

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2025.20239060

## 电渗改良尾矿泥力学性能试验研究

魏作安, 张雪怡, 郭宏伟, 路 停  
(重庆大学 资源与安全学院, 重庆 400044)

**摘 要:** 为探究电渗改良尾矿泥力学性能的可行性与效果,以电压梯度、电压加载方式为变量,利用自制的电渗试验箱对铜尾矿泥和磷尾矿泥分别开展室内电渗试验.通过分析电渗过程中的排水量与电流衰减规律以及电渗改良后尾矿泥的含水率、干密度和抗剪强度等指标,并结合电渗能耗,探究了电渗改良尾矿泥力学性能的有效性及其最佳作用方式.结果表明:电渗排水量与电压强度和电压加载级数正相关;相较于单级电压加载,多级电压加载时的电流衰减趋势减缓,电渗结束后尾矿泥的含水率更低、干密度更大、抗剪强度更高,力学性能的改良效果更优;在电渗过程中,多级电压加载的平均能耗比单级加载更低;电渗改良尾矿泥力学性能的最佳作用方式为15—20—25—30 V 4级电压加载.

**关键词:** 尾矿泥;电渗排水;多级加载;抗剪强度;能耗分析

中图分类号: X 936 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)04-0151-08

## Experimental Study on Electroosmotic Improvement of Mechanical Properties of Tailings Mud

WEI Zuo-an, ZHANG Xue-yi, GUO Hong-wei, LU Ting

(School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China. Corresponding author: WEI Zuo-an, E-mail: weiza@cqu.edu.cn)

**Abstract:** To investigate the feasibility and effectiveness of improving the mechanical properties of tailings mud by electroosmosis, voltage gradient and voltage loading method were used as variables, and the self-made electroosmotic test chamber was used to carry out indoor electroosmotic tests on copper tailings mud and phosphorus tailings mud. By analyzing the drainage volume and current attenuation during the electroosmosis, as well as the moisture, dry density and shear strength of the tailings mud after electroosmotic improvement, combined with the energy consumption of electroosmosis, the effectiveness and best way for improving the mechanical properties of tailings mud by electroosmosis were explored. The test results show that electroosmotic drainage is positively correlated with voltage intensity and voltage loading stages. Compared with single-stage voltage loading, the current attenuation trend of multi-stage voltage loading slows down. After the end of electroosmosis, the water content of tailings mud is lower, the dry density is larger, the shear strength is higher, and the improvement effect of mechanical properties is better. During the electroosmotic process, the average energy consumption of multi-stage voltage loading is lower than that of single-stage loading. The best way to improve the mechanical properties of tailings mud by electroosmosis is 15—20—25—30 V four-stage voltage loading.

**Key words:** tailings mud; electroosmotic dewatering; multi-stage loading; shear strength; energy consumption analysis

电渗法是指在电压作用下,土体中的水分子逐渐固结的一种软土加固技术.电渗技术自1939年首次被运用到铁路边坡工程的加固后,即被广

收稿日期: 2023-12-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52304124); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTB2022NSCQ-MSX0497).

作者简介: 魏作安(1965—),男,江西南昌人,重庆大学教授,博士生导师.

泛用于软土加固工程中,该技术能有效改良软土的力学性能,开创了软土地基加固的新思路<sup>[1]</sup>.

以往的研究表明,影响电渗加固软土效果的主要因素包括电压梯度、电压加载方式、电极布置形式及电极材料等<sup>[2]</sup>.在电压梯度方面,Lockhart<sup>[3]</sup>通过电渗试验发现电渗排水速率与电流和电压强度成正比,电压越大则排水越快;Shang等<sup>[4]</sup>通过进行高电压条件下的电渗试验,发现高电压下电渗加固软土的效果比低电压更好;李瑛等<sup>[5]</sup>基于自制的电渗模型试验箱进行了一维电渗排水试验,通过分析排水量、电势分布等指标探明了不同电压下的电渗排水规律.关于电压加载方式,Karunaratne<sup>[6]</sup>采用了单一逐级加压方案,发现逐级加载电压能更有效地促进电渗排水、提升加固效果;刘飞禹等<sup>[7]</sup>和曾芳金等<sup>[8]</sup>探究了逐级加压对电渗加固效果的影响,发现合理的逐级加压不仅能增加电渗排水量、提高排水效率以及降低能耗,还能使电渗加固作用更加均匀;龚晓南等<sup>[9]</sup>通过自制的电渗固结装置对比了间歇通电和连续通电对土体固结的影响.在电极布置形式方面,陈卓等<sup>[10]</sup>在对软黏土开展一维电渗试验的基础上,研究了电极反转下的电渗加固规律;王柳江等<sup>[11]</sup>和李一雯等<sup>[12]</sup>研究了电极排布形式对电渗效果的影响.此外,张雷等<sup>[13]</sup>和Wu等<sup>[14-15]</sup>研究了不同电极材料对电渗加固效果的影响,发现铜作为电极材料的电渗排水效果最优.

目前,电渗已广泛应用于软土地基处理及边坡加固等岩土工程领域,但将电渗技术应用于改良尾矿泥力学性能的研究相对较少.

尾矿是矿石经选矿工序分选出有用矿物后剩余的废渣,一般以矿浆的形式通过管道排放到尾矿库内.近年来,随着选矿工艺的不断进步,选矿回收率逐渐提高,但也导致尾矿颗粒的粒径越来越细;同时由于充填采矿法的发展,粗粒尾矿更多被用于井下充填,这致使排放到尾矿库的尾矿越来越细,堆存尾矿中尾矿泥的含量也越来越多<sup>[16]</sup>.由于尾矿泥具有颗粒细、含水率高、渗透性差、力学性能低的特点,其含量的增加会使得尾

矿坝的稳定性降低,发生失稳、溃坝的风险随之上升<sup>[17]</sup>.

堆存尾矿的力学性能是影响尾矿坝稳定性的关键因素,因此,对尾矿泥力学性能进行改良研究具有重要意义.饱和尾矿泥与软土具有相似的力学性质,因此,本文将电渗技术引入到尾矿泥力学性能的改良研究中.以电压强度和电压加载方式为变量,分别对铜尾矿泥和磷尾矿泥开展室内电渗试验,以电渗排水量、电流衰减程度以及电渗改良后尾矿泥的含水率、干密度和抗剪强度为测试指标,结合电渗能耗分析结果,评估电渗对尾矿泥力学性能的改良效果,探索最佳的电压加载方式.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本文以排放量最大的金属铜尾矿和非金属磷尾矿作为研究对象,铜尾矿取自四川凉山矿业公司小打鹅尾矿库,磷尾矿取自南磷化集团有限公司马屋箐尾矿库.2种尾矿的粒径级配曲线和特征粒径分布如图1和表1所示.由级配曲线和特征粒径可知:铜尾矿的不均匀系数 $C_u=5.79$ ,曲率系数 $C_c=1.22$ ;磷尾矿的不均匀系数 $C_u=4.64$ ,曲率系数 $C_c=0.60$ .因此,铜尾矿级配良好,而磷尾矿级配不良<sup>[18]</sup>.

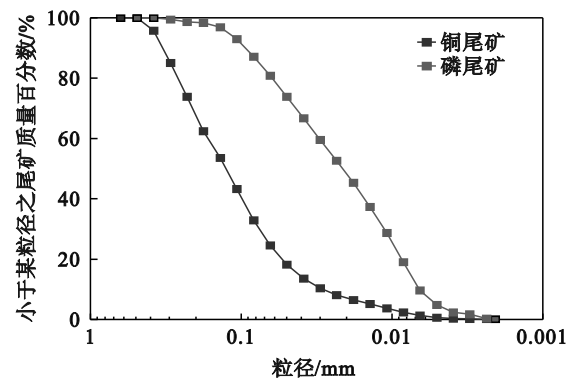


图1 铜尾矿和磷尾矿的粒径级配累积曲线

Fig. 1 Particle size cumulative distribution curves of copper tailings and phosphorus tailings

表1 铜尾矿和磷尾矿的特征粒径

Table 1 Characteristic particle sizes of copper tailings and phosphate tailings

尾矿类别	特征粒径/ $\mu\text{m}$				不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$
	$d_{10}$	$d_{30}$	$d_{50}$	$d_{60}$		
铜尾矿	28.77	76.44	127.04	166.61	5.79	1.22
磷尾矿	6.59	10.96	21.07	30.57	4.64	0.60

1.2 尾矿泥的电渗改良试验

1) 电渗装置设计及电渗过程. 电渗试验装置如图2所示, 主要由电渗试验箱及稳压电源(型号为UTP3305)组成. 电渗试验箱的材质为有机透明玻璃, 壁厚5 mm, 底厚10 mm, 为了便于水分的排出, 将试验箱划分为试验区和排水区, 2个区域之间用带孔隔板分隔, 并在排水区的底部设置一个排水孔, 以便收集电渗排出的水分. 电极材料采用均匀打孔的铜板, 宽、高、厚尺寸为100 mm×110 mm×5 mm.

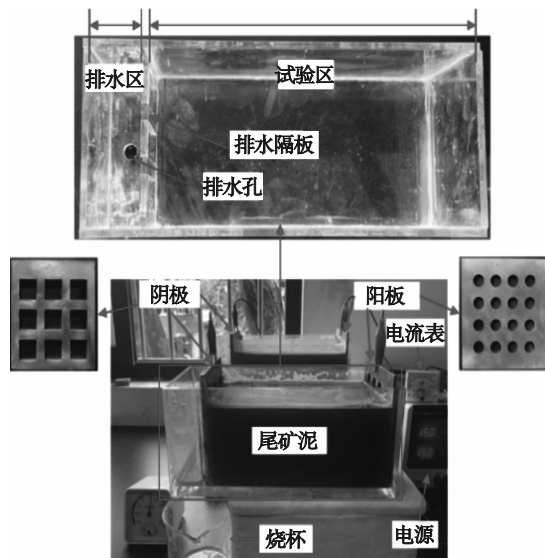


图2 电渗试验装置

Fig. 2 Electroosmotic experimental device

电渗过程: 首先将配置好的饱和尾矿泥分层均匀填入试验箱内; 然后用导线将电源接入电渗装置, 在排水口下方放置烧杯收集电渗排水; 最后打开电源, 根据预设的试验方案调整电压大小和加载方式, 开始电渗排水试验. 在试验过程中, 每隔1 h记录一次电压、电流与排水量, 当连续1 h内的排水量小于5 mL时, 视为电渗排水已基本停止, 关闭电源, 并测量计算出试验终了的电渗排水量.

2) 试验方案. 在室内电渗试验中, 电势梯度一般在0.5~1.5 V/cm的范围内<sup>[19]</sup>. 对应到本研究所用长度为20 cm的试验箱, 两电极间应施加的电压为10~30 V. 因此, 选择使用15, 20, 25和30 V 4种不同的电压强度, 结合不同的电压加载方式, 共设计13组电渗试验, 如表2、图3和图4所示. 为便于区分, 在后续的试验结果分析中分别采用Tc和Tp表示铜尾矿泥和磷尾矿泥的试验组.

表2 电渗改良尾矿泥的试验方案

Table 2 Experimental scheme for electroosmotic improvement of tailings mud V

试验组别	电压加载方式	试验组别	电压加载方式
T0	空白对照, 静置	T7	15—30
T1	15	T8	20—25
T2	20	T9	20—30
T3	25	T10	15—20—25
T4	30	T11	15—20—30
T5	15—20	T12	20—25—30
T6	15—25	T13	15—20—25—30

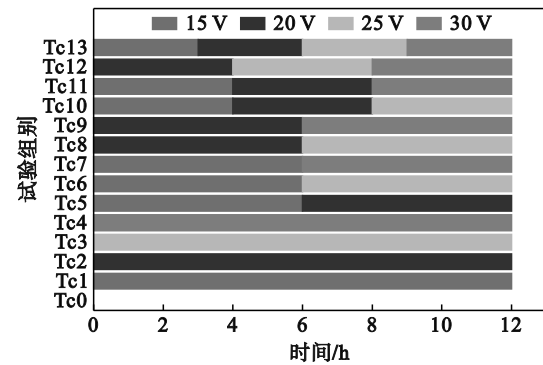


图3 铜尾矿泥加载电压与时间

Fig. 3 Copper tailings mud loading voltage and time

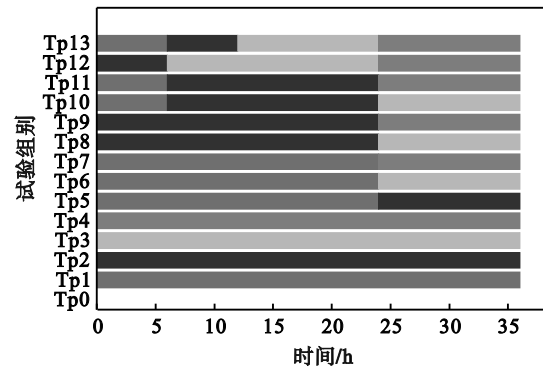


图4 磷尾矿泥加载电压与时间

Fig. 4 Phosphorus tailings mud loading voltage and time

1.3 尾矿泥力学性能测试方法与过程

采用电渗前后土体的含水率、干密度和抗剪强度来评价电渗的加固效果<sup>[20]</sup>. 因此, 在电渗试验结束后, 按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019), 利用环刀分别对不同电压形式加载时排水效果最优的试验组进行取样, 测定尾矿泥的含水率、干密度和抗剪强度等指标.

1) 含水率: 分别在试验箱内距离阳极0, 5, 10, 15及20 cm处, 分上、中、下3层取尾矿泥试样, 测定其含水率;

2) 干密度: 用环刀分别在距离阳极5及

15 cm 处各取 4 个尾矿泥试样,测量其干密度;

3) 抗剪强度:用环刀在试验箱靠近阳极处与阴极处分别取 4 个尾矿泥试样,利用南京土壤仪器厂生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪对其进行直剪试验,试验采用的垂直压力为 25, 50, 75 和 100 kPa,剪切速率为 0.8 mm/min.

## 2 结果与讨论

### 2.1 电渗排水量

铜尾矿泥和磷尾矿泥电渗过程中的排水量随时间变化趋势如图 5 和图 6 所示.由图可知,所有电渗试验组的排水量均比对照组显著增多,这验证了利用电渗能加速尾矿泥排水固结的有效性.在单级电压加载下,参考李金典等<sup>[21]</sup>的研究结果,可将 2 种尾矿泥的排水量变化划分为初始排水阶段、稳定排水阶段和不排水阶段.在初始排水阶段,排水速率快且保持稳定增长的趋势,排水量增幅明显,且具有电压越高,排水速率越快,排水量越多的特点;在稳定排水阶段,排水量增长趋势减缓,排水速率降低,直至排水量不再变化,电渗进入不排水阶段.这与李瑛等<sup>[5]</sup>和万勇等<sup>[22]</sup>在一维电渗试验中观察到的排水变化规律一致.由分级电压加载的试验结果可知,各组试验在提高电压后的排水量均显著增加,试验结束时的总电渗排水量亦比单级电压加载更多,此外,电渗总排水量随加载级数的增多而增加,表明电压分级加载比单级加载更能加速尾矿泥的排水固结,这符合文献[7]与文献[23]中逐级加载试验得到的电渗排水规律.

### 2.2 电流变化

图 7 和图 8 展示了不同加载方式中排水效果最优试验组的电流变化.从图中可以看出,2 种尾矿泥在电渗过程中的电流变化规律相似.在 30 V 电压单级加载时,前期排水量增速明显,电流则迅速衰减,这是由于高电压加载初期会使阳极端迅速失水而形成硬壳层,增大了尾矿泥的电阻;此外,电解产生的气体减少了电极与尾矿泥的接触面积,增大了界面电阻,从而使电流迅速衰减<sup>[24]</sup>.多级电压加载时,低电压加载的初期不会导致阳极端失水过快,并且随着每级电压的升高,电流值均会突变增大,电流整体衰减的趋势有所减缓,电渗排水量相对更多,排水效果较单级电压加载时更好.但是不同于常规淤泥土的电渗试验现象<sup>[7-8,25-26]</sup>,在尾矿泥电渗过程中,无论

单级加载还是多级加载,电流在试验初期就开始衰减,并未出现小幅度的回升.

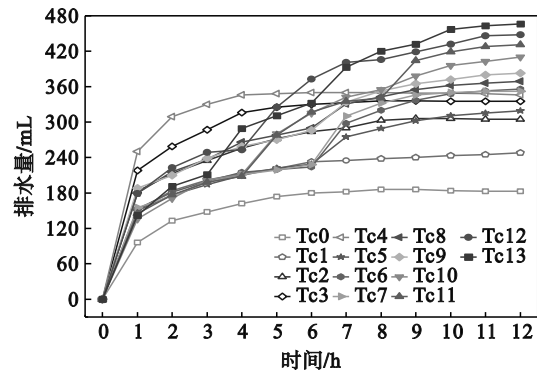


图 5 铜尾矿泥电渗排水量

Fig. 5 Displacement in electroosmotic process of copper tailings mud

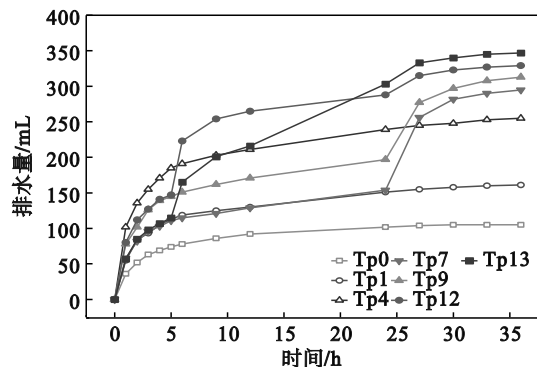


图 6 磷尾矿泥电渗排水量

Fig. 6 Displacement in electroosmotic process of phosphorus tailings mud

综上,相比单级加载,多级加载能够延缓电流的衰减趋势,从而提高尾矿泥的排水固结效果.

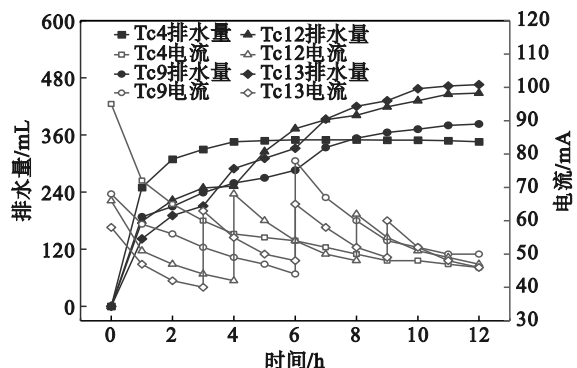


图 7 铜尾矿泥电渗过程中电流衰减与排水量的变化情况

Fig. 7 Current attenuation and drainage change during the electroosmotic process of copper tailings mud

### 2.3 含水率

不同位置尾矿泥含水率的测试结果如图 9 和图 10 所示.从图中可以看出,电渗后 2 种尾矿泥的含水率均表现为从阳极至阴极方向递增的趋

势,这主要与试验组的孔隙水在通电作用下被驱向阴极而在阴极处发生积聚有关<sup>[25]</sup>;而对照组则呈现相反的变化趋势,且减少幅度较大,究其原因,对照组由于无电场作用,排水过程较慢,阴极处尾矿泥中的水分会直接经隔板流出,阳极处由于无排水边界,孔隙水只能缓慢地经阴极渗出,有的甚至停留在阳极处,从而对照组的含水率从阳极到阴极方向大幅度减少.此外,各位置尾矿泥的含水率均高于试验组,这与常规土壤电渗试验的结果相同<sup>[26-27]</sup>.同时,根据图9和图10可知,单级高电压加载下的含水率低于低电压时,多级电压加载下的含水率低于单级电压加载,与前面排水量的变化规律保持一致.上述结果表明,电场作用可以加速尾矿泥的排水固结,而且多级电压加载的电渗排水效果优于单级电压加载.

随着电压施加级数的增加而逐渐增大,这说明电渗过程有利于尾矿泥的排水固结,且在多级电压加载下,电渗排水效果更优,尾矿泥的固结加固效果也更均匀.

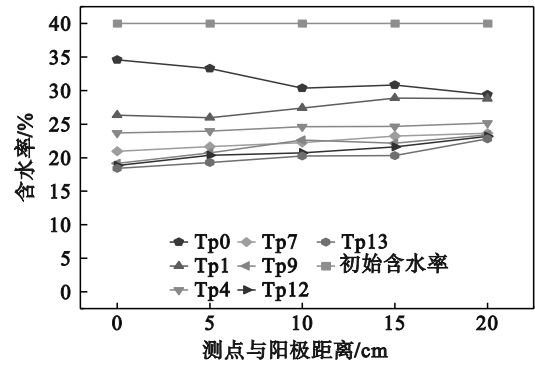


图10 电渗结束后不同位置处磷尾矿泥的含水率  
Fig. 10 Moisture of phosphorus tailings mud at different positions after electroosmosis

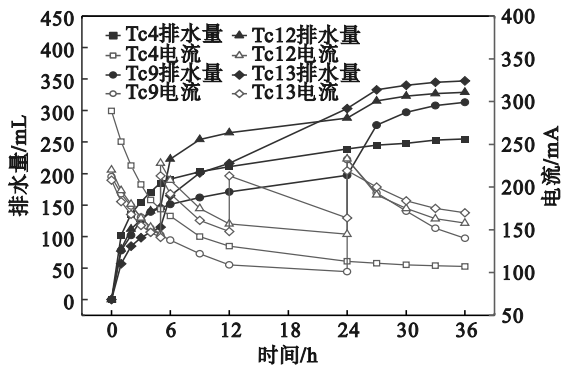


图8 磷尾矿泥电渗过程中电流衰减与排水量的变化情况  
Fig. 8 Current attenuation and drainage change during the electroosmosis of phosphorus tailings mud

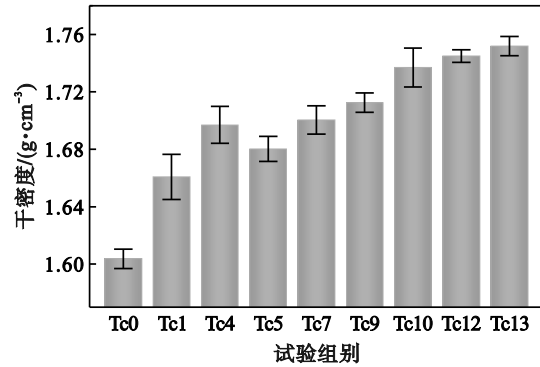


图11 电渗后阳极处铜尾矿泥的干密度  
Fig. 11 Dry density of copper tailings mud at the positive electrode after electroosmosis

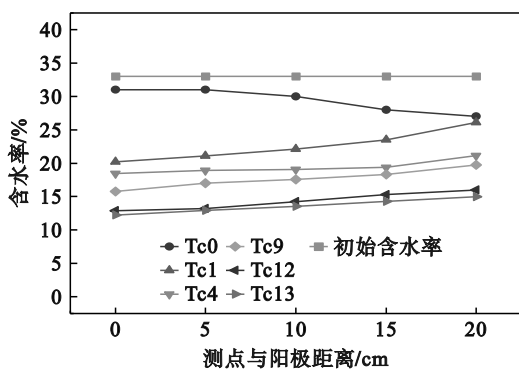


图9 电渗结束后不同位置处铜尾矿泥的含水率  
Fig. 9 Moisture of copper tailings mud at different positions after electroosmosis

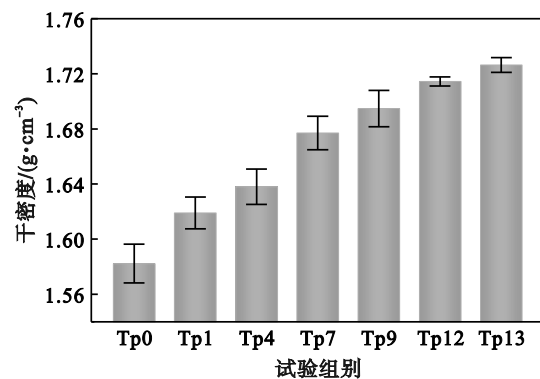


图12 电渗后阳极处磷尾矿泥的干密度  
Fig. 12 Dry density of phosphorus tailings mud at the positive electrode after electroosmosis

2.4 干密度

同样选取排水固结效果较好的试验组测定尾矿泥的干密度,结果如图11和图12所示.从图中可以看出,试验组的干密度均大于对照组,且

2.5 抗剪强度

电渗改良后2种尾矿泥的直剪试验结果如表3所示.从表3可知,2种尾矿泥在阳极处的抗剪强度均大于阴极处,这与尾矿泥的含水率分布规

律密切相关,试样的含水率越小,内摩擦角和黏聚力等力学参数越高<sup>[28-29]</sup>.这也表明电渗对阳极处尾矿泥力学性能的改良效果更好.同样,将不同加载方式下排水效果最优试验组阳极处的直剪试验结果进行对比分析,如图 13 和图 14 所示.2 种尾矿泥试验组的抗剪强度值均大于对照组,且经过 15—20—25—30 V 4 级电压电渗改良后,2 种尾矿泥的抗剪强度均达到了最大值,较对照组力学性质提升显著,说明电渗技术是改良尾矿泥力学性能的有效措施,且分级电压加载能使尾矿泥力学性能的改良效果更佳.

此外,从图 13 和图 14 可以看出,电渗技术对 2 种尾矿泥力学性能的改良效果存在差异性,电渗后铜尾矿泥的抗剪强度比磷尾矿泥的大,对铜尾矿泥力学性能的改良效果更优.这主要与 2 种尾矿泥的颗粒粗细有关,由于铜尾矿的比表面积比磷尾矿的小,因而铜尾矿的颗粒比磷尾矿的粗.土颗粒越细、亲水性越好,吸附水分子的能力越强<sup>[19]</sup>.因此,相比磷尾矿,铜尾矿吸附水分子的能力较差,尾矿泥中的水分子在电渗过程中更容易从阳极流向阴极,其在阳极处的含水率更低,从而抗剪强度更大,力学性能的改良效果更优.

表 3 电渗后尾矿泥的黏聚力与内摩擦角  
Table 3 Cohesion and internal friction angle of tailings mud after electroosmosis

试验组别	阴极处		阳极处	
	黏聚力 <i>c</i> /kPa	内摩擦角 $\varphi$ /( $^{\circ}$ )	黏聚力 <i>c</i> /kPa	内摩擦角 $\varphi$ /( $^{\circ}$ )
Tc0	1.44	46.29	6.43	45.57
Tc1	5.37	46.29	14.94	44.36
Tc4	12.32	48.80	17.60	50.45
Tc7	4.54	48.43	16.24	47.60
Tc9	9.40	46.65	7.83	50.44
Tc10	15.07	44.00	15.76	48.29
Tc12	8.96	51.23	15.22	51.89
Tc13	17.78	48.92	13.72	52.73
Tp0	4.33	31.10	4.23	30.53
Tp1	5.33	30.95	6.55	30.58
Tp4	7.34	31.80	7.45	32.09
Tp7	6.25	33.34	3.20	35.17
Tp9	5.67	32.28	6.98	33.88
Tp12	6.59	33.13	8.78	33.77
Tp13	8.49	33.75	13.29	34.76

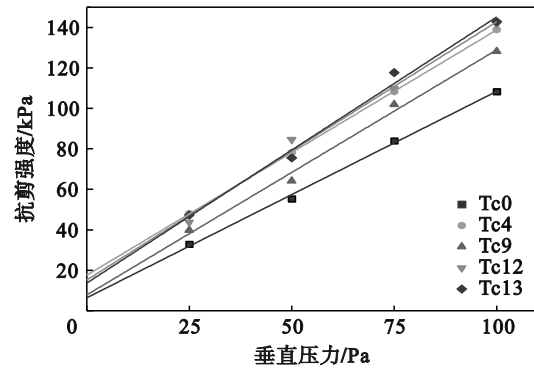


图 13 电渗试验后阳极处铜尾矿泥的抗剪强度值  
Fig. 13 Shear strength of copper tailings mud at the positive electrode after electroosmotic test

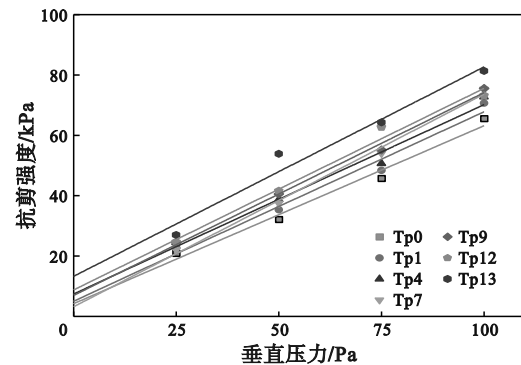


图 14 电渗试验后阳极处磷尾矿泥的抗剪强度值  
Fig. 14 Shear strength of phosphorus tailings mud at the positive electrode after electroosmotic test

### 3 电渗能耗分析

土体进行电渗排水时需要持续通电,因此能耗是电渗法在现场实际应用中需要关注的重点,在提高电渗改良效果的同时,也需注重降低能耗.电渗过程中总电能消耗  $W$  可按式(1)计算:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} UF(t) \cdot dt. \quad (1)$$

式中: $U$ 为电渗过程中的电压强度; $F(t)$ 为电渗过程中电流随时间变化的函数; $t_2-t_1$ 为电渗试验持续时间.

为了探究电渗排出单位体积水分所需消耗的电能,引入平均排水能耗  $\bar{W}$ ,其计算方式为

$$\bar{W} = \frac{W}{V - V_0}. \quad (2)$$

式中: $W$ 为电渗过程中的总能耗; $V$ 为电渗过程中试验组的最终排水量; $V_0$ 为对照组的最终排水量.

针对 2 种尾矿泥电渗试验效果最优的试验组,分别计算其电渗能耗及平均排水能耗,结果如表 4 所示.从结果可以看出,随着电压加载级数

的增多,铜尾矿泥的电渗总能耗及平均排水能耗均有所降低,这是由于分级电压加载时前期低电压的功率小,且在电渗终了时的排水量更多,进而具备更低的平均排水能耗<sup>[30]</sup>.这也说明分级电压加载不仅可以促进铜尾矿泥的排水固结、改良铜尾矿泥的力学性能,而且具有较低的电渗能耗.

与铜尾矿泥不同,磷尾矿泥的电渗总能耗随着电压加载级数的增多而逐渐增加,这是由于磷尾矿泥电渗耗时更长引起的.单级高电压加载试验组中,电流在试验前期即会迅速衰减,直至电渗后期均一直处于较低水平;而分级电压加载时,电流始终保持相对较高的数值,电渗排水效果较好的同时亦会带来更大的总能耗.进一步分析平均排水能耗,磷尾矿泥表现出与铜尾矿泥相同的变化规律,平均排水能耗随着电压加载级数的增多而降低.综合分析可知,尽管磷尾矿泥分级电压加载时的总能耗较单级电压更高,但其能带来更多的电渗排水量,更好地促进磷尾矿泥排水固结,因而电渗排出单位体积水的能耗较单级电压时更低,具有更高的经济性.

表4 尾矿泥电渗能耗计算结果

Table 4 Calculation results of tailings mud electroosmotic energy consumption

试验组别	电渗总能耗 $W$	平均排水能耗 $\bar{W}$
	$\text{kW}\cdot\text{h}$	$\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{mL}^{-1}$
Tc4	$2.03\times 10^{-2}$	448.34
Tc9	$1.68\times 10^{-2}$	302.40
Tc12	$1.58\times 10^{-2}$	214.64
Tc13	$1.41\times 10^{-2}$	179.36
Tp4	0.148	3 540.24
Tp9	0.153	2 653.61
Tp12	0.160	2 575.89
Tp13	0.161	2 390.39

## 4 结 论

1) 尾矿泥的电渗排水量与电压强度及电压加载级数呈正相关.随着电压的增大,尾矿泥的电渗排水速率越快,最终排水量越多,固结效果越好;相比于单级加载,多级加载时的最终排水量更多,且表现出随电压级数增多而逐渐上升的趋势,尾矿泥的排水固结效果更好.在单级高电压加载条件下,尾矿泥的电阻值随电渗时间逐渐增大,电流呈现迅速衰减的现象;而在多级电压

加载条件下,电流的衰减趋势减缓,电渗排水固结效果更明显.

2) 单级电压加载时,尾矿泥在高电压条件下的含水率较低电压时更低,且具有更高的抗剪强度;相较而言,多级电压加载改良后较单级电压条件下具有更高的物理力学性能.此外,在多级电压加载时,电渗改良后尾矿泥的干密度随着电压加载级数的增加而增大,固结效果也更均匀,力学性能提升幅度更显著.电渗改良后尾矿泥在阳极处的含水率最小且具有更大的抗剪强度,阴极处则与之相反.

3) 2种尾矿泥在不同加载方式时的电渗总能耗存在差异,铜尾矿泥的电渗总能耗随着电压加载级数的增加而降低,而磷尾矿泥的电渗总能耗则随着级数的增加而增多.但由于分级加载能带来更多的电渗排水量,2种尾矿泥的平均排水能耗均随着电压加载级数的增多而降低.

4) 电渗技术能较好地促进尾矿泥排水固结,是改良尾矿泥力学性能的有效措施.综合电渗排水效果、电渗后尾矿泥的物理力学性能及电渗能耗,得到改良尾矿泥力学性能的最佳电渗方案为15—20—25—30V 4级电压加载方式.

## 参考文献:

- [1] Casagrande L. Electro-osmosis in soils [J]. *Geotechnique*, 1948, 1(3): 159-177.
- [2] 郑凌透. 滨海软土地基电渗加固方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018. (Zheng Ling-wei. Electroosmosis reinforcement technical research of coastal soft soil foundation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.)
- [3] Lockhart N C. Electro-osmotic dewatering of clays, Influence of salt, acid and flocculants [J]. *Colloids and surfaces*, 1983, 6(3): 239-251.
- [4] Shang J Q, Dunlap W A. Improvements of soft clays by high voltage electro kinetics [J]. *Geotechnical engineering Journal*, 1996, 29(2): 117-120.
- [5] 李瑛, 龚晓南, 张雪婵. 电压对一维电渗排水影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 709-714. (Li Ying, Gong Xiao-nan, Zhang Xue-chan. Experimental research on effect of applied voltage on one-dimensional electroosmotic drainage [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 709-714.)
- [6] Karunaratne G P. Prefabricated and electrical vertical drains for consolidation of soft clay [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2011, 29(4): 391-401.
- [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 Fei-yu, Mi Wei, Wang Jun, et al. Influence of applying stepped voltage in electro-osmotic reinforcement of dredger fill [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(12): 2582-2591.)
- [8] 曾芳金, 石常鑫, 袁莉莉, 等. 不同增压方式下电渗法加固

- 滩涂淤泥试验研究[J]. 江西理工大学学报, 2018, 39(3): 1-5.  
(Zeng Fang-jin, Shi Chang-xin, Yuan Li-li, et al. Experimental study on tideland sludge with electroosmotic method under different stepped voltage modes[J]. *Journal of Jiangxi University of Science and Technology*, 2018, 39(3): 1-5.)
- [9] 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 Xiao-nan, 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.)
- [10] 陈卓, 周建, 温晓贵, 等. 电极反转对电渗加固效果的试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(9): 1579-1584.  
(Chen Zhuo, Zhou Jian, Wen Xiao-gui, et al. Experimental research on effect of polarity reversal to electro-osmotic [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2013, 47(9): 1579-1584.)
- [11] 王柳江, 刘斯宏, 朱豪, 等. 电极布置形式对电渗加固软土效果的影响试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(1): 64-69.  
(Wang Liu-jiang, Liu Si-hong, Zhu Hao, et al. Experimental study of effects of electrode configuration on electroosmosis reinforcement for soft soil [J]. *Journal of Hohai University(Natural Science)*, 2013, 41(1): 64-69.)
- [12] 李一雯, 周建, 龚晓南, 等. 电极布置形式对电渗效果影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1972-1978.  
(Li Yi-wen, Zhou Jian, Gong Xiao-nan, et al. Experimental research on influence of electrode array on electroosmotic effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(7): 1972-1978.)
- [13] 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 Lei, Wang Ning-wei, Jing Li-ping, et al. Comparative experiments of different electrode materials on electro-osmotic consolidation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(9): 3493-3501, 3514.)
- [14] Wu H, Hu L M, Wen Q B. Electro-osmotic enhancement of bentonite with reactive and inert electrodes[J]. *Applied Clay Science*, 2015, 111: 76-82.
- [15] Wu H, Hu L M. Microfabric change of electro-osmotic stabilized bentonite[J]. *Applied Clay Science*, 2014, 101: 503-509.
- [16] 尹光志, 魏作安, 许江. 细粒尾矿及其堆坝稳定性分析[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2004.  
(Yin Guang-zhi, Wei Zuo-an, Xu Jiang. The characteristics and dam stability analysis of fine grained tailings [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2004.)
- [17] Ruiz E, Huamni L, Paucar J, et al. Planning the dewatering of a tailings storage facility[J]. *Mine Water and the Environment*, 2021, 40(1): 270-284.
- [18] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.  
(Chen Zhong-yi, Zhou Jing-xing, Wang Hong-jin. Soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.)
- [19] Vijn A K. Electroosmotic dewatering of clays and suspensions: components of voltage in an electroosmotic cell[J]. *Drying Technology*, 1999, 17(3): 565-574.
- [20] 胡俞晨, 王钊, 庄艳峰. 电动土工合成材料加固软土地基实验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 582-586.  
(Hu Yu-chen, Wang Zhao, Zhuang Yan-feng. Experimental studies on electro-osmotic consolidation of soft clay using EKG electrodes [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(5): 582-586.)
- [21] 李金典, 韩猛, 封海洋, 等. 低渗透致密黏土电渗排水技术室内试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(sup2): 3464-3471.  
(Li Jin-dian, Han Meng, Feng Hai-yang, et al. Laboratory experimental study on electroosmotic drainage technology of low-permeability dense clay[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(sup2): 3464-3471.)
- [22] 万勇, 杨庆, 杨钢. 电势梯度对海相淤泥电渗试验的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(4): 94-98.  
(Wan Yong, Yang Qing, Yang Gang. Electro-osmotic Experiment on Marine Sludge of Different Voltage Gradients [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2014, 12(4): 94-98.)
- [23] 袁国辉, 胡秀青, 刘飞禹, 等. 絮凝-逐级加压电渗法改良疏浚淤泥试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(sup1): 2995-3003.  
(Yuan Guo-hui, Hu Xiu-qing, Liu Fei-yu, et al. Experimental study on the improvement of dredged slurry by flocculation-step-by-step loading voltage electro-osmosis method [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(sup1): 2995-3003.)
- [24] Corwin D L, Lesch S M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 46(1/2/3): 11-43.
- [25] Morris D V, Hillis S F, Caldwell J A. Improvement of sensitive silty clay by electroosmosis [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1985, 22(1): 17-24.
- [26] 杨克军, 袁国辉, 符洪涛, 等. 通电方式对电渗加固软土影响试验研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(2): 170-176.  
(Yang Ke-jun, Yuan Guo-hui, Fu Hong-tao, et al. Experimental study on influence of electrification method on soft soil enhanced by electroosmosis [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(2): 170-176.)
- [27] 朱侠达. 河道淤泥电渗加固修复试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.  
(Zhu Xia-da. Experimental study on electroosmosis reinforcement and repair of river silt [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.)
- [28] 申春妮, 方祥位, 王和文, 等. 吸力、含水率和干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1347-1351.  
(Shen Chun-ni, Fang Xiang-wei, Wang He-wen, et al. Research on effects of suction, water content and dry density on shear strength of remolded unsaturated soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(5): 1347-1351.)
- [29] Wan T Y, Mitchell J K. Electro-osmotic consolidation of soils[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1976, 102(5): 473-491.
- [30] 郑凌透, 谢新宇, 谢康和, 等. 电渗法加固地基试验及应用研究进展[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(6): 1064-1073.  
(Zheng Ling-wei, Xie Xin-yu, Xie Kang-he, et al. Test and application research advance on foundation reinforcement by electro-osmosis method [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2017, 51(6): 1064-1073.)