

文章编号: 1674-599X(2021)01-0013-06

改性预崩解炭质泥岩强度特性及微观机理分析

唐静¹, 丁启龙²

(1. 湖南华罡规划设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410015;

2. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 采用水泥和粉煤灰对预崩解炭质泥岩进行改性处理, 以期实现炭质泥岩填料在工程实际中的有效应用。通过对不同水泥和粉煤灰组合、不同养护龄期下改性预崩解炭质泥岩进行无侧限抗压强度试验, 分析了水泥和粉煤灰改良预崩解炭质泥岩的力学性能, 并结合 X 射线衍射和电镜扫描试验揭示其改性机理。研究表明: 9% 水泥+10%粉煤灰组合改性预崩解炭质泥岩时, 其无侧限抗压强度最大, 7、14 和 28 d 的强度分别为 2.39、2.68、2.94 MPa。从 X 射线衍射和扫描电子显微镜试验结果表明, 随着养护龄期的增加, 改性预崩解炭质泥岩内部孔隙被水化产物填充, 结构逐渐密实, 导致其强度持续提高。

关键词: 预崩解炭质泥岩; 无侧限抗压强度; X 射线衍射; 电镜扫描

中图分类号: TQ450.4*3 文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.003

Analysis of strength characteristics and microscopic mechanism of modified disintegrated carbonaceous mudstone

TANG Jing¹, DING Qi-long²

(1. Hunan Huagang Planning Design & Research Institute Co., Ltd., Changsha 410015, China;

2. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to effectively use the disintegrated carbonaceous mudstone in engineering practice, the disintegrated carbonaceous mudstone was modified with cement and fly ash. In this paper, the mechanical properties of the modified disintegrating carbonaceous mudstone are analyzed through the unconfined compressive strength tests of modified disintegrated carbonaceous mudstone with cement and fly ash combinations and different curing time, and the mechanism of modification was revealed by X-ray diffraction and scanning electron microscopy. The results show that when the disintegrated carbonaceous mudstone is modified with combination of 9% cement and 10% fly ash, its unconfined compressive strength reaches the maximum on 2.39 MPa, 2.68 MPa and 2.94 MPa at 7, 14 and 28 days, respectively. The X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM) show that the pores inside the modified disintegrated carbonaceous mudstone are filled with hydration products with the increase of curing time, and the structure is gradually compact. The strength of modified disintegrated carbonaceous mudstone is enhanced due to the change of its microstructure.

Key words: disintegrating carbonaceous mudstone; unconfined compressive strength; X-ray diffraction; scanning electron microscopy

炭质泥岩因其强度低、湿化变形大的特征, 在实际工程中常被当成劣质路堤填料废弃。但中国西

南地区优质路堤填料缺乏且炭质泥岩分布广泛, 为节约成本和保证工程进度, 已有高速项目采用崩解

收稿日期: 2020-07-13

基金项目: 校级专业学位研究生“实践创新与创业能力提升”(SJCX201919)

作者简介: 唐静(1985-), 男, 湖南华罡规划设计研究院有限公司。

炭质泥岩与土分层填筑的方式将炭质泥岩废弃物成功应用在路堤填筑中。在地下水和降雨丰富地区,水分入渗仍会引起炭质泥岩的后续崩解,导致路堤变形增大,分层填筑虽然利用黏土的低渗透性阻碍了部分水分入渗,弱化炭质泥岩崩解效应,但未从根本上解决预崩解炭质泥岩持续崩解导致其力学性能减小的问题。因此,分层填筑方法具有很大的局限性,急需寻找新的方法保证炭质泥岩路堤的正常运营。

水泥加固优异、价格低廉等优势,可作为各类土体强度改性的常用掺料^[1-2]。国内外学者对水泥改性土的研究已有许多成果,并以微观表征形式诠释水泥改性土的强度演化机理^[3-4]。随着学者的深入研究,其他外加剂开始掺入水泥改性土中,提升其强度、耐久性^[5-6]。其中,粉煤灰作为燃煤电厂排出的主要固体废物,在资源化利用后,证明能与水泥共同作用,提升岩土体强度和耐久性等性能^[7-10]。目前,国内粉煤灰资源化利用率较低,采用水泥和粉煤灰混掺方法,改善土体力学性能。同时,增加粉煤灰在水泥改性土中的消纳量,为提高粉煤灰利用率的有效手段之一。朱莹莹^[11]等人以复掺水泥粉煤灰方式对南方红黏土进行改良,发现改性红黏土抗剪强度增长明显。张桂荣^[12]等人研究了水泥粉煤灰在不同掺量下对细砂土力学性能的影响,发现水泥掺量为 4%时,提高粉煤灰的掺量,可以大幅度的降低细沙土渗透系数,并提高无侧限抗压强度。邵俐^[13]等人通过不同水泥、粉煤灰掺入量和养护龄期下,对水泥改性有机质软土进行无侧限抗压强度试验,得出粉煤灰最佳掺入量为 12%。学者们研究了水泥粉煤灰对各类泥岩土体的宏观改性效果,但在微观分析和强度改性机理方面的研究少见。本研究通过无侧限抗压强度试验,分析粉煤灰和水泥组合、不同养护龄期改性炭质泥岩试样的强度变化规律,结合 X 射线衍射和电镜扫描试验,分析其改性机理,以期对相关理论研究和工程实践提供参考。

1 原材料与试验方案

1.1 原材料

试验选用炭质泥岩,采自湖南娄底龙塘—琅塘高速公路 K7+040 边坡附近,其主要矿物成分包括:石英、高岭石和绿泥石等。测试得到预崩解炭质泥

岩的最佳含水率为 10.23%、最大干密度为 2.088 g/cm³、塑限为 24.08%、液限为 32.53%。

本研究使用的水泥为河南永安水泥厂生产的 42.5 级普通硅酸盐水泥。3,28 d 实测抗折强度分别为 $R_{f_3}=5.5$ MPa, $R_{f_{28}}=6.5$ MPa。3,28 d 抗压强度分别为 $R_{c_3}=28.5$ MPa, $R_{c_{28}}=42.5$ MPa。比表面积 343%, $w(\text{CaO})=64\%$, $w(\text{SiO}_2)=20\%$, $w(\text{AlO}_3)=6\%$, $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)=2\%$, 以及烧失量-质量分数为 3.94%。

所用粉煤灰为河南四通化建公司生产的一级低钙粉煤灰,氧化物组成包括 SiO_2 、 Al_2O_3 和少量的 CaO 、 Fe_2O_3 及 MgO 等,其中, SiO_2 和 Al_2O_3 含量占总含量的 79.6%。粉煤灰的细度 11.8%、密度 2 g/cm³、需水率 97%、烧失量 7.3%。

1.2 试验方案

为研究不同水泥、粉煤灰组合对预崩解炭质泥岩无侧限抗压强度影响,根据《水泥石配合比设计规程(JGJ/T 233—2011)》及《公路工程无机结合料稳定材料试验规范(JTG E51—2009)》,对水泥、粉煤灰掺量各选取 4 个水平,分别表示为:水泥掺量为 0%(A₁)、3%(A₂)、6%(A₃)和 9%(A₄);粉煤灰掺量为 0%(B₁)、5%(B₂)、10%(B₃)和 15%(B₄)。参考《混凝土结构工程施工质量验收规范(GB 50204—2015)》中水泥砂浆的养护时间,通过相关试验分析水泥和粉煤灰组合对改性预崩解炭质泥岩 7,14,28 d 无侧限抗压强度的影响。改性预崩解炭质泥岩编号和试验配比见表 1。

表 1 试验编号及配比

编号	水泥掺量/%	粉煤灰掺量/%	编号	水泥掺量/%	粉煤灰掺量/%
A ₁ B ₁	0	0	A ₃ B ₁	6	0
A ₁ B ₂	0	5	A ₃ B ₂	6	5
A ₁ B ₃	0	10	A ₃ B ₃	6	10
A ₁ B ₄	0	15	A ₃ B ₄	6	15
A ₂ B ₁	3	0	A ₄ B ₁	9	0
A ₂ B ₂	3	5	A ₄ B ₂	9	5
A ₂ B ₃	3	10	A ₄ B ₃	9	10
A ₂ B ₄	3	15	A ₄ B ₄	9	15

2 试验步骤和试验方法

2.1 试样制备

按照《公路土工试验规程(JTG E40—2007)》进

行无侧限抗压强度测试。预崩解炭质泥岩过 2 mm 孔筛, 与对应配比的水泥和粉煤灰混合, 在干燥状态下搅拌 30 s。再加入水, 继续混合, 直到获得含水率为 14% 的拌合物。然后, 将混合拌料置于密封聚乙烯袋中保存, 闷料 24 h 后, 倒入内径为 40 mm, 高为 100 mm 的重塑桶模具中, 按三层压实成型。压制结束后, 脱模, 并放入(20±2) °C、相对湿度大于 90% 的恒温恒湿养护箱中, 分别养护 7,14,28 d。

2.2 无侧限抗压试验

试样达到养护龄期后, 放置于 WDW-300E 微机控制电子万能试验机中, 以 0.1 mm/min 加载速率进行强度测试。各养护龄期下的不同配比均设有 3 个平行试样, 抗压试验结束后, 将 3 个平行试样所测数据取平均值, 得到该试样在特定养护龄期下的最大破坏荷载, 再除以该试样截面面积, 得到无侧限抗压强度。将不同龄期下破坏荷载值峰值最大的试样压碎成多块, 收集碎块, 并保留无光滑外壁的部分, 用于后续开展 X 射线衍射(X-ray diffraction, 简称为 XRD)、扫描电子显微镜(scanning electron microscope, 简称为 SEM)试验。

2.3 X 射线衍射

试验样品选择无侧限抗压强度试验阶段所保存的碎块, 研磨后, 过 0.075 mm 孔筛, 得到 3 g 手摸无颗粒感粉末。在 60 °C, 真空干燥箱中烘 24 h。使用具有 Cu-K 辐射源的日本 D/max2200vpc X 射线衍射系统进行 XRD 分析。X 射线管电压为 40 kV, 管流 20 mA, 扫描速度 2.00 d/min, 扫描范围(2 θ) 为 5°~70°。试验结果通过 JADE6.0 软件进行处理。

2.4 扫描电子显微镜

为进一步揭示改性炭质泥岩的机理, 在无侧限抗压强度试验阶段所留的碎块中, 选取最大宽度不超过 10 mm, 厚度低于 7 mm, 表面较为平整的试块作试验样品。放入 60 °C 真空干燥箱, 进行 24 h 烘干, 再冷却至室温, 然后喷金。使用日本 S-3000N 扫描电子显微镜进行 SEM 试验, 在超高真空、30 kV 加速电压的工作条件下, 对样品进行断裂表面的微观结构分析, 获得 1 000 倍下的 SEM 照片。

3 结果与讨论

3.1 无侧限抗压强度试验

依据试验配比方案, 将目标养护龄期试样分批进行无侧限抗压强度试验, 具体试验结果见表 2 和

图 1,2 所示。

由表 2 可知, 有 15 组改性炭质泥岩试样的强度均高于基准试样 A₁B₁ 的, 其养护 7 d 基准试样的无侧限抗压强度仅为 297.64 kPa。继续养护后, 强度持续降低。造成这种现象的原因是炭质泥岩在养护过程中, 遇水崩解, 导致试样结构逐渐疏松, 强度下降。在较低的水泥粉煤灰掺量下, 改性预崩解炭质泥岩的强度增强效应在养护中期可达到最大。若继续在相对湿度大于 90% 的环境下养护, 其强度增强效应无法消除试样长时间崩解造成的强度下降现象。因此, 低掺量试样 A₁B₂、A₂B₁、A₂B₂ 在养护龄期达到 28 d 时的强度较养护 14 d 时的低。试样 A₄B₃ 养护 7,14,28 d 无侧限抗压强度均达到最大, 分别为 2 386.94, 2 678.27, 2 943.42 kPa, 与同养护龄期下的基准试样 A₁B₁ 相比, 无侧限抗压强度增幅为 701.9%, 953.1% 和 1 258.5%, 各养护龄期下强度增长效果显著。

表 2 无侧限抗压强度试验结果

编号	无侧限抗压强度/kPa		
	7 d	14 d	28 d
A ₁ B ₁	297.64	254.32	216.67
A ₁ B ₂	317.13	412.17	394.56
A ₁ B ₃	379.63	443.74	479.34
A ₁ B ₄	367.58	417.91	450.52
A ₂ B ₁	806.43	856.46	636.68
A ₂ B ₂	841.24	882.08	718.49
A ₂ B ₃	863.45	1 012.89	1 162.91
A ₂ B ₄	844.37	897.84	923.79
A ₃ B ₁	2 011.53	2 023.82	2 068.34
A ₃ B ₂	2 064.67	2 137.73	2 377.26
A ₃ B ₃	2 125.02	2 387.75	2 531.86
A ₃ B ₄	2 023.45	2 046.82	2 081.14
A ₄ B ₁	2 225.46	2 378.51	2 546.37
A ₄ B ₂	2 307.75	2 482.43	2 776.18
A ₄ B ₃	2 386.94	2 678.27	2 943.42
A ₄ B ₄	2 254.68	2 396.87	2 532.62

从图 1,2 中可以看出, 本试验掺量变化范围内, 水泥对炭质泥岩改性体系强度有显著提升。水泥掺量增加, 体系强度持续增长。但掺量大于 6% 时, 强度增长速度明显减缓。粉煤灰对预崩解炭质泥岩改性试样强度的影响与养护龄期和水泥掺量有关。从图 2 中还可以看出, 水泥掺量越高, 养护龄期越

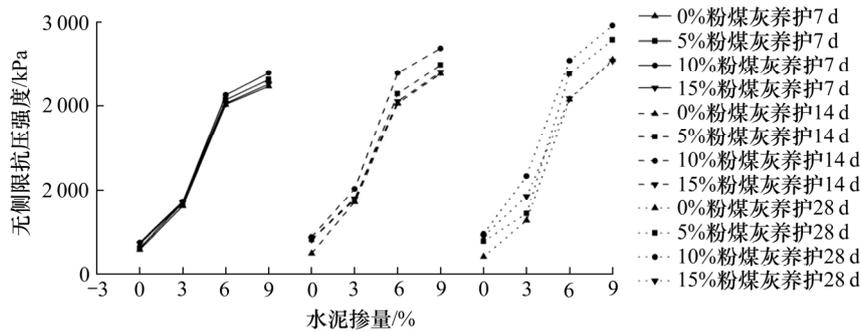


图 1 无侧限抗压强度随水泥掺量的变化

Fig. 1 The change of unconfined compressive strength with content of cement

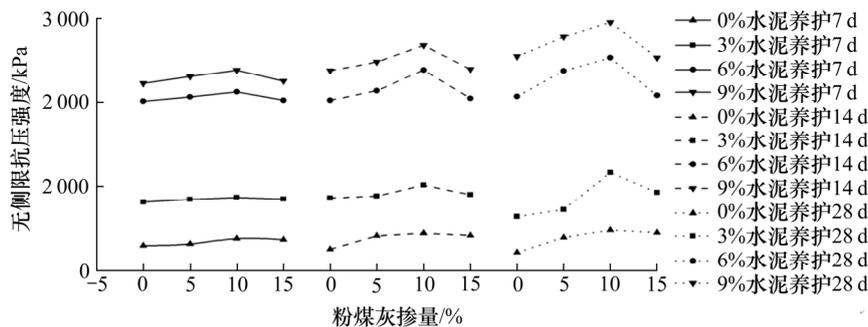


图 2 无侧限抗压强度随粉煤灰掺量的变化

Fig. 2 The change of unconfined compressive strength with content of fly ash

长, 粉煤灰对试样强度影响越明显。随着粉煤灰掺量的不断增加, 试样强度先增大, 达到峰值顶点后, 随掺量的继续增加而减小。在达到峰值之前, 所掺粉煤灰、预崩解炭质泥岩和水泥充分胶结硬凝。达到峰值时, 混合料完全胶结, 体系强度最高。若继续掺入过量粉煤灰, 相当于完全胶结的混合料中加入无黏聚力的粉土材料, 会导致土体强度降低。表明: 对于无侧限抗压强度, 所得最佳掺水泥、粉煤灰比率分别为 9% 和 10%。在该配比下, 改性预崩解炭质泥岩试样各龄期的强度均大于 2.3 MPa, 并随着养护龄期的延长持续提高。

3.2 微观分析与反应机理

预崩解炭质泥岩主要化学成分有 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 , 其 XRD 图谱如图 3 所示, 结晶相以石英 Q、白云母 M、高岭石 K 和绿泥石 C 为主。Shaikh^[14] 等人研究指出: 粉煤灰掺入水泥后, 微粒均匀分布于水泥浆体中填充孔隙, 产生更高的堆积密度, 并通过颗粒中的活性组分 SiO_2 和 Al_2O_3 , 消耗水泥水化过程产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 生成更多水化产物, 水化产物与水泥粉煤灰胶紧密结, 从而提升强度。

在养护 28 d 的 A_4B_3 试样 XRD 图谱如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 水泥水化产物水化硅酸钙、水

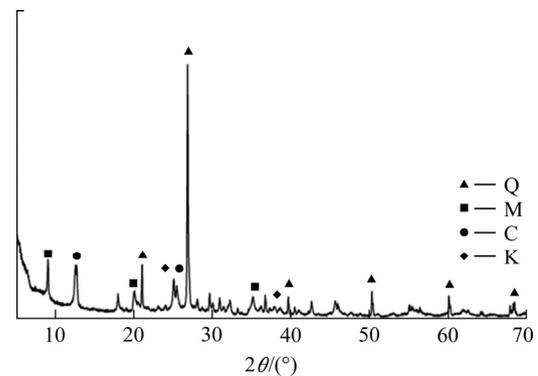


图 3 预崩解炭质泥岩 XRD 图谱

Fig. 3 The XRD patterns of the disintegrating carbonaceous mudstone

化铝酸钙和钙矾石的衍射峰。表明: 粉煤灰能提高改性预崩解炭质泥岩的密实程度, 促进水泥水化反应的作用。

养护 7 d 的 A_1B_1 试样电镜扫描结果如图 5(a) 所示, 能观察到未改性预崩解炭质泥岩由大量片状层状颗粒组成, 且颗粒间孔隙较大, 整体结构疏松, 这从微观结构角度证明了其较差的强度性能。图 5(b)~5(d) 分别为 A_4B_3 试样养护 7, 14, 28 d 的电镜扫描图片, 以 1 000 倍放大率展示了两种掺加料影响下炭质泥岩改性体系中水化产物的微观形态差异。

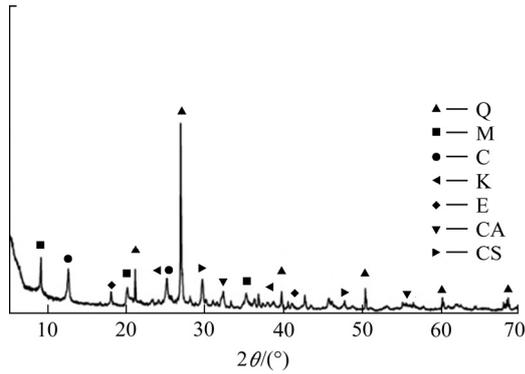


图 4 养护 28 d A4B₃ XRD 图谱

Fig. 4 The XRD patterns of the A₄B₃ under 28-day curing

从图 5(b)中可以看出,除了粉煤灰微珠外,还有少量细纤维状钙矾石、水化铝酸钙和水化硅酸钙,其中,钙矾石主要是水化早期水泥颗粒向外放射生长的长条物质。此外,还能看到纤维状钙矾石与粉煤灰细颗粒相互胶结,对结构孔隙有一定的填充效果,加密了内部结构。从图 5(c)中可以看出,养护 14 d 后,纤维状钙矾石长度和数量增加,而且出现分叉现象,这有利于钙矾石对结构孔隙的进一步填充,促进了强度的增强。从图 5(d)中可以看出,养护 28 d 后的,水化产物明显增加,钙矾石形态呈互相联锁的网状结构,填充布满内部孔隙,促使结构

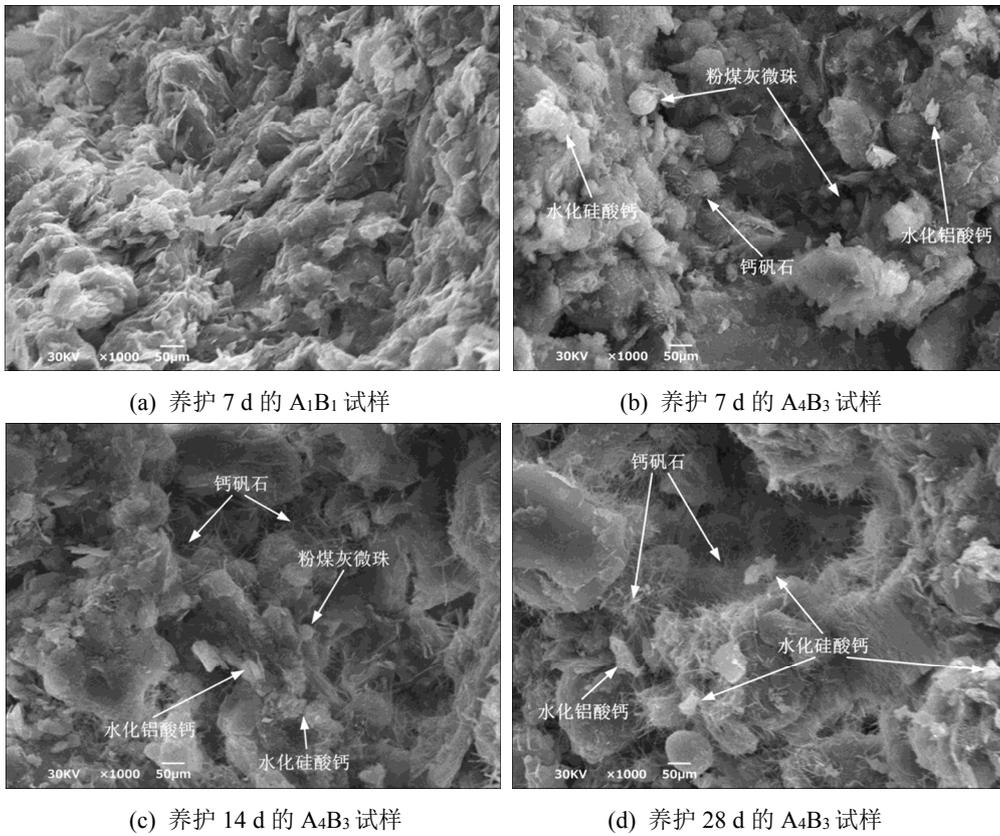


图 5 不同龄期下 A₁B₁ 和 A₄B₃ 电镜显微照片

Fig. 5 The SEM micrographs of the A₁B₁ and A₄B₃ under different curing

密实,改性预崩解炭质泥岩强度显著提升。因此,当掺加 9%水泥和 10%粉煤灰时,随着养护龄期的增加,水泥水化产物逐渐填充内部孔隙,有效提高了改性预崩解炭质泥岩各阶段的强度。

4 结论

通过改性预崩解炭质泥岩试样的无侧限抗压强度试验、X 射线衍射试验和电镜扫描试验,得到

结论为:

1) 在水泥和粉煤灰对预崩解炭质泥岩改性试验中,水泥对试样的强度提升效果明显优于粉煤灰的。但在固定水泥掺量的情况下,粉煤灰的掺入能解决改性预崩解炭质泥岩因遇水崩解导致后期强度下降问题,甚至提高岩样各阶段强度。

2) 在标准养护条件下,当掺入 9%水泥和 10%粉煤灰组合时,试样养护 7,14,28 d 无侧限抗压强度最高,分别为 2 386.94,2 678.27,2 943.42 kPa。

3) 随着养护龄期的增加,改性预崩解炭质泥岩的内部孔隙被水化产物钙矾石、水化铝酸钙水化硅酸钙凝胶填充,结构逐渐密实,改性预崩解炭质泥岩强度持续提高。

参考文献(References):

- [1] 曹亮,潘倩,孙陶苑正.水泥改良土的力学性能试验研究[J].四川建筑科学研究,2019,45(4):89-92.(CAO Liang, PAN Qian, SUN Taoyuanzheng. Experimental study on mechanical properties of cement modified soil[J]. Sichuan Building Science, 2019, 45(4): 89-92. (in Chinese))
- [2] Subramaniam P, Banerjee S. Dynamic properties of cement-treated marine clay[J]. International Journal of Geomechanics,2020,20(6):04020065.
- [3] Chew S H, Kamruzzaman A H M, Lee F H. Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2004,130(7):696-706.
- [4] 尤忆,向杰.水泥稳定土强度和微观结构的冻融损伤规律[J].硅酸盐通报,2020,39(2):453-458.(YOU Yi, XIANG Jie. Freeze-thaw damage laws of strength and microstructure of cement stabilized soils[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(2): 453-458. (in Chinese))
- [5] Ribeiro D V, Labrincha J A, Morelli M R. Potential use of natural red mud as pozzolan for Portland cement[J]. Materials Research, 2011, 14(1): 60-66.
- [6] 王立峰,陈巧红,陈建建,等.垃圾废灰改性水泥土的无侧限抗压强度试验研究[J].科技通报,2019,35(12):166-170.(WANG Li-feng, CHEN Qiao-hong, CHEN Jian-jian, et al. Experimental study on unconfined compressive strength of modified cement soil of the waste ash[J]. Bulletin of Science and Technology, 2019, 35(12):166-170.(in Chinese))
- [7] Liu S T, Li Z Z, Li Y Y, et al. Strength properties of Bayer red mud stabilized by lime-fly ash using orthogonal experiments[J]. Construction and Building Materials, 2018,166:554-563.
- [8] 朱蓓蓉,杨全兵.粉煤灰火山灰反应性及其反应动力学[J].硅酸盐学报,2004,32(7):892-896.(ZHU Bei-rong, YANG Quan-bing. Pozzolanic reactivity and reaction kinetics of fly ash[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2004,32(7):892-896.(in Chinese))
- [9] 刘新海,彭小林.水泥粉煤灰稳定碎石力学参数影响因素研究[J].交通科学与工程,2020,36(1):38-43.(LIU Xin-hai, PENG Xiao-lin. Study on influence factors of mechanical parameters of cement fly ash stabilized crushed stone[J]. Journal of Transport Science and Engineering,2020,36(1):38-43.(in Chinese))
- [10] 张海涛,梁爽,杨洪生,等.粉煤灰对振动拌和水泥稳定碎石力学性能的影响[J].公路工程,2019,44(5):176-179.(ZHANG Hai-tao, LIANG Shuang, YANG Hong-sheng, et al. Influence of fly ash on performance of cement-stabilized crushed stone based on vibratory mix technology[J]. Highway Engineering, 2019, 44(5): 176-179.(in Chinese))
- [11] 朱莹莹,李就好,刘懿韬,等.水泥粉煤灰改良南方红黏土的试验研究[J].公路工程,2017,42(2):145-149.(ZHU Ying-ying, LI Jiu-hao, LIU Yi-tao, et al. Experimental study on cement and fly ash improving the southern red soils[J]. Highway Engineering, 2017, 42(2): 145-149. (in Chinese))
- [12] 张桂荣,罗紫婧,邵勇,等.水泥、粉煤灰改良细砂土的工程特性与改良机理[J].水利与建筑工程学报,2019,17(5):128-132.(ZHANG Gui-rong,LUO Zi-jing,SHAO Yong, et al. Engineering characteristics and improvement mechanism of cement and fly ash improved fine sand[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2019,17(5):128-132.(in Chinese))
- [13] 邵俐,刘松玉,杜广印,等.水泥粉煤灰加固有机质土的试验研究[J].工程地质学报,2008,16(3):121-127.(SHAO Li, LIU Song-yu, DU Guang-yin, et al. Experimental study on improvement of organic soil with cement and fly-ash[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(3): 121-127.(in Chinese))
- [14] Shaikh F U A, Supit S W M. Compressive strength and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concretes containing ultrafine fly ash (UFFA)[J]. Construction and Building Materials,2015,82:192-205.