

絮凝剂作用下黏性细沙絮凝沉降规律研究

李青芝¹, 张根广¹, 孟若霖², 王玺玥¹

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 山西水资源研究所有限公司, 山西 太原 030000)

摘要: 细颗粒泥沙广泛分布于河流、水库、河口及海岸水体中, 其絮凝沉降及输移规律是泥沙运动力学中一个重要课题。采用自制沉降实验装置, 实验观测了不同絮凝剂浓度、不同浓度黏性细颗粒泥沙的絮凝沉降过程, 分析研究了黏性细沙絮凝沉降规律。结果表明: 聚合氯化铝 (PAC) 絮凝剂比较稳定, PAC 溶液浓度对不同泥沙浓度絮团沉速的影响均较小, 最佳投放浓度可统一采用 0.08 g/L。阳离子型聚丙烯酰胺 (CPAM) 絮凝剂对泥沙浓度的反应最为敏感, 絮凝剂最佳投放浓度随着泥沙浓度的变化分为 3 个稳定段和 2 个敏感段, 稳定段 CPAM 最佳投放浓度分别为 0.08、0.10 和 0.12 g/L, 敏感段 CPAM 最佳投放浓度可采用区间插值方法选取。阴离子型聚丙烯酰胺 (APAM) 絮凝剂最佳投放浓度随着泥沙浓度的变化分为 2 个稳定段和 1 个敏感段, 稳定段 APAM 最佳投放浓度不随泥沙浓度的变化而变化, 分别为 0.08 和 0.10 g/L, 敏感段 APAM 最佳投放浓度可采用区间插值方法选取。絮凝剂 APAM 的絮凝效果最好, 絮凝剂 CPAM 的絮凝效果次之, 絮凝剂 PAC 的絮凝效果较差。

关键词: 黏性细颗粒泥沙; 泥沙絮凝沉降; 絮凝剂; 絮团沉速

中图分类号: TV149

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)06-0124-06

Flocculation and sedimentation of cohesive fine-grained sediment under the action of flocculants

LI Qingzhi¹, ZHANG Gengguang¹, MENG Ruolin², WANG Xiyue¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. Shanxi Water Resources Research Institute Co., Ltd., Taiyuan 030000, China)

Abstract: Fine-grained sediment is commonly found in rivers, reservoirs, estuaries and offshore water bodies, and its flocculation and sedimentation is an integral part of mechanics of sediment transport. Here, experiments were conducted to monitor the flocculation and sedimentation process of cohesive fine-grained sediment with different concentrations of flocculants and sediment using a homemade experimental device, according to which the flocculation and sedimentation law of cohesive fine-grained sediment was analyzed and studied. The results show that among the flocculants, polyaluminum chloride (PAC) is relatively stable, and its optimal dosage does not change with the change of sediment concentration, which remains at 0.08 g/L. As for cationic polyacrylamide (CPAM), it is the most sensitive to sediment concentration, and the optimal dosage concentration of the flocculant can be divided into three stable stages and two sensitive stages with the change of sediment concentration; the optimal dosage concentrations corresponding to different sediment concentrations are 0.08, 0.10 and 0.12 g/L at the stable stages, respectively, and those at the sensitive stages can be selected using interval interpolation. In regards to anionic polyacrylamide (APAM), its optimal dosage concentration can be divided into two stable stages with the change of sediment concentration, and the optimal dosage concentration does not change with the change of sediment concentration during the stable stages, which is 0.08 and 0.10 g/L, respectively. In addition, the optimal dosage concentration of APAM at the sensitive stage can be selected by interval interpolation as well. APAM

收稿日期: 2023-03-09; 修回日期: 2023-05-18

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (2021SF-447)

作者简介: 李青芝 (1996 年—), 女, 四川广元人, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学。

通讯作者: 张根广 (1964 年—), 男, 山西夏县人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事水工水力学及河流泥沙方面的研究。

has the best flocculation effect, followed by CPAM, whereas PAC performs poorly.

Key words: cohesive fine-grained sediment; sediment flocculation and sedimentation; flocculant; floc settling rate

1 研究背景

絮凝是自然界中十分常见的现象,广泛存在于河流湖泊等水体中,在泥沙沉积与输运、污水处理等领域,黏性细颗粒泥沙的絮凝问题一直是研究的重点,也是泥沙运动理论研究中一个复杂且不容忽视的课题。不同学者采用不同的实验装置和方法,通过现场观测、室内实验及数值模拟等手段开展了不同絮凝剂及不同紊动剪切率、盐度、悬沙浓度、有机质等条件下的泥沙絮凝沉降规律的研究,取得了丰富的研究成果^[1-14]。

对泥沙絮凝的初步研究大多关注于单一无机盐类絮凝剂^[15-21]。如:Feeney等^[3]以污染物去除率为指标,指出 Cl^- 不仅会引起设备孔腐蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀,而且还会影响吸收塔对 SO_2 的吸收作用,降低脱硫效率; F^- 可与脱硫废水中的 Al^{3+} 生成胶状絮凝物 AlF_3 覆膜于石灰石表面,影响脱硫主反应。王鑫等^[4]利用聚合氯化铝处理脱硫废水,得到了最佳的处理工艺。陈洪松等^[22-24]利用吸管法探究了不同种类絮凝剂(NaCl 、 CaCl_2 、 AlCl_3)、不同搅拌方式和不同浓度对黏性细沙絮凝沉降的影响,结果表明:在采用 NaCl 絮凝剂时,浑水中含沙量随时间的变化可采用动力学模式中的双曲线型来描述,泥沙絮凝度与粒径呈显著的幂函数关系;在采用 CaCl_2 絮凝剂时,絮团沉降速度呈现先增大后减小的趋势;添加 AlCl_3 絮凝剂时,水体中同一高度处的泥沙浓度随着时间的变化呈指数型衰减,且随着搅拌次数的增多,絮团沉速逐渐放缓。Hayet等^[25]通过实验发现,在温度由 $9\text{ }^\circ\text{C}$ 升至 $21\text{ }^\circ\text{C}$ 时,泥沙絮团沉速随着温度的增加而减小;在温度由 $21\text{ }^\circ\text{C}$ 升至 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 时,泥沙清浑交界面沉降速度随着温度的增加而加快。杨耀天^[26]通过添加不同浓度的 NaCl 、 CaCl_2 、 AlCl_3 絮凝剂,进行了 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 不同浓度下的絮凝沉降实验,发现阳离子对泥沙絮凝的影响远大于电解质对泥沙絮凝的影响,并以此推求得到以离子含量为变量的泥沙絮凝沉速公式。张宇卓等^[27]通过实验研究探讨了不同含沙量中添加不同浓度 NaCl 、 CaCl_2 、 AlCl_3 絮凝剂的泥沙絮凝沉降特性,结果表明,絮体的沉降速度随着离子化合价的升高而增大,其中 AlCl_3 对泥沙絮凝的促进作用最为明显。

随着泥沙絮凝研究的深入,有机絮凝剂逐渐开始应用。李慧梅等^[12]研究了聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM)对泥沙颗粒沉降的影响,结果表明最佳加药量随含沙浓度的增大而增加,但最佳加药量的增加幅度有所降低。史志鹏^[28]以非离子型聚丙烯酰胺(nonionic polyacrylamide, NPAM)为研究对象,探究了NPAM的絮凝机理以及絮凝体沉降规律,结果表明,在最佳絮凝投放浓度下,絮团间以点边交接的形式搭接,在电镜图像中可以显著观察到絮体间的交接与桥连,并以此推导出絮团沉速公式。随着科学技术的发展,数字图像处理技术及数学模型在絮凝沉降实验中得到了应用^[29-30]。宋迪迪等^[31]采用IPP(Image-pro plus)软件分析得到的絮凝体结构特征的变化规律与现有结论基本一致,即絮凝体沉速随着絮凝体孔隙比的增大而减小,证明了IPP软件应用于分析絮凝体扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)图像的可行性。Cao等^[32]将机器学习算法应用于细颗粒絮凝沉降实验数据库,开发了非参数数据驱动模型,以预测细颗粒泥沙絮凝沉降速度,经实测资料验证,该模型具有较高的准确性。Moruzzi等^[33]基于分形理论,结合实验与数值方法用于预测絮凝沉降速度。马林^[34]和孟若霖^[35]观测分析了不同絮凝剂浓度下黏性细颗粒泥沙絮凝沉降过程,确定了不同含沙量条件下聚合氯化铝、阳离子型聚丙烯酰胺、阴离子型聚丙烯酰胺絮凝剂的最佳投加浓度。

在前人研究的基础上,本研究采用自制沉降实验装置,对不同泥沙浓度和不同絮凝剂浓度下的黏性细颗粒泥沙的絮凝沉降规律进行了系统地实验及分析,以确定不同含沙量对应的不同絮凝剂的最佳投加浓度,提高絮凝剂的凝剂效果,降低絮凝成本,进一步完善研究内容,为给水、排水等工程的泥沙处理工作提供技术支持。

2 实验材料、仪器设备与方法

2.1 实验材料

实验分析沙样取自渭河杨凌河段洪水淤积体。实验前用 0.074 mm 的标准筛去除泥沙中较粗粒径的颗粒和杂质,之后通过室内沉积过程分选得到需要的实验沙样。沙样级配曲线采用济南微纳公司生产的Winner2008D智能型全自动全量程湿法激光粒度仪测量得到,见图1,沙样中值粒径为 $9.24\text{ }\mu\text{m}$ 。

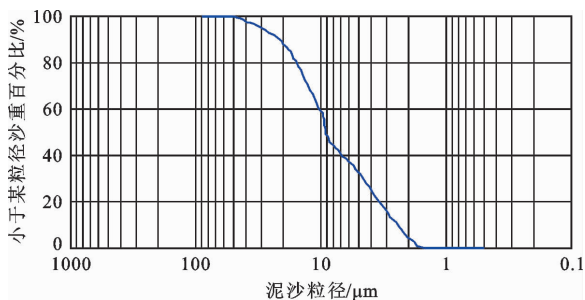


图1 实验沙样级配曲线

实验采用的絮凝剂为无机高分子絮凝剂聚合氯化铝 (polyaluminium chloride, PAC), 工业纯 (96.0%); 有机高分子絮凝剂阳离子型聚丙烯酰胺 (cationic polyacrylamide, CPAM), 工业纯 (99.0%), 相对分子量为 $(800 \sim 1000) \times 10^4$; 阴离子型聚丙烯酰胺 (anionic polyacrylamide, APAM), 工业纯 (99.0%), 相对分子量为 $(1000 \sim 1200) \times 10^4$ 。

实验所采用的絮凝剂均为分析级别, 去离子水的 pH 值为 7.1。

2.2 实验仪器

实验采用的主要仪器为自制沉降实验装置、Winner2008D 智能型全自动全量程湿法激光粒度仪 (济南微纳公司生产)、高速摄像系统、100 mL 烧杯、玻璃水箱、玻璃搅拌棒、注射器、移液管和滴管等。自制的沉降实验装置主要包括保温箱和 250 mL 的量筒。保温箱尺寸为 20 cm × 20 cm × 25 cm (长 × 宽 × 高), 采用有机玻璃加工制成, 外侧包裹 1.5 cm 厚的泡沫板, 保温箱内放置加热棒和温度计控制和检测水温, 以保持水温恒定。量筒高度为 31.3 cm, 直径为 4.24 cm, 放置在自制的保温箱内。

高速摄像系统包括高速相机、采集卡、镜头、光源、计算机等。高速相机采用德国 Mikrottron GmbH 公司生产的 EoSens® 3CXP 主机, 当像素为 1690 × 1710 时, 最大帧率为 569 帧/s。采集卡采用德国 Silicon Software 公司生产的 AQ8 - CXP6D 采集卡, 单通道最高数据采集带宽为 6.25 Gbps。镜头采用尼康 (Nikon) 公司生产的 PC - E 85mm f/2.8 微距镜头。光源采用中国 LOTS 公司生产的 LTS - 3FT3000300 - W 光源, 可提供持续、稳定、可调节的光照条件。计算机中采用 Stream Pix 软件对高速相机进行实时控制与调节, 以获取高质量的照片。天平采用德国赛多利斯科学仪器有限公司生产的 SQP 系列电子天平, 量程为 100 g, 精度为 0.000 1 g。

2.3 实验方法

实验中控制保温箱内水温恒为 20 ± 0.1 °C。调

节高速相机、照明灯和沉降筒的相互位置, 保持高速相机中心高度与 250 mL 量筒的 150 mL 刻度线齐平, 调整光圈和焦距, 保证高速相机可以清晰完整地记录泥沙沉降全过程。具体实验过程如下:

(1) 实验前在水箱中打开加热棒开关, 观察电子温度计示数, 待水体温度上升至设定温度后, 关闭加热棒盖上泡沫板以保持恒温。

(2) 分别配置好 150 mL 指定泥沙浓度浑水溶液和 100 mL 指定絮凝剂浓度溶液, 先将 150 mL 泥沙浑水倒入 250 mL 量筒中, 再将 100 mL 絮凝剂溶液置于 100 mL 容量瓶中, 将量筒和容量瓶都放入保温箱中, 保证实验均在 20 ± 0.1 °C 环境条件下进行。

(3) 将 100 mL 指定絮凝剂浓度溶液加入 250 mL 量筒中, 用玻璃搅拌棒匀速搅拌 2 min, 以保证泥沙颗粒与溶液均匀接触, 搅拌结束后在容器上盖上泡沫板。

(4) 在预留窗口处采用高速摄像系统进行录像, 记录清浑交界面的沉降位置与时间。

3 实验结果分析与讨论

实验观测了不同泥沙浓度 (10、20、30、40、50、60、70、80、90 kg/m³)、添加不同种类单一絮凝剂 (PAC、CPAM 和 APAM)、不同絮凝剂浓度 (0.04、0.06、0.08、0.10、0.12、0.14、0.16、0.20 g/L) 条件下的黏性细沙絮凝沉降过程。

3.1 絮凝剂 PAC 的絮凝沉降规律

在不同泥沙浓度的浑水中加入不同浓度絮凝剂 PAC 溶液时, 黏性细沙絮团沉速变化规律见图 2。

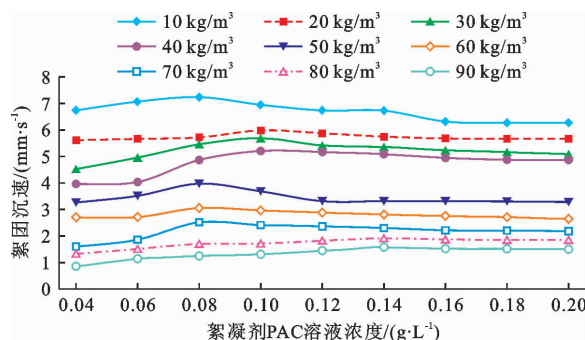


图2 加入不同浓度絮凝剂 PAC 时不同泥沙浓度浑水中黏性细沙絮团沉速的变化规律

由图 2 可见, 不同泥沙浓度絮团沉速随着 PAC 溶液浓度的变化均为一条独立的、较为平稳的变化曲线, 说明 PAC 溶液浓度对絮团沉速的影响较小, 絮团沉速没有随着 PAC 溶液浓度的变化而发生显著变化; 含沙量越大, 絮团沉速越小; 不同泥沙浓度

的絮团沉速均随着 PAC 溶液浓度的增大表现出先增大后减小的统一规律。在泥沙浓度小于 80 kg/m^3 的情况下, PAC 溶液最佳投加浓度介于 $0.08 \sim 0.10 \text{ g/L}$ 之间;在泥沙浓度为 80 和 90 kg/m^3 的情况下, PAC 溶液最佳投加浓度为 0.14 g/L 。综上分析,不同泥沙浓度的絮团沉速随着 PAC 溶液浓度的变化均比较平稳,考虑到实际应用中絮凝剂投放效率等因素,建议在泥沙浓度小于 90 kg/m^3 情况下的 PAC 溶液最佳投放浓度均采用 0.08 g/L 。

3.2 絮凝剂 CPAM 的絮凝沉降规律

在不同泥沙浓度的浑水中加入不同浓度絮凝剂 CPAM 溶液时,黏性细沙絮团沉速变化规律见图 3。

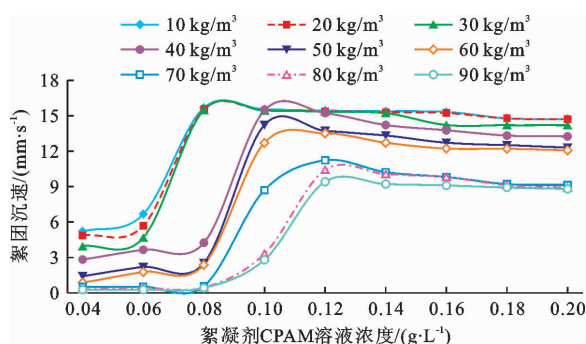


图3 加入不同浓度絮凝剂 CPAM 时不同泥沙浓度浑水中黏性细沙絮团沉速的变化规律

由图 3 可见,随着 CPAM 溶液浓度的增大,不同泥沙浓度的絮团沉速均表现出先增大后减小的变化规律,且每条曲线均存在着一个低临界点和一个高临界点;低临界点对应的 CPAM 溶液浓度称为低临界值,高临界点对应的 CPAM 溶液浓度称为高临界值。在 CPAM 溶液浓度位于两个临界值之外时,不同泥沙浓度的絮团沉速随着 CPAM 溶液浓度的变化均比较平稳;在 CPAM 溶液浓度介于两个临界值之间时,絮团沉速随着 CPAM 溶液浓度的增大而显著增大,说明在此区间,CPAM 溶液浓度对絮团沉速的影响非常明显。因此可将每条曲线的高临界值定义为絮凝剂 CPAM 溶液的最佳投放浓度。对于 $10 \sim 30 \text{ kg/m}^3$ 的泥沙浓度,絮凝剂 CPAM 溶液的最佳投放浓度为 0.08 g/L ;对于 $40 \sim 60 \text{ kg/m}^3$ 的泥沙浓度,絮凝剂 CPAM 溶液的最佳投放浓度为 0.10 g/L ;对于 $70 \sim 90 \text{ kg/m}^3$ 的泥沙浓度,絮凝剂 CPAM 溶液的最佳投放浓度为 0.12 g/L 。

3.3 絮凝剂 APAM 的絮凝沉降规律

在不同泥沙浓度的浑水中加入不同浓度絮凝剂 APAM 溶液时,黏性细沙絮团沉速变化规律见图 4。

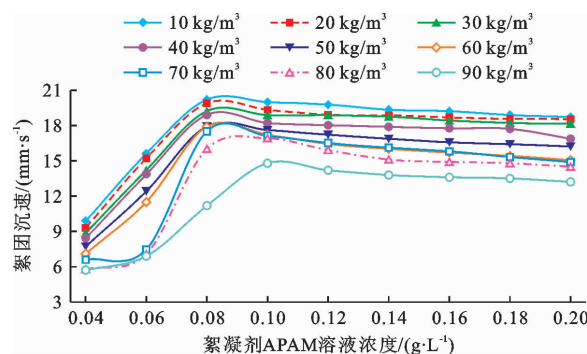


图4 加入不同浓度絮凝剂 APAM 时不同泥沙浓度浑水中黏性细沙絮团沉速的变化规律

由图 4 可见,不同泥沙浓度的絮团沉速随着 APAM 溶液浓度的增大均表现出先增大后减小的相同变化规律,且每一条絮团沉速变化曲线均存在一个临界点,临界点左侧曲线较陡,临界点右侧曲线较缓,临界点处的絮团沉速最大,其对应的絮凝剂浓度为絮凝剂最佳投放浓度。当 APAM 溶液浓度值小于最佳投放浓度值时,不同泥沙浓度的絮团沉速随着 APAM 溶液浓度的增大而迅速增大;当 APAM 溶液浓度值大于最佳投放浓度值时,絮团沉速随着 APAM 溶液浓度的增大而缓慢减小。当泥沙浓度为 $10 \sim 70 \text{ kg/m}^3$ 时,APAM 溶液最佳投放浓度为 0.08 g/L ;当泥沙浓度为 $80 \sim 90 \text{ kg/m}^3$ 时,APAM 溶液最佳投放浓度为 0.10 g/L 。

3.4 不同泥沙浓度对应的不同絮凝剂最佳投放浓度

图 5 为不同泥沙浓度对应的不同絮凝剂最佳投放浓度变化曲线。由图 5 可见,絮凝剂 PAC 溶液最佳投放浓度对泥沙浓度反应不敏感,随着泥沙浓度变化而变化的幅度较小,故最佳投放浓度均采用 0.08 g/L 。絮凝剂 APAM 对泥沙浓度反应较为敏感,其最佳投放浓度随着泥沙浓度的变化分为 2 个稳定段和 1 个敏感段,2 个稳定段泥沙浓度分别为 $10 \sim 70$ 和 $80 \sim 90 \text{ kg/m}^3$,相应的 APAM 溶液最佳投放浓度分别稳定在 0.08 和 0.10 g/L ,不随泥沙浓度的变化而变化;敏感段泥沙浓度为 $70 \sim 80 \text{ kg/m}^3$,APAM 溶液最佳投放浓度可采用区间插值选取。絮凝剂 CPAM 对泥沙浓度的反应最为敏感,其最佳投放浓度随着泥沙浓度的变化分为 3 个稳定段和 2 个敏感段,3 个稳定段泥沙浓度分别为 $10 \sim 30$ 、 $40 \sim 60$ 和 $70 \sim 90 \text{ kg/m}^3$,相应的 CPAM 溶液最佳投放浓度分别稳定在 0.08 、 0.10 和 0.12 g/L ,不随泥沙浓度的变化而变化;2 个敏感段泥沙浓度分别为 $30 \sim 40$ 和 $60 \sim 70 \text{ kg/m}^3$,其相应的 CPAM 最佳投放浓度可采用区间插值选取。

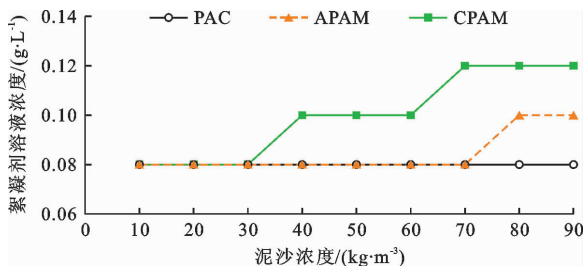


图5 不同泥沙浓度对应的不同絮凝剂最佳投放浓度变化曲线

3.5 不同泥沙浓度与不同絮凝剂最佳投放浓度对应的絮团沉速变化规律

图6给出了本文作者及孟若霖^[35]观测的不同絮凝剂最佳投放浓度下的絮团沉速随泥沙浓度的变化规律。

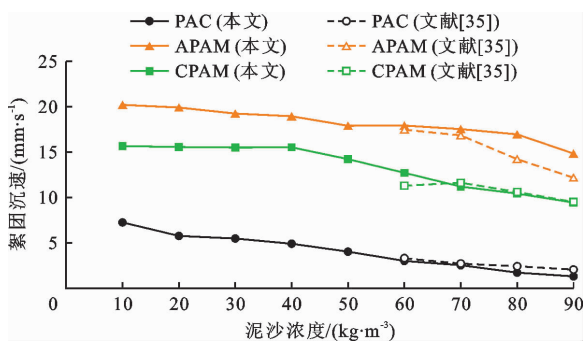


图6 不同絮凝剂最佳投放浓度下的絮团沉速随泥沙浓度的变化规律

由图6可见,孟若霖^[35]观测了3种絮凝剂在泥沙浓度介于60~90 kg/m³区间的泥沙絮凝沉降规律,其中絮凝剂PAC和CPAM的絮团沉速与本文实测数据基本一致,絮凝剂APAM在泥沙浓度为80~90 kg/m³时的絮团沉速与本文实测数据差异相对较大,但总体趋势完全一致,即3种絮凝剂最佳投放浓度相应的絮团沉速均随着泥沙浓度的增大而减小。絮凝剂PAC形成的泥沙絮团沉速最小,絮凝剂CPAM形成的泥沙絮团沉速相对较大,絮凝剂APAM形成的泥沙絮团沉速最大,表明絮凝剂APAM的絮凝效果最好,而絮凝剂PAC的絮凝效果较差。

3.6 无机絮凝剂与有机絮凝剂的絮凝机理分析

泥沙絮凝是指黏性细颗粒泥沙之间通过互相作用减少泥沙颗粒表面所带的电荷,从而减小相互间的排斥作用力,形成一定团状结构的絮凝体。一般情况下,水体中泥沙颗粒表面带有负电荷,在泥沙沉降过程中,泥沙颗粒将带正电荷的离子吸引至其表

面形成一个相对密集层,而同性电荷将会被排斥,使泥沙颗粒表面形成双电层结构。因此,通常在黏性泥沙含量达到一定浓度后,即使不加入絮凝剂,泥沙颗粒也会形成絮团^[26,34-35]。

无机盐类絮凝剂的絮凝机理就是利用水体中泥沙颗粒表面带有负电荷的这一特性,通过在水体中加入带有正电荷的离子,降低细颗粒泥沙表面的电位,减小表面双电层厚度及颗粒之间的排斥力,从而增大泥沙颗粒之间的综合作用力,使泥沙颗粒间更易于絮凝^[26,34-35]。

与无机盐类絮凝剂相比,无机聚合物絮凝剂具有使泥沙颗粒形成絮凝体速度快、密度大、沉降速度快等特点。其根本原因在于,无机聚合物絮凝剂不仅能提供无机盐类絮凝剂的正电荷离子,达到无机盐类絮凝剂的絮凝效果,而且还能提供大量的多羟基络离子,并以—OH为架桥形成多核络离子,从而形成无机高分子化合物(分子量可达 1×10^5),因此能够强烈吸附胶体微粒,通过粘附、架桥和交联作用促使胶体絮凝^[36]。例如,本文采用的聚合氯化铝(PAC)絮凝剂,其絮凝效能可比无机铝盐类絮凝剂提高2~3倍。絮凝剂PAC投入水中后,可直接吸附在颗粒物表面,发挥了很强的电中和及架桥粘合作用,随后和溶液中的—OH相互发生水解作用,并在界面上生成氢氧化铝凝胶沉淀物,与此同时,PAC还将中和泥沙颗粒表面的电荷,从而使胶体离子发生互相吸引作用,形成絮状结构。

与无机聚合物絮凝剂相比,有机高分子絮凝剂的分子量更大,可达到几十万至几百万甚至几千万,因此能够快速形成絮凝体,絮凝体的密度更大、沉降速度更快。有机高分子的絮凝作用也包括两个方面:一方面是高分子吸附架桥作用,另一方面是电中和作用。吸附在泥沙微粒表面上的高分子长链同时也吸附在另一个微粒的表面上,通过“架桥”方式将两个或更多的微粒联在一起,从而产生絮凝。当聚合物带有与粒子相反的电荷时,可以产生强烈的、定量的吸附作用,此时为电中和作用,当然有时絮凝是架桥和电中和共同作用的结果,一般同电荷以吸附架桥为主,异电荷以电中和为主^[37]。例如,本文选用的聚丙烯酰胺(PAM),其絮凝机理是通过分子链中特有的—CONH₂官能团与悬浮物发生吸附架桥作用,从而增大絮体尺寸、加大絮团沉速。

4 结 论

通过自制絮凝沉降装置对不同含沙量浑水中加

入不同浓度的3种絮凝剂溶液的絮团沉速进行了实验观测与分析,得到以下主要结论:

(1)聚合氯化铝(PAC)絮凝剂最佳投放浓度基本不随泥沙浓度的变化而变化,可均采用0.08 g/L。

(2)阴离子型聚丙烯酰胺(APAM)絮凝剂最佳投放浓度随着泥沙浓度的变化分为2个稳定段和1个敏感段。2个稳定段泥沙浓度分别为10~70和80~90 kg/m³,相应的APAM最佳投放浓度分别为0.08和0.10 g/L;敏感段泥沙浓度为70~80 kg/m³,APAM最佳投放浓度可采用区间插值选取。

(3)阳离子型聚丙烯酰胺(CPAM)絮凝剂最佳投放浓度随着泥沙浓度的变化分为3个稳定段和2个敏感段。3个稳定段泥沙浓度分别为10~30、40~60和70~90 kg/m³,相应的CPAM最佳投放浓度分别为0.08、0.10和0.12 g/L;2个敏感段泥沙浓度分别为30~40和60~70 kg/m³,其相应的CPAM最佳投放浓度可采用区间插值选取。

(4)3种絮凝剂最佳投放浓度对应的絮团沉速均随着泥沙浓度的增大而减小,阴离子型聚丙烯酰胺(APAM)絮凝剂的絮凝效果最好,阳离子型聚丙烯酰胺(CPAM)絮凝剂絮凝效果次之,聚合氯化铝(PAC)絮凝剂的絮凝效果较差。

参考文献:

- [1] MA Xiaoying, ZENG Guangming, ZHANG Chang, et al. Characteristics of BPA removal from water by PACl-Al₁₃ in coagulation process[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2009, 337(2): 408-413.
- [2] LIU Hongyu, ZHANG Huan, WANG Jie, et al. Biological synthesis of Pt nanoparticles in a microfluidic chip and modeling of the formation process with PBM and CFD[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2017, 92(8): 2171-2177.
- [3] FEENEY S, KLIDAS M. Salt dryers for true zero liquid discharge from WFGD wastewater[J]. Power Engineering, 2016, 120(6): 20-23.
- [4] 王鑫,闫淑梅,马宵颖.无机絮凝剂与PAM协同处理脱硫废水的实验研究[J].吉林电力,2022,50(6):39-42.
- [5] 唐建华,何青,王元叶,等.长江口浑浊带絮凝体特性[J].泥沙研究,2008,33(2):27-33.
- [6] 万远扬,吴华林,顾峰峰.长江口细颗粒泥沙沉降速度室内试验研究[J].人民长江,2014,45(1):98-101.
- [7] 柴朝晖,李昊洁,王茜,等.黏性泥沙絮凝研究进展[J].长江科学院院报,2016,33(2):1-9+18.
- [8] 张乃予,周晶晶,王捷.泥沙絮团结构的试验研究综述[J].泥沙研究,2016,41(1):76-80.
- [9] 姬昌辉,谢瑞,吉立,等.灌河口海域泥沙悬浮和沉降试

验研究[J].水运工程,2020(4):22-26.

- [10] 袁强.云南红土型泥沙室内静水沉降研究[D].昆明:昆明理工大学,2019.
- [11] SKINNEBACH K H, FRUERAARD M, ANDERSEN T J. Biological effects on flocculation of fine-grained suspended sediment in natural seawater[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2019, 228: 106395.
- [12] 李慧梅,陈建国,袁玉萍.高含沙浑水在絮凝剂作用下的絮凝沉降试验研究[J].泥沙研究,2006,31(4):73-77.
- [13] 余立新,张金凤,张庆河,等.有机质对絮团形态影响的试验研究[J].电子显微学报,2020,39(2):158-163.
- [14] 李杰,杨文俊,景思雨,等.黏性泥沙絮凝研究现状与进展[J].长江科学院院报,2022,39(4):8-13.
- [15] ALMUBADDAL F, ALRUMAIHI K, AJBAR A. Performance optimization of coagulation/flocculation in the treatment of wastewater from a polyvinyl chloride plant[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 161(1): 431-438.
- [16] HAO Qiang, CHEN Tong, WANG Ruiting, et al. A separation-free polyacrylamide/bentonite/graphitic carbon nitride hydrogel with excellent performance in water treatment[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 197(Part 1): 1222-1230.
- [17] POURJAVADI A, HOSSEINZADEH H, MAHDAVINIA G R, et al. Carrageenan-g-Poly(sodium acrylate)/Kaolin superabsorbent hydrogel composites: synthesis, characterisation and swelling behavior[J]. Polymers and Polymer Composites, 2007, 15(1): 43-51.
- [18] ZHENG Huaili, ZHU Guocheng, JIANG Shaojie. Investigations of coagulation-flocculation process by performance optimization, model prediction and fractal structure of flocs[J]. Desalination, 2011, 269(1-3): 148-156.
- [19] 常青.絮凝科学的研究与进展[J].环境科学,1994,15(1):69-72.
- [20] 常青.水处理絮凝剂(第二版)[M].北京:化学工业出版社,2011.
- [21] 常青.论疏水絮凝与疏水作用力[J].环境科学学报,2018,38(10):3787-3796.
- [22] 陈洪松,邵明安. CaCl₂对细颗粒泥沙静水絮凝沉降的影响[J].水土保持学报,2000,14(2):46-49.
- [23] 陈洪松,邵明安. AlCl₃对细颗粒泥沙絮凝沉降的影响[J].水科学进展,2001,12(4):445-449.
- [24] 陈洪松,邵明安. NaCl对细颗粒泥沙静水絮凝沉降动力学模式的影响[J].水利学报,2002,33(8):63-67.
- [25] HAYET C, HÉDI S, SAMI A, et al. Temperature effect on settling velocity of activated sludge[C]// 2nd International Conference on Chemical, Biological and Environmental Engineering, Cairo, Egypt, 2010.

(下转第146页)

- 指标的关系及评价方法[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(6): 75-80.
- [15] 邵生俊, 李 骏, 李国良, 等. 大厚度自重湿陷黄土湿陷变形评价方法的研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 965-978.
- [16] 纪风兰. 长距离明渠输水渠道变形分析[J]. 黑龙江水利科技, 2015, 43(1): 25-27.
- [17] 王正中, 江浩源, 王 羿, 等. 旱寒区输水渠道防渗抗冻胀研究进展与前沿[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 120-132.
- [18] 于云飞. 新疆某水电站引水渠道变形处理技术措施[J]. 小水电, 2018(5): 62-66+74.
- [19] 金松丽. 基于“可能湿陷变形”的黄土渠道地基湿陷性评价方法研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017.
- [20] GIOMI I, FRANCISCA F M. Numerical modeling of the oedometrical behavior of collapsible loess[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022, 40(5): 2501-2512.
- [21] WANG Yuan, WEI Zhijian, REN Jie, et al. A new evaluation model of a water conveyance channel based on Bayesian theory by integrating monitoring and detection information[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 8914.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 湿陷性黄土地区建筑标准: GB 50025—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [23] LIU Zhen, LIU Fengyin, MA Fuli, et al. Collapsibility, composition, and microstructure of loess in China[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(4): 673-686.
- [24] WANG Zhiwei, HE Yanping, DUAN Zhongdi, et al. Effects of rolling motion on transient flow behaviors of gas-liquid two-phase flow in horizontal pipes[J]. Ocean Engineering, 2022; 255: 111482.
- [25] 马 闫, 王家鼎, 彭淑君, 等. 大厚度黄土自重湿陷性场地浸水湿陷变形特征研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 537-546.
- [26] 陈香凤, 徐建军. 浅谈含水量对黄土湿陷性的影响[J]. 中国建材科技, 2020, 29(2): 66+124.
- [27] GARAKANI A A, HAERI S M, KHOSRAVI A, et al. Hydro-mechanical behavior of undisturbed collapsible loessial soils under different stress state conditions[J]. Engineering Geology, 2015, 195: 28-41.

(上接第 129 页)

- [26] 杨耀天. 细颗粒泥沙静水沉降实验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [27] 张宇卓, 张根广, 李 青, 等. 基于电解质浓度参数的泥沙沉降公式研究[J]. 泥沙研究, 2020, 45(3): 1-7+45.
- [28] 史志鹏. 非离子聚丙烯酰胺(NPAM)对絮凝体沉降特性的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [29] 李文杰, 杨胜发, 张帅帅, 等. 基于图像灰度的非均匀粉砂沉降试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2012, 27(6): 696-703.
- [30] PARK S, MOON Y, KIM J O. Evaluation of the image analysis method using statistics for determining the floc size and settling velocity in ballasted flocculation[J]. Desalination and Water Treatment, 2017, 99: 220-227.
- [31] 宋迪迪, 张根广, 张宇卓, 等. Image-pro plus 软件在泥沙絮凝体结构特征分析中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(4): 156-161.
- [32] CAO Zhendong, WOFRAM P J, ROWLAND J, et al. Estimating sediment settling velocities from theoretically guided data-driven approach[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(10): 04020067.
- [33] MORUZZI R B, BRIDGEMAN J, SILVA P A G. A combined experimental and numerical approach to the assessment of floc settling velocity using fractal geometry[J]. Water Science and Technology, 2020, 81(5): 915-924.
- [34] 马 林. 泥沙静水絮凝沉降规律研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [35] 孟若霖. 黏性细颗粒泥沙絮凝沉降规律研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [36] 毛艳丽, 张延凤, 罗世田, 等. 水处理用絮凝剂絮凝机理及研究进展[J]. 华中科技大学学报, 2008, 25(2): 78-82.
- [37] 佟瑞利, 赵娜娜, 刘成蹊, 等. 无机、有机高分子絮凝剂絮凝机理及进展[J]. 河北化工, 2007, 30(3): 3-6.