

粉煤灰与酸性高炉渣配比对多孔莫来石基陶瓷吸附性能的影响

龚 凯^{1,2}, 何彦辰¹, 陈雪梅³

¹攀枝花学院钒钛学院, 四川 攀枝花

²钒钛关键战略材料四川省重点实验室, 四川 攀枝花

³攀枝花学院数学与计算机学院, 四川 攀枝花

收稿日期: 2025年12月22日; 录用日期: 2026年3月9日; 发布日期: 2026年3月17日

摘 要

为解决传统多孔莫来石陶瓷制备成本高的问题, 以冶金固废粉煤灰和酸性高炉渣为主要原料, Al_2O_3 为补充铝源, 添加球形石墨粉造孔剂和3%聚乙烯醇粘剂, 采用模压成型工艺于1250℃常压烧制制备多孔莫来石陶瓷, 探究原料配比及粒径对其性能的影响。结果表明: 调控粉煤灰与酸性高炉渣质量比和粒径, 可制备出净水效果和吸附性能良好的多孔莫来石基陶瓷, 过滤水前后总溶解固体差值最大可达33 ppm, 对六价铬离子和甲基橙最大吸附率分别可达30.89%和20.45%。物相分析显示试样主要由莫来石相、钙长石相和刚玉相构成, 微观结构存在较多不规则孔径。

关键词

粉煤灰, 酸性高炉渣, 多孔莫来石基陶瓷, 六价铬离子吸附, 甲基橙吸附

Effect of the Ratio of Fly Ash to Acidic Blast Furnace Slag on the Adsorption Performance of Porous Mullite-Based Ceramics

Kai Gong^{1,2}, Yanchen He¹, Xuemei Chen³

¹School of Vanadium and Titanium, Panzhihua University, Panzhihua Sichuan

²Vanadium and Titanium Critical Strategic Materials Key Laboratory of Sichuan Province, Panzhihua Sichuan

³School of Mathematics and Computers, Panzhihua University, Panzhihua Sichuan

Received: December 22, 2025; accepted: March 9, 2026; published: March 17, 2026

文章引用: 龚凯, 何彦辰, 陈雪梅. 粉煤灰与酸性高炉渣配比对多孔莫来石基陶瓷吸附性能的影响[J]. 冶金工程, 2026, 13(1): 13-23. DOI: 10.12677/meng.2026.131003

Abstract

To address the high production cost of traditional porous mullite ceramics, porous mullite-based ceramics were prepared via die pressing and subsequent sintering at 1250°C under ambient pressure, using metallurgical solid wastes—fly ash and acid blast furnace slag—as the main raw materials, with Al_2O_3 as a supplementary aluminum source, spherical graphite powder as the pore-forming agent, and a 3 wt% polyvinyl alcohol (PVA) solution as the binder. The effects of raw material ratio and particle size on the properties of the ceramics were investigated. The results indicate that by regulating the mass ratio and particle size of fly ash and acidic blast furnace slag, porous mullite ceramics with favorable water purification effects and adsorption performance can be prepared. The maximum difference in total dissolved solids before and after water filtration reached 33 ppm, while the maximum adsorption rates for hexavalent chromium ions and methyl orange reached 30.89% and 20.45%, respectively. Phase analysis reveals that the sample is primarily composed of mullite, anorthite, and corundum phases, and the microstructure shows the presence of numerous irregular pores.

Keywords

Fly Ash, Acid Blast Furnace Slag, Porous Mullite-Based Ceramics, Hexavalent Chromium Ion Adsorption, Methyl Orange Adsorption

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

多孔莫来石陶瓷因其独特的结构与性能组合而受到广泛关注：其多孔骨架赋予材料轻质、隔热和吸声特性，而莫来石主相则贡献了高强度、高硬度及出色的抗热震性能，这使得它在催化载体、高温过滤与隔热等领域具有重要应用价值[1][2]。优异的化学惰性与高温稳定性，进一步保障了其在恶劣环境下的长期服役可靠性。

面对日益严峻的环境污染问题，开发经济高效的多孔陶瓷过滤材料用于废气、废水处理成为研究热点。该材料的最终性能强烈依赖于其制备路径与工艺参数，如初始原料的化学组成与粒度、造孔剂类型与含量、以及所采用的成型与烧结方法。目前，该领域的研究集中于多种制备技术，包括发泡法[3]-[6]、造孔剂法[7]-[10]、反应烧结法[11]-[14]和增材制造技术[15]-[18]等。

基于降低原料成本与实现固废资源化的考虑，提出以粉煤灰和酸性高炉渣两类冶金固废为主要硅铝源，辅以 Al_2O_3 调节组成，采用球形石墨为造孔剂、聚乙烯醇(PVA)溶液为粘结剂，通过室温模压与常压烧结工艺制备多孔莫来石基陶瓷。系统研究粉煤灰与高炉渣的质量配比与原料粒径对陶瓷吸附性能的影响。

2. 实验

2.1. 实验材料

所用原料包括粉煤灰、酸性高炉渣、氧化铝、球形石墨粉及聚乙烯醇。其中，粉煤灰与酸性高炉渣取自四川攀枝花某冶金企业，其详细化学成分(质量分数)列于表 1。氧化铝与球形石墨粉购自国药集团化

学试剂有限公司, 聚乙烯醇购自天津致远化学试剂有限公司, 以上试剂均为分析纯级。

Table 1. Chemical composition table of fly ash and acid blast furnace slag/wt%

表 1. 粉煤灰和酸性高炉渣的化学成分表/%

名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃
粉煤灰	42.16	28.00	1.63	23.67	1.25	3.29
酸性高炉渣	37.44	11.07	10.75	26.62	3.01	5.74

2.2. 实验设备

采用箱式电阻炉对陶瓷胚体实施烧制。在实验进程中, 借助高温烧结促使原料中的 Al₂O₃ 和 SiO₂ 发生扩散传质与固相反应, 进而生成莫来石相。X 射线衍射(XRD)分析采用荷兰帕纳科公司生产的 Xpert Pro 型 X 射线衍射仪; 形貌分析(SEM)采用德国蔡司公司生产的 EVO18 型扫描电子显微镜; 能量色散谱(EDS)采用美国布鲁克公司的能量色散 X 射线谱仪。

2.3. 实验方法

2.3.1. 制备方法

Table 2. Experimental scheme table

表 2. 实验方案表

实验号	粉煤灰和酸性高炉渣的质量比	原料粒径/目
1	60:40	80
2	60:40	120
3	60:40	160
4	70:30	80
5	70:30	120
6	70:30	160
7	80:20	80
8	80:20	120
9	80:20	160

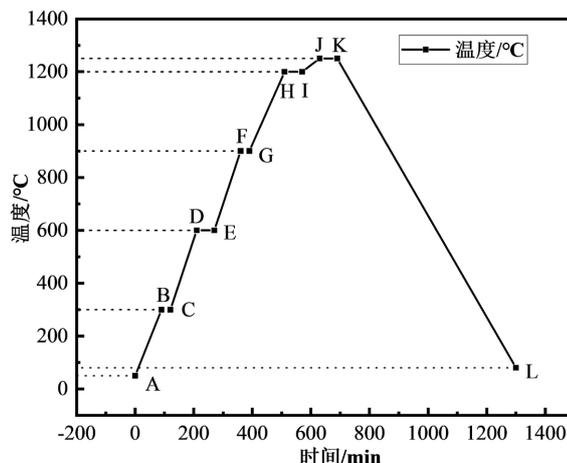


Figure 1. Sintering process diagram

图 1. 烧制工艺图

采用正交实验法,探究粉煤灰与酸性高炉渣的配比及粒径对多孔莫来石基陶瓷制备及其性能的影响。依据实验方案表(见表 2)所规定的配比及粒径进行物料称量与混合。借助手板式液压四柱制样机,采用模压成型工艺,将混合物料压制成长条状胚体与圆饼状胚体。脱模后,把胚体置于电热鼓风干燥箱内,于 210℃条件下干燥 3 h。干燥结束后,将胚体放入箱式电阻炉,按照图 1 所示的烧制工艺进行烧结并保温。待随炉冷却后,即可获得多孔莫来石基陶瓷样品。

2.3.2. 净水性能测试

净水性能测试过程包含装置搭建与测试评价:先将圆饼状陶瓷样品装配于 32 mm 直径软管中构成过滤单元;随后使自来水自然流经样品,采用 TDS 笔检测过滤前后水样的总溶解固体值,其差值直接反映净水效果,差值越大则性能越佳。图 2 为样品净水性能测试装置示意图。

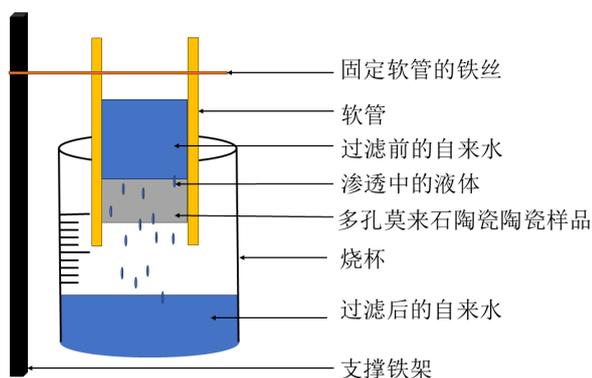


Figure 2. Diagram of water purification performance test device
图 2. 净水性能测试装置示意图

2.3.3. 吸附性能测试

吸附性能测试涵盖两个方面,分别为对六价铬离子(Cr(VI))的吸附性能检测以及对甲基橙的吸附性能检测。图 3 为吸附性能测试装置的示意图。

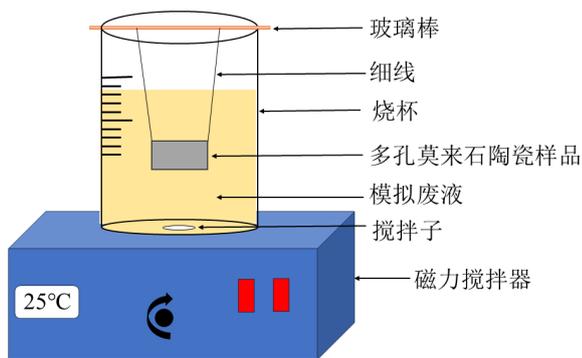


Figure 3. Schematic diagram of adsorption performance testing device
图 3. 吸附性能测试装置示意图

(1) Cr (VI)吸附性能测试:采用 0.2 g/L 重铬酸钾溶液模拟含铬废水。首先测定该初始溶液的吸光度作为基准值。随后将溶液等分为九等份,分别盛入相同型号烧杯,用细线悬吊多孔莫来石基陶瓷样品使其完全浸没在溶液中。在磁力搅拌条件下进行 1 h 吸附后,取出样品,对残余溶液进行离心分离,并通过紫外分光光度法测定其最终吸光度。

(2) 甲基橙吸附性能测试：采用 0.01 g/L 甲基橙溶液模拟含有机染料废水，首先测定该初始溶液的吸光度作为基准值。随后将溶液等分为九份，分别盛入烧杯，用细线悬吊多孔莫来石基陶瓷样品使其完全浸没。在磁力搅拌条件下进行 1 h 吸附后，取出样品，对残余溶液进行离心分离，并通过紫外分光光度法测定其最终吸光度。

3. 结果与讨论

3.1. 净水性能分析

多孔莫来石基陶瓷样品的净水性能采用自来水通过样品前后总溶解固体(TDS)的差值予以衡量，即自来水自然流经多孔莫来石陶瓷样品前后的 TDS 差值越大，表明其净水性能越优。图 4 为样品净水性能与粉煤灰和酸性高炉渣质量比及粒径关系图。通过分析 TDS 变化值与工艺参数的关联规律(图 4)，发现：1) 在 60:40 与 70:30 配比下，最佳净化效果分别出现在 160 目与 120 目；2) 80:20 配比时，净化性能随粒径细化持续提升；3) 160 目样品在 70:30 配比时出现性能拐点。最终优化条件为质量比 80:20 结合 80 目粒径，该组合使 TDS 去除量达到峰值 33 ppm，这表明在此配比与粒径条件下，样品具有最优的净水性能，其内部孔隙结构更有利于水中离子的吸附与截留。

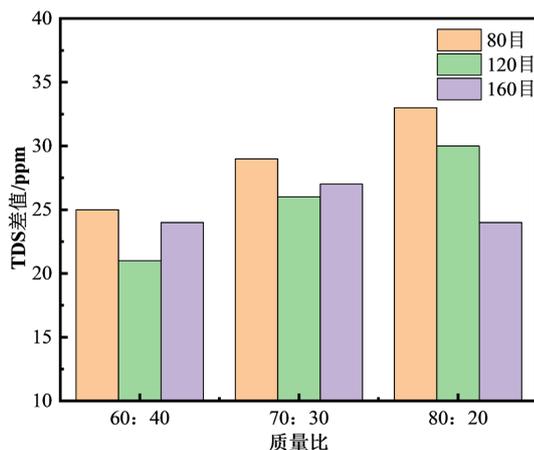


Figure 4. Relationship diagram of water purification performance of samples with mass ratio of fly ash to acid blast furnace slag and particle size

图 4. 样品净水性能与粉煤灰和酸性高炉渣质量比及粒径关系图

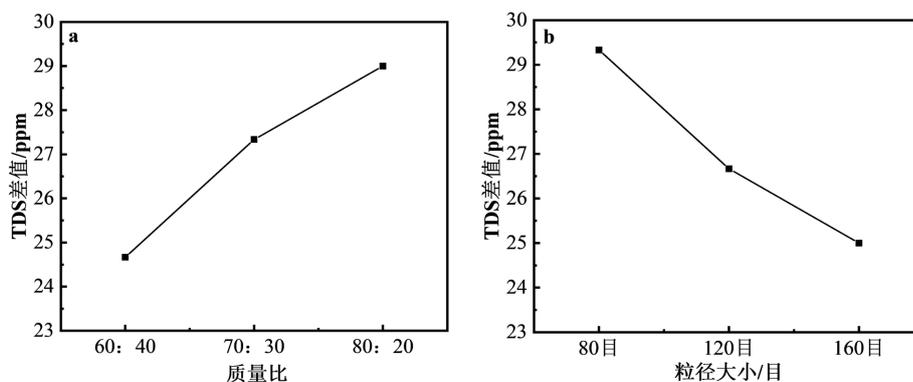


Figure 5. Variation of water purification performance of samples with mass ratio of fly ash to acid blast furnace slag (a) and particle size (b)

图 5. 样品净水性能随粉煤灰和酸性高炉渣质量比(a)及粒径(b)变化趋势图

图 5 是样品净水性能随粉煤灰和酸性高炉渣质量比(a)和粒径(b)变化的趋势图。由图 5 可见, 随着粉煤灰质量比的增加, 样品的总溶解固体(TDS)差值呈上升趋势; 而随着样品粒径的增大, 样品的总溶解固体(TDS)呈下降趋势。此结果与图 4 中 80 目、120 目下的变化规律基本一致, 进一步验证了粉煤灰含量提升有助于增强样品对水中离子的吸附能力。然而, 当粒径增至 160 目时, TDS 差值出现反转趋势, 表明过细的颗粒可能因团聚效应导致孔道堵塞, 反而削弱净水效果。

3.2. 吸附性能分析

3.2.1. 对 Cr(VI)的吸附

图 6 是样品吸附 Cr(VI)前后的溶液颜色对照图。其中, 标液是未被吸附的溶液, 将标准溶液的吸光度分别与 9 组吸附后溶液的吸光度的值作差, 计算后即可得到各组样品对 Cr(VI)的吸附率。与最左侧标液相比, 所有样品吸附后溶液颜色均变淡, 表明样品对 Cr(VI)具备一定的吸附能力。被吸附处理后的溶液, 于静置阶段在烧杯底部出现微量固体析出, 推测为搅拌条件下样品表面发生磨蚀所致。

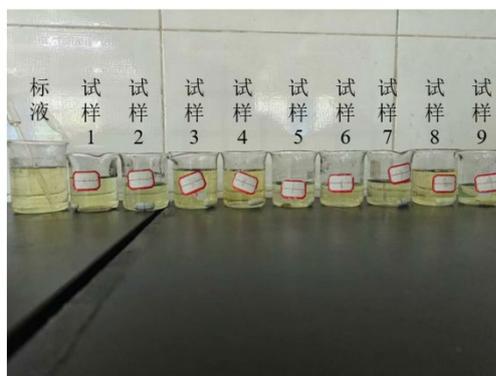


Figure 6. Comparison diagram of solution colors before and after Cr(VI) adsorption for 9 groups of samples
图 6. 9 组样品吸附 Cr(VI)前后的溶液颜色对照图

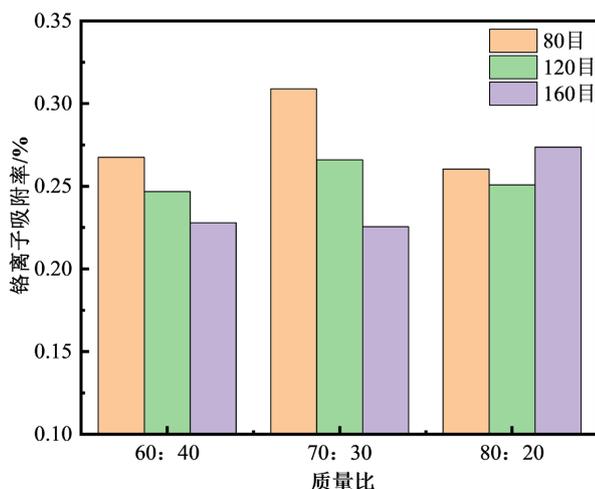


Figure 7. Relationship diagram of Cr(VI) adsorption rate of samples with mass ratio of fly ash to acid blast furnace slag and particle size

图 7. 样品对 Cr(VI)吸附率与粉煤灰和酸性高炉渣质量比及粒径关系图

图 7 是样品对 Cr(VI)吸附率与粉煤灰和酸性高炉渣质量比及粒径关系图。当粉煤灰占比为 60%~70%

时, 吸附率随粒径增大持续降低; 而在 80%高配比条件下则呈现先降后升的 V 型变化。固定粒径时, 80 目与 120 目样品在 70%配比处出现吸附峰值, 160 目样品则在 60%与 80%配比处形成双峰特征。最佳吸附性能出现在 70%配比与 80 目粒径组合, 吸附率达 30.89%。该结果表明, 适当提高粉煤灰比例并控制原料粒径在中等范围(80~120 目)有助于提升样品对 Cr (VI)的吸附性能。此外, 粒径过细可能导致颗粒团聚, 比表面积下降, 从而削弱吸附能力。综合来看, 材料配比与粒径协同作用显著影响吸附效果, 优化制备参数可有效增强其对重金属离子的去除效率。

图 8 是样品对 Cr (VI)吸附率随粉煤灰和酸性高炉渣质量比(a)及粒径(b)变化趋势图。数据分析表明, 吸附率随粉煤灰占比及粒径的增加均呈现先升后降的规律, 存在明确的极值点。当质量比为 70:30、粒径为 80 目时, 吸附率达到最大值 30.89%, 与图 7 所示结果相互印证。粒径过细或过粗均会导致吸附性能下降, 这主要与颗粒分散性差异及活性位点可及性有关。

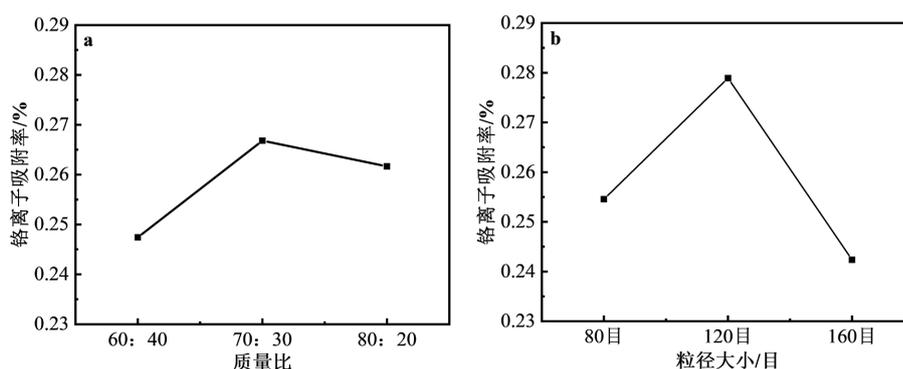


Figure 8. Variation of Cr (VI) adsorption rate of samples with mass ratio of fly ash to acid blast furnace slag (a) and particle size (b)

图 8. 样品对 Cr (VI)吸附率随粉煤灰和酸性高炉渣质量比(a)及粒径(b)变化趋势图

3.2.2. 对甲基橙的吸附

图 9 是 9 组样品吸附甲基橙前后的溶液颜色对照图。观察发现所有样品均显示出不同程度的颜色变浅, 其中试样 5 至 9 的褪色现象较为显著, 证实其对甲基橙分子具有明确吸附作用。也发现部分样品在测试中出现粉体脱落, 其原因与前述 Cr (VI)吸附实验中的分析一致。

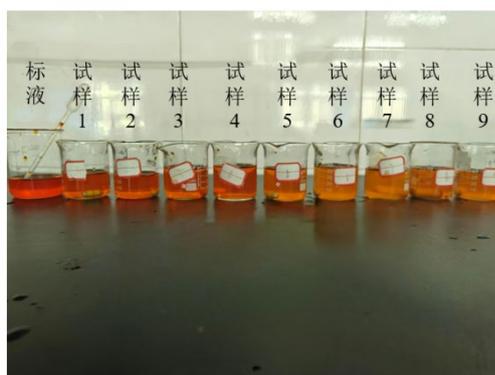


Figure 9. Comparison diagram of solution colors before and after methyl orange adsorption for 9 groups of samples

图 9. 样品吸附甲基橙前后的溶液颜色对照图

图 10 是样品对甲基橙吸附率随粉煤灰和酸性高炉渣质量比(a)及粒径(b)关系图。粉煤灰和酸性高炉

渣的质量比为 60:40 和 80:20 时, 随着粒径从 80 目增至 160 目, 制备的样品对甲基橙的吸附率呈现出先减小后增大的趋势; 粉煤灰和酸性高炉渣的质量比为 70:30 时, 随着粒径的增大, 制备的样品对甲基橙的吸附率呈现持续增大的趋势。在粉煤灰和酸性高炉渣的质量比为 80: 20, 粒径为 80 目条件下制备的样品对甲基橙的吸附率达到最高, 为 20.45%, 表明该参数组合最有利于甲基橙的去除。

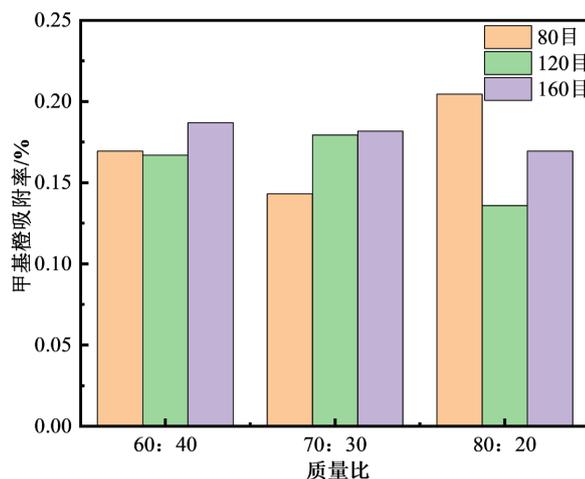


Figure 10. Relationship between methyl orange adsorption rate of samples and mass ratio of fly ash to acid blast furnace slag and particle size

图 10. 样品对甲基橙吸附率与粉煤灰和酸性高炉渣质量比及粒径关系图

图 11 是样品对甲基橙吸附率随粉煤灰和酸性高炉渣质量比(a)及粒径(b)变化趋势图。随着粉煤灰占比及原料粒径的增大, 吸附率均表现出先降后升的非单调变化特征, 呈现典型的 V 型趋势。

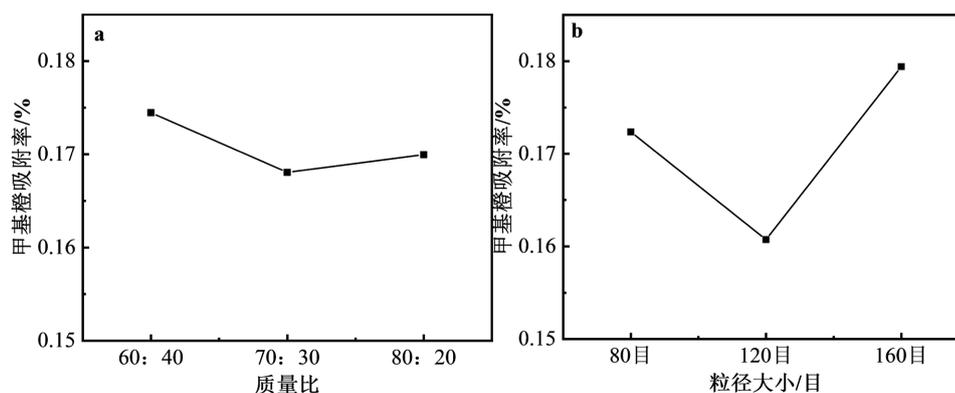


Figure 11. Variation of methyl orange adsorption rate of samples with mass ratio of fly ash to acid blast furnace slag (a) and particle size (b)

图 11. 样品对甲基橙吸附率随粉煤灰和酸性高炉渣质量比(a)及粒径(b)变化的趋势图

3.3. 物相分析

基于上述性能评估, 确定粉煤灰与酸性高炉渣质量比 80:20、粒径 80 目条件下制备的样品综合性能最好, 由此测得该择优试样的 XRD 图谱如图 12 所示。

利用 Jade 软件对图 12 进行峰型拟合分析, 表明该择优试样由莫来石相($Al_6Si_2O_{13}$)、钙长石相($CaAl_2Si_2O_8$)和刚玉相(Al_2O_3)构成, 未检测到石墨相, 表明造孔剂已完全分解。精修分析显示: 莫来石相

衍射峰无偏移；钙长石相峰位标准且强度稳定，反映其均匀分布；刚玉相特定晶面衍射增强，暗示其存在择优取向。样品中莫来石相含量偏低而刚玉相偏高，可能与 Al_2O_3 未完全参与反应有关，其可能原因包括：1) 烧结温度或保温时间不足，导致原料未能完全转化为莫来石相；2) 烧结过程中样品表面优先生成莫来石相，而内部莫来石相生成尚未完全；3) 原料酸性高炉渣成分复杂，其中所含杂质元素对莫来石相的生成产生了抑制作用。

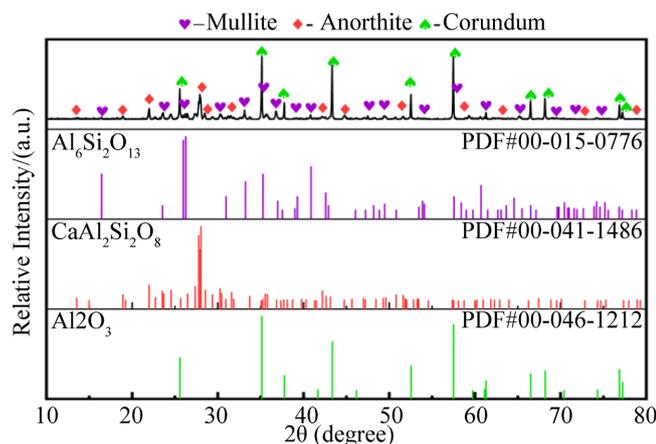


Figure 12. XRD patterns of the optimal sample

图 12. 择优试样的 XRD 图

3.4. 微观形貌分析

图 13 展示了择优试样在不同放大倍数下的微观结构。B1 (1000×)中可见不规则孔隙分布于连续基体中，孔隙连通性良好，符合造孔剂分解形成的开孔特征，且未见局部熔融或孔壁坍塌现象，结构完整无坍塌。b1 (3000×)进一步显示孔壁由界限清晰的烧结晶粒构成，晶粒间通过烧结颈相互连接，证实所选烧结工艺有效形成了稳定多孔结构。

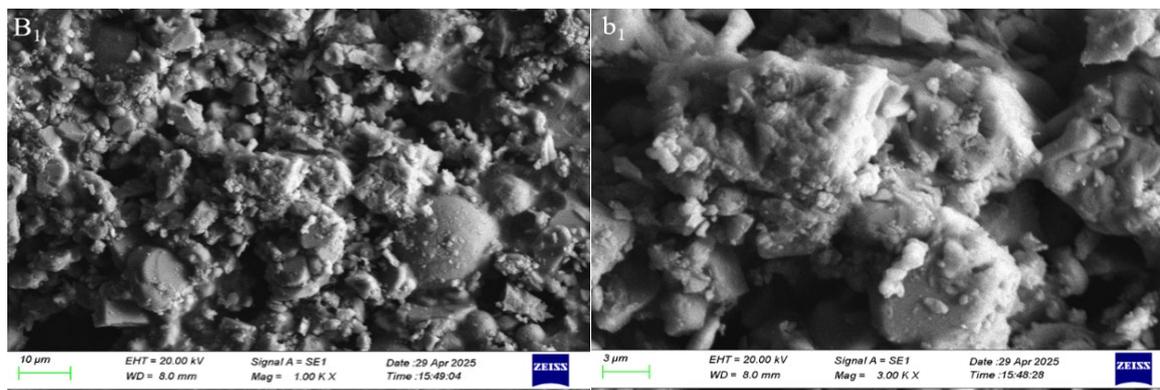


Figure 13. SEM Micro-graphs of the optimal sample

图 13. 择优试样的扫描电镜照片

3.5. 能谱分析

对择优试样进行微区成分分析(图 14、图 15)，结果显示其主要成分为 O、Al、Si、Ca 四种元素。通过对莫来石、钙长石和刚玉相的标准化学计量比，确认 Al-Si-O 体系组成符合三相共存特征，但 Ca 元

素超额表明系统中存在未参与反应的钙化合物。能谱分析结论与 XRD 表征结果共同证实了莫来石 - 钙长石 - 刚玉三相共存体系的形成。

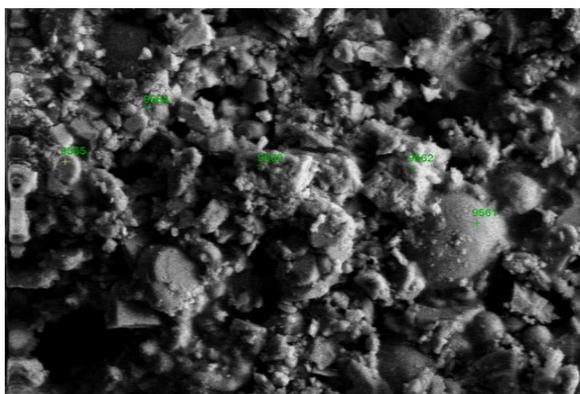


Figure 14. SEM micro-graph of the selected area of the optimal sample
图 14. 择优试样选定区域的电镜照片

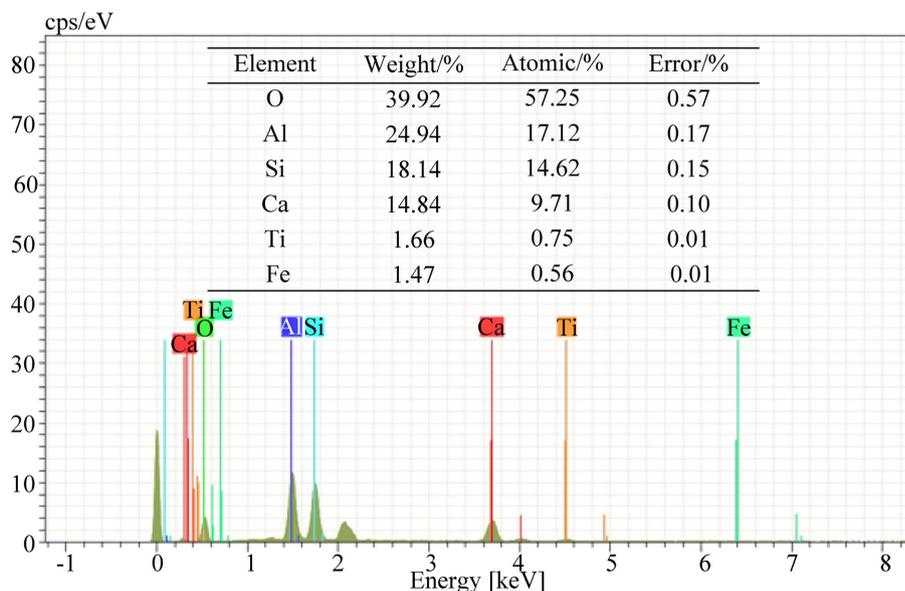


Figure 15. EDS spectrum of the selected area of the optimal sample
图 15. 择优试样选定区域的能谱分析图

4. 结论

以粉煤灰与酸性高炉渣为主要原料，通过引入 Al_2O_3 作为补充铝源、球形石墨粉作为造孔剂及聚乙烯醇溶液作为粘结剂，采用模压成型与固相烧结工艺，系统探讨了原料配比与粒径对多孔莫来石基陶瓷吸附性能的影响，并对择优样品进行了物相分析、形貌表征和能谱分析，获得如下结论：

1) 性能综合评价确定，原料粒径 80 目、粉煤灰占比为(70~80)%条件下所制得多孔莫来石基陶瓷的净水性能表现为最大 TDS 去除量达 30 ppm，对 Cr(VI)与甲基橙的最高吸附率分别为 30.89%与 20.45%。

2) 物相鉴定结果表明，择优样品中主要物相为莫来石、钙长石与刚玉，其中莫来石相含量相对较低。能谱分析检测到样品以 Al、Si、O、Ca 为主要元素，其组成与 XRD 解析所得物相的元素分布相符，进一步佐证了物相判定结果。

致 谢

感谢攀西钒钛检验检测院提供本研究试样的 SEM、XRD、EDS 检测服务。

基金项目

本研究获得攀枝花学院校级培育 - 科研项目(基金名称: 高铝粉煤灰掺杂酸性高炉渣制备多孔莫来石陶瓷滤芯材料的研究, 编号: 12, 主持人: 龚凯)资助。

参考文献

- [1] 王蒙蒙, 隋学叶, 綦开宇, 等. 多孔陶瓷隔热材料的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(2): 637-648.
- [2] 花开慧, 伍芷菁, 余煜环, 等. 负载型多孔陶瓷在环境催化领域的研究进展[J]. 工业催化, 2025, 33(2): 1-11.
- [3] 徐娜, 王挺. 采用发泡-流延成型工艺制备多孔莫来石发泡陶瓷[J]. 耐火材料, 2020, 54(4): 330-333.
- [4] 吴文浩, 张海军, 葛胜涛, 等. 发泡法制备莫来石多孔陶瓷[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(9): 1359-1365.
- [5] 王治聪, 解文圣, 李爱民. 以碳酸钙为发泡剂的粉煤灰发泡陶瓷制备[J]. 大连理工大学学报, 2024, 64(2): 118-126.
- [6] Shao, Y., Lin, L., Xu, J., Wang, H., Xia, C., Feng, X., *et al.* (2024) Near-Zero Sintering Shrinkage Porous Mullite Ceramics with High Porosity and Low Thermal Conductivity. *Ceramics International*, **50**, 29738-29746. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.05.270>
- [7] 颜浩, 陈仕乐, 郎莹, 等. 多孔莫来石陶瓷的近净尺寸制备及性能[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(3): 698-703.
- [8] 程冠吉, 赵维现, 邹欣伟, 等. 添加淀粉对煤矸石基多孔莫来石陶瓷性能的影响[J]. 太原科技大学学报, 2022, 43(5): 422-426.
- [9] 邹欣伟, 张风岷, 姜凯, 等. 空心玻璃微珠造孔制备多孔莫来石陶瓷及其性能[J]. 材料工程, 2023, 51(3): 123-130.
- [10] Cui, Z., Hao, T., Yao, S. and Xu, H. (2023) Preparation of Porous Mullite Ceramic Supports from High Alumina Fly Ash. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, **25**, 1120-1129. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01598-8>
- [11] 程卫桃, 李济, 胡其国. 粉煤灰漂珠资源化制备莫来石质多孔陶瓷的研究[J]. 中国陶瓷, 2022, 58(12): 39-43+49.
- [12] Xia, B., Wang, Z., Gou, L., Zhang, M. and Guo, M. (2022) Porous Mullite Ceramics with Enhanced Compressive Strength from Fly Ash-Based Ceramic Microspheres: Facile Synthesis, Structure, and Performance. *Ceramics International*, **48**, 10472-10479. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.12.256>
- [13] 齐涛, 刘璇, 满苏醇, 等. 二次铝灰基多孔莫来石陶瓷制备研究[J]. 非金属矿, 2024, 47(3): 18-21.
- [14] 奚健飞, 张玲, 邵维锴, 等. 废弃活性炭对莫来石多孔陶瓷性能的影响[C]//中国金属学会耐火材料分会, 中钢洛耐科技股份有限公司, 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司, 马鞍山钢铁股份有限公司, 先进耐火材料国家重点实验室. 第十九届全国耐火材料青年学术报告会论文集. 洛阳: 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司, 2024: 135-144.
- [15] 许西庆, 樊嘉显, 牛书鑫, 等. 3D 打印氧化硅陶瓷型芯的各向异性调控及高温强化性能[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(9): 2422-2429.
- [16] Hossain, S.S., Baek, I., Son, H., Park, S. and Bae, C. (2022) 3D Printing of Porous Low-Temperature *In-Situ* Mullite Ceramic Using Waste Rice Husk Ash-Derived Silica. *Journal of the European Ceramic Society*, **42**, 2408-2419. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.01.001>
- [17] 李鑫, 曹岳岐, 张强, 等. 光固化 3D 打印制备莫来石纤维基多孔陶瓷[J]. 耐火材料, 2023, 57(6): 461-466.
- [18] 王美玉, 史非, 刘敬肖, 等. 3D 打印磷酸钙陶瓷的制备与表征[J]. 大连工业大学学报, 2024, 43(6): 438-442.