

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.08.007

铜渣改良膨胀土的工程性质及环境效应

吴杰, 查甫生, 康博

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:城市化进程中,工业固体废弃物铜渣过度堆存引发了一系列土地占用及环境污染问题。文章以铜渣部分替代传统改良剂石灰来改良膨胀土,通过一系列宏观、微观试验对改良土的工程特性及微观结构进行研究,揭示铜渣改良膨胀土的作用机理,同时结合潜在生态风险指数法对改良土的环境效应进行综合评价。研究表明:铜渣作为改良剂可有效降低膨胀土的胀缩性及压缩性,显著改善土体强度特性;相较于未添加铜渣的试样,6%铜渣掺量下的改良膨胀土强度可达1.2 MPa,满足路用标准。微观试验结果则揭示了改良剂通过填充作用、阳离子交换、火山灰反应等一系列物理化学作用使土体结构致密化的过程。同时,将石灰-铜渣复合胶凝材料与膨胀土的相互作用划分为物理填充阶段、初次水解水化阶段、二次水化阶段。环境效应评价结果表明石灰-铜渣在改良膨胀土过程中的环境无害性。该研究证明了铜渣作为土壤稳定剂的效果十分显著,在资源化利用中具有广阔的应用前景。

关键词:铜渣;膨胀土;工程性质;微观结构;环境效应

中图分类号:TU42

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2025)08-1052-08

Engineering properties and environmental effects of copper slag modified expansive soil

WU Jie, ZHA Fusheng, KANG Bo

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Excessive stockpiling of copper slag, an industrial solid waste, has caused a series of land occupation and environmental pollution problems in the process of urbanization. In this paper, copper slag combined with traditional stabilizer lime was used to treat expansive soil. The engineering properties and microstructure of modified expansive soil were investigated by a series of macroscopic and microscopic tests, and the stabilization mechanism was illustrated. The evaluation of environmental effects was made in combination with the Hakanson potential ecological risk index method. Results show that copper slag can effectively reduce the swelling and compressibility of expansive soil and significantly improve its strength. Compared with the specimen without copper slag, the strength of the specimen with 6% copper slag can reach 1.2 MPa, which meets the road standard. Microscopic test results reveal the process of densification of soil structure through a series of physicochemical effects such as physical filling, cation exchange and pozzolanic reaction. Meanwhile, the interaction mechanism between lime-copper slag composite cementitious material and expansive soil is divided into the following three stages: physical filling stage, initial hydrolysis and hydration stage, and secondary hydration stage. The environmental effect evaluation results prove the environmental harmlessness of lime-copper slag in the process of stabilizing expansive soil. The study demonstrates that copper slag is highly effective as a soil stabilizer and has a broad application prospect in resource utilization.

Key words: copper slag; expansive soil; engineering properties; microstructure; environmental effects

收稿日期:2023-04-03;修回日期:2023-05-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42030710)

作者简介:吴杰(1998—),男,安徽马鞍山人,合肥工业大学硕士生;

查甫生(1978—),男,安徽枞阳人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师;

康博(1988—),女,河北武安人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail: kangbo@hfut.edu.cn.

随着我国城市化进程的推进和经济的快速增长,城区内固体废弃物的过度堆存引发了环境污染、土地占用、全球变暖等一系列环境安全问题^[1-2]。铜渣是铜冶炼过程中产生的工业废渣,在我国长江中下游地区大量堆存、广泛分布。根据《中国大宗工业固体废弃物综合利用产业发展报告 2018—2019 年度》可知,仅 2018 年铜冶炼渣产量约为 $2\ 668 \times 10^4$ t,约为当年有色冶炼渣产量的 $1/2$ ^[3]。铜渣具有耐磨性、稳定性、良好流动性等优点,其组成成分含有大量的火山灰物质,与普通硅酸盐水泥相似,可以看作是 $\text{FeO-CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 氧化物体系。但大量堆存的铜渣中有毒、有害元素会造成工程地质灾害和环境污染^[4]。目前,国内外对铜渣的资源化利用途径主要包括有价金属的回收、建筑材料和路基填筑等。文献^[5]研究发现,对铜渣干燥和细磨后通过添加石灰和石膏补充钙质及硫酸盐成分可显著提高其胶凝性能;文献^[6]通过掺入不同比例的铜渣替换水泥制备胶凝材料,对胶凝材料的强度特征、微观物相、成分进行分析,结果表明铜渣可以有效增强胶凝材料的抗折、抗压强度,微结构体系显示其密实度也有显著提升。铜渣资源化利用过程中有毒、有害元素是否能够得到控制是制约铜渣资源化利用的关键因子。文献^[7]通过生命周期评价方法对铜渣制蒸压砖的环境影响进行分析,结果指出铜渣资源化方案虽能够取得一定的效果,但资源化过程中的人体毒性、富营养化、酸化等多种环境影响类别还存在重大威胁。铜渣的高效绿色资源化利用仍然面临较大挑战。

膨胀土是一种具有胀缩性、裂隙性、超固结性的特殊土体^[8-9],在干湿循环或冻融循环等外界环境条件下,膨胀土吸水膨胀、失水收缩,土体结构变化剧烈,易造成地基失稳、滑坡等地质灾害,经济损失巨大^[10]。化学改良法因其易于实施和广泛的适用性,是最常用的膨胀土改良方法之一^[11-12]。当前,石灰、水泥已成为膨胀土改良中应用最为广泛的材料^[13],然而石灰、水泥的生产伴随着高能耗及高碳排放^[14]。近些年,采用固体废弃物替代水泥或石灰进行膨胀土改良是常见且

低碳环保的方法^[15]。文献^[16]探讨利用石灰-粉煤灰作为添加剂改良合肥膨胀土的可行性,研究结果表明随着掺灰率的增加,膨胀土的胀缩性显著下降,养护后的土体强度显著增长;文献^[17]研究石灰及生物质灰渣改良膨胀土的微观结构特征,研究发现以片状结构为主的膨胀土在添加灰渣之后微观结构胶结成柱状、块状、颗粒状,继续添加石灰之后变成棉絮状;文献^[12]在冻融循环条件下对钢渣复合改良膨胀土进行研究,结果表明钢渣对膨胀土的抗膨胀性能有显著提升,在冻融循环条件下仅有较小的体积收缩;文献^[18]通过试验发现,硅灰与水泥质量比为 1:1 时,膨胀土的工程性质得到了有效改善,且在干湿循环作用下,硅灰水泥改良膨胀土也有着优异的表现。目前,国内外多数学者对于工业固体废物在膨胀土改良中的运用已经开展了诸多研究,都取得了良好的效果。长江沿岸由于工业布局和特殊的地质成因,膨胀土和铜渣在同一地区大量存在,利用铜渣改良膨胀土为铜渣的就地资源化利用和膨胀土的低碳低能耗改良提供了途径,然而利用铜渣对膨胀土进行固化的研究仍较少。特别是铜渣在其应用过程中具有较大的重金属滤出风险,结合环境效益评价铜渣在膨胀土改良中的运用鲜有报道,因此对面临环境风险的铜渣改良膨胀土的综合评价研究十分必要。

本文以铜渣部分替代石灰作为改良剂,通过系列室内试验研究其对膨胀土的宏观工程性质的影响规律,并通过试验对石灰-铜渣改良膨胀土的微观结构变化进行研究。结合试样的宏观、微观特征揭示石灰-铜渣复合胶凝材料与膨胀土相互作用的机理。同时结合毒性浸出试验,对石灰-铜渣改良膨胀土进行环境风险评价,为石灰-铜渣改良膨胀土的工程应用提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

本试验所用膨胀土取自安徽省淮南市,其相关化学组成及物理性质,见表 1、表 2 所列。

表 1 膨胀土和铜渣的化学成分及其组成

		%						
膨胀土	成分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	TiO_2	MgO
		w	60.26	16.58	9.55	3.53	1.69	1.19
铜渣	成分	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	CaO	ZnO	As_2O_3	Cr_2O_3
	w	51.49	31.16	3.64	2.35	2.00	0.73	0.12

膨胀土主要化学组成为 SiO_2 和 Al_2O_3 , 主要矿物组成为石英、伊利石、高岭石及蒙脱石。

铜渣是一种从铜铈熔炼和精炼中获得的工业废渣。试验所用铜渣由位于安徽省铜陵市的某有色冶炼厂提供, 其化学成分和物理特性见表 1、表 2 所列。主要矿物组成为铁橄榄石、磁铁矿及大量不定型玻璃体, 铜渣颗粒多棱角分明, 边缘锋利。试验所用石灰呈粉末状, 粒径大小为 100 目, 氧化钙质量分数高达 85%~90%。

表 2 材料物理性质指标

材料	参数	指标
膨胀土	颜色	黄褐色
	比重	2.71
	液限/%	59.30
	塑限/%	26.80
	塑性指数	32.50
	最大干密度/(g/cm^3)	1.75
	最优含水率/%	19.1
	自由膨胀率/%	60.00
铜渣	pH 值	7.53
	颜色	黑色
	比重	3.81
	pH 值	7.62

1.2 试验方法

1.2.1 试样制备

结合石灰土相关研究^[16,19], 固定掺入 2% 的石灰, 再将铜渣以不同比例 (0、4%、6%、8%、10%)^[20-21] 与石灰混合形成复合胶凝材料, 最后将复合材料与膨胀土均匀混合。试样干密度控制为最大干密度的 95%, 并控制试样含水率保持一致, 均为 19%。每项试验至少准备 3 个平行样。试样置于养护箱中, 温度控制在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 以及 95% 的相对湿度。试验养护龄期根据一般石灰土试样的固化时间选定为 7、28 d。

1.2.2 室内岩土工程测试

依据标准 JTG E40—2007, 在实验室对改良土各项工程性质进行研究^[22], 主要包括无侧限抗压强度 (unconfined compression strength, UCS) 试验、无荷载膨胀率试验、线缩率试验及压缩特性试验。

1.2.3 矿物学及微观结构分析

本次研究选取具有代表性的样品进行一系列微观试验。采用 X 射线衍射仪 (X-ray diffractometer, XRD) 实现对改良土的矿物学表征和鉴定。采用扫描电子显微镜 (scanning electron mi-

croscope, SEM) 对改良土的微观结构及形貌特征进行观察分析。通过压汞试验 (mercury-in-pressure, MIP) 在微观尺度上对不同铜渣掺量的改良土孔隙特征进行分析。

1.2.4 环境效益分析

本研究毒性浸出试验参考国家环境保护总局发布相关标准^[23], 浸提液选取 pH 值为 2.64 ± 0.05 的醋酸溶液。利用电感耦合等离子光谱发射仪测定改良土淋滤液中重金属元素质量浓度, 并通过 Hakanson 潜在生态风险指数法对改良土的环境效益进行评估。

Hakanson 潜在生态风险指数法反映铜渣改良膨胀土的重金属敏感性, 考虑到污染物不同、生物有效性的差异性, 计算公式为:

$$E_i^r = T_i^r C_i^r \quad (1)$$

$$R_1 = \sum_{i=1}^n E_i^r = \sum_{i=1}^n T_i^r C_i^r \quad (2)$$

其中: R_1 为总潜在生态风险系数; E_i^r 为重金属元素 i 的环境风险系数; T_i^r 为重金属元素 i 的响应系数; C_i^r 为重金属元素 i 的单因子污染指数。

2 工程性质及微观特征

2.1 工程性质指标变化规律

2.1.1 无侧限抗压强度

铜渣对试样无侧限抗压强度的影响及增强系数如图 1 所示。

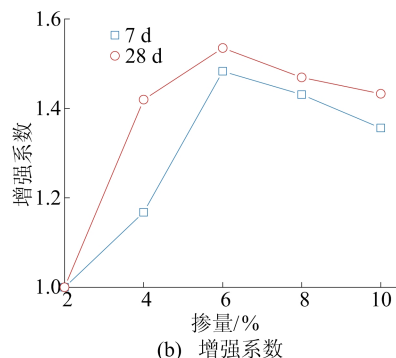
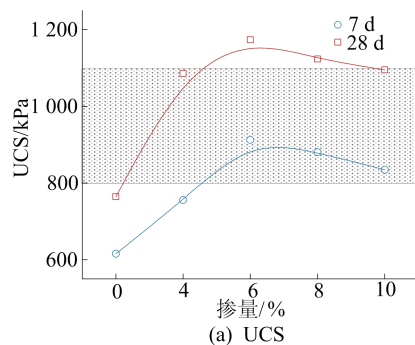


图 1 铜渣对试样 UCS 和增强系数的影响

由图 1 可知,随着钢渣掺量增加,改良土 UCS 显著升高,当掺量达到 6% 时,达到峰值。28 d 养护的试样 UCS 峰值可达 1.2 MPa,7、28 d 养护下 UCS 增长幅度分别为 48.3%、53.5%。当掺入铜渣时,对于膨胀土改良的增强系数(即掺加铜渣与不掺铜渣的土体强度之比)可达 1.4~1.5,可节约石灰 67%~75%。养护龄期对改良土 UCS 有着积极影响,不同龄期的 UCS 有不同程度的提升。

通过对比《公路路面基层施工技术规范》(JTJ 034—2000)对石灰工业废渣改良土的抗压强度的相关规定^[24],改良土能够满足高级公路及一级公路基层建设要求(图 1a 阴影部分),这对路基设计及工程应用具有重要意义。

2.1.2 胀缩特性

铜渣在不同养护龄期下对改良土胀缩特性的影响如图 2 所示。

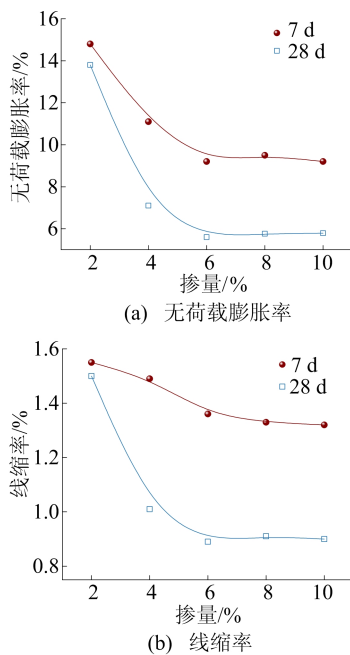


图 2 铜渣对改良土强度特性及胀缩特性的影响

由图 2 可知,铜渣的加入大幅降低了土体的膨胀性。无荷载膨胀率在铜渣掺量为 6% 时变化曲线存在 1 个谷值,28 d 养护的试样无荷载膨胀率仅为 5.6%。铜渣的加入对膨胀土的失水收缩也存在显著抑制作用。6% 铜渣掺量下经 28 d 养护试样线缩率仅为 0.9%,降低幅度达 40.7%。

2.1.3 压缩特性

铜渣掺量对改良土的压缩特性影响规律如图 3 所示。

由图 3 可知,随着铜渣掺量的增加,改良土的压缩系数显著下降,养护 28 d、掺量为 6% 时达到

最低,养护 28 d 改良土压缩系数降低了 51.1%。28 d 养护龄期条件下更大掺量试样的压缩系数均小于 0.1 MPa^{-1} ,属于低压缩性土。铜渣的再掺入没有持续降低压缩系数,而是处于稳定状态。这是由于水化产物对试样有很好的胶结作用,使得改良土的压缩特性得到显著改善。

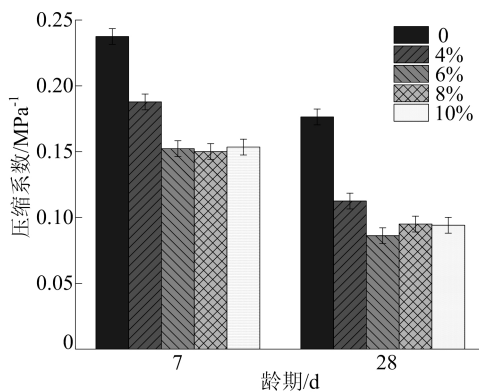


图 3 铜渣对改良土压缩系数的影响

2.2 微观结构特征

2.2.1 矿物成分分析

改良土工程性质的变化与矿物学特征的变化息息相关。28 d 养护不同掺量铜渣改良土矿物分析结果及最优掺量不同养护龄期下改良土矿物演变规律如图 4 所示。

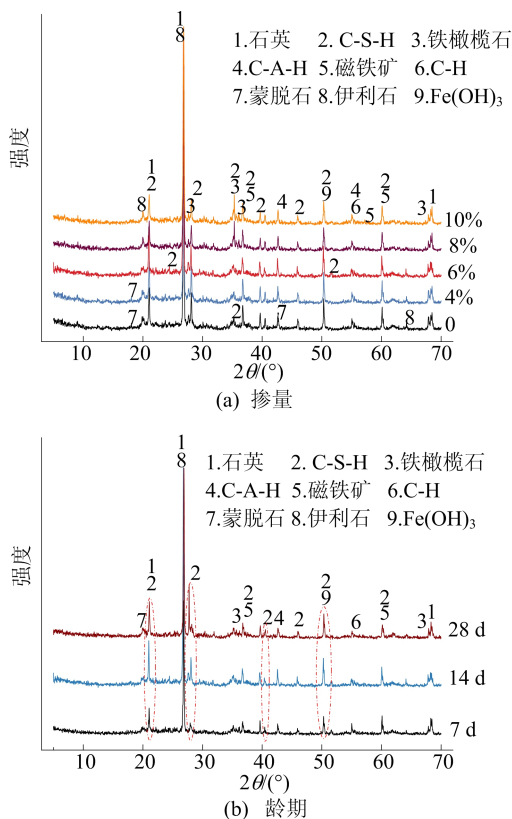


图 4 改良土矿物特征演变规律

铜渣的增加使土中黏土矿物的衍射峰强度降低,这在微观层面上解释了胀缩性下降的原因。试样反应生成的水化产物峰值强度不断增高,这些水化产物可对土体工程性质产生积极影响。当铜渣掺量较大时,改良土中会出现较多的铁橄榄石和磁铁矿的衍射峰。

而从不同龄期的改良土矿物组成变化来看,7、14 d 的养护龄期改良土矿物组成差异不大,主要为反应生成的水化产物以及一些铁质矿物。但经 28 d 养护的改良土试样中水化产物又有明显的增加,这与碱性环境下铜渣在土体中发生的二次水化有关。

2.2.2 微观结构演变规律

使用 SEM 对改良土的微观形貌特征进行观察分析,结果如图 5 所示。

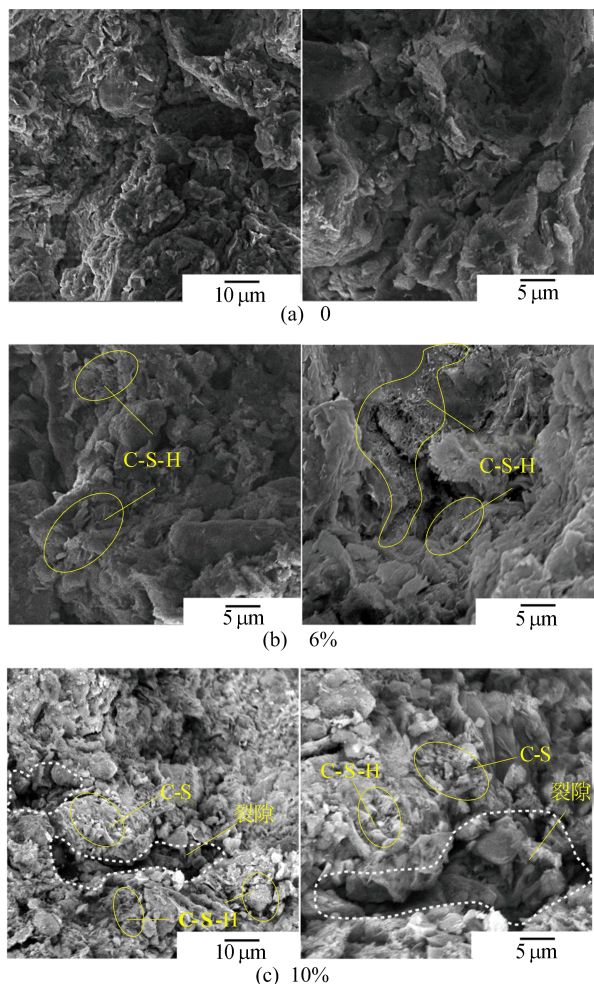


图 5 微观形貌特征图

从图 5 可以看出:未掺入铜渣的土体结构相对比较松散;随着铜渣的加入,可以观察到土颗粒之间的孔隙被铜渣充填,土体结构变得更加

致密。其次,火山灰作用形成的蜂窝状及针、棒状的水化产物增加,有效地粘结了土壤颗粒,使得土体整体性增强。当铜渣的掺量较大时,虽然可以观察到有水化产物的生成,但是也明显观察到了改良土的裂隙以及较多的铜渣颗粒。这是由于铜渣作为外加剂掺入势必伴随着土体基质被替换,而土体基质成分的过度替换会对土体的整体结构性造成破坏。另外,铜渣颗粒之间堆积有效接触面积较小,从而对工程性质造成负面影响。

2.2.3 孔隙特征演变规律

通过压汞试验研究铜渣对改良土孔隙分布及演变规律的影响,如图 6 所示。

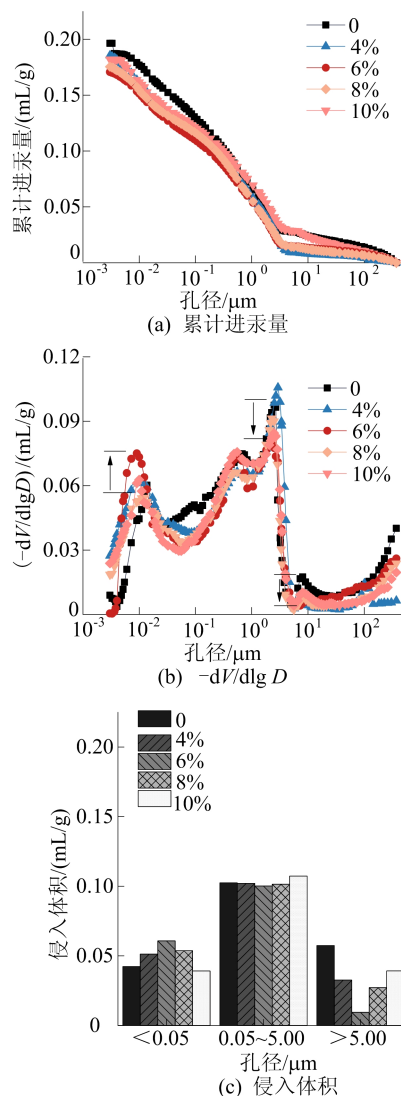


图 6 孔隙特征演变规律

由图 6a、图 6b 可知,随着铜渣掺量的增加,改良土中汞的累计侵入体积先减小后增大。在铜渣掺量 6% 时,累计进汞量最少,此时土中总孔隙

最少。通过分析对数差异侵入体积可以看出,铜渣的加入使得大孔隙密度明显降低,小孔隙密度明显增加,而中孔隙的数量并无明显变化。铜渣掺量为 10% 时,试样小孔隙数量有所下降而大孔隙数量则有所升高。这表明铜渣可通过物理化学反应填充膨胀土中的大孔隙,使改良土联结更加紧密,整体性增强。但铜渣的大量掺入不仅没有进一步起到改善作用,而且具有劣化效应。

为进一步研究改良土孔隙特征的影响,将测得的孔径大小进行分类,如图 6c 所示,分别为小孔($<0.05 \mu\text{m}$)、中孔($0.05 \sim 5.00 \mu\text{m}$)、大孔($>5.00 \mu\text{m}$)。铜渣的加入对中孔隙的影响不大,但显著降低了大孔隙的数量及增加了小孔隙数量。改良土体内的孔隙总体积随铜渣的加入呈先减小后有所增大的趋势,6% 掺量减少幅度为 17.4%。由此可见水化产物有效地联结了土体颗粒,减少土体孔隙,从而增加土体整体性。

通过将土体总孔隙体积与宏观工程性质进行拟合,结果如图 7 所示。

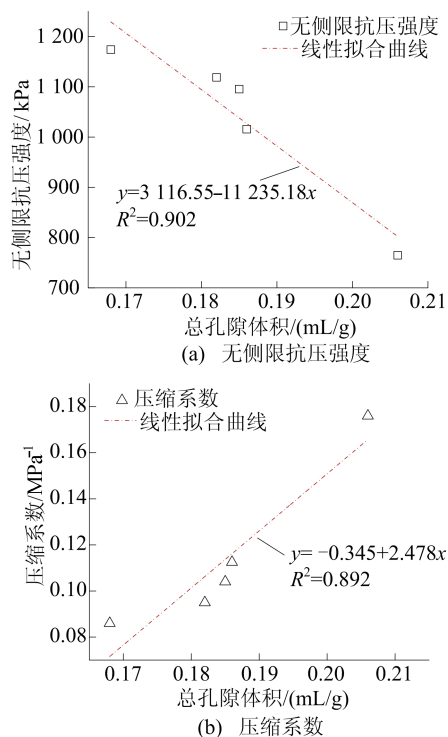


图 7 孔隙体积与工程参数的拟合曲线

改良土的工程性质与孔隙特征之间存在紧密的联系,对应线性关系拟合度接近 0.90。结合微观试验结果可知,复合材料通过物理化学反应降低了土体孔隙体积,从而提高了土体强度、降低了压缩性。

2.2.4 膨胀土改良机理分析

以铜渣来部分替代石灰,一方面石灰为铜渣提供了丰富的钙源,可起到激发作用,还可为水化反应提供较好的碱性环境;另一方面,铜渣部分替代对减少碳排放有益,且为固废资源化利用提供新途径。结合宏观、微观试验,可将石灰-铜渣复合材料改良膨胀土的机理概括为:

1) 填充作用,试验所用铜渣均被充分研磨以获得较大的比表面积。SEM 试验结果可以观察到铜渣能够很好地填充在膨胀土孔隙之中。铜渣可以改善土体的颗粒级配,使土体更加密实^[25];同时铜渣颗粒之间的刚性接触,一定程度上可以提高土体的强度^[26]。

2) 初次水解及水化,石灰为土体的反应体系营造出碱性环境,该环境下高浓度高价阳离子将进一步增强离子交换能力^[27]。石灰-铜渣胶凝材料水解成的 Ca^{2+} 高价阳离子与黏土颗粒表面可交换的 Na^+ 和 K^+ 发生替代和交换^[28]。离子交换的结果改变了黏土颗粒周围的电荷密度,使得颗粒表面的双电层厚度变薄、土体聚拢从而降低土体颗粒的分散程度,有效改善改良土的工程性质。在碱性水化环境下,黏土矿物中 SiO_2 和 Al_2O_3 的缓慢溶解后,大部分与 Ca^{2+} 发生反应,生成不溶于水的水化硅酸钙及水化铝酸钙^[16,29]。这能够有效降低膨胀土的孔隙率,提高土体界面的黏结力。

3) 二次水化作用,在 OH^- 的持续作用下,玻璃相 $\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$ 中的 Fe^{2+} 开始脱落。 Fe^{2+} 一方面能够进一步促进离子交换作用,另一方面, OH^- 对 Fe^{2+} 络合能力很强,会形成具有较强黏聚力的 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 或 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 凝胶体,从而团聚土体,提高土体强度。

$[\text{SiO}_4]$ 在 OH^- 的作用下,会解聚最终形成 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 单体,在高 Ca^{2+} 的环境中能够生成 C-S-H 胶凝产物密填在膨胀土中^[30]。虽然铜渣的胶凝性与硅酸盐水泥相比来说比较弱,但其为水化产物提供了充裕的空间,使得水化产物分布更均匀,显著改善了膨胀土微观结构,使膨胀土的物理力学性能大大提高。

铜渣掺入过多时,土体基质成分被过多替代,土体完整性被破坏,导致结构强度降低。铜渣颗粒呈不规则棱角状,颗粒之间有效接触面积较小^[31],其过度堆叠使土体在外力作用下更易发生破坏,导致改良土中大孔隙数量增加而小孔隙降低,从而对工程性质造成影响。

3 环境效应分析

3.1 毒性浸出试验

本次研究采用毒性浸出程序,对淋滤液中的重金属元素进行测试,并与中国土壤环境质量建筑用地土壤污染风险管控标准(GB 36600—

2018)^[31]中规定的重金属离子的相关限值进行对比,结果见表 3 所列。从表 3 可以看出,试样中部分重金属元素被固化,并且各元素质量比均未达到环境限值,且相差甚多。这很好地证明了铜渣在膨胀土改良过程的环境无害性以及膨胀土处置中的可行性。

表 3 淋滤液中重金属元素质量比和标准限值

单位:mg/kg

掺量/%	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Ba	Pb
0	0.527	0.462	1.726	0.461	0.213	0.009	25.742	0.150
4	0.442	0.539	14.256	3.274	1.156	0.051	21.220	0.325
6	0.432	0.602	30.824	4.536	1.780	0.054	8.409	0.516
8	0.521	0.668	45.456	6.358	3.256	0.078	7.561	1.126
10	0.465	0.725	49.263	7.248	4.355	0.082	6.532	1.568
标准限值	3.000	150.000	200.000	250.000	20.000	20.000	100.000	400.000

3.2 Hakanson 潜在生态风险指数法

Hakanson 潜在生态风险指数法能够反映改良土的重金属敏感性,通过引入重金属毒性响应系数,使评价结果更符合重金属毒理作用。

改良土中重金属离子的环境风险系数及潜在生态风险指数见表 4 所列。改良剂的增加会导致生态风险指数增大,其中 Cu 和 As 的风险指数对掺量敏感性较大。铜渣改良土的潜在生态风险指数处于轻微生态风险水平。证明了铜渣作为改良剂是绿色环保的,对铜渣的资源化利用具有重要意义。

表 4 改良土的环境风险系数及潜在生态风险指数

掺量/%	0	4	6	8	10
$E_r(\text{Cr})$	0.352	0.295	0.288	0.347	0.310
$E_r(\text{Ni})$	0.015	0.018	0.020	0.022	0.024
$E_r(\text{Cu})$	0.043	0.356	0.771	1.136	1.232
$E_r(\text{Zn})$	0.002	0.013	0.018	0.025	0.029
$E_r(\text{As})$	0.107	0.578	0.890	1.628	2.178
$E_r(\text{Cd})$	0.014	0.077	0.080	0.117	0.123
$E_r(\text{Pb})$	0.002	0.004	0.006	0.014	0.020
R_i	0.534	1.341	2.074	3.291	3.915

4 结 论

本文研究了铜渣在膨胀土稳定中的潜在应用,通过将铜渣以不同掺量与膨胀土均匀混合,具体探究改良土的宏观工程性质和微观结构特征,以揭示改良效果并阐明相互作用机理。同时对石灰-铜渣改良土的环境效应进行综合评价。主要结论如下:

1) 铜渣可显著地改善膨胀土的强度特性及

变形特性。相较于未添加铜渣的试样,6%掺量下养护龄期 7、28 d 强度增强系数达到 1.48、1.53,峰值强度达到了近 1.2 MPa。此时,改良土有最强的抑制膨胀与收缩的能力,也具最低的压缩性。

2) 微观实验表明,石灰-铜渣复合材料与膨胀土相互作用,发生一系列物理化学反应,使得土体颗粒团聚,孔隙减少,相互联结更加紧密。这表明土壤骨架结构更加致密化,稳定性更强。这与土体宏观性质的变化相一致。

3) 环境效应评价结果显示改良土不存在环境风险。重金属滤出量远低于标准限值,且其潜在生态风险指数是处于轻微生态风险水平的。

4) 铜渣部分替代石灰被证明能够有效地稳定膨胀土,并且对环境无害。这有助于建筑业的可持续发展,对减少碳排放及固体废弃物资源化处理十分有利。

[参 考 文 献]

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 2019 年全国大、中城市固体废物污染环境防治年报[R]. 北京:中华人民共和国生态环境部,2019.
- [2] ZHU Y, ZHANG Y, LUO D, et al. A review of municipal solid waste in China: characteristics, compositions, influential factors and treatment technologies[J]. Environment, Development and Sustainability, 2021, 23(5):6603-6622
- [3] 杨涛, 且增, 倪海凤, 等. 铜渣资源化利用技术研究现状[J]. 再生资源与循环经济, 2021, 14(4):29-35.
- [4] 谢仁齐, 黄润, 赵世翻, 等. 铜渣资源化利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(6):149-154.
- [5] PEYRONNARD O, BENZAAZOUA M. Estimation of the cementitious properties of various industrial by-products for

- applications requiring low mechanical strength [J]. Resources Conservation & Recycling, 2011, 56(1): 22-33.
- [6] 杜海云, 马倩敏, 郭荣鑫, 等. 铜渣水泥复合胶凝材料力学性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(5): 1634-1638, 1645.
- [7] 张旅, 杨建新, 刘晶茹, 等. 基于生命周期评价的铜尾渣资源化利用环境效益: 以制取蒸压砖为例[J]. 岩石矿物学杂志, 2022, 41(5): 950-958.
- [8] LIU Y, ZHU W, YANG E H. Alkali-activated ground granulated blast-furnace slag incorporating incinerator fly ash as a potential binder[J]. Construction & Building Materials, 2016, 112: 1005-1012.
- [9] 路钊驰, 杨忠年, 刘继明, 等. 冻结橡胶加筋膨胀土(ESR)的动力特性研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1312-1319.
- [10] 李关洋, 顾凯, 王翔, 等. 含裂隙膨胀土无侧限抗压强度特征试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 62-70.
- [11] XU L, ZHA F S, LIU C M. Experimental investigation on carbonation behavior in lime-stabilized expansive soil[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 78: 65-69.
- [12] 吴燕开, 苗盛瑶, 李鑫, 等. 冻融循环下铜渣粉水泥改良膨胀土室内试验研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 851-861.
- [13] 韩赞, 宋正民, 穆彦虎, 等. 石灰改良膨胀土的力学特性受养生周期的影响试验研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(2): 2194-2201.
- [14] 中国建筑材料联合会. 中国建筑材料工业碳排放报告(2020年度)[J]. 石材, 2021(5): 35-54.
- [15] 侯普林, 张彤炜, 于子豪, 等. 碱激发凝灰岩石粉与骨料复合体系的强度与收缩率研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(5): 1414-1426.
- [16] 查甫生, 刘松玉, 杜延军. 石灰-粉煤灰改良膨胀土试验[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(2): 339-344.
- [17] 张德恒, 孙树林. 石灰生物质灰渣改良膨胀土强度变形及微观结构特征[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2018, 37(4): 726-731.
- [18] 费少刚, 王保田, 单熠博, 等. 硅灰、水泥复合改良膨胀土试验研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(9): 190-193.
- [19] OLUWASOLA E A, HAININ M R, AZIZ M A. Comparative evaluation of dense graded and gap-graded asphalt mix incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 122: 315-325.
- [20] AL-JABRI K S, HISADA M, AL-ORAIMI S K, et al. Copper slag as sand replacement for high performance concrete [J]. Cement & Concrete Composites, 2009, 31(7): 483-488.
- [21] 宋军伟, 陈俊. 铜矿渣掺合料对混凝土力学性能影响试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2013(8): 81-84.
- [22] 交通部公路科学研究院. 公路土工试验规程: JTG E40—2007[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 156-164.
- [23] 国家环境保护总局. 固体废物浸出毒性浸出方法醋酸缓冲溶液法: HJ/T 300—2007[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007: 3.
- [24] 交通部公路科学研究院. 公路路面基层施工技术规范: JTJ 034—2000[S]. 北京: 人民交通出版社, 2000: 26.
- [25] SHARMA R, KHAN R A. Sustainable use of copper slag in self compacting concrete containing supplementary cementitious materials[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 151: 179-192.
- [26] HASSAN H F, ALJABRI K. Laboratory evaluation of hot-mix asphalt concrete containing copper slag aggregate[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(6): 879-885.
- [27] LIU Y, SU Y, NAMDAR A, et al. Utilization of cementitious material from residual rice husk ash and lime in stabilization of expansive soil[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 1-17.
- [28] ZHA F S, QIAO B R, KANG B. Engineering properties of expansive soil stabilized by physically amended titanium gypsum[J]. Construction and Building Materials, 2021, 303(12): 124456.
- [29] 许龙. 重金属污染土的固化修复及长期稳定性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [28] 汪波. FeO-SiO₂系废渣的结构及其活性机理研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2015.
- [30] 詹金林, 雷国辉, 施建勇, 等. 有效剪切面积对直剪试验结果的影响分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 213-216.
- [31] 中华人民共和国生态环境部. 土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行): GB 36600—2018[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2018: 5.

(责任编辑 吴亮)