

粉末级配处理对微滴喷射粘结成形 可溶性陶瓷芯性能的影响

余小鹏, 蒋文明, 彭子伟, 黄一鹤, 李庆晴, 樊自田

(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, 湖北武汉 430074)

摘要: 采用微滴喷射粘结成形技术制备可溶性陶瓷芯, 分别以粉末粒径分布为17.89~74.19 μm 的重质碳酸钙作为原料进行级配处理, 研究了粉末粒径以及粒径分布对陶瓷芯性能的影响。研究表明, 级配处理能有效地提高陶瓷芯的抗弯强度, 选用Z1 (17.89 μm)与Z3 (32.54 μm)的重质碳酸钙粉末进行级配处理, 可以得到最优的坯体抗弯强度 (1.96 MPa, 是未级配处理时的174%), 同时得到最优的粉床铺粉效果。随着细粉含量增加, 陶瓷芯烧结后的抗弯强度呈现出先增大后减小的趋势, 当细粉含量从20%增加到30%时, 抗弯强度由8.24 MPa增加到8.72 MPa, 但当细粉含量进一步增加到40%时, 抗弯强度却降至7.74 MPa。不同处理工艺烧结后得到的陶瓷芯浸泡在80 $^{\circ}\text{C}$ 水中30 min后即开始溃散, 表现出良好的可溶性。

关键词: 微滴喷射粘结成形; 粉末级配; 重质碳酸钙; 可溶性陶瓷芯; 抗弯强度; 烧结工艺

中图分类号: TG242.7; TG174.45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 06-0581-06

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0077

The Influence of Powder Gradation Treatment on the Properties of Soluble Ceramic Cores Prepared by Binder Jetting

YU Xiao-peng, JIANG Wen-ming, PENG Zi-wei, HUANG Yi-he, LI Qing-qing, FAN Zi-tian
(School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Using the binder jetting technique to fabricate the soluble ceramic cores, and taking advantage of heavy calcium carbonate powders with the particle size distribution ranging from 17.89 μm to 74.19 μm as raw materials to carry out grading treatment, respectively, the effects of powder particle sizes and particle size distributions on the properties of the ceramic cores have been studied. The results show that the bending strength of the ceramic cores can be effectively improved through the grading treatment, and by selecting and using gradation of Z1 (17.89 μm) and Z3 (32.54 μm) heavy calcium carbonate powders, optimal green body bending strength (1.96 MPa, being 174% of that without grading treatment) can be obtained, and optimal powder bed spreading effect can be also achieved; with the increase of fine powder content, the bending strengths of the sintered ceramic cores exhibit a trend of first increasing and then decreasing. When the fine powder content increases from 20% to 30%, the bending strength increases from 8.24 MPa to 8.72 MPa. However, when the fine powder content further increases to 40%, the bending strength decreases to 7.74 MPa; the ceramic cores sintered by different treatment processes begin to disintegrate after being immersed in 80 $^{\circ}\text{C}$ water for 30 minutes, demonstrating excellent solubility.

Key words: binder jetting; powder gradation; heavy calcium carbonate; soluble ceramic core; bending strength; sintering process

随着航空航天、新能源等高端装备制造业的飞速发展, 核心热端部件 (如航空发动机涡轮叶片) 的性能要求日益严苛^[1-2]。这些部件内部往往设计有极其复杂的冷却流道以应对高温环境, 而成形这些复杂内

腔的关键在于陶瓷芯。传统工艺 (如热压注成形) 在制造此类复杂空腔结构时面临模具成本高、开发周期长和难以成形高精度复杂结构的瓶颈^[3]。尤其对于具有复杂内腔的铸件, 传统的非可溶型芯在铸造后难以

基金项目: 国家自然科学基金 (52271102, 52075198)。

收稿日期: 2025-12-29 收到初稿, 2026-03-08 收到修订稿。

作者简介: 余小鹏 (2001-), 男, 博士生, 主要从事基于增材制造的陶瓷型壳/芯制备技术研究。E-mail: yuxiaopeng12138@163.com

通信作者: 蒋文明, 男, 教授。E-mail: wmjiang@hust.edu.cn

引用格式: 余小鹏, 蒋文明, 彭子伟, 等. 粉末级配处理对微滴喷射粘结成形可溶性陶瓷芯性能的影响 [J]. 铸造, 2026, 75 (6): 581-586.

YU Xiaopeng, JIANG Wenming, PENG Ziwei, et al. The influence of powder gradation treatment on the properties of soluble ceramic cores prepared by binder jetting [J]. Foundry, 2026, 75 (6): 581-586.

完全清除,严重影响铸件的完整性与可靠性^[4]。因此,可溶性陶瓷芯因其能在水中自行溃散的特性,成为解决该难题的理想方案,极大地简化了脱芯工艺。

为突破传统工艺的局限,增材制造技术应运而生,为复杂陶瓷芯的制备带来了革命性变革^[5-6]。该技术无需模具,可实现复杂三维结构的自由成形,特别适合定制化及复杂构件的快速制造^[7]。在众多3D打印技术中,微滴喷射粘结成形技术(3DP/Binder Jetting)在陶瓷芯制备中展现出显著优势^[8]。它通过逐层或喷射粘结剂粘结粉末,直接获得具有精密结构的陶瓷生坯,再经过脱脂和烧结后处理得到最终产品。与光固化技术与选择性激光烧结技术相比,微滴喷射粘结成形技术无需打印支撑,不需要激光或紫外线等外部能源,可以在室温下形成复杂的形状,且设备与原料成本低、效率高。这项技术不仅简化了制备流程,缩短了生产周期,也为实现型芯性能的主动设计与调控提供了可能^[9-10]。

为解决传统型芯脱除困难的问题,可溶性型芯逐渐被应用于铸件生产中^[11]。目前常见的可溶性型芯主要包括可溶性盐芯和可溶性陶瓷芯两类^[12-13]。其中,可溶性盐芯可通过水溶方式高效去除,脱芯效果良好,但其脆性大,限制了在复杂或高要求铸件中的应用^[12]。而以氧化钙为基础的可溶性陶瓷芯虽兼具较高力学性能和良好的溃散性,却因氧化钙极易吸水潮解,在制备和储存过程中面临稳定性差、易失效等难题。近年来,重质碳酸钙(HCC)的采用为上述问题提供了一种有效解决方案。重质碳酸钙化学性质稳定,不与水反应,相较于氧化钙更易于运输和储存;同时,在高温烧结过程中,其可原位分解生成氧化钙,氧化钙可以与水反应,因此陶瓷芯仍具有良好的溃散性。

然而,尽管重质碳酸钙在材料稳定性方面展现出明显优势,但通过3D打印获得的陶瓷坯体强度是决定其能否成功应用于后续精密铸造流程的关键^[14]。坯体强度不足会导致在搬运、脱脂和烧结过程中出现开裂或变形。强度受到打印工艺参数、粉末状态以及后处理工艺的共同影响^[15]。其中,粉末的状态是基础,它直接影响粉末的流动性、坯体的初始密度以及最终烧结质量^[15-16]。因此本课题分别以粉末粒径分布为17.89~74.19 μm的重质碳酸钙作为原料进行级配处理,采用喷射粘结成形技术打印陶瓷芯坯体,研究不同粉末粒径以及粒径分布对陶瓷芯力学性能的影响,以此为喷射粘结成形可溶性陶瓷芯的应用奠定基础。

1 试验材料与方法

1.1 材料

采用从原矿中生产出的重质碳酸钙作为原材料打印陶瓷芯坯体,其成分如表1所示。四组重钙粉粒径从低到高分别设置为Z1~Z4,粉末粒径分布如图1所示,平均粒径分别为 $D_{50}=17.89\ \mu\text{m}$ 、 $D_{50}=21.67\ \mu\text{m}$ 、 $D_{50}=32.54\ \mu\text{m}$ 、 $D_{50}=74.19\ \mu\text{m}$ 。试验各组编号及其粉末粒径与粒径分布如表2所示。采用酚醛树脂作为打印粘结剂。

表1 重质碳酸钙主要成分
Tab. 1 Main components of heavy calcium carbonate $w_B/\%$

CaCO ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
≥98.6	≤0.24	≤0.06	≤0.08

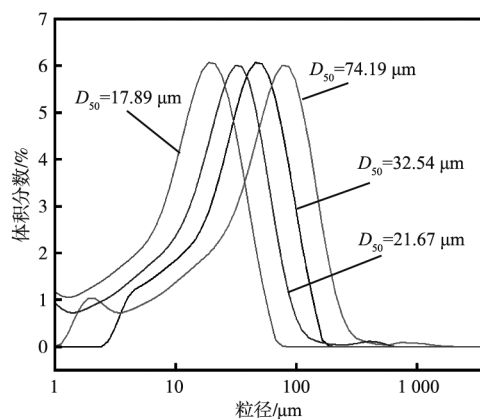


图1 Z1~Z4组重质碳酸钙粉末粒径分布
Fig. 1 Particle size distributions of HCC powders in groups Z1 to Z4

表2 重质碳酸钙的粉末粒径与粒径分布
Tab. 2 The powder particle sizes and particle size distributions of HCC

编号	粉末粒径		粒径分布	
	细粉	粗粉	粗粉质量分数/%	细粉质量分数/%
A0	Z1			
A1	Z1	Z3	80	20
A2	Z1	Z3	70	30
A3	Z1	Z3	60	40
A4	Z1	Z4	70	30
A5	Z2	Z3	70	30
A6	Z2	Z4	70	30

1.2 打印与后处理过程

分别按照A1~A6配制混合粉末,粉末原料按一定比例混合后置于自动粉料混料机中,以60 r/min的速度

搅拌6 h。粉末混合均匀后倒入粘结剂喷射3D打印机（Easy3DP，武汉易制科技有限公司）的供粉仓。将所需打印结构的三维模型（本试验为适用于测量物理性能的8 mm × 10 mm × 50 mm矩形棒状样品）导入计算机，设定打印参数统一为层高0.1 mm、粘结剂饱和度130%。打印出的样品在干燥箱中于200 °C固化3 h。冷却后清除多余粉末，将样品在50 °C干燥箱中干燥12 h。最后，陶瓷芯坯体经高温烧结后冷却，得到所需样品进行相关测试。陶瓷芯坯体的烧结工艺曲线如图2所示。

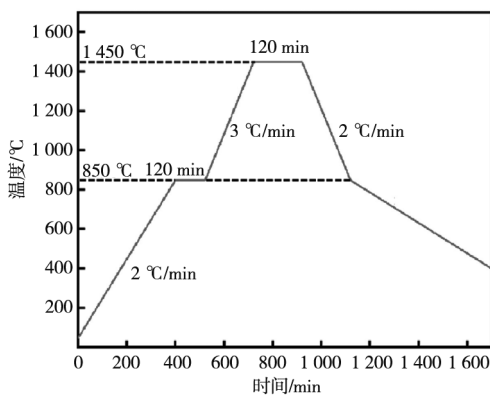


图2 重质碳酸钙陶瓷芯的烧结曲线
Fig. 2 Sintering curve of HCC ceramic cores

1.3 性能与表征

在MTS810万能试验机上使用三点弯曲法对烧结后的陶瓷芯进行弯曲强度测量，跨度为30 mm、冲头位移速度为0.05 mm/min，每组样品测量五组数值，最后获得弯曲强度的平均值。

以煤油作为测量介质，利用阿基米德排水法测量陶瓷型芯的孔隙率，其中每组型芯测试5次取其平均值，陶瓷型芯孔隙率 P 具体计算方法如式（1）所示。

$$P = \frac{M_3 - M_1}{M_3 - M_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中： M_1 是型芯放入煤油之前的质量， M_2 是型芯吸饱煤油后在煤油中的浮重， M_3 是型芯吸饱煤油后的质量。

利用环境扫描电子显微镜（ESEM，Quanta200，FEI，Netherland）对烧结后的陶瓷芯进行微观形貌观察。

2 结果与讨论

图3是不同粉末粒径（A2、A4~A6组）重质碳酸钙陶瓷芯坯体的抗弯强度与孔隙率曲线。未进行级配处理的重质碳酸钙粉末打印的坯体强度为1.15 MPa，从图中可以观察到A4组与A5组得到的陶瓷芯强度较低，分

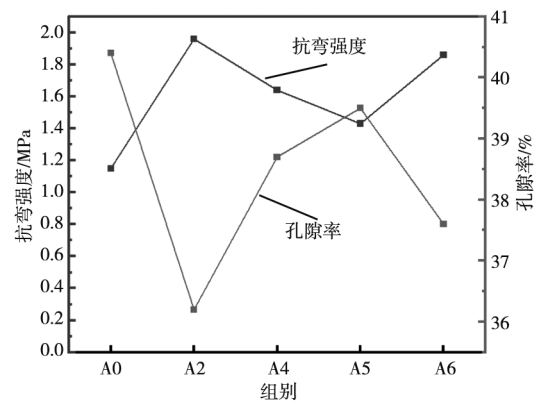


图3 不同粉末粒径重质碳酸钙坯体试样的抗弯强度与孔隙率
Fig. 3 Bending strengths and porosities of the specimens of HCC green bodies with different powder particle sizes

别为1.64 MPa、1.43 MPa，这是因为A4组粉末粒径相差较大，导致较多细粉堆积在粗粉孔隙中，陶瓷粉末的流动性较差；A5组粉末粒径较为接近，粗粉与细粉之间的孔隙难以实现有效的填充，级配效果较差，因此A4、A5两组的抗弯强度较低。A2与A6强度较高，分别为1.96 MPa、1.86 MPa，这是因为细粉与粗粉之间的粒径匹配更加合适，细粉能够有效填充大陶瓷颗粒之间的孔隙，从而有效提升陶瓷芯的烧结强度。由于较大的粉末粒径有更好的流动性，且重质碳酸钙粉末的铺粉效果较差，故优选出200目与600目的粉末粒径进行级配处理。

图4是相同粉末粒径不同粒径分布（A1~A3）重质碳酸钙陶瓷芯烧结后的抗弯强度曲线。未进行级配处理的重质碳酸钙粉末试样烧结后的抗弯强度为7.10 MPa，从图中可以看出，随着细粉含量增加，陶瓷芯的抗弯强度呈现出先增大后减小的趋势。当细粉含量较少时（A1），抗弯强度为8.24 MPa，粗大的陶瓷颗粒间填充了少量的细小陶瓷颗粒，随着细粉含量增加至30%（A2），抗弯强度为8.72 MPa，陶瓷芯内部有更多

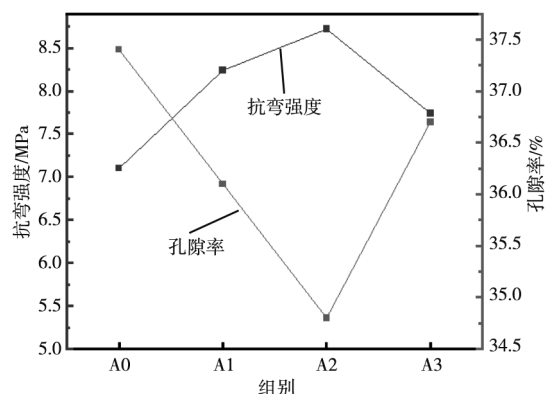


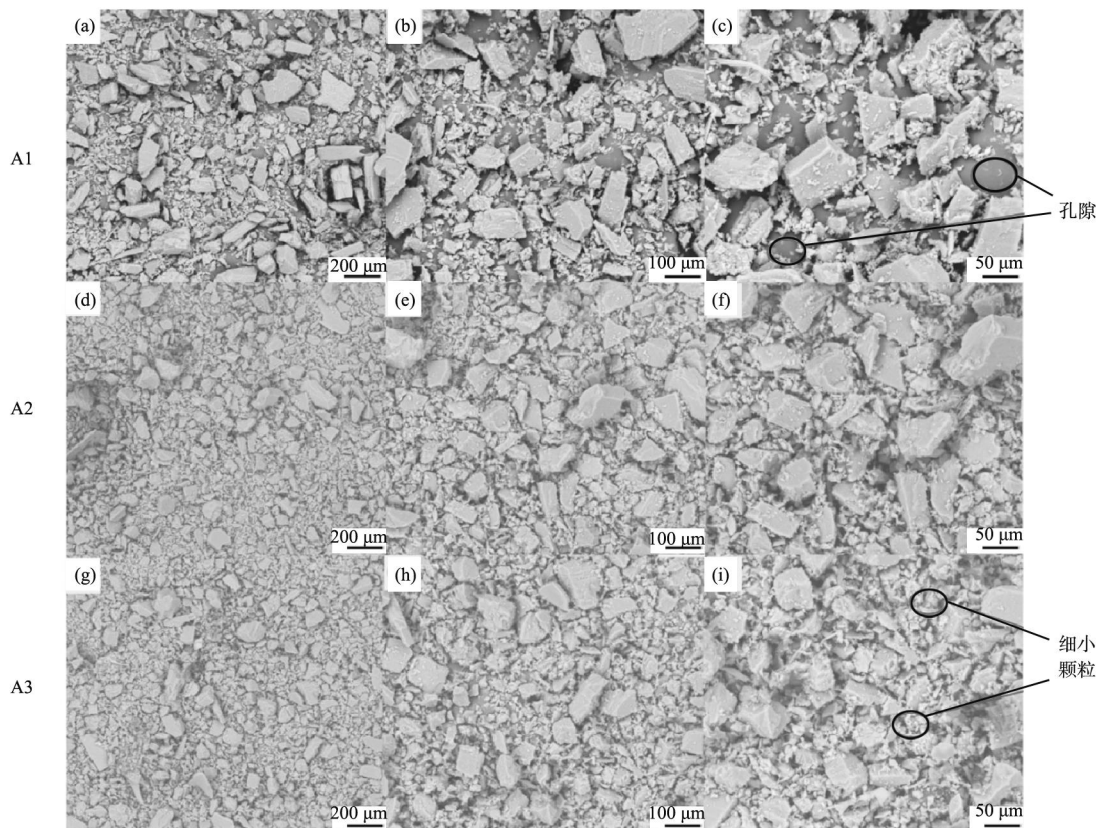
图4 不同粒径分布重质碳酸钙试样烧结后的抗弯强度与孔隙率
Fig. 4 Bending strengths and porosities of HCC samples with different particle size distributions after sintering

的大陶瓷颗粒，大陶瓷颗粒结合细小陶瓷颗粒有效填充颗粒间孔隙，因此陶瓷芯烧结强度得到提升。而当细粉比例增加到40%后（A3），抗弯强度为7.74 MPa，粗大陶瓷颗粒的增加将产生较多的孔隙，因此陶瓷芯的烧结强度会下降。

图5是不同粒径分布重质碳酸钙烧结后在不同放大倍数下的微观形貌图。可以发现，当细粉较少时（A1），从图5（c）可以观察到粗粉间孔隙较大，且孔隙数量较多，这会使得陶瓷芯内部颗粒疏松，烧结后抗弯强度较低。随着细粉的增加（A2），陶瓷芯内部细小颗粒有效地填充了粗大颗粒间的缝隙，陶瓷芯内部的颗粒紧密烧结，因此A2组的抗弯强度最高。细

粉含量继续增加（A3），图5（i）中可以观察到陶瓷芯内部有大量的细小重质碳酸钙颗粒，细粉含量过高时，破坏了粗-细粉的最紧密堆积结构，导致生坯密度下降、孔隙分布不均；烧结过程中，细粉区域过早致密化，阻碍了整体均匀收缩，最终烧结体孔隙率升高，抗弯强度下降。

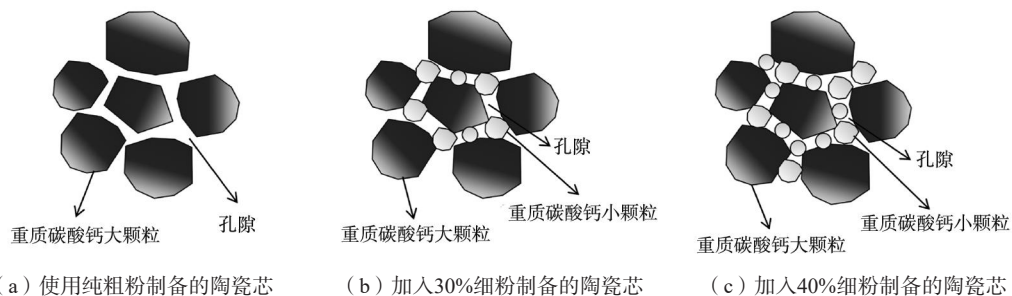
粒度分布对重质碳酸钙可溶性陶瓷芯性能的影响如图6所示。对于用纯粗粉制备的试样，如图6（a）所示，粗粉大颗粒之间的间隙较大，烧结困难，因此烧结强度较低。当细粉含量为30%时，如图6（b）所示，由细粉烧结后产生的小颗粒可以适当填充大颗粒之间的间隙，增强颗粒间的结合并阻碍大颗粒的运动，故



(a)、(d)、(g) 200倍；(b)、(e)、(h) 400倍；(c)、(f)、(i) 800倍

图5 不同粒径分布重质碳酸钙烧结后在不同放大倍数下的微观形貌图

Fig. 5 Microscopic morphology images of HCC with different particle size distributions after sintering at different magnification levels



(a) 使用纯粗粉制备的陶瓷芯

(b) 加入30%细粉制备的陶瓷芯

(c) 加入40%细粉制备的陶瓷芯

图6 粒径分布对重质碳酸钙可溶性陶瓷芯性能影响的示意图

Fig. 6 Schematic diagrams illustrating the influences of particle size distributions on the performances of heavy calcium carbonate soluble ceramic cores

此时烧结得到的陶瓷芯具有最优的抗弯强度。

图7展示了重质碳酸钙陶瓷芯在80℃热水中分别在0~90 min每间隔30 min的溃散情况。在热水中浸泡90 min后烧杯内没有明显的大块状重质碳酸钙，说明级配处理后重质碳酸钙仍然具有较好的溃散效果。

图8是本研究采用A2组重质碳酸钙级配粉末，通过喷射粘结成形技术制备具有复杂结构的陶瓷芯。经级配处理后，陶瓷芯的力学性能得到显著提升。使用三维扫描仪获取了该陶瓷芯的数学模型，并与原始CAD设计模型进行了对比。采用非接触式光学测量法，基

于三维理论模型与实际检测结果进行对比分析，可溶性陶瓷型芯尺寸精度达到 $(-0.11\text{ mm}\sim+0.17\text{ mm})/100\text{ mm}$ 。测量得到可溶性陶瓷芯表面粗糙度 $Ra=2.96\text{ }\mu\text{m}$ 。这表明采用A2组粉末级配方案所打印的复杂陶瓷芯具有良好的精度和可控的收缩行为，为后续的实际浇注应用提供了重要的工艺参数依据。在高温烧结过程中，重钙原位分解生成氧化钙，可同步达成结构的高精度成形与优异的溃散性，为复杂铸件的精密制造提供了材料与工艺协同创新的解决策略。

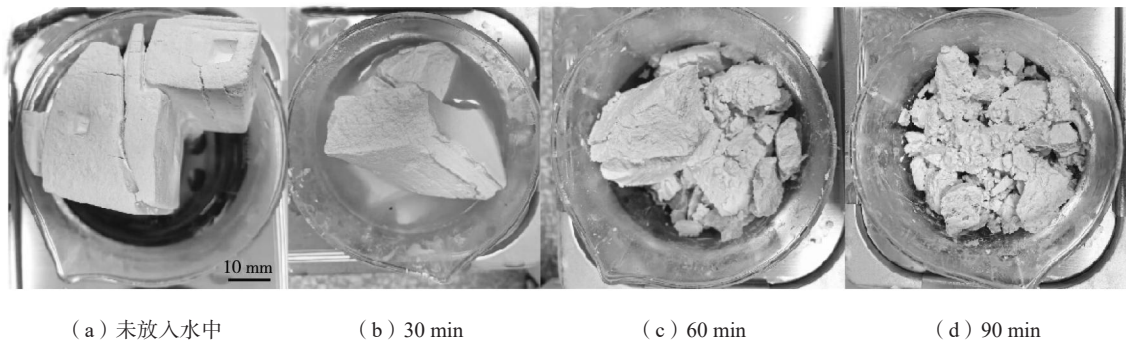


图7 不同时间下A2组陶瓷芯在80℃热水中的情况

Fig. 7 The situations of the group A2 ceramic core under different times in 80℃ hot water

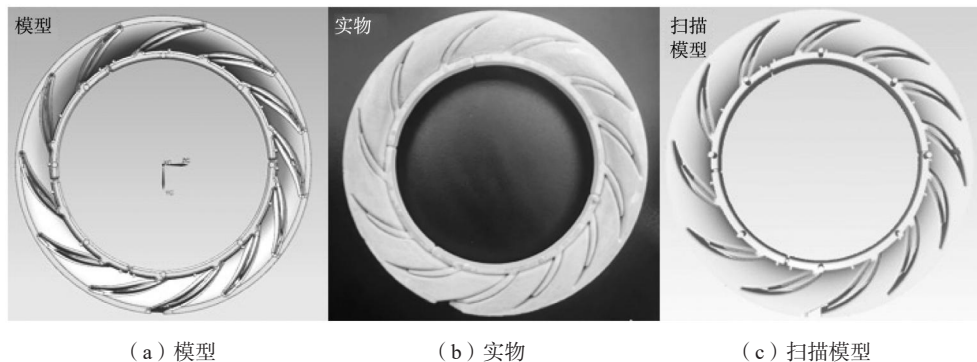


图8 采用A2组重质碳酸钙粉末制备出的复杂陶瓷芯

Fig. 8 The complex ceramic core prepared using the A2 group HCC powder

3 结论

(1) 采用不同粉末粒径(A2、A4~A6组)重质碳酸钙级配粉末打印陶瓷芯生坯，级配处理能有效提高陶瓷芯的抗弯强度，抗弯强度提升24%~74%。选用A2组即Z1(17.89 μm)与Z3(32.54 μm)的重质碳酸钙粉末进行级配处理，可以得到最优的抗弯强度(1.96 MPa)，同时得到最优的粉床铺粉效果。

(2) 采用相同粉末粒径不同粒径分布(A1~A3)重质碳酸钙打印陶瓷芯并烧结，随着细粉含量增加(20%~40%)，陶瓷芯的抗弯强度呈现出先增大后减小的趋势，当细粉含量从20%增加到30%时，抗弯强度由8.24 MPa增加到8.72 MPa，但当细粉含量从30%增加

到40%时，抗弯强度却降至7.74 MPa。

(3) 在相同粉末粒径情况下，观察不同粒径分布可溶性陶瓷芯的微观形貌发现，当细粉较少时，粗颗粒间孔隙较大，且孔隙数量较多，这会使得陶瓷芯内部颗粒疏松，烧结后抗弯强度降低。随着细粉的含量增加至30%，陶瓷芯内部细小颗粒有效地填充了粗大颗粒间的缝隙，陶瓷芯内部的颗粒紧密烧结，此时陶瓷芯的抗弯强度最高。细粉含量继续增加，陶瓷芯内部有大量的细小重质碳酸钙颗粒，破坏了粗-细粉的最紧密堆积结构，导致生坯密度下降、孔隙分布不均；烧结过程中，细粉区域过早致密化，阻碍了整体均匀收缩，最终烧结体孔隙率升高，抗弯强度下降。

参考文献:

- [1] 李鑫, 贾子祺, 范红娜, 等. 纳米氧化铝增强氧化钇陶瓷芯制备及化学相容性研究 [J]. 中国陶瓷, 2025, 61 (12): 18-27.
- [2] 梁启如, 吴玉胜, 刘孝福, 等. 航空发动机涡轮叶片铸造用陶瓷芯研究进展 [J]. 铸造, 2018, 67 (9): 790-793.
- [3] 贾天敏, 谷志刚, 穆柏椿, 等. 热压注成型 $ZrSiO_4$ - MgO - Al_2O_3 三元复合直孔陶瓷过滤器的研究 [J]. 铸造, 1997 (7): 9-11.
- [4] ZHANG X, GUO L, HUANG H, et al. Removal of phosphorus by the core-shell bio-ceramic/Zn-layered double hydroxides (LDHs) composites for municipal wastewater treatment in constructed rapid infiltration system [J]. Water Research, 2016, 96: 280-291.
- [5] RAMESH R, GAIROLA S, JAYAGANTHAN R, et al. Microstructural evolution, mechanical behaviour and strengthening mechanisms of additively manufactured AISi9Cu3 alloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2026, 40: 1738-1752.
- [6] TAGHIAN M. Toward closed-loop quality assurance in powder bed fusion additive manufacturing: defect detection, machine learning, and computational modeling [J]. Additive Manufacturing, 2026, 74 (3): 104589.
- [7] SUN Y, DU R, FAN Y, et al. Novel method for achieving high-performance Ti/Al dissimilar structure via hybrid solid-liquid phase additive manufacturing [J]. Additive Manufacturing, 2026, 115: 105064.
- [8] XIE P, WANG Y, LI Z, et al. Physical, mineralogical, thermal, and mechanical evolutions of binder jetting 3D printing magnesium phosphate cement exposed to elevated temperatures [J]. Journal of Building Engineering, 2026, 117: 114737.
- [9] TANG C, HUANG S, WU H, et al. A new approach for fabricating high performance alumina ceramics by binder jetting [J]. Ceramics International, 2025, 51 (28): 59820-59831.
- [10] CHEN X, GAO X, WANG W, et al. Controlled microstructure, thermal and mechanical property anisotropy of binder jetting 3D-printed SiC ceramics by reaction bonding [J]. Ceramics International, 2026, 52 (8): 10587-10596.
- [11] LIU F, FAN Z, LIU X, et al. Aqueous gel casting of water-soluble calcia-based ceramic core for investment casting using epoxy resin as a binder [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86 (5-8): 1235-1242.
- [12] ZHANG Y, DUAN W, SUN X, et al. Effect of particle grading on water-soluble salt-based ceramic core based on vat photopolymerization [J]. Ceramics International, 2025, 51 (8): 9893-9903.
- [13] GONG X, LIU X, CHEN Z, et al. 3D printing of high-strength water-soluble salt cores via material extrusion [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118 (9-10): 2993-3003.
- [14] SHE Y, TANG J, WANG C, et al. Preparation of high-density green body based on binder jetting 3D printing using spheroidized SiC powder [J]. Ceramics International, 2024, 50 (18): 32412-32419.
- [15] MAXIMENKO A, OLUMORI I, MAIDANIUKA, et al. Modeling of effect of powder spreading on green body dimensional accuracy in additive manufacturing by binder jetting [J]. Powder Technology, 2021, 385: 60-68.
- [16] LI J, WANG L, YIN Z, et al. Preparation of binder-jetted alumina ceramics by a novel tailored glass-infiltrated powder [J]. Ceramics International, 2025, 51 (26): 48724-48734.