

改性磷石膏和粉煤灰掺量对全固废地聚物材料性能的影响

容七英, 章 鸿, 罗春平, 蔡志强, 张颖倩

(楚雄佑琳生科技有限公司, 楚雄 675099)

摘 要: 为了提高磷石膏和粉煤灰的资源化利用效率, 将原状磷石膏进行改性处理后制备出改性磷石膏, 然后再将其与粉煤灰、矿渣粉和电石渣等材料掺合, 制备出全固废地聚物复合材料, 采用红外光谱 (FT-IR) 和扫描电镜 (SEM) 对改性磷石膏的结构进行了表征, 并通过流动度、抗压强度、抗折强度以及收缩值测定实验, 考察了改性磷石膏和粉煤灰掺量对全固废地聚物复合材料流动性能、力学性能以及收缩性能的影响。结果表明: 改性磷石膏和粉煤灰的掺量对全固废地聚物复合材料综合性能的影响较大, 当改性磷石膏的掺量为 15%, 粉煤灰的掺量为 30% 时, 全固废地聚物复合材料的综合性能较好, 流动度可以达到 159 mm, 抗压强度和抗折强度分别为 38.5、6.4 MPa, 养护 3、7、28 d 的收缩值分别为 306.7×10^{-6} 、 407.6×10^{-6} 、 357.5×10^{-6} 。全固废地聚物复合材料具有良好的流动性能、力学性能和收缩性能, 可替代部分水泥作为胶凝材料在建筑工程施工中进行应用。研究结果可为磷石膏以及粉煤灰等工业固体废弃材料的高效资源化利用提供一定参考。

关键词: 改性磷石膏; 粉煤灰; 掺量; 全固废地聚物; 复合材料; 综合性能

中图分类号: TU599; TQ177 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 03-0026-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.005

Effect of Modified Phosphogypsum and Fly Ash Dosage on the Properties of Solid Waste Geopolymer Materials

RONG Qiyang, ZHANG Hong, LUO Chunping, CAI Zhiqiang, ZHANG Yingqian

(Chuxiong Youlinsheng Technology Co., Ltd., Chuxiong 675099, China)

Abstract: To enhance the resource utilization efficiency of phosphogypsum and fly ash, the original phosphogypsum was modified to produce modified phosphogypsum, which was then blended with materials such as fly ash, slag powder, and carbide slag to create a fully solid waste geopolymer composite. The structure of the modified phosphogypsum was characterized using Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) and scanning electron microscopy (SEM). The effects of modified phosphogypsum and fly ash content on the fluidity, mechanical properties, and shrinkage performance of the fully solid waste geopolymer composite were investigated through tests measuring fluidity, compressive strength, flexural strength, and shrinkage values. The results indicate that the content of modified phosphogypsum and fly ash significantly influences the overall performance of the fully solid waste geopolymer composite. When the modified phosphogypsum content is 15% and the fly ash content is 30%, the composite exhibits optimal performance, with a fluidity reaching 159 mm, compressive strength and flexural strength of 38.5 MPa and 6.4 MPa, respectively, and shrinkage values of 306.7×10^{-6} , 407.6×10^{-6} , and 357.5×10^{-6} at curing

项目来源: 楚雄州“兴楚科技领军人才”培养计划项目 (CXKJLJRC2023-03)。

作者简介: 容七英 (1972—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 材料开发。

收稿日期: 2026-02-03

periods of 3, 7, and 28 days. The fully solid waste geopolymer composite demonstrates excellent fluidity, mechanical properties, and shrinkage performance, making it a viable alternative to cement as a cementitious material in construction applications. These findings provide valuable insights for the efficient recycling of industrial solid waste materials such as phosphogypsum and fly ash.

Key words: modified phosphogypsum; fly ash; dosage; solid waste geopolymer; compound material; comprehensive performance

0 引言

磷石膏和粉煤灰是最为常见的两类工业固体废弃物材料，其排放量呈逐年增大的趋势，未经合理处置或者任意堆放将产生巨大的环境污染风险以及资源浪费，研究如何将其资源化利用迫在眉睫^[1-2]。

目前国内外研究者针对磷石膏和粉煤灰基地聚物复合材料开展了较多的研究，并取得了一定的研究成果。例如柏延平等^[3]研究了粉煤灰掺量以及碱激发剂模数等因素对固化土性能的影响，发现粉煤灰掺量为30%、碱激发剂模数为1.1时，固化土的抗压强度较高，并具有良好的抗硫酸盐侵蚀性能；谢建海等^[4]以磷石膏和粉煤灰等工业固体废弃物为原材料，结合硫铝酸盐水泥和碱激发剂制备出一种磷石膏基胶凝材料，并将其应用于C30混凝土中，表现出良好的工作性能和抗硫酸盐侵蚀性能；王永瑞等^[5]采用磷石膏和矿渣粉作为填料制备了FRP约束磷石膏基地聚物材料，结果认为少量粉煤灰的掺入可明显提高材料的强度；白平^[6]采用磷石膏、粉煤灰以及矿渣等工业固废制备出磷石膏基地聚物，发现其具备良好的力学性能、耐久性能以及环保性能，适合应用于路用材料；何斌^[7]以粉煤灰、磷石膏以及矿渣粉为主要原材料，采用碱性激发反应制备出一种新型的地聚物注浆材料，并考察了磷石膏掺量对地聚物性能的影响，认为适量磷石膏的掺入可促进材料中晶相和非晶相物质的生成，提高材料的长期强度；曹甜甜^[8]研究了磷石膏掺量对碱激发胶凝材料性能的影响，结果认为磷石膏掺量为15%时，材料的抗压强度和流动度达到最佳。但由于磷石膏中不可避免的会含有一定的杂质成分，尤其是部分酸性杂质的存在可能会对碱激发反应制备地聚物过程产生负面影响，因此，在使用磷石膏制备地聚物复合材料或者其他工程材料时，往往需要对其进行改性处理。

程树范等^[9]研究发现当基层材料中水泥的掺量为7%~10%时，可使改性磷石膏基层材料具备良好的路用性能和经济性；何绍坤^[10]研究发现转晶预处理后的磷石膏用作水泥缓凝剂可明显缩短凝结时间，缓凝效果较好；唐坤^[11]探究了改性磷石膏在沥青混合料中的应用可行性，结果认为磷石膏经过改性处理后加入到沥青混合料中可显著改善其水稳性能，可作为填料代替部分矿粉；赵沁媛等^[12]评价了不同改性工艺对磷石膏基复合材料力学性能的影响，发现当球磨时间为45 min，氨水溶液质量分数为1%时，磷石膏基复合材料的力学性能较好；杜顺贵等^[13]采用聚羧酸减水剂和六偏磷酸钠作为改性剂对磷石膏进行改性处理，并考察了改性磷石膏对路基填料性能影响，发现改性剂的掺入可有效提高磷石膏路基填料的力学性能、水稳性能和膨胀性能；杨洪全等^[14]考察了改性磷石膏掺量对路基工程用复合材料性能的影响，结果表明改性磷石膏的掺入可提高复合材料的力学性能、耐水性能、抗干湿循环性能和冻融循环性能，推荐改性磷石膏的掺量为15%；屠艳平等^[15]研究了生石灰对磷石膏的高温改性效果，发现在生石灰的掺量为2%时，可有效去除磷石膏中的酸性杂质，并显著提升磷石膏水泥基复合材料的力学性能。

综上，为进一步深入研究改性磷石膏和粉煤灰在全固废地聚物复合材料中的应用。因此，以原状磷石膏为原材料，使用复合改性剂对其改性处理制备出改性磷石膏，采用红外光谱和扫描电镜对其结构进行了表征，然后将改性磷石膏与粉煤灰、矿渣粉和电石渣等材料相掺，制备出一种全固废地聚物复合材料，评价改性磷石膏和粉煤灰掺量对全固废地聚物复合材料流动性能、力学性能和收缩性能的影响，为磷石膏以及粉煤灰等工业固体废弃材料的高值化和资源化利用提供一定的参考借鉴。

材料科学

1 试验材料与方法

1.1 原材料

原状磷石膏，含水率 5.2%，密度 2.27 g/cm³；粉煤灰为Ⅱ级，比表面积 538 m²/kg，密度 2.36 g/cm³；矿渣粉比表面积 492 m²/kg，密度 2.87 g/cm³；电石渣比表面积 358 m²/kg，密度 2.09 g/cm³；分析纯氧化钙；分析纯无水乙醇；复合改性剂主要成分为硅烷偶联剂和分散剂。

1.2 改性磷石膏的制备

称取 200 g 原状磷石膏加入到 1 000 mL 水中，搅拌 10 min 后再加入 8 g 氧化钙，继续搅拌 60 min；将上述混合液过滤后收集固体产物，并使用清水冲洗干净后烘干，即得到预处理磷石膏；将复合改性剂加入到适量蒸馏水和无水乙醇中，室温下搅拌 120 min 后，备用；称取 200 g 预处理磷石膏加入到复合改性剂溶液中，边加边搅拌，持续搅拌反应 120 min；最后过滤收集固体产物，并将其放入恒温干燥箱中，在 60 ℃ 下恒温干燥 24 h，粉碎研磨过 0.075 mm 分样筛，即得到最终产物改性磷石膏。

1.3 全固废地聚物复合材料配比设计及制备

准确称取 500 g 的胶凝材料（材料配比见表 1）加入到搅拌机中，干燥搅拌混合 30 s；按照水胶比（质量比）为 0.45 的设计结果，加入适量的水和碱激发剂溶液，充分搅拌混合 3 min，即制备出全固废地聚物复合材料浆体；将其倒入模具中，振捣去除气泡，室温养护 1 d 后脱模，然后继续在恒温恒湿标准养护箱中养护至不同龄期，待用。

表 1 不同材料配比设计结果

Table 1 Design results of different material ratios /%

序号	改性磷石膏	粉煤灰	矿渣粉	电石渣
W0		30	50	20
W1	5	30	45	20
W2	10	30	40	20
W3	15	30	35	20
W4	20	30	30	20
W5	15	10	55	20
W6	15	20	45	20
W7	15	40	25	20
W8	15	50	15	20

1.4 试验方法

1.4.1 改性磷石膏结构表征

分别采用红外光谱分析和扫描电镜分析对改性

磷石膏的结构进行表征，其中红外光谱分析测试波长范围为 500~4 000 cm⁻¹，扫描电镜测试加速电压选择为 10 kV。

1.4.2 全固废地聚物复合材料性能评价

参照国家标准 GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》中的相关要求，测定复合材料浆体的流动度，评价复合材料的流动性能；参照国家标准 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法（ISO 法）》中的相关要求，测定复合材料试件养护不同龄期后的抗压强度和抗折强度，评价复合材料的力学性能；参照建材行业标准 JC/T 603—2004《水泥胶砂干缩试验方法》中的相关要求，测定复合材料试件养护不同龄期后的收缩值，评价复合材料的收缩性能。

2 结果与讨论

2.1 改性磷石膏结构表征

2.1.1 红外光谱

由图 1 可知，改性磷石膏与原状磷石膏的红外光谱具有一定的相似性，在波数为 3 420~3 580 cm⁻¹ 处附近均出现了磷石膏中的吸附水和结晶水上的 -OH 键伸缩振动吸收峰，只是改性磷石膏的波峰和强度明显减弱，这是由于经过改性处理后的磷石膏中吸附水和结晶水明显减少；波数为 2 805~2 910 cm⁻¹ 处附近分别为磷石膏中甲基 -CH₃ 的伸缩振动吸收峰和弯曲振动吸收峰；波数为 1 635 cm⁻¹ 处附近为磷石膏中碳碳双键 C=C 的伸缩振动吸收峰；波数为 1 150 cm⁻¹ 处附近为磷石膏中硫酸根的非伸缩振动吸收峰；原状磷石膏中波数为 680 cm⁻¹ 处附近的吸收峰为硫酸根的非

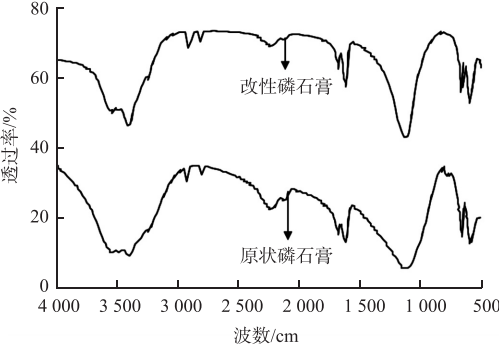


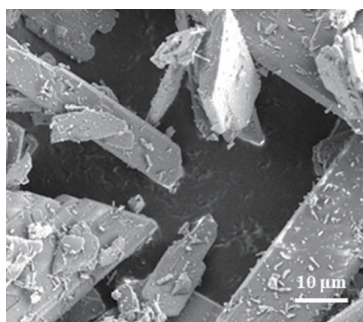
图 1 原状磷石膏和改性磷石膏的红外光谱图

Fig. 1 Infrared spectra of undisturbed phosphogypsum and modified phosphogypsum

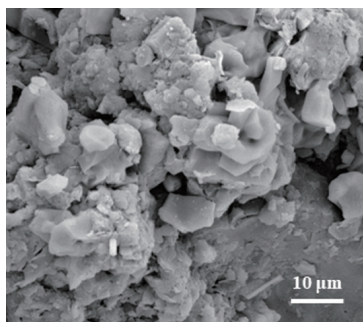
对弯曲振动吸收峰,而改性磷石膏中波数为 680 cm^{-1} 处附近的吸收峰则为经过复合改性剂处理后形成的 Si-OH-OH 键的伸缩振动吸收峰。上述结果说明,原状磷石膏与复合改性剂发生了化学反应,磷石膏成功改性。

2.1.2 扫描电镜

由图2可知,原状磷石膏主要呈不规则的片状结构,其主要由小块颗粒状的石膏以及结晶而成的大块石膏组成;而改性磷石膏则呈疏松多孔的堆积结构,表面由片状转变为颗粒状,与原状磷石膏相比,颗粒变得更小,并且更加分散,比表面积也更大。这说明原状磷石膏得到了改性,改性处理使磷石膏的表面形貌发生了明显改变。



(a) 原状磷石膏



(b) 改性磷石膏

图2 磷石膏改性前后的扫描电镜图

Fig. 2 Scanning electron microscopy images of phosphogypsum before and after modification

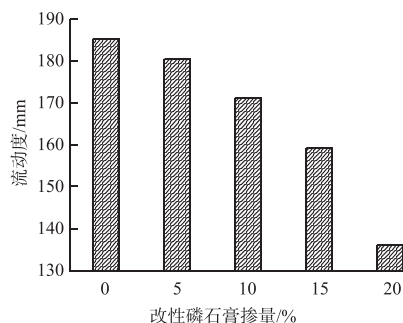
2.2 改性磷石膏和粉煤灰掺量对地聚物材料性能的影响

2.2.1 流动性

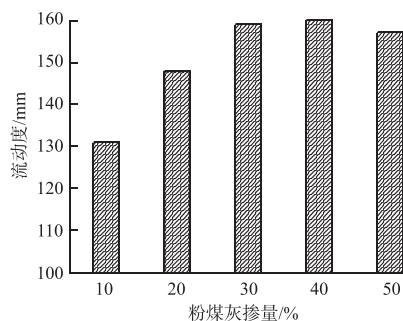
由图3(a)可知,随着改性磷石膏掺量的逐渐增大,地聚物复合材料的流动度呈逐渐减小的趋势,当改性磷石膏的掺量由0增大至20%时,材料的流动度可由185 mm减小至136 mm,流动度下降了

26.49%。这是由于改性磷石膏的比表面积和孔隙率较大,使其具有较强的吸水性能,并且改性磷石膏中的硫酸根离子与其他原材料发生化学反应会消耗掉部分自由水,致使浆体变得黏稠,流动度有所下降。因此,在建筑施工过程中对地聚物复合材料流动性能要求较高时,应注意控制改性磷石膏的掺量。

由图3(b)可知,随着粉煤灰掺量的逐渐增大,地聚物复合材料的流动度则呈先增大后减小的趋势。当粉煤灰的掺量在10%~40%之间时,材料的流动度均随粉煤灰掺量的增大而增大;而当粉煤灰的掺量大于40%时,材料的流动度则有所减小。这是由于粉煤灰的颗粒多呈光滑玻璃微球状,其掺入地聚物复合材料中时可起到一定的滚珠润滑作用,降低原材料中颗粒之间的摩擦阻力,有助于提高材料的流动性能;但当其掺入量过大时,过多的粉煤灰颗粒也会吸附部分自由水,致使浆体流动性能有所减弱。因此,为使地聚物复合材料具备良好的流动性能,应注意选择合适的粉煤灰掺量。



(a) 改性磷石膏



(b) 粉煤灰

图3 改性磷石膏和粉煤灰掺量对材料流动性能的影响

Fig. 3 Effect of modified phosphogypsum and fly ash dosage on the flowability of materials

2.2.2 力学性能

由图4(a)可知,随着改性磷石膏掺量的逐渐

材料科学

增大,地聚物复合材料的抗压强度和抗折强度均先增大再减小。当改性磷石膏的掺量为 15% 时,地聚物复合材料的抗压强度和抗折强度均能达到最大值,分别为 38.5、6.4 MPa,比未掺入改性磷石膏时分别提高了 18.1%、25.5%。再继续增大改性磷石膏的掺量至 20%,地聚物复合材料的抗压强度和抗折强度则均有所减小。原因是由于改性磷石膏具备一定的胶凝活性,当其掺入地聚物复合材料中时可提供较多的硫酸盐,与其他原材料提供的钙离子相反应生成水化硅酸钙,有助于强化和填充地聚物复合材料的微观孔隙结构,提高其力学强度;但当改性磷石膏的掺量过大时,由于其吸水能力较强,并且颗粒相对较为疏松,容易包裹在其他材料颗粒表面,减缓水化反应速率,影响复合材料的力学强度。因此,从改性磷石膏掺量对地聚物复合材料力学性能的影响考虑,推荐其最佳掺量为 15%。

由图 4 (b) 可知,随着粉煤灰掺量的逐渐增大,地聚物复合材料的抗压强度和抗折强度均先增大再减小。当粉煤灰的掺量为 30% 时,地聚物复合材料

的抗压强度和抗折强度均能达到最大值,再继续增大粉煤灰的掺量至 40% 以上,地聚物复合材料的抗压强度和抗折强度则均有所减小。由于掺适量的粉煤灰可有效发挥活性效应和微集料填充效应,细化地聚物复合材料的基体孔隙结构,提高其密实性,从而有助于改善材料的力学性能;而当其掺量过大时,由于其活性低于矿渣粉等其他原材料,致使碱激发反应程度下降,生成的胶凝产物量减少,导致地聚物复合材料的基体疏松,界面薄弱,从而降低了材料的力学强度。因此,从粉煤灰掺量对地聚物复合材料力学性能的影响考虑,推荐其最佳掺量为 30%。

2.2.3 收缩性能

由图 5 (a) 可知,随着改性磷石膏掺量的逐渐增大,地聚物复合材料养护不同龄期的收缩值均呈逐渐减小的趋势。当改性磷石膏的掺量为 20% 时,地聚物复合材料养护 3、7、28 d 的收缩值分别为 306.7×10^{-6} 、 407.6×10^{-6} 、 357.5×10^{-6} ,比未掺入改性磷石膏时分别降低了 38.8%、45.9%、56.2%。这是由于改性磷石膏的掺入可有效减少地聚物复合材料的微小孔隙数量,从而减少材料在干燥收缩过程中的失水量,降低其收缩值;另外,改性磷石膏的掺入可促进胶凝材料水化产物的生成,使材料中的部分自由水转变为结合水,使材料出现一定的微膨胀行为,有助于减小收缩值。因此,从改性磷石膏掺量对地聚物复合材料收缩性能的影响考虑,在合适掺量范围内应尽可能的增大改性磷石膏的掺量。

由图 5 (b) 可知,随着粉煤灰掺量的逐渐增大,地聚物复合材料养护不同龄期的收缩值同样均呈逐渐减小的趋势。当粉煤灰的掺量为 50% 时,地聚物复合材料养护 3、7、28 d 的收缩值分别为 285.9×10^{-6} 、 381.6×10^{-6} 、 308.4×10^{-6} ,比掺入 10% 粉煤灰时分别降低了 31.2%、40.5%、46.1%。这是由于粉煤灰的掺入可有效优化地聚物复合材料的孔隙结构,提升材料的密实度和弹性模量,从而有助于增强其抵抗收缩变形的能力,降低材料的收缩值。因此,从粉煤灰对地聚物复合材料收缩性能的影响考虑,在粉煤灰掺量为 10%~50% 范围内,应尽可能的增大其掺量。

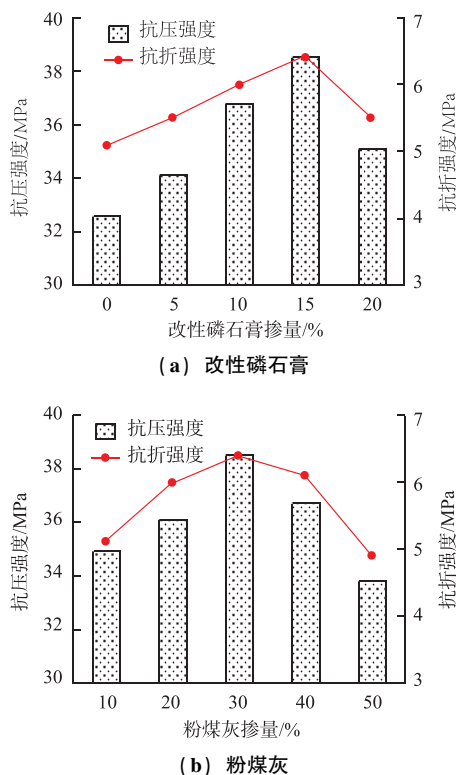


图 4 改性磷石膏和粉煤灰掺量对材料力学性能的影响
Fig. 4 Effect of modified phosphogypsum and fly ash dosage on the mechanical properties of materials

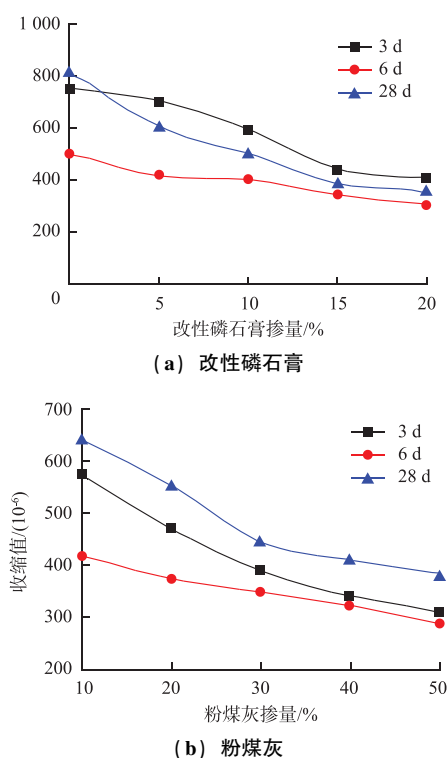


图5 改性磷石膏和粉煤灰掺量对材料收缩性能的影响

Fig. 5 Effect of modified phosphogypsum and fly ash dosage on the shrinkage performance of materials

3 结论

以改性磷石膏、粉煤灰、矿渣粉和电石渣为主要原材料，通过碱激发反应制备出一种全固废地聚物复合材料，通过相关实验评价了改性磷石膏和粉煤灰掺量对全固废地聚物复合材料综合性能的影响，主要得出以下结论：

(1) 随着改性磷石膏掺量的逐渐增大，地聚物复合材料的流动度逐渐减小，抗压强度后和抗折强度先增大后减小，养护不同龄期的收缩值均逐渐减小。综合考虑改性磷石膏掺量对地聚物复合材料流动性能、力学性能和收缩性能的影响，推荐其最佳掺量为15%。

(2) 随着粉煤灰掺量的逐渐增大，地聚物复合材料的流动度、抗压强度和抗折强度均先增大后减小，养护不同龄期的收缩值均逐渐减小。综合考虑粉煤灰掺量对地聚物复合材料流动性能、力学性能

和收缩性能的影响，推荐其最佳掺量为30%。

(3) 掺入适量的改性磷石膏和粉煤灰可使全固废地聚物复合材料具备良好的流动性能、力学性能和收缩性能，综合性能得到明显改善，能够满足建筑工程施工对地聚物复合材料性能的要求。

参 考 文 献

- [1] 杨靖娴, 马丽萍, 何宾宾, 等. 磷石膏基固废碱激发胶凝材料研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (11): 3934-3946.
- [2] 廖滢, 何妮, 何春云, 等. 磷石膏协同多元固废处理及资源化利用研究进展 [J]. 云南化工, 2025, 52 (1): 38-43.
- [3] 柏延平, 夏懿, 马雷, 等. 粉煤灰基地聚物固化黄土性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (5): 8-13.
- [4] 谢建海, 雷航州, 李明泽, 等. 磷石膏基胶凝材料的制备及其混凝土性能研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2025 (8): 6-9.
- [5] 王永瑞, 陈兵. FRP 约束磷石膏基地聚物的力学性能 [J]. 建筑材料学报, 2025, 28 (5): 458-464.
- [6] 白平. 基于路用材料的磷石膏地聚物应用基础研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2024.
- [7] 何斌. 磷石膏—矿渣—粉煤灰地聚物注浆材料理化特征及工程力学行为 [D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2024.
- [8] 曹甜甜. 碱激发磷石膏矿渣粉煤灰胶凝材料及其随机力学性能研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2025.
- [9] 程树范, 曾卫新, 殷源, 等. 大掺量改性磷石膏基层材料路用性能试验研究 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2025, 49 (6): 1306-1310.
- [10] 何绍坤. 磷石膏预处理改性用作水泥缓凝剂的研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2024.
- [11] 唐坤. 偶联剂改性磷石膏在沥青胶浆和混合料中的利用研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2024.
- [12] 赵沁媛, 陈文, 何治良, 等. 改性磷石膏基复合胶凝材料配比设计及力学性能研究 [J]. 化工矿物与加工, 2025, 54 (6): 48-56.
- [13] 杜顺贵, 林志伟, 陈亦楠. 大掺量改性磷石膏作为路基填料的性能优化与应用研究 [J]. 材料导报, 2025, 39 (S2): 153-158.
- [14] 杨洪全, 刘正雄, 孙贵礼, 等. 路基用改性磷石膏复合材料性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (4): 46-50.
- [15] 屠艳平, 白登显, 程书凯, 等. 矿粉和生石灰高温改性对磷石膏水泥基材料性能影响 [J]. 无机盐工业, 2024, 56 (6): 94-101.