

DOI: 10.11779/CJGE201508016

# 露天矿泥岩路基双重改性研究

杨建林<sup>1, 2</sup>, 王来贵<sup>2</sup>, 李喜林<sup>3</sup>, 张 鹏<sup>2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学材料科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000;

3. 辽宁工程技术大学建筑工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘 要:** 为了对露天矿临时性公路泥岩路基进行改良, 提高泥岩路基的力学强度和耐崩解性, 提出了双重改性方法。采用 XRD、激光共聚焦显微镜、SEM、红外光谱仪、静态水接触角试验、力学性能测试等手段对改性前后泥岩的成分、微观结构、憎水性、膨胀率和抗剪强度等特征进行表征, 分析了不同改性方法对泥岩改性的微观机理。结果表明: 改性前泥岩浸水 10 min 崩解成碎屑, 有机改性和双重改性后泥岩浸水 2 d 表面无明显变化, 无机改性后泥岩浸水 2 d 周围有崩解碎屑产生; 有机改性和双重改性后泥岩的润湿角由  $2.6^\circ$  分别增加为  $116.3^\circ$  和  $119.4^\circ$ , 而无机改性后润湿角仅为  $4.5^\circ$ ; 经过有机改性、无机改性和双重改性, 膨胀率由改性前的 16.7% 分别减小为 11.2%, 4.2% 和 2.4%; 改性前泥岩的抗剪强度随含水率的增加而减小, 改性后抗剪强度随含水率的增加先升高后降低, 双重改性对抗剪强度的提高最明显, 含水率为 25% 时泥岩改性效果最好。有机改性时岩粒表面形成一层非极性憎水膜, 但泥岩的抗剪强度提高幅度较小; 无机改性时泥岩内部孔隙被三维网状凝胶结构填充, 力学强度明显提高, 但耐崩解性提高幅度较小; 双重改性综合了有机改性和无机改性的优点, 力学强度和耐崩解性显著提高。

**关键词:** 泥岩; 有机; 无机; 双重改性; 力学性能; 微观机理

**中图分类号:** TU458

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 4548(2015)08 - 1469 - 09

**作者简介:** 杨建林(1980 - ), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩土力学等方面的教学和科研。E-mail: jlyanget@163.com。

## Double modification for mudstone roadbed of open pit mines

YANG Jian-lin<sup>1, 2</sup>, WANG Lai-gui<sup>2</sup>, LI Xi-lin<sup>3</sup>, ZHANG Peng<sup>2</sup>

(1. College of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. College of Materials Science and

Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 3. College of Architecture and Engineering, Liaoning Technical

University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** Mudstone can soften and break down in contact with water. This behaviour is frequently encountered in mudstone roadbed engineering of open pit mines. It is highly important to improve the mechanical properties of mudstone. By using the X-ray diffractometer, three-dimensional laser topography measurement instrument, scanning electron microscope, Fourier transform infrared spectrometer, static water contact angle tests and mechanical experiments, the mudstone was characterized to investigate its change rules of composition, topography, contact angle, swelling ratio and shear strength, respectively. More attention was paid to the micro-mechanism of organic, inorganic and double modification. The results show that the size of cracks increases with the increasing soaking time of mudstone, and it disintegrates in water 10 minutes later, however the mudstone does not disintegrate in water 2 days later after organic and double modification except for that modified by inorganic materials. The contact angle of water on the surface of mudstone is  $2.6^\circ$ ; after organic and double modification, it increases to  $116.3^\circ$  and  $119.4^\circ$ , respectively; however it is only  $4.5^\circ$  for the mudstone modified by inorganic materials. After organic, inorganic and double modification, the swelling ratio of mudstone decreases from 16.7% to 11.2%, 4.2% and 2.4%, respectively. The shear strength of mudstone decreases with the increasing water content before modification. After modification, both cohesion and internal friction angle increase with the increasing water content, and then decrease with the increasing water content. After double modification, the mechanical strength of mudstone with water content of 25% is optimum. Hydrophobic film forms in the surface of mudstone grains in the process of organic modification, however the mechanical strength of mudstone is enhanced slightly. The pores are filled by three-dimensional net gel texture in the process of inorganic modification. The cementation condition between grains of mudstone is improved by inorganic silicate materials, and the mechanical

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51274110, 51304106, 51404136)

**收稿日期:** 2014 - 11 - 30

strength is enhanced obviously, however hydrolytic stability of mudstone is enhanced slightly. Double modification has the advantages of both organic and inorganic modification. The mechanical strength and hydrolytic stability are enhanced obviously for mudstone after double modification.

**Key words:** mudstone; organic; inorganic; double modification; mechanical property; micro-mechanism

## 0 引言

中国露天煤矿主采区的特征是煤炭赋存于泥岩、第三系红黏土及第四系沙砾土中<sup>[1]</sup>。露天矿临时性公路位于采掘工作面和排土场工作面,穿越泥岩、第三系红黏土及第四系沙砾土层。由于临时公路随着采掘线和排土线的推进不断移动,一般只对路基做简单的压实、整平处理,运输车直接在泥岩或膨胀土路面上行驶,这类公路具有坡度陡、转弯多、运量大及服务年限短等特点。对于泥岩,天然状态下形状完整、力学性能良好,但遇水后短时间内产生膨胀和崩解,强度急剧降低<sup>[2-3]</sup>。尤其在雨季,持续降雨引起泥岩路基短时间内吸收大量水,导致路基不均匀沉降,承载力不足,甚至泥化,影响露天矿的正常生产,甚至导致短时间内停产,造成经济效益下降。因此,开展泥岩改性研究具有重要意义。

许多学者研究了泥岩及膨胀土引起不良工程地质问题的原因,并且开展了泥岩及膨胀土路基改性方面的研究。高国瑞<sup>[4]</sup>、谭罗荣等<sup>[5]</sup>研究了膨胀土的微结构,分析了产生膨胀的结构原因。黄宏伟等<sup>[6]</sup>研究了不含蒙脱石的泥岩遇水过程中微观结构的变化特征,分析了泥岩软化崩解的原因。刘镇等<sup>[7]</sup>提出了软岩饱水软化过程中微观结构演化的临界判据,建立了软岩微观结构和力学特性之间的定量关系。孔令伟等<sup>[8]</sup>研究了原状膨胀土的水稳定性及力学效应。陈伟志等<sup>[9]</sup>研究了铁路路基荷载下非饱和膨胀土浸水后的变形特征。祝艳波等<sup>[10]</sup>利用石灰、水泥、粉煤灰对泥岩路基土的不良特性进行改良。郭爱国等<sup>[11]</sup>利用石灰对膨胀土进行改性,研究了公路工程施工最佳含水率的确定方法。冯美果等<sup>[12]</sup>研究了粉煤灰改性膨胀土路基的水稳定性特征。胡萍等<sup>[13]</sup>研究了石灰和水泥改良软岩的强度形成机理。张中云等<sup>[14]</sup>利用水泥对红层泥岩进行改性,确定了红层泥岩路基的施工参数。张鑫等<sup>[15]</sup>利用绿砂对公路膨胀土路基进行改良。柴肇云等<sup>[16]</sup>利用化学方法改变了泥岩的表面特性,研究改性对泥岩物理、化学和力学特性的影响。

前人研究主要分析了泥岩及膨胀土遇水过程中微观结构的变化规律,并且对泥岩及膨胀土进行改良处理,研究了改良前后微观结构和力学性能的变化机理。利用石灰和粉煤灰对泥岩和膨胀土进行改良处理,所需龄期较长,一般龄期 1 个月以上无侧限抗压强度才

有明显提高,并且提高幅度较小<sup>[11-12]</sup>。利用水泥对泥岩和膨胀土进行改良处理,一般龄期几天无侧限抗压强度有较大提高<sup>[14]</sup>。加入水泥改良泥岩时加入量小于 5% 时,泥岩的崩解率仍然较大<sup>[10]</sup>。利用有机材料对泥岩进行改良处理,泥岩由亲水性变为憎水性,力学强度提高幅度较小<sup>[16]</sup>。露天矿临时性公路的服役时间短,对它的要求低于四级公路,路基满足具有较高的力学强度和耐崩解性既可。根据泥岩的成分及结构特点,研究经济、有效地改良泥岩路基的方法,对露天矿的安全生产具有重要意义。

本文以内蒙古伊敏河矿区的粉砂质泥岩为例,通过有机材料(有机改性)和无机材料(无机改性)对泥岩进行化学改性,结合两种改性的优点提出了双重改性的方法,即先对泥岩进行无机改性随后进行有机改性。采用有机硅加固剂作为有机改性材料、#425 硅酸盐水泥作为无机改性材料,利用 X 射线衍射仪(XRD)、激光共聚焦显微镜、扫描电子显微镜(SEM)、傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)、静态水接触角试验、膨胀率试验和直剪试验分析了改性前后泥岩的成分、微观结构、憎水性、膨胀性和力学强度等物理力学性能变化规律,并从微观上讨论了不同改性方法对泥岩的改性机理。期望提高泥岩路基的强度及耐崩解性,为露天矿临时性公路路基的设计施工提供参考。

## 1 试验过程

### 1.1 粉晶 X 射线衍射试验

为了使试验样品具有代表性,从大块泥岩上敲下质量为 200 g 的泥岩块,然后进一步破碎,放入玛瑙研钵磨成细粉,采用四分法分样。利用粉晶 X 射线衍射仪 Shimadzu XRD-6100 测试成分,靶材为 Cu 靶,加速电压为 30 kV,电流为 40 mA,滤波片选用 Ni,扫描速度为 5°/min,步长为 0.02°。

### 1.2 泥岩浸水作用时间试验

为了降低岩样非均一性的影响,选取表面没有宏观裂纹的大块风干泥岩,从同一块泥岩上切割下 5 块边长为 2 cm 的正方体,放在培养皿内,分别记为试样 1, 2, 3, 4 和 5。试样 2, 3, 4 和 5 分别浸入水中等待 3, 6, 9, 12 s 后取出,在空气中风干 48 h,利用激光共聚焦显微镜 OLYMPUS OLS4000 观察试样

表面的三维形貌。

### 1.3 红外光谱试验

利用傅里叶变换红外光谱仪 Shimadzu IRPrestige-21, 测量改性剂的红外光谱。先用玛瑙研钵将质量约为 0.2 g 的 KBr 粉末研磨成细粉, 将粉末放入模具内用 700 MPa 的压力压成透明薄片, 放入样品腔内扫描背底, 取出 KBr 片, 在表面涂一薄层改性剂, 放入样品腔测量并扣除背底。

### 1.4 润湿角测量试验

润湿角的测量分为改性前、有机改性、无机改性和双重改性 4 组进行。改性前和有机改性试样取自泥岩原岩, 将大块泥岩切割成边长为 2 cm 的正方体 6 块, 表面用 5 号砂纸磨平, 放入养护箱将泥岩的含水率控制在 25% 附近。试样分成两组, 每组 3 块, 其中一组为改性前泥岩; 另外 3 块浸入有机硅加固剂浸泡 30 min, 取出后在养护箱中养护 10 h, 作为有机改性泥岩。无机改性和双重改性试样取自重塑泥岩。将风干后的泥岩敲碎, 用筛子筛分成粒度小于 1 mm 的颗粒, 测出泥岩颗粒的含水率为 8.9%。根据击实试验结果, 得到泥岩的最大干密度为  $1.825 \text{ g/cm}^3$ 。本文中重塑试样的含水率和压实度指的是配制试样时的含水率和压实度。根据压实度公式, 压实度 = 干密度 / 最大干密度, 压实度为 90% 时试样干密度为  $1.643 \text{ g/cm}^3$ 。根据干密度、含水率和模具体积, 计算制备一个试样所需泥岩、水和 #425 水泥的质量。用电子天平称出泥岩、水和水泥, 搅拌均匀后放入模具, 压成尺寸为  $\phi 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  的圆柱试件。将圆柱试件切割成边长为 2 cm 的正方体 6 块, 表面用 #5 砂纸磨平, 分成两组, 每组 3 块, 其中一组为无机改性试样, 在养护箱中养护 10 h; 另外 3 块浸入有机硅加固剂 30 min, 取出后在养护箱中养护 10 h, 作为双重改性试样。采用静态水接触角法测量水在泥岩表面的润湿角, 每个试样表面滴两个水滴, 分别测润湿角, 取平均值作为润湿角试验值。

### 1.5 膨胀率测量试验

将泥岩制成含水率为 25%, 压实度为 90%, 尺寸为  $\phi 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  的重塑试样, 制样过程参见 1.4 节。试样分成改性前、有机改性、无机改性和双重改性四组, 每组 3 个试样, 取平均值作为试验值。测试时试样上、下表面各放一块透水石, 蒸馏水的高度高于透水石上表面约 5 mm。为了减少泥岩与样品腔间的摩擦力, 在样品腔内侧涂一层凡士林, 将位移传感器放于上透水石表面中心。

### 1.6 直剪试验

直剪试验的试样尺寸采用  $\phi 61.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  的重塑试样, 压实度为 90%, 制样过程参见 1.4 节。试样分为改性前、有机改性、无机改性和双重改性 4 组,

每组试样的含水率分别为 15%, 20%, 25%, 30% 和 35%, 每组 4 个相同含水率的试样放于 ZJ 型应变控制式直剪仪上, 分别施加轴向压力 100, 200, 300, 400 kPa, 剪切速率为 0.8 mm/min。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 泥岩成分及击实试验

图 1 为试样的 XRD 图, 经过物相分析得出试样的主要成分为石英、高岭石、蒙脱石、伊利石, 各成分的含量分别为石英 29%、高岭石 15%、蒙脱石 16%、伊利石 29%、方解石 10%。

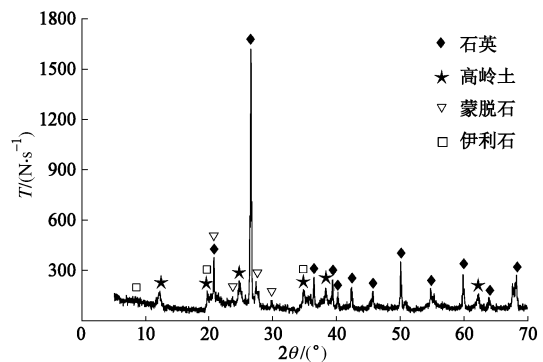


图 1 泥岩的 X 射线衍射图

Fig. 1 XRD of mudstone

根据击实试验结果, 得到泥岩试样的最大干密度为  $1.825 \text{ g/cm}^3$ , 最佳含水率为 19.55%, 如图 2 所示。

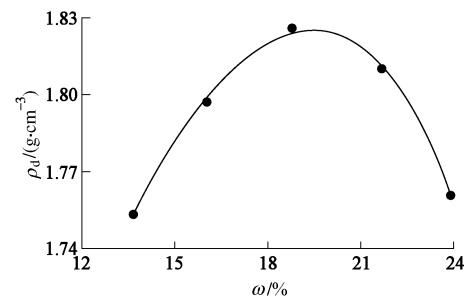


图 2 泥岩的击实曲线

Fig. 2 Compaction curve of mudstone

### 2.2 泥岩表面形貌随浸水时间的变化规律

图 3 为试样 1, 2, 3 和 4 分别浸水 0, 3, 6, 9 s 后表面的三维形貌, 放大倍数为 100 倍, 试验过程见 1.2 节。图中观察区域为试样上表面最大裂纹附近区域。图 3 (a) 为试样 1 (风干泥岩) 的表面形貌, 试样表面平整, 没有裂纹。图 3 (b) 为试样 2 浸水 3 s 后的表面形貌, 试样表面比较平整, 但存在 4 条裂纹, 裂纹的最大宽度约为  $95 \mu\text{m}$ , 表明浸水后泥岩内部的微观结构发生变化。图 3 (c) 为试样 3 浸水 6 s 后的表面形貌, 存在 4 条裂纹且裂纹宽度增加, 最大宽度约为  $310 \mu\text{m}$ 。图 3 (d) 为试样 4 浸水 9 s 后的表面形

貌, 观察到 5 条裂纹, 其中一条裂纹的宽度明显大于其余裂纹, 最大宽度约为  $1030\ \mu\text{m}$ , 试样表面变得高低不平。试样 5 在水中浸泡 12 s, 取出的过程中崩解为多个碎块, 故没有给出其形貌图。

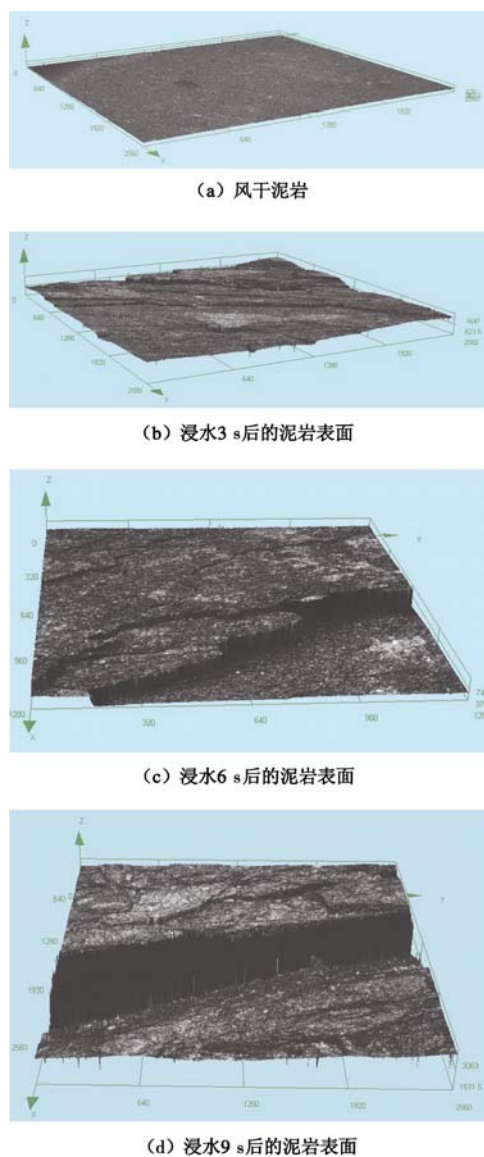


图 3 不同浸水时间后泥岩表面的三维形貌图

Fig. 3 Three-dimensional microstructure of mudstone soaked in water after different time intervals

图 4 为图 3 中裂纹的最大宽度  $W$  与浸水时间  $t$  之间的关系。 $t < 6\ \text{s}$  时裂纹宽度随浸水时间的增加缓慢增大,  $t > 6\ \text{s}$  时裂纹宽度随浸水时间的增加急剧增加, 试样浸水大约 12 s 崩解成多个碎块。本试验表明, 泥岩遇水后内部微观结构发生了改变。泥岩浸水后, 水逐渐渗入泥岩内部。进入岩粒晶格内部的水称为化学结晶水, 能够引起晶格膨胀, 使泥岩内部产生次生孔隙<sup>[17]</sup>。泥岩颗粒表面吸附一层水化膜, 水化膜由分子结合水和吸附水两部分构成。紧靠岩粒表面的水称为分子结合水, 分子结合水是强结合水, 只有在加热到  $105^\circ\text{C}$

才能消失; 吸附水位于分子结合水外面, 是水化膜的主要部分, 黏土颗粒周围的吸附水膜厚度可达  $5\sim 10\ \mu\text{m}$ , 吸附水是弱结合水, 泥岩风干时吸附水消失<sup>[18]</sup>。水化膜引起泥岩体积膨胀, 使泥岩内部产生次生孔隙。能够在泥岩内部孔隙内自由流动的水称为重力水。重力水对矿物颗粒产生冲刷、运移物理作用和溶解、溶蚀化学作用, 进一步增加泥岩内部的次生孔隙。如果提高岩粒之间的胶结程度; 另一方面使黏土颗粒表面由亲水性变为憎水性, 阻止水分子吸附在黏土颗粒表面, 泥岩遇水后微观结构能够保持不变, 从而提高泥岩的力学强度和耐崩解性。

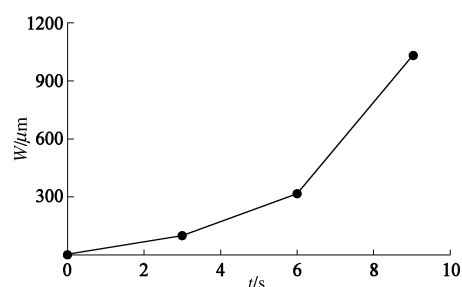


图 4 试样表面裂纹宽度  $W$  与浸水时间  $t$  的关系

Fig. 4 Relationship between  $W$  and  $t$

## 2.3 改性对泥岩润湿角的影响

图 5 为有机硅改性剂的 FTIR 谱图。图中,  $794/\text{cm}$  吸收峰为  $\text{Si-CH}_3$  的弯曲振动特征峰;  $966/\text{cm}$  吸收峰为  $\text{C=C-H}$  的弯曲振动特征峰;  $1095/\text{cm}$  吸收峰为  $\text{Si-O-Si}$  键的对称伸缩振动特征峰;  $1250/\text{cm}$  吸收峰为环氧基的伸缩振动特征峰;  $2966/\text{cm}$  吸收峰为甲基的伸缩振动特征峰。改性材料中存在多种官能团, 可能对泥岩表面进行改性, 改善泥岩的水理性质。

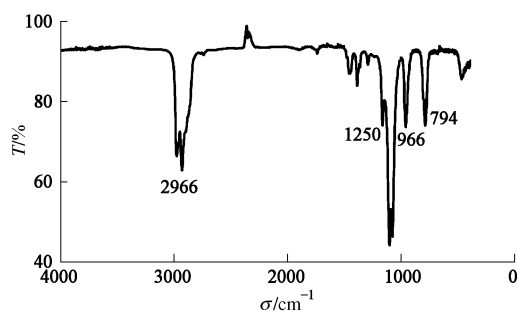


图 5 改性剂的 FTIR 谱图

Fig. 5 FTIR spectra of modification materials

图 6 为泥岩改性前、后在水中的崩解过程。图 6 (a) 为改性前泥岩浸水 10 s 后的形貌, 表面部分区域崩解成碎屑散落在烧杯底部; 图 6 (b) 为改性前泥岩浸水 600 s 后的形貌, 块状泥岩完全崩解成碎屑。图 6 (c) 为有机改性后泥岩浸水 10 s 后的形貌, 泥岩表面没有发生变化; 图 6 (d) 为有机改性后泥岩浸水

2 d 后的形貌, 仍然没有发生崩解, 泥岩形貌没有发生明显改变。可见, 有机硅加固剂使泥岩的憎水性发生变化。图 6(e) 为无机改性后试样浸水 10 s 后的形貌, 与改性前相比试样底部无崩解碎屑。图 6(f) 为无机改性后试样浸水 2 d 后的形貌, 试样形状仍然完整, 但试样底部周围存在少量碎屑, 说明试样表面发生了部分崩解。利用含量为 5% 的水泥对泥岩进行无机改性后, 短时间内耐崩解性得到提高, 但经过 2 d 后部分发生了崩解。图 6(g) 为双重改性后试样浸水 10 s 后的形貌, 与有机改性和无机改性后试样类似, 试样没有发生崩解; 图 6(h) 为双重改性后试样浸水 2 d 后的形貌, 与图 6(g) 相比形貌无明显变化, 具有良好的耐崩解性。

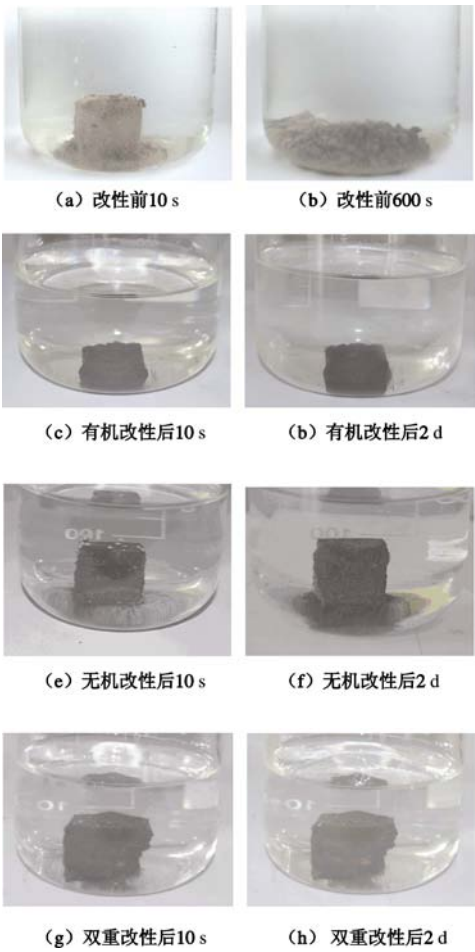


图 6 泥岩改性前后的崩解性

Fig. 6 Degradation of mudstone before and after modification

采用润湿角定量表征泥岩的憎水性。水滴在岩样表面上, 形成固、液、气三相交界面。在三相交点, 固液面和气液面的夹角  $\theta$  即为润湿角, 如图 7 所示,  $\theta$  值的范围为  $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 。润湿角越大表明岩样的憎水性越高, 水越难进入岩样内部。

图 8 为水滴在改性前、后泥岩表面的形貌。水滴在改性前泥岩表面铺展, 并且很快渗入泥岩内部, 如

图 8(a), 说明泥岩亲水性强; 有机改性后泥岩表面的水滴形状近似球形, 如图 8(b), 有机改性后泥岩变成憎水性; 无机改性后水滴在泥岩表面铺展, 如图 8(c), 无机改性后泥岩仍然为亲水性; 双重改性后水滴在泥岩表面近似为球形, 泥岩变为憎水性, 如图 8(d)。表 1 给出了水在改性前后泥岩表面的润湿角, 改性前润湿角为  $2.6^{\circ}$ ; 有机改性后润湿角为  $116.3^{\circ}$ ; 无机改性后泥岩润湿角为  $4.5^{\circ}$ , 与改性前相比变化不大; 双重改性后润湿角为  $119.4^{\circ}$ 。有机改性和双重改性后泥岩从亲水性变为憎水性, 但无机改性后泥岩的亲水性仍较强。

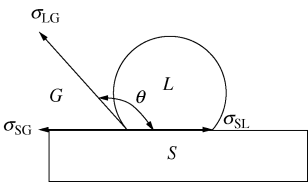


图 7 润湿角示意图

Fig. 7 Diagram of contact angle

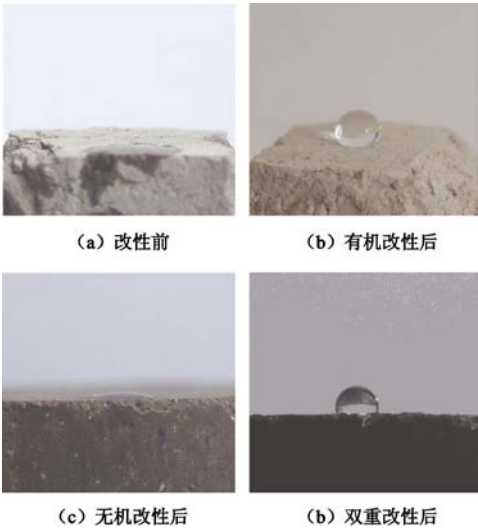


图 8 水滴在泥岩表面的形貌

Fig. 8 Water drop on surface of mudstone

表 1 泥岩表面润湿角

Table 1 Contact angle of mudstone

状态	润湿角/( $^{\circ}$ )
改性前	2.6
有机改性后	116.3
无机改性后	4.5
双重改性后	119.4

2.4 泥岩的膨胀性

图 9 为泥岩在水中膨胀率  $\varepsilon$  随浸水时间  $t$  的变化趋势。浸水前 10 min, 改性前和无机改性后泥岩以线性趋势迅速膨胀, 膨胀率增加的速率分别为  $0.16/\text{min}$  和  $0.21/\text{min}$ ; 有机改性后泥岩浸入水中前 20 min 以线性趋势迅速膨胀, 膨胀率增加的速率为  $0.07/\text{min}$ , 双



重改性后泥岩浸水前 15 min 以线性趋势迅速膨胀, 膨胀率增加的速率为 0.10/min。改性前和有机改性后泥岩经过线性迅速膨胀后, 膨胀率的增加速率逐渐减小, 经过 700 min 后达到稳定状态, 改性前和有机改性后泥岩的稳定膨胀率分别为 16.7% 和 11.2%, 有机改性后膨胀率降为改性前的 67.1%; 无机改性和双重改性泥岩经过 200 min 达到膨胀稳定状态, 稳定后的膨胀率分别为 4.2% 和 2.4%, 分别为改性前的 25.1% 和 14.4%。有机改性和无机改性可能从两个不同方面改变泥岩的微观结构。联系图 8, 有机改性剂使岩粒表面性质发生改变, 水分子不易吸附在岩粒表面形成水化膜; 无机改性材料使泥岩颗粒间的胶结程度提高。本试验中泥岩的膨胀率明显大于文献[16]报道的结果。原因可能包括两个方面: ①泥岩的成岩作用不同, 本试验中泥岩的成岩作用弱, 岩粒之间的胶结不强, 岩粒间存在较多孔隙; ②本试验测的是轴向膨胀率, 试验中径向膨胀受到限制。

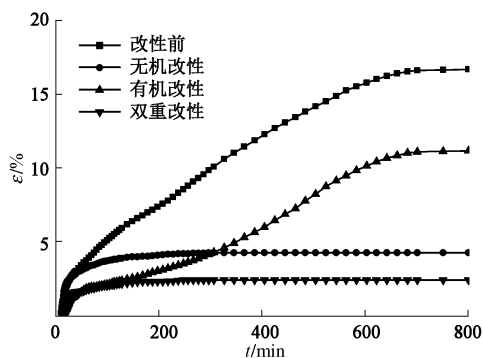


图 9 泥岩的膨胀率

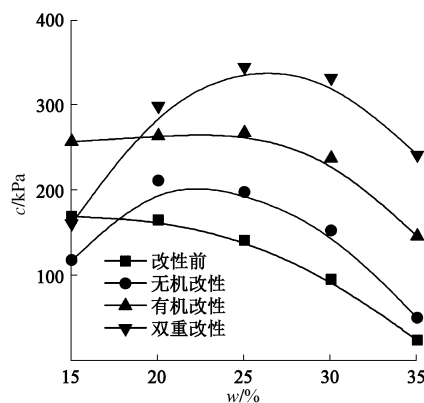
Fig. 9 Relationship between swelling ratio and time of mudstone

## 2.5 改性对泥岩力学强度的影响

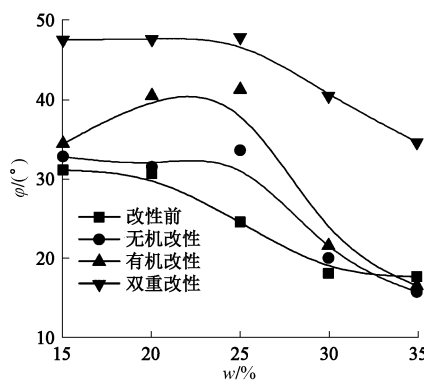
图 10 为改性前、后泥岩黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  随含水率  $w$  的变化规律, 试验过程见 1.6 节。改性前泥岩的  $c$ ,  $\varphi$  值随含水率的增加而减小, 表明在法向应力保持不变的条件下, 泥岩的抗剪强度随含水率的增加而减小。有机改性、无机改性和双重改性后, 含水率分别为 22.3%、23.3% 和 25.9% 的泥岩具有最大黏聚力。可见, 改性后强度最高泥岩的含水率高于最佳含水率 19.55%, 这是由于改性过程中部分水参与化学反应。

综合  $c$ ,  $\varphi$  值随含水率的变化规律, 泥岩的含水率在 25% 左右时, 利用双重改性能明显提高泥岩的力学强度。以含水率为 25% 的泥岩为例, 改性前泥岩的  $c$  值为 139.6 kPa, 经过有机改性、无机改性和双重改性后,  $c$  值分别增加为 195.9, 265.5, 342.9 kPa; 改性前泥岩的  $\varphi$  值为 24.6°, 经过有机改性、无机改性和双重改性后,  $\varphi$  分别增加为 33.6°, 41.2° 和 47.5°。

因此, 工程中对泥岩路基进行改性处理, 泥岩的含水率为 25% 时效果最明显。



(a) 改性前后泥岩黏聚力  $c$  随含水率  $w$  的变化



(b) 改性前后泥岩内摩擦角  $\varphi$  随含水率  $w$  的变化

图 10 改性前后泥岩黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  随含水率的变化

Fig. 10 Variation of cohesion and internal friction angle with water content of mudstone before and after modification

## 2.6 改性前后泥岩微观结构的变化

取直剪试验后试样作为待测样品, 利用扫描电子显微镜(SEM)观察断口的表面形貌, SEM 的型号为岛津 SUPERS CAN SS-550。图 11 为泥岩改性前后表面的 SEM 形貌图。图 11(a) 为改性前泥岩的 SEM 图, 局部区域存在片状黏土矿物, 黏土矿物之间以面面或边面方式接触形成聚集体, 改性前泥岩的孔隙主要由粒间孔和聚集体间孔构成。图 11(b) 为有机改性后泥岩的 SEM 图, 与图 11(a) 相比, 片状黏土矿物的尺寸变小, 粒间孔被有机改性材料填充, 有机改性后泥岩的孔隙主要由聚集体间孔构成。图 11(c) 为无机改性后泥岩的 SEM 图, 与图 11(a)、(b) 相比, 聚集体间的孔隙大部分被填充, 然而存在大量的粒间孔。图 11(d) 为双重改性后泥岩的 SEM 图, 粒间孔和大的聚集体间孔隙被填充, 孔隙的大小和数量明显降低。因此, 有机改性主要填充泥岩粒间孔, 无机改性主要填充泥岩的聚集体间孔, 而双重改性使泥岩的粒间孔和聚集体间孔都得到填充。

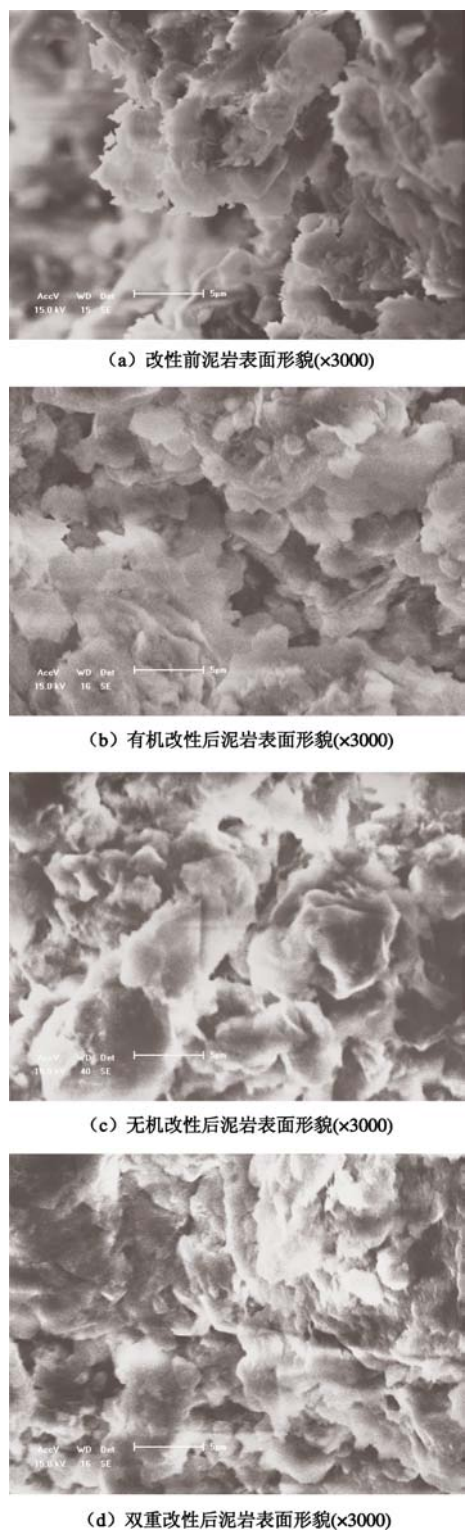


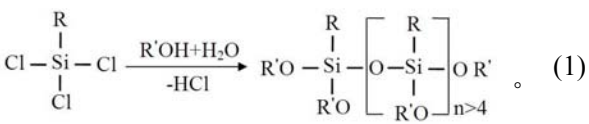
图 11 泥岩表面的 SEM 形貌

Fig. 11 SEM images of mudstone

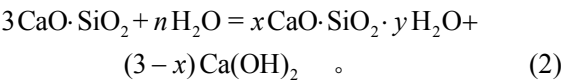
3 泥岩改性的微观机理

图 12 为泥岩改性微观机理示意图,并且给出了改性前后泥岩遇水膨胀的微观机理。改性前泥岩的组成成分主要由石英颗粒、膨胀性黏土颗粒(蒙脱石、伊利石等)和非膨胀性黏土矿物构成,颗粒之间存在粒间孔,片状黏土颗粒间形成聚集体,聚集体间存在聚集

体间孔,黏土矿物颗粒将岩粒胶结成一个整体,如图 12(a)左图。改性前泥岩浸水后,水分子进入膨胀性黏土矿物晶胞内部形成结晶水引起晶胞体积膨胀,另一方面水分子为极性分子,能够吸附于带电荷的膨胀性黏土矿物颗粒表面形成分子水膜和吸附水膜,使膨胀性黏土矿物的体积急剧增加,如图 12(a)右图,灰色区域代表膨胀性黏土矿物。有机硅改性剂中含有多种活性化学基团。当改性剂接触到泥岩时,活泼基团与泥岩表面的活性基发生缩聚反应,化学反应式为



式中, R 代表基团,在泥岩颗粒表面形成一层非极性憎水膜,憎水膜的主链为 Si-O 键,如图 12(b)左图所示。有机改性泥岩浸水后,岩粒表面被非极性有机膜包覆,由于极性水分子与非极性基团 R 间的吸引力很弱,水分子不能吸附于岩粒表面更不能进入晶胞内部,膨胀性黏土颗粒不会吸水膨胀,如图 12(b)右图,图中空白区域的黑点代表孔隙水。通过泥岩的膨胀率试验,改性后泥岩的膨胀率仍然较大,这可能是由于泥岩内部存在较多原生孔隙或微裂隙,水分子进入孔隙或微裂隙后产生楔裂力,引起泥岩体积膨胀。水泥遇水后主要发生水化、凝结和硬化 3 种变化。常温下水化反应的产物为水化硅酸钙(凝胶)和氢氧化钙,反应式为



无机改性过程中,水泥熟料与水通过水化反应形成凝胶和氢氧化钙,随后凝胶中析出晶体,晶体间相互搭接、交叉攀附,构成三维网状结构(图中三角形连接构成),如图 12(c)左图。三维网状结构的形成,使泥岩的孔隙率降低,并且颗粒之间的胶结程度大幅度提高。无机改性泥岩浸水后,水分子进入泥岩内部少量孔隙,膨胀性黏土颗粒吸水体积膨胀。水泥形成的三维网络结构将泥岩颗粒胶结到一起,并且胶结作用大于有机材料对泥岩的胶结作用,因此,无机改性后泥岩在水中的体积膨胀率小于改性前和有机改性后泥岩,如图 12(c)右图。双重改性后的泥岩一方面内部孔隙被三维网络状凝胶填充,另一方面岩粒表面形成非极性薄膜并且进一步提高了岩粒间的胶结,如图 12(d)左图。双重改性泥岩浸水后,由于内部残存孔隙数量很小,并且岩粒表面的非极性薄膜与水分子间吸引力微弱,进入泥岩内部的水很少,产生的楔裂压力小,因此双重改性后泥岩的体积膨胀最小,如图 12(d)右图。

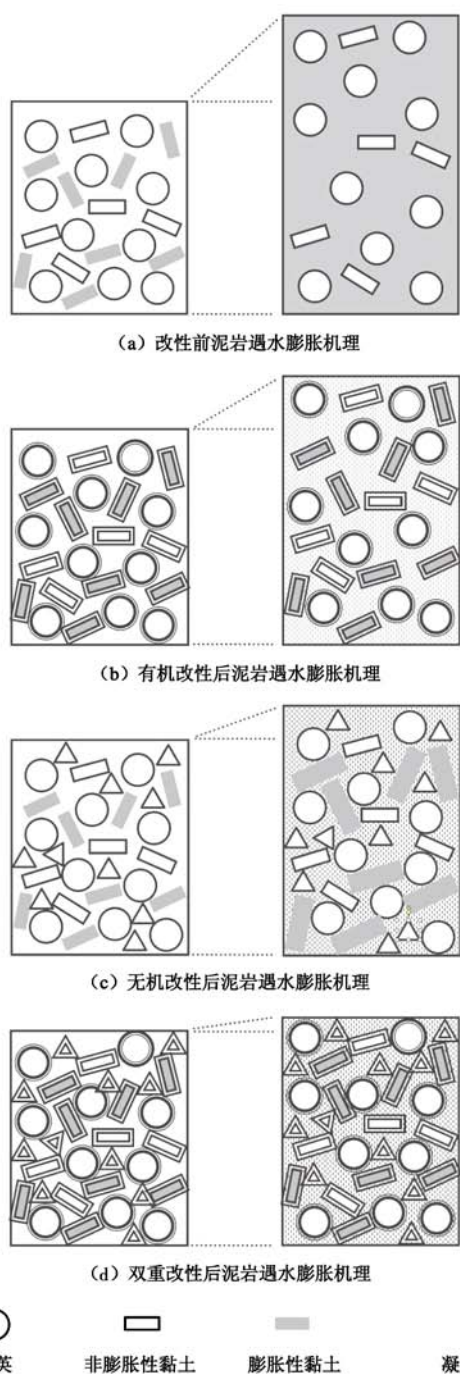


图 12 改性前后泥岩膨胀机理

Fig. 12 Swelling mechanism of mudstone before and after modification

有机改性和无机改性, 两者都需要水的参与, 所需的水需要一个合适的范围。含水率太低反应不完全, 改性效果差; 含水率太高形成的有机改性膜不能吸附于岩粒表面或无机凝胶颗粒不能有效地将岩粒胶结到一起。

## 4 结 论

露天矿临时性公路泥岩路基遇水发生沉降, 甚至泥化。为了改良泥岩的力学强度及耐崩解性, 利用有

机改性、无机改性和双重改性 3 种方法进行改性, 研究了泥岩改性前后微观结构、憎水性和力学特性变化, 讨论了 3 种改性方式对泥岩的改性机理。得到的以下 5 点主要结论。

(1) 改性前泥岩浸水后, 试样表面的裂纹宽度随浸水时间的增加而增加, 浸水 10 min 左右崩解成碎屑; 有机改性和双重改性后泥岩浸水 2 d 没有发生崩解, 无机改性后泥岩浸水 2 d 周围有少量崩解碎屑产生。

(2) 有机改性和双重改性后泥岩的水理性质发生明显改变, 泥岩由亲水性变为憎水性; 无机改性后泥岩的耐崩解性得到提高, 然而仍然为亲水性。

(3) 改性后泥岩浸水后的膨胀率明显减小, 有机改性、无机改性和双重改性后泥岩浸水后膨胀率分别为改性前的 67.1%, 25.1% 和 14.4%。

(4) 改性前泥岩的黏聚力和内摩擦角随含水率的增加而减小, 改性后泥岩的黏聚力和内摩擦角随含水率的增加先增加后减小。双重改性使泥岩抗剪强度显著提高, 泥岩含水率为 25% 时抗剪强度提高最大。

(5) 有机改性和无机改性分别从两个不同方面改变泥岩的微观结构。有机改性后岩粒表面形成一层非极性憎水膜, 泥岩的耐崩解性得到显著提高, 而力学强度提高较小。无机改性后泥岩内部孔隙被三维网状凝胶结构填充, 岩粒间胶结程度得到提高, 力学强度明显提高, 而耐崩解性提高幅度较小。双重改性综合了有机改性和无机改性的优点, 力学强度和耐崩解性得到显著提高。

## 参考文献:

- [1] 王来贵, 赵娜, 刘建军, 等. 岩石(土)类材料拉张破坏有限元法分析[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2011. (WANG Lai-gui, ZHAO Na, LIU Jian-jun, et al. Finite element analysis of tension fracture for rock (geotechnical) materials[M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 2011. (in Chinese))
- [2] 王建国, 王振伟, 王来贵, 等. 受控于软弱结构面的矿山软岩边坡稳定性[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2006, 25(5): 686 - 688. (WANG Jian-guo, WANG Zhen-wei, WANG Lai-gui, et al. Soft-rock slope stability of mine controlled by weak structure plane[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2006, 25(5): 686 - 688. (in Chinese))
- [3] 刘长武, 陆士良. 泥岩遇水崩解软化机理的研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 28 - 31. (LIU Chang-wu, LU Shi-liang. Research on mechanism of mudstone degradation and



- softening in water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(1): 28 - 31. (in Chinese))
- [4] 高国瑞. 膨胀土的微结构和膨胀势[J]. 岩土工程学报, 1984, **6**(2): 40 - 48. (GAO Guo-rui. Microstructures of expansive soil and swelling potential[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1984, **6**(2): 40 - 48. (in Chinese))
- [5] 谭罗荣, 张梅英, 邵梧敏, 等. 灾害性膨胀土的微结构特征及其工程性质[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(2): 48 - 57. (TAN Luo-rong, ZHANG Mei-ying, SHAO Wu-min, et al. Microstructure characteristics and engineering properties of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(2): 48 - 57. (in Chinese))
- [6] 黄宏伟, 车平. 泥岩遇水软化微观机理研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, **35**(7): 866 - 870. (HUANG Hong-wei, CHE Ping. Research on micro-mechanism of softening and argillitization of mudstone[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2007, **35**(7): 866 - 870. (in Chinese))
- [7] 刘镇, 周翠英, 朱凤贤, 等. 软岩饱水软化过程微观结构演化的临界判据[J]. 岩土力学, 2011, **32**(3): 661 - 666. (LIU Zhen, ZHOU Cui-ying, ZHU Feng-xian, et al. Critical criterion for microstructure evolution of soft rocks in softening process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(3): 661 - 666. (in Chinese))
- [8] 孔令伟, 郭爱国, 赵颖文, 等. 荆门膨胀土的水稳定性及其力学效应[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(6): 727 - 732. (KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, ZHAO Ying-wen, et al. Water stability of Xiangjing expansive soils and their mechanical effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(6): 727 - 732. (in Chinese))
- [9] 陈伟志, 蒋关鲁, 赵慧爽, 等. 铁路路基下膨胀土地基浸水响应现场试验[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(8): 1507 - 1514. (CHEN Wei-zhi, JIANG Guan-lu, ZHAO Hui-shuang, et al. Field tests on soaking response of expansive soil foundation under railway subgrade[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(8): 1507 - 1514. (in Chinese))
- [10] 祝艳波, 余宏明, 杨艳霞, 等. 红层泥岩改良土特性室内试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(2): 425 - 432. (ZHU Yan-bo, YU Hong-ming, YANG Yan-xia, et al. Indoor experimental research on characteristics of improved red-mudstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(2): 425 - 432. (in Chinese))
- [11] 郭爱国, 孔令伟, 胡明鉴, 等. 石灰改性膨胀土施工最佳含水率确定方法探讨[J]. 岩土力学, 2007, **28**(3): 517 - 521. (GUO Ai-guo, KONG Ling-wei, HU Ming-jian, et al. On determination of optimum water content of lime-treated expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(3): 517 - 521. (in Chinese))
- [12] 冯美果, 陈善雄, 余颂, 等. 粉煤灰改性膨胀土水稳定性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(9): 1889 - 1893. (FENG Mei-guo, CHEN Shan-xiong, YU Song, et al. Laboratory study on water stability of flyash-treated expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(9): 1889 - 1893. (in Chinese))
- [13] 胡萍, 王永和, 卿启湘. 软岩改良土特性的室内试验研究[J]. 湖南工业大学学报, 2007, **21**(2): 96 - 99. (HU Ping, WANG Yong-he, QING Qi-xiang. Study on indoor tests of the characteristics of modified weathered soft rock[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2007, **21**(2): 96 - 99. (in Chinese))
- [14] 张中云, 蒋关鲁. 客运专线无碴轨道红层泥岩改良土路基离心模型试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2010, **7**(5): 41 - 46. (ZHANG Zhong-yun, JIANG Guan-lu. Research on centrifugal model test of improved red mudstone embankment for unballasted trunk[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2010, **7**(5): 41 - 46. (in Chinese))
- [15] 张鑫, 孙树林, 魏永耀, 等. 掺绿砂改良膨胀土室内试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(增刊 2): 209 - 212. (ZHANG Xin, SUN Shu-lin, WEI Yong-yao, et al. Laboratory test study of properties of expansive soil improved by waste foundry sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(S2): 209 - 212. (in Chinese))
- [16] 柴肇云, 郭卫卫, 康天合, 等. 有机硅材料改性泥岩物性变化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(1): 168 - 175. (CHAI Zhao-yun, GUO Wei-wei, KANG Tian-he, et al. Change rules of physical property of argillaceous rock for organic silicon material modified[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(1): 168 - 175. (in Chinese))
- [17] 谭罗荣. 关于黏土岩崩解、泥化机理的讨论[J]. 岩土力学, 2001, **22**(1): 1 - 5. (TAN Luo-rong. Discussion on mechanism of disintegration and argillitization of clay-rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, **22**(1): 1 - 5. (in Chinese))
- [18] 朱效嘉. 软岩的水理性质[J]. 矿业科学技术, 1996(3/4): 46 - 50. (ZHU Xiao-jia. Characteristics of soft rocks interacting with water[J]. Scientific Technology of Mining, 1996(3/4): 46 - 50. (in Chinese))