

低强度超声波强化污水生物处理中超声辐照周期的优化选择

闫怡新¹, 刘红^{2*}

(1. 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 2. 北京航空航天大学环境工程系, 北京 100083)

摘要: 为了对低强度超声波强化污水生物处理的重要工艺参数——超声辐照周期进行优化, 采用城市污水处理厂的好氧活性污泥为试验材料, 以好氧呼吸速率 (Oxygen Uptake Rate, OUR) 和 TTC-脱氢酶活性 (2, 3, 5-triphenyl tetrazoliumchloride dehydrogenase activity, TTC-DHA) 为指标, 研究了频率 35kHz、强度 0.3 W/cm^2 的超声波辐照 10min 后 0~48h 污泥活性的变化规律, 发现超声辐照处理后 8h 污泥活性达到最大值, 24h 后超声波的强化作用基本消失。随后分别以 8h 和 24h 为超声辐照周期, 进行了反复超声辐照处理试验。结果表明, 当采用超声辐照周期为 8h 时, 第 2 次超声辐照后污泥的活性就开始明显下降, 3 次辐照后污泥的活性下降到对照的一半; 当采用超声辐照周期 24h 时, 每次超声辐照后污泥活性依然有所升高, 但是随着超声辐照次数增加, 其升高的幅度逐渐降低。考虑到设备投资及处理效果稳定性, 应采用 8h 的超声处理周期, 每次只处理反应器内一定比例的污泥以避免反复超声引起的污泥活性下降。根据上述现象分析了低强度超声波改善污泥活性的机理。

关键词: 低强度超声波; 强化生物处理; 活性污泥; OUR; TTC-DHA; 辐照周期

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)05-0898-05

Optimization of Irradiation Cycle for Enhancement of Biological Treatment of Wastewater by Low Intensity Ultrasound

YAN Yixin¹, LIU Hong²

(1. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Department of Environmental Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: This work aims to optimize one of the critical technological parameters—ultrasound (US) irradiation cycle for utilizing the low intensity ultrasound to enhance biological wastewater treatment. The aerobic activated sludge from domestic wastewater treatment plant was used for this study as an experimental material. Oxygen uptake rate (OUR) and 2, 3, 5-triphenyl tetrazoliumchloride dehydrogenase activity (TTC-DHA) were determined to indicate the changes of biological activity (within 48 h) after US irradiation at 0.3 W/cm^2 in irradiation time of 10 min. The activity of sludge took 8 h after irradiation to reach peak level, and the enhancement effects induced by US faded away 24 h after irradiation. In addition, 8 h and 24 h were used as irradiation cycle respectively to carry out repeated US treatment. Results showed that when 8h cycle was used, sludge activity decreased quickly after second US irradiation, and after third US exposure, sludge activity decreased even less than 50% of the control. When 24 h was used as the irradiation cycle, sludge activity increased after each US irradiation, but the extent of each increase declined with the increase of the number of US exposure. In consideration of US equipment costs and stability of treatment effects, 8 h should be selected as the US irradiation cycle and each time we can expose only a part of activated sludge in the biological reactor to avoid the decrease of sludge activity induced by repeated US treatment. The paper also analyzed the mechanism of biological activity enhancement by US according to above phenomena.

Key words: low intensity ultrasound; enhance biological treatment; activated sludge; OUR; TTC-DHA; irradiation cycle

生物学的研究表明^[1~5], 低强度超声波可以有效提高酶的活性, 促进细胞生长, 因此可应用于污水生物处理过程, 通过强化微生物的活性来提高废水的生物处理效率。在前期的试验研究中针对超声波的强度以及辐照时间进行了优化选择, 结果表明, 采用超声波强度 0.3 W/cm^2 , 辐照时间 10min, 对提高污泥活性的效果最为显著, 与无超声辐照相比, 活性可提高 15% 左右^[6]。本文采用此超声声强和辐照时间对超声处理的辐照周期进行优化选择研究。

1 材料与方法

1.1 超声波辐照装置

超声辐照采用的试验装置如图 1 所示。

超声装置为 DL-60D 型超声波清洗机: 上海之信仪器有限公司生产, 频率 35kHz, 固定其声强为 0.3 W/cm^2 。试验过程中, 将盛有污泥的烧杯浸入超声波清洗槽内进行超声辐照, 烧杯位于清洗槽的中心, 且放置的位置始终固定。

1.2 试验过程

试验污泥取自北京市城市污水处理厂曝气池,

收稿日期: 2005-03-29; 修订日期: 2005-05-17

基金项目: 国家“十五”科技攻关计划项目 (2002DFBA0009)

作者简介: 闫怡新 (1978~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水污染控制。

* 通讯联系人, E-mail: lh64@buaa.edu.cn

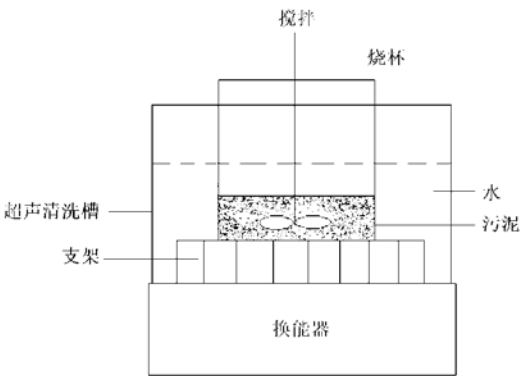


图 1 超声辐照试验装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of ultrasound irradiation system

培养稳定后将污泥分装入 250mL 烧杯, 每个烧杯中污泥体积为 70mL, 污泥浓度为 9962mg/L, 置于 4℃冰箱中待用, 实验过程中随用随取.

表 1 人工配制生活污水/mg·L⁻¹

Table 1 Characteristics of synthetic domestic wastewater/mg·L ⁻¹						
成分	葡萄糖	尿素	KH ₂ O ₄	CaCl ₂	MgCl ₂	CuSO ₄
浓度	300	22.5	7.32	0.8	1.0	0.002

1.2.1 超声辐照后污泥活性的变化

将 2L 污泥浓度为 9962mg/L 的污泥分别放入 2 个 1L 的广口瓶中, 置于清洗槽内在强度为 0.3 W/cm², 辐照时间 10min 条件下进行超声处理. 并将处理后的污泥倒入一个 16L 的塑料桶中, 加入 8L 人工配制的生活污水(表 1)进行模拟 SBR 反应. 反应周期 8h, 其中瞬间进水, 曝气 6h 沉淀 1h, 排水和闲置 1h. 在不同的时间取污泥样进行 OUR 的测定. 同时测定未经超声处理污泥 OUR 值作为对照.

另取污泥 50mL 分装入 7 个 250mL 的烧杯中, 在 0.3W/cm² 强度下进行 10min 的超声辐射处理. 经超声处理后的污泥分别装入 500mL 的量筒中, 加入 200mL 人工配制的生活污水(表 1)进行模拟 SBR 反应(反应过程同上). 超声处理后又反应了 0、4.8、12、24、36h 之后, 各取样 100mL 进行脱氢酶活性的测试, 另外测定没有经超声处理的污泥的脱氢酶活性值作为对照.

1.2.2 反复超声试验

根据超声辐照后污泥活性的变化规律, 选择合适的周期并进行反复超声试验, 以观察多次超声处理对污泥活性的影响. 将 1L 污泥浓度为 10.1g/L 的浓缩污泥在 0.3W/cm² 强度下进行 10min 超声处理, 然后倒入 16L 的塑料桶中, 并加入 4L 如表 1 所

示的人工配制生活污水进行模拟 SBR 反应(反应过程同上). 每隔所选的周期时间将污泥再次进行超声处理. 在每次处理后 10min 以及下次超声处理之前取样检测其 OUR 和 TTC-DHA 值, 并测定没有经超声处理污泥的 OUR 和 TTC-DHA 作为对照.

1.3 测试指标及分析方法

1.3.1 OUR 的测定

采用 1 个自制完全封闭呼吸仪, 如图 2 所示.

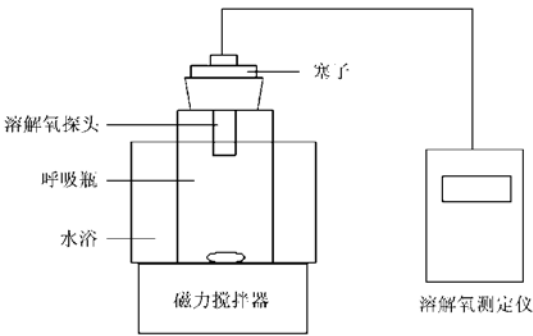


图 2 OUR 测量装置
Fig. 2 Experimental setup for measuring OUR

其中, 55/12FT 型溶解氧测定仪: Incorporated Yellow Spring, Ohio, USA; 81-2 型恒温磁力搅拌器: 上海司乐仪器有限公司; 呼吸瓶: 250mL 广口瓶, 实际容积约为 350mL.

将待测污泥用蒸馏水洗涤 3 次, 使其中的有机物完全洗净, 再加入经充分曝气人工配制生活污水(表 1), 立即放入密闭呼吸仪中, 温度保持在 25~26℃, 测量 DO 浓度随时间的变化, 做出 DO-t 曲线. 同时分析其污泥浓度 MLSS, 根据下式进行计算:

$$OUR = (DO_1 - DO_2) / MLSS \cdot (t_2 - t_1)$$

式中, OUR: 单位质量污泥在单位时间内利用的氧量, mg/(g·min); DO: 溶解氧浓度, mg/L; t: 测量时间, min; MLSS: 呼吸瓶中悬浮液生物固体浓度, g/L.

1.3.2 脱氢酶活性的测定^[7]

TTC-DHA 采用氯化三苯基四氮唑(2, 3, 5-triphenyl tetrazoliumchloride, TTC) 分光光度法. 其原理是: 无色的 TTC 作为受氢体可变成红色的三苯基甲替(triphenyl formazone, TF), 根据产生红色的色度判断脱氢酶的活性.

污泥悬浮液的制备: 将 100mL 泥水混合物自然沉降 30min 后弃去上清液, 用生理盐水洗涤 3 次, 然后重新悬浮于等量生理盐水中. 测定方法: 在具塞的 50mL 离心管内分别加入以下试剂: 0.36% 的 Na₂SO₃ 液 0.5 mL, 0.0577% 的 CoCl₂ 溶液 0.5 mL,

Tris-HCl 缓冲液 1.0 mL, 污泥悬浮液 1 mL, 0.4% 的 TTC 溶液 0.5 mL, 最后再加入 1 mL 表 1 所示的废水。样品试管摇匀后置于黑布袋内, 立即放入 37 °C 恒温水浴锅内, 不时轻轻摇动, 培养 30 min。培养结束后加 1 滴浓硫酸终止酶反应。在各样品管中加入正丁醇 5 mL, 充分摇匀, 于 90 °C 恒温水浴锅内萃取 6 min。将萃取完毕的离心管以 4 000 r/min 离心 10 min, 取其上清液用光程 1 cm 的比色皿于波长 485 nm 处进行比色分析, 根据所测得的吸光值, 从事先做出的标准曲线中找出显色液中的 TF 浓度, 进而计算出样品的 TTC-DHA。测定结果以每 mg 污泥每 h 还原 TTC 所生成的 TF μg 数表示。

2 结果与讨论

2.1 超声波辐照处理后污泥活性的变化规律

超声波辐射处理后污泥的 OUR 与 DHA 随时间的变化见图 3, 其中对照为没有经超声处理的污泥的 OUR 和 DHA。

分析图 3 可见, 超声处理后, 污泥活性随时间的延长逐渐提高, 8 h 后, 活性达到最大值。然后继续随着时间的延长, 污泥活性持续降低, 在 24 h 以后超声波作用的效果基本消失。脱氢酶活性所显示的变化规律与 OUR 是一致的。

超声波在介质中传播, 可使介质质点进入振动状态, 由此可以有效促进反应物质的扩散和传输, 强化了反应物进入以及生成物离开酶的活性部位的过程, 因此, 酶的活性增加, 这一效果在超声辐照后立刻反映出来, 表现为 DHA 比对照有较大的提高。但由于仅对活性污泥进行了 10 min 的超声辐照, 而超声波所激励的活性则持续了 24 h 之久, 因此可以推测促进传质并不是超声波强化的主要原因, 更重要

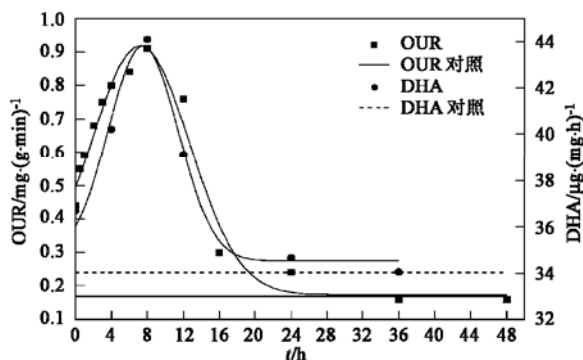


图 3 超声辐照处理后 OUR 和 DHA 随时间变化曲线

Fig. 3 Changes of OUR and DHA of sludge after ultrasound irradiation

的原因可能是超声波激励了微生物的新陈代谢活性。具体地说, 就是在超声辐照过程中超声波所引起的机械应力对细胞造成了微伤, 其自身要产生本能的防御反应。一般来说, 细胞在受到生物和非生物胁迫或诱导时, 可以形成多种防御反应, 表现为酶的分泌增多, 细胞繁殖加快, 新陈代谢活性增强。Wu 等^[8]对人参细胞进行 2 min 的超声辐照后, 立刻观察到 H_2O_2 的大量产生, 而 H_2O_2 正是在胁迫条件下, 植物细胞迅速产生的一种活性氧分子, 用来激活防御反应。微生物细胞在结构上比植物细胞简单, 但是当其受到外界环境胁迫后, 也会产生防御反应。由于这个过程在停止超声辐照后需要一段反应时间, 而且活性污泥种群中不同的细菌反应时间不同, 在 8 h 后细菌的总体 DHA 水平最高, 再随着时间的延长, 大部分细菌的修复过程完成, DHA 逐渐降低, 当所有细胞的修复过程完成后, 细胞活性恢复到对照水平。由于脱氢酶是呼吸链的主干酶系, 它们可以把基质氧化脱下的氢传入呼吸链, 直至最终受氢体分子态氧, 因此, 在污泥的好氧消化过程中, DHA 与 OUR 之间有着本质上的联系, 本试验结果也表明, 二者具有良好的相关性。

2.2 反复超声对污泥活性的影响

根据超声处理后污泥活性的变化规律, 选择 8 h 和 24 h 的处理周期分别进行了反复超声辐照污泥试验。试验结果如图 4 5 所示。

分析图 4 可以看出, 在污泥经过第 1 次超声处理后 8 h, 其活性 OUR 值比对照提高了 23.4%, TTC-DHA 比对照提高了 21.4%, 这与图 3 4 所表示的超声后污泥活性变化规律是一致的。但是在 8 h 后经过第 2 次超声处理, 污泥活性呈现下降趋势, 并且在 8 h 后降低到低于对照水平。第 3 次超声后 8 h 内, 污泥活性降低到对照污泥活性的 50% 左右。在 24 h 反复超声处理试验中 (图 5), 第 1 次超声后污泥的活性变化呈现出与图 3 4 所示的活性变化相同的规律, 8 h 后污泥活性比对照提高 20% 以上, 24 h 后污泥的活性降低到接近对照水平。此时进行第 2 次超声处理, 污泥活性再次升高, 但已经不如第 1 次超声后 8 h 的活性提高显著, OUR 值比对照提高 13.7%, TTC-DHA 比对照高 18.7%; 24 h 后, 活性降低较快, 低于对照水平。此时第 3 次进行超声处理, 8 h 后污泥活性依然有所提高, 但是和对照相比已经不甚明显, 并且 24 h 后污泥的活性降低到更低的水平, 低于对照 30% 左右。

超声波强化生物活性的主要原因是细胞切应力

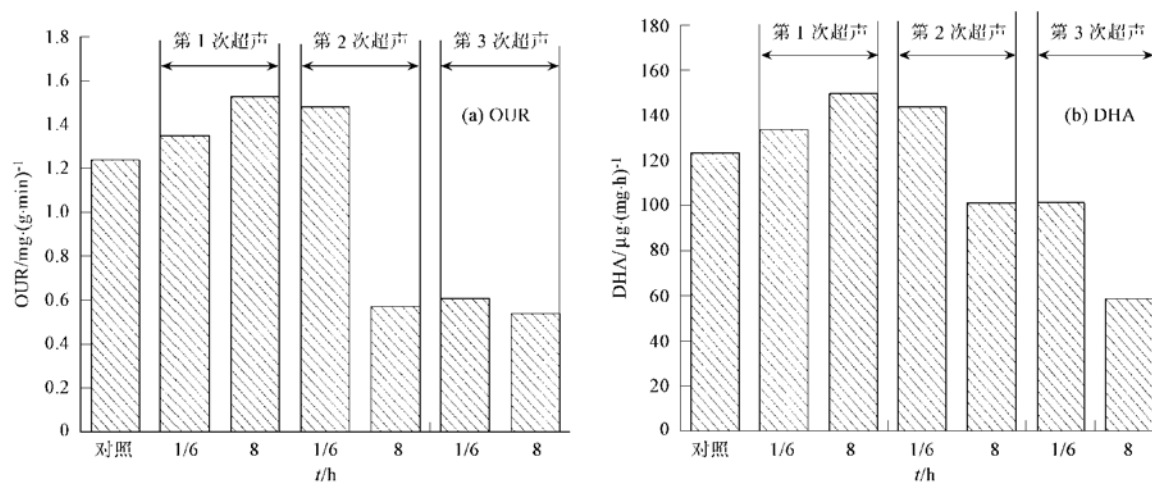


图 4 8h 周期反复超声辐照污泥的活性变化

Fig. 4 Changes of biological activity after repeated US treatment with 8h irradiation cycle

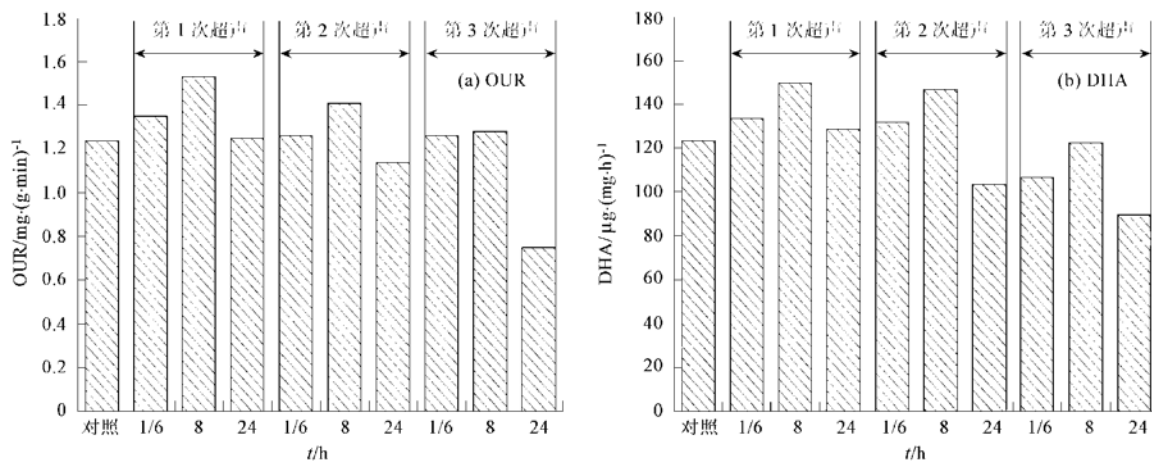


图 5 24h 周期反复超声处理污泥的活性变化

Fig. 5 Changes of biological activity after repeated US treatment with 24h irradiation cycle

造成的微伤使得细胞自身产生本能的防御反应,在对伤口的自我修复过程中,微生物的活性得以增强.超声辐照 8h 后微生物的活性最大,说明此时防御反应最为活跃,24h 后活性逐渐降低到对照水平,表明此时修复过程已经基本完成.因此选择 8h 和 24h 的辐照周期对活性污泥进行反复超声试验.在第 1 次超声处理后 8h 再次进行超声辐照,此时大部分微生物的伤口修复还未完成,再次加载超声,使得伤口增大,细胞的自身修复困难,导致活性下降,表现为 2 次超声后 8h 微生物的活性已经降低到低于对照水平;当加载第 3 次超声后,微生物的伤口继续增大,甚至有些微生物死亡,因此活性继续快速降低,8h 后微生物的活性下降到对照活性的一半.当采用周期为 24h 进行反复超声时,由于此时大部分细胞修复过程基本已经完成,因此再次加载超声,微生物的

活性又随着时间的延长而升高,并随着修复过程的再次完成活性下降.但是由于第 1 次超声后 24h 仍然有些细胞的修复过程并没有完成,因此在加载 2 次超声后,这部分细胞的活性快速降低,表现为 2 次超声后 8h,微生物的整体活性比第 1 次超声后 8h 有所下降,且 24h 后大部分细胞修复再次完成以后,活性比对照水平略低.3 次超声处理后又有一部分修复过程没有完成的细胞活性快速降低,因此虽然 8h 后污泥活性依然有所提高,但是提高效果已经愈加不明显,并且 24h 后污泥的活性降低到更低的水平.实验分别测试了每个阶段好氧污泥的呼吸速率和脱氢酶活性,二者的结果显示是一致的.

3 在强化污水生物处理工程中的应用

从上述试验结果可以得出结论,在超声强化生

物处理中, 24h 的处理周期比 8h 的处理周期更为有利. 但是在实际工程应用中, 将污泥全部进行超声处理需要较大的超声设备, 基建费用高. 因此应该考虑将污泥分批次进行超声处理, 这样只需较小的超声设备, 可大大节省设备投资, 经济上更加合理. 因此可以采用 8h 的处理周期, 而且每隔 8h 仅处理一部分污泥, 而不是全部的污泥, 这样可以避免反复超声导致的污泥活性下降. 如果采用 24h 的处理周期, 每次需要处理的污泥量必然大, 所需的超声设备投资费用较高, 经济上是不合算的.

根据超声处理后 TTC-DHA 的变化曲线(图 3) 可以做出实际反应器内污泥活性的变化示意图, 当采用 8h 处理周期时(图 6), 反应器内总有污泥处于活性高峰, 并且其总的活性保持在一个较稳定的范围内, 因此处理效果也将较稳定; 而采用 24h 的处理周期(图 7), 其活性是随时间变化而变化的, 处理效果也将随时间的变化而变化, 当污泥活性处于高峰时其处理效率较高, 而污泥活性降低时, 处理效果也会随之降低. 在污水处理过程中总是希望有一个相对稳定的处理效果, 因此, 选择 8h 的辐照间隔对超声波强化污水生物处理更为有利.

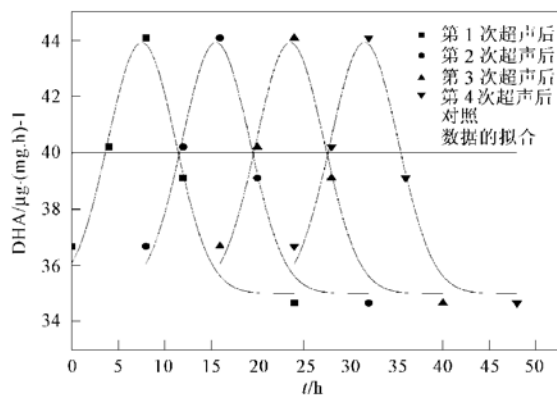


图 6 超声间隔时间 8h 反应器内污泥活性的变化示意图

Fig. 6 Schematic diagram of changes of sludge activities in the biological reactor with US irradiation cycle of 8h

但是采用 8h 的处理周期必须要对进行超声辐照的污泥的比例进行谨慎选择, 如果处理污泥比例过高, 会由于反复超声而引起污泥活性的降低.

4 结论

(1) 超声波处理后污泥活性的变化规律表明, 超声辐照后 8h 其强化效果最为显著, 24h 后强化效果基本消失.

(2) 采用超声辐照周期为 8h 时, 第 2 次超声辐照后污泥的活性就开始明显下降, 3 次辐照后污泥

的活性下降到对照的一半; 当采用超声辐照周期 24h 时, 每次超声辐照后污泥活性依然有所升高, 但是随着超声辐照次数增加, 其升高的幅度逐渐降低.

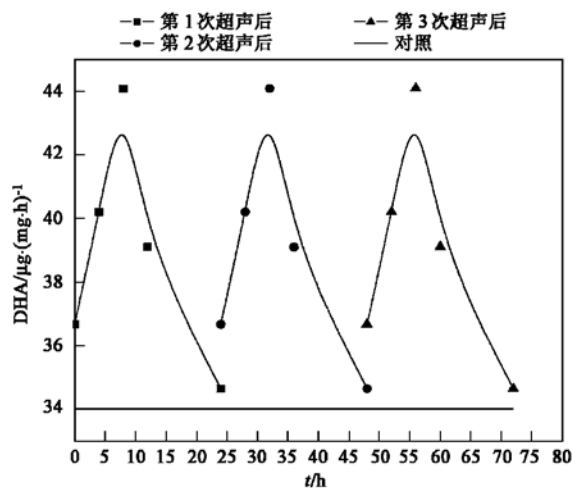


图 7 超声间隔时间 24h 反应器内污泥活性的变化示意图

Fig. 7 Schematic diagram of changes of sludge activities in the biological reactor with US irradiation cycle of 24h

(3) 采用 8h 的超声辐照周期, 设备投资小, 在经济上更为合理; 而且反应器内的污泥活性也可保持在一个稳定的范围内, 处理效果较稳定.

(4) 为了避免反复超声引起的污泥活性下降, 可以每次只将反应器内的部分污泥进行超声处理, 而不是全部污泥, 这部分污泥占整个反应器内污泥的比例需要进行谨慎选择.

参考文献:

- [1] Pitt W G, Ross S A. Ultrasound Increases the Rate of Bacterial Cell Growth [J]. Biotechnol. Prog., 2003, 19(3): 1038~1044.
- [2] Liu Y Y, Takatsuki H, Yoshikoshi A, et al. Effects of ultrasound on the growth and vacuolar H^+ -ATPase activity of aloe arborescens callus cells [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2003, 32: 105~116.
- [3] Wu J Y, Lin L D. Ultrasound-induced stress responses of *Panax ginseng* cells: enzymatic browning and phenolics production [J]. Biotechnol. Prog., 2002, 18: 862~866.
- [4] Wang B C, Yoshikoshi A, Sakanishi A. Carrot cell growth response in a stimulated ultrasonic environment [J]. Colloids and Surface. B: Biointerfaces, 1998, 12: 89~95.
- [5] 刘红, 何韵华, 张山立, 等. 微污染水源水处理中超声波强化生物降解有机污染物研究[J]. 环境科学, 2004, 25(3): 57~60.
- [6] 刘红, 闫怡新, 杨志峰, 等. 低强度超声波改善污泥活性[J]. 环境科学, 2005, 26(4): 124~128.
- [7] 王家玲, 环境微生物学实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988. 82~85.
- [8] Lin L D, Wu J Y, Ho K P, et al. Ultrasound-induced physiological effects and secondary metabolite (saponin) production in *Panax ginseng* cell cultures[J]. Ultrasound in Med. & Biol., 2001, 27(8): 1147~1152.