

DOI: 10.11779/CJGE20231152

# 电渗透法降低黏土-金属界面黏附力的机理与试验研究

万泽恩<sup>1</sup>, 尹威方<sup>1</sup>, 李树忱<sup>\*1</sup>, 景少森<sup>1</sup>, 王海波<sup>2</sup>, 许钦明<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中铁二局集团有限公司, 四川 成都 610031)

**摘要:** 在岩土工程中机械法施工普遍, 但黏土堵塞是困扰施工的一大难题。盾构、钻孔桩机等设备在黏性地层施工时易发生结泥饼、堵塞、排渣不畅等现象, 导致器械扭矩增大, 加剧刀具损耗, 降低施工效率。黏土堵塞一般发生在黏土与金属界面之间, 如何降低黏土对金属表面的黏附力是解决上述问题的关键。介绍了一种利用电渗透技术使黏土与金属界面之间形成一层水膜以达到降低黏土黏附性的方法。在不同电压和含水率条件下, 对4种黏土进行倾斜板试验和电渗透试验。试验结果表明: 黏土的电动力学行为不仅受含水率和黏土矿物的影响, 还需要满足一定的阈值电压。试验的4种土样的滑动临界电压阈值集中在4 V左右, 受含水率影响临界电压阈值有轻微差异。超过电压阈值后土样脱离时间急剧减少, 电压由9 V增加到11 V, 脱离时间无明显差异。当电压超过7 V后, 增加电压对土样的降黏作用不明显, 但电渗透过程中的能耗却呈倍数增长。电渗透法未来应用于实际工程, 应综合考虑能耗、地层条件等因素, 选择基于最优电压的电渗透降黏方案, 提高施工效率。

**关键词:** 界面黏附; 电渗透; 降黏机理; 电压阈值; 有效能耗

**中图分类号:** TU43      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2024)08-1732-10

**作者简介:** 万泽恩(1994—), 男, 博士, 讲师, 主要从事盾构渣土改良与高效智能掘进等方面的教学和科研工作。E-mail: zeenwan@cumt.edu.cn。

## Mechanism and experimental tests on reducing adhesive force of clay-metal interface by using electro-osmosis method

WAN Ze'en<sup>1</sup>, YIN Weifang<sup>1</sup>, LI Shuchen<sup>1</sup>, JING Shaosen<sup>1</sup>, WANG Haibo<sup>2</sup>, XU Qinming<sup>2</sup>

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. China Railway Erju Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The mechanical construction is widely used in geotechnical engineering, but clay clogging is the major problem that hinders construction. Shield, drilling pile machine and other equipments are prone to mud cake, clogging, poor soil discharge and other phenomena during the construction in clay stratum, which leads to the increased torque of the apparatus, intensified tool wear and reduced construction efficiency. The clay clogging generally occurs at the interface between clay and metal surfaces, and reducing the adhesion force of the clay to the metal surfaces is the key to solving the above issues. A method of using the electro-osmosis technology is introduced to form a water film between the clay and the metal interfaces to reduce the clay adhesion. The tilted-plate tests and electro-osmosis tests are conducted on four types of clay under different voltages and water contents. The experimental results show that the electrodynamic behavior of the clay is influenced by the water content and clay minerals, and needs to meet a certain voltage threshold. The critical sliding voltage threshold of the four clay samples in the experiment is concentrated at 4 V, with slight differences influenced by the water content. After the voltage exceeds the threshold, the detachment time of the soil samples decreases sharply. Increasing the voltage from 9 V to 11 V does not show a significant difference in the detachment time. After the voltage exceeds 7 V, increasing the voltage has few effects on reducing the stickiness of the soil samples, but the energy consumption during the electro-osmosis process increases significantly. When applying the electro-osmosis method in practical engineering, the factors such as energy consumption and formation conditions should be considered comprehensively so as to select the optimal voltage-based electro-osmosis viscosity reduction program and improve the construction efficiency.

**Key words:** interfacial adhesion; electro-osmosis; viscosity reduction mechanism; voltage threshold; effective energy consumption

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金项目(52308423); 国家自然科学基金面上项目(52379114); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2023QN1018)

**收稿日期:** 2023-11-27

**\*通信作者** (E-mail: sclj@cumt.edu.cn)

## 0 引言

在岩土工程中机械法施工普遍, 但黏土堵塞是困扰施工的一大难题。堵塞主要发生在盾构开挖、桩基施工等过程中, 其中盾构结泥饼堵塞较为严重。土压平衡盾构穿越黏土地层, 渣土容易黏在刀盘、土仓、螺旋输送机等工作部件上, 出现刀盘结泥饼、刀具黏结、土仓堵塞、排渣不畅等问题, 如图1所示。黏土对刀盘黏附导致工作扭矩增加, 整体掘进速率低, 能耗高, 严重困扰盾构施工。

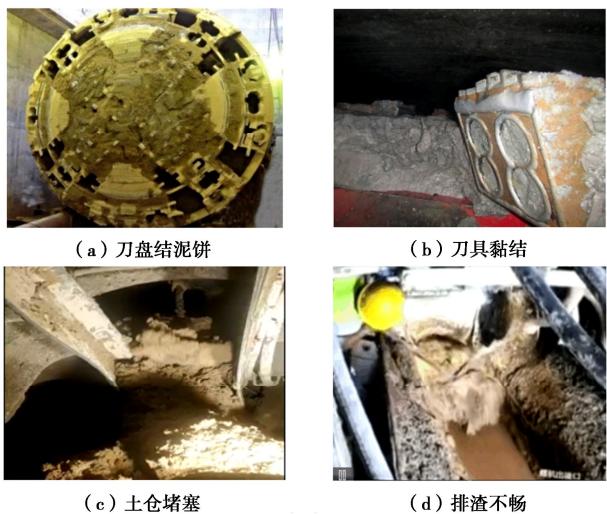


图1 盾构穿越黏土地层施工难题

Fig. 1 Difficulties of shield tunneling in clay stratum

目前针对黏土地层带来的盾构施工问题, 主要有机械冲刷和化学渣土改良两种处理手段。对于机械手段, 通过在盾构刀盘增加冲刷装置, 如在刀盘安装高压水刀将坚硬的泥饼切割冲刷, 该方法存在占据刀盘空间、无法全盘面清理、处理滞后等弊端<sup>[1]</sup>。而常采用的渣土改良手段, 通过向刀盘、土仓、螺旋输送机等部位添加泡沫剂、分散剂等化学改良剂来降低土体黏附性, 将土体调整为“塑性流动”状态, 解决盾构泥饼问题。相关学者开展了试验研究, 通过加入化学改良剂能够降低土体的法向黏附力、横向黏附力<sup>[2-3]</sup>。然而改良剂的使用标准较难把控, 很难将土体和地下水条件与适当的改良剂相匹配, 同时化学改良药剂会带来一定的环保问题, 造成排出的渣土需要处理处置, 工程整体成本增加。

为此, 近年来相关学者旨在寻求新的方法来降低黏土对刀具的黏附。Reuss<sup>[4]</sup>最早发现, 施加到土体上的电流会导致水向阴极移动。如果改变电流方向则可能产生水的渗透, 电渗透技术应运而生。电渗透技术最早是由Casagrande<sup>[5]</sup>提出, 作为一种通过脱水来固结土体的技术。在软黏土电渗透固结方面, 相关学者开展

了大量研究, 王柳江等<sup>[6]</sup>开展了电渗透加固软黏土的室内模型试验, 对排水量、电流和电势、处理后土体表面沉降、以及不同位置的土体含水率和抗剪强度进行对比分析。刘飞禹等<sup>[7]</sup>研究了逐级加压对电渗的影响, 发现逐级加压能提高电渗的作用时间, 使电渗透效果更加均匀。崔允亮等<sup>[8]</sup>、项鹏飞等<sup>[9]</sup>分析了软黏土含水率和含砂率对电阻率、电渗透系数的影响, 以及含砂率与含水率对电阻率的交互影响。李瑛等<sup>[10-12]</sup>、龚晓南等<sup>[13]</sup>从电渗的机理入手, 研究了电渗过程及其电极电解反应, 分析了土体性质、电极、电源输出和通电方式等因素对电渗固结的影响。为了进一步实现电渗固结效果, 减少能耗, 满足工程应用。王柳江等<sup>[14]</sup>发现真空电渗联合振动碾压能加快超软黏土固结速度, 减少电渗能耗。周亚东等<sup>[15]</sup>建立了轴对称真空预压-电渗耦合非线性大变形固结模型, 发现真空预压-电渗联合作用的固结效果最优。刘飞禹等<sup>[16]</sup>研究发现外荷载与电渗法联合作用和单纯电渗法及单纯预压法相比, 能够显著提高地基处理效果。

在土体电渗透固结的基础上, 针对黏土堵塞, 相关学者发现通过外加电场使黏土中离子推动水分子从阳极向阴极迁移, 在土-金属界面形成水膜来减少黏土与金属界面之间的黏附性<sup>[17-20]</sup>。Baalen<sup>[21]</sup>建议应用电渗透在土体和切割轮表面之间的界面上形成一层水膜, 以减少堵塞问题。Baalen等<sup>[22]</sup>首次提出该技术可能同样适用于盾构开挖。Spagnoli等<sup>[23]</sup>通过开展倾斜板试验, 研究了不同电流、电流类型和预加载对土样分离的影响。Heuser等<sup>[24]</sup>在一个临界稠度指标下, 对高岭石和蒙脱石与几种电解质溶液混合进行了电渗透流动试验和zeta电位模拟, 电渗透不仅受黏土矿物组分的影响而且还与溶液电解质有关。迄今为止, 人们对电渗透降低黏土黏附性的适用性还缺乏了解, 特别是对不同工程地质情况没有具体施加标准。

为充分研究不同黏粒含量黏土在电渗透作用下的电动力学行为, 开展了倾斜板试验及自主设计并搭建的电渗透试验。针对不同类型的黏土(即高岭石、钠基膨润土和石英砂及其组合)制成的土样开展试验, 得到黏土黏附性和渗透率随电渗透作用的变化规律, 并分析了电渗透降黏过程的能耗, 为盾构工程刀盘降黏提供了一种新的技术思路。

## 1 电渗透法作用原理

### 1.1 水膜理论

水膜理论最早是由Fountaine<sup>[25]</sup>提出的, 也称作水分张力理论, 该理论对于水在黏附中的作用提出了两种假设模型, 如图2所示。对于理想的相对干燥或粗糙的土体, 土体表面被描绘成一系列的“凸起”, 这些

“凸起”通过离散的水环附着在固体表面。第二种是对于理想的相对湿润、土质较细的土体，在固体表面和土体之间有一层水膜，土颗粒与金属通过水膜间接接触。层间水膜通常为非连续的，但它通过土颗粒表层之间的通道与大部分土体水相连。水膜理论在液体对固体接触角小于 90° 时应用情况较好<sup>[26]</sup>，因此该理论常用于解释土体的黏附。

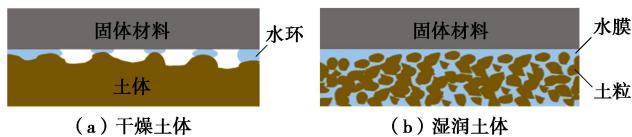


图 2 界面黏附中水的接触模型<sup>[27]</sup>

Fig. 2 Contact model for water in interfacial adhesion<sup>[27]</sup>

土体黏附力主要由土体固相颗粒对水的吸引力、毛细管力和静电引力组成，其中毛细管力对界面黏附力起决定性作用，大小可由拉普拉斯压力计算<sup>[27-29]</sup>。土体与金属界面的接触可以用图 3 表示， $R_1$  为水环弯月面半径， $R_2$  为水膜的半径，通常  $R_1 \ll R_2$ ， $\theta$  为三相交界点上固-液界面与液-气界面切线间的夹角，称作接触角。

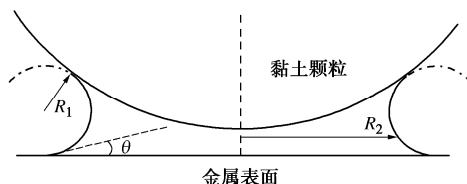


图 3 土颗粒与固体表面水环接触示意图<sup>[29]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of water ring contact between soil particles and solid surface<sup>[29]</sup>

当土体含水率较低时，土体与金属界面通过水环接触。单一水环接触点产生的黏附力为  $\Delta F$ ，则总黏附力  $F$  可视为有  $N$  个水环接触点产生黏附力：

$$\Delta F = \pi R_2^2 \Delta p = \pi R_2^2 \gamma \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) , \quad (1)$$

$$F = \sum_{n=1}^N \Delta F = \sum_{n=1}^N \pi \gamma R_{2n}^2 \left( \frac{1}{R_{1n}} - \frac{1}{R_{2n}} \right) . \quad (2)$$

式中： $\Delta p$  为拉普拉斯压力； $\gamma$  为液面张力。

当土体含水率较高时，界面为连续水膜，可将水膜视为一个较大的水环，则产生的黏附力  $F$  为

$$F = \pi \gamma R_2^2 \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) . \quad (3)$$

由式 (3) 可以看出，表面张力  $\gamma$  越大，水环弯月面半径  $R_1$  越小，水膜半径  $R_2$  越大，黏附力越大。当土体的含水率增大时，界面的水膜会变得更加均匀，水膜的总面积增加，即  $R_2$  增加，进而黏附力  $F$  增大。当含水率继续增大，液面张力大幅下降，同时水膜面积

已不再变化，水膜会变厚，黏附力会大幅下降。水膜主要与水分在土体内部的迁移速率有关，当水分从土体内部向金属界面处渗透时，“水环”向“水膜”发展，水分迁移继续增加时，水膜则逐渐变厚，黏土对金属界面的黏附性大大降低。

## 1.2 电渗透原理

通常黏土矿物颗粒表面存在着硅烷羟基 (Si-OH)、铝烷羟基 (Al-OH)，这两种羟基在水中发生电离作用，使黏性土颗粒表面带一定量的负电荷。同时黏土矿物颗粒表面对正、负离子的吸附能力不同，阴离子的吸附能力一般比阳离子弱，所以黏土矿物颗粒表面常吸附多量的负离子而带负电荷。在土壤中，带负电的黏性颗粒会吸引周围极化的水分子以及带正电荷的阳离子组成双电层<sup>[30]</sup>。在外加电场作用下，阳离子从阳极向阴极迁移，同时附着在阳离子上的水分子也向阴极迁移<sup>[21]</sup>。当阳离子向阴极迁移时，附着在阳离子周围的水作为结合水分子对周围孔隙水的自由水分子产生黏阻力，这种阻力导致自由水分子向阴极移动<sup>[31]</sup>，形成电渗透现象。在电渗透作用下，黏土与阴极界面的水分含量增加，水膜厚度增加，液面张力减小，使得黏土与阴极界面的黏附力大幅度降低，最终实现降黏效果，如图 4 所示。

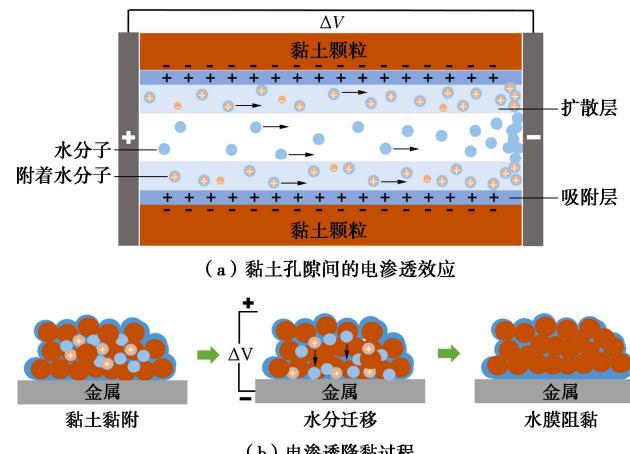


图 4 电场作用下黏土中水分迁移示意图

Fig. 4 Schematic diagram of water migration in clay under action of electric field

## 2 试验材料与方法

### 2.1 黏土试样制备

在本研究中，试验土样使用膨润土、高岭土、石英砂等材料配制而成，在实验室按照不同配比预制 4 种不同类型黏土，具体配比如表 1 所示。石英砂采用中国 ISO 标准砂，膨润土采用粒度为 400 目、蒙脱石含量 75%、最大吸水率 295% 的钠基膨润土。高岭土粒度为 1250 目，密度为  $2.58 \text{ g/cm}^3$ 。采用 LP-100D 型

土体液塑限联合测定仪对试验土样进行液塑限测定。将每种土样与蒸馏水充分混合制成 45%, 55%, 65%, 80% 四种不同含水率在实验室常温条件下覆盖保鲜膜密封静置 24 h 后分别开展倾斜板试验和电渗透试验。

表 1 试验土样

Table 1 Test soil samples

| 类型   | 石英含<br>量/% | 膨润土<br>含量/% | 高岭土<br>含量/% | 塑限/<br>% | 液限/<br>% | 塑性<br>指数 |
|------|------------|-------------|-------------|----------|----------|----------|
| 对照组  | 0          | 0           | 100         | 59.18    | 68.29    | 9.11     |
| 土样 1 | 10         | 60          | 30          | 36.86    | 454.46   | 417.60   |
| 土样 2 | 0          | 100         | 0           | 38.76    | 477.72   | 439.06   |
| 土样 3 | 0          | 50          | 50          | 41.99    | 217.70   | 175.71   |
| 土样 4 | 0          | 75          | 25          | 39.80    | 422.35   | 382.55   |

## 2.2 倾斜板试验方法

黏土试样重力沿倾斜板分力无法克服切向黏附力  $F_t$  保持静止, 在外加电场作用下, 水分向阴极迁移形成一定厚度的水膜降低了黏土金属界面切向黏附力, 当切向黏附力减少到一个临界值试样平衡状态失效开始沿斜面滑动 (如图 5 所示)。为了探究在不同电压、含水率等条件下电渗透作用对不同类型黏性土黏附性的影响, 分别开展了倾斜板试验和电渗透试验。其中倾斜板试验是一种简单有效的试验来研究电渗透对降低黏性土与金属界面黏附性的适用性。本研究中的倾斜板试验 (图 6) 使用倾斜的 (本试验中采用的倾斜角度为 30°) 钢板作为阴极, 将黏土试样放置在倾斜钢板上, 使用另一个钢板放置黏土试样顶部作为阳极, 对试样施加电压。倾斜板试验电极为表面粗糙程度一致的不锈钢钢板, 选择尺寸为 200 mm×200 mm, 厚度为 3 mm 的不锈钢钢板作为阴极电极, 使用直径为 100 mm, 厚度为 3 mm 的不锈钢钢板作为阳极电极放置在试样顶部。将密封养护完成的不同含水率的黏土装填进摸具 (直径 100 mm; 高度 20 mm) 中用 Proctor 锤 (2.5 kg) 压实<sup>[22, 32]</sup>, 并用刮刀将表面抹平后脱模取出。将试样夹在两电极之间并水平放置在试验台上, 使用 2.5 kg 的砝码对其进行预加载保证同一类型黏土试样具有一致的黏附性。60 s 后取下砝码并将试样连同阴极电极翻转朝下, 试样未脱落表明试样预加载成功。在不施加电压情况下, 将预加载合格试样轻轻地放在倾斜角度为 30° 的支架上。黏土试样的制备见图 7。

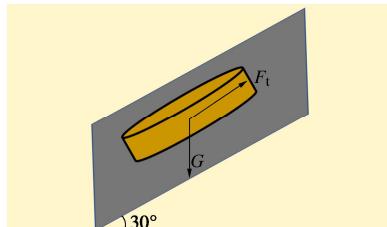
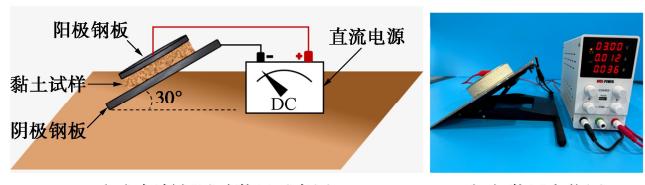


图 5 黏土试样平衡状态受力

Fig. 5 Equilibrium state force on clay samples



(a) 倾斜板试验装置示意图

(b) 装置实物图

图 6 倾斜板试验装置

Fig. 6 Schematic representation of the tilted-plate test

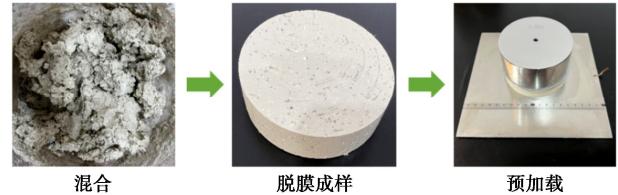


图 7 黏土试验制备

Fig. 7 Preparation of clay samples

在试验中, 使用直流电源施加电压作用于试样, 定义脱离时间为试样从接通电源到开始滑动所需时间, 记录试样接通电源后的开始滑动时间。在施加电压情况下, 试样的开始滑动时间具有一定的不确定性, 所以在同一电压作用下更换新试样进行 5 次重复试验, 每次更换试样前使用吸水纸对两电极钢板擦拭干净。试验中, 开始滑动时间取决于试样与钢板的黏附性和电渗透速率, 前者与试样的成分和含水率相关, 后者通过改变作用于试样上的电压来验证。

## 2.3 电渗透试验方法

电渗透降黏效果受含水率、电压、土样类型等因素共同影响, 同时通过电场作用下黏土黏附力的变化直接反应, 宏观现象可通过倾斜板试验中试样脱离时间表示。电渗降黏的本质是黏土在电场作用下水分迁移形成一定厚度的水膜实现降黏效果, 所以在电渗降黏研究中电场作用下黏土中水分的迁移速率以及土样的电渗透渗透率是不可忽视的因素。因此采用图 8 所示的电渗透试验装置开展相关研究, 重点探讨含水率和土样类型的不同对黏土电渗透速率和电渗透渗透率的影响。

自主设计了电渗透试验装置 (如图 8 所示) 进行室内电渗试验, 其中电渗透试验装置主体为 PE 绝缘材料, 具体由两个电极端、试样土仓、电解液收集装置和直流电源组成。两个电极端上方分别设有玻璃储液管, 端口设有卡槽放置多孔电极和橡胶垫片。电渗透试验所用多孔电极为市售的多孔不锈钢电极, 直径为 100 mm, 厚度为 6 mm, 过滤精度为 45  $\mu\text{m}$ 。黏土试样放置在中间的试样土仓。试验过程为避免水力梯度对试验结果的影响, 两端储液管的水位应保持一致。

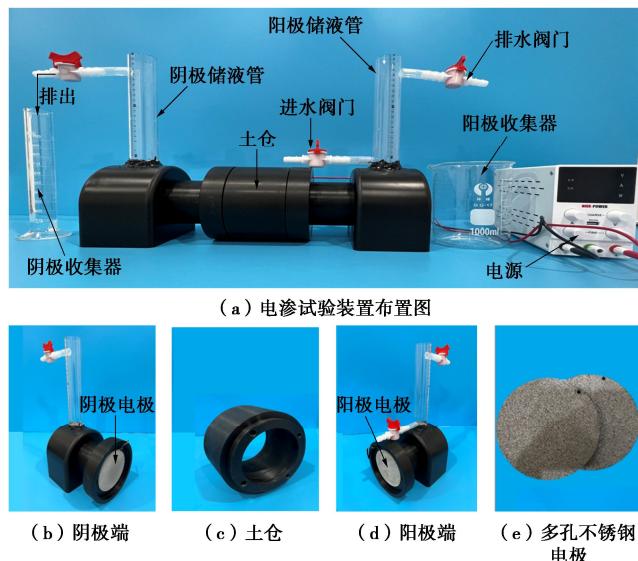


图 8 电渗透试验装置

Fig. 8 Electro-osmosis test devices

将养护完成的黏土试样分层压实装填进试样土仓(内径 100 mm; 高度 100 mm), 每层装填深度为 20 mm。通过 4 根 PVC 螺栓将试样土仓和装有不锈钢电极的两电极端连接, 使试样土仓内的土样与两端多孔电极紧密接触。两个储液管内电解液采用与制备试样相同的蒸馏水。往阴极储液管内注入蒸馏水至略高于排水口, 多余的水从排水口排除。阳极储液管内蒸馏水通过下部进水阀门注入, 并从上部排水口流至阳极收集管。两储液管上部排水口的水平高度一致。直流电源通过导线连接两端电极, 在试样土仓内的土样两端施加电压。试验中, 水在电压作用下通过黏土试样从阳极向阴极渗透并从阴极储液管排水口流至阴极收集管内。为减少试验中误差, 整个电渗透试验间限定为 4 h。试验期间, 每隔 20 min 测量一次阴极的排水量。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 倾斜板试验结果

在倾斜板试验中对表 1 中的土样 1~4 分别施加 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9 V 和 11 V 共 8 组电压, 不同电压条件下黏土在倾斜板上的脱离时间如图 9 所示。

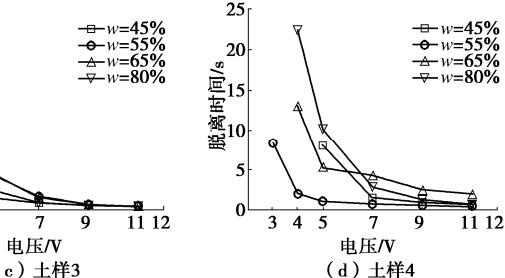
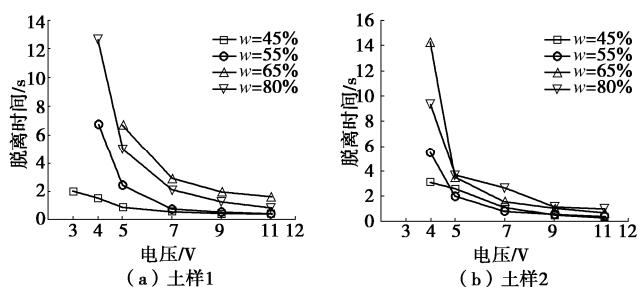


图 9 土样脱离时间随电压变化趋势

Fig. 9 Variation trend of detachment time of samples with voltage

试验结果发现, 应用电渗透法降低黏土与金属界面的黏附性需要满足电压条件, 当作用于土样的电压过小时, 试样无论多长时间都不会滑动。这是由于土样含水率较小且外部电压过小, 水分迁移不充分, 在土体和倾斜板间隙形成的水膜不足以克服静态摩擦力, 无法实现电渗透降黏。且当时间较长时, 阳极表面逐渐干燥导致电极与土样脱落(图 10)。当作用于试样的电压大于某一电压值时试样开始滑动, 定义这一电压值为试样的滑动电压阈值。图 11 展示了黏土在不同电压下水分的迁移情况。当电压低于脱离电压阈值时, 试样中水分以较慢的速度从阳极向阴极迁移。同时阳极端水分减少阻抗值增加, 导致试样中的电流逐渐减少, 水分迁移速度逐渐减缓至一个极小值。最终试样水分被集中在中间难以到达黏土-金属界面形成水膜, 试样无法滑动。当电压达到脱离电压阈值, 水分以较快的速度从阳极向阴极迁移并在阴极界面上形成水膜达到阻黏效果, 试样发生滑动。继续增加电压超过脱离电压阈值, 阴极金属界面形成水膜的速度加快, 但达到一定速度后继续增加电压并不会产生额外的效果。

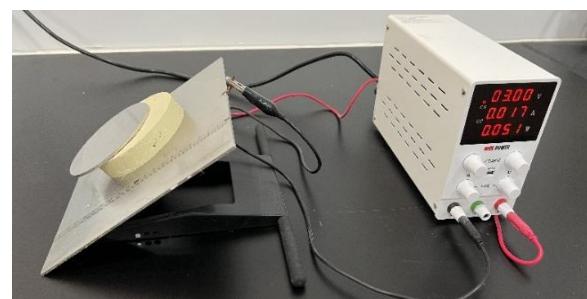


图 10 阳极钢板脱落

Fig. 10 Anodic steel plate falling off

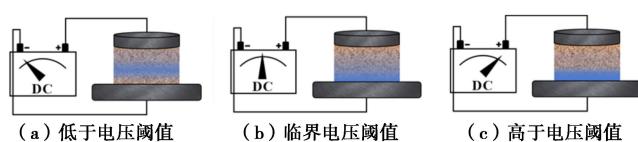


图 11 电压作用下水分在黏土中迁移的过程

Fig. 11 Process of water migration in clay under voltage

土样发生脱离的实际临界电压阈值在试验所设电压梯度区间内。本研究的临界电压阈值规定为其所在区间的上限值, 不同土样的临界电压阈值如图 12 柱状图所示。土样 1 和土样 4 的临界电压阈值随着含水率变化有轻微变化, 其余两种土样的临界电压阈值随着含水率的变化并未出现明显差异。由试验结果发现, 不同含水率的土样的临界电压阈值以 4 V 居多, 受含水率的影响较小。Hollmann 等<sup>[33]</sup>结合工程经验基于地层稠度指数对盾构堵塞风险进行了评估预测。当盾构发生堵塞时, 土体稠度应处于“软/中”区域, 该区域的土体容易发生强堵塞。需要水或土壤改良剂来消除黏在机器上的黏土。当黏土处于“非常软”或“液体”区域时, 认为堵塞已被消除。黏土的塑性指数越高, 黏土从“软”区向“极软”区或“液态”区转变所需的水量就越多。同时盾构土仓中压实黏土渗透系数较低, 需要很长时间和注入大量的水来分散堵塞黏土。因此, 仅通过增加含水率难以降低堵塞风险。通过施加电压可以缩短黏土的脱离时间, 进一步解释了电渗透法降低黏土黏附性的可行性。

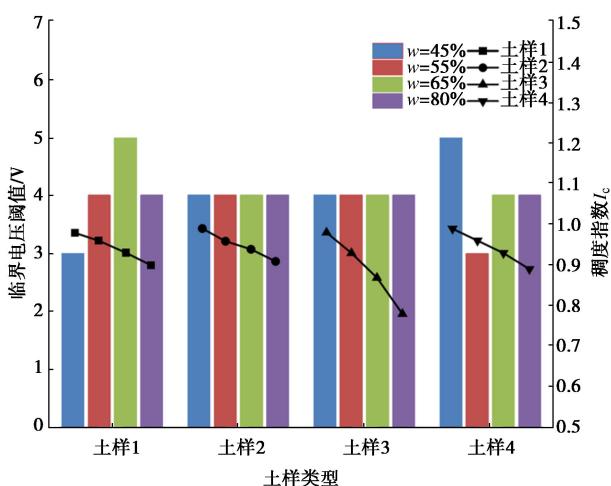


图 12 土样临界电压阈值

Fig. 12 Critical voltage thresholds of soil samples

由图 9 可知, 当施加电压超过临界电压阈值后, 增加电压使得土样的脱离时间急剧减少。但随着电压的继续增加对缩短土样脱离时间的效果并不明显, 特别是当电压超过 9 V 后再继续增加电压土样脱离时间未出现明显差异, 均保持在 1 s 左右。土样脱离难度与含水率不是正相关, 土样 1、土样 2 和土样 3 在含水率为 45% 时最易脱离, 随着含水率的增加土样的脱离难度增加, 含水率从 65% 到 80% 土样的脱离难度呈下降趋势。低电压区间, 土样 4 在含水率在 55%~80% 内脱离难度与含水率呈正相关。而当电压大于 7 V 时, 土样 4 含水率在 55%~80% 内脱离难度随含水率先增

加随后又呈下降趋势, 在 65% 含水率脱离最困难。因为含水率和电压是影响土样滑动的主要因素, 含水率在一定区间内增加土样的黏附性和电渗透速率增加, 同时电渗透速率随电压的提高而增加。在低电压作用下含水率的增加导致黏附性增强效果大于电渗透率的提高。而当电压大于 7 V 时, 80% 含水率的土样电渗透速率提高效果强于黏附性的增强, 相比于 65% 含水率土样更快脱离。相同含水率的同一土样, 随着电压的增大, 黏土块的脱离时间逐渐减小。但减小的速率逐渐变缓, 曲线逐渐趋向一个定值。因此电渗透的电压并不是越大越好, 当超过到 9~11 V 的最优电压时, 降黏效果基本达到最优, 额外增加电压只会增加能耗。

电压和含水率是电渗透降黏应用中不可忽视的两个重要因素。不同含水率的黏土试样的脱离时间与含水率的关系如图 13 所示。在低电压作用下, 试样的脱离时间受含水率影响较大。同时试样脱离时间随含水率变化曲线有明显拐点。含水率影响黏土的黏附性, 含水率在一定范围内增加黏土的黏附性随之增加, 继续增加含水率黏土的黏附性呈下降趋势。由图 14 (b) 所示, 电渗透效率受含水率的影响, 含水率与电渗透效率在一定范围内呈正相关, 但含水率对电渗透效率的影响效果受其他因素的影响。电渗透本质是黏土中离子的在电场作用下的迁移, 因此含水率的增加能提高电渗透效率但受限于电压和黏土矿物成分等其他因素。因此, 在使用电渗透降低黏土黏附性的应用中应综合考虑含水率、电压和地层类型等因素。

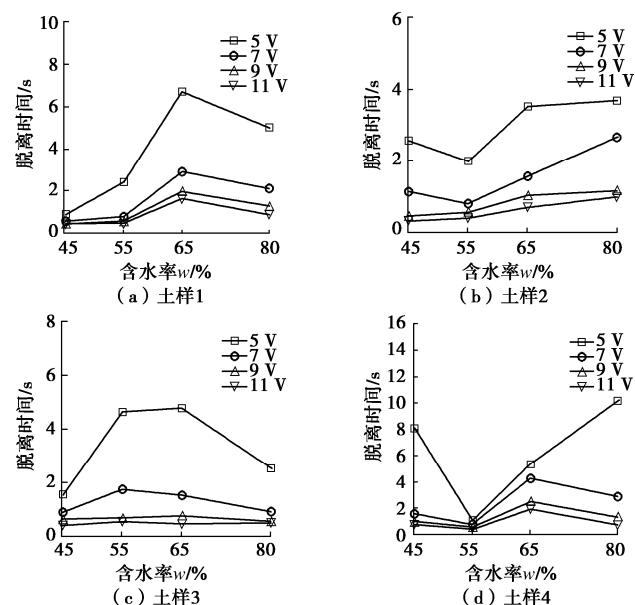


图 13 土样脱离时间随含水率变化趋势

Fig. 13 Variation trend of detachment time of soil samples with water content

### 3.2 电渗透试验结果

根据倾斜板试验结果发现,当作用于土样的电压小于滑动电压阈值时土样无法滑动,而当电压增加到一定值后再继续增加电压土样滑动时间未出现明显差异。因此,选择5, 7, 9 V三种电压梯度对土样进行电渗透试验,4 h后试验的渗透测量结果与电压和含水率的关系如图14所示。4种土样的渗透量随着电压的增加而增加(图14(a)),但随着土样矿物成分的不同土样的电渗透量有些显著差异。相同电压作用下,含砂的土样1的电渗透量最高,纯膨润土土样和含有25%高岭土的混合土样的电渗透量处于较低水平,但随着高岭土含量的增加土样电渗透量有所增加。对于土样1和土样3在电压为5~7 V时电渗透量的增加受电压影响较小,而当电压从7 V增加到9 V电渗透量增加幅度较大。相比于土样1和土样3,土样2和土样4的电渗透量受电压影响较小。如图14(b)所示,电渗透量除受电压影响外,土样含水率也是影响电渗透量的一个重要因素。以土样1为例,含水率在45%~65%电渗透量随着含水率增加而增加,但当含水率从65%继续增加到80%时土样的电渗透量有所下降。

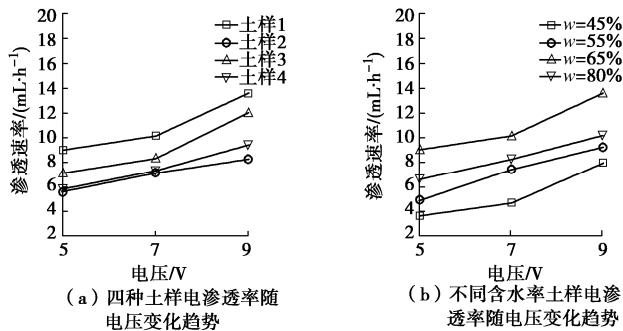


图14 土样电渗透速率随电压变化趋势

Fig. 14 Variation trend of electroosmotic rate of soil samples with voltage

土样的电渗透渗透率如表2所示,表达式为<sup>[34]</sup>

$$k_e = \frac{Q}{EA} \quad (4)$$

式中:  $k_e$ 为电渗透渗透率( $\text{m}^2/(\text{s}\cdot\text{V})$ );  $Q$ 为渗流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $E$ 为电场强度( $\text{V}/\text{m}$ );  $A$ 为土样在电场中的横截面积( $\text{m}^2$ )。

含砂土样的电渗透渗透率明显高于其他土样,其中纯膨润土的电渗透渗透率最小。这是因为含砂土样的孔隙率要高于纯黏土土样。与纯膨润土相比,土样中高岭土含量的增加其电渗透渗透率有所提高。正如Mitchell等<sup>[35]</sup>预期的那样,  $k_e$ 的绝对值范围在 $10^{-9} \text{ m}^2/(\text{s}\cdot\text{V})$ 。电渗驱动的渗透量与渗透率直接相关,渗透率越高,电渗量越高。电渗透渗透率与土样矿物成分和孔隙率相关。

表2 4种土样的电渗透系数

Table 2 Electro-osmotic permeability coefficients of four soil samples

| 土样类型 | 电渗透系数/( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{V}^{-1}$ ) |
|------|--|
| 土样1  | $6.39 \times 10^{-9}$                                      |
| 土样2  | $3.98 \times 10^{-9}$                                      |
| 土样3  | $5.09 \times 10^{-9}$                                      |
| 土样4  | $4.16 \times 10^{-9}$                                      |

对于同一试样梯度电压越大电渗透速率越快,试样在5, 7, 9 V三种梯度电压作用下脱离时间随电渗透速率的变化规律如图15所示。相比于其他3种土样,一定含砂率的土样1脱离时间随电渗透速率变化差异不明显。这是因为土样1含砂孔隙率高于其他土样,由图14也可发现相同电压作用下试样的电渗透速率最高。同时由图15曲线可知当电渗透速率增加时,土样的脱离时间急剧降低,但当电渗透速率达到一定值后再增加对缩短脱离时间的效果不明显。

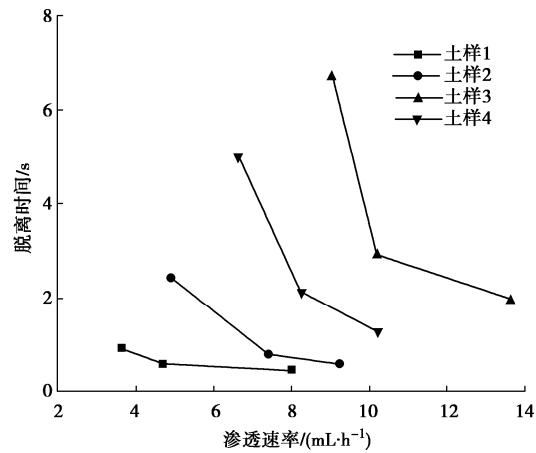


图15 脱离时间随电渗透速率变化规律

Fig. 15 Variation of detachment time with electro-osmotic rate

### 3.3 能量消耗

能量消耗是应用电渗透解决黏性地层盾构结泥饼问题的一个相关因素。定义倾斜板试验中从施加电压到土样开始滑动所需能量为有效能量消耗:

$$E = P \cdot T \quad (5)$$

式中:  $E$ 为有效能量( $\text{J}$ );  $P$ 为滑动过程的功率( $\text{W}$ );  $T$ 为开始滑动时间( $\text{s}$ )。

Casagrande<sup>[5]</sup>认为在电渗过程中,能量消耗取决于电极尺寸、施加的电位梯度和地下条件(土体电阻率)。所有这些参数都控制着电流强度,从而控制着电渗透。土样在不同电压作用下的电流强度如表3所示。对于直流电源功率消耗为

$$P_{DC} = V \cdot I \quad (6)$$

式中:  $V$ 为电压( $\text{V}$ );  $I$ 为电流强度( $\text{A}$ )。

4种土样受电压、含水率影响下的有效能量消耗对比如图16所示。以土样1(图16(b))为例,有效

能量消耗受含水率影响较大, 土样含水率增加需要更多的能量来克服黏附力。电压的增加对含沙土样和纯膨润土土样的有效能量消耗没有显著影响。当电压从5 V增加到7 V时, 土样4的有效能量消耗明显提高, 而当电压从5 V增加到9 V时对效能量消耗没有显著影响。与其余3种土样相比, 土样3的有效能量消耗随着电压增加呈下降趋势。在使用电渗透解决黏性地层盾构结泥饼问题的应用中能量消耗成本是一个重要因素, 在一定范围内增加电压能提高降低黏土黏附性效率, 但继续单独增加电压不会对电渗透产生额外效果。图17显示电渗透过程的功率消耗, 发现电压从7 V增加到9 V功率消耗呈倍数增长, 但对电渗透效率别没有明显效果。因此, 应用电渗透时电压根据地层类型、含水率等因素具有最优选择。

表3 不同电压下土样的电流强度

Table 3 Current intensities of samples under different voltages

| 土样类型 | 电流/A   |        |        |
|------|--------|--------|--------|
|      | 5 V    | 7 V    | 9 V    |
| 土样1  | 0.0224 | 0.0364 | 0.0512 |
| 土样2  | 0.0250 | 0.0470 | 0.0638 |
| 土样3  | 0.0176 | 0.0288 | 0.0402 |
| 土样4  | 0.0220 | 0.0386 | 0.0520 |

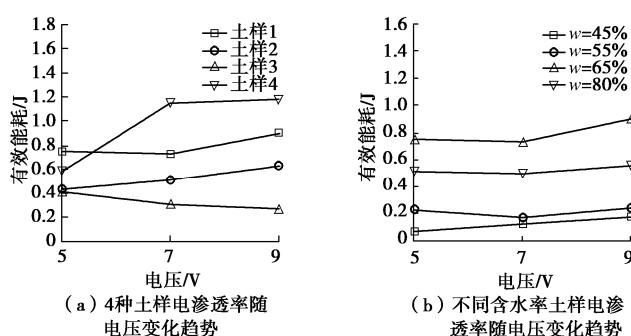


图16 土样有效能耗随电压变化趋势

Fig. 16 Variation trend of effective energy consumption of soil samples with voltage

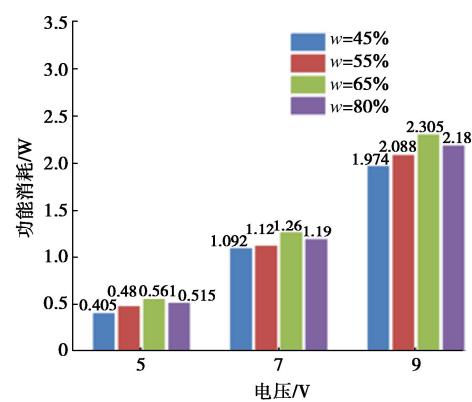
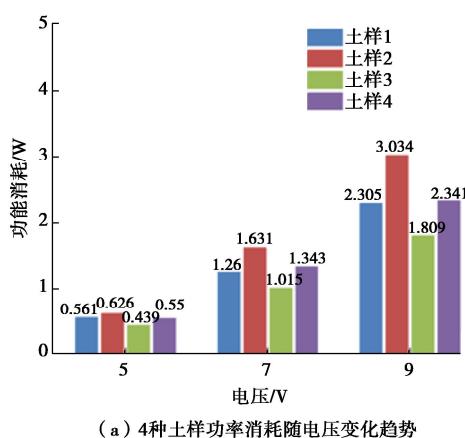


图17 土样功率消耗随电压变化趋势

Fig. 17 Variation trend of power consumption of soil samples with voltage

## 4 结 论

本文对应用电渗透法降低黏土与金属界面之间黏附性的适用性进行了研究。电压、黏土矿物成分和含水率是影响电渗透降黏效果的相关因素。选择膨润土、高岭土和石英砂制备成含水率不同的4种土样分别开展了倾斜板试验和电渗透试验。

(1) 电渗透降低黏土黏附性中的电压条件要满足电压阈值。试验的4种土样的滑动临界电压阈值集中在4 V左右, 超过电压阈值后继续增加电压土样脱离时间急剧减少, 但当电压超过9 V后再继续增加电压对缩短土样脱离时间无显著差异。

(2) 试验的4种土样电压阈值随含水率的变化有轻微差异, 但土样脱离时间受含水率和电压影响较大。含水率在一定范围内增加土样的脱离时间增加, 继续增加含水率脱离时间又出现下降趋势。因为增加含水率导致黏土黏附性的增加, 但电压和含水率的增加也提高了电渗透效率。

(3) 在电渗透法降低黏土黏附性的应用中存在最优电压。当试验电压超过电压阈值, 一定范围内增加电压对缩短脱离时间作用明显, 但继续增加电压不会对电渗透产生显著效果而功率消耗却成倍数增加。因此, 在电渗透法降黏的未来工程应用中应综合考虑能耗、地层条件等因素, 实现盾构节能、高效的掘进。本试验的未来应用在电极材质和埋置位置的选择方面还需进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 周文波, 吴惠明, 赵峻. 泥岩地层常压刀盘盾构的掘进策略与分析[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(4): 8-15. (ZHOU Wenbo, WU Huiming, ZHAO Jun. On driving strategy of the

- shield machine with atmospheric cutterhead in mudstone strata[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, **56**(4): 8-15. (in Chinese))
- [2] WAN Z, LI S, YUAN C, et al. Soil conditioning for EPB shield tunneling in silty clay and weathered mudstone[J]. International Journal of Geomechanics, **21**(9): 06021020.
- [3] 方 勇, 王 凯, 陶力铭, 等. 黏性地层面板式土压平衡盾构刀盘泥饼堵塞试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(9): 1651-1658. (FANG Yong, WANG Kai, TAO Liming, et al. Experimental study on clogging of cutterhead for panel earth-pressure-balance shield tunneling in cohesive strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(9): 1651-1658. (in Chinese))
- [4] REUSS F. Sur un nouvel effet de l'électricité galvanique[J]. Mem Soc Imp Natur Moscou, 1809(2): 327-337. (REUSS F. On a new effect of galvanic electricity[J]. Memoirs of the Imperial Society of Naturalists Moscow, 1809(2): 327-337. (in French))
- [5] CASAGRANDE I L. Electro-osmosis in soils[J]. Géotechnique, 1949, **1**(1): 159-177.
- [6] 王柳江, 陈强强, 刘斯宏, 等. 水平排水板真空预压联合电渗处理软黏土模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(增刊 2): 3516-3525. (WANG Liujiang, CHEN Qiangqiang, LIU Sihong, et al. Model test on treatment of soft clay under combined vacuum preloading with electro-osmosis using prefabricated horizontal drain[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(S2): 3516-3525. (in Chinese))
- [7] 刘飞禹, 宓 炜, 王 军, 等. 逐级加载电压对电渗加固吹填土的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(12): 2582-2591. (LIU Feiyu, MI Wei, WANG Jun, et al. Influence of applying stepped voltage in electroosmotic reinforcement of dredger fill[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(12): 2582-2591. (in Chinese))
- [8] 崔允亮, 项鹏飞, 王新泉. 含水率与含砂率对软黏土电阻率影响的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, **18**(3): 335-338. (CUI Yunliang, XIANG Pengfei, WANG Xinquan. Experimental study on influence of water content and sand content on resistivity of soft clay[J]. Science Technology and Engineering, 2018, **18**(3): 335-338. (in Chinese))
- [9] 项鹏飞, 崔允亮, 王新泉. 含水率与含砂率对软黏土电渗透系数的影响试验研究[J]. 铁道建筑, 2017, **57**(12): 75-77. (XIANG Pengfei, CUI Yunliang, WANG Xinquan. Experimental study on influence of water content and sand content on electroosmosis coefficient of soft clay[J]. Railway Engineering, 2017, **57**(12): 75-77. (in Chinese))
- [10] 李 瑛, 龚晓南. 含盐量对软黏土电渗排水影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(8): 1254-1259. (LI Ying, GONG Xiaonan. Experimental study on effect of soil salinity on electro-osmotic dewatering in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(8): 1254-1259. (in Chinese))
- [11] 李 瑛, 龚晓南. 软黏土地基电渗加固的设计方法研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(6): 955-959. (LI Ying, GONG Xiaonan. Design method of electro-osmosis reinforcement for soft clay foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(6): 955-959. (in Chinese))
- [12] 李 瑛, 龚晓南, 郭 彪, 等. 电渗软黏土电导率特性及其导电机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊 2): 4027-4032. (LI Ying, GONG Xiaonan, GUO Biao, et al. Research on conductivity characteristics of soft clay during electro-osmosis and its conductive mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S2): 4027-4032. (in Chinese))
- [13] 龚晓南, 焦 丹. 间歇通电下软黏土电渗固结性状试验分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, **42**(6): 1725-1730. (GONG Xiaonan, JIAO Dan. Experimental study on electro-osmotic consolidation of soft clay under intermittent current condition[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, **42**(6): 1725-1730. (in Chinese))
- [14] 王柳江, 刘斯宏, 樊科伟, 等. 真空电渗联合振动碾压加固超软黏土试验研究[J]. 水运工程, 2017(5): 150-156. (WANG Liujiang, LIU Sihong, FAN Kewei, et al. Experimental study of combined application of vacuum electroosmotic drainage and vibration rolling in ultra-soft clay improvement[J]. Port and Waterway Engineering, 2017(5): 150-156. (in Chinese))
- [15] 周亚东, 付继宇, 邓 安, 等. 真空预压-电渗联合作用下软黏土非线性大变形固结模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(8): 1677-1685. (ZHOU Yadong, FU Jiyu, DANG An, et al. A nonlinear consolidation model of soft clay under the combination of electroosmosis and vacuum preloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(8): 1677-1685. (in Chinese))
- [16] 刘飞禹, 张 乐, 王 军, 等. 外荷载变电压作用下软黏土电渗固结试验研究[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2014, **20**(2): 228-238. (LIU Feiyu, ZHANG Le, WANG Jun,

- et al. Experimental study on electro-osmotic consolidation of soft clay under preloading and variable voltage[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2014, **20**(2): 228-238. (in Chinese))
- [17] AZZAM R, OEH W. The utilization of electrokinetics in geotechnical and environmental engineering[J]. *Transport in Porous Media*, 2001, **42**: 293-314.
- [18] LAMBE T W. *Foundation Engineering*[M]. New York: McGraw-Hill Education, 1962.
- [19] MICIC S, SHANG J Q, LO K Y. Electrokinetic strengthening of marine clay adjacent to offshore foundations[J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2002, **12**(1): 64-73.
- [20] MOHAMEDELHASSAN E, SHANG J Q. Feasibility assessment of electro-osmotic consolidation on marine sediment[J]. *Ground Improvement*, 2002, **6**(4): 145-152.
- [21] VAN BAALEN L R. *Reduction of Clay Adherence by Electro-osmosis*[D]. Amsterdam: Centre of Engineering Geology in the Netherlands, 1999.
- [22] VAN BAALEN L R, ZIMNIK A, VERHOEF P, et al. Applicability of electro-osmosis to reduce clay adherence in a TBM[C]// *Proceedings of the International Conference on Geotechnical Geological Engineering*. Beijing, 2001.
- [23] SPAGNOLI G. *Electro-chemo-mechanical Manipulations of Clays Regarding the Clogging During EPB-tunnel Driving*[D]. Aachen: RWTH Aachen University, 2011.
- [24] HEUSER M, SPAGNOLI G, LEROY P, et al. Electro-osmotic flow in clays and its potential for reducing clogging in mechanical tunnel driving[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2012, **71**: 721-733.
- [25] FOUNTAINE E R. Investigations into the mechanism of soil adhesion[J]. *Journal of Soil Science*, 1954, **5**(2): 251-263.
- [26] 贾 贤, 任露泉, 陈秉聪. 土壤对固体材料黏附力的理论分析[J]. *农业工程学报*, 1995(4): 5-9. (JIA Xian, REN Luquan, CHEN Bingcong. Theoretical analysis of adhesion force of soil to solid materials[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1995(4): 5-9. (in Chinese))
- [27] 方 勇, 王宇博, 王 凯, 等. 基于界面黏附力盾构堵塞风险评判方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, **45**(9): 1813-1821. (FANG Yong, WANG Yubo, WANG Kai, et al. Risk evaluation method for shield clogging based on interface adhesion force[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, **45**(9): 1813-1821. (in Chinese))
- [28] 陶力铭. 盾构刀盘-土壤界面黏附机理试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020. (TAO Liming. *Experimental Study on the Adhesion Mechanism of Shield Cutterhead-Soil Interface*[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020. (in Chinese))
- [29] JIA X. Theoretical analysis of the adhesion force of soil to solid materials[J]. *Biosystems Engineering*, 2004, **87**(4): 489-493.
- [30] LEROY P, REVIL A. A triple-layer model of the surface electrochemical properties of clay minerals[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, **270**(2): 371-380.
- [31] TIKHOMOLOVA K P. *Electro-osmosis*[D]. Ellis Horwood: University of St Petersburg, 1993.
- [32] SPAGNOLI G, KLITZSCH N, FERNANDEZ-STEEGER T, et al. Application of electro-osmosis to reduce the adhesion of clay during mechanical tunnel driving[J]. *Environmental & Engineering Geoscience*, 2011, **17**(4): 417-426.
- [33] HOLLMANN F S, THEWES M. Assessment method for clay clogging and disintegration of fines in mechanised tunnelling[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, **37**: 96-106.
- [34] MOHAMEDELHASSAN E, SHANG J Q. Effects of electrode materials and current intermittence in electro-osmosis[J]. *Proceedings of the ICE Ground Improvement*, 2001, **5**(1): 3-11.
- [35] MITCHELL JK, SOGA K. *Fundamentals of Soil Behavior*[M]. 3rd ed. Hoboken NJ: Wiley, 2005.