

路基用改性磷石膏复合材料性能研究

Research on the Performance of Modified Phosphogypsum Composite Materials for Roadbed

杨洪全, 刘正雄, 孙贵礼, 郭薇, 黄顺文, 阚涛

(西南交通建设集团股份有限公司, 昆明 650000)

摘要: 为了提高磷石膏的利用效率, 以电石渣、生石灰和分散剂作为改性剂对磷石膏进行改性, 制备出改性磷石膏, 并将其与矿渣粉、水泥和固化剂相结合, 制备出适用于高速公路路基工程的改性磷石膏复合材料。通过无侧限抗压强度、直接剪切、浸水、干湿循环、冻融循环以及重金属浸出毒性试验, 对改性磷石膏复合材料的综合性能进行评价。结果表明: 当改性磷石膏掺量为 15% 时, 复合材料的无侧限抗压强度、内摩擦角和黏聚力分别为 15.2 MPa、30.4° 和 186.3 kPa, 软化系数为 0.94, 具有良好的力学性能和耐水性能; 当干湿循环次数为 40 次或者冻融循环次数为 80 次时, 改性磷石膏复合材料的无侧限抗压强度值仍能满足高速公路路基材料的强度标准要求, 具有良好的耐久性能; 改性磷石膏复合材料中重金属浸出毒性较低, 环保性能较好, 为废弃磷石膏的高效资源化利用提供一定的参考和借鉴。

关键词: 高速公路; 路基工程; 改性磷石膏; 耐久性能; 环保性能

中图分类号: X705; U416 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 04-0046-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.009

YANG Hongquan, LIU Zhengxiong, SUN Guili, GUO Wei, HUANG Shunwen, KAN Tao

(Southwest Transportation Construction Group Co., Ltd., Kunming 650000, China)

Abstract: In order to improve the utilization efficiency of phosphogypsum, modified phosphogypsum was prepared by using carbide slag, quicklime, and dispersant as modifiers, and combined with slag powder, cement, and curing agent to prepare modified phosphogypsum composite materials suitable for highway subgrade engineering. The comprehensive performance of modified phosphogypsum composite materials was evaluated through unconfined compressive strength, direct shear, immersion, wet dry cycle, freeze-thaw cycle, and heavy metal leaching toxicity tests. The results show that when the dosage of modified phosphogypsum was 15%, the unconfined compressive strength, internal friction angle, and cohesion of the composite material were 15.2 MPa, 30.4°, and 186.3 kPa, respectively, the softening coefficient was 0.94, indicating good mechanical and water resistance properties; When the number of wet dry cycles is 40 or the number of freeze-thaw cycles is 80, the unconfined compressive strength value of modified phosphogypsum composite material can still meet the strength standard requirements of highway subgrade materials and has good durability performance; The leaching toxicity of heavy metals in modified phosphogypsum composite materials is relatively low, and the environmental performance is good, provide some reference and inspiration for the efficient resource utilization of waste phosphogypsum.

Key words: expressway; roadbed engineering; modified phosphogypsum; durability performance; environmental performance

基金项目: 云南省重点研发计划项目 (202303AC100015)。

作者简介: 杨洪全 (1981—), 男, 纳西族, 本科, 高级工程师, 研究方向: 公路工程施工。

通信作者: 刘正雄 (1982—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 公路工程施工。

收稿日期: 2025-04-10

0 引言

目前磷石膏的利用率仍相对较低，大量堆积的磷石膏不仅会造成土地资源的浪费，还可能对周围土壤、空气、地下水以及生态环境造成严重的污染^[1-2]。随着我国环保制度以及管理的不断完善，针对磷石膏的环保资源化利用研究显得尤为重要。

目前，针对磷石膏在水泥建筑材料制备以及土壤改良领域的研究相对较多，将废弃磷石膏进行改性后用作水泥缓凝剂^[3-4]、胶凝材料^[5-6]以及土壤修复材料^[7-8]的研究已较为成熟，并且取得了较多的研究成果。但由于磷石膏中的杂质类型复杂^[9-10]，增大了材料的处理成本，并且水泥缓凝剂、胶凝材料以及土壤修复材料的用量都相对较小，难以实现对废弃磷石膏的大规模资源化利用。胡彪等^[11]采用生石灰对磷石膏进行改性，并将其与矿渣粉和水泥结合制备出改性磷石膏矿渣水泥，评价了改性磷石膏材料在混凝土和路基材料中的应用性能，结果表明早期强度得到了明显的提高，中后期强度也能实现稳定增长；另外，改性磷石膏中的磷和氟杂质也能实现有效固化，降低了对生态环境的影响程度。肖心等^[12]采用固废基硫铝系高活性材料、电石渣以及矿粉等对磷石膏进行改性，并开展了改性磷石膏材料用作路面基层材料的相关试验研究，结果表明改性磷石膏材料的强度较高，具备较强的水稳定性；黄绪泉等^[13]使用水泥和硅灰对原状磷石膏进行固化处理制备道路稳定材料，然后再用硅酸钠作为改性剂对磷石膏道路稳定材料进行改性处理，结果显示磷石膏道路稳定材料具有较强的力学性能和耐水性能；赵丽华等^[14]采用硅酸钠和熟石灰作为改性剂，对水泥稳定磷石膏进行改性，结果表明硅酸钠和熟石灰均能有效改善水泥稳定磷石膏的力学强度，并且硅酸钠的改性效果相对更好。综合来看，由于磷石膏自身的强度相对较低，并且亲水性能较强，往往需要对其进行适当的改性才能满足道路路基施工对填充材料性能的要求。

综上，目前大多数的研究集中在使用石灰类材料以及硅酸盐类改性剂对磷石膏进行改性处理，而采用电石渣以及矿渣粉类固废基材料对磷石膏进行改性的研究相对较少。因此，将电石渣、生石灰和

分散剂作为改性剂对磷石膏进行改性，制备出改性磷石膏，再将其与矿渣粉、水泥、固化剂和水进行混合，制备出适用于高速公路路基工程的改性磷石膏复合材料，通过无侧限抗压强度、直接剪切、浸水、干湿循环、冻融循环以及重金属浸出毒性试验，对改性磷石膏复合材料的综合性能进行评价，为废弃磷石膏的高效资源化利用提供一定的参考和借鉴。

1 试验材料及方法

1.1 原材料

磷石膏取自西南地区某化工厂（pH 值为 2.5 ~ 3.5）；S95 级高炉矿渣粉与电石渣性能指标见表 1；生石灰 CaO 含量为 98%，活性度 450；P·C 42.5 复合硅酸盐水泥（化学组分符合 GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》中的规定）；试验用分散剂（主要活性成分为非离子型表面活性剂）和固化剂（主要成分为矿物掺合料和激发剂）均为实验室自制。

表 1 高炉矿渣粉与电石渣性能指标

Table 1 Performance indicators of blast furnace slag powder and calcium carbide residue

材料名称	比表面积 /(m ² /kg)	密度 /(g/cm ³)	Al ₂ O ₃ /%	CaO /%	SiO ₂ /%	Fe ₂ O ₃ /%
矿渣粉	420	2.65	28.0	18.0	49.0	
电石渣		3.35	1.3	94.1	3.2	0.2

1.2 改性磷石膏复合材料的制备

将电石渣、生石灰和磷石膏按照质量比为 4:1:95 的比例进行混合，再加入一定量的分散剂，将混合料装入塑料桶中搅拌混合均匀，放置恒温干燥箱中陈化，直至其颜色变为土黄色时，即制备出改性磷石膏；将改性磷石膏掺量为 5%~30%（每级增长 5%，共 6 级）、矿渣粉为 20%~45%（每级增长 5%，共 6 级）、水泥为 25%、固化剂为 5% 和水为 20% 的质量比进行混合，搅拌均匀后装入不同模具即制备出改性磷石膏复合材料试件。

1.3 试验方法

参照 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中“无机结合料稳定材料的取样、成型和养生试验”要求制备试件；参照 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》中“无侧限抗压强度试验”和“直接剪切试验”要求对改性磷石膏复合材料的基本力学性能进行测试，并采用浸水试验、干

材料科学

湿循环试验和冻融循环试验测试耐水性能和耐久性；参照 HJ 557—2010《固体废物浸出毒性浸出方法 水平振荡法》，对改性磷石膏复合材料浸出液中的重金属含量进行测定，考察其环保性能。

2 结果与讨论

2.1 力学性能

以无侧限抗压强度、内摩擦角和黏聚力为评价指标，考察了不同改性磷石膏用量对复合材料力学性能的影响，如图 1、图 2 所示。试件的养护龄期均为 28 d，剪切试验垂直应力均为 300 kPa。

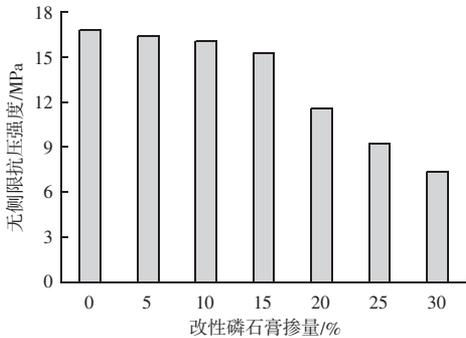


图 1 改性磷石膏用量对复合材料无侧限抗压强度的影响
Fig. 1 Effect of modified phosphogypsum dosage on the unconfined compressive strength of composite

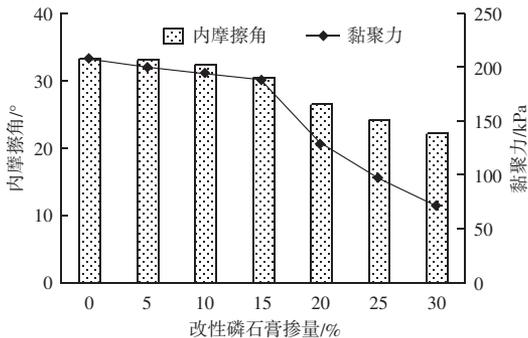


图 2 改性磷石膏用量对复合材料内摩擦角和黏聚力的影响
Fig. 2 Effect of modified phosphogypsum dosage on the internal friction angle and cohesion of composite materials

随着改性磷石膏掺量的逐渐增大，复合材料的无侧限抗压强度、内摩擦角和黏聚力均呈逐渐减小的趋势。当改性磷石膏的掺量为 0~15% 时，复合材料的无侧限抗压强度、内摩擦角和黏聚力减小的幅度均不大，其中当改性磷石膏的掺量为 15% 时，复合材料的无侧限抗压强度、内摩擦角和黏聚力分别可以达到 15.2 MPa、30.4° 和 186.3 kPa，与未掺改性磷石膏相比，分别减小了 9.52%、8.16% 和

9.48%，减小的幅度均小于 10%；而当改性磷石膏的掺量继续增大至 20% 以上时，复合材料的无侧限抗压强度、内摩擦角和黏聚力减小的幅度均明显增大。这是由于改性磷石膏自身的强度相对较低，当其掺量较大时，无法被水泥和矿渣粉的水化产物所包裹，导致改性磷石膏复合材料的强度有所下降。因此，从改性磷石膏掺量对复合材料力学性能的影响角度考虑，推荐改性磷石膏的掺量尽量小于 20%。

2.2 耐水性能

以软化系数为评价指标，考察了不同改性磷石膏用量对复合材料耐水性能的影响，如图 3 所示。试件的养护龄期和浸水时间均为 28 d。

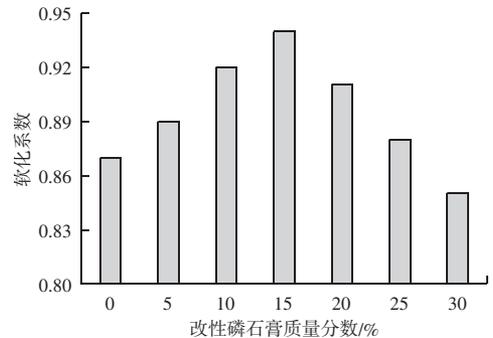


图 3 改性磷石膏用量对复合材料软化系数的影响
Fig. 3 Effect of modified phosphogypsum dosage on the softening coefficient of composite materials

随着改性磷石膏掺量的逐渐增大，复合材料的软化系数呈先逐渐增大再逐渐减小的趋势。当改性磷石膏的掺量为 15% 时，复合材料的软化系数可以达到最大值 0.94，与未掺改性磷石膏时相比提升了 8.05%；继续增大改性磷石膏掺量至 20% 以上时，复合材料的软化系数则有所减小。这是由于改性磷石膏中添加了一定量的分散剂（表面活性剂），使其疏水性能有所改善，在浸水试验过程中能够保持较高的强度，耐水性能较好；而当改性磷石膏的用量较大（超过 15%）时，复合材料的初始强度值有所降低，试件内部的吸水能力增大，致使试件的软化系数减小，耐水性能下降。因此，从改性磷石膏用量对复合材料耐水性能的影响角度考虑，推荐改性磷石膏的最佳掺量为 15%。

2.3 耐久性性能

以质量损失率和强度损失率为评价指标，在改性磷石膏掺量均为 15% 的条件下，考察了不同干湿循环次数和冻融循环次数对改性磷石膏复合

材料耐久性能的影响,如图4所示。试件的养护龄期为7 d。

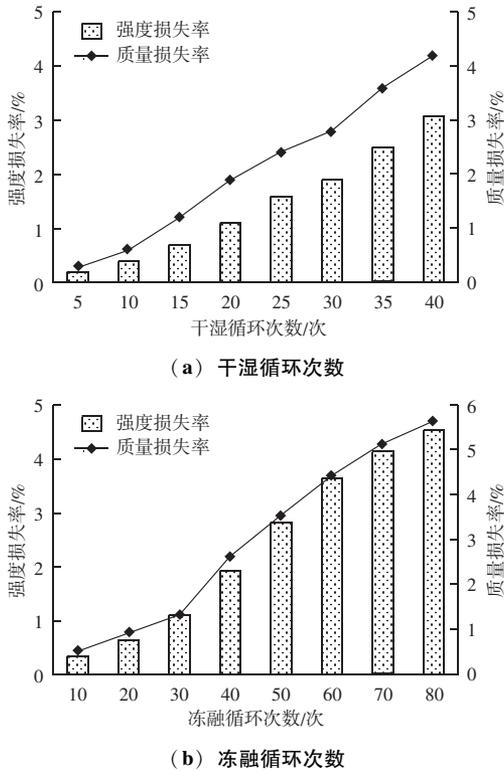


图4 复合材料的质量损失率和强度损失率

Fig. 4 Quality loss rate and strength loss rate of composite materials

随着干湿循环次数的不断增加,改性磷石膏复合材料的质量损失率和强度损失率均呈现出逐渐增大的趋势。当干湿循环次数达到40次时,改性磷石膏复合材料的质量损失率和强度损失率分别为4.2%和3.1%,此时试件的无侧限抗压强度值仍能满足JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》要求,试件表面也未出现明显的裂缝和裂纹。这说明改性磷石膏复合材料的抗干湿循环能力较强,能够满足雨水较多地区高速公路施工对路基材料耐久性能的要求。

随着冻融循环次数的不断增加,改性磷石膏复合材料的质量损失率和强度损失率均呈现出逐渐增大的趋势。当冻融循环次数达到80次时,改性磷石膏复合材料的质量损失率和强度损失率分别为5.6%和4.5%,此时试件的无侧限抗压强度值同样仍能满足JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》要求,试件表面也未出现明显的裂缝和裂纹。这说明改性磷石膏复合材料的抗冻融循环能力也比较强,

能够满足寒冷地区高速公路施工对路基材料耐久性能的要求。

2.4 环保性能

以浸出液中不同类型重金属的含量为评价指标,在改性磷石膏用量均为15%的条件下,对改性磷石膏复合材料的耐久性能进行了评价,试验结果见表2。

改性磷石膏复合材料中不同类型的重金属浸出测定值均比较小,其中重金属铬、锰、锌和铜的含量分别为0.02、0.01、0.03和0.06 mg/L,均明显低于污水排放限值和Ⅲ类地下水排放限值,而重金属镉、砷和镍均未检出。分析原因可能是由于改性磷石膏复合材料中各组分之间产生了较好地胶结作用,使复合材料的内部结构较为稳定,有效抑制了重金属的扩散运移,使其能够稳定地存在于材料内部,不会对周围土壤和地下水环境造成污染。以上研究结果表明改性磷石膏复合材料的环保性能较好。

表2 改性磷石膏复合材料环保性能测试结果

Table 2 Environmental performance test results of modified phosphogypsum composite materials

重金属类型	测定结果/(mg/L)	污水排放限值/(mg/L)	Ⅲ类地下水排放限值/(mg/L)
铬	0.02	≤1.5	≤0.05
镉		≤0.1	≤0.005
锰	0.01	≤2.0	≤0.1
砷		≤0.5	≤0.01
镍		≤1.0	≤0.05
锌	0.03	≤2.0	≤1.0
铜	0.06	≤0.5	≤1.0

3 结论

将电石渣、生石灰、磷石膏和分散剂进行混合搅拌以及陈化后,制备出改性磷石膏,然后将其与矿渣粉、水泥、固化剂和水进行混合,即制备出适用于高速公路路基工程的改性磷石膏复合材料。得出以下主要结论:

(1) 随着改性磷石膏掺量的逐渐增大,复合材料的无侧限抗压强度、内摩擦角和黏聚力均呈现出逐渐减小的趋势,而软化系数则呈先增大后减小的趋势,推荐改性磷石膏的最佳掺量为15%,此时改性磷石膏复合材料的力学性能和耐水性能较强。

(2) 改性磷石膏掺量为15%的复合材料抗干湿循环能力和抗冻融循环能力均比较强,干湿循环40

材料科学

次或者冻融循环 80 次后复合材料的强度损失率和质量损失率均比较低, 能够满足雨水较多以及寒冷地区高速公路路基工程施工的需求。

(3) 改性磷石膏掺量为 15% 的复合材料环保性能较好, 重金属镉、砷和镍未检出, 铬、锰、锌、铜检测结果均低于污水排放限值和Ⅲ类地下水排放限值, 不会对高速公路周围土壤或者地下水造成污染威胁。

参 考 文 献

- [1] 乐群力. 磷石膏对水泥稳定碎石基层性能影响研究 [J]. 合成材料老化与应用, 2019, 48 (5): 91-95, 106.
- [2] 吴泳霖, 陈建军, 张伟, 等. 不同气氛下磷石膏热脱水特性及动力学比较研究 [J]. 化学工程师, 2022, 36 (3): 16-20.
- [3] 孟文慧, 宋少民. 无熟料胶凝材料胶砂与混凝土性能的试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (1): 32-38.
- [4] 戴取秀, 胡瑶, 马丽萍, 等. 改性磷石膏对污泥重金属迁移变化的影响机制 [J]. 中国环境科学, 2024, 44 (9): 5063-5076.
- [5] 桑安, 曹俊雅, 张莉昕, 等. 磷石膏固废资源化利用技术及应用前景 [J]. 现代化工, 2025, 45 (1): 34-41.
- [6] 邹庆余, 周理, 胡松, 等. 纤维增强磷石膏轴心受拉应力-应变曲线研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (4): 53-58.
- [7] 王飞, 马明全, 王鹏. 冻融循环作用下水泥+磷石膏改良湿陷性黄土力学特性试验 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (3): 93-98.
- [8] 冷曼希, 朱钰, 严继康, 等. 工业废料磷石膏结晶特征与矿物浮选性能研究 [J]. 无机盐工业, 2025, 57 (3): 108-115.
- [9] 龙崎钧, 吴琴, 陶佳, 等. 高掺量改性半水磷石膏墙体材料力学性能研究 [J]. 无机盐工业, 2025, 57 (4): 89-96.
- [10] 张家豪, 赵丽华, 高奥东, 等. 水泥稳定大掺量改性磷石膏的制备与性能研究 [J]. 公路, 2024, 69 (8): 107-113.
- [11] 胡彪, 吴赤球, 吕伟, 等. 改性磷石膏矿渣水泥在混凝土和路基材料中的应用研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2022 (4): 94-99.
- [12] 肖心, 李敬伟, 侯祥山, 等. 固废基硫铝系高活性材料改性磷石膏制备路面基层材料试验研究 [J]. 环境卫生工程, 2023, 31 (4): 63-69.
- [13] 黄绪泉, 蔡家伟, 赵小蓉, 等. 硅酸钠改性磷石膏道路稳定材料性能及固化机理 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (12): 4471-4479.
- [14] 赵丽华, 张家豪, 高奥东, 等. 基于硅酸钠与熟石灰改性的水泥稳定磷石膏性能研究 [J]. 四川水泥, 2025 (2): 4-7.
- [3] 李朝阳, 王迎超, 刘洋, 等. 侵入接触型隧道突泥涌水危险性评估的变权-靶心贴适度模型 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2019, 50 (11): 2773-2782.
- [4] LI L P, TU W F, SHI S H, et al. Mechanism of water inrush in tunnel construction in karst area [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016, 7 (sup1): 35-46.
- [5] 韩伯鲤, 张文昌, 杨存奋. 新型地质力学模型材料 (MIB) [J]. 武汉水利电力学院学报, 1983 (1): 11-17.
- [6] 马芳平, 李仲奎, 罗光福. NIOS 模型材料及其在地质力学相似模型试验中的应用 [J]. 水力发电学报, 2004 (1): 48-51.
- [7] 胡晶. 含软弱夹层隧道围岩渗流破坏机理及围岩压力计算方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [8] 尹相杰. 复杂环境条件下新型流固耦合模型相似材料的研制及其应用 [D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [9] 刘欣宇, 刘爱华, 李夕兵. 高围压条件下含充填裂隙类岩石水渗流试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (7): 1390-1398.
- [10] XU Z L, LUO Y B, CHEN J X, et al. Mechanical properties and reasonable proportioning of similar materials in physical model test of tunnel lining cracking [J]. Construction and Building Materials, 2021, 300, 123960.
- [11] 袁荣宏, 白杰, 吴桂芬. 水泥土渗透系数随围压变化的试验研究 [J]. 水利水运工程学报, 2012 (5): 13-17.
- [12] 张改玲, 王雅敏. 高围压下砂土的渗透特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2014, 35 (10): 2748-2754, 2786.
- [13] YANG M Z, YANG Y, ZHAO B. Study on the proportion of conglomerate similar materials based on the orthogonal test [J]. Shock and Vibration, 2021, 2021.
- [14] LIANG D X, JIANG Z Q, ZHU S Y, et al. Experimental research on water inrush in tunnel construction [J]. Natural Hazards, 2016, 81 (1): 467-480.

(上接第 38 页)