

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.03.09

基于直写3D打印的 级配SiC陶瓷浆料颗粒分布研究

李 赛^{1,2}, 余仲航^{1,2}, 朱发文^{1,2}, 张 博^{1,2}, 陈铠东^{1,2}, 任全耀^{1,2}, 蒲曾坪^{1,2*}

1. 中国核动力研究设计院 核反应堆技术全国重点实验室, 四川 成都 610213

2. 核能增材制造四川省重点实验室, 四川 成都 610213

摘要: 将直写3D打印应用于SiC制备是突破SiC传统加工困难和应用受限的有效途径。在直写3D打印过程中,不同直径喷嘴会导致挤出丝内的SiC颗粒分布发生一定程度变化,这种改变会显著影响最终SiC试样的孔隙分布,继而导致后续致密化效果产生差异。本文研究了级配SiC颗粒在直写3D打印挤出过程中的分布规律,通过试验与数值模拟,对级配SiC浆料在挤出过程中的颗粒分布规律与作用机理展开研究和分析。结果表明:喷嘴中心区域的剪切速率变化是导致级配颗粒分布发生改变的主要原因,喷嘴直径为800 μm和1 mm时,喷嘴中心区域剪切速率变化率超过80%,此时粗颗粒所受曳力较大,可以有效抵消剪切速率变化率带来的影响,而细颗粒曳力相对较小,在剪切应力差的作用下朝挤出丝芯部聚拢;当喷嘴直径为500 μm和600 μm时,喷嘴中心区域的剪切速率变化率小于50%,剪切应力差减少,使得挤出丝中的SiC颗粒分布更为均匀。

关键词: 3D打印; 级配SiC; 颗粒分布; 陶瓷浆料

中图分类号: TH164 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)03-0067-06

Study on Particle Distribution of Graded SiC Ceramic Slurry based on Direct Ink Writing 3D Printing

LI Sai^{1,2}, SHE Zhonghang^{1,2}, ZHU Fawen^{1,2}, ZHANG Bo^{1,2}, CHEN Kaidong^{1,2}, REN Quanyao^{1,2}, PU Zengping^{1,2*}

1. Nuclear Power Institute of China, National Key Laboratory of Nuclear Reactor Technology, Chengdu 610213, China

2. Nuclear Power Additive Manufacturing Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610213, China

Abstract: Direct ink writing (DIW) 3D printing with its high design flexibility and rapid manufacturing capabilities, offers an effective way to overcome the difficulties and application limitations of traditional processing methods for SiC. During the DIW process, nozzles with different diameters can induce variations in the distribution of SiC particles within the extruded filaments. These variations significantly affect the pore distribution in the final SiC samples, thereby influencing the subsequent densification outcomes. This study investigates the distribution rule of graded SiC particles in direct ink writing 3D printing extrusion process through experiments and numerical simulations. The results indicate that the variation in shear rate at the nozzle's central region is the primary factor influencing the distribution of graded particles. When nozzle diameters are 800 μm and 1 mm, the shear rate variation in the central region exceeds 80%, and the drag force on coarse particles is sufficient to counteract the effects of shear rate variation. In contrast, for nozzle diameters of 500 μm and 600 μm, the shear rate variation in the central region is less than 50%, reducing the shear stress difference and resulting in a more uniform distribution of SiC particles in the extruded filaments.

Keywords: 3D printing; graded SiC; particle distribution; ceramic slurry

引用格式: 李赛, 余仲航, 朱发文, 等. 基于直写3D打印的级配SiC陶瓷浆料颗粒分布研究[J]. 电焊机, 2026, 56(3): 67-72.

收稿日期: 2026-01-18 修回日期: 2026-02-08

基金项目: 四川省自然科学基金(2025ZNSFSC1274); 中国核动力研究设计院青年人才基金项目(KJCX-2025-QR-04)

作者简介: 李 赛(1995—), 男, 博士, 工程师, 主要从事增材制造、核燃料组件设计研究。E-mail: lisai@npic.ac.cn。

通讯作者: 蒲曾坪, E-mail: puzengping@npic.ac.cn。

Citation: LI Sai, SHE Zhonghang, ZHU Fawen, et al. Study on Particle Distribution of Graded SiC Ceramic Slurry based on Direct Ink Writing 3D Printing[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(3): 67-72.

0 引言

碳化硅(SiC)陶瓷具有高比强度、高模量、耐高温、低密度等特点,在核能、航空航天、半导体等重要领域具有广泛的应用前景^[1-2]。随着应用领域的不断拓宽,SiC陶瓷的服役环境也愈发复杂、恶劣,对其综合性能提出了全新要求。然而,SiC自身高硬度、高强度的特点也使其成为一种难加工材料,采用传统的机械加工技术存在加工效率低、刀具磨损严重、加工过程难控制等问题^[3]。

近年来,3D打印技术的快速兴起为SiC的制造提供了新契机。3D打印避免了传统加工过程中加工刀具与SiC陶瓷之间的“硬碰硬”,且无需模具,降低了成形过程中对零件结构复杂程度的敏感性,可以满足不同结构零件的设计需求,加快SiC陶瓷零部件的设计制造迭代过程^[4-5]。按照ISO/ASTM 52900标准^[6],3D打印主要分为七类,其中直写3D打印是一种将浆料通过喷嘴选择性挤出的成形方法,具有工艺灵活、设备简单、打印材料普适性强的特点,是陶瓷材料领域中重要的3D打印方法之一。直写3D打印以具有特殊流变特性的陶瓷基浆料为原料,在环境温度下通过外力将陶瓷浆料通过喷嘴挤出,经逐层叠加后获得所设计的结构和形状^[7]。

目前,为了进一步提高陶瓷浆料的形状保真度和固相含量,避免后续脱脂烧结过程中出现收缩以及翘曲,可以在大粒径陶瓷颗粒的间隙中引入小粒径颗粒以形成级配陶瓷浆料。级配陶瓷浆料能够有效提高单位空间内陶瓷颗粒的占有率,提升陶瓷浆料的陶瓷固相含量。本文聚焦直写3D打印过程中喷嘴直径对级配SiC浆料颗粒分布的影响规律并对该过程进行数值模拟分析,以揭示浆料中SiC颗粒分布变化的作用机理,为后续致密化提供指导。

1 材料及试验方法

1.1 级配SiC浆料制备

使用中粒径为 $0.979\ \mu\text{m}$ 、 $10.39\ \mu\text{m}$ 、 $50.52\ \mu\text{m}$ 的

SiC粉末进行三级级配,三种粉末按照质量比 $0.145:0.22:0.635$ 称取得到级配SiC粉末^[8];随后以去离子水为溶剂,加入聚丙烯酸-聚乙烯亚胺流变调节剂并进行预搅拌,并使用行星式均质机(ZYMC-700VS深圳中毅科技有限公司)以 $2\ 500\ \text{r/min}$ 的转速脱气搅拌 $245\ \text{s}$,最后按照级配SiC粉末质量的3%加入40wt.%聚碳硅烷粘结剂,再经 $200\ \text{s}$ 脱气搅拌后制备得到级配SiC浆料。

1.2 直写3D打印

直写3D打印设备的挤出压力气源由数控空气压缩机提供,直写3D打印过程中使用的挤出压力为 $15\ \text{psi}$,打印速度为 $10\ \text{mm/s}$,在保证成形精度的前提下,为分析喷嘴直径对级配颗粒分布的影响,使用直径分别为 $1\ \text{mm}$ 、 $800\ \mu\text{m}$ 、 $600\ \mu\text{m}$ 和 $500\ \mu\text{m}$ 的四种喷嘴进行直写3D打印,将通过四种不同直径喷嘴获得的挤出丝简称为 $1\ \text{mm}$ 挤出丝, $800\ \mu\text{m}$ 挤出丝, $600\ \mu\text{m}$ 挤出丝和 $500\ \mu\text{m}$ 挤出丝。

1.3 试验表征

使用场发射扫描电子显微镜(GeminiSEM500, ZEISS, Germany)观察挤出丝截面;利用X射线成像仪(XRM, Xradia 610 Versa, ZEISS, Germany)分析挤出丝中的级配颗粒分布情况,设置的表征工作功率为 $10\ \text{W}$,扫描分辨率为 $800\ \text{nm}$ 。X射线扫描对象为 $500\ \mu\text{m}$ 挤出丝、 $600\ \mu\text{m}$ 挤出丝、 $800\ \mu\text{m}$ 挤出丝和 $1\ \text{mm}$ 挤出丝,挤出丝试样长度均为 $1.5\ \text{mm}$ 。

2 试验结果与分析

2.1 级配SiC浆料的颗粒分布对比

通过不同直径喷嘴获得的级配SiC浆料挤出丝截面的微观形貌如图1所示, $1\ \text{mm}$ 和 $800\ \mu\text{m}$ 挤出丝截面中心区域均含有更多的细颗粒,而位于挤出丝边缘位置的SiC颗粒则较粗。这种颗粒分布特征会导致挤出丝边缘因粗颗粒堆叠而存在更多的孔隙,芯部则因堆叠空间小而相对致密。此类分布特征并不利于后续的陶瓷致密化,在致密化过程中,先驱体反应物会优先渗入大孔隙,在外部逐渐形成致

密陶瓷,阻塞通往芯部的浸渗通道,导致芯部区域无法完全致密。相比之下,级配SiC颗粒在600 μm 、500 μm 挤出丝中的分布更为均匀,在芯部区域和边缘区域均存在粗、细颗粒,颗粒无明显分布差异。

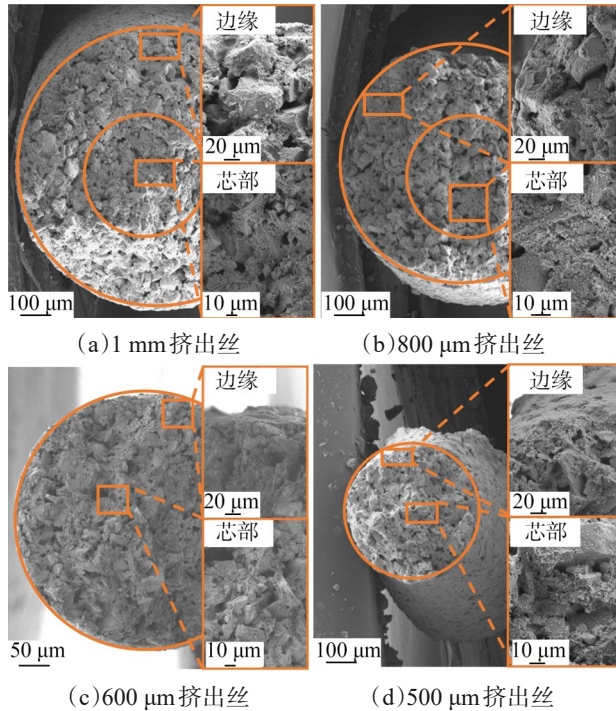


图1 挤出丝的微观形貌

Fig. 1 Microscopic morphology of extruded filaments

X射线显微图像更直观地展现了挤出丝中的颗粒分布情况,图2为挤出丝的XZ截面、YZ截面以及三维立体图像,浅灰色部分为SiC颗粒,深灰色部分为孔隙。与微观形貌中观察到的颗粒分布特征一致,在800 μm 和1 mm挤出丝的XRM图像中,细颗粒在整个挤出方向上均朝挤出丝中心区域聚集,几乎填充了挤出丝芯部的孔隙(深灰色区域明显较少),而挤出丝边缘则孔隙较多(深灰色区域多);在500 μm 和600 μm 挤出丝中,其XRM图像中的颗粒分布更为均匀,细颗粒朝芯部聚集的趋势明显较少(深、浅灰色区域无明显差异),表明在直写3D打印过程中,使用直径500 μm 和600 μm 的喷嘴可以有效减少细颗粒朝挤出丝芯部偏析,使挤出丝中的颗粒分布更均匀,有助于提高后续陶瓷致密化效果。

2.2 级配SiC浆料挤出过程数值模拟

为进一步研究和分析观察到的级配SiC颗粒规律,对级配SiC浆料的挤出过程进行数值模拟。陶

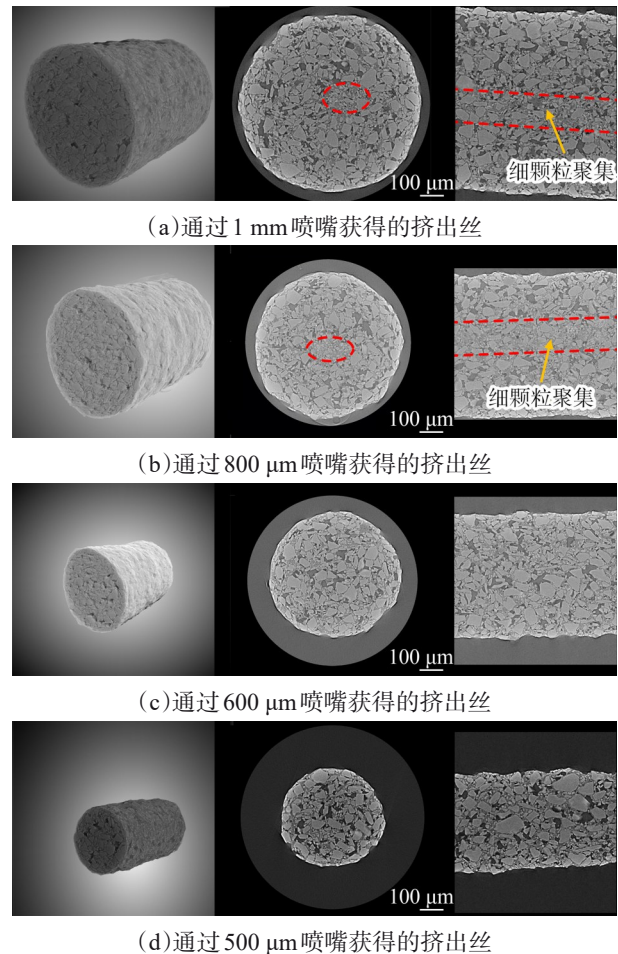


图2 不同喷嘴直径下挤出丝的XRM图像

Fig. 2 XRM images of extruded filaments under different nozzle diameters

瓷固相含量高、颗粒粒径小是级配SiC浆料的两大特点,因此在数值模拟的过程中要充分考虑下列条件:(1)微米级粒径条件下,颗粒与颗粒之间的高概率碰撞(固-固耦合);(2)连续相液体对颗粒的影响(液-固耦合)以及颗粒与喷嘴壁之间的碰撞。此外,级配SiC浆料是一种由三种粒径粉末组成的宽粒径分布体系,因此在数值模拟过程中还需考虑粒径特征。本文采用基于离散颗粒动力学的稠密离散相模型(Dense Discrete Phase Model, DDPM)对挤出过程进行模型分析,DDPM在欧拉-拉格朗日框架下可以实现针对高固相级配SiC浆料挤出过程的快速计算^[9-10]。

在数值模拟过程中,使用的几何模型尺寸与喷嘴实际大小一致,同时建立轴对称二维平面喷嘴几何网格以减少计算量,几何模型和计算域如图3所

示。计算域包括喷嘴计算域和挤出丝自由面,分别用于获取级配SiC浆料在喷嘴内部和挤出丝中的颗粒分布。采用四边行划分法对网格进行划分,网格平均特征尺寸为0.01 mm,模拟时间步长为 10^{-3} s,模拟时间为10 s,颗粒追踪时间步长与流动时间步长一致。设置喷嘴的上边界为速度入口,下边界为压力出口,SiC颗粒以面源垂直入口的方式注入,密度为 $3\ 200\text{ kg/m}^3$,入射速度为10 mm/s。

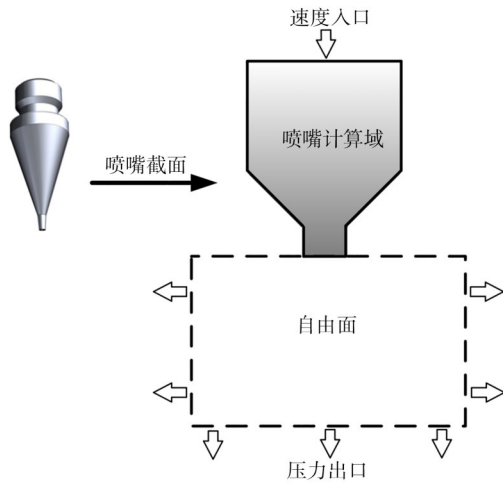


图3 喷嘴和挤出丝的计算域

Fig. 3 Computational domain of the nozzle and extruded filament

对于颗粒相,颗粒与喷嘴壁的边界条件采用反射类型,即颗粒接触喷嘴壁后反弹回计算区域;出口的边界条件类型设置为逃脱类型,颗粒一旦逃脱该边界,其轨迹计算停止。颗粒相的运动轨迹更新计算需要及时的流场信息输入,为能够给大规模颗粒群计算提供快速可靠的流场数据,保证模型收敛,本模型将连续相简化,连续相采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,设置连续相每迭代100步,颗粒相更新一次位置信息;该简化在确保流-固耦合基本物理过程的前提下,可显著提升大规模颗粒模拟过程的稳定性。

表1 边界条件基本设定

Table1 Boundary conditions basic setup

位置	边界类型	速度值/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	表压值/Pa
上边界	速度入口	10	无
下边界	压力出口	无	0

本文所用级配SiC颗粒的粒径分布由F-D最密堆积方程计算得到^[8],在数值模拟过程中需要考虑这一粒径特征。在ANSYS Fluent中,使用双参数Rosin-Rammler分布函数建立DDPM模型中的颗粒

粒径分布特征。Rosin-Rammler分布函数是在颗粒粒径与颗粒质量分数间建立的一种指数经验公式:

$$Y_d = e^{-(d/\bar{d})^{n'}} \quad (1)$$

式中 d 为颗粒粒径, Y_d 为粒径大于 d 的颗粒的质量分数, \bar{d} 为颗粒平均粒径, n' 为粒径分布指数。F-D最密堆积方程计算拟合得到的级配颗粒粒径为连续分布,其粒径范围为 $0.241\ 5\sim 198.35\ \mu\text{m}$ 。为了将该粒径特征通过Rosin-Rammler分布函数表达,在 $0.2415\sim 198.35\ \mu\text{m}$ 内平均选取25个数据点与Rosin-Rammler分布函数进行拟合。图4为F-D最密堆积方程粒径数据与Rosin-Rammler分布的拟合曲线,最终得到平均粒径 \bar{d} 和分布指数 n' 分别为53.985和0.8222。

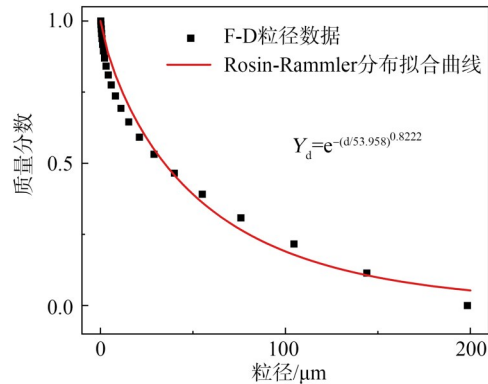


图4 Rosin-Rammler分布拟合曲线

Fig. 3 Rosin-Rammler distribution fitting curve

在数值模拟的颗粒分布云图中,红色点为粗颗粒,蓝色点为细颗粒。结合颗粒分布云图,可以定性分析级配颗粒在挤出丝中的分布情况。数值模拟结果中的颗粒分布与扫描电镜中观察到的结果基本一致,在大直径喷嘴(1 mm和 $800\ \mu\text{m}$)的颗粒分布云图中,观察到明显的颗粒分布不均匀现象,细颗粒聚集于挤出丝芯部,即挤出丝中心位置以蓝色细线为主;挤出丝边缘则分布大量的粗颗粒,表现为红色云图。此外,1 mm挤出丝相较于 $800\ \mu\text{m}$ 挤出丝在喷嘴出口处出现了更为明显的滞胀现象。在 $600\ \mu\text{m}$ 和 $500\ \mu\text{m}$ 挤出丝的颗粒分布云图中,芯部主要呈现为绿色的中粒径颗粒,无细颗粒朝芯部区域聚集的极端情况,数值模拟结果与挤出丝微观形貌特征基本一致。

2.3 级配SiC颗粒分布变化机理分析

为了进一步研究挤出过程中,喷嘴直径与级配

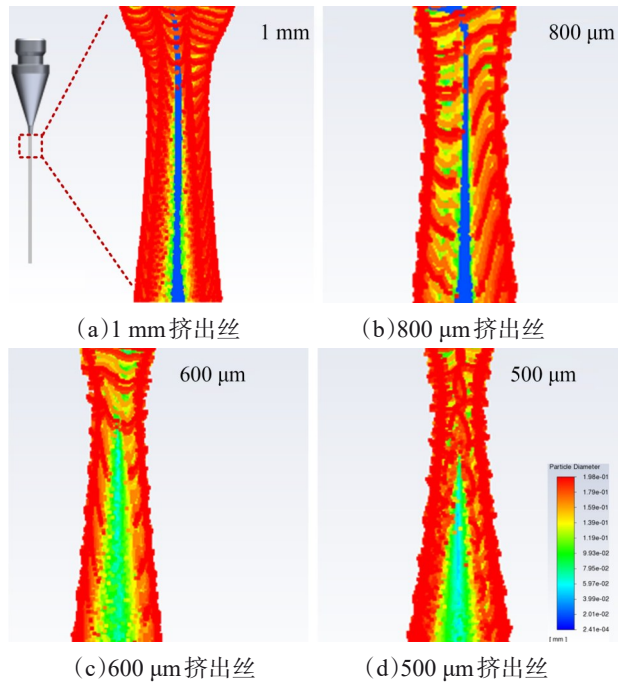


图 5 颗粒分布数值模拟云图

Fig. 5 Particle distribution numerical simulation contour map

SiC 颗粒分布之间的关系,使用 CFD-post 获取了不同直径喷嘴中的剪切速率分布情况,以探究颗粒分布从挤出丝边缘至芯部的变化机理。本文所涉及的级配 SiC 浆料均为非牛顿流体,其所受剪切应力与剪切速率呈非线性相关。浆料在喷嘴壁处所受的剪切速率最大,且沿半径朝中心逐渐减小,如图 6 所示。图 6b 为不同喷嘴直径下,剪切速率在不同直径喷嘴中的变化曲线。可以看出,喷嘴直径越小,其边缘处的剪切速率越大。在 500 μm 喷嘴中,浆料在喷嘴壁处的剪切速率为 179 s⁻¹;而 1 mm 喷嘴中,浆料在喷嘴壁处的剪切速率则为 61 s⁻¹。在 500 μm 和 600 μm 喷嘴中,浆料在近喷嘴壁区域(-R 至 -2R/3 和 2R/3 至 R)的剪切速率急剧下降,在近喷嘴壁区 1R/3 的距离内,500 μm 喷嘴的剪切速率从 179 s⁻¹ 下降至 30 s⁻¹,而 600 μm 喷嘴的剪切速率从 93 s⁻¹ 下降至 22 s⁻¹。剪切速率变化是导致颗粒分布发生改变的根本原因,为了更好的描述剪切速率变化的程度,对剪切速率变化率进行描述:

$$\delta = \frac{\dot{\gamma}_1 - \dot{\gamma}_2}{\dot{\gamma}_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中 $\dot{\gamma}_1$ 为初始的剪切速率, $\dot{\gamma}_1 - \dot{\gamma}_2$ 为剪切速率的变化量。在中心区域(-2R/3 至 2R/3)剪切速率的变化

明显放缓,500 μm 喷嘴的剪切速率从 30 s⁻¹ 下降至 20 s⁻¹,600 μm 喷嘴的剪切速率从 22 s⁻¹ 下降至 11 s⁻¹,500 μm 和 600 μm 喷嘴中心区域的剪切速率变化率分别为 33% 和 50%。800 μm 喷嘴和 1 mm 喷嘴边缘处的剪切速率相对较小,浆料在 800 μm 喷嘴边缘处的剪切速率为 84 s⁻¹,1 mm 喷嘴边缘处的剪切速率为 61 s⁻¹;在中心区域的剪切速率变化较快,800 μm 喷嘴的剪切速率从 22 s⁻¹ 下降至 4 s⁻¹,1 mm 喷嘴的剪切速率从 16 s⁻¹ 下降至 2 s⁻¹;800 μm 和 1 mm 喷嘴在中心区域剪切速率变化率分别为 82%、87.5%。即,500 μm 和 600 μm 喷嘴边缘处的剪切速率虽然较大,但是其迅速降低,在进入喷嘴中心区域后剪切速率变化率反而更小;而 800 μm 和 1 mm 喷嘴边缘处的剪切速率虽然偏小,但是其进入中心区域后,剪切速率变化率反而更大。

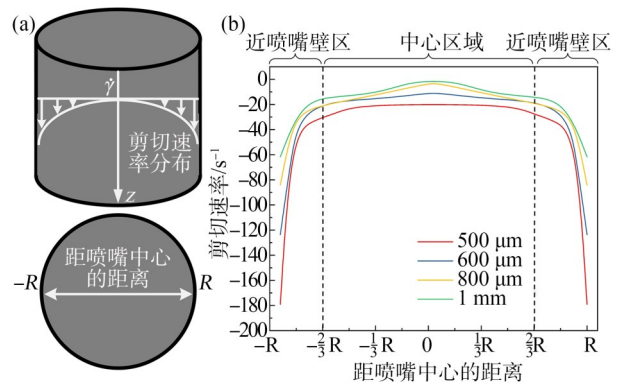


图 6 不同喷嘴直径下的剪切速率分布

Fig. 6 Shear rate distribution under different nozzle diameters

SiC 颗粒在挤出过程中的受力情况可以通过颗粒曳力公式进行描述^[11]:

$$F_{\text{drag}} = C_D 6\pi v_m R_p U \quad (3)$$

式中 C_D 为曳力系数; v_m 为颗粒中心的速度; R_p 为颗粒半径; U 为颗粒速度。在 800 μm 和 1 mm 喷嘴中,由于喷嘴中心区域剪切速率变化率过高,级配 SiC 颗粒在挤出过程中受到更为明显的剪切应力差影响。根据式(3),颗粒半径越大,曳力作用更明显,能够有效抵抗剪切应力差;但细颗粒半径有限,曳力小,易受剪切应力差的作用,因此朝挤出丝中间聚拢,最终呈现为颗粒分布不均匀。而 500 μm、600 μm 喷嘴中,中心区域的剪切速率变化率小, SiC 颗粒受到的剪切应力作用更为均匀,因此级配 SiC 颗粒在 500 μm、600 μm 喷嘴中的分布无明显改变。

3 结论

以三级级配 SiC 浆料为研究对象,系统分析了直写 3D 打印过程中喷嘴直径与挤出丝中 SiC 颗粒分布之间的关系,并结合稠密离散相模型(DDPM)开展数值模拟,同时从剪切速率演化与颗粒受力角度揭示了颗粒分布的调控机理,在挤出压力为 15 psi、打印速度为 10 mm/s 的工艺参数下,得到以下结论:

(1)使用 800 μm 和 1 mm 直径喷嘴时,挤出丝中颗粒分布发生改变,细颗粒朝挤出丝芯部区域聚集;使用 500 μm 和 600 μm 直径喷嘴时,挤出丝中颗粒分布更为均匀。

(2)当喷嘴直径为 800 μm 和 1 mm 时,喷嘴中心区域剪切速率变化率分别为 87.5% 和 82%,粗颗粒所受曳力较大,可以有效抵消剪切速率变化率带来的影响;而细颗粒曳力相对较小,在剪切应力场差的作用下朝挤出丝芯部聚拢。

(3)当喷嘴直径为 500 μm 和 600 μm 时,喷嘴中心区域剪切速率变化率小于 50%,剪切应力差减少,使得挤出丝中的 SiC 颗粒分布更为均匀。后续可进行更为详细的动力学分析,建立级配颗粒的高保真数值模拟分析模型,获取考虑粉体分形特征的曳力系数表达式,系统分析曳力、剪切应力、颗粒移动趋势之间的关系,进一步详细阐明颗粒不均匀分布机理。

参考文献:

- [1] 姜永亮,冻瑞岚,李阳,等. 陶瓷基复合材料增材制造工艺研究进展[J/OL]. 中国机械工程, 2026: 1-24 [2026-01-18]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1294.TH.20260104.1105.002>.
JIANG Y L, DONG R L, LI Y, et al. Research progress on additive manufacturing processes for ceramic matrix composites [J/OL]. China Mechanical Engineering, 2026, 1-24 [2026-01-18]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1294.TH.20260104.1105.002>.
- [2] 石浩江,李权,孙永铎,等. SiC_f/SiC 复合材料在核能领域应用设计的历史回顾、挑战及发展[J]. 复合材料学报, 2025, 42(11): 6130-6151.
SHI H J, LI Q, SUN Y D, et al. Historical review, challenges and development of SiC_f/SiC composite for nuclear applications [J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2025, 42(11): 6130-6151.
- [3] 陈张伟,屈飘,季泽宇. 增材制造 SiC 基陶瓷及其强韧化研究进展[J]. 航空制造技术, 2025, 68(08): 26-43.
CHEN Z W, QU P, JI Z Y. Research Progress on Additive Manufacturing for SiC-Based Ceramics and Its Strengthening and Toughening [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(08): 26-43.
- [4] 殷杰,耿佳毅,王康龙,等. SiC 陶瓷的 3D 打印成形与致密化新进展[J]. 无机材料学报, 2025, 40(03): 245-255.
YIN J, GENG J Y, WANG K L, et al. Recent Advances in 3D Printing and Densification of SiC Ceramics [J]. Journal of Inorganic Materials, 2025, 40(03): 245-255.
- [5] 杨勇,郭啸天,唐杰,等. 非氧化物陶瓷光固化增材制造研究进展及展望[J]. 无机材料学报, 2022, 37(03): 267-277.
YANG Y, GUO X T, TANG J, et al. Research Progress and Prospects of Non-oxide Ceramic in Stereolithography Additive Manufacturing [J]. Journal of Inorganic Materials, 2022, 37(03): 267-277.
- [6] ISO/ASTM 52900-2021, Additive manufacturing - General principles - Fundamentals and vocabulary[S].
- [7] Rau D A, Williams C B, Bortner M J. Rheology and printability: A survey of critical relationships for direct ink write materials design[J]. Progress in Materials Science, 2023, 140: 101188.
- [8] Li S, Lu Z, Zhang H, et al. Rheological behavior of multi-sized SiC inks containing polyelectrolyte complexes specifically for direct ink writing[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2022, 42(12): 4810-4816.
- [9] Wei P R, Cipriani C, Hsieh C M, et al. Go with the flow: Rheological requirements for direct ink write printability [J]. Journal of Applied Physics, 2023, 134(10): 100701.
- [10] Thakur A K, Kumar R, Banerjee N, et al. Hydrodynamic modeling of liquid-solid flow in polyolefin slurry reactors using CFD techniques-A critical analysis[J]. Powder Technology, 2022, 405: 117544.
- [11] Goh G L, Agarwala S, Yeong W Y. Directed and on-demand alignment of carbon nanotube: A review toward 3D Printing of Electronics [J]. Advanced Materials Interfaces, 2019, 6(4): 1801318.