

岩石力学与工程学报  
*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*  
ISSN 1000-6915, CN 42-1397/O3

## 《岩石力学与工程学报》网络首发论文

题目: 电渗注浆加固土遗址片状剥离实验研究  
作者: 崔凯, 程福强, 谌文武, 马启鑫, 许鹏飞  
DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2020.0294  
收稿日期: 2020-04-13  
网络首发日期: 2020-09-28  
引用格式: 崔凯, 程福强, 谌文武, 马启鑫, 许鹏飞. 电渗注浆加固土遗址片状剥离实验研究[J/OL]. 岩石力学与工程学报.  
<https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2020.0294>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 电渗注浆加固土遗址片状剥离实验研究

崔凯<sup>1,2</sup>, 程福强<sup>1</sup>, 谌文武<sup>2</sup>, 马启鑫<sup>1</sup>, 许鹏飞<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要：**片状剥离是具有二元结构特征的干旱区土遗址常见病害，常规的渗透方法对片状剥离加固效果不甚理想。研究以电渗法为借鉴，通过研制电渗装置并进行常压滴渗和电渗注浆的片状剥离对比渗透加固试验，证明电渗注浆能均匀加固半径与扩展加固深度。在此基础上以硅酸钠溶液进行了不同电极布置形式下的电渗注浆渗透试验，通过分析试验过程中电流、注浆量、能耗系数变化遴选出正六边形为最优布置形式。然后以最优布置开展了3种加固溶液的电渗注浆现场加固试验和加固土体的相关性测试，研究表明：糯米浆和硅酸钠溶液不适用于电渗注浆加固；SH溶液电渗注浆加固后片状剥离层间黏结紧密，加固区土体贯入阻力、硬度、波速、抗风蚀性能和抗崩解性能均较未加固土体有显著提升。

**关键词：**土力学；片状剥离；电渗注浆；电极布置形式；加固溶液

**中图分类号：**TU 43

**文献标识码：**A

## Experiment on reinforcement of scaling off at earthen sites by electro-osmosis grouting

CUI Kai<sup>1,2</sup>, CHENG Fuqiang<sup>1</sup>, CHEN Wenwu<sup>2</sup>, MA Qixin<sup>1</sup>, XU Pengfei<sup>1</sup>

(1. Gansu Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Reduction, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Western Disaster and Environmental Mechanics of Ministry of Education,

Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Scaling Off is a common disease in arid area Earthen Sites with dual structure characteristics. Conventional infiltration methods are not ideal for Scaling Off reinforcement. The study uses electroosmosis as a reference, and through the development of electroosmosis equipment and the comparison of penetration and reinforcement tests of atmospheric dripping and electroosmosis grouting, it is proved that electroosmosis grouting can uniformly penetrate the radius and expand the penetration depth. On this basis, electroosmosis grouting penetration tests were carried out with sodium silicate solution under different electrode layouts. The optimal layout was selected by analyzing the changes in current, grouting volume and energy consumption coefficient during the test. Then, the field reinforcement test of electroosmosis grouting of three kinds of reinforcement solutions and the related property test of the reinforced soil were carried out with the optimal layout. The research results showed that: glutinous rice slurry and sodium silicate solution are not suitable for electroosmosis grouting

**收稿日期：**2020-04-13；**修回日期：**2020-08-20

**基金项目：**国家自然科学基金资助项目(52068050, 41562015)；教育部长江学者创新团队支持计划项目(2017IRT17\_51)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 52068050 and 41562015) and Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University of Ministry of Education of China(Grant No. 2017IRT17\_51)

**作者简介：**崔凯(1980-), 男, 2009年于兰州大学地质工程专业获博士学位, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩土工程、地质灾害防治和岩土文物保护等方面的教学与研究工作。E-mail: cuik09@lut.edu.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2020.0294

reinforcement; SH solution after the electroosmosis grouting is strengthened, the bonding between the Scaling Off layers is tight, and the penetration resistance, hardness, wave speed, wind erosion resistance and disintegration resistance of the soil in the reinforced area are significantly improved compared with the unreinforced soil.

**Key words:** soil mechanics; scaling off; electro-osmosis grouting; layout style of electrodes; strengthening solution

## 1 引言

片状剥离是干旱区土遗址发育最为普遍和典型的病害形式之一,在形成初期对抵抗土遗址风化起到一定的保护作用,但在后期快速剥离和脱落反而加速了土遗址的消亡进程<sup>[1-3]</sup>。同时 K. Cui 等<sup>[4-5]</sup>研究表明片状剥离是水-热-盐-风多场耦合共同作用的结果,在其发育过程中盐分分异和不均匀收缩 2 个重要机制促使其具有致密壳层、疏松粉层以及 2 个分界面的独特结构。其发育的普遍性和危害的严重性使片状剥离加固成为土遗址保护领域亟待解决的问题;其形成机制的复杂性和结构的特殊性又使片状剥离加固成为土遗址保护难点和焦点问题。

自 20 世纪 90 年代开始的土遗址保护加固实践中针对片状剥离的加固方法的研究主要集中在表面喷洒渗透和常压滴渗两方面。王旭东等<sup>[6-14]</sup>大量学者应用 PS, SH 和糯米浆等加固材料围绕喷洒渗透和常压滴渗两种方法对不同类型土遗址片状剥离开展了大量室内与现场的研究工作,积累了丰富的经验。然而在土遗址表面发育的片状剥离的壳层、粉层和其之间的界面通常垂直于地面发育,加固溶液在渗透过程受到重力场的显著影响。因此,喷洒渗透方法虽然工艺简单,但渗透深度不足以彻底穿越壳层、粉层;滴渗虽能满足加固溶液渗透深度,但渗透半径较小且随渗透深度分布不均匀;故 2 种方法不能从根本上解决加固后的界面问题,可能会加快壳层和粉层剥落,不能达到预期理想的加固效果。因此可见,片状剥离加固的关键在于扩展渗透深度和均匀渗透半径,这就对加固方法提出了新的要求。

电渗技术是利用电场驱动水分子从阳极向阴极发生定向移动,从而达到排水固结的目的,已被广泛的应用于地基加固领域。L. Casagrande<sup>[15]</sup>在一段铁路的路基处理中将电渗技术首次引入工程,并取得了成功。E. Mohamedelhassan 和 J. Q. Shang<sup>[16]</sup>将电渗法用于提高近海地基承载力和加固海相黏土方面;L. G. Soderman 和 V. Milli<sup>[17]</sup>在处理某高速公路大桥的桩基施工中引入电渗技术。在国内,胡

勇前<sup>[18]</sup>将电渗技术应用到了公路软基的处理中。朱文元<sup>[19]</sup>采用电渗井点降水技术对某中学消防池基坑进行降水处理,极大缩短了降水周期并改善了基坑作业条件。王 燕等<sup>[20]</sup>对某古铜矿遗址围岩(土)和坑木保护中采用了电渗注浆技术,证实了以水玻璃为加固防腐液的电渗注浆方法不仅可以使围岩(土)得到加固,而且对坑木的防腐也起到了积极的作用。电渗注浆技术已在多个工程领域取得了较好的加固效果,然而用于土遗址片状剥离加固却鲜有报道。是否可以利用电场促进加固溶液的均匀渗透成为弥补喷洒渗透和常压滴渗 2 种方法不足的关键。

基于此,借鉴电渗促使液体发生定向移动的原理,通过自制电渗装置开展了电渗注浆与常压滴渗对比试验,证实了电渗注浆在扩展渗透深度、均匀渗透半径方面的可行性和有效性。在此基础上,进行了电极布置形式和加固溶液优选的现场试验,综合电流大小、溶液注入量和能耗系数遴选出最优电极布置方式,综合电流大小、溶液注入量和加固后墙体表征优选出加固溶液,并对优选溶液和布置方式开展的现场加固试验进行土体的贯入阻力、硬度、波速、风蚀模数和崩解速率测试试验,验证了电渗注浆在片状剥离加固过程中能够达到扩展渗透深度、均匀渗透半径的效果。为西北干旱区土遗址片状剥离病害的防治提供了新的途径与方法。

## 2 可行性研究

### 2.1 基本原理

电渗法是将黏性土中插入阴、阳电极并通以直流电,带正电荷的极性水分子会在直流电作用下从阳极向阴极迁移。电渗注浆是将常规电渗排水法中阴、阳电极调换,并在阳极通入加固溶液,促进加固溶液往土中扩散。根据流动定律,电渗流与水力渗流具有相似性,均与它们之间的驱动力(电力梯度和水力梯度)成线性关系,即电渗流具有达西定理的表达形式,计算式为

$$V_e = K_e V \quad (1)$$

$$K_e = \frac{\zeta D}{4\pi\eta} \quad (2)$$

式中:  $V_e$  为电渗流速度;  $K_e$  为电渗透系数;  $V$  为电势梯度;  $\zeta$  为电动电位(与孔隙水含盐量相关);  $D$  为液体的介电常数;  $\eta$  为液体的黏滞系数。电渗透系数与土的双电层结构、水的性质有关, 与土的孔隙大小无关, 因此电渗法在细粒土中非常有效。电渗注浆就是将加固溶液在水力梯度与电力梯度共同作用下加速从阳极向阴极扩散的进程, 对溶液在土体中的渗透提供助渗且有效均匀渗透半径的目的。

## 2.2 装置制备

根据电渗注浆的原理, 进行了电渗注浆的装置研发与制备。该装置构造如图 1 所示, 包括供液单元和供电单元; 供液单元包括供液源、供液管和供液头, 供液管两端分别与供液源和供液头连接; 供电单元包括直流电源、阳极和阴极, 阳极和阴极通过缆线分别与直流电源的正极和负极连接; 阳极与供液头保持接触并组合成阳极管。

阳极管为阳极均匀缠绕在供液头上, 阳极采用 24 k 碳纤维, 供液头采用 PVC 管且沿其长度方向设有多个穿透管壁的孔洞, 管直径 2 cm, 长度 12 cm, 中部每隔 1 cm 均匀布置 1 排 4 个半径 3 mm 的圆孔; 两头用硅胶塞密封, 顶部硅胶塞可引入供液管。阳极管用土工布包裹, 防止土颗粒堵塞渗透通道; 碳纤维作为惰性导电材料, 在电渗过程中不会由于电极腐蚀产生新的离子。阴极采用直径 2 mm 的钢钉, 电源采用欧力姆公司生产的型号 OSM-120V、10 A 直流电源, 具有过载保护, 能实时显示电流和电压。

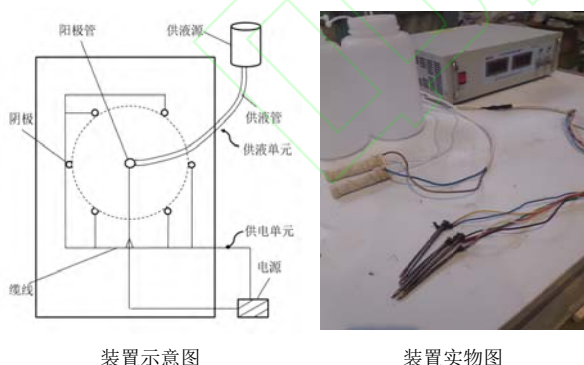


图 1 电渗装置

Fig.1 Electroosmosis device

## 2.3 对比试验

试验地点选择在兰州市七里河区魏林乡狗牙山村一处废弃的具有 40 a 历史的居民夯土院落, 通过现场的多点统计, 用游标卡尺测得壳层厚度在 8~12 mm 范围, 粉层厚度在 40~55 mm 范围, 并选取

1 m×1 m 范围的片状剥离区域拍照进行 CAD 描线求出其剥离面积大多数在 48~70 cm<sup>2</sup>, 取原状土并进行室内试验求出其基本物理指标, 如表 1 所示, 与张影会<sup>[5]</sup>统计西北干旱区土遗址片状剥离病害发育程度和土体基本物理性质几乎一致, 故本试验研究与在土遗址上做相关试验有一定相似性, 且不会对土遗址造成保护性破坏。

表 1 土体基本物理性质

Table 1 Physico-mechanical properties of soil

天然含水率/%	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	相对密度	孔隙比	液限/%	塑限/%
1.5	1.42	2.71	0.91	28.55	17.95

为验证电渗注浆的可行性, 在室外进行纯水常压滴渗与电渗注浆的对比试验。选取同一墙面的相同高度划分 2 个试验区, 并分别在两试验区中心位置钻直径 2 cm, 深度 10 cm 的孔洞。(1) 电渗注浆试验区同时布置供液单元与供电单元, 阳极管在试验区中心, 阴极以梅花形均匀布置在阳极管四周且阴、阳电极间距为 30 cm, 电压为恒压 45 V。试验过程中为增强土地导电性能, 更好形成电渗注浆通路, 先用水对电渗注浆试验区墙面进行喷渗处理, 当墙体表面成股流不再入渗时停止喷撒渗透, 其渗透深度为 3~4 cm; 此时打开供液单元与供电单元, 渗透进行 24 h。(2) 常压滴渗试验区只布置供液单元, 其布置方式与电渗注浆试验区完全相同, 并对试验区进行常压滴渗, 时间 24 h。试验过程中记录纯水的渗透量, 试验结束后测量渗透半径并剖开渗透区域土体测量渗透深度, 对比电渗注浆与常压滴渗的渗透效果。

试验结果表明: (1) 从渗透土体表面观测, 常压滴渗渗透半径不均匀, 注浆孔左右两侧渗透距离均在 18 cm 左右, 注浆孔正上方渗透距离 13 cm, 而正下方渗透距离高达 25 cm(见图 2(a)); 电渗注浆其渗透半径均匀, 各方向的渗透距离均达到阴、阳电极所布置的 30 cm(见图 2(b))。(2) 从渗透土体剖面观测, 常压滴渗法表现为随渗透深度增加, 渗透半径逐渐减小, 渗透体为不规则截面递减的台体(见图 2(c)); 电渗注浆在电极布置深度 9~10 cm 处其渗透半径仍为 30 cm, 渗透体为规则的六棱台体(见图 2(d))。(3) 从渗透量来看, 在 24 h 单纯滴渗试验总渗透量为 4 200 mL; 电渗注浆渗透试验 24 h 渗透量达 6 400 mL。以上试验结果充分表明, 电渗注浆能有效促进水分迁移, 相比较于单纯常压滴渗所提

供的水力梯度，电渗注浆在电力梯度与水力梯度耦合下对水的渗透更加高效，能够达到均匀并扩展渗透半径，延深渗透深度的目的。其中渗透半径指以为阳极处为圆心，水纹在墙体上最外边缘距离圆心的水平距离为半径，当同一平面内渗透水纹上、下、左、右距圆心水平距离不同时，取其所有水纹测点距圆心处的平均值作为该平面内的渗透半径；渗透深度为电渗注浆过程中，渗透半径范围内溶液渗透能达到土体中的最大深度，以剖开渗透后土体其最底部水纹距离墙体表面的最大距离为准。

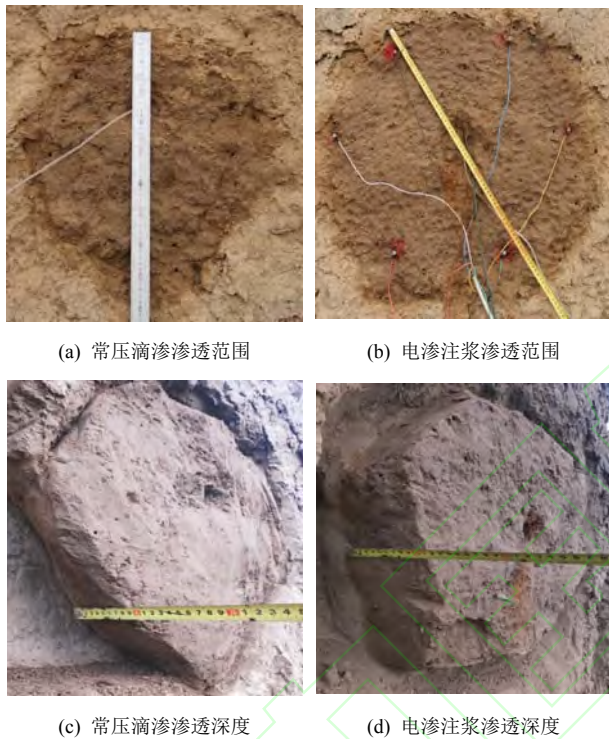


图2 平、剖面对比图

Fig.2 Flat and section comparison chart

### 3 参数优化试验

在明确了电渗注浆在均匀渗透半径和扩展渗透深度可行基础上，为了提高电渗注浆的工作效率和加固效果，电极布置形式和加固溶液类型 2 个参数的优化成为首要问题。

#### 3.1 试验设计

在电渗注浆参数优化试验中，首先进行电极布置形式的优选。采用正三角形、正四边形和正六边形 3 种布置形式展开现场试验，试验所用溶液为质量分数 5% 的硅酸钠溶液。首先通过分析入渗过程中电流、溶液注入量、能耗系数的变化综合遴选出最优布置形式。而后以最优布置形式选择常用于土遗址片状剥离加固的 SH、硅酸盐、糯米浆溶液为

加固材料开展加固溶液类型的优选试验<sup>[9-10, 13-14]</sup>，SH 溶液和糯米浆溶液均宜采用的质量浓度为 1%，硅酸钠溶液优选质量浓度为 5%，通过分析入渗过程中电流、溶液注入量和加固后墙体形态变化遴选出最优加固溶液，并评估加固效果。

#### 3.2 试验方法与过程

试验同样选择狗牙山村那处废弃居民院落的一面院墙上开展。在电极布置形式遴选试验中，选取同一墙体相同高度划出 3 个 1 m×1 m 试验区。阳极管布置在每个试验区中心，在确定的阳极管位置用手钻开直径 2 cm，深度 10 cm 的注浆孔，将阳极管布置在注浆孔内，满足穿越试验区壳层粉层的要求。然后阴极以不同布置形式均匀布置在阳极管四周，电极间距均为 30 cm(见图 3)，阴极用直径 2 mm，长度 10 cm 的钢钉插入墙体。完成电极布置遴选试验后，再划分 3 个 1 m×1 m 的试验区域，以最优的布置形式进行 SH、硅酸钠和糯米浆溶液的选型试验。

整个试验过程中阴、阳电极通过缆线分别与直流电源负极和正极相连接，首先用相应溶液对墙体进行喷洒渗透，使加固墙体形成有效电渗通路，然后打开供液单元与供电单元进行渗透，直流电源始终保持恒压 60 V，渗透时间为 24 h，试验过程中每 1 h 记录一次电流和溶液注入量。渗透结束后关闭供液与供电单元，拔出阴、阳电极，用当地过筛土与加固溶液配置成泥浆封闭电极孔，最后压密加固区域。

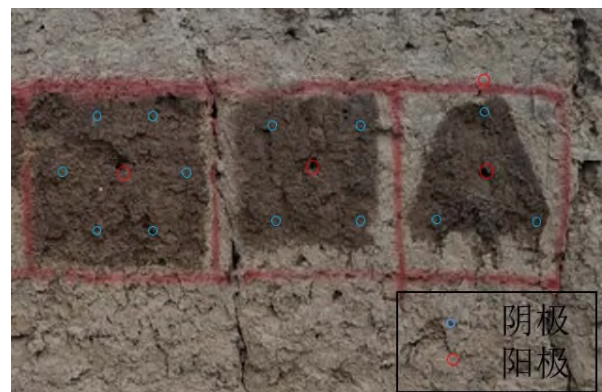


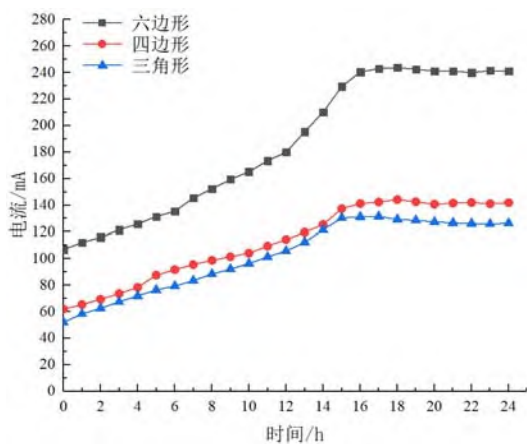
图3 现场布置形式示意图

Fig.3 Schematic diagram of the field layout

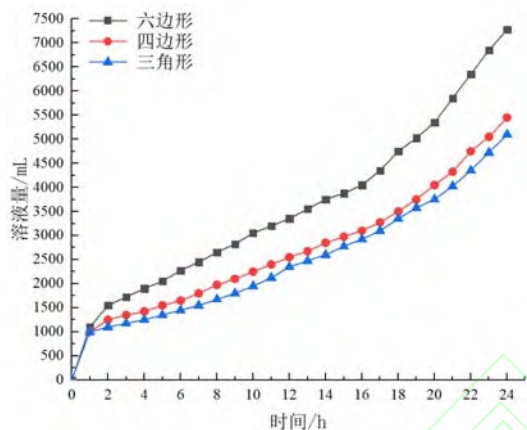
#### 3.3 试验结果与分析

##### 3.3.1 电极布置形式优选

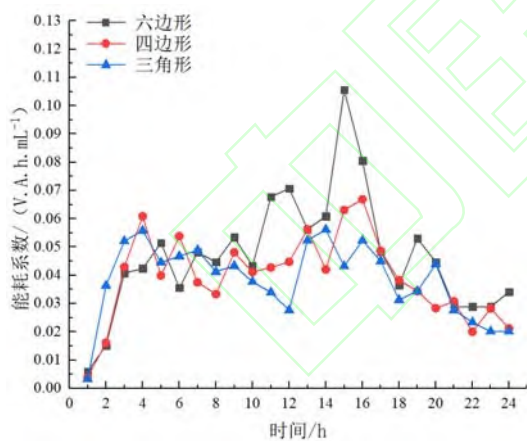
3 种电极布置形式下电流、溶液注入量和能耗系数随时间的变化如图 4 所示：(1) 3 种布置形式下电流均呈现出先增加后平缓的总体趋势，以入渗时间 16 h 为界，0~16 h 为电流递增，16~24 h 为电流稳定(见图 4(a))。(2) 3 种布置形式下第 1 h



(a) 电流随时间变化



(b) 溶液注入量随时间变化



(c) 能耗系数随时间变化

图 4 不同布置形式下电流、溶液和能耗系数随时间变化  
Fig.4 Current, solution and energy consumption coefficients vary with time in different arrangements

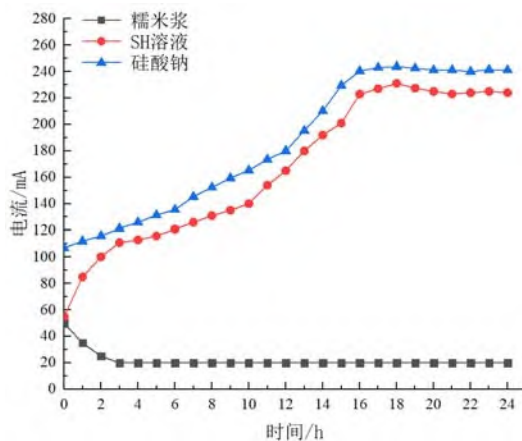
溶液注入量均在 1 000 mL 左右;而后呈现出先平缓增加后快速均匀增长的总体趋势,同样以 16 h 为界,1~16 h 为溶液注入量平缓增长,16~24 h 为溶液注入量快速均匀增长(见图 4(b))。(3) 3 种布置形式下,除前 1 h 能耗系数较小及正六边形布置在 16 h 时出现剧烈的增加,3 种布置形式下能耗系数相差不大,

均在 0.02~0.06 之间浮动变化(见图 4(c))。(4) 整个电渗过程中电流和溶液注入量的大小顺序依次为正六边形布置>正四边形布置>正三角形布置,正六边形布置电流最大为 240 mA,溶液注入量最大为 7 275 mL。

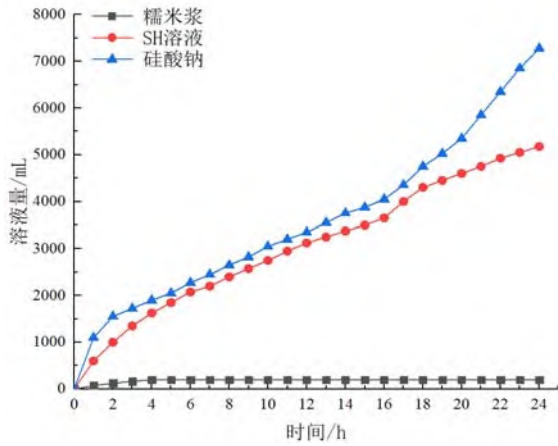
综合以上结果分析表明:从电流变化与溶液注入量变化趋势可以看出,在电渗注浆注入溶液过程中,溶液入渗速率与电流强度有较好的相关性。3 种布置形式下能耗系数总体比较稳定,能耗系数突然剧增可能是渗透过程中遇到土中不易渗透的结实体,暂时减缓渗透速率,当溶液渗透绕过结实体,渗透恢复原来速率,能耗系数又将降回原来的范围内,忽略结实体对电渗注浆能耗系数的影响,3 种布置形式下能耗系数相差不大。综合分析电流、溶液注入量和能耗系数,在能耗系数相差不大情况下,正六边形布置加固效率明显高于正三角形和正四边形布置,电极正六边形布置为 3 种布置情况下最优选择。

### 3.3.2 加固溶液类型优选

以正六边形为最优布置进行的 3 种溶液电渗注浆加固试验的结果显示:(1) 糯米浆对应电路电流经过 3 h 衰减趋于稳定,SH 和硅酸钠溶液对应电路以入渗时间 16 h 为界,0~16 h 为电流稳步递增,16~24 h 为电流趋于稳定(见图 5(a))。(2) 糯米浆以 50 mL/h 的速率渗透,3 h 后渗透基本停止;SH 溶液在 2 h 之前渗透量明显低于硅酸钠溶液,在 2~16 h 之间两者渗透量均平稳增加,在 16 h 之后硅酸钠溶液渗透量增幅大于 SH 溶液(见图 5(b))。(3) 糯米浆渗透量较少,加固养护后墙体表面与加固前无明显变化(见图 6(a)),SH 溶液加固养护后墙体表面坚硬光滑(见图 6(b)),硅酸钠溶液加固养护后墙体表面析盐泛白,片状剥离严重脱落(见图 6(c))。



(a) 电流随时间变化



(b) 溶液注入量随时间变化

图 5 不同加固溶液条件下电流和溶液注入量随时间变化

Fig.5 Current and solution injection amount changes with time under different reinforcement solutions



(a) 糯米浆加固 养护后 (b) SH 溶液加固 养护后 (c) 硅酸钠溶液加固 养护后

图 6 加固养护后表现现状

Fig.6 Apparent status after reinforcement and maintenance

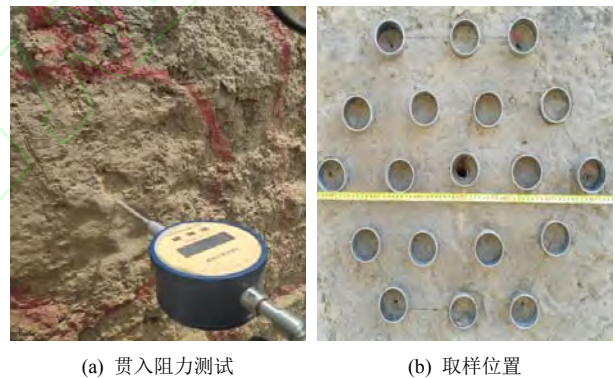
综合以上结果分析表明：由于糯米浆渗透性能差，供液单元提供的糯米浆堵塞在阳极管附近不能及时扩散到土体中，电渗注浆只在表面喷洒渗透较小深度范围内形成通路，土体没有后续的溶液供给，电流经过短暂的衰减后一直稳定在 20 mA。SH 溶液和硅酸钠溶液对应的电路中电流逐渐增加，这与电渗注浆过程中溶液不断渗入土体，土体电阻减小所致。硅酸钠溶液导电性能优于 SH 溶液，所以电渗注浆整个过程中硅酸钠溶液电路对应的电流和溶液注入量明显高于 SH 溶液。糯米浆渗透性能差，其加固范围仅局限于阳极附近较小的区域，故不适用于电渗注浆加固；硅酸钠溶液虽然渗透性能较好，但加固养护后墙面析盐泛白严重，并伴有片状剥离脱落；SH 溶液不仅能达到渗透要求，而且 SH 含有极性羟基能够主动吸附小颗粒，使小颗粒之间互相胶结形成大的聚凝体，加固养护后墙体表面光滑坚硬。综合 3 种溶液渗透及加固性能考虑，SH 溶液均可作为片状剥离加固的优选材料。

### 4 优化参数后加固效果

在上述试验得到了最优电极布置形式和加固溶液的前提下，加固区域土体相关性质的变化情况的评价成为电渗注浆是否有效加固片状剥离的关键。

#### 4.1 评价方法与过程

以电极正六边形布置，电极间距 30 cm，电势梯度 2 V/cm，质量分数 1%SH，在同一试验墙进行参数优化后 24 h 加固试验。试验完成后，露天养护 14 d 至加固区土体自然风干，对加固区域与未加固区域土体进行相关性质评价。以阳极点为圆心，10, 20 和 30 cm 为半径同心圆内切正六边形的顶点作为加固土体相关性质测点，40 cm 处同心圆内切正六边形的顶点作为未加固土体相关性质测点。首先对未加固区与加固区墙体测点进行贯入阻力(见图 7(a))和硬度测试，而后用直径 6.18 cm，高度 6 cm 的环刀在上述测点处取样(见图 7(b))，取样深度距离墙体表面 2 cm 处，而后将所取试样依次进行室内波速测试、风蚀试验和崩解试验。



(a) 贯入阻力测试 (b) 取样位置

图 7 测点和取样图

Fig.7 Measurement points and sampling diagram

贯入阻力测量采用沧州华韵试验仪器有限公司生产的 WG-V 型地基承载力贯入仪。硬度测量采用数显式邵氏硬度仪，测量范围为 0~100。声波仪采用中科智创岩土技术有限公司出产的 RSM-SY 型声波仪，每个试样多次测试取平均值。风洞试验在兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室进行，研究选取干旱区常见大风速 18 m/s 的挟沙风对 5 cm×5 cm×5 cm 试样进行 300 s 连续吹蚀，求得单位时间和单位面积土体风蚀量，即风蚀模数。将风蚀试验剩余试样制成 3 cm×3 cm×3 cm 的立方体块用于崩解试验，称其质量后完全浸入玻璃试验箱中，记录崩解现象和时间，然后求出单位时间的崩解质量，即崩解速率。

### 4.2 结果与分析

加固区域与未加固区域土体的相关性质测试结果显示: ① 加固区土体的贯入阻力随着加固半径依次减小, 距阳极 10, 20 和 30 cm 处土体平均贯入阻力相较 40 cm 处未加固区土体平均贯入阻力分别提升了 64.89%, 52.35%和 35.83%(图 8a)。②加固区土体的硬度随着加固半径依次减小, 距阳极 10, 20 和 30 cm 处土体平均硬度相较 40 cm 处未加固区土体平均硬度分别提升了 17.46%, 15.46%, 12.24%(图 8b)。③加固区土体的波速随着加固半径依次减小, 距阳极 10, 20 和 30 cm 处土体平均波速相较 40 cm 处未加固区土体平均波速分别提升了 35.87%, 23.18%, 16.22%(图 8c)。④加固区土体的风蚀模数随着加固半径依次增大, 抗风蚀性能依次降低, 距阳极 10, 20 和 30 cm 处土体抗风蚀性相较 40 cm 处未加固区土体抗风蚀性分别提升了 85.77%, 70.3%, 56.49%(图 8d)。⑤加固区土体的崩解速率随着加固半径依次增大, 抗崩解性能依次降低, 距阳极 10 cm 处立方体试样仅棱和角部分崩解, 距阳极 20 和 30 cm 处土体抗崩解性能相较 40 cm 处未加固区土体抗崩解性能分别提升了 82.86%, 64.57%(图 8e)。

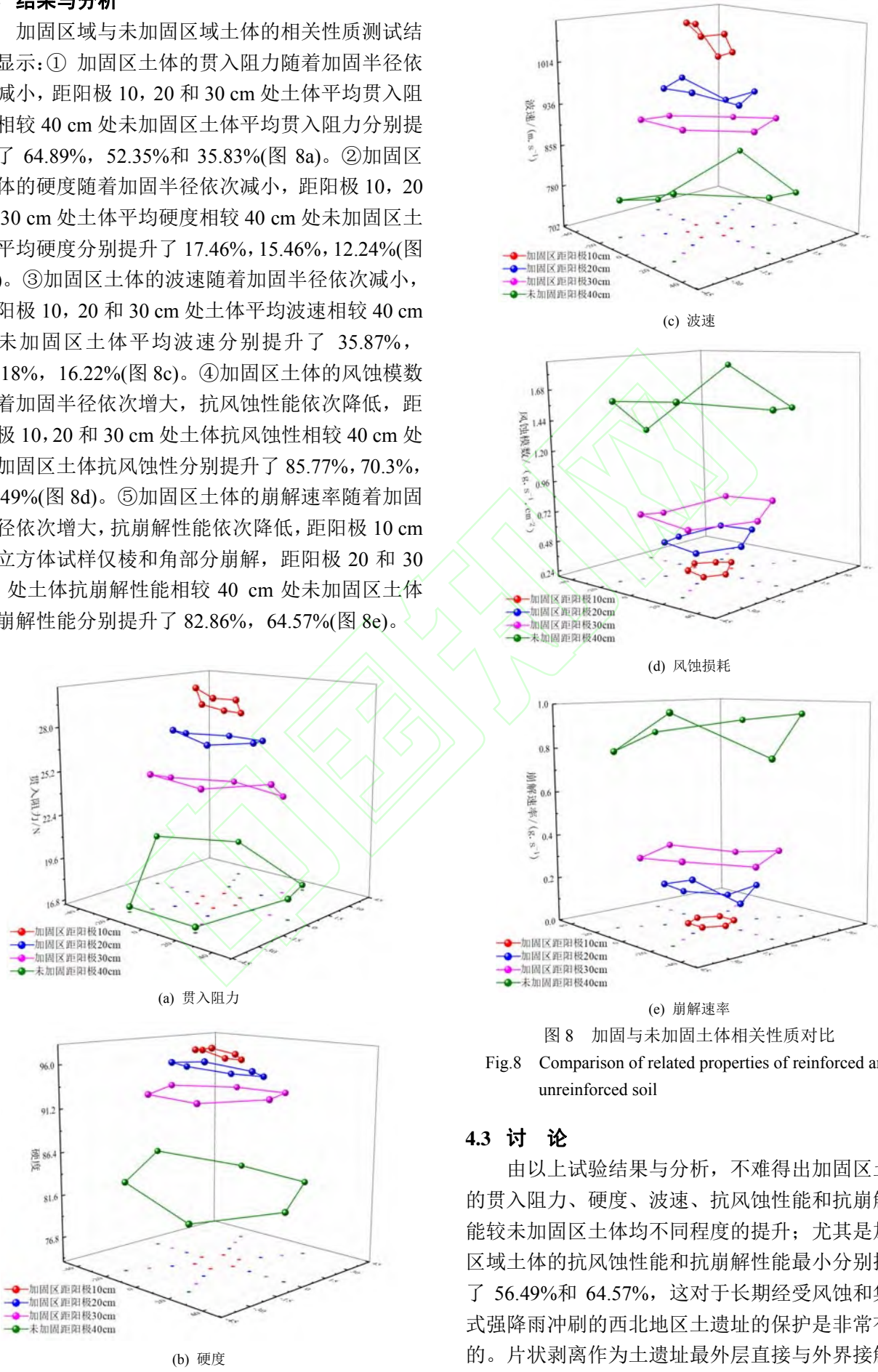


图 8 加固与未加固土体相关性质对比

Fig.8 Comparison of related properties of reinforced and unreinforced soil

### 4.3 讨论

由以上试验结果与分析, 不难得出加固区土体的贯入阻力、硬度、波速、抗风蚀性能和抗崩解性能较未加固区土体均不同程度的提升; 尤其是加固区域土体的抗风蚀性能和抗崩解性能最小分别提升了 56.49%和 64.57%, 这对于长期经受风蚀和集中式强降雨冲刷的西北地区土遗址的保护是非常有益的。片状剥离作为土遗址最外层直接与外界接触,



其抗风蚀性能和抗崩解性能是否明显提升成为检验加固措施是否真实有效的关键。此外, 试验结果反映出的另外一个特征是: 加固区土体随着距阳极的距离变大, 加固后贯入阻力、硬度和波速均有减小的趋势, 风蚀模数与崩解速率均有增大的趋势。这充分说明电势梯度  $2\text{ V/cm}$ ,  $24\text{ h}$  的渗透时间内, 在电场力的驱动下 SH 溶液能够达到  $30\text{ cm}$  的渗透半径、以及与电极长度一样的渗透深度, 但渗透量尚不能在  $30\text{ cm}$  半径范围内均匀分布。因此, 在接下来的研究中如何控制渗透时间和明晰溶液的渗透路径成为电渗注浆在片状剥离加固中广泛推广亟需解决的问题。

## 5 结 论

(1) 通过常压滴渗和电渗注浆的对比试验, 证明了电渗注浆能克服传统片状剥离加固工艺的局限, 具备有效扩展渗透深度和均匀渗透半径的可行性。

(2) 电极布置形式对电渗注浆有一定影响, 在能耗系数大致相同的情况下, 正六边形布置加固面积最大, 渗透效率最高。

(3) 糯米浆渗透性能差, 易堵塞渗透通路; 硅酸钠溶液加固养护至后期会出现盐分结晶、泛白并伴有片状剥离严重脱落; 故糯米浆和硅酸钠均不宜作为土遗址片状剥离电渗注浆加固材料。

(4) 用质量分数  $1\%$  的 SH, 电势梯度  $2\text{ V/cm}$ , 溶液进行  $24\text{ h}$  电渗注浆渗透加固片状剥离土体自然风干后相较于未加固土体的贯入阻力、硬度、波速, 抗风蚀和抗崩解能力均有较明显提升。

### 参考文献(References):

- [1] SHAO M, LI L, WANG S, et al. Deterioration mechanisms of building materials of jiahe ruins in China[J]. journal of Culture Heritage, 2013, 14(1): 38 - 44.
- [2] 崔 凯, 谌文武, 张景科, 等. 干旱区古代建筑夯土特征及劣化机理研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44(6): 47 - 54.(CUI Kai, CHEN Wenwu, ZHANG Jingke, et al. Study on Mechanism of Degradation and Feature of Ancient Building Materials-rammed Earth in Arid Region[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2012, 44(6): 47 - 54.(in Chinese))
- [3] 崔 凯, 谌文武, 匡 静, 等. 干湿交替与盐渍双重作用下干旱和半干旱地区土遗址劣化效应[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(6): 2 378 - 2 384. (CUI Kai, CHEN Wenwu, KUANG Jing, et al. Effect of deterioration of earthen ruin with joint function of salinized and alternating wet and dry in arid and semi-arid regions [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(6): 2 378 - 2 384.(in Chinese))
- [4] CUI K, DU Y, ZHANG Y, et al. An evaluation system for the development of scaling off at earthen sites in arid areas in NW China[J]. journal of Culture Heritage, 2019, 7: 14.
- [5] 张影会. 干旱区夯土遗址表面剥离二元结构特征形成机制及影响因素研究[D]. 兰州理工大学硕士学位论文, 兰州, 2018.(ZHANG Yinghui. Study on the Formation Mechanism and Influencing Factors of Binary Structure Features on Surface of Rammed Soil Sites in Arid Areas[D]. Master thesis of Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 2018.(in Chinese))
- [6] 王旭东. 中国西北干旱环境下石窟和土遗址保护加固研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2003.(WANG Xudong. The Conservation and Consolidation of the Grottoes and the Earthen Architecture Sites in the Arid Region of Northwestern China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2003.(in Chinese))
- [7] 王银梅, 杨重存, 谌文武, 等. 新型高分子材料 SH 加固黄土强度及机理探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2 554 - 2 559. (WANG Yinmei, YANG Chongcun, CHEN Wenwu, et al. Strength Characteristics and Mechanism of Loess Solidified with New Polymer Material SH [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2005, 24(14): 2 554 - 2 559.(in Chinese))
- [8] 王银梅, 韩文峰, 谌文武. 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): 1 761 - 1 765.(WANG Yinmei, HAN Wenfen, CHEN Wenwu. Research on comparison between mechanical behaviors of loess solidified with new polymer material and cement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1 761 - 1 765.(in Chinese))
- [9] 谌文武, 郭志谦, 徐彦荣, 等. 基于 SH 加固材料的土遗址夯土试样室内滴渗试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8): 1 517 - 1 523. (CHEN Wenwu, GUO Zhiqian, XU Yanrong, et al. Laboratory tests on rammed earth samples of earthen sites instilled by reinforcement material SH [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(8): 1 517 - 1 523.(in Chinese))
- [10] 赵海英, 王旭东, 李最雄, 等. PS 材料模数浓度对干旱区土建筑遗址加固效果的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 557 - 562.(ZHAO Haiying, WANG Xudong, LI Zuixiong, et al. Impact of modulus and concentration of potassium silicate material on consolidation earthen architecture sites arid region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 557 - 562.(in Chinese))

- [11] 和法国, 谌文武, 赵海英, 等. PS 材料加固遗址土试验研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(3): 1 132 - 1 138.(HE Faguo, CHEN Wenwu, ZHAO Haiying, et al. Experimental research of PS reinforcing earthen architecture[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(3): 1 132 - 1 138.(in Chinese))
- [12] 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.(SONG Maoqiang, PANG Miao. Experimental study on physical and mechanical properties of stichy rice-lime mortar[J]. Architecture Technology, 2013, 44(6): 540 - 543. (in Chinese))
- [13] 李 璐, 郭青林, 杨善龙. 2010. PS 表面防风化工艺研究[J]. 文物保护与考古科学. 22(41): 71 - 76.(LI Lu, GUO Qinglin, YANG Shanlong. Study on Weatherproof Technology of PS Surface[J]. Sciences of Constervation and Archaeology, 22(41): 71 - 76.(in Chinese))
- [14] 谌文武, 杨 光, 崔 凯, 等. 土遗址片状剥离加固现场渗透试验[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2017, 53(3): 309 - 315.(CHEN Wenwu, YANG Guang, CUI Kai, et al. Field penetration test to strengthen the scaling off of earthen sites[J]. Journal of Lanzhou University: Science and Technology, 2017, 53(3): 309 - 315.(in Chinese))
- [15] CASAGRANDE L. Electroosmosis in soils[J]. Geotechnique, 1949, 1(3): 159 - 177.
- [16] MOHAMEDLHASSAN E, SHANG J Q. Feasibility assessment of electro-osmotic consolidation on marine sediment[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 2002, 6(4): 145 - 152.
- [17] SODERMAN L G, MILLI V Capacity of friction piles in varved clay increased by electro-osmosis[C]. Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, 2: 143148.
- [18] 胡勇前. 高等级公路电渗法软基处理试验研究, 城市道桥与防洪, 2004, (4): 127 - 129.(HU Yongqian. Experimental Study on Soft Foundation Treatment of High-grade Highway by Electroosmosis, Urban Roads, Bridges And Flood Control, 2004, (4): 127 - 129.(in Chinese))
- [19] 朱文元. 电渗法如何用于弱透水层基坑降水的探讨[J]. 中国科技信息, 2007(21): 61 - 62.(ZHU Wenyuan. Discussion on how to apply electroosmosis method to precipitation in weak permeable foundation pit [J]. China Science and Technology Information, 2007(21): 61 - 62.(in Chinese))
- [20] 王 燕, 程昌炳, 蔡胜华, 等. 某古铜矿遗址围岩(土)及坑木电渗注浆保护研究[J]. 电子显微学报, 1996(1): 53 - 58.(WANG Yan, Cheng Chang-bing, Cai Sheng-hua, et al. Protection of surrounding rock(soil) and pit wood of an ancient copper mine site by electroosmosis grouting[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 1996(1): 53 - 58.(in Chinese))