

超声波强化混凝处理太湖高藻水效能研究

陈卫 盛誉 曹喆 刘成

(河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 针对藻类在常规水处理过程中难以被有效去除的现状,采用超声预处理对太湖高藻水混凝过程进行强化. 研究表明:在 20 mg/L 的聚合氯化铝投加量条件下,采用功率为 100 W 的超声预处理 15 s 可强化混凝效果,有效去除 90% 以上藻细胞,降低沉后水浊度;低频条件下超声频率并非藻类去除效果的决定性因素;超声总能量和时间影响强化混凝效果,功率高于 200 W 或处理时间长于 30 s 会影响混凝效果. 在过量条件下进行超声预处理会造成胞内物质及藻毒素的严重释放,实际应用中须合理确定其作用参数.

关键词 藻; 超声; 强化混凝; 藻毒素; 释放

中图分类号 TU991.2 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2011)01-0110-04

Efficacy of enhanced ultrasonic coagulation of high-algae water from Taihu lake

Chen Wei Sheng Yu Cao Zhe Liu Cheng

(College of Environmental Science and Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract Aimed at conventional removal of low algae, enhance dultrasonic coagulation treatment of high-algae water from Taihu lake were studied. The results show that: ultrasonic irradiation, with an aluminium polychloride dose of 20 mg/L, at 100 W for 15 s can significantly enhance the removal of algae (more than 90%) and the turbidity, the ultrasonic frequency was not a decisive factor for algae removal in low frequency range; ultrasonic dosage decides the effect of ultrasonic enhanced coagulation. High power (more than 200 W) or long duration (more than 30 s) ultrasonic irradiation could influence coagulation and bring release of intracellular substances and microcystins, and the ultrasonic parameter should be determined properly in practical uses.

Key words algae; ultrasound; enhanced coagulation; microcystin; release

水源中藻类过度生长已成为我国供水行业面临的重大难题,藻类及藻类有机物难以被常规工艺有效去除,一些除藻工艺也难以达到安全除藻和高效经济的要求. 超声波技术是一种新型环境友好技术,在处理中不引入其他的化学物质,且反应条件温和、反应速度快. 超声波在水中产生的空化效应能够破坏藻细胞结构,抑制叶绿素合成,降低细胞酶活性^[1]. 研究^[2]表明,低剂量的超声辐照可有效破坏藻体内气囊结构,改善藻类聚集性和沉降性,强化混凝沉淀对藻类去除效果. 本文探讨了超声预处理对太湖高藻水的强化混凝作用及其

最佳工艺参数,并考察其出水安全性.

1 材料与方法

1.1 源水水质

高藻水源水取自太湖梅梁湾,试验时间为 2009 年 7~8 月,此期间为高藻期,主要水质情况如下:试验水温约 26.5~32.5 °C, pH 约为 7.6~8.1,浊度约为 40~90 NTU,水体中藻类数目高达 $8 \times 10^3 \sim 6.4 \times 10^4$ 个/mL,其中约 90% 为蓝藻(微囊藻属为主),其余为绿藻(盘星藻属为主)和

收稿日期 2010-08-18.

作者简介 陈卫(1958-),女,教授, E-mail: cw5826@hhu.edu.cn.

基金项目 国家科技重大专项资助项目(2008ZX07421-002);国家自然科学基金资助项目(50908073).

硅藻(直链藻属为主)。

1.2 超声反应器

本研究采用频率为 20 kHz 及 40 kHz 的功率可调式超声反应器(无锡市华能超声电子有限公司)和频率为 80 kHz 的 KQ-100VDE 数控超声清洗器(昆山市超声仪器有限公司)。

1.3 混凝烧杯试验

混凝烧杯试验采用 ZR4-6 型六联搅拌机,混凝剂采用聚合氯化铝(PAC),将体积为 1 L 的水样经超声预处理后进行混凝沉淀烧杯试验,以 200 r/min 搅拌 1 min,60 r/min 搅拌 6 min,30 r/min 搅拌 6 min,静止沉淀 20 min。

1.4 检测指标和方法

检测指标:藻细胞数目、浊度、溶解性有机碳(DOC)和藻毒素。

检测方法:HACH Hydrolab 5X 多参数水质监测仪检测藻细胞数目;HACH2100P 便携式浊度仪检测浊度;岛津 TOC-VCPH 检测 DOC;岛津 LC-10AVP 高效液相色谱仪检测藻毒素,使用 Supelco ENVI-18 SPE 萃取柱,紫外检测器的检测波长为 238 nm;以体积比为 60:40 的甲醇和磷酸盐缓冲液作流动相,总流速为 1.0 mL/min,进样量 10 μ L。

2 结果与讨论

2.1 超声预处理助凝效能

对照组样品直接进行混凝沉淀,超声样经过频率为 40 kHz、功率为 100 W 的超声波作用 15 s 后进行混凝沉淀,检测指标结果均取多次平均值,下同。

表 1 为采用不同混凝剂投加量,对照组样品

表 1 对照组与超声样混凝沉淀效果对比

混凝剂 投加量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	对照组		超声样	
	藻细胞去 除率/%	浊度/ NTU	藻细胞去 除率/%	浊度/ NTU
15	64	5.6	80	4.0
20	75	4.0	91	2.4
25	84	3.1	93	2.1
30	87	2.8	95	1.9
35	89	2.6	96	1.7

和超声混凝沉淀后的藻细胞去除率及浊度对比结果。可以看出当混凝剂投加量相同时,超声预处理后的藻细胞去除率及浊度均好于对照组样品。当混凝剂投加量为 20 mg/L 时,经超声预处理后藻细胞去除率可达 91%,远高于对照组样品的 75%,出水浊度仅为 2.4 NTU,达到了沉后水的

一般要求。可见经过短时间超声预处理,可很好地强化混凝沉淀对藻细胞的去除效果,并且超声通过破坏藻类气囊结构使矾花沉降性大大提高,出水浊度降低,从而利于后续处理。

超声预处理的良好助凝效果具有重大意义:一方面通过降低混凝剂投加量,产生重要的经济意义;另一方面,降低混凝剂投加量可以减少出水含铝量,在一定程度上保障出水铝离子达标。虽然超声预处理具有良好助凝效果,但不可一味降低混凝剂投加量,因为只有在合适的混凝剂投加量下,超声预处理才能达到良好的处理效果。如表 1 中当混凝剂投加量为 15 mg/L 时,虽然超声样比对照组效果较好,但仍难满足对沉后水的一般要求,因此在本研究中选择 20 mg/L 的混凝剂投加量。

2.2 超声频率对混凝效果的影响

粒度为 3~5 μ m 的藻细胞气囊的特征频率范围为 1.30~2.16 MHz。Tang Jiaowen 等^[3]认为采用 1.7 MHz 的超声频率效果最佳,另有研究^[4]表明约 1 MHz 的频率较有效。高频超声的空化阈值较高,耗能较大,不具经济实用性;而低频时采用较小功率即可使藻细胞发生空化效应。Lee T J 等^[5]认为相同功率下 28 kHz 超声对藻细胞的抑制比 100 kHz 超声更有效;Hao Hongwei 等^[6]认为 200 kHz 超声的作用效果优于 1.7 MHz 超声。本研究考虑经济实用性,选择低频超声频率段(20,40 及 80 kHz),并考察其对混凝效果的影响。

水样经功率为 100 W 的不同频率超声作用 15 s 后进行混凝沉淀,混凝剂投加量为 20 mg/L,结果见表 2。在低频范围内超声强化混凝效果良好;不同频率作用下藻细胞去除率均为 90% 以上,浊度均为 2.5 NTU 左右,无较大差别。可见在低频条件下超声频率并非藻类去除效果的决定性因素,此结论与 Heng Liang 等的研究^[7]类似。考虑经济性与实际效果等因素,选取 20~40 kHz 的超声频率即可满足强化混凝的要求,本研究以 40 kHz 为最佳超声频率。

表 2 不同超声频率对混凝的影响

超声频率/kHz	藻细胞去除率/%	浊度/NTU
20	90	2.4
40	91	2.4
80	90	2.6

2.3 超声功率对混凝效果的影响

超声功率是影响超声强化除藻效能的重要参数。超声频率为 40 kHz,作用时间为 15 s,混凝剂投加量为 20 mg/L,超声功率(30,60,100 和 200

W)对强化混凝去除藻细胞及浊度的影响见表 3.

表 3 不同超声功率对混凝的影响

超声功率/W	藻细胞去除率/%	浊度/NTU
30	83	2.8
60	86	2.5
100	90	2.4
200	94	2.9

由表 3 可以看出:随着超声功率的增加,藻细胞去除率随之增高;处理后水的浊度先降低后升高;60 W 和 100 W 时的效果最好. 这与张光明等^[8]的研究结果比较相似. 产生此现象的原因为:随着功率的增加,超声对藻细胞的破坏作用不断增强,较高的功率作用条件下空化作用不仅会破

表 4 超声时间对混凝效果的影响

超声作用时间/s	100 W		200 W	
	藻细胞去除率/%	浊度/NTU	藻细胞去除率/%	浊度/NTU
5	83	3.4	86	2.8
15	90	2.4	93	2.9
30	93	2.6	96	3.4
60	96	3.6	97	4.2

除率随之增高,而当作用时间增加到一定程度时,出水浊度出现升高的现象,原因与超声功率对其作用的影响类似. 一味增加超声作用时间会导致藻细胞严重破坏成为碎片,对混凝沉淀造成负面影响. 本研究选取 15 s 为最佳超声作用时间.

超声强化混凝效果与输入超声总能量有关,超声总能量即为超声功率与作用时间的乘积. 一般来说,达到同等效果,超声功率较高则需要作用时间短,功率较低需要作用时间长,如表 4 中功率为 100 W 时作用 30 s 的效果与功率 200 W 作用 15 s 类似. 从水厂实际应用角度考虑,不宜采用过长的超声作用时间或过高的超声功率,可选取适中的超声功率和作用时间,以破坏藻细胞气囊结构,使细胞内部结构紊乱和均质化,同时保持细胞壁完整,从而达到良好的强化混凝效果.

2.5 超声强化混凝的出水安全性

超声波对藻细胞的破坏会导致胞内物质释放进入水体,其中藻毒素的释放情况值得关注. 有研究^[9]采用 80 W,80 kHz 的超声作用 5 min,胞外藻毒素浓度从 0.87 μg/L 升至 3.11 μg/L,而董敏殷等研究^[10]发现低频超声引起藻毒素严重释放,20 kHz,20 W,5 min 超声作用使胞外藻毒素增加 140%,且超声对高浓度藻毒素不具备降解作用. 与此同时另有研究^[11]认为低于 5 min 的超声作用不会引起胞外藻毒素增加,且超声可有效降解藻毒素,20 min,150 kHz,30 W 超声作用使

坏藻细胞气囊结构,而且也对藻细胞结构产生粉碎性破坏,而产生的这些细小碎片难以在混凝沉淀过程中有效去除,从而会导致沉后水的浊度较高. 由此可见,必须采用合适的功率才能有效去除藻细胞并保证出水的浊度较低,针对实验所用水源水的最佳超声功率为 100 W.

2.4 超声作用时间对混凝效果的影响

超声作用时间亦是重要工况参数. 超声频率为 40 kHz 时,分别考察超声功率为 100 W 和 200 W 情况下,超声作用时间(5,15,30 和 60 s)对其强化藻类去除效果的影响,混凝剂投加量采用 20 mg/L,结果见表 4.

如表 4 所示,随超声作用时间增加,藻细胞去

得藻毒素去除率达到 70%.

一般认为高功率和较长时间超声会导致胞外藻毒素浓度增加,所以应慎重选择工艺参数,本研究采用前述研究中确定的最佳工艺参数(40 kHz,100 W)进行超声试验,通过超声作用后可溶性有机物及藻毒素的质量浓度变化考察出水安全性,结果见图 1 和图 2. 图中:*t* 为超声作用时间; ρ_{DOC} 和 ρ_{M} 分别为 DOC 质量浓度和藻毒素质量浓度.

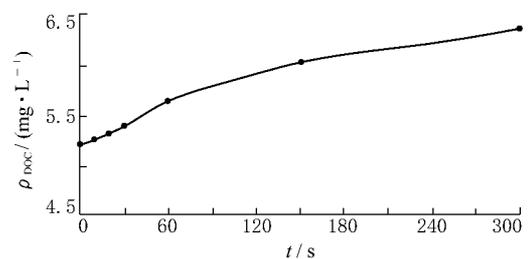


图 1 超声作用后 DOC 质量浓度变化

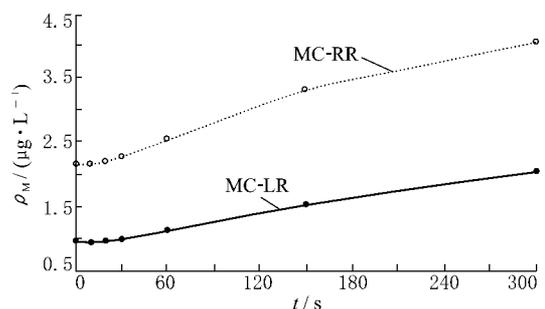


图 2 超声作用后藻毒素质量浓度变化

如图1所示,随着超声作用时间的增加, ρ_{DOC} 逐渐升高.30 s之内,短时间低剂量的超声作用仅对藻细胞气囊结构造成破坏, ρ_{DOC} 无明显升高.当作用时间持续增加时,藻细胞结构破坏程度加剧,胞内物质释放加快,5 min后 ρ_{DOC} 值增加约20%.如图2所示,超声作用下藻毒素释放规律与DOC类似,30 s之内藻毒素MC-LR及MC-RR均无明显增加,增幅不超过5%,而30 s之后随着超声对细胞结构加剧破坏,胞内藻毒素释放严重,5 min后MC-LR及MC-RR分别达到2.01 $\mu\text{g/L}$ 及4.05 $\mu\text{g/L}$.

可见,过量的超声预处理会造成胞内物质及藻毒素的严重释放,为了保证出水安全性,必须选择合适的超声作用时间,小于30 s较为适宜.

适当的超声预处理可强化混凝效果,有效去除藻细胞,并降低沉淀出水浊度,同时可减少混凝剂投加量;低频下不同频率超声对强化混凝效果影响不大,频率建议采用40 kHz;超声强化混凝的效果与输入超声总能量有关,采用功率100 W超声处理15 s时效果良好,功率过高或处理时间过长反而会影响混凝效果.超声预处理工艺参数选择不当会导致胞内物质及藻毒素的严重释放,选取低频低功率(40 kHz,100 W)超声短时间(15 s)作用可在强化混凝的同时保障出水安全性.

参 考 文 献

- [1] Zhang Guangming, Zhang Panyue, Fan Maohong. Ultrasound-enhanced coagulation for microcystis aeruginosa removal[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2009, 16: 334-338.
- [2] 陈杰,王波,张光明,等. 超声强化混凝去除蓝藻实验研究[J]. 环境工程学报, 2007, 1(3): 66-71.
- [3] Tang Jiaowen, Wu Qingyu, Hao Hongwei, et al. Effect of 1.7 MHz ultrasound on a gas-vacuolate cyanobacterium and a gas-vacuole negative cyanobacterium[J]. Colloids and Surfaces: B, 2004, 36: 115-121.
- [4] Kotopoulis S, Schommartz A, Postema M. Sonic cracking of blue-green algae[J]. Applied Acoustics, 2009, 70: 1306-1312.
- [5] Lee T J, Nakano K, Matsumura B. Ultrasonic irradiation for blue-green algae bloom control[J]. Environ Technol, 2001, 22: 383-390.
- [6] Hao Hongwei, Wu Minsheng, Chen Yifang, et al. Cavitation mechanism in cyanobacterial growth inhibition by ultrasonic irradiation[J]. Colloids and Surfaces: B, 2004, 33: 151-156.
- [7] Liang Heng, Nan Jun, He Wenjie, et al. Algae removal by ultrasonic irradiation-coagulation[J]. Desalination, 2009, 239: 191-197.
- [8] 张光明,常爱敏,张盼月. 超声波水处理技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2006.
- [9] Zhang Guangming, Zhang Panyue, Wang Bo, et al. Ultrasonic frequency effects on the removal of microcystis aeruginosa [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2006, 13: 446-450.
- [10] 董敏殷,乔俊莲,王国强,等. 低频超声波对藻毒素释放和降解的研究[J]. 净水技术, 2008, 27(6): 21-23.
- [11] Ma Bozhi, Chen Yifang, Hao Hongwei, et al. Influence of ultrasonic field on microcystins produced by bloom-forming algae[J]. Colloids and Surfaces B, 2005, 41: 197-201.