

# 电絮凝协同活性炭提高污泥脱水性能的可行性探究

汪明志\*, 陈健新, 陈杰, 陈佳鑫, 刘燕烱, 莫凌烽, 崔展彰, 冯燕华, 林洁丽<sup>#</sup>

佛山大学化学工程系, 广东 佛山

收稿日期: 2025年5月15日; 录用日期: 2025年6月26日; 发布日期: 2025年7月7日

## 摘要

本研究通过耦合电絮凝(EC)技术与调理剂即活性炭(AC)或粉煤灰的吸附作用, 系统探究其对池塘污泥性能的协同增效机制。实验表明, EC与AC的协同作用显著优于单一技术, 污泥含水率平均降低10.0%。通过比较不同投加顺序(正序: 先EC后调理剂; 反序: 先调理剂后EC)及调理剂活性炭或粉煤灰投加量对污泥作用的影响, 发现正序调理效果更优, 含水率较反序降低7.0%。活性炭因高比表面积和良好孔隙结构, 其吸附性能优于粉煤灰, 平均含水率进一步降低3.0%。当AC投加量为15%时, 正序处理污泥含水率最低(42.13%), 而粉煤灰对应含水率为: 46.12%。此时活性炭调理后的滤液浊度(0.40 mg/L)显著低于粉煤灰对应的值(1.86 mg/L)。本研究为污泥脱水工艺提供了基于“吸附-电化学协同”的高效调理方案。

## 关键词

污泥, 含水率, 活性炭, 电絮凝, 脱水

# Investigation on the Feasibility of Electrocoagulation Synergized with Activated Carbon to Improve Sludge Dewatering Performance

Mingzhi Wang\*, Jianxin Chen, Jie Chen, Jiaxin Chen, Yanhui Liu, Lingfeng Mo, Zhanzhang Cui, Yanhua Feng, Jieli Lin<sup>#</sup>

Chemical Engineering Department, Foshan University, Foshan Guangdong

Received: May 15<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jun. 26<sup>th</sup>, 2025; published: Jul. 7<sup>th</sup>, 2025

\*第一作者。

<sup>#</sup>通讯作者。

**文章引用:** 汪明志, 陈健新, 陈杰, 陈佳鑫, 刘燕烱, 莫凌烽, 崔展彰, 冯燕华, 林洁丽. 电絮凝协同活性炭提高污泥脱水性能的可行性探究[J]. 化学工程与技术, 2025, 15(4): 205-213. DOI: 10.12677/hjct.2025.154019

## Abstract

This paper systematically explored the synergistic enhancement mechanism of the combined electrocoagulation (EC) technology and the adsorption of conditioners, namely activated carbon (AC) or fly ash, on the performance of pond sludge. Experiments showed that the synergy between EC and AC was significantly superior to single technologies, with the average moisture content of sludge reduced by 10.0%. By comparing the effects of different dosing sequences (positive sequence: EC first followed by conditioner; reverse sequence: conditioner first followed by EC) and the dosage of conditioners (activated carbon or fly ash) on sludge, it was found that the positive sequence conditioning effect was superior, with the moisture content being 7.0% lower than that of the reverse sequence. Due to its high specific surface area and favorable pore structure, AC exhibited better adsorption performance than fly ash, further reducing the average moisture content by 3.0%. When the dosage of AC was 15%, the moisture content of sludge treated in the positive sequence was the lowest, *i.e.*, 42.13%, while the corresponding moisture content of sludge treated with fly ash was 46.12%. In such a situation, the filtrate turbidity of the sludge conditioned by activated carbon (0.40 mg/L) was significantly lower than that of the sludge treated with fly ash (1.86 mg/L).

## Keywords

Sludge, Water Content, Activated Carbon, Electrocoagulation, Dehydration

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

污泥成分复杂, 含有病原体等有机污染物, 若未经妥善处理, 将对环境和人类健康构成严重威胁。其高含水率是无害化处理的主要难题。当前, 河道、池塘及雨污管道的污泥治理工作在全国广泛开展, 成为改善生态环境、保障城市水系统健康运行的关键举措[1]。河道与池塘中, 富含氮、磷等营养物质, 以及有机污染物和重金属的大量污泥沉积, 严重损害水体生态功能, 影响景观效果。雨污管道作为城市排水系统的“血管”, 长期运行后会积累大量污泥, 不仅降低排水能力, 引发城市内涝, 还会因厌氧发酵产生有害气体, 威胁管道结构与周边环境。在污泥治理流程中, 污泥脱水至关重要。未经充分脱水的污泥, 在堆放或后续处置时易渗出污水, 造成二次污染。以雨污管道污泥为例, 其渗出液可能污染地下水, 散发的恶臭气体也会影响周边居民生活环境。国务院令第 641 号《城镇排水与污水处理条例》关注污泥处理处置问题, 国家鼓励污泥资源化。污泥因高含水率、大体积, 运输和处理困难, 污泥脱水减量化是无害化处理的关键步骤, 实现高效污泥脱水是污泥减量化、无害化和资源化的首要前提。

污泥脱水调理环节, 常用化学调理和物理调理。化学调理通过添加化学药剂, 改善污泥絮体结构, 增强脱水性能, 如河道与池塘污泥处理中常用的聚合氯化铝、聚丙烯酰胺等絮凝剂, 可促使细微颗粒凝聚成大絮体[2] [3]。但大量使用化学药剂会带来新问题: 一是引入的化学物质可能对环境有潜在风险; 二是长期使用某些絮凝剂会改变污泥性质, 阻碍后续资源化利用。雨污管道污泥成分复杂, 化学调理效果受残留污水成分影响大, 调理难度高。

物理调理中的机械脱水, 如离心脱水、板框压滤脱水等, 可降低污泥含水量。但对于粘性大、难脱水的河道、池塘及雨污管道污泥, 单纯机械脱水效果欠佳, 常需与化学调理结合。然而, 现有调理手段

处理成分复杂的河道、池塘和雨污管道污泥时,存在明显局限。这些污泥除常规污染物外,还可能含有多种难处理有害物质,传统调理方式难以有效去除重金属、有机污染物等。例如,雨污管道污泥中可能有工业排放的重金属及难降解有机污染物,传统方法处理效果不佳。

电絮凝技术通过电解产生金属离子,与污泥污染物发生化学反应,实现污染物分离去除,融合氧化与絮凝作用,是一种电化学处理手段。随着技术发展和工业活动推进,电絮凝在污泥脱水处理中日益受重视。2010年,Yuan等[4]采用电絮凝处理污泥,研究毛细吸水时间变化。研究者常将电絮凝与其他技术联用[5]-[8]以提升处理效果。活性炭比表面积大、吸附性强且具导电性,是理想协同材料。Dong等[9]用活性炭强化电化学处理,在最佳条件下,污泥滤饼含水量(MC)和毛细吸水时间(CST)分别降至64.3%和55.9 s。本文借助活性炭吸附污泥中有机杂质和部分重金属离子的特性,以及电絮凝促进污泥颗粒凝聚的作用,将二者协同应用于污泥处理,有望显著提升污泥脱水性能,改善滤液清洁度,为后续安全处置与资源化利用奠定基础,对推动河道、池塘和雨污管道污泥治理工作意义重大。

## 2. 实验部分

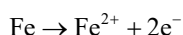
### 2.1. 实验材料和仪器

本实验所采用的材料包括池塘污泥、活性炭、粉煤灰以及阳离子聚丙烯酰胺(简称CPAM)。污泥样本直接采集自佛山市禅城区某莲花池。活性炭由徐州景发化工科技有限公司提供;粉煤灰和CPAM由盛世环保科技(应城)有限公司提供。

实验所用仪器涵盖了电热鼓风干燥箱(型号SH202-00,由上杭仪器有限公司生产)、磁力加热搅拌器(型号79-1,常州德科仪器制造有限公司制造)、分析天平(型号T-214,北京赛多利斯仪器系统有限公司出品),以及自制的三维纤毛滤布,尺寸为40 cm × 30 cm。

### 2.2. 实验思路

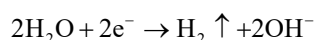
污泥是污水悬浮液中胶体颗粒经电中和与架桥作用形成的异相聚集体,其絮体呈现典型分形生长特征,构建出具有自相似性的三维网状拓扑结构。该多尺度孔隙结构赋予污泥絮体较高比表面积与孔隙率。电絮凝技术借助电场作用,电离出具有捕获和絮凝功能的特定金属离子,促使溶液中微小颗粒聚团沉降。在电絮凝过程中,电解作用可破坏污泥中结合水结构,释放更多自由水,进而提升脱水效率。活性炭具有多孔结构与高孔隙率,在吸附过程中能提供大量表面积,增强对有机物的吸附能力,可有效去除污泥中的水分及其他污染物,降低污泥含水率。对于电极材料的选择,同等其他条件下,铁电极效果比铝电极、铜电极有优势。铁阳极电解产生 $\text{Fe}^{2+}$ :



$\text{Fe}^{2+}$ 在溶液中进一步氧化为 $\text{Fe}^{3+}$ :



$\text{Fe}^{3+}$ 水解生成多核羟基络合物(如 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}$ ),通过压缩双电层和电荷中和破坏污泥胶体稳定性。而阴极产生 $\text{H}_2$ :



产生的 $\text{H}_2$ 微气泡将携带絮体上浮,实现固液分离,同时破坏污泥絮体中的结合水结构。李阳滢的研究也表明,在增大污泥粒径、削弱污泥亲水性及提升固液相自分离能力方面,铁离子比铝离子更有效[10]。

## 2.3. 实验方案

为凸显活性炭的调理作用, 本实验选用活性炭和粉煤灰两种调理剂, 二者均为含碳丰富的无机混合物。实验旨在评估不同投加量的活性炭或粉煤灰协同电絮凝对污泥脱水效果的影响。其中, 投加量指占样品污泥绝干物质的质量百分比。实验方案涉及的参数包括电压、时间、电极板材料等, 经过大量数据的比较, 发现电压在 10 V~60 V 之间, 含水率和浊度随电压增大都不是单调变化, 有最佳值, 在 28~33 V 之间表现最佳; 反应时间在 5 min~60 min 之间, 时间越长, 絮凝体越大, 但含水率不一定越低。因此本实验方案选择的电絮凝电压设定为 30 V, 时间为 20 min。实验发现, 相较于铝板, 选择铁板作为电极板更具优势, 因为铁板阳极产生的  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$  等高价阳离子, 能引发更强烈的氧化还原反应, 更有效地氧化、分解和转化有机物, 压缩污泥双电层、凝聚污泥絮体, 释放更多游离水, 降低污泥比阻值, 提高脱水效率。本实验数据均在铁电极作用下所测量得到。

实验中, 调理剂活性炭或粉煤灰的投加量分别设为 5%、10%和 15%。以 200 mL 样品污泥为实验对象, 添加调理剂设置两种顺序: 正序为先电絮凝后投加调理剂; 反序为先投加调理剂后电絮凝。脱水前, 投加固定量的絮凝剂 CAPM 溶液, 加入后搅拌使混合物均匀, 并观察絮凝现象。搅拌后的混合物统一静置 60 秒, 随后利用自制三维纤毛滤布过滤, 收集滤液用于测量浊度。过滤后, 以相同力量挤压滤布上的污泥, 取用挤压后的污泥泥饼称重, 再放入 105℃的电热鼓风干燥箱中烘干 10 小时, 烘干后计算泥饼含水率。

通过改变电絮凝与调理剂的作用顺序, 探究不同絮凝顺序对脱水效果的影响。实验将通过比较滤液浊度和泥饼含水率这两个关键指标, 确定最佳污泥调理与脱水方案, 旨在为污泥脱水处理提供高效、经济的新途径。

## 2.4. 实验结果

实验前期对样品污泥基础参数进行测定, 其原始含水率平均值为 84.43%, 含固率为 15.57%。经换算, 200 mL 样品污泥的绝干质量约为 31.14 g。同时明确 CPAM 投加参数, 5 mL 质量分数 0.1%的 CPAM 溶液, 占 200 mL 样品污泥绝干物的 0.016%, 此即实验中 CPAM 的固定投加比例。在空白对照实验中, 仅投加 0.016%的 CPAM 时, 电絮凝与未电絮凝条件下的污泥含水率平均值分别为 58.46%和 67.43%, 初步体现电絮凝技术对污泥脱水的促进作用。表 1 记录了活性炭、粉煤灰协同电絮凝技术调理污泥的含水率数据, 涵盖正序(先电絮凝后投加调理剂)、反序(先投加调理剂后电絮凝)两种添加顺序, 并纳入单调理剂(无电絮凝)处理结果作为对照, 清晰展现污泥含水率随调理剂投加量的变化规律。对应实验条件下, 污泥上层清液的浊度数据详见表 2 为综合评估处理效果提供多维数据支撑。为了对比其它调理剂对污泥含水率和浊度的影响作用, 表 3 列举了同样电絮凝条件(电压 30V, 反应时间 20 min)下, 不同调理剂的实验数据, 其中最后两行是采用铝板、铜板的数据, 含水率均大于活性炭调理的结果。

## 2.5. 实验分析

### 2.5.1. 含水率数据的分析

从含水率结果看, 表 3 数据说明电絮凝协同其他调理剂的效果不如协同活性炭的效果。通过对表 1 数据的系统分析可知, 电絮凝分别与活性炭、粉煤灰协同调理污泥后, 所得泥饼的含水率显著低于单一处理(即仅采用电絮凝或仅投加调理剂)的结果。值得注意的是, 所有经复合处理的污泥, 其泥饼含水率相较于仅使用 CPAM 处理的结果(67.43%)均降低了 10 个百分点以上。这充分表明, 协同处理方案较单一处理方式具有更强的脱水效能, 能够更高效地降低污泥含水率。其中, 活性炭凭借其优异的高比表面积、可控的表面化学性质以及独特的孔隙结构, 在水分吸附和促进排水方面展现出显著优势, 因而在降低含水率方面表现尤为突出。

**Table 1.** Variations in sludge water content under conditioning with different dosages of activated carbon or fly ash  
**表 1.** 不同投加量活性炭或粉煤灰调理下污泥含水率变化

| 是否进行电絮凝 | 活性炭(或粉煤灰)<br>投加量/% | 含水率/% |       |       |       |
|---------|--------------------|-------|-------|-------|-------|
|         |                    | 活性炭   |       | 粉煤灰   |       |
|         |                    | 正序    | 反序    | 正序    | 反序    |
| 是       | 5                  | 47.91 | 50.62 | 55.06 | 56.79 |
| 否       |                    | 48.25 | -     | 51.14 | -     |
| 是       | 10                 | 45.02 | 48.16 | 50.34 | 50.74 |
| 否       |                    | 46.02 | -     | 48.15 | -     |
| 是       | 15                 | 42.13 | 49.43 | 46.12 | 59.6  |
| 否       |                    | 47.32 | -     | 46.47 | -     |
| 是       | 0                  |       | 58.46 |       |       |
| 否       |                    |       | 67.43 |       |       |

**Table 2.** Variations in turbidity of sludge supernatant after conditioning with different dosages of activated carbon or fly ash  
**表 2.** 不同投加量活性炭或粉煤灰调理后污泥上清液浊度变化

| 是否进行电絮凝 | 活性炭(或粉煤灰)<br>投加量/% | 浊度/(mg/L) |      |      |      |
|---------|--------------------|-----------|------|------|------|
|         |                    | 活性炭       |      | 粉煤灰  |      |
|         |                    | 正序        | 反序   | 正序   | 反序   |
| 是       | 5                  | 0.42      | 1.5  | 1.63 | 1.22 |
| 否       |                    | 3.62      | -    | 4.28 | -    |
| 是       | 10                 | 0.40      | 0.44 | 1.95 | 0.78 |
| 否       |                    | 2.02      | -    | 6.26 | -    |
| 是       | 15                 | 0.40      | 1.56 | 1.86 | 1.18 |
| 否       |                    | 1.88      | -    | 7.94 | -    |
| 是       | 0                  |           | 1.02 |      |      |
| 否       |                    |           | 3.93 |      |      |

**Table 3.** Experimental data for electrocoagulation synergistic with other conditioning agents conditioning  
**表 3.** 电絮凝协同其它调理剂调理的实验数据表

| 试剂            | 含水率/% | 浊度/(mg/L) |
|---------------|-------|-----------|
| 邻苯二甲酸氢钾       | 54.49 | 0.58      |
| 壳聚糖           | 51.94 | 0.54      |
| 聚合氯化铝         | 49.23 | 0.44      |
| 聚合硅酸铝铁        | 55.08 | 0.60      |
| CPAM          | 58.46 | 1.02      |
| CPAM (铁板改为铝板) | 62.48 | 1.12      |
| CPAM (铁板改为铜板) | 65.31 | 1.45      |

研究发现，污泥含水率的降低程度与复合调理剂的添加顺序密切相关。无论是活性炭还是粉煤灰，正序添加(先电絮凝后投加调理剂)的脱水效果均优于反序添加(先投加调理剂后电絮凝)，且正序处理后的含水率普遍低于反序，降低幅度分别为：活性炭 3~7 个百分点，粉煤灰 1~15 个百分点。这一现象可归因

于以下作用机制:

首先,电絮凝作为预处理步骤,电解产生的  $\text{Fe}^{3+}$  等金属离子能够高效吸附并沉淀污泥中的悬浮物,去除大分子有机物和颗粒物,从而减少活性炭表面孔隙的堵塞风险。同时,电解过程中产生的微气泡通过气浮作用分离污染物,有效降低后续活性炭处理的负荷。这种预处理为活性炭创造了更有利的作用环境,而活性炭则通过吸附残余污染物、增强絮体骨架支撑,进一步巩固电絮凝的脱水效果。其次,电絮凝生成的金属氢氧化物通过吸附架桥、网捕卷扫作用,将细小污泥颗粒聚集成大粒径絮体。相较于单一活性炭处理仅依赖物理吸附的局限性,电絮凝预处理显著提升了絮体尺寸,降低了过滤阻力,并形成了更致密且孔隙率更高的结构,为后续活性炭的吸附和骨架支撑作用提供了理想条件。第三,电絮凝破坏污泥结构后,大量有机质(如蛋白质、腐殖酸)从固相释放至液相或絮体表面,显著增加了可吸附污染物浓度。同时,絮体表面的极性官能团(如  $-\text{OH}$ 、 $-\text{COOH}$ )与活性炭表面的活性基团(如羧基、氨基、酚羟基)通过氢键或静电作用结合,大幅提升吸附亲和力。此外,活性炭嵌入电絮凝形成的絮体中,可防止过滤时絮体压缩堵塞孔隙,其高导电性还有助于增强电絮凝过程中的电流传输效率,降低能耗。

进一步分析表 1 数据可知,有电絮凝协同的条件下,正序时,随着活性炭投加量的增加(从 5%到 15%),污泥含水率呈持续下降趋势(分别为 47.91%、45.02%、42.12%),表明电絮凝能够显著提升活性炭的利用效率,充分发挥其脱水优势。然而,在无电絮凝作用时,含水率随活性炭投加量呈现先降后升的趋势(从 48.25% 降至 46.02%,再升至 47.32%),说明缺乏电絮凝预处理会导致活性炭利用率下降,造成资源浪费。与活性炭类似,随着粉煤灰投加量的增加(从 5%到 15%),污泥含水率同样呈持续下降趋势(分别为 55.06%、50.34%、46.34%)。在反序处理条件下,活性炭和粉煤灰的含水率变化规律趋于一致,均表现为先降后升,且在投加量为 10% 时达到最低值(活性炭 48.16%,粉煤灰 50.74%)。这一结果表明,先投加调理剂再进行电絮凝的处理顺序,难以实现两者的最佳协同效应,不利于污泥脱水效能的最大化。

### 2.5.2. 浊度数据的分析

从表 2 浊度数据来看,无论是活性炭还是粉煤灰,在电絮凝处理后,污泥上层清液的浊度均低于未经电场作用时的数值。且活性炭对应的浊度值总体低于粉煤灰对应的浊度值。其作用机理在于,电絮凝过程中,通过电场作用促使污泥中悬浮物聚集和絮凝,减少了液相中的悬浮物,进而降低含水率与浊度。以调理剂投加量为 5%为例,电絮凝协同活性炭调理后浊度为 0.42 mg/L,而未进行电絮凝处理时浊度为 3.62 mg/L;采用粉煤灰时,相应浊度值分别为 1.63 mg/L、4.28 mg/L。即便未添加活性炭或粉煤灰,仅使用 CPAM,电絮凝处理后的浊度为 1.02 mg/L,比未经电絮凝处理的 3.93 mg/L 降低了超 2 倍,充分体现电絮凝的优势。

当存在电絮凝处理时,活性炭降低浊度的程度比粉煤灰更显著。这是因为活性炭具有优良的吸附性,其与电絮凝的协同效应强于粉煤灰与电絮凝的协同效应。活性炭超高比表面积和微孔-介孔分级结构,提供大量吸附位点。电絮凝预处理后,胞外聚合物分解产生的疏水性小分子有机物(如腐殖酸片段)更易被 AC 吸附,避免堵塞滤布孔隙。在正序(先电絮凝再投加调理剂)情况下,活性炭浊度值(0.42 mg/L、0.40 mg/L、0.40 mg/L)均低于无活性炭时的 1.02 mg/L;而粉煤灰浊度值(1.63 mg/L、1.95 mg/L、1.88 mg/L)均高于 1.02 mg/L。这是由于粉煤灰颗粒比表面积小于活性炭,其吸附悬浮物的效应不足以抵消自身带入液相的悬浮物,从而加重液相浊度。此外,二者在正、反序变化规律上也存在差异:其他条件不变时,活性炭协同电絮凝正序时浊度低于反序,而粉煤灰正序浊度高于反序。

浊度会随调理剂投加量变化。无电絮凝处理时,活性炭和粉煤灰投加量对浊度影响趋势相反:活性炭投加量为 5%、10%、15%时,浊度分别为 3.62 mg/L、2.02 mg/L、1.88 mg/L,与无调理剂时的 3.93 mg/L 相比呈负相关;粉煤灰投加量对应上述比例时,浊度分别为 4.28 mg/L、6.26 mg/L、7.94 mg/L,高于 3.93

mg/L, 呈正相关。这表明活性炭既能改善含水率又能降低浊度, 而粉煤灰虽能降低含水率却提升浊度。

当调理剂协同电絮凝处理时: 正序下, 浊度随活性炭投加量增加呈负相关, 这是因为电絮凝已经使大部分悬浮物聚集, 投加活性炭主要是进一步吸附剩余的少量悬浮物和其他杂质, 随着活性炭投加量增加, 其吸附作用持续发挥, 能不断减少液相中杂质, 所以浊度随投加量呈负相关。但对于粉煤灰, 浊度先升高后降低(1.63 mg/L、1.95 mg/L、1.88 mg/L), 原因可以解释如下: 初始阶段, 投加少量粉煤灰时, 粉煤灰自身携带一些悬浮物进入体系, 且其颗粒比表面积相对较小, 吸附能力有限, 不能有效吸附电絮凝后已聚集的悬浮物, 反而增加了液相中的悬浮物质, 导致浊度升高。随着粉煤灰投加量进一步增加, 粉煤灰中的某些成分(如含钙、铁等成分)与电絮凝产生的絮体发生作用, 一定程度上促进了絮凝体的进一步聚集和沉淀, 使得液相中悬浮物减少, 浊度降低。

反序下, 浊度随活性炭和粉煤灰投加量变化均为先降低再升高。这说明先经调理剂调理再进行电絮凝, 会减弱协同效应, 含水率和浊度存在对应的最佳值。出现这状况解释如下:

当活性炭投加量较低时, 其表面丰富的孔隙结构能有效吸附污泥中的部分悬浮物和胶体颗粒。在后续电絮凝过程中, 电场作用促使被活性炭吸附的这些颗粒进一步聚集、沉降, 使得液相中悬浮物减少, 浊度降低。此时, 活性炭的吸附作用占主导, 且与电絮凝有较好的协同效应, 所以浊度随着投加量增加而降低。随着活性炭投加量不断增加, 体系中活性炭颗粒数量过多。一方面, 过量的活性炭颗粒之间相互干扰, 部分颗粒不能充分发挥吸附作用, 甚至会发生重新分散悬浮的情况; 另一方面, 活性炭可能会与电絮凝产生的絮体发生复杂的相互作用, 阻碍絮体正常的长大和沉降, 导致液相中悬浮物质不能有效去除, 甚至有所增加, 从而使浊度升高。因此, 在反序时, 活性炭投加量存在一个最佳值, 低于此值浊度降低, 高于此值浊度升高。

当粉煤灰投加量较低时, 它分散在体系中, 可与部分颗粒发生吸附、架桥等作用, 在后续电絮凝过程中, 电场作用促进了这些结合体的聚集沉降, 使浊度降低。当投加量增加到一定程度, 粉煤灰颗粒过多, 一方面颗粒之间相互排斥, 难以形成有效的絮凝结构; 另一方面, 过量的粉煤灰会占据大量空间, 阻碍电絮凝产生的絮体进一步聚集长大, 且自身携带的悬浮物无法被有效去除, 导致浊度升高。所以在反序情况下, 存在一个粉煤灰投加量, 使得浊度达到最低, 即有最佳浊度对应的投加量。

### 2.5.3. 经济性分析

从表 1 和表 3 数据可知, 电絮凝协同不同调理剂处理后, 污泥含水率的变化呈现一定差异。与未添加调理剂的基准值相比, 活性炭处理后的污泥含水率降低幅度最大。然而, 由于活性炭价格显著高于粉煤灰及其他调理剂, 在实际选择调理剂时需开展经济性分析。鉴于其他调理剂价格均高于粉煤灰, 以下以投加量为 10% 的活性炭和粉煤灰数据为例, 对经济效果进行估算。

首先, 污泥深度脱水显著降低了运输成本。污泥含水率与湿污泥总质量呈正相关, 含水率越低, 湿污泥质量越小, 运输成本亦随含水率下降呈线性降低趋势。以 1 吨干污泥为基准, 空白组(含水率 58.46%)对应的湿污泥质量约为 2.407 吨, 活性炭组(含水率 45.02%)对应 1.819 吨, 粉煤灰组对应 2.014 吨。若每吨干污泥的运输费用为 800 元, 经测算, 使用活性炭和粉煤灰处理后, 每吨干污泥可分别节省运费 470.4 元、314.4 元, 成本优化效果显著。

第二, 后续处理工艺的成本优化潜力。脱水后的泥饼的后期处置方式多样, 例如焚烧, 含水率降低可减少焚烧时的水分蒸发能耗。假设焚烧成本 800 元/吨湿污泥, 燃料成本占 60% (480 元/吨), 以活性炭处理后含水率 45.02% 为例, 含水率每降低 1% 可减少 3% 燃料消耗。因此按 13.44% 的含水率降幅, 每吨湿污泥可节省燃料成本 193.5 元( $480 \times 3\% \times 13.44$ ), 处理后每吨干污泥对应 1.819 吨湿污泥, 总燃料节省约 351.9 元( $193.5 \times 1.819$ ), 粉煤灰对应节省 235.5 元。脱水后的泥饼在后期如果是资源化利用(如制砖), 则可以减免干燥工艺成本。制砖工艺要求含水率低于 50%, 活性炭处理的泥饼可直接用于生产, 节省对

湿污泥的额外干燥成本。对比之下,粉煤灰处理后的泥饼含水率 50.34%,需干燥处理,至少去掉 0.34% 的水分,按照一度电蒸发 3 公斤水计算,1 吨干污泥需 4.56 度电(备注:  $[1/(1 - 50.34\%) - 1/50\%]*1000/3 = 4.56$ ),相对活性炭无成本优势。如果是用于填埋场景,则因体积减少降低处置费。湿污泥密度约 1.2 吨/立方米,活性炭处理后每吨干污泥的填埋体积从 2.006 立方米(空白组)降至 1.516 立方米;粉煤灰降至 1.655 立方米。按 300 元/立方米填埋费计算,活性炭和粉煤灰对每吨干污泥可节省费用分别为:147.0 元、105.3 元。其次,污泥深度脱水在后续处理工艺中展现出显著的成本优化潜力:

焚烧处置:脱水污泥的焚烧处理中,较低的含水率能有效减少水分蒸发能耗。以 800 元/吨的湿污泥焚烧成本为例,其中燃料成本占比 60%(即 480 元/吨)。以活性炭处理后 45.02%的含水率数据测算,每降低 1%含水率可减少 3%燃料消耗。基于 13.44%的含水率降幅,每吨湿污泥可节省燃料成本 193.5 元( $480 \times 3\% \times 13.44$ )。考虑到处理后每吨干污泥对应 1.819 吨湿污泥,总燃料成本节省约 351.9 元( $193.5 \times 1.819$ );而粉煤灰处理后的污泥,燃料成本节省约为 235.5 元。

资源化利用:在污泥制砖等资源化场景下,脱水效果直接影响工艺成本。制砖工艺要求原料含水率低于 50%,经活性炭处理的泥饼可直接投入生产,无需额外干燥流程;相比之下,粉煤灰处理后的泥饼含水率为 50.34%,需通过干燥处理去除至少 0.34%的水分。按每度电蒸发 3 公斤水计算,处理 1 吨干污泥需消耗约 4.56 度电,经济性明显低于活性炭处理方案。

填埋处置:污泥含水率降低直接减少填埋体积,进而降低处置费用。以湿污泥 1.2 吨/立方米的密度计算,经活性炭处理后,每吨干污泥的填埋体积从空白组的 2.006 立方米降至 1.516 立方米;粉煤灰处理后降至 1.655 立方米。若按 300 元/立方米的填埋费用标准,活性炭和粉煤灰处理每吨干污泥可分别节省 147.0 元、105.3 元,成本优势差异显著。

在考虑调理剂和电絮凝成本后,我们计算净成本  $M$  公式为:

$$M = F_1 * 10\% + F_2 - F_3 - F_4 .$$

式中,各符号意义如表 4 所示。假设工业上,1 度电费用是 1 元,调理剂价格分别是:1 吨活性炭需 800 元,1 吨粉煤灰需 80 元,电絮凝技术生产 1 吨干污泥耗电 0.7 度,则活性炭、粉煤灰的净成本计算公式分别如下:

$$M_{\text{活性炭}} = F_1 * 10\% + F_2 - F_3 - F_4 = 800 * 10\% + 0.35 - 470.4 - F_4 = (-389.7 - F_4) \text{ (元/吨干污泥)}$$

$$M_{\text{粉煤灰}} = F_1 * 10\% + F_2 - F_3 - F_4 = 80 * 10\% + 0.35 - 314.4 - F_4 = (-305.7 - F_4) \text{ (元/吨干污泥)}$$

不同后期处置方式对应的净成本存在差异,具体数据如表 4 所示(注:表中负数代表成本节省)。从表内数据可知,在所有处置方式中,活性炭所节省的成本均低于粉煤灰。这一现象的核心原因在于:含水率的降低显著削减了运输成本。相较于粉煤灰和其它调理剂(参考表 3 的数据),活性炭在含水率控制方面表现更优,进而使其在运输环节的成本节约幅度更大。

**Table 4.** Net cost analysis for electrocoagulation combined with activated carbon or fly ash conditioning  
**表 4.** 电絮凝协同活性炭或粉煤灰调理的净成本分析数据表

| 成本项目                                                | 活性炭                        | 粉煤灰                         |
|-----------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 调理剂成本 $F_1$ /(元/吨)                                  | 800                        | 80                          |
| 电絮凝成本 $F_2$ /(元/吨)                                  | 0.7                        | 0.7                         |
| 运输成本节省 $F_3$ /(元/吨干污泥)                              | 470.4                      | 314.4                       |
| 后期处置成本节省(以焚烧为例) $F_4 \rightarrow$ 净成本 $M$ /(元/吨干污泥) | 351.9 $\rightarrow$ -741.6 | 235.5 $\rightarrow$ -541.2  |
| 后期处置成本节省(以制砖为例) $F_4 \rightarrow$ 净成本 $M$ /(元/吨干污泥) | 0 $\rightarrow$ -389.7     | -4.56 $\rightarrow$ -301.14 |
| 后期处置成本节省(以填埋为例) $F_4 \rightarrow$ 净成本 $M$ /(元/吨干污泥) | 147.0 $\rightarrow$ -536.7 | 105.3 $\rightarrow$ -411.0  |

### 3. 结论

电絮凝分别与活性炭、粉煤灰协同调理污泥的实验结果显示, 协同处理在降低污泥含水率和滤液浊度方面展现出显著优势, 相较于单独使用电絮凝技术, 污泥含水率平均降幅达 10 个百分点。在调理剂投加顺序的对比中, 正序投加(先电絮凝后添加活性炭)的脱水效果更为突出, 其污泥平均含水率较反序投加降低 7 个百分点。这一差异源于电絮凝过程中产生的金属离子与微气泡, 通过吸附沉淀污染物、气浮分离杂质, 有效减少了活性炭孔隙堵塞风险, 为后续吸附过程创造了更优条件。

从调理剂性能来看, 活性炭凭借高比表面积与优化的孔隙结构, 在吸附效能与脱水能力上显著优于粉煤灰, 两者协同处理时, 活性炭组污泥平均含水率较粉煤灰组低 3 个百分点。实验数据进一步表明, 污泥含水率与活性炭投加量呈负相关趋势, 当投加量提升至 15% 时, 脱水效果达到最佳——含水率从初始的 67.43% 骤降至 42.13%, 滤液浊度亦从 3.93 mg/L 大幅降至 0.40 mg/L。

综合分析, “先电絮凝后投加活性炭”的正序处理方案展现出最优处理效果。该方案通过“电化学破解-电荷中和-絮凝强化-吸附协同”的多重作用机制, 突破了单一技术的效能瓶颈。电絮凝预处理不仅去除部分污染物与水分, 还可降低活性炭的必要投加量; 两者协同作用使滤液浊度显著降低(0.40 mg/L vs. 3.93 mg/L), 意味着固液分离更为彻底, 有效减轻了后续脱水设备(如压滤机)的运行负荷与能耗成本。经过经济性的分析, 尽管活性炭的价格是粉煤灰的 10 倍以上, 但考虑后期处置的成本后, 活性炭仍具有较大的经济优势。

### 基金项目

广东省 2024 年省级大学生创新训练计划项目“活性炭协同电絮凝提高污泥脱水性能的可行性探究”和佛山大学 2025 年实验开放创新基金项目“电絮凝协同化学调理试剂提高污泥脱水性能的实验研究”。

### 参考文献

- [1] Jieli, L., Minyi, H., Zhihao, X., *et al.* (2020) Study on the Combined Conditioning Effect of High Efficiency Dehydration of River Sediment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **546**, Article 052023.
- [2] 王海龙. 河道淤泥处理新技术探讨[J]. 农业开发与装备, 2022(2): 109-111.
- [3] 杨鹏. 基于污泥特性的化学调理技术及其作用机制[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2019.
- [4] Yuan, H., Zhu, N. and Song, L. (2010) Conditioning of Sewage Sludge with Electrolysis: Effectiveness and Optimizing Study to Improve Dewaterability. *Bioresource Technology*, **101**, 4285-4290. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.147>
- [5] Vilakazi, S., Onyari, E., Nkwonta, O. and Bwapwa, J.K. (2023) Reuse of Domestic Sewage Sludge to Achieve a Zero Waste Strategy & Improve Concrete Strength & Durability—A Review. *South African Journal of Chemical Engineering*, **43**, 122-127. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.10.012>
- [6] Huang, H., Deng, Y., Zeng, Q., Heynderickx, P.M., Chen, G. and Wu, D. (2022) Integrating Electrochemical Pretreatment (EPT) and Side-Stream Sulfidogenesis with Conventional Activated Sludge Process: Performance, Microbial Community and Sludge Reduction Mechanisms. *Chemical Engineering Journal*, **433**, Article 133678. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133678>
- [7] Zhang, X., Ye, P. and Wu, Y. (2022) Enhanced Technology for Sewage Sludge Advanced Dewatering from an Engineering Practice Perspective: A Review. *Journal of Environmental Management*, **321**, Article 115938. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115938>
- [8] 梁华倩, 黄臻扬, 黄乐民, 等. 煤炭浮选剂对污泥深度脱水的作用[J]. 化学工程与技术, 2022, 12(6): 394-398.
- [9] Dong, Y., Yuan, H., Ge, D. and Zhu, N. (2022) A Novel Conditioning Approach for Amelioration of Sludge Dewaterability Using Activated Carbon Strengthening Electrochemical Oxidation and Realized Mechanism. *Water Research*, **220**, Article 118704. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118704>
- [10] 李阳滢. 污泥基生物炭改善电絮凝脱水性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2024.