

粉煤灰 - 矿渣基地聚物砂浆试验制备及力学性能研究

李庆轩

(武汉城市职业学院, 武汉 430064)

摘要: 为探究工业固废制备地聚物砂浆的良好工艺及力学特性, 研究以粉煤灰、矿渣等工业固废为原料, 通过正交试验设计法优化地聚物胶凝材料配比。主要探究矿渣掺量、碱激发剂含量、水玻璃模数等参数对材料性能的影响。结果表明: 当矿渣占胶凝材料总量 70%、碱含量 8%、水玻璃模数 1.4 时, 所制地聚物砂浆力学性能最优。其 7 d 抗压、抗折强度分别达 44.4、6.1 MPa, 28 d 抗压、抗折强度则提升至 68.9、9.8 MPa, 表现出显著的后期强度发展特性。表明通过科学配比设计可实现工业固废的高效利用, 所制备的粉煤灰 - 矿渣基地聚物砂浆具有优异的力学性能, 其抗压强度指标较传统水泥基材料提升约 30%~40%。该成果为工业固废资源化利用及绿色建材开发提供了技术支撑, 对降低水泥行业碳排放具有重要实践价值。

关键词: 工业固废; 地聚物砂浆; 正交试验; 力学性能

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 01-0058-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.01.011

Study on Preparation and Mechanical Properties of Fly Ash and Slag - Based Polymer Mortar

LI Qingxuan

(Wuhan City Polytechnic, Hubei Wuhan 430064, China)

Abstract: In order to explore the good process and mechanical properties of geopolymer mortar prepared by industrial solid waste, the ratio of geopolymer cementitious materials was optimized by orthogonal test design method with industrial solid waste such as fly ash and slag as raw materials. The effects of slag content, alkali activator content, water glass modulus and other parameters on the properties of materials were mainly explored. The results show that when the slag accounts for 70% of the total amount of cementitious materials, the alkali content is 8%, and the water glass modulus is 1.4, the mechanical properties of the geopolymer mortar are the best. The 7 d compressive strength and flexural strength were 44.4 MPa and 6.1 MPa, respectively, and the 28 d compressive strength and flexural strength were increased to 68.9 MPa and 9.8 MPa, showing significant late strength development characteristics. Studies have shown that the efficient utilization of industrial solid waste can be achieved through scientific ratio design. The prepared fly ash - slag based geopolymer mortar has excellent mechanical properties, and its compressive strength index is about 30%~40% higher than that of traditional cement - based materials. The results provide technical support for the utilization of industrial solid waste and the development of green building materials, and have important practical value for reducing carbon emissions in the cement industry.

Key words: industrial solid waste; geopolymer mortar; orthogonal test; mechanical property

项目来源: 2025 年度武汉城市职业学院校级骨干教师专项课题“绿色低碳煤矸石细集料工业固废基地聚物混凝土的制备及装配式构件性能研究”(2025WHCPG07)。

作者简介: 李庆轩 (1992—), 男, 硕士, 助教, 研究方向: 固废再利用低碳混凝土材料。

收稿日期: 2025-01-07

0 引言

地聚物是一种具有可持续性和经济性的新型黏结材料，它是工业固废如矿渣、粉煤灰等含铝硅酸盐的物质在碱激发剂的作用下产生的无机铝硅酸盐聚合物，可以 100% 替代混凝土中的水泥^[1]。地聚物具有低能耗、低碳排放、制备简便、抗压抗弯强度高、耐酸碱腐蚀、收缩膨胀率低、快干快硬化、耐久性优异等特点^[2]。

2024 年我国粉煤灰年产生量约 8.31 亿吨，累计历史堆存总量已超 31 亿吨，占地约 124 万亩，如果有效利用不足，排入水系，会对人体和生物造成危害^[3]。据统计^[4]，每生产 1 吨生铁，将排出矿渣 0.3~1 吨，我国钢铁厂年矿渣排放量高达 6 000 万吨以上。据资料显示^[5]，我国钢渣每年排放量超过 1 亿吨，但利用率很低，造成占用土地、环境污染与资源浪费的问题十分突出。所以，如何高质量利用工业固废显得尤为重要，国内外学者再利用固废材料采用不同的技术。

白建侠^[6]以粉煤灰、矿渣等工业固废为原材料，通过正交试验、单因素试验分别确定各掺量之间的变化规律、最佳配合比，结果表明 28 d 抗压强度、抗折强度分别达到 61.06、7.46 MPa；学者王笑阳^[7]以矿粉、粉煤灰和电石渣三种工业固废为原材料制备地聚物砂浆，根据直剪试验确定满足可打印性能要求的抗剪强度，结果表明地聚物 3D 打印砂浆力学性能较优，其黏聚力为 [2.25, 5.7] kPa；左泽明康^[8]通过多源固废协同利用制备高值化建筑材料，制备出干混抹灰砂浆具有强高的力学性能，其 28 d 抗压强度可达 12.3 MPa；Wang 等^[9]通过向硅酸盐混凝土中加入煤矸石骨料，发现降低孔隙率，提高混凝土密度，养护 28 d 煤矸石集料混凝土抗压强度最大为 36.8 MPa；杨国宝^[10]利用煤渣、粉煤灰、脱硫石膏等工业废弃物，研制节能绿色的新型砂浆材料，试验结果表明，新型建筑砂浆 28 d 抗压强度为 21.03~44.69 MPa，抗折强度为 [3.10, 4.29] MPa；李树峰等^[11]以粉煤灰、高炉矿粉、电石渣为原料制备地聚物干粉砂浆，通过测试砂浆的力学性能，得出最佳配合比；窦智等^[12]以矿渣、粉煤灰、沙漠砂为材料，采用正交试验研究各掺量对矿渣砂浆性能

的影响，试验数据表明砂浆抗压强度最高时达到 72.9 MPa；吕炎等^[13]利用硅灰、偏高岭土地聚物砂浆进行改性，通过正交试验研究力学性能，并确定最佳配合比；郑兆昱^[14]利用铅锌尾矿、高炉矿渣、钢渣工业废弃物制备地聚物，通过对地聚物砂浆力学性能进行试验研究，结果显示掺有铅锌尾矿和高炉矿渣的地聚物抗压强度为 47.2 MPa；管柏伦等^[15]以偏高岭土和粉煤灰为原料制备地聚物砂浆，通过测试地聚物砂浆试件常温、1 000 °C 高温后的抗压强度，结果表明试件历经 1 000 °C 高温后残余强度仍能维持 42% 及以上。然而，这些技术在工业固废粉煤灰、高炉矿渣的消耗、“双碳”战略的进行方面仍有不足之处。

目前，制约工业固废材料加入地聚物应用的办法仍是对其性能的深入研究，对粉煤灰、高炉矿渣等工业固废为基底的地聚物砂浆进行深入的抗压性能研究显得尤为重要。鉴于此，选择以矿渣占比、碱含量、水玻璃模数为因素，采用全自动水泥抗折抗压试验机研究粉煤灰 - 矿渣地聚物砂浆的力学性能，并得出粉煤灰 - 矿渣地聚物砂浆的优选配合比。

1 试验

1.1 原材料

粉煤灰 (FA): F 级，密度为 2 180 kg/m³；粒化高炉矿渣微粉 (GGBS): S95 级，密度为 2 850 kg/m³；碱激发剂：由液体水玻璃与片状氢氧化钠固体配制而成；氢氧化钠：密度为 2.13 g/cm³ (20 °C)，熔点为 318 °C；水玻璃：模数为 2.25，波美度 50 Be；细集料：机制砂，细度模数为 2.35，最大粒径为 2.36 mm。粉煤灰、粒化高炉矿渣的化学组成见表 1，粉煤灰、粒化高炉矿粉 X-衍射图谱分别如图 1 所示。

表 1 粉煤灰、高炉矿渣化学成分含量
Table 1 Chemical composition content of fly ash and blast furnace slag

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O
FA	49.65	36.10	4.56	5.12	0.89	0.32
GGBS	33.65	15.34	0.52	39.46	6.89	0.30

1.2 正交试验

采用正交试验的极差分析方法，以矿粉占胶凝材料（矿粉和粉煤灰）的质量比、碱含量、水玻璃模数为因素，每个因素有 3 个不同的水平，设置了

材料科学

L9 (3³) 正交试验, 因素水平见表 2。

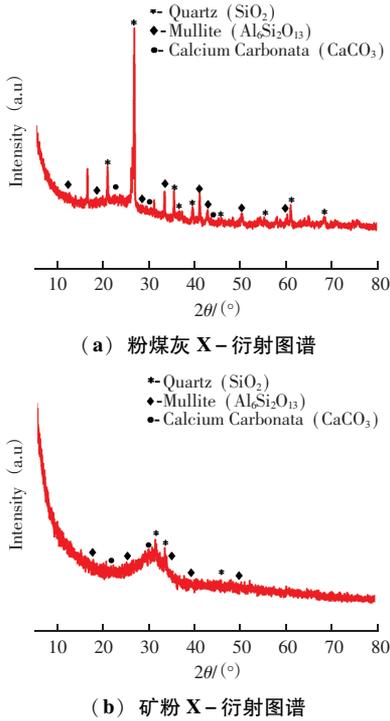


图 1 粉煤灰、矿粉 X-衍射图谱

Fig. 1 X-ray diffraction patterns of fly ash and blast furnace slag

表 2 正交试验设计

Table 2 Orthogonal experimental design

水平	因素		
	矿粉占比 (A)	碱含量/% (B)	水玻璃模数 (C)
1	0.5	7	1.2
2	0.6	8	1.4
3	0.7	9	1.6

1.3 砂浆拌合工艺

干拌粉煤灰和矿粉 90 s, 其中高速搅拌 30 s, 低速搅拌 30 s, 再高速搅拌 30 s, 为碱激发剂充分进行激发起到相应作用。接着倒入提前 24 h 配制好的碱激发剂搅拌 60 s, 其中高速、低速各搅拌 30 s。将砂子和 3/4 的水倒入搅拌锅中搅拌 90 s, 使混合浆体具有一定的流动性, 接着加入余下 1/4 水量再搅拌 60 s。

1.4 砂浆试件制备

先将地聚物砂浆倒入 40 mm × 40 mm × 160 mm 的三联模具的 1/2 处, 利用振动台振动 30 s 后再将剩下 1/2 地聚物砂浆倒入模具中, 接着振动 30 s。

1.5 测试方法

采用全自动水泥抗折抗压试验机测定抗压、抗折强度, 抗压强度值取一组六个棱柱体试件抗压强度平均值。

2 结果与讨论

2.1 试验结果分析

2.1.1 砂浆流动度的影响分析

由图 2 中可知, 随着矿粉占比的增加流动度从 143 mm 降至 127 mm, 矿粉含量对流动度影响较大。碱含量和水玻璃模数在三种不同的水平条件下, 对流动度影响较弱, 稳定在 133 ~ 137 mm。

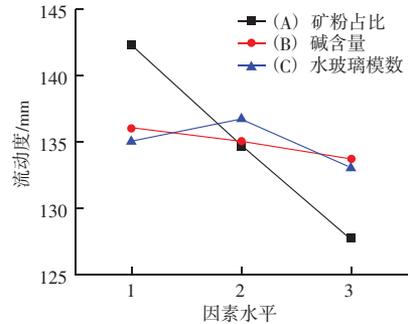
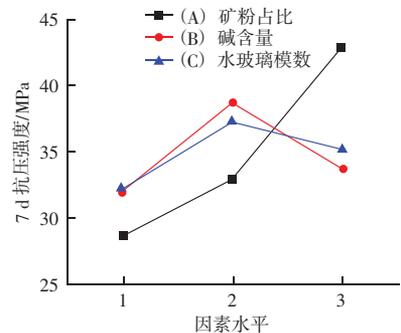


图 2 各因素水平对应流动度

Fig. 2 Liquidity corresponding to each factor level

2.1.2 抗压强度的影响分析

由图 3 (a) 中可以看出各因素水平对应 7 d 抗压强度情况, 即随着矿粉比例增加, 7 d 抗压强度从 28.1 MPa 升至 43.5 MPa, 矿粉含量对抗压强度影响显著。碱含量和水玻璃模数在三种不同的水平条件下, 7 d 抗压强度先增加后减少, 均在水平 2 时出现最大值, 即碱含量 8%, 水玻璃模数 1.2。在图 3 (b) 中可知各因素水平对应 28 d 抗压强度情况, 整体趋势与 (a) 大致相同。随着矿粉占比的增加 28 d 抗压强度从 43.3 MPa 升至 68.2 MPa, 矿粉含量对抗压强度影响显著。碱含量和水玻璃模数在三种不同的水平条件下, 28 d 抗压强度同样也是先增加后减少, 在碱含量 8%, 水玻璃模数 1.2 时 28 d 抗压强度分别为 56.2、57.8 MPa。



(a)

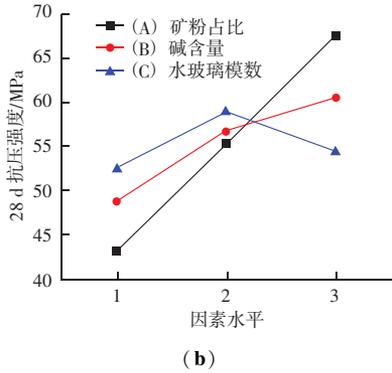
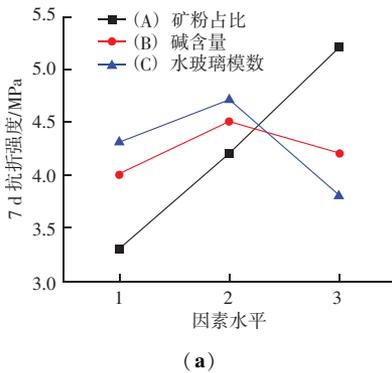


图3 各因素水平对应抗压强度

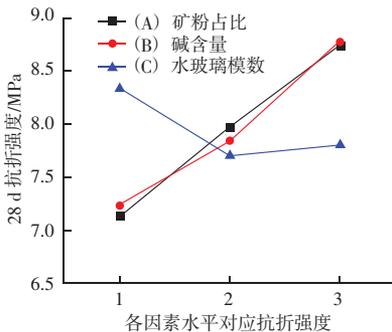
Fig. 3 Compressive strength corresponding to each factor level

2.1.3 抗折强度的影响分析

由图4(a)中可知,随着矿粉占比的增加7 d 抗折强度从3.3 MPa 升至5.2 MPa,矿粉含量对抗压强度存在明显影响。碱含量和水玻璃模数在三种不同的水平条件下,7 d 抗折强度先增加后减少,均在水平2时出现最大值,即碱含量8%,水玻璃模数1.4。由图4(b)中可知,矿粉占比在0.7时出现最大抗折强度,即8.7 MPa。但是碱含量和水玻璃模数趋势与7 d 抗折强度即碱含量为9%、水玻璃模数1.4时28 d 抗折强度分别为8.7、8.6 MPa。



(a)



(b)

图4 各因素水平对应抗折强度

Fig. 4 Corresponding flexural strength of each factor level

7 d 抗折强度与28 d 抗折强度相差较大,结合工程实际推荐 $A_3B_3C_1$, 即矿粉粉煤灰占比为0.7,碱含量为9%,水玻璃模数为1.2。

2.2 配合比优选

由图5~6可知,粉煤灰-矿渣基地聚物砂浆在7、28 d 的抗压强度与抗折强度发展规律存在一定差异。7、28 d 抗压强度均在矿粉占比0.7、碱含量8%、水玻璃模数1.2时达到最大值,分别为44.4、68.9 MPa;而抗折强度在7、28 d 时亦在此条件下最优。考虑到该地聚物砂浆主要拟用于地基基础、结构柱等以受压为主的工程结构,对抗压性能的要求显著高于抗折性能。因此,在配合比优选过程中,应以抗压强度为主要评价指标,同时兼顾施工可行性。综合比较各因素水平对抗压强度的影响及实际施工需求,推荐采用 $A_3C_2B_1$ 配合比组合,即:矿粉占胶凝材料总质量的70%、碱含量为8%、水玻璃模数为1.2。该配比不仅在7、28 d 均表现出最高的抗压强度,且具备良好的早期强度发展和施工性能,适用于对承载力要求较高的受压结构工程。

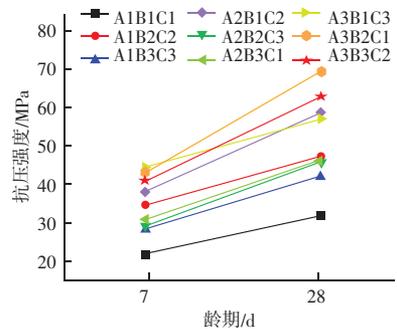


图5 7、28 d 各因素水平抗压情况

Fig. 5 Horizontal compressive strength of various factors at 7 d and 28 d

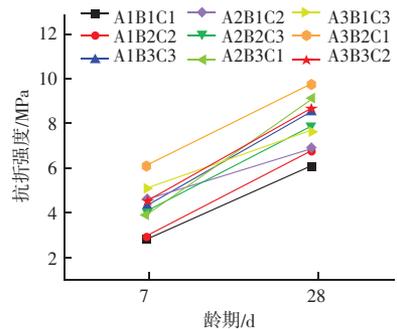


图6 7、28 d 各因素水平抗折情况

Fig. 6 Bending resistance of each factor level at 7 d and 28 d

材料科学

3 结论

通过工业固废为原料,采用正交试验设计法优化地聚物胶凝材料配比,探究矿渣掺量、碱激发剂含量、水玻璃模数等参数对材料性能影响的研究,得到以下结论:

(1) 合理拌合工艺采用三段式干拌,即粉煤灰与矿渣经高速 30 秒、低速 30 秒、高速 30 秒的组合干拌,促进碱激发剂作用。

(2) 采用正交试验设计法对矿渣-粉煤灰地聚物砂浆的流动度、抗压强度和抗折强度试验数据进行分析,3 种因素影响分别为矿渣与粉煤灰质量比 0.5、0.6 和 0.7,碱含量 7%、8% 和 9%,水玻璃模数 1.2、1.4 和 1.6,得出合理配合比组合为 A3C2B1,即矿粉在胶凝材料总量的占比 0.7、碱含量为 8%、水玻璃模数 1.2。

(3) 根据地聚物砂浆试件力学性能测试结果可知,砂浆抗压强度在 7 d 时最大为 44.4 MPa,7 d 抗折强度最大为 6.1 MPa,反映出地聚物砂浆具有早强性,随着养护时间的推移,抗压强度和抗折强度均有较大提升。砂浆抗压强度在 28 d 时最大为 68.9 MPa,28 d 抗折强度最大为 9.8 MPa。

参 考 文 献

[1] 韩延吉,刘建树,张永圣,等.电石渣-煤矸石粉稳定土在高速公路浸水路基中的应用[J].山东科技大学学报(自然科学版),2024,43(6):84-93.

- [2] 惠存,马泽亚,杨飞,等.不同配箍率钢筋地聚物混凝土梁受剪性能试验研究与分析[J].建筑结构,2025,55(3):41-46.
- [3] 孙红娟,曾丽,彭同江.粉煤灰高值化利用研究现状与进展[J].材料导报,2021,35(3):3010-3015.
- [4] 路鹏,曹奇光,赵秋利.固体废物资源化技术[M].北京:化学工业出版社:2022:225.
- [5] 王市均,周利,高雪岩,等.提升矿产资源保障能力分析与建议[J].冶金信息导刊,2024,61(1):60-62,45.
- [6] 白建侠.固废基地聚合物道路修补材料制备与性能优化研究[D].开封:河南大学,2024.
- [7] 王笑阳.工业固废地聚物 3D 打印砂浆的配制及性能研究[D].开封:河南大学,2024.
- [8] 左泽明康.钢铁工业多源固废协同利用制备建筑材料的研究[D].武汉:武汉科技大学,2024.
- [9] WANG Q, LI Z, ZHANY Y, Influence of coarse coal gangue aggregates on elastic modulus and drying shrinkage behaviour of concrete [J]. Journal Of Building Engineering. 2020, 32, 101748.
- [10] 杨国宝.工业固废制备建筑砂浆的基本力学性能研究[J].福建建筑,2022,(3):118-121,125.
- [11] 李树峰,邓凯,阎胜利,等.多元固废地聚物干粉砂浆制备与性能研究[J].建筑技术,2025,56(1):117-121.
- [12] 窦智,张萌,王泽平,等.沙漠砂地聚物砂浆的制备及性能研究[J].新型建筑材料,2024,51(7):54-59.
- [13] 吕炎,白二雷,王志航,等.低温制备硅灰-偏高岭土-矿渣基地聚物砂浆试验及微观研究[J].材料导报,2023,37(增刊2):218-226.
- [14] 郑兆昱.无机固废协同制备单组分地聚物砂浆和混凝土的基本性能研究[D].长沙:湖南大学,2023.
- [15] 管伯伦,郭荣鑫,齐荣庆,等.偏高岭土-粉煤灰基地聚物砂浆力学性能研究[J].硅酸盐通报,2021,40(4):1250-1257.