

# 活性炭协同表面活性剂降低污泥含水率的探讨

黄杰特\*, 崔展彰, 汪明志, 陈健新, 陈杰, 林洁丽#

佛山大学环境与化学工程学院化学工程系, 广东 佛山

收稿日期: 2024年4月22日; 录用日期: 2024年5月22日; 发布日期: 2024年5月29日

## 摘要

本文利用活性炭吸附作用和表面活性剂的亲水基团, 探讨活性炭与表面活性剂协同调理对城镇污水处理厂活性污泥脱水性能的影响。实验表明活性炭和表面活性剂的协同作用对污泥脱水具有显著增效作用, 相对没有调理剂下, 平均能够降低十个百分点。通过对比不同投加顺序和投加量的活性炭与表面活性剂(选择SDS和SDBS)对污泥含水率的降低效果, 发现先加入表面活性剂后加入活性炭的顺序降低的程度更高, 平均降低六个百分点。实验数据指出表面活性剂的投加量不宜多。当活性炭投加量为5%时, SDS投加量选择为1%时, 污泥的脱水效果达到最佳, 正序下含水率降低至82.26% (添加CPAM后为59.95%)、反序下降至76.29% (添加CPAM后为58.59%)。

## 关键词

活性污泥, 含水率, 活性炭, 表面活性剂, 脱水

# Exploration on the Synergistic Effect of Activated Carbon and Surfactants on Reducing Sludge Water Content

Jiете Huang\*, Zhazhang Cui, Mingzhi Wang, Jianxin Chen, Jie Chen, Jieli Lin#

Chemical Engineering Department, School of Environmental and Chemical Engineering, Foshan University, Foshan Guangdong

Received: Apr. 22<sup>nd</sup>, 2024; accepted: May 22<sup>nd</sup>, 2024; published: May 29<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In this paper, the adsorption of activated carbon and hydrophilic group of surfactant were used to

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 黄杰特, 崔展彰, 汪明志, 陈健新, 陈杰, 林洁丽. 活性炭协同表面活性剂降低污泥含水率的探讨[J]. 化学工程与技术, 2024, 14(3): 180-186. DOI: 10.12677/hjct.2024.143020

investigate the effect of synergistic conditioning of activated carbon and surfactant on the dewatering performance of activated sludge from urban sewage treatment plant. The experimental results showed that the synergistic effect of activated carbon and surfactant on sludge dewatering had a significant synergistic effect, where the water content could be reduced by 10 percentage points on average compared with that without conditioner. By comparing the effect of different adding order and dosage of activated carbon and surfactant (SDS and SDBS were selected) on the reduction of sludge water content, it was found that the order of adding surfactant first and then adding activated carbon had a higher reduction degree, with an average decrease of 6 percentage points for water content. The experimental data indicated that the dosage of surfactant should not be large. When the dosage of activated carbon was 5% and the dosage of SDS was 1%, the dewatering effect of the sludge reached the best, and the water content of the sludge was reduced to 82.26% in the positive sequence (59.95% after adding CPAM) and 76.29% in the reverse sequence (58.59% after adding CPAM).

## Keywords

Activated Sludge, Water Content, Activated Carbon, Surfactant, Dewatering

Copyright © 2024 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

随着经济的蓬勃发展和公众环保意识的不断提升, 城镇生活污水处理厂的建设数量持续增长, 随之而来的是污泥产量的急剧上升。根据《住房和城乡建设部城乡建设统计年鉴》2022 年的数据分析[1], 生活污水污泥的产生量正以每年 5% 至 8% 的速度增长。预测显示, 到 2030 年, 污水污泥的干重产生量将达到 3094.96 万吨, 而到了 2060 年, 这一数字将激增至 1.4 亿吨。污泥中含有多种复杂的组成成分, 加之其含有的病原体等有机污染物, 使得若不经适当处理, 污泥可能对环境 and 人类健康构成严重威胁。污泥的高含水率一直是无害化处理的主要挑战。

污泥预调理作为污泥处理过程中的关键环节[2] [3] [4], 其效果直接关系到污泥减量化的成效及后续处理的可行性。预调理通过添加化学药剂引发一系列反应, 目的在于改变污泥的内部结构, 有效改善污泥絮体结构, 释放絮体中的水分, 进而通过脱水设备有效降低泥饼的含水量。其中较显著的是絮凝剂, 利用电中和、压缩双电层、吸附架桥和网捕卷扫等作用机制, 改变污泥颗粒的表面特性, 促使污泥胶体脱稳并释放内部水分, 从而改善污泥的脱水性能。鉴于污泥通常带有负电荷, 阳离子絮凝剂因其能降低污泥内部静电斥力, 其调理效果通常优于非离子型和阴离子型絮凝剂。目前, 污水处理厂广泛使用的化学调理剂是阳离子聚丙烯酰胺(简称 CPAM)。

市政污泥成分复杂和多变, 尤其是胞外聚合物(简称 EPS)的高度亲水性和可压缩性使得脱水工作变得更加困难。因此, 在明确污泥的物理化学性质及其动态变化特征的基础上, 开发针对性的高效低耗调理药剂或技术, 对于实现 EPS 组分的降解、细胞破解以及污泥结构的调控具有重要意义。

鉴于此, 探索新的调理剂变得尤为迫切, 特别是那些既高效又经济的调理剂。活性炭因其易得、成本低而被考虑作为新的调理剂。吴佳欢[5]等人通过实验发现用不同活化剂制备的污泥基生物炭对污泥进行调理后均明显优于未经调理结果。同帆等人[6]研究发现炭材料能够改变污泥物理和化学性质, 改善脱水性能, 对污泥 EPS 中中低分子质量物质和中分子质量物质的吸附效果比大分子质量物质的吸附效果

要好。同时,我们考虑到价格低廉且效果明显的表面活性剂,将活性炭与表面活性剂结合使用,将成为一种新的复合污泥脱水调理剂。本文采用活性炭协同表面活性剂对污泥进行调理,利用活性炭的吸附作用和表面活性剂的亲水性,达到降低污泥含水率的目标。两者的协同效应有助于改变污泥絮体的结构和表面性质,促进结合水向自由水的转化,从而提高污泥的脱水性能,为污泥深度脱水领域提供新的思路和有益的参考。

## 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剩余活性生活污水、活性炭以及两种表面活性剂,即十二烷基硫酸钠(简称 SDS)和十二烷基苯磺酸钠(简称 SDBS)。活性污泥样本直接采集自佛山市顺德区的一家生活污水处理厂。活性炭由徐州景发化工科技有限公司提供;表面活性剂 SDS (分析纯)和 SDBS (化学纯)由天津市福晨化学试剂厂提供均为市售产品。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

污泥作为污水中悬浮颗粒物凝聚而成的胶体,具有松散结构和不规则形状,通常带有负电荷。这些絮体展现出分形特征,呈现出网状结构,这为其提供了较高的比表面积和孔隙率。污泥的脱水性能受到其浓度、电荷性质、絮体形态和强度等多重因素的影响。活性剩余污泥主要来源于污水处理厂二沉池的回流污泥,这些污泥未经其它处理,其 EPS 的含量通常占污泥总量的 60%~80% [7]。EPS 的存在是导致污泥脱水困难和压缩性差的主要原因。EPS 中含有大量结合水,而传统的污泥调理方法往往无法有效破坏 EPS 结构,从而不能有效释放结合水,难实现污泥的有效脱水。

表面活性剂的分子结构中含有亲水和憎水两个基团,能够有效降低水与污泥之间的界面张力。选择表面活性剂[8]是因为能够溶解胞外聚合物(EPS),破坏污泥的内部结构,释放出内部结合水,从而加速污泥的沉降并提升脱水性能。选择活性炭是因为其具有多孔结构和高孔隙率的特点,在吸附过程中提供大量表面积,增强了对有机物的吸附能力[5] [6] [9],有效去除污泥中的水分和其他污染物,进而降低污泥的含水率。

### 2.3. 实验方案

本实验旨在评估不同投加量的活性炭以及表面活性剂 SDS 和 SDBS 对污泥脱水效果的影响。本文所提及的投加量是指占样品污泥绝干物质的质量百分比。实验首先选取了 5%、10% 和 15% 三种不同投加量的活性炭,表面活性剂投加量选择 1%、6% 和 10% 三种情况。实验对象为 200 mL 的样品污泥,添加调理剂的顺序有两种,正序是先向污泥样本加入预先计好量的活性炭,随后加入相应投加量的表面活性剂溶液;反序是先添加表面活性剂再添加活性炭。加入调理剂后,通过搅拌混合均匀并观察絮凝现象。搅拌后的混合物需静置一定时间(例如设定 60 秒)以促进絮凝,随后利用自制的三维纤毛滤布进行过滤,以测量滤液的浊度。过滤后,使用相同力量对滤布上的污泥进行挤压,挤压出的污泥泥饼将被取用称重。之后,将其放入电热鼓风干燥箱中烘干 10 小时,烘干结束后计算泥饼的含水率。为了对比不同表面活性剂的效果,实验中先测 SDS 的作用,再测 SDBS 的作用。通过改变添加活性炭和表面活性剂的顺序,可以探究投加调理剂顺序对脱水效果的影响。以上过程在挤压前没有添加化学有机絮凝剂阳离子聚丙烯酰胺 CPAM,为了作对比,对每一种方案,重复实验,但在挤压前添加 10 mL 的质量分数为 0.1% 的 CPAM 溶

液。所有实验均设置两组平行实验，以提升实验结果的可靠性，最终结果取自两组实验的平均值。

实验结果将通过比较滤液浊度、污泥挤压难度以及最终泥饼的含水率这三个关键指标，来确定最佳的污泥调理和脱水方案。通过这一严谨的实验设计，旨在为城镇污水处理厂活性剩余污泥的脱水处理提供一种高效且经济的新方法。

## 2.4. 实验结果

首先测得样品污泥的原始含水率平均值为 98.75%，含固率为 1.25%。由此可粗略计算出 200 mL 样品污泥的绝干质量大概为 2.50 g。经计算，10 mL 的质量分数为 0.1% 的 CPAM 占 200 mL 样品污泥的绝干物的百分比为 0.4%，意味着 CPAM 投加量为 0.4%。实验测定样品污泥在未调理下只添加投加量为 0.4% 的 CPAM 絮凝后平均含水率为 82.23%。表 1 是活性炭协同 SDS 调理污泥实验的含水率数据，对于调理剂的添加顺序分为正序和反序，正序是指先添加活性炭再添加表面活性剂；反序是指先添加表面活性剂，再添加活性炭。每一种顺序又分为未添加 CPAM 和添加 CPAM 的情况。表 2 是用 SDBS 代替 SDS 的实验结果。通过观察实验现象，发现正序的滤液比反序滤液的浊度高，挤压没有添加 CPAM 的污泥比挤压添加 CPAM 后的污泥更困难，并且前者出现漏泥现象，絮凝体较小。当调理污泥时若不投加表面活性剂而只用活性炭时，污泥含水率随活性炭的投加量变化而变化，实验数据一并列在表 1 中。

**Table 1.** The water content of sludge with different amounts of activated carbon and SDS

**表 1.** 添加不同量的活性炭和 SDS 对应的污泥含水率

活性炭投加量/%	SDS 投加量/%	含水率/%			
		正序		反序	
		未加 CPAM	加 CPAM	未加 CPAM	加 CPAM
5	0	-	81.95	-	-
	1	82.26	59.95	76.29	58.59
	6	93.36	74.71	88.48	68.91
	10	93.24	73.33	87.54	66.57
10	0	-	79.81	-	-
	1	89.61	69.96	85.09	65.36
	6	93.95	74.42	88.69	68.77
	10	94.46	75.38	89.54	68.75
15	0	-	76.12	-	-
	1	91.68	72.30	85.78	68.35
	6	91.90	72.88	86.06	67.99
	10	92.27	72.44	86.97	65.26

**Table 2.** The water content of sludge with different amounts of activated carbon and SDBS

**表 2.** 添加不同量的活性炭和 SDBS 对应的污泥含水率

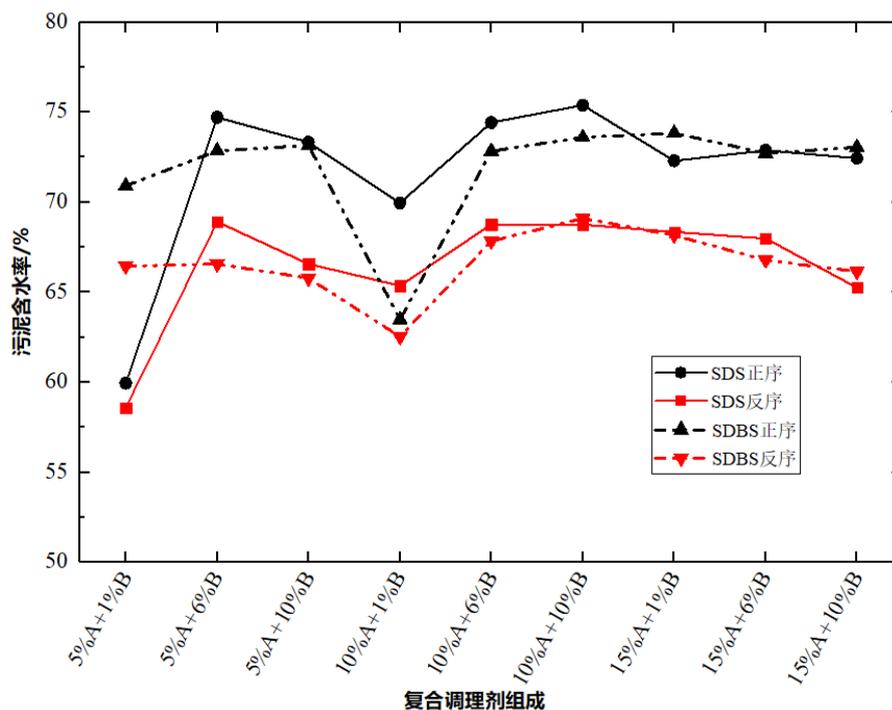
活性炭投加量/%	SDBS 投加量/%	含水率/%			
		正序		反序	
		未加 CPAM	加 CPAM	未加 CPAM	加 CPAM
5	1	90.67	70.91	85.67	66.45
	6	92.01	72.86	87.37	66.57
	10	92.98	73.15	87.61	65.78

续表

10	1	84.92	63.48	79.60	62.54
	6	92.28	72.83	87.75	67.84
	10	92.65	73.60	86.69	69.10
15	1	92.66	73.83	88.05	68.16
	6	92.50	72.72	87.89	66.78
	10	93.11	73.05	87.09	66.15

## 2.5. 实验分析

从表 1 和表 2 数据不难发现活性炭协同表面活性剂调理污泥后再添加 CPAM 得到的含水率均比没有调理剂作用下只添加 CPAM 絮凝作用后的含水率(即 82.23%)低, 使含水率大约降低十个百分点, 说明该复合调理方案能够有效降低污泥含水率。为了更好地比较不同投加量和调理剂组成对污泥脱水的影响, 将表 1 和表 2 中添加 CPAM 下污泥含水率随调理剂的组成的变化数据绘在同一个图中, 如图 1 所示。图 1 中横坐标轴的 A 代表活性炭, B 代表表面活性剂, 曲线的不同颜色对应复合调理剂不同的投加顺序, 黑色数据线对应正序, 红色数据线对应反序。实验数据点的连线形状对应不同的表面活性剂, 实线对应 SDS, 点虚线对应 SDBS。



**Figure 1.** Comparison of effects of composition of different compound conditioners on sludge water content with CPAM

**图 1.** 加 CPAM 下不同复合调理剂组成对污泥含水率的影响比较图

由图 1 看出, 污泥含水率降低的程度与添加复合调理剂的顺序有关, 无论是哪一种表面活性剂, 反序添加的效果均比正序添加的效果好, 反序的含水率比正序的平均降低六个百分点。这一点在多个活性炭和表面活性剂的不同组合条件下均得到了验证。这一现象可以归因于先添加表面活性剂[8]的优势: 表

面活性剂预先破坏污泥结构, 释放出更多的水分, 随后活性炭发挥其吸附作用[5] [6] [9], 最终通过机械脱水时泥水分分离变得更容易实现, 使得污泥含水率从原来的 98.75%显著降低至 90% (未加 CPAM 时)和 70% (加 CPAM 时)以下。这表明表面活性剂和活性炭的协同作用是提高污泥脱水效率的关键因素。值得注意的是, 同样的复合调理方案下, 添加了 CPAM 的污泥含水率比未添加的污泥含水率平均要低 20%左右, 这是因为 CPAM 能够较好地絮凝污泥, 挤压时高效且不漏泥, 有利于泥水分离。

实验数据指出了活性炭投加量与污泥含水率之间的关系。表 1 数据显示只投加活性炭进行调理时, 污泥含水率随活性炭的投加量增大而降低, 活性炭越多, 降低越多, 跟活性炭的直接吸附有关。但结果都不如协同表面活性剂的调理效果。在不同的表面活性剂投加量下, 增加活性炭的投加量并不总是导致含水率的降低, 这与活性炭的吸附能力受污泥颗粒表面结构影响有关, 在表面活性剂作用下, 两者之间的作用将存在最佳平衡状态。

实验结果还指出, 在活性炭投加量维持不变的情况下, 随着表面活性剂投加量的提高, 污泥的含水率呈现出轻微上升的趋势, 因此表面活性剂投加量不需要多, 太多反而不利于脱水。在所测试的实验条件下, 当活性炭的投加量设定为 10%, SDBS 的投加量为 1%时, 污泥脱水效果较为理想, 正序下含水率降至 84.92% (添加 CPAM 后为 63.48%), 反序下降至 79.60% (添加 CPAM 后为 62.54%), 而表面活性剂换为 SDS 时, 相应参数分别为 89.61% (添加 CPAM 后为 69.96%)、85.09% (添加 CPAM 后为 65.36%)。进一步优化实验条件, 当活性炭投加量降低至 5%, 选择 SDS 比 SDBS 相对有优势, SDS 投加量为 1%时, 污泥的脱水效果达到最佳, 正序下含水率降低至 82.26% (添加 CPAM 后为 59.95%)、反序下降至 76.29% (添加 CPAM 后为 58.59%)。仔细分析其它调理组合条件的结果, SDBS 在实验中展现出比 SDS 略优的脱水性能, 但是考虑到 SDBS 略有微毒的性质, 建议选择 SDS。

### 3. 结论

污泥中的水分主要分为自由水(游离水, 约占 70%)、间隙水(毛细水, 约占 20%)、表面水(吸附水, 约占 7%)和化学结合水(内部水, 约占 3%) [10], 它们的结合强度依次增强, 从而决定了脱水的难易程度。自由水和间隙水较易通过机械脱水方法分离, 然而, 污泥中剩余的水分依然较高, 这主要是由于结合强度较大的表面水和化学结合水难以去除。因此需要对污泥进行深度脱水, 污泥的深度脱水依赖于高压脱水技术与适宜的化学调理技术的结合。为了实现优异的污泥脱水效果与降低运行成本, 本文研究强调了超越单纯提高脱水压力的需要, 提倡综合考虑污泥脱水设备、化学调理剂及调理方法, 并进行有机组合与优化, 以构建高效的集成脱水工艺。本文研究证实了活性炭、表面活性剂种类、以及它们投加量和投加顺序对污泥脱水效果都有影响。只有活性炭调理时, 投加量越大, 污泥含水率越低, 但结果都不如协同表面活性剂的调理效果, 所以复合调理剂的效果显然优于单一调理剂(只投加活性炭)。反序投加方式(先加表面活性剂后加活性炭)在多数情况下更有利于提高污泥脱水效率, 污泥含水率比正序投加时的含水率低, 有的情况可以降低六个百分点以上。活性炭投加量不变时, 随着表面活性剂投加量的提高, 污泥的含水率呈现出轻微上升的趋势, 因此表面活性剂投加量不宜多, 而且要获得更低的污泥含水率, 投加量还与表面活性剂的种类有关。当活性炭投加量为 5%时, SDS 投加量选择为 1%时, 污泥的脱水效果达到最佳, 正序下含水率降低至 82.26% (添加 CPAM 后为 59.95%)、反序下降至 76.29% (添加 CPAM 后为 58.59%)。当活性炭的投加量设定为 10%, SDBS 的投加量为 1%时, 污泥脱水效果较为理想, 正序下含水率降至 84.92% (添加 CPAM 后为 63.48%), 反序下降至 79.60% (添加 CPAM 后为 62.54%)。实验结果还显示对于污水处理厂的活性污泥来说, 活性炭和表面活性剂组成的复合调理剂配合 CPAM 的絮凝能够较好地降低污泥的含水率, 平均可以降低十个百分点。其结果为优化污泥调理和脱水工艺提供了重要的实验依据, 对于推动污泥处理技术的创新和应用具有重要的工程意义。与传统脱水方法相比, 本调理方

案展现出耐腐蚀设备、操作简单、试剂用量经济、絮凝速度快、处理方便以及对环境影响小等多项优势。

## 基金项目

2023 年度广东省省级大学生创新训练计划项目“活性炭协同表面活性剂降低污泥含水率的研究”(编号: S202311847066)。

## 参考文献

- [1] 住房和城乡建设部发布. 住房和城乡建设部城乡建设统计年鉴[EB/OL]. <https://www.mohurd.gov.cn/ess/?ty>, 2023-10-11.
- [2] 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.
- [3] Lin, J.L., Huang, M.Y., Xie, Z.H., *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. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/546/5/052023>
- [4] 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.
- [5] 吴佳欢, 鲁涛, 袁浩然, 等. 污泥基生物炭的制备及其作为污泥调理剂的可行性探究[J]. 新能源进展, 2020, 8(3): 184-191.
- [6] 同帆, 王瑞露, 曹秉帝, 等. 炭材料调理改善活性污泥脱水性能的影响机制[J]. 环境工程学报, 2018, 12(7): 2094-2105.
- [7] Zhang, W., Xiao, P., Liu, Y., *et al.* (2014) Understanding the Impact of Chemical Conditioning with Inorganic Polymer Flocculants on Soluble Extracellular Polymeric Substances in Relation to the Sludge Dewaterability. *Separation and Purification Technology*, **132**, 430-437. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.05.034>
- [8] 鹿雯, 张登峰, 胡开林, 等. 阳离子表面活性剂对污泥脱水性能的影响和作用机理[J]. 环境化学, 2008, 27(4): 444-448. <https://doi.org/10.3321/j.issn:0254-6108.2008.04.007>
- [9] 杨亚红, 林秀锋, 王惠, 等. 典型吸附剂对污泥脱水性能的影响研究[J]. 甘肃科学学报, 2022, 34(3): 73-77.
- [10] Vaxaire, J. and Cezac, P. (2004) Moisture Distribution in Activated Sludges: A Review. *Water Research*, **38**, 2214-2229. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.02.021>