

低强度超声波强化 SBR 处理生活污水

闫怡新¹, 刘红^{2*}, 张山立¹, 谢倍珍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: 通过设置超声波(ultrasound, US)的 SBR 反应器(sequence batch reactor, SBR)与对照反应器的对比试验, 研究了超声波对 SBR 处理生活污水的强化效果. 结果表明, 采用强度 $0.3 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的超声波, 每隔 8h 取 SBR 反应器中 10% 的污泥进行 10min 辐射处理, 对 COD 的总去除率提高 3%~6%, 其出水 COD 与对照反应器的出水相比降低了 40%~53%, 通过该辐射处理有效提高了 SBR 反应器对模拟生活污水的高负荷冲击和有毒物质冲击的耐受能力. 对于实际生活污水, 设置超声强化使污泥耗氧呼吸速率(oxygen uptake rate, OUR)增加 14% 左右, 有效提高了微生物对难降解有机物质的分解能力. 对污泥沉降性能的研究表明, 超声波强化会引起污泥的 SVI 值升高, 但升高的幅度仅为 5% 左右, 不会对系统的沉降性能造成显著影响. 根据电镜观测以及种群结构分析发现, 超声波对细胞产生了损伤作用, 其表面出现了明显的皱褶, 但是活性污泥种群结构并未发生显著变化. 通过对 2 个反应器中活性污泥的呼吸动力学分析表明, 设置 US 反应器中活性污泥对底物具有更高的利用率.

关键词: 低强度超声波; SBR 反应器; 生活污水; 强化; 生物降解

中图分类号: X799.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)08-1596-07

Treatment of Domestic Wastewater Using Sequence Batch Reactor Enhanced by Low Intensity Ultrasound

YAN Yixin¹, LIU Hong², ZHANG Shan-li¹, XIE Beizhen²

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

Abstract Enhancement effect of ultrasound (US) on the bio-treatment of domestic wastewater was studied through contrast experiments between two sequence batch reactors (SBR) with and without US. The results showed that when US with intensity of $0.3 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ was employed to irradiate 10% of the activated sludge in the SBR for 10 minutes every 8 hours, the removal rate of COD was improved by 3%~6%, and the effluent COD of US-SBR was lower than that of the control SBR by 40%~53%. Moreover, the tolerance of SBR to high concentration and toxicity impact was improved effectively. For the practical domestic wastewater, the sludge activity was 14% higher in the US-SBR than that in the control SBR, increasing the capacity of microorganism to degrade the refractory compounds. The settleability of activated sludge in the US-SBR descended slightly and 5% increase of SVI (sludge volume index) was observed during the experiment, but it had little influence on the system since the increment was very small. According to the results of scan electron microscope (SEM) and microbial community structures analysis, the microorganism in the US-SBR was damaged by US and compared with the control, the cell wall was ruffled obviously, but it didn't change the community structures of activated sludge. Kinetics analysis of microbial respiration in the two SBRs showed that the activated sludge in the US-assisted SBR could make better use of substrate.

Key words: low intensity ultrasound; SBR; domestic wastewater; enhancement; biodegradation

低强度超声波可以有效提高酶的活性, 促进细胞生长^[1~5]. 因此可将之应用于污水生物处理过程中, 通过强化微生物的活性来提高废水的生物处理效率. 在本文作者的前期研究中, 对低强度超声波作用的最佳超声声强、辐照时间、辐照周期以及每次超声辐射处理反应器中污泥的比例进行了系统的优化选择. 结果表明, 当采用超声强度为 $0.3 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, 每隔 8h 取反应器中 10% 的活性污泥辐照 10min 后再返回反应器, 污泥活性可提高 12% 以上, 而污泥的增长率可降低 11% 左右, 不仅提高了反应器的生物处理效率, 而且还减轻了后续污泥处理工序的负荷^[6~9]. 本文通过设置对照, 考察了设置超声波强

化的 SBR 反应器在不利条件下的运行状况和耐受能力, 并对其中微生物的生存状态进行了研究.

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 1 500 mm 的有机玻璃柱作为 SBR 反应器, 有效容积 20L, 其中 1 号为对照反应器, 2 号反应器设置超声强化.

收稿日期: 2005-07-08; 修订日期: 2005-09-05

基金项目: 国家“十五”科技攻关计划项目(2002DFB40009)

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

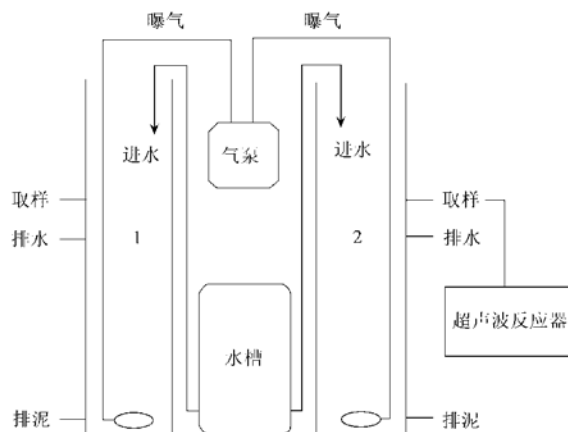


图 1 SBR 反应器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SBR reactor

SBR 反应器底部设 1 排泥口,距底部 12L 和 16L 处

分别设 1 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.

超声波反应器采用笔者前期研究使用的超声波清洗机装置^[6]. 频率 35kHz, 固定其声强为 0.3 W·cm⁻². 试验过程中, 将从 2 号 SBR 反应器中取出的污泥放入 1L 的广口瓶中, 然后浸入超声波清洗槽内进行超声辐照处理, 并不断搅拌, 广口瓶位于清洗槽的中心, 放置的位置始终固定.

1.2 试验用水

1.2.1 人工配制生活污水

人工配制生活污水主要成分如表 1.

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	蔗糖	尿素	NH ₄ Cl	KH ₂ PO ₄	CaCl ₂	MgCl ₂	CuSO ₄
浓度	400	12.5	12.5	7	0.8	1.0	0.002

1.2.2 实际生活污水

实际生活污水取自北京师范大学家属区下水井,其水质如表 2 所示.

表 2 实际生活污水

Table 2 Water quality of practical domestic wastewater

COD/mg·L ⁻¹	NH ₃ -N/mg·L ⁻¹	pH	SS/mg·L ⁻¹
400~ 500	50~ 70	7.0	100~ 200

1.3 试验过程

1.3.1 反应器试验

试验污泥取自北京市清河城市污水处理厂二沉池,培养稳定后开始正式运行,进水采用人工配制生活污水. 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. 在曝气过程的第 4h 取 2 号反应器中 10% 的泥水混合物用频率 35kHz,声强 0.3 W·cm⁻²的超声波进行 10min 超声处理,然后将处理过的泥水混合物返回该反应器中,即每天超声处理 3 次,每次间隔 8h. 每天固定时间分别从 2 个反应器中取污泥样测试其 SVI 及 OUR,并定时测定进出水的 COD; 定时排泥,保持 2 个反应器中污泥浓度均为 3g·L⁻¹左右. 试验过程中,温度保持在 15~ 25℃.

耐高浓度负荷冲击试验: 将进水 COD 逐渐由 400 mg·L⁻¹ 增加到 1 000 mg·L⁻¹, 测试对照反应器

和设置 US 反应器中污泥活性 OUR 以及对 COD 去除效果的变化,观察超声波对反应器耐高负荷冲击能力的影响.

耐有毒物质冲击试验: 反应器恢复优化状态并运行 1 周后,在进水中加入苯酚,使得进水中苯酚的浓度按照 20、50、100、250 mg·L⁻¹ 逐步增加. 每种苯酚浓度运行 3 个周期,测试对照反应器和设置 US 反应器中污泥活性 OUR 以及对 COD 去除效果的变化.

实际污水试验: 反应器恢复稳定运行之后,取北京师范大学家属区内居民生活污水进行试验,测试指标包括 COD 和 OUR,观察设置 US 反应器对实际废水的处理效果.

电镜扫描与污泥种群结构分析: 反应器稳定运行 2 个月后,分别取设置 US 反应器和对照反应器中的活性污泥进行电镜观测. 分别取设置 US 反应器和对照反应器中的活性污泥采用核糖体 DNA 间隔基因片段分析 (ribosomal intergenic spacer analysis, RISA) 试验的方法^[10~ 12],对微生物的种群结构进行分析.

1.3.2 呼吸动力学分析^[13]

取对照反应器与设置 US 反应器中的活性污泥分别加入 COD 浓度为 100、200、400、600、800 mg·L⁻¹ 废水,测试其 OUR 值,根据所得的呼吸速

率与底物浓度关系曲线,分别求得 2 个反应器中活性污泥的呼吸速率方程。

1.4 测试方法

COD 的测试采用美国 HACH 公司生产的 COD 测定仪,150 ℃消解 2h 后用硫酸亚铁铵滴定;苯酚采用 4-氨基安替比林法^[14];MLSS 和 SVI 按照标准方法进行测试^[14]。OUR 的测定使用自制的呼吸仪,分析和计算方法见文献[6]。

2 结果与讨论

2.1 超声波对 SBR 系统处理效率及耐高浓度冲击能力的影响

高浓度冲击条件下设置 US 反应器和对照反应器的进出水 COD 值如图 2 所示,分别对 2 个反应器中 COD 的去除率进行线性拟合,得到如图 3 所示的结果。

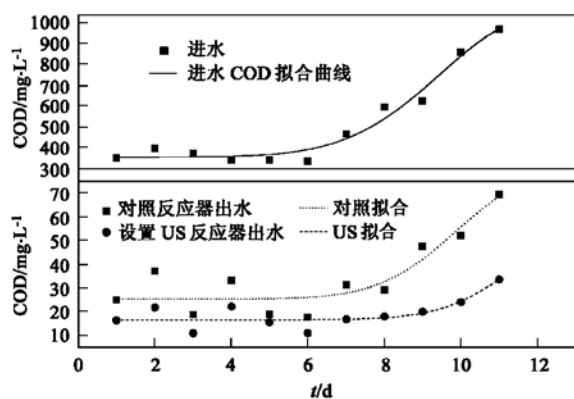


图 2 设置 US 反应器与对照反应器出水的 COD 值

Fig. 2 Influent COD and effluent COD of the SBRs with and without US

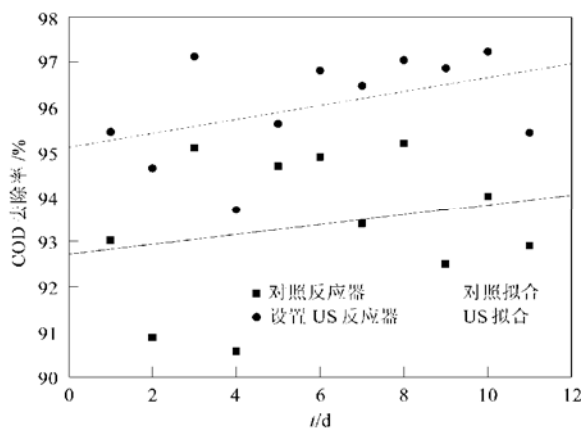


图 3 设置 US 反应器与对照反应器对 COD 去除率的比较

Fig. 3 Comparison of COD removal rate between the SBRs with and without US

由图 2 可以看出,在稳定运行的 1 周内,进水 COD 一直在 $350 \sim 400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间变化,在此期间,设置 US 反应器的出水 COD 始终小于对照反应器。当第 7d 开始将进水浓度由 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐渐增加到 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,2 个反应器的出水 COD 均有所提高,但是从拟和曲线可以看出,设置 US 反应器的出水比对照反应器更为稳定。由于试验采用 SBR 反应器,其充水比(排水量与反应器内最低水位时容积之比)为 0.667,本身就具有良好的抗冲击负荷能力,所以尽管进水 COD 已经达到 $979 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,但是对照反应器的出水 COD 仍可保持在 $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,而设置 US 反应器出水 COD 为 $33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。图 3 所示为设置 US 反应器和对照反应器对 COD 的去除率,经线性拟和后可以看出,对照反应器的去除率平均约为 93%,设置 US 反应器的去除率约为 96%,设置超声强化后的 SBR 反应器对 COD 去除效率约比对照反应器提高 3%。另外,比较 2 个反应器出水可以看出,设置 US 反应器的出水 COD 在对照反应器出水的基础上又降低了 40%~53% 左右,对于 SBR 反应器来说,在微生物作用 8h 后易被微生物利用的物质几乎已经消耗殆尽,而设置 US 反应器出水能在此基础上又降低 53% 是具有很大意义的。

2.2 超声波对 SBR 系统耐有毒物质能力的影响

在反应器稳定运行期间,将进水中加入不同浓度的苯酚,设置 US 反应器与对照反应器中污泥的进出水 COD 以及耗氧呼吸速率如图 4 和图 5 所示。

由图 4 中可以看出,当加入苯酚浓度从 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐渐增加到 $280 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,进水 COD 浓度也相应从 $436.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $1670.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。但是由于苯酚具有很强的挥发性,在曝气过程中,大部分的苯酚已经挥发(所测出水苯酚均在 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下),因此出水 COD 仍可以保持在 $22 \sim 24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (设置 US 反应器)和 $30 \sim 33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (对照反应器),只有当苯酚浓度达到 $280 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时(相应 COD 为 $1670.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),对照反应器和设置 US 反应器才表现出明显的出水 COD 增高,其中对照反应器出水 COD 为 $52.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,设置 US 反应器出水 COD 为 $40.84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,比对照反应器的出水 COD 降低了 21.5%。从图 5 中可看出,加入苯酚后,2 个反应器中污泥的呼吸速率均随之下降,但是 OUR 显示的设置 US 反应器的污泥活性比对照反应器中污泥活性平均高出 23% 左右。

2.3 实际废水试验

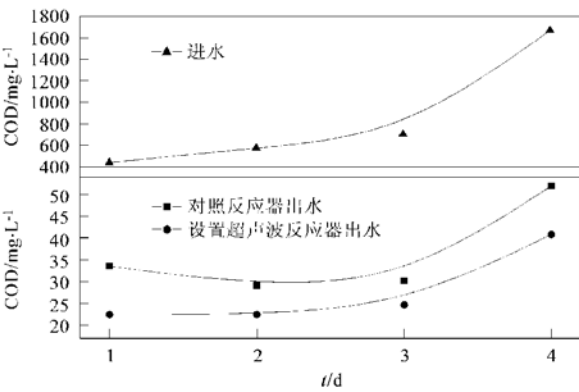


图 4 苯酚对设置 US 反应器和对照反应器进出水 COD 的影响
Fig. 4 Influence of phenols impact on the influent and effluent COD of SBRs with and without US

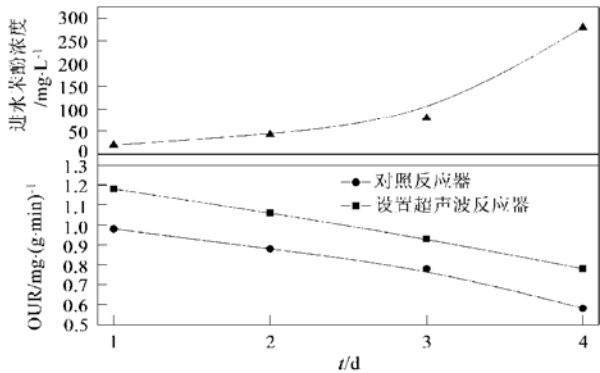


图 5 苯酚对设置 US 反应器和对照反应器中污泥活性的影响
Fig. 5 Influence of phenols impact on the activated sludge of SBRs with and without US

实际废水试验期间, 对照反应器和设置 US 反应器的 MLSS 为 $3\ 100\sim 3\ 200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中对照反应器的 SVI 为 $53\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 设置 US 反应器的 SVI 为 $57\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$. 其运行效果详见表 3 和表 4.

由表 3 可以看出, 在处理实际废水试验中, 对照反应器对 COD 的去除效率为 87% 左右, 而设置 US 反应器对 COD 的去除效率为 93% 左右, 与对照相比, 其去除效率提高了约 6%. 这与采用人工配制生活污水的实验结果一致. 由于实际生活污水含有难降解成分, 因此, 与图 3 所示的采用人工配制生活污水相比, 对照反应器和设置 US 反应器的去除效率均有所下降, 而去除率的提高值却有所升高. 对表 4 进一步分析发现, 对照反应器 COD 出水约为 $50\sim 55\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而设置 US 反应器出水 COD 约为 $27\sim 33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 对于生活污水来说, 在 COD 降低到 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下时, 剩余的主要为难降解物质, 而经超声波强化后, 可使出水 COD 在对照出水水质的基础上, 又降低 42% 左右, 说明超声波可以有效提高微生物对难降解有机物质的分解能力. 另外, 从表 4 中也可以看出, 设置 US 反应器在处理实际生活污水中, 其污泥活性比对照提高 14% 左右.

2.4 超声波对污泥沉降性能的影响

本试验污泥取自北京市清河城市污水处理厂, 初测 SV₃₀ 为 40% 左右, SVI 达到 $150\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$. 出水清澈, 但是沉降速度缓慢, 上清液较少. 正式运行后, 对照反应器和超声反应器的 SVI 值的变化见图 6.

表 3 对照反应器和设置 US 反应器对实际污水 COD 去除效果的比较
Table 3 Comparison of removal effect of COD in the SBRs with and without US

项目	第 1d		第 2d		第 3d	
	COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	去除率/%	COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	去除率/%	COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	去除率/%
进水	458.74	—	461.11	—	408.39	—
对照反应器出水	55.94	87.80	55.56	87.95	50.35	87.67
设置 US 反应器出水	33.57	92.68	33.33	92.77	27.92	93.15
设置 US 出水比对照出水降低的百分比/%	40		40		44	

表 4 对照反应器和设置 US 反应器中 OUR 的比较
Table 4 Comparison of OUR in the SBRs with and without US

时间	对照 $/\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$	US 反应器 $/\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$	活性提高百分比 /%
第 1d	1.00	1.14	14
第 2d	1.05	1.19	13.7
第 3d	0.95	1.10	15.8

US 反应器中 SVI 的变化图; 图 6(b) 为整个试验进行期间 SVI 的变化图. 由图 6 可以看出, 在加载超声的前 2d 内, 对照反应器和设置 US 反应器中污泥的 SVI 值相差不大, 从第 3d 开始, 设置 US 反应器中的 SVI 值开始迅速上升, 在随后的运行过程中虽然缓慢下降, 但是始终高于对照反应器 5% 左右. 由此可见, 利用超声波强化污水生物处理会引起污泥的 SVI 值升高, 但其升高的幅度仅为 5% 左右, 不会对系统的沉降性能造成显著影响.

图 6(a) 为正式运行后 1 周内对照反应器和设置

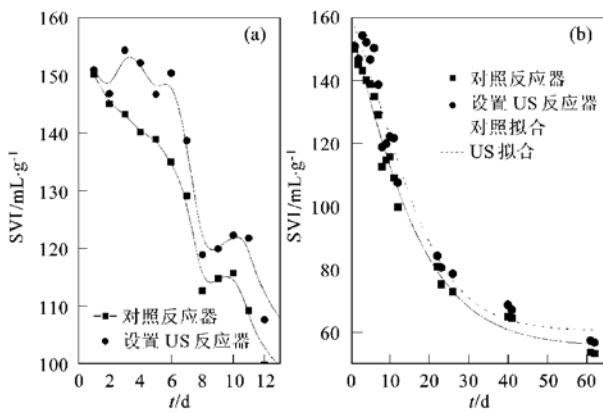
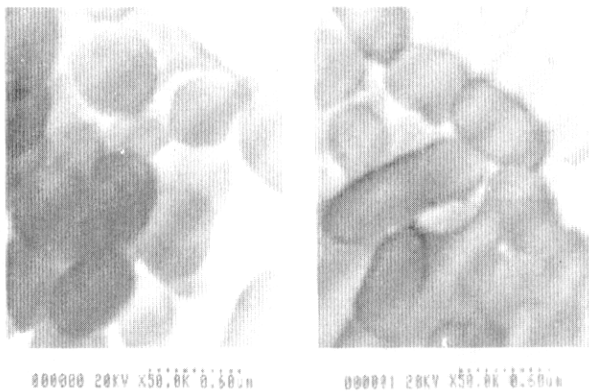


图 6 设置 US 反应器 and 对照反应器污泥 SVI 的变化

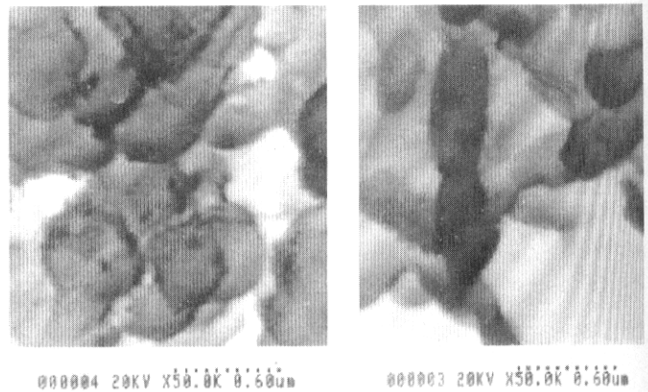
Fig. 6 Change of SVI in the SBRs with and without US

2.5 电镜扫描观测分析超声波对微生物细胞的影响

将对照反应器和设置 US 反应器中微生物进行扫描电镜观察, 结果如图 7 所示. 图 7(a) 为对照反应器中微生物的电镜照片, 细胞表面是光滑的. 图 7(b) 为设置 US 反应器中的微生物细胞, 表面粗糙有皱褶. 根据文献[6~9]的研究分析, 在超声波作用过程中, 其机械效应和空化效应是促进微生物活性的主要作用机制, 这 2 种机制使得细胞的通透性增加, 物质交换加速. 另外, 由于机械效应会对细胞表面造成微伤, 在细胞自身修复过程中, 酶的分泌增多, 新陈代谢活性增强. 电镜照片中经超声处理的细胞表面产生了大量的皱褶, 说明超声波对细胞表面产生了明显的损伤, 使细胞发生变形; 而且, 细胞受损后修



(a) 对照反应器中污泥电镜照片



(b) 设置 US 反应器中污泥电镜照片

图 7 污泥电镜照片 (放大倍数: 50 000)

Fig. 7 SEM pictures

复也有可能产生皱褶的产生.

2.6 微生物种群结构分析

RISA 试验的结果如图 8 所示. 图中 3 条谱带分别为标准 DNA 物质 (Marker DL2000) 对照反应器内样品和经超声辐照反应器内的样品. 由图 8 可见, 经过超声辐照后的样品与对照在相同位置呈现了一致的谱带, 即大约 1 000 bp 与 2 000 bp 之间以及 500 bp 与 750 bp 之间各出现 1 条谱带. 通过该现象可以推断超声的存在并未改变活性污泥菌群中微生物种类的组成, 而且从这 2 种微生物体内提取出的 DNA 的含量基本相近, 因为根据 PCR 的原理, 如果 2 种 DNA 的含量相差较大且较少含量的 DNA 含量很微弱时, 只有较多含量的 DNA 能在 PCR 结果中形成片断并表现在电泳图谱上, 而微量的模板不能形成较浓的谱带显现在结果中. 因此, 从 RISA 试验的结果可以得到如下结论, 即在反应器内的主要微生物为 2 种, 而且经超声辐射处理后这 2 种微生物

的比例组成基本上没有改变.

2.7 动力学分析

不同底物 COD 浓度下, 2 个反应器中活性污泥

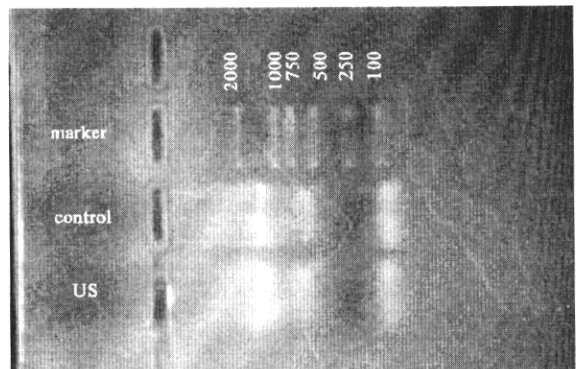


图 8 对照反应器和设置 US 反应器中种群结构 RISA 试验结果

Fig. 8 Microbial community structures in the SBRs with and without US as revealed by RISA assays

耗氧呼吸速率如图 9 所示。

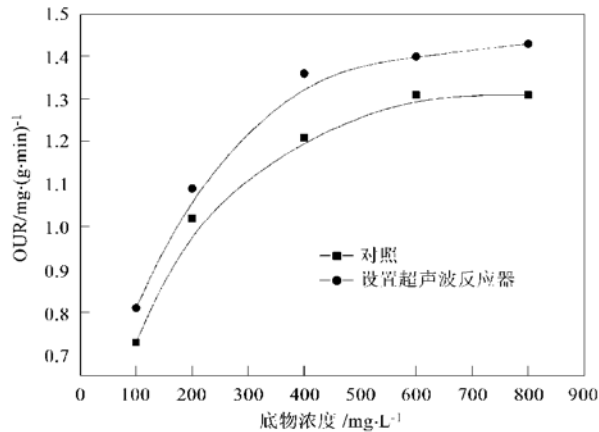


图 9 耗氧呼吸速率与底物浓度的关系
Fig. 9 Relationship between OUR and substrate concentration

由图 9 可以看出,随着底物浓度的增加,耗氧呼吸速率逐渐增大,其关系曲线具有随底物浓度的增大,而呼吸速率趋向一个定值的趋势,本文采用了双曲函数进行拟合。

$$y = \frac{ax}{x + b} \tag{1}$$

式中, y 为耗氧呼吸速率(可用 v 表示); x 为底物浓度(可用 c 表示). 代入后得:

$$v = \frac{ac}{b + c} \tag{2}$$

式(2)具有 Michaelis-Menten 方程的形式. 据此, a 、 b 的含义如下: a 为最大呼吸速率值(可用 v_m 表示); b 为达到最大呼吸速率一半时的底物浓度,可称为半速率常数(用 k 表示). 代入后得:

$$v = \frac{v_m c}{k + c} \tag{3}$$

将式(3)取倒数得:

$$\frac{1}{v} = \frac{k}{v_m} \cdot \frac{1}{c} + \frac{1}{v_m} \tag{4}$$

根据试验数据,将 $\frac{1}{v}$ 对 $\frac{1}{c}$ 作图,如图 10 所示。

由图 10 可知,对其进行直线拟合,根据相关性系数,其拟合是显著的. 因此,用式(3)来描述耗氧呼吸速率随底物浓度的变化是成功的. 根据拟合直线,得到如表 5 所示的呼吸速率方程。

式(5)和式(6)即为对照反应器和设置 US 反应器中污泥耗氧呼吸速率随底物浓度的变化关系. 可以得出: 对照反应器中耗氧呼吸速率的最大值为 $1.53 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$, 且达到最大耗氧呼吸速率的一半 $0.76 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 时的底物浓度 $\text{COD} =$

$107.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 设置 US 反应器中耗氧呼吸速率的最大值为 $1.65 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$, 且达到最大耗氧呼吸速率的一半 $0.82 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 时的底物浓度 $\text{COD} = 102.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 因此可以得出结论, 设置 US 反应器中活性污泥对底物具有更高的利用率. 由式(5)和式(6)计算可得呼吸速率曲线与实际曲线如图 11 所示, 可见二者符合得很好。

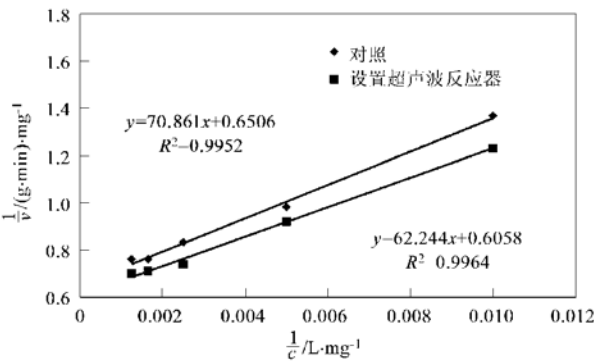


图 10 $1/c$ 和 $1/v$ 关系图
Fig. 10 Relationship between $1/v$ and $1/c$

表 5 对照反应器和设置 US 反应器中
好氧活性污泥的呼吸速率方程

Table 5 Kinetics results of activated sludge in the SBRs with and without US			
项目	v_m $/\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$	$k/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	呼吸速率方程
对照反应器	1.53	107.15	$v = \frac{1.53 \cdot c}{107.15 + c}$ (5)
设置 US 反应器	1.65	102.73	$v = \frac{1.65}{102.73 + c}$ (5)

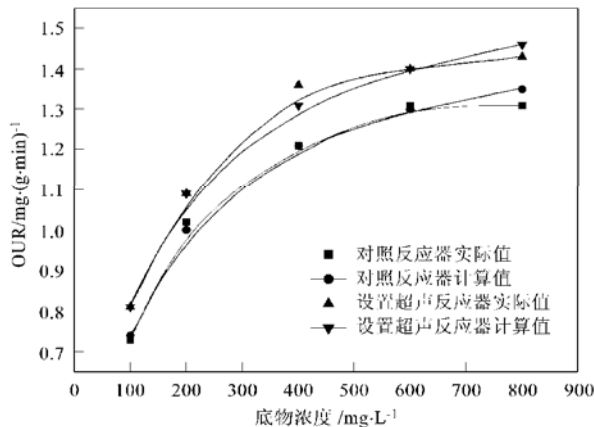


图 11 计算值与实测值
Fig. 11 Calculated and experimental curves

3 结论

(1) 与对照反应器相比, 设置 US 反应器对 COD 的总去除率可提高 3% ~ 6%, 其出水 COD 与对照反应器的出水相比降低了 40% ~ 53%, 通过该辐射处理有效提高了 SBR 反应器对模拟生活污水的高负荷冲击和有毒物质冲击的耐受能力。

(2) 对于实际生活污水, 设置超声强化可使污泥活性增加 14% 左右, 有效提高了微生物对难降解有机物质的分解能力。

(3) 超声波强化污水生物处理会引起污泥的 SVI 值升高, 但其升高的幅度仅为 5% 左右, 不会对系统的沉降性能造成显著影响。

(4) 通过扫描电镜观察, 超声强化反应器长期运行后, 活性污泥微生物细胞表面出现明显的皱褶。说明超声波对细胞壁产生了损伤作用; 活性污泥种群结构分析的结果表明, 超声强化并未改变活性污泥菌群中主要微生物的比例组成。

(5) 对设置 US 反应器 and 对照反应器中耗氧呼吸速率的研究表明, 经超声强化后, 污泥的活性增强, 对底物的利用效率提高。

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, 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.
- [7] 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.
- [8] 闫怡新, 刘红. 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 [J]. *环境科学*, 2006, **27** (5): 903~ 908.
- [9] 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.
- [10] 奥斯伯 F, 靳斯顿 R E, 塞曼斯 J G, 等著, 颜子颖 王海林, 译. 精编分子生物学试验指南 [M]. 北京: 科学出版社, 1998. 39~ 41.
- [11] Quan X C, Shi H C, Liu H, *et al.* Enhancement of 2, 4-dichlorophenol degradation in conventional activated sludge systems bioaugmented with mixed special culture [J]. *Water Research*, 2004, **38**: 245~ 253.
- [12] 张山立. 微污染水源水生物活性炭净化工艺筛选及超声波强化器效能研究 [D]. 北京: 北京师范大学, 2005.
- [13] 瞿福平, 张晓健, 何苗, 等. 易降解有机物对氯苯好氧生物降解性能的影响 [J]. *中国环境科学*, 1998, **18** (5): 407~ 409.
- [14] 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.