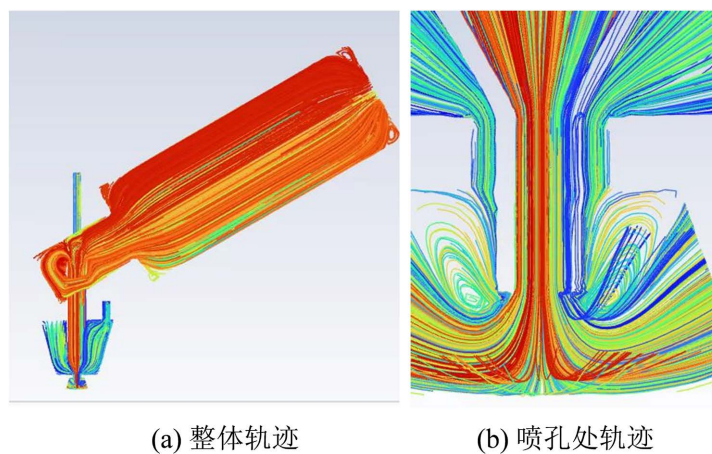


Figure 5. Aerosol particle motion trajectory diagram
图 5. 气溶胶颗粒运动轨迹图

4.2. 气溶胶射流压强与速度分布

在气溶胶喷孔出口，载气携带液滴从喷孔喷出时，喷孔截面积缩小时，压强逐渐减小(图 6(a))，但气溶胶喷射速度逐渐增加，在喷嘴出口处速度达到峰值。速度分布云图显示(图 6(b))，喷孔结构逐渐缩小以及中心流束的速度逐渐加大(图 6(c))，并形成稳定的高速核心区域，有助于提高喷射精度和沉积效率。

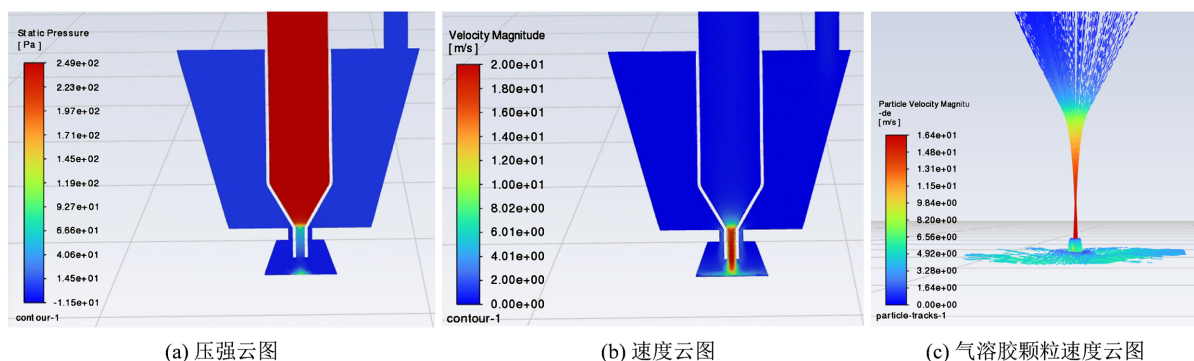


Figure 6. Aerosol jet simulation diagram
图 6. 气溶胶喷射模拟图

4.3. 载气对气溶胶喷射的影响

为了获得喷头设计的影响因素, 分别分析载气以及鞘气作用对气溶胶聚焦作用的影响。在鞘气速度为 0.5 m/s 时, 不同载气作用时气溶胶射流速度如图所示。当载气速度为 0.1 m/s 时(图 7(a)), 喷孔处气溶胶射流速度增加为 21.3 m/s, 射流直径略大于喷孔直径, 约为 1.2 倍孔径。当载气速度上升为 2 m/s 时(图 7(b)), 喷孔处气溶胶射流速度增加为 26.4 m/s, 射流直径与喷孔基本相当。当载气速度增加到 5 m/s 时(图 7(c)), 喷孔处气溶胶射流速度增加为 34.7 m/s, 射流直径有所增加, 约为 2 倍孔径。根据以上结果可知, 随着载气流速增加, 射流直径先直径减小到最小值, 然后逐渐增加。因此, 通过调节载气速度能有效改变气溶胶喷射速度与直径。

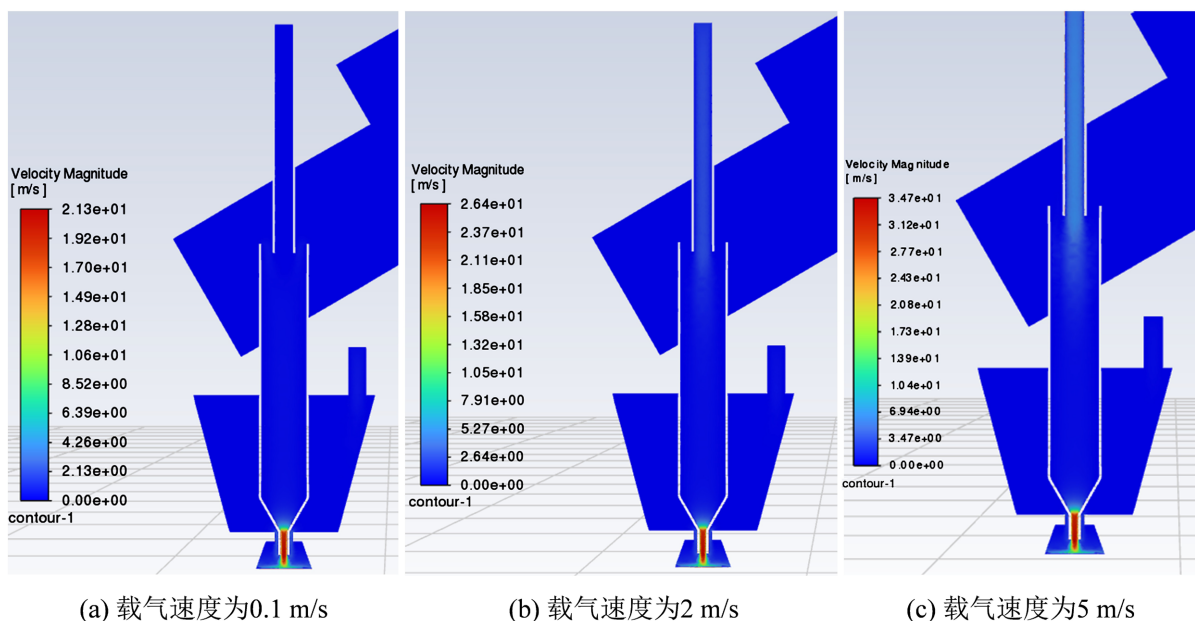


Figure 7. Cloud map of aerosol spray velocity at the nozzle
图 7. 喷孔处气溶胶喷射速度云图

4.4. 鞘气对气溶胶喷射的影响

为了获得鞘气作用对气溶胶喷射的影响, 在载气速度 v_c 为 0.5 m/s 时, 不同鞘气速度条件下, 气溶胶

的速度云图如图 8。当输入鞘气速度较低时 $v_q = 0.5 \text{ m/s}$ ，气溶胶射流直径大于喷孔直径，射流速度约为 20 m/s 。当鞘气速度逐渐增加时， $v_q = 2 \text{ m/s}$ 射流直径与喷孔直径基本相等，射流最大值从 20 m/s 增加到 23 m/s 。但当输入鞘气速度增加到 $v_q = 5 \text{ m/s}$ 时，射流速度最大值增加到 32.3 m/s ，射流直径约为喷孔直径的 $1/3$ 。由此可知，适当增加鞘气速度能有效降低气溶胶射流直径，提高打印精度。

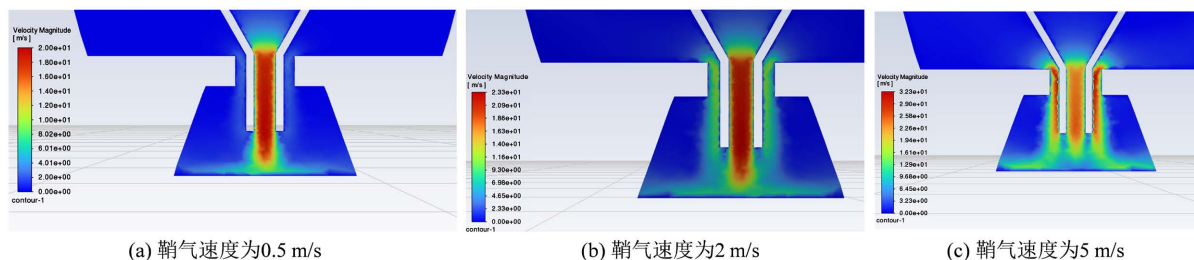


Figure 8. Cloud map of aerosol spray velocity at the nozzle

图 8. 喷孔处气溶胶喷射速度云图

5. 结论

本研究通过数值模拟方法探究了气溶胶直写(Aerosol Jet Writing)过程中的流体动力学行为。首先建立了气溶胶喷射系统的三维几何模型，并采用多面体网格进行划分。随后，利用计算流体动力学(CFD)方法，结合离散相模型(DPM)与标准 $k-\omega$ 湍流模型，对气溶胶颗粒在喷头内部及喷出后的运动轨迹、速度分布和流场压力进行了仿真分析。研究系统性地考察了载气速度和鞘气速度这两个关键工艺参数对气溶胶射流聚焦效果(即射流直径和速度)的影响。结果表明，载气与鞘气速度能够显著改变气溶胶喷射的速度与直径，适当增加鞘气速度能有效降低气溶胶射流直径，从而提高打印精度。研究揭示了气溶胶射流的内在运动规律和相互作用机制，为喷头结构优化和工艺参数调整提供理论依据。

基金项目

北京市教委科技计划项目(No. KM201710015002)。

参考文献

- [1] Wilkinson, N.J., Smith, M.A.A., Kay, R.W. and Harris, R.A. (2019) A Review of Aerosol Jet Printing—A Non-Traditional Hybrid Process for Micro-Manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **105**, 4599-4619. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03438-2>
- [2] Meredith, A., Beuting, M., Trujillo, M., Sanders, S. and Andrews, J. (2024) In-flight Imaging of Aerosol Jet Printer Droplets to Enable Spatially Resolved Flow Rate Measurements. *Flexible and Printed Electronics*, **9**, 015003. <https://doi.org/10.1088/2058-8585/ad1dbf>
- [3] Feng, J.Q. (2015) Sessile Drop Deformations under an Impinging Jet. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, **29**, 277-290. <https://doi.org/10.1007/s00162-015-0353-x>
- [4] 周健, 裴泽光. 同轴气流作用下压电驱动式微滴喷射行为的实验研究[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(2): 200-210.
- [5] Ma, T., Li, Y., Cheng, H., Niu, Y., Xiong, Z., Li, A., et al. (2024) Enhanced Aerosol-Jet Printing Using Annular Acoustic Field for High Resolution and Minimal Overspray. *Nature Communications*, **15**, Article No. 6317. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-50789-w>