粗颗粒 SiC 浆料流变性能及其直写成型①

徐麒凯[1], 刘子瑞[1], 周红莉[2], 王日初[1], 彭超群[1], 王小锋[1]
(1.中南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410083; 2.漳州台商投资区质量计量检验检测所, 福建 漳州 363107)

摘 要: 为了促进直写成型技术在 SiC 陶瓷成型领域的应用,以粗颗粒 SiC 粉体(D_{50} = 44 μm)为原料,系统研究分散剂、浆料 pH 值、固相体积分数及增稠剂对浆料流变性能的调控规律,制备出高固相体积分数直写成型浆料。依托有限元仿真完成打印参数优化,并借助线性流体跨距测试定量评价浆料可打印性能。结果表明,在 pH = 10~11 条件下,加入质量分数 1.4%的分散剂聚丙烯酸能显著降低浆料的黏度,浆料固相体积分数最高可达 55%;加入质量分数 0.05%的增稠剂甲基纤维素能有效提升浆料自身结构强度,打印综合性能优;采用 1.2 mm 喷嘴,打印最大跨距控制在 6.3 mm 以内,可成型无坍塌、结构完整的三维点阵陶瓷坯体。

关键词: 增材制造; 碳化硅; 陶瓷; 直写成型; 流变性能; 分散剂; 增稠剂; 有限元模拟; pH 值
中图分类号: TQ174;TB302 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.040
文章编号: 0253-6099(2026)04-0260-07

Rheological Properties of Coarse-Grained SiC Slurry and Direct Ink Writing

XU Qikai[1], LIU Zirui[1], ZHOU Hongli[2], WANG Richu[1], PENG Chaoqun[1], WANG Xiaofeng[1]
(1.*School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan, China*; 2.*Zhangzhou Taiwanese Investment Zone Quality and Metrology Inspection and Testing Institute, Zhangzhou* 363107, *Fujian, China*)

Abstract: To advance the application of direct ink writing (DIW) in SiC ceramic manufacturing, with coarse-grained SiC powder (D_{50} = 44 μm) as raw material, the regulation rules of dispersant, slurry pH value, solid volume fraction and thickener on the rheological properties of slurry were systematically investigated, and high-solid-content slurry suitable for DIW was prepared. The printing parameters were then optimized based on finite element simulation, and the printability of the slurry was quantitatively evaluated via linear fluid span test. The results show that with pH of 10-11, an addition of 1.4% polyacrylic acid (PAA) dispersant can greatly reduce slurry viscosity, and lead to the maximum solid volume fraction of the slurry up to 55%. While an addition of 0.05% methylcellulose (MC) thickener can effectively improve the structural strength of the slurry, bringing in optimal comprehensive printing performance. By adopting a 1.2 mm nozzle with the maximum printing span controlled within 6.3 mm, an intact three-dimensional lattice ceramic green body can be fabricated without collapse.

Key words: additive manufacturing; SiC; ceramic; direct ink writing (DIW); rheological property; dispersant; thickener; finite element simulation; pH value

碳化硅(SiC)陶瓷具有高硬度、高耐磨性、高导热性和优异的抗氧化性能,广泛应用于航空航天、核能和高温结构材料等领域[1-2]。然而,SiC 陶瓷的传统制备方式(如无压烧结[3]、热等静压成型[4]、注射成型[5]等技术)均存在成型设备昂贵、制件结构受限、批量制备成本高等问题,限制了其在定制化与复杂部件方向的发展。直写成型(direct ink writing,DIW)技术作为一种新兴增材制造技术,为复杂结构 SiC 陶瓷制备提供了全新解决方案[6-7]。该技术通过逐层堆叠具有特定流变性能的浆料,直接成型复杂三维结构[8],浆料流变性能是决定其成型质量的关键因素。

现有研究主要关注亚微米和纳米级的细颗粒 SiC

① **收稿日期**: 2026-01-20
作者简介: 徐麒凯(2001—),男,浙江杭州人,硕士研究生,主要研究方向为增材制造直写成型技术。E-mail:13467516329@163.com
通信作者: 王小锋(1980—),男,湖北天门人,博士,教授,主要研究方向为增材制造和金属基复合材料。E-mail:wangxiaofeng@csu.edu.cn

粉末[9-10]，通过高比表面积颗粒提高烧结致密性，但细颗粒粉体易发生团聚，浆料黏度高，不利于 DIW 可打印窗口的拓展，所制备浆料的固含量较低；同时细颗粒粉体价格高，导致 SiC 陶瓷的 DIW 综合制造成本高。迄今为止，研究者对粗颗粒体系 DIW 研究较少，缺乏可用于工艺优化的指导模型。基于上述背景，本文以粒径 44 μm 粗颗粒 SiC 粉体为研究对象，系统探究分散剂、pH 值、固相体积分数与增稠剂对 SiC 浆料流变性能的影响规律，获得适配直写成型的高固含量 SiC 浆料配方；同时结合有限元模拟优化挤出工艺条件与参数，通过三角形结构测试表征线性流体的跨越能力，最终实现粗颗粒 SiC 浆料的直写成型，为低成本复杂结构 SiC 陶瓷制备提供新的思路。

1　实验材料和方法

1.1　实验材料

实验原料为粗颗粒 SiC 粉末（D_{50} = 44 μm，潍坊凯华碳化硅微粉有限公司）。分散剂包括聚乙二醇（PEG，分子量分别为 10 000、6 000 和 1 000，国药集团化学试剂有限公司）、聚丙烯酸（PAA，上海阿拉丁生化科技股份有限公司）、聚乙烯亚胺（PEI，上海泰坦化学股份有限公司）、聚乙烯吡咯烷酮（PVP，上海麦克林生化科技有限公司）、四甲基氢氧化铵（TMAH，上海麦克林生化科技有限公司）。增稠剂为甲基纤维素（MC，分子量 100 000）。所有试剂均为分析纯。

1.2　SiC 浆料的配制

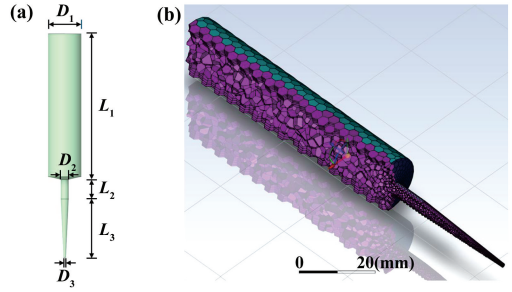
首先将分散剂与去离子水按一定比例混合均匀，然后加入 NaOH 调节溶液 pH 值，接着按照目标固相体积分数取定量的 SiC 粉末加入溶液中，将所得预混液放入行星搅拌仪中以 1 500 r/min 混合 6 min，重复进行 5 次，并在每次搅拌的中间加入去离子水以补充蒸发的水。最后加入增稠剂 MC 调节浆料的黏弹性。

1.3　直写成型及后处理

直写成型设备为美国 Hyrel 3D 公司的 System 30M 打印机。打印前将配制好的浆料装入 30 mL 塑料注射器中，通过活塞挤出方式，从喷嘴中挤出浆料并固化，形成 SiC 坯体。为了防止坯体开裂，直写成型坯体先置于室温下缓慢干燥 24 h，后置于 80 ℃烘箱内干燥 24 h。

1.4　有限元分析

采用有限元分析软件 Ansys Fluent 模拟 SiC 浆料在注射器和喷嘴中的流动。注射器和喷嘴的几何模型及网格划分如图 1 所示。L_1、L_2、L_3 的设置与喷嘴的实际尺寸相匹配，分别为 75 mm、10 mm 和 30 mm。注射器入口和出口的直径分别为 17.5 mm 和 4 mm。喷嘴的出口直径分别为 0.4、0.8、1.2 和 1.5 mm。采用 Fluent 软件自带的 Fluent Meshing 生成非结构化网格，通过测量偏斜度来确保这些网格的质量，网格总数为 170 601 个。流域由分布均匀的 SiC 浆料填充，入口定义为速度入口，出口是无压力出口，边界为无滑移条件。浆料流动受 Navier-Stokes 方程控制。



（a）注射器和喷嘴的几何模型；（b）网格示意图

图 1　注射器和喷嘴的几何模型及网格划分

Fig. 1　Geometric model and meshing of syringe and nozzle

1.5　性能表征

通过沉降实验评估不同分散剂条件下浆料稳定性，将固相体积分数为 2% 的不同浆料置于 10 mL 量筒中密封静置，每隔 10 min 记录悬浮液高度变化；采用旋转流变仪（AR2000EX，TA，美国）测量室温条件下 SiC 浆料的流变性能；在 Hyrel 打印机上测量跨越性能测试中的点高；采用场发射扫描电镜（SEM，Quanta-200，美国）观察 SiC 颗粒及样品的微观形貌，结合 KH-7700 三维数字显微镜获取的三维结构局部放大图像对界面结合状况进行分析。

2　实验结果与讨论

2.1　浆料配方设计及其流变性能

2.1.1　分散剂对 SiC 浆料流变性能的影响

水中 SiC 颗粒的分散是分散与絮凝维持平衡的过程。范德华力的存在使得 SiC 颗粒相互吸引而聚集，产生絮凝[11]。分散剂吸附在 SiC 颗粒表面，使得表面带相同电荷而互相排斥，起到分散颗粒的作用，保持体系的稳定[12-14]。分散剂的选择直接关系到 SiC 浆料的稳定性。本文通过 8 种不同分散剂的沉降实验，探究分散剂对粗颗粒 SiC 的分散效果。分散剂加入量（质量分数，下同）1% 时，分散剂种类对 SiC 浆料沉降性能的影响如图 2 所示。由于 SiC 颗粒较粗，各组分散剂的分散效果均欠佳，浆料沉降速度较快（小于 1 h）。在所有分散剂中，PAA 对浆料的分散作用相对较优，故本文选用 PAA 作为分散剂。

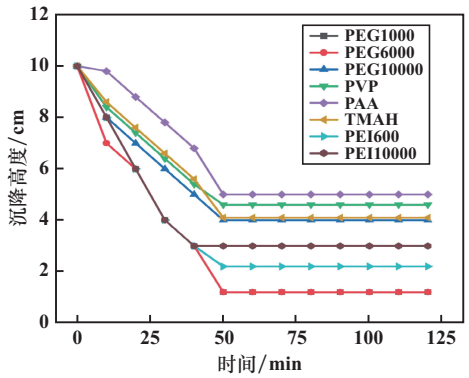
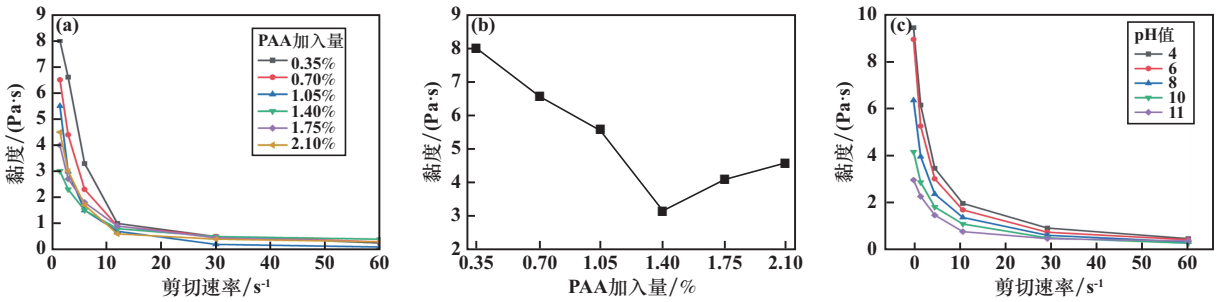


图 2 分散剂种类对 SiC 浆料沉降性能的影响

Fig. 2 Effect of dispersant type on sedimentation performance of SiC slurry

以 PAA 为分散剂,SiC 浆料固相体积分数 20%,分散剂 PAA 加入量与 pH 值对浆料流变性能的影响见图3。由图3(a)可知,所有浆料均呈现典型的剪切变稀特性。由图 3(b)可知,在低剪切速率(1 s^{-1})下,随着 PAA 加入量增加,浆料黏度表现为先减少后增加的趋势。这是因为 PAA 为离子型分散剂,当 PAA 加入量较少时,其在颗粒上的吸附较少,导致颗粒表面电荷不同,产生相互吸引,发生絮凝[15];而 PAA 加入量过多时,其在颗粒上的吸附也较多,颗粒带电量大,颗粒表面双电层厚度降低,静电排斥效应减弱,分散效果较差[16]。PAA 加入量为 1.4%时,SiC 浆料黏度最低,因此较优的分散剂 PAA 加入量为 1.4%。pH 值影响离子型分散剂的解离,并会影响其对 SiC 颗粒的吸附效果,进而改变颗粒间的平衡状态,影响浆料中颗粒的分散效果[17]。由图 3(c)可知,在低剪切速率下,浆料黏度随着 pH 值增大而逐渐减少。pH 值较小时,PAA 难以解离,其在颗粒上的吸附量较少,分散效果欠佳;而 pH≥10 后,PAA 解离度较大,其在 SiC 颗粒上的吸附量较多,因此使用 PAA 作为分散剂时,应调节 pH 值为 10~11。



(a) 不同 PAA 加入量下剪切速率与黏度的关系;(b) 低剪切速率下 PAA 加入量对黏度的影响;(c) 不同 pH 值下剪切速率与黏度的关系

图 3 分散剂 PAA 加入量与 pH 值对浆料流变性能的影响

Fig. 3 Effects of dispersant dosage and pH on rheological properties of slurry

2.1.2 固相体积分数对 SiC 浆料流变性能的影响

直写成型样品在打印完成后会产生体积收缩[11]。为了减少直写成型样品在打印后的体积收缩并提升其尺寸精度和机械强度,需要制备具有高固相体积分数的浆料。实验中发现,PAA 加入量为 1.4%、pH 值控制在 10~11 时,SiC 浆料的最大固相体积分数可达到 55%。

不同固相体积分数下剪切速率与黏度的关系见图 4。在低剪切速率条件下,浆料黏度随固相体积分数增加呈现先上升后下降的变化规律:固相体积分数从 35%增加至 50%时,浆料黏度从 18 Pa·s 提高到了 136 Pa·s;而固相体积分数继续增加至 55%,浆料的黏度反而降至 103 Pa·s。这是由于较大的颗粒间距阻碍了紧密堆积结构的形成,体系内自由流动液体相对不足,导致黏度持续上升;而当固相体积分数超过临界值后,颗粒开始形成更紧密的排列,自由流动液体比例回升,从而引起黏度下降。

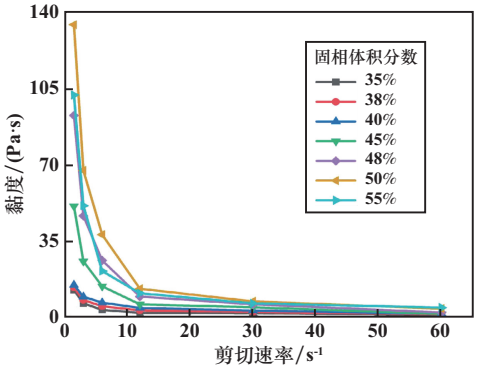


图 4 不同固相体积分数下剪切速率与黏度的关系

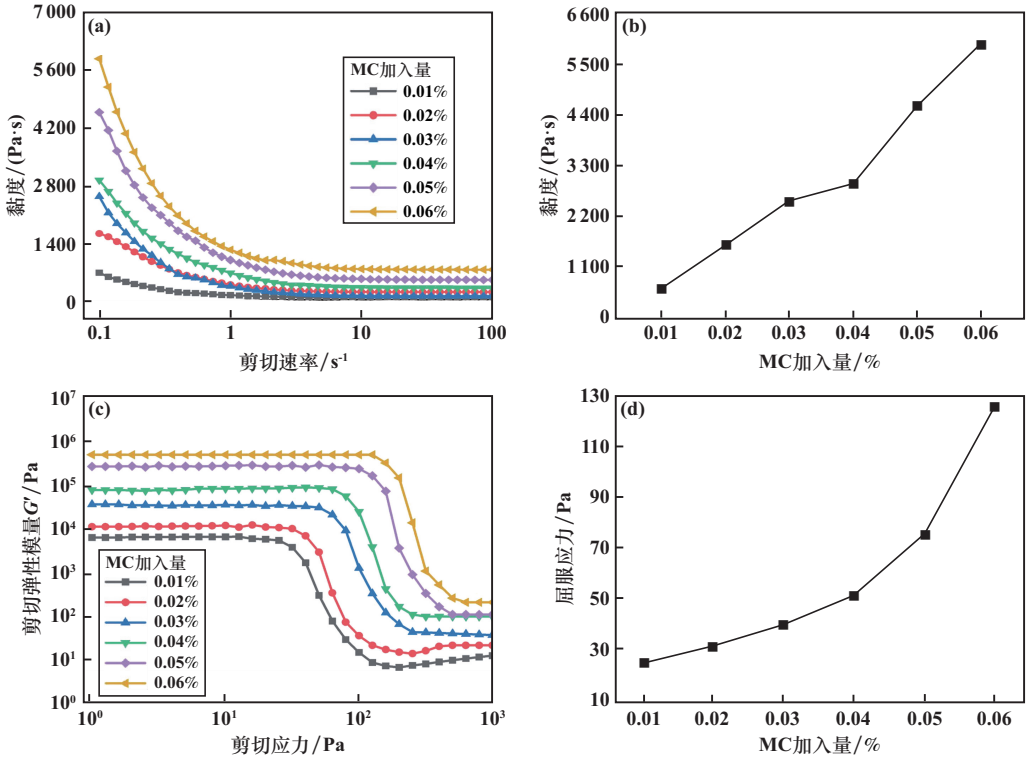
Fig. 4 Relationship between shear rate and viscosity under different solid volume fractions

2.1.3 增稠剂 MC 对 SiC 浆料流变性能的影响

为了确保直写成型过程中挤出的线性流体保持自身形状稳定性,直写成型用浆料在低剪切速率下应具

有较高的剪切弹性模量[8]。MC 是一种非离子纤维素醚，能有效改善浆料的流变性能。其分子通过氢键作用构建三维网络结构，既可限制浆料中颗粒的运动，又能提高体系黏度[18]，故选用 MC 作为增稠剂，以提高浆料在低剪切速率下的剪切弹性模量。

PAA 加入量 1.4%、pH 值 10～11、固相体积分数 55%，MC 加入量（质量分数，下同）对 SiC 浆料流变性能的影响见图 5。从图 5（a）可见，加入 MC 后所有浆料均表现出剪切变稀特性。从图 5（b）可见，低剪切速率（1 s^{-1}）下，随着 MC 加入量增加，浆料黏度逐渐上升，当 MC 加入量达到 0.06%时，浆料黏度约为 6 000 Pa·s。由图 5（c）可见，在低剪切速率下，浆料剪切弹性模量随着 MC 加入量增大而提高，表明添加 MC 能够增强浆料保持形状的能力。图 5（d）表明，随着 MC 加入量增加，浆料屈服应力呈逐步上升趋势。为了保证浆料在低剪切速率下具有足够的剪切弹性模量，并能顺利从针孔中挤出，浆料的屈服应力不宜过高。因此，选择 MC 加入量为 0.05%。



（a）不同 MC 加入量下剪切速率与黏度的关系；（b）低剪切速率下 MC 加入量与黏度的关系；
（c）不同 MC 加入量下剪切应力与剪切弹性模量的关系；（d）MC 加入量对 SiC 浆料屈服应力的影响

图 5　MC 加入量对 SiC 浆料流变性能的影响

Fig. 5　Effect of MC dosage on rheological properties of SiC slurry

2.2　直写成型工艺与结构表征

2.2.1　直写成型工艺参数的有限元分析

黏度是求解 Navier-Stokes 方程组的参数之一，浆料黏度 η 可由式（1）表示：

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \tag{1}$$

所测得的浆料黏度数据可用 Herschel-Bulkley 模型进行拟合：

$$\tau = \tau_0 + k\gamma^n \tag{2}$$

式中：τ 为剪切应力；τ_0 为屈服应力；k 为黏度系数；γ 为剪切速率；n 为流动指数，是与牛顿流体偏差的量度，$n=1$ 时，黏度值恒定，表示典型的牛顿流体，$n<1$ 时代表剪切稀化流体。

由 2.1 节得到 SiC 浆料的优化配方为：PAA 分散剂加入量 1.4%，pH 值 10～11，固相体积分数 55%，MC 加入量 0.05%。对该配方浆料进行 Herschel-Bulkley 模型拟合，所得参数见表 1。喷嘴处稳定的流动速度对于确保浆料的均匀挤出和直写型样品的高保真度至关重要，通过调整入口速度来确保不同喷嘴直径下出

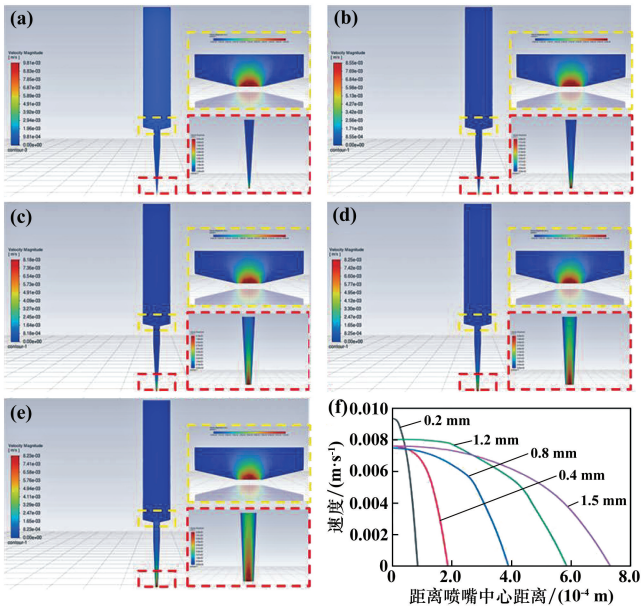
表 1　SiC 浆料模型拟合参数

Table 1　Fitting parameters for SiC slurry

τ_0	k	n	R^2
301.206	673.257	0.661	0.95

口面平均速度在 5 mm/s 左右。

图 6 为喷嘴直径对流体流动速度的影响。大尺寸喷嘴剪切速率低,浆料的黏度较高,导致速度梯度更加平缓,更多区域接近中心速度,形成更宽的高速平台,而小直径喷嘴剪切速率高,浆体黏度降低,高速区仅集中在狭窄的中心区域。在注射器与喷嘴结合的急性颈缩区域会产生流动死区现象,流体在该区域因局部剪切应力过低形成近静止滞留区,而大直径喷嘴在颈缩区速度变化率更大,高惯性力使得流体更易从壁面分离,扩大死区范围。从图 6(f)可以看出,压力出口下的速度剖面图在形状上与 Poiseuille 流体一致,中心速度最大,近壁处速度趋近于 0。挤出线条的速度梯度会引起流体层间剪切差异,导致线条表面出现褶皱,从而提高打印坯体的表面粗糙度。模拟结果展现出不同喷嘴直径下的最大挤出速度相近,改变喷嘴直径不会影响喷嘴出口处的速度大小。



(a) 0.2 mm; (b) 0.4 mm; (c) 0.8 mm; (d) 1.2 mm; (e) 1.5 mm; (f) 不同喷嘴直径压力出口速度图

图 6 喷嘴直径对流体流动速度的影响

Fig. 6 Effect of nozzle diameter on fluid flow velocity

喷嘴直径对挤出压力的影响如图 7(a)所示。从图 7(a)可以看出,喷嘴直径小于 0.8 mm 时,所需挤出压力急剧上升,这种压力突变现象是因为当喷嘴直径过小时,流体进入超高剪切速率区,黏度逼近最小极限,压力梯度对直径变化极为敏感。为验证有限元模拟对 DIW 挤出过程的预测能力,在不同喷嘴直径下采用模拟所得挤出压力进行挤出测试,记录 30 mm 挤出线条的实际挤出时间求得平均速度,结果如图 7(b)所示。结果表明:喷嘴直径分别为 0.2、0.4、0.8、1.2 和 1.5 mm 时,挤出速度模拟结果与实际挤出速度的偏差分别为 5.8%、1.6%、4.6%、7.2%和 8.4%。模拟结果可以指导实验过程中挤出压力的初步选取,小直径喷嘴因局部剪切速率较大,浆料发生明显剪切变稀及壁面滑移,导致实际挤出速度高于模拟结果,而中大直径喷嘴在较低剪切速率下触变结构恢复较快,局部黏度高于模拟预测,从而导致速度偏低。误差主要源于 Herschel-Bulkley 模型未考虑浆料的触变性以及浆料在挤出过程中的壁面滑移,此外,在死区中可能出现的颗粒迁移现象也会对浆料的最终挤出速度造成一定影响。这也是未来模型需要优化的方向。

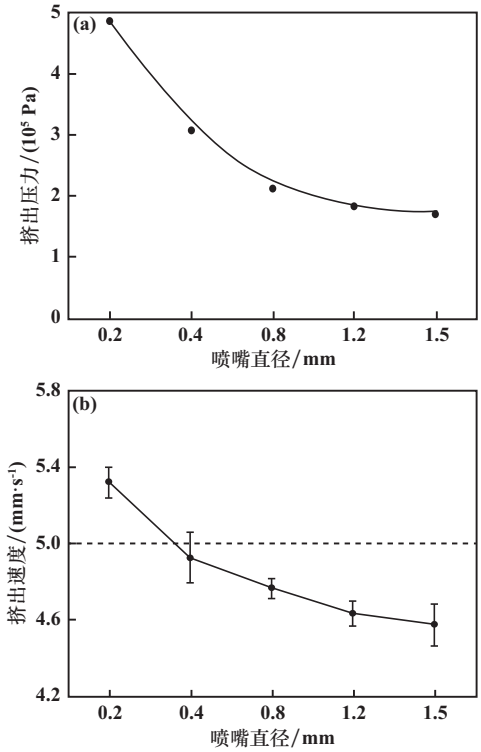


图 7 喷嘴直径对挤出压力及挤出速度的影响

Fig. 7 Effect of nozzle diameter on extrusion pressure and extrusion speed

2.2.2 线性流体跨越能力表征

线性流体的跨越能力对制备复杂结构具有重大指导意义。线性流体跨越能力表征见图 8。为了使打印过程更加稳定,选用直径为 1.2 mm 的喷嘴,并通过有限元模拟指导选取合适的挤出压力和挤出速度,打印过程中,线性流体在跨越如图 8(a)所示的桥形结构时会发生凹陷,为表征线性流体的跨越能力,使用优化所得浆料按照预先设计的三角形结构[如图 8(b)所示]进行打印。该三角形结构由基底和跨越层两部分组成。基底部分由 2 个等腰三角形组成,高度为 3 个打印层厚,外侧三角形顶角为 30°,内侧三角形顶角为

15°。打印所得坯体如图 8(c)所示。

线性流体的塌陷高度(h')满足如下关系式：

$$h' = h - h_c \tag{3}$$

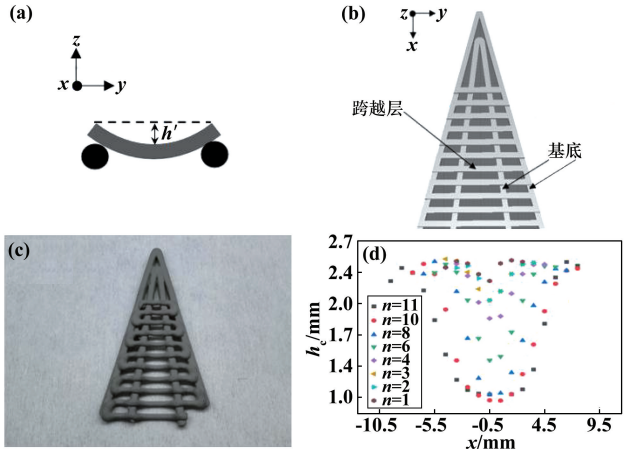
式中：h 为三角形结构高；h_c 为点高测量值。

线性流体的跨越距离则满足如下关系式：

$$L = 2x\tan(7.5°) \tag{4}$$

式中 x 为线条至内部等腰三角形顶点的距离。

点高测量结果如图 8(d)所示，其中 n 表示从三角形上顶点至底边第 n 条跨越线条。从图 8(d)可知，当 $n \leqslant 3$ 时，$h' < 0.4D$，塌陷程度较小，当 $n \geqslant 6$ 时，$h' > 0.9D$，塌陷已较为严重。$n = 3$ 线条对应的 x 为 24 mm，跨越距离 L 为 6.3 mm，因此所打印模型跨越距离应小于 6.3 mm。



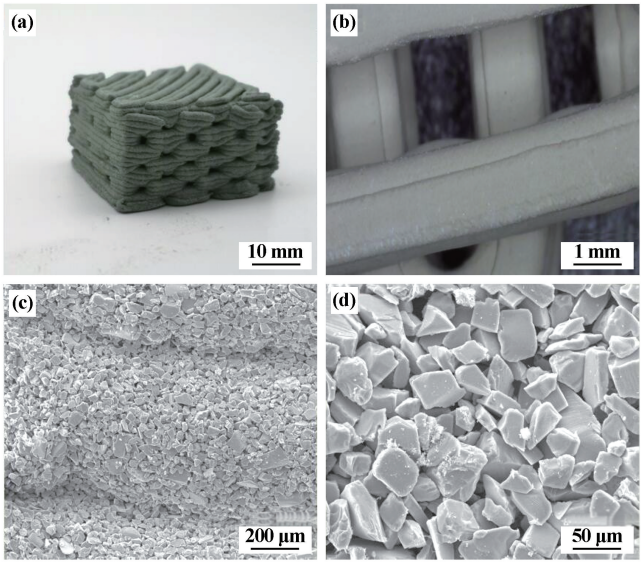
(a) 桥形结构；(b) 三角形结构；
(c) 三角形结构坯体；(d) 三角形结构坯体点高分布

图 8　线性流体跨越能力表征

Fig. 8　Characterization of spanning capacity for linear fluid

2.2.3　SiC 浆料的直写成型及后处理策略

使用优化所得浆料进行直写成型，制备了 45°木材堆积的三维点阵结构，其最大跨越距离为 1 mm。三维 SiC 样品图及微观结构如图 9 所示。由图 9(a)可知，打印所得坯体结构完整，无任何断口或浆料堆积缺陷。在纵向面上，SiC 线性流体保持了较好的打印稳定性，排列的孔洞清晰可见，且孔洞与孔洞之间排列整齐紧密，大小基本一致，误差在±0.05 mm 之内。回走路径之间有明显的界线，但是底层线性流体因挤压出现扁平化，导致整体结构轻微凹陷。图 9(b)为点阵结构的局部放大图，从中可看出 SiC 线性流体受重力影响而无法完全挺立于下层之上，悬垂线条与下层发生了局部融合。粗颗粒 SiC 浆料在干燥过程中易出现收缩不均、层间应力集中、坯体塌陷等问题。图 9(c)和图 9(d)展示了干燥后坯体的 SEM 照片，可见样品表面存在明显的层状界面，且层状界面处出现较多开放孔隙与颗粒凸起，表层颗粒排列并未达到理想的致密堆积状态。这主要由于 SiC 颗粒尺寸较大且粒径分布存在一定宽度，在堆积过程中难以填充小尺度间隙，从而保留较大孔隙；另一方面，在干燥过程中，毛细管力驱动的液相迁移与颗粒重排不完全，易在层界面处诱导应力集中与孔隙形成。



(a) 木材堆积结构；(b) 三维点阵结构局部放大图；
(c)，(d) SiC 微观结构

图 9　三维 SiC 样品图及微观结构

Fig. 9　3D SiC sample and its microstructure

为提升后续坯体的致密度与界面结合强度，可从两方面优化后处理工艺：一是在干燥阶段尝试采用可控湿度的梯度干燥制度，以减缓水分蒸发速率，减少因干燥应力导致的层间微裂纹；二是在烧结阶段引入更高效的烧结助剂或采用分段保温的烧结工艺，促进颗粒重排与界面融合，从而改善最终陶瓷件的微观结构与力学性能。

3　结论

1) 在低剪切速率下，粗颗粒 SiC 浆料的黏度随着分散剂 PAA 加入量增加呈现先下降后上升的趋势，PAA 加入量为 1.4%时黏度最低；浆料黏度随着固相体积分数增加呈现先上升后下降的变化规律，最大固相体积分数可以达到 55%；浆料 pH 值 10~11 时分散效果较好；MC 加入量增加，黏度与屈服应力升高，MC 加入量为 0.05%时可兼顾浆料挤出性与成型性。

2) SiC 浆料优化配方为：PAA 分散剂加入量 1.4%，pH 值 10~11，固相体积分数 55%，MC 加入量 0.05%。

3）结合有限元模拟结果，SiC 浆料不宜采用直径过小的喷嘴，喷嘴直径 1.2 mm 时，为减少坯体塌陷，打印跨越距离应小于 6.3 mm。

4）采用 SiC 浆料优化配方，打印得到的三维点阵结构保持完整，无断裂和浆料堆积现象；但粗颗粒 SiC 粉体降低了直写成型过程中线性流体的形状保持能力，导致底层线性流体被压扁，存在轻微变形。

参考文献(References)：

[1] 董博，余超，邓承继，等. 碳化硅陶瓷导热性能的研究进展[J]. 材料工程，2023，51(1)：64-75.
Dong Bo，Yu Chao，Deng Chengji，et al. Research progress in thermal conductivity of SiC ceramics[J]. Journal of Materials Engineering，2023，51(1)：64-75.

[2] Guo X T，Tang J，Chang H T，et al. Application of SiO_2-coated SiC powder in stereolithography and sintering densification of SiC ceramic composites[J]. Ceramics International，2023，49(15)：25016-25024.

[3] Taneja K，Kumar M，Mahajan S B. Reaction mechanism for pressureless sintering silicon carbide boron carbide composite[J]. Materials Today：Proceedings，2021，39：1921-1924.

[4] Shinoda Y，Nagano T，Wakai F. Fabrication of nanograined silicon carbide by ultrahigh-pressure hot isostatic pressing[J]. Journal of the American Ceramic Society，1999，82(3)：771-773.

[5] 胡子健，俞风英，钟佳妮，等. 陶瓷增材制造技术的研究现状与展望[J]. 矿冶工程，2025，45(2)：197-204.
Hu Zijian，Yu Fengying，Zhong Jiani，et al. Research status and prospects of ceramic additive manufacturing[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2025，45(2)：197-204.

[6] 乔聪卓，刘子瑞，徐麒凯，等. 复杂形状 SiCp/Al 复合材料的光固化增材制造[J]. 矿冶工程，2025，45(4)：168-174.
Qiao Congzhuo，Liu Zirui，Xu Qikai，et al. Additive manufacturing of complex shaped SiCp/Al composite by photocuring process[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2025，45(4)：168-174.

[7] Li W，Cui C C，Bao J X，et al. Properties regulation of SiC ceramics prepared via stereolithography combined with reactive melt infiltration techniques[J]. Ceramics International，2021，47(24)：33997-34004.

[8] 王小锋，孙月花，彭超群，等. 直写成型用悬浮液的设计[J]. 无机材料学报，2015，30(11)：1139-1147.
Wang Xiaofeng，Sun Yuehua，Peng Chaoqun，et al. Suspensions designed for direct ink writing[J]. Journal of Inorganic Materials，2015，30(11)：1139-1147.

[9] Xiong H W，Chen H H，Zhao L Z，et al. SiC_w/SiCp reinforced 3D-SiC ceramics using direct ink writing of polycarbosilane-based solution：microstructure，composition and mechanical properties[J]. Journal of the European Ceramic Society，2019，39(8)：2648-2657.

[10] Xu H C，Liu Y，Che Y J，et al. Combination of direct ink writing and reaction bonded for rapid fabrication of SiC_w/SiC composites[J]. Ceramics International，2023，49(1)：392-402.

[11] Lu Z L，Xia Y L，Miao K，et al. Microstructure control of highly oriented short carbon fibres in SiC matrix composites fabricated by direct ink writing[J]. Ceramics International，2019，45(14)：17262-17267.

[12] Hu S J，Feng B，Tang X X，et al. Porous alumina ceramics obtained by particles self-assembly combing freeze drying method[J]. Materials，2019，12(6)：897.

[13] Zhang K，Hou Y，Ye Z，et al. Interactions of coal pitch with amphoteric polycarboxylate dispersant in coal pitch - water slurry：experiments and simulations[J]. Fuel，2022，318：123608.

[14] Li Z W，Geng H K，Wang X J，et al. Noval tannic acid-based polyether as an effective demulsifier for water-in-aging crude oil emulsions[J]. Chemical Engineering Journal，2018，354：1110-1119.

[15] Gensowski K，Tepner S，Schweigert S，et al. Conductive highly filled suspensions for an electrochemical dispensing approach to pattern full-area thin metal layers by physical vapour deposition[J]. Scientific Reports，2020，10：7409.

[16] Xiong H W，Zhao L Z，Chen H H，et al. 3D SiC containing uniformly dispersed，aligned SiC whiskers：printability，microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds，2019，809：151824.

[17] Bai L，Greca L G，Xiang W C，et al. Adsorption and assembly of cellulosic and lignin colloids at oil/water interfaces[J]. Langmuir，2019，35(3)：571-588.

[18] Shi C，Zou X W，Wang P. Influences of EVA and methylcellulose on mechanical properties of Portland cement-calcium aluminate cement-gypsum ternary repair mortar[J]. Construction and Building Materials，2020，241：118035.

引用本文：徐麒凯，刘子瑞，周红莉，等. 粗颗粒 SiC 浆料流变性能及其直写成型[J]. 矿冶工程，2026，46(4)：260-266.
Xu Qikai，Liu Zirui，Zhou Hongli，et al. Rheological properties of coarse-grained SiC slurry and direct ink writing[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2026，46(4)：260-266.