



# 疏浚泥浆泥水快速分离的复合絮凝试验研究 \*

王瑞彩<sup>1,2</sup>, 吴 腾<sup>1,2</sup>, 诸裕良<sup>1,2</sup>, 徐伟杰<sup>3</sup>, 汪 彦<sup>4</sup>

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098;

2. 河海大学疏浚技术教育部工程研究中心, 江苏南京 210098;

3. 南通港集团建设投资有限公司, 江苏南通 226300; 4. 杭州京杭运河二通道建设投资有限公司, 浙江杭州 310000)

**摘要:**为了对港口航道建设和维护产生的大量疏浚泥浆进行减量化处理,通过添加聚丙烯酰胺(APAM)和聚合氯化铝(PAC)的方法,进行疏浚泥浆泥水快速分离的复合絮凝试验研究,探究了复合絮凝对泥浆的沉积时间、底泥含水率和渗透系数的影响。结果表明:1) APAM 和 PAC 复合絮凝泥浆的泥水分离效果优于单一 APAM 或 PAC, 其中 APAM 对泥浆沉积时间起控制作用, PAC 对上液清澈度起控制作用; 2) APAM 和 PAC 复合絮凝能够有效降低底泥含水率, 但随着 APAM 和 PAC 添加量的增大, 底泥含水率呈上升趋势, 较小的 APAM 和 PAC 添加量更有利于底泥含水率的降低; 3) APAM 与 PAC 复合絮凝泥浆能够提高底泥的渗透系数, 并存在 APAM 的最佳添加量; 4) 在减小泥浆沉积时间、降低底泥含水率和提高底泥渗透系数方面, APAM 优于 PAC。当粉土与黏土比为 2.4 时, 复合絮凝剂的适宜添量为 1 600 g/t 的 PAC 与 240 g/t 的 APAM, 研究结果可为工程提供参考。

**关键词:**疏浚泥浆;絮凝剂;沉积时间;底泥含水率;底泥渗透系数

中图分类号: TV 851; U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)03-0035-06

## Compound flocculation experiment for rapid separation of dredged mud and water

WANG Ruicai<sup>1,2</sup>, WU Teng<sup>1,2</sup>, ZHU Yuliang<sup>1,2</sup>, XU Weijie<sup>3</sup>, WANG Yan<sup>4</sup>

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Engineering Research Center of Dredging Technology of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Nantong Port Group Construction Investment Co., Ltd., Nantong 226300, China;

4. Hangzhou Jinghang Canal Second Channel Construction Investment Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** The study is focused on the minimization of dredged mud produced by construction and maintenance of port and waterway engineering. By adding polyacrylamide (APAM) and polyaluminum chloride (PAC) to dredged mud, the composite flocculation test of rapid separation of solid particles from dredged mud was studied. The effects of composite flocculation on the sedimentation time of mud, sediment moisture content and sediment permeability were investigated. The results show as follows: 1) Compound flocculation effect of APAM and PAC is better than that of single APAM or PAC. Among the test, the APAM plays a key role in the mud sedimentation time while the PAC plays a key role in the clarity of the upper liquid of mud. 2) Compound flocculation of APAM and PAC can reduce sediment moisture content effectively. While with the increase of the addition of APAM or PAC, the sediment moisture content maintains an upward trend. Namely, small amount of APAM and PAC is more beneficial to the reduction of sediment moisture content. 3) Compound flocculation of APAM and PAC can enhance sediment permeability, and there exists

收稿日期: 2022-07-05

\*基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52179061); 浙江省交通运输厅科技计划项目 (2020015); 河海大学创新性教学实验资助项目 (2021024)

作者简介: 王瑞彩 (1973—), 女, 博士, 讲师, 从事港航结构、结构与土相互作用、疏浚土处理等研究。

an optimal addition amount of APAM. 4) APAM is superior to PAC in reducing mud sedimentation time, decreasing sediment moisture content and increasing sediment permeability. For 2.4 ratio of silt to clay content of dredged mud, the suitable addition amounts of compound flocculation is 1 600 g/t PAC and 240 g/t APAM. The research results can provide reference for engineering.

**Keywords:** dredged mud; flocculants; sedimentation time of mud; sediment moisture content; sediment permeability

港口及航道工程建设和维护每年产生巨量的疏浚泥浆。该工程废弃物具有含水率高、流动性强的特点<sup>[1]</sup>，难以储存或处理。我国早期的疏浚泥浆处理方式多以水抛或陆地堆存的方式，水抛对河流、海洋环境及水生态系统带来很大影响<sup>[2-5]</sup>。受水上抛泥区资源缺乏限制和人类对水环境保护的重视，传统的海上水抛方法经历了从允许到严格控制海抛的转变过程<sup>[6-7]</sup>。由于疏浚泥浆固结排水时间极长，使得陆地堆存占用大量土地资源，且堆场长期处于泥沼状态，成为难以利用的“废地”，引发环境和土地资源浪费等问题<sup>[8]</sup>，亟需对疏浚泥浆进行减量化处理。为缩短泥浆沉积时间，采用添加絮凝剂的方法<sup>[9-12]</sup>实现泥浆快速沉积。该方法可缩短工程时间、降低工程成本和减少对生态环境的影响。但前期试验研究结果显示，对于疏浚泥浆，经过无机絮凝剂聚合氯化铝(PAC)处理后的上液清澈，但沉积速度相对较慢；经过有机高分子絮凝剂聚丙烯酰胺(APAM)处理后的上液浑浊，但沉积速度快，底泥含水率低。针对前期试验研究成果的不足，结合APAM和PAC絮凝疏浚泥浆的优点和劣势，本文开展此两种絮凝剂复合絮凝疏浚泥浆的试验研究，进一步探讨泥水快速分离效果，以期为疏浚泥浆的处理提供优化方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

根据 GB/T 50145—2007《土的工程分类标准》<sup>[13]</sup>中关于土的粒组划分标准和工程实践中泥浆颗粒沉积(大于 75 μm 砂粒组在水中无需经过絮凝便能自主沉积)的情况，选择 0~5 μm 的黏粒

组，5~75 μm 的粉粒组进行疏浚泥浆絮凝沉积试验研究，采用 APAM 和 PAC 絮凝剂，所用土样取自南京江心洲边滩淤泥，经过烘干后测得其物理性质指标见表 1。

表 1 疏浚淤泥基本物理特性

比重 $G_s$	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	塑性指数 $I_p$	砂粒/ %	粉粒/ %	黏粒/ %
2.71	21.4	34.4	13	0	70.6	29.4

### 1.2 试验流程

根据单一絮凝试验结果，经 APAM 或 PAC 絯凝的泥浆均存在问题，经 APAM 絯凝的泥浆上液浑浊，经 PAC 絯凝的底泥性质较差，两种絮凝剂处理泥浆存在互补情况。鉴于此，本文通过室内试验探讨 APAM 和 PAC 复合絮凝处理疏浚泥浆的效果。具体流程为：量取烘干后的淤泥土样，加入清水制备成含水率为 500% 的泥浆(含水率为泥浆中所含水质量与干土质量之比)，分别制备 1 000 ml 质量分数为 0.1% 的 APAM 溶液和 500 ml 质量分数为 4% 的 PAC 溶液。依次向泥浆中滴加 PAC 和 APAM 溶液，并通过电动搅拌器和玻璃棒搅拌，使絮凝剂与泥浆充分混合，同步观察试验现象。待混合完全后将烧杯中试样转移至量筒内，记录泥面沉积完成时间。当泥浆沉积完成后，利用虹吸法抽出量筒中的上液，保留底泥，取出部分底泥测量含水率，将剩余土样烘干后置入三瓣膜饱和器中，采用真空抽气饱和法将土样饱和，利用变水头渗透仪测量饱和后土样的渗透系数。

### 1.3 试验工况

APAM、PAC 絯凝剂均对疏浚泥浆的快速沉积有一定的效果，对疏浚泥浆进行复合絮凝试验设计时，根据单一絮凝试验得到的絮凝剂最优添

加量选取 APAM 与 PAC。单一絮凝剂 APAM 和 PAC 的最优添加量分别为 280、3 200 g/t, 以此为基础进行复合絮凝试验, 依次减小 APAM 和 PAC 的添加剂量, 具体分为 A、B、C 3 个组别共计 9 组试验工况, 每组试验工况的 APAM 和 PAC 的添加量不同; D 组和 E 组作为对比试验组, 分别为单一 APAM 和 PAC 最优添加量下的工况。试验工况见表 2。

表 2 复合絮凝试验工况

试验组	试验土样	试验工况	APAM 添加量/(g·t <sup>-1</sup> )	PAC 添加量/(g·t <sup>-1</sup> )
A	500%含水率长江江心洲边滩淤泥	A <sub>1</sub>	1 600	
		A <sub>2</sub>	200	2 400
		A <sub>3</sub>		3 200
B		B <sub>1</sub>	1 600	
		B <sub>2</sub>	240	2 400
		B <sub>3</sub>		3 200
C		C <sub>1</sub>	1 600	
		C <sub>2</sub>	280	2 400
		C <sub>3</sub>		3 200
D	500%含水率长江江心洲边滩淤泥	D	280	0
E		E	0	3 200

## 2 试验结果

### 2.1 复合絮凝对泥浆沉积时间的影响

图 1 列出了泥浆沉积时间与 PAC 和 APAM 添加量之间的关系曲线。由图可知: 当 APAM 添加量不变时, 随 PAC 添加量的增加, 各试验组泥浆沉积时间变化较小; 但在 PAC 添加量一定时, 随 APAM 添加量的增大(A→B→C), 各相应工况的泥浆沉积时间明显逐渐变小。复合絮凝试验 A、B 和 C 组以及单一 APAM 试验 D 组、单一 PAC 试验 E 组, 其泥浆沉积的时间分别约为 50、44、38、37 和 105 min。复合絮凝试验 C 组与单一添加 APAM 的 D 组的 APAM 用量相同, 其泥浆沉积时间相差不大, 但 C 组的上液清澈, D 组的上液浑浊; 复合絮凝试验工况 A<sub>3</sub>、B<sub>3</sub>、C<sub>3</sub> 与单一添加 PAC 的 E 工况的 PAC 用量相同, A<sub>3</sub>、B<sub>3</sub>、C<sub>3</sub> 试验工况的泥浆沉积时间约是 E 工况的 1/3~1/2, A<sub>3</sub>、B<sub>3</sub>、C<sub>3</sub> 和 E 工况泥浆沉积后的上液均比较清澈。由此可以判断在复合絮凝试验中, APAM 絮凝剂对泥浆沉积时间起控制作用, 而 PAC 絮凝剂对

上液的清澈度起控制作用。从减小泥浆沉积时间的角度考虑, 以单一 APAM 的最优添加量为参考值, PAC 添加量满足上液清澈度要求即可。在工程处理中, 根据对泥浆沉积时间的要求和对泥浆沉积后上液清澈度的要求, 合理选择絮凝剂的添加量。

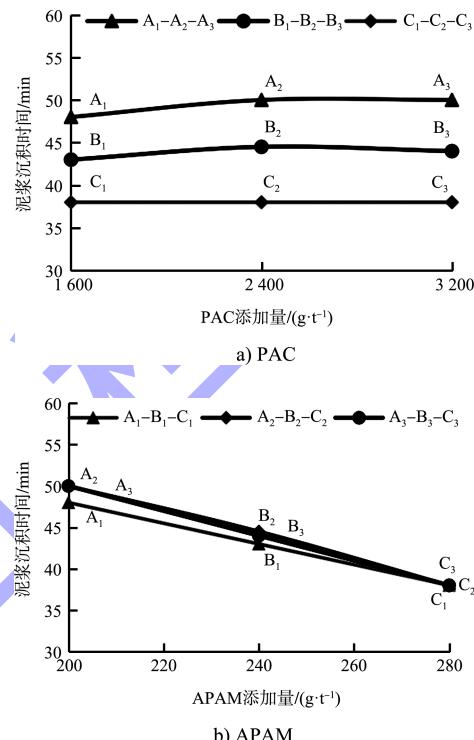
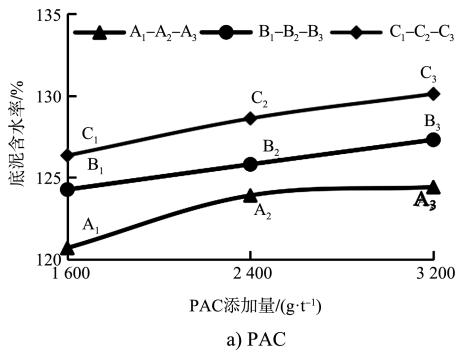


图 1 絮凝剂添加量与泥浆沉积时间关系

### 2.2 复合絮凝对底泥含水率的影响

复合絮凝试验 A、B 和 C 组的底泥含水率随絮凝剂添加量的变化曲线见图 2, 试验数据显示: A 组的底泥含水率由 120.69% 升高到 124.41%; B 组的由 124.26% 升高到 127.30%; C 组的由 126.34% 升高到 130.10%。其中 A<sub>1</sub> 工况的底泥含水率为 120.69%, 为试验工况中的最小值。无论随着 PAC 还是 APAM 添加量的增大, 底泥的含水率曲线大多呈上升趋势, 说明较小的 APAM 或 PAC 添加量有利于底泥含水率的降低。单一添加 APAM 的 D 组以及 PAC 的 E 组, 其底泥含水率分别为 130.70% 和 156.00%; 与 D、E 组具有同类絮凝剂等量添加量的 C<sub>3</sub> 工况, 其含水率为 130.10%。C<sub>3</sub> 工况与 D 工况的底泥含水率近乎相等, 相比 E 工况的底泥含水率减小了 16.60%, 说

明在降低底泥含水率方面 APAM 优于 PAC。对于 APAM 与 PAC 复合絮凝泥浆而言, 为减小絮凝后底泥的含水率, 宜以 APAM 为主、PAC 为辅, 在单一 APAM 最优添加量的基础上, 适当减小 APAM 添加量, 辅以一定的 PAC 添加量(满足上液清澈度即可)。



a) PAC

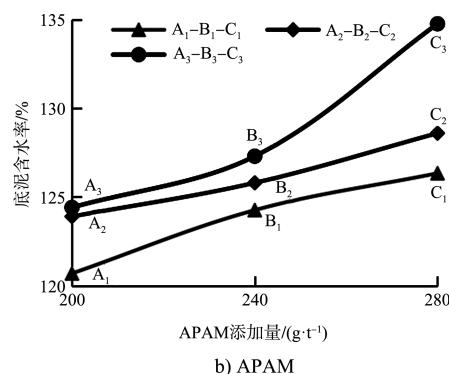


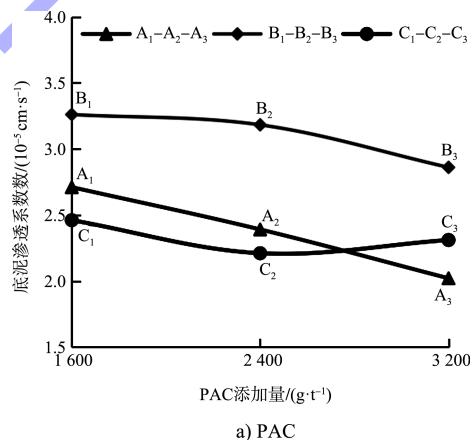
图 2 絮凝剂添加量对底泥含水率的影响曲线

### 2.3 复合絮凝对底泥渗透系数的影响

单一添加 APAM 的 D 组和 PAC 的 E 组, 其底泥渗透系数分别为  $3.34 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$  和  $1.27 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ , 复合絮凝试验 A、B 和 C 组的底泥渗透系数见图 3。图 3a) 显示: 随着 PAC 添加量的增大, A 组的底泥渗透系数由  $2.71 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$  下降到  $2.02 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ ; B 组的底泥渗透系数由  $3.26 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$  下降到  $2.86 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ ; C 组的底泥渗透系数由  $2.46 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$  下降到  $2.31 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ , 底泥渗透系数曲线大致呈下降趋势。说明复合絮凝试验中 PAC 添加量增大不利于底泥渗透性提高。而图 3b) 呈现的规律为: 随着 APAM 添加量的增大, 工况 A₁-B₁-C₁、A₂-B₂-C₂、A₃-B₃-C₃ 的底泥渗透系数曲线都呈先上升后下降趋势, 存在一

个最优添加量, 当 APAM 的添加量为 240 g/t 时, 各组的渗透系数最大。

比较具有同类絮凝剂等量添加量的复合絮凝试验 C<sub>3</sub> 工况与单一添加 APAM 的 D 工况以及 PAC 的 E 工况的底泥渗透系数, D 工况的渗透系数最大; C<sub>3</sub> 工况的渗透系数其次; E 工况的渗透系数最小。其中 D 工况的渗透系数是 E 工况的 2.63 倍, C<sub>3</sub> 工况的渗透系数是 E 工况的 1.82 倍。说明 APAM 对提高底泥渗透系数有利, 而 PAC 不利于底泥渗透系数的提高。复合絮凝最优添加量 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub> 工况的渗透系数分别达到了单一添加 APAM 的最优添加量 D 组的 97.6%、95.3% 和 85.6%, 是单一添加 PAC 的最优添加量 E 组的 2.57、2.51 和 2.25 倍; 而复合絮凝试验组的上液比单一添加 APAM 的最优添加量 D 组的清澈。说明用复合絮凝剂进行疏浚泥浆的泥水快速分离优于单一絮凝剂 APAM 或 PAC。



a) PAC

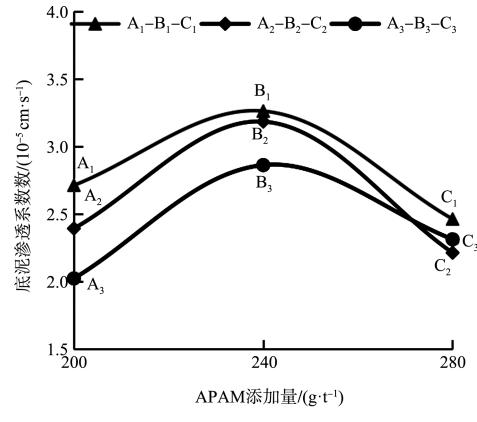


图 3 絮凝剂添加量对底泥渗透系数的影响曲线

### 3 絮凝效果对比

APAM 具有絮凝性, 其通过电中和、架桥吸附作用<sup>[14]</sup>, 使泥浆中悬浮物质颗粒表面的动电位降低而凝聚; 同时 APAM 的分子链固定在不同的颗粒表面上, 各颗粒间形成聚合物的桥, 使颗粒形成聚集体而沉降。黏土颗粒在下沉过程中形成比较多的孔隙。在图 4a) 的底泥微观结构 SEM 图像中显示, 经 APAM 絮凝后, 底泥的土颗粒呈纤维状、网状的空间结构。这种结构之间的孔隙是黏土颗粒在下沉过程中形成的, 数量多且杂乱无章, 形状大小也各不相同。这些孔隙中充满水, 使得底泥具有较高的含水率, 而且这些孔隙也是渗透的通道, 宏观表现为底泥的渗透系数较大。另外 APAM 能够有效降低流体的摩擦阻力, 加速颗粒体的沉积作用, 表现为经 APAM 絯凝的泥浆, 其沉积时间较 PAC 絯凝的短。

PAC 絯凝是以压缩双电层和电性中和作用<sup>[15]</sup>形成较多细小的矾花, 通过卷带网捕和吸附桥连作用形成较大的颗粒, 从而使泥浆中的黏土颗粒沉积。图 4b) 为单一 PAC 絯凝后底泥的 SEM 图像, 可以观察到经 PAC 絯凝后底泥大致呈片状结构。相对 APAM 絯凝后的底泥孔隙而言, 片状结构之间的孔隙较少, 宏观表现为经 PAC 絯凝后底泥的渗透系数较 APAM 的小。由于 PAC 絯凝形成细小的矾花, 矜花中的黏土颗粒之间间距较大, 因此底泥中的片状结构之间间距较大, 导致其含水率高于 APAM 絯凝后的底泥含水率。

APAM 与 PAC 复合絮凝泥浆时, PAC 中的 3 价铝离子对泥浆中的黏土胶体颗粒进行电性中和压缩双电层, 使其电位降低, 黏土颗粒之间的斥力减小而结合成小的絮体, 这种小的絮体在 APAM 高分子长链吸附架桥作用下形成大的絮凝体, 在重力作用下发生沉积, 沉积过程中的卷扫作用继续吸附更多的黏土颗粒。当 PAC 用量较少时有利于双电层的压缩, 结合架桥作用, 能够吸附更多的黏土颗粒, 使底泥含水率降低; 当 PAC 絯凝剂投加量过大, 泥浆中的黏土颗粒吸附过多的反离子, 使原本带负电荷的胶粒转变为带正电荷, 胶粒间排斥力变大, 双电层变厚, 导致底泥含水率

增大; 而当 APAM 絯凝剂投加量过大时, 泥浆的黏度增加, 吸附架桥作用产生的桥式聚合物妨碍黏土颗粒相互靠近, 絯凝体内部液体难以排出, 导致底泥含水率增大, 渗透系数反而减小。

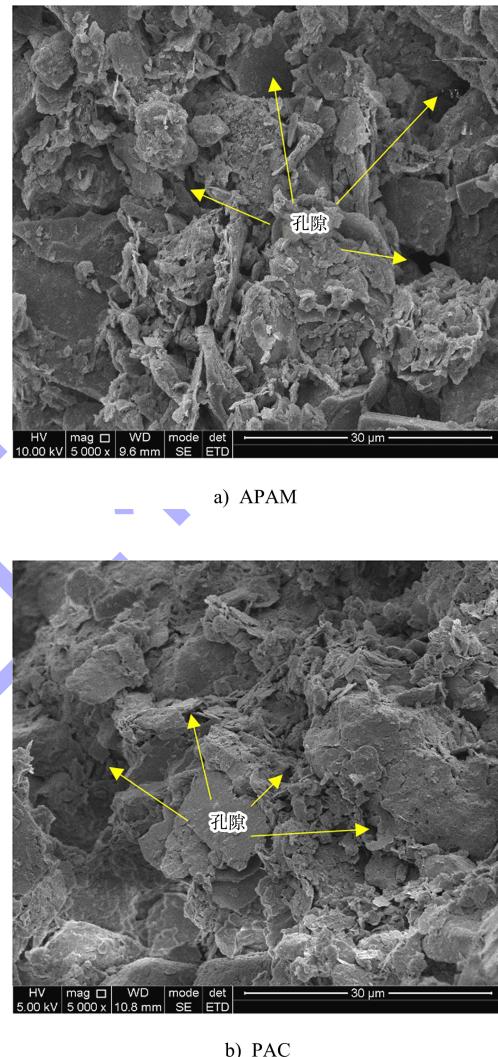


图 4 单一絮凝后底泥微观结构 (5 000 倍)

根据单一絮凝试验与复合絮凝试验结果进行疏浚泥浆絮凝沉积试验的效果对比分析, 结果见表 3。

由表 3 可知: 单一 APAM 絯凝剂处理的疏浚泥浆, 其沉积时间短、底泥含水率低、底泥渗透系数大, 但处理后的上液较浑浊; 单一 PAC 絯凝剂处理的疏浚泥浆, 其处理后的上液清澈, 但泥浆沉积时间长、底泥含水率较高、底泥渗透系数较小。经过 APAM 和 PAC 复合絮凝处理的疏浚泥浆, 其上液清澈、泥浆沉积时间短、底泥含水率低、渗透系数高。

表 3 单一絮凝试验与复合絮凝试验对比

絮凝剂	泥水分离情况	泥浆沉积时间/min	底泥含水率/%	底泥渗透系数/( $10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
单一絮凝	PAC 絮凝剂 上液清澈, 泥水分离效果好	105	156.0	1.27
	APAM 絯凝剂 上液较浑浊, 泥水分离效果较差	37	130.7	3.34
复合絮凝(APAM 与 PAC 复合)	上液清澈, 泥水分离效果好	38~48	125.0	2.3~3.3

为实现泥浆中的黏土颗粒与水的快速分离并满足分离后的上液清澈的要求, 在此基础上更好地降低底泥含水率和增大底泥渗透系数, 以便于后期能够加快底泥的排水固结, 可以用 APAM 和 PAC 复合絮凝处理疏浚泥浆。在泥浆沉积时间满足工期要求的情况下, 通过试验确定渗透系数最大的复合絮凝添加量, 并在满足上液清澈度的情况下, 宜减少 PAC 的添加量。

试验选用的土材料来自南京江心洲边滩淤泥土样, 其粉土与黏土的比例为 2.4:1, 若仅考虑缩短泥浆的沉积时间, 可参考选择 1 600 g/t 的 PAC 与 280 g/t 的 APAM 复合处理泥浆; 若考虑降低絮凝后底泥含水率, 可参考选择 1 600 g/t 的 PAC 与 200 g/t 的 APAM 复合处理泥浆; 若考虑增大絮凝后底泥渗透系数, 可参考选择 1 600 g/t 的 PAC 与 240 g/t 的 APAM 复合处理泥浆; 若综合考虑泥浆的沉积时间短、上液清澈、底泥含水率低和渗透系数高, 可参考 1 600 g/t 的 PAC 和 240 g/t 的 APAM 复合处理泥浆。当工程中需要处理的疏浚泥浆中粉土与黏土比例含量不同时, 可参考相关研究结果, 进一步进行试验研究, 以满足工程处理需要。

#### 4 结论

1) 在小于单一絮凝剂 APAM 最优添加量的前提下, APAM 与 PAC 复合絮凝泥浆随着 APAM 添加量的增大, 泥浆的沉积时间逐渐缩短, 而 PAC 剂量变化对泥浆沉积时间影响较小;

2) APAM 与 PAC 复合絮凝泥浆能够有效降低底泥的含水率, 但随着 APAM 和 PAC 添加量的增大, 底泥含水率呈上升趋势, 较小的 APAM 或 PAC 添加量更有利于底泥含水率的降低;

3) 对于底泥渗透系数而言, APAM 与 PAC

复合絮凝泥浆存在一个最优的 APAM 添加量; 而随着 PAC 添加量的增大, 底泥渗透系数逐渐减小;

4) APAM 与 PAC 复合絮凝疏浚泥浆能够实现泥浆的泥水快速分离。综合考虑上液清澈与否、泥浆沉积时间、底泥含水率和底泥渗透系数等方面, 复合絮凝较单一 APAM 或 PAC 的效果好。复合絮凝中, 在减小泥浆沉积时间、降低底泥含水率和提高底泥渗透系数方面, APAM 效果优于 PAC, 在提高上液清澈度方面, PAC 的效果优于 APAM。

#### 参考文献:

- [1] 俞亚南, 张仪萍. 杭州西湖疏浚底泥工程性质试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 579-582.
- [2] 韩照祥, 何冠东, 李祥, 等. 江苏海域倾倒区对海洋环境影响的安全性评价[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(3): 11-14, 51.
- [3] 张春雷, 管非凡, 李磊, 等. 中国疏浚淤泥的处理处置及资源化利用进展[J]. 环境工程, 2014, 32(12): 95-99.
- [4] VIRTASALO J J, KORPINEN S, KOTILAINEN A T. Assessment of the influence of dredge spoil dumping on the seafloor geological integrity[J]. Frontiers in marine science, 2018, 4(5): 131-146.
- [5] 刘莹, 肖树芳, 王清. 吹填土室内模拟试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 518-521, 528.
- [6] HAMER K, KARIUS V. Brick production with dredged harbour sediments: an industrial-scale experiment [J]. Waste management, 2002, 22(5): 521-530.
- [7] 袁永兵, 陈洪龄, 吕志刚, 等. 以干化太湖淤泥为原料烧结制砖的研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(5): 179-182.
- [8] 朱伟, 闵凡路, 吕一彦, 等.“泥科学与应用技术”的提出及研究进展[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3041-3054.

(下转第 55 页)