

煤矸石质固土材料固化土的耐久性试验研究

肖雪军 鞠宇飞

(常州工程职业技术学院 化学与材料工程学院 江苏 常州 213164)

摘要: 为评价煤矸石质固土材料固化土的耐久性能,研究了煤矸石质固土材料固化土的耐水性能、耐干湿循环性能、抗冻融性能以及耐酸、碱、盐腐蚀性能,通过与普通硅酸盐水泥固化土的性能对比,对煤矸石质固土材料固化土的耐久性能进行了试验研究。结果表明,煤矸石质固土材料固化土14 d耐水稳定系数为0.94,耐干湿循环交替系数为0.898,抗冻系数为0.9,煤矸石质固土材料固化土在这3项性能上均优于水泥加固土。耐酸碱盐性能方面,煤矸石质固土材料固化土耐酸性略逊于水泥固化土,而耐碱和盐腐蚀性能明显优于水泥固化土。

关键词: 煤矸石; 固化土; 质固体材料; 路基填料

中图分类号: TD849.5 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2016)12-0202-06

Study on durability experiment of stabilized soil of gangue sialite soil material

Xiao Xuejun Ju Yufei

(School of Chemical and Material Engineering, Changzhou Institute of Engineering Technology, Changzhou 213164, China)

Abstract: In order to evaluate the durability performances of the stabilized soil of gangue sialite soil material, the paper had a study on the water resistance performances of the solidified soil, dry and wet cycling performances, freeze-thaw resistance performances as well as the acid, alkali and salt corrosion resistance performances of the stabilized soil of gangue sialite soil material. In comparison with the cement solidified soil performances, a test and study was conducted on the solidified soil durability performances of the stabilized soil of gangue sialite soil material. The results showed that 14 days water resistance stability coefficient of the solidified soil with the stabilized soil of gangue sialite soil material was 0.94, the dry and wet cycling alternative coefficient was 0.898 and the anti freezing coefficient was 0.9. With the stabilized soil of gangue sialite soil material, the above three performances of the solidified soil all better than the cement solidified soil. In the acid, alkali and salt corrosion resistance performances aspects, with the stabilized soil of gangue sialite soil material, the acid resistance of the solidified soil was slightly lower than the cement solidified soil and the alkali and salt corrosion resistance performances of the solidified soil were obviously better than the cement solidified soil.

Key words: coal refuse; solidified soil; solidified soil material; roadbed filling

0 引言

煤矸石是煤炭开采、分选加工过程中产生的固体废弃物,因其含有活性的硅铝,因此也是可利用的资源^[1]。煤矸石是多种矿岩组成的混合物,属沉积岩,主要岩石种类有黏土岩类、砂岩类、碳酸盐类和铝质岩类。黏土岩中主要矿物组分为黏土矿物,其次为石英、长石云母和黄铁矿、碳酸盐等自生矿物,此外还含有植物化石、有机质、碳质等^[2]。2011年,

中国煤矸石产生量约6.59亿t,综合利用率4.1亿t,综合利用率62.2%^[3]。由于煤矸石的成分、堆积方式和堆积地形等原因,全国约有1/3煤矸石山发生自燃^[4-5]。煤矸石山的堆积及自燃不仅占用土地,而且造成环境污染,甚至威胁矿区居民生命财产安全。另外一方面,我国水利工程、机场、高铁以及高速公路快速发展和建设,需要大量的道路基层材料。从资源再利用的角度出发,煤矸石在道路工程的应用研究日益深入^[6-8]。文献[9]采用石灰、煤矸

收稿日期: 2016-10-05; 责任编辑: 代艳玲 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.12.035

基金项目: 江苏省科技厅产学研前瞻性联合研究资助项目(BY2016034-01)

作者简介: 肖雪军(1980—),男,江苏金坛人,讲师,硕士。Tel: 0519-86332026, E-mail: xxjun18@163.com

引用格式: 肖雪军, 鞠宇飞. 煤矸石质固土材料固化土的耐久性试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(12): 202-207.

Xiao Xuejun, Ju Yufei. Study on durability experiment of stabilized soil of gangue sialite soil material [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(12): 202-207.

石与土混合后作为道路基层,能充分发挥煤矸石的特性,提高道路基层的强度。煤矸石的作用主要是基于其自身强度,以及煤矸石中活性成分与石灰的火山灰反应。文献[10-11]重点研究自燃煤矸石加固土的性能。利用水泥、自燃煤矸石、粉煤灰为主要原料,以风积砂土为处理对象,在水泥、煤矸石和粉煤灰掺量比为5:20:20时,总掺量为土质量45%时,其7d固化强度可达1.09 MPa。文献[12]研究表明,当水泥熟料、矿渣和煅烧煤矸石掺量比为20:10:70时,添加煅烧明矾石、NaCl、Na₂SO₄和CaSO₄等激发剂,能提高固化土3d、7d和28d强度。由于固化土的无侧限抗压强度比较容易测定,且公路工程无机结合料稳定材料试验规程^[13]、渠道防渗工程技术规范标准^[14]及土壤固化剂标准^[15]都对固化类材料的无侧限抗压强度有明确要求,所以在对固化土进行研究时,多数学者主要针对固化土无侧限抗压强度进行研究。但众所周知,固化土在实际应用中会受到环境的影响,因而固化土的耐久性能也十分重要。

笔者利用煤矸石煅烧后的火山灰活性,附以多种矿物复合料,研究出性能优良、成本低廉的煤矸

石质固土材料。笔者在前期研究制备出力学性能良好的煤矸石质固土材料基础上^[16],考虑到固化土在实际应用过程中会受到水的浸泡影响,干湿交替、碱性环境、酸性环境以及各种盐类环境的影响,为了更好地评价煤矸石质固土材料的性能,结合《公路路基土壤固剂的设计、应用与机理研究》以及国外的一些研究方法和原理^[17-18],对煤矸石质固土材料固化土的水稳定性、耐干湿循环性能、抗冻融性能以及耐酸、碱、盐腐蚀性能进行了试验研究,通过与普通硅酸盐水泥固化土的对比,研究煤矸石质固土材料固化土的耐久性能。

1 试验

1.1 试验原料

试验所用土为普通黄土,取样深度为地表以下1m。煤矸石取自江西吉安,矿渣取自唐山钢铁厂,水泥熟料来自河北冀东水泥厂,消石灰为工业消石灰,石膏为分析纯无水石膏,盐酸、氢氧化钠、碳酸钠、氯化镁和硫酸钠等均为分析纯试剂。固土试块根据JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》制备。各原料化学组成见表1。

表1 原料的化学组成

Table 1 Content of raw material

材料	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(CaO)	w(Na ₂ O)	w(K ₂ O)	w(MgO)	w(Fe ₂ O ₃)	w(SO ₃)	%
原状土	64.17	23.78	4.72	1.19	1.34	2.70	2.45	—	10.33
煤矸石	65.66	23.78	1.92	0.19	2.34	0.64	2.72	2.72	—
矿渣	36.03	12.70	39.39	0.15	1.07	4.26	1.76	4.62	—
水泥熟料	23.83	3.77	61.71	0.12	1.27	5.28	4.03	—	—

1.2 煤矸石质固土材料配比

煤矸石质固土材料主要以煅烧煤矸石(500℃煅烧)为主,并辅以矿渣,以提高其火山灰活性。以水泥熟料、消石灰以及石膏为激发剂,用以激发煤矸石的火山灰活性,通过研究各组分掺量变化对固土材料力学性能的影响后,试验表明煤矸石质固土材料在表2所示配合比下,固化土的7d强度就能达到3.9 MPa,已达到城市快速路和城市主干线基层的要求;28d时强度达到5.4 MPa;60d和90d时强度分别达到5.9 MPa和6.45 MPa,其具有早期强度高和后期强度持续增长的特点。

表2 煤矸石质固土材料配比(质量分数)

Table 2 Content of gangue sialite soil stabilizer

成分	煅烧煤矸石	矿粉	水泥熟料	消石灰	石膏
比例/%	31.7	31.7	15.9	15.9	4.8

1.3 耐久性测定试验方案

固化土在道路路基会遇到长期积水、干湿交替以及冻融循环交替的环境,笔者参考岩石力学中关于岩石水稳系数的方法和JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中的试验方法。通过与水泥固化土的对比,研究固化土耐水稳定性、干湿循环以及抗冻融循环性能。此外固化土在道路路基应用过程中,由于各地区的差异,会碰到酸性、碱性、氯盐、镁盐以及硫酸盐等环境介质的侵蚀。为研究固化土在上述不同环境下使用的稳定性,试验选择4种具有代表性的化学纯酸、碱、盐药品分别配制成一定浓度的溶液,考虑到固化土材料掺量仅有6%,均将其配制成质量分数1%溶液。将制备好的煤矸石质固土材料固化土与普通水泥固化土试件(Φ50 mm×50 mm)分别浸泡于各溶液中,定期取样,

观察其外观变化情况,并测定其无侧限抗压强度,根据与水泥固化土的对比,分析研究煤矸石质固土材料固化土的耐酸、碱、盐稳定性。

2 试验结果与分析

2.1 水稳定性试验结果

煤矸石质固土材料固化土和普通水泥(P32.5)固化土都是以6%的掺量按最佳含水量制备试件,按照以上方法测得不同浸水时间后的吸水量、强度损失及水稳系数,数据见表3。

表3 固化土的水稳定性试验结果

Table 3 Results of water-resistance test for stabilized soil

固化土材料	浸水时间/d	吸水量/%	浸水强度/MPa	检验强度/MPa	强度损失/%	水稳定系数
煤矸石质固土材料	3	0.36	4.0	4.3	6.98	0.93
	7	0.43	4.1	4.4	6.82	0.93
	14	0.63	4.7	5.0	6.00	0.94
普通水泥	3	0.42	3.3	3.25	-1.54*	1.02
	7	0.49	3.6	4.0	10.00	0.90
	14	0.72	4.1	4.4	6.82	0.93

注: * 表示强度增加。

从表3可以看出:①随着固化土浸水时间的增加,煤矸石质固土材料固化土和水泥固化土的吸水量都有所增加。但是在相同浸水时间下,煤矸石质固土材料固化土的吸水量小于水泥固化土的吸水量,这证明煤矸石质固土材料固化土的结构比水泥固化土的结构密实。②浸水3 d后,煤矸石质固土材料固化土的强度相比于检验强度有所下降,强度损失为6.98%。而水泥固化土浸水3 d后强度却上升了1.54%,分析其原因是煤矸石质固土材料的水化凝结的速度较慢,在浸水初期受土粒吸水膨胀的影响较大。③浸水7 d和14 d后,煤矸石质固土材料固化土的浸水强度稳步增长,水稳定系数分别为0.93和0.94;而水泥固化土强度增长较缓,水稳定系数分别为0.90和0.93,这表明煤矸石质固土材料固化土的水稳定性良好。

2.2 耐干湿循环交替试验结果

煤矸石质固土材料固化土与水泥固化土耐干湿循环交替试验结果见表4。

根据表4试验结果以及对试块的观察可知:①经过10次干湿循环后,2种固化土表面都未出现起皮现象,只是吸水量有所增加,分别为0.93%和1.07%。相比之下,水泥固化土的吸水量较多,这跟

固化土水稳定性试验结果相符,从而进一步证明煤矸石质固土材料固化土的结构更为密实。②2种固化土在经过10次循环后破坏强度相比于检验强度均有下降,可见在干湿循环交替作用下,土粒的吸水膨胀以及失水收缩对固化土的结构造成了破坏。煤矸石质固土材料固化土和水泥固化土相比于检验强度,强度损失分别为10.20%和18.30%,抗干湿循环系数分别为0.898和0.817。根据强度损失和抗干湿循环系数可以看出,煤矸石质固土材料固化土相比于水泥固化土,有更好的耐干湿循环交替性能。

表4 干湿循环试验结果

Table 4 Results of dry-wet cyclic process experiment

固化土材料	吸水量/%	破坏强度/MPa	检验强度/MPa	强度损失/%	抗干湿循环系数 D_G
煤矸石质固土材料	0.93	3.95	4.40	10.20	0.898
普通水泥	1.07	3.35	4.10	18.30	0.817

2.3 抗冻融循环试验结果

对分别掺入6%的煤矸石质固土材料和水泥的2组固化土的试块,经过标准养护7 d后再冻融循环12次后的抗压强度、强度损失、质量损失以及抗冻系数进行了对比试验分析,试验结果见表5。

表5 固化土冻融循环试验结果

Table 5 Results of freezing and thawing cycle test for stabilized soil

固化土材料	质量损失/%	冻融强度/MPa	检验强度/MPa	强度损失/%	抗冻融系数 D_f
煤矸石质固土材料	1.35	4.15	4.60	9.78	0.902
普通水泥	1.48	3.75	4.10	8.54	0.915

通过对表5中的数据分析以及对试块的表面观察可得:①在冻融循环12次后,煤矸石质固土材料固化土和水泥固化土的所有试块均未出现掉块现象,只是质量有所下降,但是质量损失不大,煤矸石质固土材料固化土的质量损失为1.35%,水泥固化土的质量损失为1.48%。由此可见,冻融循环对这2种固化土的质量影响很小。②冻融循环12次后,煤矸石质固土材料固化土强度为4.15 MPa,水泥固化土的强度为3.75 MPa。相比于检验强度,煤矸石质固土材料固化土强度损失为9.78%,而水泥的强度损失为8.54%。③2种固化土的抗冻融系数都在0.9以上,抗冻融性能

相近,显示了良好的抗冻融效果,能够满足一般工程对抗冻融性能的要求。

2.4 耐酸、碱、盐的稳定性试验结果

2.4.1 耐酸腐蚀试验结果

将分析纯盐酸配制成质量分数为1%的溶液,分别将煤矸石质固化土材料固化土和水泥固化土的试块浸入溶液中,分别测试其侵蚀3 d、7 d和28 d后的强度,试验结果如图1所示。

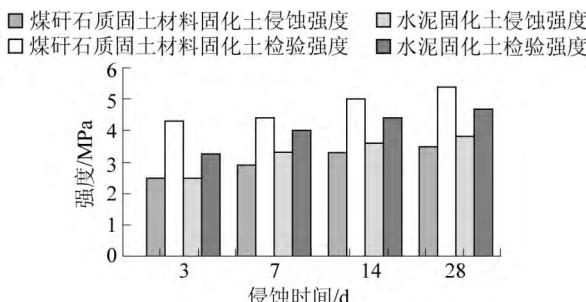


图1 固化土在1%HCl中侵蚀后的强度与时间的关系
Fig. 1 Relationship between eroding time and strength in 1%HCl solution

由图1可以看出:①盐酸溶液对煤矸石质固化土材料固化土和水泥固化土的强度影响都比较大,侵蚀3 d后2种固化土表面都有掉块现象,强度相比于检验强度分别下降了41.86%和23.08%。②随着侵蚀时间的增加,煤矸石质固化土材料固化土的强度有所上升。侵蚀28 d后的强度达到3.5 MPa,比侵蚀3 d时的强度增加了40%,但是相比于检验强度还是下降了36.36%。由此可见,煤矸石质固化土材料固化土在酸性条件下虽然还能够保证自身强度增长,但在酸的作用下,体系的碱性下降,影响了煤矸石质固化土材料自身的水化硬化,因而相比于检验强度下降得较多。③相比之下,水泥固化土受酸的影响比煤矸石质固化土略小,在盐酸溶液中强度稳步增加。盐酸溶液对固化土的侵蚀作用主要为,HCl水解产生的H⁺离子与固化土材料中的OH⁻离子发生了中和反应,可见体系中的OH⁻减少,pH值降低,影响体系中水化产物的生成,从而导致强度下降。

2.4.2 耐碱腐蚀试验结果

将分析纯氢氧化钠配制成质量分数为1%的溶液,分别将煤矸石质固化土材料固化土和水泥固化土的试块浸入溶液中,浸泡不同时间后所测强度如图2所示。

由图2可知:①NaOH溶液对煤矸石质固化土材

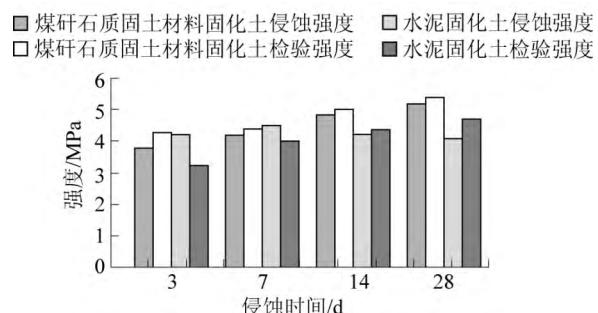


图2 固化土在1%NaOH中侵蚀后的强度与时间的关系

Fig. 2 Relationship between eroding time and strength in 1%NaOH solution

料固化土侵蚀初期影响比较大,相比于检验强度有所下降,3 d时强度比检验强度低11.63%,但其侵蚀后期强度持续增长,相比检验强度的强度损失有所下降。侵蚀14 d时,强度为4.85 MPa,强度损失为3%。28 d时的强度损失为5.45%,相比于3 d的强度增加了36.84%。②水泥固化土在NaOH侵蚀溶液中早期强度增加,后期强度下降。侵蚀3 d时的强度比检验强度高出29.23%。但是后期强度则有所下降,侵蚀28 d的强度比侵蚀3 d时低了0.1 MPa。③总体看来,2种固化土都有良好的耐碱性,煤矸石质固化土材料固化土在侵蚀初期强度相比于检验强度有所下降,但是其在NaOH溶液中,强度一直保持增长,并且在侵蚀14 d和28 d时强度达到4.85 MPa和5.20 MPa,高于水泥固化土的4.25 MPa和4.10 MPa。因而可以看出,煤矸石质固化土材料固化土的耐碱性要好于水泥固化土。

2.4.3 耐盐腐蚀试验结果

1) 碳酸钠溶液侵蚀试验。将分析纯碳酸钠配制成质量分数为1%的溶液,分别将煤矸石质固化土材料固化土和水泥固化土的试块浸入溶液中,浸泡不同时间后所测的强度如图3所示。

由图3可知,①侵蚀3 d时,煤矸石质固化土材料固化土与水泥固化土的强度相比于检验强度下降很多,分别下降了44.19%和50.77%;其中水泥固化土强度只有1.6 MPa,比煤矸石质固化土材料固化土侵蚀3 d的强度低33.33%。②随着侵蚀时间的增长,煤矸石质固化土材料固化土的强度逐步上升,但还是低于检验强度;与侵蚀3 d的强度相比,上升了很多,相对于检验强度的强度损失也小了很多。③水泥固化土侵蚀7 d时,强度达到3.8 MPa,相比于3 d强度增加了137.50%,只比检验强度低5.00%;但是侵蚀14 d后,强度比侵蚀7 d

的强度降低,只有3.65 MPa;到28 d时下降到3.25 MPa,相比于检验强度低31.58%,比同龄期的煤矸石质固土材料固化土的强度低37.5%。(4)通过以上分析可知,煤矸石质固土材料固化土在 Na_2CO_3 溶液中的侵蚀强度虽然低于检验强度,但是能够持续增长,侵蚀28 d时只比检验强度低5.45%。由此可以看出,煤矸石质固土材料固化土在 Na_2CO_3 溶液中有良好的耐腐蚀性,其耐腐蚀性明显好于水泥固化土。

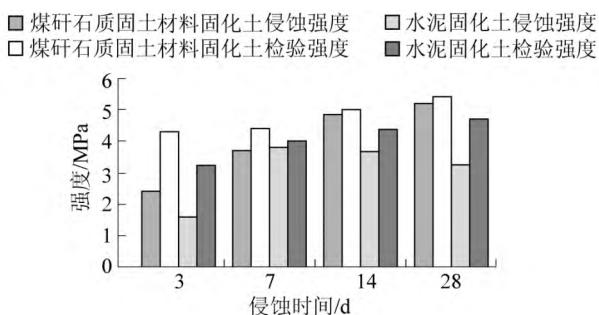


图3 固化土在1% Na_2CO_3 中浸泡后的强度与时间的关系

Fig. 3 Relationship between eroding time and strength in 1% Na_2CO_3 solution

2) 硫酸钠溶液侵蚀试验。分别将煤矸石质固土材料固化土和水泥固化土的试块浸入质量分数1%硫酸钠溶液中,浸泡不同时间后所测的强度如图4所示。

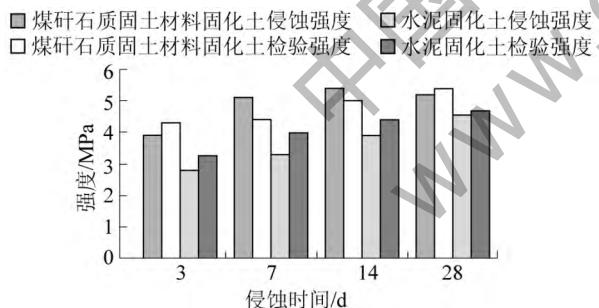


图4 固化土在1% Na_2SO_4 中浸泡后的强度与时间的关系

Fig. 4 Relationship between eroding time and strength in 1% Na_2SO_4 solution

由图4可知,(1)煤矸石质固土材料固化土在 Na_2SO_4 溶液中侵蚀时,侵蚀7 d和14 d的强度均高于检验强度,其中侵蚀7 d强度的增幅达15.91%,固化土在 Na_2SO_4 溶液中的侵蚀强度随着时间的增长先上升后下降,14 d时达到最高5.4 MPa,28 d的强度为5.2 MPa,比3 d强度增加了33.33%。(2)水泥固化土的侵蚀强度随着侵蚀时间的延长而上升,但是在各个侵蚀时间下的侵蚀强度均低于检验强度。

度,可见水泥固化土受 Na_2SO_4 溶液侵蚀的影响比较大;其中侵蚀7 d时强度损失最大,达到17.50%。(3)对比2种固化土在不同侵蚀时间下的强度可以看出,煤矸石质固土材料固化土的强度在各个时间下的强度均高于水泥固化土;煤矸石质固土材料固化土3 d时的侵蚀强度比水泥固化土高1.1 MPa,高出39.30%;28 d时强度相差0.70 MPa,高出15.38%。(4)通过以上的分析结果可知,煤矸石质固土材料固化土在 Na_2SO_4 溶液中强度受 Na_2SO_4 溶液侵蚀的影响较小,由此可知其有良好的耐 Na_2SO_4 腐蚀性能。

3) 氯化镁溶液侵蚀试验。分别将煤矸石质固土材料固化土和水泥固化土的试块浸入到质量分数1%氯化镁溶液中,浸泡不同时间后所测的强度如图5所示。

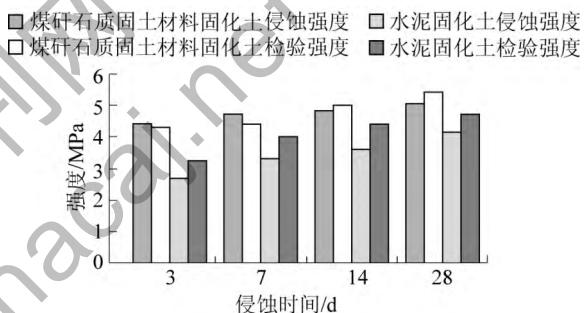


图5 固化土在1% MgCl_2 中浸泡后的强度与时间的关系

Fig. 5 Relationship between eroding time and strength in 1% MgCl_2 solution

由图5可知:(1)煤矸石质固土材料固化土在 MgCl_2 溶液中的侵蚀强度随着侵蚀时间的增长而增加,侵蚀3 d时的强度为4.40 MPa,到28 d时达到了5.05 MPa,增加了0.65 MPa,增幅达到14.77%。与检验强度相比,侵蚀3 d和7 d的强度高于检验强度,最高增幅为侵蚀7 d时,增幅6.82%。14 d和28 d的侵蚀强度均低于检验强度,28 d时强度损失为8.18%。(2)水泥固化土在各个侵蚀时间下的强度都低于检验强度,在侵蚀14 d时相差最大,为18.18%,可见水泥固化土受 MgCl_2 溶液的侵蚀影响较大。(3)对比煤矸石质固土材料固化土与水泥固化土在不同侵蚀龄期下的强度,可以明显看出煤矸石质固土材料固化土的强度高,而且相差强度较大;3 d时两者相差1.7 MPa,28 d强度相差也是1.7 MPa。(4)对比2种固化土在不同侵蚀龄期下的强度以及相比于检验强度的强度损失,可以看出煤矸石质固土材料固化土在 MgCl_2 溶液中具有良好的耐腐蚀性能。

3 结 论

1) 根据水稳定试验结果可知,煤矸石质固土材料固化土的水稳定系数浸水3 d、7 d 和14 d 时分别为0.93、0.93 和0.94,而水泥固化土的水稳定系数在14 d 时为0.93,通过对比可以看出,煤矸石质固土材料固化土具有良好的水稳定性,能够用于一般的水下工程。

2) 由干湿循环试验结果可知,煤矸石质固土材料固化土的耐干湿循环交替系数为0.898,大于水泥固化土的0.817,表明煤矸石质固土材料有较好的耐干湿循环性能。

3) 抗冻融循环试验表明,2种固化土都有较好的抗冻性能:经过12次冻融循环后,质量几乎没有损失,强度损失也都小于10.00%,并且两者的抗冻系数都在0.9以上,2种固化土的抗冻融系数相近,均显示了良好的抗冻融性能,能够满足一般工程对抗冻融性能的要求。

4) 采用HCl、NaOH、Na₂CO₃、MgCl₂和Na₂SO₄配制质量分数1%的溶液对煤矸石质固土材料固化土和水泥固化土进行耐腐蚀试验,结果表明,煤矸石质固土材料固化土只是耐酸性略逊于水泥固化土,而耐碱和盐腐蚀性能明显好于水泥固化土。煤矸石质固土材料固化土有良好的耐腐蚀性能,这有利于煤矸石质固土材料在路基处理中的广泛使用。

参考文献(References):

- [1] 姜振泉,李雷.煤矸石的环境问题及其资源化利用[J].环境科学研究,1998,11(3):57-59.
Jiang Zhenquan, Li Lei. Environmental problems and resources utilization on coal slag [J]. Research of Environmental Sciences, 1998, 11(3) : 57-59.
- [2] 刘松玉,邱钰.煤矸石的动力特性试验研究[J].东南大学学报:自然科学版,2005,35(2):280-283.
Liu Songyu, Qiu Yu. Experimental research on dynamic properties of coal mining wastes [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2005, 35(2) : 280-283.
- [3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.中国资源综合利用年度报告(2012)[R].北京:中华人民共和国国家发展和改革委员会,2013.
- [4] 潘荣锟,余明高,徐俊等.矸石山的危害及自燃原因关联分析[J].安全与环境工程,2006,13(2):66-69.
Pan Rongkun, Yu Minggao, Xu Jun, et al. Harm of gangue dump and cause analysis of spontaneous combustion [J]. Safety and Environmental Engineering, 2006, 13(2) : 66-69.
- [5] 张超.路用煤矸石环境影响评价[J].交通环保,2002,23(1):4-6,16.
Zhang Chao. Environmental impact assessment of gangue used in road [J]. Environmental Protection in Transportation, 2002, 23 (1) : 4-6,16.
- [6] 闫秀萍.煤矸石作为高速公路路基填料的应用[J].公路交通科技,2002,19(9):51-54.
Yan Xiuping. Application of coal gangue as filling material for expressway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19(9) : 51-54.
- [7] 师晖军.高性能二灰稳定碎石混合料设计和路用性能研究[J].道路施工与机械,2013(12):69-72.
Shi Huijun. Research on mixture design and pavement performance of high performance lime fly-ash stabilized aggregate [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2013(12) : 69-72.
- [8] 何上军.煤矸石作路面基层材料的探讨[J].铁道工程学报,1999,61(1):114-117.
He Shangjun. Discussion on coal gangue as base material of road base [J]. Journal of Railway Engineering Society, 1999, 61(1) : 114-117.
- [9] 王修山,郝培文,张干.煤矸石路用性能研究[J].路基工程,2009(2):44-45.
Wang Xiushan, Hao Peiwen, Zhang Gan. Study on the performance of coal gangue [J]. Subgrade Engineering, 2009(2) : 44-45.
- [10] 尹志刚.煤矸石、粉煤灰作为道路基层填料的试验研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2004.
- [11] 邱钰,林昌,刘松玉.煤矸石在道路建设中的应用研究现状及实例[J].公路交通科技,2002,19(2):1-5.
Qiu Yumiao, Lin Chang, Liu Songyu. Application study and practice of coal gangue applied in road construction [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19 (2) : 1-5.
- [12] 李化建.煤矸石质硅铝基材料胶凝机理的研究[D].北京:清华大学,2007.
- [13] JTGE51—2009,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
- [14] GB/T 50600—2010,渠道防渗工程技术规范[S].
- [15] CJ/T 3073—1998,土壤固化剂[S].
- [16] 肖雪军,孙恒虎,李化建.煤矸石质固土材料的制备[J].煤炭科学技术,2009,37(3):109-111,114.
Xiao Xuejun, Sun Henghu, Li Huaian. Preparation of coal refuse base consolidated soil material [J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(3) : 109-111,114.
- [17] 凯兹迪A.公路路基土壤固剂的设计、应用与机理研究[M].张起森,梁锡三,蔡龙章,等,译.北京:人民交通出版社,1989.
- [18] American association of state highway and transportation officials system. soil-cement laboratory handbook [K]. Portland: Portland Cement Association, 1992.