

高性能泡沫混凝土用改性粉煤灰的制备及性能评价

李秋香^{1,2,3}, 刘玉珍¹, 郑杰¹, 谢晖^{1,2}

- (1. 江西工业贸易职业技术学院, 南昌 330038;
2. 江西省教育厅粮油智能检测与加工运输装备重点实验室, 南昌 330038;
3. 南昌市汽车及装备工业视觉智能感知与检测重点实验室, 南昌 330038)

摘要: 为有效提高泡沫混凝土的防水和保温性能, 以二级粉煤灰 CFA 为原料, 使用疏水改性剂 GSK 和分散剂 FST 对其进行改性处理, 制备出一种改性粉煤灰 G-CFA, 采用扫描电镜、红外光谱以及 XRD 谱图对其结构进行了表征, 并对比评价了 CFA 和 G-CFA 对泡沫混凝土力学、防水以及保温性能的影响。结果表明: 粉煤灰经改性处理后表面形貌和有机官能团均发生了明显的改变, 疏水性能得到改善。改性粉煤灰 G-CFA 的掺入虽然可使泡沫混凝土的力学性能有所减弱, 但可有效提升其防水性能和保温性能。推荐 G-CFA 的最佳质量分数为 15%, 此时泡沫混凝土的抗压强度仍可达 3.72 MPa, 吸水率低至 20.8%, 导热系数低至 0.031 W/(m·K), 泡沫混凝土的综合性能较好。在相同的掺量条件下, 改性粉煤灰 G-CFA 对泡沫混凝土力学性能、防水性能和保温性能的影响明显优于粉煤灰 CFA。为提高泡沫混凝土的综合性能提供一定参考。

关键词: 高性能泡沫混凝土; 改性粉煤灰; 防水性能; 力学性能; 保温性能

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 05-0008-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.05.002

Preparation and Performance Evaluation of Modified Fly Ash for High-Performance Foam Concrete

LI Qiuxiang^{1,2,3}, LIU Yuzhen¹, ZHENG Jie¹, XIE Hui^{1,2}

- (1. Jiangxi Vocational Technical College of Industry & Trade, Nanchang 330038, China;
2. Key Laboratory of Grain and Oil Intelligent Testing and Processing Transportation Equipment, Jiangxi Provincial Department of Education, Nanchang 330038, China;
3. Nanchang Key Laboratory of Industry Visual Intelligence Perception and Inspection for Automotive and Equipment, Nanchang, Jiangxi 330038, China)

Abstract: In order to effectively improve the waterproof and thermal insulation properties of foam concrete, a modified fly ash G-CFA was prepared by using secondary fly ash CFA as raw material, hydrophobic modifier GSK and dispersant FST to modify

项目来源: 江西省教育厅重点科技项目 (GJJ2506901); 国家粮食和物资储备局软科学研究项目 (GLRKX2026082); 江西省教育厅青年科技项目 (GJJ2506902; GJJ2407104)。

作者简介: 李秋香 (1986—), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 绿色建筑材料。

收稿日期: 2025-12-02

it. Its structure was characterized by scanning electron microscope, infrared spectrum and XRD spectrum, and the effects of CFA and G-CFA on the mechanical, waterproof and thermal insulation properties of foam concrete were compared and evaluated. The results showed that the surface morphology and organic functional groups of fly ash were significantly changed after modification treatment, and the hydrophobicity was improved. The addition of modified fly ash G-CFA can weaken the mechanical properties of foam concrete, but can effectively improve its waterproof performance and thermal insulation performance. The optimal mass fraction of G-CFA is recommended to be 15%. At this time, the compressive strength of foam concrete can still reach 3.72 MPa, the water absorption rate is as low as 20.8%, and the thermal conductivity is as low as 0.031 W/(m · K). The comprehensive performance of foam concrete is good. In addition, the effect of modified fly ash G-CFA on the mechanical properties, waterproof properties and thermal insulation properties of foam concrete is significantly better than that of fly ash CFA at the same dosage. To offer some reference for enhancing the comprehensive performance of foamed concrete.

Key words: high performance foam concrete; modified fly ash; waterproof performance; mechanical properties; thermal insulation performance

0 引言

泡沫混凝土因其具备良好的防火、保温、隔音以及施工便捷等优点,在建筑墙体施工以及节能构件等领域的应用日益增多^[1]。常规泡沫混凝土的防水性能、保温性能和耐久性能相对较差,无法满足复杂环境条件下建筑施工对混凝土综合性能的要求^[2]。因此,仍需研究更加高性能的泡沫混凝土,以满足建筑施工对泡沫混凝土综合性能的需求。

目前国内外学者在掺入粉煤灰改善泡沫混凝土性能方面展开了多方面的研究^[3-4],并且将粉煤灰进行改性处理后能够更好的提高泡沫混凝土的综合性能^[5-6]。钟兴昌^[7]开展了粉煤灰基泡沫混凝土在矿井充填中的应用研究,考察了粉煤灰掺量对泡沫混凝土抗压强度的影响,结果认为粉煤灰的掺入可有效增强充填体后期的力学强度,并可使混凝土的成本大幅降低;李国荣等^[8]以不同等级粉煤灰为研究对象,考察了不同掺量粉煤灰对泡沫混凝土综合性能的影响,通过优化试验设计,当Ⅱ级粉煤灰的掺量为15%时,可实现对泡沫混凝土综合性能的大幅改善。然而原状粉煤灰通常由玻璃体、少量石英以及莫来石等惰性矿物组成,活性较低,直接掺入混凝土中容易导致材料的力学性能减弱,影响混凝土的使用效果^[9-10]。将粉煤灰进行改性处理能够有效提升其活性,从而有助于提高其对混凝土综合性能的改善效果^[11-13]。曹启坤等^[14]研究了不同粉煤灰激发剂掺量对泡沫混凝土抗压强度以及导热系数等参数的影响,结果认为合适的水胶比、粉煤灰掺量

以及碱激发剂掺量可明显改善泡沫混凝土的综合性能,能够制备出符合A07级标准的泡沫混凝土;周美茹等^[15]采用粉磨+流化床气相沉积的复合改性法对低品质粉煤灰开展了改性处理研究,并评价了其在混凝土中的应用效果,改性粉煤灰的掺入能提高混凝土的力学性能,并降低混凝土的使用成本;温超凯等^[16]将赤泥作为改性对低品质粉煤灰进行改性处理,将赤泥部分取代粉煤灰掺入混凝土中可有效提高混凝土的抗压强度、抗氯离子渗透性能以及碳化性能;汤小松^[17]采用不同类型碱激发剂溶液对粉煤灰和矿渣进行改性处理,并制备出一种碱激发矿渣-粉煤灰/再生砖粉泡沫混凝土,评价了其综合性能,结果认为碱激发剂类型、胶凝材料类型和比例对泡沫混凝土的宏观性能和微观结构影响较大,优化后的泡沫混凝土综合性能优良;李阳春等^[18]采用硅烷偶联剂对超细粉煤灰进行改性处理,并考察了改性粉煤灰掺量对泡沫混凝土干密度、孔隙率、吸水率、导热系数以及抗压强度的影响,推荐改性粉煤灰的最佳质量分数为1.5%。

综上所述,仍需进一步深入研究改性粉煤灰在泡沫混凝土中的应用效果,以二级粉煤灰CFA为原料,使用疏水改性剂GSK和分散剂FST对其进行改性处理,制备出一种改性粉煤灰G-CFA,采用扫描电镜、红外光谱以及XRD谱图对其结构进行了表征,并对比评价了粉煤灰CFA和改性粉煤灰G-CFA对泡沫混凝土力学性能、防水性能以及保温性能的影响,为提高泡沫混凝土的综合性能提供一定参考和借鉴。

材料科学

1 试验部分

1.1 原材料

二级粉煤灰 CFA（其性能指标满足标准 GB/T 1596—2017《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》中的要求，主要性能参数见表 1）；疏水改性剂 MSK（主要成分为聚硅氧烷）；分散剂 FST（主要成分为非离子表面活性剂）；分析纯无水乙醇；水泥为普通硅酸盐 P·O 42.5 水泥（其性能指标满足标准 GB 175—2023《通用硅酸盐水泥》中的要求，主要性能参数见表 2）；泡沫剂（主要成分为阴离子型表面活性剂及蛋白质等，有效质量分数为 30%）；减水剂（主要成分为改性聚羧酸盐，氯离子含量≤0.1%）；试验用水为自来水。

表 1 试验用粉煤灰主要性能参数

Table 1 Main performance parameters of experimental fly ash				
比表面积 / (cm ² /g)	需水量比 /%	28 d 活性 指数/%	含水率 /%	烧失量 /%
501.65	101.51	84.82	0.57	6.52

表 2 试验用水泥主要性能参数

Table 2 Main performance parameters of experimental cement				
比表面积 / (cm ² /g)	密度 / (g/cm ³)	烧失量 /%	SO ₃ 含量 /%	氯离子含量 /%
532.56	3.15	3.05	3.35	0.02

1.2 改性粉煤灰 G-CFA 的制备

将粉煤灰样品置于恒温干燥箱中，在 105 ℃ 下恒温干燥 48 h，彻底去除其中的水分；将干燥后的粉煤灰样品过 0.075 mm 筛网，然后准确称取 10 g 粉煤灰加入到 50 mL 无水乙醇溶液中，搅拌混合均匀；继续往上述混合液中加入 0.5 g 的疏水改性剂 GSK 和 0.2 g 的分散剂 FST，在 800 r/min 下搅拌分散形成悬浊液；升高反应体系温度至 70 ℃，继续在搅拌状态下恒温反应 3 h；反应结束后过滤收集反应产物，然后在 80 ℃ 下将反应产物恒温烘干，即制备出最终产物改性粉煤灰 G-CFA。

1.3 改性粉煤灰 G-CFA 结构表征

采用 EVO 10 型高分辨率扫描电镜仪对粉煤灰 CFA 和改性粉煤灰 G-CFA 的表面形貌进行分析；采用 Nolay-50 型傅立叶红外光谱仪测定粉煤灰 CFA 和改性粉煤灰 G-CFA 的红外光谱图；采用 D6 PHASER 型 X 射线衍射仪测定粉煤灰 CFA 和改性粉煤灰

G-CFA 的 XRD 图谱。

1.4 泡沫混凝土配合比设计及试件制备

按表 3 的结果，在水胶比为 0.45 的条件下设计泡沫混凝土的配合比，重点考察改性粉煤灰 G-CFA 掺量对泡沫混凝土性能的影响。其中泡沫混凝土的制备流程为：将一定量的水倒入搅拌机中，再按比例加入水泥，搅拌 2 min；继续加入不同质量分数的改性粉煤灰 G-CFA，搅拌 2 min，即制备出水泥浆体；将泡沫剂和减水剂按设计用量加入到适量的水中，混合均匀后再将其倒入水泥浆体中，继续搅拌 2 min，即制备出泡沫混凝土浆体；最后将其倒入相应的模具中，在标准养护条件下养护至规定的龄期后取出，用于后续泡沫混凝土的性能评价试验。

表 3 泡沫混凝土配合比设计

Table 3 Mix design of foam concrete						
编号	水泥	水	泡沫剂	减水剂	G-CFA	G-CFA 质量 分数/%
	/ (kg/m ³)					
P-1	500	225	20	2.5		
P-2	475	225	20	2.5	25	5
P-3	450	225	20	2.5	50	10
P-4	425	225	20	2.5	75	15
P-5	400	225	20	2.5	100	20
P-6	350	225	20	2.5	150	30

1.5 泡沫混凝土性能评价试验方法

参照建筑行业标准 JG/T 266—2011《泡沫混凝土》中的要求，分别以抗压强度、吸水率和导热系数为评价指标，对不同泡沫混凝土试件的力学性能、防水性能和保温性能进行评价。其中混凝土试件的尺寸均为 100 mm × 100 mm × 100 mm，养护龄期均为 28 d，每组试件的数量均为 3 块。

2 试验结果分析

2.1 改性粉煤灰 G-CFA 结构表征

2.1.1 表面形貌

由图 1 可知，改性处理前的粉煤灰 CFA 结构相对规整，颗粒呈圆球状，并且表面仅附着有少量的颗粒物，表面比较光滑。而改性处理后的改性粉煤灰 G-CFA 颗粒状态虽然仍为圆球状，但其表面的粗糙程度明显增大，表面附着物明显增多。这是由于粉煤灰表面被改性剂或者化学反应生成物覆盖，说明改性反应使粉煤灰的表面形貌发生了明显改变。

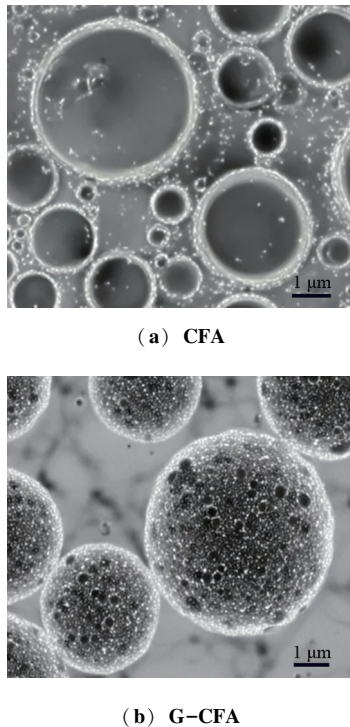


图 1 粉煤灰改性前后的表面形貌图

Fig. 1 Surface morphology of fly ash before and after modification

2.1.2 红外光谱

由图 2 可知,与粉煤灰 CFA 相比,改性粉煤灰 G-CFA 在波数为 $3\,250 \sim 3\,650\text{ cm}^{-1}$ 处的伸缩振动吸收峰强度明显减弱,这是由于疏水改性剂 GSK 中的硅氧烷基团可与粉煤灰中的亲水的羟基 (Si-OH 和 Al-OH) 产生化学反应,使粉煤灰表面的羟基数量有所减少;另外,疏水改性剂 GSK 中的疏水长链会覆盖部分亲水的羟基,同样也会使羟基的特征吸收峰有所减弱。改性粉煤灰 G-CFA 在波数为 $2\,450\text{ cm}^{-1}$ 处的伸缩振动吸收峰强度略有增强,这主要是由于在粉煤灰改性处理过程中生成了部分碳酸盐所造成的。

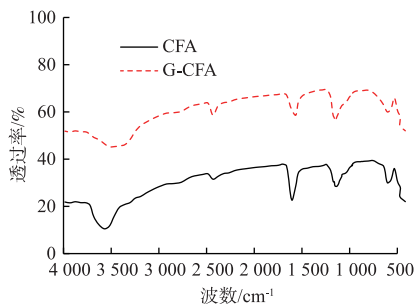


图 2 粉煤灰改性前后的红外光谱图

Fig. 2 Infrared spectra of fly ash before and after modification

改性粉煤灰 G-CFA 在波数为 $1\,600\text{ cm}^{-1}$ 处的伸缩振动吸收峰强度有所减弱,这是由于疏水改性剂 GSK 吸附在粉煤灰表面形成一层疏水膜,使 G-CFA 表面吸附水有所减少。

2.1.3 XRD 图谱

由图 3 可知,粉煤灰经过改性处理后 X 射线衍射图中所呈现的衍射峰有较大的差异,其中改性粉煤灰 G-CFA 中 53° 附近的衍射峰强度有所减弱,而在 $32.5^\circ \sim 37.2^\circ$ 之间的衍射峰强度则有所增强,并在 22.5° 和 61.2° 附近出现了新的衍射峰。结合图 1 和图 2 结果分析,进一步确认改性处理过程中粉煤灰表面发生了明显的化学反应。

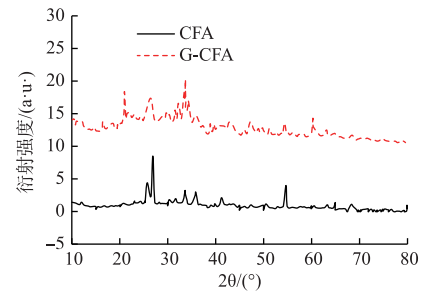


图 3 粉煤灰改性前后的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of fly ash before and after modification

2.2 泡沫混凝土性能评价

2.2.1 力学性能

由图 4 可知,随着 CFA 和 G-CFA 掺量的逐渐增大,混凝土的抗压强度均逐渐减小。并且当 CFA 和 G-CFA 的掺量相同时,掺入 G-CFA 时混凝土的抗压强度明显高于 CFA。当 CFA 和 G-CFA 的掺量均为 15% 时,混凝土的抗压强度分别为 3.19、3.72 MPa,与未掺入粉煤灰时相比,抗压强度分别下降了 19.24% 和 5.82%,其中掺入改性粉煤灰 G-CFA 时混

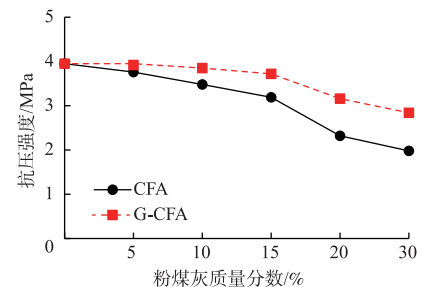


图 4 不同 CFA 和 G-CFA 掺量时混凝土的抗压强度

Fig. 4 Compressive strength of concrete with different CFA and G-CFA dosages

材料科学

凝土抗压强度下降的幅度相对更小。再继续增大 CFA 和 G-CFA 的掺量至 20% 以上, 混凝土的抗压强度减小的幅度变得更大, 力学性能大幅减弱。可能是由于粉煤灰的加入量过大时, 泡沫混凝土中水泥熟料的量相对就减少, 从而导致水化产物的生成量减少, 造成混凝土孔隙率增大, 密实性下降, 致使抗压强度有所减小。此外, 改性粉煤灰 G-CFA 的疏水性能更强, 可以减少水分吸附, 提高其在混凝土中的分散性能, 并且改性剂分子可与水泥水化产物产生一定的化学键合反应, 使粉煤灰与水泥浆的结合更加紧密, 有助于维持混凝土的抗压强度, 所以掺入 G-CFA 后混凝土的抗压强度高于 CFA。从粉煤灰掺量对泡沫混凝土力学性能的影响角度考虑, 应控制 CFA 和 G-CFA 的质量分数在 15% 以内。

2.2.2 防水性能

由图 5 可知, 随着 CFA 和 G-CFA 掺量的逐渐增大, 混凝土的吸水率均先逐渐减小再增大。并且当 CFA 和 G-CFA 的掺量相同时, 掺入 G-CFA 时混凝土的吸水率明显低于 CFA。当 CFA 和 G-CFA 的掺量均为 15% 时, 混凝土的吸水率均可以达到最小值, 分别为 40.6% 和 20.8%, 与未掺入粉煤灰时相比, 吸水率分别下降了 12.69% 和 55.27%, 其中, 掺入改性粉煤灰 G-CFA 时混凝土的吸水率减小的幅度相对更大。再继续增大 CFA 和 G-CFA 的掺量至 20% 以上, 混凝土的吸水率则均有所增大。说明粉煤灰 CFA 和改性粉煤灰 G-CFA 的掺入均能有效提升泡沫混凝土的防水性能, 但改性粉煤灰 G-CFA 对混凝土防水性能的提升效果更好。分析原因是由于合适掺量的粉煤灰能够有效降低泡沫混凝土的孔隙率, 增大其密实性能, 从而有效减少吸水率, 并且改性粉

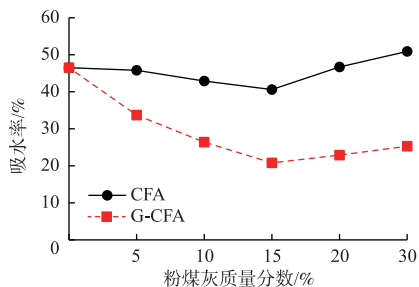


图 5 不同 CFA 和 G-CFA 掺量时混凝土的吸水率
Fig. 5 Water absorption rate of concrete with different CFA and G-CFA dosages

煤灰 G-CFA 表面的疏水基团更多, 可以大幅降低混凝土的吸水率, 提升其防水性能。但过量的 CFA 和 G-CFA 掺入也会增大混凝土的孔隙率, 从而使其吸水能力有所增强, 减弱了其防水性能。因此, 从粉煤灰掺量对泡沫混凝土防水性能的影响角度考虑, 推荐 CFA 和 G-CFA 的最佳质量分数均为 15%。

2.2.3 保温性能

由图 6 可知, CFA 和 G-CFA 的掺量越大时, 混凝土的导热系数先减小后增大, 这与 2.2.2 中的试验结果趋势相同, 当 CFA 和 G-CFA 的掺量相同时, 掺入 G-CFA 时混凝土的导热系数明显低于 CFA。当 CFA 和 G-CFA 的掺量均为 15% 时, 混凝土的导热系数均可以达到最小值, 分别为 0.063、0.031 W/(m·K), 与未掺入粉煤灰时相比, 导热系数分别下降了 16.00% 和 58.67%, 其中掺入改性粉煤灰 G-CFA 时混凝土的导热系数减小的幅度相对更大。再继续增大 CFA 和 G-CFA 的掺量至 20% 以上, 混凝土的导热系数则均有所增大。由于混凝土的导热系数与其保温性能呈负相关的关系, 说明粉煤灰 CFA 和改性粉煤灰 G-CFA 的掺入均能有效提升泡沫混凝土的保温性能, 并且改性粉煤灰 G-CFA 对混凝土保温性能的提升效果更好。分析原因是由于泡沫混凝土中掺入粉煤灰能够有效填充水泥浆体中的孔隙, 降低连通孔隙数量, 形成更多的封闭气孔, 从而起到良好的隔热作用, 有效降低其导热系数。此外, 改性粉煤灰 G-CFA 表面有一层有机疏水层, 其能通过水泥水化产物发生化学反应来增强粉煤灰与水泥浆体之间的黏合性能, 使混凝土结构的稳定性更强, 从而进一步降低混凝土的导热系数, 增强其保

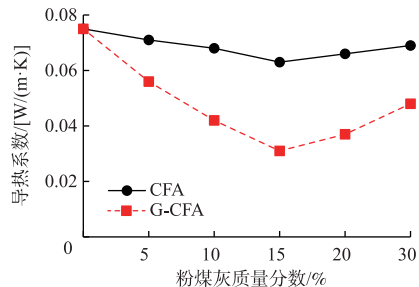


图 6 不同 CFA 和 G-CFA 掺量时混凝土的导热系数
Fig. 6 Thermal conductivity of concrete with different CFA and G-CFA dosages

温性能。但当粉煤灰的掺入量过大时，混凝土的力学强度降低，水化热有所延迟，更易因温度变化而产生收缩裂缝，从而容易形成热流通道，增大导热系数，并且粉煤灰掺量较大时，未反应的粉煤灰颗粒容易聚集在界面过渡区上，形成热量传导的“短路路径”，更易增大导热系数，保温效果变差。因此，从粉煤灰掺量对泡沫混凝土保温性能的影响角度考虑，同样推荐 CFA 和 G-CFA 的最佳质量分数均为 15%。

3 结论

为提高泡沫混凝土的综合性能，并有效降低混凝土的使用成本，以二级粉煤灰 CFA 为原料，制备改性粉煤灰 G-CFA，对其结构进行了表征，并考察 G-CFA 掺量对泡沫混凝土力学性能、防水性能和保温性能的影响，主要得出如下结论：

(1) 随着 CFA 和 G-CFA 掺量的逐渐增大，泡沫混凝土的抗压强度逐渐减小。与空白混凝土相比，当 CFA 和 G-CFA 的掺量均为 15% 时，混凝土的抗压强度分别下降 19.24% 和 5.82%。

(2) 随着 CFA 和 G-CFA 掺量的逐渐增大，泡沫混凝土的吸水率和导热系数均呈先减小后增大的趋势。当 CFA 和 G-CFA 的掺量均为 15% 时，混凝土的吸水率和导热系数均可达最小值，防水性能和保温性能均达最佳状态。

(3) 综合分析可知，CFA 和 G-CFA 的掺入均能有效改善泡沫混凝土的防水性能和保温性能，但会使其力学性能有所减弱，推荐 CFA 和 G-CFA 的最佳质量分数为 15%。此外，在相同的掺量条件下，改性粉煤灰 G-CFA 对泡沫混凝土综合性能的改善效果更好。

参 考 文 献

[1] 袁瑞青, 彭家蔓, 彭玉文, 等. 不同水泥制备的泡沫混凝土性

能对比研究 [J]. 建筑结构, 2025, 55 (13): 103-109.

- [2] 杨旭荣, 郭智云, 李灿华, 等. 高炉矿渣优化配比泡沫混凝土制备与性能研究 [J]. 无机盐工业, 2025, 57 (11): 65-73.
- [3] 付世尧. 粉煤灰基泡沫混凝土的制备及其性能研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2025.
- [4] 孙浩洋. 碱激发矿渣-粉煤灰泡沫混凝土干燥收缩性能研究 [D]. 济南: 济南大学, 2023.
- [5] 刘毅. 磷石膏-粉煤灰泡沫混凝土制备、性能及应用研究 [D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2024.
- [6] 刘柏君, 张国防, 郑薇, 等. 矿物掺合料对泡沫混凝土性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 2025, 28 (3): 252-260.
- [7] 钟兴昌. 粉煤灰基泡沫混凝土试验研究及矿井充填工业应用 [J]. 矿业研究与开发, 2025, 45 (11): 105-112.
- [8] 李国荣, 刘玉芝. 粉煤灰对超轻泡沫混凝土性能的影响试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (1): 29-33.
- [9] 董必钦, 张泉, 刘源涛, 等. 硫酸铝对高掺量流化床粉煤灰基泡沫混凝土性能的影响 [J]. 材料导报, 2024, 38 (20): 178-185.
- [10] 刘荣桂, 张帅涛, 徐超杰. 基于纳米氧化镁改性粉煤灰混凝土的膨胀变形研究 [J]. 混凝土, 2024 (12): 80-83, 88.
- [11] 蒋建华, 卢宸宸, 师效哲, 等. 纳米 SiO_2 改性粉煤灰混凝土力学性能及吸水特性研究 [J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41 (3): 10-17.
- [12] 吴少财. 铝粉发泡剂对粉煤灰-矿渣基泡沫混凝土性能的影响研究 [D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2024.
- [13] 高瞻, 张启志. 超细粉煤灰改性再生骨料混凝土力学及抗冻性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (1): 104-107, 135.
- [14] 曹启坤, 景昊星, 李豪. 基于响应曲面法的粉煤灰泡沫混凝土配合比优化 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (4): 1427-1435.
- [15] 周美茹, 陈国强, 李军锁. 复合改性低品质粉煤灰在混凝土中的应用研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2017 (3): 16-18.
- [16] 温超凯, 祝云, 刘其彬, 等. 赤泥改性低品质粉煤灰混凝土性能的研究 [J]. 新型建筑材料, 2019, 46 (1): 53-55.
- [17] 汤小松. 碱激发矿渣-粉煤灰/再生砖粉泡沫混凝土的制备与性能研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2023.
- [18] 李阳春, 庞雪飞. 硅烷偶联剂改性超细粉煤灰增强泡沫混凝土防水和隔热性能研究 [J]. 塑料科技, 2024, 52 (12): 77-80.