

武汉地区建筑废弃泥浆泥水分离试验研究

郑亮^{1,2}, 刘晓烨^{*3}, 潘希军^{1,2}, 郁红飞², 李关雄², 李煜坤³, 郭宇潮³, 穆庆岚³

(1.湖北省城市地质工程院,湖北武汉430050; 2.武汉地质勘察基础工程有限公司,湖北武汉430050;
3.江汉大学工业烟尘污染控制湖北省重点实验室,湖北武汉430056)

摘要:针对武汉地区不同地层、不同工艺产生的建筑工程废弃泥浆,通过光谱仪分析了其主要化学成分,并通过过滤、真空抽滤、离心以及不同絮凝剂的正交试验,以上清液浊度和清液率为主要指标对废弃泥浆泥水分离效果进行评价。试验发现:废弃泥浆固相颗粒以有机质为主;采用过滤方式取得的清液浊度较低,但清液率较少;采用真空抽滤方式处理废弃泥浆可以获得较多的上清液;采用离心方式能处理除含特细颗粒外的多数废弃泥浆;正交试验表明阳离子絮凝剂(PAM)处理废弃泥浆效果较好。

关键词:废弃泥浆;泥水分离;浊度;清液率;过滤;离心;絮凝;建筑工程

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)08-0110-08

Experiment on separation of mud and water from construction waste mud in the Wuhan area

ZHENG Liang^{1,2}, LIU Xiaoye^{*3}, PAN Xijun^{1,2}, YU Hongfei²,
LI Guanxiong², LI Yukun³, GUO Yuchao³, MU Qinglan³

(1.Hubei Institute of Urban Geological Engineering, Wuhan Hubei 430050, China;
2.Wuhan Geological Survey Foundation Engineering Co., Ltd., Wuhan Hubei 430050, China;
3.Hubei Key Laboratory of Industrial Fume and Dust Pollution Control, Jiangnan University,
Wuhan Hubei 430056, China)

Abstract: The main chemical components of construction engineering waste mud produced by different formations and different processes in the Wuhan area were analyzed by spectrograph, and the separation effect of waste mud was evaluated by orthogonal tests of filtration, vacuum filtration, centrifugation and different flocculants with the turbidity and clear liquid rate as the main evaluation indexes. The results showed that the waste mud was mainly composed of organic substance; the filtrate obtained by filtration had lower turbidity but less clear liquid rate; more supernatant could be obtained by vacuum filtration; most of the waste mud except for ultra-fine particles could be treated by centrifugation; the orthogonal test showed that better effect was obtained with cationic flocculant (PAM) treating waste mud.

Key words: waste mud; separation of mud and water; turbidity; clear liquid rate; filtration; centrifugation; flocculation; construction engineering

0 引言

钻孔灌注桩、地下连续墙等建筑工程施工时会

产生大量的废弃泥浆,这些泥浆多为稳定的胶体形态,自然静置很难沉淀分离。通常会采用机械压

收稿日期:2020-11-09; 修回日期:2021-05-06 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.08.017

作者简介:郑亮,男,汉族,1986年生,工程师,长期从事桩基及基坑施工技术管理工作,湖北省武汉市汉阳区江城大道298号湖北地勘企业总部大楼,401930991@qq.com。

通信作者:刘晓烨,男,汉族,1985年生,讲师,环境工程专业,博士,从事污染治理与综合利用技术研究与应用工作,湖北省武汉市经济技术开发区三角湖路8号江汉大学J13D206,1024xiaoye@163.com。

引用格式:郑亮,刘晓烨,潘希军,等.武汉地区建筑废弃泥浆泥水分离试验研究[J].钻探工程,2021,48(8):110-117.

ZHENG Liang, LIU Xiaoye, PAN Xijun, et al. Experiment on separation of mud and water from construction waste mud in the Wuhan area[J]. Drilling Engineering, 2021,48(8):110-117.

滤、旋流离心和添加絮凝剂等方法进行泥水分离^[1-3],但较多的研究主要集中在单一泥浆类型,并未对泥浆处理效果进行量化评价。建筑废弃泥浆主要由有机质和无机物组成,重金属和非金属有害物质含量非常少^[4],悬浮固体浓度(SS)、悬浮颗粒携带污染物(COD)、总氮(TN)及总磷(TP)等污染物排放指标随着浊度增加而增加^[5],故此对废弃泥浆颗粒进行处理,可以减少污染物通过径流方式排入附近

水域,对保护地表水体有着重要的意义。因此本试验的要点是依据清液浊度和清液率为主要指标,寻求对废弃泥浆颗粒处理的最佳方式。

1 样品来源及其主要地层性状

选取武汉地区工程实践中不同地层类型、不同施工工艺的4个泥浆样品来进行试验。泥浆均从泥浆池返浆口处取得,样品主要特征见表1。

表1 各泥浆样品的主要特点

Table 1 Main characteristics of mud samples

样品编号	地层主要特征	返浆颜色	泥浆形式	施工机械	来源项目
1	粉质粘土+粉细砂	青灰色	200目纳基膨润土配置	旋挖钻机	武汉古田路某项目
2	粉质粘土	黄褐色	200目纳基膨润土配置	旋挖钻机	武汉公正路某项目
3	粉质粘土	棕褐色	地层粘土自然造浆	冲击钻机	武汉白沙洲某项目
4	粉质粘土+粉砂	青灰色	200目纳基膨润土配置	成槽机	武汉汉正街某项目

2 废弃泥浆基本物理和化学性质

采用NB-1型泥浆密度计、1006型泥浆粘度计、NA-1型泥浆含砂量测定仪、PH-10型pH计及DT-300型电位仪测定泥浆的基本物理性质,见表2。

表2 各泥浆样品的物理特性

Table 2 Physical properties of mud samples

样品编号	密度/ (g·cm ⁻³)	粘度/ s	含砂率/ %	pH值	表面电位/ mV
1	1.010	16.25	0.01	12.28	-21.9
2	1.031	17.80	0.05	10.07	-22.5
3	1.227	20.17	5.83	8.45	-22.6
4	1.080	18.73	2.40	12.24	-21.1

将泥浆样品混匀后,取100 mL放入真空干燥箱中,60 °C下烘干,碾碎,并放入鼓风干燥箱中110 °C干燥2 h。将干燥泥浆粉末进行压片,并放入Rigaku Primus II型XRF荧光光谱仪中进行分析^[6]。分析结果见表3。

建筑废弃泥浆主要成分以粉砂、粘土颗粒等无机物为主^[7],本次分析主要为泥浆固相颗粒中各元素成分占比(原子序数>9的元素,不含清液中固相颗粒)。由表3可以看出,各泥浆固相成分样品中无机元素占比为20%左右,元素成分、种类和含量基本一致,其中Si含量较大,占10%左右,其次是Al,

占4%左右,再者为K、Ca,各占2%以内;有机成分占80%左右,主要为含有机质成分的土壤颗粒^[8]。

3 废弃泥浆处理

由于建筑废弃泥浆中含有大量的水分,如何采取行之有效的方式来将泥水分离,实现水资源的循环利用是本研究的主要目的。清液率越高、清液浊度越低,分离后的水质就越好。其中清液率主要为泥水分离后上清液的体积占比;清液浊度为上清液中颗粒物浓度的一种表征形式。旋流除砂可以去除40~74 μm的固相颗粒,离心机可以去除2~44 μm的固相颗粒^[9],不同设备对不同粒径颗粒处理效果不一。因此,本文主要通过物理与化学药剂方式对废浆进行处理,旨在寻找高效、合适的废浆处理方法,为大规模废浆处理工艺提供试验基础。对于处理效果指标,采用粒度范围较难衡量,故采用处理时间、清液率、清液浊度这几个较直观的指标来表示。

3.1 废弃泥浆自由沉降及抽滤处理

3.1.1 自由沉降对泥浆的处理效果

将泥浆放入沉降柱中进行72 h的自由沉降,采用WZS-185A型浊度仪测定浊度,其结果见图1。

泥浆样品2和样品3沉降速度慢,泥水分离状况不佳,但测得其上清液的散射浊度较低,在100 NTU内,清液可循环利用。样品1和样品4的泥浆沉降性能较好,清液率分别为60%和41%左右,但

表3 废浆样品中固相组分元素成分

元素	样品编号			
	1	2	3	4
F	未检出	未检出	未检出	0.1074
Na	0.3468	0.3112	0.1683	0.36
Mg	0.7185	0.4301	0.3445	0.6262
Al	4.544	4.3157	4.2768	3.9020
Si	10.4693	12.2736	12.0196	10.11
P	0.0462	0.0302	0.0384	0.0416
S	0.0342	0.0179	0.0111	0.0352
Cl	0.0289	0.0321	0.0233	0.0123
K	1.0743	1.0641	0.851	0.9402
Ca	1.4752	0.8585	0.2412	1.8933
Ti	0.1852	0.1833	0.1721	0.1629
V	未检出	0.0057	0.0033	0.0068
Cr	0.0053	0.0062	0.0051	0.0047
Mn	0.0353	0.0203	0.031	0.0313
Fe	1.7879	1.5813	1.237	1.3441
Co	未检出	未检出	0.0016	未检出
Ni	0.0032	0.0026	0.0027	0.0028
Cu	0.0022	0.0019	0.0016	0.0018
Zn	0.0051	0.0047	0.0031	0.0041
Ga	0.0008	0.0010	未检出	未检出
As	0.0007	0.0014	0.0008	0
Rb	0.0051	0.0058	0.0039	0.0046
Sr	0.0068	0.0054	0.003	0.0091
Y	0.0009	0.0015	0.0013	0.0021
Zr	0.0069	0.0062	0.0090	0.0055
Nb	0.0014	0.0016	0.0007	0.0007
Mo	0.002	0.0004	未检出	未检出
I	0.0162	0.0133	未检出	未检出
Ba	0.0278	0.0232	未检出	0.0251
Pb	未检出	未检出	未检出	0.0040
U	未检出	0.0019	未检出	未检出
Th	0.0014	未检出	未检出	未检出
有机质	79.1684	78.7989	80.5496	80.3622

样品1的清液浊度较大,为300 NTU。

3.1.2 重力过滤对泥浆的处理效果

4个泥浆样品原水浊度均大于1000 NTU,对50 mL混匀后的泥浆废水通过103慢速定性滤纸进行过滤,其结果见表4。

从重力过滤处理效果上看,4个泥浆样品的处理效果都较为理想,处理后的清液浊度极低,均不超

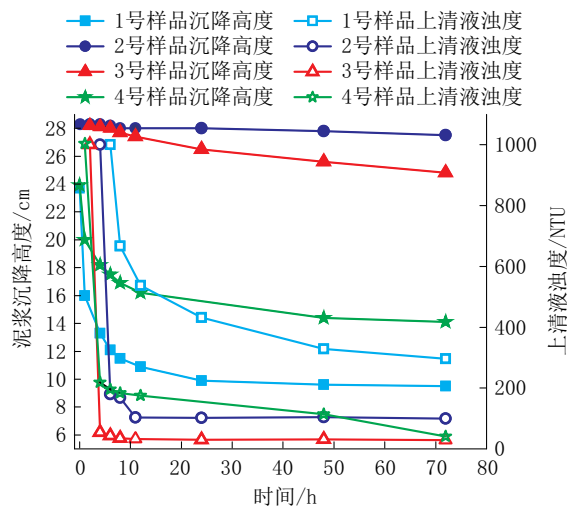


图1 各泥浆样品自然沉降结果

Fig.1 Settlement results of mud samples

表4 各泥浆样品过滤处理结果

Table 4 Filtration results of mud samples

样品编号	过滤时间/min	滤液量/mL	过滤效率/(mL·min ⁻¹)	清液率/%	滤液浊度/NTU
1	112	37	0.33	74	2.18
2	330	18	0.05	36	3.17
3	280	10	0.04	20	9.20
4	90	28	0.31	56	1.45

过10 NTU,说明1 μm以下的颗粒占比较低,泥水分离非常好。从过滤效率上看,样品1和样品4明显优于样品2和样品3,但总体速度都偏慢,不适合工业规模处理。

3.1.3 真空抽滤对泥浆的处理效果

由于工业上常采用压滤机进行泥水分离^[10],因此利用真空抽滤的方式模拟压滤机对泥浆样品进行处理。4个泥浆样品原水浊度均大于1000 NTU,对50 mL混匀后的泥浆废水进行真空抽滤处理,滤纸为103定性滤纸,其结果见表5。

表5 各泥浆样品真空抽滤结果

Table 5 Vacuum filtration results of mud samples

样品编号	过滤时间/min	滤液量/mL	过滤效率/(mL·min ⁻¹)	清液率/%	滤液浊度/NTU
1	4.0	45	11.25	90	28.2
2	3.5	-	-	-	-
3	7.0	15	2.1	30	55.1
4	4.3	41.5	9.7	83	29.0

从真空抽滤结果来看,样品2由于泥浆颗粒较细,堵塞了滤纸空隙,使得抽滤时压力过大,将滤纸损毁,无法进行真空抽滤处理。其他3个样品处理效果较为理想,清液浊度均未超过50 NTU。

从处理清液率上分析,样品1和样品4的泥浆减量可达80%以上,说明对于这2个样品而言,虽然处理后水浑浊度比自然过滤略高,但对于泥浆的减量和泥水分离效果非常好,并且相比重力过滤,抽滤速率也非常快,若利用大型生产设备,效果会更加理想。因此对于1、4号泥浆而言,抽滤处理对于泥浆的减量和处理效率是比较好的选择。而对于2、3号泥浆而言,则不适宜利用抽滤进行处理。

3.1.4 机械离心对泥浆的处理效果

机械离心也是工业上常采用的泥水分离方式,主要采用离心机^[11]、旋流器^[12],针对建筑泥浆,采用离心机的方式进行处理。对于15 mL混匀后的泥浆废水进行4000 r/min、10 min离心处理,处理效果见图2。样品2效果不理想,泥水分离不充分,清液浊度>1000 NTU,超过设备量程,而且清液率<5%。分析原因,由于样品2采用旋挖钻机施工,其地层主要为粉质粘土,施工中泥浆的蒙脱石膨润土损耗较少^[13],使得其含有较多粒径<2 μm的颗粒,不易离心分离^[14]。

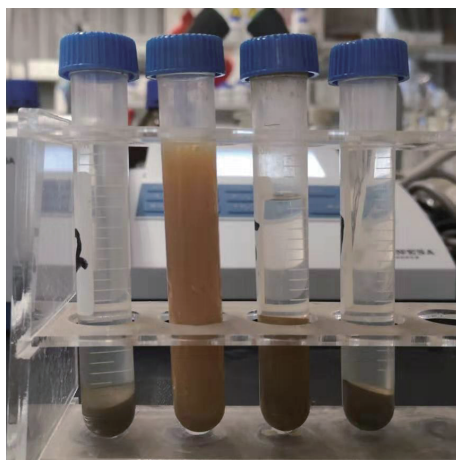


图2 各泥浆样品离心处理效果

Fig.2 Mud samples after centrifugal treatment

对于样品1,在4000 r/min、1 min就可以让泥浆的浊度降到150 NTU以下,清液率>75%;5 min的处理效果较好,泥浆浊度可下降到50 NTU以下,清液率可达到接近90%。对于2000 r/min而言,效果

稍差,需要10 min左右,浊度可降到100 NTU以下,清液率在80%左右。因此对于泥浆样品1而言,机械离心的最佳参数为4000 r/min、5 min,见图3。

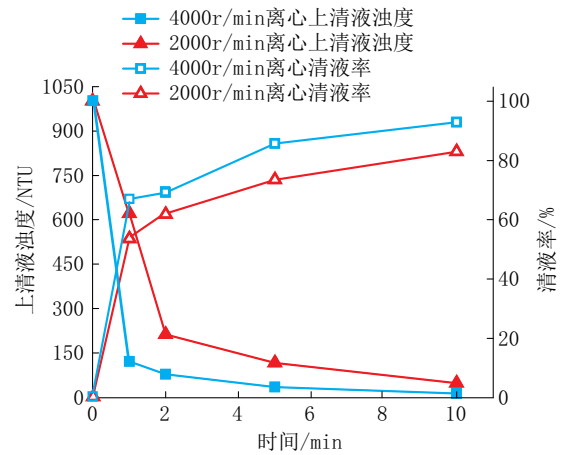


图3 样品1离心试验结果

Fig.3 Centrifugation results of Sample 1

对于样品3,4000 r/min、5 min的处理效果也较好,可以让泥浆的浊度降到100 NTU左右,但清液率较低,接近40%;4000 r/min、10 min的处理效果较好,清液率50%以上。对于2000 r/min而言泥浆处理效果不佳,10 min离心处理泥浆浊度仍接近300 NTU,清液率仅略大10%。说明离心对泥浆样品3处理效果虽好,但处理量不够大,对于泥浆的减量效果不明显,结果见图4。

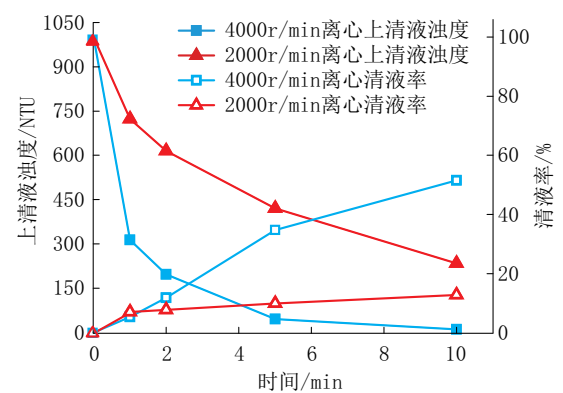


图4 样品3离心试验结果

Fig.4 Centrifugation results of Sample 3

对于样品4,跟样品1处理效果基本一致,4000 r/min、5 min的处理效果就可使泥浆的浊度降到50 NTU,清液率在85%左右;2000 r/min、5 min的处理效果也较好,但清液率在60%左右,对泥浆减量

效果不太理想。2000 r/min、10 min处理对泥浆的减量有所提升,清液率接近80%。因此对于4号泥浆而言最佳处理参数为4000 r/min、5 min,见图5。

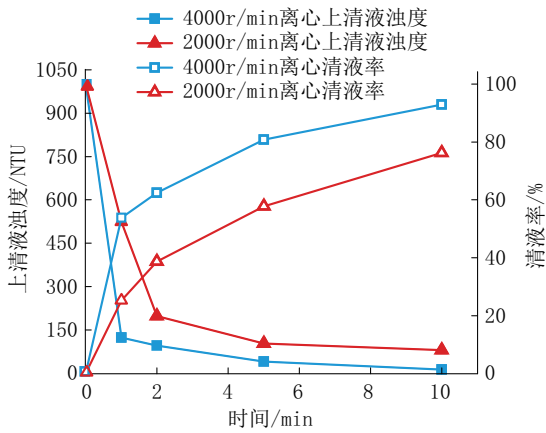


图5 样品4离心试验结果

Fig.5 Centrifugation results of Sample 4

综合分析,对于样品2和样品3而言,利用低速离心方式的处理效果不理想,虽然样品3经过4000 r/min、10 min的处理效果较好,但对泥浆减量效果较差,处理量不够大。对于样品1和样品4,离心效果比较显著,最佳参数为4000 r/min、5 min,处理后浊度均可下降到50 NTU左右,清液率接近90%。4000 r/min、10 min就可保证泥浆清液率在90%以上,减量效果明显。

3.2 废弃泥浆的絮凝正交试验

3.2.1 有机絮凝剂对泥浆废水处理正交试验结果及分析

由于自然沉降效果不够理想,而通过泥浆成分分析得知泥浆中有机质的含量较大,宜采用有机絮凝剂进行絮凝沉淀,加强沉降效果后,再联合机械处理进行泥水分离效果会更好。因此,采用聚丙烯酰胺高分子絮凝剂(简称PAM)进行正交试验^[15]来选出最佳试验参数。

PAM分子式为 $(C_3H_5NO)_n$,常用PAM分为阳离子、阴离子和非离子3种类型,主要在水溶后通过接枝或交联得到支链或网状结构来对液相中颗粒物进行捕集,使其团聚沉降形成絮凝作用,由于该絮凝剂性能优越,工业上常用于水处理、石油开采、造纸、医用、纺织等领域。本文选用常用的阳离子、阴离子和非离子3种类型的PAM絮凝剂进行处理废浆,所有絮凝剂的浓度配置为5%,试验方案见表6^[16],

为满足正交实验方案完整性,增设D、E两列空列。试验结果见表7。

表6 PAM絮凝剂沉降试验方案(L₄⁵)

Table 6 PAM flocculant settlement test scheme

水平	A 样品	B 絮凝剂种类	C 5%絮凝剂 用量/%	D (空 列)	E (空 列)
1	1	阳离子(1200万分子量)	0.5	1	1
2	2	阴离子(1200万分子量)	1	2	2
3	3	非离子(500万分子量)	3	3	3
4	4	阳离子(1200万分子量)	6	4	4

分析正交试验数据极差,对于泥浆清液率指标而言,影响因素最大的是泥浆种类,样品1最容易沉降;再者就是絮凝剂种类,阳离子絮凝剂处理效果最好,该结论与于真真^[17]、丁光亚等^[18]的研究结果一致;最后是絮凝剂用量,3%为最佳用量。因此对于清液率来说,最佳参数为样品1,5%的阳离子絮凝剂用量为3%。对于清液浊度指标而言,影响因素最大的是絮凝剂的浓度,3%的浓度比例下,清液的浊度最低;其次是泥浆种类,也同样是样品1的清液率较低,最后是絮凝剂种类,但絮凝剂种类极差比空列极差还低,说明絮凝剂种类对浊度的影响不大。

3.2.2 阳离子絮凝剂单因素试验及结果分析

对正交试验进行综合分析,对于4种泥浆样品,选择5%的阳离子絮凝剂,浓度3%的效果是最佳的。为验证正交试验所得最佳参数,取4种泥浆样品各500 mL,采用阳离子絮凝剂,在不同浓度条件下进行单因素试验。

对于样品1而言,试验显示加入30 mL絮凝剂时,清液率为30.8%,浊度为27.0 NTU,清液浊度较低,效果好,见图6。

对于样品2而言,试验显示加入30 mL絮凝剂时,清液率为23.7%,浊度为429 NTU,清液浊度较大,但清液率较高,见图7。

对于样品3而言,试验显示加入15 mL絮凝剂时,清液率为4.82%,浊度为5.44 NTU,清液浊度较低,但清液率较少,见图8。

对于样品4而言,试验显示加入15 mL絮凝剂时,清液率为25.3%,浊度为38.1 NTU,清液浊度低,清液率尚可,见图9。

表7 PAM絮凝剂沉降正交试验结果与分析

Table 7 Results and analysis of PAM flocculant settlement orthogonal test

试验号	A	B	C	D	E	试验方案	清液率/%	浊度/NTU
1	1	1	1	1	1	A1B1C1	29.1	357.0
2	1	2	2	2	2	A1B2C2	7.3	142.2
3	1	3	3	3	3	A1B3C3	37.3	116.1
4	1	4	4	4	4	A1B4C4	34.6	23.5
5	2	1	2	3	4	A2B1C2	0.0	>1000.0
6	2	2	1	4	3	A2B2C1	0.0	>1000.0
7	2	3	4	1	2	A2B3C4	0.0	>1000.0
8	2	4	3	2	1	A2B4C3	27.4	64.8
9	3	1	3	4	2	A3B1C3	2.2	26.7
10	3	2	4	3	1	A3B2C4	7.3	96.7
11	3	3	1	2	4	A3B3C1	2.3	>1000.0
12	3	4	2	1	3	A3B4C2	2.2	>1000.0
13	4	1	4	2	3	A4B1C4	24.9	55.3
14	4	2	3	1	4	A4B2C3	16.4	69.0
15	4	3	2	4	1	A4B3C2	19.0	28.5
16	4	4	1	3	2	A4B4C1	23.4	550.0
k1		27.0	14.0	13.7	11.9	20.7		
k2		6.9	7.7	7.1	15.5	8.2		
k3		3.5	14.6	20.8	17.0	16.1		
k4		20.9	21.9	167.0	13.9	13.3		
极差R(k)		23.5	14.2	13.7	5.1	12.5		
因素主次						A>B>C		
优方案						A1B4C3		
k1		159.7	359.8	726.8	606.5	136.8		
k2		766.2	327.0	542.7	315.6	429.7		
k3		530.9	536.2	69.2	440.7	542.9		
k4		175.7	409.6	293.9	269.7	523.1		
极差R(k)		606.5	209.2	657.6	336.8	406.1		
因素主次						C>A>B		
优方案						C3A1B2		

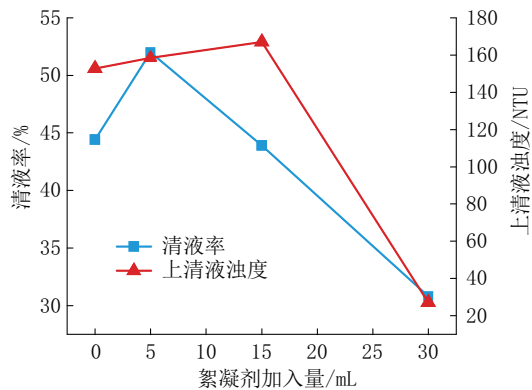


图6 样品1絮凝剂浓度影响试验

Fig.6 Effect of flocculant concentration on Sample 1

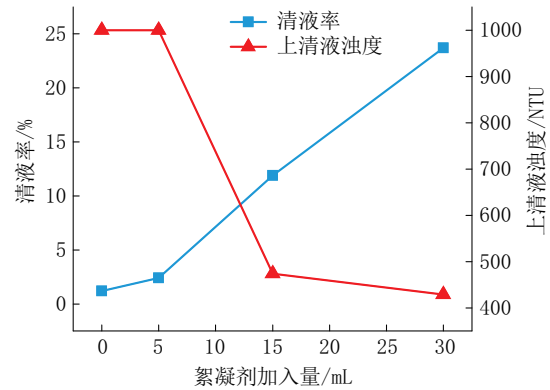


图7 样品2絮凝剂浓度影响试验

Fig.7 Effect of flocculant concentration on Sample 2

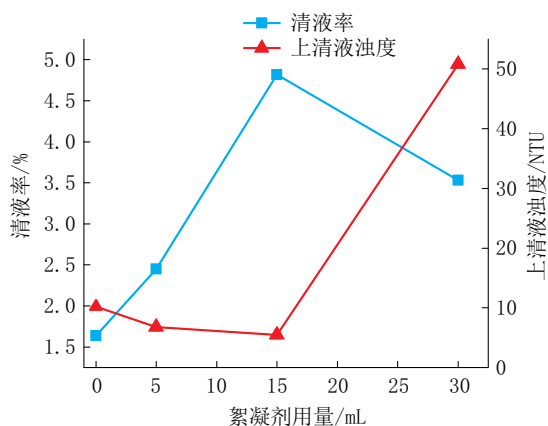


图8 样品3絮凝剂浓度影响试验

Fig.8 Effect of flocculant concentration on Sample 3

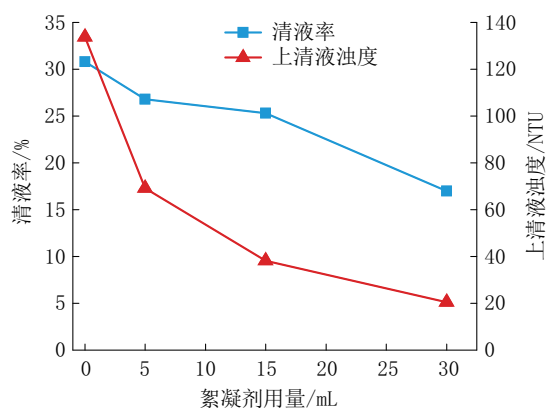


图9 样品4絮凝剂浓度影响试验

Fig.9 Effect of flocculant concentration on Sample 4

综上所述,对于样品1、样品2来说,每500 mL泥浆样品加入5‰阳离子絮凝剂的量为30 mL最佳,对于样品3、样品4来说,每500 mL泥浆样品加入5‰阳离子絮凝剂的量为15 mL最佳。

4 结语

不同的处理方式,对不同类型建筑废弃泥浆的处理效果是不同的,工程应用中需要采取针对性的一种或多种方法组合。

通过试验分析,得出的主要结论有:

(1)武汉地区建筑废弃泥浆除去15 μm以上颗粒后,其固相主要成分为有机质,约占80%,无机成分中Si占比较大,约10%,各泥浆样品的元素成分种类和含量差别不大。

(2)采用过滤方式取得的清液浊度较低,采用抽滤方式处理废弃泥浆可以获得较多的上清液,整

体来看,过滤和抽滤方式针对粘土颗粒较少、砂颗粒较多、颗粒物粒径较大的废弃泥浆效果比较明显。

(3)采用低速离心方式能够有效进行多数废弃泥浆的泥水分离,但颗粒物粒径较小的、含有较多膨润土或蒙脱石矿物的废弃泥浆不宜采用低速离心方式进行泥水分离。

(4)通过正交试验和单因素试验,利用阳离子絮凝剂(PAM)处理废弃泥浆效果较好,但对于不同类型的泥浆,其最佳配比还需要通过试验确定。

参考文献(References):

- [1] 张统得,蒋炳,严君凤.地质钻探废弃冲洗液污染特性及脱稳技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):134-139.
ZHANG Tongde, JIANG Bing, YAN Junfeng. Research on pollution characteristics and destabilization technology of waste drilling fluid in geological drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):134-139.
- [2] 何玉云,王发民,瞿兵,等.宁夏宁东地区废弃冲洗液无害化处理技术初步研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(5):17-21.
HE Yuyun, WANG Famin, ZI Bing, et al. Preliminary study on harmless treatment of waste drilling fluid in the Ningdong area of Ningxia [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(5):17-21.
- [3] 周庆,黄伟钧,卢烈听.CaO添加顺序对废弃泥浆絮凝效果的影响[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(7):77-83.
ZHOU Qing, HUANG Weijun, LU Lieting. Effect of addition order of CaO on flocculation effect of waste slurry [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(7):77-83.
- [4] 徐佩佩.建筑泥浆高效综合脱水技术研究[D].南京:东南大学,2015.
XU Peipei. Study on high efficiency and comprehensive dehydration technique of construction mud [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [5] 刘伟,潘杨,黄勇,等.浊度与悬浮颗粒携带污染物之间的规律研究[J].环境工程,2016,34(6):14-17,22.
LIU Wei, PAN Yang, HUANG Yong, et al. Regularity between turbidity and pollutants carried by suspended particles [J]. Environmental Engineering, 2016,34(6):14-17,22.
- [6] 胡林彦,张庆军,沈毅.X射线衍射分析的实验方法及其应用[J].河北理工学院学报,2004,26(3):83-86,93.
HU Linyan, ZHANG Qingjun, SHEN Yi. Experimental method and application of X-ray diffraction analysis [J]. Journal of Hebei Institute of Technology, 2004,26(3):83-86,93.
- [7] 王罗春,赵由才.建筑垃圾处理与资源化[M].北京:化学工业出版社,2004:120-137.

- WANG Luochun, ZHAO Youcai. Construction Waste Treatment and Resource Utilization[M]. Beijing: Chemical Industry Publishing House, 2004:120-137.
- [8] 丁武泉,何家洪,刘新敏,等.有机质对三峡库区水体中土壤胶体颗粒凝聚影响机制研究[J].水土保持学报,2017,31(4):166-171.
- DING Wuquan, HE Jiahong, LIU Xinming, et al. Effect of organic matter on aggregation of soil colloidal particles in water bodies of Three Gorge Reservoir Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(4):166-171.
- [9] 乌效鸣,蔡记华,胡郁乐.钻井液与岩土工程浆材[M].武汉:中国地质大学出版社,2014:141-147.
- WU Xiaoming, CAI Jihua, HU Yule. Drilling Fluid and Geotechnical Slurry Material[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2014:141-147.
- [10] 张忠苗,房凯,王智杰,等.泥浆零排放处理技术及分离土的工程特性研究[J].岩土工程学报,2011,33(9):1456-1461.
- ZHANG Zhongmiao, FANG Kai, WANG Zhijie, et al. Zero discharge treatment technology for slurry and engineering properties of separated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011,33(9):1456-1461.
- [11] 楼明浩,汪炎法,孔奥.桩基施工泥浆固化处理新技术在某工程中的应用[J].施工技术,2015,44(12):97-100.
- LOU Minghao, WANG Yanfa, KONG Ao. Engineering practice of improved sludge dewatering processing technology for piles construction in a project [J]. Construction Technology, 2015,44(12):97-100.
- [12] 张飞,熊虎林,彭一江,等.岩心钻探中泥浆净化除砂器的研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(8):32-36.
- ZHANG Fei, XIONG Hulin, PENG Yijiang, et al. Application of slurry purifying desander in core drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(8):32-36.
- [13] 朱利中,陈宝梁.有机膨润土在废水处理中的应用及其进展[J].环境科学进展,1998,6(3):53-61.
- ZHU Lizhong, CHEN Baoliang. Application and progress of organic bentonite in waste water treatment[J]. Progress in Environmental Science, 1998,6(3):53-61.
- [14] 刑铁良.亚微米颗粒的离心沉降试验研究[D].上海:华东理工大学,2004.
- XING Tieliang. Study on the separation of sub-micron particle TiO_2 from liquid phase by centrifuge[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2004.
- [15] 王寿红,赵杰伟.泥浆凝集剂凝集机理分析与选择[J].探矿工程,1994(3):38-41.
- WANG Shouhong, ZHAO Jiewei. Analysis and selection of agglutinating mechanism of mud coagulant[J]. Exploration Engineering, 1994(3):38-41.
- [16] 刘勇健.废泥浆固液分离的正交试验研究[J].探矿工程,2000(6):12-14.
- LIU Yongjian. Orthogonal experimental study on solid-liquid separation of waste mud [J]. Exploration Engineering, 2000(6):12-14.
- [17] 于真真.钻井废弃泥浆无害化处理实验研究[D].天津:天津大学,2009.
- YU Zhenzhen. Experimental study on harmless treatment of drilling waste mud[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [18] 丁光亚,孙林柱,张波,等.废泥浆脱水的试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(1):53-56.
- DING Guangya, SUN Linzhu, ZHANG Bo, et al. Experimental study on dehydration of waste mud [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(1):53-56.

(编辑 周红军)