

颗粒级配对选区激光烧结打印结合常压固相烧结 制备碳化硅陶瓷性能的影响

王康龙^{1,2}, 殷杰¹, 陈晓¹, 王力¹, 刘学建¹, 黄政仁^{1,3}

(1. 中国科学院 上海硅酸盐研究所, 上海 200050; 2. 湖南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410082; 3. 中国科学院 宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201)

摘要: SiC 陶瓷因其独特的热学、电学性能及优异的力学性能, 被广泛应用于航空航天、核能、化工、半导体等国防与工业重大领域, 但是传统的成型方法无法满足大尺寸复杂构件的制备需求。选区激光烧结(SLS)打印具有无需支撑、材料利用率高、加工效率高等优势, 能高效成型复杂陶瓷结构零部件。本研究采用颗粒级配 SiC 的方法, 系统研究了冷等静压(CIP)、前驱体浸渍热解(PIP)、CIP 结合 PIP 后常压固相烧结等工艺对级配和中位径 82 μm 未级配体系 SiC 陶瓷的影响。研究发现, 级配粉末成型坯体的体积密度和抗弯强度比未级配坯体均提升了 20%以上, 级配体系 CIP 后常压固相烧结体的相对致密度达到了 90%以上, 实现了致密化烧结, 而未级配体系烧结体的相对致密度仅为 89%, 这是由颗粒级配后坯体的堆积密度提升所致, 且级配烧结体的抗弯强度(136.8 MPa)比未级配(99.4 MPa)提升了 37%以上。采用多次重复 PIP 结合常压固相烧结的方法制备高致密的 SiC 陶瓷, 发现 SLS 打印成型的坯体经四次 PIP 后致密度可达到 CIP 堆积致密的效果, 但四次 PIP 后常压固相烧结体的体积密度仅为 2.29 g/cm³, 抗弯强度为 59.6 MPa。

关键词: 碳化硅陶瓷; 颗粒级配; 选区激光烧结打印; 常压固相烧结

中图分类号: TQ174 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2024)07-0754-07

Effect of Particle Grading on Properties of Silicon Carbide Ceramics Prepared by Selective Laser Sintering Printing Combined with Solid-phase Sintering at Atmospheric Pressure

WANG Kanglong^{1,2}, YIN Jie¹, CHEN Xiao¹, WANG Li¹, LIU Xuejian¹, HUANG Zhengren^{1,3}

(1. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

Abstract: Silicon carbide (SiC) ceramics are widely used in critical industries such as aerospace, nuclear energy, chemical processing, and semiconductor manufacturing due to their unique thermal and electrical properties coupled with excellent mechanical properties. Nevertheless, conventional forming methods often fall short when it comes to producing large-sized and complex components. Selective laser sintering (SLS) printing has the advantages of no

收稿日期: 2023-12-18; 收到修改稿日期: 2024-02-17; 网络出版日期: 2024-02-22

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

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

作者简介: 王康龙(1999-), 男, 硕士研究生. E-mail: wangkanglong@hnu.edu.cn

WANG Kanglong (1999-), male, Master candidate. E-mail: wangkanglong@hnu.edu.cn

通信作者: 殷杰, 研究员. E-mail: jieyin@mail.sic.ac.cn; 刘学建, 研究员. E-mail: xjliu@mail.sic.ac.cn

YIN Jie, professor. E-mail: jieyin@mail.sic.ac.cn; LIU Xuejian, professor. E-mail: xjliu@mail.sic.ac.cn

support, high material utilization, high processing efficiency, etc., endowing it suitable for the precise fabrication of ceramic structural components with complicated shape. Here, the particle grading approach was employed to systematically investigate the impacts of processes such as cold isostatic pressing (CIP), precursor impregnation pyrolysis (PIP), and the combination of CIP with PIP followed by solid-phase sintering at atmospheric pressure. The results revealed that the graded powders significantly enhanced both the bulk density and the flexural strength of the formed body by over 20% compared to non-graded systems. Relative density of the graded system after CIP and subsequent solid-phase sintering at atmospheric pressure was over 90%, confirming successful densification during sintering. In contrast, the non-graded sintered body only achieved a density of 89%. Implementation of the particle grading led to an increase in bulk density, and it was beneficial for achieving higher densification during sintering. Consequently, the flexural strength of the grading-sintered body was significantly improved, reaching 136.8 MPa—a gain of over 37% compared to the non-graded counterpart whose flexural strength was only 99.4 MPa. Meanwhile, high-density SiC ceramics could be achieved by repeating PIP for four cycles combined with solid-phase sintering of which SiC ceramics density was comparable to that of CIP compacts. However, the bulk density of solid-phase sintered body after four PIP cycles was only 2.29 g/cm^3 , which was accompanied by a flexural strength of 59.6 MPa.

Key words: SiC ceramic; particle grading; selective laser sintering printing; solid-phase sintering at atmospheric pressure

SiC 陶瓷因具有低密度、高强度、耐高温、耐辐射、耐腐蚀等优异性能,成为可在极端环境下应用的理想候选材料,在航空航天、装甲、空间光学部件、核能、化工、半导体等国防与工业重大领域中得到了广泛应用^[1-3]。近年来,国防与工业应用等场合经常要求使用复杂形状的 SiC 陶瓷,但 SiC 陶瓷的强共价键特征给产品的成型制造带来了极大挑战。

对于复杂结构陶瓷构件,传统机械加工法存在周期长、成本高等不足,且最终零部件的表面质量及尺寸精度难以得到保证。凝胶注模成型或注浆成型等陶瓷近净成型工艺虽然可以简化或省去二次机械加工,但对模具的依赖程度较高且在制造大尺寸整体零部件时往往存在气孔、翘曲及裂纹等问题,难以制造出复杂异形形状(如拓扑状、薄壁状等)的陶瓷构件^[4-6]。3D 打印有效解决了上述问题,其在制备异形构件方面有着天然优势^[7-9]。3D 打印又称增材制造,是一种累积制造技术,即先通过计算机建模软件建造所需的三维模型,再将建成的三维模型“分区”成逐层的截面(即切片),从而实现基于分层-叠加原理的制造。

选区激光烧结(SLS)是一种粉末床快速制造工艺,首先通过辊轮或刮刀在粉末床上铺粉,然后利用高能激光束(如 CO_2 激光)选择性烧结粉末;首层制造完成后,供粉缸和成型缸各自上升、下降一层配合铺粉、成型,如此重复建造直至所需三维构件制造完成。SLS 打印具有无需支撑、材料利用率高、加工效

率高等优势,可以高效成型大尺寸复杂陶瓷结构零部件。目前, SLS 打印主要有直接和间接成型两种方式^[10-11]。直接激光成型是用高能量密度的激光照射粉体以实现成型和烧结一体化,这极易产生热应力,导致最终产品的机械性能不佳,因此直接激光成型工艺并未成为主流;间接激光成型是用低能量密度激光照射聚合物粉末熔融冷却以获得陶瓷素坯,素坯的热应力可通过粉末床的预热来消除,但素坯的密度低、强度低,这需要后续热处理工艺来改善^[12]。

目前热处理的主要方法有反应烧结(LSI)^[13]、化学气相沉积(CVI)^[14]和前驱体浸渍热解(PIP)^[15-16]。然而, SLS 打印结合 LSI 会造成游离硅含量高($>10\%$, 体积分数)的问题,这容易导致 SiC 制品的抗弯强度低($\leq 100 \text{ MPa}$)、脆性大(断裂韧性 $\leq 1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$),且当服役温度超过 1410°C 时,烧结体的强度会随着游离硅的熔化迅速下降,同时游离硅还使得基体的耐酸碱腐蚀性能变差;而 CVI 和 PIP 都存在工艺周期长且易产生封闭内孔等问题,这严重制约了 SiC 陶瓷在工程中的应用^[17],因此急需开发其他工艺制备高纯度的 SiC 陶瓷。

颗粒级配可有效改善粉末床的堆积状态,提高成型素坯的致密度。Gu 等^[18]采用级配体系黏结剂喷射打印的 SiC 素坯抗弯强度比未级配 $20 \mu\text{m}$ 中位径的样品提高了 116%。Xing 等^[19]通过粗细 SiC 粉体的颗粒级配实现了致密固相烧结碳化硅(SSiC)陶瓷的增强增韧,当粗细比例为 13:7 时,

抗弯强度与断裂韧性分别为 (440 ± 35) MPa 与 (4.92 ± 0.24) MPa·m^{1/2}, 比未级配 SSiC 陶瓷分别提升了 14.0%与 17.1%。本研究利用颗粒级配来提高粉末床的堆积密度, 进而提高成型素坯的体积密度和力学性能, 制备出高纯度、高致密的 SiC 陶瓷。探究了冷等静压(CIP)、PIP、CIP 结合 PIP 后常压固相烧结等工艺对级配和未级配 $D_{50}=82\text{ }\mu\text{m}$ 体系 SiC 陶瓷制品的影响, 系统表征了各工艺对 SiC 陶瓷孔径分布、力学性能和微观形貌的影响。

1 实验方法

1.1 实验材料

实验采用造粒 SiC 粉末($D_{50}=82\text{ }\mu\text{m}$, 纯度>99.8%)、SiC 粉末($D_{50}=5\text{ }\mu\text{m}$, 纯度>99%)、炭黑(纯度>99%)。激光成型用黏结剂为热塑性酚醛树脂粉末($D_{50}=20\text{ }\mu\text{m}$, 纯度>98%)。前驱体为聚碳硅烷溶液(室温黏度 65 mPa·s, 热解产率 89%)。

1.2 SiC 陶瓷的成型与制备

激光能量密度的大小直接决定了聚合物黏结剂的熔融和黏结效果, 显著影响了激光成型素坯的质量。激光扫过特定区域的能量密度由激光功率、扫描速率、扫描间距、层厚共同决定(见式(1))。

$$E_d = \frac{P_{\text{laser}}}{V_{\text{scan}} \cdot h_{\text{space}} \cdot t_{\text{layer}}} \quad (1)$$

其中, E_d 是能量密度或输入能量(J/mm³); P_{laser} 是激光功率(W); V_{scan} 是扫描速率(mm/s); h_{space} 是扫描间距(mm); t_{layer} 是粉末层厚度(mm)。

使用 CO₂ 激光打印机(光斑尺寸为 10.6 μm)进行

SiC 素坯打印成型, 打印参数如表 1 所示。
SLS 打印成型的样品经 CIP 处理后再进行 PIP 处理, 其中 CIP 压力为 70 MPa、保压 5 min; PIP 热解温度为 1550 ℃、保温 1 h。将 PIP 处理后的烧结体置于 2100 ℃石墨坩埚进行常压固相烧结。为研究多次重复 PIP 对素坯增密和烧结体性能的影响, 本研究分别进行了 1~4 次 PIP 工艺。为简化描述, 表 2 约定了相应方法的缩写形式。
本实验研究的工艺流程如图 1 所示。

表 1 SLS 打印参数
Table 1 Parameters for SLS printing

Laser power/ W	Hatch distance/ μm	Scanning speed/ (mm·s ⁻¹)	Preheating temperature/ ℃	Layer thickness/ mm	Energy density/ (J·mm ⁻³)
35	80	7620	60	0.1	0.057

表 2 实验工艺制度缩写
Table 2 Abbreviations for experimental procedures

Abbreviation	Experimental procedure
SLS-SSiC	Solid-phase sintering at atmospheric pressure after SLS
CIP-SSiC	Solid-phase sintering at atmospheric pressure after SLS and CIP
CIP-PIP-1-SSiC	Solid-phase sintering at atmospheric pressure after SLS and CIP followed by PIP once
CIP-PIP-2-SSiC	Solid-phase sintering at atmospheric pressure after SLS and CIP followed by PIP twice
PIP-4-SSiC	Solid-phase sintering at atmospheric pressure after SLS and PIP four times

Note: the abbreviations in Fig. 3 without SSiC mean that the samples do not have solid-phase sintering step

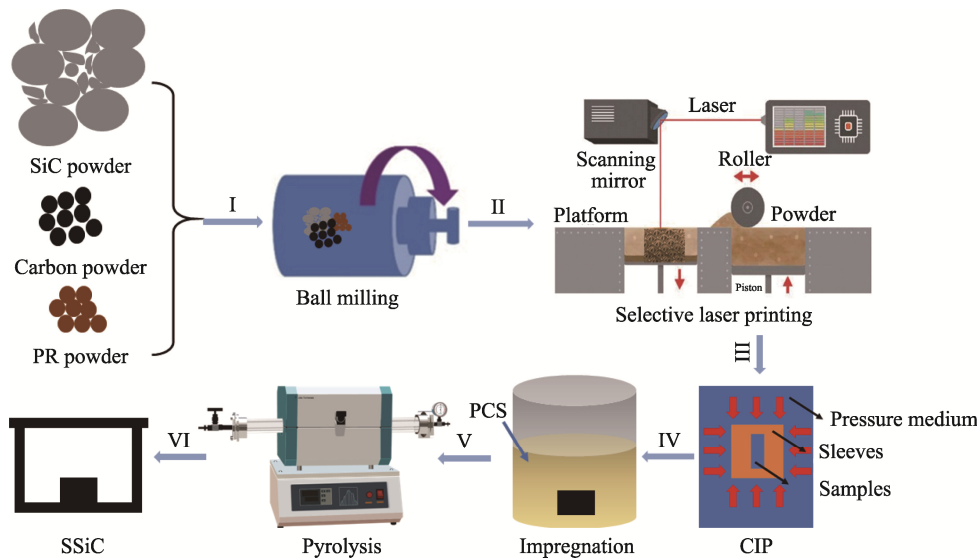


图 1 SLS 打印制备 SiC 陶瓷的工艺流程

Fig. 1 Flow chart of SiC ceramics preparation by SLS printing

1.3 材料表征

采用激光衍射粒度分析仪(Mastersizer 3000, Malvern, 英国)测定粉体的粒度分布。使用阿基米德法(GB/T 25995—2010)测定多孔素坯与 SiC 陶瓷的体积密度(ρ , $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)与开气孔率(P , %), 计算公式如式(2)和式(3)所示。

$$\rho = W_1/(W_2 - W_3) \quad (2)$$

$$P = [(W_2 - W_1)/(W_2 - W_3)] \times 100\% \quad (3)$$

其中, W_1 为样品干重, W_2 为样品充分吸水后在空气中的质量(湿重), W_3 为样品在水中的质量(浮重)。

采用高分辨率场发射扫描电子显微镜(SEM, Verios G4, FEI, 美国)观察多孔素坯以及 SiC 陶瓷的微观结构、形貌与组成。使用材料万能试验机(Instron-5566, Instron, 美国)测量样品的力学性能。根据国标 GB/T 6569—2006, 采用三点抗弯实验方法测试弯曲强度(σ , MPa; 式(4)), 样品加工尺寸为 $4\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 36\text{ mm}$ 。

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (4)$$

其中, F 为样品可以承受的最大压头载荷; L 为跨距, 设置为 30 mm ; b 为样品宽度; h 为样品厚度。测试过程中, 压头加载速率为 $0.5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

根据国标 GB 4161—84 和美标 ASTM E399—74, 采用单边切口梁法(Single Edge Notched Beam, SENB)测定陶瓷试条的断裂韧性(K_{IC} , $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)。样品截面加工尺寸为 $5.0\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$, 切口加工深度为 2.5 mm 。

采用压汞仪(Poremaster 60, Anton Paar, 美国)测试 SiC 素坯的孔径分布。

2 结果与讨论

2.1 级配对 SLS 打印 SiC 素坯性能的影响

级配选用中位径 $82\text{ }\mu\text{m}$ 的球形造粒 SiC 和市售

多角状中位径 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的 SiC 粉末, 质量比为 $7:3$ 。结果发现, 级配粉末成型坯体的体积密度和抗弯强度比未级配中位径 $82\text{ }\mu\text{m}$ 的 SiC 坯体均提升了 20% 以上, 如图 2 所示。

2.2 级配对 SLS 打印 SiC 陶瓷性能的影响

虽然颗粒级配有效提高了 SLS 成型素坯的体积密度, 但烧结体的致密度仍然较低, 必须引入其他致密化方法。表 3 为 CIP、PIP、CIP 结合 PIP 后常压固相烧结工艺对级配和 $D_{50}=82\text{ }\mu\text{m}$ 体系 SiC 陶瓷致密度及力学性能的影响。

首先, 实验制备的级配 CIP-SSiC 烧结体的体积密度为 2.54 g/cm^3 , 而 $D_{50}=82\text{ }\mu\text{m}$ 体系 CIP-SSiC 烧结体的体积密度仅为 2.29 g/cm^3 , 且抗弯强度(99.4 MPa)与级配烧结体(136.8 MPa)相差了 37% 左右。从级配 CIP 样品的微观结构来看(图 3), 坯体中亚微米颗粒填充在粗颗粒形成的空隙中或分布在粗颗粒 SiC 表面, 整个坯体中的颗粒堆积紧密, 而未级配 CIP 坯体颗粒堆积形成的孔隙较多(图 3(c))。

从压汞测试来看, SLS 打印成型素坯经 CIP 后样品孔径明显变小、孔隙含量变小, 级配体系在 SLS 打印成型和 CIP 阶段的效果都要优于未级配 $D_{50}=82\text{ }\mu\text{m}$ 体系, 级配体系经 CIP 后堆积密实, 而 $D_{50}=82\text{ }\mu\text{m}$ 体系存在孔隙, 如图 3(a~d)所示。CIP 样品经 PIP 后对 $0.1\sim 0.2\text{ }\mu\text{m}$ 附近的孔隙填堵效果优异, 但对 $5\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙填堵效果不佳, 这是因为聚碳硅烷陶瓷前驱体热解后晶粒细小, 不足以填堵大孔径, 如图 3(e, f)所示。CIP-PIP-2 与 CIP-PIP-1 样品的孔径分布差别很小, 在 $0\sim 3\text{ }\mu\text{m}$ 都是无峰曲线, 孔隙主要分布在 $5\sim 20\text{ }\mu\text{m}$, 这是由于 CIP-PIP-1 坯体的致密度已经很高, 且 PIP 一次后热解的 SiC 存在于坯体外部, 形成封闭气孔, 导致第二次 PIP 时前驱体溶液很难进入坯体内部, 这点在图 3(g, h)中有所体现, 即 CIP-PIP-2 坯体热解的 SiC 晶粒分布相较 CIP-PIP-1 坯体并没有明显增多。

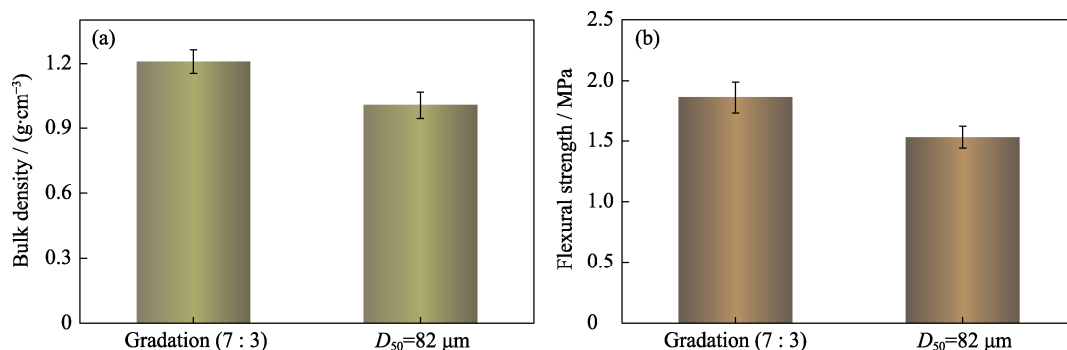


图2 SLS 打印成型 SiC 素坯脱黏后的性能

Fig. 2 Properties of SLS printed SiC green bodies after debonding
(a) Bulk density; (b) Flexural strength

表 3 不同工艺对级配和 $D_{50}=82\text{ }\mu\text{m}$ 体系 SiC 陶瓷性能的影响

Table 3 Effect of different processes on properties of SiC ceramics with gradation and $D_{50}=82\text{ }\mu\text{m}$ systems

Sample		Bulk density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Open porosity/%	Flexural strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Fracture toughness/($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)
SLS-SSiC	Gradation	1.41	52.16	3.49	—	—
	$D_{50}=82\text{ }\mu\text{m}$	1.30	54.23	3.12	—	—
CIP-SSiC	Gradation	2.54	6.37	136.8	127	1.98
	$D_{50}=82\text{ }\mu\text{m}$	2.29	10.01	99.4	111	1.72
CIP-PIP-1-SSiC	Gradation	2.67	7.43	142.1	118	2.16
	$D_{50}=82\text{ }\mu\text{m}$	2.53	7.05	120.5	107	2.09
CIP-PIP-2-SSiC	Gradation	2.69	7.27	150.3	106	2.04
	$D_{50}=82\text{ }\mu\text{m}$	2.51	7.59	123.9	113	2.11
PIP-4-SSiC	Gradation	2.29	20.2	59.6	89	1.37
	$D_{50}=82\text{ }\mu\text{m}$	2.15	19.8	55.7	75	1.19

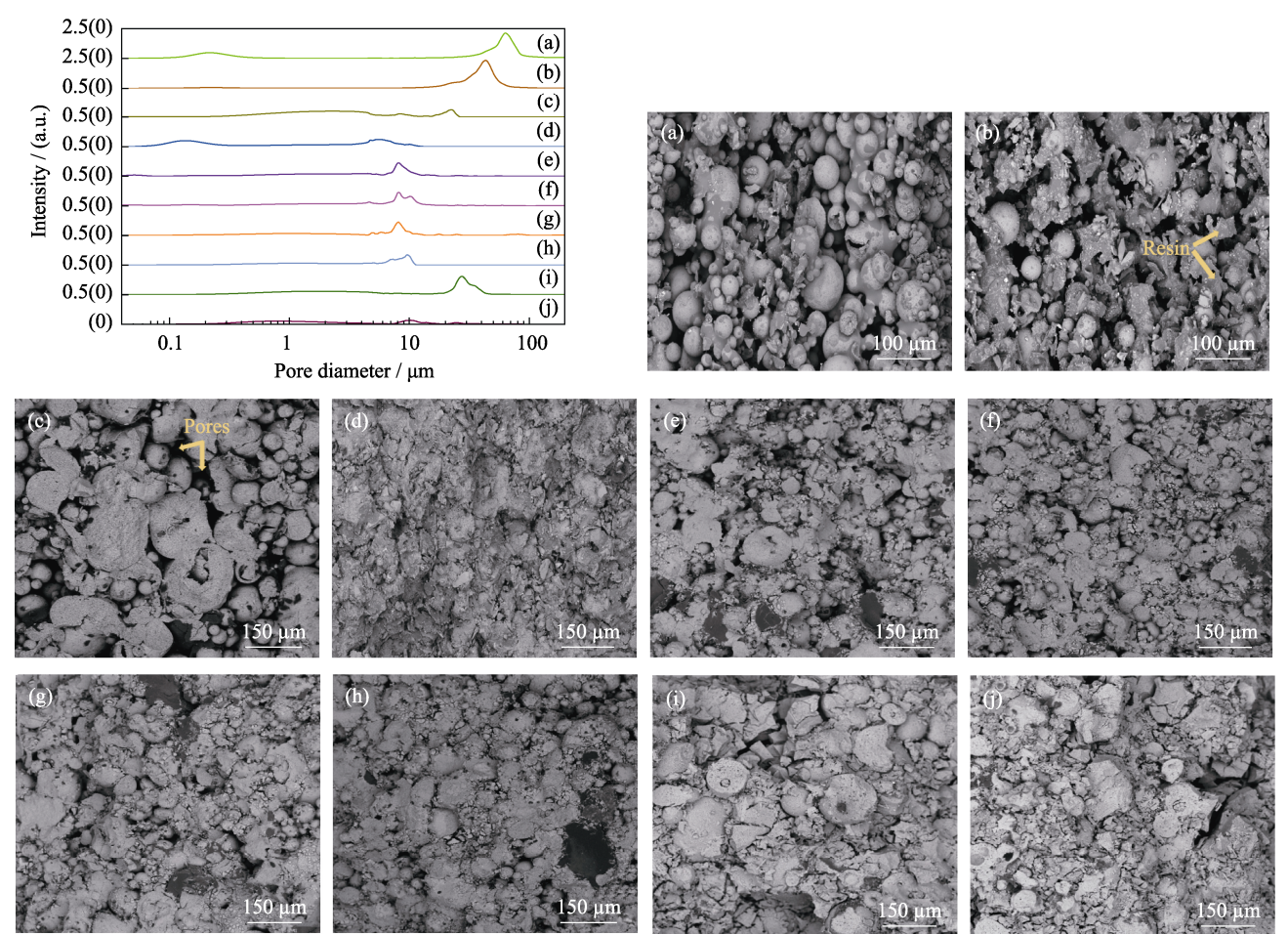


图 3 样品的孔径分布及对应 SEM 照片

Fig. 3 Pore size distribution and corresponding SEM images of the samples
 $D_{50}=82\text{ }\mu\text{m}$ system: (a) SLS, (c) CIP, (e) CIP-PIP-1, (g) CIP-PIP-2, (i) PIP-4
Graded system: (b) SLS, (d) CIP, (f) CIP-PIP-1, (h) CIP-PIP-2, (j) PIP-4

选取致密度最高的样品做收缩测试,如图 4 所示,级配 CIP-PIP-2-SSiC 烧结体的 X、Y 轴收缩率均低于 6.5%,Z 轴收缩率为 13.6%;而 $D_{50}=82\text{ }\mu\text{m}$ 体系 CIP-PIP-2-SSiC 烧结体的 X、Y 轴收缩率均为 7.5%,

Z 轴收缩率为 16.5%。由此可见,颗粒级配有 利于 制备低收缩率 SiC 陶瓷制品,避免了大尺寸陶瓷部件在烧结过程中变形或开裂。
从固相烧结 SiC 陶瓷的微观结构(图 5)来看,

级配 CIP-SSiC 烧结体的缺陷比 $D_{50}=82\text{ }\mu\text{m}$ 体系烧结体更少, $D_{50}=82\text{ }\mu\text{m}$ 体系 CIP-SSiC 烧结体存在更多的孔隙, 颗粒之间结合不紧密, 如图 5(c, d)所示。级配和未级配 CIP-PIP-2-SSiC 体系烧结体均出现局部“皸裂”现象, 这是由 PIP 过程中前驱体挥发收缩所致。表 4 对比了本工作与已报道文献的 SiC 陶瓷的致密度和抗弯强度, 可以看出级配体系在制备高致密及高强度的 SiC 陶瓷方面有着显著的优势。

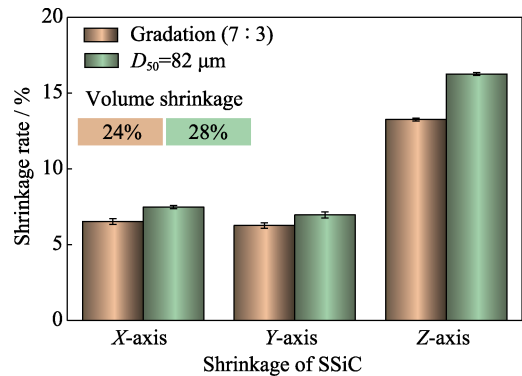


图 4 级配和 $D_{50}=82\text{ }\mu\text{m}$ 体系 CIP-PIP-2-SSiC 烧结体的 X、Y、Z 轴收缩率

Fig. 4 X, Y, and Z-axis shrinkage rate of CIP-PIP-2-SSiC for gradation and $D_{50}=82\text{ }\mu\text{m}$ systems

Colorful figure is available on website

表 4 本工作制备的 SiC 陶瓷致密度和抗弯强度与文献报道对比

Table 4 Comparison of densities and flexural strengths of SiC ceramics prepared in this work with literature reports

Sample	Bulk density / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Open porosity/%	Flexural strength/MPa	Ref.
CIP-SSiC	2.67	6.37	136.8	This work
PIP-4-SSiC	2.29	20.2	59.6	
CIP-SSiC	—	7.02	56.2	[20]
CIP	2.12	33.88	59.47	[21]
PIP-7	—	10	20	[22]
PIP-8	2.45	5.05	152.6	[23]

由于 SLS 打印成型坯体在 CIP 过程中容易出现各向异性收缩而导致坯体开裂, 且 CIP 工艺无法处理复杂空腔结构, 研究采用多次重复 PIP 结合常压固相烧结的方法制备高致密的 SiC 陶瓷。如图 3(i, j)所示, PIP-4 坯体的孔径分布和 CIP-PIP-2 坯体相差不大, 且颗粒之间堆积紧密, 没有较大的孔隙缺陷, 多次 PIP 可替代 CIP 致密。级配 PIP-4-SSiC 烧结体的体积密度为 2.29 g/cm^3 , 开气孔率为 20.2%, 与 CIP-SSiC 烧结体的性能存在差距, 但级配 PIP-4-SSiC 烧结体的微观形貌更加丰富, 出现连续板状的 SiC 晶粒, 如图 5(h)所示, 这可能是高温下前驱体不断晶化生长所致。

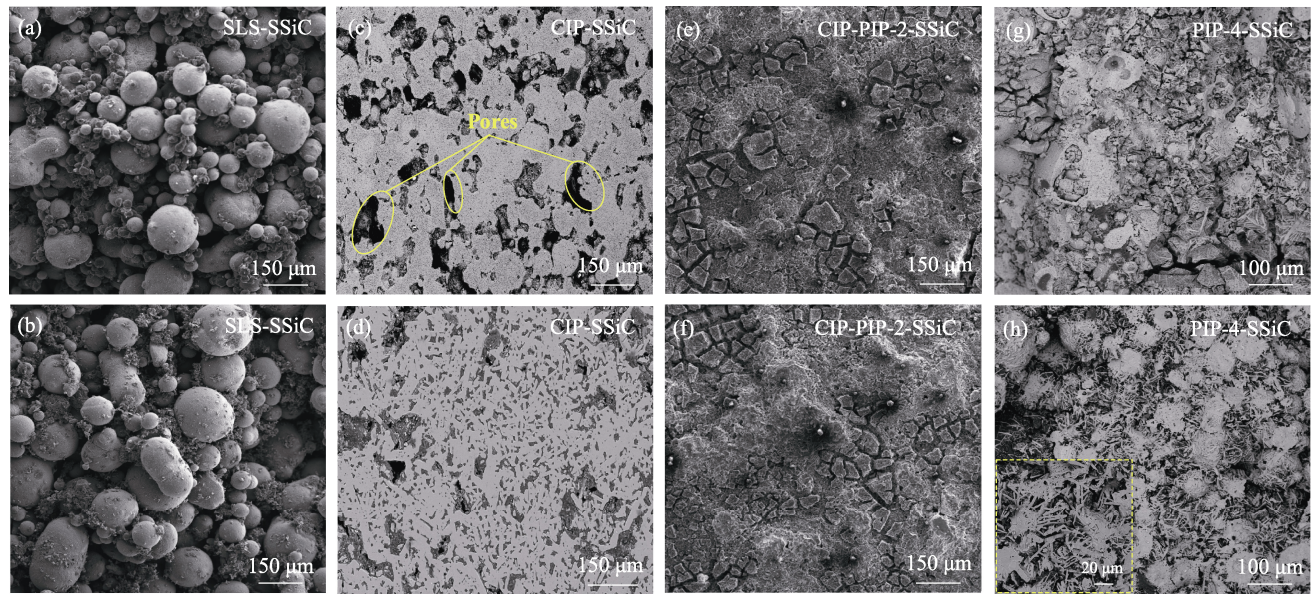


图 5 各阶段烧结体 SEM 照片

Fig. 5 SEM images of sintered bodies in each stage

$D_{50}=82\text{ }\mu\text{m}$ system: (a) SLS-SSiC, (c) CIP-SSiC, (e) CIP-PIP-2-SSiC, (g) PIP-4-SSiC
Graded system: (b) SLS-SSiC, (d) CIP-SSiC, (f) CIP-PIP-2-SSiC, (h) PIP-4-SSiC

3 结论

在相同 SLS 打印参数下, 级配体系成型坯体的

体积密度和抗弯强度比中位径 $82\text{ }\mu\text{m}$ 未级配体系均提升 20% 以上, 成型坯体体积密度最高为 1.25 g/cm^3 , 中位径 $82\text{ }\mu\text{m}$ 未级配体系 CIP 后常压固相烧结体的相对致密度仅为 89%, 烧结致密化困难, 而级配体

系烧结体的相对致密度达到了 93.63%，且缺陷更少，晶粒之间结合更为紧密。级配有利于制备收缩率更低的固相烧结 SiC 陶瓷，级配后的 CIP-PIP-2-SSiC 烧结体的 X、Y 轴收缩率均低于 6.5%，Z 轴收缩率为 13.6%，优于未级配体系(X、Y 轴收缩率均为 7.5%，Z 轴收缩率为 16.5%)。

级配体系 PIP-4-SSiC 烧结体的体积密度为 2.29 g/cm^3 ，开气孔率为 20.2%，与 CIP-SSiC 烧结体的性能存在差距，但 PIP 工艺使得烧结体的微观形貌更加丰富，基体出现连续堆积的板状 SiC 晶粒。

参考文献:

- [1] KOYANAGI T, TERRANI K, HARRISON S, *et al.* Additive manufacturing of silicon carbide for nuclear applications. *Journal of Nuclear Materials*, 2021, **543**: 152577.
- [2] WANG X, GAO X, ZHANG Z, *et al.* Advances in modifications and high-temperature applications of silicon carbide ceramic matrix composites in aerospace: a focused review. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, **41(9)**: 4671.
- [3] SINGH S, RATHI K, PAL K. Synthesis, characterization of graphene oxide wrapped silicon carbide for excellent mechanical and damping performance for aerospace application. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, **740**: 436.
- [4] 魏华阳, 赵小波, 徐鸿照, 等. 固含量对凝胶注模成型碳化硅陶瓷性能的影响. *现代技术陶瓷*, 2016, **37(4)**: 296.
- [5] 王阳阳, 贾晨, 徐敏, 等. 注浆成型碳化硅陶瓷材料成型工艺研究. *佛山陶瓷*, 2023, **33(10)**: 23.
- [6] WANG Y, CHENG Y, CHEN Y, *et al.* Lattice-structured SiC ceramics obtained via 3D printing, gel casting, and gaseous silicon infiltration sintering. *Ceramics International*, 2022, **48(5)**: 6488.
- [7] 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.
- [8] BAI X, DING G, ZHANG K, *et al.* Stereolithography additive manufacturing and sintering approaches of SiC ceramics. *Open Ceramics*, 2021, **5**: 100046.
- [9] HASSANIN H, ESSA K, ELSHAER A, *et al.* Micro-fabrication of ceramics: additive manufacturing and conventional technologies. *Journal of Advanced Ceramics*, 2021, **10(1)**: 1.
- [10] WANG K, YIN J, CHEN X, *et al.* Microstructure and properties of liquid phase sintered SiC ceramics fabricated via selective laser printing and precursor impregnation and pyrolysis. *Ceramics International*, 2024, **50(3)**: 4315.
- [11] WANG K, YIN J, CHEN X, *et al.* Advances on direct selective laser printing of ceramics: an overview. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, **975**: 172821.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] LI H, LIU Y, LIU Y, *et al.* Influence of sintering temperature and CVI time on mechanical properties of 3D-printed alumina ceramics. *Materials Letters*, 2021, **285**: 129096.
- [15] JIN L, ZHANG K, XU T, *et al.* The fabrication and mechanical properties of SiC/SiC composites prepared by SLS combined with PIP. *Ceramics International*, 2018, **44(17)**: 20992.
- [16] ZHONG H, WANG Z, ZHOU H, *et al.* Properties and microstructure evolution of Cf/SiC composites fabricated by polymer impregnation and pyrolysis (PIP) with liquid polycarbosilane. *Ceramics International*, 2017, **43(10)**: 7387.
- [17] 张喜飞, 陈定, 顾华志, 等. 碳源对反应烧结碳化硅性能的影响. *硅酸盐通报*, 2024, **43(1)**: 312.
- [18] GU X S, YIN J, WANG K L, *et al.* Effect of particle grading on properties of silicon carbide ceramics by binder jetting printing. *Journal of Inorganic Materials*, 2023, **38(12)**: 1373.
- [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] 夏思婕. 碳化硅粉末激光选区烧结/冷等静压复合工艺及其后处理研究. 武汉: 华中科技大学硕士学位论文, 2016.
- [21] 陈鹏, 朱小刚, 吴甲民, 等. 基于 SLS/CIP 工艺 SiC 陶瓷的制备及其性能. *材料工程*, 2019, **47(3)**: 87.
- [22] PELANCONI M, COLOMBO P, ORTONA A. Additive manufacturing of silicon carbide by selective laser sintering of PA12 powders and polymer infiltration and pyrolysis. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, **41(10)**: 5056.
- [23] 张坤. 基于 SLS 和 PIP 的 SiC_p/SiC 陶瓷基复合材料成型机理及其性能研究. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学博士学位论文, 2021.