

# Experimental Study on Electric Flocculation Treatment Method for Waste Mud in Bored Pile

Qinxi Zhang<sup>1</sup>, Xiaojie Wang<sup>1</sup>, Yuxin Zhai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

<sup>2</sup>China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing

Email: [zhangqinxi@bjut.edu.cn](mailto:zhangqinxi@bjut.edu.cn)

Received: Jun. 27<sup>th</sup>, 2015; accepted: Jul. 10<sup>th</sup>, 2015; published: Jul. 17<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Bored pile construction process will produce a lot of waste mud, characterized by the proportion of high consistency, system stability, high pH value, and difficulty of short time dispose. According to the characteristics of the waste mud, related research is carried out on harmless treatment of waste mud in building. The paper has researched on basic composition of waste mud and primary flocculation and gel breaking. Then, we research electric dewatering on waste mud structure.

## Keywords

Waste Mud, Mud Dewatering, Flocculation and Gel Breaking, Electric Dewatering

---

# 絮凝—电动法处理钻孔灌注桩废弃泥浆的试验研究

张钦喜<sup>1</sup>, 王晓杰<sup>1</sup>, 翟玉新<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北京工业大学建工学院, 北京

<sup>2</sup>中铁建设集团有限公司, 北京

Email: [zhangqinxi@bjut.edu.cn](mailto:zhangqinxi@bjut.edu.cn)

收稿日期：2015年6月27日；录用日期：2015年7月10日；发布日期：2015年7月17日

## 摘要

钻孔灌注桩施工过程中会产生大量废弃泥浆，其比重稠度大、体系稳定、pH值高，短时间处理掉难度很大。本文对废弃泥浆的特性，进行了对建筑废弃泥浆进行无害化处理的相关研究。本文对废弃泥浆基本组成及初步絮凝破胶进行试验研究，在此基础上对废弃泥浆体系进行电动脱水试验研究。

## 关键词

废弃泥浆，泥水分离，絮凝破胶，电动脱水

## 1. 引言

在建筑工程领域，桩主要应用于深基础或者地基处理技术。钻孔灌注桩是按成桩方法来分类而定义的。它是通过正反循环钻机、长螺旋钻机、旋挖钻机等先进的机械设备来成孔，然后于孔内放置钢筋笼子并灌注混凝土而形成的一种桩型。随着工程规模的加大和工程技术难度的增加，钻孔灌注桩在高层、超高层的建筑物以及重型构筑物中被广泛应用[1]。

考虑到技术经济因素，泥浆护壁成孔灌注桩得到最广泛的应用。但是，泥浆护壁成孔灌注桩施工过程中会产生大量废弃钻孔泥浆[2]。如果处理不当就会对工程进度产生很大的影响，造成很大的不必要的浪费，同时也会对工程所在地的环境产生不同程度的危害。所有这些反过来也制约着相关工程技术的应用与发展。建筑废弃泥浆主要是采用泥浆护壁工艺的各类机械成孔灌注桩施工过程中产生的废弃物，其比重稠度大、体系稳定、pH值高，短时间处理掉难度很大。目前，还没有可行的工艺技术能够在短时间内将废弃泥浆处理掉[3]。工程废弃泥浆问题俨然已经成为工程界亟需解决的难题之一。

为了能够消除钻孔灌注桩废弃泥浆的污染或者将其进行回收利用，国内外学者及相关工作者进行了大量工作，并且取得了显著成效，如今主要治理方法可归纳为注入安全地层、固化处理、脱水回收、回填处理、再循环使用、焚烧处理、破乳法、机械脱水法、MTC (Mud To Cement)技术、微生物处理等方法。其中机械脱水法、破乳法、MTC技术和微生物处理法是四种比较新的工艺方法[4]。

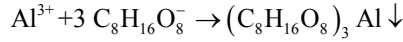
废弃泥浆中粘粒粒度非常小，泥浆中大部分粘粒处于悬浮状态，自然沉淀和一般的处理工艺不能满足实际要求。本文通过向废弃泥浆中加入絮凝剂明矾，对废弃泥浆进行破胶处理。然后利用电渗法的微观作用机制在经破胶处理的废弃泥浆两端通以低压直流电。通过絮凝-电动法处理钻孔灌注桩废弃泥浆技术的试验研究结果，得到絮凝-电动法处理钻孔灌注桩废弃泥浆技术的相关规律，对实际工程有一定的指导作用。

## 2. 絮凝-电动法的基本原理

### 2.1. 废弃泥浆初步絮凝脱水机理分析

废弃泥浆体系包括固相和液相两部分，固相中包括粘粒和砂，液相指的是外加剂和水组成的溶液。其中外加剂主要包括增稠的 Na-CMC (钠质羧甲基纤维素)和提供碱性环境的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 。废弃泥浆体系是热力学稳定体系，由于泥浆中粘粒带负电性，并且在增稠剂 Na-CMC 作用下，增加了粘土颗粒和水之间的联系。

明矾( $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ )溶于水后形成溶液。在水中,无机铝盐一般都会进行完全电离,电离出高价 $Al^{3+}$ 离子等,同时电离出的 $Al^{3+}$ 也能发生不完全的水解反应。在在废弃泥浆体系中电离的高价 $Al^{3+}$ 会置换掉 $Na^+$ ,并与 $C_8H_{16}O_8$ -(CMC 阴离子)结合,发生置换反应。很明显,故一个 $Al^{3+}$ 要与三个 $C_8H_{16}O_8$ —结合,形成 $(C_8H_{16}O_8)_3Al$ 。根据 CMC 的特性,当价数越高的离子取代了 $Na^+$ 时,得到的化合物的溶解度将会降低, $(C_8H_{16}O_8)_3Al$  会从溶液中析出并沉淀。



此时,存在的 $Al^{3+}$ 和 $CO_3^{2-}$ 能发生双水解反应,反应中能产生 $Al(OH)_3$ 沉淀和 $CO_2$ 气体。

$3CO_3^{2-} + 2Al^{3+} + 3H_2O \rightarrow 2Al(OH)_3 + 3CO_2 \uparrow$ 通过以上过程,使得废弃泥浆体系中的两个重要组成部分得以解决。为大颗粒粘粒的自然快速下沉扫清了障碍。

废弃泥浆中,固相中粘粒带有负电荷,而砂却不带电荷,一般粘粒比砂稳定。但是,由于固相颗粒间总有很强的聚结趋势,这就影响了泥浆体系的稳定性。为了实现体系中固液快速彻底分离,我们必须逐渐中和粘粒的负电荷,然后体系中的粘粒就能在聚结趋势下聚沉降。根据 DLVO 理论,高价反离子中和粘粒负电荷后,使得粘粒间距离变小,同时,降低了吸引能 EA 和排斥能 ER 的位能差 Eb,使位能差 Eb 降低到 0 或负值,这样,粘粒间就易于聚结沉降。

## 2.2. 废弃泥浆电功脱水理论分析

电动现象包括电泳和电渗两种现象,两种现象均是利用粘粒表面带负电荷并形成双电层特性。在土木工程领域中,第一个意识到应用电渗技术处理工程问题的是 Leo Casagrand。他应用电渗技术成功地处理了土层的强度及稳定性问题。此后,该项技术迅速被应用到了堤岸、软弱地基处理、提高桩及锚的承载力、加固斜坡等众多工程实践领域[5]。

本文电动脱水试验以废弃泥浆分层后将上层清液排出剩下的沉淀层为研究对象。废弃泥浆絮凝沉淀后,所得沉淀层仍属于泥的范畴,含水率在 100%以上。泥是一种多孔性的土,在试验中可以将它类似成多孔塞模型,即毛细管的集合体,水或其他液体可以在其中产生渗流现象[6]。如图 1,根据 Stern 双电层模型,假定在多孔塞毛细管中外加电场方向与组成毛细管壁的粘粒固液界面平行。在扩散层中,反离子分散在液体中。在外加电场作用下,反离子的电荷会沿着外加电场的方向运动,从而也会带动液体一起运动,而固定层则会随着粘粒一起运动。从 Stern 面开始,液体速度逐渐增加,加速度逐渐减小,直到扩散层外边缘( $\Psi = 0$ )处,液体的速度到最大,而加速度变为零。由于泥浆体系处电中性,体系中无多余电荷,外加电场对体系无作用,体系中液体的加速度为零,速度保持不变。此时,液体体系的电场力和液体间的摩擦阻力也处于受力平衡状态,如上图 2 所示。隔离体的厚度为  $dy$ ,面积为  $S$ ,距粘粒表面的距离为  $y$ ,隔离体内的电荷密度为  $\sigma_y$ ,作用于隔离体的电场强度为  $E$ 。设稳定状态下的隔离体以  $v$  的速度沿着  $E$  的方向运动。

作用与隔离体的电场力为  $E\sigma_y S dy$ ;作用在隔离体上的摩擦阻力分别为  $\mu S v_y (y + dy)$  和  $\mu S v_y (y)$ ,各作用力方向如图 2 所示。

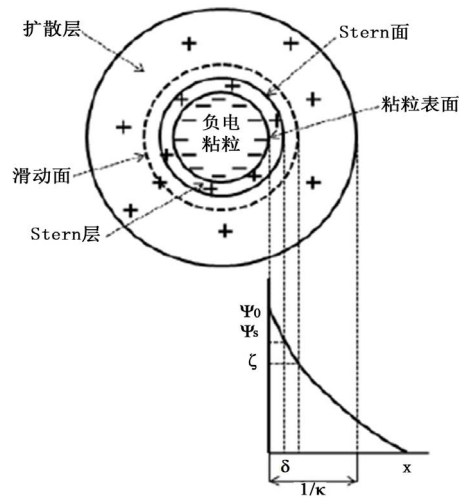
则受力平衡方程为:  $E\sigma_y S dy + \mu S v_y (y + dy) - \mu S v_y (y) = 0$

或  $E\sigma_y S dy + \mu S v_y (y + dy) = 0$

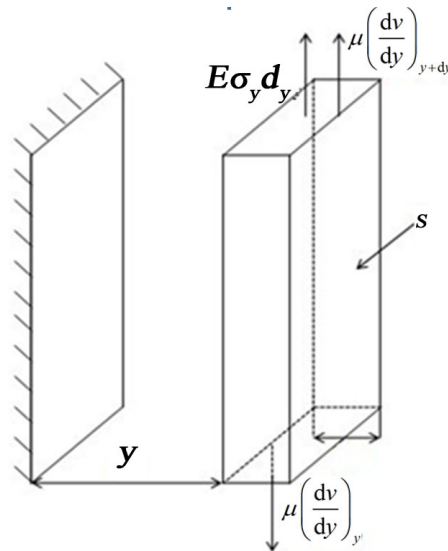
将上式带入 Poisson 公式,得:

$$\varepsilon E \frac{d^2 \Psi}{dy^2} = \frac{d}{dy} \left( \mu \frac{dv}{dy} \right)$$

根据边界条件  $\frac{d\Psi}{dy} = \frac{dv}{dy} = 0$ , 积分后得



**Figure 1.** The stern model of electric double layer of colloidal particles  
**图 1.** 胶体粒子的 stern 双电层模型



**Figure 2.** The stress of isolation body in liquid system  
**图 2.** 液体体系中隔离体的受力状态

$$\varepsilon E \frac{d\psi}{dy} = \mu \frac{dv}{dy}$$

再利用边界条件：Stern 面处  $\psi = \zeta$  以及  $v = 0$ ，积分后得：

$$v = \frac{\varepsilon}{\mu} E (\psi - \zeta)$$

根据  $E = \frac{U}{D}$  及双电层外的液体中  $\psi = 0$ ，上式可变为：

$$v_{\infty} = \frac{\varepsilon}{\mu} \zeta \frac{U}{D}$$

式中： $U$ ——正负两极间的电压；

$D$ ——正负两极间的距离；

$\mu$ ——废弃泥浆体系液相的粘滞系数；

$\zeta$ ——滑动面与电势为零的液体内部之间的电势差；

$\psi$ ——电势。

从上式中可以看出，电极间的电压  $U$  与电动渗流速度  $v$  成正相关，而极距  $D$  与电动渗流速度  $v$  成负相关。其重要影响取决于胶体体系本身各物理参数的变化。

### 3. 试验准备

#### 3.1. 试验材料

试验用泥浆来源于北京市顺义区某工地桩基施工现场。其基本物理力学性质如表 1 所示。试验过程中采用粉末状的明矾作为絮凝剂。

#### 3.2. 试验仪器设备

絮凝剂选择过程中主要用到的试验仪器主要采用烧杯、泥浆比重计、含砂测定计、泥浆粘度计以及电子天平等。电动脱水试验主要仪器设备采用不同尺寸玻璃槽、稳压直流电源电极等。

#### 3.3. 试验方案

絮凝剂选择部分共分 9 组试验，每组试验方案主要控制絮凝剂明矾的加入量。试样用量如表 2 所示。

絮凝剂脱胶絮凝试验中试验前主要测试泥浆的比重、含砂率以及初始 pH 值，试验过程中主要测试泥浆的比重、pH 值以及分层后泥浆体系各相态的高度。

电动脱水试验方案中初步选择的试验因素为电流  $I$ 、阴极与阳极的距离  $D$  和实验所需时间  $T$ 。三个因素初始取值为：电流  $I$  分别取值 0.6 A 和 1.0 A，电极间距  $D$  分别取 11 cm、14 cm、21 cm 和 28 cm，试验时间分别取 1.5 h、3.0 h、4.5 h 和 6 h。由此，整个试验需进行 16 次试验测试。试验前测试絮凝后泥浆含水率为 406%，试验中主要测试指标有电极间的电势差  $U$  和阴极附近的排水量。

#### 3.4. 试验步骤

##### (1) 絮凝试验试验步骤

a) 准备好实验器材及用品：明矾、一定量的废弃泥浆 A、新鲜泥浆 A 的配比、1000 ml 的烧杯若干、量杯若干、电子天枰、泥浆三件套、钢直尺、玻璃棒等。

b) 在室温时，将试样废弃泥浆搅拌均匀，然后在水平的试验台上水平放置 9 个 1000 ml 的烧杯，并按照试验方案中的试验编号给每个烧杯编号。

c) 在 9 个烧杯中每个都加入 1000 ml 搅拌均匀的废弃泥浆，然后用钢直尺量取烧杯中 1000 ml 废弃泥浆的液面距试验台面的高度。

d) 根据试验方案中设定的 9 个明矾加量，用电子天平按方案设定值称取 9 份明矾，将 9 份明矾分别制成体积相同的溶液。然后将 9 份不同浓度的明矾溶液加入到对应编号的烧杯中，并迅速将溶液与废弃泥浆搅拌均匀，观察现象。对于第一组对照试验没有加入明矾溶液，也要加入同体积的水，也要搅拌均匀。

e) 在试验过程中，对各组试验，包括对照组在内，设定每隔 20 min 用钢直尺量取沉降层的高度，并做相应的资料记录和照片记录。

Table 1. The basic features indicators of waste mud

表 1. 废弃泥浆的基本特性指标

名称	比重 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	粘度 $\mu$ (s)	含沙量(%)	pH
废弃泥浆	1.108	16.9	1.82	10.84

Table 2. The test plan of alum flocculation and breaking

表 2. 废弃泥浆的基本特性指标明矾絮凝破胶试验方案

试验编号	初始比重 $\rho_0$ (g/cm <sup>3</sup> )	初始含砂率(%)	初始 pH	明矾加量(g)	试样体积(ml)	试验总时间(h)
1	1.1143	1.82	11.0	0	1000	4
2	1.1143	1.82	11.0	3	1000	4
3	1.1143	1.82	11.0	6	1000	4
4	1.1143	1.82	11.0	9	1000	4
5	1.1143	1.82	11.0	12	1000	4
6	1.1143	1.82	11.0	15	1000	4
7	1.1143	1.82	11.0	18	1000	4
8	1.1143	1.82	11.0	21	1000	4
9	1.1143	1.82	11.0	24	1000	4

f) 试验结束时, 废弃泥浆体系已经基本分层完毕。对于各组试验, 应用泥浆比重计、含砂率计和电子 pH 计量取上层清液中相应的数值, 并做好相应数据记录和照片记录。

g) 最后进行数据整理, 分析明矾对废弃泥浆 A 各性能指标的影响及废弃泥浆泥水分离的明矾最佳加量值。

#### (2) 电动脱水试验步骤

a) 试验时, 先从极距大的水平组合开始试验, 准备试验器材及用品, 将试验器材擦拭干净。

b) 将各试验设备连接成简易电极装置, 不插电源。其中, 要将两个石墨电极沿着玻璃槽宽度方向布置在玻璃槽的两个底角处, 并将玻璃棒与连接石墨电

极的导线固定在一起, 以便于固定石墨电极的位置。

c) 用烧杯量取一定体积的搅拌均匀的废弃泥浆 A 到玻璃电极槽中, 然后根据第三章絮凝脱水试验的方法对废弃泥浆 A 进行明矾初步絮凝脱水处理(分层作用), 体系分层后, 分阶段将上层清液排掉, 这样便得到了大含水量的泥。

d) 按照正交试验方案中的试验水平组合, 将预先连接好的简易电渗装置接通电源, 通过石墨电极给大含水量的泥加上稳压电场。先进行电流  $I$  为 1 A、极距  $D$  为 28 cm、时间为 6 h 的一组试验。认真观察泥体系的宏观物理变化, 并监测和记录电极间的电压  $U$  及监测时间段内的排水量  $V$ 。

e) 第一组试验完成后, 再根据正交试验方案的水平组合改变电流  $I$  和石墨电极距离  $D$  的大小, 依次做完各组试验, 并完整记录各组试验的资料。

f) 进行试验数据整理分析, 得到分离大含水量泥的最佳电压  $U$ 、电极距离  $D$ 、分离时间  $T$  等关键参数, 并分析各因素对分离速率的影响规律。

## 4. 试验结果分析与讨论

### 4.1. 絮凝试验结果分析

按照以上试验方案和实验步骤, 利用明矾做絮凝剂对废弃泥浆进行初步的絮凝沉降, 以固液分离面

作为研究对象，记录固液分离面在试验过程中一定时间内沉降层厚度，从而研究废弃泥浆泥水分离的速度。进一步得出絮凝剂明矾与废弃泥浆体系作用的效果。固液分离面沉降层厚度随时间变化如图 3 所示。

根据图 4 可知，利用明矾做絮凝剂初步处理泥浆进行泥水分离，效果明显，分离程度满足下一阶段试验要求。同时，上清液酸碱度由强碱性变为弱碱性。

絮凝剂加入量不同，对废弃泥浆的影响程度也不相同。本试验明矾加入量范围为 0~24 g，共分为 9 组试验。得到 4 h 后上清液高度、比重、pH 值和明矾加入量的关系曲线分别如图 4、图 5、图 6 所示。

从图 4 中明显可以看出，曲线的变化是一直递增的，而增加的趋势可以分为三个阶段，第一阶段是变化比较平缓，第二阶段则变化最快，第三阶段变化最平缓，基本不变。对应着第三阶段曲线的明矾加量就可以认为是最佳明矾加量。即当明矾加量达到 21 g 时，明矾对废弃泥浆体系的絮凝功效已接近最大；当达到 24 g 时，明矾对体系的絮凝功效就基本不变了。因此，室内试验中，明矾的最佳加量是 21 g。

从图 5 和图 6 中的曲线分析可知，体系中的 pH 值的变化趋势和上层清液的比重变化趋势是随着明矾加量的增加而减小的。在明矾加量接近 24 g 时，体系的 pH 值在不断接近 7.0 和体系中上层清液的比

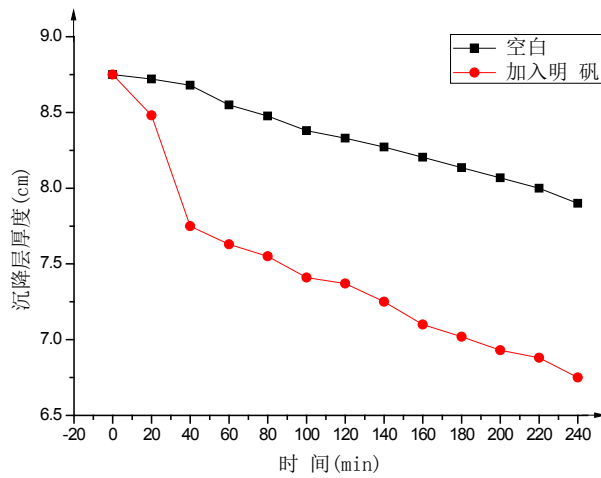


Figure 3. Settling curve

图 3. 沉降曲线

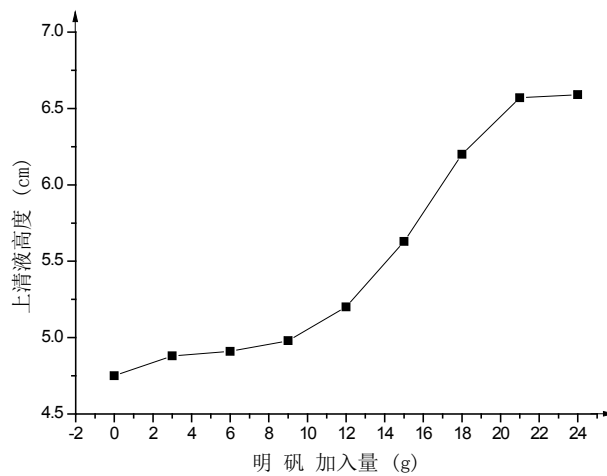


Figure 4. The relationship between the amount of alum and the height of supernatant fluid

图 4. 上层清液高度与明矾加入量的关系

重在不断接近于纯净水的比重，体系由碱性在不断接近中性而且上层清液中的微粒浓度也在不断减少。当明矾加量为 24 g 时，体系为弱碱性，清液基本为清水。此时，如果再向体系中加入明矾，则只能增加体系中明矾的浓度，对体系的分离起不到任何作用了。

#### 4.2. 电动脱水试验分析

按照电动脱水正交试验方案及步骤，进行试验。试验过程中，通过稳压稳流电源控制监测极距间的电压  $U$ 、电流  $I$  和量测一定时间间隔的排水量  $V$ 。得到脱水结果如表 3 所示。

试验过程中对比发现，试验前后，大含水量泥的表观变化很大。大含水量泥在一定状态的电场作用下，由流动状态的土变成了可塑状态的土了，且可塑性强。这说明其含水量显著降低。试验不考虑交互作用影响，只将累计排水率作为试验指标。累计排水率是指排出水的体积占絮凝沉降排出上清液后体系中含水体积。利用方差分析法对以上正交试验结果进行分析，各因素对累计排水量的影响及其变化趋势如图 7~10 所示。

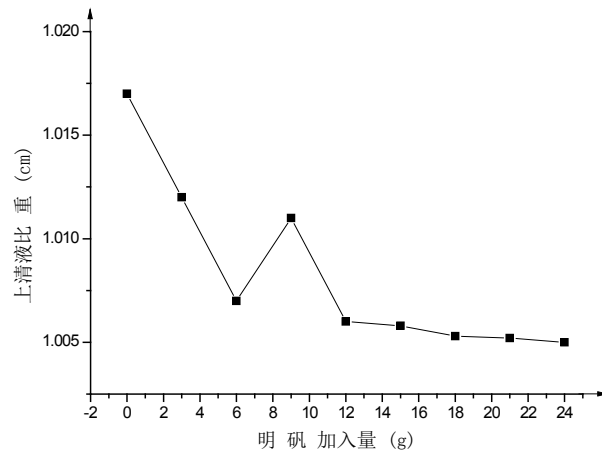


Figure 5. The relationship between the amount of alum and the proportion of supernatant fluid

图 5. 上层清液比重与明矾加入量的关系

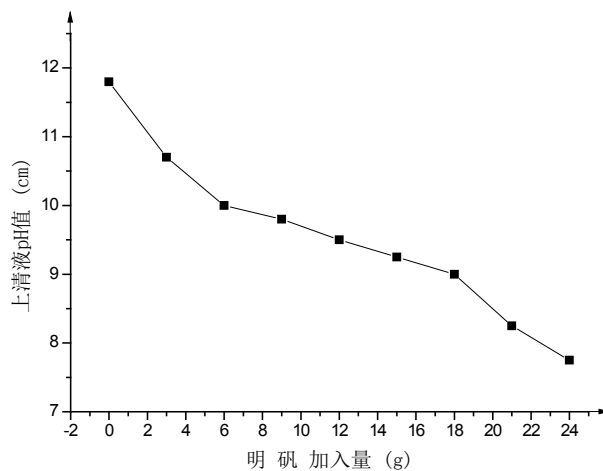


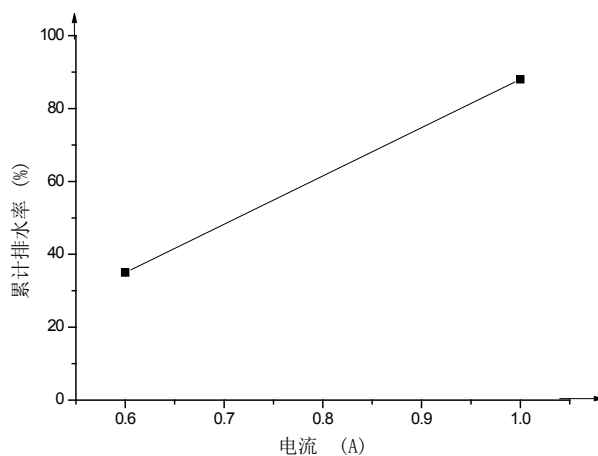
Figure 6. The relationship between the amount of alum and the pH value of supernatant fluid

图 6. 上层清液 pH 值与明矾加入量的关系



**Table 3.** The electric dehydration orthogonal results  
**表 3.** 电动脱水正交试验结果

试验次数	因素				电极间电压 U (V)	累计排水率 P (%)	
	电流 I (A)	极距 D (cm)	时间 T (h)				
1	1 (0.6)	1 (11)	1	1 (1.5)	1	13.0	37.4
2	1 (0.6)	2 (14)	2	2 (3.0)	2	14.2	50
3	1 (0.6)	3 (21)	3	3 (4.5)	3	17.1	34
4	1 (0.6)	4(28)	4	4 (6.0)	4	21	36.5
5	1 (0.6)	1 (11)	2	3 (4.5)	4	14.3	83.1
6	1 (0.6)	2 (14)	1	4 (6.0)	3	15.7	88.7
7	1 (0.6)	3 (21)	4	1 (1.5)	2	16.7	17
8	1 (0.6)	4 (28)	3	2 (3.0)	1	19.9	20
9	2 (1.0)	1 (11)	3	4 (6.0)	2	45	17.5
10	2 (1.0)	2 (14)	4	3 (4.5)	1	13.6	14.6
11	2 (1.0)	3 (21)	1	2 (3.0)	4	21.1	61.6
12	2 (1.0)	4 (28)	2	1 (1.5)	3	28.5	31
13	2 (1.0)	1 (11)	4	2 (3.0)	3	19.7	10.4
14	2 (1.0)	2 (14)	3	1 (1.5)	4	14.3	61.6
15	2 (1.0)	3 (21)	2	4 (6.0)	1	26	11.5
16	2 (1.0)	4 (28)	1	3 (4.5)	2	30	76.2



**Figure 7.** The influence of current level changes on the test index  
**图 7.** 电流水平变化对试验指标的影响

上述电动脱水试验采用单指标混合型正交试验原理的试验设计方法。在试验设计及分析过程中，没有考虑因素交互作用的影响，只设置了一个描述试验效果的量累计排水率  $P$ 。试验设计中，选取的参数有电流  $I$ 、极距  $D$  和时间  $T$ 。经过分析对比，有如下结论：

(1) 在试验因素中，电流  $I = 1 \text{ A}$  为电流的优水平；另外两个因素的优水平分别为： $D1 = 11 \text{ cm}$ 、 $T4 = 6 \text{ h}$ 。故三个因素的最优水平组合为  $I2D1T4$ ，即试验研究得到的最优工艺为电流值  $I = 1 \text{ A}$ 、电极距离  $D = 11 \text{ cm}$

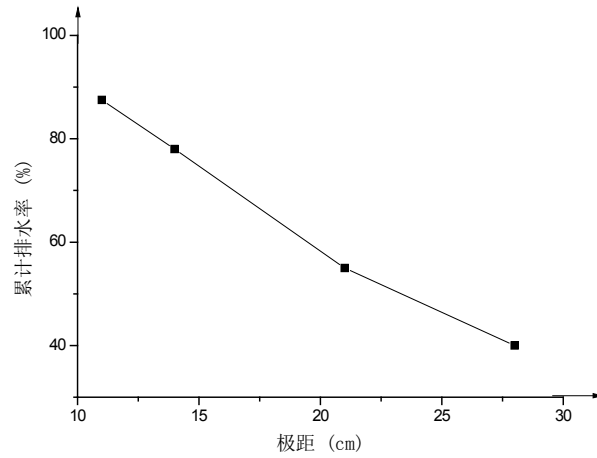


Figure 8. The influence of electrode distance changes on the test index

图 8. 极距水平变化对试验指标的影响

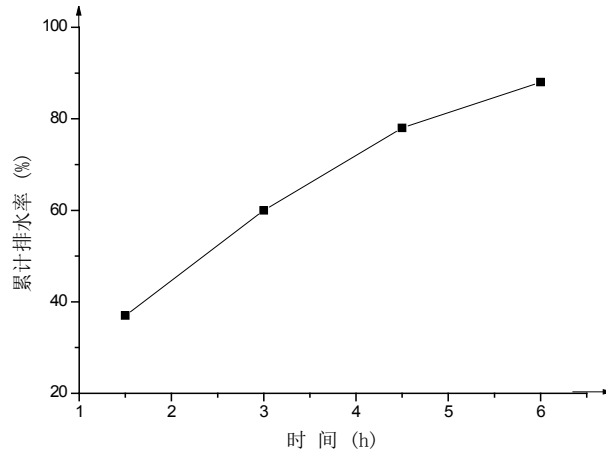


Figure 9. The influence of the function time changes on the test index

图 9. 作用时间对试验指标的影响

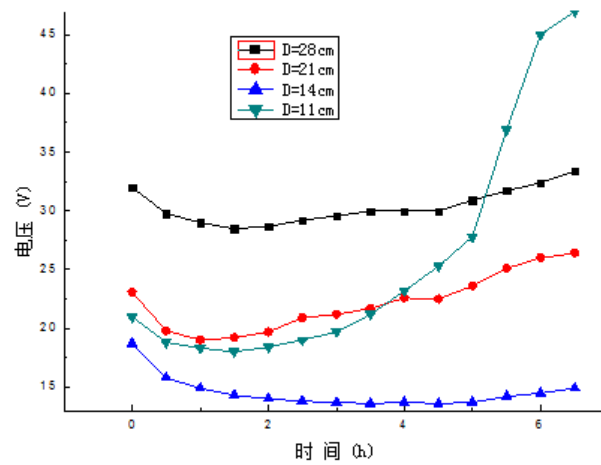


Figure 10. The instantaneous voltage curve in the 1 A current

图 10. 电流为 1 A 时瞬时电压变化曲线

和作用时间  $T=6\text{ h}$ 。

(2) 对于絮凝聚沉后土体, 土体的电流值  $I$  的变化对土体两端瞬时电压的影响同样是符合欧姆定律变化关系的, 而且土体电流值的变化对瞬时电压变化曲线的形状也有显著影响。

(3) 随着极距  $D$  的增大, 一般电压先加速下降再逐渐上升, 呈现下凸曲线先递减再递增的趋势。当极距达到  $14\text{ cm}$  时, 土体两端的瞬时电压达到最低点, 瞬时电压变化在此时处于“瞬时平稳”的状态, 然后又开始递增。

(4) 土体两端电极间的瞬时电压随着试验时间的增加一般会先从初值减小, 然后再逐渐增加。

## 5. 结论

本文以室内试验研究为基础, 分析了废弃泥浆的基本组分和组成结构, 试验了一种絮凝与电动脱水组合处理方法对废弃泥浆的处理效果。本文得到的主要结论有:

(1) 试验中, 明矾最佳加量为  $24\text{ g/L}$ 。此时分层体系的 pH 值接近  $7.0$ , 体系为弱碱性, 上层清液比较清澈。

(2) 明矾加量对废弃泥浆体系絮凝脱水快慢的作用机理: 随着明矾加量的均匀增加, 明矾絮凝作用下体系中胶体粘粒聚结沉淀增加的数量呈现先缓慢增加, 中间快速增加和最后又缓慢增加的趋势, 同时对应着  $vG\text{-}Y$  的变化趋势是先缓慢减小、中间快速减小到最后又缓慢减小。

(3) 根据正交试验  $R$  法对试验结果的分析可知: 在试验因素电流  $I$  的两个水平中,  $I=1\text{ A}$  为电流的优水平; 另外两个因素的优水平分别为:  $D1=11\text{ cm}$ 、 $T4=6\text{ h}$ 。所以, 三个因素的优水平组合为  $I2D1T4$ , 即试验研究得到的最优工艺为电流值  $I=1\text{ A}$ 、电极距离  $D=11\text{ cm}$  和作用时间  $T=6\text{ h}$ 。

(4) 电渗试验中, 对于大含水量的土体, 土体的电流值  $I$  的变化对土体两端瞬时电压的影响同样是符合欧姆定律变化关系的, 而且土体电流值的变化对瞬时电压变化曲线的形状也是有影响的。

(5) 随着极距  $D$  的增大, 一般电压先加速下降再逐渐上升, 呈现下凸曲线先递减再递增的趋势。当极距达到  $14\text{ cm}$  时, 土体两端的瞬时电压达到最低点, 瞬时电压变化在此时处于“瞬时平稳”的状态, 然后又开始递增。

(6) 土体两端电极间的瞬时电压随着试验时间的增加一般会先从初值减小, 然后再逐渐增加。

## 参考文献 (References)

- [1] 耿朋飞, 孙林柱 (2014) 泥浆压滤脱水复合絮凝剂的实验研究. *武汉理工大学学报*, **36**, 118-112.
- [2] 洪蔚 (2011) 铁路桥梁施工废弃泥浆处理技术试验研究. 中国铁道科学研究院, 北京.
- [3] 刘勇健 (2000) 废泥浆固液分离的正交试验研究. *探矿工程*, **6**, 12-14.
- [4] 洪蔚, 侯世全 (2009) 钻孔废弃泥浆处理管理要求综述. *铁道劳动安全卫生与环保*, **36**, 264-265.
- [5] Shang, H. (2006) Microwave treatment of oil-contaminated North Saedrill cuttings in a highpower multimode cavity. *Separation Purification Technology*, **49**, 84-90.
- [6] 张旺达, 姜晓宏, 张春萍 (2000) 泥浆护壁成孔施工工艺探讨. *交通科技与经济*, **2**, 38-40.