

# 地铁施工废弃泥浆处理试验研究

师雯洁<sup>1</sup>, 程文<sup>1</sup>, 任立志<sup>2</sup>, 张豆<sup>1</sup>, 胡德华<sup>2</sup>, 段景川<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地 陕西 西安 710048;

2. 中国电建集团铁路建设有限公司 北京 100044)

**摘要:** 为了研究地铁施工废弃泥浆快速泥水分离性能,提高分离效率,降低泥浆处理成本,采用化学絮凝的方法,以黏土泥浆为对象,分析了絮凝剂类型、投加量和搅动对絮凝效果的影响。结果表明:在每 50 mL 泥浆中,投加聚丙烯酰胺 0.02 ~ 0.03 g,煤灰粉约 0.03 g,搅拌速度 400 ~ 450 r/min,搅拌时间 240 ~ 270 s,泥浆的絮凝效果达到最佳。该处理方法可有效降低泥浆处理工作量,缩短泥浆处理周期,在节省成本的同时可以产生较好的社会效益。

**关键词:** 废弃泥浆;絮凝;聚丙烯酰胺;煤灰粉;废弃泥浆处理

中图分类号:X705 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2017)01-0141-05

## Experimental study on treatment of waste slurry in subway construction

SHI Wenjie<sup>1</sup>, CHENG Wen<sup>1</sup>, REN Lizhi<sup>2</sup>, ZHANG Dou<sup>1</sup>, HU Dehua<sup>2</sup>, DUAN Jingchuan<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Power China Railway Construction Co., LTD, Beijing 100044, China)

**Abstract:** In order to research the rapid mud-water dehydration properties of waste slurry generated by the construction of subway, to improve the efficiency of the separation, and to reduce the cost of slurry treatment, chemical flocculation method was used in this research to analyze the effects of flocculant type, dosing quantity and agitation on flocculation efficiency of clay slurry. The results showed that, the flocculation effects of slurry was best when adding 0.02 - 0.03 g of polyacrylamide, 0.03g of coal ash at stirring speed of 400 - 450 r/min and stirring time of 240 - 270 seconds in 50 mL slurry. The treatment method can effectively reduce the amounts of slurry treatment, shorten the slurry treatment cycle, save the cost and produce more social benefits.

**Key words:** waste slurry; flocculation; polyacrylamide; coal ash; treatment of waste slurry

## 1 研究背景

地铁施工过程中通常采用钻孔灌注桩基或者地下连续墙的施工方式,这需要采样泥浆进行护壁,即通过泥浆产生的静压力防止槽壁坍塌,同时降低钻头温度也可以带出成槽过程产生的渣土<sup>[1]</sup>。但是,施工过程,尤其是施工结束后会产生大量的废弃泥浆。这类泥浆以黏土和水为主要成分,同时含有大量矿物,有一定黏度,是比较稳定的分散系,具有胶体和悬浮体的性质,其中颗粒大小在 2 - 10 $\mu\text{m}$  之间,因此很难自然沉降<sup>[2]</sup>。在施工现场只能建大量

泥浆池,将废弃泥浆存储,再逐步处理,但是地铁施工现场多多在市区,有的还位于繁华的商业及交通地带,泥浆池的存在不仅占用了宝贵的施工场地,而且影响了施工进度和现场环境,同时收集起来的泥浆不可能长期存放,施工方一般会委托给第三方进行处理。但往往有不专业的第三方公司将泥浆运到郊外甚至在市区排水沟非法排放,造成土地污染、管网堵塞及水土流失等一系列的环境问题,这也是建筑、环卫和环境执法部门密切关注的环境违法问题<sup>[3]</sup>。因此,寻找一种高效率、低成本而且环保的废弃泥浆处理措施和工艺是非常迫切的。

收稿日期:2016-10-24; 修回日期:2016-11-30

基金项目:陕西省水利科技计划资助项目(2014slkj-12); 广东省水利科技创新资助项目(2015-06); 中国电建集团科技项目(2014610002000071)

作者简介:师雯洁(1993-),女,陕西西安人,硕士研究生,研究方向为固体废物处理及综合利用。

通讯作者:程文(1968-),女,陕西西安人,博士,教授,博士生导师,从事水处理原理与技术、多相流及流体可视化等领域的教学和科研工作。

目前国内外对施工废弃泥浆的处理方法主要有以下几种:(1)自然沉淀法<sup>[4]</sup>。将泥浆收集起来之后自然沉淀,不加药剂,处理成本低,但是处理周期长,占地大。适用于量少污染小的泥浆;(2)化学固化法<sup>[5]</sup>。加入化学药剂,使泥浆固化,能迅速处理大量泥浆,但处理成本高,后期处置复杂,适合污染物成分复杂且含量高的泥浆,在油田钻井泥浆及化工厂泥浆的处理中常用;(3)土地耕作处理<sup>[6]</sup>。处理方式简单,但是容易对土壤造成污染,具有潜在风险,适合处理污染物含量低的泥浆;(4)化学絮凝加机械脱水<sup>[7]</sup>。对原泥浆加入絮凝剂,先进行固液分离,对分离后的浓缩泥浆再采用机械脱水的方式进行二次处理。这种方法处理量大,对环境污染小,在实际中应用较广,是最有前景的一种泥浆处理方式。

对于化学絮凝加机械脱水这种泥浆处理方式而言,选择一种合适的絮凝剂及处理条件,能迅速有效地使泥浆泥水分离以便后续处理,显得至关重要。现在常用的絮凝剂主要有无机絮凝剂、有机絮凝剂和生物絮凝剂<sup>[8]</sup>。这些絮凝主要是为水处理过程中污染物絮凝沉淀或者是为了活性污泥脱水而研发,对于以无机成分为主的施工废弃泥浆是否有良好絮凝效果,国内外研究成果并不多见。

本文以地铁维护结构施工过程中产生的废弃泥浆为对象,用几种常见絮凝剂进行脱水试验,研究多种操作条件对絮凝效果的影响,并在此基础上提出有效的泥浆处理工艺。

## 2 材料与方法

### 2.1 泥浆来源及性质

试验所用泥浆来自深圳地铁七号线上沙站连续墙施工现场,泥浆类型为黏土泥浆,呈现浅黄色,分散性好,含水率高。泥浆基本理化性质见表1。

表1 泥浆理化特性

| 泥浆来源 | 相对密度/<br>( $g \cdot cm^{-3}$ ) | 胶体率/<br>% | pH  | 含水率/<br>% | 黏度/<br>s ( $mm \cdot min^{-1}$ ) | 沉速/<br>( $mm \cdot min^{-1}$ ) |
|------|--------------------------------|-----------|-----|-----------|----------------------------------|--------------------------------|
| 上沙站  | 1.07                           | 65        | 8.9 | 78        | 12.06                            | 0.56                           |

由表1可见,该类型泥浆呈碱性,相对密度略高于水,胶体率高,由于分散性好,因此自然沉降速度比较慢,说明在自然状态下要达到泥水分离需要很长时间。这一点从图1,即泥浆的粒度分布图可以看出。由图1表明,泥浆的颗粒粒径主要分布在1~100  $\mu m$ 之间,占比86.6%;100~200  $\mu m$ 之间粒径的颗粒占4.7%;200  $\mu m$ 以上粒径的颗粒占8.7%。一般而言,泥浆粒径大于15  $\mu m$ 的颗粒可以通过自然沉淀的方式实现泥水分离进而去除;但是粒径小于15  $\mu m$ 的泥浆颗粒,由于分散性很好很难通过静置分离的方法去除<sup>[9]</sup>,而上沙站的泥浆中这一部分粒径泥浆约占40.0%,其在自然状态下很难实现泥水分离,只有加入絮凝剂,使得泥浆微小颗粒能发生絮凝沉淀,才能达到泥水分离的目的。

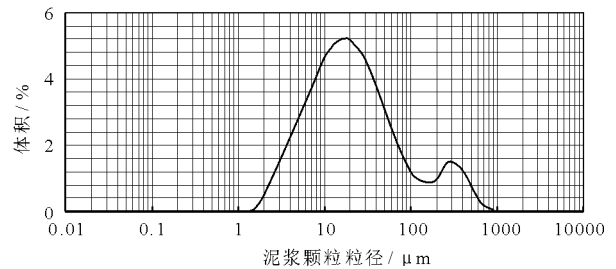


图1 上沙站泥浆的粒径分布

### 2.2 试验仪器和方法

通过比较泥浆絮凝前后上清液所占体积的大小,判断得出絮凝效果。絮凝后液体所占比例越高,说明泥水分离效果越好。

泥浆的粒径通过激光衍射法测定,仪器型号为马尔文2000;含水率测定采用烘干法;黏度用涂四杯测定;浓缩泥浆风干后用电镜扫描其表面形态,分析其外观特征,电镜型号为JSM-6700F。

## 3 试验结果及讨论

### 3.1 最佳絮凝剂的选择

取12个烧杯,依次编号1#-12#,用量筒准确量取50 mL待测泥浆,依次加入各烧杯。其中,1#烧杯作为空白不加任何絮凝剂,其它烧杯分别加入一种或者两种絮凝剂组合,见表2。

表2 各编号烧杯投加絮凝剂的种类

| 1#    | 2#    | 3#    | 4#    | 5#  | 6#  | 7#  | 8#            | 9#            | 10#         | 11#         | 12#         |
|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|---------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| 不加絮凝剂 | 聚丙烯酰胺 | 聚合氯化铝 | 聚合氯化铁 | 高岭土 | 煤灰粉 | 硅藻土 | 聚丙烯酰胺 + 聚合氯化铝 | 聚丙烯酰胺 + 聚合氯化铁 | 聚丙烯酰胺 + 高岭土 | 聚丙烯酰胺 + 煤灰粉 | 聚丙烯酰胺 + 硅藻土 |

试验过程中,各种絮凝剂投加方式均为固体投加,一边缓慢加入絮凝剂一边搅拌。待泥浆中絮体开始出现时,减缓絮凝剂投加量,搅拌继续进行,直到矾花大量出现再停止搅拌,待各烧杯泥水完全分离后,静置 30 min,量取上清液的量,即可得到浓缩泥浆的量。试验过程中同时记录从加药搅拌到絮体开始出现的时间。每组试验做 3 次,最终数据取 3 次的平均值。使用不同絮凝剂对泥浆处理后浓缩泥浆所占比例见图 2。

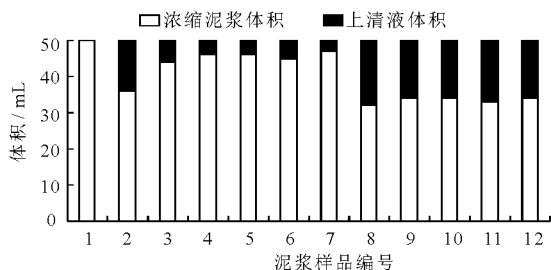


图2 泥浆絮凝结果

从试验结果可以发现,单一絮凝剂的处理效果不如复合絮凝剂,无机+有机絮凝剂联合处理的泥水分离效果均优于单一絮凝剂的处理效果。单一絮凝剂中各类无机絮凝剂对泥浆的处理效果均不理想,原泥浆中分离的上清液体积最多 6 mL;而单纯使用有机絮凝剂聚丙烯酰胺(阴离子),泥浆的絮凝效果比较好,约有 14 mL 的上清液产生。使用复合絮凝剂对泥浆进行处理,泥水分离效果均比较好,产生的上清液体积约为 18 mL,其中以聚丙烯酰胺(阴离子)+聚合氯化铝和聚丙烯酰胺(阴离子)+煤灰粉这两种处理方式效果最佳(8#和11#样品)。从处理成本的角度考虑,聚合氯化铝价格要高于煤灰粉,因此在这种泥浆的处理过程中宜采用聚丙烯酰胺(阴离子)+煤灰粉作为絮凝剂。

### 3.2 絮凝剂最佳用量的选择

3.2.1 聚丙烯酰胺最佳投加量 为了定量研究絮凝剂最佳投加量,取 6 个烧杯,分别加入 50 mL 待测泥浆,再加入不同量的聚丙烯酰胺(阴离子)。一边加入絮凝剂一边搅拌,先缓慢搅拌,待絮体开始出现时快速搅拌,直到泥水分离完成,静置 30 min 后,准确量取上清液的体积,比较不同投加量泥浆的絮凝效果,见图 3。

由图 3 可以看出泥浆的絮凝效果不是随着聚丙烯酰胺(阴离子)投加量的增加而不断提升,投加量增加达到一定程度后,泥浆絮凝效果会随着投加量的再增加而变差。本次实验中,50 mL 泥浆加入

0.02~0.03 g 聚丙烯酰胺时,絮凝效果最好,约有 15 mL 的上清液产生;而当投加量增加到 0.06 g 时,只产生了不到 10 mL 的上清液。

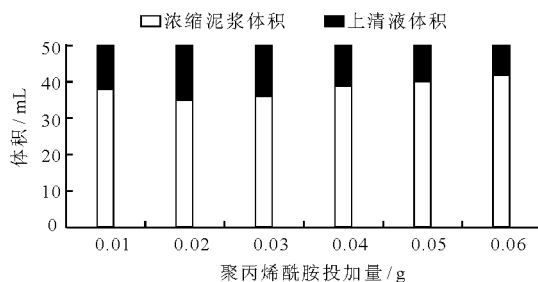


图3 聚丙烯酰胺最佳投加量试验结果

3.2.2 复合絮凝剂最佳投加量 为了研究复合絮凝剂对泥浆的处理效果,取 12 个 50 mL 烧杯,分别加入 50 mL 待分析泥浆。将 12 个烧杯分为两组,第一组先加入 0.02 g 聚丙烯酰胺(阴离子),再加入不同量煤灰粉粉末。第二组先加入不同量煤灰粉粉末,再分别加入 0.02 g 聚丙烯酰胺(阴离子)。所有絮凝剂的加入过程中都需要搅拌,待泥水分离完成后,静置 30 min,然后量取泥浆上清液体积。分析研究絮凝剂投加顺序和煤灰粉投加量对泥浆絮凝效果的影响。实验结果见图 4。

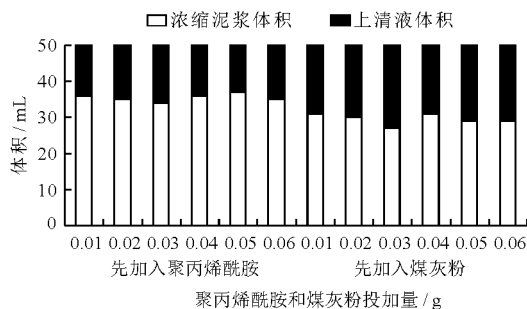


图4 复合絮凝剂最佳投加量试验结果

从图 4 可以看出,絮凝剂的投加顺序对泥浆的絮凝有比较明显的影响。先投加煤灰粉的一组泥浆泥水分离效果明显优于先加入聚丙烯酰胺(阴离子)的一组泥浆。在先加入聚丙烯酰胺(阴离子)的一组泥浆中,再 0.03 g 煤灰粉时,泥浆絮凝效果最佳,产生了大约 16 mL 上清液,即有约 32% 的泥浆完全泥水分离;在先加入煤灰粉再加聚丙烯酰胺的一组泥浆中,同样加入 0.03 g 煤灰粉,产生了大约 23 mL 的上清液,即有大约 46% 的泥浆完全泥水分离,说明先加入适量粉煤灰再加入适量聚丙烯酰胺(阴离子)可以显著提高泥浆的泥水分离效果。

### 3.3 搅动对泥浆絮凝结果的影响

搅拌一方面使絮凝剂溶解更加迅速,另一方面

絮凝剂在泥浆中分布更加均匀,泥浆颗粒与絮凝剂分子有更多接触机会,有利于泥浆实现泥水快速分离。本节研究了不同搅拌强度和搅拌时间下,泥浆絮凝状况。

3.3.1 搅拌强度对絮凝效果的影响 取8个50 mL烧杯,并分别加入50 mL待测泥浆,根据3.1和3.2的试验结果,往各个烧杯中分别加入0.02 g聚丙烯酰胺(阴离子)和0.03 g煤灰粉,设置不同的搅拌速度,研究泥浆的絮凝效果。待泥水分离完成后,静置30 min,然后量取泥浆上清液体积。实验结果见图5。

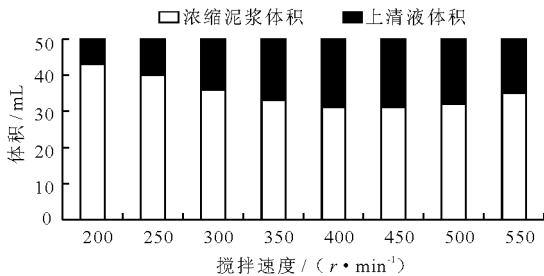


图5 搅拌速度对絮凝效果的影响

搅拌对泥浆的絮凝效果也有重要影响,一方面适度的搅拌加快了絮凝剂的溶解和泥浆小颗粒与絮凝剂接触的机会,能加速絮凝;另一方面,过度的搅拌可能破坏泥浆絮凝结构,使絮凝的大颗粒絮体重被破碎,从而影响了泥浆絮凝效果<sup>[10]</sup>。从图5可知,搅拌速度在400~450 r/min时,泥浆的絮凝效果最好,产生的上清液最多,约有近20 mL上清液产生,即约有40%的泥浆完全泥水分离。

3.3.2 搅拌时间对絮凝效果的影响 取8个50 mL烧杯分别加入50 mL待测泥浆,根据以上试验结果,往各个烧杯中分别加入0.02 g聚丙烯酰胺(阴离子)和0.03 g煤灰粉,搅拌速度为450 r/min,设置不同的搅拌时长研究其对泥浆絮凝效果的影响。待泥水分离完成后,静置30 min,然后量取泥浆上清液体积。实验结果见图6。

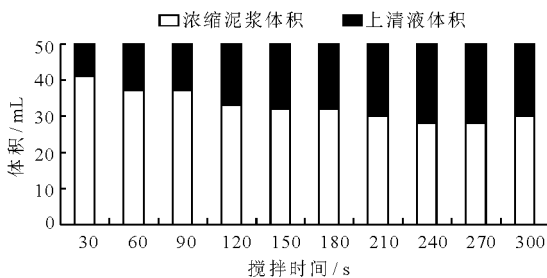


图6 搅拌时间对泥浆絮凝的影响

搅拌时间也会对泥浆的絮凝效果产生影响。合理的搅拌时间,加速了泥浆和絮凝剂碰撞结合,也就促使泥浆更快地絮凝,但是搅拌时间太长,也会再次破坏絮体结构,阻碍泥浆的进一步絮凝。因此,在实践中也要合理控制搅拌的时长。本研究发现,在搅拌开始到240 s之内,随着搅拌时间的延长,泥浆的絮凝结果越来越好,搅拌时间超过270 s之后,泥浆的絮凝效果反而变差,说明最佳搅拌时长应该在240~270 s之间,在这期间,絮凝剂和泥浆小颗粒完全接触,而没有破坏絮体。

## 4 讨论

从以上实验可见,对上沙站黏土泥浆而言,采用聚丙烯酰胺(阴离子)和煤灰粉复合絮凝剂在一定条件下可以有效进行絮凝处理。投加量为每50 mL泥浆投加聚丙烯酰胺(阴离子)0.02~0.03 g,煤灰粉0.03 g左右;投加方式为固体投加,先加入煤灰粉再加入聚丙烯酰胺(阴离子);同时还需要适度的搅拌,以加速泥浆的絮凝过程,快速实现泥水分离。按此方式对泥浆絮凝之后,浓缩泥浆为原泥浆的60%~70%,大约30%~40%的泥浆彻底泥水分离,泥浆减量化明显,大大降低了后续处理量。同时,浓缩后的泥浆絮体大而且密实,便于进一步压缩处理。

经过絮凝之后,浓缩泥浆粒径有了显著变化。小粒径颗粒比例降低,大粒径泥浆颗粒比例显著提高。结果见图7。

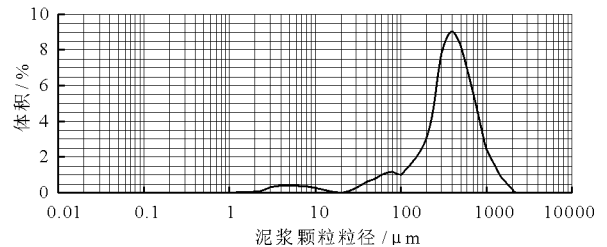


图7 泥浆絮凝后粒径分布

由图7可见,泥浆中小于15 μm的细小颗粒占比从絮凝前的40%降至絮凝后的2%;而200 μm以上的大颗粒占比从絮凝前的9%升至絮凝后的82%。可见,经过絮凝之后泥浆中小颗粒团聚成大颗粒效果明显。

聚丙烯酰胺(PAM)作为一种典型的高分子有机絮凝剂,其主要作用机理为<sup>[11]</sup>:(1)压缩双电层。PAM加入后形成与反离子同电荷离子,产生压缩双电层作用,使 $\zeta$ 电位降低,使泥浆颗粒失去稳定性,

从而絮凝。(2) 吸附架桥作用<sup>[12]</sup>。PAM 分子链固定在不同的颗粒表面上,各颗粒之间形成聚合物的桥,使颗粒形成聚集体而沉降。(3) 表面吸附作用<sup>[13]</sup>。PAM 分子上的极性基团( -CONH<sub>2</sub> )的各种吸附能力,能使絮凝颗粒进一步融合,从而在重力作用下沉淀。(4) 沉淀网捕。PAM 分子链与分散相通过各种机械、物理、化学等作用,将分散相牵连在一起,形成网状链接,实现聚沉。

本研究中,煤灰粉的加入能显著提升絮凝效果。一方面,煤灰粉在泥浆溶液中电离产生带正电荷的物质与黏土泥浆颗粒(带负电)产生电中和效应;另一方面水解过程中生成具有高电化学特性的多核羟基金属络合盐类,这些物质通过离子间的吸附-架桥产生二次结合,形成聚合物,进一步促进了泥浆的絮凝,浓缩泥浆颗粒表面电镜扫描结果见图 8。

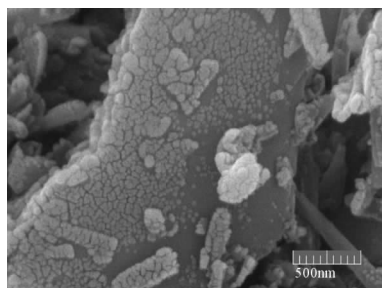


图 8 浓缩泥浆颗粒表面形态

将絮凝过的浓缩泥浆自然风干后在电子显微镜下扫描发现,泥浆颗粒表面附着一层细小物质,将泥浆颗粒包裹起来,这可能是络合盐类干燥后在泥浆颗粒表面的附着物。这些络合盐类在泥浆体系中通过电中和、表面吸附等作用为泥浆胶体的脱稳絮凝产生了重要的作用。

## 5 结 论

针对黏土泥浆的絮凝实验研究发现,采用聚丙烯酰胺(阴离子)和煤灰粉作为絮凝剂,在一定条件下对此类废弃泥浆有良好的絮凝效果。

(1) 在实验室条件下,采用固体粉末投加方式,在废弃泥浆中先投加煤灰粉再加入聚丙烯酰胺(阴离子),投加量为每 50 mL 泥浆投加聚丙烯酰胺加

0.02 ~ 0.03 g,煤灰粉约 0.03 g;并在投加过程中以 400 ~ 450 r/min 的搅拌速度搅拌 240 ~ 270 s,能对这种泥浆有较好的絮凝效果,泥浆脱水效率能达到 30% ~ 40%。明显地实现了废弃泥浆的减量化,降低了后续处理负荷。

(2) 泥浆的絮凝是聚丙烯酰胺(阴离子)和煤灰粉共同作用的结果,同时操作条件,如搅拌时间、搅拌速度、投加顺序等对泥浆的絮凝效果也有明显的影响。通过浓缩泥浆的电镜扫描照片发现,在泥浆颗粒表面附着一层细小物质,这可能是各种络合盐类的结晶。

## 参考文献:

- [1] 郑玉辉. 浅谈地下连续墙施工中弃浆的净化和处理[J]. 西部探矿工程, 2008, 20(9): 63 - 64.
- [2] 席社. 铁路桥梁施工废弃泥浆处理的实用技术研究[J]. 铁道标准设计, 2012(7): 132 - 134.
- [3] 答治华, 李刚, 刘建华, 等. 铁路桥梁钻孔灌注桩施工泥浆处理设备的研制[J]. 铁道工程, 2009(10): 30 - 32.
- [4] 李耀良, 王建华, 丁勇春, 等. 上海地铁明珠线二期西藏南路站地下连续墙施工技术[R]. 岩土工程学报, 2006, 28(Z1): 1664 - 1672.
- [5] 韩多学. 泥水盾构结构中泥浆处理及循环系统的设计与应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2011(33).
- [6] 吴龙华, 汪宇, 谢鑫, 等. 高速铁路施工废弃泥浆处理试验研究[J]. 新技术新工艺, 2011(5): 96 - 98.
- [7] 何文锋, 邓美龙, 白晨光, 等. 地铁车站施工废弃泥浆处理方法[J]. 施工技术, 2012, 41(24): 83 - 86.
- [8] 赵风华, 王怀民. 泥沙聚沉剂及泥水分离技术成功应用[J]. 军民两用技术与产品, 2010, 14(3): 36 - 40.
- [9] 罗序燕, 武斌, 彭鹏. 聚丙烯酰胺类絮凝剂的分子设计与应用研究[J]. 广州化工, 2011, 39(7): 10 - 12.
- [10] 刘建华, 侯世全, 李刚, 等. 废弃泥浆无害化处理技术研究进展[J]. 铁道劳动安全卫生与环保, 2009, 36(1): 10 - 12.
- [11] 张钦喜, 陶韬, 王晓杰, 等. 钻孔灌注桩废弃泥浆处理的试验研究[J]. 水力学报, 2015, 46(增刊1): 40 - 45.
- [12] 刘智峰, 崔剑锋, 蒋勇兵, 等. 絮凝剂对打桩废弃泥浆的处理研究[J]. 山西建筑, 2015, 41(22): 181 - 183.
- [13] 王瑶, 白昭. 废弃钻井泥浆处理对策研究[J]. 安徽农学通报, 2015, 21(17): 80 - 81 + 114.