

# 单组份碱活化矿渣基地聚物砂浆的力学性能和 微观表征:粉煤灰和水泥的协同效应

王明茹<sup>1</sup>,唐艳娟<sup>1,2\*</sup>,夏多田<sup>1,2</sup>

(1 石河子大学水利建筑工程学院,新疆 石河子 832003;

2 新疆兵团高烈度寒区建筑抗震节能技术工程实验室,新疆 石河子 832003)

**摘要:**为了制备出高性能的单组份碱活化矿渣基地聚物砂浆,探究粉煤灰和水泥在矿渣基地聚物砂浆中的协同效应,以及优化其力学性能和揭示其微观机理,在固体碳酸钠混合硅灰活化的矿渣基地聚物体系中,通过单掺和混掺粉煤灰和水泥设计了 16 个配合比进行力学性能测试,将最优的配合比结合微观手段分析其微观形貌和反应产物。结果表明:10%粉煤灰和 10%普通硅酸盐水泥的掺入可显著提升砂浆的力学性能,在 7 d 时其抗折强度和抗压强度分别达到了 5.92 和 44.01 MPa,相较于 100%矿渣制备的地聚物分别提高了 75.67%和 79.78%。微观结构分析发现,粉煤灰和水泥的协同作用显著增强了地聚合反应速率,而 C-(A)-S-H 与 N-A-S-H 凝胶间的桥接作用抑制了微裂纹的形成和扩展,使得基体结构高度致密。研究结果为矿渣体系凝胶材料在实际工程中的应用提供了理论依据。

**关键词:**单组份地质聚合物砂浆;高炉矿渣;协同作用;力学性能;微观结构

中图分类号:TU528

文献标志码:A

## Mechanical properties and microstructural characterization of one-part alkali-activated slag-based geopolymer mortars: Synergistic effects of fly ash and cement

WANG Mingru<sup>1</sup>,TANG Yanjuan<sup>1,2\*</sup>,XIA Duotian<sup>1,2</sup>

(1 College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China;

2 Xinjiang Production & Construction Groups Engineering Laboratory for Seismic and Energy-Saving Building in High Earthquake Intensity and Cold Zone, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

**Abstract:** To develop a high-performance one-part alkali-activated slag-based geopolymer mortar, the synergistic effects of fly ash and cement were investigated to optimize the mechanical properties and elucidate the underlying microstructural mechanisms. Within the slag-based geopolymer system activated by solid sodium carbonate combined with silica fume, sixteen mix proportions were designed—incorporating both single and combined additions of fly ash and cement—for mechanical performance testing. The optimal mixture was further analyzed using microstructural characterization techniques to examine its morphology and reaction products. Results demonstrated that the inclusion of 10% fly ash and 10% ordinary Portland cement significantly enhanced the mechanical performance of the mortar. At 7 days, the optimized formulation achieved a flexural strength of 5.92 MPa and a compressive strength of 44.01 MPa, representing improvements of 75.67% and 79.78%, respectively, compared to the reference 100% slag-based geopolymer. Microscopic structural analysis demonstrated that the synergistic interaction between fly ash and cement markedly accelerated the geopolymerization process. Moreover, the bridging effects between C-(A)-S-H and N-A-S-H gels effectively suppressed the initiation and propagation of microcracks, thereby contributing to a highly densified matrix structure. The findings of this study offer a solid theoretical foundation for the practical implementation of slag-based gel materials in engineering applications.

**Key words:** one-part geopolymer mortar;ground granulated blast-furnace slag;synergistic effect;mechanical properties;microstructure

收稿日期:2025-10-08

基金项目:新疆生产建设兵团科技计划项目(2025DA059)

作者简介:王明茹(1999—),女,硕士研究生,专业方向为土木水利,e-mail:riibhapy@163.com。

\*通信作者:唐艳娟(1977—),女,教授,从事绿色建筑方向的研究,e-mail:31018106@qq.com。

为了缓解水泥行业碳排放对环境产生的负担,开发水泥替代材料已成为建筑材料领域的研究热点。地质聚合物凭借其早期强度高、耐久性好等突出性能逐渐成为水泥材料的替代品之一<sup>[1]</sup>,这类材料通常由含硅铝酸盐的前驱体与碱性激发剂制备而成,其中粉煤灰(Fly Ash, FA)和高炉矿渣(Ground Granulated Blast-furnace Slag, GGBS)作为产量丰富的工业副产物,兼具资源利用率高与环境友好特性,已被广泛用于地质聚合物的制备中。

近年来,碱活化矿渣体系的力学性能与耐久性能已被广泛研究,其中,碳酸钠基活化剂因其成本低、危险系数低、操作简单等特性在单组份碱活化体系获得突出地位<sup>[2]</sup>。然而,由碳酸钠激发的矿渣基地聚物在养护前期存在早期强度低<sup>[3]</sup>、养护后期强度发展不足<sup>[3-4]</sup>、凝结时间较长和干燥收缩率较高等缺点<sup>[5-6]</sup>,这些问题限制了高炉矿渣基地聚物材料的应用范围。有研究表明,通过引入粉煤灰和水泥(Ordinary Portland Cement, OPC)等辅助胶凝材料可有效优化其基本性能<sup>[6-7]</sup>,其中:粉煤灰作为火力发电厂的燃煤工业副产品,富含 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 等火山灰活性组分,将其引入矿渣基地聚物中可有效调控前驱体材料中化学成分的比例。王永宝等<sup>[8]</sup>研究发现FA的掺入可有效抑制磨细高炉矿渣地质聚合物材料由干燥收缩引起的微裂纹扩展;Gopalakrishna和Pasla<sup>[9]</sup>研究表明将FA与GGBS复合使用可显著提高地聚物的耐久性能;黄华等<sup>[10]</sup>研究表明粉煤灰掺量对制备粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土具有调控作用,并指出在双组份体系中粉煤灰掺量为40%的力学性能表现更优异。

值得注意的是,粉煤灰中 $\text{Ca}^{2+}$ 含量显著低于高炉矿渣,过大的粉煤灰替代率将影响材料早期力学性能<sup>[11]</sup>,而水泥中富含的钙源对碱激发地质聚合物有缩短凝固时间和提高力学性能的作用<sup>[12-13]</sup>。另外,鞠成等<sup>[13]</sup>研究表明水泥的加入可缩短负温碱激发矿渣砂浆的凝结时间,并且碱性环境下水泥自身水化产物会进一步促进聚合反应的进行;Zhang等<sup>[14]</sup>研究发现掺入水泥可提高矿渣基地聚物胶凝材料的抗压强度,尤其在低温工况下掺入20%水泥对材料的抗压强度提升效果最为显著;Askarian等<sup>[15]</sup>研究揭示了水泥对地聚物的改良机理,证明了水泥的引入不仅显著降低微观结构的孔隙率、密实材料基体,更重要的是促进水泥自身水化产物与聚合反应产物相互交联,从而构筑更致密的复合

胶凝体系。但Amer等<sup>[16]</sup>研究发现过量水泥引入可能会影响材料的和易性,甚至会增大材料微裂缝生成的可能性。

综上所述,在矿渣基地聚物砂浆中引入粉煤灰和水泥有望改善材料的基本性能,在单组份碱活化矿渣基地聚物砂浆中加入粉煤灰和水泥对优化材料性能具有积极意义,而合理的掺量是实现性能提升的关键,因此,本研究创新性提出以固体碳酸钠粉末混合硅灰作为激发剂,以GGBS为主要材料,在标准养护条件下重点探讨FA和OPC掺量对高炉矿渣地质聚合物力学性能的影响规律,并借助X射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)和差示扫描热分析(TG-DSC)等表征手段,揭示单掺和混掺下地聚物砂浆的聚合反应机理和微观结构演变特征,旨在为工业固废的高效利用和低碳材料的开发提供理论支撑和依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 原料

本试验以GGBS、FA和OPC为前驱体材料,以天然河砂作为骨料。GGBS采购自新疆某公司,外观呈灰白色;而FA采购自石河子某火力发电厂,外观呈浅灰色;OPC使用的是P·O 42.5级,外观呈灰色。

激发剂采用固体粉末状激发剂体系,由工业级碳酸钠( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )与高活性硅灰(Silica fume, SF)组成,其中,碳酸钠采购自河南郑州某化工企业,纯度 $\geq 99.2\%$ 。

硅灰采购自河南郑州某材料公司,经XRF分析证实 $\text{SiO}_2$ 含量达96.3%。硅灰的中值粒径为 $1.41\ \mu\text{m}$ 、比表面积为 $5.70\ \text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 原料

使用激光粒度仪测定前驱体材料粒径分布曲线,并用XRF测定GGBS、FA和OPC的化学成分。

#### 1.2.2 砂浆

(1)配合比设计。

为探究FA和OPC单掺和混掺对单组份碱激发地质聚合物砂浆性能的调控机制,制备了16种不同组合的地质聚合物砂浆(表1)。在本试验中,所有的地聚物砂浆都使用相同的激发剂,依据前期预实验优化结果,设计固体碱激发剂与前驱体材料的质量比为30%,其中碳酸钠与硅灰的质量比为1:1;水胶比为0.45,河砂与前驱体材料总量比为2.75。

表 1 试验配合比

Table 1 Test mix proportions

单位:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 

编号	GGBS	OPC	FA	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	SF	水	河砂
G100F0P0	455.00	0	0	68.25	68.25	266.18	1 250
G90F10P0	409.50	0	45.50	68.25	68.25	266.18	1 250
G80F20P0	364.00	0	90.00	68.25	68.25	266.18	1 250
G70F30P0	318.50	0	136.50	68.25	68.25	266.18	1 250
G95F0P5	432.25	22.75	0	68.25	68.25	266.18	1 250
G90F0P10	409.50	45.50	0	68.25	68.25	266.18	1 250
G85F0P15	386.75	68.25	0	68.25	68.25	266.18	1 250
G85F10P5	386.75	22.75	45.50	68.25	68.25	266.18	1 250
G80F10P10	364.00	45.50	45.50	68.25	68.25	266.18	1 250
G75F10P15	341.25	68.25	45.50	68.25	68.25	266.18	1 250
G75F20P5	341.25	22.75	90.00	68.25	68.25	266.18	1 250
G70F20P10	318.50	45.50	90.00	68.25	68.25	266.18	1 250
G65F20P15	295.75	68.25	90.00	68.25	68.25	266.18	1 250
G65F30P5	295.75	22.75	136.50	68.25	68.25	266.18	1 250
G60F30P10	273.00	45.50	136.50	68.25	68.25	266.18	1 250
G55F30P15	250.25	68.25	136.50	68.25	68.25	266.18	1 250

## (2) 砂浆样品制备。

将称好的材料依次放入行星式水泥砂浆搅拌机,低速搅拌 2 min 后加水慢速搅拌 30 s,随后快速搅拌 2 min;搅拌均匀后将地聚物砂浆浇筑在  $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$  的三联试模中,放在振动台振动 60 s 去除残留气泡;然后将成品用塑料保鲜膜包裹,放置在标准恒温恒湿养护箱中固化。养护 24 h 后,将样品从模具中取出并标记。继续放入养护箱进行养护,养护至 3、7、28 和 56 d 后进行力学性能测试。

## (3) 力学性能测试方法。

按照 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法》进行力学性能测试。测试时支点间距为 100 mm,采用加载速度  $50 \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$ 。抗折强度结果取 3 次测试的平均值,然后取折断的棱柱体进行抗压强度测试,最终取 6 次测试的平均值作为抗压强度。在 28 d 抗压试验后取砂浆试样的中间部分,放入无水乙醇中浸泡 48 h 终止材料的水化反应,然后在烘箱  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下烘干 48 h。

取一部分样品磨成粉末,过 200 目筛子,进行 X 射线衍射分析和热重分析测试,确定反应产物的晶相以及结晶水和气体等物质的量。另取尺寸小于 5 mm 的薄片样品做喷金处理,对破碎的砂浆样品进行微观形貌的观测。

## 2 结果与分析

## 2.1 前驱体材料物理化学性能

前驱体材料粒径分布曲线(图 1)显示:GGBS、

FA 和 OPC 的中值粒径分别为  $9.59 \text{ } \mu\text{m}$ 、 $12.10 \text{ } \mu\text{m}$  和  $17.91 \text{ } \mu\text{m}$ ,比表面积分别为  $0.78 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $1.02 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  和  $0.66 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。

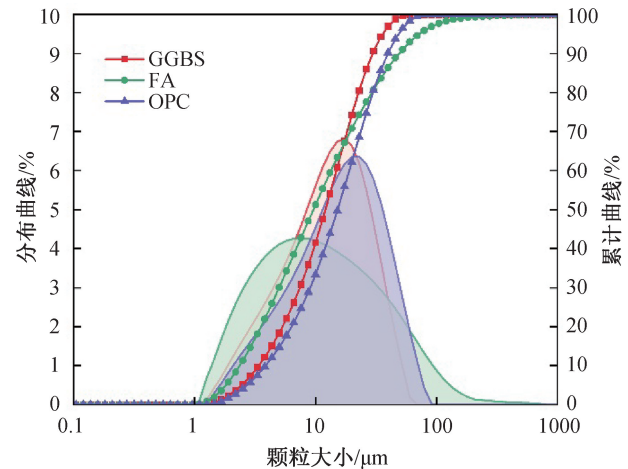


图 1 前驱体材料粒径分布

Figure 1 Particle size distribution of precursor materials

通过 XRF 测得 GGBS、FA 和 OPC 的化学成分见表 2;图 2 和图 3 分别为前驱体材料的 XRD 图谱和 SEM 图。

由图 2 可知:GGBS 在  $2\theta = 20 \sim 38^\circ$  存在大量无定形物质,FA 的主要结晶相为石英、赤铁矿、方解石、硬石膏和氧化镁等,OPC 的主要结晶相为  $\text{C}_3\text{S}$ 、 $\text{C}_2\text{S}$ 、 $\text{C}_4\text{AF}$ 、 $\text{C}_3\text{A}$  以及方解石。

由图 3a 可以看出:GGBS 的颗粒形态主要以棱角分明的块状、片状碎粒为主(图 3a);FA 可观察到主要以粒径大小不一的球形颗粒形式存在(图 3b);OPC 的颗粒表现为棱角分明、形状不规则的特征,

且多以絮凝体和块状形态分布,整体颗粒较为松散 (图 3c)。

表 2 前驱体材料的化学成分

Table 2 The chemical composition of precursor materials 单位: %

原材料	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	其他
GGBS	31.43	8.62	46.09	0.63	6.56	0.96	0.63	2.43	1.61	1.04
FA	45.94	17.14	13.29	10.21	3.73	3.32	2.46	1.52	1.03	1.36
OPC	18.76	3.89	64.78	4.41	1.51	0.81	0.76	3.53	0.31	1.24

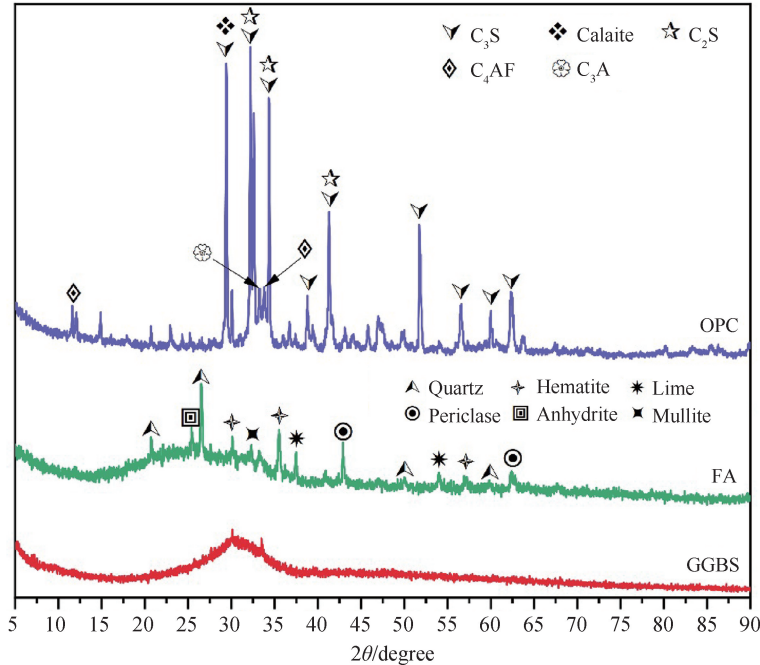


图 2 前驱体材料的 XRD

Figure 2 X-ray diffraction of the precursor material

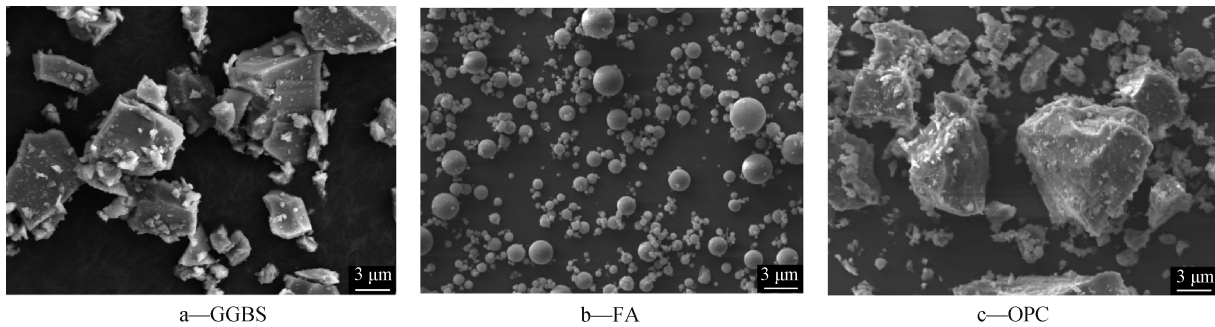


图 3 前驱体材料的微观形貌

Figure 3 Microscopic morphology of the precursor material

## 2.2 力学性能

### 2.2.1 粉煤灰掺量的影响

粉煤灰掺量对矿渣基地聚物砂浆抗折强度影响的结果(图 4)显示:G100F0P0 在 3、7、28、56 d 的抗折强度分别为 0.45、3.37、4.22、6.11 MPa,在龄期早期(3、7 d),粉煤灰的引入对试样的抗折强度产生负面影响,随着粉煤灰掺量增加至 10%、20%、30%,试样抗折强度分别降低至 3.16、0.37、0.33 MPa。但在养护后期(28、56 d),随着粉煤灰掺量增加至 10%、20%和 30%,试样抗折强度呈先增后减的趋势,

在粉煤灰掺量为 10%时抗折强度最高。G90F10P0 在 28、56 d 的抗折强度分别为 4.28、6.73 MPa,较 G100F0P0 分别提高了 1.42%、10.15%。而当粉煤灰掺量继续增大,抗折强度逐渐降低,甚至 G70F30P0 的抗折强度低于 G100F0P0。由以上结果可知:在矿渣基地聚物砂浆中掺入 10%粉煤灰可显著增强试样养护后期的抗折强度;这主要归因于粉煤灰的持续火山灰反应对材料微观结构的优化作用<sup>[17]</sup>。

粉煤灰掺量对矿渣基地聚物砂浆抗压强度影响的结果(图 5)显示:G100F0P0 在 3、7、28、56 d 养护

龄期时的抗压强度分别为 1.29、24.48、54.59、56.16 MPa,随着粉煤灰掺量的增加,试样的抗压强度呈现先增后减的趋势,在加入 10%粉煤灰时达到最高,G90F10P0 在 3、7、28、56 d 的抗压强度分别为 1.08、12.42、54.74、57.70 MPa;这可能是由于粉煤灰的加入减缓了硬化速率,导致早期抗压强度降低<sup>[18]</sup>,随着聚合反应的进行,粉煤灰的硅铝玻璃体逐渐被碱活化,养护后期力学性能出现提升<sup>[10]</sup>。

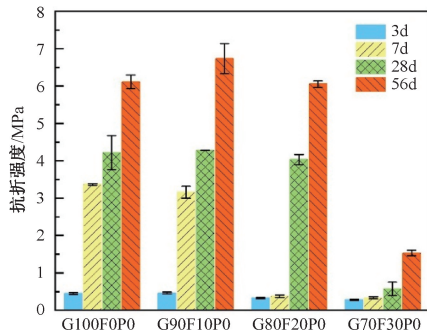


图 4 粉煤灰掺量对砂浆抗折强度的影响

Figure 4 The influence of fly ash content on the flexural strength of mortar

当加入 20%、30%粉煤灰时,抗压强度显著下降,G80F20P0、F70F30P0 在 28 d 的抗压强度分别为 44.87、1.95 MPa;其原因是,一方面粉煤灰的高替代率降低了碱活化体系中的  $Ca^{2+}$  含量,导致生成较少的 C-(A)-S-H 凝胶;另一方面碳酸钠对粉煤灰的激发效果可能相对较差<sup>[19]</sup>。

综上所述:掺入 10%粉煤灰对力学性能的提高较为显著。

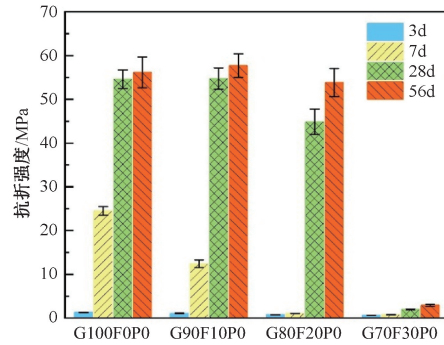


图 5 粉煤灰掺量对砂浆抗压强度的影响

Figure 5 The influence of fly ash content on the compressive strength of mortar

### 2.2.2 水泥掺量的影响

水泥掺量对矿渣基地聚物砂浆抗折强度影响的结果(图 6)显示:当前驱体材料中水泥含量从 0%增至 15%时,试样在 3、7、28、56 d 的抗折强度均呈现先增后减的趋势。其中 G90F0P10 展现出最佳的力学性能,在 3、7、28、56 d 抗折强度分别达到 4.62、5.40、6.95、7.30 MPa,较对照组 G100F0P0 分别提升了 926.67%、60.24%、64.69%、19.48%。值得注意的是,在养护 3 d 时,水泥的加入对抗折强度的增强效果尤为显著,这是因为水泥的引入增加了碱活化体系中  $Ca^{2+}$  含量,提高了其聚合程度<sup>[20]</sup>,形成大量的 C-S-H 凝胶和 C-A-S-H 凝胶。然而,当水泥掺量超过 10% 时,试样的抗折强度降低,试样 G85F0P15 在 3、7、28、56 d 抗折强度较 G90F0P10

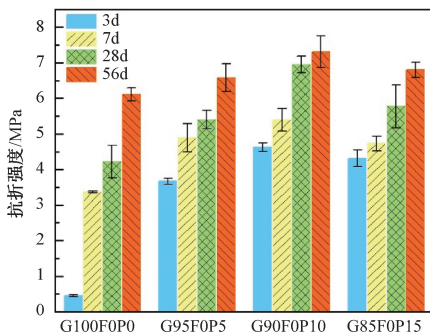


图 6 水泥掺量对砂浆抗折强度的影响

Figure 6 The influence of cement content on the flexural strength of mortar

分别下降了 6.49%、12.41%、16.83%、6.85%;这一强度逐渐降低的现象可能与过量水泥引入导致,该现象与 Askarian 等<sup>[15]</sup>的研究结果一致。

水泥掺量对矿渣基地聚物砂浆抗压强度影响的结果(图 7)显示:水泥掺量对抗压强度的影响呈现先增后减的趋势,G90F0P10 的抗压强度最佳,其 3、7、28、56 d 抗压强度分别达到了 38.42、43.58、56.84、62.46 MPa,较 G100F0P0 分别提高了 2878.29%、78.02%、4.11%、11.22%。水泥掺量对材料早期(3、7 d)的抗压强度具有显著的增强效果,在养护龄期为 3 d 时,基准试样 G100F0P0 的抗压强度仅为 1.29 MPa,随着水泥掺量增加至 5%、10%、15%,试样抗压强度分别提升至 22.68、38.42、33.87 MPa,这是钙源的加入带来的正向影响<sup>[12]</sup>,水

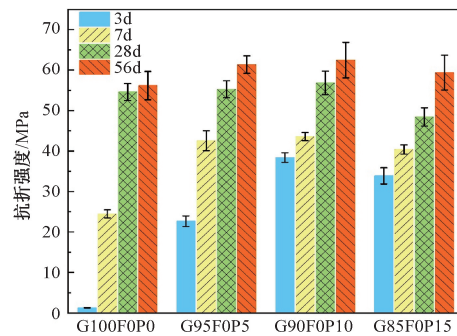


图 7 水泥掺量对砂浆抗压强度的影响

Figure 7 The influence of cement content on the compressive strength of mortar

泥的引入促进了反应体系中 C-(A)-S-H 凝胶的生成,进而与 N-A-S-H 凝胶协同作用提高了试样的抗压强度<sup>[15,20]</sup>,但过高的水泥掺量可能会由于水泥自身剧烈的水化反应抑制地聚物反应进程<sup>[15]</sup>。

由以上结果可知:10%水泥的引入可显著提高矿渣基聚物砂浆的抗压强度。

### 2.2.3 粉煤灰和水泥协同作用的影响

粉煤灰和水泥混掺对矿渣基聚物砂浆抗折强度影响的结果(图8)显示:在不同的养护龄期下,水泥和粉煤灰的加入对地聚物砂浆抗折强度产生了积极影响。其中,试样 G80F10P10 的抗折强度最高,在 3、7、28、56 d 的抗折强度分别达到了 4.86、5.92、7.36、7.65 MPa,较对照组 G100F0P0 在 3、7、28、56 d 分别提高了 980.00%、75.67%、74.41%、25.20%;较 G90F10P0、G90F0P10 在 28 d 分别提高了 71.96%、5.90%。混掺粉煤灰和水泥对材料抗折强度的增强可能归因于前驱体材料中化学成分比例的改变,其中的粉煤灰为材料提供了大量硅源,而水泥提供了钙源<sup>[20]</sup>,这些化学成分含量的改变促进了聚合反应,并且粉煤灰因

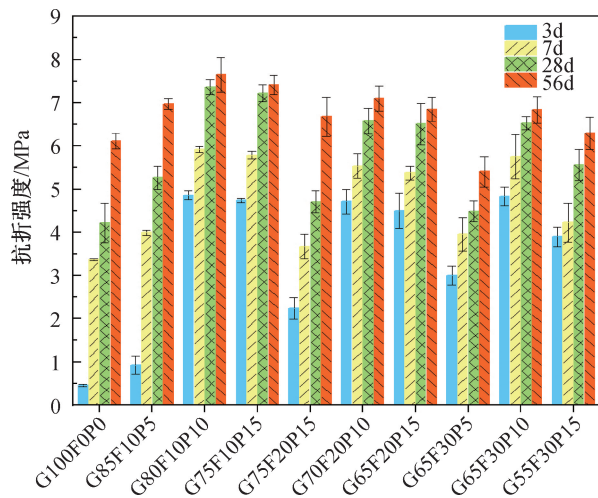


图8 粉煤灰和水泥协同作用对抗折强度的影响

Figure 8 The influence of the combined effect of fly ash and cement on flexural strength

## 2.3 微观分析

### 2.3.1 X射线衍射分析

矿渣基聚物砂浆在养护 28 d 后的 XRD 测试结果(图 10)显示:砂浆主要呈现结晶相和非结晶相,其中结晶相主要为石英( $\text{SiO}_2$ )和方解石( $\text{CaCO}_3$ )。试样 G100F0P0 中,在  $2\theta = 26.82^\circ$  处石英的衍射峰强度最高,其强度来源于前驱体材料中的部分结晶相,并且还可能存在钙长石、钠长石以及方解石的衍射峰。单掺粉煤灰时,石英的衍射峰强度增强,这

其自身的火山灰性质,可以在矿渣基聚物砂浆中密实材料微观结构,达到增强其后期抗折强度的效果<sup>[17]</sup>。

粉煤灰和水泥混掺对矿渣基聚物砂浆抗压强度影响的结果(图9)显示:协同作用对抗压强度的影响规律和抗折强度的规律基本一致。G80F10P10 的抗压强度在各个龄期达到最佳,3、7、28、56 d 的抗压强度分别达到了 35.62、44.01、59.34、65.07 MPa,较对照组 G100F0P0 分别提高了 2 661.24%、79.78%、8.70%、15.87%。G80F10P10 相对于 G90F10P0 在 3、7 d 的抗压强度分别提高了 3 198.15%、254.35%。G80F10P10 相对于 G90F0P10 在 28、56 d 的抗压强度分别提高了 4.40%、4.18%。硅源和钙源的加入对砂浆前期和后期的强度发展具有重要作用,粉煤灰的加入可进一步密实材料的微观结构,并且水泥中的钙源还将进一步促进前驱体材料溶解,形成大量的 C-(A)-S-H 凝胶<sup>[20]</sup>,达到强化材料的力学性能的效果,综上所述可知混掺 10%粉煤灰和%水泥可显著提高矿渣基聚物砂浆的力学性能。

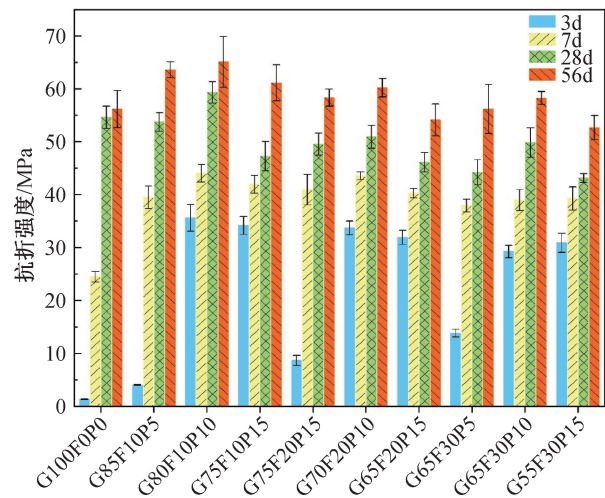


图9 粉煤灰和水泥协同作用对抗压强度的影响

Figure 9 The influence of the combined effect of fly ash and cement on compressive strength

可归因于粉煤灰自身所含的  $\text{SiO}_2$  对衍射峰强度产生的影响;单掺粉煤灰和单掺水泥试样中,钙长石、钠长石和方解石的衍射峰强度相较 G100F0P0 均有所下降,这可能是方解石和钙长石中的可溶性  $\text{Ca}^{2+}$ 、钠长石中的可溶性  $\text{Na}^+$  参与了聚合反应,导致其结晶程度降低。而在混掺粉煤灰和水泥的样品 G80F10P10 中,石英的衍射峰强度变化最为显著;该样品中钙长石、钠长石和方解石的衍射峰强度均有所下降,但钙长石和钠长石的衍射峰强度仍高于

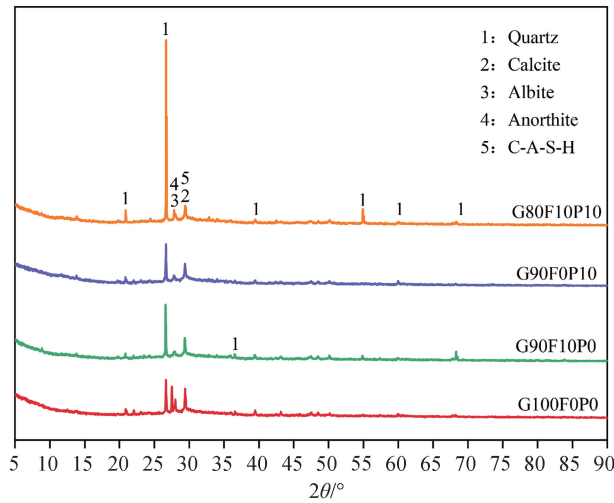


图 10 矿渣基地聚物砂浆的 XRD  
Figure 10 XRD patterns of slag-based polymer mortar

单掺的试样,这可能是因为粉煤灰为基体提供了丰富的硅源,水泥为基体提供了丰富的钙源,两者的协同作用有利于促进 N-A-S-H 凝胶和 C-(A)-S-H 凝胶间的相互作用<sup>[15,20]</sup>。

由上述衍射峰强度的变化规律可知,粉煤灰与水泥的掺入可通过调控反应产物的物相组成影响材料力学性能的发展进程,这与力学性能测试的结果一致。

2.3.2 SEM 分析

G100F0P0、G90F10P0、G90F0P10 和 G80F10P10 在养护 28 d 后的微观形貌(图 11)显示:在 G100F0P0 中存在较为致密的结构,但可观察到较多的微裂缝,大部分高炉矿渣颗粒完全溶解,仅有少部分未被完全溶解(图 11a),而已溶解的高炉矿渣处生成的凝胶主要呈现出较为松散的柱状相

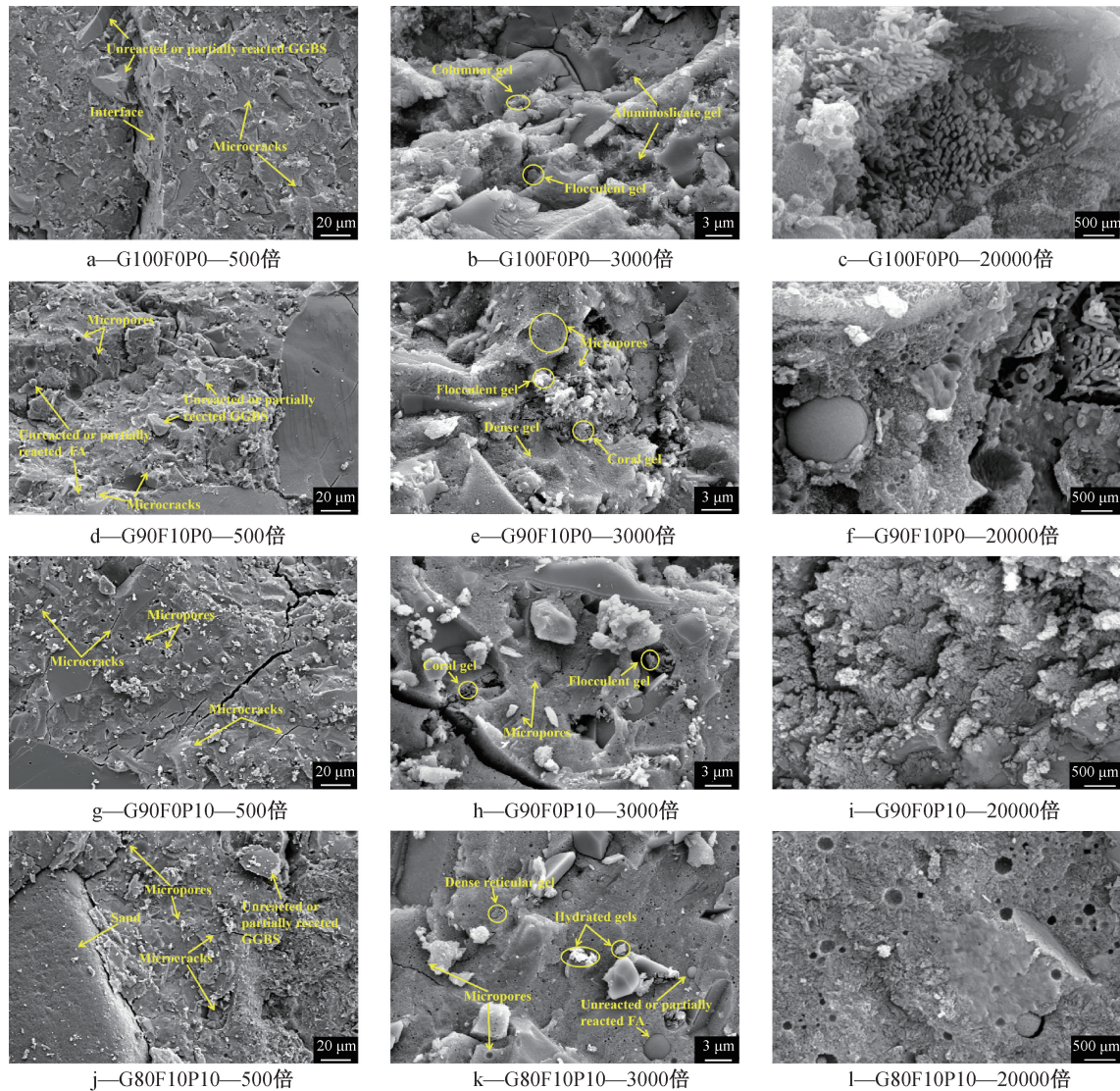
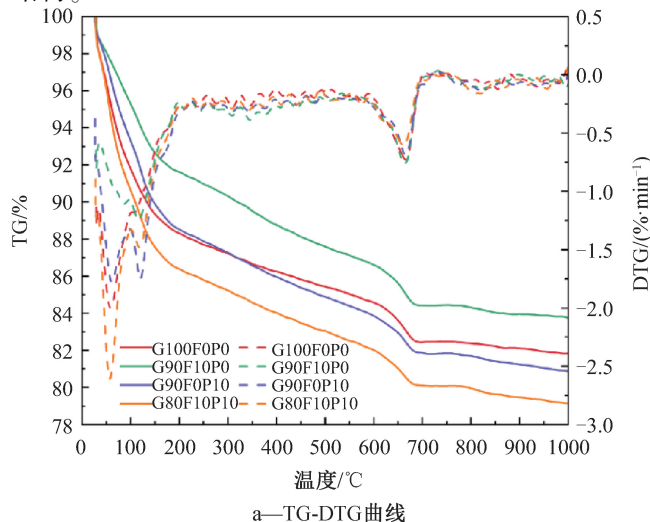


图 11 不同粉煤灰和水泥掺量下的微观形貌

Figure 11 Microscopic morphologies under different proportions of fly ash and cement

(图 11c)。G90F10P0 的裂缝数量比 G100F0P0 的少,粉煤灰的引入致使材料基体更为密实,但存在部分粉煤灰未完全参与聚合反应(图 11d),生成产物主要呈现较为松散的柱状相和絮状相结合(图 11f),表明 G90F10P0 的凝胶产物比 G100F0P0 的更为丰富。相较于 G100F0P0,G90F0P10 表现出更致密的微观结构,未反应的高炉矿渣量明显减少(图 11g),这可能是水泥的加入促进了高炉矿渣在碱性环境的溶解<sup>[15]</sup>,但水泥的引入会增加水化热,导致基体产生更宽、更多的微裂纹<sup>[16]</sup>。G90F10P0 中生成的凝胶产物主要表现为松散的柱状相结构(图 11i),这可能与加入水泥后生成的钙基化合物有关,该化合物可以有效地填充基质中的孔隙,形成更致密、更少孔隙的凝胶结构<sup>[15]</sup>,达到提高材料的力学性能的效果,这与力学性能分析一致。而 G80F10P10 的微观结构更为致密,相对 G100F0P0、G90F10P0 和 G90F0P10 的微裂纹数量明显减少(图 11j),并且形成了紧凑的凝胶结构(图 11l),这是混掺粉煤灰和水泥带来的积极影响,也是其力学性能优于 G100F0P0、G90F10P0 和 G90F0P10 的主要原因。

综上所述,在 10%水泥和 10%粉煤灰的协同作用下矿渣基地聚物砂浆表现出更为致密的微观结构。



### 2.3.3 TG-DSC 分析

图 12 是粉煤灰和水泥在单掺和混掺情况下碱活化高炉矿渣基地聚物砂浆 TG-DTG 曲线和 TG-DSC 曲线,表 3 是 4 个试样在各温度梯度下的质量损失率。100 °C 附近的失重现象主要由材料内部自由水分子及凝胶表面弱吸附水分的挥发作用引起<sup>[21]</sup>。当温度升至 100~800 °C 区间时,C-(A)-S-H 与 N-A-S-H 凝胶结合水的蒸发和地聚合物凝胶中的羟基断裂释放是失重的主要原因<sup>[22]</sup>。由 DSC 曲线可观察到在 30~200 °C 时 4 个试样均有 1 个小的吸热峰,这可能是基质中的自由水损失造成的;在 650 °C 附近的小吸热峰可能是方解石分解引起的<sup>[23]</sup>。在 100 °C 以下时,G100F0P0、G90F0P10、G90F10P0、G80F10P10 的质量损失率分别为 8.21%、4.71%、6.70%、9.38% (表 3),这主要是由自由水的蒸发引起的。在 100~800 °C 范围内,对照组、G90F0P10、G90F10P0 的质量损失率分别达到了 8.21%、4.71%、6.70%,这与单掺粉煤灰或单掺水泥时体系中凝胶产物生成量的差异有关;而 G80F10P10 的质量损失率高达 9.38%,可能是由于粉煤灰和水泥的掺入促进了聚合反应的进程,生成了更多的凝胶产物<sup>[24]</sup>。

由上述结果及分析可知:较多的凝胶产物有利于砂浆力学性能的提升,这与力学性能测试、XRD 和 SEM 的分析结果一致。

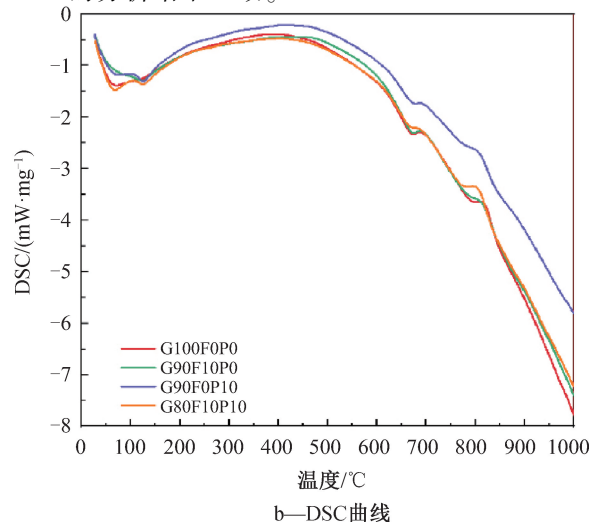


图 12 热重分析曲线

Figure 12 Thermogravimetric analysis curve

表 3 不同温度下试样的质量损失率

Table 3 Mass loss rate of samples at

different temperatures

单位: %

温度/°C	G100F0P0	G90F10P0	G90F0P10	G80F10P10
35~100	8.21	4.71	6.70	9.38
100~800	9.42	10.98	11.61	10.66
35~800	17.63	15.69	18.31	20.04

## 3 结论

本文研究粉煤灰和水泥掺量对单组份矿渣基地聚物砂浆力学性能的影响,并结合微观检测分析得到以下结论:

(1) 采用固体碳酸钠与硅灰相结合的活化方

式,为单组份碱激发矿渣基体聚物体系的开发提供了一种重要的技术创新。由此制备的矿渣地聚物砂浆(G100F0P0)在 7、28 d 的抗折强度分别达到了 3.37、4.22 MPa,相应龄期的抗压强度分别达到了 24.48、54.59 MPa。这种方法提供了一种经济且环保的制备方案,有助于实际工程应用。

(2)单掺粉煤灰时,当粉煤灰掺量为 10% 的抗折强度、抗压强度在 28 d 达到峰值,分别为 4.28、54.74 MPa,此时的微观结构更为密实;单掺水泥时,水泥掺量为 10% 的力学性能最佳,在养护前期的力学性能提升尤为突出,在 3 d 的抗折强度、抗压强度分别达到了 4.62、38.42 MPa,水泥自身的水化反应生成的凝胶与聚合反应生成的凝胶共同作用出更为致密的凝胶产物,从而进一步提升砂浆的力学性能。

(3)混掺粉煤灰和水泥时,粉煤灰和水泥掺量均为 10% 的试样在不同养护龄期均具有最佳的力学性能,与 G100F0P0 相比,养护龄期为 3、7 d 时的改善效果尤为显著,3 d 的抗折强度、抗压强度分别提升了 980.00%、2 661.24%;7 d 时抗折强度、抗压强度分别提高了 75.67%、79.78%。微观分析表明,适量的粉煤灰和水泥的引入可促进聚合反应进程,体系中会生成更多的 C-(A)-S-H 凝胶和 N-A-S-H 凝胶;其机制是二者的协同作用有效抑制了基体内部孔隙和微裂纹的生成与扩展,使材料的微观结构更为致密。

### 参考文献(References)

- [ 1 ] 赵云,毕继红,刘晓敏,等. 原材料和氧化物成分对地聚物砂浆性能的影响[J]. 混凝土, 2024(5): 126-129, 141.  
ZHAO Y, BI J H, LIU X M, et al. Influence of raw materials and oxide composition on the properties of geopolymer mortar[J]. Concrete, 2024(5): 126-129, 141.
- [ 2 ] KANG X, TIAN Z, CHOI C E, et al. Reaction mechanisms of one-part and two-part slag-based binders activated by sodium carbonate and lime[J]. Cement and Concrete Composites, 2025, 159: 105992.
- [ 3 ] 袁晓辉,石艳羽,芦峰,等. 激发剂种类对碱矿渣胶凝材料性能的影响研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2021, 34(4): 667-672.  
YUAN X H, SHI Y Y, LU F, et al. Studies on the influence of the properties of alkali-activated slag cementitious materials with different activator types[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2021, 34(4): 667-672.
- [ 4 ] 杨锦湖,林添琦,张检梅,等. 氧化钙-碳酸钠复合激发矿渣砂浆的自收缩机制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(2): 86-94.  
YANG J H, LIN T Q, ZHANG J M, et al. Mechanism of autogenous shrinkage of hybrid calcium oxide and sodium carbonate-activated slag mortars[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(2): 86-94.
- [ 5 ] 崔潮,邵文玉,孙小惠,等. 碱-矿渣-偏高岭土基体聚物干燥收缩研究[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(6): 94-100.  
CUI C, TAI W Y, SUN X H, et al. Study on the drying shrinkage of alkali-slag-metakaolin based geopolymer[J]. New Building Materials, 2024, 51(6): 94-100.
- [ 6 ] 刘扬,陈湘,王柏文,等. 碱激发粉煤灰-矿渣-电石渣基体聚物的制备及强度机理[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(4): 1353-1362.  
LIU Y, CHEN X, WANG B W, et al. Preparation and strength mechanism of alkali-activated fly ash-slag-carbide slag based geopolymer[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(4): 1353-1362.
- [ 7 ] HUMAD A M, KOTHARI A, PROVIS J L, et al. The effect of blast furnace slag/fly ash ratio on setting, strength, and shrinkage of alkali-activated pastes and concretes[J]. Frontiers in Materials, 2019, 6:9.
- [ 8 ] 王永宝,张翊,史晨曦,等. 材料组分对矿渣、粉煤灰和赤泥基体聚物收缩影响试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2022, 53(5): 955-962.  
WANG Y B, ZHANG X, SHI C X, et al. Experimental study on the effect of material components on the shrinkage of slag, fly ash, and red mud based geopolymer[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2022, 53(5): 955-962.
- [ 9 ] GOPALAKRISHNA B, PASLA D. Durability performance of recycled aggregate geopolymer concrete incorporating fly ash and ground granulated blast furnace slag[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2024, 36(4): 04024037.
- [ 10 ] 黄华,郭梦雪,张伟,等. 粉煤灰-矿渣基体聚物混凝土力学性能与微观结构[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(3): 74-84.  
HUANG H, GUO M X, ZHANG W, et al. Mechanical property and microstructure of geopolymer concrete based on fly ash and slag[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(3): 74-84.
- [ 11 ] SZCZEŚNIAK A, ZYCHOWICZ J, STOLARSKI A. Influence of fly ash additive on the properties of concrete with slag cement[J]. Materials, 2020, 13(15): 3265.
- [ 12 ] 陈迎晓,彭小芹,王淑萍,等. 水泥熟料对偏高岭土

- 基地聚合物凝结硬化性能的影响[J]. 混凝土, 2019(5): 81-84.
- CHEN Y X, PENG X Q, WANG S P, et al. Influence of clinker on the setting and hardening properties of metakaolin based geopolymer[J]. Concrete, 2019(5): 81-84.
- [13] 鞠成, 汪雨萱, 孙鹏飞, 等. 普通硅酸盐水泥对负温碱激发矿渣砂浆力学性能的影响[J]. 混凝土, 2024(6): 198-201, 214.
- JU C, WANG Y X, SUN P F, et al. Effect of OPC on mechanical properties of alkali-activated slag mortar at negative temperature[J]. Concrete, 2024(6): 198-201, 214.
- [14] ZHANG G, YANG H, JU C, et al. Novel selection of environment-friendly cementitious materials for winter construction: alkali-activated slag/portland cement[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 258: 120592.
- [15] ASKARIAN M, TAO Z, ADAM G, et al. Mechanical properties of ambient cured one-part hybrid OPC-geopolymer concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 186: 330-337.
- [16] AMER I, KOHAIL M, EL-FEKY M S, et al. Characterization of alkali-activated hybrid slag/cement concrete[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2021, 12(1): 135-144.
- [17] ZHU H, LIANG G, XU J, et al. Surface-modification of fly ash and its effect on strength and freezing resistance of slag based geopolymer[J]. Construction and Building Materials, 2019, 199: 574-580.
- [18] 赵英良, 邢军, 孙晓刚, 等. 粉煤灰对碱激发高炉矿渣性能的影响[J]. 金属矿山, 2017(3): 188-191.
- ZHAO Y L, XING J, SUN X G, et al. Research on influence of fly ash on properties of alkali activated blast furnace slag[J]. Metal Mine, 2017(3): 188-191.
- [19] 窦占双, 李晓民, 秦宏涛, 等. 化学激发大掺量粉煤灰复合胶凝材料力学性能与水化机理研究[J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(1): 243-252.
- DOU Z S, LI X M, QIN H T, et al. Mechanical properties and hydration mechanism of chemically activated high content fly ash composite cementitious materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2025, 44(1): 243-252.
- [20] HUO W, ZHU Z, ZHANG J, et al. Utilization of OPC and FA to enhance reclaimed lime-fly ash macadam based geopolymers cured at ambient temperature[J]. Construction and Building Materials, 2021, 303: 124378.
- [21] 何培刚, 杨治华, 段小明, 等. 铝硅酸盐无机聚合物转化法制备先进陶瓷材料研究进展[J]. 科学通报, 2015, 60(3): 226-235.
- HE P G, YANG Z H, DUAN X M, et al. Progress on the formation of ceramics and ceramic-based composites through geopolymer precursors[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(3): 226-235.
- [22] 杨旭清, 王辉, 高尚, 等. 高温作用对粉煤灰-矿渣基多孔地聚合物性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(2): 561-568.
- YANG X Q, WANG H, GAO S, et al. Effect of high temperature on properties of fly ash-slag based porous geopolymer[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2025, 44(2): 561-568.
- [23] NATH S K, KUMAR S. Role of particle fineness on engineering properties and microstructure of fly ash derived geopolymer[J]. Construction and Building Materials, 2020, 233: 117294.
- [24] QI W, DUAN G, HAN Y, et al. Comparison of mechanical properties and microstructure of GGBS-based cementitious materials activated by different combined alkaline wastes[J]. Construction and Building Materials, 2024, 422: 135784.

(责任编辑:张忠)