

基于絮凝沉降结合技术的水利水电工程砂石废水处理研究

赵佩兰

河南省陆浑水库运行中心 河南 洛阳 471003

【摘要】：水利水电工程建设中会产生大量砂石废水，若未经有效处理直接排放，将对周边环境造成严重污染。本文聚焦于絮凝沉降结合技术在砂石废水处理中的应用。首先分析了砂石废水的特点与危害，接着阐述了絮凝沉降结合技术的原理，包括絮凝剂的选择、作用机制以及沉降过程。然后探讨了该技术在实际应用中的优势与可能面临的问题，并提出了相应的解决策略。研究表明，絮凝沉降结合技术能有效处理水利水电工程中的砂石废水，降低其对环境的负面影响，具有广阔的应用前景。

【关键词】：水利水电工程；砂石废水处理；絮凝沉降结合技术

DOI:10.12417/2811-0528.25.20.077

引言

水利水电工程作为国家基础设施建设的重要组成部分，在防洪、灌溉、发电、供水等方面发挥着关键作用。然而，在工程建设过程中，砂石加工环节会产生大量的废水，这些废水中含有大量的悬浮物、泥沙等杂质，若直接排放到自然水体中，会导致水体浑浊度增加、水质恶化，影响水生生物的生存和水资源的利用，对周边生态环境造成严重破坏。因此，寻求一种高效、经济的砂石废水处理技术具有重要的现实意义。絮凝沉降结合技术凭借其处理效果好、操作简单、成本较低等优点，在砂石废水处理领域得到了广泛关注和应用。

1 水利水电工程砂石废水的特点与危害

1.1 砂石废水的特点

砂石废水的物理特性主要表现为高浊度和强不稳定性。水中悬浮颗粒的粒径分布范围较广，从胶体级的微细颗粒到毫米级的粗颗粒共存，这种多分散体系使得自然沉降过程变得复杂。颗粒表面通常带有负电荷，易形成稳定的悬浮状态，且受水流剪切作用影响易发生破碎-聚合的动态平衡。废水的流变特性呈现出明显的非牛顿流体行为，随着固体浓度升高，其黏度呈现指数增长趋势，这对输送和处理系统提出特殊要求。从化学组成来看，这类废水呈现典型的矿物加工废水特征。主要成分包括硅酸盐类矿物颗粒、少量溶解性盐类以及微量金属离子。水体pH值通常偏碱性，这与岩石破碎过程中新鲜矿物表面的离子溶出有关。溶解氧含量往往较低，主要由于颗粒物表面对氧的吸附消耗。从工程运行角度看，这类废水具有显著的间歇性和不均衡性。水量和水质随加工工序的变化呈现周期性波动，破碎工序产生高浓度废水，而筛分过程则产生较大流量的低浓度废水。

1.2 砂石废水的危害

砂石废水排放对水环境的影响呈现多层次破坏特征。水体

中过量的悬浮颗粒物会显著改变水体的光学性质，导致透光层厚度急剧减小，这种光照条件的恶化直接抑制浮游植物的初级生产力。随着浊度持续升高，整个水生食物链的基础环节受到削弱，鱼类等高等水生生物面临食物短缺危机。悬浮物沉积过程会覆盖原有底栖生物群落，特别是对滤食性生物的鳃部结构造成机械损伤，这类生物往往承担着水体自净功能，其种群衰退将引发二次生态危机。沉积物中的细颗粒组分具有较强吸附能力，会成为重金属和有机污染物的载体，延长污染物在水环境中的滞留时间。对陆地生态系统的影响则表现出累积性特征。悬浮物在土壤表层形成的致密层会破坏土壤团粒结构，使耕作层孔隙度下降，根系发育空间受限。随着渗透率降低，土壤内部的气体交换受阻，好氧微生物活性受抑制，有机质分解速率减缓。长期受纳废水区域的土壤会出现明显的质地变化，砂粒含量异常增加而黏粒组分流失，这种质地恶化导致保水保肥能力持续衰退。更严重的是，随废水迁移的胶体颗粒可能堵塞土壤毛细管，造成水分上升运动受阻，即使在降水后也会出现局部积水现象。景观系统的破坏具有不可逆性。废水携带的悬浮物在河道两岸形成的灰白色沉积带，会产生强烈的视觉污染，破坏自然景观的和谐性。持续排放会导致受纳水体永久性浑浊，丧失景观水体的美学价值。在干旱地区，蒸腾作用会使沉积物中的盐分析出，在地表形成难看的盐霜斑块。

2 絮凝沉降结合技术原理

2.1 絮凝剂的选择

砂石废水处理过程中的絮凝剂选择需要建立在对水质特性的深入理解基础上。无机絮凝剂的应用关键在于其水解产物形态的调控，不同碱化度的聚合铝絮凝剂会产生不同比例的单核与多核羟基配合物，这些水解产物通过表面吸附和电荷中和双重作用实现颗粒脱稳。铁盐絮凝剂在水解过程中会形成更具结晶性的沉淀物，这使得其构建的絮体结构更为密实，但过量使用可能导致出水残留金属离子问题。有机高分子絮凝剂的选择

择更加注重分子结构的适配性。线型聚合物分子链的伸展程度直接影响其架桥效率,而支链化结构则能增强对不规则颗粒的捕获能力。电荷密度是另一个关键参数,过高可能导致分子链过度卷曲,过低则减弱吸附强度。对于含有腐殖酸等溶解性有机物的废水,两性离子型絮凝剂展现出独特优势,其分子链上的正负电荷区域可分别与不同污染物结合。微生物絮凝剂的开发正在突破传统生物技术的局限。通过代谢工程手段可以定向改造菌株的分泌特性,使产生的胞外聚合物具有更宽的pH适应范围和更高的絮凝活性。固定化细胞技术则解决了游离菌体难以回收的问题,使生物絮凝剂的连续生产成为可能。

2.2 絮凝作用机制

絮凝过程的微观机理揭示了固液界面发生的复杂相互作用。电荷中和并非简单的静电吸引,当胶体表面电位降低至临界值时,伦敦-范德华力开始主导颗粒间的相互作用,这种势能曲线的变化决定了絮凝的临界浓度。无机絮凝剂的水解产物在溶液中形成的三维网络结构具有记忆效应,其空间分布特征会影响后续絮体的生长模式。高分子絮凝剂的吸附动力学呈现出明显的浓度依赖性。在稀溶液中,分子链采取较为伸展的构象,有利于实现颗粒间的长程架桥;而在浓溶液中,分子链更倾向于形成密集吸附层,此时电补丁效应成为主要作用机制。絮凝剂分子在颗粒表面的吸附取向也至关重要,平躺吸附有利于电荷中和,而末端吸附则更利于架桥作用。温度对絮凝机制的影响常被忽视。升温会加速水解反应但可能破坏预形成的水解产物,同时改变聚合物分子的柔顺性。对于含黏土矿物的废水,温度波动还会影响层状硅酸盐的边缘电荷分布,进而改变其与絮凝剂的相互作用方式。

2.3 沉降过程

沉降行为的流体力学分析揭示了多相体系的分离本质。在初始自由沉降阶段,颗粒的加速度沉降期往往被忽视,这段时间虽然短暂但对后续絮体结构的形成具有奠基作用。当系统进入干涉沉降区时,悬浮体系开始表现出非牛顿流体特性,表观粘度随剪切速率的变化直接影响着沉降速度的测量精度。压缩沉降阶段的分相分离过程涉及复杂的固液耦合作用。絮体网络中的结合水释放需要克服毛细管压力,这一过程的推动力来自重力场的持续做功。污泥层的压缩模量决定了其最终密实程度,而这一参数与絮体初始结构的强度密切相关。采用阶梯式减速的搅拌程序可以优化絮体结构,使其既保持足够孔隙率便于水分子逸出,又具备必要强度抵抗压缩变形。沉降系统的几何特征对分离效率产生深远影响。传统的矩形沉淀池存在严重的端壁效应,而圆形设计虽能改善流态但可能出现旋流影响污泥收集。新型的立体流场设计通过引入倾斜管组件,在有限空间内大幅增加了有效沉降面积,这种结构创新使沉降设备的处理

能力获得突破性提升。

3 絮凝沉降结合技术在砂石废水处理中的优势与问题

3.1 优势

3.1.1 处理效果好

絮凝沉降结合技术在砂石废水处理中展现出的处理效果优势主要体现在其对悬浮物的高效去除能力。该技术通过絮凝剂的电中和与吸附架桥作用,使废水中的微小悬浮颗粒形成较大的絮体,从而显著提高沉降效率。经过优化的工艺参数,包括pH值调节、搅拌强度和反应时间控制,能够针对不同性质的砂石废水实现精准处理。出水悬浮物浓度可稳定控制在较低水平,满足严格的环保要求。水质透明度的提升直接反映了处理效果。

3.1.2 操作简单

操作简便性是该技术得以广泛应用的关键特征。整套处理系统主要由加药装置、混合反应池和沉淀池构成,模块化设计便于现场安装与调试。自动化控制系统可实现絮凝剂投加量的精确调节,根据进水水质变化自动优化运行参数。操作人员仅需进行常规巡检和设备维护,无需具备极高的专业技能。这种低人力依赖特性特别适合在偏远地区的水电工程中应用,降低了现场管理的复杂度。

3.1.3 成本较低

经济性优势体现在全生命周期成本的控制上。絮凝剂作为主要耗材,其大宗化工产品的特性保证了供应稳定性与价格合理性。无机絮凝剂如聚合氯化铝的吨水处理成本极具竞争力,配合可循环利用的污泥脱水系统进一步降低处置费用。处理设施采用混凝土结构的沉淀池,相比膜处理等高端技术大幅节约了基建投资。能耗主要集中在搅拌设备,功率需求远低于需要高压泵的过滤技术。这种低投入高产出的特点使其成为中大型砂石加工场首选工艺。

3.2 可能面临的问题及解决策略

3.2.1 絮凝剂投加量控制困难

絮凝剂的精准投加是影响砂石废水处理效果的核心因素之一。不同来源的砂石废水其悬浮物浓度、颗粒粒径分布以及电荷特性存在显著差异,这使得固定投加量的模式难以适应实际需求。废水中的黏土矿物或有机质含量波动会改变体系中的胶体稳定性,导致常规投加量可能失效。过量投加不仅造成药剂浪费,还会因电荷反转导致胶体重新稳定,形成细小的难以沉降的絮体。而投加不足则无法有效中和颗粒表面电荷,影响

絮凝效果。为解决这一问题,需建立动态调节机制。通过在线浊度仪或 Zeta 电位分析仪实时监测水质变化,为自动加药系统提供反馈信号。引入基于模糊控制或 PID 算法的智能控制系统,能够根据进水水质波动自动调节加药泵频率。小试试验仍是确定基础投加量的必要环节,采用烧杯试验模拟不同水质条件下的最佳投加区间。针对含泥量高的废水,可考虑分段投加策略,先在快速混合阶段投加部分药剂完成电中和,再在慢速絮凝阶段补充投加以强化絮体生长。定期对出水 SS 检测数据进行趋势分析,可进一步优化控制参数。

3.2.2 污泥处理问题

絮凝沉降产生的污泥具有高含水率、低压实性的特点,体积庞大且易腐化。砂石废水污泥通常含有石英、长石等惰性物质,但也可能夹杂重金属或有机污染物,直接填埋存在淋滤污染风险。传统自然干化方式受场地和气候限制,机械脱水面临滤布堵塞、能耗高等痛点。污泥的粘稠特性导致运输成本增加,而填埋场拒收高含水率污泥的情况时有发生。深度脱水是解决问题的关键路径。采用化学调理联合高压压滤工艺,通过添加石灰或铁盐改善污泥脱水性能,可将含水率降至 60% 以下。离心脱水机适合处理含细颗粒的污泥,而板框压滤机对高黏度污

泥适应性强。热干化技术虽能进一步减量,但需权衡能耗与经济性。资源化利用方面,烧结制备轻骨料时,污泥中的硅铝成分可替代部分黏土原料。经稳定化处理的污泥可用于路基填料或矿山复垦,但需通过浸出毒性测试确保环境安全性。建立污泥特性数据库,针对不同矿物组成的污泥定制处理方案,是实现经济效益与环境效益平衡的基础。

4 结语

综上所述,絮凝沉降结合技术在水利水电工程砂石废水处理中具有显著的优势,能够有效去除废水中的悬浮物,改善出水水质,且具有操作简单、成本较低等优点。然而,在实际应用中还存在一些问题,如絮凝剂投加量控制困难、污泥处理等,需要通过进一步的研究和技术创新来解决。未来,应加强对新型絮凝剂的研发,提高絮凝剂的絮凝效果和适应性;优化絮凝沉降工艺参数,提高废水处理效率和稳定性;同时,注重污泥的资源化利用,实现砂石废水处理的可持续发展。相信随着技术的不断进步和完善,絮凝沉降结合技术将在水利水电工程砂石废水处理领域发挥更加重要的作用,为保护生态环境和促进水利水电工程的可持续发展做出更大贡献。

参考文献:

- [1] 王金星,杨涵,杨小林,等.某金矿全尾砂絮凝沉降参数优化及机理分析[J].河南理工大学学报(自然科学版),2025,44(05):91-99.
- [2] 夏志华,陶玮.基于絮凝沉降结合技术的水利水电工程砂石废水处理研究[J].粘接,2025,52(07):49-52.
- [3] 王乐,陈庆霞,王天宇,等.三峡库区泥沙絮凝沉降试验研究[J].水力发电学报,2025,44(06):12-21.
- [4] 庞建涛,李树建,彭亮,等.难沉降细尾砂絮凝沉降特性与浓密机理研究[J/OL].矿业研究与开发,1-9[2025-08-07].
- [5] 赵阳,陶亚东,周安宁,等.难沉降煤泥水处理技术研究进展[J].应用化工,2025,54(03):742-747.
- [6] 陈志军.絮凝处理对疏浚淤泥脱水效果的影响试验研究[J].山西建筑,2025,51(06):86-91.
- [7] 刘伊丰,柏文文,吴淼,等.电絮凝流场及泥沙沉降效果特性与控制因素[J].水力发电学报,2024,43(12):77-88.