

# 疏浚泥浆吹填余水的污染特征及净化试验研究\*

王磊<sup>1,2</sup> 曹亚丽<sup>1,2</sup> 殷承启<sup>1,2</sup> 许雪记<sup>1,2</sup> 费小通<sup>1,2#</sup>

(1.中设设计集团股份有限公司,江苏 南京 210014;2.江苏省交通运输环境保护技术中心,江苏 南京 210014)

**摘要** 疏浚泥浆吹填余水中含有大量胶体及微小颗粒物,直接排放将对受纳水体造成较大危害。依托京杭运河湖西航道疏浚工程开展现场试验,对比分析聚合氯化铝(PAC)和 $\text{FeCl}_3$ 对余水中悬浮固体(SS)的去除效果。研究发现,疏浚泥浆落淤后的余水SS浓度较高,随着吹填时间的延长,余水SS浓度有明显增加的趋势。室内混凝小试试验表明,PAC、 $\text{FeCl}_3$ 均能有效降低余水中的SS,PAC、 $\text{FeCl}_3$ 的最佳投加量分别为39、17 mg/L;在最佳投加量下,两种混凝剂对余水SS的混凝效果均随沉降时间延长而改善,前5 min内 $\text{FeCl}_3$ 的混凝效果比PAC好,5 min后PAC的混凝效果更佳。现场中试试验显示,两种混凝剂均在较短时间取得较好的SS混凝效果。当以混凝剂最佳投加量及污染物排放达标为评价目标时, $\text{FeCl}_3$ 的处理费用分别为15.0、8.0元/h,PAC的处理费用分别为20.5、10.5元/h, $\text{FeCl}_3$ 的经济性均优于PAC。

**关键词** 疏浚泥浆 余水 悬浮固体 混凝剂 净化

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2017.05.010

**The filed study on the pollution characteristics and purification effect of tail water in dredging slurry** WANG Lei<sup>1,2</sup>, CAO Yali<sup>1,2</sup>, YIN Chengqi<sup>1,2</sup>, XU Xueji<sup>1,2</sup>, FEI Xiaotong<sup>1,2</sup>. (1.China Design Group Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 210014; 2.Jiangsu Province Research Center of Environment Protection Engineering & Technology in Communication and Transportation, Nanjing Jiangsu 210014)

**Abstract:** The tail water from dredging engineering contained large amount of gel and fine particulate matters, directly discharge of tail water would caused environmental hazard to receiving water body. Relying on dredging project in the Huxi Waterway of Grand Canal, field test were studied to analyze the effect of polymeric aluminium (PAC) and  $\text{FeCl}_3$  on SS removal from tail water of cofferdam. The study found that the SS content in tail water was very high, and it increased with the increasing of dredging time. The indoor coagulation experiments showed that PAC and  $\text{FeCl}_3$  could removal SS in tail water effectively, the best dosage of PAC and  $\text{FeCl}_3$  were 39, 17 mg/L. Under the optimal dosage of two flocculating agent, the effect of flocculation enhanced when the flocculation time increased, and within the first 5 min of flocculation, the effect of  $\text{FeCl}_3$  was better than that of PAC, while PAC performed much better than  $\text{FeCl}_3$  after 5 min of flocculation. The pilot test showed that both two kinds of flocculants had good performance of SS sedimentation in a relatively short period. The most economical flocculant was  $\text{FeCl}_3$ , on the best processing efficiency and pollutant emission standards as the goal, the treatment cost of  $\text{FeCl}_3$  was 15.0, 8.0 yuan/h, for PAC was 20.5, 10.5 yuan/h, respectively.

**Keywords:** dredging slurry; tail water; SS; flocculating agent; purification

工程疏浚能提高内河航道的通航能力,但在疏浚作业中会产生大量的含高水率疏浚泥浆。疏浚泥浆吹填沉降过程中产生的余水从围堰尾部排出<sup>[1]</sup>。余水中含有大量落淤胶体杂质和微小颗粒物,这些物质表面带有电荷,靠彼此静电斥力和范德华力平衡,在溶液中保持悬浮状态,排入外部水体会造成严重的二次污染<sup>[2]</sup>。混凝沉降是指通过投加各类混凝剂和絮凝剂,改变悬浮物的带电性质并破坏其悬浮稳态,使悬浮物互相接触、碰撞形成大型絮状体,并通过重力沉降去除悬浮固体(SS)<sup>[3-5]</sup>。非离子型无

机混凝剂聚合氯化铝(PAC)和离子型无机混凝剂 $\text{FeCl}_3$ 是两种重要的混凝剂,在水处理领域具有重要的应用价值。

京杭运河湖西航道建设工程(包括航道、船闸)疏浚土方共计约400万 $\text{m}^3$ ,全线围堰共计20余处,围堰中疏浚泥浆含水率高达90%以上,携带有大量SS的余水经围堰泄水口、排水沟渠排入航道,会对环境造成较大的污染。为了明确疏浚吹填过程中的余水污染特征,进而寻找有效的余水污染物控制措施,现场测定了疏浚吹填过程中各阶段余水中污染

第一作者:王磊,男,1982年生,硕士,工程师,主要从事水环境保护设计及研究工作。\*通讯作者。

\*江苏省交通科学研究计划项目(No.2013Y16)。

物的含量,并在现场采集水样,研究了 PAC 和  $\text{FeCl}_3$  对余水的净化规律,在室内试验的基础上,开展了现场中试试验,为余水的安全排放提供指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 混凝剂

本次试验采用工业级 PAC 和  $\text{FeCl}_3$ 。其中: PAC 纯度 99%,价格为 1 500 元/t。 $\text{FeCl}_3$  纯度 96%,价格为 2 500 元/t。

### 1.2 工程介绍

京杭运河湖西航道蔺家坝段围堰工程平面布置见图 1。绞吸式疏浚船将河道底泥吸出,经管道(直径 500 mm)吹填进入堆场。堆场长 200 m、宽 100 m、高约 3 m。疏浚泥浆沉降产生的余水经围堰余水出口排出,围堰余水出口到入河口的距离为 300 m,余水正常流经时间为 30 min。

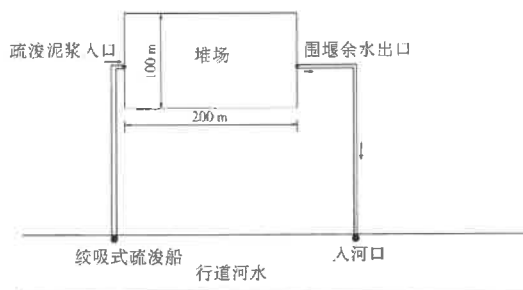


图1 工程平面布置  
Fig.1 The engineering layout

余水中 SS 主要以黏土颗粒和胶体为主。从图 2 可以看出,10  $\mu\text{m}$  以下的颗粒质量分数达 27%,30  $\mu\text{m}$  以下颗粒质量分数达 51%,75  $\mu\text{m}$  以下颗粒质量分数达到近 80%。根据张德茹等<sup>[6]</sup>研究结果,对于天然泥沙,混凝临界粒径为 30  $\mu\text{m}$ 。而钱宁<sup>[7]</sup>的研究结果显示,黄河淤泥的混凝临界粒径在 10  $\mu\text{m}$  左右,对比本试验余水中 SS 粒径分布,说明余水较

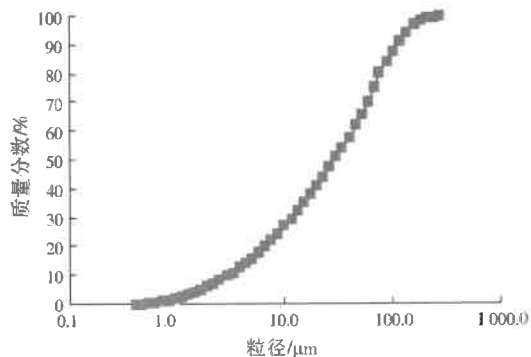


图2 余水 SS 粒径分布  
Fig.2 Particle size distribution of SS in tail water

易发生混凝现象,可通过添加混凝剂促进其发生混凝沉降。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 自然沉降试验

将 1 000 mL 余水水样注入沉降柱中,搅拌均匀,记录距取样口 20 cm 高度处液面 SS 的质量浓度,开启计时器,分别在 5、10、20、30、60、120 min 时取水样 100 mL,水样由干燥的滤纸过滤,过滤后,将滤纸放入已准确称量的带盖称量瓶中,在 105~110  $^{\circ}\text{C}$  烘箱内烘干,称量滤纸增加的质量,计算 SS 质量浓度。

#### 1.3.2 混凝沉降小试试验

(1) 最佳混凝剂投加量:在烧杯中加入 1 000 mL 余水水样,分别向水样中加入 5、11、17、28、39、50 mg/L 的混凝剂,并将烧杯固定在混凝试验搅拌机上,开启磁力搅拌器快速搅拌 3 min(200 r/min),使混凝剂在溶液中充分混合,然后在 60 r/min 的转速下缓慢搅拌 30 min,静置沉降 90 min 并观察沉降过程,待烧杯内沉降过程结束后,取 100 mL 上清液并置于准确称量的带盖称量瓶中,在 105~110  $^{\circ}\text{C}$  烘箱内烘干,称量滤纸增加的质量,计算 SS 质量浓度,筛选最佳混凝剂投加量。

(2) 最佳沉降时间:在烧杯中加入 1 000 mL 余水水样,按混凝剂最佳投加量加入一定 PAC 或  $\text{FeCl}_3$ ,将烧杯固定在混凝试验搅拌机上,开启磁力搅拌器快速搅拌 3 min(200 r/min),使混凝剂在溶液中充分混合,然后在 60 r/min 的转速下缓慢搅拌 30 min,分别静置沉降 5、10、20、30、60、120 min,取 100 mL 上清液并置于准确称量的带盖称量瓶中,在 105~110  $^{\circ}\text{C}$  烘箱内烘干,称量滤纸增加的质量,计算 SS 质量浓度,确定最佳沉降时间。

#### 1.3.3 混凝沉降现场中试试验

本次疏浚工程单艘疏浚船疏浚能力为 150  $\text{m}^3/\text{h}$ ,疏浚泥浆含水率 65%,疏浚扰动后泥浆含水率增致 90%,堆场落淤后含水率降至 70%,经计算,需处理余水水量为 350  $\text{m}^3/\text{h}$ 。以喷射流的形式从围堰余水出口处加入混凝剂,余水出口设置长 5 m、宽 3 m 的储水池,加入混凝剂的余水流入储水池,在沉降 5、10、20、30、60、120 min 时取 3 个平行样,测定水样 SS 浓度,评价混凝剂的中试混凝沉降效果。

### 1.4 测定方法

试验中各水质指标测定方法见表 1。

表 1 水质指标测定方法  
 Table 1 Test methods of water quality parameters

| 检测指标 | 分析方法                                   | 主要检测设备     |
|------|----------------------------------------|------------|
| pH   | 《水质 pH 值的测定 玻璃电极法》(GB/T 6920—86)       | 便携式 pH 计   |
| COD  | 《水质 化学需氧量的测定 快速消解分光光度法》(HJ/T 399—2007) | 紫外—可见分光光度计 |
| 氨氮   | 《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 535—2009)      | 紫外—可见分光光度计 |
| TP   | 《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893—89)       | 紫外—可见分光光度计 |
| SS   | 《水质 悬浮物的测定 重量法》(GB 11901—89)           | 真空抽滤装置     |
| 总铜   | 《水质 铜、锌、铅、镉的测定 原子吸收分光光度法》(GB 7475—87)  | 原子吸收分光光度计  |
| 总锌   | GB 7475—87                             | 原子吸收分光光度计  |
| 总锰   | 《水质 铁、锰的测定 火焰原子吸收分光光度法》(GB 11911—89)   | 原子吸收分光光度计  |

表 2 疏浚工程中主要节点的水质参数<sup>1)</sup>  
 Table 2 Water quality parameters in different stage of dredging

| 水质指标                      | 航道河水      | 疏浚泥浆          | 围堰余水出口      | 入河口       | 标准值 <sup>2)</sup> |
|---------------------------|-----------|---------------|-------------|-----------|-------------------|
| pH                        | 8.0       | 7.6           | 7.8         | 7.9       | 6~9               |
| COD/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 36.5~45.3 | 70.9~88.3     | 64.2~79.6   | 45.6~56.3 | ≤100              |
| 氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )  | 0.9~2.1   | 0.8~1.2       | 0.3~1.3     | 0.6~1.1   | 15                |
| TP/(mg·L <sup>-1</sup> )  | 0.37~0.55 | 0.43~0.45     | 0.32~0.43   | 0.37~0.42 | 0.5               |
| SS/(mg·L <sup>-1</sup> )  | 25~56     | 39 755~45 356 | 1 237~1 656 | 824~1 021 | ≤70               |
| 总铜/(mg·L <sup>-1</sup> )  | \         | \             | \           | \         | 0.5               |
| 总锌/(mg·L <sup>-1</sup> )  | \         | \             | \           | \         | 0.5               |
| 总锰/(mg·L <sup>-1</sup> )  | \         | \             | \           | \         | 2.0               |

注: <sup>1)</sup>“\”表示未达到检出限; <sup>2)</sup>指《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类标准值。

2 结果与讨论

2.1 余水污染特征分析

2.1.1 余水 SS 在疏浚过程中的变化

表 2 为京杭运河湖西航道疏浚工程中期主要节点的水质参数。从表 2 可以看出,项目所在地航道河水的水环境质量良好,各项水质指标总体满足 GB 3838—2002 中Ⅲ类标准要求。航道河水、疏浚泥浆、围堰余水出口和入河口余水中总铜、总锌、总锰含量均在仪器检出限以下,由于疏浚泥浆中有物质、营养盐类含量均很少,COD、氨氮、TP 等水质指标皆不超标,故疏浚泥浆需重点控制的污染指标为 SS。

从 SS 的变化规律来看,经输泥管排入围堰的疏浚泥浆呈浑浊黏稠状,SS 很高。疏浚泥浆在围堰中自然沉降后,大部分悬浮物质被有效沉降截留,SS 急剧下降,从 39 755~45 356 mg/L 降至围堰余水出口处的 1 237~1 656 mg/L;余水经排水沟导流排入河道,SS 继续发生自然沉降,降至 824~1 021 mg/L,为 GB 3838—2002 中Ⅲ类标准限值的 10 倍以上,超标倍数较大。

2.1.2 余水 SS 随吹填时间的变化

对围堰吹填施工过程中余水 SS 进行连续采样,分析 SS 随吹填时间的变化规律,结果如图 3 所示。由图 3 可见,余水 SS 检测值随吹填时间的延

长急剧升高。在吹填后期,堆场空间逐渐被淤泥占满,难以保证淤泥颗粒的沉降条件,余水中携带大量泥沙排入河道。因此,对于航道疏浚工程中围堰余水的 SS 处理具有重要意义。

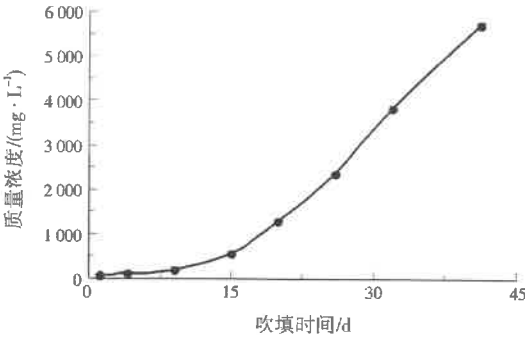
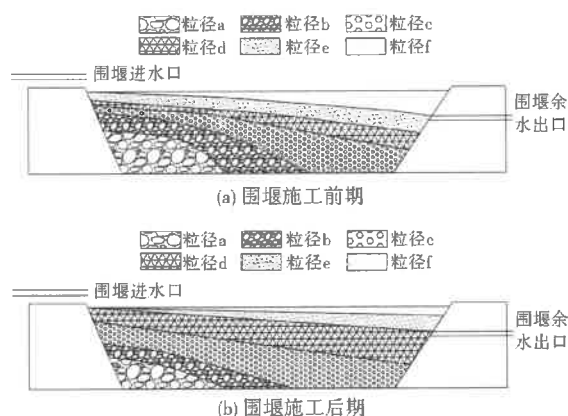


图 3 余水 SS 随吹填时间变化

Fig.3 Change of SS content in tail water with dredging time

图 4 为典型堆填场内落淤过程的概化模型。由图 4(a)可见,在围堰施工前期,即落淤过程刚开始,粗颗粒主要在堆场靠近进水口处沉降,当泥浆推流到出水口时,大部分粗颗粒已经落淤完成,只有少量细颗粒(胶体、黏粒和部分黏粉颗粒)会随余水排出;由图 4(b)可见,在围堰施工后期,由于落淤时间增加,堆场内沉降淤泥依靠重力沉降固结,沉降固结趋势从进水口到出水口依次减弱,一定时间后,堆填场内剩余空间不能满足粗颗粒的沉降时间要求,导致围堰余水中粗颗粒逐渐增加,SS 浓度明显升高。与 SS 浓度随吹填时间的增加而明显增加(见图 3)的

规律相符。



注:粒径  $a > b > c > d > e > f$ , 概化模型旨在定性描述, 不对粒径进行定量分析。

图4 堆填场落淤概化模型

Fig.4 Generalized model of sedimentation in dredging

## 2.2 室内混凝沉降小试结果

不同混凝剂投加量下, 混凝结束后余水上清液中 SS 质量浓度变化见图 5。由图 5 可见, 随着 PAC 投加量的增加, 余水上清液中 SS 浓度呈先快速下降后逐渐平衡的趋势, PAC 最佳投加量为 39 mg/L, 此时余水上清液 SS 质量浓度为 25 mg/L。随着  $\text{FeCl}_3$  投加量的增加, 余水上清液中 SS 呈快速下降后缓慢上升, 最后明显增加的趋势,  $\text{FeCl}_3$  最佳投加量为 17 mg/L, 此时上清液 SS 质量浓度为 44 mg/L。相比而言,  $\text{FeCl}_3$  对 SS 去除效果不够稳定, 可能的原因是离子型无机混凝剂主要通过破坏胶体颗粒间的静电斥力发生聚集沉降, 当混凝剂投加量过少时, 不足以中和胶体表面电荷, 胶体间静电斥力使胶体不能发生凝聚; 但过量投加混凝剂将导致絮体发生脱稳, 重新稳定分散在溶液中<sup>[8-10]</sup>。

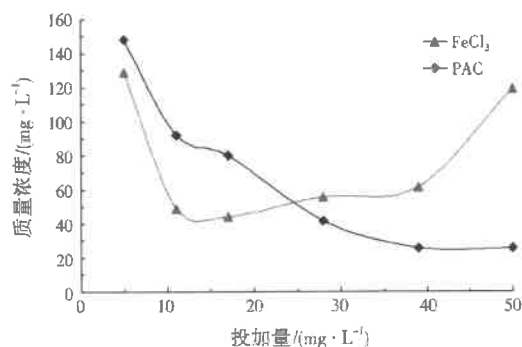


图5 混凝剂投加量与上清液 SS 质量浓度的关系  
Fig.5 Relationship between flocculating agent dosage and the SS content in upper liquid

在自然沉降及最佳混凝剂投加量下, 余水上清液中 SS 随不同沉降时间的变化见图 6。

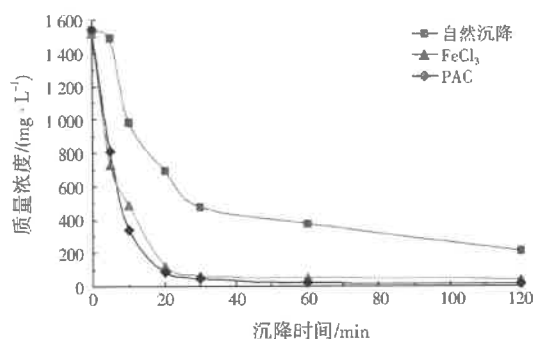


图6 不同沉降时间下上清液 SS 质量浓度  
Fig.6 SS content in upper liquid after different time of flocculation

由图 6 可见, 自然沉降条件下, 余水上清液 SS 浓度远大于投加混凝剂后余水上清液, 这是由于混凝剂与余水中颗粒物结合在一起, 单个颗粒质量增加, 根据斯托克斯公式, 粗颗粒快速沉降, 细颗粒沉降速度缓慢<sup>[11]</sup>。

沉降前 5 min,  $\text{FeCl}_3$  的混凝效果稍好于 PAC, 余水上清液 SS 从 1 520 mg/L 下降至 730 mg/L, 而投加 PAC 5 min 后, 余水上清液 SS 下降至 808 mg/L。5 min 后, PAC 的混凝效果好于  $\text{FeCl}_3$ 。投加 PAC、 $\text{FeCl}_3$  沉降 60 min 时, 余水上清液 SS 分别为 21、57 mg/L, 沉降 120 min 时, 余水上清液 SS 分别为 16、40 mg/L。这是由于 PAC 由形态多变的多元羧基络合物组成, 相比于低分子结晶盐的传统无机混凝剂, PAC 混凝沉降效果更好, 有效期更长。

## 2.3 余水 SS 混凝沉降现场中试结果

混凝沉降现场中试试验结果见表 3。可见, 自然沉降条件下, 沉降 10 min 时, 余水 SS 最小, 平均值为 726 mg/L; 沉降 120 min 时, 余水 SS 最大, 平均值为 1 039 mg/L。自然沉降条件下 SS 浓度在沉降后期稍有增加, 其主要原因为余水进入储水池后, 由于连续进水造成扰动, 使部分黏粒无法得到有效沉降, 甚至会有扰动后的释放现象。  $\text{FeCl}_3$ 、PAC 对余水均有较好的混凝效果。对比 5、120 min 的 SS 含量可以看出, 实际工程处理时, 混凝剂产生作用的时间基本上在 5 min 左右即可完成, 这说明围堰余水中 SS 胶体和黏粒与  $\text{FeCl}_3$  及 PAC 能在较短时间内产生良好的混凝反应, 工程实际利用效果均良好。

## 2.4 经济性评价

以实际处理工程量分析最佳投加量及环境功能区达标要求下的 PAC 与  $\text{FeCl}_3$  费用, 对两种混凝剂的经济性进行评价。

### 2.4.1 最佳投加量下的经济性评价

根据室内混凝沉降小试结果, PAC、 $\text{FeCl}_3$  投加

表3 混凝沉降现场中试试验结果  
Table 3 Results of field pilot test of coagulation precipitation

| 项目                | 沉降时间<br>/min | 样品1<br>/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 样品2<br>/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 样品3<br>/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 平均值<br>/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 标准偏差<br>/(mg·L <sup>-1</sup> ) |
|-------------------|--------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 自然沉降              | 5            | 996                           | 1 021                         | 1 002                         | 1 006                         | 13                             |
|                   | 10           | 756                           | 723                           | 700                           | 726                           | 28                             |
|                   | 20           | 854                           | 1 002                         | 1 001                         | 952                           | 85                             |
|                   | 30           | 986                           | 1 001                         | 897                           | 961                           | 56                             |
|                   | 60           | 897                           | 1 002                         | 896                           | 932                           | 61                             |
|                   | 120          | 1 014                         | 1 117                         | 987                           | 1 039                         | 69                             |
| FeCl <sub>3</sub> | 5            | 25                            | 44                            | 42                            | 37                            | 10                             |
|                   | 10           | 12                            | 124                           | 48                            | 61                            | 57                             |
|                   | 20           | 12                            | 55                            | 74                            | 47                            | 32                             |
|                   | 30           | 35                            | 50                            | 45                            | 43                            | 8                              |
|                   | 60           | 23                            | 22                            | 21                            | 22                            | 1                              |
|                   | 120          | 20                            | 18                            | 20                            | 19                            | 1                              |
| PAC               | 5            | 25                            | 44                            | 23                            | 31                            | 12                             |
|                   | 10           | 23                            | 33                            | 23                            | 25                            | 6                              |
|                   | 20           | 44                            | 55                            | 50                            | 50                            | 6                              |
|                   | 30           | 21                            | 15                            | 22                            | 19                            | 4                              |
|                   | 60           | 15                            | 18                            | 17                            | 17                            | 2                              |
|                   | 120          | 20                            | 25                            | 30                            | 25                            | 5                              |

量分别为 39、17 mg/L 时混凝效果最佳,在此投加量下的混凝剂费用计算见表 4。可见,处理同一批次围堰余水,采用 PAC、FeCl<sub>3</sub> 所需要的混凝剂费用分别为 20.5、15.0 元/h。

表4 最佳混凝效果下的混凝剂费用  
Table 4 The costs of flocculant when achieving the best efficiency

| 混凝剂               | 处理水量<br>/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | 加药量<br>/(kg·h <sup>-1</sup> ) | 单价<br>/(元·t <sup>-1</sup> ) | 费用<br>/(元·h <sup>-1</sup> ) |
|-------------------|---------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| PAC               | 350                                         | 13.7                          | 1 500                       | 20.5                        |
| FeCl <sub>3</sub> |                                             | 6.0                           | 2 500                       | 15.0                        |

#### 2.4.2 环境功能区达标要求下的经济性评价

湖西航道执行 GB 3838—2002 中的Ⅲ级标准,据此可知,余水 SS 排放限值为 70 mg/L。根据室内混凝小试试验结果,当 PAC 投加量为 20 mg/L, FeCl<sub>3</sub> 投加量为 9.42 mg/L 时余水能够达到排放标准,基于处理成本考虑,FeCl<sub>3</sub> 投加量以 8 mg/L 计算,据此计算得到的混凝剂费用见表 5。

表5 环境功能区达标要求下所需药剂费用  
Table 5 The costs of flocculant when achieving the pollution standards

| 混凝剂               | 处理水量<br>/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | 加药量<br>/(kg·h <sup>-1</sup> ) | 单价<br>/(元·t <sup>-1</sup> ) | 费用/<br>(元·h <sup>-1</sup> ) |
|-------------------|---------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| PAC               | 350                                         | 7.0                           | 1 500                       | 10.5                        |
| FeCl <sub>3</sub> |                                             | 3.2                           | 2 500                       | 8.0                         |

综上所述,当分别以最佳混凝效果及污染物排放达标为评价目标时,FeCl<sub>3</sub> 的处理费用分别为 15.0、8.0 元/h, PAC 的处理费用分别为 20.5、10.5 元/h, FeCl<sub>3</sub> 的经济性均优于 PAC。

### 3 结 论

(1) 京杭运河湖西航道疏浚工程围堰余水 SS 含量较高,对于该工程中围堰余水进行室内混凝小试试验,结果表明,FeCl<sub>3</sub> 和 PAC 均能有效降低余水中 SS 含量,FeCl<sub>3</sub>、PAC 的最佳投加量分别为 17、39 mg/L。FeCl<sub>3</sub> 和 PAC 在最佳投加剂量下,SS 浓度下降趋势均随时间增加而增强,前 5 min FeCl<sub>3</sub> 的混凝效果比 PAC 好,5 min 后 PAC 的混凝效果更佳。

(2) 实际工程处理中,FeCl<sub>3</sub> 和 PAC 均能在 5 min 内对围堰出口余水中 SS 产生较佳的混凝沉降效果,与自然沉降相比,余水入河口处 SS 大幅降低。当以混凝剂最佳投加量及污染物排放达标为评价目标时,FeCl<sub>3</sub> 的处理费用分别为 15.0、8.0 元/h, PAC 的处理费用分别为 20.5、10.5 元/h, FeCl<sub>3</sub> 的经济性均优于 PAC。

#### 参考文献:

- [1] 陈云敏,施建勇,朱伟,等.环境岩土工程研究综述[J].土木工程学报,2012,45(4):165-182.
- [2] 雷晓玲,丁娟,雷雨.疏浚过程中的环境影响分析及其对策研究[J].环境工程,2015,33(2):140-142.
- [3] 李冲,吕志刚,陈洪龄,等.河湖疏浚淤泥的表征、絮凝和脱水[J].环境工程学报,2013,7(2):737-742.

(下转第 519 页)

