

DOI: 10.11779/CJGE2023S10056

超声时间对污泥脱水性能的影响

齐永正^{1,2,3}, 郝昀杰¹, 吴思麟^{1,3}, 周爱兆^{1,3}, 朱忠泉⁴, 杨子明¹, 金永杰¹

(1. 江苏科技大学土木工程与建筑学院, 江苏 镇江 212100; 2. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 江苏省地质环境灾害防治及修复工程研究中心, 江苏 镇江 212100; 4. 扬中市环境卫生管理处, 江苏 镇江 212000)

摘要: 污泥絮体紧紧包裹大量结合水, 导致污泥脱水性能很差。超声波处理是改善污泥脱水性能的有效处理方法之一。针对超声时间对污泥脱水性能的影响进行了一系列研究。超声波作用在液相中产生瞬时高温高压, 其声空化和水力剪切作用通过裂解污泥絮体, 将难以去除的结合水释放出来, 改善污泥脱水性能。同时, 也释放了胞内大量的有机酸或碳酸类物质, 改变了污泥的 pH 值。但是, 超声波作用存在最优作用时间, 无限延长超声波作用时间, 污泥絮体和微生物细胞将变得更加破碎, 污泥脱水性能会恶化。

关键词: 超声波; 作用时间; 污泥处理; 脱水特性; 微观结构

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S1-0084-04

作者简介: 齐永正(1974—), 男, 博士, 硕士生导师, 主要从事环境岩土与软基处理等方面的教学和科研工作。E-mail: zmxtree@just.edu.cn。

Effects of ultrasonic duration on performance of sludge dewatering

QI Yongzheng^{1,2,3}, HAO Yunjie¹, WU Silin^{1,3}, ZHOU Aizhao^{1,3}, ZHU Zhongquan⁴, YANG Ziming¹, JIN Yongjie¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China; 2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Jiangsu Province Engineering Research Center of Geoenvironmental Disaster Prevention and Remediation, Zhenjiang 212100, China; 4. Yangzhong City Environmental Health Management Office, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: Sludge flocs tightly wrapping a large amount of bound water results in poor performance of sludge dewatering. The ultrasonic treatment is one of the effective methods to improve performance of sludge dewatering. The effects of ultrasonic time on performance of sludge dewatering are studied. The ultrasonic waves generate instantaneous high temperature and pressure in the liquid phase, which the acoustic cavitation and hydraulic shear effects can break down sludge flocs, release bound water that is difficult to remove, and improve performance of sludge dewatering. At the same time, it also releases a large amount of organic acids or carbonates in the cells, which changes the pH value of the sludge. However, there is an optimal action time for ultrasound. If the ultrasound action time is infinitely extended, the sludge flocs and microbial cells will become more fragmented, and the sludge dewatering effects will deteriorate.

Key words: ultrasonic; duration; sludge treatment; dehydration characteristic; microstructure

0 引言

污泥往往具有极高的含水率, 需要对污泥进行脱水, 以方便后续处理^[1]。然而污泥胞外聚合物 (EPS) 的成分极其复杂, 使污泥中的水分很难被去除^[2]。为了降低污泥的含水率, 国内外已进行了很多新技术的研究, 包括微波辐射、热水解、超声波以及新型絮凝剂的开发等^[3-6]。超声波处理是改善污泥脱水性能的有效处理方法之一^[7-8]。污泥液相在超声波的作用下产生大量的空化气泡及产生强大的剪切力和瞬时高温, 能够有效地裂解胞外聚合物 (EPS), 使大量结合水释放^[9-10]。

超声波作用使絮体颗粒尺寸变小, 破坏菌胶团的结构, 使其间所含结合水转化为自由水^[11]。超声波还可以杀灭污泥中的病毒、细菌和其他有害物质, 提高重金属的浸出率和回收率等^[12-13]。超声波处理污泥改善脱水性能受到超声波频率、超声时间、声能密度、pH 值、作用方式、耦合方法等因素的影响^[14]。目前, 超声波技术仍有一些局限性, 超声波处理污泥脱水的一些机

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (52108369); 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金项目 (2021491611)

收稿日期: 2023-07-05

理尚未能充分认识^[15]。本文拟在超声波作用时间对污泥脱水性能影响方面进行研究, 以达到最佳处理效果。从而为在实际工程应用中更好地利用超声波的优势提供理论参考。

1 材料和方法

1.1 污泥试样

试验污泥选用当地城镇污水处理厂二沉池活性污泥, 为保证各组试验初始条件的一致性, 采用同一批污泥, 测试初始含水率为 97.13%, 密度为 1.026 g/cm³。原污泥基本性质如表 1 所示, 粒径分布采用激光粒度分析仪测定, 如图 1 所示。

表 1 原污泥基本性质

Table 1 Characteristics of raw sewage sludge

| 含水率/% | pH | SV30/% | 密度/cm ³ | 污泥温度/℃ |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|----------|
| 97.13 | 8.87 | 54 | 1.026 | 24.1 ± 2 |
| SRF/(10 ¹³ ·m ⁻¹ ·kg ⁻¹) | d ₁₀ /μm | d ₅₀ /μm | d ₉₀ /μm | Mean/μm |
| 4.76 | 13.680 | 49.129 | 172.116 | 73.109 |

注: SV30 表示污泥沉降比; SRF 表示污泥比阻; d₁₀ 表示颗粒累积分布为 10% 的污泥粒径; d₅₀ 为中值粒径, 表示颗粒累积分布为 50% 的污泥粒径; d₉₀ 表示“颗粒累积分布为 90% 的污泥粒径; Mean 表示粒径加权平均值, 即平均污泥粒径。

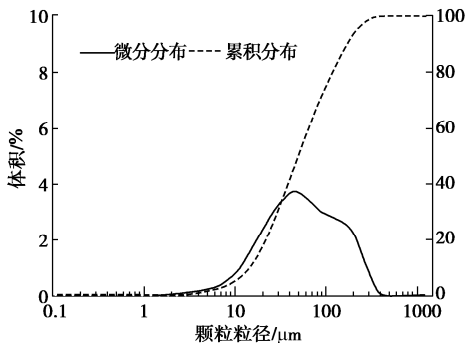


图 1 原污泥粒径分布

Fig. 1 Particle-size distribution of raw sludge

1.2 仪器设备

本试验仪器有 SM-900A 超声波细胞破碎仪, LT2200E 激光粒度分析仪, PXBJ-287L 型便携式离子计, JJ-4B 六联异步电动搅拌器, CS-101-2 电热干燥箱, Coxem EM-30 PLUS 台式扫描电子显微镜, CR21N 高速冷冻离心机等。

1.3 试验方法

取原污泥 5 盒各 300 mL, 设定超声波频率 20 kHz, 声能密度 9.8 W, 调节超声波作用时间为 5, 15, 30, 45, 60 s。待每组污泥试样超声处理完成后, 检测污泥的 pH 值、粒径分布。试样放入离心机脱水, 检测离心脱水后的污泥泥饼含水率, 确定超声波调理污泥的最优作用时间。取适量污泥, 进行扫描电镜试

验, 分析污泥的微观结构。

1.4 分析方法

(1) 污泥含水率

污泥加入离心机试样瓶, 离心机必须同时放置 4 个离心试样瓶且 4 个试样瓶各自的质量差值小于 4 g, 底部用滤布进行过滤, 污泥经 6000 r/min, 5 min 离心作用后检测滤饼含水率。污泥含水率的测定采用热干燥法, 离心机脱水后的泥饼放入恒温烘箱中烘至恒重, 取平均值。

(2) 污泥 pH 值

采用便携式离子计的 pH 电极进行测量。

(3) 污泥粒径

用去离子水将污泥样品稀释至浓度为 15 mg/L 的混合液, 采用激光粒度分析仪测定污泥粒径分布, 每个样品测定 3 次后取平均值。

(4) 污泥微观结构

污泥样本在烘箱里烘干后, 采用扫描电子显微镜 (SEM) 对污泥样本进行分析, 放大倍数分别为 200, 500, 1000, 2000, 5000 倍。

2 结果与讨论

2.1 污泥含水率的变化

污泥含水率为污泥中水的质量与污泥总质量之比。超声波作用后的污泥经离心机脱水后的泥饼含水率随超声波作用时间的变化曲线, 如图 2 所示。

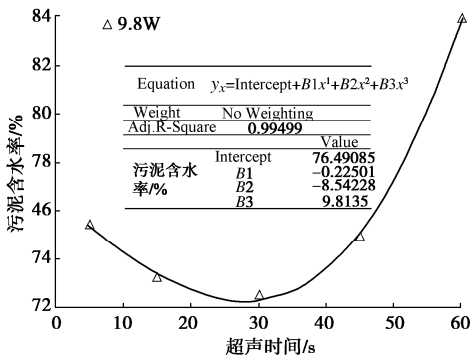


图 2 含水率随超声时间的变化

Fig. 2 Change in water content with ultrasonic time

从图 2 中曲线可知, 当超声波作用时间小于 30 s, 污泥泥饼含水率随超声波作用时间的增加逐渐降低, 表明污泥脱水性能得到改善。经 30 s 的处理时间后降至最低值。当超声波作用时间大于 30 s, 污泥泥饼含水率反而升高, 显示污泥脱水性能逐渐恶化。这意味着额外延长超声时间, 处理效果反而变差。长时间超声波作用使污泥絮体过分破碎, 过度裂解了污泥絮体和微生物细胞结构, 释放出的核酸、蛋白质、脂肪微粒和无机物微粒等微小聚合物, 增加了污泥的黏度,

致使污泥又重新吸附水分, 结合水增加, 脱水性能恶化。上述污泥泥饼含水率变化规律说明超声波作用时间存在一个最优值, 作用时间过短和过长均不利于污泥脱水性能的提高。

2.2 污泥 pH 值的变化

污泥 pH 值随超声波作用时间的变化曲线如图 3 所示。

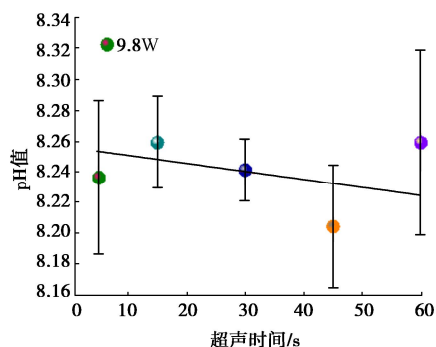


图 3 污泥 pH 值随超声时间的变化

Fig. 3 Change in sludge pH value with ultrasound time

由图 3 中曲线可知, 随着超声波作用时间的延长, 超声处理后的污泥 pH 值稍有下降, 但下降趋势不明显。由于污泥絮体和细胞结构被破坏, 在释放细胞内部水分的同时, 也释放内部的有机物质, 包含有机酸或碳酸类物质, 该过程改变了污泥的化学特性, 使 pH 降低。

2.3 污泥粒径的变化

超声波作用时间对污泥颗粒粒度分布的影响, 如图 4 所示。

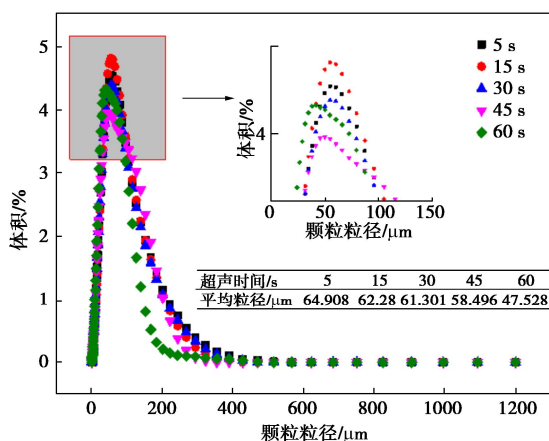


图 4 污泥颗粒粒径分布曲线

Fig. 4 Distribution curves of particle size of sludge

从图 4 曲线可以看出, 污泥颗粒粒径主要分布在 10~200 μm 范围内, 随着超声波作用时间延长, 污泥颗粒粒径逐渐变小。究其原因, 由于污泥颗粒稳固的细胞结构, 短时间的超声波处理可能达不到理想的能量输入, 这部分能量不足以破坏大部分的细胞结构,

只能破坏结合力较小的污泥絮体结构。逐渐延长超声波作用时间, 能量输入不断增强, 越来越多的细胞结构无法承受空化气泡崩溃时产生的巨大压力而被破坏, 絮体断裂, 颗粒粒径变小。继续延长超声波作用时间, 能量持续输入, 完全破坏了污泥絮体及细胞结构。长时间超声波作用使污泥絮体过分破碎, 表现为污泥平均颗粒粒径进一步减小。

2.4 污泥微观结构的变化

图 5 为原污泥及超声波作用时间 5, 15, 30, 45, 60 s 处理后污泥的 SEM 图。

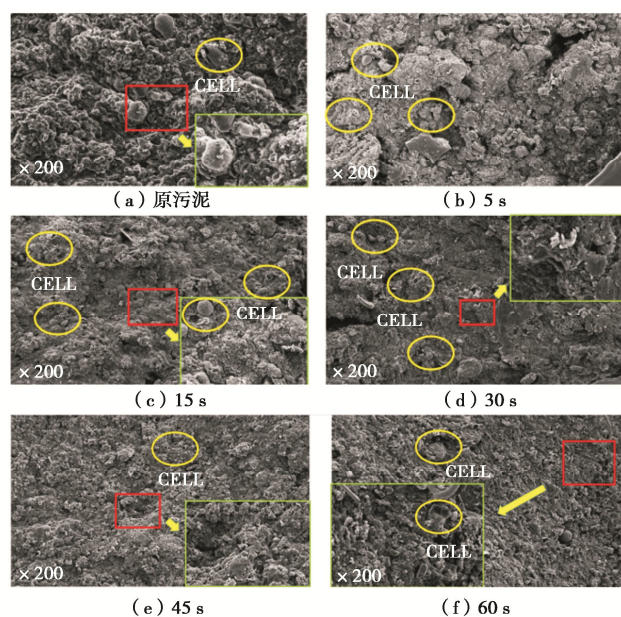


图 5 污泥 SEM 图

Fig. 5 SEM images of sludge

图 5 (a) 为原污泥微观结构, 从图 5 (a) 中可以看出, 原污泥絮体结构较为完整, 较多圆球状颗粒堆积胶黏在一起, 微生物细胞极少裸露, 被污泥絮体紧紧包裹, 污泥絮体之间紧密结合, 表面相对光滑完整, 结构致密。图 5 (b) 为超声波作用时间 5 s 处理后的污泥微观结构, 可见少量完整细胞裸露在外, 污泥絮体变得松散; 图 5 (c) 为超声波作用时间 15 s 处理后的污泥微观结构, 可见较多完整细胞裸露在外, 污泥絮体松散, 可见大块状絮体聚集体; 图 5 (d) 为超声波作用时间 30 s 处理后的污泥微观结构, 可以看出污泥絮体更加松散, 污泥颗粒粒径变小, 污泥絮体结构遭到明显破坏, 暴露的细胞数显著增加, 污泥絮体解体, 细胞壁破裂; 图 5 (e) 为作用时间 45 s 处理后的污泥微观结构, 可见, 细胞壁凹陷破碎明显, 污泥絮体重新聚集组合。图 5 (f) 为作用时间 60 s 处理后的污泥微观结构, 细胞壁破碎严重, 外层胞外聚合物 EPS 和微生物细胞破裂失活, 污泥无机颗粒与微生物细胞碎片堆积胶结在一起, 污泥重新变得很致密。

3 结 论

本文从污泥离心脱水含水率、pH 值、颗粒粒径分布、微观结构等方面研究了超声波作用时间对污泥脱水性能的影响, 得到以下 3 点结论。

(1) 原污泥具有稳定的胶体系统, 大量结合水被污泥絮体紧紧包裹无法释放, 导致污泥脱水性能很差。超声波通过声空化作用和水力剪切作用裂解污泥絮体, 将难以去除的结合水释放出来, 改善污泥脱水性能。

(2) 由于超声波作用, 污泥在释放胞内结合水的同时, 也将大量的有机酸或碳酸类物质的有机物质释放到污泥浆液中, 使污泥 pH 值降低。

(3) 无限延长超声时间, 污泥脱水性能会变差。采用超声改善污泥脱水性能, 应选择最优的超声波作用时间, 超声波作用时间过短和过长均不利于污泥脱水, 在实际应用时应引起重视。

参考文献:

- [1] QI Y Z, WANG Z Z, JIANG P M, et al. Test and analysis of sludge dewatering with a vacuum negative pressure load at the bottom of full section[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020(3): 1-12.
- [2] BIEN B, BIEN J. Dewatering of sewage sludge treated by the combination of ultrasonic field and chemical methods[J]. *Desalin. Water Treat*, 2020, **199**: 72-78.
- [3] 王 芳. 壳聚糖联合超声波改善污泥脱水性能的研究[D]. 南京: 东南大学, 2020. (WANG Fang. Study on Improving Sludge Dewatering Performance by Combining Chitosan with Ultrasound[D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese))
- [4] MOBARAKI M, SEMKEN R S, MIKKOLA A, et al. Enhanced sludge dewatering based on the application of high-power ultrasonic vibration[J]. *Ultrasonics*, 2018, **84**: 438-445.
- [5] 董 慧. 超声/双氧水预处理技术对污泥发酵及脱水影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018. (DENG Hui. The Effect of Ultrasonic/Hydrogen Pretreatment on the Fermentation and Dehydration of Sludge[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese))
- [6] BARATI R R, PASALARI H, MOSERZADEH A A, et al. A combined ultrasonic and chemical conditioning process for upgrading the sludge dewaterability[J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2022, **102**(7): 1613-1626.
- [7] LIU H, WANG X, QIN S, et al. Comprehensive role of thermal combined ultrasonic pre-treatment in sewage sludge disposal[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **789**: 147862.
- [8] 申晓娟, 邱 珊, 李光明, 等. 超声波对污泥脱水的影响研究[J]. *中国给水排水*, 2018, **34**(3): 122-124, 128. (HEN Xiaojuan, QIU Shan, LI Guangming, et al. Study of ultrasonic wave impact on sludge dewatering[J]. *China Water & Wastewater*, 2018, **34**(3): 122-124, 128. (in Chinese))
- [9] WU S, ZHENG M, DONG Q, et al. Evaluating the excess sludge reduction in activated sludge system with ultrasonic treatment[J]. *Water Science and Technology*, 2018, **77**(9/10): 2341-2347.
- [10] MAO H, CHI Y, WANG F, et al. Effect of ultrasonic pre-treatment on dewaterability and moisture distribution in sewage sludge[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2018, **9**(2): 247-253.
- [11] LIPPERT T, BANDELIN J, SCHLEDERER F, et al. Impact of ultrasound-induced cavitation on the fluid dynamics of water and sewage sludge in ultrasonic flatbed reactors[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, **55**: 217-222.
- [12] 叶新合, 刘军伟, 策红军, 等. 物理调理法改善污泥脱水性能研究进展[J]. *工业水处理*, 2022, **42**(8): 51-59. (YE Xinhe, LIU Junwei, CE Hongjun, et al. Research progress in the improvement of sludge dewatering by physical conditioning[J]. *Industrial Water Treatment*, 2022, **42**(8): 51-59. (in Chinese))
- [13] GOLBABAIE K F, MEHRDADI N, NABI B G, et al. Improvement of sludge dewatering by ultrasonic pretreatment[J]. *International Journal of Environmental Research*, 2022, **16**(4): 1-11.
- [14] WOLSKI P. The effect of ultrasonic disintegration on sewage sludge conditioning[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2020, **199**: 99-106.
- [15] 林佳琪, 姚 毅, 王 龙, 等. 酶促污泥原位减量研究现状[J]. *中国给水排水*, 2022, **38**(22): 28-34. (LIN Jiaqi, YAO Yi, WANG Long, et al. Current situation of in-situ enzymatic sludge reduction[J]. *China Water & Wastewater*, 2022, **38**(22): 28-34. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)