

# 颗粒级配对黏结剂喷射打印碳化硅陶瓷性能的影响

顾薛苏<sup>1</sup>, 殷杰<sup>1</sup>, 王康龙<sup>1</sup>, 崔崇<sup>2</sup>, 梅辉<sup>3</sup>,  
陈忠明<sup>1</sup>, 刘学建<sup>1</sup>, 黄政仁<sup>1,4</sup>

(1. 中国科学院 上海硅酸盐研究所, 上海 200050; 2. 南京理工大学 材料科学与工程学院, 南京 210094; 3. 西北工业大学 材料学院, 西安 710072; 4. 中国科学院 宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201)

**摘要:** 碳化硅(SiC)陶瓷作为一种高性能结构功能一体化的陶瓷材料, 在航空航天、核能工业和制动系统等领域应用广泛。然而, 传统的制造方法无法满足大尺寸复杂结构 SiC 陶瓷日益增长的市场需求, 例如发动机喷嘴、襟翼和涡轮叶片等。黏结剂喷射(BJ)3D 打印突破了传统成型的约束, 可以提供新的制造思路。本工作采用颗粒级配 SiC 的思路, 基于级配理论优化较佳的颗粒度配比, 研究了 BJ 打印对级配前后 SiC 陶瓷素坯及烧结体性能的影响。研究发现, BJ 打印级配后的 SiC 素坯经过一次前驱体浸渍裂解(PIP)处理, 能够快速制备抗弯强度最大达到(16.70±0.53) MPa 的 SiC 素坯, 相比采用 20 μm 中位径未级配的样品提高了 116%。进一步采用液相渗硅制备了致密的 SiC 陶瓷, 其密度、抗弯强度、弹性模量和断裂韧性分别达到(2.655±0.001) g/cm<sup>3</sup>, (285±30) MPa, (243±12) GPa 和 (2.54±0.02) MPa·m<sup>1/2</sup>。XRD 分析表明, SiC 烧结体主要以 3C-β-SiC 晶为主。本研究基于颗粒级配的原料, 采用黏结剂喷射打印, 结合一次浸渍裂解与液相渗硅制备工艺, 高效可靠地制备了高性能 SiC 陶瓷材料。

**关键词:** 碳化硅; 颗粒级配; 黏结剂喷射打印; 前驱体浸渍裂解

中图分类号: TQ174 文献标志码: A

## Effect of Particle Grading on Properties of Silicon Carbide Ceramics by Binder Jetting Printing

GU Xuesu<sup>1</sup>, YIN Jie<sup>1</sup>, WANG Kanglong<sup>1</sup>, CUI Chong<sup>2</sup>, MEI Hui<sup>3</sup>,  
CHEN Zhongming<sup>1</sup>, LIU Xuejian<sup>1</sup>, HUANG Zhengren<sup>1,4</sup>

(1. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 3. School of Materials, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 4. Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

**Abstract:** Silicon carbide (SiC) ceramics, as a high-performance structural-functional integrated material, are widely used in aerospace, nuclear industry and braking system. However, the conventional fabrication methods can not meet the increasing demands for large-scale and complex-structured SiC ceramics, such as engine nozzles, flaps and turbine blades. Binder jetting (BJ) 3D printing technology can overcome the traditional obstacle and provide a novel

收稿日期: 2023-05-05; 收到修改稿日期: 2023-06-16; 网络出版日期: 2023-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(U22A20129, 52073299, 52172077); 国家重点研发计划(2022YFB3706300)

National Natural Science Foundation of China (U22A20129, 52073299, 52172077); National Key R&D Program of China (2022YFB3706300)

作者简介: 顾薛苏(1997-), 男, 硕士研究生. E-mail: guxs2022@163.com

GU Xuesu(1997-), male, Master candidate. E-mail: guxs2022@163.com

通信作者: 殷杰, 副研究员. E-mail: jieyin@mail.sic.ac.cn; 黄政仁, 研究员. E-mail: zhrhuang@mail.sic.ac.cn

YIN Jie, associate professor. E-mail: jieyin@mail.sic.ac.cn; HUANG Zhengren, professor. E-mail: zhrhuang@mail.sic.ac.cn

manufacturing roadmap. Here, we adopted this technique *via* SiC particle grading, optimized the particle size ratio based on gradation theory, and studied the influence of BJ printing on properties of SiC green body and as-sintered ceramic. For the particle-graded green body after BJ printing, SiC ceramics with a maximum flexural strength of  $(16.70 \pm 0.53)$  MPa was obtained after one precursor impregnation and pyrolysis (PIP) treatment, whose flexural strength was improved by 116% as compared with that BJ printed from a median diameter of 20  $\mu\text{m}$ . SiC ceramics were further densified using liquid phase siliconization, with the density, flexural strength, elastic modulus, and fracture toughness reaching  $(2.655 \pm 0.001)$   $\text{g}/\text{cm}^3$ ,  $(285 \pm 30)$  MPa,  $(243 \pm 12)$  GPa, and  $(2.54 \pm 0.02)$   $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , respectively. XRD results demonstrated that the sintered SiC ceramics were mainly composed of 3C structured- $\beta$ -SiC. All results show that high-performance SiC ceramic materials are innovatively prepared by an efficient and reliable method, based on the combined techniques of particle grading, BJ printing, PIP and liquid silicon infiltration.

**Key words:** silicon carbide; particle grading; binder jetting printing; precursor impregnation and pyrolysis

近年来,随着科学技术的迅猛发展,在特定服役环境下,高性能陶瓷需要满足大尺寸复杂构型的要求。SiC 陶瓷作为一种重要的热结构材料,具有高强高硬、化学稳定性好、导热系数高等独特优良特性<sup>[1-4]</sup>,被广泛应用在航空航天、空间探测、能源化工等工程领域<sup>[5-7]</sup>。陶瓷的传统制备路线包括制粉、成型、烧结及后处理等工序,成型作为至关重要的步骤,主要包含干压成型、注浆成型以及流延成型等方法<sup>[8-10]</sup>。采用传统成型工艺制备高性能精细化陶瓷,难以实现蜂窝状、拓扑状等多孔薄壁的异形复杂成型,存在制备周期长、生产成本低、加工性差等局限性<sup>[11-13]</sup>,严重限制了碳化硅陶瓷的进一步推广应用。采用 3D 打印(3D printing)新技术可以有效解决上述难题,为制备高性能陶瓷提供新的方案。

3D 打印技术,亦称为增材制造(Additive Manufacturing, AM),它是一种基于数字化结合计算机辅助设计制造所需三维对象的技术,被广泛应用于金属、陶瓷和高分子等材料领域<sup>[14]</sup>。3D 打印技术主要分为浆料式 3D 打印和铺粉式 3D 打印,前者成型需要考虑浆料的固含量、分散性和润湿性等诸多因素,较为繁琐;相比之下,后者的制备操作更加简便。黏结剂喷射(BJ)打印<sup>[15]</sup>作为铺粉式 3D 打印的重要技术之一,主要由铺粉、喷射打印和粉料黏合三个步骤构成,其中铺粉决定了粉料状态,喷射打印关系到打印精度,粉料黏合影响到成型性能。BJ 打印的具体过程如下:通过投料机在成型区域内振动撒上一定厚度的粉料,反旋转辊子将粉料均匀铺平在成型区,接着通过计算机控制打印机喷头并根据 CAD 模型的轮廓信息在需要的区域有选择地喷射黏结剂到粉末床上,使截面内的粉料与黏结剂溶液粘合,加热器控制黏结剂/粉末的水分以及

固化,随后将成型缸下降一层,继续撒料、铺平、喷射,重复以上过程,直至打印工作结束,生成三维立体零件。目前,国外对 BJ 打印 SiC 陶瓷的研究主要集中在打印参数、后处理工艺对 SiC 陶瓷性能的影响,粉末特性对打印试件性能影响的研究较少,而粉末的状态将会影响整个铺粉过程的好坏,因而亟待开展相关研究。国内由于设备条件相对不成熟,在 BJ 打印 SiC 陶瓷方面鲜有报道,处于刚起步阶段。Cramer 等<sup>[16]</sup>运用 Exone 生产的 BJ 设备,打印参数设置为:散粉速度 25 mm/s,振荡器转速 2700 r/min,辊子旋转速度 300 r/min,黏结剂饱和度 80%,加热器横扫速度 22 mm/s,研究了 PIP 对 SiC 复合材料性能的影响。研究发现 SiC 陶瓷的密度由  $2.05 \text{ g}/\text{cm}^3$ (1 次 PIP 循环)增大到  $2.33 \text{ g}/\text{cm}^3$ (3 次 PIP 循环),3 次 PIP 循环后的室温弯曲强度和杨氏模量分别达到  $(66.8 \pm 2.5)$  MPa 和  $(69.5 \pm 2.8)$  GPa。他们团队<sup>[17]</sup>还采用 PIP 和反应熔渗(RMI)结合的技术,通过两次浸渍酚醛树脂(PR)热解成碳,结合 RMI 技术,最终制备得到的陶瓷孔隙率小于 2%,弹性模量接近 300 GPa,抗弯强度达  $(517.6 \pm 24.8)$  MPa。Terrani 等<sup>[18]</sup>采用 Exone 生产的 BJ 设备,结合化学气相渗透致密化工艺,最终打印得到陶瓷的导热系数和抗弯强度分别为  $37 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$  和 297 MPa。

颗粒级配是一种能够很好地改善粉末堆积状态的方式,可以有效提高素坯致密度,并且引入粗颗粒可以降低陶瓷烧结时的界面扩散,抑制晶粒长大,从而改善陶瓷力学性能<sup>[19]</sup>。本研究利用颗粒级配改性粉体原料,采用 BJ 打印素坯,运用一次 PIP 处理并结合液相渗硅致密化烧结制备了 SiC 陶瓷,探究颗粒级配对 SiC 素坯抗弯性能和孔径分布以及陶瓷力学性能的影响。

# 1 实验方法

## 1.1 实验材料

实验采用纯度 >99.5% 的市售 SiC 粉末 ( $D_{50} = 5, 10, 20, 50, 80 \mu\text{m}$ , 上海尚磨机电有限公司)。采用 Exone 公司生产的型号为 PhenolFuse 的打印黏结剂, 它是一种水性有机黏结剂, 主要成分为乙二醇(体积分数 20%)、乙二醇单丁醚(体积分数 10%)和 PR。

## 1.2 颗粒级配 SiC 粉末的制备

为保证级配后粉末具有一定流动性和堆积性能, 以便于成型过程中的铺粉, 颗粒级配前后不同中位径 SiC 粉末按照表 1 所示的质量配比进行混合, 表 1 中卡尔指数(Carr index)的数值越小, 对应粉体的流动性越好。混合工艺为: SiC 球磨介质, 球料比 1.5:1, 转速为 60 r/min, 混料 1 h。

## 1.3 SiC 陶瓷的成型与制备

采用 BJ 设备打印成型 SiC 素坯, 在 900 °C 下脱黏, 1550 °C 下液相渗硅致密化烧结制备陶瓷, 具体成型制备流程如图 1 所示。打印参数参考文献[16-18]: 散粉速度为 50 mm/s, 黏结剂饱和度为 75%, 打印层厚为 50  $\mu\text{m}$ , 加热器横扫速度为 25 mm/s, 辊子旋转速度为 300 r/min。

表 1 不同中位径 SiC 粉末的级配比例及流动性指数  
Table 1 Mass ratios and flowability indexes of SiC powders with different median diameters

Group	Fraction	Carr index/%
G0	20 $\mu\text{m}$ (non-grading)	37.11
G1	5 $\mu\text{m}$ :10 $\mu\text{m}$ :20 $\mu\text{m}$ :50 $\mu\text{m}$ :80 $\mu\text{m}$ =5:6:15:5:5	27.80
G2	5 $\mu\text{m}$ :10 $\mu\text{m}$ :20 $\mu\text{m}$ :50 $\mu\text{m}$ :80 $\mu\text{m}$ =6:6:15:5:4	30.05
G3	5 $\mu\text{m}$ :10 $\mu\text{m}$ :20 $\mu\text{m}$ :50 $\mu\text{m}$ :80 $\mu\text{m}$ =6:5:15:4:6	34.94

Note: "5  $\mu\text{m}$ :10  $\mu\text{m}$ :20  $\mu\text{m}$ :50  $\mu\text{m}$ : 80  $\mu\text{m}$ " refers to mass ratio of SiC powders with different median diameters

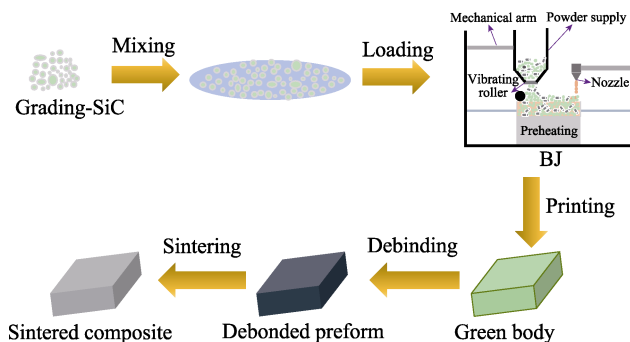


图 1 BJ 打印制备 SiC 陶瓷的工艺流程  
Fig. 1 Flow chart of SiC ceramics by BJ process

## 1.4 材料表征

根据阿基米德排水法测得 SiC 素坯和陶瓷的体积密度( $D$ )和开气孔率( $P$ ), 计算公式如式(1)和式(2)所示。采用场发射扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM, Hitachi SU8220, 日本)观察 SiC 素坯的断面形貌和陶瓷的抛光面形貌。采用万能材料试验机(Instron-5566, Instron, 美国)测量素坯的抗弯性能和陶瓷的抗弯性能、弹性模量和断裂韧性。采用压汞仪(Quantachrome Instruments, Poremaster60, America)测试 SiC 素坯的孔径分布。采用 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD, D8 Advance, Bruker, 德国)进行物相的定性分析。

$$D = M_1 / (M_2 - M_3) \tag{1}$$

$$P = [(M_2 - M_1) / (M_2 - M_3)] \times 100\% \tag{2}$$

其中,  $M_1$  为样品干重,  $M_2$  为样品充分吸水后在空气中质量(湿重),  $M_3$  为样品水中质量(浮重)。

# 2 结果与讨论

## 2.1 级配对 BJ 打印 SiC 素坯性能的影响

选用表 1 所示的四组颗粒级配前后的粉体, 在相同的 BJ 打印参数下进行打印, 接着在 900 °C 下进行脱黏得到 SiC 素坯试样。为了提高素坯的性能, 在后处理液相渗硅致密化之前进行一次 PIP 处理, 这是由于打印黏结剂中碳含量较少, PIP 可以为素坯提供合适的碳源, 提高素坯的密度, 起到预增密的作用。本实验按 PR 和乙醇的质量比为 1:1 去配制浸渍裂解溶液, 四组 BJ 打印好的素坯, 经过一次 PIP 后测试力学性能, 得到级配前后粉体打印素坯 PIP 后的抗弯强度。PIP 前后的素坯体积密度和开气孔率具体数值如表 2 所示, PIP 后的素坯抗弯性能如图 2 所示。

由表 2 可知, 纯 20  $\mu\text{m}$  打印的 PIP 前素坯体积密度达  $(1.236 \pm 0.008) \text{g/cm}^3$ , 开气孔率达  $(61.12 \pm 0.47)\%$ 。

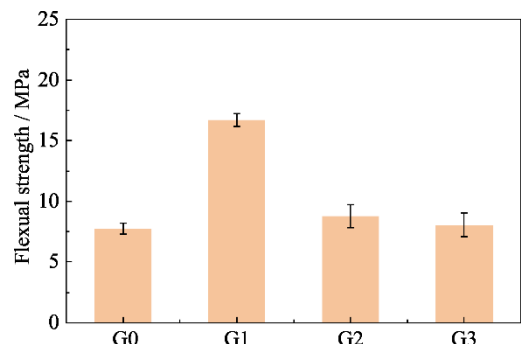


图 2 BJ 打印素坯经一次 PIP 后的抗弯强度  
Fig. 2 Flexural strength of BJ-printed green body after one PIP

级配后素坯的密度和气孔率均在一定程度上得到改善,流动性最好的 G1 组,其 PIP 前素坯体积密度达到 $(1.470\pm 0.006)$  g/cm<sup>3</sup>,开气孔率达 $(53.19\pm 0.46)\%$ 。级配后的粉体比级配前的粉体流动性在一定程度上得到提升,同时相同 BJ 打印参数下 PIP 后,素坯性能也有一定改善。特别是通过颗粒级配调控后的 G1 组,抗弯强度达到 $(16.70\pm 0.53)$  MPa,强度比未级配 20  $\mu\text{m}$  SiC $(7.74\pm 0.99)$  MPa),提升了约 8.96 MPa。从级配后三种粉体打印的素坯性能可以发现,级配后复合粉体的流动性与 PIP 后的素坯性能之间呈正相关,即级配后流动性越好的粉体 BJ 打印后的试件,经过一次 PIP 后的素坯性能也越好。由图 3(e)可知,级配之后各组的微分浸汞量峰值位置发生左移,对应于孔径向小孔偏移。级配之后的各组 SiC 素坯孔径分布在 5~15  $\mu\text{m}$  之间。随着原料流动性由好变差,最可几孔径分别为 8.86、9.21 和 10.15  $\mu\text{m}$ ,中位孔径分别为 5.26、7.61 和 8.35  $\mu\text{m}$ ,而未级配的 20  $\mu\text{m}$  打印的 SiC 素坯最可几孔径为 14.29  $\mu\text{m}$ ,中位孔径为 9.74  $\mu\text{m}$ 。这表明级配有利于减小素坯的孔径,在某种程度上可以提升素坯的性能。随着原料流动性的变差,素坯孔径呈现逐渐变大的趋势,这是由于原料流动性变差,堆积效果也随之变差,粉体颗粒之间的间隙变大,导致素坯的气孔也增大,与前面的抗弯强度结果一致。

由图 3(a~d)可知:经过一次 PIP 处理后,增碳剂 PR 热解后的残余碳以块状结构附着在 SiC 颗粒表面,大部分填充在 SiC 大小颗粒接触部分的细孔之间。观察 20  $\mu\text{m}$  中位径原料打印的 PIP 后的素坯,可以发现颗粒之间的接触较为紧密,宏观孔隙较小,而颗粒级配调控后打印的 PIP 后素坯,由于大颗粒的加入,根据 Furnace 不连续尺寸颗粒堆积理论<sup>[20]</sup>,大颗粒之间产生的空隙在填入小颗粒后形成密堆积,从而减少宏观孔隙,整体上 PIP 后素坯相对较均匀,无明显的分层现象,这种低孔隙的 PIP 后素坯可以防止在液相渗硅时出现大量的残余硅。

表 2 BJ 打印素坯在 PIP 处理前后的体积密度和开气孔率  
Table 2 Bulk densities and open porosities of BJ-printed SiC green body before and after PIP treatment

Group	Bulk density/(g·cm <sup>-3</sup> )		Open porosity/%	
	Before PIP	After PIP	Before PIP	After PIP
G0	1.236±0.008	1.533±0.005	61.12±0.47	47.48±0.84
G1	1.470±0.006	1.718±0.009	53.19±0.46	40.63±0.57
G2	1.313±0.007	1.598±0.003	59.72±0.20	46.44±0.63
G3	1.284±0.004	1.572±0.007	59.04±0.13	45.85±0.77

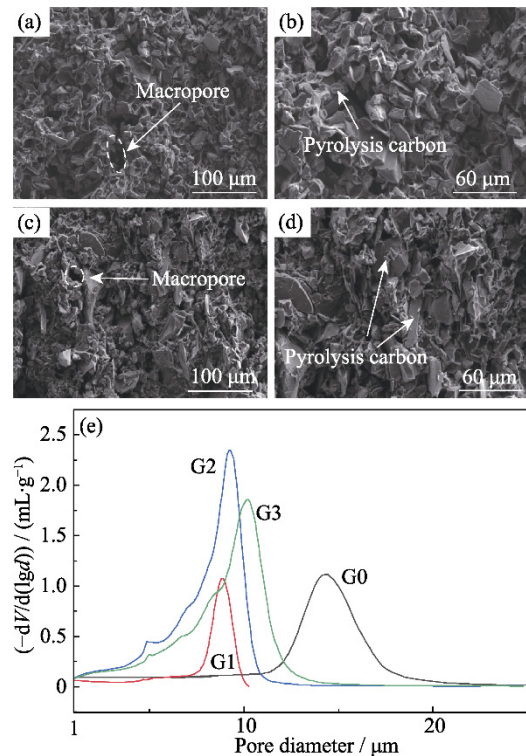


图 3 PIP 后素坯的断面形貌(a~d)以及 PIP 后素坯的孔径分布(e)

Fig. 3 Fracture morphologies (a-d), and pore size distributions (e) of green bodies after PIP (a) G0; (b) G1; (c) G2; (d) G3

## 2.2 级配对 BJ 打印 SiC 陶瓷性能的影响

对比图 4 中级配前后的几组 SiC 陶瓷的体积密度和开孔率可知,流动性越好的粉体,制备的陶瓷致密度越好,这与粉体堆积有很大的关联,颗粒级配堆积的效果越好,致密度越佳。其中, G1 组的陶瓷致密性最佳,密度为 $(2.655\pm 0.001)$  g/cm<sup>3</sup>,比纯 20  $\mu\text{m}$  的 SiC 的密度 $(2.590\pm 0.006)$  g/cm<sup>3</sup>提高了约 0.065 g/cm<sup>3</sup>。结合表 1 可知,粉体流动性原料最佳的粉体,打印烧结后的陶瓷密度最高,开孔率最小。

由图 5 可知,随着级配后 SiC 颗粒的流动性提升,抗弯强度和弹性模量均呈现一定程度的上升,粉

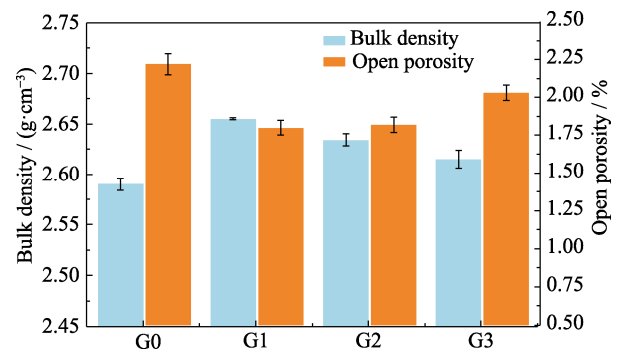


图 4 BJ 打印 SiC 陶瓷的体积密度和开孔率

Fig. 4 Bulk densities and open porosities of BJ-printed SiC ceramics

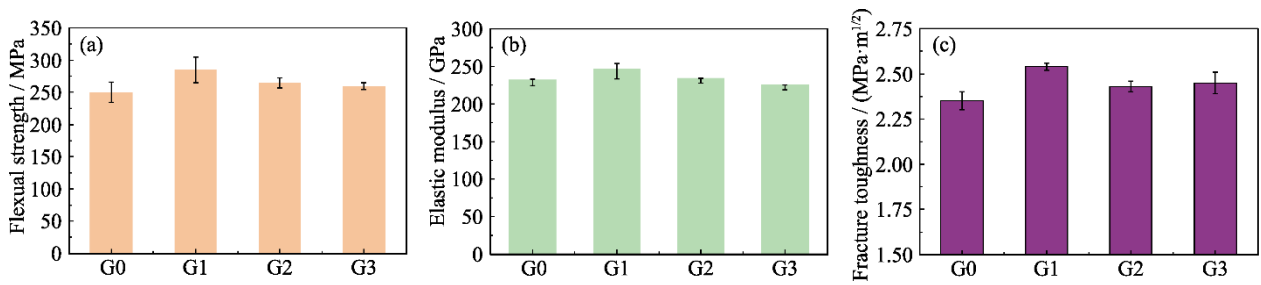


图 5 BJ 打印 SiC 陶瓷的力学性能

Fig. 5 Mechanical properties of BJ-printed SiC ceramics  
(a) Flexural strength; (b) Elastic modulus; (c) Fracture toughness

体流动性最好的 G1 组的抗弯强度达到(285±30) MPa, 弹性模量达到(243±12) GPa, 断裂韧性达到(2.54±0.02) MPa·m<sup>1/2</sup>。以 20 μm 粉体为基准级配后的 BJ 打印的各组陶瓷力学性能均有所提高, 一定程度上来说, 原料级配有利于提高陶瓷的抗弯性能、弹性模量和断裂韧性等力学性能。

值得一提的是, Si 的弹性模量为 113 GPa, 低于单相 SiC 陶瓷的 475 GPa<sup>[3]</sup>, 根据基于加权平均值方法的复合材料的混合定律, BJ 打印的 SiC 陶瓷相应的弹性模量随残余硅含量的增加而减小。残余硅的理论体积含量为 53%, SiC 陶瓷的理论弹性模量应该为 283 GPa, 但 G1 组的实测弹性模量为(243±12) GPa, 这是由于孔隙和残余碳的存在使弹性模量低于理论值。

文献[16-18]报道的抗弯强度为 200~500 MPa、弹性模量为~300 GPa, 本工作制备的陶瓷性能虽不及此, 但通过颗粒级配改性的方式对 BJ 打印 SiC 陶瓷进行性能优化, 采用的是一次 PIP 和液相渗硅, 与报道采用的多次 PIP 致密化和 CVI 工艺相比, 步骤更简便, 大大缩短了陶瓷的制备周期, 成本降低, 经济优势显著, 并且制备得到的 SiC 陶瓷的性能更高且更可靠。

图 6 为 SiC 陶瓷基复合材料抛光面形貌, 由图可知, 以 20 μm SiC 打印的陶瓷颗粒较为均匀且晶粒尺寸较小, 级配之后的陶瓷由于大颗粒数增加, 颗粒之间的间距减小, 宏观上表现为堆积过程中的小颗粒填充大颗粒之间的间隙, 有利于陶瓷致密化, 从而使级配后的密度比未级配的要高, 这与陶瓷密度测试结果相一致。图中出现的少量白点为 Al-Fe 合金, 来自陶瓷制备过程中黏结剂 PR 所引入的金属杂质<sup>[3]</sup>。

BJ 打印 SiC 复合材料的不同相对应的 XRD 衍射峰标记在图 7 中, 主要为闪锌矿结构的立方碳化硅 3C-β-SiC, 还有少量的硅(Si)。Si 相对较脆, 其含量会影响陶瓷试件的强度。图 7 显示级配 G1 组的 Si 衍射峰强度很低, 说明其 Si 含量比未级配的 Si

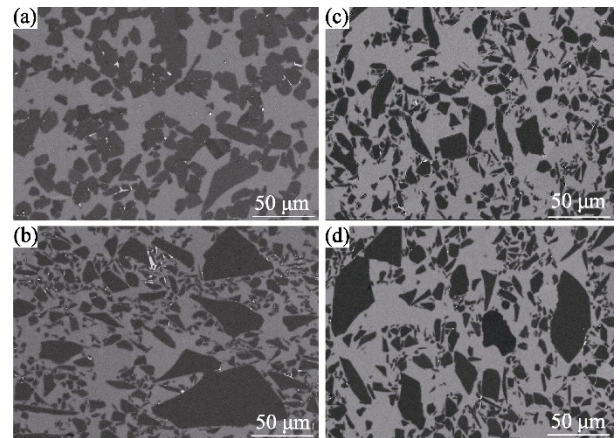


图 6 BJ 打印 SiC 陶瓷的抛光面形貌

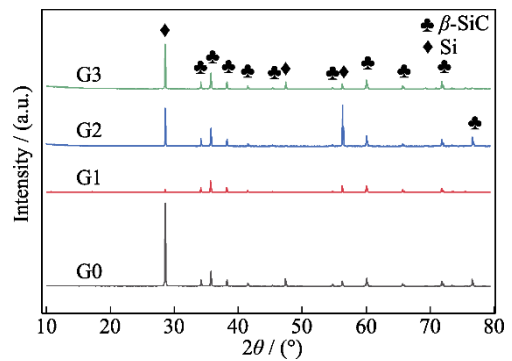
Fig. 6 Polished surface morphologies of BJ-printed SiC ceramics  
(a) G0; (b) G1; (c) G2; (d) G3

图 7 BJ 打印 SiC 陶瓷的 XRD 图谱

Fig. 7 XRD patterns of BJ-printed SiC ceramics

含量要少, 在宏观上表现为级配后的抗弯强度和断裂韧性高于未级配体系, 这与前面的结果一致。

### 3 结论

级配后的粉体比未级配的粉体流动性有一定程度上的提升, 在相同 BJ 打印参数下的素坯性能均有一定改善。特别是颗粒级配调控后的粉体 G1 组, 通过 BJ 打印并经一次 PIP 处理后的素坯抗弯强度达到(16.70±0.53) MPa, 此种粉体在流动性达到最

佳的同时,强度比未级配的素坯提高了 8.96 MPa。

级配后的 G1 组的陶瓷密度最佳为 $(2.655 \pm 0.001) \text{ g/cm}^3$ ,比纯 20  $\mu\text{m}$  的 SiC 陶瓷密度 $(2.590 \pm 0.006) \text{ g/cm}^3$ 提高了约  $0.065 \text{ g/cm}^3$ 。级配后的各组 SiC 颗粒,随着流动性变好,制备的 SiC 陶瓷的抗弯强度和弹性模量均呈现一定程度的上升,粉体流动性最好的 G1 组 BJ 打印陶瓷的实测抗弯强度达到 $(285 \pm 30) \text{ MPa}$ ,弹性模量达到 $(243 \pm 12) \text{ GPa}$ ,断裂韧性达到 $(2.54 \pm 0.02) \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

## 参考文献:

- [1] HE R, ZHOU N, ZHANG K, *et al.* Progress and challenges towards additive manufacturing of SiC ceramic. *Journal of Advanced Ceramics*, 2021, **10(4)**: 637.
- [2] KUMAR P, SRIVASTAVA V K. Tribological behaviour of C/C-SiC composites—a review. *Journal of Advanced Ceramics*, 2016, **5**: 1.
- [3] CHEN X, YIN J, LIU X, *et al.* Effect of laser power on mechanical properties of SiC composites rapidly fabricated by selective laser sintering and direct liquid silicon infiltration. *Ceramics International*, 2022, **48(13)**: 19123.
- [4] HUANG L Z, YIN J, CHEN X, *et al.* Selective laser sintering of SiC green body with low binder content. *Journal of Inorganic Materials*, 2022, **37(3)**: 347.
- [5] CHEN Z W, LI Z Y, LI J J, *et al.* 3D printing of ceramics: a review. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, **39(4)**: 661.
- [6] BELOSLUDTSEV A, BUINOVSKIS D. Significant increase of UV reflectivity of SiC galvanometer mirror scanners for the high-power laser applications. *Optics & Laser Technology*, 2021, **140**: 107027.
- [7] LIU G, ZHANG X, YANG J, *et al.* Recent advances in joining of SiC-based materials (monolithic SiC and SiC<sub>p</sub>/SiC composites): joining processes, joint strength, and interfacial behavior. *Journal of Advanced Ceramics*, 2019, **8**: 19.
- [8] SONG M, HE Y. Effects of die-pressing pressure and extrusion on the microstructures and mechanical properties of SiC reinforced pure aluminum composites. *Materials & Design*, 2010, **31(2)**: 985.
- [9] SUZUKI T S, UCHIKOSHI T, SAKKA Y. Effect of sintering conditions on microstructure orientation in  $\alpha$ -SiC prepared by slip casting in a strong magnetic field. *Journal of the European Ceramic Society*, 2010, **30(14)**: 2813.
- [10] LIU Y, HU C, FENG W, *et al.* Microstructure and properties of diamond/SiC composites prepared by tape-casting and chemical vapor infiltration process. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, **34(15)**: 3489.
- [11] CHEN X, YIN J, HUANG L, *et al.* Microstructural tailoring, mechanical and thermal properties of SiC composites fabricated by selective laser sintering and reactive melt infiltration. *Journal of Advanced Ceramics*, 2023, **12(4)**: 830.
- [12] 唐杰, 杨勇, 黄政仁. 碳化硅陶瓷浆料基 3D 打印研究进展. 材料导报, 2021, 35(S1): 172.
- [13] 顾薛苏, 殷杰, 崔崇, 等. C<sub>p</sub>/SiC 复合材料的原料高效改性及其 3D 打印制备研究进展. 现代技术陶瓷, 2022, **43(4)**: 229.
- [14] LIU G, ZHANG X F, CHEN X L, *et al.* Additive manufacturing of structural materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2021, **145**: 100596.
- [15] DU W, SINGH M, SINGH D. Binder jetting additive manufacturing of silicon carbide ceramics: development of bimodal powder feedstocks by modeling and experimental methods. *Ceramics International*, 2020, **46(12)**: 19701.
- [16] CRAMER C L, ELLIOTT A M, LARA-CURZIO E, *et al.* Properties of SiC-Si made via binder jet 3D printing of SiC powder, carbon addition, and silicon melt infiltration. *Journal of the American Ceramic Society*, 2021, **104(11)**: 5467.
- [17] CRAMER C L, ARMSTRONG H, FLORES-BETANCOURT A, *et al.* Processing and properties of SiC composites made via binder jet 3D printing and infiltration and pyrolysis of preceramic polymer. *International Journal of Ceramic Engineering & Science*, 2020, **2(6)**: 320.
- [18] TERRANI K, JOLLY B, TRAMMELL M. 3D printing of high-purity silicon carbide. *Journal of the American Ceramic Society*, 2020, **103(3)**: 1575.
- [19] XING Y Y, WU H B, LIU X J, *et al.* Grain composition on solid-state-sintered SiC ceramics. *Journal of Inorganic Materials*, 2018, **33(11)**: 1167.
- [20] LIU S, HA Z. Prediction of random packing limit for multimodal particle mixtures. *Powder Technology*, 2002, **126(3)**: 283.