

粉煤灰基胶凝材料固化硫酸盐渍土机理研究

李宏亮¹, 张杰¹, 于浩², 程寅^{2*}, 李天彬¹, 马义傲¹, 胡瑞¹, 李钦栋², 骆丽珍¹, 史宏宇², 刘尊青³

(1. 新疆交通建设集团股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830026; 2. 交通运输部科学研究院, 北京 100029; 3. 新疆农业大学, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:【目的】为解决新疆地区利用粉煤灰基胶凝材料高效处治硫酸盐渍土路基问题, 需揭示粉煤灰基固废固化硫酸盐渍土机理。【方法】本文采用粉煤灰、高炉矿渣、电石渣等固废材料制备粉煤灰基胶凝材料固化剂, 并用其固化硫酸盐渍土, 研究固化土强度及水化物种类和生成量的变化规律, 揭示固化剂固化硫酸盐渍土的机理。【结果】研究表明: (1) 在固化剂掺量为 10% 的情况下, 随着盐渍土中含盐量增长, 固化土强度逐渐降低, 固化土中的钙矾石 (简称 AFt) 生成量逐渐增加, 而 AFm-SO₄²⁻ 盐的生成量则逐渐降低。 (2) 盐渍土的含盐量由 5% 增加至 20% 时, 固化土 28 d 强度降低了 2.43 MPa, 固化土中的 AFt 生成量占比由 0.5% 增至 22.0%, 而 AFm-SO₄²⁻ 盐的生成量占比则由 6% 降至 2%。 (3) 对含盐量 15% 和 20% 的土样 YT15 和 YT20, 随固化剂掺量的增加, 固化土强度也逐渐增强, 固化土中的 AFt 生成量先增加后降低, 而 AFm-SO₄²⁻ 盐的生成量则逐渐增长。 (4) 当固化剂掺量分别达到 10% 和 15% 时, 固化土强度和 AFm-SO₄²⁻ 盐生成量的增长速率加快, 而此时也是 AFt 生成量由增加转为降低的拐点。综合上述实验结果, 固化剂固化硫酸盐渍土的机理为: 粉煤灰、高炉矿渣水化生成的 Al(OH)₃ 离子可将硫酸盐渍土中的 SO₄²⁻ 离子转化为 AFm-SO₄²⁻ 盐, 大幅降低 AFt 的生成量, 从而强化了 AFm-SO₄²⁻ 盐填充固化土孔隙的作用, 大幅削弱了 AFt 膨胀破坏固化土胶结结构的作用, 实现固化土强度增长。【结论】本文结果可为推动煤电行业固废大规模资源化利用提供科学依据。

关键词: 粉煤灰基固废; 硫酸盐渍土; 电石渣; 固化机理; 钙矾石; AFm-SO₄²⁻ 盐

中图分类号: TK09; X773

文章编号: 1674-8069(2026)05-0718-11

文献标志码: A

DOI 编号: 10.19944/j.epetp.1674-8069.2026.05.004

[引用本文格式] 李宏亮, 张杰, 于浩, 等. 粉煤灰基胶凝材料固化硫酸盐渍土机理研究[J]. 电力科技与环保, 2026, 42(5): 718-728.

Li Hongliang, Zhang Jie, Yu Hao, et al. Mechanism of solidifying sulfate saline soil using fly ash-based cementitious materials[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2026, 42(5): 718-728.

Mechanism of solidifying sulfate saline soil using fly ash-based cementitious materials

Li Hongliang¹, Zhang Jie¹, Yu Hao², Cheng Yin^{2*}, Li Tianbin¹, Ma Yi'ao¹, Hu Rui¹, Li Qindong², Luo Lizhen¹, Shi Hongyu², Liu Zunqing³

(1. Xinjiang Transportation Construction Group Co., Ltd., Urumqi 830026, Xinjiang China; 2. China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China; 3. Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang China)

Abstract: 【Objective】To address the issue of efficiently treating sulfate-stained soil roadbeds in Xinjiang region using fly ash-based solid waste materials, it is necessary to reveal the mechanism of solidifying sulfate-stained soil with fly ash-based solid waste. 【Method】In this paper, fly ash, blast furnace slag, calcium carbide slag and other solid waste materials are used to prepare fly ash-based cementitious material curing agent, which is used to solidify sulfate saline soil. The strength of solidified soil and the change law of hydrate type and production amount are studied, and the mechanism of curing agent solidifying sulfate saline soil is revealed. 【Results】The results showed that: (1) when the dosage of the solidifying agent was fixed at 10%, with the increase of the salt content in the saline soil, the strength of the solidified soil gradually decreased, the generation amount of ettringite (AFt) in the solidified soil gradually increased,

收稿日期: 2026-04-03 录用日期: 2026-06-20

Received: 2026-04-03 Accepted: 2026-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52268072); 交通运输部绿色低碳交通强国建设专项试点任务(交办规划函[2024]1356号)

while the generation amount of AFm-SO_4^{2-} salt gradually decreased. (2) When the salt content in the soil increased from 5% to 20%, the 28-day strength of the solidified soil decreased by 2.43 MPa, the proportion of AFt generation in the solidified soil increased from 0.5% to 22%, while the proportion of AFm-SO_4^{2-} salt generation decreased from 6% to 2%. (3) For the soil samples YT15 and YT20 with salt contents of 15% and 20%, respectively, as the dosage of the solidifying agent increased, the strength of the solidified soil gradually increased, the generation amount of AFt in the solidified soil first increased and then decreased, while the generation amount of AFm-SO_4^{2-} salt gradually increased. (4) When the dosages of the solidifying agent reached 10% and 15% respectively, the growth rate of the strength of the solidified soil and the generation amount of AFm-SO_4^{2-} salt accelerated, and this was also the turning point when the generation amount of AFt changed from increasing to decreasing. Based on above results, the mechanism of fly ash, blast furnace slag and calcium carbide slag solidifying sulfate saline soil is proposed as follows: the CAH generated by the hydration of fly ash and blast furnace slag can convert the SO_4^{2-} ions in the sulfate saline soil into AFm-SO_4^{2-} salt, significantly reducing the generation amount of AFt, thereby strengthening the role of AFm-SO_4^{2-} salt in filling the pores of the solidified soil and significantly weakening the role of AFt expansion in destroying the cementation structure of the solidified soil, achieving the growth of the strength of the solidified soil. [Conclusion] The results of this paper can provide a scientific basis for promoting the large-scale resource utilization of solid waste in coal-fired power industry.

Key words: fly ash based solid waste; sulfate salt soil; acetylene slag; stabilized mechanism; ettringite; AFm-SO_4^{2-} salt

0 引言

新疆准东经济技术开发区是依托准东煤田规划建设国家级煤炭、煤电、煤化工产业示范区,每年产生约 120 万 t 的粉煤灰等固废,这些固废目前主要采用填埋或堆存方式进行处置,急需寻求新的固废资源化利用途径^[1-3]。新疆维吾尔自治区是我国盐渍土面积最大的省区,盐渍土面积高达 $1.583 \times 10^{11} \text{ m}^2$,占全区土地面积的近 10%,按含盐种类分类,以硫酸盐渍土为主^[4]。“一带一路”倡议提出以来,以新疆为核心交通枢纽的丝绸之路经济带沿线公路基础设施建设快速推进,越来越多的公路工程需要在盐渍土地区进行建设。由于盐渍土中的盐分会对路基路面材料和结构产生严重影响,导致路基在车辆荷载的作用下产生严重的路基病害。研究表明,在新疆盐渍土地区,公路路基病害类型主要包括溶陷、盐胀、腐蚀、翻浆等^[5-6]。这些路基病害不仅造成公路修缮和养护费用大量增加(仅新疆自治区每年就高达数百亿元),影响公路使用寿命。

固化土技术是基础建设工程中应用面广、适用性强、经济效益和社会效益很高的一种特殊土处理技术,在公路工程中已有应用^[7-9]。该技术是采用水泥、石灰、工业固废等胶凝材料作为固化剂与盐渍土拌和均匀,通过固化剂与盐渍土中的盐分之间、固化剂与土颗粒之间以及不同固化剂组分之间的

一系列物理化学反应,生成稳定的复合盐、胶凝性水化物等水化产物,达到稳定盐渍土中盐分、包裹胶结土颗粒等效果,从而在稳定土中的盐分的同时增强固化土的力学与工程性能,达到盐渍土路基处治的目的^[10-12]。新疆准东经济技术开发区产生的粉煤灰等固废材料本身具有潜在的胶凝性,在合适的激发剂激发并掺加 CaO 含量较高的材料条件下能够体现出胶凝性^[13-15],从而可以作为盐渍土固化剂使用。如能采用这些煤基固废材料作为固化剂用于盐渍土路基处治,则既可解决盐渍土路基处治问题,又为煤基固废资源化利用提供了新路径^[16-20]。

近年来,许多研究者采用粉煤灰、石灰等胶凝材料作为固化剂固化硫酸盐渍土,开展了一系列研究工作。李敏等^[21]采用以粉煤灰和石灰为主要组分的固化剂固化硫酸盐渍土,结合改良盐渍土抗压及抗剪强度实验结果,给出了土体固化参数的最佳组合形式。吕擎峰等^[22]依据石灰粉煤灰固化硫酸盐渍土的抗压强度实验证实,随含盐量增加,固化土的强度先增大后减小,1.8% 含盐量土的抗压强度最高;超过 1.8% 含盐量的土,其强度大幅降低,因为此时土中的盐胀作用占据主导,破坏了土的结构稳定性。Cheng 等^[23]通过不同含盐量土的抗压强度实验证实,石灰固化硫酸盐渍土的抗压强度为盐渍土的 4~5 倍;强度和破坏应变均呈先增大后减小趋势;含盐量越大,土的破坏越严重。在硫酸盐渍土的微观

结构和固化机理方面,周刚^[24]以石灰粉煤灰与水玻璃固化硫酸盐渍土,使用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察到胶结物包裹土颗粒,在土中形成空间网状结构,约束了土团粒的位移。谷留杨等^[25]研究提出,随含盐量增加,黄土状硫酸盐渍土的水化膜变薄、比表面积减小。杨晓华等^[26]通过实验提出,石灰粉煤灰固化硫酸盐渍土中存在针棒状水化产物,这是硫酸盐渍土强度增长的根本原因。张卫兵等^[27]开展了冻融与干湿循环作用下硫酸盐渍土的微观结构分析实验,计算土的孔隙率、孔径和空隙分形维数。结果表明,随含盐量增加,固化土孔隙的孔径集中在3~40 μm ,孔隙率与大孔隙数量的变化基本一致。上述针对粉煤灰、石灰等固化剂固化硫酸盐渍土的力学性质、微观结构与固化机理的研究成果为本文提供了理论基础与支撑。

上述研究采用的硫酸盐渍土固化剂,大多以粉煤灰和石灰为主,采用多种固废材料作为固化剂的研究极少;上述关于硫酸盐渍土固化机理的研究也围绕固化土微观结构和孔隙结构展开的,从固化剂组分与土中的盐发生化学反应的角度分析固化机理的研究也较少。本文首先采用粉煤灰、高炉矿渣和电石渣等固废材料制备粉煤灰基胶凝材料,再用于固化新疆地区硫酸盐渍土。通过宏观力学性能测试和微观水化产物分析,以揭示硫酸盐渍土的固化机理,为该项技术在新疆地区推广应用,实现煤炭、煤电、煤化工行业固废材料大规模资源化利用提供理论支撑。

1 实验方法

1.1 实验材料

1.1.1 固废基胶凝材料

实验所用的固废粉煤灰、电石渣以及生铁冶炼产生的高炉矿渣等工业固废材料取自新疆准东经济技术开发区,其物理性质和化学组成如表1所示。

1.1.2 硫酸盐渍土

由于新疆维吾尔自治区盐渍土中的含盐量基本介于5%~20%^[28],故本文制备含盐量为5%~20%的硫酸盐渍土,开展粉煤灰基胶凝材料固化实验。实验用硫酸盐渍土的制备方法为:将取自新疆准东经济技术开发区的盐渍土(命名为YT)中的盐洗去,再向盐渍土中加入质量百分比分别为5%、10%、15%和20%的无水 Na_2SO_4 制备成不

表1 工业固废的物理性质和化学组成

Table 1 Physical properties and chemical composition of industrial solid waste

工业 固废	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	化学组成/%						
		CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	SO_3	Cl
粉煤灰	350	8.21	54.05	26.31	6.18	0.47	3.81	0.06
高炉矿渣	300	44.06	28.72	15.13	1.23	1.98	0.78	0.02
电石渣	300	88.55	5.71	3.69	0.83	—	—	—

同浓度的硫酸盐渍土(分别命名为:YT5、YT10、YT15和YT20),取自新疆准东经济技术开发区的盐渍土的基本物理力学性质指标如表2所示。

表2 硫酸盐渍土的物理力学性质

Table 2 Physical and mechanical properties of sulfate saline soil

性质 指标	含水率 $\omega/\%$	土颗粒密度 $\rho_s/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	液限 ω_L /%	塑限 ω_P /%	液性指 数 I_L	塑性指 数 I_P
YT	11.60	1.75	19.40	7.50	0.34	11.90

1.2 实验方案

本文所用固化剂为粉煤灰、高炉矿渣和电石渣3种工业固废复配而成。前期预研时,采用不同配比的粉煤灰、高炉矿渣和电石渣来固化取自新疆昌吉州的原状硫酸盐渍土,结果表明当粉煤灰:高炉矿渣:电石渣=4:5:1、固化剂掺量为10%时,固化硫酸盐渍土的28 d无侧限抗压强度可达到2.83 MPa,完全满足道路地基处理和路基填筑的强度要求,故本文所用的固化剂也按此比例配制。

本文首先采用固化剂掺量10%(固化剂与湿盐渍土的质量比)固化上述4种不同浓度的硫酸盐渍土,测试固化土的7 d和28 d无侧限抗压强度变化规律;进而,针对含盐量较高的土样YT15和YT20,分别采用掺量为5%、10%、15%、20%的固化剂进行固化,测试固化土强度的变化规律。在测得上述无侧限抗压强度变化规律的基础上,选取典型配合比的试样,采用XRD、SEM、EDS等微观分析方法,测试固化土中的水化产物种类、生成量,分析固化硫酸盐渍土的机理。具体实验方案如表3所示。

1.3 测试仪器及方法

1.3.1 试件的制备

固化土试样的制备按照《公路工程无机结合料

表 3 固化硫酸盐渍土实验方案
Table 3 Test scheme of solidified sulfate saline soil

固化剂掺量/%	土样编号			
	YT5	YT10	YT15	YT20
5	—	—	GT15-5	GT20-5
10	GT5-10	GT10-10	GT15-10	GT20-10
15	—	—	GT15-15	GT20-15
20	—	—	GT15-20	GT20-20

稳定材料实验规程》(JTG 3441—2024)规定的方法进行。试件尺寸为直径 150 mm、高 150 mm 的圆柱形试件,试件脱模后在标准养护条件下(养护温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,湿度 $(95 \pm 2)\%$)养护至预定的龄期。

1.3.2 无侧限抗压强度测试

无侧限抗压强度测试按照 JTG 3441—2024 规定的方法进行。实验所用压力机为 WDW-100 型微机控制电子万能实验机。以 (10 ± 1) mm/min 速率对试件加载,直至试件破坏。在加压过程中同步记录压缩变形,当试件的压缩变形达到 5% 时没有破坏,则以试件压缩变形 5% 时的荷载为破坏荷载。记录破坏荷载 P_1 ,精确至 10 N。试件的无侧限抗压强度按式(1)计算,计算结果取同组 6 个试样的平均值,精确至 0.01 MPa。同组实验的变异系数应不大于 6%,如不满足,则需要增加试件数量重新进行实验。

$$R_c = P/A \quad (1)$$

式中, R_c 为试件的无侧限抗压强度,MPa; P 为试件破坏时的最大压力,N; A 为试件的截面积, mm^2 。

1.3.3 X 射线衍射(XRD)测试分析

取测定了抗压强度后的试样中心部分的碎块置于 DZF6020 真空干燥箱内, 60°C 烘干至恒重;使用玛瑙碾钵和碾杵,将烘干后的试样在适当压力下碾磨约 5 min,然后放入玛瑙研磨仪进一步研磨,至细度为 200~400 目时,将试样封装入塑料密封袋,放入硅胶干燥器中待用。

XRD 测试采用日本岛津公司生产的 X-600 型 X 射线衍射仪进行,测试得到的图谱可通过 Materials Data Jade 8.0 分析软件进行分析,并由分析软件的寻峰报告得到测试试样的物相组成、衍射峰等指标。为进一步分析固化盐渍土在水化过程中物相组成的演变情况,采用 Rietveld 精修法对固化土的 XRD 谱图进行定量分析,详细的精修步骤参考文献[29]提供的方法进行。通过对比分析不同固化

盐渍土中水化产物的种类和生成量变化规律,揭示硫酸盐渍土的固化机理。

1.3.4 扫描电子显微镜(SEM)和能谱(EDS)测试分析

将样品切割成 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的方形切片并进行真空干燥。经溅射镀金处理后,样品采用导电碳黏合剂固定。测试过程中使用日本株式会社日立制作所生产的 NL-3800 场发射扫描电子显微镜进行观测,该电子显微镜配备了 Xplore 能量色散光谱仪。

2 结果与分析

2.1 固化硫酸盐渍土的无侧限抗压强度

固化剂掺量为 10% 时,不同硫酸盐浓度的固化土的 7 d 和 28 d 强度结果如图 1 所示。不同掺量固化剂的固化土样 YT15 和 YT20 的 28 d 强度如图 2 所示。由图 1 的可知,在固化剂掺量固定为 10% 时,随着土中硫酸盐浓度的增加,固化盐渍土的 7 d 强度和 28 d 强度均呈现逐渐降低的趋势,特别是硫酸盐浓度高于 10% 后,固化土的 7 d 和 28 d 强度下降的幅度有所加快。硫酸盐浓度由 5% 增加到 10% 时,固化土的 7 d 和 28 d 强度分别只下降了 0.22 MPa 和 0.68 MPa;而硫酸盐浓度由 15% 增加到 20% 时,固化土的 7 d 和 28 d 强度分别下降了 0.60 MPa 和 0.91 MPa。总的来看,当含盐量由 5% 增加至 20% 时,固化土的 7 d 和 28 d 强度分别下降了 1.22 MPa 和 2.43 MPa。

由图 2 可知,对于硫酸盐浓度为 15% 和 20% 的盐渍土样,固化土的 28 d 无侧限抗压强度随着固化

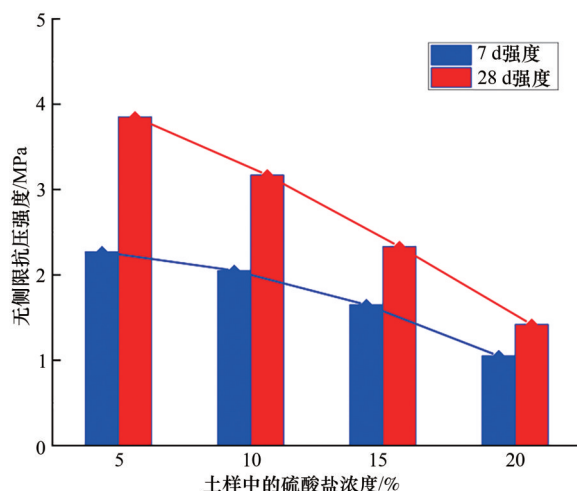


图 1 固化土强度随含盐量变化曲线

Figure 1 Curve of strength of solidified soil changing with salt content

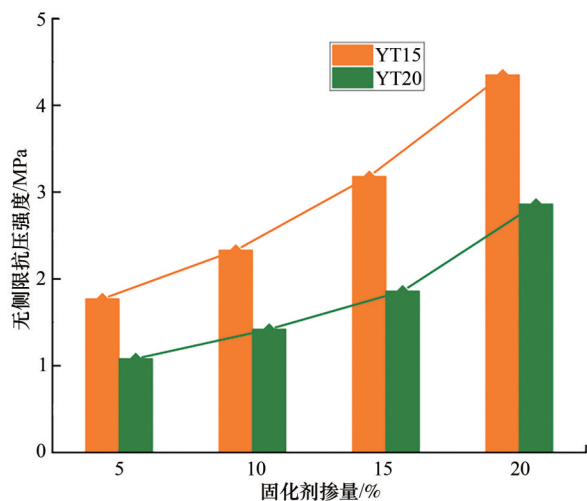


图2 固化土强度随固化剂掺量变化曲线

Figure 2 The strength curve of solidified soil with the change of curing agent content

剂掺量的增加而增加。针对不同掺量的土样,当固化剂掺量由5%增长到10%时,固化土强度只增长了0.56 MPa;当固化剂掺量超过10%后,固化土强度增长开始加快,固化剂掺量由10%增加到15%和由15%增长到20%时,固化土强度分别增长了0.85 MPa和1.17 MPa;而对硫酸盐浓度20%的土样YT20而言,当固化剂掺量由5%增长到10%和由10%增长到15%时,固化土强度分别只增长了0.34 MPa和0.44 MPa;当固化剂掺量超过15%后,固化土强度增长开始加快,固化剂掺量由15%增长到20%时,固化土强度增长了1.0 MPa。

2.2 固化硫酸盐渍土中水化产物的XRD分析结果

对固化剂掺量同样为10%的固化土试样(GT5-10、GT10-10、GT15-10和GT20-10的28 d龄期的试样)进行XRD测试分析,得到的XRD测试结果如图3所示。

基于各类水化产物的衍射峰面积,采用定量分析的方法计算各类水化产物占有水化产物的质量百分比,绘制占比图,结果如图4所示。图4中的“无定形物质”主要指未反应的粉煤灰、高炉矿渣中的玻璃态物质和弱结晶铁矿等惰性成分,“硅铝类水化产物”主要是生成的水化硅酸钙($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, C-S-H)、水化硅铝酸钙($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, C-A-S-H)和水化铝酸钙($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, C-A-H)等。

对不同固化剂掺量、固化含盐量为15%和20%

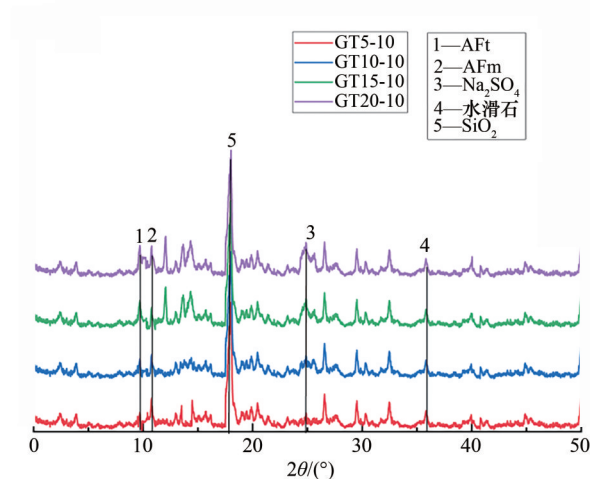


图3 固化剂掺量10%的固化土XRD图谱

Figure 3 The XRD pattern of solidified soil with 10% curing agent content

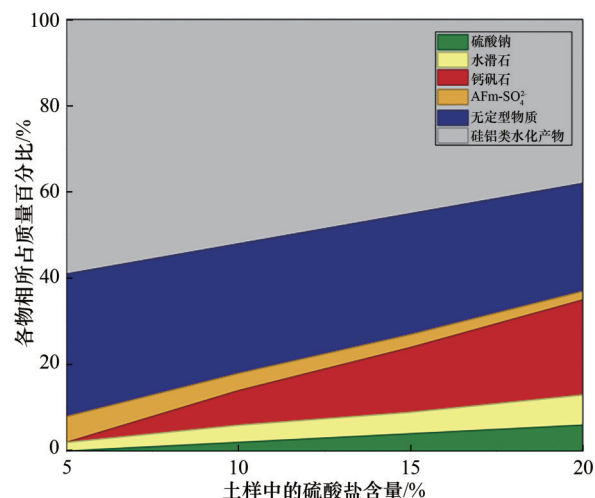


图4 固化剂掺量10%的固化土中的水化物占比

Figure 4 The proportion of hydrates in solidified soil with 10% curing agent content

的固化土试样,28 d龄期时进行XRD图谱分析,并采用上述同样的方法计算得到各水化产物的质量百分比。含盐量15%的YT15系列各土样的XRD图谱结果如图5所示,水化产物占比如图6所示;含盐量20%的YT20系列各土样的XRD图谱结果如图7所示,水化产物占比如图8所示。

图3、图5、图7的XRD测试结果表明,采用粉煤灰、矿渣和电石渣制备的固化剂固化硫酸盐渍土后,其水化产物主要有水滑石、钙矾石、AFm- SO_4^{2-} 、硅铝质水化产物以及无定形物质等,且可以看出硫酸盐渍土中的 SO_4^{2-} 离子主要以钙矾石($3\text{CaO} \cdot$

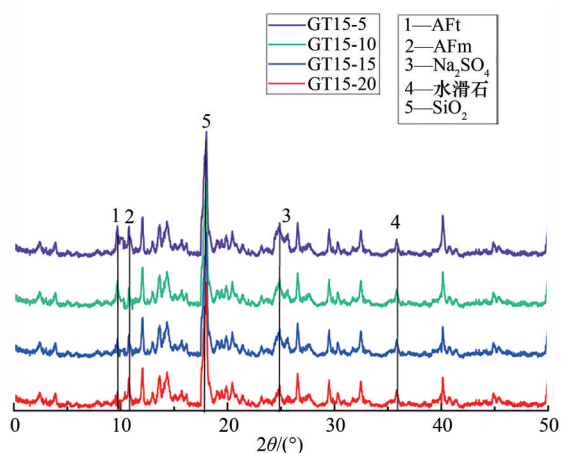


图5 YT15系列固化土XRD图谱

Figure 5 XRD patterns of YT15 series solidified soil

$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$, AFt)、 AFm-SO_4^{2-} ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) 的形式存在。

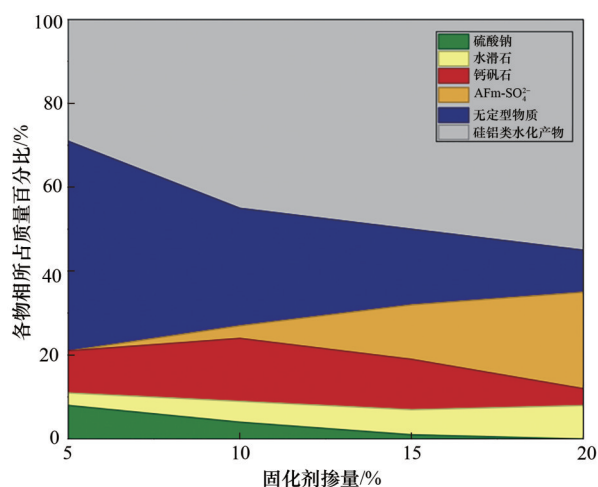


图6 YT15系列固化土中的水化物占比

Figure 6 The proportion of hydrates in YT15 series solidified soil

由图3和图4可知,在固化剂掺量固定为10%的情况下,随着土中硫酸盐浓度的增加,固化土中的AFt生成量逐渐增加,而 AFm-SO_4^{2-} 的生成量逐渐减少。当土中硫酸盐浓度为5%时, AFm-SO_4^{2-} 的生成量占比近6%,而AFt的生成量占比只有0.5%。而当土中硫酸盐浓度增加到20%时,固化土中的AFt生成量占比提升至22%,而 AFm-SO_4^{2-} 的生成量占比降至2%左右。

由图5和图6可知,对于硫酸盐浓度15%的土样YT15,随着固化剂掺量的增加,固化土中的AFt

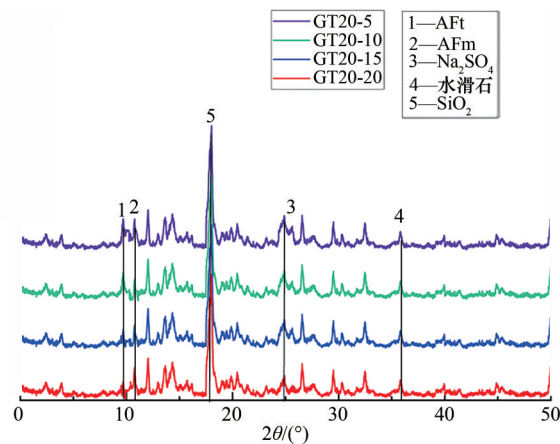


图7 YT20系列固化土XRD图谱

Figure 7 XRD patterns of YT20 series solidified soil

生成量占比呈现先增加后减小的变化趋势,拐点对应固化剂掺量为10%;当固化剂掺量由10%增加至20%时,固化土中的AFt生成量占比由15%下降至4%。 AFm-SO_4^{2-} 的生成量占比随固化剂掺量的增加呈现逐渐增大的趋势,当固化剂掺量达到10%后,其增长速率显著加快。当固化剂掺量由10%增至20%时,固化土中 AFm-SO_4^{2-} 的生成量占比由3%迅速增至23%。

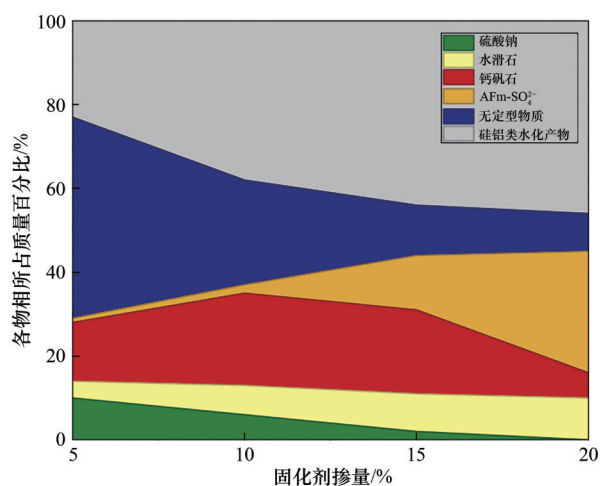


图8 YT20系列固化土中的水化物占比

Figure 8 The proportion of hydrates in YT20 series solidified soil

由图7和图8可知,对于硫酸盐浓度20%的土样YT20,固化土中的AFt生成量占比也呈现先增加后减小的变化趋势,当固化剂掺量达到15%时,固化土中的AFt生成量占比开始迅速下降,固化剂

掺量由15%增至20%时,固化土中的AFt生成量占比由20%降至6%。AFm-SO₄²⁻的生成量占比随固化剂掺量的增加呈现逐渐增大的趋势,当固化剂掺量达到15%后,其增长速率显著加快。当固化剂掺量由15%增至20%时,固化土中AFm-SO₄²⁻的生成量占比由13%迅速增至29%。

2.3 固化硫酸盐渍土中水化产物的SEM和EDS分析结果

经测试分析得到固化剂掺量为10%时,含盐量为5%和20%的固化土试样(GT5-10和GT20-10)的SEM照片和EDS分析结果分别如图9和

图10所示。

由图9和图10可知,当固化剂掺量固定为10%时,含盐量5%的固化土试样GT5-10的水化产物中含有大量的AFm-SO₄²⁻盐,而AFt几乎没有;而在含盐量20%的固化土试样GT20-10的水化产物中含有大量的AFt,而AFm-SO₄²⁻盐几乎没有。EDS分析结果也表明,试样GT20-10中的S元素含量几乎是试样GT5-10的4倍,而相应的其他元素则占比有所降低。这些测试分析结果进一步印证了2.2节中图3和图4所示的固化剂掺量10%的固化土试样的XRD分析结果。

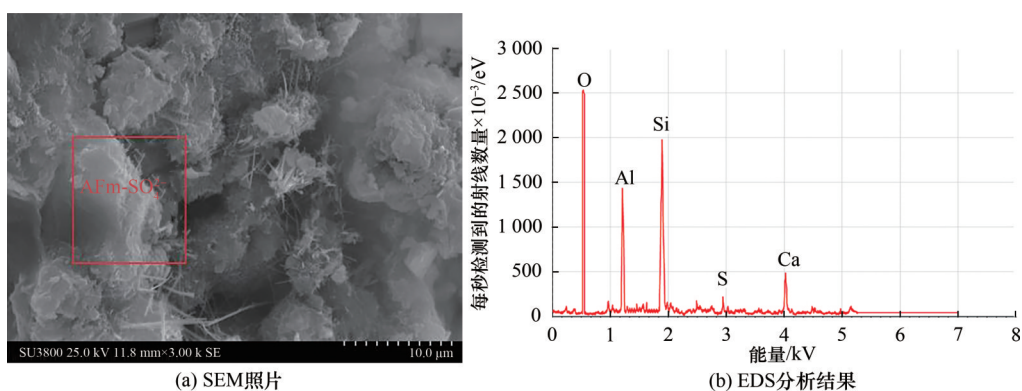


图9 固化土试样GT5-10的SEM照片和EDS分析结果

Figure 9 SEM photos and EDS analysis results of solidified soil sample GT5-10

对于土样YT-20,其固化剂掺量为5%和20%的固化土试样(GT20-5和GT20-20)的SEM照片和EDS分析结果分别如图11和图12所示。

由图10和图11可知,对于含盐量为20%的固化土试样,固化剂掺量为5%时,固化土试样GT20-5的水化产物中含有大量的AFt,而AFm-SO₄²⁻盐几乎没有;而在固化剂掺量20%时,固化土试样GT20-

20的水化产物中含有大量的AFm-SO₄²⁻盐,而AFt几乎没有。EDS分析结果也表明,试样GT20-20中的Si和Al元素含量也多于试样GT20-5。这些测试分析结果进一步印证了2.2节中图7和图8所示的含盐量为20%的固化土试样的XRD分析结果。

2.4 盐渍土的含盐量对固化土中水化产物的影响

本文采用的固化剂主要由粉煤灰、高炉矿渣和

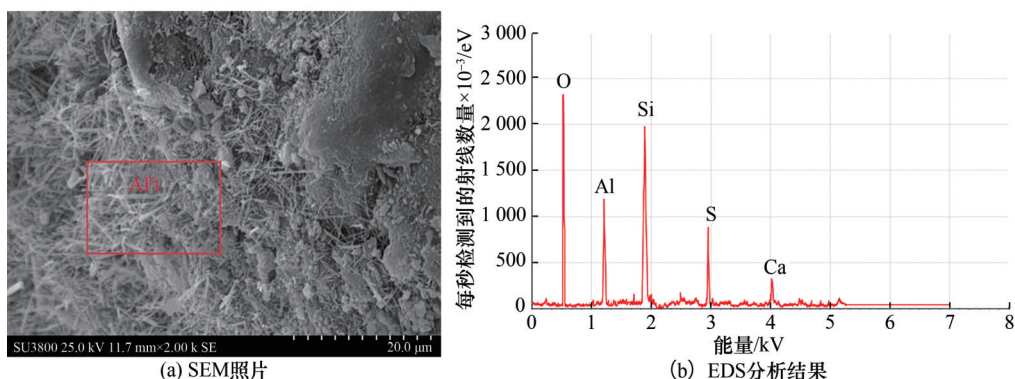


图10 固化土试样GT20-10的SEM照片和EDS分析结果

Figure 10 SEM photos and EDS analysis results of solidified soil sample GT20-10

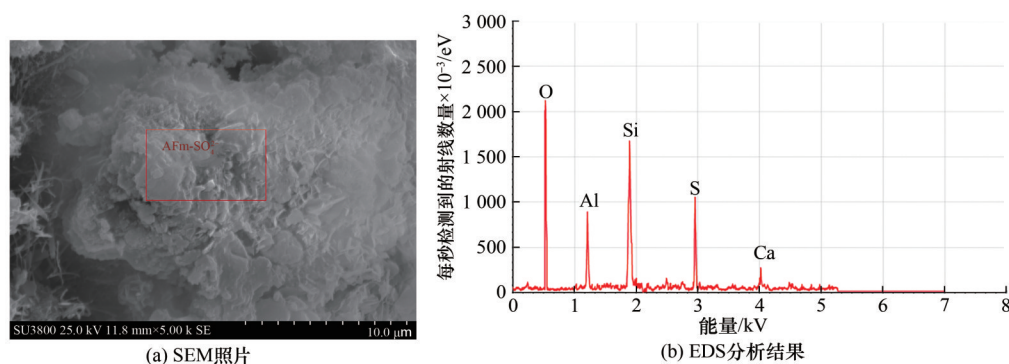


图 11 固化土试样GT20-5的SEM照片和EDS分析结果

Figure 11 SEM images and EDS analysis results of solidified soil sample GT20-5

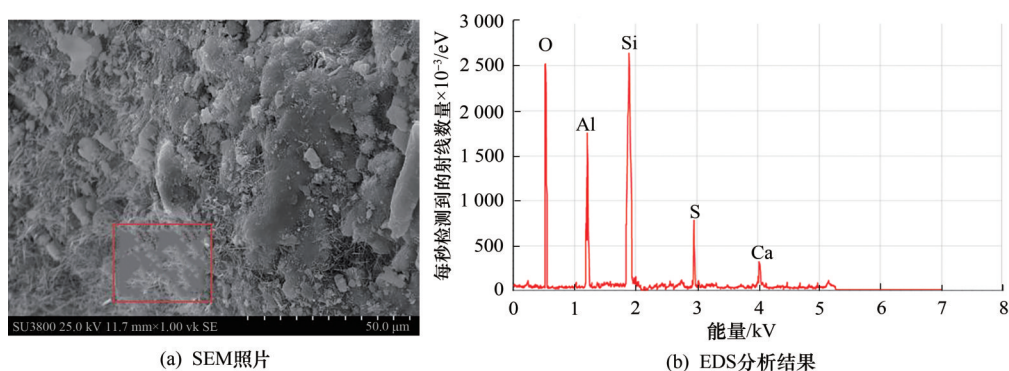
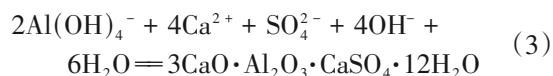
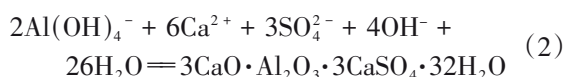


图 12 固化土试样GT20-20的SEM照片和EDS分析结果

Figure 12 SEM photos and EDS analysis results of GT20-20 solidified soil sample GT20-20

电石渣组成。电石渣的主要成分是CaO,自身呈强碱性,可以作为粉煤灰和高炉矿渣水化的激发剂,并可直接参与粉煤灰的水化反应^[30-31]。粉煤灰和高炉矿渣在电石渣作用下可水化生成C-S-H、C-A-S-H等胶凝性水化产物,起到包裹胶结土颗粒和填充固化土孔隙的作用,从而为固化土提供基础强度。当土样为硫酸盐渍土时,盐渍土中的 SO_4^{2-} 离子会与粉煤灰和高炉矿渣水化产生的 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 离子发生化学反应生成AFt和 AFm-SO_4^{2-} 盐,化学反应方程式如式(2)和(3)所示。当固化土中的 SO_4^{2-} 离子较充足时,生成物以AFt为主;当固化土中的 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 较充足时,生成物以 AFm-SO_4^{2-} 盐为主。当固化土中的硫酸盐含量增加时,则固化土中的AFt生成量增加;当固化土中的硫酸盐含量一定,而固化剂掺量逐渐增加($\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 离子逐渐增加)时,则固化土中的 AFm-SO_4^{2-} 盐生成量增加



对固化剂掺量固定为10%的固化土试样,当含盐量仅为5%时,固化土中的粉煤灰、高炉矿渣水化生成的 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 离子较盐渍土中的 SO_4^{2-} 离子更充足,而盐渍土中的 SO_4^{2-} 离子量相对较少,因此固化土中的 SO_4^{2-} 离子主要转化为 AFm-SO_4^{2-} 盐。当盐渍土的含盐量继续增加时,由于固化土中的 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 离子的生成量不变,固化土中的AFt的生成量逐渐增加,而 AFm-SO_4^{2-} 盐的生成量逐渐减少。

2.5 固化剂掺量对固化土中水化产物的影响

对含盐量分别为15%和20%的YT15和YT20固化土,当固化剂掺量仅为5%时,固化土中的粉煤灰、高炉矿渣水化生成的 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 离子的量较少,而土中的 SO_4^{2-} 离子是足量的,因此固化土中主要生成AFt。随着固化剂掺量逐渐增加,固化土中的 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 离子的生成量逐渐增加,AFt生成量也逐渐增加,并逐渐达到最大值;当固化剂掺量继续增

加时,固化土中的AFt生成量开始逐渐减少,而AFm-SO₄²⁻盐的生成量则逐渐增长。

2.6 固化硫酸盐渍土的强度增长机理

在粉煤灰、高炉矿渣和电石渣固化土中,粉煤灰和高炉矿渣在电石渣作用下水化生成胶凝性水化产物C-S-H和C-A-S-H等,可以包裹胶结土颗粒和填充固化土孔隙,从而为固化土提供基础强度,电石渣还能对固化土液相提供碱性环境,保证C-S-H和C-A-S-H的稳定存在。当固化土中含有硫酸盐时,Al(OH)₄⁻离子与SO₄²⁻离子发生反应生成AFt,AFt生成过程中其体积会膨胀1.2倍。当AFt生成量很小时,其生成过程中的膨胀作用可填充少量固化土中的孔隙。但是,当AFt的生成量达到一定量时,AFt的膨胀作用则会破坏C-S-H和C-A-S-H形成的固化土胶结结构,过量时则导致固化土强度下降^[12]。而当固化土中的SO₄²⁻离子不足或Al(OH)₄⁻离子过量时,固化土中主要生成AFm-SO₄²⁻盐,其膨胀量仅为AFt膨胀量的5%~10%,因此AFm-SO₄²⁻盐主要起到填充固化土孔隙、增强固化土强度的作用。

在固化剂掺量固定为10%的情况下,当盐渍土的含盐量仅为5%时,固化土中的AFt生成量很少,而SO₄²⁻离子则主要转化为AFm-SO₄²⁻盐,有益于固化土强度增长。而随着固化土的含盐量增加,其中生成的AFt的量也逐渐增加,AFt膨胀破坏固化土胶结结构的作用逐渐增强,因此固化土强度逐渐降低。

对含盐量分别为15%和20%的YT15和YT20固化土,当固化剂掺量仅为5%时,固化土中的AFt生成量较多,而AFm-SO₄²⁻盐的量很少,AFt膨胀主要起破坏固化土胶结结构的作用,因此固化土强度较低。当固化剂掺量增加时,固化土中AFt的生成量减少而AFm-SO₄²⁻盐的生成量增加,即AFt膨胀破坏固化土胶结结构的作用减弱而AFm-SO₄²⁻盐填充固化土孔隙的作用增强,因此固化土强度逐渐增长。当固化剂掺量增加到一定量时,AFm-SO₄²⁻盐填充固化土孔隙的作用达到最大,而AFt的膨胀破坏固化土胶结结构的作用则极其微弱,因此固化土强度显著提高。

综合上述分析可以得出,由于粉煤灰、高炉矿渣中的Al₂O₃含量较高(是普通硅酸盐水泥的3~5倍),其水化生成的Al(OH)₄⁻离子可将硫酸盐渍土中的SO₄²⁻离子转化为AFm-SO₄²⁻盐,而大幅降低AFt

的生成量,从而强化了AFm-SO₄²⁻盐填充固化土孔隙的作用,大幅削弱了AFt膨胀破坏固化土胶结结构的作用,实现固化土强度增长。

3 结论

本文采用粉煤灰、高炉矿渣和电石渣等固废制备粉煤灰基胶凝材料,并用来固化硫酸盐渍土,探索固化土强度和固化土中的水化物种类和生成量变化规律,揭示其固化硫酸盐渍土的机理。主要得到以下结论:

1)在固化剂掺量固定为10%的情况下,盐渍土中的含盐量增加,固化土强度逐渐降低,固化土中的AFt生成量逐渐增加,而AFm-SO₄²⁻盐的生成量则逐渐降低。盐渍土的含盐量由5%增加至20%时,固化土28 d强度降低了2.43 MPa,固化土中的AFt生成量占比由0.5%增至22.0%,而AFm-SO₄²⁻盐的生成量占比则由6.0%降至2.0%。

2)对含盐量分别为15%和20%的土样YT15和YT20,随固化剂掺量的增加,固化土强度也逐渐增强,固化土中的AFt生成量先增加后降低,而AFm-SO₄²⁻盐的生成量则逐渐增长。当固化剂掺量分别达到10%和15%时,固化土强度和AFm-SO₄²⁻盐生成量的增长速率加快,而此时也是AFt生成量由增加转为降低的拐点。

3)综合上述实验结果,提出粉煤灰、高炉矿渣和电石渣固化硫酸盐渍土的机理:粉煤灰、高炉矿渣水化生成的Al(OH)₄⁻离子可将硫酸盐渍土中的SO₄²⁻离子转化为AFm-SO₄²⁻盐,同时大幅降低AFt的生成量。这强化了AFm-SO₄²⁻盐填充固化土孔隙的作用,大幅削弱了AFt膨胀破坏固化土胶结结构的作用,从而实现固化土强度增长。本文结果可为推动煤炭、煤电、煤化工行业固废材料大规模资源化利用提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 赵秉庆,李泯材,王依敬,等.新疆高碱煤掺烧及结渣特性实验研究[J]. 电力科技与环保, 2025, 41(5): 759-768.
Zhao Bingqing, Li Mincai, Wang Yijing, et al. Experimental study of combustion and slag characteristics of blended Xinjiang high alkali coal[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2025, 41(5): 759-768.
- [2] Mahmoud S, Mohammadreza B. Effect of bacteria on the self-healing ability of fly ash concrete[J]. Construction and Building

- Materials, 2023, 364: 129956.
- [3] 姚斌, 胡文博, 余亚成, 等. 高岭土对准东煤中不同赋存形态钠释放的影响[J]. 电力科技与环保, 2019, 35(4): 14–18.
Yao Bin, Hu Wenbo, Yu Yacheng, et al. Effect of Kaolin on sodium release of different forms in Zhundong coal[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2019, 35(4): 14–18.
- [4] Li W W, Jin L, Li Q U. Study on establishing early warning model of soil salinization disaster[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 446(3): 032049.
- [5] 王小林, 王英, 何睿举, 等. 风积沙改良硫酸盐渍土的强度特性研究[J]. 公路, 2026, 71(2): 40–46.
Wang Xiaolin, Wang Ying, He Ruiju, et al. Research on the strength characteristics of sulfate soil modified by aeolian sand[J]. Highway, 2026, 71(2): 40–46.
- [6] 杨晓华, 张莎莎, 刘伟, 等. 粗颗粒盐渍土工程特性研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(5): 22–40.
Yang Xiaohua, Zhang Shasha, Liu Wei, et al. Research progress on engineering properties of coarse-grained saline soil[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(5): 22–40.
- [7] 季节, 梁森, 韩秉烨, 等. 中国道路工程中土壤固化技术综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(2): 47–66.
Ji Jie, Liang Ben, Han Bingye, et al. Review on soil solidified technologies in road engineering in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(2): 47–66.
- [8] Ahmed A. Compressive strength and microstructure of soft clay soil stabilized with recycled bassanite[J]. Applied Clay Science, 2015, 104: 27–35.
- [9] 陈锐, 郝若愚, 李笛, 等. 碱激发材料固化低液限粉黏土路用性能及抗冻融特性研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(2): 327–337.
Chen Rui, Hao Ruoyu, Li Di, et al. Study on road performance and freeze–thaw resistance of alkali activated material stabilized low-liquid-limit silty clay[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(2): 327–337.
- [10] 李宏波, 李盛, 于广云, 等. 超硫酸盐渍土固化强度及冻融特性实验研究[J]. 工程科学与技术, 2024, 56(6): 147–160.
Li Hongbo, Li Sheng, Yu Guangyun, et al. Experimental study on curing strength and freeze–thaw characteristics of supersulphate saline soil[J]. Advanced Engineering Sciences, 2024, 56(6): 147–160.
- [11] 易耀林, 李晨, 孙川, 等. 碱激发矿粉固化连云港软土实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1820–1826.
Yi Yaolin, Li Chen, Sun Chuan, et al. Test on alkali-activated ground granulated blast-furnace slag(ggbs) for Lianyungang soft soil stabilization[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1820–1826.
- [12] 周国钧. 岩土工程治理新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Zhou Guojun. New technology of geotechnical engineering treatment [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [13] 陈宏伟, 吕文婷, 王晓清, 等. 不同温度下高岭土对 PbCl_2 与 NaCl 的竞争吸附[J]. 电力科技与环保, 2023, 39(2): 157–165.
Chen Hongwei, Lyu Wenting, Wang Xiaoqing, et al. Competitive adsorption of PbCl_2 and NaCl on Kaolin at different temperatures [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2023, 39(2): 157–165.
- [14] 孙剑, 占先春, 李兵, 等. 粉煤灰制备地聚物复合材料低速冲击下力学性能[J]. 电力科技与环保, 2026, 42(1): 15–24.
Sun Jian, Zhan Xianchun, Li Bing, et al. Mechanical properties of geopolymers prepared by fly ash under low-velocity impact[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2026, 42(1): 15–24.
- [15] 王剑文, 郭力, 魏佳豪, 等. 机械化学改性粉煤灰脱汞性能研究[J]. 电力科技与环保, 2025, 41(5): 691–701.
Wang Jianwen, Guo Li, Wei Jiahao, et al. Research on mercury removal performance of mechanochemically modified fly ash[J]. Electric Power Environmental Protection, 2025, 41(5): 691–701.
- [16] 李继洪, 刘刚, 王硕, 等. 一种环保型泥浆处理装置在输电线路灌注桩基础施工中的应用[J]. 电力科技与环保, 2021, 37(1): 14–17.
Li Jihong, Liu Gang, Wang Shuo, et al. The application of an environmental protection mud treatment unit in the filling pile foundation for transmission line[J]. Electric Power Environmental Protection, 2021, 37(1): 14–17.
- [17] Wild S, Kinuthia J M, Jones G I, et al. Suppression of swelling associated with ettringite formation in lime stabilized sulphate bearing clay soils by partial substitution of lime with ground granulated blastfurnace slag (GGBS) [J]. Engineering Geology, 1999, 51(4): 257–277.
- [18] Zhao H D, Chang J Q, Miao Z F, et al. Application of coal-based solid waste artificial soil in the restoration of saline alkali land-taking the saline alkali land restoration of the Emao River in China as an example[J]. Heliyon, 2024, 10: e37095.
- [19] Wang H, Liu C F, Zhu C Y, et al. Resource recycling and ceramsite utilization of coal-based solid waste: A review[J]. Minerals, 2025, 15(9): 948.
- [20] Wang W X, Ling H B, Hu X Y, et al. A review of coal-based solid waste cementitious materials and their applications[J]. Journal of Building Engineering, 2025, 111: 113405.
- [21] 李敏, 于禾苗, 杜红普, 等. 冻融循环对二灰和改性聚乙烯醇固化盐渍土力学性能的影响[J]. 岩土力学, 2022, 43(2): 489–498.
Li Min, Yu Hemiao, Du Hongpu, et al. Mechanical properties of saline soil solidified with the mixture of lime, fly ash and modified polyvinyl alcohol under freeze–thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(2): 489–498.
- [22] 吕擎峰, 贾梦雪, 王生新, 等. 含盐量对固化硫酸盐渍土抗压强度的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(3): 718–724.
Lyu Qingfeng, Jia Mengxue, Wang Shengxin, et al. Effect of salt content on compressive strength of solidified sulphate saline soil [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(3): 718–724.
- [23] Cheng S K, Wang Q, Wang N, et al. Study on mechanical

properties of saline soil and evaluation of influencing factors[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2021, 35(2): 04021002.

- [24] 周刚. 固化硫酸盐渍土微观特征研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
Zhou Gang. Study on microscopic characteristics of solidified sulphate saline soil[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
- [25] 谷留杨. 硫酸盐含量对黄土物理力学性质的影响研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
Gu Liuyang. Study on the influence of sulfate content on physical and mechanical properties of loess[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [26] 杨晓华, 王利鑫, 张莎莎, 等. 无机材料改良硫酸盐渍土微观机理分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(2): 129-137.
Yang Xiaohua, Wang Lixin, Zhang Shasha, et al. Analysis on microscopic mechanism of sulfate saline soil improved by inorganic materials[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(2): 129-137.
- [27] 张卫兵, 雷过, 周瑞璞, 等. 冻融作用下固化盐渍土的强度劣化及微观机理研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(20): 8869-8876.
Zhang Weibing, Lei Guo, Zhou Ruipu, et al. Strength deterioration of consolidated saline soils under freeze-thaw action and micromechanics [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(20): 8869-8876.
- [28] 任泽世. 全固废固化硫酸盐渍土水盐迁移与盐-冻胀变形特性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2025.
Ren Zeshi. Study on water-salt migration and salt-frost heave deformation characteristics of all-solid waste solidified sulfate saline soil[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2025.
- [29] 黄芳仪. 硅酸盐和磷酸盐 LTCC 材料及其应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2024.
Huang Fangyi. Research on silicate and phosphate LTCC materials and their applications[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024.
- [30] Latifi N, Vahedifard f, Chazanfari e, et al. Sustainable usage of calcium carbide residue for stabilization of clays[J]. Juurnal of Materials inCivil Engineering, 2018, 30(6): 04018099.
- [31] Sharanya A G, Thyagaraj T, Heeralal M. Influence of carbide slag stabilization on the short-term and long-term resilient modulus of clayey subgrade[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2025, 18(4): 964-978.



第一作者简介:李宏亮(1984—),男,正高级工程师,主要从事公路建设与养护过程中的智能化、绿色化新技术等方面的研究,278750367@qq.com;



张 杰(1989—),男,工程师,主要从事公路工程施工领域智能化建造与绿色化新技术研究,以及节能环保新材料、新工艺的开发与实施等方面的研究,401834415@qq.com;



于 浩(1983—),男,工程师,主要从事特殊岩土处治、道路工程新材料等方面的研究,403012700@qq.com;



通信作者简介:程 寅(1984—),男,副研究员,主要从事特殊岩土处治、固体废弃物资源化利用等方面的研究,306876662@qq.com;



李天彬(1981—),男,高级工程师,主要从事公路工程施工领域智能化建造与管理、绿色化等新技术研究,以及节能环保新材料、新工艺的开发与实施等方面的研究,845182788@qq.com;



马义傲(1997—),男,工程师,主要从事公路工程等方面的研究,271239917@qq.com;



胡 瑞(1992—),男,工程师,主要从事公路工程新材料、新工艺研发及相关技术成果转化等方面的研究,447529853@qq.com;



李钦栋(1994—),男,工程师,主要从事道路工程新材料及施工技术等方面的研究,717560814@qq.com;



骆丽珍(1994—),女,工程师,主要从事公路材料与结构等方面的研究,1453655950@qq.com;



史宏宇(1996—),女,助理研究员,主要从事道路路基路面施工工艺等方面的研究,shy_96@163.com;



刘尊青(1985—),男,正高级工程师,主要从事路基路面,固废材料资源化应用,交通安全等方面的研究,liuzunqing@163.com。

(编辑 林正根)