

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.075



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 基于电化学反应的软土电渗界面电阻试验研究

胡浩<sup>1</sup>, 甘淇匀<sup>2,3</sup>, 周建<sup>2</sup>, 马郁春<sup>1</sup>, 蒋熠诚<sup>2</sup>, 朱则铭<sup>2</sup>

(1. 中铁建设集团南方工程有限公司, 广州 511466; 2. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心; 浙江省城市地下空间开发工程技术研究中心, 杭州 310058; 3. 浙江建投创新科技有限公司, 杭州 310012)

**摘要:**针对电渗加固软土地基能耗高、黏土-电极界面电势损失大的问题,从电化学反应角度出发,研究电极反应对界面电阻的影响。利用自行研制的一维电渗固结装置,开展电极材料和通电模式两大关键因素的室内试验,研究电动土工合成材料(EKG)、铁、铝和铜 4 种不同电极在持续通电条件下的黏土-电极界面电阻变化趋势,并研究间歇通电、反转通电两种优化通电策略的电化学作用机理。结果表明:电极反应改变了界面电化学特性,通过影响界面电阻进而影响电渗排水速率;界面电阻增长迅速是导致电渗高能耗的原因之一,阳极界面电阻受电极反应影响明显,长期通电情况下,电动土工合成材料电极阳极界面电阻较小,而在浓差电阻和表面膜阻的共同影响下,金属电极阳极界面电阻较大;采用优化通电模式有利于缓解界面极化现象,抑制界面电阻增长。

**关键词:**电渗法;界面电阻;电极反应;试验研究;地基处理;电化学

**中图分类号:** TU472.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2096-6717(2025)04-0010-09

## Experimental study of electro-osmotic interface resistance of soft soil based on electrochemical reaction

HU Hao<sup>1</sup>, GAN Qiyun<sup>2,3</sup>, ZHOU Jian<sup>2</sup>, MA Yuchun<sup>1</sup>, JIANG Yicheng<sup>2</sup>, ZHU Zeming<sup>2</sup>

(1. China Railway Construction Group Southern Engineering Co., Ltd., Guangzhou 511466, P. R. China; 2. Coastal and Urban Geotechnical Engineering Research Center; Zhejiang Urban Underground Space Development Engineering Research Center, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China; 3. Zhejiang Jiantou Innovation Technology Co., Ltd., Hangzhou 310012, P. R. China)

**Abstract:** In order to solve the issue of high energy consumption and significant potential loss at the soil-electrode interface during electroosmotic consolidation, this study investigates the impact of electrode reactions on interface resistance from an electrochemical perspective. By using a self-designed one-dimensional electro-osmotic consolidation device, indoor experiments were conducted to explore the trend of the clay-electrode interface resistance under different electrode materials and different power supply modes. The trend of interfacial resistance of four different electrode materials, electric geosynthetics (EKG), iron, aluminum and copper,

**收稿日期:** 2023-03-17

**基金项目:** 国家自然科学基金(52078455、51708507); 浙江省“领雁”计划项目(2022C01130)

**作者简介:** 胡浩(1988-), 男, 主要从事项目工程技术管理和岩土工程研究, E-mail: 35213437@qq.com。

周建(通信作者), 女, 教授, 博士生导师, E-mail: Zjelim@zju.edu.cn。

**Received:** 2023-03-17

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (Nos. 52078455, 51708507); Zhejiang Province Bellwether Project (No. 2022C01130)

**Author brief:** HU Hao (1988-), main research interests: project engineering technology management and geotechnical engineering, E-mail: 35213437@qq.com.

ZHOU Jian (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: Zjelim@zju.edu.cn.

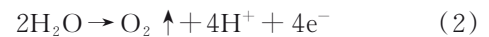
under continuous power supply was investigated through laboratory electroosmotic tests. Further, the electrochemical mechanism of action of two optimized power supply modes, intermittent current and polarity reversal, were investigated. Results show that electrode reactions alter the interface electrochemical properties, affecting interface resistance and thus the electroosmotic drainage rate. The rapid growth of the interfacial resistance is one of the reasons for the high energy consumption of electro-osmosis. The anode interface resistance is significantly affected by electrode reactions, with a smaller anode interface resistance observed in the EKG electrode under long-term electrification, while the metal electrode exhibits a larger anode interface resistance due to the combined effects of concentration polarization and surface membrane resistance. Using an optimized power supply strategy could help alleviate interface polarization and inhibit interface resistance growth.

**Keywords:** electro-osmotic; interfacial resistance; electrode reaction; experiment study; ground improvement; electrochemistry

电渗法是一种加快细粒土排水固结的有效方法,被应用于软土地基加固、疏浚淤泥排水、重金属污染土修复以及尾矿脱水等领域<sup>[1]</sup>。相较于堆载预压和真空预压等常规加固方法,电渗法排水速率不取决于水力渗透系数,具有显著优势<sup>[2]</sup>。但在长期应用实践中发现,电渗法能耗较高<sup>[3]</sup>,特别是在黏土-电极的界面处电势损失(界面电阻所消耗的电势)较大<sup>[4]</sup>,限制了该方法的推广应用。在工程界,界面电势损失常被视为经验值,占总电势的50%~90%。Bjerrum等<sup>[5]</sup>在挪威现场试验中发现,界面电势损失约50%;李存谊<sup>[6]</sup>在电渗加固海相吹填土时发现,电渗后期阶段界面消耗的外电势一度超过总电势的70%,即在界面处的能耗甚至高于土体消耗的能耗。由此可见,研究电渗过程中黏土-电极界面过程机理,从而降低界面电阻、减小界面处的能耗是亟待解决的问题。

目前针对黏土-电极界面电阻的研究多采用室内试验方法,Zhuang等<sup>[7]</sup>结合电渗试验现象,首次提出界面电压降的假定并给出了界面电阻表达式。张雷等<sup>[8]</sup>发现,电渗过程中电势损失主要发生在电极-土体界面处,并将其归因于电极材料腐蚀。谢新宇等<sup>[9]</sup>基于金属元件间的接触电阻理论,研究了电极腐蚀及导电面积对界面电阻的影响。Gan等<sup>[10]</sup>将电化学经典理论引入电渗加固领域,用于阐释界面电阻变化机理,建立了基于电极反应过程的界面电阻计算模型,发现界面电阻的主要影响因素包括电极材料、电极反应持续时间、电极表面的电流密度以及孔隙液pH值等。上述模型的提出为从电极反应差异研究电渗过程中界面电阻变化提供了理论基础。电极反应是电渗时电流自电极板进入土体的必要步骤。土体通电后,黏土-电极界面处的电极反应保证了电子在电极(电子导体)和黏土(离子导体)间的跨相传递。不同电极材料的电极电化学反应各不相同,式(1)和式(2)所示分别为金属电极和

惰性电极的阳极反应。



式中:Me指代不同金属元素; $n$ 为电荷数。

阴极处主要发生析氢反应



不同的电化学反应会造成黏土-电极界面处电阻变化规律的极大差异。

在电渗法的应用中,电极反应变化主要体现在电极材料和通电模式上。电极材料对电渗产生的影响广受学者关注<sup>[4,8,11-12]</sup>,较多学者将目光聚焦于整体电渗排水表现,对产生电渗排水效果差异的内在机理研究较少。陶燕丽等<sup>[12]</sup>总结了电极材料对电渗的影响,并指出电极材料对电渗过程的影响主要通过电势损失和离子迁移过程实现。进一步地,为降低传统电渗法的能耗,提升排水效率,在工程现场往往会采用优化通电模式<sup>[5-6,13-14]</sup>。优化通电模式包括间歇通电和反转通电等,与持续通电相比,优化模式以中断或变换电极反应的方式改变黏土-电极界面状况,对界面电阻同样会产生较大影响。目前学者较多关注通电参数与排水速率,如Micic等<sup>[15]</sup>和Malekzadeh等<sup>[16]</sup>使用铁电极进行了室内试验,对通电时间和通电断电时间比(通断比)展开了研究;Ou等<sup>[17]</sup>发现,长时间反转通电不利于电渗排水;沈扬等<sup>[18]</sup>和蒋熠诚等<sup>[19]</sup>利用EKG电极研究了电极反转规律。上述研究集中于电极材料和通电模式对排水效率的直接影响,缺乏对界面电阻变化规律的研究,未考虑电极反应差异在其中的作用。

综上所述,针对电极反应差异对电渗界面电阻以及排水效率的影响,笔者首先开展不同电极材料电渗排水室内试验,基于电化学模型分析界面电阻变化。其次,开展间歇通电和反转通电两种通电模式的电渗试验,研究非连续电极反应下界面电阻的变化规律。通过多组室内电渗试验,重点关注电渗

过程中的电学现象,研究电化学反应、界面电阻以及电渗排水效率三者的相互关系,为降低电渗界面电阻、缓解电渗高能耗提供参考。

## 1 试验设计

### 1.1 试验方案

试验分为两个部分。第1部分为不同材料电极的持续通电试验:分别使用EKG、铁、铝、铜电极,分析界面电阻变化规律,并探寻界面电阻对排水效率的影响。其中,EKG电极由添加碳黑的塑料排水板包裹铜丝构成,具有良好的导电性,耐腐蚀,是近年来逐步推广使用的一种电极材料。EKG电极通电后发生的电极反应与惰性电极(式(2))相似,试验结果一定程度上代表了石墨等惰性电极的情况。第2部分为优化通电模式对各电极界面电阻的影响:选取第1部分试验中排水效果较好的铁电极和EKG电极开展优化通电模式试验研究,重点研究不同电极材料下间歇通电和反转通电时界面电阻变化趋势,具体试验方案见表1。

表1 试验方案  
Table 1 Test schemes

编号	通电方式	电极材料	电压/V	持续时间/h	初始含水量/%
CC-1	持续通电	EKG	30	24.0	80.1
CC-2		铁		24.0	81.2
CC-3		铝		24.0	80.7
CC-4		铜		24.0	82.4
IC-1	间歇通电	EKG	30	28.8	79.8
IC-2		铁		28.8	80.3
RC-1	反转通电	EKG	30/20	28.8	79.4
RC-2		铁	(反)	28.8	80.6

RC-1和RC-2试验采用反转通电模式,为避免混淆,将持续通电试验下通电方向定义为正向,反转后称反向通电。所有试验中正向通电电压取30 V,电势梯度1.5 V/cm,为电渗室内试验常用取值范围<sup>[20]</sup>。持续通电组(CC1-4)通电时间为24 h。这是由于前期试验发现EKG电极持续通电24 h后基本不再排水,排水速率连续3 h小于1 mL/h,因此推广至各金属电极试验中。试验后发现,虽然金属电极通电24 h后仍会有一定量的水排出,但本研究重点关注界面电阻的变化及影响,后续排水对试验结果影响不大。对于优化通电模式的试验组,蒋熠诚等<sup>[19]</sup>总结了现有研究中存在的一些分歧,并通过试验研究发现:对于EKG电极,在适当电压下短时间反转通电有利于电渗排水。因此,参考文献[19],本研究反转通电采用正向通电20 min,反向通电4 min,反向通电电压20 V的方案,间歇通电采用通电

20 min,断电4 min的模式。试验持续时间由正向通电时间控制,当正向累积通电达到24 h时停止试验,即间歇及反转试验组的真实持续时间为28.8 h。

### 1.2 试验装置

试验装置采用自主研发的电渗室内试验系统(如图1所示),由模型箱、供电模块及数据采集模块组成。相较于以往研究中常用的电渗装置,该装置主要对供电模块和数据采集模块进行了改进,克服了需要人工切换电源,无法高频次间歇、反转通电的缺陷。供电模块包括直流供电电源、计时器、反转切换开关以及控制回路电源,输出功率为60 V/(3 A),能稳定提供直流电,输出精度控制在 $\pm 0.2\%$ 。通过计时器和反转切换开关,能实现自动间歇通电和反转通电,可以控制时间范围在10 s~10 h的电源切换,控制精度为1%。数据采集模块频率为1 Hz,电压表精度为1 mV,电流表精度为0.1 mA。

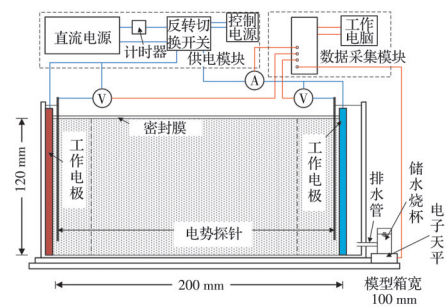


图1 电渗装置示意图

Fig. 1 Device for electro-osmosis

模型箱(200 mm×100 mm×120 mm)由有机玻璃组成,两侧利用固定扣件将工作电极与电势探针固定在侧壁处,避免发生相对位移。工作电极整体高度为140 mm,插入土体部分长120 mm。试验时土体表面覆有密封膜,防止水分蒸发干扰试验结果,在阴极处设置排水管、储水烧杯及电子天平,记录试验排水情况。

### 1.3 试验材料

试验用土为杭州淤泥,取自某杭州亚运基坑工程。原状土各项物理指标如下:含水量 $w=58.5\%$ ,土粒比重 $G_s=2.75$ ,孔隙比 $e=1.47$ ,液限 $w_L=45.3\%$ ,塑限 $w_p=23.5\%$ ,土体电导率 $\sigma_e=0.16$  S/m。试验时为确保黏土试样均匀,将原状土烘干研磨成土粉,加入去离子水,调制成试验所需目标含水量(80%)的重塑淤泥,制备完成后密封静置72 h以上。

工作电极采用铁、铝、铜、EKG四种材料的电极板。金属电极(1 mm×100 mm×140 mm)包括铁、铝、铜电极,在阴极板处开有小孔,确保顺利排水,



孔径约3 mm。EKG电极采用板式EKG电极,尺寸为5 mm×100 mm×140 mm,阴极板处开孔方式同金属电极。由于EKG电极与土体接触部分主要是由石墨组成的非金属材料,因此,其阳极表面所发生的电极反应为析氧反应(式(2)),EKG电极的试验结果一定程度上代表了一系列阳极发生析氧反应的惰性电极情况。

## 2 不同电极反应界面电阻试验结果

大量电渗试验中发现界面电势降的存在<sup>[7,9]</sup>,但大多仅在试验前、中、后期进行测量,所测数据时间间隔较大,少有研究连续测量其随时间的变化。本研究利用高频率电压电流表对界面电势降进行连续观测,并通过式(4)分别计算阳极和阴极界面电阻

$$\begin{cases} R_a = V_a^1 / I \\ R_c = V_c^1 / I \end{cases} \quad (4)$$

式中: $R_a$ 、 $R_c$ 分别为阳极界面电阻和阴极界面电阻, $\Omega$ ;  $V_a^1$ 、 $V_c^1$ 为阳极电势降及阴极电势降,V,由电压表实测所得; $I$ 为电流,A,由电流表测得。Gan等<sup>[10]</sup>从黏土-电极界面电化学反应角度推导了金属和非金属电极界面电阻计算方法。该模型将界面所消耗的电势分解成分解电压、活化电势差和浓差电势差3个部分依次计算,并分析了其影响因素和产生机理。因此,本研究依据该模型,从活化电阻和浓差电阻的角度对室内试验中界面电阻的变化进行分析。

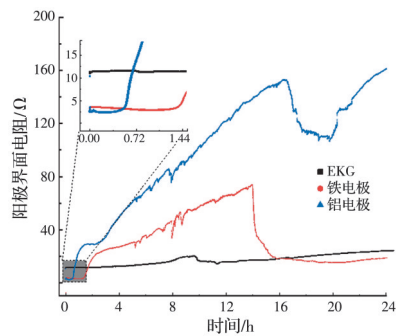
### 2.1 阳极界面电阻

图2是阳极界面电阻随时间的变化曲线,其中,由于铜电极界面电阻过大,在图2(b)中单独呈现。试验开始时EKG电极阳极界面电阻为11  $\Omega$ ,大于金属电极的初始界面电阻,但增长较缓慢,在试验结束时仍能保持较小的阳极界面电阻。

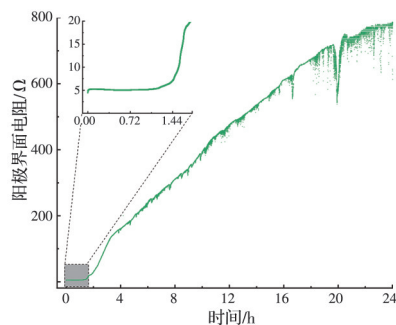
金属电极阳极界面电阻增长迅速,其变化趋势可分为3个阶段。

1)第1阶段阳极电阻极小,仅为3~5  $\Omega$ 。此时界面电阻主要由分解电压控制,在相同的电流密度下,金属材料分解电压远小于EKG等惰性电极材料,符合电极动力学普遍规律<sup>[21]</sup>。

2)随着通电的持续,界面电阻变化趋势进入第2阶段,金属表面逐渐发生钝化,表面膜阻的增大使阳极界面电阻迅速增长。根据金属材料的不同,钝化发生时刻与电阻突增幅度也各不相同。就发生时刻而言,铝电极最早出现钝化现象,随后是铁电极与铜电极。其中又以铜电极持续时间最长,电阻增幅最明显,3.39 h后铜电极阳极界面电阻增至145  $\Omega$ 。



(a) EKG、铁、铝电极



(b) 铜电极

图2 阳极界面电阻随时间变化曲线

Fig. 2 Anode interface resistance curves with time

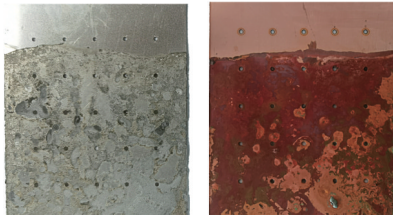
3)进入第3阶段,界面电阻增长速率逐渐稳定,依次为铜电极>铝电极>铁电极。第3阶段阳极界面电阻的增长是活化电阻、浓差电阻和表面膜阻的共同作用,电流密度下降导致活化电阻升高,金属离子累积导致浓差电阻增大,电极表面的沉积物进一步加大了膜阻。

金属电极的阳极界面电阻增长速率远大于EKG电极,这是由阳极处的电化学反应决定的。金属阳极反应如式(1)所示,在通电的过程中伴随着阳极金属的溶解,生成的金属离子必然会在电极表面累积。金属离子的累积会导致浓差极化现象,与此同时,还会生成一些副产物,如金属氧化物、氢氧化物附着在电极表面,进而形成极大的表面膜阻。图3是电渗后各电极的照片,可以发现,铜电极阳极表面有一层“红泥”(氧化沉积物),严重阻碍了电极反应的发生;铝电极试验后虽然质量变化不大,但在阳极可以发现透明度较高的白色物质,难以去除。表面膜阻也导致铝、铜电极阳极界面电阻在骤降后快速增长。

总的来说,金属电极阳极界面电阻的增长主要由浓差电阻和表面膜阻两部分构成。

### 2.2 阴极界面电阻

图4是阴极界面电阻变化曲线,对比阳极曲线(图2)发现,阴极界面电阻的增长幅度远不及阳极,以铜电极为例,试验结束时阴极电阻为65  $\Omega$ 左右,



(a) 铝阳极

(b) 铜阳极

图 3 铝、铜阳极电极板表面状态

Fig. 3 Surface condition of aluminum and copper anode electrode

远小于阳极界面电阻(786  $\Omega$ )。试验初期,EKG 电极和铝电极的电阻初始值大于铁电极和铜电极;随着通电的持续,EKG 电极和铁电极界面电阻维持在较低水平,铝电极和铜电极的阴极界面电阻增长较为显著;试验结束时,EKG 电极和铁电极的阴极界面电阻较小,分别为 8.9、6.5  $\Omega$ ,铝电极(45.0  $\Omega$ )以及铜电极(61.9  $\Omega$ )相对较大。总体而言,阴极界面电阻受电极材料影响较小,主要是由于各材料在阴极均发生了析氢反应(式(3)),相同的电化学反应使其呈现出一定的相似性。

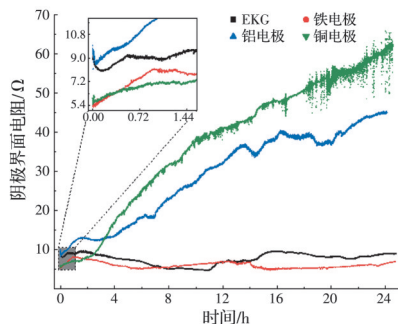


图 4 阴极界面电阻随时间变化曲线

Fig. 4 Cathodic interface resistance curves with time

综合对比阳极界面电阻和阴极界面电阻可以发现,在通电过程中,阳极界面电阻对电渗效率起主导作用。无论是金属电极还是EKG 电极,阳极界面电阻均大于阴极。阴极界面电阻增长不明显,是由于电极反应生成物氢氧根离子随排水离开电极板表面,因此浓差极化不明显。同时可以发现,阴极界面电阻增长较为迅速的铜、铝电极阴极电阻的变化趋势与阳极类似,这是由于铜、铝电极阳极浓差电阻和表面膜阻较大,使电流下降,较小的电流值导致阴极活化电阻大增,因此,这两种电极的阴极界面电阻增长稍显迅速。

### 2.3 排水量和电流

电渗试验中,排水量是最为直观的判断电渗效果的指标<sup>[2]</sup>,图 5 为不同电极在持续通电下电渗排水量随时间的变化曲线。由图 5 可知,EKG 电极的排水效果最佳,试验结束时排水量超过 250 mL;在试

验条件下,相较金属电极,EKG 电极具有较大优势,铁、铝、铜电极的排水量仅为 EKG 的 85.6%、77.3%、64.1%。排水量变化曲线斜率反映了该试验组的排水速率,EKG 电极在通电 10 h 内排水速率较快,随后逐渐放缓;而对于金属电极,电渗开始后 4 h 内排水较快,总体而言,排水速率均不及 EKG 电极。界面电阻越大的试验组排水效果越差,因此,界面电阻一定程度上可以作为电渗过程中反映排水效率的评价指标。

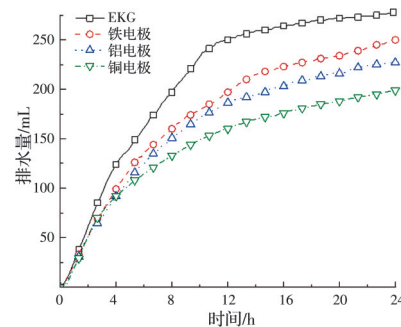


图 5 排水量随时间变化曲线

Fig. 5 Variation curves of drainage with time

试验采用恒定电压供电,外电压保持为 30 V 不变,电流的变化反映了电渗体系整体电阻的变化。图 6 是电流随时间的变化曲线,各试验组电流在前期均有小幅上升。从局部放大图中可以发现,铝电极最快达到电流峰值,随后迅速衰减;EKG 电极和铁电极电流上升趋势较铝电极慢,但持续时间更久;铜电极上升不明显。经历上升段后,电流开始下降,其中 EKG 电极电流下降幅度明显小于金属电极,能在较长的时间范围内保持较大电流。金属电极的电流均存在一个快速下降的过程,如铁电极的 1.25~2.4 h、铝电极的 0.5~1.9 h 和铜电极的 1.25~3.6 h,其中又以铜电极的突降持续时间最长,突降幅值最大。

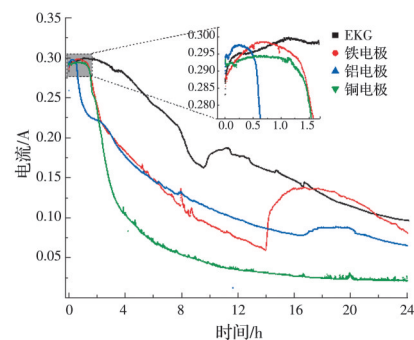


图 6 电流随时间变化曲线

Fig. 6 Variation curves of current with time

储亚等<sup>[22]</sup>发现,土体电阻率随含水量的减小而增大,在电渗排水土体电阻不可避免地会上升。但对比 EKG 电极和金属电极(特别是铜电极)的电

流变化情况可以发现,EKG电极的最终排水量和电流值均远大于金属电极,即EKG组土体电阻大于金属电极的情况下,其整体电阻仍小于金属电极。

值得一提的是,在持续通电中后期(EKG电极的9.6 h、铁电极的14 h、铝电极的16.5 h以及铜电极的20 h处)可以观察到电流的突升,且排水效果越佳的试验组电流突升越早出现(EKG电极>铁电极>铝电极>铜电极)。这是由于持续通电时排水效果不均匀,阳极处土体排水效果好,失水收缩较为严重,导致电极板与土体发生脱裂。电极板与土体的部分脱裂使其接触面积减小,在电流相同时,接触面积的逐步减小使电流密度增大,活化电阻骤降,因此出现了图2中所示的阳极界面电阻骤降的情况,电阻的下降使电流升高,电渗效率提高。

### 3 优化通电模式试验结果

对持续通电试验中排水效果较好的EKG电极和铁电极开展优化通电模式试验。首先分析排水量,以直观反映各通电模式下的电渗效果,如图7所示。在本试验条件下,EKG电极和铁电极在两种优化模式下均体现出良好的排水效果,间歇通电时排水量分别提高了15.4%和14.8%,反转模式下则提高了4.0%和18.0%。采用短时间反转或间歇的通电模式有助于提高电渗排水效率。

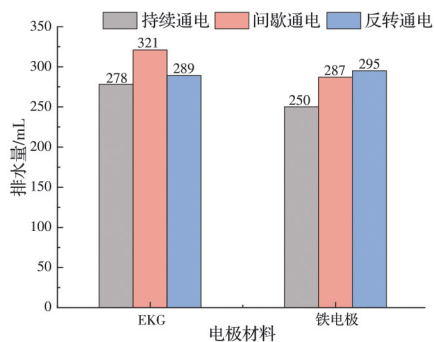


图7 不同通电方式排水量对比

Fig. 7 Comparison of dewatering capacity under different power supply methods

分析通电过程中各试验组电流、界面电阻变化情况,讨论优化通电模式对界面电阻的影响。

#### 3.1 EKG电极试验结果

EKG电极各试验组电流变化如图8所示。间歇与反转通电模式均不改变电流整体趋势变化,表现为先小幅增长,而后随着排水电流不断下降的趋势。电流从大到小依次为间歇通电、反转通电和持续通电,与排水效率一致。在试验开始后10 h内,持续组电流下降最快,其后依次为反转组和间歇组。采用优化通电模式对小周期电流变化影响较

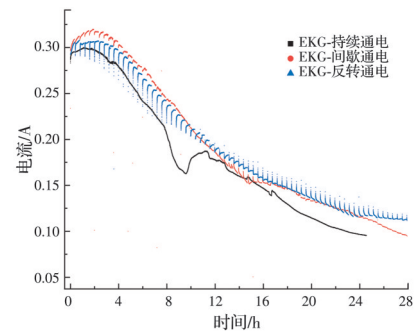


图8 EKG电极电流随时间变化曲线

Fig. 8 Current versus time curves for EKG electrodes

大:间歇组小周期电流在试验初期呈“T”形,10 h后变为“L”形,通电开始时刻电流值大于上一周期结束时刻,而后缓缓下降;反转组同样呈前期“T”形、后期“L”形的趋势。该变化主要受界面电阻影响,需要结合界面电阻分析。

图9是3种通电模式下EKG电极阳极界面电阻变化曲线。在整体趋势上,持续通电组增长最快,间歇组与反转组阳极电阻增长较缓,特别是在试验最初10 h内,与持续组有较大差异。观察各组小周期的阳极界面电阻变化规律可以发现,间歇或反转通电后小周期内电阻变化呈“T”形。小周期界面电阻变化主要受黏土-电极界面处氢离子(阳极反应产物)浓度影响:在间歇通电时,断电期间电极表面累积的氢离子在化学势作用下向土体方向扩散迁移;在反转通电时,原阳极电化学反应由式(2)转变为式(3),反应生成氢氧根离子消耗累积在电极表面的氢离子。阳极表面氢离子浓度下降,浓差电阻下降,因此,每个小周期恢复通电时均能发现阳极界面电阻减小。

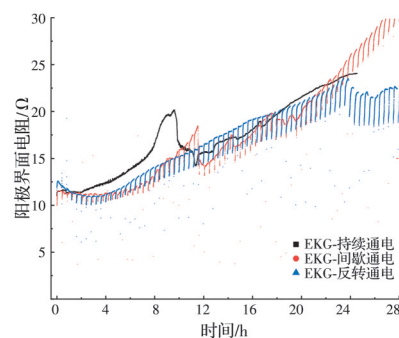


图9 EKG电极阳极界面电阻随时间变化曲线

Fig. 9 Anode interface resistance versus time curves for EKG electrodes

阴极界面电阻变化趋势见图10。相较于持续组,间歇通电的阴极电阻前8 h变化较小,维持在6 Ω左右,8 h后有所增加;反转通电阴极电阻在试验开始2 h内突增,而后也持续上升。阴极界面电阻小周期变化趋势分为两个阶段,前期呈“L”形,后期转



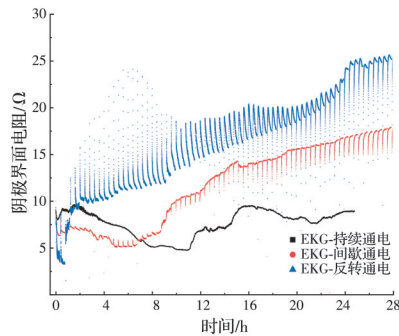


图 10 EKG 电极阴极界面电阻随时间变化曲线

Fig. 10 Cathode interface resistance versus time curves for EKG electrodes

变为“Γ”形。结合电流变化(图 8)可以发现,EKG 电极同时受阴、阳极界面电阻变化影响,前期阳极电阻较小,电流变化受阴极电阻影响较大,后期随着阳极界面电阻增大,阴极电阻影响逐渐减小,电流变化与阳极电阻变化趋于一致。

### 3.2 铁电极试验结果

铁电极电流变化情况如图 11 所示。采用优化的通电模式后,电流整体趋势在 3 个方面有所变化:首先,整体电流大小明显提升且反转组>间歇组>持续组,符合电渗排水量与电流大小成正比的规律;其次,电流突降时刻明显延后,由持续通电时的 2 h 左右延后至反转通电的 4 h 和间歇通电的 6 h 左右,前期较大的电流保证了电渗初期的快速排水;最后,采用优化通电可以缓解阳极脱裂现象,使加固效果更为均匀,反映在电流变化中即为电渗后期电流突增时刻的推迟。将每个正向通电的 20 min 称为一小周期,间歇与反转试验组电流在小周期呈“L”形,即通电开始时刻电流值大于上一周期结束时刻,而后逐渐下降。

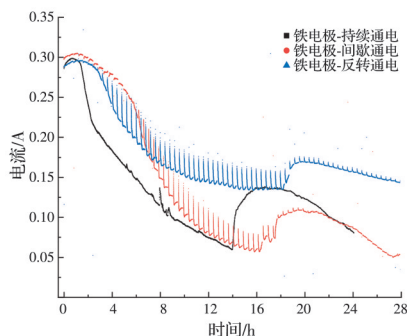


图 11 铁电极电流随时间变化曲线

Fig. 11 Current versus time curves for iron electrodes

铁电极阳极界面电阻变化趋势如图 12 所示。各试验组整体趋势相同,采用优化通电模式可以在一定程度上缓解电极表面钝化的发生,反转组与间歇组界面电阻分别在试验开始后约 4、6 h 开始迅速增长,晚于持续通电组。同时可以发现,电阻增长

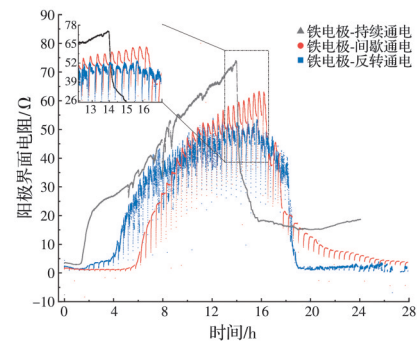


图 12 铁电极阳极界面电阻随时间变化曲线

Fig. 12 Anode interface resistance versus time curves for iron electrodes

峰值依次为持续组>间歇组>反转组,优化通电模式限制了界面电阻的增长。

进一步观察小周期内阳极界面电阻变化发现,优化通电后各组均呈“Γ”形趋势。其主要原因是,当采用间歇通电模式时,断电期间在电极表面累积的阳极反应产物在化学势的作用下向土体方向扩散迁移,浓差极化现象有所缓解,浓差电阻下降,因此,恢复通电后阳极界面电阻减小;而采用反转通电时,原阳极(正向通电时作为阳极的电极)发生析氢反应,生成氢氧根离子,氢氧根离子浓度的增大会使金属离子发生沉淀析出,同样有利于浓差电阻的降低。

在电渗试验中,整体电阻由土体电阻和界面电阻两部分构成,上述阳极界面电阻变化趋势与电流变化趋势一一对应,说明采用优化通电模式可以缓解阳极界面电阻增长,促进电流提高,进而有利于电渗固结排水。

阴极界面电阻变化趋势如图 13 所示,与阳极界面电阻相比,金属电极阴极电阻值较小,主要受活化电阻控制;小周期变化与阳极相同,呈“Γ”形,同样是由于浓差极化有所缓解。

从界面电阻角度来看,采用间歇与反转通电模式后,铁电极促进电渗排水的原因主要有:1)推迟

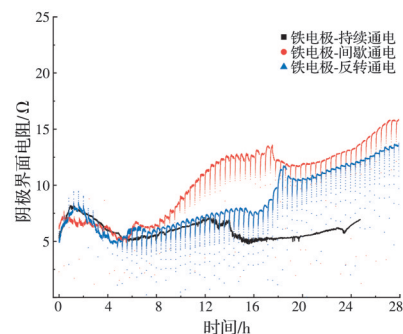


图 13 铁电极电流随时间变化曲线

Fig. 13 Cathode interface resistance versus time curves for iron electrodes

金属电极表面钝化的发生,抑制表面膜阻增长;2)通过缓解浓差极化现象降低每个小周期初始界面电阻,提高有效电势;3)使排水处理效果更均匀,缓解阳极电极板与土体的脱裂。

## 4 结论

通过多组电渗室内试验,结合电化学界面电阻模型,从多个角度研究电极反应差异对黏土-电极界面电阻的影响,得到以下结论:

1)电极反应是界面电阻的重要影响因素。电极材料和通电模式均会改变黏土-电极界面均会改变黏土-电极界面处的离子分布和电化学反应速率,进而影响电渗排水速率。

2)在本研究的电势梯度下,试验初期金属阳极界面电阻均小于EKG电极,主要由于EKG阳极析氧反应分解电压远高于金属;试验后期界面电阻 $EKG < 铁电极 < 铝电极 < 铜电极$ ,铝、铜电极的膜阻增长严重影响了电渗排水效率。

3)界面电阻变化趋势与排水效率高度一致。降低电渗过程中的界面电势损失有助于促进电渗排水,提高能源利用效率。

4)采用优化通电模式有利于缓解界面极化现象,抑制界面电阻增长。对于EKG电极,优化模式可以在小周期内减小浓差极化,有利于降低界面电阻;对于铁电极,间歇与反转通电均可推迟电极表面钝化的发生。

## 参考文献

- [1] YEUNG A T, GU Y Y. A review on techniques to enhance electrochemical remediation of contaminated soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 195: 11-29.
- [2] GLENDINNING S, JONES C J, PUGH R C. Reinforced soil using cohesive fill and electrokinetic geosynthetics [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2005, 5(2): 138-146.
- [3] 谢新宇, 郑凌透, 谢康和, 等. 电势梯度与电极间距变化的滨海软土电渗模型试验研究[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(1): 108-114, 121.  
XIE X Y, ZHENG L W, XIE K H, et al. Experimental study on electro-osmosis of marine soft soil with varying potential gradient and electrode spacing [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(1): 108-114, 121. (in Chinese)
- [4] MOHAMED ELHASSAN E, SHANG J Q. Effects of electrode materials and current intermittence in electro-osmosis [J]. *Ground Improvement*, 2001, 5(1): 3-11.
- [5] BJERRUM L. Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings [J]. *Geotechnique*, 1967, 17: 83-118.
- [6] 李存谊. 电渗联合真空预压现场试验研究和数值分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.  
LI C Y. Field experimental study and numerical analysis of electroosmosis combined with vacuum preloading [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [7] ZHUANG Y F, WANG Z. Interface electric resistance of electroosmotic consolidation [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(12): 1617-1621.
- [8] 张雷, 王宁伟, 景立平, 等. 电渗排水固结中电极材料的对比试验[J]. *岩土力学*, 2019, 40(9): 3493-3501, 3514.  
ZHANG L, WANG N W, JING L P, et al. Comparative experiments of different electrode materials on electro-osmotic consolidation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(9): 3493-3501, 3514. (in Chinese)
- [9] 谢新宇, 李卓明, 郑凌透, 等. 电渗固结中接触电阻影响因素的试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(3): 655-662.  
XIE X Y, LI Z M, ZHENG L W, et al. Experimental study on influencing factors of contact resistance on electroosmotic consolidation [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, 49(3): 655-662. (in Chinese)
- [10] GAN Q Y, ZHOU J A, TAO Y L, et al. Interfacial resistance model for electro-osmotic system [J]. *Géotechnique*, 2022: 1-17.
- [11] LOCKHART N C. Electroosmotic dewatering of clays. II. Influence of salt, acid and flocculants [J]. *Colloids and Surfaces*, 1983, 6(3): 239-251.
- [12] 陶燕丽, 周建, 龚晓南. 电极材料对电渗过程作用机理的试验研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2014, 48(9): 1618-1623.  
TAO Y L, ZHOU J, GONG X N. Experimental study on function mechanism of electrode materials upon electro-osmotic process [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2014, 48(9): 1618-1623. (in Chinese)
- [13] 孙召花, 高明军, 刘志浩, 等. 导电塑料排水板加固吹填土现场试验[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(3): 255-260.  
SUN Z H, GAO M J, LIU Z H, et al. Field test on consolidation of dredger fill using electric vertical drains [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2015, 43(3): 255-260. (in Chinese)
- [14] ZHUANG Y F. Large scale soft ground consolidation using electrokinetic geosynthetics [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, 49(3): 757-770.
- [15] MICIC S, SHANG J Q, LO K Y, et al. Electrokinetic



- strengthening of a marine sediment using intermittent current [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, 38(2): 287-302.
- [16] MALEKZADEH M, SIVAKUGAN N. Experimental study on intermittent electroconsolidation of singly and doubly drained dredged sediment s[J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 11(1): 32-37.
- [17] OU C Y, CHIEN S C, WANG Y G. On the enhancement of electroosmotic soil improvement by the injection of saline solutions [J]. *Applied Clay Science*, 2009, 44 (1/2): 130-136.
- [18] 沈扬, 徐海东, 尤延锋. 电渗处理软基的电极转换规律试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(增刊 1): 65-71.  
SHEN Y, XU H D, YOU Y F. Cyclic electrode conversion law in treatment of soft soil foundation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37 (Sup 1): 65-71. (in Chinese)
- [19] 蒋熠诚, 周建, 甘淇匀, 等. 电极反转模式下反转电压对电渗影响试验研究[J]. *地基处理*, 2022, 4(增刊 1): 37-44.  
JIANG Y C, ZHOU J, GAN Q Y, et al. Experimental study on the effect of reversal voltage to electro-osmosis using polarity reversal method [J]. *Journal of Ground Improvement*, 2022, 4(Sup 1): 37-44. (in Chinese)
- [20] 罗战友, 陶燕丽, 周建, 等. 杭州淤泥质土的电渗电导率特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(增刊 1): 3222-3228.  
LUO Z Y, TAO Y L, ZHOU J, et al. Study on electro-osmotic conductivity of Hangzhou silty soil [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38 (Sup 1): 3222-3228. (in Chinese)
- [21] HAMANN C H, HAMNETT A, VIELSTICH W, et al. *Electrochemistry* [M]. New York, USA: John Wiley & Sons Inc, 2007.
- [22] 储亚, 刘松玉, 蔡国军, 等. 重金属污染黏性土电阻率影响因素分析及其预测模型[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(4): 866-871.  
CHU Y, LIU S Y, CAI G J, et al. Impact factor analysis of resistivity of heavy metal polluted cohesive soil and its prediction model [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2016, 46(4): 866-871. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)