

文章编号: 1674-9669(2024)01-0080-07 DOI: 10.13264/j.cnki.ysjskx.2024.01.010

引文格式: 王小锋, 陈洪钧, 周红莉, 等. 直写成型用碳化硅浆料及其流变性能研究[J]. 有色金属科学与工程, 2024, 15(1): 80-86.

直写成型用碳化硅浆料及其流变性能研究

王小锋^a, 陈洪钧^a, 周红莉^a, 彭超群^a, 王日初^a, 曾婧^{*b}

(中南大学, a. 材料科学与工程学院; b. 冶金与环境学院, 长沙 410083)

摘要: 碳化硅(SiC)凭借高强度、轻质性以及耐高温性能等优势已成为时下应用最广泛的陶瓷材料之一。传统的制备方法生产周期长、成本高且难以制造相对复杂结构的陶瓷。本文利用直写成型方法制备三维复杂结构的SiC陶瓷, 研究分散剂含量、pH值、固相体积分数和增稠剂等因素对SiC浆料流变性能的影响, 制备可打印的SiC浆料并直写成型, 获得SiC的三维点阵结构。结果表明: 调节分散剂含量能使浆料黏度获得最低值; pH值影响分散剂的解离度进而改变浆料的黏度; 固相体积分数越高, 打印结构完整性越好; 添加甲基纤维素(MC)可增加浆料的黏度和剪切弹性模量, 使其可打印。优化的SiC浆料配方为: 分散剂聚丙烯酸(PAA)质量分数为0.01%, 固相体积分数为63%和MC质量分数为0.04%, pH>10。

关键词: 碳化硅; 直写成型; 流变性能; 添加剂; 固相体积分数; pH

中图分类号: TG148 **文献标志码:** A

Rheological properties of SiC suspension for direct ink writing

WANG Xiaofeng^a, CHEN Hongjun^a, ZHOU Hongli^a, PENG Chaoqun^a,

WANG Richu^a, ZENG Jing^{*b}

(a. School of Materials Science and Engineering; b. School of Metallurgy and Environment,
Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Silicon carbide is one of the most widely used ceramic materials today due to its excellent properties such as high strength, light weight and high temperature resistance. However, the traditional preparation method has long production cycle, high cost and is difficult to manufacture relatively complex structures. In this paper, the SiC slurry used in direct ink writing was studied to fabricate SiC ceramics with 3D complex structure. The effects of dispersant content, pH, solid loading and thickener on the rheological properties of SiC suspension were investigated. Printable SiC suspension was prepared and direct-written into three-dimensional lattice structures of silicon carbide. The results show that the optimum content of dispersant results in the lowest paste viscosity; pH affects the dissociation of the dispersant to change the viscosity of the paste; the higher the solid loading, the stronger the printable structural integrity; and the addition of methyl cellulose (MC) increases the viscosity and shear elastic modulus of the slurry, making it printable. The optimized silicon carbide slurry formulations are: 0.01% polyacrylic acid (PAA) in mass fraction, 63% solid loading and 0.04% MC in mass fraction, pH > 10, respectively.

Keywords: silicon carbide; direct-ink writing; rheological properties; additives; solid loading; pH value

收稿日期: 2022-12-08; 修回日期: 2023-01-13

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ4729, 2022JJ40591); 长沙市自然科学基金资助项目(kq2202094)

通信作者: 曾婧(1990—), 博士, 副教授, 主要从事3D打印直写成型等方面的研究。E-mail: 13467516329@163.com

SiC 是一种结构陶瓷材料,具有优异的机械性能(高强度和高硬度)^[1-2]、热学性能^[3](高热导率和低膨胀系数)和化学性能^[4](耐磨损和抗腐蚀),即使在极端的环境下该材料也能发挥作用,在汽车配件^[5]、生物医学^[6]、航空航天^[7]等领域中均具有重要的应用价值和潜力。传统的陶瓷加工成型技术主要有注射成型、等静压成型和注浆成型^[8-11]等,这些制备方式都需要使用模具获得陶瓷素坯,因此这些制备方式都具有生产周期长、成本高且难以制造相对复杂结构的陶瓷等缺点。如何实现陶瓷部件的高效率结构与制备已成为工业生产的迫切需求。

3D 打印由于具有高精度、能够制造复杂结构、生产成本低和生产周期短等优点而被陶瓷材料制造领域所青睐^[12]。各种利用 3D 打印制备三维陶瓷结构的方法被提出,其中包括立体光刻(SLA)^[13]、黏结剂喷射打印技术(3DP)^[14]、选择性激光熔化(SLM)技术^[15-16]以及直写成型技术(DIW)^[16-17]。直写成型技术是一种灵活性高、成本低且适合大规模生产的 3D 打印技术,它基于稳定流变性能的 SiC 浆料的基础上,将其依照预先设计的打印规划路径进行逐层打印从而获得三维陶瓷结构^[16-17]。SiC 浆料的配制是直写成型工艺制备 SiC 陶瓷零件的基础,其流变性能直接影响直写成型 SiC 坯体的成型效果和精度。用于直写成型的 SiC 浆料应满足均匀分散、流变性能可控、黏弹性适中以及较高的固相含量等特征。

因此,本文研究分散剂种类与含量、pH、固相体积分数以及增稠剂对 SiC 浆料流变性能的影响,制备可打印的 SiC 浆料,并通过直写成型方法获得 SiC 的三维点阵结构。

1 实验部分

1.1 实验材料

SiC 粉末的粒径为 1 μm ,实验中使用的分散剂有 8 种:聚丙烯酸(PAA,浓度 50%,分子量 5 000,上海阿拉丁生化科技有限公司),聚乙烯亚胺(PEI,浓度 99%,分子量分别为 600 和 10 000,上海泰坦化学有限公司),聚乙二醇(PEG,浓度 99%,分子量分别为 2 000、6 000 和 8 000,国药集团化学试剂有限公司)、聚乙烯吡咯烷酮(PVP,上海麦克林生化科技有限公司)和四甲基氢氧化铵(TMAH,上海麦克林生化科技有限公司)。增稠剂采用甲基纤维素(MC,上海阿拉丁生化科技有限公司)。所有添加剂均为 AR 级。

1.2 沉降实验

沉降实验常用于表征浆料的稳定性。具体方法

为:将含不同分散剂且固相体积分数均为 2% 的 SiC 浆料用行星搅拌机球磨 10 min 并调节 pH 为 10 后,倒入 10 mL 带刻度的量筒内。密封量筒,隔一段时间记录浆料悬浮高度,以确定各种分散剂对浆料悬浮性能的影响。

1.3 碳化硅浆料的配制

将一定量的分散剂溶解在定量的水中,调节 pH 至所需值,取定量的 SiC 粉末倒入溶液中,并将其放入行星搅拌机进行均匀搅拌,得到均匀分散的 SiC 浆料。再将 MC 加入浆料中,增加其剪切弹性模量和黏度。

1.4 直写成型及后处理

采用美国产 Hyrel 3D 打印机设备制备三维结构。将该打印机位置调节系统安装在计算机上,并由其控制调节打印头的走向 x 轴和 y 轴和打印平台的移动(z 轴)。打印步骤分为三维模型设计、三维切片、打印平台调零、浆料准备和打印。三维模型设计由 Auto CAD 提供支持并设计,在 Prusa slicer 软件进行切片相应的设置,其中内容包括确定层高、打印速度、打印机挤出速度和挤出宽度等,打印平台调零应移动打印平台,并设置 z 轴 0 点位置靠近打印针头尖端,其误差应在 0.01~0.05 mm 之间。浆料准备时,应先将配制好的浆体由 5 mL 注射器多次装满注入 10 mL 注射器中,再将 10 mL 的注射器放入行星搅拌机中进行脱泡操作,最后将其精准安装在打印头内。打印前进行预挤出,顺利出料后,进行打印。最后,将直写成型的 SiC 样品置于相对湿度为 70% 的室温环境下进行干燥直至质量固定不变。

1.5 性能表征

采用旋转流变仪(AR2000EX)在恒温状态下确定待测材料的黏弹性等流变性能。采用带 EDS 能谱仪的 Quanta-200 型扫描电子显微镜(SEM)表征 SiC 颗粒及其三维结构的微观结构。使用 Tecnai G2 20 ST 显微镜获得三维结构局部放大图,并观察界面结合情况。

2 结果与讨论

2.1 分散剂对碳化硅流变性能的影响

分散剂对 SiC 浆料沉降性能的影响如图 1(a)所示。纵坐标为浑浊液面高度,横坐标为时间变化,依据浑浊液面的高度来观测其颗粒分散的情况,液面高度越高,时间越长,其分散效果越好,并可以看出,PEI 600 和 PEI 10000 沉降速度很快,而其余分散剂变化情况相似。随着时间的延长,添加 PAA 的浆料

稳定性较优。

SiC 颗粒在水中的分散是一个分散与絮凝平衡的过程,颗粒之间会由于范德华力的作用而相互聚集起来^[16]。而分散剂可以吸附在颗粒表面,改变其表面性质,从而改变颗粒与溶剂介质之间、颗粒与颗粒之间的相互作用,使颗粒间有较强的排斥力,从而使得浆料达到一种稳定分散的状态^[17-18]。就分类而言,PEG 和 PVP 属于非离子型分散剂,属于双亲分子,由亲油基和亲水基 2 部分组成,依靠空间位阻效应,亲水基吸附在粉体表面,疏水链伸向溶剂中,从而改善浆料的流变性能^[18-19]。PEI、TMAH 以及 PAA 属于离子型分散剂,依靠 2 种作用方式分散浆料,一是吸附在颗粒表面实现空间位阻作用;二是自身主链或支链上的基因可发生离解各自带电,产生静电位阻稳定效应,这种分散效果更为稳定。因此,PAA 作为离子型分散剂能更好地实现 SiC 粉体在浆料中的稳定分散。

为了进一步获得稳定分散的浆料,在选用了

PAA 作为 SiC 浆料分散剂的前提下,研究不同含量 PAA 对浆料黏度的影响。如图 1(b)所示,在剪切速率为 $0\sim 60\text{ s}^{-1}$ 下,随着分散剂含量的增加,初始黏度增加,当 PAA 含量为 $0.004\sim 0.008\%$ 时,黏度曲线未表现出明显的剪切变稀行为,且黏度保持在最低值,稳定在 $34\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 左右。这是因为当分散剂掺入量较低时,颗粒表面覆盖度较低,颗粒表面带电性质不同,2 个相邻的颗粒带不同电荷的区域相互吸引,产生桥连,从而导致浆料分散不均匀,出现絮凝的情况。分散剂掺量过多时,离子强度过高,压缩双电层,会减少颗粒间的静电斥力,同时过高的自由高分子链也容易发生桥连或缺絮凝,这使得浆料分散效果的稳定性大大下降^[20]。因此,浆料的黏度随着分散剂掺量的增加表现出先减少后增大的趋势,在分散剂用量接近或达到饱和吸附量时,黏度最低,并且相对稳定,继续增加分散剂用量,浆料黏度又会增加。从图 1(c)中可以看出,随着 PAA 含量的增加,浆料的初始黏度在不断增加,而在 $0.004\%\sim 0.008\%$ (质

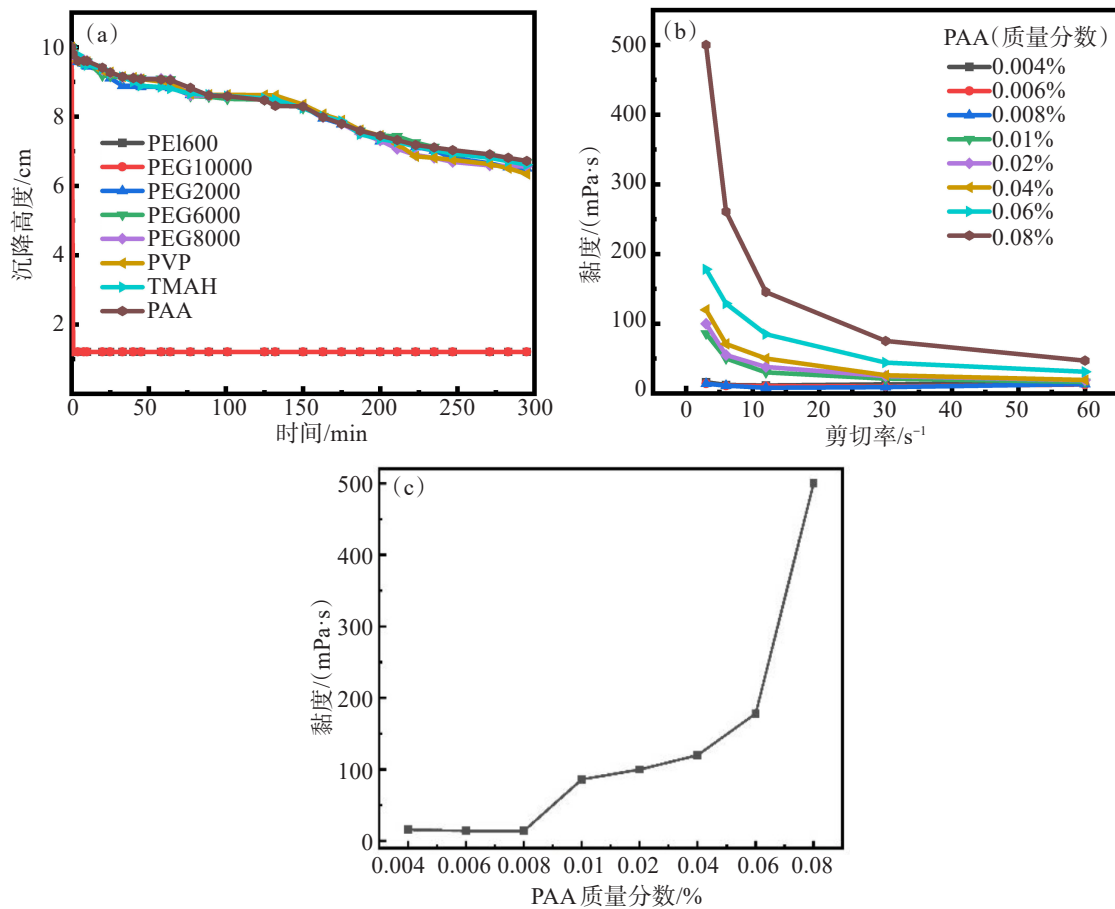


图1 添加剂对 SiC 浆料的沉降高度和黏度的影响: (a) 不同分散剂对 SiC 浆料的沉降高度的影响;

(b) PAA 含量对 SiC 浆料黏度的影响; (c) PAA 含量对低剪切速率下 (1 s^{-1}) SiC 浆料黏度的影响

Fig.1 Effect of additives on the settling height and viscosity of SiC suspension: (a) effect of different dispersants on the settling height of SiC suspension; (b) the effect of PAA content on the viscosity of SiC suspension; (c) the effect of PAA content on the viscosity of SiC suspension at low shear rate (1 s^{-1})

量分数)时是浆料黏度最小的位置,分散效果最为明显,但是由于其无明显的剪切变稀行为,因此选择 0.01%(质量分数)PAA 作为 SiC 浆料的较优掺量。

2.2 pH对碳化硅浆料流变性能的影响

浆料依靠静电作用保持其稳定性和均质性,体系的 pH 决定颗粒表面所带电荷量,进而影响颗粒间的相互作用,使体系表现出不同的流变性质^[21]。体系的 pH 还会影响分散剂对 SiC 浆料的吸附行为,从而影响到颗粒之间的吸引力和排斥力平衡。图 2 所示为 SiC 浆料流变性能受 pH 的影响,低剪切速率下的初始黏度随着 pH 的增加呈现出先增加后减少的趋势,当 pH>10 时,浆料黏度达到了最低。在酸性条件下,PAA 难以解离,仅依靠空间位阻效应难以实现浆料的稳定分散。随着 pH 增大,PAA 逐渐完全解离,同时带有负电。此时,PAA 吸附在 SiC 表面,在颗粒间产生稳定的静电作用力,使浆体具有稳定的分散性^[22-23]。pH 的增加不仅促进了分散剂 PAA 的解离,还影响着 SiC 粉末表面的电位,当 pH>10 时,其电位急剧增加,pH 在 10 左右时电位达到最大,电位的增强极大地增加了颗粒与颗粒之间的排斥力。所以当使用 PAA 作为 SiC 浆料的分散剂时,应调节 pH>10。

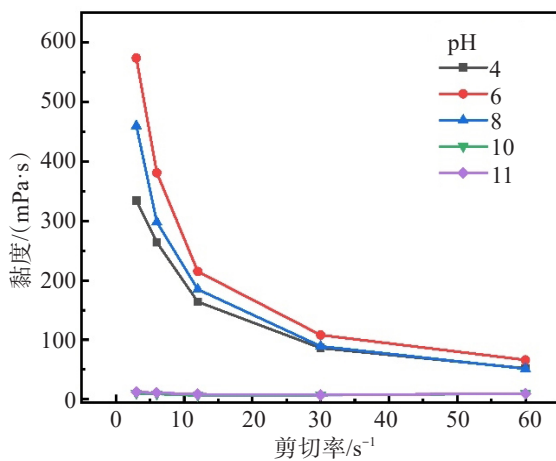


图 2 不同 pH 对 SiC 浆料黏度的影响

Fig.2 Effect of different pH value on the viscosity of SiC suspension

2.3 固相体积分数对碳化硅浆料流变性能的影响

较高的固相体积分数不仅能够提高浆料的稳定性和颗粒之间的相互作用,确保打印结构的完整性,还能减少样品干燥收缩率,提高样品强度^[17]。在确定分散剂和 pH 的基础上,研究 SiC 浆料所能达到的最高固相体积分数是十分必要的。图 3 为不同固相体积分数的碳化硅浆料黏度随剪切速率变化的曲

线,采用 0.01%(质量分数) PAA 作为分散剂,且调节浆料 pH 范围为 10~11,从图 3 中可见,随着固相体积分数的增加,黏度也会随之增加,固相体积分数最高可达到 63%。浆料也表现出剪切变稀行为,且屈服点在 5 s^{-1} 左右。固相体积分数为 63% 与 60% 的曲线变化趋势相同,但低剪切速率下的初始黏度却不同。当固相体积分数为 60% 时,低剪切速率下的黏度为 $40 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,而当固相体积分数为 63% 时,其黏度为 $27 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。因此,选取 63% 为直写成型 SiC 浆料的固相体积分数。

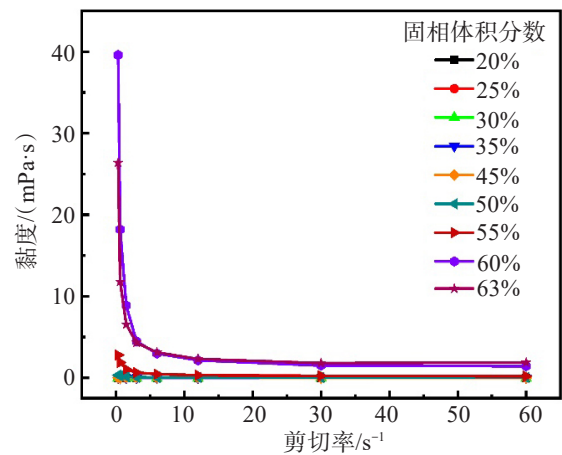


图 3 不同固相体积分数对 SiC 浆料黏度的影响

Fig.3 Effect of different solid loading on the viscosity of SiC suspension

2.4 甲基纤维素对碳化硅浆料流变性能的影响

在实现浆料稳定均质分散的基础上,为获得适合于直写成型的浆料,还需要添加增稠剂来提高浆料的黏度以及低剪切压力下的剪切弹性模量,使稳定分散的低浓度浆料变成黏稠且具有高黏弹性的浆料。MC 是一种非离子纤维素醚,依靠疏水主链与周围水分子通过氢键缔合,提高聚合物本身的流体体积,减少颗粒自由活动的空间,从而提高体系黏度。此外,MC 还可以提高 SiC 颗粒之间的黏结力,从而提高打印样品的强度与韧性。

图 4 为添加 MC 至 SiC 浆料后,浆料黏度、弹性模量、屈服应力以及低剪切速率下黏度的变化。添加 MC 后, SiC 浆料仍表现出剪切变稀行为(图 4(a)),且随着 MC 含量的增加,黏度不断增加。在低剪切速率下,随着 MC 含量的增加,最大黏度也在不断上升,在 0.05%(质量分数)时达到了最大,约为 $600 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (图 4(b))。从图 4(c)中可以看出,随着 MC 含量的增加,其低剪切压力下的弹性模量也在不断增加,并且每个浆料都有明显的屈服点,其具体的屈服应力

值,如图4(d)所示。随着MC掺量的增加,屈服应力也在不断增加,在MC掺量为0.5%(质量分数)时达到了最大,这是因为在 $\text{pH}>10$ 时,PAA几乎完全解离,而PAA在SiC表面的吸附主要受自身的负电荷产生的静电作用力以及SiC与聚合物链之间非亲和吸附平衡来控制。当PAA含量为0.1%(质量分数)时,其接近饱和吸附,可以实现有效分散。在浆料中加入MC以后,MC一部分凭借氢键与PAA相连共同吸附在SiC表面上,部分依靠自身的官能团包裹住水分子,填充在颗粒与颗粒的间隙中,此时浆料流动性能大幅降低,模量提高,所以MC的加入能同时提高其黏度和弹性模量。此外,由于MC包裹住水分子,

并与水分子形成氢键增加了空间位阻,而SiC表面吸附的PAA屏障因和MC相连形成双层保护,从而使得整体空间絮凝稳定性增强。而屈服应力大小可以间接反映破坏这种絮凝所需要的力值大小。因此随着MC的加入,屈服应力也在随着增加。对于可打印浆料来说,应该具备以下2种条件:保持较高的弹性模量来保持其打印形状,保持较低的屈服应力来减少挤出力。从图4(d)中可见:当MC掺量为0.04%(质量分数)时,浆料的屈服应力曲线变化斜率突然变大,而为了同时兼具上述的2个条件,应选择0.04%(质量分数)的MC作为碳化硅浆料的较优掺量。

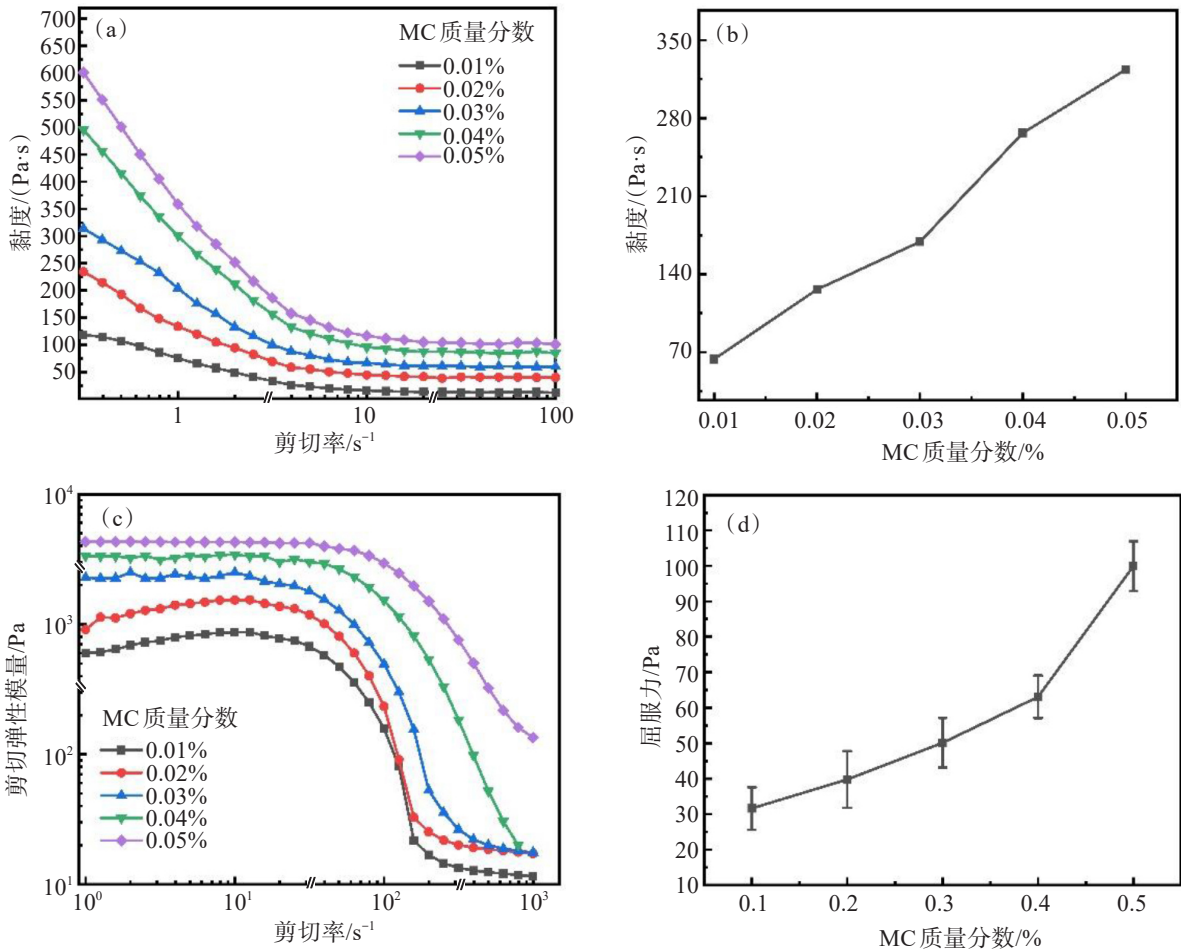


图4 MC含量对SiC浆料流变性能的影响:(a)不同MC含量对SiC浆料黏度的影响;(b)在低剪切速率(1 s^{-1})下,SiC浆料的黏度随MC含量的变化;(c)不同MC含量对SiC浆料剪切弹性模量的影响;(d)不同MC含量对SiC浆料屈服应力的影响

Fig.4 Effect of MC on the rheological properties of SiC suspension: (a) viscosity vs. shear rate; (b) viscosity vs. content of MC under low shear rate (1 s^{-1}); (c) shear elastic modulus vs. shear stress; (d) yield stress vs. content of MC

2.5 碳化硅浆料的直写成型及性能表征

在获得碳化硅可打印浆料的基础上,采用直写成型方法制备木材堆积的三维点阵结构,并对其进行了局部放大以及微观结构的观察,如图5所示。

图5(a)所示为SiC浆料直写成型所获得三维点阵结构,其木材堆积结构完整,小部分路径出现了断口,打印路径由纵横交错的圆柱体构成,考虑到直写成型中可能存在压滤或者挤出过量的现象,因此将打

印挤出细丝设定为圆柱体,并设定直径为 1 mm,长为 3 cm,采用回字形路线来避免浆料的重复通过。在纵向截面上,三维结构由六层二维结构组成且线性棒状的厚度均匀,无明显的弯曲或坍塌,孔洞清晰可见,排列整齐,且大小一致,误差在 ± 0.05 mm之内。图 5(b)局部放大图显示打印细丝具有良好的剪切弹

性模量,保持了打印初始形状,且层与层之间有明显的分隔,每层的打印细丝可以直立于下一层之上,具有很高的刚度。图 5(c)和图 5(d)分别为不同放大倍数时,60 °C下干燥 24 h后的样品扫描照片,打印细丝表面均匀平整,无突出小颗粒,且 SiC 颗粒之间排列紧密,间隙较小。

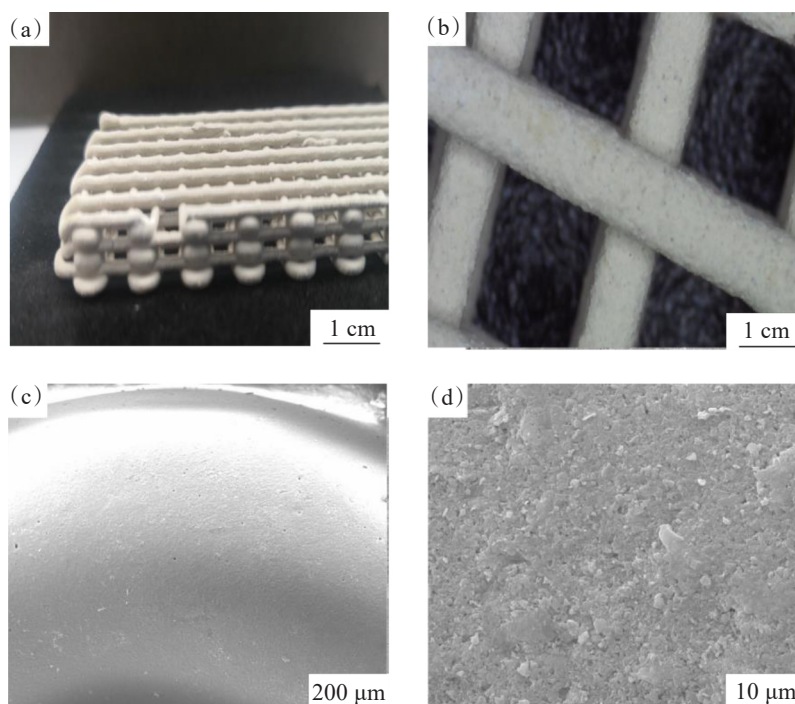


图 5 三维 SiC 样品图及其微观结构:(a)木材堆积结构;(b)三维点阵结构局部放大图;
(c—d)碳化硅微观结构

Fig.5 Three-dimensional SiC samples and their microstructure: (a) timber stacking structure; (b) local enlargement of three-dimensional lattice junction; (c—d) the microstructure of SiC samples

3 结 论

1)随着 PAA 含量的增加,浆料黏度呈现先降低后增加的趋势;pH 会影响 SiC 表面所带电荷以及 PAA 的解离度;随着固相体积分数的增加,浆料黏度呈现先上升后平稳的趋势;MC 的加入能同时提高浆料的黏度、弹性模量和屈服应力。

2)优化的碳化硅浆料配方为:分散剂为 0.01% (质量分数)PAA(聚丙烯酸),固相体积分数为 63% 和 MC 质量分数为 0.04%,调节 pH>10。

3)打印所得 SiC 样品的三维结构由六层二维结构组成且线性棒状的厚度均匀,层间结构保持完整,不坍塌、不弯曲,表面微观结构界面层次清晰,无明显的空隙和团聚。

参考文献:

- [1] 邹芹,周鑫,李艳国,等. SiC 复合材料的研究进展与展望[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(11): 3220-3232.
- [2] 向忠宁,何秦川,王益群,等. 中空 SiC 球形纳米颗粒的合成及吸波性能[J]. 有色金属科学与工程, 2022, 13(1): 83-92.
- [3] MAYO M J. Processing of nanocrystalline ceramics from ultrafine particles[J]. International Materials Reviews, 1996, 41(3): 85-115.
- [4] WU J G, FAN Z, XIAO D Q, et al. Multiferroic bismuth ferrite-based materials for multifunctional applications: Ceramic bulks, thin films and nanostructures[J]. Progress in Materials Science, 2016, 84: 335-402.
- [5] RAMADHAS A S, XU H M. Intake air heating strategy to reduce cold-start emissions from diesel engines[J]. Biofuels, 2018, 9(3): 405-414.
- [6] HAJIALI F, TAJBAKHSH S, SHOJAEI A. Fabrication and properties of polycaprolactone composites containing

- calcium phosphate-based ceramics and bioactive glasses in bone tissue engineering: A review[J]. *Polymer Reviews*, 2018, 58(1): 164-207.
- [7] ANTIL P, SINGH S, SINGH S, et al. Metaheuristic approach in machinability evaluation of silicon carbide particle/glass fiber-reinforced polymer matrix composites during electrochemical discharge machining process[J]. *Measurement and Control*, 2019, 52(7/8): 1167-1176.
- [8] MENDES M A A, GOETZE P, TALUKDAR P, et al. Measurement and simplified numerical prediction of effective thermal conductivity of open-cell ceramic foams at high temperature[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 102: 396-406.
- [9] CAO J J, DONG X F, LI L L, et al. Recycling of waste fly ash for production of porous mullite ceramic membrane supports with increased porosity[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, 34(13): 3181-3194.
- [10] MURPHY S V, ATALA A. 3D bioprinting of tissues and organs[J]. *Nature Biotechnology*, 2014, 32(8): 773-785.
- [11] DONG C J, WANG R C, CHEN Y X, et al. Near-net shaped Al/SiC_p composites via vacuum-pressure infiltration combined with gelcasting[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30(6): 1452-1462.
- [12] LIU J J, YANG H C, REN B, et al. Highly porous ZrO₂ cellular ceramics with 3D network architecture[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(6): 7149-7154.
- [13] 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.
- [14] WANG J C, DOMMATI H, HSIEH S J. Review of additive manufacturing methods for high-performance ceramic materials[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 103(5/6/7/8): 2627-2647.
- [15] XIE H B, ZHANG J L, LI F L, et al. Selective laser melting of SiC_p/Al composites: densification, microstructure, and mechanical and tribological properties[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(21): 30826-30837.
- [16] LI S, LI Y F, WANG Q W, et al. Fabrication of 3D-SiC/aluminum alloy interpenetrating composites by DIW and pressureless infiltration[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(17): 24340-24347.
- [17] 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.
- [18] HU S J, FENG B, TANG X X, et al. Porous alumina ceramics obtained by particles self-assembly combing freeze drying method[J]. *Materials (Basel)*, 2019, 12(6): 897.
- [19] LI Z W, AN S J, LIU Y F, et al. Practical modification of tannic acid polyether demulsifier and its highly efficient demulsification for water-in-aging crude oil emulsions[J]. *ACS Omega*, 2019, 4(24): 20697-20707.
- [20] 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.
- [21] BAI L, GRECA L G, XIANG W, et al. Adsorption and assembly of cellulosic and lignin colloids at oil/water interfaces[J]. *Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2019, 35(3): 571-588.
- [22] 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(1): 1-10.
- [23] ZHOU L, ZHU J W, ZHAO Y F, et al. A molecular dynamics study on thermal conductivity enhancement mechanism of nanofluids-Effect of nanoparticle aggregation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 183: 122124.

(责任编辑:赵中波)