

吹填泥浆沉降特性的室内试验研究

王国锋¹, 杨庆光¹, 李毛毛², 秦文海³

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007;
2. 中国水利水电第十四工程局有限公司, 云南 昆明 650000;
3. 中国建筑第八工程局有限责任公司, 上海 200120)

摘要:为解决吹填泥浆自身沉降时间较长、吹填土地基固结速度较慢等问题,以温州平阳地区泥浆为研究对象,在初始含水率为500%的吹填泥浆中分别加入聚合氯化铝(PAC)、硅酸钠(Na_2SiO_3)、硅酸钠和硅藻土复合试剂,利用搅拌静置沉淀的方法观察泥浆混合液泥水界面高度特性。试验结果表明,泥浆中加入外加试剂与否对泥浆的沉降速度具有明显的影响,且加入混合试剂比加入单一试剂的效果更明显。对比试验结果得知,以质量浓度为5 g/L的硅藻土与15 g/L的 Na_2SiO_3 的组合混凝剂的作用效果最明显,不仅泥浆的沉降速率最快,且最终沉降性能最好。

关键词:吹填泥浆; 混凝沉降特性; 聚合氯化铝; 硅酸钠; 硅藻土

中图分类号: TU411.93

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)02-0008-05

Indoor Experimental Study on the Coagulation-Sedimentation Properties of Hydraulic-Dredged Mud

WANG Guofeng¹, YANG Qingguang¹, LI Maomao², QIN Wenhai³

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. Sinohydro Bureau 14 Co., Ltd., Kunming 650000, China;
3. China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: In view of the flaws of long-delayed settling time of the dredger filling mud and slow consolidation speed of the dredged soil foundation, a research has been carried out, with the slurry in Pingyang area, Wenzhou as the object of study. With the addition of polyaluminum chloride (PAC), sodium silicate (Na_2SiO_3), sodium silicate (Na_2SiO_3) and diatomite composite reagent to the dredger mud with initial water content of 500%, an observation can be made of the height characteristics of mud water interface by adopting mixing static precipitation method. The test results show that the addition of applied reagents in the mud exerts an obvious effect on the sedimentation rate of the mud, with the positive effect of adding mixed reagent more obvious than that by adding single reagent. The results of contrast tests show that the positive effect of the combined coagulant with the mass concentration of 5 g/L and diatomite 15 g/L proves to be the most obvious with the fastest sedimentation rate and the best final settlement performance of the hydraulic-dredged mud.

Keywords: hydraulic-dredged mud; coagulation sedimentation property; polyaluminium chloride (PAC); sodium silicate (Na_2SiO_3); diatomite

收稿日期: 2017-06-26

作者简介: 王国锋(1987-), 男, 浙江杭州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为桩基工程,
E-mail: 814821396@qq.com.

0 引言

近年来,我国对沿海地带许多大面积的围海造陆工程进行了规划并实施。对于土地资源较为紧张的沿海地区(如温州、香港等地),将疏浚淤泥堆场处理和填海造陆有机结合起来,不仅可以减轻近海抛泥弃淤对海洋环境造成的污染,还可以大大降低造陆成本,其经济效益和社会效益均十分显著。

科研工作者们已对细粒土的沉降固结进行了大量研究^[1],并得知带负电的泥浆颗粒在絮凝和沉降过程中易受温度、pH值等外界因素的影响^[2],这些因素都会影响泥浆的沉降规律。由于吹填泥浆的渗透性较差、含水量较高、排水固结较慢^[3-5],导致泥浆的自由沉降性能较差,从而给实际工程带来较多麻烦,如会降低工程效益、破坏生态环境等。因此,加快泥浆的絮凝和沉降过程,在实际吹填过程中具有显著的经济效益和环境效益^[6]。目前,国际上较为先进的解决方法是向其中加入水泥、生石灰等固化剂进行固化处理,这在某种程度上加快了泥浆的沉降速度并改良了土壤性质。但由于这些固化剂不仅成本较高且效果不太理想,很难在实际工程中得到推广和运用^[7]。查询已有文献表明,目前对滨海吹填土絮凝沉降的研究较少,且主要是通过投加铁系、铝系等无机高分子试剂或者聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM)等有机高分子试剂,以加快吹填土的絮凝沉降速度。而以硅藻土和 Na_2SiO_3 作为复合试剂在吹填土沉降中的应用还未见报道。因此,本试验以温州平阳地区现场采集的吹填土为研究对象,研究投加复合试剂对吹填泥浆混合液沉降性能的影响,以及单投试剂与投加硅藻土和 Na_2SiO_3 复合试剂的效果对比,为复合试剂在吹填泥浆固液分离工程中的应用提供参考依据。

1 试验方法

1.1 试验材料 with 处理

试验用土样取自温州平阳地区。首先,取部分样品在108℃烘箱中烘干,然后测定其含水量。为了模拟现场,取现场地区海水,将海水和土样按照一定的比例调和,配成含水率为500%的泥浆。最后,分别研究不加试剂以及分别加无机聚合氯化铝(polyaluminum chloride, PAC)、硅酸钠(Na_2SiO_3)、硅藻土(diatomaceous earth)和硅酸钠复合试剂共4种情况下的泥浆自重沉降特性。

1.2 试验方法

试验前,将选取的泥样用搅拌器搅拌5 min,以保证其均匀性。然后,取所需土样,加入计算好

的适量海水放入搅拌器中定时搅拌5 min;接下来将搅拌均匀的泥浆倒入1 000 mL量筒中,快速搅拌50下后投入试剂,再缓慢搅拌50下,观察泥浆的沉降速率及现象,并记录好沉降时间和相应的分界面数值。最后,根据试验结果计算沉积土中的物理指标。

2 试验结果与分析

2.1 PAC对泥浆沉降的影响

分别往样品泥浆中投加一定量的PAC,使其添加质量浓度分别为0.05, 0.10, 0.30, 1.00, 3.00 g/L,并与没有添加PAC试剂的原样进行对比试验,观察上层液的浑浊度以及泥水分界面的量筒刻度,所得结果如图1所示。

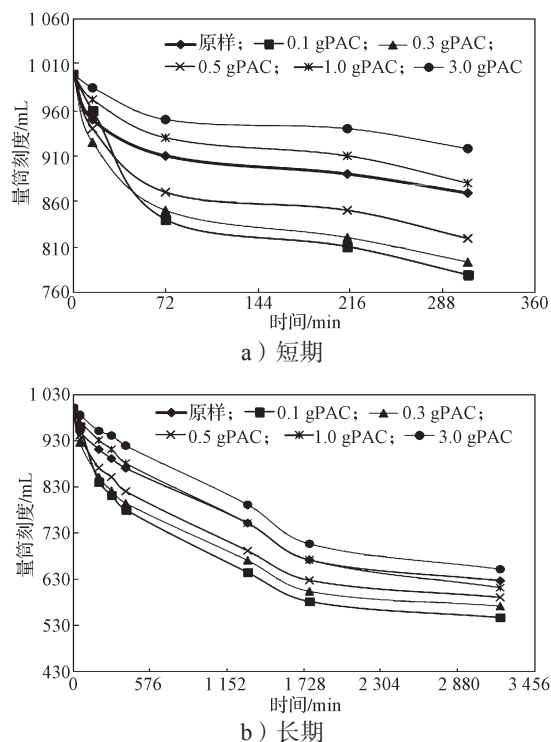


图1 添加不同质量浓度PAC样液与原样的对比沉降试验结果

Fig. 1 Contrast settlement test results of PAC samples and original samples with different mass concentration

由于细颗粒土的颗粒带电,所以在下降过程中不断地互相碰撞、吸引,产生絮凝作用,相互絮凝成大的颗粒集合体——类似絮状结构;絮状结构又相互碰撞吸引,絮凝成更大的絮状结构,从而导致其质量不断增加;当其质量增加到重力大于水的阻力时,颗粒开始下沉,从试验中也可以见到泥水分界面开始下降。泥面保持稳定的阶段称为絮凝阶段,由图1a中原样的沉降曲线可以看出,开始阶段的沉降量很小,保持短暂的稳定。从第15 min起,沉降速度开始加快。

这是因为在阻碍沉降的初始阶段,土的初始骨架还未形成,不能传递有效应力,土颗粒在自重作用下下沉;泥浆发生了阻碍沉降后,沉降速度明显加快。与此同时,下沉至底部的土颗粒开始沉积,逐渐形成土的骨架,并开始传递有效应力;受自重影响,土体中孔压逐渐上升,随着超孔压的消散,土中的自由水流出,土体开始固结沉降,有效应力增加^[8]。当所有土颗粒下沉后,进入完全自重固结状态,从图 1b 中曲线可以看出,在第 3 200 min 时,泥浆的沉降迅速变慢,此后时间对试样的沉降影响不明显。

从图 1 中还可以得知,添加适量 PAC 对于加速泥浆的沉降有显著作用。在添加 PAC 后,泥浆中出现了絮状物,泥水分界面很明显,泥水分界面下降也很明显。当 PAC 的添加质量浓度为 0.10 g/L 时,其作用效果最为明显,在第 1 343 min 时,泥水分界面的刻度值为 643 mL,而同一时间的原样泥水分界面的刻度值为 750 mL。原样泥浆沉降到 643 mL 的时间约为 3 200 min。从图 1b 可以得知,本次投加 PAC 的最佳添加质量浓度为 0.10 g/L。而当 PAC 的添加质量浓度大于 0.10 g/L 时,随着投加试剂量的增加,泥浆沉降速度反而下降。这是由于试剂量小的情况下,因 PAC 混凝剂具网捕架桥作用,可将较小的颗粒不断地吸附在大颗粒上。不仅如此,由于原始颗粒表面带负电荷,它与 PAC 所带的正电荷相互吸引,从而导致粒子之间相互吸引,在这两种因素的影响下,小颗粒不断地组合在一起,从而快速形成较大的絮体,加快了泥浆的沉降。即随着试剂量的不断增加,体系中发生网捕架桥作用和电中和作用的载体不断增加,加速絮体的形成,絮体的碰撞组合使得絮体粒径逐渐增大,加快了沉降速率。但由图可见继续增加投入量,沉降的速率反而减小。这是由于在絮凝过程的初始阶段,在投加了足量 PAC 后,絮体表面的负电荷已完全被 PAC 携带的正电荷中和,当 PAC 投加过量时,小絮体发生了再稳,从而影响了絮体之间的碰撞,阻碍了絮体粒径变大^[9]。所以在短期内要达到较好的沉降效果,本实验条件下 PAC 的最佳添加质量浓度为 0.10 g/L。

2.2 硅藻土对泥浆沉降的影响

为了得到 Na_2SiO_3 的最佳添加质量浓度,分别配置了 4, 6, 10, 15, 19 g/L 的 Na_2SiO_3 溶液和原样进行了对比试验,确定了 Na_2SiO_3 的最佳添加质量浓度为 15 g/L。分别往样品泥浆中投加一定量的 Na_2SiO_3 和硅藻土,得到添加质量浓度分别为 15 g/L 的 Na_2SiO_3 样液、5 g/L 硅藻土和 15 g/L Na_2SiO_3 的混合样液以及 15 g/L 硅藻土和 15 g/L Na_2SiO_3 的混合样液,并将

这些样液与原样进行对比试验,观察其上层液的浑浊度及泥水分界面刻度,所得结果如图 2 所示。

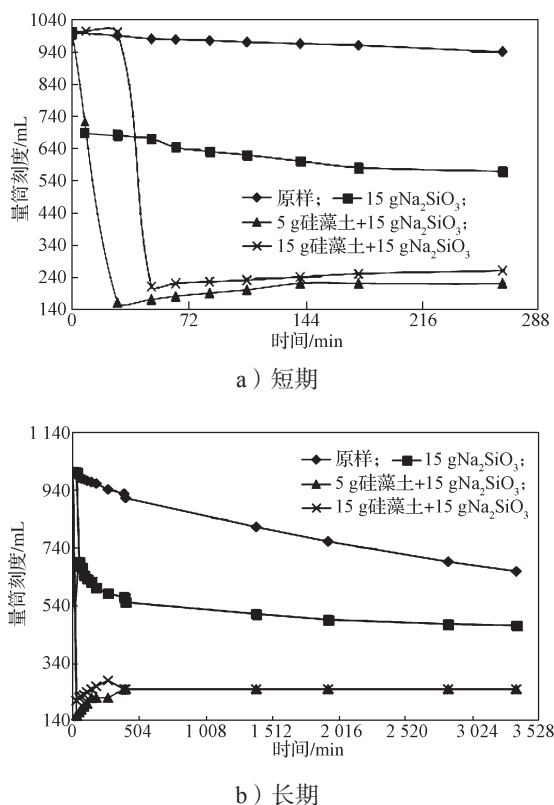


图2 不同质量浓度硅藻土样液与原样的对比试验结果
Fig. 2 Comparison test results of diatomite samples with different mass concentration

试验发现,添加 Na_2SiO_3 后,经过一段时间静置,泥浆很快出现泥水分界面,且下层泥浆壁出现数条不规则横向裂缝,没有裂缝的地方伴有大量气孔。从图 2 所示曲线可看出,原样的沉降比较稳定。添加 Na_2SiO_3 质量浓度为 15 g/L 的试样在第 15 min 时的泥水分界面急剧沉降到 690 mL。不过此时上层混合液的浊度较高,而此时原样的泥水分界面刻度为 980 mL。说明投加 Na_2SiO_3 的沉降效果很显著,比添加 PAC 的效果好很多,在第 15 min 时的沉降量,约为同等时间下添加 PAC 质量浓度为 0.10 g/L 试样的 15.5 倍。造成这一现象的原因为 Na_2SiO_3 是弱酸性,在水溶液中由于其电离作用生成带负电荷的硅酸根。水中的胶粒表面通常是带负电荷的,因此,带负电荷的硅酸对胶体具有吸附架桥作用,这使得胶粒粘连在一起^[10]。但是由于它的效果受 pH 值等多种因素的影响,稳定性较差,单投 Na_2SiO_3 的试样上层混合液比较浑浊,且泥水分界面不够明显。于是在投加 Na_2SiO_3 的基础上复合投入硅藻土。

由图 2 可以得知,硅藻土和 Na_2SiO_3 的联合投加对泥浆的絮凝效果特别明显。在第 28 min,添加

了 5 g/L 硅藻土和 15 g/L Na_2SiO_3 试样的泥水分界面刻度为 160 mL, 其沉降量约为同等时间内原样沉降量的 333.3 倍, 为单独投加 15 g/L Na_2SiO_3 的 14 倍。通过图 2a 也可以发现, 短期内, 复合投加硅藻土和 Na_2SiO_3 的试样在沉降一段时间后泥水分界面会发生反弹上升。试验发现随着硅藻土量的进一步增加, 在短期内沉降效果变弱, 因此, 本试验条件下的最佳方案为 5 g/L 硅藻土和 15 g/L Na_2SiO_3 的复合投加。由图 2b 可知, 随着时间的延长, 硅藻土投加量的影响效果慢慢变小, 投加 5 g/L 硅藻土和 15 g/L Na_2SiO_3 的试样与投加 15 g/L 硅藻土和 15 g/L Na_2SiO_3 试样的后期沉降量相同。

混凝剂不仅可以除去水体中的金属离子等溶解性物质, 还可以去除水体中悬浮颗粒物、胶体等。混凝剂在去除大分子的溶解性有机物方面的效果特别明显^[11]。这是由于大分子有机物具有憎水性, 所以采用化学试剂有较好的效果。而且混凝剂对溶解性有机物具有电性络合沉淀, 可沉降絮体以及对金属氢氧化物产生吸附作用。硅藻土是一种硅质多孔性矿物质沉积岩, 其分布较为广泛, 价格较低, 且具有大孔隙度、较大的比表面积、相对的不可压缩性及强化学稳定性与吸附性等优点, 对大分子有机物的吸附效果比较显著。加入硅藻土, 可以使水中带电荷的胶体脱稳。硅藻土絮体对这些脱稳的胶体以及海水中的某些颗粒态污染物有较强的吸附作用, 形成许多大而密集的絮体, 所以采用硅藻土强化混凝, 既可改善絮体沉降性能, 又可去除水体中的消融性有机物^[12]。以上试验结果表明, 采用硅藻土和 Na_2SiO_3 复合絮凝剂的效果要优于单独投加 Na_2SiO_3 作为絮凝剂时的效果, 混凝过程中形成的絮体尺寸更大, 沉降性能更好。

2.3 PAC 与硅藻土加 Na_2SiO_3 混合液的沉降效果对比

分别往样品泥浆中投加一定量的 PAC、 Na_2SiO_3 和硅藻土, 分别得到 PAC 的添加质量浓度为 0.1 g/L 样液、5 g/L 硅藻土加 15 g/L 的 Na_2SiO_3 混合样液, 并进行对比试验, 观察各样液上层液的浑浊度以及泥水分界面的高度, 所得结果如图 3 所示。

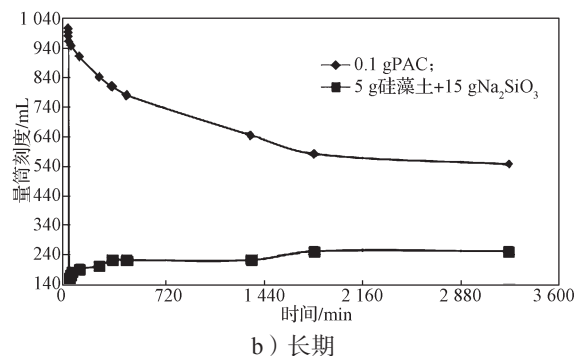
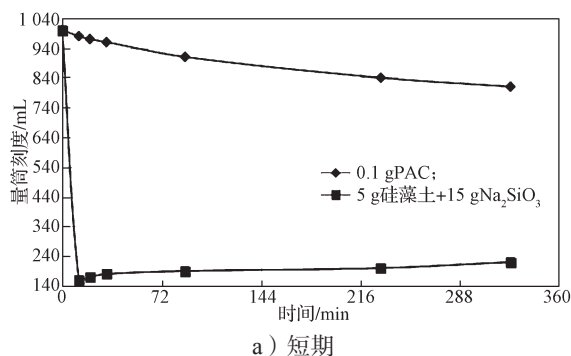


图3 添加质量浓度为 0.1 g/L 的 PAC 泥浆液与 5 g 硅藻土加 15 g/L 的 Na_2SiO_3 的混合泥浆液对比试验结果

Fig. 3 Contrast test results of mixed slurry solution of PAC with mass concentration of 0.1 g/L and that of 5 g of diatomite with the addition of 15 g/L of Na_2SiO_3

由图 3 所示 PAC 添加质量浓度为 0.1 g/L 样液与 5 g/L 硅藻土加 15 g/L Na_2SiO_3 混合样液对泥浆沉降的影响效果曲线可知, 在第 28 min, 加了 5 g/L 硅藻土和 15 g/L Na_2SiO_3 试样的泥水分界面刻度到达了 160 mL, 此时泥浆的沉降速率是加入 0.1 g/L PAC 试样的 24 倍左右。从长期的对比试验结果来看, 加入 0.1 g/L PAC 试样的最终泥水分界面刻度在 540 mL 左右, 而加入 5 g/L 硅藻土和 15 g/L Na_2SiO_3 混合试样的最终泥水分界面刻度在 240 mL 左右。所以采用 5 g/L 硅藻土加 15 g/L Na_2SiO_3 试剂作为絮凝剂的试验方案, 不管是从沉降速率还是最终沉降效果方面, 都远远超过添加质量浓度为 0.1 g/L 的 PAC 试验方案的。

以上试验分析结果表明, 硅藻土和 Na_2SiO_3 的复合试剂对泥浆的沉降效果要优于单独采用 PAC 或者单独采用 Na_2SiO_3 作为絮凝剂的效果, 在泥浆沉降过程中, 不仅沉降速度更快, 而且最终沉降性能更好。

3 结论

1) 本文采用 PAC、 Na_2SiO_3 以及 Na_2SiO_3 和硅藻土复合的 3 种混凝剂, 对温州平阳地区的泥浆进行絮凝处理试验, 试验结果表明这些混凝剂对泥浆沉降都起到了一定的絮凝效果, 证明对平阳地区的吹填土进行絮凝处理的方案是可行的, 且为絮凝剂在吹填工程中的应用提供了一定的参考。本试验方案投加混凝剂能在一定程度上加快泥浆的沉降速率, 缩短施工周期, 同时减轻对环境的污染。

2) 基于泥浆泥水分界面分析, 单独投加 PAC 或者 Na_2SiO_3 , 单纯地依靠其架桥作用, 不能达到很好的絮凝效果。单独投加 PAC 时, 泥浆的沉降速度一般; 单独投加 Na_2SiO_3 后, 试样沉降的上层混合液比较浑浊, 导致泥水分界面不清晰, 且 Na_2SiO_3 的作用效果

不稳定。

3) 本试验条件下的最佳方案, 是添加质量浓度为 5g/L 硅藻土和 15g/L Na_2SiO_3 的复合混凝剂。该方案下, 在第 28 min, 加入此复合试剂的试样泥水分界面刻度为 160 mL, 沉降量是同等时间内原样的 333.3 倍, 是单投 PAC 最佳方案 0.1g/L PAC 的 24 倍。投加复合试剂试样的最终泥水分界面刻度为 240 mL, 是原样的 0.365 倍, 是添加 0.1g/L PAC 的 0.444 倍。

参考文献:

- [1] 杨秀娟, 贾永刚. 黄河口入海泥沙沉积固结过程长期现场观测研究 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 671-678.
YANG Xiujuan, JIA Yonggang. Long-Term Field Observation of Sediment Consolidation Process in Yellow River Delta, China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 671-678.
- [2] 张楠, 朱伟, 王亮, 等. 吹填泥浆中土颗粒沉降-固结规律研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1681-1686.
ZHANG Nan, ZHU Wei, WANG Liang, et al. Study of Sedimentation and Consolidation of Soil Particles in Dredged Slurry[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1681-1686.
- [3] 尹聪, 张春雷, 朱伟, 等. 吹填泥浆自然沉降规律研究 [J]. 西部探矿工程, 2010(8): 3-6.
YIN Cong, ZHANG Chunlei, ZHU Wei, et al. Natural Subsidence Study of Dredged Sediment Hydraulic Filling [J]. West-China Exploration Engineering, 2010(8): 3-6.
- [4] 王琦, 李中华. 环保疏浚底泥堆场余水处理方法及实施装置研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(2): 179-181.
WANG Qi, LI Zhonghua. Study on Treatment Device and Method to Residual Water at Environmental Dredging Sediment Storage Area[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2012, 23(2): 179-181.
- [5] 杨爱武, 杜东菊, 赵瑞斌, 等. 吹填泥浆沉积模拟试验研究 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2010, 29(4): 617-620.
YANG Aiwu, DU Dongju, ZHAO Ruibin, et al. Simulation on Sedimentation of Mud Fluid of Dredger Fill[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2010, 29(4): 617-620.
- [6] 张春雷, 朱伟, 范公俊. 水泥固化高含水率淤泥的收缩性质 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2010, 38(3): 295-299.
ZHANG Chunlei, ZHU Wei, FAN Gongjun. Shrinkage Properties of Cement Solidified Sludge with High Water Content[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(3): 295-299.
- [7] 陈宏, 刘胜宇, 陈绍文, 等. 吹填泥浆的混凝沉降特性试验 [J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(5): 69-70.
CHEN Hong, LIU Shengyu, CHEN Shaowen, et al. Laboratory Study on Coagulation-Sedimentation Behaviors of Hydraulic-Dredged Mud[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(5): 69-70.
- [8] 孙雨涵, 周晓朋, 李怡, 等. 滨海淤泥质吹填土泥浆絮凝脱水试验研究 [J]. 水道港口, 2015, 36(4): 345-346.
SUN Yuhan, ZHOU Xiaopeng, LI Yi, et al. Study on the Flocculation and Dehydration of Hydraulic-Dredged Mud in Binhai[J]. Journal of Waterway and Harbour, 2015, 36(4): 345-346.
- [9] 徐桂中, 吉锋, 翁佳兴. 高含水率吹填淤泥自然沉降规律 [J]. 土木工程与管理学报, 2012, 29(3): 25-26.
XU Guizhong, JI Feng, WENG Jiaying. Sedimentation Behavior of Dredged Slurry at High Water Contents[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2012, 29(3): 25-26.
- [10] 高宝玉, 艾子萍, 王淑仁. 聚硅酸的絮凝性能及胶凝特性研究 [J]. 山东大学学报 (自然科学版), 1993, 28(4): 483-487.
GAO Baoyu, AI Ziping, WANG Shuren. The Properties of Polysilicic Acid and Its Flocculation as Flocculant Agent for Water Treatment[J]. Journal of Shangdong University, 1993, 28(4): 483-487.
- [11] 叶挺进, 何君, 刘超斌, 等. 珠江水中有机物分子量分布及其去除研究 [J]. 供水技术, 2010, 4(3): 12-16.
YE Tingjin, HE Jun, LIU Chaobin, et al. Molecular Weight Distribution and Removal of Dissolved Organic Matters in Pearl River Water[J]. Water Technology, 2010, 4(3): 12-16.
- [12] 徐亚斌, 吴纯德, 王林, 等. 硅藻土强化混凝去除微污染原水中的有机物 [J]. 环境工程学报, 2012, 6(11): 3920-3921.
XU Yabin, WU Chunde, WANG Lin, et al. Removal of Organic Matter in Micro-Polluted Raw Water Using Enhanced Coagulation with Diatomite[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2012, 6(11): 3920-3921.

(责任编辑: 廖友媛)