



碱激发煤矸石-矿渣胶凝材料的制备及性能

秦玲 杨俊翼 孙建伟 鲍玖文 牛荻涛 高小建

Preparation and properties of alkali-activated coal gangue-slag cementitious materials

QIN Ling, YANG Junyi, SUN Jianwei, BAO Jiuwen, NIU Ditao, GAO Xiaojian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250609.011>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多因素协同强化煤矸石粗骨料混凝土断裂性能试验研究

Experimental study on fracture performance of coal gangue coarse aggregate concrete reinforced by multi-factor synergy
复合材料学报. 2025, 42(8): 4615–4623 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250609.011>

基于长江下游超细疏浚砂的碱激发矿渣混凝土力学性能

Mechanical properties of alkali activated slag concrete with ultra fine dredged sand from Yangtze River
复合材料学报. 2022, 39(1): 335–343 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210419.003>

聚乙烯纤维增强高延性碱矿渣复合材料的拉压性能及裂缝分布

Tensile and compressive properties and crack distribution of polyethylene fiber reinforced high ductile alkali-activated slag composites
复合材料学报. 2021, 38(12): 4305–4312 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210302.003>

煤矸石/BiVO₄复合光催化剂的制备及其对黄药废水的降解

Preparation of coal gangue/BiVO₄ composite photocatalyst and its degradation of xanthate wastewater
复合材料学报. 2023, 40(12): 6703–6717 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230505.001>

基于固废磷石膏制备胶凝材料的工艺与机制

Preparation technology and mechanism of cementitious material based on solid waste phosphogypsum
复合材料学报. 2024, 41(3): 1436–1446 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230731.001>

纳米SiO₂和聚丙烯纤维对全煤矸石骨料混凝土力学性能与微观结构的影响

Effect of nano-SiO₂ and polypropylene fibers on the mechanical properties and microscopic properties of all coal gangue aggregate concrete
复合材料学报. 2024, 41(3): 1402–1419 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230714.005>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

碱激发煤矸石-矿渣胶凝材料的制备及性能



分享本文

秦玲¹, 杨俊翼¹, 孙建伟^{*1}, 鲍玖文¹, 牛菽涛², 高小建³

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266520; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055;

3. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要: 为降低水泥行业的碳足迹同时回收利用煤矸石和矿渣等固体废弃物, 本文将矿渣作为钙源加入到碱激发煤矸石浆体中, 制备碱激发煤矸石-矿渣 (AACGS) 胶凝材料。研究了矿渣掺量、液固比、碱激发剂模数和碱当量 4 种影响因素对 AACGS 试块凝结时间、流动度和抗压强度的影响, 确定出最优配合比。此外, 研究了矿渣掺量对 AACGS 试块干燥收缩和毛细吸水性能的影响, 并利用等温导热热量仪 (TAM Air)、X 射线衍射 (XRD)、压汞法 (MIP)、扫描电镜 (SEM) 等手段对 AACGS 试块的水化热、物相组成、孔结构特征、微观形貌进行分析。结果表明: 当液固比为 0.32、碱激发剂模数为 1.3、碱当量为 14% 时, AACGS 胶凝材料的综合性能最优。矿渣掺量的增多可以提高 AACGS 浆体流动度、抗压强度、抗毛细吸水性能, 增大了水化热, 加快了凝结时间, 细化了孔结构, 但导致了较大的干燥收缩。当矿渣掺量为 30% 时, AACGS 材料的抗压强度达到 P-O 42.5 水泥标准, 展现出替代硅酸盐水泥的巨大潜力, 对固体废弃物的资源化利用和环保建材的开发具有重要意义。

关键词: 碱激发胶凝材料; 煤矸石; 矿渣; 抗压强度; 微观结构

中图分类号: TQ172.1; TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2026)02-1008-14

Preparation and properties of alkali-activated coal gangue-slag cementitious materials

QIN Ling¹, YANG Junyi¹, SUN Jianwei^{*1}, BAO Jiuwen¹, NIU Ditao², GAO Xiaojian³

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China; 2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China; 3. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To reduce the carbon footprint of the cement industry and recycle solid waste such as coal gangue and slag, this paper incorporates slag as a calcium source into alkali-activated coal gangue slurry to prepare alkali-activated coal gangue-slag (AACGS) cementitious materials. The effects of four factors—slag content, liquid-to-solid ratio, modulus of alkali activator, and alkali equivalent—on the setting time, fluidity, and compressive strength of AACGS specimens were studied to determine the optimal mix proportions. Additionally, the influence of slag content on the drying shrinkage and capillary water absorption properties of AACGS specimens was investigated. Furthermore, isothermal calorimetry (TAM Air), X-ray diffraction (XRD), mercury intrusion porosimetry (MIP), and scanning electron microscopy (SEM) were employed to analyze the hydration heat, phase composition, pore structure characteristics, and micromorphology of AACGS specimens. The results indicate that AACGS gel materials exhibit optimal overall performance when the liquid-to-solid ratio is 0.32, the modulus of the alkali activator is 1.3, and the alkali equivalent is 14%. Increased slag content enhances the fluidity and compressive

收稿日期: 2025-01-10; 修回日期: 2025-05-09; 录用日期: 2025-05-28; 网络首发时间: 2025-06-10 10:11:12

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250609.011>

基金项目: 国家自然科学基金 (52208260; U23A20661; 52341803); 山东省自然科学基金 (ZR2022QE002); 中国博士后科学基金 (2023MD734207); 山东省高等学校青创科技计划创新团队 (2023KJ113); 武汉理工大学硅酸盐建筑材料国家重点实验室项目 (SYSJJ2024-08)
National Natural Science Foundation of China (52208260; U23A20661; 52341803); Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2022QE002); China Postdoctoral Science Foundation (2023MD734207); Youth Innovation Team Development Plan of Shandong Province in China (2023KJ113); State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures (Wuhan University of Technology) (SYSJJ2024-08)

通信作者: 孙建伟, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为混凝土耐久性 E-mail: jianwei_68@126.com

引用格式: 秦玲, 杨俊翼, 孙建伟, 等. 碱激发煤矸石-矿渣胶凝材料的制备及性能 [J]. 复合材料学报, 2026, 43(2): 1008-1021.

QIN Ling, YANG Junyi, SUN Jianwei, et al. Preparation and properties of alkali-activated coal gangue-slag cementitious materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2026, 43(2): 1008-1021(in Chinese).

strength of AACGS slurry, improves capillary water absorption resistance, increases hydration heat, accelerates setting time, and refines the pore structure, but it also leads to greater drying shrinkage. When the slag content is 30%, the compressive strength of AACGS cementitious materials meets the P·O 42.5 cement standard, demonstrating significant potential as a replacement for Portland cement. This has important implications for the resource utilization of solid waste and the development of environmentally friendly building materials.

Keywords: alkali-activated cementitious materials; coal gangue; slag; compressive strength; microstructure

随着全球经济的持续增长, 硅酸盐水泥的消耗量急剧增加, 已成为使用量最为显著的人工合成材料之一^[1-3]。据统计, 2021 年全球范围内波特兰水泥的生产量达到 44 亿吨, 而每吨波特兰水泥的生产伴随着约 0.94 吨二氧化碳 (CO₂) 的排放, 致使水泥产业成为第三大 CO₂ 排放源^[4-5]。鉴于此, 探索硅酸盐水泥的替代材料显得尤为迫切^[6]。与此同时, 工业进步伴随着大量工业固体废弃物的产生, 若不能有效加以利用, 将导致严重的环境污染和能源浪费问题。由潜在活性的原料(矿渣、粉煤灰、偏高岭土、煤矸石等)在碱性激发剂的作用下产生的水硬性的一类胶凝材料被称为碱激发胶凝材料, 其具有初始强度高、水化热低、抗冻性、耐化学性、耐久性强、高温稳定性好等一系列优异的性能^[7-8]。此外, 其制备工艺具有能耗低、CO₂ 排放少的环保优势, 并且能够有效实现固体废弃物的资源化利用^[9-11]。因此, 碱激发胶凝材料被视为硅酸盐水泥的理想替代品。

碱激发胶凝材料按水化产物不同可分为两大类: 一类是由高钙含量的原材料(如矿渣)激发获得的碱激发胶凝材料, 其主要水化产物与硅酸盐水泥一致, 为水化硅酸钙 (C-S-H) 凝胶; 另一类是以水化铝硅酸钠 (N-A-S-H) 凝胶为主要水化产物, 其主要原材料为低钙物质(如低钙粉煤灰、偏高岭土)^[12-14]。我国煤炭资源丰富, 煤矿开采加工过程中, 会生成大量的煤矸石, 占煤炭产量的 15%~20%^[15]。煤矸石通常以固体废弃物形式存在, 利用率低, 大量煤矸石占用了许多土地资源, 对社会造成很大危害^[16-17]。因此, 如何有效地资源化利用煤矸石尤为重要。目前, 煤矸石主要用于水泥生产、道路建设、烧结砖和非烧结砖等^[18-19]。值得注意的是, 未处理的煤矸石活性较低, 其硅铝矿物多呈惰性晶体结构(如高岭石、石英), 难以直接参与胶凝反应^[20]。经煅烧处理(通常为 600~900℃)后, 煤矸石中高岭石等层状硅酸盐矿物可转化为无定形偏高岭土相, 同时脱除有机质与硫化物, 显著提升火山灰活性, 这一预处理工艺已被工程界广泛采用^[21]。研究发现, 煅烧煤矸

石的化学和矿物组成与低钙粉煤灰高度相似^[22], 因此, 可以考虑利用煤矸石取代粉煤灰、矿渣和偏高岭土等制备碱激发胶凝材料^[23-24]。有研究发现^[25], 在粉煤灰地质聚合物中加入矿渣可以使体系中增加钙, 从而生成更多的水化硅(铝)酸钙 (C-(A)-S-H) 凝胶, 改善粉煤灰地质聚合物的力学性能, 而关于不同矿渣掺量对碱激发煤矸石胶凝材料性能影响及相关机制分析不足。此外, 目前关于碱激发煤矸石体系的研究主要集中于其宏观性能的研究, 由煤矸石作为原材料所制备的碱激发胶凝材料体系的抗压强度及煤矸石的利用率较低^[26], 关于碱激发煤矸石胶凝材料具体配合比设计、不同配合比参数对其宏观性能影响及微观机制分析系统研究较少。

综上, 碱激发胶凝材料能有效利用工业固体废弃物, 如矿渣、粉煤灰等, 但对于煤矸石这一量大且利用率低的废弃物, 其资源化利用的研究尚不充分。尽管已有尝试利用煤矸石制备碱激发胶凝材料, 但关于不同原材料替代(如用煤矸石取代粉煤灰、矿渣等)对材料性能的具体影响及机制分析仍显薄弱, 特别是在不同矿渣掺量对碱激发煤矸石胶凝材料性能的影响方面缺乏深入探究。此外, 现有研究多聚焦于碱激发煤矸石胶凝材料的宏观性能, 而对于材料水化过程、物相组成及微观结构的系统分析较少。这限制了对材料性能优化和新型材料开发的深入理解。因此, 本文旨在通过系统的实验研究和微观机制分析, 填补这些研究空白, 以煅烧煤矸石为主要原材料, 矿渣为钙源, NaOH(NH) 和 Na₂SiO₃(NS) 为碱激发剂, 制备碱激发煤矸石-矿渣 (AACGS) 胶凝材料。系统地分析了矿渣掺量及不同配合比参数(包括碱当量、碱激发剂模数和液固比)对 AACGS 凝结时间、流动度、抗压强度、干燥收缩和吸水性能的影响。并采用水化热分析、X 射线衍射 (XRD)、压汞法 (MIP) 和扫描电镜 (SEM) 等测试方法进行微观机制分析, 深入分析了 AACGS 胶凝材料的水化热、物相组成和微观结构的变化, 为 AACGS 胶凝材料的研发与应用提供理论支持和实践指导。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

煤矸石 (CG) 选用中国河北灵寿县煅烧煤矸石粉末, 经 800℃ 高温煅烧处理 2 h 后, 自然冷却 24 h 至室温 (图 1(a)), 其主要化学成分包括 SiO₂ 和 Al₂O₃, 二者含量超过 95%。矿渣采用中国河南巩义市 S95 级矿粉 (图 1(b)), 主要化学成分包括 SiO₂、CaO、Al₂O₃ 等, 其中矿渣的 CaO 含量远大于煅烧煤矸石的 CaO 含量。煅烧煤矸石、矿渣具体的 X 射线荧光 (XRF) 化学成分测定见表 1。图 2 为煤矸石及矿渣的粒径分布, 两者的中值直径 (D₅₀) 分别为 15.465 μm 和 11.917 μm, 说明矿渣的粒径比煤矸石更细些。分别采用青岛世纪星化学试剂有限公司生产的氢氧化钠 (分析纯, 纯度 ≥99.5%)

和青岛海湾精细化工有限公司生产的硅酸钠溶液 (27.58% SiO₂, 8.75% Na₂O)。通过向硅酸钠溶液中加入氢氧化钠以调节硅酸钠溶液的模数。此外, 为了与硅酸盐系水泥性能进行对比分析, 选用青岛市四方区生产的 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥, 制备硅酸盐水泥试块。

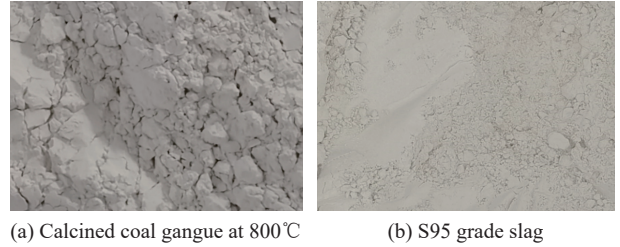


图 1 煤矸石 (CG) 和矿渣外观图

Fig. 1 Exterior view of coal gangue (CG) and slag

表 1 煅烧煤矸石和矿渣的化学成分 (质量分数 (%))

Table 1 Chemical components of calcined coal gangue and slag (Mass fraction (%))

Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Other
CG	54.44	42.71	0.22	0.69	0.17	0.01	1.76
Slag	34.50	17.70	34.00	1.03	6.01	1.64	5.12

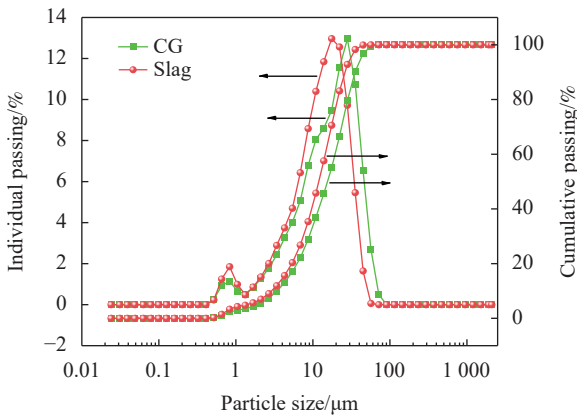


图 2 煤矸石和矿渣粒度分布

Fig. 2 Particle size distribution of coal gangue and slag

1.2 配合比及样品制备

采用不同煤矸石掺量 (0%~100%)、碱当量 (10%~16%)、碱激发剂模数 (1.1~1.5) 和液固比 (0.30~0.38) 制备 AACGS 胶凝材料试块, 具体配合比如表 2 所示。以样品编号为 CG7-14M1.3-32 为例, CG7 表示煅烧煤矸石含量为 70%, 14 表示碱当量为 14%, M1.3 表示 Na₂SiO₃ 的模数为 1.3, 32 表示液固比为 0.32。对照组水泥净浆试块的水灰比为 0.32, 以 PC 表示。

按照图 3 流程制备净浆试块并进行各种性能测试试验, 对于 AACGS 试块, 根据设计的配合比

将煅烧煤矸石与矿渣加入搅拌锅中, 慢搅 2 min, 混合均匀后, 再加入提前 24 h 配制的碱激发剂, 先慢搅 2 min 再快搅 2 min, 混合成均匀的 AACGS 净浆, 分别浇注在尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm、25 mm×25 mm×280 mm 和直径 Φ100 mm×Φ100 mm×50 mm 的模具中, 覆盖保鲜膜, 在相对湿度大于 90%、温度为 (22±3)℃ 条件下养护 1 d, 然后从模具中取出。对于水泥净浆试块, 将水泥加入搅拌锅中, 慢搅 1 min, 加入水, 先慢搅后快搅各 2 min, 混合成均匀的水泥净浆, 浇注在尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 的模具中, 覆盖保鲜膜, 在相对湿度大于 90%、温度为 (22±3)℃ 条件下养护 1 d, 然后从模具中取出。将制备好的试块养护在不同条件下至相应龄期, 进行力学强度、干燥收缩和吸水性能试验。

1.3 测试方法

本研究针对 AACGS 胶凝材料的工程化应用需求, 除了核心性能指标强度外, 系统开展了多种性能测试, 凝结时间是胶凝材料水化进程的关键表征参数, 决定了施工窗口期, 直接关联施工效率、结构安全及长期耐久性; 流动性可评估新拌浆体的工作性能, 确保其满足自密实或泵送施工要求; 干燥收缩实验可以量化材料的体积稳定性;

表2 碱激发煤矸石-矿渣 (AACGS) 净浆配合比

Table 2 Mix proportion of alkali-activated coal gangue-slag (AACGS) pastes

Sample	Liquid-solid ratio	SiO ₂ /Na ₂ O/Na ₂ O	total binder	Calcined coal gangue : Slag
CG10-14M1.3-32				10 : 0
CG9-14M1.3-32				9 : 1
CG8-14M1.3-32				8 : 2
CG7-14M1.3-32				7 : 3
CG6-14M1.3-32				6 : 4
CG5-14M1.3-32	0.32	1.3	14%	5 : 5
CG4-14M1.3-32				4 : 6
CG3-14M1.3-32				3 : 7
CG2-14M1.3-32				2 : 8
CG1-14M1.3-32				1 : 9
CG0-14M1.3-32				0 : 10
CG7-14M1.3-30	0.30			
CG7-14M1.3-32	0.32			
CG7-14M1.3-34	0.34	1.3	14%	7 : 3
CG7-14M1.3-36	0.36			
CG7-14M1.3-38	0.38			
CG7-14M1.1-32		1.1		
CG7-14M1.2-32		1.2		
CG7-14M1.3-32	0.32	1.3	14%	7 : 3
CG7-14M1.4-32		1.4		
CG7-14M1.5-32		1.5		
CG7-10M1.3-32			10%	
CG7-12M1.3-32			12%	
CG7-14M1.3-32	0.32	1.3	14%	7 : 3
CG7-16M1.3-32			16%	

Notes: CG7 indicates that the content of calcined coal gangue is 70%, 14 indicates that the alkali equivalent is 14%, M1.3 indicates that the modulus of Na₂SiO₃ is 1.3, and 32 indicates that the liquid-solid ratio is 0.32; Calcined coal gangue : Slag is mass ratio.

毛细吸水可表征材料孔隙结构致密性, 评估抗渗性能及抗碳化/氯离子侵蚀潜力。上述参数共同构成胶凝材料从施工性能到长期耐久性的完整评价体系, 为固废基胶凝材料替代传统水泥提供技术依据。具体测试方法如下:

(1) 凝结时间和流动度: 根据标准 GB/T 1346—2011^[27] 利用维卡仪 (ISO, 上海荣计达仪器科技有限公司) 测量 AACGS 浆体的初凝、终凝时间。按照标准 GB/T 2419—2005^[28] 进行流动度测试, 取玻璃板上两条最大垂直直径平均值作为流动度。

(2) 抗压强度: 用于抗压强度测试的试块尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm, 拆模后的试块在温度为 (20±3)°C、相对湿度约为 (95±1)% 的标准养护室中养护, 按照标准 GB/T 17671—2021^[29] 进行 1、3、7、28 天强度测试, 确定材料强度的发展规律。测试加载速率为 2.4 kN/s, 取 3 个试块的平均值为

测试的抗压强度值。

(3) 干燥收缩: 干燥收缩按照标准 JC/T 603—2004^[30] 进行测试, 干燥收缩测试试块尺寸为 25 mm×25 mm×280 mm, 试块拆模后测试初始长度 (L_0), 然后将其放置在干缩室中 (温度为 (20±2)°C, 相对湿度为 (60±5)%) 养护至 56 d, 期间测试其不同龄期长度 (L_t)。取 3 个试块的平均干燥收缩率作为试块的干燥收缩结果, 干燥收缩率 (ε_s) 的计算公式如下式所示:

$$\varepsilon_s = \frac{L_0 - L_t}{L_0} \times 100\% \quad (1)$$

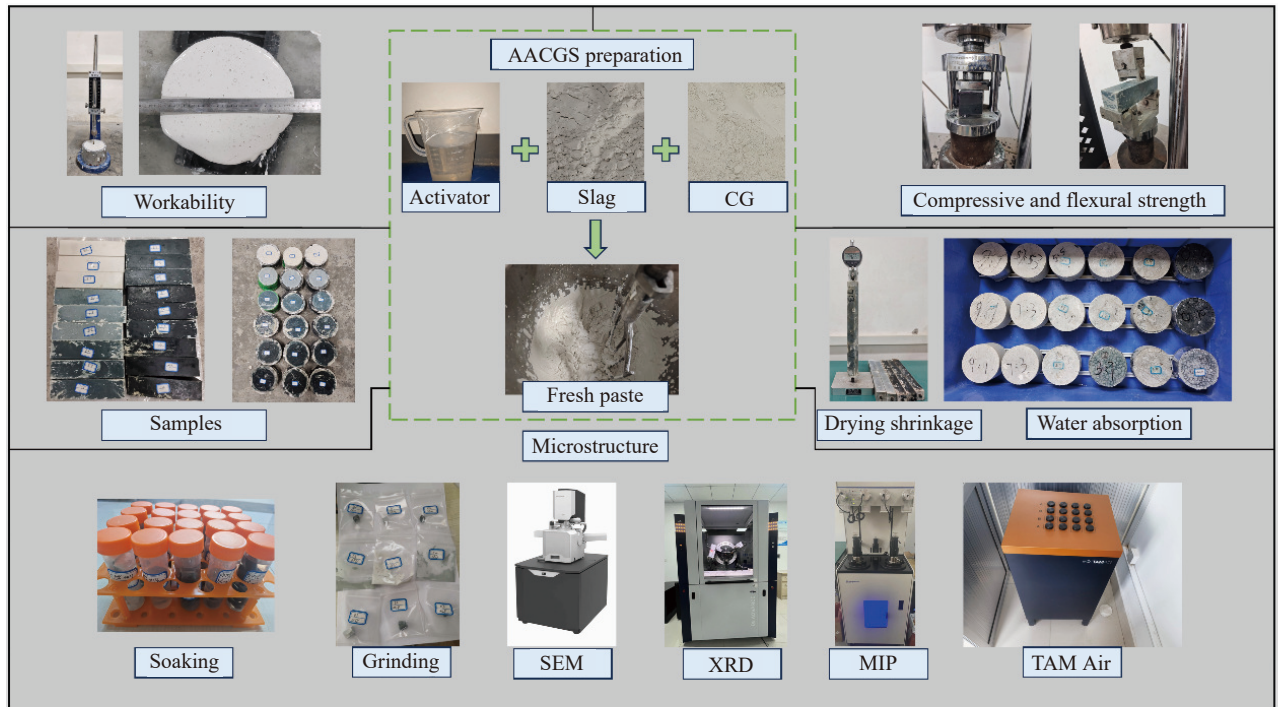
(4) 毛细吸水: 毛细吸水性能试验参照标准 EN 13057—2002^[31] 进行。将在标准养护室养护 28 d 的尺寸为 $\Phi 100$ mm× $\Phi 100$ mm×50 mm 圆柱试块先于室温条件下养护 1 天, 然后放在烘箱 (SG-40A, 中交建仪) 中 40°C 烘干 3 d 至恒重, 此时可认为试块中的水分已完全蒸发, 处于完全干燥状态。先把试块放入干燥皿中冷却, 再放在塑料垫条上方, 逐渐加水至没过试块底部 5 mm (±1 mm)。每次称重前要用湿毛巾将试块表面的水滴擦除。试验前用分析天平 (精度为 0.01 g, 上海舜宇恒平科学仪器有限公司, JY5002) 先记录所有试块的初始质量, 吸水试验开始后, 浸泡 1、4、9、16、25、36、49、64、81、100 和 121 min 后测定试块增加的质量, 计算得出单位面积吸水率。单位面积吸水率与吸收时间的平方根成正比, 如下式所示:

$$m_w = S \sqrt{t} + b \quad (2)$$

式中: m_w 为单位面积吸水率; S 为所求吸水性; t 为吸收时间 (min); b 为常数。

(5) 水化热: 水化热测试可以表征样品的活性、激发效率及早期的强度发展。水化热测试使用 TAM Air 等热量热仪 (TA Instruments) 在温度为 (20±0.02)°C 下进行。将不同配合比的 AACGS 样品称重后放入玻璃安瓿瓶中, 并立即放入量热仪中, 测量其前 3 天反应热变化。

(6) 物相组成及微观结构测试: 试块养护至 28 天后用无水乙醇终止水化, 在 40°C 真空干燥箱 (DZF-6020, 上海精宏实验设备有限公司) 中干燥 3 天至恒重, 进行 XRD、MIP 和 SEM 测试。XRD 测试采用 Bruker D8 Advance 衍射仪, 采用 40 kV 和 40 mA 下的 Cu-K α 辐射, 2θ 范围为 5°~70°。使用 Autopore-9600 MIP 测试仪 (Micromeritics Instrument) 进行孔结构的分析, 测试压力为



TAM Air—Isothermal heat flow meter; MIP—Mercury intrusion porosimetry; CG—Coal ganguex

图3 碱激发煤矸石-矿渣 (AACGS) 试块的制备及测试图

Fig. 3 Preparation and test diagram of alkali-activated coal gangue-slag (AACGS) samples

2.28×10⁸ Pa。使用 Thermo Scientific Quattro S 扫描电子显微镜对镀金的样品进行微观形貌测试。

2 结果与讨论

2.1 AACGS 浆体的凝结时间及流动度

AACGS 浆体的凝结时间和流动度如图 4 所示。由图 4(a) 可以看出, 随着矿渣掺量的增加, AACGS 浆体流动度增加, 凝结时间缩短, 当矿渣掺量从 10% 增加到 100% 时, 流动度增长 39.57%, 这是由于可作为吸附剂使用的煤矸石具有多孔结构及吸水能力^[32-33], 随着煤矸石被矿渣取代, 水泥浆体中游离水的含量增加, 从而导致流动性增加。此外, 随着矿渣掺量的增加, AACGS 浆体中的 Ca²⁺ 含量增加, 形成了较多的 C-A-S-H 凝胶, 降低了凝结时间^[34-35], 纯碱激发煤矸石浆体在常温下养护不能终凝。

由图 4(b)、图 4(c) 可以看出, 当固定矿渣掺量不变时, 液固比及碱当量对 AACGS 浆体的流动度影响较大, AACGS 浆体流动度随着液固比及碱当量的增加均增大, 流动度较初始值比分别提高了 77.84% 及 77.12%。此外, 液固比及碱当量的增加延缓了浆体的凝结硬化, 具体的初凝、终凝时间随两者的增加较初始值比分别增加 75.86%、

85.88% 及 455.56%、337.14%。这是由于液固比的增加使体系中自由水含量增加, 水化反应速率降低^[36], 碱当量的增加使体系 pH 值增大, 加快了部分聚合反应^[22], 部分煤矸石和矿渣颗粒尚未参与水化就被包裹, 从而凝结时间增加。由图 4(d) 可知, 相对于液固比及碱当量的影响, 碱激发剂模数对 AACGS 浆体流动度和凝结时间影响较小, 不同碱激发剂模数 AACGS 浆体的流动度在 250 mm 左右, 初凝、终凝时间为 70 min、110 min 左右。此外, AACGS 浆体的流动度明显大于硅酸盐水泥净浆的流动度 (60 mm), 除矿渣掺量为 10% 外的 AACGS 浆体的初凝、终凝时间也明显低于水泥净浆的初凝 (303 min)、终凝时间 (433 min), 具体工程应用、施工过程可充分考虑这一变化。

2.2 AACGS 净浆的抗压强度

图 5 为各影响因素对 AACGS 净浆抗压强度的影响。由图 5(a) 可以看出, AACGS 净浆的各龄期抗压强度随矿渣掺量 (10%~90%) 的增加而提高, 当矿渣掺量从 10% 增长到 90% 时, AACGS 净浆的 28 d 抗压强度增加了 131.84%。这是由于随着矿渣掺量的增加, Ca²⁺ 浓度增加, Ca²⁺ 可以取代水化硅铝酸钠 (N-A-S-H) 凝胶中的 Na⁺, 生成密度更高的水化硅铝酸钙 (C-A-S-H) 凝胶, 且两种凝胶

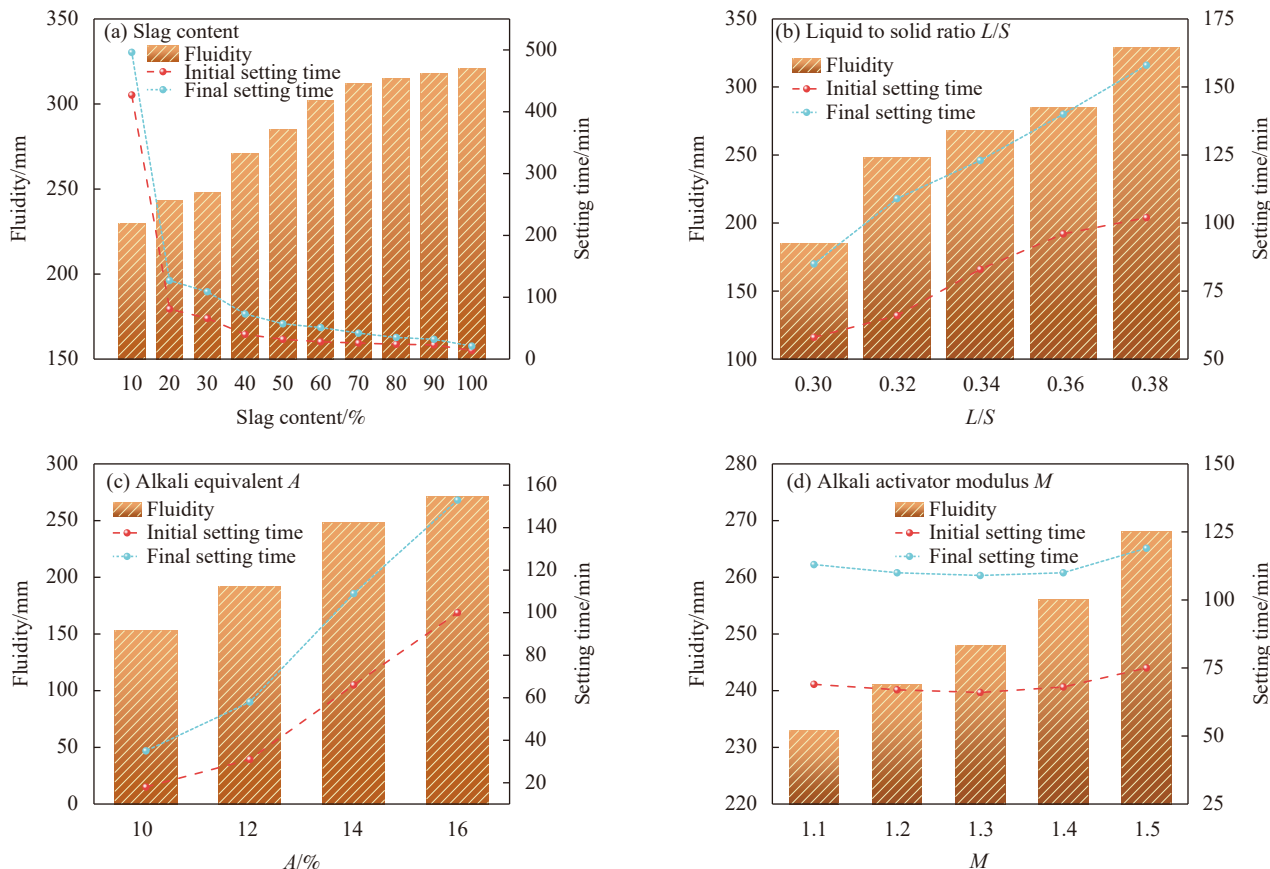


图4 不同影响因素下 AACGS 浆体凝结时间及流动度

Fig. 4 Setting time and fluidity of AACGS pastes under different influencing factors

相互交织缠绕，从而使强度提高^[37-38]。当矿渣掺量为 100% 时，AACGS 净浆的抗压强度会略微低于掺加 90% 矿渣的抗压强度。这是由于当 AACGS 净浆体系中全为矿渣时，浆体中的 Al_2O_3 和 SiO_2 含量减少，导致 N-A-S-H 凝胶减少，产物主要为单一的水化硅酸钙 (C-S-H) 凝胶，两种凝胶相互作用变少，从而使强度略微降低^[39]。值得注意的是，当矿渣掺量超过 30% 时，AACGS 净浆各龄期抗压强度 (30.6~83 MPa) 开始优于纯水泥 (PC) 净浆的抗压强度 (29.7~63.4 MPa)。此外，Yi 等^[26] 的研究表明，当液固比为 0.36、碱激发剂模数为 2、碱当量为 8~16 时，纯碱激发煤矸石胶凝材料的 1~28 d 龄期强度为 2~63 MPa，结合本试验结果，30% 矿渣的掺入可明显提高材料强度。Ma 等^[40] 的研究表明，当液固比为 0.38、碱激发剂模数为 2、碱当量为 12、矿渣掺量为 30% 时，AACGS 净浆 28 d 抗压强度为 78.3 MPa，略低于本试验结果。考虑到不同区域的原材料化学组成存在一定波动，原材料不同配比也会使强度有所差异，因此，不

同地区实际应用时，需考虑具体情况进行相应试验。基于以上分析，本文后续其他因素对强度的影响试验所选取的煤矸石：矿渣质量掺量固定为 7 : 3。

图 5(b) 为液固比对 AACGS 净浆抗压强度的影响，由图可知，AACGS 净浆的抗压强度随液固比增大而降低。当液固比为 0.30 时，AACGS 净浆的 28 d 抗压强度达到最大值 72.1 MPa，但结合图 4(b)，此时浆体流动度太差，而当液固比为 0.32 时，AACGS 净浆的 28 d 抗压强度与液固比为 0.30 时相比仅降低 2 MPa 左右，但流动度提高 34.05%，当液固比为 0.38 时，AACGS 净浆 28 d 抗压强度降低了 19.5 MPa 左右。高液固比虽然提高了浆体的流动度，但是也增大了试块内部孔隙率，降低了抗压强度，基于此，选择 0.32 的液固比进行后续试验。

图 5(c) 和图 5(d) 分别为碱当量和碱激发剂模数对 AACGS 净浆抗压强度的影响。由图可知，当碱当量和碱激发剂模数分别为 14% 和 1.3 时，

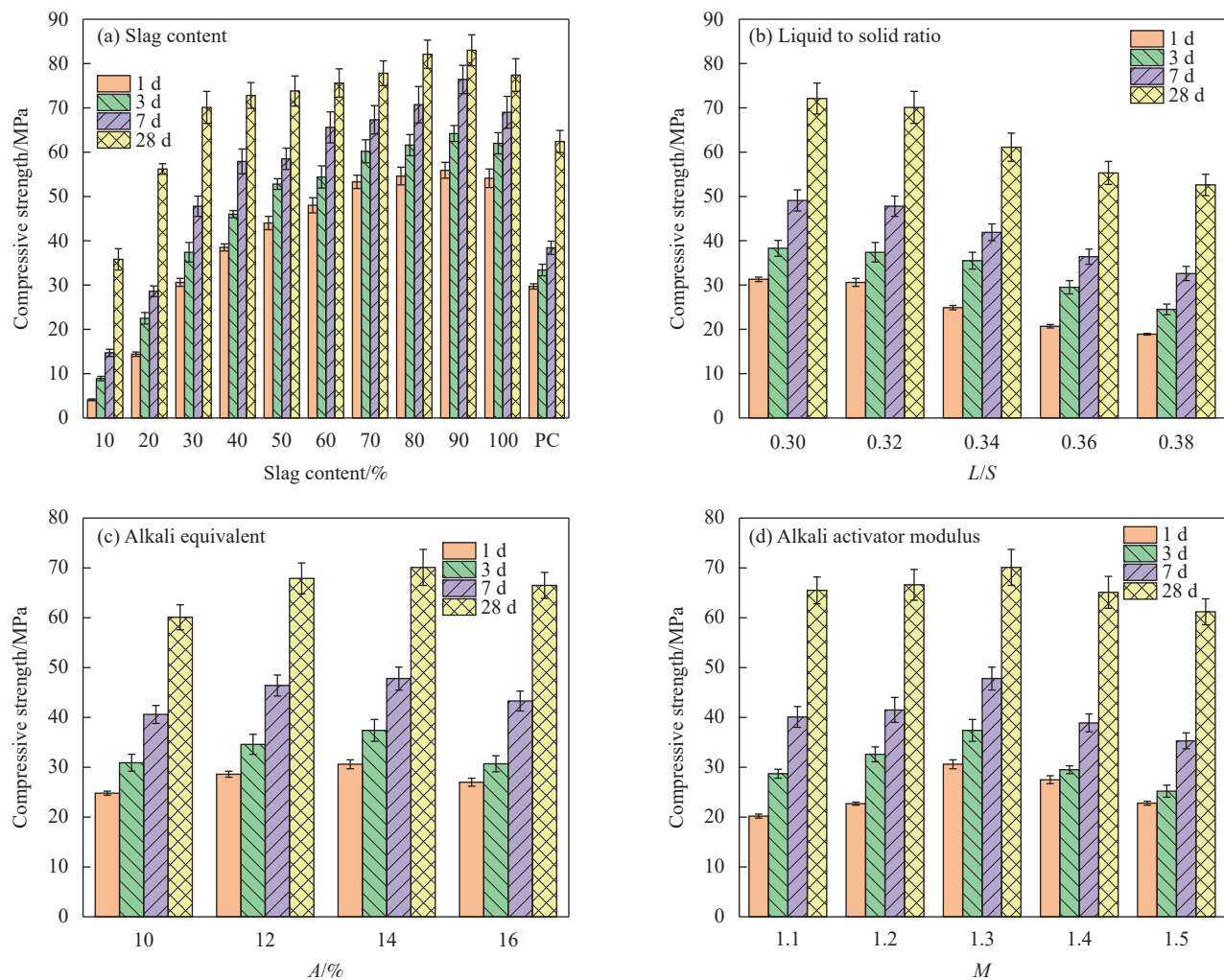


图5 不同影响因素时 AACGS 净浆的抗压强度

Fig. 5 Compressive strength of AACGS pastes under different influencing factors

AACGS净浆 28 d 抗压强度出现了拐点, 说明存在最佳碱当量和碱激发剂模数。当碱当量较低、碱激发剂模数较高时, 浆体碱性不足, 水化产物聚合速率降低, 延迟聚合, 影响缩聚反应。当加入的氢氧化钠较多时, 碱当量增加, 碱激发剂模数降低, 加快了聚合反应, 部分煤矸石、矿渣尚未参加反应就被包裹, 作为残留物填充孔隙, 从而抗压强度降低^[40]。综合以上分析, 后续试验选取的基准配合比为液固比 0.32、碱激发剂模数 1.3、碱当量 14%。

2.3 AACGS 试块的干燥收缩性能

碱激发胶凝材料的干燥收缩是由于试块在相对湿度较低时, 内部水分的蒸发造成的。不同矿渣掺量对 AACGS 试块干燥收缩的影响如图 6 所示。可以看出, AACGS 试块的干燥收缩率与养护龄期呈正相关, 且随龄期的变化干缩曲线可分为快速

增长、缓慢增长和稳定阶段。快速增长的原因是前期聚合反应迅速, 促进凝胶和毛细孔的形成, 从而导致试块孔隙率更高, 然后逐渐趋向稳定^[41]。在快速增长阶段, 结合后续孔结构试验结果, 煤矸石掺量越多, 干燥收缩越大, 这是由于煤矸石掺量越多, 试块大孔数量越多, 孔结构分布越粗糙, 大孔水分会迅速蒸发, 收缩迅速, 然后是小孔水分蒸发, 最后是凝胶孔。然而, 随着龄期的延长, 矿渣掺量增加时, AACGS 体系中水滑石和 C-(A)-S-H 凝胶类水化产物数量增加, 填充试块大孔, 小孔数量变多, 孔隙结构细化^[42]。根据 Young-Laplace 方程^[43], 可以得到毛细管压力, 如下式:

$$\sigma_c = \frac{2\gamma \cos\theta}{r_c} \quad (3)$$

式中: σ_c 表示毛细管压力; γ 表示孔隙溶液的表

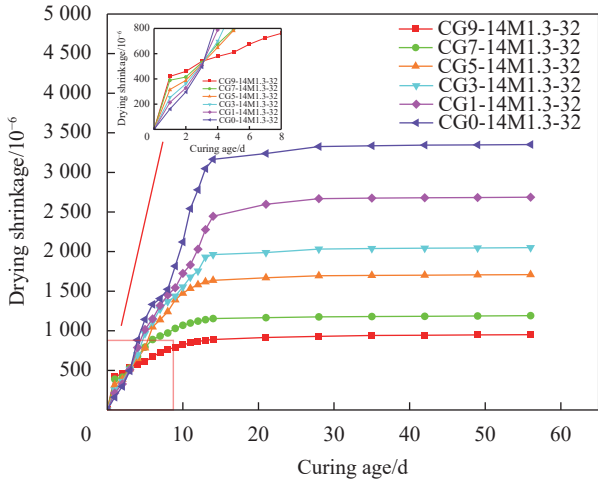
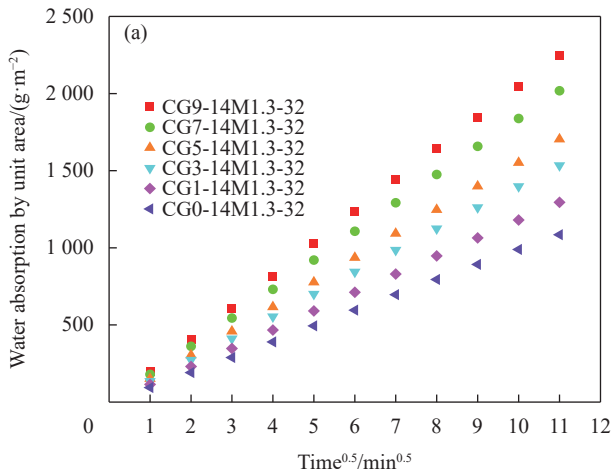


图6 AACGS试块不同龄期的干燥收缩

Fig. 6 Dry shrinkage of AACGS samples at different ages

面张力; θ 表示孔壁亲水性的接触角; r_c 表示毛细管半径。

试块的收缩通常会随着毛细压力的增大而增加^[44]。由式(3)可知,随着矿渣掺量的增加,孔隙结构变细,毛细压力变大,最终试块的收缩也随之增大。此外,与硅酸盐水泥(OPC)试块相比,AACGS试块具有较高的收缩率,主要是由试块内部的孔隙结构和水化产物的差异导致的^[45-46]。AACGS试块相对较大的干燥收缩会引起相对更多的微裂纹,这也是限制这种胶凝材料代替OPC广泛使用的最重要原因。因此,在制备AACGS胶凝材料时建议采用0.2%~2%的纤维(如钢纤维、聚丙烯纤维)、0.5%~3%的减缩剂、5%~10%的膨胀剂和0.05%~0.5%的保水剂等方法来减小干燥收缩^[47]。



2.4 AACGS试块的毛细吸水性能

图7为矿渣掺量对AACGS试块吸水性能的影响。由图7(a)可以看出,2h内各试块的单位面积吸水率快速增长,且与吸水时间的平方根呈高度线性关系,相关系数在0.99以上,主要是由于干燥试块快速吸水所致^[32]。此外,由图7(b)可见,随着矿渣掺量的增加,吸水性逐渐减小。结合后续孔隙结构试验结果,这是由于矿渣含量越大,液相中前驱体越活跃,促进了两种凝胶的形成^[48-49],此外,矿渣具有更细的颗粒形态,矿渣本身可以对AACGS试块内部的缝隙和孔洞进行填充,其掺量的增加使大孔数量减少,试块总孔隙率降低,密实度和不透水性明显提高^[50-51],在毛细吸收作用下,可以有效抵抗水分的侵入^[52],使单位面积吸水率和吸水性均降低。

不同区域的原材料因地质条件、生产工艺等差异可能导致其化学组成存在一定波动,原材料不同配比可能会使上述具体性能有所差异,但性能演变大体趋势是一致的,不同地区实际应用时,可针对具体原材料进行相应试验,本研究所得影响规律可为实际工程应用提供重要参考。

2.5 AACGS浆体的水化热

图8(a)和图8(b)分别为不同矿渣掺量对AACGS浆体的水化速率和累计放热量的影响。由图8(a)、图8(b)可以发现,由于AACGS材料与碱激发剂的反应速度较快,Si和Al与溶解的Ca快速反应,生成高浓度的水化产物,因此在水化初期的放热速率较大,出现初始反应放热峰,早期水化累积放热量也较高^[53]。随后,水化放热速率

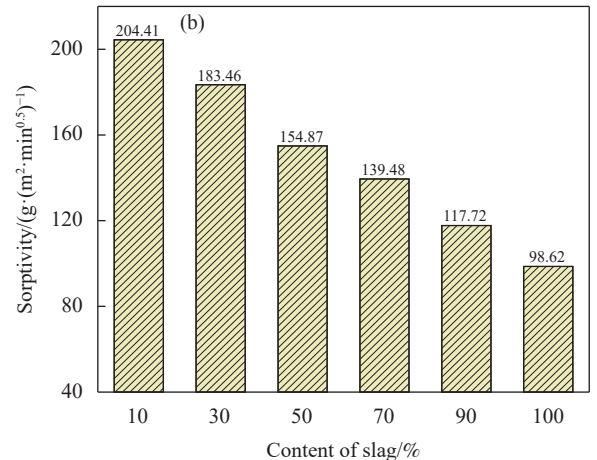


图7 不同矿渣掺量时 AACGS 试块的毛细吸水性能

Fig. 7 Capillary water absorption performance of AACGS pastes with different slag content

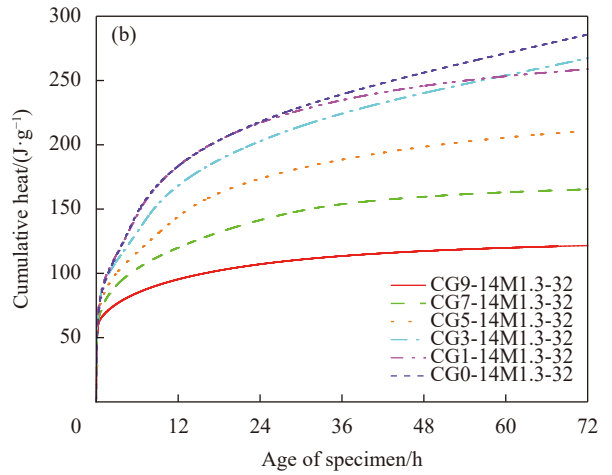
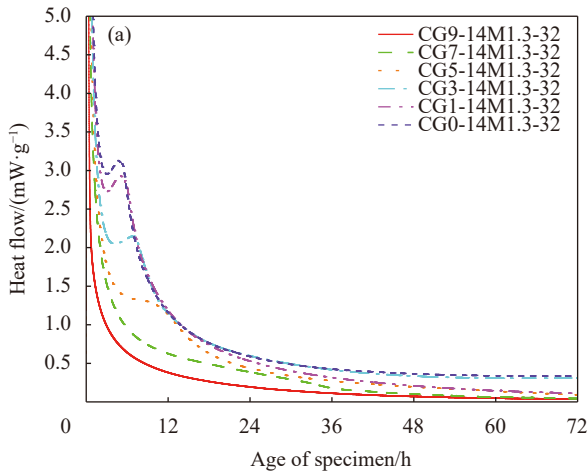


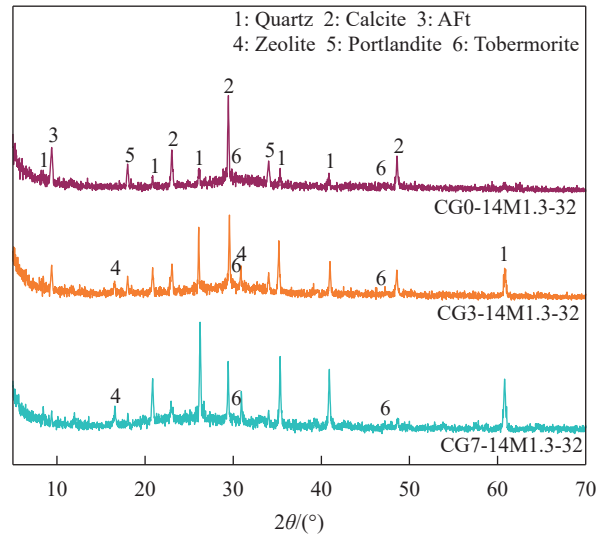
图8 不同矿渣掺量时 AACGS 浆体的水化热

Fig.8 Hydration heat of AACGS pastes with different slag content

迅速降低，在 6 h 之后出现第二个放热峰 (体积水化峰)，碱激发胶凝材料发生水化反应生成凝胶产物，并影响最终试块的强度和耐久性^[54-55]。矿渣掺量较低时，第二水化放热峰不明显 (图 8(a))，这是由于体系中铝元素含量较高，生成水化产物速率较慢，放热量少^[56]。随着矿渣掺量的增加，AACGS 浆体的水化进程加快，第二水化放热峰变得明显并向左偏移，水化速率提高，累计放热量增加 (图 8(b))，这是由于放热峰值强度与物质的溶解程度及初始产物形成有关^[57]，矿渣的活性高于煤矸石，Ca—O 键比 Si—O 和 Al—O 键弱，因此，随着矿渣掺量的增加，矿渣溶解及生成水化产物比例越高，反应越剧烈^[56, 58]，从而使 AACGS 浆体凝结时间降低、强度提高。

2.6 AACGS 试块的物相组成分析

图 9 为不同矿渣掺量的 AACGS 试块在 28 天龄期时的 XRD 图谱。在 AACGS 试块中，可发现明显的石英 (SiO₂)、方解石 (CaCO₃)、钙矾石 (AFt)、沸石、氢氧化钙 (Ca(OH)₂) 衍射峰。托勃莫来石是 C-S-H 的晶体相，衍射峰不明显，这可能是由于其尺寸较小，小于 XRD 检测阈值^[57, 59]。石英主要来源于煤矸石，方解石主要来源于试块在空气中的碳化作用，沸石是一种硅铝酸盐，是煤矸石在碱激发剂的作用下形成的二次反应产物，因此随着矿渣的增加而减少^[48]。矿渣掺量的增多使体系中 CaO 的含量提高，与煤矸石中的活性 SiO₂ 反应，促进了 C-A-S-H 凝胶和 C-S-H 凝胶的形成^[60-61]，此外，随着矿渣掺量的增加，方解石、AFt 和氢氧化钙的衍射峰强度增加，表明矿渣可以增加体系中方解石、AFt 和氢氧化钙的生成量，各种水



AFt—Calcium aluminosilicate

图9 AACGS 试块 XRD 图谱

Fig.9 XRD patterns of AACGS samples

化产物相互交织缠绕形成致密的结构，从而提高 AACGS 试块的抗压强度。

2.7 AACGS 试块的微观结构分析

图 10(a)、图 10(b) 为不同矿渣掺量 AACGS 试块在 28 天龄期时的 MIP 曲线，由此统计出的孔径分布结果如图 10(c) 所示。试块内的孔可分为无害孔 (<20 nm)、较小的有害孔 (20~50 nm)、有害孔 (50~200 nm) 和较大的有害孔 (>200 nm)^[62]。由图 10 可以看出，随着矿渣掺量的增加，试块的总孔隙率降低 (图 10(b))，无害孔数量增加，有害孔的数量降低 (图 10(c))，掺加 30%、70% 和 100% 矿渣的试块在 28 d 时的总孔隙率分别为 22.14%、18.26% 和 16.15%，小于 20 nm 的孔径含量 (分别为 65.34%、

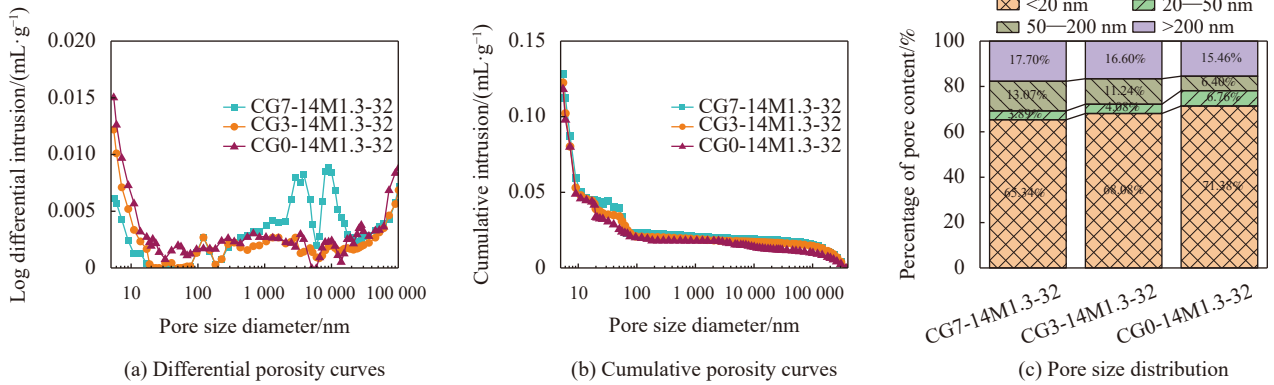


图 10 AACGS 试块压汞法 (MIP) 测试结果

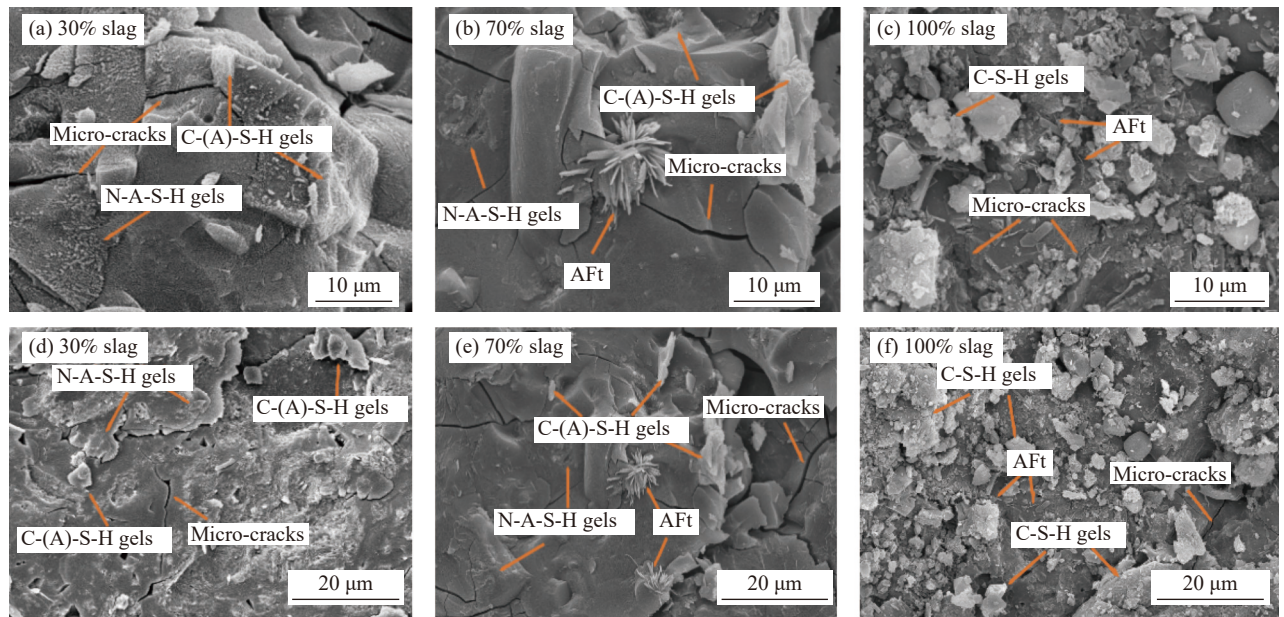
Fig. 10 MIP results of AACGS samples

68.08% 和 71.38%)。一方面，这是由于与煤矸石相比矿渣具有更连续的粒径分布和更高的比表面积(图 2)，在 AACGS 浆体中掺入矿渣后，会使其微观结构更致密，减少有害孔^[63]。另一方面，在 CG 体系中加入矿渣后，水化产物为共存的 C-(A)-S-H 凝胶和 N-A-S-H 凝胶，它们相互填充水化区域的孔隙，从而提高了 AACGS 试块的密实度，降低了总孔隙率^[64]，从而导致了抗压强度的提高。

2.8 AACGS 试块的微观形貌分析

不同矿渣掺量 AACGS 试块在 28 天龄期时的 SEM 图像如图 11 所示。图 11(a) 可观测到 AACGS 试块的主要水化产物，包括由碱激发煤矸石形成的具有沸石凝胶型三维结构的水化硅铝酸钠 (N-A-

S-H) 凝胶及由碱激发高钙矿渣形成的水化硅(铝)酸钙 (C-(A)-S-H) 凝胶，两者可相互交织缠绕形成致密的结构胶^[65]。随着矿渣掺量的增加，针棒状的钙矾石 (AFt) 被明显观测到(图 11(b))。对于碱激发矿渣胶凝材料(图 11(c))，针棒状的钙矾石 (AFt) 和 C-S-H 凝胶是主要水化产物，大量的 C-S-H 凝胶形成并填充在 AFt 晶体之间^[66]。由图 11(a)~图 11(f) 还可看出，矿渣掺量提高使浆体中 Ca/Si 比和 Si/Al 比提高^[67]，生成了更多的 C-(A)-S-H 凝胶等水化产物，因此使 AACGS 试块变得更加致密，提高了其抗压强度。此外，在样品中还观察到均匀的微裂纹，这主要是由碱激发样品的干燥收缩造成的^[68]。



C-(A)-S-H—Hydrated calcium (aluminum) silicate; N-A-S-H—Hydrated sodium aluminosilicate; C-S-H—Hydrated calcium silicate

图 11 AACGS 试块扫描电镜图像

Fig. 11 SEM images of AACGS samples

3 结论

本文制备了一种碱激发煤矸石-矿渣 (AACGS) 胶凝材料, 研究了不同因素对其性能的影响, 得出如下结论:

(1) 随着液固比的增大, AACGS 净浆流动度和凝结时间均增加, 抗压强度减小, 当液固比为 0.32 时, 其初凝时间为 66 min, 终凝时间为 109 min, 28 d 抗压强度为 70.1 MPa; 碱激发剂模数对 AACGS 净浆流动度和凝结时间影响较小, 28 d 抗压强度在模数为 1.3 时达到最大值 70.1 MPa; 随着碱当量的增大 AACGS 净浆流动度和凝结时间均增加, 28 d 抗压强度在碱当量为 14% 时达到最大值 70.1 MPa。综合各性能, 本文确定的最优配合比为液固比 0.32、碱激发剂模数 1.3、碱当量 14%。

(2) 随着矿渣掺量的增多, AACGS 净浆流动度、抗压强度、抗毛细吸水性能均增加, 当矿渣掺量超过 30% 时, AACGS 净浆各龄期抗压强度开始优于硅酸盐水泥净浆的抗压强度, 28 d 抗压强度提高 12.34%~33.01%; 但是矿渣的掺入会导致较大的干燥收缩, 生成微裂纹, 因此在制备 AACGS 胶凝材料时可以考虑加入外加剂和纤维以减小干燥收缩。

(3) 矿渣掺量的增加, 加快了 AACGS 胶凝材料的水化进程, 使水化放热速率、放热量增加、降低了凝结时间。随着矿渣掺量的增加, 水化硅(铝)酸钙(C-(A)-S-H)凝胶生成量增加, 水化硅铝酸钠(N-A-S-H)凝胶和C-(A)-S-H凝胶相互交织缠绕, 使AACGS试块微观结构变得致密, 孔隙结构细化, 有害孔减少, 总孔隙率降低。

(4) 不同产地的原材料因地质条件、生产工艺等因素, 其材料组成存在差异, 本研究揭示了AACGS胶凝材料性能变化的总体规律, 可为实际工程应用提供重要参考。此外, 后续研究将对比未处理煤矸石与预处理煤矸石的性能差异, 探索低成本预处理技术(如机械活化、化学激发)对低品位煤矸石的改性效果。将进行矿渣掺量、液固比、碱当量、碱激发剂模数等多因素协同作用对AACGS胶凝材料性能的影响分析。

参考文献:

[1] PARUTHI S, HUSAIN A, ALAM P, et al. A review on material mix proportion and strength influence parameters of geopolymer concrete: Application of ANN model for GPC strength prediction[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 356: 129253.

[2] MORALES-CANTERO A, VALLINA D, ANGELES G, et al. Enhancing fluidity and mechanical properties in limestone calcined clay cements with one-third Portland clinker content[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 95: 110334.

[3] ZHAO Y, YANG C, QU F, et al. Mechanical properties and drying shrinkage of alkali-activated coal gangue concrete[J]. *Sustainability*, 2022, 14(22): 14736.

[4] PACHECO-TORGAL F, ABDOLLAHNEJAD Z, CAMOES A F, et al. Durability of alkali-activated binders: A clear advantage over Portland cement or an unproven issue?[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 30: 400-405.

[5] CHAUDHURY R, SHARMA U, THAPLIYAL P C, et al. Low-CO₂ emission strategies to achieve net zero target in cement sector[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 417: 137466.

[6] PROVIS J L, PALOMO A, SHI C. Advances in understanding alkali-activated materials[J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 78: 110-125.

[7] WARDHONO A, GUNASEKARA C, LAW D W, et al. Comparison of long term performance between alkali activated slag and fly ash geopolymer concretes[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 143: 272-279.

[8] ROVNANÍK P, KUSÁK I, BAYER P, et al. Comparison of electrical and self-sensing properties of Portland cement and alkali-activated slag mortars[J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 118: 84-91.

[9] PROVIS J L. Alkali-activated materials[J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 114: 40-48.

[10] XUE L, ZHANG Z, LIU H, et al. Drying shrinkage behavior of hybrid alkali activated cement (HAAC) mortars[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 316: 126068.

[11] AMRAN Y M, ALYOUSEF R, ALABDULJABBAR H, et al. Clean production and properties of geopolymer concrete: A review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 251: 119679.

[12] JIAO Z, WANG Y, ZHENG W, et al. Effect of dosage of sodium carbonate on the strength and drying shrinkage of sodium hydroxide based alkali-activated slag paste[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 179: 11-24.

[13] 童国庆, 张吾渝, 高义婷, 等. 碱激发粉煤灰地聚物的力学性能及微观机制研究[J]. *材料导报*, 2022, 36(4): 129-134.

TONG Guoqing, ZHANG Wuyu, GAO Yiting, et al. Mechanical properties and micromechanism of alkali-activated fly ash geopolymer[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(4): 129-134(in Chinese).

[14] QU C, QIN Y, WANG T. From cement to geopolymers: Performances and sustainability advantages of ambient curing[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 91:

- 109555.
- [15] PENG B, LI X, ZHAO W, et al. Study on the release characteristics of chlorine in coal gangue under leaching conditions of different pH values [J]. *Fuel*, 2018, 217: 427-433.
- [16] 宋强, 杨玉鑫, 许世鹏, 等. 煤矸石混凝土性能及提升研究进展 [J]. *煤炭科学技术*, 2025, 53(2): 407-425.
- SONG Qiang, YANG Yuxin, XU Shipeng, et al. Research progress in performance and enhancement of coal gangue concrete [J]. *Coal Science and Technology*, 2025, 53(2): 407-425(in Chinese).
- [17] ZHAO Z, QU X, LI Z, et al. Preparation and characterization of geopolymer foamed concrete based on coal gangue and slag [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 455: 139187.
- [18] 仲国龙, 邓小伟, 房朝军, 等. 煤矸石资源化利用现状及发展趋势 [J]. *煤炭学报*, 2025, 50(S2): 1153-1168.
- ZHONG Guolong, DENG Xiaowei, FANG Chaojun, et al. The status quo and development trend of coal gangue resource utilization [J]. *Journal of China Coal Society*, 2025, 50(S2): 1153-1168(in Chinese).
- [19] 刘泽, 段开瑞, 周梅, 等. 煤矸石在土木工程材料中的应用研究进展 [J]. *材料导报*, 2024, 38(10): 88-99.
- LIU Ze, DUAN Kairui, ZHOU Mei, et al. State-of-the-art utilization of coal gangue in civil engineering materials [J]. *Materials Reports*, 2024, 38(10): 88-99(in Chinese).
- [20] 李大虎, 李晓丽, 赵晓泽, 等. 活化煤矸石粉对砒砂岩土水泥复合强度影响的试验研究 [J]. *材料导报*, 2025, 39(9): 120-125.
- LI Dahu, LI Xiaoli, ZHAO Xiaoze, et al. Effect of activated gangue powder on the strength of pisha sandstone cement composite soil [J]. *Materials Reports*, 2025, 39(9): 120-125(in Chinese).
- [21] 文壮, 金娇, 刘帅, 等. 活化煤矸石基改性沥青流变性能评价及微观机理 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2024, 55(11): 4204-4216.
- WEN Zhuang, JIN Jiao, LIU Shuai, et al. Rheological properties assessment and micro-mechanism of asphalt modified by activated coal gangue [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2024, 55(11): 4204-4216(in Chinese).
- [22] ZHAO Y, YANG C, YAN C, et al. Design and properties of coal gangue-based geopolymer mortar [J]. *Buildings*, 2022, 12(11): 1932.
- [23] 石起振, 周梅, 白金婷, 等. 煤矸石对煤基固废地聚物注浆材料性能的影响 [J]. *建筑材料学报*, 2025, 28(8): 717-724.
- SHI Qizhen, ZHOU Mei, BAI Jinting, et al. Influence of coal gangue on the properties of coal-based solid waste geopolymer grouting material [J]. *Journal of Building Materials*, 2025, 28(8): 717-724(in Chinese).
- [24] ZHAO J, WANG A, ZHU Y, et al. Manufacturing ultra-high performance geopolymer concrete (UHPGC) with activated coal gangue for both binder and aggregate [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 284: 111723.
- [25] KUMAR S, KUMAR R, MEHROTRA S P. Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymer [J]. *Journal of Materials Science*, 2010, 45: 607-615.
- [26] YI C, MA H, CHEN H, et al. Preparation and characterization of coal gangue geopolymers [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 187: 318-326.
- [27] 全国水泥标准化技术委员会. 水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法: GB/T 1346—2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- National Technical Committee for Cement Standardization. Test methods for standard consistency water requirement, setting time, stability of cement: GB/T 1346—2011 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011(in Chinese).
- [28] 全国水泥标准化技术委员会. 水泥胶砂流动度测定方法: GB/T 2419—2005 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- National Technical Committee for Cement Standardization. Test method for fluidity of cement mortar: GB/T 2419—2005 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2005(in Chinese).
- [29] 全国水泥标准化技术委员会. 水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法): GB/T 17671—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- National Technical Committee for Cement Standardization. Test method for strength of cement mortar (ISO method): GB/T 17671—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021(in Chinese).
- [30] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水泥胶砂干缩试验方法: JC/T 603—2004 [S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004.
- National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Test method for drying shrinkage of cement mortar: JC/T 603—2004 [S]. Beijing: China Construction Science and Technology Press, 2004(in Chinese).
- [31] European Committee for Standardization. Products and systems for the protection and repair of concrete structures—Test methods—Determination of resistance of capillary absorption: EN 13057—2002 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2002.
- [32] QIN L, GAO X. Properties of coal gangue-Portland cement mixture with carbonation [J]. *Fuel*, 2019, 245: 1-12.
- [33] JABŁOŃSKA B, KITYK A V, BUSCH M, et al. The structural and surface properties of natural and modified coal gangue [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 190: 80-90.

- [34] JANG J G, LEE N K, LEE H K. Fresh and hardened properties of alkali-activated fly ash/slag pastes with superplasticizers[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 50: 169-176.
- [35] LEE N K, LEE H K. Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 47: 1201-1209.
- [36] 赵宏昊, 刘宪明, 李鹏, 等. 考虑道路层间脱空病害的地聚合物注浆材料性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(12): 4559-4571. ZHAO Honghao, LIU Xianming, LI Peng, et al. Properties of geopolymer grouting material considering road interlayer hollowing diseases[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 42(12): 4559-4571(in Chinese).
- [37] ZHU H, YANG S, LI W, et al. Study of mechanical properties and durability of alkali-activated coal gangue-slag concrete[J]. *Materials*, 2020, 13(23): 5576.
- [38] ASAAD M A, HUSEIEN G F, MEMON R P, et al. Enduring performance of alkali-activated mortars with metakaolin as granulated blast furnace slag replacement[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 16: e00845.
- [39] ZHAO J, WANG A, ZHANG Z, et al. Design and evaluation of alkali-activated slag-calcined coal gangue cement and the shrinkage control by calcium carbonate whisker[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 443: 137753.
- [40] MA H, ZHU H, YI C, et al. Preparation and reaction mechanism characterization of alkali-activated coal gangue-slag materials[J]. *Materials*, 2019, 12(14): 2250.
- [41] MA H, CHEN H, ZHU H, et al. Study on the drying shrinkage of alkali-activated coal gangue-slag mortar and its mechanisms[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 225: 204-213.
- [42] ZHANG Y, YANG D, WANG Q. Performance study of alkali-activated phosphate slag-granulated blast furnace slag composites: Effect of the granulated blast furnace slag content[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2023, 23(3): 181.
- [43] KOVLER K, ZHUTOVSKY S. Overview and future trends of shrinkage research[J]. *Materials and Structures*, 2006, 39(9): 827-847.
- [44] HUANG D, CHEN P, PENG H, et al. A review and comparison study on drying shrinkage prediction between alkali-activated fly ash/slag and ordinary Portland cement[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 305: 124760.
- [45] ZHANG B, ZHU H, CHENG Y, et al. Shrinkage mechanisms and shrinkage-mitigating strategies of alkali-activated slag composites: A critical review[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 318: 125993.
- [46] TAGHVAYI H, BEHFARNIA K, KHALILI M. The effect of alkali concentration and sodium silicate modulus on the properties of alkali-activated slag concrete[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2018, 16(7): 293-305.
- [47] MA H, ZHU H, CHEN H, et al. Shrinkage-reducing measures and mechanisms analysis for alkali-activated coal gangue-slag mortar at room temperature[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 252: 119001.
- [48] GUO L, ZHOU M, WANG X, et al. Preparation of coal gangue-slag-fly ash geopolymer grouting materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 328: 126997.
- [49] EL-HASSAN H, SHEHAB E, AL-SALLAMIN A. Effect of curing regime on the performance and microstructure characteristics of alkali-activated slag-fly ash blended concrete[J]. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 2021, 10(5): 289-317.
- [50] CHI M, HUANG R. Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 40(3): 291-298.
- [51] KA M, HOFFMANN D, MOLEZ L, et al. Alkali-activated mortars: Porosity and capillary absorption[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2023, 27(4): 1715-1729.
- [52] MOHAMMED B S, HARUNA S, LIEW M S. Optimization and characterization of cast in-situ alkali-activated pastes by response surface methodology[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 225: 776-787.
- [53] XUE L, ZHANG Z, WANG H. Early hydration kinetics and microstructure development of hybrid alkali activated cements (HAACs) at room temperature[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 123: 104200.
- [54] GARCIA-LODEIRO I, FERNANDEZ-JIMENEZ A, PALOMO A. Hydration kinetics in hybrid binders: Early reaction stages[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 39: 82-92.
- [55] ANGULO-RAMÍREZ D E, DE GUTIÉRREZ R M, PUERTAS F. Alkali-activated Portland blast-furnace slag cement: Mechanical properties and hydration[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 140: 119-128.
- [56] MAHMOOD A H, BABAEE M, FOSTER S J, et al. Capturing the early-age physicochemical transformations of alkali-activated fly ash and slag using ultrasonic pulse velocity technique[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 130: 104529.
- [57] SUN Z, VOLLPRACHT A. Isothermal calorimetry and in-situ XRD study of the NaOH activated fly ash, metakaolin and slag[J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 103: 110-122.
- [58] ABDALQADER A F, JIN F, AL-TABBAA A. Development of

- greener alkali-activated cement: Utilisation of sodium carbonate for activating slag and fly ash mixtures[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 113: 66-75.
- [59] ŽEMLIČKA M A T Ů Š, KUZIELOVÁ E, KULIFFAYOVA M, et al. Study of hydration products in the model systems metakaolin-lime and metakaolin-lime-gypsum[J]. *Ceram Silik*, 2015, 59(4): 283-291.
- [60] 马宏强, 易成, 陈宏宇, 等. 碱激发煤矸石-矿渣胶凝材料的性能和胶结机理 [J]. *材料研究学报*, 2018, 32(12): 898-904.
MA Hongqiang, YI Cheng, CHEN Hongyu, et al. Property and cementation mechanism of alkali-activated coal gangue-slag cementitious materials[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2018, 32(12): 898-904(in Chinese).
- [61] PYERTAS F, PALACIOS M, MANZANO H, et al. A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2011, 31: 2043.
- [62] CHEN W, LI B, WANG J, et al. Effects of alkali dosage and silicate modulus on autogenous shrinkage of alkali-activated slag cement paste[J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 141: 106322.
- [63] TAI Y S, EL-TAWIL S. Effect of component materials and mixing protocol on the short-term performance of generic ultra-high-performance concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 238: 117703.
- [64] 王川, 刘超, 裴文晶, 等. 活化煤矸石制备路基充填材料的探讨 [J]. *材料科学与工程学报*, 2022, 40(1): 97-103.
WANG Chuan, LIU Chao, PEI Wenjing, et al. Discussion on the preparation of roadbed filling material with activated coal gangue[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2022, 40(1): 97-103(in Chinese).
- [65] PUERTAS F, FERNANDEZ-JIMENEZ A. Mineralogical and microstructural characterisation of alkali-activated fly ash/slag pastes[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2003, 25(3): 287-292.
- [66] PACHECO-TORGAL F, CASTRO-GOMES J, JALALI S. Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products[J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(7): 1305-1314.
- [67] MA H, ZHU H, WU C, et al. Study on compressive strength and durability of alkali-activated coal gangue-slag concrete and its mechanism[J]. *Powder Technology*, 2020, 368: 112-124.
- [68] MA Y, YE G. The shrinkage of alkali activated fly ash[J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 68: 75-82.