

超声波水处理技术研究进展

高颖, 耿楠楠*, 孙威威

滁州学院土木与建筑工程学院, 安徽 滁州

收稿日期: 2024年12月29日; 录用日期: 2025年2月16日; 发布日期: 2025年2月28日

摘要

近年来, 生态环境受到越来越多的关注, 因此, 在当前环境资源日益严峻的背景下, 如何更好地保护生态环境具有紧迫性和重要性。水环境是生态环境的重要组成部分, 如果水环境不能得到很好的保护, 水污染不能得到有效的处理, 不仅直接影响居民日常生活, 还会诱发各种社会矛盾和问题, 限制人类发展。超声波水处理技术是一种利用超声波的空化、热作用等对水资源进行深度处理的技术, 具有操作简单、绿色无污染等特点, 符合可持续发展需求。本文试图从超声波出发, 在分析传统水处理的基础上, 从水体类型、应用形式、机理、影响因素等方面综述超声波水处理技术对水污染的贡献, 并对超声波处理水资源的未来发展提出展望。

关键词

水处理, 超声波, 应用, 机理, 影响因素

Research Progress of Ultrasonic Water Treatment Technology

Ying Gao, Nannan Geng*, Weiwei Sun

College of Civil and Architectural Engineering, Chuzhou University, Chuzhou Anhui

Received: Dec. 29th, 2024; accepted: Feb. 16th, 2025; published: Feb. 28th, 2025

Abstract

In recent years, the ecological environment has received more and more attention, therefore, in the current environment resources increasingly grim background, how to better protect the ecological environment is urgent and important. The water environment is an important part of the ecological environment. If the water environment can not be well protected and the water pollution can not be effectively treated, it will not only directly affect the daily life of the residents, it will also lead to

*通讯作者。

various social contradictions and problems, which will limit the development of human beings. Ultrasonic water treatment technology is a kind of advanced treatment technology of water resources by using cavitation and heat effect of ultrasonic wave, which has the characteristics of simple operation, green and no pollution, meets the needs of sustainable development. Therefore, based on the analysis of traditional water treatment, this paper attempts to summarize the contribution of ultrasonic water treatment technology to water pollution from water types, application forms, mechanism and influencing factors. The future development of ultrasonic treatment of water resources is prospected.

Keywords

Water Treatment, Ultrasound, Application, Mechanism, Influencing Factors

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

1.1. 选题背景与意义

人类的日常生活离不开水资源，然而随着工业化和城市化的发展，水资源的污染和短缺问题日益严重，水处理技术被广泛研究。超声波技术作为一种环境友好型处理技术，具有处理条件温和、处理效率高及对环境不产生二次污染等优点[1]。其在水处理领域的应用受到越来越广泛的关注，本文将探讨超声波技术在水处理方面的研究现状及发展趋势。

1.2. 研究现状

人们通常把振动频率在 20 KHZ~10 MHZ 的声波、物体介质中产生的弹性波叫超声波。目前，在国内外的研究中，很多学者都尝试将超声波与水处理相结合，希望借助超声波更好地去除水中的污染物。超声波可以作用于活性污泥中的细菌，通过提高细菌的活性增强污染物的去除率，如杨杰源于 2023 年在《低强度超声波对厌氧氨氧化颗粒污泥处理高氨氮无机废水的影响》中提出低强度超声波辐照可以有效提高厌氧氨氧化颗粒污泥的生物活性[2]。超声波可以作用于水中有机污染物从而改善污水中的物质种类及环境、提高污水降解率，如廖天棋于 2021 年在《超声波强化锌粉深度净化硫酸锌溶液研究》中提出超声波在液体中传播时，引起媒介质点的振动，加快分子的碰撞速度，使得质点受到较大的机械力的冲击，从而除去介质表面附着的污垢或污损[3]。此外，超声波可以作用于酶，通过提高酶的活性来提升污染物的去除效率。虽然超声波有助于去除水中有机污染物，但也存在一些不足，如能源耗费、应用广泛性以及处理污染物时的影响因素和效率。所以，如何使超声波的去除效率更高、耗能更少、应用更广泛，成为当前社会研究的热点。

2. 超声波处理的水体类型

超声波处理的水体类型多种多样，包括生活污水、工业废水、地表水源、海洋生物污水、高氨氮无机废水、稀土废水、低温生活污水等，其中，与人类日常生活息息相关的就是生活污水。居民生活污水是指居民在日常生活和商业、工业等活动中排出的水，主要来自家庭、学校、医院、商店、公共场所和工业企业等，这些生活污水中含有大量的有机物和无机物，如蛋白质、碳水化合物、脂肪、尿素、氨氮等有机物，泥沙和杂物等无机物。此外，居民生活污水中还含有大量的病原微生物和寄生虫卵等，这些污染

物对环境和人类健康都有很大的危害，因此需要及时对其进行处理。一些案例利用超声波破坏污水中的有机物结构，促进微生物对有机物的降解，另外，超声波的空化效应和搅拌作用有助于悬浮物的混凝和沉淀。工业废水是指工业生产过程中产生的废水，包括各种洗涤水、冷却水、设备和场地清洁用水等，这些废水中含有随水流失的工业生产原料、中间产物、副产物以及生产过程中产生的污染物。工业废水通常具有较高的污染浓度和复杂的成分，对环境和生态系统有较大的危害，需要经过专业的污水处理过程，达标后才能进行排放。例如：某电子产品制造厂采用高频超声波设备对废水进行处理，利用超声波的机械效应和化学效应，破坏废水中的有机物和油脂分子结构，使其分解为小分子，便于后续处理[4]。

3. 超声波技术在水处理中的应用范围

超声波可以单独使用，也能与其他水处理技术联用。通常情况下，单独超声作用对污染物的降解效率不高、能耗大，联合技术效率更高，成本更低，是未来超声波应用的一个发展方向。

3.1. 超声波单独作用

3.1.1. 杀菌消毒

超声波能够通过稳态空化作用使膜面局部变薄，使细胞与其他细胞在叠加过程中更加通透，加速细胞膜两侧的物质交换，促进污水净化[5]。其消毒杀菌目的主要通过破坏细菌细胞壁、导致细菌死亡来实现。同时，超声波还可以诱发细菌产生共振效应，进一步增强杀菌效果。虽然超声波技术在饮用水、游泳池水、医院污水等领域的杀菌消毒中具有显著效果，但是在超声空化作用下，水体中溶解的氮气和氧气会发生反应产生无机含氮副产物。如果副产物未经处理直接排入环境中，会对水体造成污染甚至对人体健康产生长期危害。

3.1.2. 生物降解

超声波技术大多用于生物预处理工艺，其主要作用是降低废水的生物毒性，提高 BOD5/COD 值，从而促进废水的可生化降解性[4]。微生物是污水生物处理的主体，目前大部分污水处理厂仍采用传统的生物处理方法处理溶解性易降解有机物，但传统的生物处理效果受进水水质影响较大，当进水的水质水量变化大，或者含有难降解的物质时，往往处理效果不佳。低强度超声波往往通过机械效应、热效应、空化效应及损伤效应来强化生物处理效能[5]。低强度超声波促进生物反应过程的作用机制主要表现在以下几个方面：1) 促进传质：增加细胞膜的通透性，促进细胞内外物质运输；2) 增加酶活力：强化反应物进入及生成物离开酶活性中心的过程，减少次生代谢产物的积累对酶活力的产物抑制，提高酶活力，促进酶催化反应；3) 加速细胞生长：适当的超声频率、强度和um时间可以提高整个细胞的新陈代谢效率，加速细胞生长[6]。

3.1.3. 促进活性炭再生

超声波可以通过声空化作用促进活性炭的再生。超声波在液体中传播时会产生空化泡，这些空化泡在瞬间爆裂时会产生强烈的冲击波和微射流，这些物理效应能够促进活性炭孔隙中吸附质的脱附，从而提高再生效率[7]。刘成等研究了低频超声波对活性炭再生的效能和机理，结果表明低频超声提升了活性炭的吸附指标，也可在一定程度上保持生物活性炭较高的可生化性[8]，他们认为超声过程中空化泡破裂产生的高温、高压微射流和微液流促进了活性炭的再生。

3.2. 超声波与其他水处理技术联用

3.2.1. 超声波 - 传统水处理技术

超声波可以产生强大的剪切力和空化效应，能够有效地破坏水中的污染物，如重金属离子、有机物、

氮磷等营养物质, 通过与传统的水处理方法结合, 如混凝、沉淀、过滤等, 可以进一步提高水处理效能。例如: 石油化工废水含有大量的有机物和有毒物质, 对环境和人类健康危害严重, 超声波技术能够通过物理化学效应和生物效应的协同作用, 有效去除石油化工废水中的有机物和有毒物质, 实现石油化工废水的有效处理; 印染废水含有大量的染料和助剂, 处理难度大, 传统的水处理方法只能去除印染废水中的简单污染物, 超声波技术可以通过破坏染料和助剂的化学结构, 促进污染物聚集和沉淀。同时, 超声波还可以激活水中的溶解氧, 生成羟基自由基等强氧化剂, 进一步降解有机污染物。Wu 等通过优化的超声-絮凝-沉淀组合工艺处理放射性铀废水, 发现超声波和絮凝剂投加量之间存在明显的协同效应, 组合工艺处理后的铀离子去除率达到 95.4% [9]。

3.2.2. 超声波-膜技术

膜在饮用水处理中发挥了重要的作用, 而膜污染是膜处理面临的关键问题, 研究表明, 超声场产生的机械振动、声流和声空化不仅能增强膜分离能力, 而且能有效地清洁膜表面, 抑制浓差极化现象和膜污染, 从而在一定程度上提高膜通量。同时, 作为一种能量形式, 超声波在溶液中的传播, 能引起溶液周期性的压缩与伸张, 在水中形成微振动, 其振幅虽小但加速度较大, 促进膜分离过程。Muthukumaran 等[10]认为超声强化膜分离过程中存在四种增强机制: 1) 声波能使超细颗粒团聚, 减弱膜溶质的吸附和膜孔的堵塞, 从而抑制膜污染; 2) 超声可以提供足够的机械振动能量, 使一些悬浮在溶液中的颗粒远离膜面, 避免颗粒沉积, 有效减缓浓差极化现象和滤饼层的形成, 显著降低边界层阻力和滤饼阻力; 3) 超声波产生的微束流可以打破在薄膜表面形成的凝胶层和滤饼层, 使其分散在液体中; 4) 由微射流、冲击波和声脉冲引起的宏观湍流可以增强湍流主体的扩散, 也可以引起边界层的局部湍流。局部湍流将分子在边界层中的扩散转化为涡流扩散, 最终增强了材料与界面之间的对流传质。

3.2.3. 超声波-臭氧技术

目前对于超声波-臭氧技术已有较多研究。臭氧在超声波作用下可生成化学性质活泼的氧自由基, 该自由基可与臭氧结合生成氧气, 也可与水反应生成 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{H}_2\text{O}_2$ 强氧化物种(公式(1)~(4)), 从而促进臭氧分解, 提高反应效率。Helfred 等[11]人的研究表明, 超声波可将含臭氧的气泡粉碎成“微气泡”, “微气泡”的比表面积比一般气泡大 $10^1\sim 10^4$ 倍, 使得臭氧与水的接触面积增大, 加快了臭氧在水中的溶解速率。Ziylani-Yavas 等[12]研究了超声-臭氧法处理扑热息痛, 结果表明联用技术增强了氧化物种产生量, 提高了污染物的矿化率。



3.2.4. 超声波-光催化技术

光催化技术是指利用光催化剂在光照下具有的氧化还原能力, 来净化污染物和合成物质的一种技术。光催化技术因为其反应条件温和、应用领域广泛高度受欢迎。超声和光催化技术联用可以分解疏水物质, 拓展光生电子空穴的转移路径。Hamdaoui 等[13]的研究结果表明, 在相同条件下, 与分别使用单独的处理技术相比, 超声辐射与光化学工艺组合导致了对氯苯酚矿化率的增加。这意味着在直接光化学作用、高频声化学和与紫外线辐射空气而产生的臭氧反应这三种氧化过程之间存在极大的协同效应。

3.2.5. 超声波-芬顿技术

超声均相芬顿技术是超声波与传统芬顿试剂(Fe^{2+} 和 H_2O_2)联合而成的高级氧化技术。传统芬顿技术

在水中污染物的去除方面应用广泛,但存在 H_2O_2 投加大、费用高的问题。因此,有学者将超声波技术与均相芬顿联合,通过超声波原位生成的 H_2O_2 来降低外部氧化剂的投加。非均相芬顿技术比均相芬顿技术的发展晚了一百年,它将传统均相芬顿试剂中的 Fe^{2+} 用铁基固体催化剂来代替。相比于均相芬顿技术,非均相芬顿技术可以实现催化剂的回收、防止铁泥的产生。Geng 等[14]采用超声-非均相芬顿技术处理盐酸四环素,在盐酸四环素浓度 10 mg/L 、催化剂浓度 0.3 g/L 、超声功率 60 W 条件下,一级动力学反应速率常数达 0.226 min^{-1} ,高于单独超声波和单独非均相芬顿技术反应速率常数的叠加。

4. 超声波水处理的作用机理

超声波处理水资源的机理主要是利用超声波的空化作用。在超声波的作用下,液体介质受到拉应力,当拉应力大于液体间的凝聚力时,便产生空化核。这些微小的空化核在超声波的振动下产生振动,振动到一定的幅度后,空化核便产生爆炸。这种由小到大、由轻到重的爆炸冲击着周围的液体,并给液体以冲击和震荡,引起液体介质的整体振动。同时,超声波的高频机械振动作用和强大的声压作用,使液体中的微气泡产生、生长、迅速闭合,形成局部强冲击波或微射流[15]。当这种冲击波或射流作用于悬浮于液体中的微粒时,产生强大的剪切力,使污染物从大颗粒上分离出来。另外,超声波在水中能产生瞬间的强大能量场和强烈的湍流效应。因此,它可以在处理过程中降解有机污染物、杀死水中的细菌和微生物、破坏生物膜结构等。

4.1. 空化原理

空化原理是指液体在一定条件下,局部压力降低到饱和蒸汽压以下时,液体中原有的气核会不断膨胀,形成肉眼可见的气泡,然后在泡内外压强差作用下发生体积振荡[16]。这种现象被称为空化。根据声压强的不同,空化作用可分为瞬态空化(声强 $> 10\text{ W/cm}^2$)和稳态空化(声强 $< 10\text{ W/cm}^2$),超声波在水处理和生物工程中的应用就是利用了超声波的空化作用。

4.2. 损伤效应原理

损伤效应原理主要指的是机械损伤效应,即细胞内外冰晶生长而产生的机械力量对细胞膜的损伤。在生物细胞冷冻过程中,细胞内外的冰晶形成首先从纯水开始,冰晶的生长逐步造成电解质的浓缩。期间经历了纯水结冰、细胞质中盐浓度不断增高、胞内 pH 值和离子强度改变、潜在的不利化学反应发生率提高的过程。在冷冻过程中,不希望形成大的冰晶,因为这会对细胞膜系统造成直接损伤,从而影响细胞的生理、代谢功能的正常发挥。

5. 超声波水处理的影响因素

Table 1. The influence of different factors on the process of cavitation [4]

表 1. 不同因素对空化过程的影响[4]

物理参量	空化过程的影响
水流速度	提高水流速度可以增强空化效果
水压	水压降低时,会影响空化的发生
水质	水质的不同也会影响空化过程
温度	温度升高会使空化泡的产生变得容易,但存在一个最佳温度

超声波处理水资源的影响因素主要包括超声波的使用参数,如频率、功率和声强等,以及待处理废水的物化参数,如温度、微粒及污染物性质等。此外,超声波处理过程中还会受到如超声功率强度等因

素的影响。在降解过程中,反应的速率并不是一成不变的,一般情况下,超声功率强度越大,反应速率就会越快[4]。表 1 列出了一些参量对超声波的影响。

6. 结论与展望

作为一种环境友好型技术,超声波在未来水处理行业显示出较大的应用潜力。虽然,目前该技术已经取得了一定的研究成果,但其单独使用时存在的耗能高、降低效率低的问题需要进一步解决。例如,如何优化超声波设备的结构和性能以提高其稳定性和效率,如何深入研究超声波的作用机理以实现其高效、安全和环保的应用,如何开发新的超声波处理工艺以适应不同类型的污水和水质条件以及减少超声波的能耗等。在现有研究基础上突破瓶颈、克服壁垒,有助于适应日益变化的水质问题。

致 谢

本文的顺利完成,离不开导师的耐心指导。在论文的研究和撰写过程中,导师以深厚的专业知识和严谨的学术态度,为我指明了研究方向,提供了宝贵的建议。在此,我对导师表示衷心的感谢。此外,还要感谢家人和朋友们的理解和鼓励,他们的默默付出为我创造了良好的学习环境。我将继续努力,不辜负大家的期望。

基金项目

论文依托于滁州学院 2023 年度博士科研启动基金项目(2023qd47)。

参考文献

- [1] 邵娜. 水处理技术在污水处理中的意义及应用前景[J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(9): 7-9.
- [2] 杨杰源. 低强度超声波对厌氧氨氧化颗粒污泥处理高氨氮无机废水的影响[D]: [硕士学位论文]. 赣州: 江西理工大学, 2023.
- [3] 廖天棋. 超声波强化锌粉深度净化硫酸锌溶液研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [4] 罗真, 吴文芳, 陶丽梅. 超声波组合工艺在水处理中的研究进展[J]. 广东化工, 2023, 50(18): 66-68.
- [5] 罗忆涵, 张少栋, 任笑笑. 超声波强化污水生物处理研究[J]. 工业微生物, 2023, 53(1): 13-15.
- [6] 闫怡新, 刘红. 低强度超声波强化污水生物处理机制[J]. 环境科学, 2006, 27(4): 647-650.
- [7] 蒙媛媛, 鲁冰格, 邓维鹏, 张慧, 杨帆, 王艺晓, 孙韵涵, 李金成, 刘杰. 超声波催化活性炭再生研究进展[J]. 山东化工, 2023, 52(7): 123-125.
- [8] Liu, C., Sun, Y., Wang, D., Sun, Z., Chen, M., Zhou, Z., *et al.* (2017) Performance and Mechanism of Low-Frequency Ultrasound to Regenerate the Biological Activated Carbon. *Ultrasonics Sonochemistry*, **34**, 142-153. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.05.036>
- [9] Wu, T., Huang, H., Sun, W., *et al.* (2023) Study on Ultrasonic Flocculation Combined Treatment of Low Radioactive Uranium Wastewater. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **25**, 89-97.
- [10] Muthukumar, S., Kentish, S., Ashokkumar, M. and Stevens, G. (2005) Mechanisms for the Ultrasonic Enhancement of Dairy Whey Ultrafiltration. *Journal of Membrane Science*, **258**, 106-114. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.03.001>
- [11] Sartori, H.E. Method for Treating a Liquid Medium: EP 1992.
- [12] Ziylan-Yavaş, A. and Ince, N.H. (2018) Catalytic Ozonation of Paracetamol Using Commercial and Pt-Supported Nanocomposites of Al₂O₃: The Impact of Ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, **40**, 175-182. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.02.017>
- [13] Hamdaoui, O. and Naffrechoux, E. (2008) Sonochemical and Photosonochemical Degradation of 4-Chlorophenol in Aqueous Media. *Ultrasonics Sonochemistry*, **15**, 981-987. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2008.03.011>
- [14] Geng, N., Chen, W., Xu, H., Ding, M., Lin, T., Wu, Q., *et al.* (2021) Insights into the Novel Application of Fe-MOFs in Ultrasound-Assisted Heterogeneous Fenton System: Efficiency, Kinetics and Mechanism. *Ultrasonics Sonochemistry*, **72**, Article ID: 105411. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105411>

- [15] 颜晓晗, 杨宏宾, 高雅, 葛心如, 荣源源, 韩瑞芳, 朱秀林, 赵晓栋. 基于空化效应的超声波灭菌除污技术性能评价[J]. 安徽大学学报, 2023, 50(3): 529-536.
- [16] 周鹏, 许祥祥, 张硕. 低温下超声波强度对厌氧氨氧化污水处理工艺性能的影响[J]. 当代化工研究, 2021(6): 101-102.