氧化铝和浸渗液对粘结剂喷射成形钾基复合盐芯性能与收缩率的影响

彭子伟，蒋文明，余小鹏，黄一鹤，郭韬雄，柳锦鑫，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：采用粘结剂喷射（BJ）成形技术制备氯化钾-硫酸钾水溶性复合盐芯，研究了氧化铝含量和饱和溶液浸渗对复合盐芯抗弯强度与尺寸收缩率的影响，并对其微观结构与增强机理进行分析。结果表明：随着氧化铝含量的增加，复合盐芯的抗弯强度和尺寸收缩率先增大后减小，当氧化铝含量为40wt.%时，复合盐芯的抗弯强度最高，达到10.66 MPa，尺寸收缩率为16.5%。当进一步采用饱和盐溶液浸渗后，氧化铝含量为40wt.%的复合盐芯试样的抗弯强度提升至10.92 MPa，尺寸收缩率降低至15.7%。氧化铝和浸渗液协同作用有利于调控粘结剂喷射成形钾基复合盐芯的性能与收缩率，可为高强度低收缩的可溶性盐芯制备提供新思路。

关键词：粘结剂喷射；复合盐芯；浸渗液；抗弯强度；收缩率

中图分类号：TG221；TG249.5；TF124　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-4977（2026）10-1089-07

DOI：10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0139

Effects of Alumina and Infiltrant on Performance and Shrinkage Rate of Potassium-Based Composite Salt Cores Formed by Binder Jetting

PENG Zi-wei, JIANG Wen-ming, YU Xiao-peng, HUANG Yi-he,
GUO Tao-xiong, LIU Jin-xin, FAN Zi-tian

(State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: The binder jetting (BJ) forming technology was used to prepare potassium chloride and potassium sulfate water-soluble composite salt cores, and the effects of alumina content and saturated solution infiltration on the flexural strength and dimensional shrinkage of the composite salt cores were studied, and their microstructure and reinforcement mechanism were analyzed. The results showed that with the increase of alumina content, the flexural strength and dimensional shrinkage of the composite salt core first increased and then decreased. When the alumina content was 40wt.%, the flexural strength of the composite salt core was the highest, reaching 10.66 MPa, and the dimensional shrinkage rate was 16.5%. After further infiltrating with a saturated salt solution, the flexural strength of the composite salt core sample with an alumina content of 40wt.% was increased to 10.92 MPa, and the dimensional shrinkage rate was reduced to 15.7%. The synergistic effect of alumina and infiltration solution is beneficial for regulating the performance and shrinkage rate of the potassium based composite salt cores formed by binder jetting, which can provide new ideas for the preparation of high-strength and low shrinkage soluble salt cores.

Key words: binder jetting; composite salt core; infiltration solution; flexural strength; shrinkage rate

目前航空航天等领域用关键铸件内部结构趋向复杂细孔、窄槽与中空设计，通常采用型芯来成形这些内腔，这对型芯的力学性能、水溃散性与可成形性能都提出了较高要求[1-3]。水溶性型芯具备快速溶于水的特质，能显著提升型芯清理效率，在制造复杂内腔结构的有色合金铸件方面极具应用前景[4-6]。铸造用高强度水溶性型芯主要采用熔融浇注法制备，型芯力学性能优异，但其形状受模具限制，且脱模困难，如果制

基金项目：国家自然科学基金（52271102，52075198）。

收稿日期：2026–07–01 收到初稿，2026–07–07 收到修订稿。

作者简介：彭子伟（2000–），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：pengziwei2021@163.com

通信作者：蒋文明，男，教授，博士生导师，E-mail：wmjiang@hust.edu.cn

引用格式：彭子伟，蒋文明，余小鹏，等 . 氧化铝和浸渗液对粘结剂喷射成形钾基复合盐芯性能与收缩率的影响 [J]. 铸造，2026，75（10）：1089–1095.

Peng Ziwei，Jiang Wenming，Yu Xiaopeng，et al. Effects of alumina and infiltrant on performance and shrinkage rate of potassium-based composite salt cores formed by binder jetting [J]. Foundry，2026，75（10）：1089–1095.

备的是细长盐芯，还存在难度大、成本高和废品率高等问题，难以适配复杂结构铸件的高效生产需求[7-8]。增材制造技术[9-10]是复杂结构盐芯制备的一个极佳的解决方案。粘结剂喷射（BJ）技术[11-14]由于其可选材料范围广泛，无需支撑结构，设计自由度高，打印成本低等特点，特别适合可溶性盐芯的制备，为解决上述难题提供了新路径。牛言清等人[15]使用纳米ZrO_2分散体真空浸渗粘结剂喷射制备的重质碳酸钙样品，成功获得了高强度的可溶性陶瓷芯。然而，重质碳酸钙在高温烧结过程中会发生分解，导致显著收缩，*X*、*Y*和*Z*轴的收缩率分别为23.72%、24.66%和31.04%。余小鹏等将6wt.%的SiO_2添加到重质碳酸钙制备的氧化钙可溶盐芯中，显著改善了烧结收缩[16]。*X*、*Y*和*Z*轴的收缩率分别从18.84%、20.57%和27.41%显著降低到7.09%、7.48%和9.45%，但是最终的烧结强度仅为4.93 MPa。由此可见，通过BJ技术制造高强度与良好水溶性兼备的型芯仍然十分困难，存在成形强度低、烧结收缩大的问题。

针对上述问题，本研究以氯化钾-硫酸钾混合物为水溶性盐芯基体，氧化铝为增强剂，饱和盐液为浸渗液，采用粘结剂喷射技术制备复杂结构、高强度和低收缩的水溶性复合盐芯试样，系统分析氧化铝含量和浸渗液对盐芯力学性能与尺寸收缩率的影响，揭示抗弯强度提升与尺寸收缩率降低的机理。

1 试验材料及方法

使用的水溶性复合盐芯原料包括：氯化钾粉末（纯度99wt.%）、硫酸钾粉末（纯度99wt.%）、氧化铝粉末（纯度99wt.%）；采用酚醛树脂为粘结剂，无水乙醇为溶剂，混合制备打印墨水。

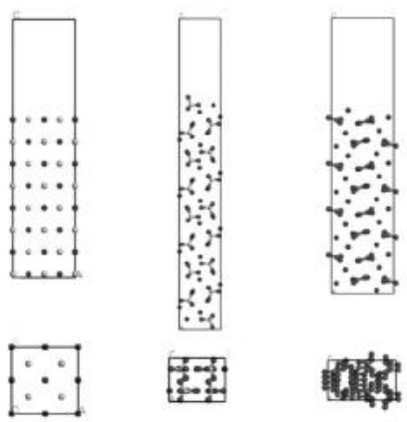
水溶性盐芯成形分为原料配比、粘结剂喷射成形、浸渗处理和恒温烧结四步，将质量比为1∶1 的氯化钾和硫酸钾与不同质量分数的氧化铝加入混粉机内搅拌，充分混合后得到打印粉末装入粉缸；然后使用粘结剂喷射技术打印初坯（粘结剂饱和度为100%，层厚为150 μm）； 打印完成后取出整台粉床固化，冷却后清理多余粉末，得到初坯。

将初坯浸入饱和盐液进行浸渗后干燥，将干燥试样埋入球形氧化铝中，使用烧结炉进行高温烧结，随炉冷却后得到钾基复合盐芯试样。

使用电子万能试验机（C42.104，New Sansi，China）和三点弯曲法测试样品的弯曲强度。机器的测试参数设定为测试跨度30 mm，加载速度0.05 mm/min。测试五个样品，计算平均值得到样品的抗弯强度。使用扫描电子显微镜（SEM，Quanta 200）观察金溅射镀膜预处理样品的微观结构。

2 试验结果与分析

使用KCl、K_2SO_4和K_2CO_3中的两种盐进行试验。使用CASTEP模块进行结构优化与能量计算，通过计算结合能从而选出结合效果更佳的两种盐。使用CASTEP模块构建的盐芯表面模型KCl（100）、K_2SO_4（010）和K_2CO_3（001）如图1所示。



（a）KCl（100）（b）K_2SO_4（010）（c）K_2CO_3（001）

图1 盐芯表面模型

Fig. 1 Salt core surface model

两种晶体之间的结合面往往由表面能较低的晶面组成，因此对KCl、K_2SO_4、 K_2CO_3分别进行表面能计算，以选取合适的低指数晶面来构建界面模型（KCl为立方晶系，K_2SO_4为正交晶系，K_2CO_3为单斜晶系）。表面能由式（1）给出。

$$E_{surf}=\frac{1}{2A}\left(E_{slab}-NE_{bulk}\right) \quad (1)$$

式中：E_{slab}是晶体界面模型的能量，E_{bulk}是晶胞模型的能量，*N*为界面模型与晶胞模型原子个数之比，*A*是界面模型的横截面积（晶格常数*a*、*b*以及它们夹角的正弦值之积）。

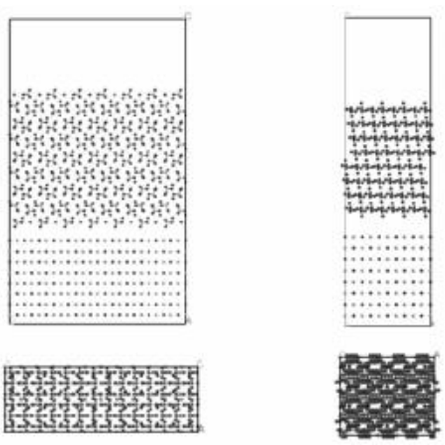
表1是三种盐不同晶面的部分表面能计算参数及表面能。由各模型的表面能计算结果可知，K_2SO_4的（010）晶面、K_2CO_3的（001）晶面和KCl的（100）晶面表面能最低，形成稳定晶体结构的可能性更大，后续使用三种盐的这三种晶面计算结合能。

由KCl（100）与K_2SO_4（010）界面结合并超胞后建立的界面模型，如图2（a）所示，KCl（100）与K_2CO_3（001）界面结合并超胞后建立的界面模型，如图2（b）所示。最终模拟两种界面结合过程中500ps内的结合能变化情况，如图3所示。可以看到，KCl和K_2SO_4的结合能比KCl和K_2CO_3更高，理论上烧结完成后可溶盐之间的结合会更加充分，因此在后续试验中

表1 三种盐不同晶面的部分表面能计算参数及表面能

Tab. 1 Partial surface energy calculation parameters and surface energies of different crystal faces of the three salts

表面	E_{slab}/eV	E_{bulk}/eV	原子个数比	表面长度a/nm	表面长度b/nm	夹角/(°)	横截面积/nm^2	表面能/(J·m^{-2})
KCl（100）	−38 111.31	−4 764.12	8	0.898 7	0.898 7	90	0.807 7	0.159 4
KCl（110）	−38 108.57	−4 764.12	8	1.271 0	0.898 7	90	1.142 3	0.305 4
KCl（111）	−19 047.38	−4 764.12	4	0.889 5	0.889 5	120	0.685 3	1.061
K_2SO_4（010）	−57 411.18	−14 352.87	8	0.588 2	0.761 3	90	0.447 8	0.056 2
K_2SO_4（110）	−57 410.76	−14 352.87	8	0.588 2	1.281 6	90	0.753 8	0.078 2
K_2SO_4（111）	−57 404.61	−14 352.87	8	0.962 1	1.186 9	90	1.141 9	0.030 14
K_2CO_3（001）	−48 444.26	−12 111.85	8	0.573 2	0.982 9	90	0.563 4	0.446
K_2CO_3（101）	−48 438.49	−12 111.85	8	0.967 8	0.982 9	90	0.951 2	0.750
K_2CO_3（111）	−48 436.75	−12 111.85	8	1.137 8	0.967 8	70.26	1.036 4	0.823



（a）KCl（100）与K_2SO_4（010） （b）KCl（100）与K_2CO_3（001）

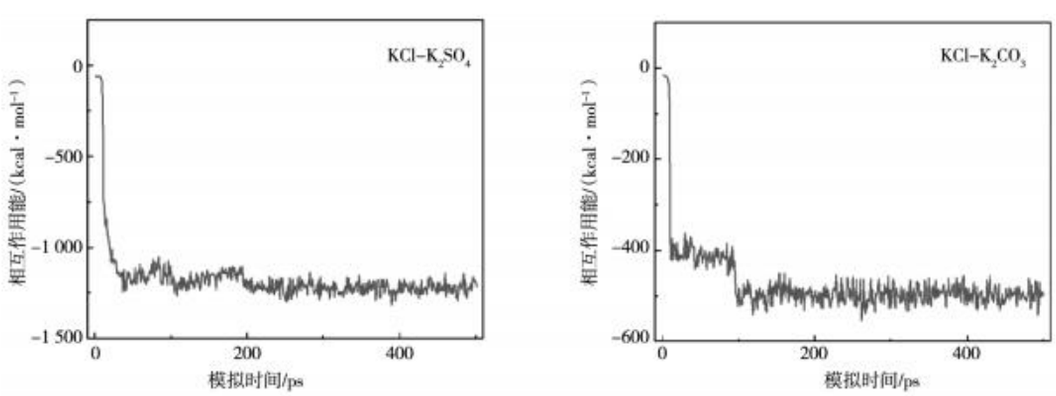
图2 界面模型

Fig. 2 Interface models

选择了KCl和K_2SO_4进行试验。

众所周知，烧结温度和时间是影响型芯力学性能和微观结构的重要因素。较低的烧结温度和时间使得颗粒之间难以结合，从而导致型芯的力学性能降低。相反，较高的烧结温度和时间可以形成更多的低粘度液相，有利于颗粒的输运、重排和粘结，使晶粒尺寸更细、分布更均匀，从而提高型芯的力学性能。然而，过高的烧结温度和时间会导致大量低熔点无机盐熔化甚至蒸发，引发型芯异常变形和开裂等缺陷，严重降低其力学性能和尺寸精度。

利用同步热分析仪获得在氮气中以10 ℃/min的升温速率将样品从30 ℃加热到900 ℃的TG-DSC曲线，如图4（a）所示。生坯在100~200 ℃之间发生脱水吸热，在600 ℃左右出现明显的放热峰，标志着酚醛树脂分



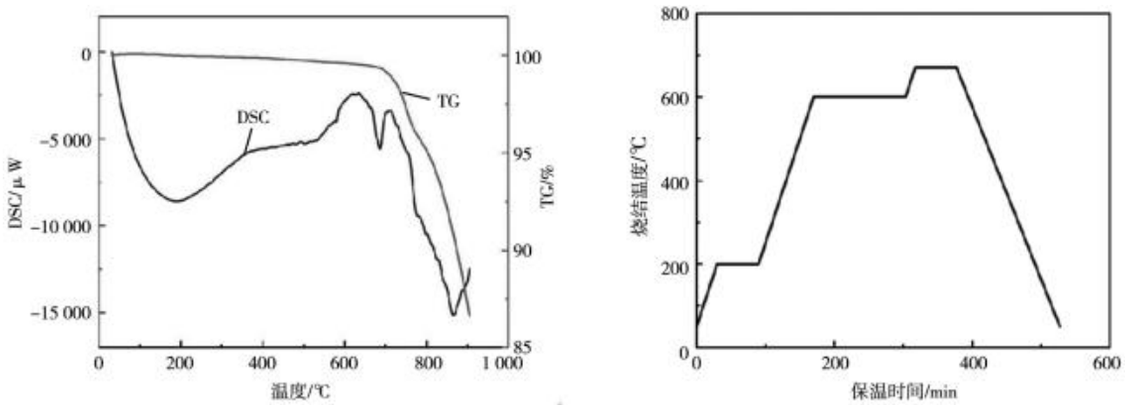
（a）KCl（100）与K_2SO_4（010） （b）KCl（100）与K_2CO_3（001）

图3 结合能

Fig. 3 Binding energies

解。在670 ℃时出现明显的吸热峰，代表KCl-K_2SO_4复合盐核的熔化，TG曲线从这里开始明显下滑，到850 ℃时，总TG降低达到 13%，表示这个过程中盐出现了分解。因此为保证样品的结构和形状不变形，烧结温度不宜过高，在670 ℃左右比较合适。

基于TG-DSC曲线和以前的研究数据，烧结温度和时间控制在670 ℃和60 min，最终的烧结曲线如图4（b）所示。试样以5 ℃/min的速度从20 ℃加热到200 ℃，然后在此温度下保持60 min，以确保完全去除水分。随后，将酚醛树脂以3 ℃/min的速度从200 ℃加



（a）TG-DSC分析　　（b）烧结工艺

图4　生坯的烧结过程

Fig. 4 Sintering process of the green body

热到600 ℃，然后保持60 min，以完全去除酚醛树脂，然后在670 ℃烧结60 min，最后试样随炉冷却完成烧结。

图5展示了烧结温度为670 ℃时氧化铝含量对盐芯抗弯强度和尺寸收缩率的影响。从图中可以得出，试样中的氧化铝含量对盐芯抗弯强度和尺寸收缩率均会产生较大的影响。随着氧化铝含量由0提升到40wt.%，盐芯的抗弯强度显著增加，由0.96 MPa逐渐上升至10.66 MPa，且当氧化铝的含量由10wt.%提升到20wt.%时，抗弯强度出现显著提高，但当氧化铝含量再次增加到50wt.%时，抗弯强度出现下降，下降到5.88 MPa。此外，随着氧化铝含量由0提升到20wt.%，盐芯的尺寸收缩率从9.6%显著提升到24.2%，当氧化铝含量由20wt.%提升到50wt.%，盐芯的尺寸收缩率逐渐回落到11.7%。可以看出，当氧化铝含量为40wt.%时试样的综合性能较好，在尺寸收缩率较低的同时拥有最高的抗弯强度。

此外，氧化铝的加入会一定程度降低硫酸钾-氯化钾二元盐芯的烧结温度，在这个温度下，氧化铝含量在0~20wt.%之间的盐芯没有得到完全烧结，因此相应的抗弯强度也较低。且由于没有氧化铝作为骨架支撑，变形也相对严重。

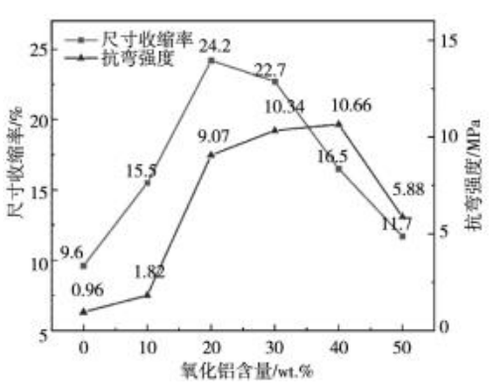


图5　氧化铝含量对盐芯抗弯强度和尺寸收缩率的影响

Fig. 5 Effects of alumina contents on flexural strengths and dimensional shrinkage rates of the salt cores

为了进一步降低试样的尺寸收缩率，提高其尺寸精度，使用氯化钾-硫酸钾饱和水溶液对氧化铝含量为30wt.%到50wt.%的试样进行浸渗试验，浸渗时间为1 min。图6和图7分别显示出了浸渗对试样抗弯强度

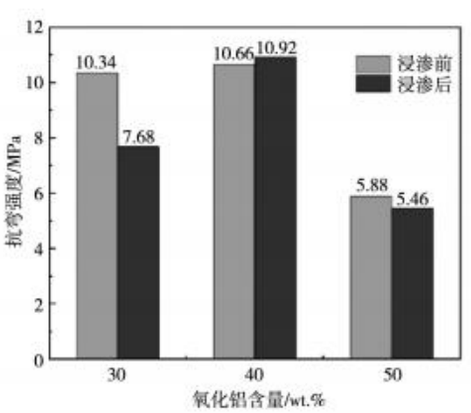


图6　浸渗对试样抗弯强度的影响

Fig. 6 Effect of infiltration on flexural strengths of the samples

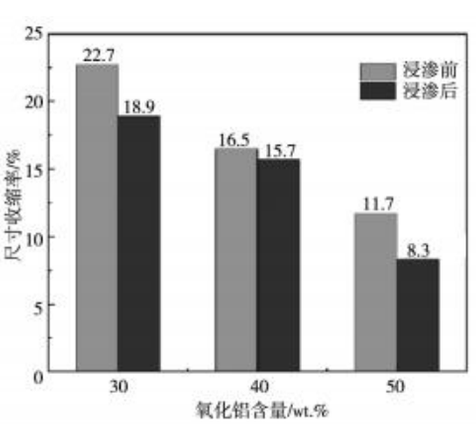
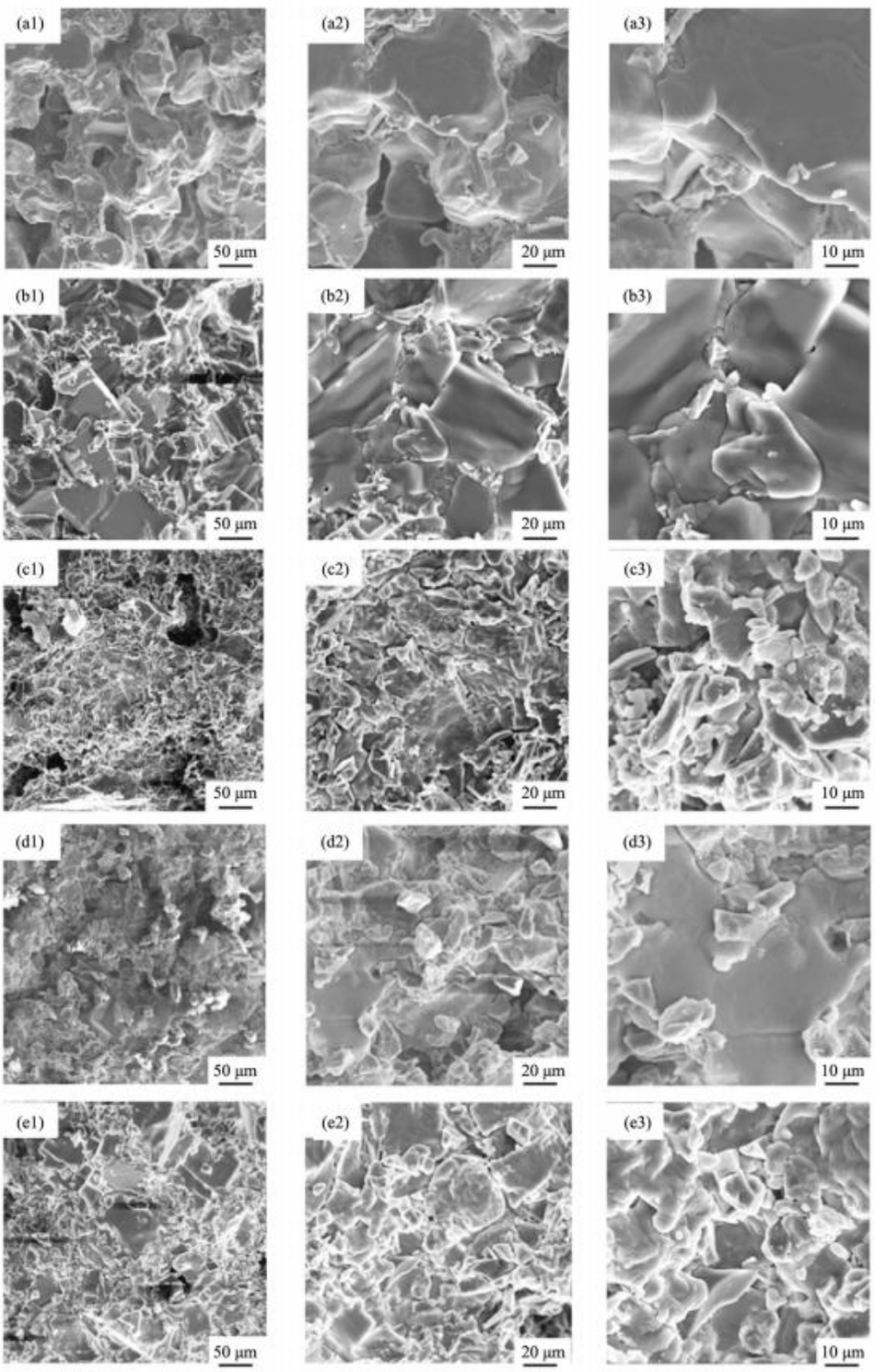


图7　浸渗对试样寸收缩率的影响

Fig. 7 Effect of infiltration on dimensional shrinkage rates of the samples

和尺寸收缩率的影响。对于氧化铝含量为40wt.%的试样来说，饱和水溶液浸渗可以使抗弯强度保持不变的情况下将收缩率下降到15.7%。可以看出饱和水溶液浸渗处理能一定程度地降低试样的尺寸收缩率，同时抗弯强度也会有一定程度的下降。

当试样中没有加入氧化铝时，没有烧结完全会产生严重的掉粉情况，难以进行SEM测试。 图8显示了不同氧化铝加入量下可溶芯的微观结构形态。从图中可以看出，当氧化铝含量从10wt.%增加到40wt.%，颗粒间的结合程度逐渐提升，试样组织逐渐趋于致密，



（a）10wt.%；（b）20wt.%；（c）30wt.%；（d）40wt.%；（e）50wt.%

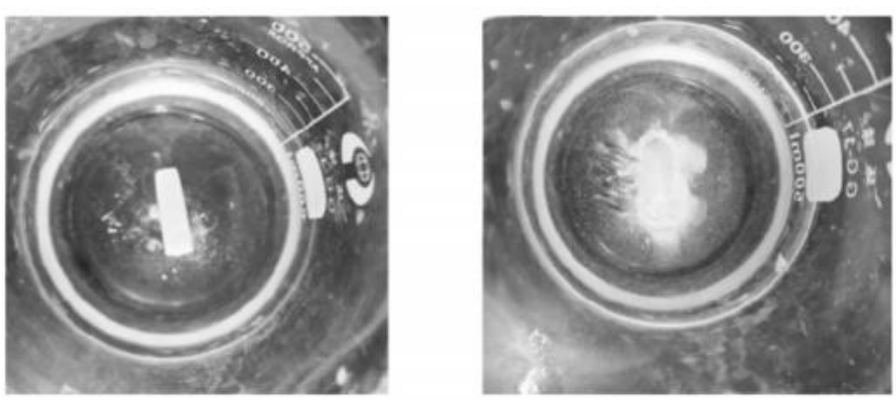
图8 不同氧化铝加入量盐芯的微观形貌

Fig. 8 Micro-morphologies of the salt cores with different alumina additions

内部的孔洞也明显减少，从而形成相对致密的微观结构。但是当氧化铝的质量分数增加到50wt.%之后，试样内部的孔洞反而出现明显增多，试样的各个组分没有得到很好的结合。从微观结构分析可以验证出抗弯强度测试所得到的结论。由此可见，在氯化钾-硫酸钾二元盐芯内加入一定量的氧化铝可以一定程度上增加试样的抗弯强度和减少收缩率，且当加入的氧化铝质量分数为40wt.%时，烧结制成的试样拥有最佳的综合性能。但当氧化铝含量过多时，盐基体之间无法得到有效的烧结结合，导致试样内部反而出现更多的孔洞，降低了其整体抗弯强度。

在这种可溶盐芯体系中，氧化铝主要作为试样的骨架和基底。氧化铝由于硬度高、弹性模量高（≈380 GPa），在烧结过程中几乎不发生变形，当盐基体受力时，应力通过界面传递给刚性氧化铝颗粒，由其分担部分载荷，其弥散颗粒还会阻碍微裂纹产生与扩张，从而提升试样的抗弯强度。当盐芯中没有氧化铝作为骨架支撑、烧结温度超过盐芯的熔点时，试样就容易发生坍塌变形和更严重的收缩，但是若烧结温度没有达到盐芯的熔点时，试样就会出现烧结不完全的情况，这种情况下不具备基本的抗弯强度。此外，氧化铝颗粒的加入可以充当异质形核质点，细化晶粒，也会一定程度地抑制凝固收缩，降低缩孔/缩松倾向。

图9显示了氧化铝为40wt.%的样品的溃散性。在冷水中浸泡1天后，样品完全分解并塌陷，这种现象主要是由于在浸泡过程中样品表面的KCl和K_2SO_4 逐步溶解，导致结构完整性逐渐丧失。随着这些亲水物质溶解，样品的整体稳定性降低，最终导致完全崩溃。虽然相较于氧化铝含量低的试样（例如氧化铝为10wt.%的试样在冷水中完全溃散仅需1 h），这种试样的溃散效率明显降低，但是其相应的抗吸潮性会相对更强。此外，通过加热、振动和搅拌等物理方法可以加速样品的溶解速率，大幅提高工作效率。



（a）刚放入冷水中的试样　　（b）放在水里1天后的试样

图9　氧化铝含量为40wt.%的试样的溃散

Fig. 9 Disintegration of the specimen with 40wt.% alumina content

3　结论

（1）随着氧化铝含量的增加，复合盐芯的抗弯强度和尺寸收缩率均呈现先增大后减小的趋势。

（2）当氧化铝含量从0增大到40wt.%时，盐芯的抗弯强度由0.96 MPa逐渐上升至10.66 MPa，但当氧化铝含量达到50wt.%时下降到5.88 MPa。

（3）当氧化铝含量由0提升到20wt.%时，盐芯的尺寸收缩率从9.6%显著提升到24.2%，当氧化铝含量由20wt.%提升到50wt.%，盐芯的尺寸收缩率逐渐回落到11.7% 。

（4）进一步使用饱和溶液浸渗后，干燥过程中从饱和盐液结晶析出的微细无机盐颗粒填充盐芯内部孔隙，氧化铝含量为40wt.%的复合盐芯试样的抗弯强度提升至10.92 MPa，尺寸收缩率降低至15.7%。

参考文献：

[1] Ning X，Zuo K，Li Y，et al. Study on the effect and mechanism of mold temperature and ceramic particle alumina on the strength and water solubility of NaCl-Na_2CO_3 and NaCl-Na_2SO_4 composite cores [J]. International Journal of Metalcasting，2025，19（4）：1884–1902.

[2] 程世豪. 铝合金铸造用水溶性盐芯的制备与性能研究 [D]. 广州：华南理工大学，2023.

[3] 王雪婷. 高强度无机复合型水溶性盐芯制备工艺及增强机理 [D]. 沈阳：沈阳工业大学，2023.

[4] Gong X，Jiang W ，Liu F，et al. Effects of glass fiber size and

content on microstructures and properties of KNO_3-based water-soluble salt core for high pressure die casting [J]. International Journal of Metalcasting，2021，15（2）：520–529.

[5] Tu S，Liu F，Li G，et al. Fabrication and characterization of high-strength water-soluble composite salt core for zinc alloy die castings [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2018，95（1–4）：505–512.

[6] 龚小龙，赵建伟，杨力，等. 粘结剂喷射增材制造水溶性盐芯材料与性能研究 [J]. 铸造，2025，74（2）：143–149.

[7] Wang X，Song L，Liu W，et al. Effect of ceramic powder on the performance of composite water-soluble salt cores：comparison of experimental data and molecular dynamics simulation [J]. International Journal of Metalcasting，2024，18（1）：494–504.

[8] Cheng Z，Fan S，Peng L，et al. Fabrication andcharacterization of high-strength water-soluble composite salt cores via layered extrusion forming [J]. International Journal of Metalcasting，2023，17（2）：988–997.

[9] Zhang Y，Duan W，Sun X，et al. Effect of particle grading on water-soluble salt-based ceramic core based on vat photopoly merization [J]. Ceramics International，2025，51（8）：9893–9903.

[10] Mu Y，Liu F，Zhang C，et al. Fabrication of high-strength and anti-hydration water-soluble calcia-based ceramic core modified with nano-ZrO_2 via direct ink writing method [J]. Ceramics International，2023，49（23）：38623–38634.

[11] Bai W，Zhang T，Yue B，et al. Performance of a water-soluble ceramic core and its application [J]. International Journal of Metalcasting，2025，19（2）：977–988.

[12] Zhao J，Gong X，Xiao X，et al. Preparation of high-strength and low-shrinkage composite salt cores by binder jetting and vacuum impregnation [J]. Materials and Manufacturing Processes，2024，39（15）：2099–2110.

[13] Ibrahim A，Ahmet C. Investigation of the mechanical properties of water-soluble salt cores produced by binder jetting additive manufacturing [J]. International Journal of Metalcasting，2025，19（6）：3705–3716.

[14] Zhao H，Wang A，Li G，et al. Improving the properties of binder jetted ceramics via nanoparticle dispersion infiltration [J]. Ceramics International，2022，48（22）：33580–33587.

[15] Niu Y，Jiang W，Yang L，et al. Preparation of low-cost high strength soluble ceramic cores using heavy calcium carbonate by binder jetting and vacuum impregnation [J]. Journal of the European Ceramic Society，2023，43（16）：7714–7720.

[16] Yu X，Niu Y，Jiang W，et al. Novel low-shrinkage and soluble heavy calcium carbonate matrix ceramic cores prepared by binder jetting [J]. Ceramics International，2025，51（10）：13403–13411.

（编辑：刘冬梅，ldm@foundryworld.com）