

低强度超声波强化污水生物处理中超声辐照污泥比例的优化选择

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:通过超声波的 SBR 反应器与对照反应器处理人工配制生活污水的对比试验, 研究了利用低强度超声波强化污水生物处理的另一个重要工艺参数——超声处理污泥比例(即超声处理污泥量占反应器内总污泥量的百分比)。设置超声波反应器采用频率 35kHz、声强 $0.3\text{W}/\text{cm}^2$ 超声波每隔 8h 取反应器中一定比例的活性污泥辐照 10min 后再返回反应器。结果表明, 超声处理污泥比例为 10% 时, 其 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率可分别提高 5% 和 0.5% 左右, 以好氧呼吸速率(Oxygen Uptake Rate, OUR) 表示的污泥活性可提高 12% 以上。通过对污泥增长率的研究表明, 当超声污泥比例为 10%, 超声波反应器内污泥的增长率比对照反应器降低了 11% 左右, 减轻了后续污泥处理工序的负荷。随着超声处理污泥比例的增加, 污泥体积指数 SVI 持续增大, 但是超声污泥比例不超过 10% 对污泥沉降性能影响不大。因此, 在超声强化污水生物处理工艺中, 可采用强度 $0.3\text{W}/\text{cm}^2$ 超声波每隔 8h 取反应器中的 10% 的活性污泥辐照 10min 后再返回反应器, 来提高反应器的生物处理效率。

关键词:低强度超声波; 活性污泥; 超声辐照污泥比例; COD; $\text{NH}_3\text{-N}$; MLSS; OUR; SVI

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)05-0903-06

Optimization of the Proportion of Irradiated Sludge for Enhancement of Sludge Activity in 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: The proportion of irradiated sludge (percentage that the irradiated sludge account for the total sludge in the reactor) for enhancement of biological treatment of wastewater by ultrasound (US) was optimized through contrast experiments between two sequenced batch reactors (SBR) with and without US. During the experiment, the US with intensity of $0.3\text{W}/\text{cm}^2$ and frequency of 35kHz was employed to irradiate a certain percentage of sludge in the US-SBR reactor for 10 minutes every 8 h. The results showed that the removal rate of COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ could be increased of 5% and 0.5% respectively when the proportion of exposed sludge was 10%. A significant increase of sludge activity was also obtained with this proportion and more than 12% increase of OUR (Oxygen Uptake Rate, OUR) was achieved when 10% of sludge was irradiated. Moreover, the growth rate of activated sludge was decreased of 11% when the proportion of irradiated sludge was 10%, which can reduce the subsequent procedure of sludge treatment. With the increase of proportion of the irradiated sludge, SVI (sludge volume index) of the sludge in the US-SBR increased continuously, but it had little influence when the proportion of the irradiated sludge was no more than 10%. Therefore, to improve the treatment efficiency of biological reactor, US with intensity of $0.3\text{W}/\text{cm}^2$ could be employed to irradiate 10% of the sludge in the biological reactor for 10 minutes every 8 h.

Key words: low intensity ultrasound; activated sludge; proportion of the irradiated sludge; COD; $\text{NH}_3\text{-N}$; MLSS; OUR; SVI

对超声波强化污水生物处理辐照周期研究的结果表明^[1], 在超声强化污水生物处理工艺中, 可采用 8h 的辐照周期, 用强度 $0.3\text{W}/\text{cm}^2$ 的超声波对反应器中的污泥进行超声辐射, 以改善污泥的活性。但是此时需要对每次超声辐射处理反应器中活性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下降; 而如果处理污泥比例过低, 又达不到超声强化的效果。因此, 本文采用设置超声波的 SBR 反应器与对照反应器进行对比试验, 以固定的超声强度 ($0.3\text{W}/\text{cm}^2$)、辐射时

间 (10min) 和超声周期 (8h) 对每次超声处理反应器内污泥的比例进行优化选择。

1 材料与方法

1.1 试验装置及设备

试验装置 (图 1) 采用 2 个内径 160mm, 高

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

1 500mm的有机玻璃柱作为 SBR (Sequence Batch Reactor) 反应器,有效容积 20L,其中 1 号为对照反应器,2 号反应器设置超声处理. SBR 反应器底部设一排泥口,距底部 12L 和 16L 处分别设一排水口和取样口. 进水采用增压泵将水槽中的水打入反应器中,通过液位计控制进水的量;曝气装置采用砂芯曝气头,由电磁气泵提供空气;处理后的出水由电磁阀排出. 整个运行过程采用 PLC 系统进行自动控制.

超声装置采用上海之信仪器有限公司生产的 DL-60D 型超声波清洗机,装置示意图见文献[1].

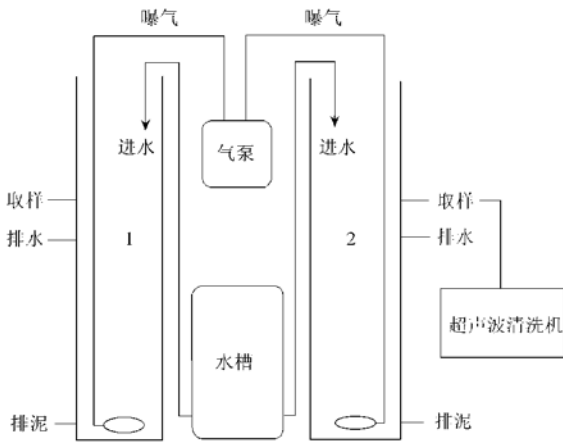


图1 SBR 反应器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SBR reactor

1.2 试验用水

试验采用人工配置生活污水,其主要成分如表 1.

表 1 人工配制生活污水/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Characteristics of synthetic domestic wastewater/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

成分	蔗糖	尿素	NH_4Cl	KH_2PO_4	CaCl_2	MgCl_2	CuSO_4
浓度	400	12.5	12.5	70	0.8	1.0	0.002

1.3 试验过程

试验污泥取自北京市清河城市污水处理厂曝气池,培养稳定后开始正式运行. 每天 3 个周期,每周期 8h. 其中瞬间进水,曝气 6h、沉淀 1h,排水和闲置 1h. 曝气 4h 后取 2 号反应器中的泥水混合物用频率 35kHz,声强 $0.3\text{W}/\text{cm}^2$ 的超声波进行 10min 超声处理,然后再将处理过的泥水混合物返回反应器中,即每天超声处理 3 次,每次间隔 8h. 处理污泥的比例按照 0.5%、1%、3%、5%、10%、20%、30% 逐步增加. 当处理污泥比例增加到 10% 以上时将取出的泥水混合物略加沉淀,上清液返回反应器中,将沉淀后的污泥再进行超声处理. 每种处理比例进行 1 周

试验,从第 2d 起每隔 1d 固定时间分别从 2 个反应器中取样测试其 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 及 OUR,最后一天除上述指标外另外测试 MLSS、SVI 及 BOD_5 . 每种工况运行过程中不排泥,该工况结束后排一次泥,以测试该工况运行条件下 MLSS 的增长量. 试验过程中,温度保持在 $15\sim 20\text{ }^\circ\text{C}$.

1.4 分析及计算方法

COD 的测试采用美国 HACH 公司生产的 COD 测定仪, $150\text{ }^\circ\text{C}$ 消解 2h 后用硫酸亚铁铵滴定; BOD_5 测试采用德国 WTW 公司的 OxiTop Cond 12 型 BOD 测试仪; $\text{NH}_3\text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法^[2]; MLSS 和 SVI 按照标准方法进行测试^[2].

OUR 的测定和脱氢酶活性的测定见文献[1].

去除率提高百分比(R_e)的计算^[3]:

$$R_e = (R_u - R_c) \times 100 / R_c$$

式中, R_u 为设置超声波的反应器的净化效率; R_c 为对照反应器的净化效率.

污泥增长率提高百分比(R_i)的计算:

$$R_i = (R_{mu} - R_{mc}) \times 100 / R_{mc}$$

式中, R_{mu} 为设置超声波反应器污泥的增长率; R_{mc} 为对照反应器污泥的增长率.

2 结果与分析

2.1 不同超声处理污泥比例对有机物及氨氮去除效果的影响

设置超声反应器与对照反应器出水 COD 值如图 2 所示. 由图 2 可以看出,当超声污泥比例为 0.5%~20% 之间,设置超声反应器的出水 COD 浓度明显低于对照反应器,但是由于所使用的人工配制生活污水本身就非常容易降解,对照反应器的出

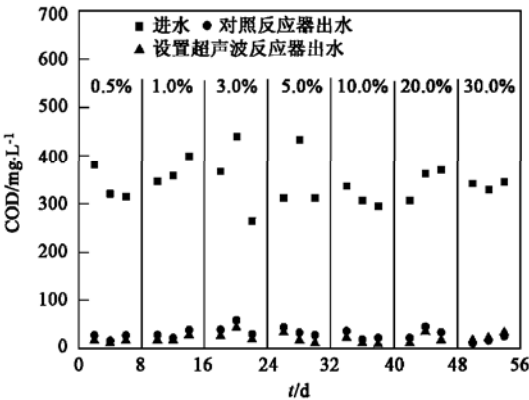


图2 超声不同比例污泥与对照反应器出水 COD 的比较
Fig. 2 Comparison of effluent COD in the system with and without US treatment

水 COD 已经达到 30mg/L 左右, 所以仅从图 2 中不易看出选择哪一种污泥比例进行超声处理效果最好, 因此实验将 2 个反应器对 COD 的去除率进行比较, 得出 R_e 值(去除率提高的百分比)的变化如图 3 所示. 对 R_e 值进行拟合可以看出, 随着超声比例的增大, R_e 值也逐渐增大, 当超声比例达到 10% 时, R_e 达到最大值, 约为 5% 左右, 说明此时设置超声反应器比对照反应器对 COD 的去除率提高了 5%; 然后再随着超声比例的增大, R_e 值开始下降. 当超声比例达到 30%, R_e 为负值; 从图 2 中也可以看出, 当超声比例为 30% 时, 设置超声反应器的出水 COD 浓度大于对照反应器. 图 4 及图 5 所示的对 BOD_5 和氨氮 R_e 值的拟合结果与图 3 是一致的.

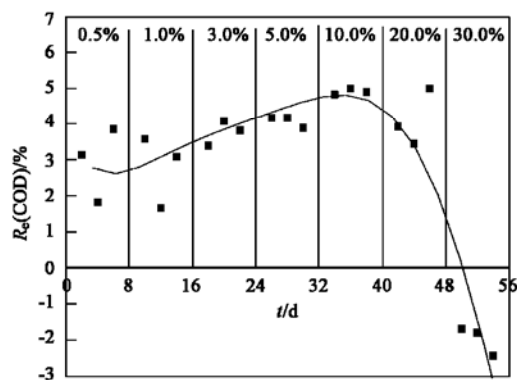


图 3 超声不同比例污泥对 COD 去除率较对照提高的百分比

Fig. 3 Improvement of COD removal rate by US treatment with various proportions of irradiated sludge

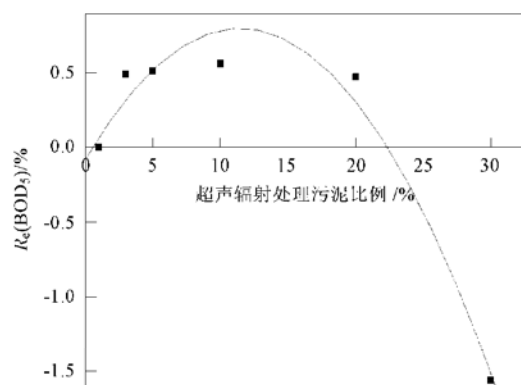


图 4 超声不同比例污泥对 BOD_5 去除率较对照提高的百分比

Fig. 4 Improvement of BOD_5 removal rate by US treatment with various proportions of irradiated sludge

2.2 不同超声处理污泥比例对污泥活性的影响

试验期间对照反应器污泥活性与设置超声反应器中污泥活性的比较以及活性提高百分比分别如图

6 和图 7 所示. 由图 6 可以看出在第 48d 之前, 即当超声污泥比例小于 30% 时, 设置超声反应器中污泥活性显著大于对照反应器; 图 7 可以看出, 当超声比例为 10% 时, 与对照相比, 设置超声反应器中污泥活性提高了 12% 左右. 当超声比例继续增加, 设置超声反应器的污泥活性开始下降, 当超声比例达到 30%, 设置超声反应器的污泥活性比对照下降了约 7% 左右.

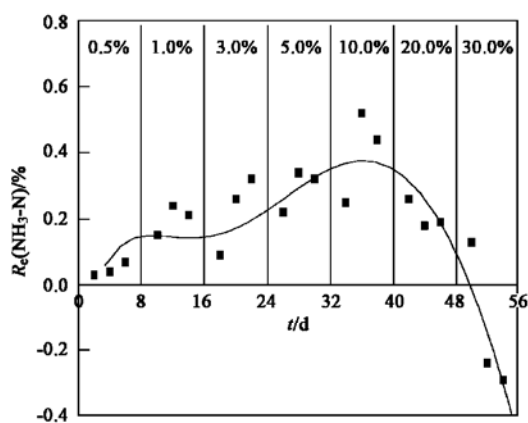


图 5 超声不同比例污泥对 NH_3-N 去除率较对照提高的百分比

Fig. 5 Improvement of NH_3-N removal rate by US treatment with various proportions of irradiated sludge

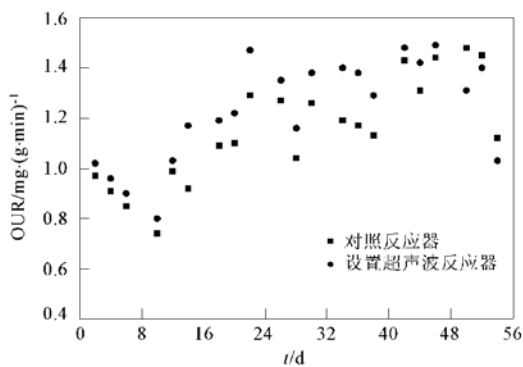


图 6 超声不同比例污泥与对照反应器污泥活性 OUR 的比较

Fig. 6 Comparison of OUR in the system with and without US treatment

2.3 不同超声处理污泥比例对污泥生长的影响

图 8 显示设置超声反应器和对照反应器在各超声污泥比例工况下运行 1 周内污泥的增长量. 当超声比例为 5% 时, 设置超声反应器和对照反应器的污泥增长量基本相同; 小于 5%, 设置超声波反应器内污泥的增长量大于对照反应器; 大于 5%, 设置超声波的反应器增长量小于对照反应器. 由图 9 也可看出, 当超声 5% 时, 污泥增长率提高的百分比 R_i

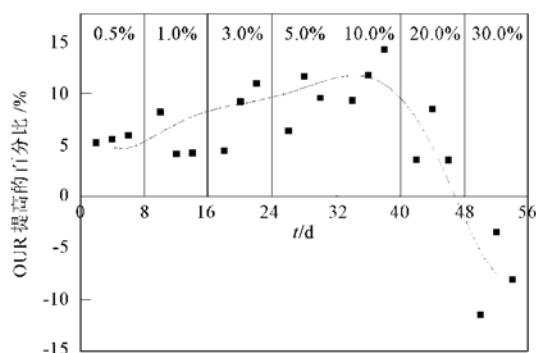


图7 超声不同比例污泥活性与对照活性相比提高的百分比
Fig. 7 Improvement of sludge activity by US treatment with various proportions of irradiated sludge

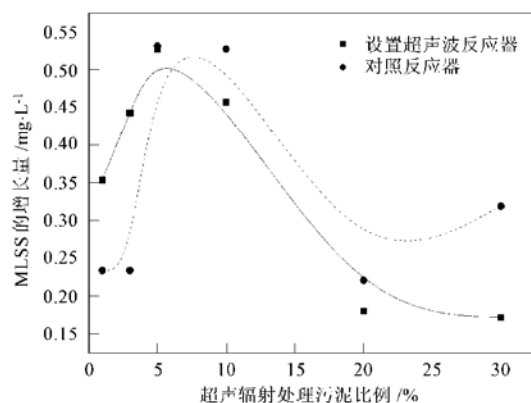


图8 超声不同比例污泥与对照反应器 MLSS 增长量的比较
Fig. 8 Comparison of MLSS increment in the system with and without US treatment

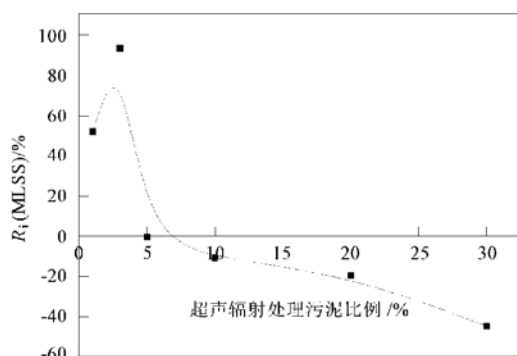


图9 超声不同比例污泥 MLSS 增长率较对照提高的百分比
Fig. 9 Improvement of MLSS increment rate by US treatment with various proportions of irradiated sludge

值几乎为 0, 表示此时 2 个反应器的污泥增长率几乎相同; 小于 5%, 则随着超声处理污泥比例的增加 R_i 值增加, 当超声比例为 3% 时, R_i 得到最大值约 95%, 说明此时设置超声波的反应器其污泥的增长

率比对照反应器提高了约 1 倍左右; 超声比例大于 5%, 随着超声比例的增加, 设置超声反应器的污泥增长率持续下降, 当超声污泥比例为 10% 时, 设置超声反应器的污泥增长率比对照低 11%; 超声污泥比例增长至 30% 时, 其增长率已经比对照低 45% 左右。

2.4 不同超声处理污泥比例对污泥沉降性能的影响

超声处理不同比例的污泥对污泥沉降性能的影响如图 10、11 所示。由图 10 可以看出, 当超声比例小于 10% 时, 设置超声反应器的 SVI 值与对照反应器比较接近。当超声比例超过 10% 以后, 尽管此时对照反应器内污泥 SVI 值略有下降, 但是设置超声的反应器内污泥的 SVI 值迅速上升。从图 11 可看出, 随着超声比例的增加, 设置超声的反应器内污泥的 SVI 值比对照反应器增加的百分比持续增大。

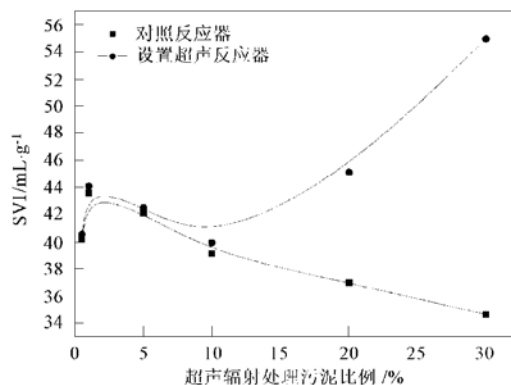


图10 超声不同比例污泥与对照反应器 SVI 的比较
Fig. 10 Comparison of SVI in the system with and without US treatment

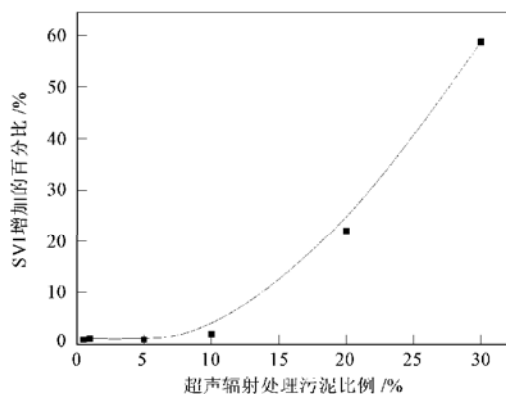


图11 超声不同比例污泥与对照反应器相比 SVI 增加的百分比
Fig. 11 Raising percentage of SVI by US treatment with various proportions of irradiated sludge

2.5 超声污泥比例 100% 对污泥活性的影响

在文献[1]对辐照周期的优化选择试验中,以8h为周期进行的反复超声试验即相当于超声辐射污泥比例为100%时污泥活性的变化结果.由文献[1]中图4可以看出,当超声污泥比例为100%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.

3 讨论

超声波与媒介的作用机制可以分为机械机制、热学机制以及由机械机制而引发的空化机制^[4].在生化反应过程中,超声波在生物介质中传播,造成液态质点的振动增强而使得传质过程加速;同时低强度的超声波所产生的稳态空化泡,使其附近的细胞在微声流的作用下,受到较大的切应力而使边界层变薄,改善了物质的传输阻碍;因此二者共同作用提高了反应物进入细胞活性部位以及生成物进入液体媒质的传质扩散过程^[5~9],细胞的活性得以增强.但是,根据笔者前一阶段的研究认为,促进传质并不是超声波强化的主要原因,更重要的原因可能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,其自身产生了本能的防御反应,在对伤口进行修复的过程中,酶的分泌增多,新陈代谢活性增强.

由前一阶段的研究得知^[1,10],超声辐照后8h是细胞防御反应的活跃期,此时大部分细胞的修复过程都还未完成;而24h后防御反应基本结束,大部分细胞的修复过程已经完成.文献[1]选择的辐照周期是8h,如果处理污泥的比例为100%,那么在大部分污泥的修复过程还未完成时再次加载超声,势必会使得细胞再次受伤,伤口增大,细胞的自身修复困难,导致细胞活性下降.这一点从文献[1]图4所示的反复超声试验结果就可看出,将全部污泥进行超声处理,反复超声3次,污泥活性已经下降到对照活性的50%左右.但是如果仅选择反应器中的一部分污泥进行超声处理,当超声比例较小时,微生物受到重复超声辐射的几率也较小,这样既增加了反应器中整体污泥活性,又不至于破坏细胞的自身修复功能,并且随着超声比例的逐渐增大,污泥的活性也逐渐增加,对有机物和氨氮的去除率也相应逐渐提高,并在超声比例为10%时获得最大的污泥活性和最佳的去除率.但是随着超声处理比例的继续增大,微生物受到重复超声辐射的几率也增加,经过重复超声辐射处理的微生物活性下降甚至死亡,因此整体污泥活性也随之下降,去除率迅速降低.因此根据

试验结果,适宜的超声比例应为10%.

从微生物的生长来看,当超声处理比例小于3%时,由于细胞产生防御反应,其繁殖速度加快,表现为整体污泥的增长率比对照快速提高,当超声比例增加到3%时,污泥增长率几乎提高了1倍.然而随着超声辐射污泥比例的增大,污泥受到重复超声辐射的几率也增大,被重复超声处理的部分污泥生长受到了抑制,因此表现出整体污泥增长率开始降低,但此时仍有大部分污泥并没有受到超声的重复辐射,因此整体污泥的活性依然保持较高水平,并随着超声污泥比例的增长而继续增长;当超声比例达到10%时,污泥整体活性达到最大值,但是此时与对照相比,污泥的增长率降低了11%左右.再随着超声比例的进一步增大,污泥发生反复超声辐射的几率也越来越大,大量污泥的增长受到抑制甚至死亡,其增长率进一步降低.因此选择10%的超声污泥比例,不仅有利于污泥活性的提高,还可以减轻后续污泥处理工序的负荷.

试验中,在每种污泥比例工况运行过程中并不排泥,只在该工况结束后排一次泥,因此造成了反应器中无机物质的积累,使得对照反应器中污泥的SVI值缓慢降低,而设置超声反应器中,由于超声辐照增加了细胞的通透性,使细菌表面附着的胞外聚合物增多,且由于超声产生的机械振动作用增加了胞外聚合物的松散程度^[10],因此导致污泥的沉降性能随着超声比例的增加而逐渐下降,其SVI值持续升高.但是当超声比例为10%时,由图10中可以看出SVI值仅比对照高1 mL/g左右,因此对污泥的沉降性能影响不大.

4 结论

(1) 每隔8h,采用频率35kHz、声强 $0.3\text{W}/\text{cm}^2$ 的超声波对反应器内10%的污泥进行超声处理10min,对污泥活性、有机物和氨氮的去除率提高的效果最为显著,其中污泥活性可提高12%左右,COD去除率和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率可分别提高5%和0.5%左右.由于本试验采用的人工配制生活污水,其本身就非常容易降解,对照反应器中COD和氨氮的去除率已经分别达到90%和99%左右,因此加载超声对去除率的提高不十分明显.

(2) 随着超声污泥比例的增加,污泥增长率快速提高,但是当超声污泥比例大于3%时,污泥增长率开始下降.当超声污泥比例为10%时,污泥增长率低于对照11%左右,可减轻后续污泥处理的

负荷.

(3) 污泥的 SVI 值随着超声污泥比例的增加而增大, 超声污泥比例为 10% 时对污泥沉降性能影响不明显.

(4) 在超声强化工艺中, 可采用强度 $0.3\text{W}/\text{cm}^2$ 超声波, 每隔 8h 取反应器中的 10% 的活性污泥辐照 10min 后再返回反应器, 以提高反应器的生物处理效率.

参考文献:

- [1] 闫怡新, 刘红. 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[J]. 环境科学, 2006, **27**(5): 898~ 902.
- [2] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会主编. 水和废水监测分析方法, [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [3] 刘红, 何韵华, 张山立, 欧阳威. 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.
- [4] 冯若, 赵逸云, 李化茂, 等. 超声在生物技术中应用的研究进展[J]. 生物化学与生物物理进展, 1994, **21**(6): 500~ 503.
- [5] Pitt W G, Ross S A. Ultrasound Increases the Rate of Bacterial Cell Growth[J]. Biotechnol. Prog., 2003, **19**(3): 1038~ 1044.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Schlafer O, Sievers M, Klotzbucher M, *et al.* Improvement of biological activity by low energy ultrasound assisted bioreactor [J]. Ultrasonics, 2000, **38**(1-8): 711~ 716.
- [10] 刘红, 闫怡新, 王文燕, 等. 低强度超声波改善污泥活性 [J]. 环境科学, 2005, **26**(4): 124~ 128.