

# 固化剂与糯米浆固化土的工程性能对比分析

李杨<sup>1</sup>, 周占学<sup>1,2</sup>, 常宇<sup>1</sup>, 吴凯<sup>1</sup>, 江一博<sup>1</sup>

(1.河北建筑工程学院 土木工程学院, 河北 张家口 075000;

2.河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室, 河北 张家口 075000)

**摘要:** [目的] 通过分别掺入离子固化剂、糯米浆对工业废料铁尾矿砂与黄土混合土进行固化试验, 研究对比两种固化剂对目标土样的固化效果差异, 为后续的工程应用及研究提供理论支持。[方法] 采用离子固化剂与糯米浆分别对目标混合土进行固化研究, 通过干湿、冻融循环试验和自然风化试验对试件抗压强度的改变, 综合评价两种固化剂对试件强度和耐久性的影响, 并根据扫描电镜试验与比表面积试验测得孔隙结构对强度的影响。[结果] 掺入 1.5% 离子固化剂的混合土强度改善效果优于其他掺量的离子固化剂改良土, 比素土提升 50% 强度; 掺入 10% 糯米浆的混合土强度使素土强度增加 110%。经过耐久性试验之后, 掺入 1.5% 离子固化剂的混合土强度损失率更小, 掺入 10% 糯米浆的混合土强度残余更高。[结论] 离子固化剂与糯米浆作为固化剂, 均可提升土体材料的强度性能。糯米浆作为固化剂的固化效果优于离子固化剂。

**关键词:** 铁尾矿砂; 土壤固化; 离子固化剂; 糯米浆

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2022)04-0195-08

**中图分类号:** TU449

**文献参数:** 李杨, 周占学, 常宇, 等. 固化剂与糯米浆固化土的工程性能对比分析[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 195-202. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.025; Li Yang, Zhou Zhanxue, Chang Yu, et al. Comparative analysis on engineering performance of stabilized soil with curing agent and glutinous rice slurry [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 195-202.

## Comparative Analysis on Engineering Performance of Stabilized Soil with Curing Agent and Glutinous Rice Slurry

Li Yang<sup>1</sup>, Zhou Zhanxue<sup>1,2</sup>, Chang Yu<sup>1</sup>, Wu Kai<sup>1</sup>, Jiang Yibo<sup>1</sup>

(1.School of Civil Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou, Hebei 075000, China; 2.Hebei Key Laboratory of Diagnosis, Reconstruction and Anti-disaster of Civil Engineering, Zhangjiakou, Hebei 075000, China)

**Abstract:** [Objective] The a curing test of industrial waste iron tailings sand and loess mixed soil by adding an ionic curing agent or a glutinous rice slurry was conducted, and the curing effects of the two curing agents on the target soil sample were compared in order to provide theoretical support for subsequent engineering application and research. [Methods] An ionic curing agent and a glutinous rice paste were used to solidify the target mixed soil. The influence of the two curing agents on the strength and durability of the soil specimen was comprehensively evaluated through changes in the compressive strength of the soil specimen through dry-wet, freeze-thaw cycles and natural weathering tests. The influence of pore structure on compressive strength was measured using a scanning electron microscope and a specific surface area test. [Results] The strength increasing effect of mixed soil with a 1.5% ionic curing agent was better than that of other ionic curing agents, and was 50% greater than that of untreated soil. The strength increasing effect of soil mixed with 10% glutinous rice pulp was greater than observed for other rates of glutinous rice pulp mixed with soil, and the strength of the treated soil increased by 110%. After the durability test, the strength loss rate of soil mixed with the 1.5% ionic curing agent was smaller, and the residual strength of soil mixed with 10% glutinous rice pulp was greater. [Conclusion] Both the ionic curing agent and the glutinous rice pulp

收稿日期: 2022-01-21

修回日期: 2022-02-19

资助项目: 国家自然科学基金项目“自承重保温空心楼板式力学性能及结构保温一体化研究”(52078476); 河北省高等学校青年拔尖人才计划(BJ2020010)

第一作者: 李杨(1996—), 男(汉族), 河北省怀来县人, 硕士研究生, 研究方向为绿色建筑。Email: 862072638@qq.com。

通讯作者: 周占学(1973—), 男(汉族), 河北省张家口市人, 博士, 教授, 主要从事绿色建筑及结构抗震研究与教学。Email: zhanxue@163.com。

treatments can increase the strength performance of soil materials. Glutinous rice paste could be better curing agent than the ionic curing agent.

**Keywords:** iron tailings sand; soil solidification; ionic solidifying agent; glutinous rice pulp

铁尾矿是采矿后的废弃物,是工业废料的主要组成部分。据统计,全世界每年排出废弃尾矿约  $1.00 \times 10^{10}$  t。中国作为一个工业大国,据相关研究数据报道,2018 年尾矿废弃物产量已达  $1.21 \times 10^9$  t,约占全球尾矿排量的 12% 以上<sup>[1]</sup>。因技术限制,中国尾矿的综合利用率不足 7%,堆存的铁尾矿已达几十亿吨,而大部分尾矿仅做堆积和填埋处理,这既造成了大量土地资源的浪费,也对周遭环境造成了极大的破坏,同时,不断堆积的铁尾矿还存在着一定的安全隐患,影响着周遭居民的生活安全。因此,如何处理堆积的尾矿以及改善周围环境已经是一个迫在眉睫的问题。目前,很多领域的学者开始研究尾矿砂的综合利用方法,并取得了一定的成果。如冶金行业中,使用特殊工艺对尾矿砂中的部分有价值物质进行回收利用,收纳其中的有价金属<sup>[2]</sup>;又如建筑行业中,将尾矿砂进行特殊处理之后,用作建筑原材料,代替混凝土中的细骨料,消耗铁尾矿的同时减少天然河沙的利用,保护环境<sup>[3-4]</sup>;又如农业中,通过特殊工艺,将尾矿中有毒有害物质剔除,将剩余有益微量元素制作为改良土壤肥力的化肥<sup>[5-6]</sup>等等。然而上述方法中,虽然对铁尾矿有了一定的回收利用,但是工艺繁琐,使用周期长,对国内源源不断产出的尾矿消耗量并不巨大。笔者认为,如今国内大力发展基础设施建设,其中道路修缮,对天然回填土材料消耗极大<sup>[7]</sup>。使用铁尾矿充当路基材料,不仅可以减少天然材料的需求,最主要的是可以巨量消耗堆积的铁尾矿,是目前对工业废料铁尾矿效率最高的处理消耗方式。而在路基铺设过程中,直接使用未经过处理的土壤进行施工,存在着路面强度低、施工工期长以及耐久性差等缺点<sup>[8]</sup>,故需要使用特殊的固化剂对未处理的土壤进行强化作用,提高强度及耐久性等性能。同时固化剂种类繁多,分为无机物、生物酶类、高聚物离子类<sup>[9]</sup>等多种固化剂种类,选用何种优秀土壤固化剂也是本材料实际应用的难题之一。

河北省张家口市宣化区内矿产资源非常丰富,矿产开采规模较大。因此在张家口宣化区,因矿山开采而形成的尾矿堆数量多、储量大,在风雨的侵蚀下,严重影响当地生活<sup>[10-11]</sup>。为消耗工业废料铁尾矿,本研究使用市面常见离子固化剂——SCA-2 以及中国传统复合灰浆—糯米灰浆对掺量 30% 铁尾矿与黄土的混合土进行固化试验<sup>[12-16]</sup>,并结合耐久性试验前后孔隙结构的变化,来分析性能变化机理,讨论两种固化

剂对铁尾矿砂与黄土混合土固化效果的优劣性<sup>[17-21]</sup>,为后续的工程应用及研究提供理论支持。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

黄土取自张家口宣化区,经过液塑限试验和击实试验可得其主要物理参数(表 1)。铁尾矿砂取自张家口宣化区,主要成分为各种矿物。如赤铁矿、黏土、石英、辉石等等,其中二氧化硅的含量约为 70%。试验采用的粒径  $< 2$  mm,主要参数如表 2 所示。固化剂采用 SCA-2 型土壤固化剂,属于高分子合成外加剂,厂家推荐掺量 0.5%~1.5%。石灰,主要成分为 CaO。糯米浆采用黄国牌糯米粉,150 g 糯米加 1 L 水,熬制 1 h,之后通过密度计法,将其浓度调节为 1.04 g/ml。

表 1 黄土样品物理性质

项目	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	最优含 水率/%	最大干密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
数值	18	24.5	6.5	17.3	1.730

表 2 铁尾矿砂物理性质

表观密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	堆积密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	孔隙率/ %	含泥量/ %	泥块量/ %	含水率/ %
2 080	1 460	30	1.8	2.0	0.2

### 1.2 试验方法及设计

1.2.1 试样制备 采集张家口黄土与铁尾矿砂过筛,粒径控制在 2 mm 以下,在黄土中掺入 30% 铁尾矿,之后与不同比例的各种固化剂混合均匀,采用静压成型方法,在模具中压缩尺寸为 50 mm×50 mm (直径×高)的圆柱形试样。经过 24 h 静置后脱模,脱模后放置通风干燥处自然养护 28 d。试块养护后含水率为 3%。模具与试块如图 1 所示。

1.2.2 试验设计 本试验针对不同固化方法对土样性质的不同影响,分为两组平行试验。本试验以黄土与铁尾矿为原材料,采用离子固化剂和糯米浆以及少量石灰为固化剂,分成两大组进行对比试验。以质量计,试验基准配比是黄土:铁尾矿:石灰:水=100:30:4:18。在此基础上添加离子固化剂,离子固化剂掺量(占黄土质量的百分比)分别为 0%,0.5%,1%,1.5%,2%。使用糯米浆作为固化剂时,糯米浆配掺量(占黄土质量的百分比)分别为 2.5%,

5%,7.5%,10%,12.5%。其中糯米浆水分计入总水量,离子固化剂质量偏低,为黏稠状液体,不与水相同时计算。本文采取了通过高精度液体密度计控制糯米浆密度和通过量筒控制加入糯米浆质量的方法。用量筒量取所需体积的糯米浆溶液,先加入糯米浆,然后加水至所需质量,加水时要注意量筒壁上无糯米浆的残留。



图1 自然养护中的试块

### 1.3 性能测试方法

1.3.1 强度试验 养护28 d后,根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程(JTGE51-2009)》,采用南京宁曦土壤仪器有限公司产MQS-2型路面材料强度试验仪,测定其无侧限抗压强度。

1.3.2 耐久性试验 通过干湿循环、冻融循环试验,结合无侧限抗压强度和外貌观测,综合分析两种固化方式对试样的强度和耐久性能的影响。

1.3.3 干湿循环试验 将干湿循环试验箱设定试验温度为25℃。试样所处环境相对湿度变化下限为40%维持12 h,湿度变化上限为80%维持12 h,完成一个干湿循环用时24 h。循环次数设置为20次。在试件经过5,10,15,20次干湿循环时,对其进行无侧限抗压强度试验。

1.3.4 冻融循环试验 将标准养护干燥后的试样放入含水量率为10%的湿沙上吸水24 h,放入保湿器保存24 h。之后使用保鲜膜护住试件基础水分,放入KDR-287全自动低温冻融试验机(北京三思行测控技术有限公司)中进行试验。设定温度变化区间为-20~20℃,经过5,10,15,20次冻融循环后,分别对试样进行无侧限抗压强度试验。

1.3.5 自然风化试验 试验将标准养护28 d的掺入1.5%离子固化剂的混合土试块、掺入10%糯米浆的混合土试块和未掺入任何固化剂的混合土试块一同放置于野外大风露天环境下,使其在没有人工干预的自然环境下进行自然风化试验。经过30 d的测试后,对试块进行无侧限抗压试验,通过残余强度,分析

各试块在自然条件下的耐久性能。

1.3.6 试样断面形貌观察 试验采用便携式USB数码显微镜来观察试样的断面,分析试样的宏观孔隙结构与密实度,以及砂砾之间胶结物与填充物的分布。

1.3.7 孔隙结构试验 试验采用北京贝士德3H-2000PM1型高性能比表面及微孔分析仪,测定耐久性前后试样的孔隙结构,分析环境条件对试样的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 无侧限抗压强度试验

试验分为使用离子固化剂和使用糯米浆两大组,通过改变各组配比之间的含量,测定相应试件在28 d标准养护后的无侧限抗压强度,结果如图2所示。从图2可以看出,在掺加少量糯米浆的时候,试样的强度比初始强度稍微下降,但是随着糯米掺量的增加,试样的强度在不断地提高,当掺量10%的时候,试件强度达到最高,约为素土的2.08倍。这个现象是因为,糯米浆属于黏性物质,在土体中相当于黏结剂,把土颗粒之间相互黏结,从而改变黄土内部的结构变化,同时,足够量糯米的成分和石灰中的碳酸钙颗粒互相包裹,形成有机-无机复合结构,这种结构使得土体有更好韧性和强度,从而提高试件的整体强度。从图2可以看出,加入1%离子固化剂时,试件强度略低于初始强度,之后强度陡然上升,在添加1.5%离子固化剂时试件强度达到最高,之后便逐步下降。出现这个现象是因为在未掺入或掺入少量固化剂的时候,混合土中的石灰未与固化剂发生协同作用,二者各自单独起效,土壤固化效果较差,甚至在1%掺量,由于单独起效不协调而产生负面作用,使土壤强度下降。

当离子固化剂掺量达到1.5%时,各项比例协调,石灰在土壤中发生固化反应,与空气中二氧化碳反应形成碳酸钙,在土壤中形成稳定结构,穿插在土壤颗粒孔隙中形成强度骨架。离子固化剂溶液含有活性磺化油,有磺酸基和羟基组成“亲水头”,也有碳氢原子组成的“疏水尾”,加入固化剂后,结合水被疏水尾排除,结合水膜减薄,土颗粒更加紧密。同时溶液中的Cl<sup>-</sup>离子可以与石灰中的可溶性CaO结合,快速形成氯盐,从而增加强度与耐久。之后继续加大离子固化剂的掺入比例,又会破坏离子固化剂与混合土的平衡性,从而使试件强度降低。将图2的两条曲线进行对比可以看出,加入糯米浆的最大强度要高于加入离子固化剂的最大强度。将离子固化剂最优掺量

1.5%的试件和糯米浆最优掺量 10% 相对比, 掺入糯米浆的试件比掺入固化剂的试件的最大强度高出

30%。同时, 就两条曲线而言, 掺入糯米浆的试件比掺入离子固化剂的试件, 强度变化更加平稳。

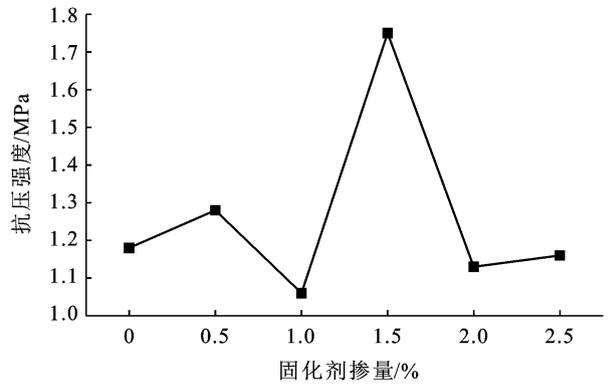
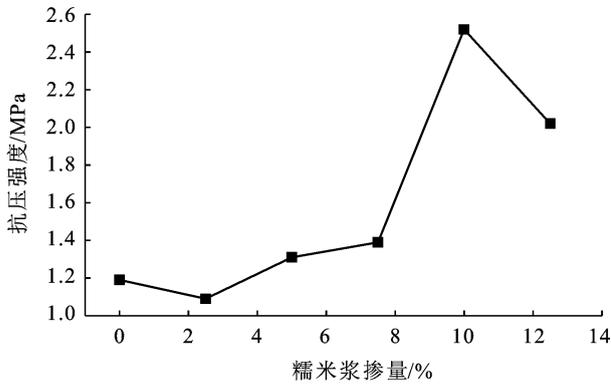


图 2 糯米浆掺量、固化剂掺量与抗压强度的关系

## 2.2 耐久性试验

**2.2.1 干湿循环试验** 由于有地下水和河流以及降雨的影响, 自然环境中经常会出现大量的水汽蒸发或迁移。本试验所研究为充分接触地基的夯土墙或路基, 会经常处于吸水—干燥的干湿循环之中, 因此要考虑干湿循环对于试件耐久性的影响, 干湿循环试验结果如图 3 所示。由图 3 可以看出, 所有试样的抗压强度, 均随着干湿循环次数的增加而呈现出下降的趋势。从图 3 来看, 虽然整体均呈下降趋势, 但是 0% 固化剂的掺合料下降幅度比较平稳, 在 5 d 后强度变化趋于平稳, 比初始值下降了 20%; 0.5% 固化剂的掺合料初始强度比未添加固化剂的素土强度高, 但是在进行 15 d 干湿循环后, 强度迅速下降, 15 d 后的强度仅为素土 15 d 后强度的 80%。这个现象是因为离子固化剂掺量太少, 只改变了一部分土的强度, 反而影响了土自身的稳定性, 降低了耐久性; 1% 掺量的固化剂在初始强度上比素土低少许, 但是在干湿循环 5 d 后强度超越素土, 但在 10 d 之后强度却大幅下降, 最终和 0.5% 固化剂掺合料的强度相差无几, 这是因为虽然 1% 掺量高于 0.5%, 在 5 d 内可以维持混合土料的强度, 但是在后续的干湿循环中却难以为继, 在抗干湿过程中依旧不如普通的素土。

从 1.5% 离子固化剂掺量的混合土从数据来看, 整体均优于素土, 随着干湿循环的增加, 在循环 10 次的时候, 强度上升, 而之后强度下降, 再上升, 逐渐趋于稳定, 整体强度均优于素土抗压强度, 最后提升在 20% 左右。这是因为固化剂与含有一定水分的土壤混合后, 在空气中对应成分参与反应的情况下碳化和结晶, 在土壤中形成网格状稳固结构, 穿插在土壤颗粒孔隙间形成强度骨架, 从而提高土体的强度; 从

2% 与 2.5% 固化剂来看, 二者在干湿循环中的变化与 0% 掺量的混合土干湿变化无异, 最初强度和干湿循环后的强度与 0% 掺量的混合土差别不大, 是因为材料使用固化剂过多, 导致土体中固化剂与固化剂相互连接, 无法与土壤协同工作, 导致强度下降。

从图 3 可以看出, 相较于土壤固化剂的干湿循环, 掺入糯米浆的干湿循环变化更加趋于稳定。掺入 2.5% 糯米浆的混合土强度比素土更低, 在 10 d 时达到最低, 随后强度稳步增加, 但依然不及普通素土强度; 5% 掺入量糯米浆整体强度均优于素土, 在干湿循环 5 次到 10 次时逐步下降, 但是 10 次后也有强度上升的趋势, 循环后的强度比素土提升了 30%; 7.5% 糯米浆掺入量的混合土与素土强度基本持平; 15 次后强度趋于平稳, 20 次强度比 15 次更高, 这种现象是因为糯米掺入的混合土中, 通过糯米本身的黏性, 可以提高混合土的黏聚力。10% 糯米浆混合土的初始强度大大优于普通素土, 在干湿循环中, 强度下降更快, 10 次的时候降至最低, 之后趋于平稳, 经过 20 次干湿, 强度比素土高出 80%; 12.5% 糯米浆掺入量的混合土初始强度低于 10% 糯米浆掺入量的混合土, 但是其干湿循环中下降量偏小, 经过 20 d 干湿循环, 其强度约等于 10% 糯米浆掺入量的混合土。

同时, 5 种掺入量的混合土均呈现出强度先降低, 后增强的现象。出现此种现象的原因是糯米浆与掺入的石灰所生成的碳酸钙颗粒有协同作用, 糯米浆成分和碳酸钙颗粒分布均匀, 互相包裹, 填充密实, 形成了有机—无机协同工作的复合结构。而碳酸钙的碳化是一个长期的过程, 随着时间的增加, 石灰逐步转化成碳酸钙颗粒, 进行长期的共同作用, 从而使得混合土的强度在后期有缓慢上升的趋势。

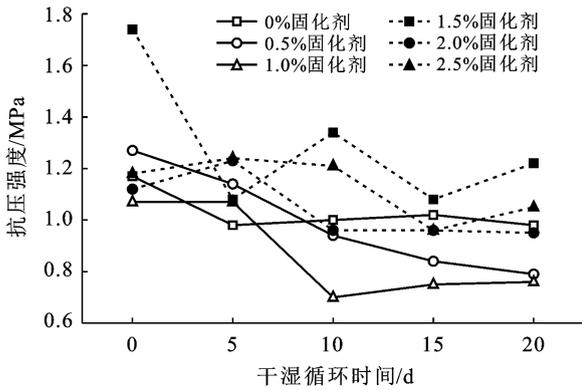
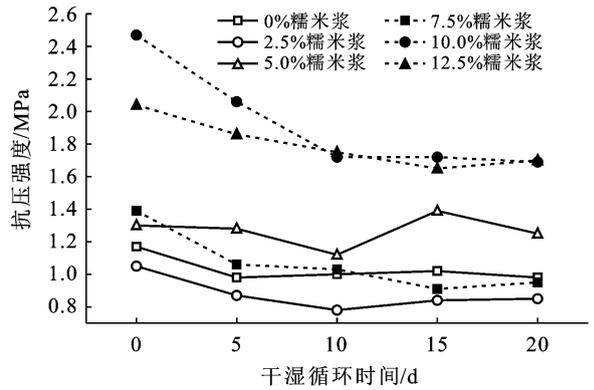


图 3 不同浓度离子固化剂组和糯米浆混合土干湿循环变化情况



从图 4 可以看出,将最优的固化剂掺合料与糯米浆掺合料相对比,在控制变量的情况下,在抗干湿循环的方面,糯米浆掺合料完全优于固化剂掺合料。在初始情况下,糯米浆掺合料的抗压强度是固化剂掺合料强度的 1.4 倍,而经过 20 次的干湿循环后,糯米浆掺合料的强度依然是固化剂掺合料的强度的 1.5 倍。

用,从而提高试块的耐久度。在冻融循环增加到 20 次后,各种浓度固化剂掺量的试块强度趋于同一数值,且初始强度最高的 1.5% 固化剂掺量的试块强度小于其他试块,2.5% 固化剂掺量的试块强度略高于其他试块。

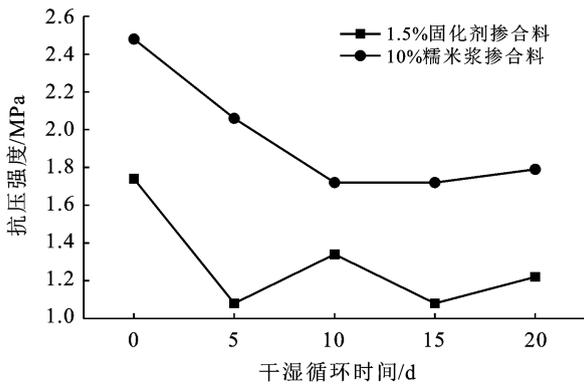


图 4 1.5%离子固化剂与 10%糯米浆混合土干湿循环变化

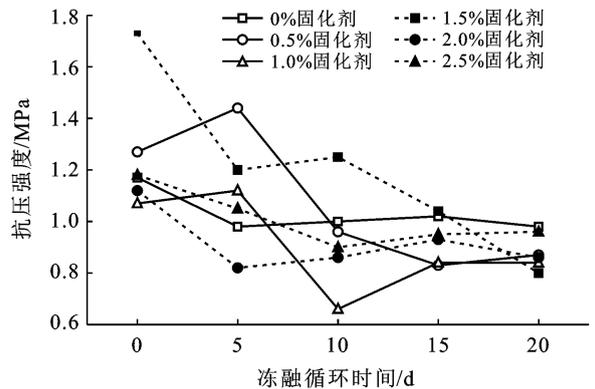


图 5 不同浓度离子固化剂冻融循环与抗压强度的关系

2.2.2 冻融循环试验 随着气候周期性变化,地区温度会出现规律性冻结与融化,即冻融循环作用。冻融循环作用会对土体产生破坏作用,因此要考虑冻融循环对试件耐久性的影响,试验结果如图 5—7 所示。通过图 5 可以看出,经过冻融循环,所有试块的抗压强度均随着冻融次数的增加而呈下降趋势。其中,在冻融循环小于 5 次的时候,0%,0.5%和 1% 固化剂掺量的试块出现短暂上升趋势,其原因是固化剂掺量较小土壤中的石灰受固化剂影响偏小,石灰与试块中水汽发生反应,凝结硬化,对试块强度有了短暂的加固作用。由于未和固化剂协同工作,冻融循环前期强度虽有增加,但是经过多次冻融循环,后期强度损失更快。2%和 2.5% 固化剂掺量的试块在 20 次冻融循环的过程中,强度下降更为缓慢,后期强度甚至出现小幅度增加,这是因为此时石灰与固化剂进行了协同作

由图 6 可以看出,随着冻融循环次数的增加,试件的整体抗压强度有着明显的下降趋势。

从图 6 还可以看出,素土在前 5 次冻融循环中,强度不降反增,其他掺量糯米浆均呈下降趋势。其原因是冻融循环会影响糯米浆工作的黏结性,从而导致土壤无法紧实。与此同时,10%糯米浆掺合料的整体强度依然优于其他掺量的糯米浆掺合料,虽然强度在冻融循环中降低,但是强度依然整体强度依然优于其他掺量的混合料,在经过 20 次冻融循环后,试样强度减 30%,但是整体强度依然比素土高出 90%,此现象说明,加入 10%糯米浆的可以有效提升土壤的抗冻性,比素土有着明显的提高。从图 7 可以看出,在抗冻融循环方面,10%糯米浆掺合料的强度均优于 1.5% 固化剂掺合料的强度。从图 7 来看,10%糯米浆掺合料强度的下降趋势趋于平缓,1.5% 固化剂的强度下降更为迅速。根据实际对比来看,在各种试验

条件相同的情况下,10%糯米浆掺合料的抗冻融循环能力要优于 1.5% 固化剂掺合料的抗冻融循环能力。

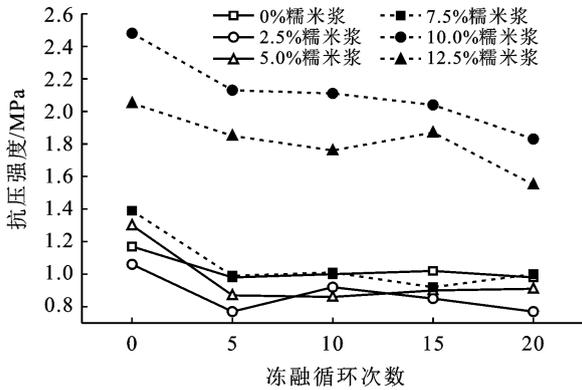


图 6 不同浓度糯米浆冻融循环与抗压强度关系

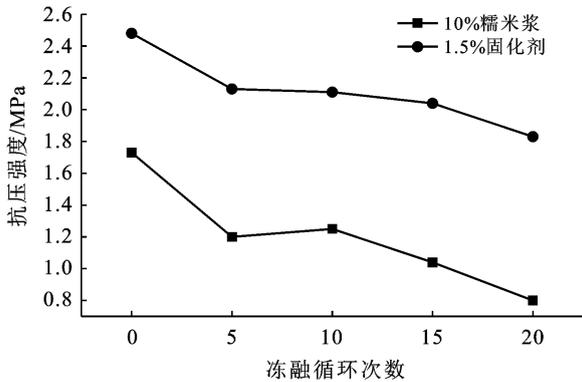


图 7 10%糯米浆与 1.5%固化剂混合土冻融循环强度变化

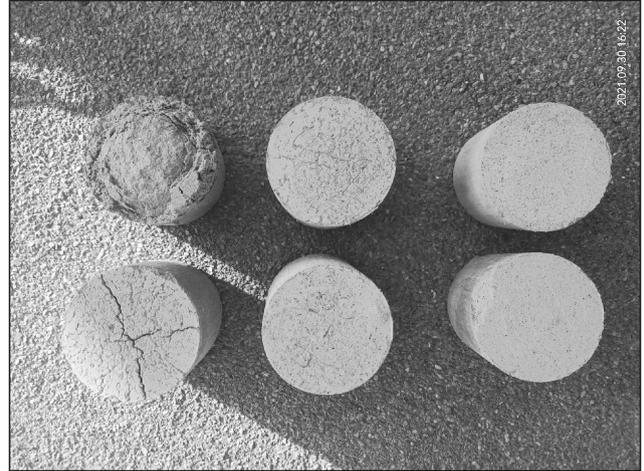
2.2.3 自然风化试验 西北地区气候条件复杂,既有气候冷暖的冻融循环,亦有雨雪风霜的干湿循环,既有紫外线的强力辐射,又有风沙的自然风化。因此,在自然环境下进行自然风化试验是十分必要的。测试时间从 2021 年 7—8 月,共计约 30 d。张家口地处温带大陆性季风气候,一年四季分明,夏天炎热且降水集中,蒸发量巨大。经过自然条件下的风、雨、紫外线侵蚀之后,土体抗压强度统计结果详见表 3。

表 3 自然风化 30 d 后各试样强度变化

编号	种类	风化后质量损失/%	风化前抗压强度/MPa	风化后抗压强度/MPa
1	未掺入离子固化剂与糯米浆	溃烂	—	—
2	1.5%离子固化剂	1.88	1.634	0.815
3	10%糯米浆	1.21	2.475	1.157

从表 3 和图 8 可以看出,在经过自然风化后普通试件整体溃烂,而离子固化剂组材料强度下降,糯米浆组下降幅度约 55%,但是整体强度依然最高。这种现象产生的原因一方面是固化剂是一种有机材料,

在与土混合的时候,会不断填充土壤中的微小裂缝,达到固化土的作用。而糯米中的黏性结构有石灰保存,且石灰在放置过程中不断与空气中的二氧化碳反应转化成强度更高的碳酸钙,与糯米协同作用,保护土壤的强度。由图 9a 可见,未添加固化剂的素土在自然环境侵蚀下发生溃烂,离子固化剂组表面产生轻微裂缝,而糯米浆组基本保持完好。



注:左,未添加固化剂,中 1.5%离子固化剂,右 10%糯米浆。

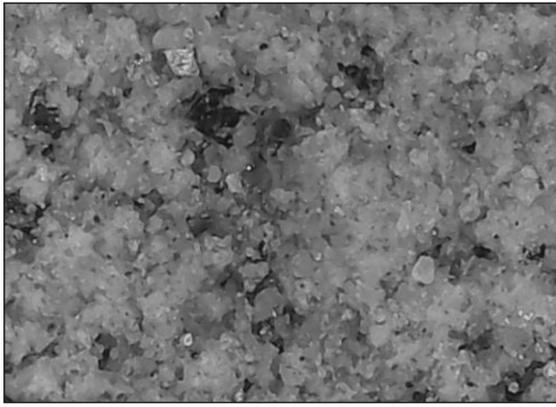
图 8 风化 30 d 的土体试件实拍

### 2.3 试样断面观察

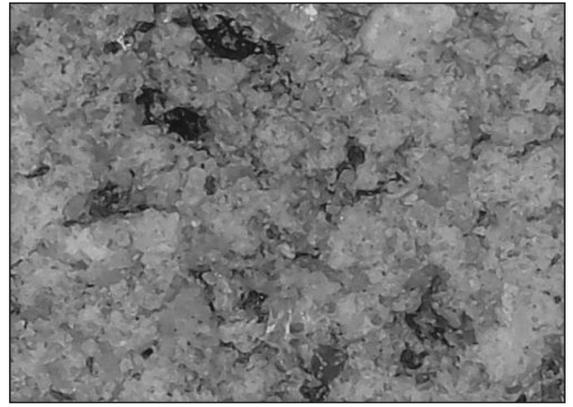
对试件进行放大 300 倍电镜试验,结果如图 9b—9d 所示。观察未掺入固化剂的试件时,其中土壤结晶和棱角比较分明,孔隙结构也比较松散。通过观察掺入 1.5% 离子固化剂的试块,可以看出试块的断面结构更加密实,沙砾见填充物更多。之后,对掺入 10% 糯米浆的试块进行观察,可以看到此试块的结构更加密实,且可以发现糯米黏丝包裹于土体之间,因此,其承受荷载的能力更强。最后,观察经过 40 d 风化后的试件可以发现,经过风化后,试件不仅出现了肉眼可见的微笑裂缝,结构较之前也更为松散,强度大幅下降。

### 2.4 孔隙分析试验

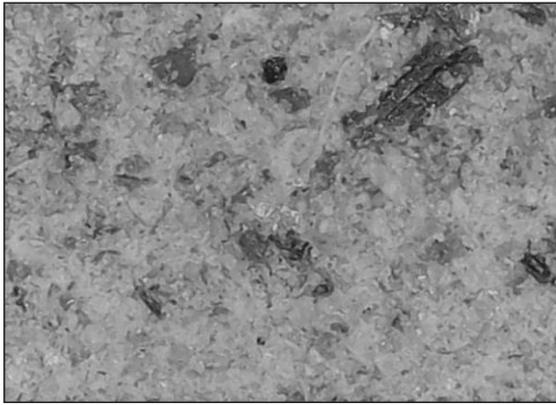
2.4.1 吸附—脱附等温线 孔隙结构采用氮气吸附法测定,3 个试样其他掺料配比均相同,编号 1 不加任何其他固化剂,编号 2 添加 1.5% 离子固化剂,编号 3 添加 10% 糯米浆。3 个试件的吸附—脱附等温试验结果详细情况如图 10 所示。由图 10 可以看出,3 组试样的吸附—脱附曲线形状相似,其中素土吸附量达到 34 ml/g,掺入 1.5% 离子固化剂的试块吸附量达 37 ml/g,掺入 10% 糯米浆的试块吸附量达到 37.5 ml/g。3 者均为第 II 型吸附曲线,因此 3 组固化试样均属于大孔固体结构。



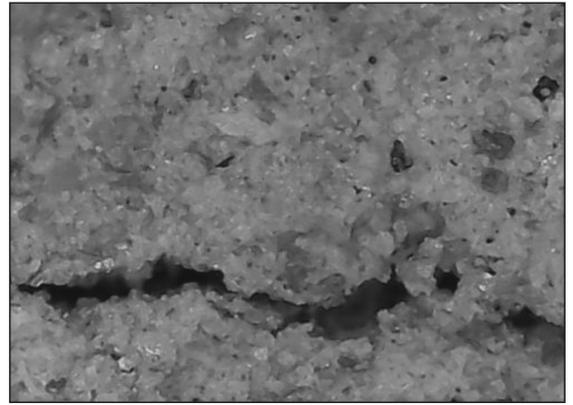
b 未掺入固化剂



c 掺入1.5%离子固化剂



c 掺入10%糯米浆



d 掺入1.5%离子固化剂风化土壤断面

图 9 不同掺入处理的风化土壤断面

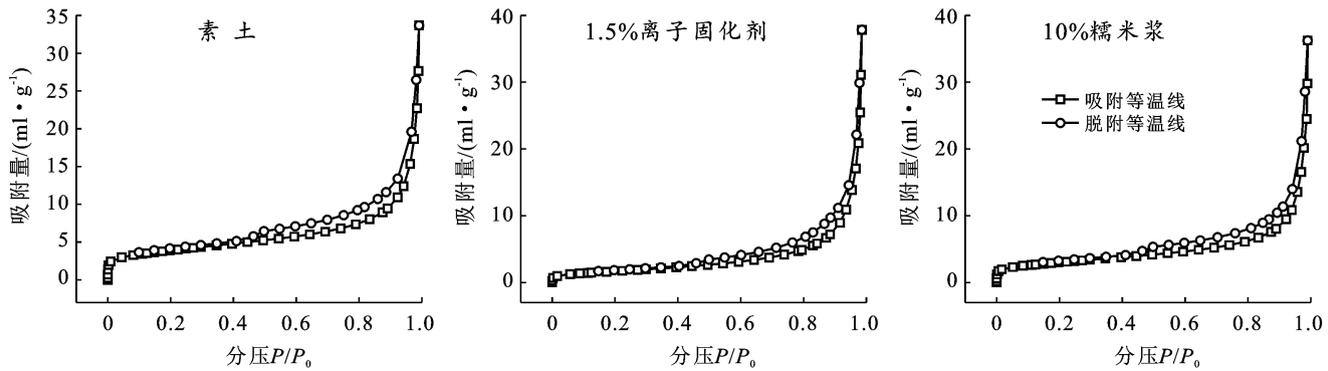


图 10 不同掺量试块的吸附—脱附等温线

2.4.2 比表面积及孔隙率分布 试样编号 1 为素土 (未加固化剂的混合料), 编号 2 为掺入 1.5% 离子固化剂的试件, 编号 3 为掺入 10% 糯米浆的试件。编号 4—7 为经过耐久试验后的各种试样, 分别为 1.5% 离子固化剂掺合料干湿 15 次 (编号 4)、冻融 15 次 (编号 5), 和 10% 糯米浆掺合料干湿 15 次 (编号 6), 冻融 15 次 (编号 7)。采用 BET 法和 BJH 法分别测得每种试样的比表面积和孔径分布, 结果详见表 4。

表 4 试样的比表面积及孔径分布

试件编号	比表面积/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	微孔体积/ ( $\text{ml} \cdot \text{g}^{-1}$ )	总孔体积/ ( $\text{ml} \cdot \text{g}^{-1}$ )	平均孔径/ nm
1	9.614 8	0.004 2	0.044 6	18.554 7
2	10.617 2	0.004 2	0.050 6	18.135 5
3	13.951 9	0.006 0	0.047 9	13.732 9
4	6.202 0	0.003 2	0.058 6	37.794 3
5	3.095 5	0.001 3	0.039 0	50.695 7
6	7.877 0	0.003 7	0.060 7	30.823 9
7	4.705 0	0.001 9	0.060 5	49.434 6

对比试样 1, 2 和 3 各项数据可知, 试样 2(1.5% 固化剂)与试样 1 的微孔体积相似, 但是由于试样 2 添加了离子固化剂, 故平均孔体积比试样 1(素土)低 0.419 2 nm, 强度有所上升。对比试样 3(10% 糯米浆)与试样 1, 由于添加糯米浆的原因, 试样 3 平均孔径比试样 1 低 4.821 8 nm, 远低于试样 1 的平均孔径, 故结构更加密实, 强度更高。这个现象说明糯米浆相较于离子固化剂, 可以有效改善土壤孔隙结构, 提高密实度, 从而显著提升强度。

试样在耐久性试验中有水汽、盐分以及金属氧化作用等情况, 均会造成试样孔隙结构发生变化, 从而影响试样的强度。试件 4(1.5% 固化剂)与试件 6(10% 糯米浆)均经过了干湿循环试验, 试样 4 的平均孔径相比试样 2 提升了 108%, 比试样 1 的平均孔径高出约 19 nm。试样 6 的平均孔径相比试样 3 提升了 124%, 比试样 1 的平均孔径高出 1 约 12 nm, 比试样 4 的平均孔径小约 7 nm, 再次印证了试样加入糯米浆后抗干湿循环能力优于加入离子固化剂。同理, 试样 5(1.5% 固化剂)与试样 7(10% 糯米浆)均进行了冻融循环试验, 试样 7 的平均孔径依然低于试样 5 的平均孔径。但是二者平均孔径远大于试样 1 的平均孔径, 说明冻融循环对试件结构破坏更大, 强度损失更高, 耐久防护中更应多考虑冻融循环对结构的不良影响。

### 3 结论

(1) 通过以 30% 铁尾矿砂与黄土的混合土为原料, 4% 石灰为辅料, 单独使用离子固化剂以及糯米浆作为改性材料固化黄土均可以达到有效的固化效果。通过无侧限抗压试验与耐久性试验, 掺入 1.5% 离子固化剂比其他浓度离子固化剂混合料强度更高, 相比未使用固化剂强度上升约 50%; 而在掺入 10% 糯米浆时, 混合料强度达到最高, 相比未使用糯米浆的混合土, 强度上升约 200%。掺入糯米浆作为土壤添加剂, 强度方面远优于离子固化剂。

(2) 加入离子固化剂的试样在 20 次干湿循环中强度发生了些许变化, 1.5% 固化剂掺量的混合料, 在 20 次干湿循环后的强度略优于其他掺量的混合料。但是在 20 d 冻融循环循环后, 强度最高的为 2.5% 离子固化剂掺量的混合料。试验结果证明 2.5% 离子固化剂掺量的混合料在冻融循环中略优于 1.5% 离子固化剂掺量的混合料。而加入 10% 糯米浆的混合料无论是经过抗冻融循环还是干湿循环的试验, 其强度均优于其他掺量的混合料, 且在干湿循环中最终强度是 1.5% 离子固化剂掺量的 1.5 倍, 在冻融循环 20 次后

的强度是 1.5% 离子固化剂掺量的 2.2 倍。

(3) 干湿循环、冻融循环试验后的孔隙率分析表明, 在干湿、冻融过程的不断吸水、失水以及温度的冷热交替中, 会使混合料的比表面积增加, 使得总孔隙率增大, 试件强度下降, 但是未出现会破坏骨架结构的超大孔隙。通过对比 1.5% 固化剂掺合料与 10% 糯米浆掺合料, 糯米浆掺合料强度下降更为缓慢, 固化性能更好, 耐久性更高。在实际工程中, 离子固化剂与糯米浆作为固化剂, 均可加强土体材料的强度与耐久。从强度与耐久方面来看, 中国传统固化砂浆—糯米浆掺合料的固化能力明显优于现代离子固化剂对土壤的固化效果。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 顾晓薇, 艾莹莹, 赵昀奇, 等. 铁尾矿资源化利用现状[J/OL]. 中国有色金属学报: 1-29[2022-08-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20220112.1844.002.html>.
- [2] 吴迪, 孟庆波, 高玉德, 等. 某烧绿石尾矿选铈试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(6): 112-118.
- [3] 康洪震, 王宇, 李强. 铁尾矿砂混凝土与 HRB500 钢筋锚固性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(1): 92-96.
- [4] 申艳军, 白志鹏, 郝建帅, 等. 尾矿制备混凝土研究进展与利用现状分析[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(3): 845-857, 876.
- [5] Cui Xiaowei, Geng Yong, Li Tao, et al. Field application and effect evaluation of different iron tailings soil utilization technologies [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 173: 105746.
- [6] Long Jibo, Chen Baodong, Zhu Yongguan, et al. Mycorrhiza and iron tailings synergistically enhance maize resistance to arsenic on medium arsenic-polluted soils through increasing phosphorus and iron uptake [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2021, 107(6): 1155-1160.
- [7] 白永厚, 陈泽盟, 张耀阳, 等. 高原冻土地区公路路基回填料优选及施工技术[J]. 水利水电技术, 2021, 52(2): 100-108.
- [8] 蒋鑫, 凌建明, 李进. 高速公路填砂路基设计若干关键问题[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(3): 570-575.
- [10] 孙婧, 刘宏波, 毛世奇, 等. 含盐铁尾矿砂在机械沙障中的固化性能[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 184-190.
- [11] 杨良权, 陈爱兵, 高焕芝, 等. 尾矿库工程地质灾害易损性评价研究[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 290-295.
- [12] 王银梅, 韩文峰, 谔文武. 新型高分子固化材料与水泥加固黄土力学性能对比研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1761-1765.

- [7] Geravand F, Hosseini S M, Ataie-Ashtiani B. Influence of river cross-section data resolution on flood inundation modeling: Case study of Kashkan River basin in Western Iran [J]. *Journal of Hydrology*, 2020,584:124743.
- [8] 朱思诚,任希岩.关于城市内涝问题的思考[J].*行政管理改革*,2011(11):62-66.
- [9] Huang Mingbin, Gallichand J, Wang Zhanli, et al. A modification to the soil conservation service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China [J]. *Hydrological Processes*, 2006,20(3):579-589.
- [10] 吴志宜,俞志强,朱雪坚,等. SCS 模型在不同土地类型地表产流计算中的应用:以余姚地区为例[J].*浙江大学学报:理学版*,2016,43(2):226-230.
- [11] 张鑫,张青峰,周阳阳,等.不同坡度黄土微地形条件下 SCS-CN 模型参数研究[J].*水土保持研究*,2019,26(2):74-77.
- [12] 栾承梅,梁忠民,仇少鹏,等.山丘区小流域 SCS-Nash 产汇流模型应用[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2021,19(2):246-254.
- [13] 吴克宁,赵瑞.土壤质地分类及其在我国应用探讨[J].*土壤学报*,2019,56(1):227-241.
- [14] Boughton W C. A review of the USDA SCS curve number method [J]. *Soil Research*, 1989,27(3):511-523.
- [15] Liu Xianzhao, Li Jiazhu. Application of SCS model in estimation of runoff from small watershed in Loess Plateau of China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2008,18(3):235-241.
- [16] Jung J W, Yoon K S, Choi D H, et al. Water management practices and SCS curve numbers of paddy fields equipped with surface drainage pipes [J]. *Agricultural Water Management*, 2012,110:78-83.
- [17] Reistetter J A, Russell M. High-resolution land cover datasets, composite curve numbers, and storm water retention in the Tampa Bay, FL region [J]. *Applied Geography*, 2011,31(2):740-747.
- [18] Verma S, Singh P K, Mishra S K, et al. Activation soil moisture accounting(ASMA)for runoff estimation using soil conservation service curve number(SCS-CN) method [J]. *Journal of Hydrology*, 2020,589:125114.
- [19] 王冬,李丽,王加虎,等.径流曲线数(SCS-CN)模型在洪水预报中的应用研究[J].*中国农村水利水电*,2017(8):108-112.
- [20] 刘家福,蒋卫国,占文凤,等. SCS 模型及其研究进展[J].*水土保持研究*,2010,17(2):120-124.
- [21] 雷晓玲,邱丽娜,魏泽军,等.基于 SCS-CN 模型在山地海绵城市不同下垫面径流预测的优化及应用[J].*中国农村水利水电*,2021(11):49-52,57.
- [22] 费茉莉,刘苇航,王席,等.城市暴雨内涝模拟模型优化与精度验证[J].*地球信息科学学报*,2017,19(7):895-900.
- [23] 马永强,李梦华,郝姗姗,等.黄土丘陵沟壑区雨水资源化途径及潜力分析[J].*中国农村水利水电*,2018(7):9-14.
- [24] 徐刘凯,王全金,向速林.应用 SCS 模型模拟清丰流域产汇流量[J].*华东交通大学学报*,2011,28(4):84-88.
- [25] 符素华,王向亮,王红叶,等. SCS-CN 径流模型中 CN 值确定方法研究[J].*干旱区地理*,2012,35(3):415-421.
- [26] 郭晓辉,王秀茹,王希.基于 SCS-CN 和 GIS 的潜在集雨工程位置确定[J].*湖南农业科学*,2014(17):48-52.
- [27] 杜世勋,郭新亚,荣月静.基于 Budyko 假设和 SCS-CN 模型的河源区水源涵养功能研究[J].*水土保持研究*, 2018,25(1):147-152.
- [28] 李星瑶,张根广,高建恩,等.沟道土地整治对不同植被覆盖流域 CN 值的影响[J].*水土保持通报*,2021,41(4):54-60.

(上接第 202 页)

- [13] 李建东,王旭,张延杰,等.F1 离子固化剂加固黄土强度及微观结构试验研究[J].*东南大学学报(自然科学版)*, 2021,51(4):618-624.
- [14] 陈丹,吕春娟,郭星星,等.容重对铁尾矿水分运移特征的影响[J].*水土保持通报*,2019(1):78-84.
- [15] 崔宏环,秦晓鹏,王文涛,等.冻融条件下非饱和路基土的强度及微观特性研究[J].*冰川冻土*,2019,41(5):1115-1121.
- [16] 崔凯,王东华,谌文武,等.基于改性糯米灰浆的 3 种锚杆锚固性能对比研究[J].*岩土力学*,2018,39(2):498-506.
- [17] 纪晓佳,宋茂强,庞苗.糯米浆三合土的物理力学性能试验研究[J].*建筑技术*,2013,44(6):540-543.
- [18] Zhang Qi, Li Beibei, Zeng Qiang, et al. Erosion of aerial lime and sticky rice mortars by cyclic wetting-drying and dilute sulfate acid actions [J]. *Advances in Cement Research*, 2020,32(8):343-357.
- [19] Li Jiandong, Wang Xu, Zhang Yanjie, et al. Study on strength characteristics and mechanism of loess stabilized by F1 ionic soil stabilizer [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021,14(12):1-11.
- [20] 中华人民共和国交通运输部.JTGE51-2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].北京:人民交通出版社,2009.
- [21] 国家质量技术监督局,中华人民共和国建设部.GB/T50123-1999 土工试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,1999.