

陶瓷铸型粉床增材制造研究进展与应用

周俊杰², 孙志斌², 蒋文明³, 刘生发², 周士翔⁴, 龚小龙², 吴甲民³, 闫春泽³, 刘凯^{1,2}, 史玉升³

(1. 武汉理工大学, 硅酸盐科学与先进建材全国重点实验室, 武汉 430070; 2. 武汉理工大学材料科学与工程学院, 武汉 430070; 3. 华中科技大学材料科学与工程学院, 材料成形与模具技术全国重点实验室, 武汉 430074; 4. 武汉理工大学交通与物流工程学院, 武汉 430063)

摘要: 陶瓷铸型因其热稳定性好、强度高、精度高等优点, 被用于航空航天、能源装备、医疗器械等领域关键复杂铸件的成形加工。当前陶瓷铸型制造主要依赖于模具成形, 复杂结构成形难度大、通常需要拼合组装, 导致研制周期长、拼接处力学性能低等问题。粉床增材制造技术可实现无模整体快速成形, 以此制备复杂高性能陶瓷铸型, 为复杂铸件的短流程制造提供了新途径。本文总结了黏结剂喷射和激光选区烧结两大类粉床增材制造技术在复杂陶瓷铸型成形方面的最新研究进展, 重点阐述了陶瓷粉末材料、打印参数等对陶瓷铸型性能的影响, 以及陶瓷铸型后的性能调控方法, 并介绍了陶瓷铸型粉床增材制造技术的应用情况。最后, 对未来发展方向进行了展望。

关键词: 陶瓷铸型; 增材制造; 铸造; 黏结剂喷射; 激光选区烧结

中图分类号: TQ174.6 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)09-3000-13

网络出版时间: 2026-08-18



陶瓷铸型凭借热稳定性好、强度高、尺寸精度高优势, 已成为航空航天(涡轮叶片)、能源装备(燃气轮机叶片)等领域精密铸件成形的重要部件^[1, 2]。陶瓷铸型包括陶瓷型壳与陶瓷型芯, 陶瓷型壳负责约束铸件外轮廓形态, 陶瓷型芯用于成形铸件的空腔结构, 陶瓷铸型的性能与精度决定了铸件的成形质量^[3]。

随着高端装备领域精密铸件向轻量化、复杂化和集成化方向发展, 对陶瓷铸型的结构与性能提出了更高要求, 而当前传统工艺, 如注射成型^[4]、压制成型^[5]、凝胶注模^[6]等技术, 主要依赖模具, 难以整体成形复杂高性能陶瓷铸型, 通常需要拼接组合, 导致铸件的制造成本高、效率低。

增材制造技术通过“分层离散-逐层叠加”的原理实现三维结构成形, 可无模快速制造复杂陶瓷铸型^[7]。其中, 粉床增材制造技术因材料利用率高、无须支撑、成形效率高, 在复杂陶瓷铸型的整体快

速制造中具有广泛的应用前景, 主要包括黏结剂喷射增材制造(BJAM)^[8]和激光选区烧结(SLS)^[9] 2 种工艺, 2 种粉床增材制造技术原理如图 1 所示。

本文系统综述了黏结剂喷射与激光选区烧结 2 大类粉床增材制造技术在复杂陶瓷铸型成形方面的最新研究进展, 重点探讨了粉末材料、打印参数对陶瓷铸型性能的影响, 总结了陶瓷铸型的后处理性能调控方法, 并介绍了陶瓷铸型粉床增材制造技术的应用进展, 最后对其未来发展趋势做出了展望。

1 黏结剂喷射增材制造

BJAM 作为粉床增材制造技术中应用较早的工艺之一, 凭借成形效率高、材料适应性广、设备成本相对较低等优势, 在复杂陶瓷铸型制造领域展现出显著潜力。同时, BJAM 无须额外支撑结构, 适合复杂陶瓷铸型的整体制造^[10]。

收稿日期: 2026-02-28。 修订日期: 2026-03-16。

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(2021YFB3703100); 2023 年湖北省重大攻关项目(JD)(2023BAA023); 湖北省自然科学基金面上项目(2025AFB457); 中南大学粉末冶金全国重点实验室开放课题(Sklpm-KF-2025008)。

第一作者: 周俊杰(2001—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 刘凯(1987—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2026-02-28. Revised date: 2026-03-16.

First author: ZHOU Jiajie (2001—), male, Master candidate.

E-mail: jiajiezhou2001@163.com

Correspondent author: LIU Kai (1987—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: victor_liu@whut.edu.cn

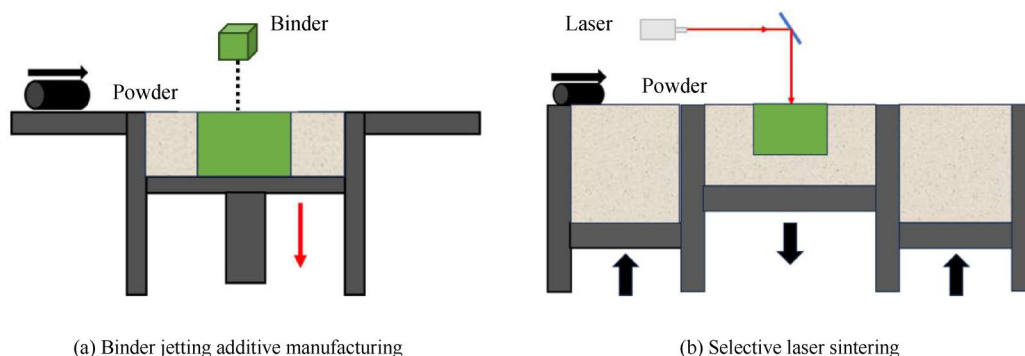


图 1 粉床增材制造技术原理
Fig. 1 Powder bed additive manufacturing technology principle

1.1 粉末材料对陶瓷铸型性能的影响

黏结剂喷射工艺中, 陶瓷铸型的粉末材料需通过协同作用满足铺粉、黏结及烧结等要求, 主要分为陶瓷粉体和添加剂材料。

作为陶瓷铸型的主体材料, 陶瓷粉体对陶瓷铸型的成形和力学性能有较大的影响。目前, BJAM 成形陶瓷铸型的陶瓷粉体材料研究较多的是氧化铝(Al_2O_3)、氧化钙(CaO)等^[11, 12]。 Al_2O_3 陶瓷铸型以 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 为主要材料, 具有较高的热化学稳定性^[13], BJAM 打印 Al_2O_3 陶瓷铸型的粉末平均粒径通常为 $10\sim 50\ \mu\text{m}$, 烧结温度较高; 另外, Al_2O_3 陶瓷型芯在常温常压下不易与酸碱发生反应, 导致其溶出性较差^[14]。与 Al_2O_3 陶瓷铸型相比, CaO 陶瓷铸型凭借出色的水溶溃散性得到国内外学者的广泛关注, 然而, CaO 较强的吸湿特性导致 CaO 在空气中易与水蒸气反应生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 导致体积膨胀、粉末结块, 影响铺粉均匀性和坯体精度^[15, 16]。为了解决 CaO 在打印过程中的吸湿性问题, 通常将 CaCO_3 作为原料^[12]进行打印, 然而 CaCO_3 陶瓷铸型烧结收缩较大^[17]。目前, 单一粉末体系制备的陶瓷型芯存在烧结温度高、力学性能低、尺寸收缩大等问题, 通常需要加入添加剂作为陶瓷铸型的辅助成分, 改善陶瓷铸型性能。

添加剂常见类型包括烧结助剂(纳米 Al_2O_3 、 SiO_2 、 TiO_2 等)^[18-21]、收缩补偿剂(Al 粉、 SiO_2 等)^[22, 23]。图 2 为不同添加剂对陶瓷铸型性能的影响, 通过引入不同功能的添加剂, 可优化粉末材料的烧结活性, 调节孔隙率与力学性能。Yu 等^[18]使用 BJAM 打印掺杂 30% 纳米 Al_2O_3 的 $40\ \mu\text{m}$ Al_2O_3 粉末, 并在 $1480\ ^\circ\text{C}$ 烧结, 得到了硬度(H_V)为 $2.17\ \text{MPa}$ 的 Al_2O_3 陶瓷。Yu 等^[19]将 $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-MgO-SiO}_2$ 用作烧结助剂, 通过 BJAM 技术制备 Al_2O_3 陶瓷, 发现

$\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-MgO-SiO}_2$ 烧结助剂的含量影响所制备的 Al_2O_3 陶瓷的烧结性能, 在 30% 添加剂和 $1500\ ^\circ\text{C}$ 条件下烧结, 陶瓷样品沿 Z 轴的收缩率达 37%, 样品的抗压强度达到最大值 $58.7\ \text{MPa}$ 。Huang 等^[20]在 Al_2O_3 粉末中加入 6% (质量分数) 的氧化锆基碳酸盐(ZBC), 使用 BJAM 成功打印了多孔 Al_2O_3 陶瓷坯体, 在 $1450\ ^\circ\text{C}$ 烧结过程中 ZBC 生成的 ZrO_2 沉积在 Al_2O_3 颗粒间隙中, 起到致密作用, 其弯曲强度达到 $75.2\ \text{MPa}$, 孔隙率为 40.4%, 尺寸精度 $<10\%$ 。Yu 等^[22]将不同质量分数的 Al 粉加入 CaO 陶瓷型芯中, 随着 Al 粉含量的增加, Al 粉通过一系列反应产生的体积膨胀, 显著降低了陶瓷型芯的烧结收缩率。赵巍等^[21]采用 BJAM 成功制备了含固-液相烧结助剂 CuO-TiO_2 的 Al_2O_3 陶瓷型芯, 当 CuO-TiO_2 含量为 5.0% 时, 得到最佳弯曲强度和孔隙率, 分别为 $29.40\ \text{MPa}$ 和 43.76%。Qin 等^[24]向氧化钇(Y_2O_3)中掺杂 5% 钛酸钙粉末, 成功制备了弯曲强度为 $34.03\ \text{MPa}$ 、孔隙率为 33.52%、表面粗糙度为 $5.04\ \mu\text{m}$ 的 Y_2O_3 陶瓷, 研究表明, 钛酸钙的掺杂显著提高了 Y_2O_3 陶瓷的烧结性能。

BJAM 陶瓷铸型粉末材料研究以 Al_2O_3 和 CaO 为主体, 通过系统设计添加剂的成分与引入方式, 可调节粉末体系的工艺适应性, 从而在保证一定孔隙结构的前提下, 协同提升陶瓷铸型的力学性能。

1.2 BJAM 打印参数对陶瓷铸型性能的影响

陶瓷铸型性能除了受陶瓷粉体材料的影响外, 还与打印参数密切相关。BJAM 成形陶瓷铸型主要的打印参数包括黏结剂饱和度和打印层厚^[8, 25]。黏结剂饱和度影响粉末颗粒间的结合强度, 而打印层厚则与成形精度、表面质量及制造效率紧密相关。为系统对比不同参数组合下陶瓷坯体的性能表现, 表 1 汇总了相关研究中打印参数对坯体弯曲强度的影响。

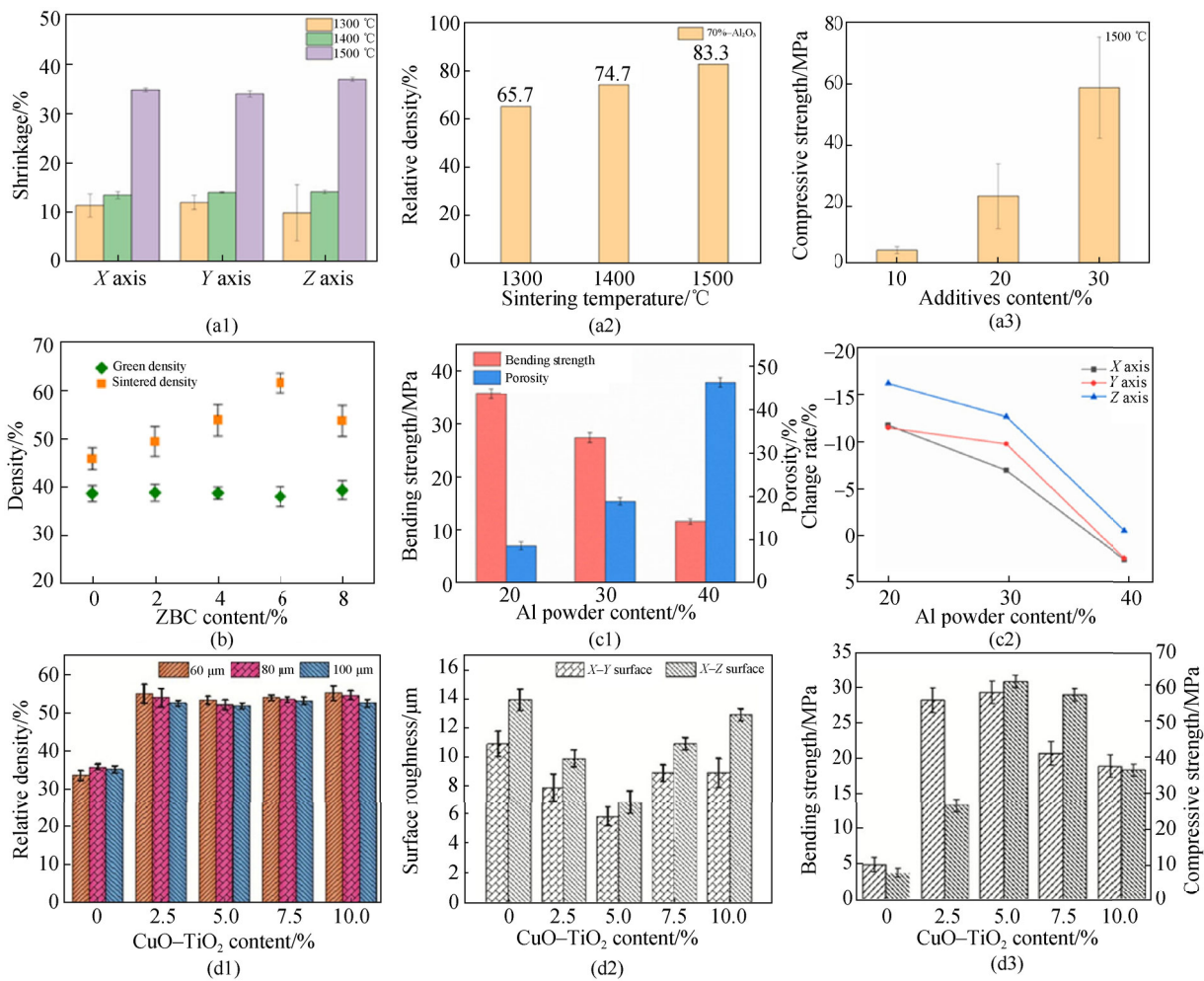


图 2 不同添加剂对陶瓷铸型性能的影响: (a1)~(a3) $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-MgO-SiO}_2$, (b) 碱式碳酸锆, (c1, c2) Al 粉, (d1)~(d3) CuO-TiO_2 ^[18-22]
Fig. 2 Effect of different additives on the properties of ceramic mold: (a1)~(a3) $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-MgO-SiO}_2$, (b) zirconium basic carbonate, (c1, c2) Al powder, (d1)~(d3) CuO-TiO_2 ^[18-22]

表 1 BJAM 打印参数对陶瓷坯体性能的影响
Table 1 Influence of BJAM printing parameters on the properties of ceramic green body

Powder materials	Binder type	Binder saturation/%	Thickness/ μm	Green body bending strength/MPa	Reference
CaO-CaCO_3	Alcohol-based	130	100	2.28	[12]
Al_2O_3	Water-based	100	100		[20]
Al_2O_3	Water-based		60		[21]
Y_2O_3	Water-based		100		[24]
Al_2O_3	Alcohol-based	100	50	2.25	[26]
				2.00	[30]
Na_2CO_3	Alcohol-based	120	100	0.41	[31]
Al_2O_3	Water-based		100		[32]
Al_2O_3	Alcohol-based	120	100		[33]

Peng 等^[26]围绕 BJAM 的打印参数进行了实验,发现层厚为 50 μm 且黏结剂饱和度为 100% 的 Al_2O_3 陶瓷壳坯体的性能最好,弯曲强度为 2.25 MPa。Zhao 等^[27]通过 BJAM 制备了纯 Al_2O_3 和掺杂 $\text{Al}_2\text{O}_3(95\%\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}4\%\text{TiO}_2\text{-}1\%\text{CuO})$ 陶瓷型芯,系统

地研究了层厚对陶瓷型芯性能的影响,随着层厚从 50 μm 增加到 100 μm ,纯 Al_2O_3 和掺杂 Al_2O_3 陶瓷坯体的弯曲强度值分别从 1.23 MPa 降至 1.13 MPa 和从 1.87 MPa 降至 1.55 MPa,纯 Al_2O_3 陶瓷坯体的孔隙率从 67.87% $\pm$ 0.85% 逐渐增加到 70.13% $\pm$ 0.81%,掺

杂 Al_2O_3 陶瓷坯体的孔隙率从 $61.70\%\pm 0.64\%$ 增加到 $65.73\%\pm 0.75\%$ 。Wang 等^[28]采用了响应面方法(RSM)优化 BJAM 打印参数,通过 RSM 获得的最佳打印层厚为 $250\mu\text{m}$ 。Zhao 等^[29]以 $100\mu\text{m}$ 的层厚和 35% 的黏结剂饱和度制备了尺寸稳定的 Y_2O_3 陶瓷型芯坯体,在 1700°C 烧结后型芯表面粗糙度低于 $10\mu\text{m}$,弯曲强度高达 23.86MPa ,尺寸收缩率 $<12\%$ 。

在一定范围内,增加黏结剂饱和度可提高粉末颗粒间结合力,进而提升陶瓷坯体性能,然而黏结剂饱和度过大,黏结剂向周围孔隙过度渗透,造成尺寸膨胀和边缘模糊,会严重影响陶瓷部件的精度和强度^[34]。层厚的选择一般与陶瓷粉末的粒径有关,低层厚可获得较好的力学性能,但会降低打印效率;高层厚可提高制造效率,但会导致表面粗糙度差。

1.3 陶瓷铸型的后处理性能调控

采用 BJAM 工艺成形坯体后,通常采用后处理工艺进行性能调控,实现陶瓷铸型强度和精度的提升。目前,陶瓷铸型后处理性能调控方法主要包括

烧结工艺优化^[35-36]和浸渗处理^[37-38]。

图 3 列出不同烧结温度对 BJAM 成形 Al_2O_3 陶瓷铸型性能与精度的影响。彭磊^[30]通过 BJAM 制备了 Al_2O_3 陶瓷型壳,研究了不同烧结温度对陶瓷型壳强度和表面精度的影响。 Al_2O_3 陶瓷型壳的弯曲强度随着烧结温度的升高而逐渐增大,烧结收缩率升高,表面精度有所降低。当烧结温度为 1300°C 时,型壳试样的弯曲强度为 21.6MPa ,X、Y、Z 轴的烧结收缩率依次为 2.08%、2.33%、2.08%。Zhao 等^[31]使用 BJAM 技术制造了水溶性盐基陶瓷型芯,并研究了烧结温度对样品性能的影响,发现随着烧结温度的升高,样品的弯曲强度最初迅速增加,随后缓慢增加,相对密度的变化与弯曲强度的变化一致。当烧结温度从 740°C 升至 760°C 时,样品的弯曲强度从 1.67MPa 增加到 62.38MPa ,相对密度从 29.64% 增加到 96.87%。Zhao 等^[32]探讨了烧结温度对 BJAM 成形 Al_2O_3 陶瓷型芯烧结收缩率和断裂强度的影响,发现在 1550°C 条件下烧结可制备出具有合适孔隙率和力学性能的 Al_2O_3 陶瓷型芯。

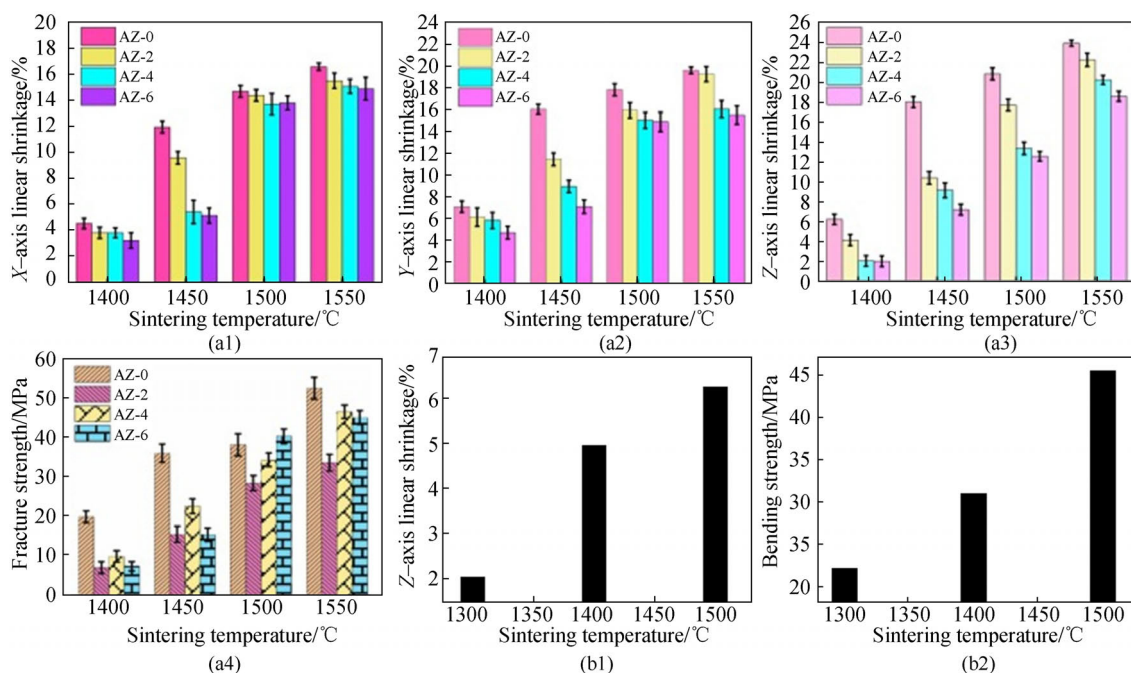


图 3 烧结温度对 Al_2O_3 陶瓷铸型性能与精度的影响: (a1)~(a4) $1400\sim 1550^\circ\text{C}$, (b1, b2) $1300\sim 1500^\circ\text{C}$ ^[30, 32]

Fig. 3 Effect of sintering temperature on properties and precision of Al_2O_3 ceramic mold: (a1)~(a4) $1400\sim 1550^\circ\text{C}$, (b1, b2) $1300\sim 1500^\circ\text{C}$ ^[30, 32]

陶瓷粉末烧结温度高、烧结活性低以及烧结后陶瓷铸型力学强度难以满足铸造服役要求,需要通过浸渗来改善烧结工艺参数和调控陶瓷铸型的力学性能^[39-40],其中浸渗时间和真空度是影响浸渗效果的 2 个重要因素(图 4)。常用的浸渗液有水玻璃、硅溶胶、纳米分散液、 TiO_2 溶胶等^[12, 33, 41, 42]。牛言

清等^[12]以重质碳酸钙作为原料,采用 BJAM 制备了可溶性陶瓷型芯,对比了纳米 TiO_2 分散液、纳米 Y_2O_3 分散液、纳米 ZrO_2 分散液、纳米 SiO_2 分散液浸渗后陶瓷型芯的力学性能和尺寸精度,发现浸渗纳米 ZrO_2 分散液的陶瓷型芯坯体烧结后可以生成 CaZrO_3 ,对陶瓷型芯的性能和精度有较大提升。

Zhao 等^[32]使用真空浸渗工艺将 30%(质量分数)硅酸钠溶液渗透并烧结得到具有合适气孔率和改善力学性能的 Al_2O_3 陶瓷型芯, 孔隙率为 21.4%, 弯曲强度约为 52.7 MPa。Yang 等^[33]通过真空浸渗 TiO_2 溶胶, 提高 BJAM 成形 Al_2O_3 陶瓷的性能, 弯曲强度达到 113.79 MPa。赵巍等^[43]引入不同质

量分数 Si_3N_4 (0~20%)和真空浸渗硅溶胶实现 Al_2O_3 陶瓷型芯性能的提升, 发现当 Si_3N_4 质量分数为 10%时, 可以显著提升陶瓷型芯的综合性能, 孔隙率和弯曲强度分别达到 51.62%和 21.2 MPa, 但 X、Y 和 Z 轴尺寸收缩率相应增大到 4.55%、5.36%和 6.21%。

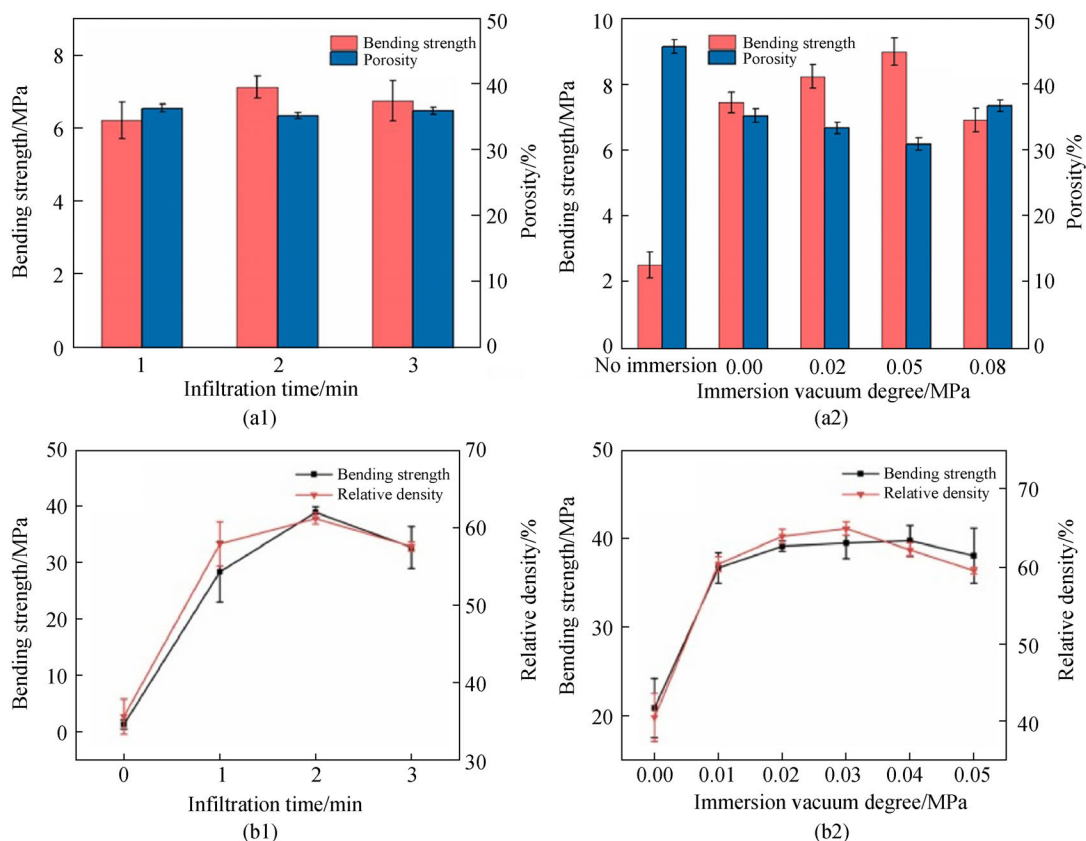


图4 浸渗时间和浸渗真空度对陶瓷铸型性能的影响规律: (a1, a2)纳米 ZrO_2 分散液^[12], (b1, b2) TiO_2 溶胶^[33]

Fig. 4 Influence of infiltration time and immersion vacuum degree on properties of ceramic mold : (a1, a2) nano- ZrO_2 dispersion^[12], (b1, b2) TiO_2 sol^[33]

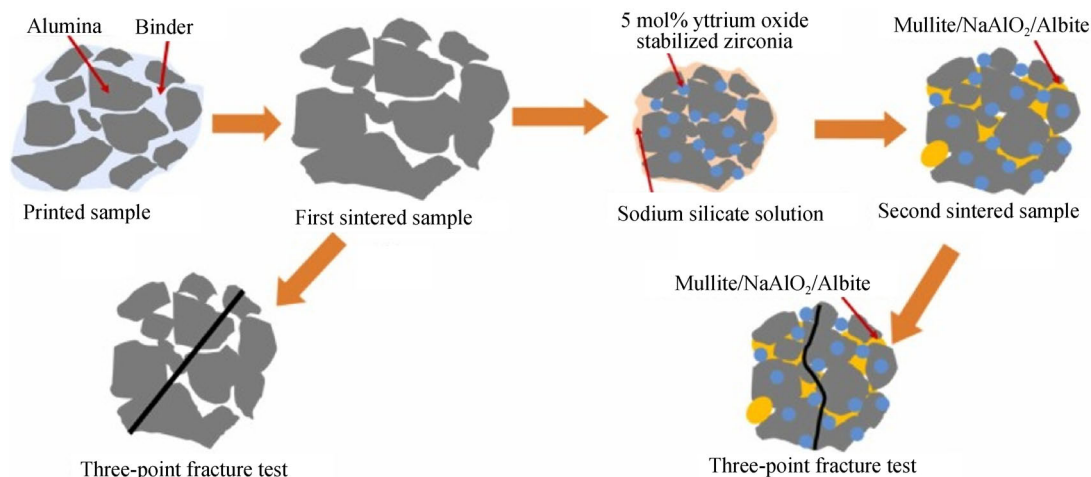
图5为在采用BJAM工艺成形的 Al_2O_3 陶瓷坯体中浸渗 $\text{Na}_2\text{O} \cdot 3.2\text{SiO}_2$ 溶液和YSZ纳米粉末后并烧结的浸渗调控机制, $\text{Na}_2\text{O} \cdot 3.2\text{SiO}_2$ 与 Al_2O_3 发生反应生成莫来石、 NaAlO_2 和长石相, 填充到 Al_2O_3 颗粒的边界或孔隙中, 降低了孔隙率, 提高了 Al_2O_3 陶瓷的弯曲强度, 而YSZ纳米粉末分布在颗粒表面, 在物理层面上提高了 Al_2O_3 陶瓷的韧性^[32]。

烧结是陶瓷铸型获得足够强度和合适孔隙率的关键环节, 而单一烧结面临烧结温度高、收缩率大、孔隙结构难以精确控制等问题, 导致铸型在性能方面仍存在不足^[44]。为此, 常需辅以浸渗处理, 通过浸渗液填充孔隙并与基体材料发生反应, 降低陶瓷铸型的脆性, 提高其弯曲强度和烧结收缩率, 但不可避免地会降低铸型孔隙率, 从而降低了型芯浸出

效率, 因此需要调控浸渗时间和浸渗固含量来平衡陶瓷铸型的孔隙率与弯曲强度。另外, BJAM打印陶瓷铸型过程中可在黏结剂中添加微纳米强化相, 不但可以解决纳米强化相在基体粉末中分布不均匀的问题, 还可省去浸渗工艺, 直接进行烧结^[45–47]。

2 激光选区烧结增材制造

激光选区烧结技术是通过高能激光束选择性作用于陶瓷粉末层, 利用激光能量使粉末颗粒之间的黏结相熔融, 实现逐层成形的粉床增材制造技术^[48]。与黏结剂喷射不同, SLS无须额外添加液态黏结剂, 直接通过激光能量实现粉末的局部结合, 成形的坯体具有更高的初始致密度和结构稳定性, 尤其适合用于对坯体强度要求较高的复杂陶瓷铸型制造^[49]。

图 5 Al_2O_3 陶瓷浸渗调控机制^[32]Fig. 5 Al_2O_3 ceramic infiltration regulation mechanism^[32]

2.1 粉末材料对陶瓷铸型性能的影响

SLS 成形陶瓷铸型依赖于激光与粉末的相互作用,且单一陶瓷材料本身存在熔点高、激光吸收性差的固有特性,单一陶瓷粉末无法满足需求,因此用于铸型制造的粉末材料由基体陶瓷粉末^[50, 51]、黏结剂^[52, 53]及添加剂^[54, 55]按特定比例混合而成。当前 SLS 打印陶瓷铸型的基体陶瓷粉末大多是 SiO_2 和 Al_2O_3 以及相应的复合粉末,粉末粒径主要为 20~60 μm ,常用 CO_2 激光器(波长 10.6 μm),而且 SiO_2 对该波段的激光吸收率较高,能高效将光能转化为热能,熔化粉末之间的黏结剂,实现颗粒间的连接^[56, 57]。并且 SiO_2 的热膨胀系数较小,打印成型件在激光快速加热和冷却过程中热应力小,不易翘曲开裂,耐火度符合大部分铸造浇铸温度较低的合金^[58]。 Al_2O_3 的热膨胀系数比 SiO_2 高,粉末成本和制备要求比 SiO_2 高,但 Al_2O_3 具有超高耐火度与高温稳定性,在对铸型耐火度、表面光洁度或化学稳定性有较高要求的场合尤为适用^[59]。黏结剂材料主要包括有机黏结剂^[60]和无机黏结剂^[61]:有机黏结剂(酚醛树脂^[62]、环氧树脂^[63]等)通常具有适宜的软化点或熔融温度,在激光辐照下能够快速熔融并润湿陶瓷颗粒表面,冷却后形成有效的颗粒桥接;而无机黏结剂(如碳化硼^[64]、氮化铝^[65]等)在激光作用下

与基体粉末反应可直接形成陶瓷结合相,无须脱脂。在粉末制备过程中,黏结剂主要通过机械混粉^[66]、喷雾造粒^[67]等方式与陶瓷粉末实现均匀复合,可有效改善粉末的流动性、铺粉性能以及激光作用下的烧结成型能力。

SLS 成形陶瓷铸型粉末材料中添加剂的主要目的是改善粉体流动性和抵抗烧结收缩,表 2 汇总了不同添加剂对陶瓷铸型性能的影响。Zheng 等^[54]利用 SLS 制备了添加碳化硼(B_4C)的 SiO_2 陶瓷型芯,由于 B_4C 的氧化,室温弯曲强度从 0% B_4C 含量时的 3.39 MPa 提高到 2%时的 27.35 MPa,线性收缩率增加到 4.61%。周士翔^[68]在 Al_2O_3 粉末中添加了 0.1%气相 SiO_2 助流剂,提高了粉体的松装密度和流动性,并利用 SLS 工艺成功制备出 Al_2O_3 陶瓷型芯-型壳一体铸型。

通过引入添加剂,可以有效改善粉末的铺粉密度与激光吸收率,从而优化坯体质量。同时,添加剂可通过后续反应调控陶瓷铸型坯体烧结行为、调节其孔隙结构,并最终显著提升陶瓷铸型的力学性能、尺寸稳定性及抗蠕变性能。

2.2 SLS 打印参数对陶瓷铸型性能的影响

SLS 打印参数通过调控能量输入(如激光功率、扫描速度等)与能量在粉床中的分布状态(如扫描

表 2 不同添加剂对陶瓷铸型性能的影响

Table 2 Effects of different additives on the properties of ceramic molds

Ceramic matrix powder	Additive in mass	Room temperature bending strength/MPa	Dimensional shrinkage rate/%	Porosity/%	Reference
SiO_2	2% B_4C	27.35	4.61	45.23	[54]
Al_2O_3	0.1%fumed silica	29.84	2.00	45.63	[68]
SiO_2	10% ZrSiO_4	21.17	1.56	26.69	[69]
SiO_2	4% $\text{Al}(\text{OH})_3$	15.23	2.25	31.16	[70]

间距、层厚等), 共同决定着陶瓷铸型坯体的成形性能^[71–74]。

表3汇总了SLS打印参数对陶瓷铸型力学性能和尺寸精度的影响。刘珩^[75]调控 SLS 制备参数, 获得了其对陶瓷坯体性能的影响规律, 发现最优的激光功率、扫描间距、扫描速度和层厚分别为 11 W、130 μm 、2000 mm/s 和 100 μm , 制备的 SiO_2 陶瓷型芯坯体的精度误差低于 300 μm , 弯曲强度为 2.03 MPa。在烧结温度为 1225 $^{\circ}\text{C}$ 时, 弯曲强度达到 7.17 MPa,

孔隙率为 44.58%。Wei 等^[76]通过一系列正交试验确定了 SLS 工艺参数的最佳组合: 激光功率、扫描间距、扫描速度和层厚分别为 8 W、150 μm 、4500 mm/s 和 150 μm , 得到的莫来石陶瓷型壳室温弯曲强度为 99.01 MPa。董晔^[77]设置正交试验参数, 研究了 SLS 工艺参数对 SLS 打印 Al_2O_3 陶瓷坯体试样孔隙率和抗弯强度的影响, 发现试样的抗弯强度随激光功率的变化最为明显, 提高激光能量密度有利于 SLS 坯体抗弯强度的提升。

表3 SLS 打印参数对陶瓷铸型力学性能和尺寸精度的影响

Table 3 Influence of SLS printing parameters on mechanical properties and dimensional accuracy of ceramic molds

Powder materials	Laser power/W	Scanning space/ μm	Scanning speed/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	Thickness/ μm	Bending strength/MPa	Dimensional shrinkage rate/%	Reference
SiO_2	9	70	2000	100	27.35	1.40	[54]
Al_2O_3	12	100	4000	100	29.84	2.00	[68]
SiO_2	9	100	1800	100	21.17	1.56	[69]
SiO_2	11	130	2000	100	7.17	/	[75]
Mullite	8	150	4500	150	99.01	/	[76]
Al_2O_3	30	300	2400	140	12.60	/	[78]

激光功率对陶瓷铸型的力学强度及尺寸精度影响最为显著, 激光功率决定粉末熔融效果, 功率过低会导致粉末表面轻微黏结, 坯体强度不足; 功率过高易引发局部过热, 造成粉末过度熔融或飞溅, 形成气孔、凹坑等缺陷, 这主要源于其决定了粉末颗粒的熔融程度与结合强度。层厚作为影响单层成形质量与层间结合的关键因素, 其重要性仅次于激光功率, 层厚过小会因激光反射导致上层粉末过度烧结, 层厚过大则激光能量难以穿透至层底, 层间结合力弱, 易出现分层。

2.3 陶瓷铸型的后处理性能调控

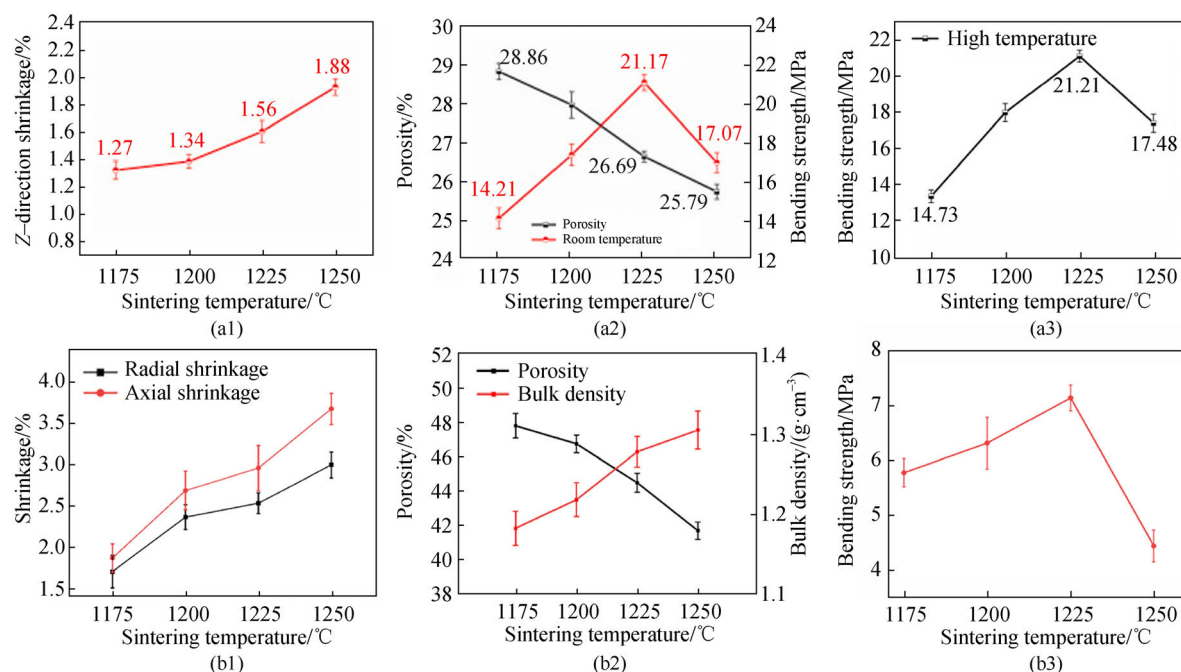
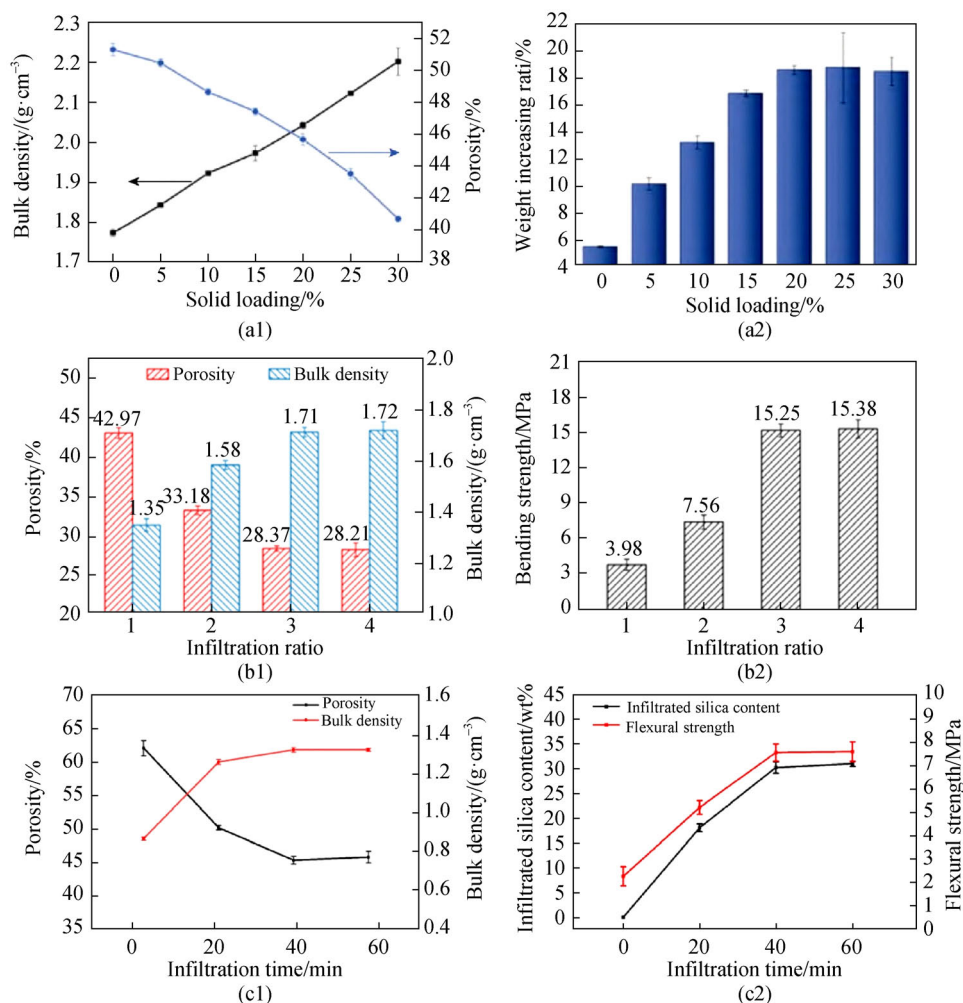
与 1.3 节所述的 BJAM 类似, SLS 成形的陶瓷铸型坯体同样需要通过烧结工艺^[79, 80]和浸渗处理^[81, 82]来获得满足铸造要求的综合性能。相较于 BJAM 工艺, SLS 成型陶瓷坯体力学强度较高, 但由于激光的瞬时高温与随后的快速冷却易造成局部热应力集中, 容易产生微裂纹、空隙等层间缺陷, 其浸渗工艺更侧重于消除层间缺陷, 提高整体均匀性。

图6为不同烧结温度对SLS成形陶瓷铸型性能与精度的影响规律。由图6可见, Chen 等^[83]通过 SLS 制备了 Al_2O_3 陶瓷铸型坯体, 烧结后得到了烧结收缩率为 1.51%~2.03%、孔隙率为 30.82%和室温弯曲强度为 13.03 MPa 的陶瓷铸型。Zhang 等^[69]通过 SLS 技术制备了 SiO_2 陶瓷型芯, 并探究了烧结温度对陶瓷铸型尺寸收缩率和力学性能的影响, 当最

终烧结温度为 1225 $^{\circ}\text{C}$ 时, 由于烧结颈的增强和低孔隙率, 室温和高温弯曲强度分别达到 21.17 MPa 和 21.21 MPa。刘珩^[75]使用 SLS 和真空浸渗技术制备了 SiO_2 陶瓷型芯, 随着烧结温度的升高, 型芯收缩率逐步增加, 孔隙率下降, 优化后的烧结温度为 1225 $^{\circ}\text{C}$, 陶瓷型芯的孔隙率为 44.58%, 弯曲强度为 7.17 MPa。

周士翔等^[68]采用 SLS 一体化成形 Al_2O_3 型芯/型壳铸型坯体, 经真空浸渗硅溶胶和 1600 $^{\circ}\text{C}$ 烧结后 X/Y 轴方向收缩率均为 1.5%, Z 轴收缩率约为 2.0%, 室温和 1550 $^{\circ}\text{C}$ 高温弯曲强度达 29.84 MPa 和 18.10 MPa (图7)。张洁^[84]利用 SLS 和真空浸渗技术制备了 SiO_2 陶瓷型芯, 随着浸渗次数从 1 次增加到 3 次, 2 次浸渗增重从 26.54%增加到 60.18%, 有效降低了孔隙率, 室温弯曲强度从 3.98 MPa 增加到 15.25 MPa。Liu 等^[85]系统地探讨了真空浸渗时间对 SLS 打印 SiO_2 陶瓷型芯结构和性能的影响, 随着浸渗时间的延长, 层间剥离现象有所改善。当浸渗时间为 40 min 时, SiO_2 陶瓷的收缩率为 3.17%, 气孔率为 45.28%, 弯曲强度为 7.52 MPa。

SLS 成形陶瓷铸型的后处理通过烧结与浸渗的协同调控, 能够在控制烧结收缩的同时显著提升力学性能。由于激光烧结过程中存在黏结剂局部熔化区域, 在坯体中形成封闭孔隙或不完全连通的孔道, 浸渗液渗透阻力较大, 通常需要更高的浸渗真空度和更长的浸渗时间才能确保浸渗液充分填充孔隙。

图 6 烧结温度对 SiO₂ 陶瓷铸型性能与精度的影响(1175~1250 °C)^[69, 75]Fig. 6 Effect of sintering temperature on properties and precision of SiO₂ ceramic mold(1175–1250 °C)^[69, 75]图 7 浸渗参数对陶瓷铸型性能的影响规律: (a1, a2)浸渗固含量, (b1, b2)浸渗次数, (c1, c2)浸渗时间^[68, 84, 85]Fig. 7 Influence of various factors on the properties of ceramic molds: (a1, a2) infiltration liquid solid content, (b1, b2) infiltration liquid ratio, (c1, c2) infiltration time^[68, 84, 85]

3 粉床增材制造技术成形陶瓷铸型应用

粉床增材制造技术凭借无模快速成形、复杂型腔结构适配性强等优势,制备的陶瓷铸型兼具高强度、高尺寸精度与高温稳定性,在陶瓷铸型制造中展现出广泛的应用潜力。BJAM 技术因其高效率、低成本和无须支撑结构的特点,特别适用于大型、复杂内腔结构的陶瓷型芯与型壳的快速制造。而 SLS 技术通过高能激光直接烧结陶瓷粉末,坯体初始强度高,适用于复杂薄壁结构和对尺寸精度要求较高的精密铸型。

3.1 黏结剂喷射技术成形陶瓷铸型的应用

BJAM 成形的陶瓷型芯能够精确制备叶片内部冷却通道的复杂结构,显著提升叶片的冷却效率与服役性能。与传统拼合式型芯相比, BJAM 一体化成形的型芯避免了接缝处的强度弱点。图 8 为 BJAM 制备的叶轮型芯和型壳以及叶片型芯和铸件。可见陶瓷型壳的弯曲强度为 21.60 MPa,尺寸收缩率小于 3.0%,表面和侧面精度分别为 6.26、7.38 μm ,满足精密铸造陶瓷型壳使用要求^[30]。

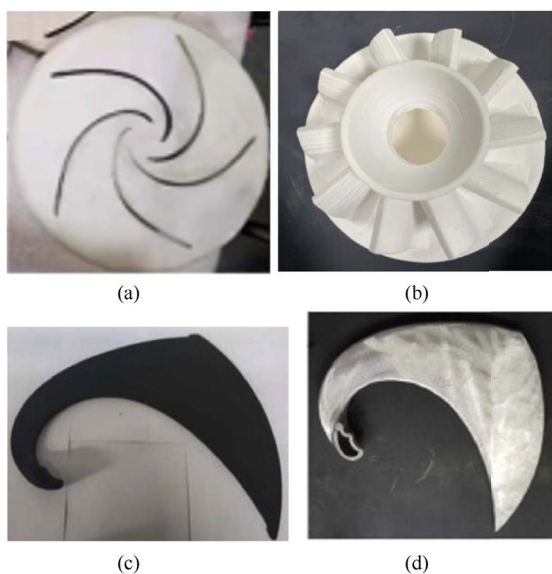


图 8 BJAM 制备的(a) 叶轮型芯、(b) 叶轮型壳、(c) 叶片型芯、(d)叶片铸件^[30, 49, 86]

Fig. 8 BJAM formed(a) Impeller core, (b) Impeller shell, (c) Blade core, (d) Blade casting^[30, 49, 86]

3.2 激光选区烧结技术成形陶瓷铸型的应用

在燃气轮机涡轮叶片制造中, SLS 成形的陶瓷型芯具备优异的高温力学性能和尺寸稳定性,能满足定向凝固或单晶铸造工艺对铸型的高温强度和抗

变形能力的要求。SLS 技术同样可以实现型芯与型壳的一体化制造,进一步简化工艺流程,提高铸件整体一致性。图 9 为 SLS 成形的陶瓷型芯、陶瓷铸型及其铸造的涡轮叶片。陶瓷型芯的弯曲强度达到 21.17 MPa,孔隙率为 26.69%,尺寸收缩率小于 1.5%,高温蠕变变形小于 0.7 mm,能够承受住高温金属液的浇注冲击^[69]。

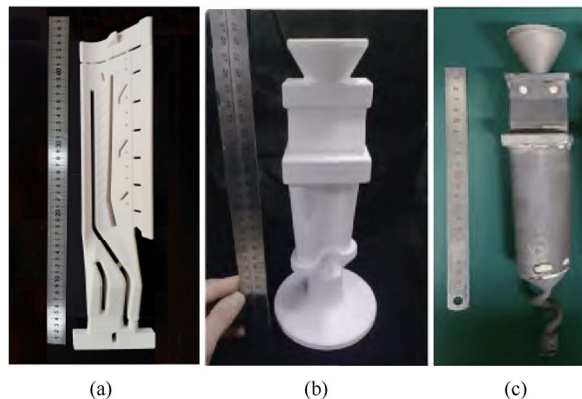


图 9 SLS 成形的(a) 陶瓷型芯、(b) 陶瓷型芯/壳、(c) 涡轮叶片铸件^[68–69]

Fig. 9 SLS formed (a) Ceramic core, (b) Ceramic core/shell, (c) Turbine blade casting^[68–69]

4 结论与展望

粉床增材制造技术为复杂陶瓷铸型的无模具、快速、整体化制造提供了可行的技术路径,在航空航天、能源装备等领域展现出重要的应用价值。本文系统梳理了黏结剂喷射与激光选区烧结 2 类粉床增材制造技术在陶瓷铸型制备中的研究进展,重点分析了粉末材料、打印参数与后处理调控工艺对铸型性能的影响规律。目前,该技术已取得阶段性成果,为进一步推动其在高性能陶瓷铸型制造中的规模化应用,以下 3 个方面值得重点关注。

1) 在陶瓷材料方面,亟须开发增材制造专用粉体与功能化黏结体系。针对 BJAM 工艺,应研制具有良好流动性与级配优化的复合陶瓷粉末,设计多功能黏结剂体系,降低对后处理性能调控的依赖;针对 SLS 工艺,需开发激光吸收率高、烧结活性好的陶瓷/黏结相复合粉材,降低后续烧结难度和提升陶瓷铸型强度。

2) 在成形装备方面,应研发适用于陶瓷铸型多材料一体化成形的专用打印系统与后处理装备。重点突破多材料精确铺粉与输送、陶瓷型芯/型壳同步制造等关键技术,实现复杂结构陶瓷铸型的高精度、高效率一体化成形。

3) 在性能调控方面, 应重点提升陶瓷铸型的高温强度、抗蠕变性与尺寸稳定性。通过材料设计、打印参数调整与后处理工艺优化, 协同调控孔隙率与致密度, 平衡高强度与易脱芯之间的矛盾, 满足高端铸件对陶瓷铸型性能的严苛要求。

参考文献:

- [1] 陈超越, 殷宇豪, 徐松哲, 等. 航空发动机叶片用陶瓷型芯的光固化增材制造研究现状[J]. 航空制造技术, 2022, 65(1): 67–76.
CHEN Chaoyue, YIN Yuhao, XU Songzhe, et al. Aeronaut Manuf Technol, 2022, 65(1): 67–76.
- [2] 刘鸣, 张继聪, 郭文刚, 等. 重型燃气轮机空心导向叶片精密铸造工艺[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(1): 49–52.
LIU Ming, ZHANG Jicong, GUO Wengang, et al. Spec Cast Nonferrous Alloys, 2017, 37(1): 49–52.
- [3] CHEN X, LU G, YAN Q S, et al. Enhancing creep resistance performance in silica-based ceramic core materials through shell-core structure[J]. J Eur Ceram Soc, 2024, 44(14): 116645.
- [4] 王程成, 贺德龙, 鞠梦婷, 等. 注射成型水溶性陶瓷型芯技术[J]. 航空材料学报, 2015, 35(4): 83–95.
WANG Chengcheng, HE Delong, JU Mengting, et al. J Aeronaut Mater, 2015, 35(4): 83–95.
- [5] 朱文杰. 铸造铝合金用水溶性精密陶瓷型芯制备与性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
ZHU Wenjie. Study on preparation and properties of water soluble fine ceramic cores for casting aluminum alloys[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [6] 李奕宁, 鲁中良, 李振发, 等. 空心涡轮叶片凝胶注模陶瓷浆料的设计与制备[J]. 材料科学与工艺, 2013, 21(6): 54–59.
LI Yining, LU Zhongliang, LI Zhenfa, et al. Mater Sci Technol, 2013, 21(6): 54–59.
- [7] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4): 1–4.
LU Bingheng, LI Dichen. Mach Build Autom, 2013, 42(4): 1–4.
- [8] LV X Y, YE F, CHENG L F, et al. Binder jetting of ceramics: Powders, binders, printing parameters, equipment, and post-treatment[J]. Ceram Int, 2019, 45(10): 12609–12624.
- [9] LI C H, HU L, ZOU Y, et al. Fabrication of Al_2O_3 - SiO_2 ceramics through combined selective laser sintering and SiO_2 -sol infiltration[J]. Int J Appl Ceram Technol, 2020, 17(1): 255–263.
- [10] DU W C, HAYES J, MYERS K, et al. Development of a high-temperature Inconel 625 heat exchanger by model design and binder jetting additive manufacturing[J]. Mater Des, 2025, 251: 113333.
- [11] AYOUBI E, KARIMI M, BOZORG M, et al. Multi-response optimization on porosity and mechanical properties of alumina-based ceramic core[J]. Powder Technol, 2025, 465: 121358.
- [12] 牛言清. 微滴喷射粘结成形碳酸钙可溶性陶瓷型芯的性能及精度调控研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
NIU Yanqing. Study on performance and precision control of calcium carbonate soluble ceramic cores by binder jetting [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024.
- [13] 陈晓燕, 肖旅, 余建波, 等. 高温合金空心叶片用陶瓷型芯概述[J]. 铸造, 2016, 65(9): 868–873.
CHEN Xiaoyan, XIAO Lü, YU Jianbo, et al. Foundry, 2016, 65(9): 868–873.
- [14] 罗凌, 芦刚, 严青松, 等. 氧化铝基陶瓷型芯溶失性的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(3): 305–309.
LUO Ling, LU Gang, YAN Qingsong, et al. Spec Cast Nonferrous Alloys, 2021, 41(3): 305–309.
- [15] 梁永和, 吴芸芸, 沈伟英. 氧化钙砂表面改性及其抗水化性能研究[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2008, 31(3): 247–249.
LIANG Yonghe, WU Yunyun, SHEN Weiyang. J Wuhan Univ Sci Technol: Nat Sci Ed, 2008, 31(3): 247–249.
- [16] 胡柏林, 穆英朋, 刘富初, 等. 烧结升温速率对微挤出 3D 打印水溶性氧化钙陶瓷型芯性能的影响[J]. 铸造, 2025, 74(3): 279–287.
HU Bolin, MU Yingpeng, LIU Fuchu, et al. Foundry, 2025, 74(3): 279–287.
- [17] ZHAO H P, YE C S, FAN Z T. 3D printing of calcia-based ceramic core composites[J]. 13th Int Ceram Congr Part B, 2014, 88: 65–69.
- [18] YU T L, ZHAO Z, LI J C. Effects of refined grains and doped nanoparticles on fabricating Al_2O_3 ceramics using binder jetting[J]. Ceram Int, 2024, 50(17): 30533–30540.
- [19] YU T L, ZHAO Z, LI J C. Effect of sintering temperature and sintering additives on the properties of alumina ceramics fabricated by binder jetting[J]. Ceram Int, 2023, 49(6): 9948–9955.
- [20] HUANG S J, YE C S. Preparation and performance of binder jetting porous alumina ceramic[J]. IOP Conf Ser: Mater Sci Eng, 2020, 770(1): 012057.
- [21] 赵巍, 常佳俊, 魏青松, 等. 分层厚度和 CuO - TiO_2 含量对黏结剂喷射成形 Al_2O_3 陶瓷型芯性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(9): 2925–2933.
ZHAO Wei, CHANG Jiajun, WEI Qingsong, et al. J Chin Ceram Soc, 2024, 52(9): 2925–2933.
- [22] YU X P, NIU Y Q, JIANG W M, et al. Significantly improved sintering shrinkage of heavy calcium carbonate ceramic cores by binder jetting using Al powder additive[J]. Ceram Int, 2024, 50(21): 40922–40931.
- [23] YU X P, NIU Y Q, JIANG W M, et al. Novel low-shrinkage and soluble heavy calcium carbonate matrix ceramic cores prepared by binder jetting[J]. Ceram Int, 2025, 51(10): 13403–13411.
- [24] QIN X Y, ZHAO W, ZOU K Q, et al. Sintering behavior and mechanical properties of calcium titanate doped yttrium oxide refractory via binder jetting additive manufacturing[J]. Ceram Int, 2025, 51(22): 36936–36946.
- [25] ZOCCA A, GOMES C M, BERNARDO E, et al. LAS glass-ceramic scaffolds by three-dimensional printing[J]. J Eur Ceram Soc, 2013, 33(9): 1525–1533.
- [26] PENG L, JIANG W M, YANG L, et al. Effect of silica sol on performance and surface precision of alumina ceramic shell prepared by binder jetting[J]. Ceram Int, 2022, 48(17): 24372–24382.
- [27] ZHAO W, LIU W L, CHANG J J, et al. Properties comparison of pure Al_2O_3 and doped Al_2O_3 ceramic cores fabricated by binder jetting additive manufacturing[J]. Ceram Int, 2023, 49(24): 40336–40346.
- [28] WANG L, WU H D, YIN Z T, et al. Additive manufacturing of high-performance SiO_2 - Al_2O_3 - K_2O (Na_2O) ceramic components via binder jetting technology[J]. Ceram Int, 2025, 51(1): 529–540.
- [29] ZHAO W, QIN X Y, FENG K H, et al. Surface-engineered bimodal yttria powder system enables high-performance ceramic cores via binder jetting for titanium alloy casting[J]. J Mater Res Technol, 2026, 40: 3071–3084.
- [30] 彭磊. 精密铸造用陶瓷型壳微滴喷射粘结成型工艺及性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
PENG Lei. Study on process and properties of precision casting

- ceramic shell by binder jetting [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [31] ZHAO J W, GONG X L, XIAO X J, et al. Effect of Al_2O_3 - SiO_2 mass ratio and sintering temperature on the properties of water-soluble salt-based ceramic cores formed by binder jetting[J]. *Ceram Int*, 2024, 50(24): 55816–55827.
- [32] ZHAO W, CHANG J J, WEI Q S, et al. Effect of sodium silicate solution combined yttrium oxide stabilized zirconia nanopowders on the properties of alumina ceramics fabricated by binder jetting additive manufacturing[J]. *J Mater Process Technol*, 2024, 330: 118454.
- [33] YANG Z Y, YANG L, WANG P L, et al. Effect of sintering aid combined vacuum infiltration on the properties of Al_2O_3 -based ceramics via binder jetting[J]. *Addit Manuf*, 2024, 79: 103898.
- [34] CHEN Q R, JUSTE E, LASGORCEIX M, et al. Binder jetting process with ceramic powders: Influence of powder properties and printing parameters[J]. *Open Ceram*, 2022, 9: 100218.
- [35] 蔡基利. 微滴喷射快速成形 Al_2O_3 陶瓷微球的工艺及性能研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2018.
- CAI Jili. Research on the processes and properties of Al_2O_3 ceramic microspheres prepared by micro-droplet jetting rapid forming [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2018.
- [36] 余一帆. 黏结剂喷射成形氧化铝陶瓷型芯烧结过程的数值模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
- YU Yifan. Numerical simulation of sintering process of alumina ceramic core fabricated by binder jetting [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024.
- [37] CRAMER C L, ARMSTRONG B L, TROFIMOV A A, et al. Alumina-based filters made *via* binder jet 3D printing of alumina powder, colloidal silica infiltration, and sintering[J]. *Int J Appl Ceram Technol*, 2021, 18(6): 1960–1968.
- [38] VOGT J, FRIEDRICH H, STEPANYAN M, et al. Improved green and sintered density of alumina parts fabricated by binder jetting and subsequent slurry infiltration[J]. *Prog Addit Manuf*, 2022, 7(2): 161–171.
- [39] 牛言清, 蒋文明, 杨力, 等. 浸渗处理及真空度对喷射粘结成形氧化钙基陶瓷型芯性能影响[J]. *铸造*, 2024, 73(1): 32–37.
- NIU Yanqing, JIANG Wenming, YANG Li, et al. *Foundry*, 2024, 73(1): 32–37.
- [40] 杨冬丽, 余小鹏, 蒋文明, 等. 浸渗处理对黏结剂喷射增材制造可溶性陶瓷芯强度和可溶性的影响[J]. *金属加工(热加工)*, 2025(12): 1–7.
- YANG Dongli, YU Xiaopeng, JIANG Wenming, et al. *Met Work*, 2025(12): 1–7.
- [41] 王富, 李成伟, 杨强, 等. 真空浸渗水玻璃对粘接剂喷射砂型性能的影响[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(10): 56–65.
- WANG Fu, LI Chengwei, YANG Qiang, et al. *J Mech Eng*, 2023, 59(10): 56–65.
- [42] LI H, SUN J W, COLOMBO P. Effect of sol impregnation and changes in sol pH on mechanical properties of 3D printed alumina ceramics[J]. *Ceram Int*, 2024, 50(19): 34987–34998.
- [43] 赵巍, 常佳俊, 魏青松, 等. 氮化硅结合硅溶胶浸渗对黏结剂喷射成形氧化铝陶瓷型芯性能的影响[J/OL]. *机械工程学报*, 2025: 1–10. (2025-02-12). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JXXB2025021100J&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- ZHAO Wei, CHANG Jiajun, WEI Qingsong, et al. *J Mech Eng*, 2025: 1–10. (2025-02-12). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JXXB2025021100J&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [44] JIMENEZ E M, AMAN B S, EHRMAN O, et al. Evaluating the sintering behaviors of ceramic oxide powders processed *via* binder jet additive manufacturing[J]. *Int J Ceramic Engine & Sci*, 2024, 6(6): e10236.
- [45] ZHAO H P, YE C S, XIONG S H, et al. Fabricating an effective calcium zirconate layer over the calcia grains *via* binder-jet 3D-printing for improving the properties of calcia ceramic cores[J]. *Addit Manuf*, 2020, 32: 101025.
- [46] HUANG S J, YE C S, ZHAO H P, et al. Additive manufacturing of thin alumina ceramic cores using binder-jetting[J]. *Addit Manuf*, 2019, 29: 100802.
- [47] ZHAO H P, YE C S, FAN Z T, et al. 3D printing of CaO-based ceramic core using nanozirconia suspension as a binder[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2017, 37(15): 5119–5125.
- [48] SOFIA D, CHIRONE R, LETTIERI P, et al. Selective laser sintering of ceramic powders with bimodal particle size distribution[J]. *Chem Eng Res Des*, 2018, 136: 536–547.
- [49] KIM E H, CHOI H H, JUNG Y G. Fabrication of a ceramic core for an impeller blade using a 3D printing technique and inorganic binder[J]. *J Manuf Process*, 2020, 53: 43–47.
- [50] 梁启如, 吴玉胜, 刘孝福, 等. 航空发动机涡轮叶片铸造用陶瓷型芯研究进展[J]. *铸造*, 2018, 67(9): 790–793.
- LIANG Qiru, WU Yusheng, LIU Xiaofu, et al. *Foundry*, 2018, 67(9): 790–793.
- [51] ZHU W J, TIAN G Q, LU Y, et al. Leaching improvement of ceramic cores for hollow turbine blades based on additive manufacturing[J]. *Adv Manuf*, 2019, 7(4): 353–363.
- [52] LIU Z H, NOLTE J J, PACKARD J I, et al. Selective laser sintering of high-density alumina ceramic parts[M]//*Proceedings of the 35th International MATADOR Conference*. London: Springer London, 2007: 351–354.
- [53] LEE I, MANTHIRAM A, MARCUS H L. Selective Laser Sintering of Alumina-Boron Oxide Composites[C]//*Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin: University of Texas Press, 1994: 1–9.
- [54] ZHENG W, WU J M, CHEN S, et al. Preparation of high-performance silica-based ceramic cores with B_4C addition using selective laser sintering and SiO_2 - Al_2O_3 sol infiltration[J]. *Ceram Int*, 2023, 49(4): 6620–6629.
- [55] 曹咏梅, 易仁杰, 刘强, 等. 熔熔氧化钒含量对硅基陶瓷型芯性能的影响[J]. *铸造*, 2025, 74(3): 365–369.
- CAO Yongmei, YI Renjie, LIU Qiang, et al. *Foundry*, 2025, 74(3): 365–369.
- [56] 徐晓强, 邱金勇, 黄道伟. 氧化物陶瓷激光选区烧结熔融成型研究进展[J]. *陶瓷学报*, 2022, 43(4): 551–566.
- XU Xiaoliang, QIU Jinyong, HUANG Daowei. *J Ceram*, 2022, 43(4): 551–566.
- [57] TOLOCHKO N K, KHLOPKOV Y V, MOZZHAROV S E, et al. Absorbance of powder materials suitable for laser sintering[J]. *Rapid Prototyp J*, 2000, 6(3): 155–161.
- [58] WERESZCZAK A A, BREDER K, FERBER M K, et al. Dimensional changes and creep of silica core ceramics used in investment casting of superalloys[J]. *J Mater Sci*, 2002, 37(19): 4235–4245.
- [59] 程迪. Al_2O_3 陶瓷零件的 SLS 成形及后处理工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- CHENG Di. Study on selective laser sintering of alumina parts and post process [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [60] BERGER C, SCHIMO-AICHHORN G, GRONAU S, et al. Potential and challenges for Powder Bed Fusion-Laser Beam (PBF-LB) in

- industrial ceramic additive manufacturing[J]. *Open Ceram*, 2024, 18: 100614.
- [61] SUBRAMANIAN K, VAIL N, BARLOW J, et al. Selective laser sintering of alumina with polymer binders[J]. *Rapid Prototyp J*, 1995, 1(2): 24–35.
- [62] CHEN Y H, WU H H, ZHANG H L, et al. Preparation of carbon/silicon carbide composites based on selective laser sintering/reaction melt infiltration and its theoretical modeling calculations[J]. *J Mater Res Technol*, 2026, 40: 718–730.
- [63] ZOU Y, LI C H, HU L, et al. Effects of short carbon fiber on the macro-properties, mechanical performance and microstructure of SiC composite fabricated by selective laser sintering[J]. *Ceram Int*, 2020, 46(8): 12102–12110.
- [64] LIU R Z, CHEN P, WU J M, et al. Effects of B₄C addition on the microstructure and properties of porous alumina ceramics fabricated by direct selective laser sintering[J]. *Ceram Int*, 2018, 44(16): 19678–19685.
- [65] WU Y R, HE J H, CHENG L J, et al. Effects of AlN inorganic binder on the properties of porous Si₃N₄ ceramics prepared by selective laser sintering[J]. *Ceram Int*, 2022, 48(20): 29900–29906.
- [66] CHEN F, WU J M, WU H Q, et al. Microstructure and mechanical properties of 3Y-TZP dental ceramics fabricated by selective laser sintering combined with cold isostatic pressing[J]. *Int J Light Mater Manuf*, 2018, 1(4): 239–245.
- [67] LIU K, SHI Y S, HE W T, et al. Densification of alumina components via indirect selective laser sintering combined with isostatic pressing[J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2013, 67(9–12): 2511–2519.
- [68] 周士翔, 孙冬, 陈双, 等. 激光选区烧结成形涡轮叶片铸造用陶瓷铸型材料及浸渗强化工艺[J]. *精密成形工程*, 2024, 16(12): 82–90. ZHOU Shixiang, SUN Dong, CHEN Shuang, et al. *J Netshape Form Eng*, 2024, 16(12): 82–90.
- [69] ZHANG J, WU J M, LIU H, et al. Infiltration of silica slurry into silica-based ceramic cores prepared by selective laser sintering based on pre-sintering[J]. *Ceram Int*, 2023, 49(19): 31477–31484.
- [70] LIU H, ZHANG R Z, WU J M, et al. Effect of Al(OH)₃ on the properties of silica-based ceramic cores prepared by laser powder bed fusion combined with vacuum infiltration[J]. *Addit Manuf*, 2024, 95: 104527.
- [71] SHISHKOVSKY I, YADROITSEV I, BERTRAND P, et al. Alumina–zirconium ceramics synthesis by selective laser sintering/melting[J]. *Appl Surf Sci*, 2007, 254(4): 966–970.
- [72] 芦刚, 李康, 严青松, 等. 基于 SLS 烧结覆膜砂工艺参数对成型尺寸精度的影响规律[J]. *铸造技术*, 2013, 34(3): 314–316. LU Gang, LI Kang, YAN Qingsong, et al. *Foundry Technol*, 2013, 34(3): 314–316.
- [73] 张瀚. 选择性激光烧结工艺参数对成型精度的影响及预测研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2018. ZHANG Han. Influence and prediction of selective laser sintering process parameters on forming accuracy [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2018.
- [74] 李成阳, 顿亚鹏, 杨伟, 等. SLS 选择性激光烧结工艺参数对覆膜砂初坯强度的影响[J]. *科技创新与应用*, 2019, 9(26): 28–32. LI Chengyang, DUN Yapeng, YANG Wei, et al. *Technol Innov Appl*, 2019, 9(26): 28–32.
- [75] 刘珩. SiO₂陶瓷型芯的 SLS 结合真空浸渗制备及其性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024. LIU Heng. SLS–VI preparation and performance study of SiO₂ ceramic core[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024.
- [76] WEI Q, ZHONG J W, XU Z L, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of ceramic shell moulds for investment casting of turbine blades by selective laser sintering[J]. *Ceram Int*, 2018, 44(11): 12088–12097.
- [77] 董晔. Al₂O₃ 多孔陶瓷激光选区烧结/反应烧结制备与性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022. DONG Ye. Preparation and properties of porous Al₂O₃ ceramics by selective laser sintering combined with reaction bonding[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2022.
- [78] ZENG Y, PAN Y Y, ZHAO C Y, et al. Indirect forming of alumina-based ceramics by selective laser sintering combined with sol infiltration process and performance study[J]. *J Mater Sci*, 2023, 58(7): 3053–3065.
- [79] 高聿. 添加剂及熔浸烧结对以铝为黏结剂的氧化铝 SLS 成型影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2011. GAO Song. Effects of sintering additives and melting infiltration sintering on selective laser sintering of alumina [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2011.
- [80] 魏倩, 许自霖, 许庆彦, 等. 烧结温度对氧化铝基陶瓷型壳显微组织及力学行为的影响[J]. *航空材料学报*, 2019, 39(2): 10–15. WEI Qian, XU Zilin, XU Qingyan, et al. *J Aeronaut Mater*, 2019, 39(2): 10–15.
- [81] 芦刚, 张小松, 严青松, 等. 浸渗硅溶胶对 SLS 覆膜砂强度的影响及强化机理[J]. *铸造*, 2016, 65(2): 193–197. LU Gang, ZHANG Xiaosong, YAN Qingsong, et al. *Foundry*, 2016, 65(2): 193–197.
- [82] 芦刚, 郭振华, 严青松, 等. 硅溶胶浸渗对 SLS 覆膜砂表面质量的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2017, 37(9): 986–989. LU Gang, GUO Zhenhua, YAN Qingsong, et al. *Spec Cast Nonferrous Alloys*, 2017, 37(9): 986–989.
- [83] CHEN S, SUN D, WANG C S, et al. Alumina-based ceramic mold with integral core and shell for hollow turbine blades fabricated by laser powder bed fusion[J]. *Addit Manuf*, 2022, 58: 103046.
- [84] 张洁. 硅酸锆增强硅基陶瓷型芯的激光选区烧结成形及性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024. ZHANG Jie. Preparation and properties of ZrSiO₄ reinforced silica-based ceramic cores by selective laser sintering [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024.
- [85] LIU H, LUO Z C, LIU H D, et al. Effect of vacuum infiltration time on the properties of silica-based ceramic cores prepared by selective laser sintering combined with vacuum infiltration[J]. *Mater Solidif*, 2025, 1(3): 9580016.
- [86] 晶瓷(北京)新材料科技有限公司. 易溃散陶瓷型芯 [EB/OL]. (2023–10–16)[2025–10–23]. <http://www.jingcikj.com.cn/pd.jspid=16>.

作者贡献声明:

周佳杰: 论文构思、调查研究、撰写初稿、绘制图表
孙志斌: 调查研究、绘制图表
蒋文明: 监督指导、审阅与修订
刘生发: 监督指导、审阅与修订
周士翔: 提供资源、监督指导、审阅与修订
龚小龙: 获取资助、项目管理、监督指导、审阅与修订
吴甲民: 项目管理、监督指导、审阅与修订
闫春泽: 监督指导、获取资助、审阅与修订
刘 凯: 获取资助、项目管理、监督指导、审阅与修订
史玉升: 获取资助、项目管理、监督指导、审阅与修订

Development on Powder Bed Additive Manufacturing for Ceramic Molds

ZHOU Jiajie², SUN Zhibin², JIANG Wenming³, LIU Shengfa², ZHOU Shixiang⁴, GONG Xiaolong², WU Jiamin³,
YAN Chunze³, LIU Kai^{1,2}, SHI Yusheng³

- (1. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 4. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Extended Abstract

Ceramic molds, including cores for internal cavities and shells for outer contours, are essential components for precision casting of complex parts in aerospace, energy equipment, and medical devices, due to their excellent thermal stability, high strength, and dimensional accuracy. As high-end castings evolve toward lightweight and integrated designs, conventional mold-dependent methods such as injection molding and gel casting have limitations. These techniques require splicing for complex structures, leading to long development cycles, poor joint performance, and high costs. Powder bed additive manufacturing (PBAM), including binder jetting additive manufacturing (BJAM) and selective laser sintering (SLS), enables mold-free, rapid, and integral fabrication of complex ceramic molds, offering a pathway for efficient short-process manufacturing.

This review systematically summarizes recent development on BJAM and SLS for ceramic mold fabrication, focusing on the effects of powder materials and printing parameters on the mold performance, post-processing regulation methods, engineering applications, and future directions. In BJAM, ceramic molds are formed *via* selectively depositing a liquid binder onto powder layers. Powder properties including particle size distribution, flowability, and composition critically determine green density and sintered properties. Common materials like Al₂O₃ and CaO are widely used, but they require additives such as sintering aids (*i.e.*, nano-sized Al₂O₃, CuO–TiO₂) and shrinkage compensators (*i.e.*, Al powder, and SiO₂). Key printing parameters, particularly binder saturation and layer thickness, significantly affect the green strength and surface quality. Post-processing through sintering optimization and vacuum infiltration with silica sol or nano-sized additives is essential to achieve required mechanical properties and porosity. BJAM features a high efficiency, a broad material adaptability, and a support-free fabrication, making it suitable for large ceramic molds with complex internal structures. In SLS, ceramic molds are formed by high-energy laser selectively melting polymer-coated or binder-mixed ceramic powders without liquid binders, providing a higher green strength. The powder system comprises ceramic matrix materials (*i.e.*, SiO₂, Al₂O₃), organic or inorganic binders (*i.e.*, phenolic resin, B₄C), and functional additives to enhance flowability and laser absorption. Critical parameters like laser power, scanning speed, layer thickness, and hatch spacing determine energy input and part quality. Post-processing *via* sintering and infiltration is required to achieve high-temperature strength, creep resistance, and dimensional stability. SLS delivers green bodies with a high initial density, ideal for complex thin-walled molds and high-precision applications in directional solidification casting.

BJAM and SLS both are applied in producing ceramic cores and shells for turbine blades and impellers, demonstrating complex cooling passages, high surface finish, and excellent high-temperature performance that meet stringent casting requirements.

Summary and prospects The existing PBAM achieves phased results. To further promote its large-scale application in the fabrication of high-performance ceramic molds, there are the following aspects. There is an urgent need to develop additive manufacturing-specific powders and functional binder systems. For BJAM process, composite ceramic powders with favorable flowability and optimized gradation should be developed, and multifunctional binder systems should be designed to reduce the dependence on post-processing performance regulation. For SLS process, it is necessary to develop ceramic/binder phase composite powders with high laser absorptivity and excellent sintering activity, so as to reduce the difficulty of subsequent sintering and improve the strength of ceramic molds. Dedicated printing systems and post-processing equipment suitable for the multi-material integrated forming of ceramic molds should be developed. Key technologies such as precise multi-material powder spreading and delivery, as well as synchronous manufacturing of ceramic cores and shells, should be prioritized to realize high-precision and high-efficiency integrated forming of ceramic molds with complex structures. Regarding the performance regulation, improving the high-temperature strength, creep resistance and dimensional stability of ceramic molds becomes an emphasis. The porosity and relative density can be synergistically regulated to balance the contradiction between high strength and easy core leaching by means of material design, printing parameter adjustment and post-processing process optimization, so as to meet the stringent performance requirements of ceramic molds for high-end castings.

Keywords ceramic mold; additive manufacturing; casting; binder jetting; selective laser sintering