



煤气化渣免烧陶粒滤料强度和孔结构的调控

孙浩 蒋林亮 常新卓 田全志

引用本文：

孙浩, 蒋林亮, 常新卓, 等. 煤气化渣免烧陶粒滤料强度和孔结构的调控[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 191–201.
SUN Hao, JIANG Linliang, CHANG Xinzhuo. Regulation on strength and pore structure of non-sintered ceramsite filter material derived from coal gasification slag[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 191–201.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2025-0312>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤气化渣资源化利用综述

Review on resource utilization of coal gasification slag
煤炭科学技术. 2024, 52(8): 192–208 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1147>

煤气化渣理化特性及其所含重金属迁移规律综述

Review of physical and chemical characteristics and heavy metal migration rules of coal gasification slag
煤炭科学技术. 2025, 53(2): 426–443 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0475>

煤气化渣特性分析及综合利用研究进展

Research progress characteristics analysis and comprehensive utilization of coal gasification slag
煤炭科学技术. 2022, 50(11): 251–257 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/2a495359-0e29-4312-ab2f-8a48f369ec17>

不同变质程度煤孔隙结构分形特征对瓦斯吸附性影响

Fractal characteristics of pore structure of coal with different metamorphic degrees and its effect on gas adsorption characteristics
煤炭科学技术. 2020, 48(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c30988c8-404a-42aa-9840-047813302665>

不同煤体结构煤的孔隙结构分形特征及其研究意义

Fractal characteristics of pore structures on different coal structures and its research significance
煤炭科学技术. 2023, 51(10): 198–206 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1867>

黔西突出煤的微观孔隙分形特征及其对渗透率的影响

Micro-pore fractal characteristics of outburst coal in Western Guizhou and its influence on permeability
煤炭科学技术. 2021, 49(3): 118–122 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021.03.015>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

孙 浩, 蒋林亮, 常新卓, 等. 煤气化渣免烧陶粒滤料强度和孔结构的调控[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6):

191–201.

SUN Hao, JIANG Linliang, CHANG Xinzhuo, et al. Regulation on strength and pore structure of non-sintered

ceramsite filter material derived from coal gasification slag[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6):

191–201.

煤气化渣免烧陶粒滤料强度和孔结构的调控

孙 浩^{1,2,3}, 蒋林亮^{1,2,3}, 常新卓^{1,2,3}, 田全志^{1,2,3}

(1. 中国矿业大学 炼焦煤资源绿色开发全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 国家煤加工与洁净化工程技术研究中心, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 煤气化渣是制备免烧陶粒滤料的优质原材料, 而强度和孔结构是决定免烧陶粒过滤性能的关键因素, 因此必须明确免烧陶粒强度和孔结构之间的关系。通过优化煤气化渣、偏高岭土和固体碱激发剂等原料配比, 制备了筒压强度为 25.72 MPa、堆积密度为 1 160 kg/m³ 的煤气化渣免烧陶粒滤料, 综合运用 X 射线衍射、扫描电子显微镜和固体核磁共振硅谱等表征方法, 研究了免烧陶粒滤料的强度形成机理, 发现免烧陶粒的主要强度来源为水化硅铝酸钠/钙(N/C-A-S-H)凝胶, 偏高岭土的加入使 N/C-A-S-H 凝胶中的 Q⁴(2Al) 聚体含量 40.34% 提升至 56.05%, 这使得硅铝酸盐网络交联程度更高, 因此 N/C-A-S-H 凝胶结构更加致密, 促进了免烧陶粒力学性能的提升。采用过氧化氢和十六烷基三甲基溴化铵作为造孔剂, 结合压汞法测试分析, 研究了造孔剂配比对免烧陶粒滤料孔隙率、强度和密度的影响。结果表明: 免烧陶粒孔隙率 21.33% 可最高增长至 50.60%, 相应筒压强度和堆积密度降低至 8.86 MPa 和 816 kg/m³。进一步采用 Menger 海绵和热力学分形理论分析了免烧陶粒滤料的孔结构特征, 发现基于热力学关系的分形模型计算所得的分形维数与免烧陶粒滤料强度的线性相关性更高, 所得分形维数范围为 2.770~2.891, 说明煤气化渣免烧陶粒的孔隙结构不仅受几何分形的影响还受到热力学机制的影响, 且煤气化渣免烧陶粒的筒压强度均随着分形维数的增加而下降。

关键词: 煤气化渣; 免烧陶粒; 孔结构; 筒压强度; 分形维数

中图分类号: TU52 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2025)06-0191-11

Regulation on strength and pore structure of non-sintered ceramsite filter material derived from coal gasification slag

SUN Hao^{1,2,3}, JIANG Linliang^{1,2,3}, CHANG Xinzhuo^{1,2,3}, TIAN Quanzhi^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Coking Coal Resources Green Exploitation, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. National Engineering Research Center of Coal Preparation and Purification, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Gasified coal slag serves as a high-quality raw material for preparing non-sintered ceramsite filter media, where mechanical strength and pore structure are critical determinants of filtration performance. Therefore, it is imperative to elucidate the relationship between strength and pore structure in non-sintered ceramsite. By optimizing the formulation of gasified coal slag, metakaolin, and solid alkali activators to develop a non-sintered ceramsite filter material exhibiting a cylinder compressive strength of 25.72 MPa and a bulk density of 1 160 kg/m³. Through comprehensive characterization techniques including X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and solid-state nuclear magnetic resonance silicon spectroscopy (²⁹Si NMR), the strength formation mechanism was investigated. Results revealed that sodium/calcium aluminosilicate hydrate (N/C-A-S-H) gel constitutes the primary strength-contributing phase. The incorporation of metakaolin elevated the Q⁴(2Al) polymer content in N/C-A-S-H gel from 40.34% to 56.05%, thereby enhancing the crosslinking degree of the aluminosilicate network and densifying the gel structure, which ultimately improved the mechanical properties.

收稿日期: 2025-03-11

策划编辑: 常 琦

责任编辑: 王晓珍

DOI: 10.12438/cst.2025-0312

基金项目: 内蒙古自治区重点研发与成果转化计划资助项目(2022YFHH0105); 准格尔旗科技重大专项资助项目(2024ZD-02)

作者简介: 孙 浩(1991—), 男, 陕西宜川人, 副教授, 博士。E-mail: 09kwjgsh@cumt.edu.cn

Pore-forming agents (hydrogen peroxide and cetyltrimethylammonium bromide) were employed to modulate porosity, combined with mercury intrusion porosimetry, the effect of pore forming agent ratio on the porosity, strength, and density of ceramsite was investigated. It was demonstrated that the porosity could increase from 21.33% to a maximum of 50.60%, accompanied by reductions in cylinder compressive strength (8.86 MPa) and bulk density (816 kg/m³). Further analysis of the pore structure characteristics of non-sintered ceramsite was conducted using Menger sponge and thermodynamic fractal models. It was found that the fractal dimension calculated based on the thermodynamic fractal model had a higher linear correlation with the strength of ceramsite, with fractal dimension values ranging from 2.770 to 2.891. This indicates that pore structure evolution in gasified coal slag-based ceramsite is governed by both geometric configuration and thermodynamic mechanisms, with compressive strength inversely proportional to fractal dimension.

Key words: coal gasification slag; non-sintered ceramsite; pore structure; cylinder compressive strength; fractal dimension

0 引言

煤气化渣是煤制气过程中产生的一种工业固体废弃物,随着我国煤化工产业的快速发展,煤气化渣的年产量已超过6000万t,并且仍在逐年增长^[1]。煤气化渣综合利用率低,大量煤气化渣被堆积或填埋处理,不仅占用大量土地资源,还对自然环境造成了极大威胁^[2]。目前国内外对于煤气化渣利用研究主要包括制备建筑材料^[3-4]、掺烧^[5]和制备多孔吸附材料^[6]等方面,其中利用煤气化渣制备陶粒是重要的消纳途径之一。

陶粒是一种以黏土、页岩、工业固废为主要原料经过高温烧结或免烧工艺制备而成的球形多孔材料^[7-9]。其中,烧结陶粒具有较低的密度和较高的强度,但是生产过程能耗和成本较高,不符合绿色发展的理念^[9]。相比之下,免烧陶粒生产过程绿色低碳、能耗低、成本低,应用前景更广阔^[10-11],且随着黏土和页岩资源日益枯竭,免烧陶粒研究正在受到越来越多的关注。已有学者采用碱性激发剂(如NaOH、NaSiO₃等)在常温或高温条件下激发粉煤灰、硅灰和钢渣等固废的潜在胶凝活性制备免烧陶粒,并取得了良好的性能^[12-13]。陶粒优异的物理性能使其在工程建设、废水处理和石油压裂等领域被广泛应用,尤其是在废水处理方面,陶粒滤料需求量逐年递增^[14-16]。

陶粒滤料的力学性能和孔隙结构对其过滤效果至关重要。首先,陶粒需要具备足够的机械强度(不低于8 MPa),以确保在长期使用过程中不易破碎或粉化,从而维持滤层稳定性。免烧陶粒力学性能受多种因素影响,如原料特性、激发剂的种类及用量、养护条件等^[17-18]。其次,陶粒应具备合理的孔隙结构,以确保滤层具有良好的过滤速度和污染物去除能力,同时降低堵塞风险。实际生产过程中,通常添加铝粉、双氧水等造孔剂改善陶粒的孔结构^[19-21]。但是,孔结构发育必定会影响陶粒强度,因此必须要明确二者之间的关系。

传统研究多通过孔隙率、孔径分布等单一参数分析陶粒的孔结构参数与力学性能之间的关系,但这些指标无法全面描述陶粒的强度特性。分形理论是一种定量表征孔结构复杂性和不规则性的新方法,为揭示孔结构与材料力学性能之间的关系提供了新的思路^[22-23]。其在水泥基材料中的应用已有较多研究,但是否适用于研究陶粒强度与孔结构之间的关系仍不清楚^[24-25]。

综上所述,本研究拟以煤气化渣为原料制备高性能免烧陶粒滤料,并提出陶粒力学性能和孔隙结构的定向调控方法,同时通过研究陶粒的分形维数变化规律,明确其孔结构与力学性能之间的关系。研究结果不仅为煤气化渣资源化利用提供了新的技术思路,也为免烧陶粒滤料在废水处理领域的应用提供基础理论支持。

1 试验材料与方法

1.1 材料与试剂

本试验所用煤气化渣(CGS)采自内蒙古某煤化工厂。试验前,通过湿式磨矿和浮选脱除煤气化渣中的残碳,收集浮选尾灰,于105℃恒温烘干后密封保存。所得尾灰的灰分为98.4%;偏高岭土(MK)为高岭岩在700℃煅烧3 h 脱除层间水后所得。碱激发剂为实验室自制的活性粉体,主要成分为硅酸钠(Na₂SiO₃),同时含有部分石英(SiO₂)。其中,硅酸钠质量分数为83.9%,石英质量分数为16.1%。

试验中使用的过氧化氢(H₂O₂,质量分数30%)购自西陇科学股份有限公司,十六烷基三甲基溴化铵(CTAB, AR)购自上海麦克林公司。造粒过程中使用的水为去离子水。

1.2 免烧陶粒滤料的制备方法

免烧陶粒滤料的制备方法如图1所示,具体步骤如下:①混料:将粉体原料按照一定配比称量,采用行星式球磨机以400 r/min的转速混合5 min,得到混合料;②造粒:向混合料中添加水和过氧化氢,

采用强力混合造粒机(GT15, 青岛骏盛科工贸有限公司, 最大装料量: 1 L, 最高转速: 3 600 r/min, 料盘最高转速: 54 r/min)造粒, 制得陶粒生料, 其中, 水添加量范围为 18%~20%, 强力混合造粒机的转子转速为 1 400~1 600 r/min, 料盘转速为 30 r/min, 严格控

制陶粒生料粒径为 2~3 mm; ③养护: 将陶粒生料进行陈化处理、蒸汽养护和自然晾干, 得到陶粒滤料。其中陈化温度为 25±2 °C, 陈化时间为 12 h; 养护温度为 60 °C, 养护湿度为 95%±2%, 养护时长为 12 h; 自然晾干温度为 25±2 °C, 晾干时间为 12 h。

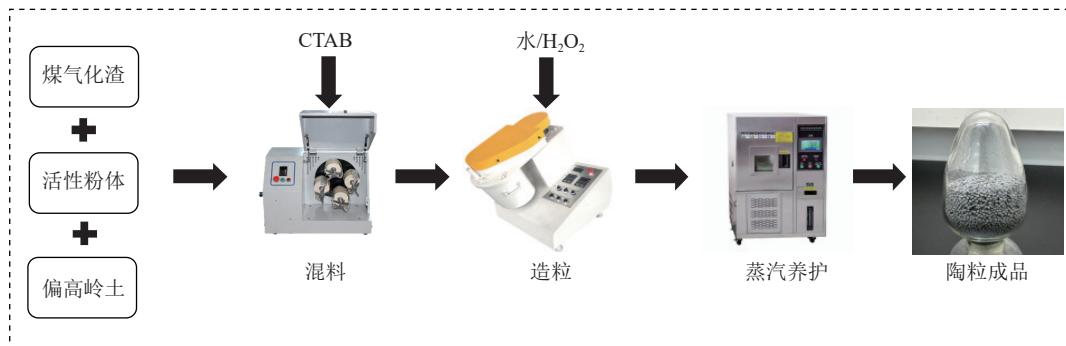


图 1 煤气化渣免烧陶粒的制备流程

Fig.1 Preparation protocol of CGS based non-sintered ceramsite

1.3 试验设计

本试验所有材料与试剂的配比均按质量分数(%)计算。以煤气化渣为主要原料, 系统研究碱激发剂、偏高岭土、H₂O₂ 及 CTAB 对免烧陶粒滤料强度和孔隙率的影响, 试验设计如下: 以煤气化渣为原料, 分别添加 5%、7.5%、10%、12.5% 和 15% 的碱激发剂, 探究碱激发剂对陶粒强度的影响; 以 5%、10%、15% 和 20% 的偏高岭土取代煤气化渣, 探究偏高岭土对陶粒强度的影响。需要指出, 偏高岭土掺量超过 20%, 陶粒凝固时间较短, 陶粒形状不易控制。在确定陶粒最佳制备条件的基础上, 分别添加 1%、3% 的 H₂O₂, 并在每个 H₂O₂ 梯度下分别添加 0.1%、0.3%、0.5% 的 CTAB, 探究发泡剂 H₂O₂ 和稳泡剂 CTAB 对陶粒孔隙率和强度的影响。

1.4 测试与表征方法

陶粒的宏观力学性能测试主要包括筒压强度和堆积密度, 测试方法参照 GB/T 17431.2—2010《轻集料及其试验方法第 2 部分: 轻集料试验方法》。筒压强度测试时采用电子万能试验机以 400 N/s 的速度匀速加载, 当冲压模压入深度为 20 mm 时, 记下压力 P₂, 计算表达式如式(1)所示, 计算结果精确至 0.01 MPa。

$$f_a = (p_1 + p_2)/F \quad (1)$$

式中: f_a 为筒压强度, MPa; p₁ 为冲压模质量, N; p₂ 为压入深度为 20 mm 时的压力, N; F 为承压面积, mm²。

堆积密度测试时将陶粒从容量筒上方均匀倒下,

让试样自然下落, 然后用直尺刮平, 记录陶粒的质量 m₁, 计算表达式如式(2)所示, 计算结果精确至 1 kg/m³。

$$\rho_{pu} = 1000m_1/V_0 \quad (2)$$

式中: ρ_{pu} 为堆积密度, kg/m³; m₁ 为陶粒的质量, kg; V₀ 为容量筒的体积, L。

采用扫描电子显微镜(SEM, 捷克 MAIA 3 LMH) 观察陶粒样品的微观形貌, 样品选用强度测试后断裂面较为平整的颗粒喷金后测试; 采用 X 射线衍射仪(XRD, 日本 Smart Lab SE) 测试陶粒样品的物相组成, 测试靶材采用铜靶, 扫描范围为 10°~80°, 扫描速度为 2 (°)/min; 采用固体核磁共振波谱仪(NMR, 美国 Agilent 600M) 测试陶粒样品的硅铝配位结构, 参照物是 TMS, 无内标物, 转子和转速(4 mm 氧化锆转子, 8 K); 采用全自动压汞仪(MIP, 美国 Micromeritics AutoPore V 9 620), 测试陶粒样品的孔结构, 样品选用完整的陶粒样品, 测试孔径为 5 nm~800 μm。

1.5 分形维数计算方法

分形维数是分形理论中的一个基本参数, 用于定量表征孔结构的复杂性和不规则性。目前, 最常用的分形模型是 Menger 海绵模型和热力学模型^[26]。首先是 Menger 海绵模型, 基于压汞法数据, 计算得到 lg(dV_P/dP) 和 lg P, 绘制线性拟合曲线, 通过曲线斜率可以得到分形维数 D_s。其次是热力学模型, 同样是基于压汞法数据, 在孔隙结构分形的基础上, 考虑了计算得到 ln(W_n/r_n²) 和 ln Q_n, 曲线斜率即分形维数 D_s, 具体计算表达式如下

1) Menger 海绵模型。

$$\lg(dV_P/dP) = (D_s - 4)\lg P + C \quad (3)$$

式中: V_P 为在特定进汞压力 P 下穿透的汞的进汞体积, m^3 ; C 为常数。

2) 基于热力学的分形模型。

$$\begin{cases} \ln(W_n/r_n^2) = D_s \ln Q_n + C \\ W_n = \sum_{i=1}^n \bar{P}_i \Delta V_i \\ Q_n = V_n^{1/3} / r_n \end{cases} \quad (4)$$

式中: \bar{P}_i 为第 i 次进汞时的平均压力, Pa ; ΔV_i 为第 i 次进汞时的进汞量, mL/g ; n 为汞的侵入次数; r_n 为第 n 次进汞时的孔隙半径, nm ; V_n 为累积进汞量, mL/g 。

2 试验结果与讨论

2.1 免烧陶粒力学性能调控

图 2 显示了在蒸汽养护条件下(温度 60 °C、湿度 95%、时间 12 h)不同碱激发剂添加量和不同偏高岭土添加量下制备的陶粒样品的筒压强度和堆积密度。如图 2a 所示,随着碱激发剂添加量的提高,陶粒的筒压强度和堆积密度均表现为先迅速升高后缓慢升高最后降低的趋势。当碱激发剂添加量为 5% 时,此时,陶粒的筒压强度仅为 1.26 MPa,堆积密

度为 1 063 kg/m³,这说明过低的碱激发剂添加量无法为反应提供充足的碱性环境,导致反应不充分,因此,陶粒强度较低。当碱激发剂添加量为 12.5% 时,此时,陶粒的筒压强度达到最大值 16.92 MPa,堆积密度为 1 160 kg/m³,说明适当提高碱激发剂添加量有利于碱激发反应的进行,此时反应较为充分,陶粒的强度达到最高。当碱激发剂添加量进一步提高至 15% 时,此时,陶粒的筒压强度降低至 15.12 MPa,堆积密度为 1 156 kg/m³,这是由于碱激发剂过量会使胶凝材料微观结构变得疏松,降低材料的密实性和强度^[27]。因此,后续选择碱激发剂添加量为 12.5%。

如图 2b 所示,随着偏高岭土添加量的提高,陶粒的筒压强度逐渐升高,而堆积密度变化不大,总体在 1 100 ~ 1 160 kg/m³。未添加偏高岭土时,陶粒的筒压强度为 16.92 MPa,添加 20% 的偏高岭土后,陶粒的筒压强度达到最大值 25.72 MPa,相较于未添加偏高岭土陶粒增长了 52%,说明提高偏高岭土的添加量有利于陶粒的强度发展。但是添加过量的偏高岭土会使材料的可加工性变差。首先,偏高岭土的微观形貌为规格不一的层状和微小片状结构,过高的掺量会使得陶粒在成型过程中流动性变差,导致陶粒的球形度较差^[28]。其次,偏高岭土的反应活性较高,过高的掺量会使得碱激发反应速率过快,凝固时间大幅缩短。因此,后续选择偏高岭土的添加量为 20%。

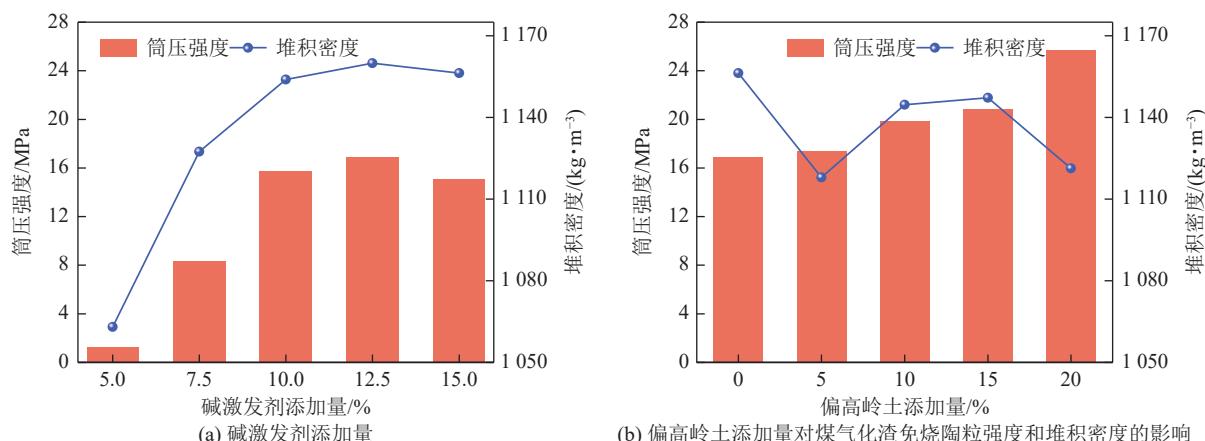


图 2 碱激发剂添加量和偏高岭土添加量对煤气化渣免烧陶粒强度和堆积密度的影响

Fig.2 Effect of alkali activator content and metakaolin content on cyclic compressive strength and bulk density of CGS based non-sintered ceramsite

2.2 免烧陶粒强度形成机理

为了明晰碱激发剂和偏高岭土添加量对碱激发反应的影响,采用 XRD、²⁹Si NMR、SEM 等方法对陶粒样品微观结构进行表征。选取碱激发剂添加量

为 5%、12.5%、15% 以及偏高岭土添加量为 20% 的几组具有代表性的陶粒样品,编号分别为 A₅G₉₅M₀、A_{12.5}G_{87.5}M₀、A₁₅G₈₅M₀ 以及 A_{12.5}G_{67.5}M₀,其中 A 代表碱激发剂, G 代表煤气化渣, M 代表偏高岭土, 数字

代表添加量(%)。

2.2.1 XRD 分析

图3显示了煤气化渣、偏高岭土和陶粒样品的XRD谱图。如图所示,在所有的陶粒样品XRD谱图中均能观察到石英和方解石的结晶相以及位于 $20^\circ \sim 40^\circ(2\theta)$ 之间的“馒头峰”。其中,石英峰是煤气化渣和碱激发剂中的残留峰,表明石英基本不参与或少部分参与反应;方解石是煤气化渣的残留峰; $20^\circ \sim 40^\circ(2\theta)$ 的“馒头峰”,这是地质聚合物凝胶—水化硅铝酸钠/钙(N/C-A-S-H)所对应的特征峰,也是陶粒的强度来源^[29]。对比煤气化渣和不同碱激发剂添加量下陶粒的XRD谱图,发现谱图相似,没有特

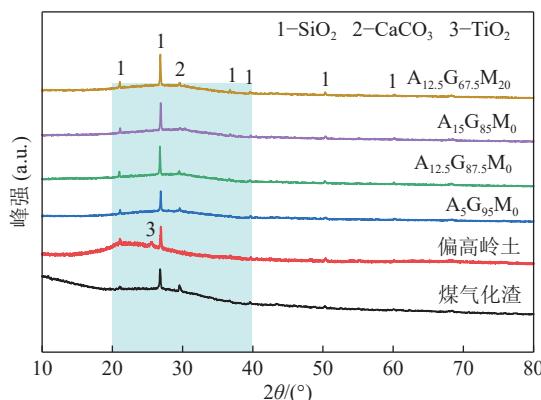


图3 煤气化渣陶粒的XRD谱图

Fig.3 XRD patterns of CGS based non-sintered ceramsite

征峰的新增或消失,仅有略微的特征峰强度以及衍射角的改变。对比偏高岭土以及不同偏高岭土添加量下陶粒的XRD谱图,发现偏高岭土中锐钛矿(TiO_2)含量较低,对应特征峰在陶粒样品中被掩盖。此外,偏高岭土中 $15^\circ \sim 30^\circ(2\theta)$ 之间的“馒头峰”消失,在陶粒样品中“馒头峰”的位置在 $20^\circ \sim 40^\circ$ 处呈现,均说明偏高岭土参与了胶凝反应。

2.2.2 SEM 分析

图4列出了碱激发剂添加量5%、12.5%、15%和偏高岭土添加量20%的陶粒样品SEM图。如图所示,随着碱激发剂添加量的增加,陶粒微观结构发生了明显变化。图4a中存在许多未反应的煤气化渣颗粒,胶凝反应程度较低,陶粒整体微观结构呈现出高度疏松且不均匀的状态,试样强度偏低。图4b中几乎看不到未反应的煤气化渣颗粒,陶粒基体上存在少量裂纹和孔隙,整体结构较为致密,说明适当提高碱激发剂添加量有助于反应进行。图4c中出现一些较大的孔隙,裂纹裂缝变宽且能观察到少量未反应的煤气化渣颗粒。说明碱激发剂添加量过高也不利于反应进行,导致陶粒力学性能下降。对比图4b和图4d,发现添加偏高岭土后,陶粒孔径明显减小,整体结构愈加致密,因此,陶粒强度升高的主要原因主要有2点:首先,与煤气化渣相比,偏高岭

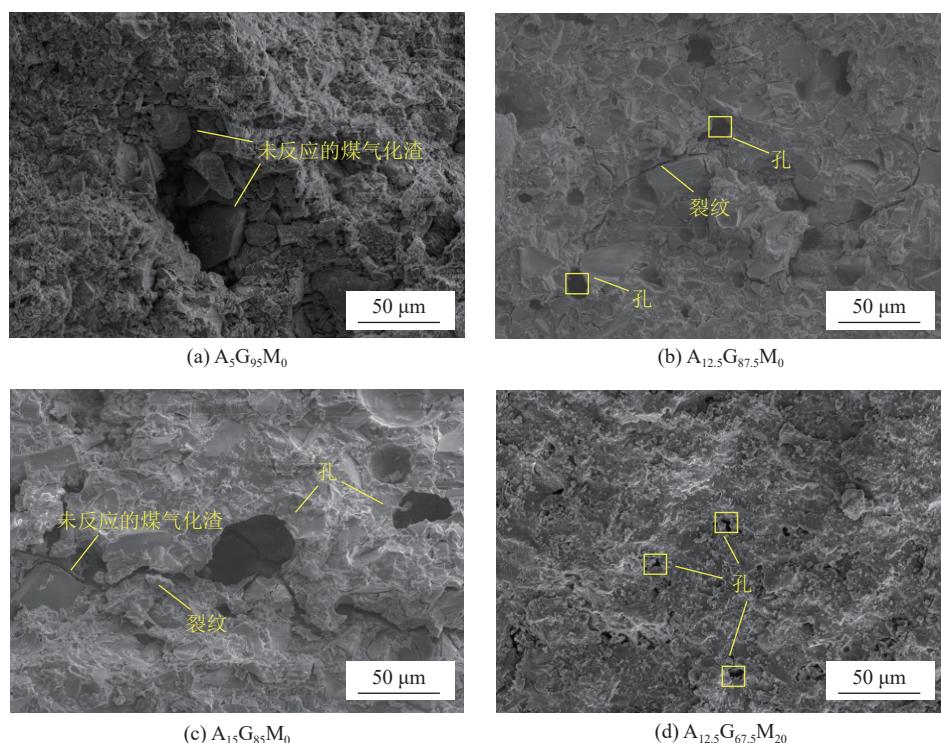


图4 煤气化渣陶粒的SEM图

Fig.4 SEM images of non-sintered ceramsite based on CGS

土的粒径较小,可起到微集料的作用填补陶粒中的孔隙,降低孔隙率,提高陶粒密实度,进而提高陶粒强度;其次,偏高岭土活性高于煤气化渣,在相同的碱性环境下,偏高岭土的溶解速度则大于煤气化渣,因此,在反应前期能够更好地与碱激发剂反应,生成更多的凝胶相,从而提高了陶粒的强度。

2.2.3 ^{29}Si NMR 分析

图 5a 和图 5b 显示了未添加偏高岭土和添加

20% 偏高岭土的陶粒样品的 ^{29}Si NMR 谱图。依据文献报道,化学位移在 $-60 \sim -81$ 、 $-68 \sim -83$ 、 $-85 \sim -94$ 、 $-91 \sim -99$ 、 $-96 \sim -106$ 、 $-102 \sim -118 \times 10^{-6}$ 分别代表 Q^0 、 Q^1 、 $\text{Q}^4(3\text{Al})$ 、 $\text{Q}^4(2\text{Al})$ 、 $\text{Q}^4(1\text{Al})$ 、 $\text{Q}^4(0\text{Al})$ 。硅的配位结构由 $\text{Q}^a(b\text{Al})$ 描述,其中 a 代表连接到硅氧四面体桥接氧的数量, b 代表被硅四面体相邻的铝所取代的数量^[30]。采用高斯拟合对重叠峰进行反卷积操作后,各配位结构的相对含量如图 6 所示。

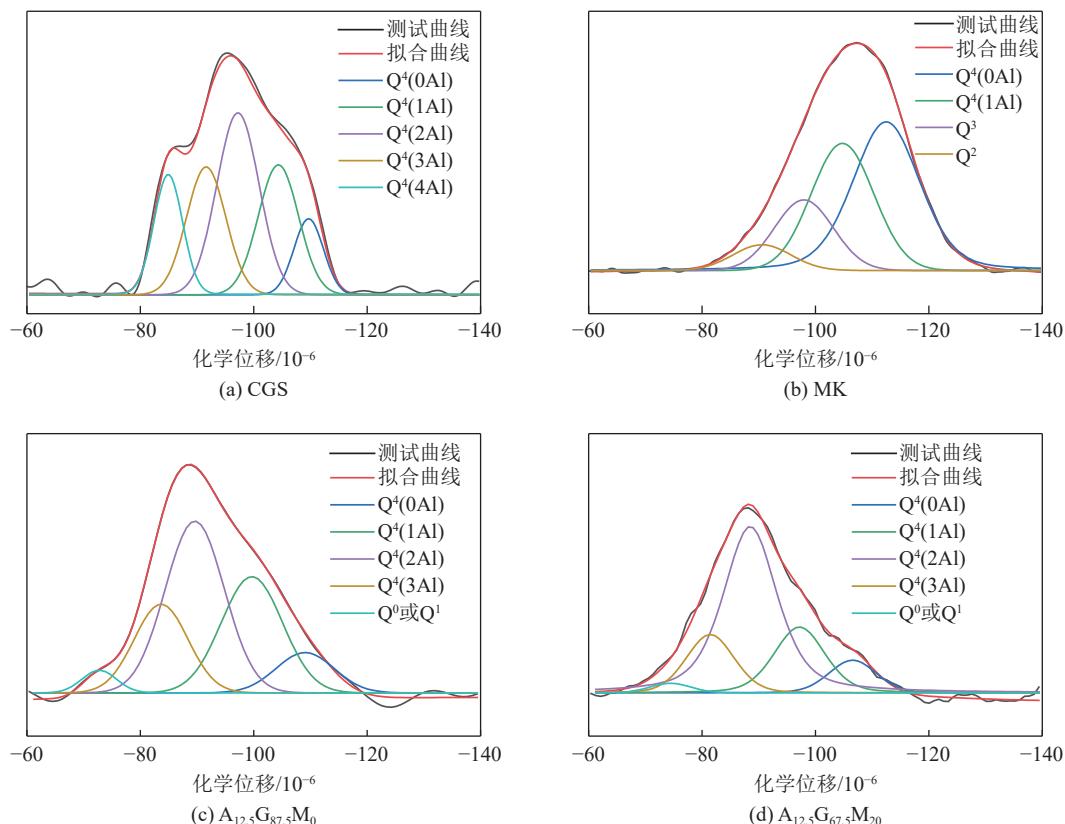


图 5 煤气化渣、偏高岭土、未添加偏高岭土和添加 20% 偏高岭土煤气化渣陶粒的 ^{29}Si NMR 谱图

Fig.5 ^{29}Si NMR spectrums of CGS, MK and CGS based ceramsites containing 0 and 20% metakaolin

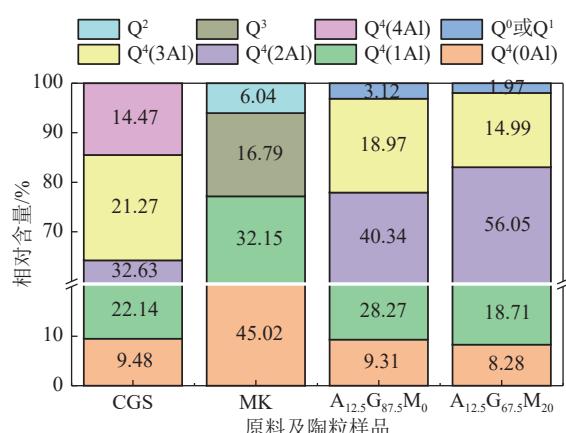


图 6 煤气化渣免烧陶粒中不同结构硅配体的相对含量

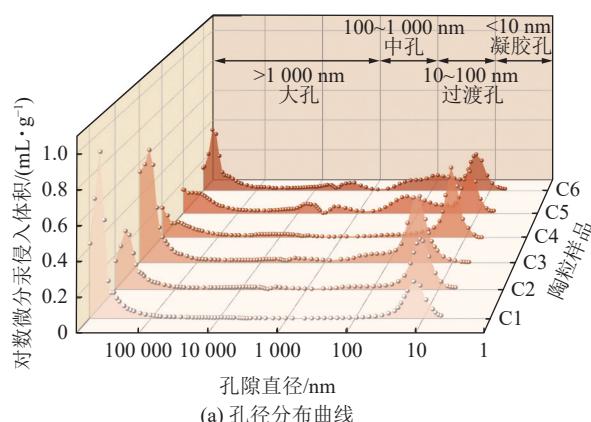
Fig.6 Normalized summary of $\text{Q}^4(\text{mAl})$ Si coordination environments in CGS based non-sintered ceramsite

结果表明,煤气化渣的主要配位结构为 $\text{Q}^4(0\text{Al})$ 、 $\text{Q}^4(1\text{Al})$ 、 $\text{Q}^4(2\text{Al})$ 、 $\text{Q}^4(3\text{Al})$ 和 $\text{Q}^4(4\text{Al})$,这些高聚合度的结构的存在表明煤气化渣中的铝硅酸盐长链较为稳定,潜在活性较低,因此在碱激发反应时溶解速率较慢。偏高岭土的主要配位结构为 $\text{Q}^4(0\text{Al})$ 和 $\text{Q}^4(1\text{Al})$,比例分别达到 45.02% 和 32.15%,同时还含有少量的低聚合度的 Q^3 和 Q^2 结构。由于偏高岭土中含有较多的低聚合度结构(如 Q^3 、 Q^2),因此在碱激发反应时能够快速溶解,解聚并形成凝胶结构^[31]。由图 5 和图 6 可知,在碱激发剂的作用下,煤气化渣中的高聚合度的 SiO_4 和 AlO_4 四面体结构发生溶解、聚合和重组,生成了网络状的 $\text{N}(\text{C})\text{-A-S-H}$ 凝胶,以及少量游离的 Q^0 单体和 Q^1 二聚体,这是煤气化渣

溶解后产生的未参与聚合反应的结构。添加偏高岭土后,陶粒样品中 $\text{Q}^4(2\text{Al})$ 的相对含量由 40.34% 上升至 56.05%,表明偏高岭土的添加为反应体系引入了更多的 Al 元素,从而提高了材料硅铝酸盐网络交联程度,促进陶粒的整体强度提升^[32]。

2.3 免烧陶粒孔结构调控及强度变化

图 7 为基于免烧陶粒最佳原料配比下,添加不同质量分数 H_2O_2 和 CTAB 后,陶粒的孔径分布曲线。根据霍多特孔径划分方法,将孔径划分为:大孔 ($> 1000 \text{ nm}$)、中孔 ($1000 \sim 100 \text{ nm}$)、过渡孔 ($100 \sim 10 \text{ nm}$) 和微孔 ($< 10 \text{ nm}$)。如图 6 所示,6 组陶粒滤料中主要的孔隙类型均为大孔和过渡孔,在同等 H_2O_2 添加量的情况下,随着 CTAB 添加量的升高,中孔和过渡孔的数量明显增多,陶粒的总孔隙率也呈现出上升的趋势,陶粒滤料各孔径范围内的孔容和孔隙率见表 1。在碱性环境下, H_2O_2 不断分解产生 O_2 ,能够促进胶凝反应过程中气泡的生成,当 H_2O_2 添加量增加时,陶粒内部气泡量增多,导致孔隙结构的改变。但 H_2O_2 分解是一个热力学不稳定过程, H_2O_2 添加量过高可能导致气泡过大且壁薄,气泡容易发生聚并、增长,因此最终的陶粒样品中通常存在过多的大孔。通过加入稳泡剂 CTAB,其在气液界面上吸附形成一层薄膜,并降低气液界面张力,阻碍气泡聚并和破裂,促进陶粒过渡孔和微孔结构的发育。当 H_2O_2 添加量为 1.0% 时,随着 CTAB 添加量由 0.1% 提升至 0.5%,陶粒过渡孔和微孔的总孔容也由 0.090 mL/g 提升至 0.170 mL/g ,孔隙率也由 42.03% 提升至 50.60%。



(a) 孔径分布曲线

也呈现出上升的趋势,陶粒滤料各孔径范围内的孔容和孔隙率见表 1。在碱性环境下, H_2O_2 不断分解产生 O_2 ,能够促进胶凝反应过程中气泡的生成,当 H_2O_2 添加量增加时,陶粒内部气泡量增多,导致孔隙结构的改变。但 H_2O_2 分解是一个热力学不稳定过程, H_2O_2 添加量过高可能导致气泡过大且壁薄,气泡容易发生聚并、增长,因此最终的陶粒样品中通常存在过多的大孔。通过加入稳泡剂 CTAB,其在气液界面上吸附形成一层薄膜,并降低气液界面张力,阻碍气泡聚并和破裂,促进陶粒过渡孔和微孔结构的发育。当 H_2O_2 添加量为 1.0% 时,随着 CTAB 添加量由 0.1% 提升至 0.5%,陶粒过渡孔和微孔的总孔容也由 0.090 mL/g 提升至 0.170 mL/g ,孔隙率也由 42.03% 提升至 50.60%。

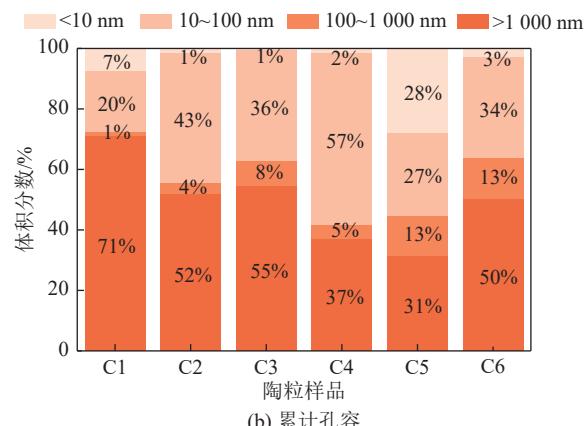


图 7 煤气化渣免烧陶粒的孔径分布曲线和累计孔容

Fig.7 Pore size distribution and cumulative pore volume of CGS based non-sintered ceramsite

表 1 煤气化渣免烧陶粒的孔隙体积和筒压强度参数

Table 1 Pore volume and cyclic compressive strength values of different CGS based non-sintered ceramsite variants

样品编号	H_2O_2 添加量/%	CTAB添加量/%	强度/MPa	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	孔隙率/%	孔容/($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)			
						<10 nm	10~100 nm	100~1000 nm	>1000 nm
C0	0	0	25.72	1 121	21.33	0.005	0.032	0.013	0.073
C1	1	0.1	23.28	1 014	42.03	0.024	0.066	0.004	0.232
C2	1	0.3	14.23	984	39.91	0.004	0.119	0.010	0.144
C3	1	0.5	8.86	816	50.60	0.003	0.167	0.038	0.251
C4	3	0.1	11.31	915	36.09	0.004	0.138	0.012	0.090
C5	3	0.3	7.57	808	41.78	0.122	0.118	0.058	0.137
C6	3	0.5	7.83	834	45.95	0.010	0.122	0.049	0.183

H_2O_2 和 CTAB 的添加能提升免烧陶粒的孔隙率,但同时也会影响陶粒的筒压强度和堆积密度,如图 8 所示。其中,C1 组的筒压强度最高,为 23.28 MPa,而 C5 组的筒压强度最低,仅为 7.57 MPa。然而,从

孔隙率结果来看,C1 和 C5 组的孔隙率分别为 42.03% 和 41.78%,二者相差不大,但其强度却有显著差异。这一现象表明,仅用孔隙率来描述陶粒的强度可能不够全面,孔隙的形态、分布特征及其对材

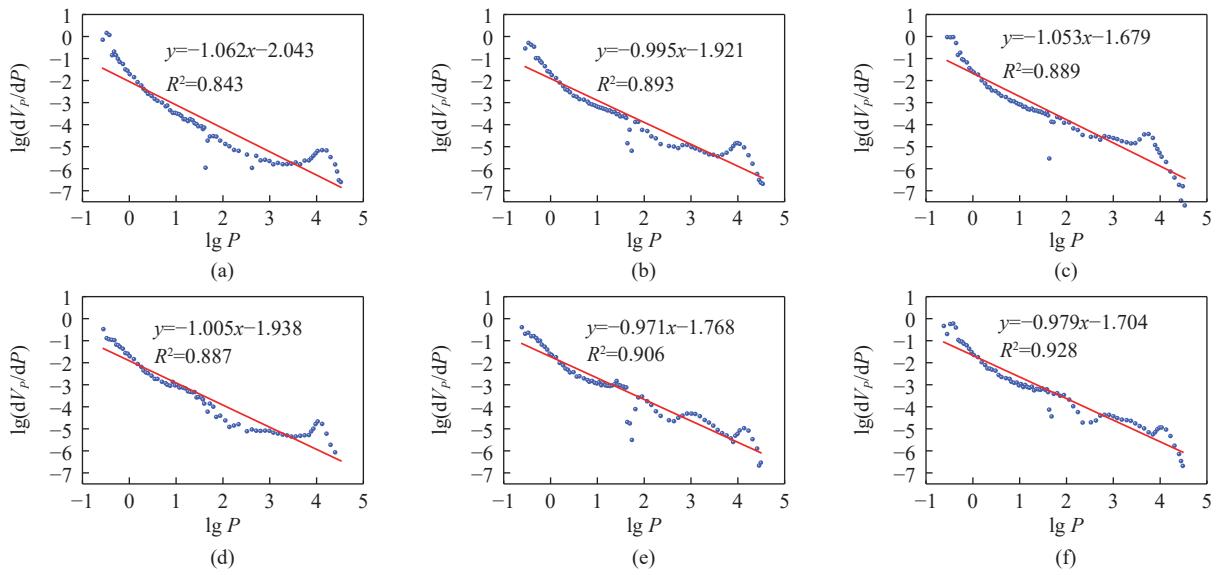


图8 基于Menger海绵模型的分形维数拟合曲线

Fig.8 Fitting curves of fractal dimension based on Menger model

料结构的影响同样关键。

2.4 免烧陶粒的孔结构分形维数

为了明晰煤气化渣免烧陶粒孔结构与强度之间的关系, 分别计算了基于Menger海绵模型和热力学模型下陶粒的分形维数, 拟合结果如图8和图9所示。拟合结果见表2。显然, 陶粒样品的内部孔隙结构表现出明显的分形特征。

基于Menger海绵模型计算得到陶粒的分形维数在2.938~3.029, 拟合度在84.3%~92.8%。基于热力学模型得到的陶粒的分形维数在2.771~2.891, 拟合度在98.5%以上。根据传统的分形理论可知, 分形维数的范围一般在2~3, 由拟合结果可知, 基于Menger海绵模型拟合得到的分形维数结果偏高, 主要归因于高压造成陶粒压缩, 导致内部孔隙结

构破坏, 致使分形维数大于3。

基于热力学模型得到的陶粒的分形维数较符合实际情况, 且拟合度较高。Menger海绵模型仅考虑几何相似性, 而不考虑表面能、毛细作用等热力学因素, 通常适用于具有单一分形尺度的孔隙结构。而热力学模型在其基础上还考虑孔隙的热力学状态^[33], 适用于具有多尺度、多层次的复杂孔隙结构。热力学模型拟合度较高, 表明陶粒样品的孔隙结构不仅受几何分形的影响还受到热力学机制的影响。本研究采用的造孔剂H₂O₂在碱性条件下分解出氧气, 陶粒内部氧气气泡经不同程度的聚并和扩散步骤, 最终形成尺寸和形状各异的孔结构, 这种复杂孔隙结构符合热力学模型的假设。因此, 在描述陶粒内部孔结构特征时, 热力学模型比Menger海绵模型的精

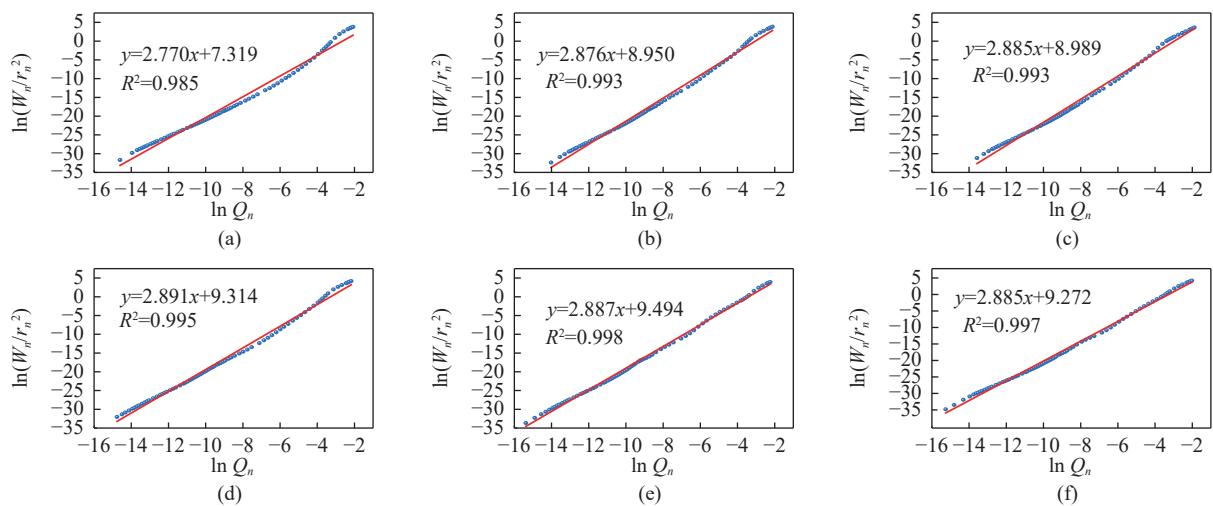


图9 基于热力学模型的分形维数拟合曲线

Fig.9 Fitting curves of fractal dimension based on thermodynamics model

表 2 基于 Menger 模型和热力学模型计算的煤气化渣免烧陶粒孔结构分形维数

Table 2 Fractal dimension values of CGS based non-sintered ceramsite variants based on Menger and thermodynamics models

样品编号	Menger模型		热力学模型	
	拟合公式	分形维数 D_s	拟合公式	分形维数 D_s
C1	$y=-1.062x-2.043$	2.938	$y=2.770x+7.319$	2.770
C2	$y=-0.995x-1.921$	3.005	$y=2.876x+8.950$	2.876
C3	$y=-1.053x-1.679$	2.947	$y=2.885x+8.989$	2.885
C4	$y=-1.005x-1.938$	2.995	$y=2.891x+9.314$	2.891
C5	$y=-0.971x-1.768$	3.029	$y=2.887x+9.494$	2.887
C6	$y=-0.979x-1.704$	3.021	$y=2.885x+9.272$	2.885

度和可靠性更高。

2.5 分形维数与免烧陶粒强度的关系

图 10 展示了基于 Menger 海绵模型和热力学模型的分形维数与陶粒筒压强度的拟合曲线。如图所示, Menger 海绵模型图 10a 计算的分形维数与筒压强度的拟合度仅为 25.3%, 拟合效果较差, 也说明煤气化渣免烧陶粒内部孔隙不是严格的自相似结构; 而热力学模型图 10b 计算的分形维数与筒压强度的拟合度达到了 82.7%, 表明该模型能准确描述陶粒孔

结构与力学性能的关系, 也说明煤气化渣免烧陶粒的孔隙是形状复杂的分形结构。

在热力学模型下, 煤气化渣免烧陶粒的筒压强度均随着分形维数的增加而下降。分形维数反映了孔结构的复杂程度, 数值越大, 孔隙连通性越强, 微孔、中孔增多, 但不能有效填充大孔, 导致孔壁变薄, 降低材料整体强度^[34]。同时, 复杂连通的孔隙削弱了陶粒的结构稳定性, 使局部受力集中, 易发生破坏。

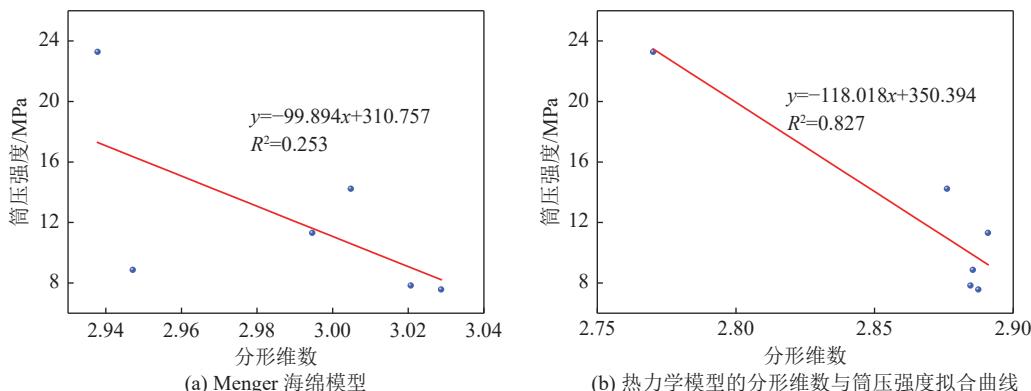


图 10 基于 Menger 海绵模型和热力学模型的分形维数与筒压强度拟合曲线

Fig.10 Fitting curves of the fractal dimension and cyclic compressive strength of Menger sponge model and thermodynamics model

3 结 论

1)通过优化碱激发剂和偏高岭土的掺量配比, 可以定向调控煤气化渣免烧陶粒滤料的力学性能。当原料质量配比为碱激发剂: 偏高岭土: 煤气化渣=12.5% : 20.0% : 67.5% 时, 免烧陶粒滤料的筒压强度达到最大值 25.72 MPa。适当的碱激发剂添加量有利于促进碱激发胶凝反应的进行, 而偏高岭土的在碱性条件下的溶解速度大于煤气化渣, 因此能在反应前期更好地与碱激发剂反应, 生成更多的Q⁴(Al)结构凝胶相以填补陶粒中的孔隙, 增加了陶粒整体的密实度, 实现陶粒强度的提升。

2)通过添加不同比例的 H₂O₂ 和 CTAB, 可以定

向调控煤气化渣免烧陶粒滤料的孔隙结构, 孔隙率最高可达 50.60%。煤气化渣免烧陶粒滤料主要的孔隙类型为大孔和过渡孔, 且随着 CTAB 添加量的升高, 过渡孔的数量明显增多。

3)基于热力学关系的分形模型可以有效表征煤气化渣免烧陶粒滤料的孔结构特征, 说明免烧陶粒滤料具有多尺度、多层次的复杂孔隙结构, 且计算所得的分形维数与免烧陶粒滤料强度的线性相关性较高, 因此通过该模型能有效预估煤气化渣免烧陶粒的宏观力学性能。

参考文献(References):

[1] 冯向港, 王海燕, 葛奋斗, 等. 煤气化渣高值化利用的研究进展及

- 应用展望[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(11): 122–132.
- FENG Xianggang, WANG Haiyan, GE Fenfei, et al. Research progress and application prospect of high-value utilization of coal gasification slag[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(11): 122–132.
- [2] 许云龙, 周长俊, 刘晓敏, 等. 路用煤气化渣混凝土的制备与微观结构[J]. 煤炭学报, 2024, 49(S1): 424–433.
- XU Yunlong, ZHOU Changjun, LIU Xiaomin, et al. Preparation and microstructure of road coal gasification slag concrete[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(S1): 424–433.
- [3] 傅文煜, 孙文强, 王连勇. 煤气化渣资源化利用技术研究进展[J]. 环境工程, 2023, 41(12): 319–328.
- FU Wenyu, SUN Wenqiang, WANG Lianyong. Advances in resource utilization technologies for coal gasification slag[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(12): 319–328.
- [4] 高海洋, 梁龙, 靳开宇, 等. 煤气化渣资源化利用综述[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(8): 192–208.
- GAO Haiyang, LIANG Long, JIN Kaiyu, et al. Review on resource utilization of coal gasification slag[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(8): 192–208.
- [5] 乔会, 左岳, 屈洁, 等. 煤气化渣残碳的分离及应用研究进展[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(S2): 103–111.
- QIAO Hui, ZUO Yue, QU Jie, et al. Research progress on separation and application of residual carbon from coal gasification slag[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(S2): 103–111.
- [6] 王对雨, 陈要平, 杨科, 等. 基于煤气化渣特性的环境功能材料制备与应用研究进展[J]. 化学通报, 2024, 87(1): 67–77.
- WANG Duiyu, CHEN Yaoping, YANG Ke, et al. Research progress in the preparation and application of environmental functional materials based on the properties of coal gasification slag[J]. Chemistry, 2024, 87(1): 67–77.
- [7] 王今华, 张茂亮, 白坡, 等. 尾矿陶粒制备技术要点分析及应用研究进展[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(8): 7–12.
- WANG Jinhua, ZHANG Maoliang, BAI Po, et al. A review of ceramisite from tailings: Preparation technology and applications[J]. New Building Materials, 2024, 51(8): 7–12.
- [8] 赵增丰, 蒲紫盈, 林璨, 等. 免烧陶粒及陶粒混凝土性能研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(20): 88–100.
- ZHAO Zengfeng, PU Ziying, LIN Can, et al. Research progress of cold-bonded aggregate and application in concrete production[J]. Materials Reports, 2024, 38(20): 88–100.
- [9] 赵飞燕, 张小东, 杜艳霞, 等. 粉煤灰陶粒的制备技术及研究进展[J]. 无机盐工业, 2024, 56(4): 16–23.
- ZHAO Feiyuan, ZHANG Xiaodong, DU Yanxia, et al. Preparation technology and research progress of fly ash ceramsite[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2024, 56(4): 16–23.
- [10] 张凯, 刘舒豪, 张日新, 等. 免烧法煤气化粗渣制备陶粒工艺及其性能研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(10): 222–227.
- ZHANG Kai, LIU Shuhao, ZHANG Rixin, et al. Research on preparation of non-sintered ceramsite from gasification cinder and its performance[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(10): 222–227.
- [11] 孟凡宁, 武陈, 王崇, 等. 粉煤灰免烧陶粒制备技术研究进展[J]. 化工环保, 2024, 44(3): 301–306.
- MENG Fanning, WU Chen, WANG Dong, et al. Research progress on unburned ceramsite preparation technologies of fly ash[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2024, 44(3): 301–306.
- [12] 许事成, 苏壮飞, 刘泽, 等. 硅灰掺量对免烧粉煤灰陶粒性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(2): 506–512.
- XU Shicheng, SU Zhuangfei, LIU Ze, et al. Influence of silica fume content on performance of non-sintered fly ash ceramsite[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(2): 506–512.
- [13] 郝建英, 穆保林, 田玉明. 钢渣基免烧陶粒的制备及性能研究[J]. 太原科技大学学报, 2021, 42(5): 399–402.
- HAO Jianying, MU Baolin, TIAN Yuming. Preparation and properties of burn-free ceramsite based on steel slag[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2021, 42(5): 399–402.
- [14] 陈沁媛, 闫一凡, 赵振华, 等. 固废基陶粒重金属固化效果及产品性能的影响因素研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(2): 515–530.
- CHEN Qinyuan, YAN Yifan, ZHAO Zhenhua, et al. Research progress on factors influencing heavy metal solidification effect and product performance of solid waste-based ceramsite[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2025, 44(2): 515–530.
- [15] 李沧, 程霄智, 矫辰, 等. 赤泥-钢渣基免烧陶粒的制备及除磷特性研究[J]. 水处理技术, 2024, 50(10): 38–43.
- LI Cang, CHENG Xiaozhi, JIAO Chen, et al. Study on preparation and phosphorus removal characteristics of red mud and steel slag based non-sintered ceramsite[J]. Technology of Water Treatment, 2024, 50(10): 38–43.
- [16] 张祎旸, 武陈, 曹宗仑, 等. 煤气化炉渣免烧陶粒的制备及其在反硝化滤池中的应用[J]. 现代化工, 2024, 44(S1): 213–217.
- ZHANG Yiyang, WU Chen, CAO Zonglun, et al. Preparation of non-sintering coal gasification slag ceramsite and its application in denitrification filter[J]. Modern Chemical Industry, 2024, 44(S1): 213–217.
- [17] 屈湃, 王倩, 黎佳全, 等. 粉煤灰基免烧陶粒的表面沸石化及其对 Cu²⁺吸附性能研究[J]. 现代技术陶瓷, 2022, 43(2): 118–128.
- QU Pai, WANG Qian, LI Jiaquan, et al. Study on surface zeolitization and Cu²⁺ adsorption of fly ash based non-roasting ceramsite[J]. Advanced Ceramics, 2022, 43(2): 118–128.
- [18] 张瑞, 鲁建国, 姚华彦, 等. 铁尾矿粉煤灰免烧陶粒的制备与物理力学特性[J]. 矿产综合利用, 2024(6): 21–26.
- ZHANG Rui, LU Jianguo, YAO Huayan, et al. Preparation and physico-mechanical properties of non-sintered ceramsite from iron tailing fly ash[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024(6): 21–26.
- [19] 魏鑫, 盘荣俊, 周治洲, 等. 粉煤灰免烧多孔保温陶粒的制备及孔结构调控研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36(5): 36–44.
- WEI Xin, PAN Rongjun, ZHOU Zhizhou, et al. Preparation and control of pore structure of porous insulating ceramsite with fly ash[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2022, 36(5): 36–44.
- [20] 曾兴华, 秦原, 杨良, 等. 锂云母渣免烧陶粒滤料制备及耐酸改

- 性研究[J]. *非金属矿*, 2024, 47(5): 45–46, 50.
- ZENG Xinghua, QIN Yuan, YANG Liang, et al. Study on preparation and acid resistance modification of lithium mica slag non-sintered ceramic filter material[J]. *Non-Metallic Mines*, 2024, 47(5): 45–46, 50.
- [21] 蒋明烨, 胡贺松, 刘春林, 等. 地聚物泡沫材料的制备、性能与应用研究进展[J]. *广州建筑*, 2024, 52(2): 128–132.
- JIANG Mingye, HU Hesong, LIU Chunlin, et al. Research progress in preparation, properties and application of geopolymers foam materials: A review[J]. *Guangzhou Architecture*, 2024, 52(2): 128–132.
- [22] JIN S S, ZHANG J X, HAN S. Fractal analysis of relation between strength and pore structure of hardened mortar[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 135: 1–7.
- [23] ZHU Z D, HUO W W, SUN H, et al. Correlations between unconfined compressive strength, sorptivity and pore structures for geopolymers based on SEM and MIP measurements[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 67: 106011.
- [24] CAI J C, ZHANG L H, JU Y, et al. An introduction to fractal-based approaches in unconventional reservoirs: Part i[J]. *Fractals*, 2018, 26(2): 1802001.
- [25] 刘瑞平, 王慧, 郭飞, 等. 粉煤灰-偏高岭土基地质聚合物发泡材料的制备与表征[J]. *矿业科学学报*, 2019, 4(1): 66–71.
- LIU Ruiping, WANG Hui, GUO Fei, et al. Preparation and characterization of fly ash-metakaolin based geopolymers foaming materials[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 4(1): 66–71.
- [26] 范张威. 煤体结构控制下的煤岩孔裂隙结构表征及其渗流特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2023.
- FAN Zhangwei. Characterization of pore and fracture structure and seepage characteristics of coal and rock under the control of coal structure[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2023.
- [27] 任超, 邓乔, 吕浩, 等. 矿渣电石渣基地聚合物固化土力学特性及微观机理分析[J]. *河南科学*, 2024, 42(10): 1434–1442.
- REN Chao, DENG Qiao, LYU Hao, et al. Mechanical properties and micro-mechanism of polymer-consolidated soils on slag and electric slag bases[J]. *Henan Science*, 2024, 42(10): 1434–1442.
- [28] 李文涛, 王彩萍, 曹红红, 等. 粉煤灰-偏高岭土基地质聚合物混
凝土的性能研究[J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2025, 46(1): 124–132.
- LI Wentao, WANG Caiping, CAO Honghong, et al. Study on performance of fly ash-metakaolin base geopolymers concrete[J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2025, 46(1): 124–132.
- [29] CHEN Z, LI J S, ZHAN B J, et al. Compressive strength and microstructural properties of dry-mixed geopolymers synthesized from GGBS and sewage sludge ash[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 182: 597–607.
- [30] LIN H, LIU H, LI Y, et al. Properties and reaction mechanism of phosphoric acid activated metakaolin geopolymers at varied curing temperatures[J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 144: 106425.
- [31] 汪其堃, 马思齐, 阳华龙, 等. 铝硅酸盐聚合物聚合机理与动力学研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(9): 2551–2566.
- WANG Qikun, MA Siqi, YANG Hualong, et al. Recent development on geopolymers mechanism and geopolymers kinetics of geopolymers[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 50(9): 2551–2566.
- [32] 李健. 循环流化床粉煤灰含钙物相对碱激发反应的影响机制[D]. 太原: 山西大学, 2023.
- LI Jian. Effect mechanism of Ca-containing phase of circulating fluidized bed-derived fly ash on alkali activation reaction[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2023.
- [33] 陈鑫, 张泽, 李东庆. 基于不同分形模型的冻融黄土孔隙特征研究[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(4): 1238–1248.
- CHEN Xin, ZHANG Ze, LI Dongqing. Study on the pore features of freezing-thawing loess based on different fractal models[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(4): 1238–1248.
- [34] 喻乐华, 欧辉, 段庆普. 捻珍珠岩水泥石孔分形维数及其与孔结构、强度的关系[J]. *材料科学与工程学报*, 2007, 25(2): 201–204, 224.
- YU Lehua, OU Hui, DUAN Qingpu. Research on pore volume fractal dimension and its relation to pore structure and strength in cement paste with perlite admixture[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2007, 25(2): 201–204, 224.