

文章编号:1673-9469(2024)05-0044-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.05.006

## 不同电极材料在两种含水率下电渗效果试验研究

王莉苹<sup>1,2</sup>, 齐向阳<sup>1,2</sup>, 王天亮<sup>1,2,3\*</sup>, 赵泽源<sup>1,2</sup>, 苏成<sup>1,2</sup>

(1. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;  
2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 3. 石家庄铁道大学  
省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043)

**摘要:** 以黏土为试验对象, 采用自制的一维水平电渗装置, 分析排水量、电流、能耗、土体最终含水率等参数, 探究不锈钢、铜、铝三种电极材料在两种含水率下的电渗效果。结果表明: 在两种含水率下三种电极材料的电渗效果均为不锈钢电极>铜电极>铝电极。初始含水率对不锈钢和铜电极影响较小, 对铝电极影响较大, 铝电极在较低的含水率下的电渗效果非常差; 初始含水率会影响阳极的化学反应程度。对比三个电极材料在两种含水率下的试验得出土体初始含水率越高, 排水效果越好, 总能耗越大, 但其单位排水量能耗较小的结论。

**关键词:** 电极材料; 电渗排水; 模型试验; 通电时间; 初始含水率

中图分类号: TU447

文献标识码: A

## Experimental Study on Electroosmotic Effect of Different Electrode Materials Under Two Moisture Contents

WANG Liping<sup>1,2</sup>, QI Xiangyang<sup>1,2</sup>, WANG Tianliang<sup>1,2,3\*</sup>, ZHAO Zeyuan<sup>1,2</sup>, SU Cheng<sup>1,2</sup>

(1. Co-constructed Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 3. Co-constructed Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

**Abstract:** Taking clay as the test object, the self-made one-dimensional horizontal electroosmosis device was used to analyze the parameters such as drainage, current, energy consumption and final moisture content of soil, and the electroosmosis effects of three electrode materials of stainless steel, copper and aluminum under two moisture contents were explored. The results show that the electroosmotic effects of the three electrode materials are in the order of stainless steel electrode>copper electrode>aluminum electrode under two moisture contents. The initial moisture content has little effect on stainless steel and copper electrodes, but has a great effect on aluminum electrodes. The electroosmotic effect of aluminum electrodes is very poor at a lower moisture content. The initial moisture content will affect the degree of chemical reaction of the anode. By comparing the tests of three electrode materials under two moisture contents, it is concluded that the higher the initial moisture content of the soil is, the better the drainage effect is and the greater the total energy consumption is, but the energy consumption per unit drainage is smaller.

**Key words:** electrode material; drainage by electro-osmosis; model test; power on hours; moisture content

收稿日期: 2023-08-23

基金项目: 河北省自然科学基金面上项目(E2021210007)

作者简介: 王莉苹(1999-), 女, 河北唐山人, 硕士研究生, 从事路基电渗排水方面研究。

\* 通信作者: 王天亮(1981-), 男, 河北保定人, 博士, 教授, 从事特殊土路基与轨道交通灾变控制方面的研究。

电渗法能有效促进低渗透性细粒土的排水,具有排水效率高,速度快等优点,从而在软土排水应用中受到越来越多工程师的重视,并被广泛应用于地基处理、海滨软土脱水等工程中<sup>[1-2]</sup>,近年来还用在处理高含水率的废弃土中<sup>[3]</sup>。电极材料是影响电渗效果和电渗能耗的关键因素,目前常见的电极材料主要有铁、铜、铝、不锈钢和石墨。Lockhart 等<sup>[4-7]</sup>多位学者对电极材料展开一系列试验研究,得出不同电极材料对不同土质类型的电渗效果不同,且阳极材料是影响电渗效果的主要因素。Pugh<sup>[8]</sup>表明,适合电渗法排水加固含水率的合理范围大致在 50%~100%,所以大多数学者研究的多为高含水率情况,而针对低含水率土电渗排水的研究较少,对于电极材料在不同初始含水率下的电渗效果研究更少。

基于此,本文对不锈钢、铜、铝电极作为阳极材料在两种含水率下的电渗过程中的表现进行了对比研究,通过分析排水量、电流、排水速率、电势损失等参数探究不锈钢、铜、铝三种电极材料在两种含水率下的电渗效果。为工程中电极材料的选择提供参考。

## 1 试验材料及方案

### 1.1 试验装置与材料

试验装置主要包括模型箱(亚克力板制成)、迈盛 MP10030D 型直流电源(电流 0~30 A,电压 0~100 V)、电极管、万用表、不锈钢针等。模型箱是一个底部右侧开孔的亚克力模型槽,内部尺寸为长 200 mm、宽 100 mm、高 150 mm,模型槽底部右侧开有直径 24 mm 的小孔便于阴极管排出模型内部水分。电极管的阳极材料选用不锈钢、黄铜、铝的金属管(长 150 mm,外径 20 mm,壁厚 1.3 mm),阴极材料选用镀锌钢管(长 180 mm,外径 20 mm,壁厚 1.3 mm)。阴极管一侧需钻三排直径为 5 mm 的孔洞,并在填土前用滤纸包裹,防止孔洞堵塞与土颗粒排出,并在距阴极管的底部 30 mm 处用防水胶带缠绕几圈防止阴极管从模型中脱落以及水分从阴极管和模型中间流出。试验装置图与实物图见图 1 和图 2。

试验土样为黄黏土,其主要物理性质指标见表 1。

### 1.2 试验方案

为比较三种电极材料在两种含水率下的电渗

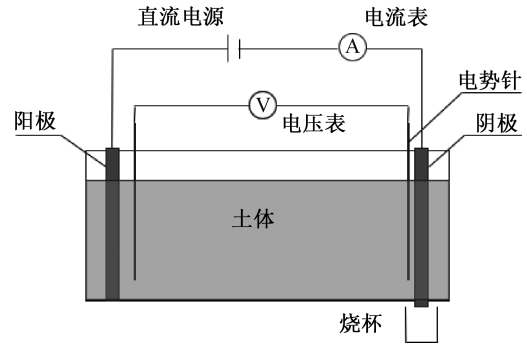


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

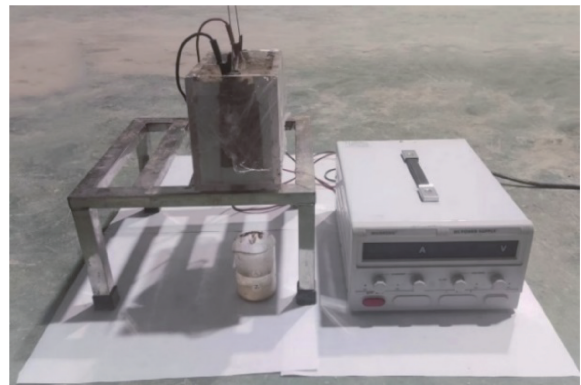


图 2 试验装置实物图

Fig. 2 Physical drawing of test device

表 1 物理性质指标

Tab. 1 Indicators of physical properties

土样	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	最优含 水率/%	最大干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )
黏土	32.3	13.6	18.7	22.1	1.64

效果,笔者进行了 6 组试验,分别记为 A1、A2、A3、A4、A5 和 A6,直流电源电压选取 30 V。两个不同初始含水率选择相差较大的两个含水率,高含水率选为 50%,低含水率选取最优压实度与饱和含水率的中间值即 28%。电极材料选取不锈钢、铜、铝三种电极材料。试验方案汇总表见表 2。

表 2 试验方案汇总表

Tab. 2 Summary of test scheme

试验编号	阳极材料	阴极材料	初始含水率/%	电压/V
A1	不锈钢	镀锌钢材	28	30
A2	铜	镀锌钢材	28	30
A3	铝	镀锌钢材	28	30
A4	不锈钢	镀锌钢材	50	30
A5	铜	镀锌钢材	50	30
A6	铝	镀锌钢材	50	30

### 1.3 试验步骤

(1) 取适量土样按照初始含水率进行配土,并

焖料 24 h, 24 h 过后将其搅拌均匀再静置焖料 4 h, 焖料结束后测量其含水率; (2) 模型箱四周涂抹凡士林, 将电极材料竖放在模型箱的左右两端(阴极管用滤纸包裹), 分层装入土样并击实, 控制试样的总高度, 制样完成后, 用薄膜覆盖住模型槽顶部; (3) 在试样顶部按顺序插入电势针(电势针分别放在距阴阳极管 5 mm 位置处); (4) 称量空烧杯重量, 并将其放在阴极管底部; (5) 接通电源, 开始试验。每隔 1 段时间测量电流与电压, 称量烧杯内水分重量; (6) 停止试验, 在阴阳极附近、以及中部位置取土并用烘干法测量最终含水率。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 排水量变化分析

排水量是反映电渗效果最重要的参数。图 3 为 6 组试样排水量随时间的变化曲线, 两个不同含水率下的最终排水量的大小关系均为不锈钢电极 > 铜电极 > 铝电极, 且电渗持续的时间大小同样是不锈钢电极 > 铜电极 > 铝电极。

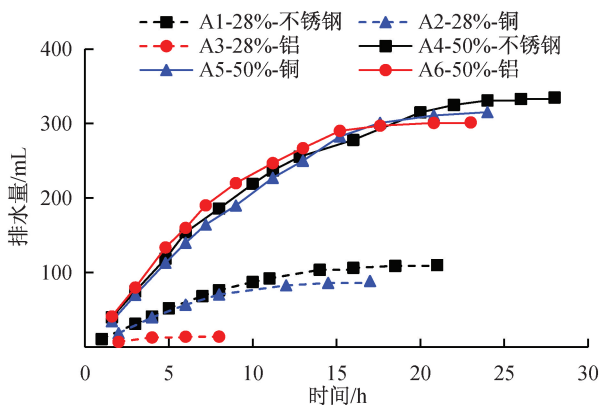


图 3 电渗排水量随时间变化曲线

Fig. 3 Variation curves of electroosmotic drainage with time

在含水率为 50% 时, A1、A2、A3 这三条曲线在 0~12 h 时间段的排水量随时间近似线性变化, 铝电极排水速率比不锈钢和铜相对大一些, 但整体上看三者曲线数据接近, 12 h 后三者增长速率变缓, 直到增长量为 0 时, 停止试验。在含水率为 28% 时, 不锈钢电极和铜电极的两条曲线也呈现以上的结论, 排水量先近似线性增长变化再缓慢增长至试验停止。但铝电极排水量曲线近似一条平行时间轴的直线, 排水量极少。

含水率为 50% 时, 铜电极和铝电极的总排水量分别为不锈钢电极的 94% 和 90%, 三者的总排水量相差不大。含水率为 28% 时, 铜电极和铝电极的排水总量分别为不锈钢电极的 80% 和 12%,

铝电极与其他两组的排水量相差较大, 可见, 含水量对铝电极的电渗效果有很大影响。

### 2.2 电流变化分析

图 4 为两种含水率下电流随时间变化曲线, 综合两图来看, 电渗初期电流会呈现短暂的上升, 然后再下降的趋势。电渗初期电流增大这一现象在诸多学者的研究中皆有出现, 其原因有以下两点<sup>[9-10]</sup>: (1) 电流作用下土体内的盐类析出到孔隙溶液中, 增加了导电离子的浓度; (2) 电渗的进行促使土体内部形成连续的水流路径, 进一步降低土体电阻。而随着电渗的进行, 土体中导电离子被消耗, 水分的排出以及电化学反应引起的水分损耗, 这些因素共同作用下导致了土体电阻的增大, 造成了电流强度的降低。

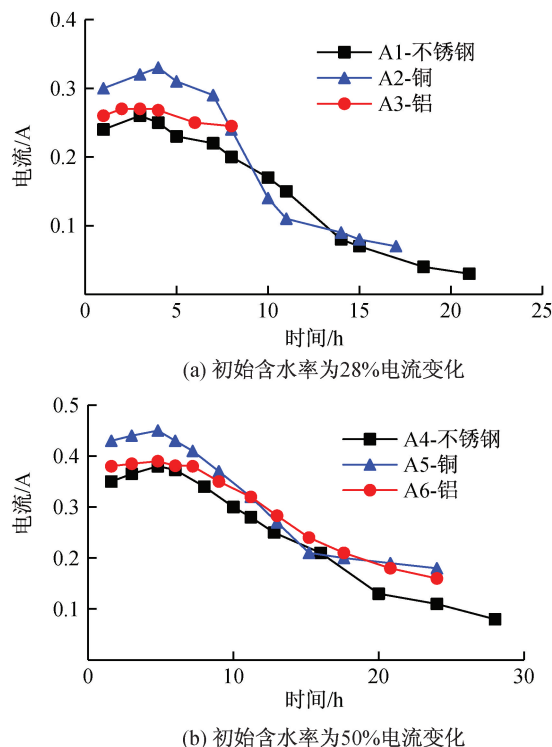


图 4 电流随时间变化曲线

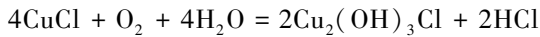
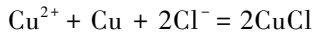
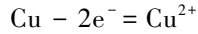
Fig. 4 Variation curves of current with time

三种电极的导电性不同导致在两个含水率下电流大小均是铜电极 > 铝电极 > 不锈钢电极。在两个含水率下不锈钢电极与铝电极的电流变化趋势相似。由于铝电极在含水率为 28% 时排水量少, 电阻增长的缓慢导致电流减小的也缓慢。

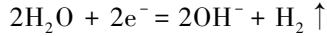
铜电极在两种不同含水率情况下都出现了试验一段时间后出现电流迅速下降, 然后再缓慢下降的情况。这主要是由于阳极管上发生电化学反应产生白色沉淀物, 且电极管与空气接触地方氧

化成绿色,导致铜电极管的导电性变差。铜电极的电化学反应如下<sup>[11]</sup>:

阳极:



阴极:



### 2.3 有效电压变化分析

电渗系统中的导电电阻由界面电阻、土体电阻和电极电阻组成。有效电势为施加在土体两端的电压,在距阴阳电极 5 mm 处插入电势针,并用万用表测量两个电势针之间的电压即为有效电势的大小。图 5 为在两种含水率下有效电势随时间的变化曲线。

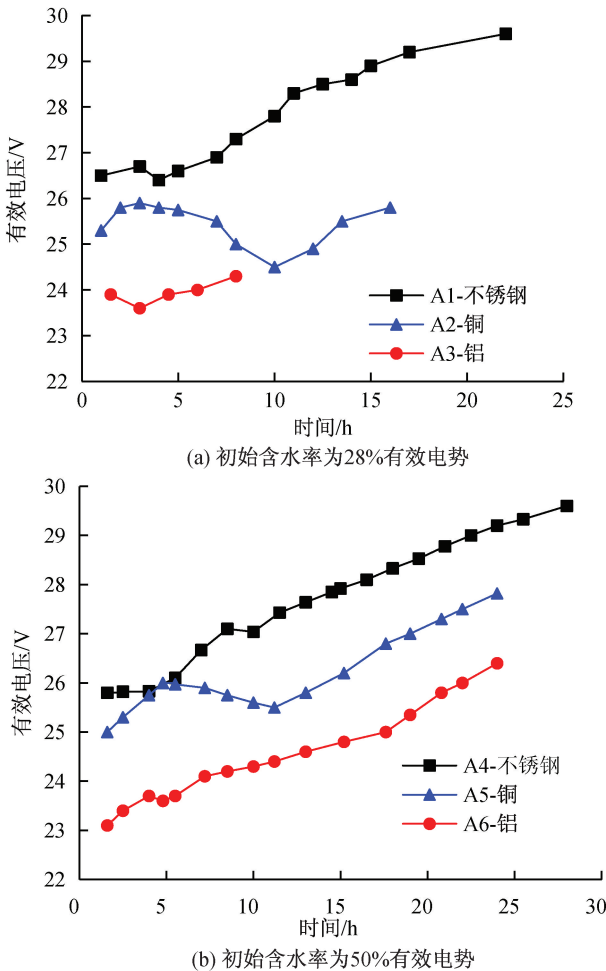


图 5 有效电势随时间变化曲线

Fig. 5 Variation curves of effective potential with time

综合来看,含水率为 28%时的有效电势较含水率为 50%时的大,低初始含水率的试样电渗初期有效电压更高,这是因为低含水率土体水封闭

现象更明显,内部难以形成连续水体<sup>[12]</sup>,土体的电阻更大,从而其占据了更多的电压。而在电渗结束时,低含水率试样的有效电压又稍低于高含水率试样,这可能是由于高含水率试样的电化学反应更剧烈,金属电极失去电子生成的离子经氧化反应后生成的惰性物质更多,造成土体阻值的增大,分担了更多的电压。在含水率为 28%时出现有效电压下降的趋势,这是由于电极管与土体产生了裂缝,界面电阻增大。6 组试样均呈现电渗前期变化较小后期逐渐上升的趋势。有效电势上升是由于随着电渗的进行,水分不断排出,土体电阻逐渐增大,而后期界面电阻增加变为缓慢,进而有效电势增大。

铜电极在通电一段时间后有效电势出现下降的趋势,由电流的变化分析可知铜电极在通电一段时间后会产生产导电性差的白色沉淀物,导致电流的快速减小,而土体电阻的变化缓慢,使得土体的有效电势也呈现下降的趋势。

本次试验 6 组试样降低的平均电势分别为 18.1%、36%、34%、23.4%、44.2%、41.46%,这些数据较李瑛等<sup>[13]</sup>试验的电势损失 65%少很多,且本次试验的有效电势是呈上升趋势,但李瑛等的阳极电势能损失随时间越来越大,使得有效电势随时间减小。通过对比可知李瑛等使用的板状电极,在电渗后期出现电极板与土体脱离严重现象,而本次试验使用的是管状电极,电极管与土体之间裂缝较小,且电极管附近的土体没有裂缝产生,这就会使电极管与土体之间裂缝产生的电阻较小,随着电渗的进行水分排出,土体部分电阻的增加速度比界面电阻增加的快,进而土体分得的电压变大。

### 2.4 能耗分析

电渗能耗是评价电渗效果的一个关键性指标,能反应电渗在工程应用中的成本,而电极材料对能耗也有很大的影响。本次主要分析电渗过程中总能耗与单位排水能耗,计算公式如下:

$$W = \int_0^t UI dt \quad (1)$$

式中, $W$  为总能耗,  $W \cdot h$ ;  $t$  为通电时间,  $h$ ;  $U$  为输出电压,本次试验电压选用 30 V;  $I$  为电流。

$$w = \frac{W}{Q} \quad (2)$$

式中, $w$  为单位排水量能耗,  $W \cdot h/mL$ ;  $Q$  为总排水量,  $mL$ 。总能耗与单位排水量能耗见图 6、图 7。

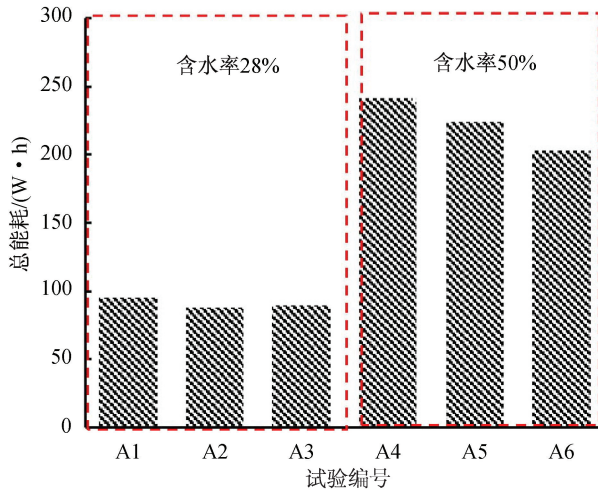


图6 总能耗变化

Fig. 6 Change of total energy consumption

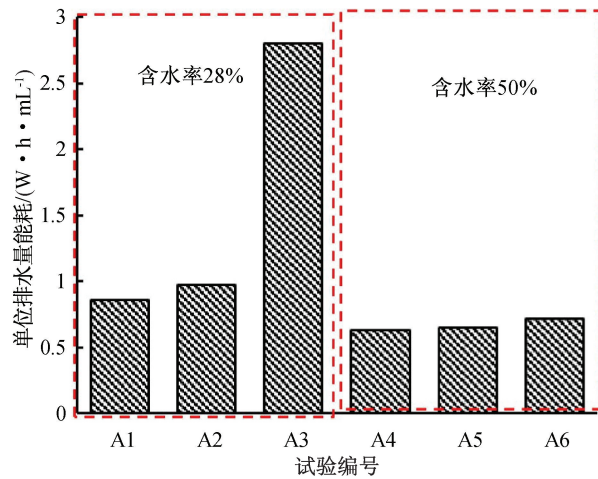


图7 单位排水量能耗变化

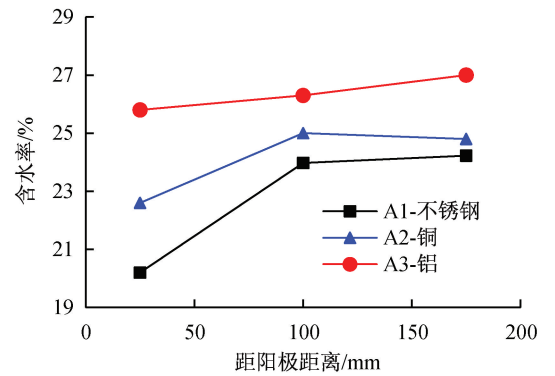
Fig. 7 Change of energy consumption per unit drainage

图6为电渗的总能耗变化图,从整体上来看初始含水率越高总能耗也越大,三种电极在含水率为50%时的总能耗比含水率为28%时的总能耗大得多。在两种不同的含水率下,三种电极的总能耗大小关系都为不锈钢电极>铜电极>铝电极。

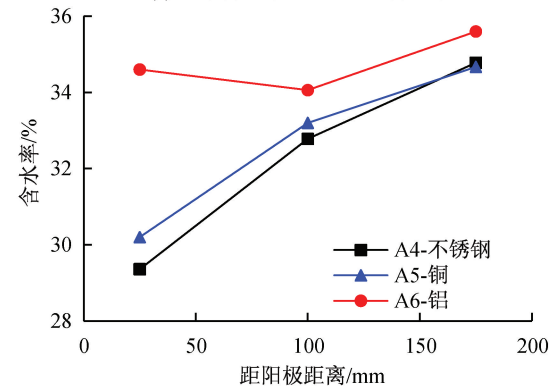
图7为电渗的单位排水能耗图,含水率低的单位排水能耗较初始含水率高的单位排水能耗高。在两种含水率下,三种电极的单位体积排水能耗关系都为铝电极>铜电极>不锈钢电极。在含水率为50%时,三者的单位排水能耗相差不大;而含水率为28%时,铝的单位体积排水能耗要高得多。在试验结束后观察各阳极材料的腐蚀情况,发现不锈钢电极材料的腐蚀程度最小。从能耗方面分析,不锈钢电极效果最好,单位排水量能量消耗最少,成本最低。

## 2.5 土体最终含水率分析

土体最终含水率的大小可以体现电渗的加固效果,本次试验的模型高为150 mm,填筑土层高120 mm,在试验结束后分别从模型上、中、下层(距模型底部40、80、120 mm)在距阳极25、100、175 mm共9处土壤取样,并用烘土法测出含水率,最后分别将数据相加取平均值,图8为初始含水率为28%、50%的试验结束后距阳极不同距离土样含水率的平均值。



(a) 初始含水率为28%最终含水率

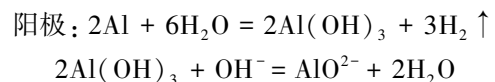


(b) 初始含水率为50%最终含水率

图8 土体最终含水率变化曲线

Fig. 8 Variation of final moisture content of the soil

不锈钢与铜在两种含水率情况下均出现含水率从阳极到阴极不断变大的情况。铝电极的含水率呈现两端高,中间低的现象,这是由于水分由阳极移动到阴极,而后期的排水效率低,阴极处的排水孔产生一定的淤堵,较低的电流强度又不足以继续驱动自阳极部分土体渗流至此的水分排出,导致阴极含水率高。且试验结束后,铝电极管附近出现气孔与水分。这是因为铝具有化学活性,与Lockhart<sup>[4]</sup>试验中的镁电极相似。反应方程式如下:



阴极:  $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \uparrow + 2\text{OH}^-$

这也就导致了铝电极与不锈钢和铜电极最终含水率分布规律的不一样。

由图9看出两个含水率下的铝电极管附近都有水产生,但含水率为28%的试验只有电极管周围有水分,而含水率为50%的试验气泡与水排出范围大很多。这也就说明了含水率的增大影响铝电极管的化学反应程度。

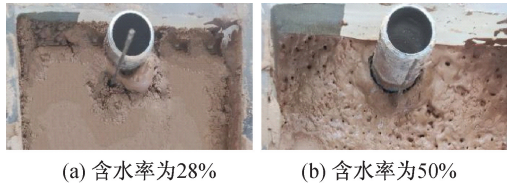


图9 试验后铝电极管附近实物图

Fig.9 Physical drawing near the aluminum electrode tube after the test

整体上看三种电极材料在两种不同含水率下最终含水率大小关系都为:不锈钢电极>铜电极>铝电极。

取图8每组试验三个位置含水率的平均值,在初始含水率为28%时,不锈钢、铜、铝电极最终含水率的平均值分别为22.8%、24.1%、26.4%。初始含水率为50%时,不锈钢、铜、铝最终含水率分别为32.3%、34.08%、34.68%。通过计算电渗含水率的降低率(平均降低的含水率值/初始含水率)分别为18.57%、13.92%、5.71%、35.4%、31.84%、30.64%。这一数据表明初始含水率越高,含水率降低量越大,排水效果越明显。

### 3 结论

1) 在本试验中,不同电极材料在不同初始含水率下的电渗效果并不相同。含水率较高时,不锈钢、铜、铝的表现相差不大;含水率较低时,铝电极的电渗效果变得很差。可见在工程中初始含水率也会对电极材料的选择有影响。

2) 初始含水率会影响阳极电极管化学反应程度。这使得在工程中选择电极材料时要考虑电极管在含水率高时的化学反应问题。

3) 土体初始含水率高的试样的总能耗要高于初始含水率低的试样。但对于单位排水体积能耗来说,初始含水率高的试样数据要低一些。

4) 电渗法排水在含水率低的黏土上应用也能达到很好的排水效果。有效电势降低跟电极与土体接触情况和电极钝化密切相关。对于水平电渗试验来说,管状电极与土体产生的裂缝较小。

### 参考文献:

- [1] 杨佳乐,李双洋,刘德仁,等. 絮凝-电渗法联合治理淤泥质土试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(10): 2861-2872.
- [2] ZHUANG Y. Large scale soft ground consolidation using electrokinetic geosynthetics[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(3): 757-770.
- [3] 王加勇,陈庚,陈永辉,等. 立体排水-电极联合体处理高含水率废弃土的试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2020, 37(4): 13-19.
- [4] LOCKHART N C. Electroosmotic dewatering of clays. II. Influence of salt, acid and flocculants[J]. Colloids and Surfaces, 1983, 6(3): 239-251.
- [5] 陶燕丽,周建,龚晓南,等. 基于杭州软土的电渗迁移过程试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(2): 448-453.
- [6] 甘淇匀. 软土电渗的电场作用机理与多场耦合理论[D]. 杭州:浙江大学, 2022.
- [7] 陶燕丽. 不同电极电渗过程比较及基于电导率电渗排水量计算方法[D]. 杭州:浙江大学, 2015.
- [8] PUGH R C. The application of electrokinetic geosynthetic material to uses in the construction industry[D]. Newcastle upon Tyne: University of Newcastle upon Tyne, 2008.
- [9] 王卓. 电渗作用下非饱和土路基排水效果研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2024.
- [10] 唐康为. 电渗作用下非饱和路基土水分迁移规律研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
- [11] 陶燕丽,周建,龚晓南,等. 铁和铜电极对电渗效果影响的对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 388-394.
- [12] LING J, LI X, QIAN J, et al. Performance comparison of different electrode materials for electro-osmosis treatment on subgrade soil[J]. Construction and Building Materials, 2020, 271: 1-11.
- [13] 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.

(责任编辑 王利君)