

低强度超声波改善污泥活性

刘红¹, 闫怡新², 王文燕², 于勇勇²

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

摘要: 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)为指标, 研究活性污泥在超声波强度 $0 \sim 1.2 \text{ W/cm}^2$ 辐照时间 $0 \sim 40 \text{ min}$ 处理后活性的变化. 发现当采用超声波强度 0.3 W/cm^2 , 辐照时间 10 min , 对提高污泥活性的效果最为显著, 不适当的处理时间与处理强度则不利于污泥活性的提高. 因此, 利用超声波激励污泥活性存在最佳的超声波强度和辐照持续时间. 另外, 研究了强度 0.3 W/cm^2 , 辐照时间 10 min 超声波辐射处理后 $0 \sim 48 \text{ h}$ 中污泥活性的变化规律, 发现超声辐照 8 h 后污泥活性达到最大值, 为辐射处理后初始活性的 2 倍, 24 h 后超声波的强化作用基本消失. 因此, 可采用强度 0.3 W/cm^2 超声波每隔 8 h 取反应器中的部分活性污泥辐照 10 min 后再返回反应器, 来提高生物反应器的处理效率. 本文还对低强度的超声波改善污泥活性的可能机制进行了假说性解释.

关键词: 低强度超声波; 活性污泥; 好氧呼吸速率; 污泥体积指数; 声强; 辐照时间; 处理周期

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)04-0124-05

Improvement of the Activity of Activated Sludge by Low Intensity Ultrasound

LIU Hong¹, YAN Yr-xin², WANG Wen-yan², YU Yong-yong²

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

Abstract: Aerobic activated sludge from domestic wastewater treatment plant was used as an experimental material. Oxygen Uptake Rate(OUR) was detected as the index to indicate the changes of sludge activity induced by ultrasound(US) at 35 kHz in $0 \sim 40 \text{ min}$ with the US intensities of $0 \sim 1.2 \text{ W/cm}^2$. The best results were achieved at a US intensity of 0.3 W/cm^2 and irradiation time of 10 min . Improper US intensity and irradiation time lead to a decrease of sludge activity. Therefore, the stimulating effects of US on the sludge activity could be enhanced at an optimized US intensity and irradiation time. In addition, changes of sludge activities (within 48 hours) after US irradiation at 0.3 W/cm^2 in 10 min were examined. The activity of sludge took 8 hours after irradiation to reach peak level, and the activity was as double as that of the initial level after irradiation. In 24 hours after irradiation, the enhancement effects induced by ultrasound disappeared. Therefore, to improve the treatment efficiency of biological reactor, ultrasound with intensity of 0.3 W/cm^2 could be employed to irradiate part of the sludge in the biological treatment system for 10 minutes every 8 hours . It also presented the hypothetical explanation of the mechanism of biological activity enhancement stimulated by ultrasound.

Key words: low intensity ultrasound; activated sludge; oxygen uptake rate(OUR); SVI; ultrasound intensity; irradiation time; treatment cycle

超声波是指频率高于 20 kHz 以上的声波,也是物质介质中的一种弹性机械波^[1].它与生物介质相互作用可产生多种效应,包括热效应、机械效应以及空化效应等^[2].通常把声强小于 10 W/cm^2 超声波称之为低强度超声波^[3].许多研究表明,低强度超声波可以有效提高酶的活性,促进细胞的生长与生物合成,以及改变细胞膜和细胞器的结构^[4],这其中具体的机制目前还不是很清楚.一些研究者认为超声波对促进反应物质的扩散和传输起主导作用;还有一些研究者认为这是由于超声波提高了酶或细胞的新陈代谢的活性^[5,6].超声波作用于液体可增强液态介质的对流,从而使边界层减薄,改善物质的传输阻碍,提高反应物进入酶或细胞活性部位以及生成物进入液体媒质的传质扩散过程,由此提高了酶的活性,并解除了产物抑制,促进了细胞的生长^[3].

基于以上机制假设,在污水生物处理过程中,可通过强化微生物活性来提高废水的生物处理效率^[7,8].Schlafer等^[8]在应用低强度超声波强化果汁生产废水的生物处理过程中,COD的最大去除速率可提高 100% ,但是,他采用将反应器中的全部泥水混合物进行连续的超声波处理的模式,所需要的设备资金投入和运行费用较高,因此对于污水处理来说在经济上是不合算的.

Lin等^[9]根据对植物细胞加载低强度超声的试验结果,认为超声波的强化作用并不仅是通过促进物质传递来实现的,而是因为超声辐照激励了 2 种参与合成次级代谢产物的关键酶,由此提高了植物

收稿日期: 2004-07-24; 修订日期: 2004-09-10

基金项目: 国家“十五”科技攻关计划项目(2002DFBA0009)

作者简介: 刘红(1964~),女,博士,教授,研究方向为水污染控制与资源化,微污染饮用水净化. E-mail: lh64@buaa.edu.cn

细胞的生理活性,因此可以设想如果在水处理过程中,微生物被低强度的超声波处理后,其生理活性也发生类似的变化,如酶的活性得到提高或细胞壁通透性得到提高,且这种效果可以保持一段时间,那么就不需要对反应器中的混合物进行连续处理.对于活性污泥法来说,只需要处理反应器中的活性污泥,而且可以是浓缩后的活性污泥,从而大幅度降低超声波处理设备投资和运行费用.

对于每一类型的生物反应来说都存在其最优化的超声强度和辐照时间,不适当的处理时间与处理强度则不利于污泥活性的提高^[10~12].因此,本研究中以好氧呼吸速率(Oxygen Uptake Rate, OUR)和污泥体积指数(Sludge Volume Index, SVI)为主要指标,研究经低强度超声波处理后的好氧活性污泥的活性以及沉降性能的变化,以寻找最佳的超声强度和處理时间;研究超声波处理后活性污泥的活性随时间的变化规律,以确定经济的处理频次,并对低强度的超声波改善活性污泥活性的可能机制进行探讨.

1 材料和方法

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.

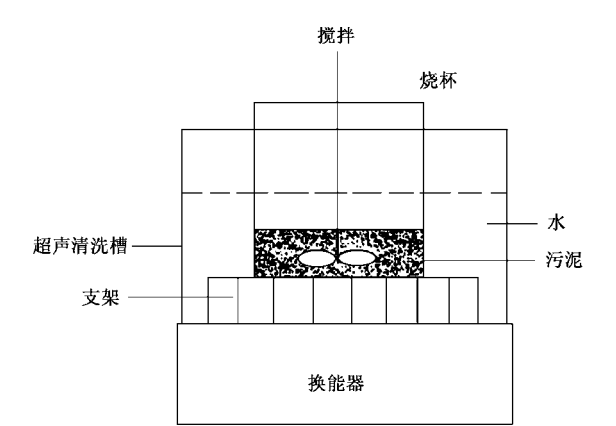


图 1 超声辐照试验装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of ultrasound irradiation system

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,功率 0~80 W 无级可调.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

实验污泥取自北京市城市污水处理厂曝气池,

培养稳定后将污泥分装入 250 mL 烧杯,每个烧杯中污泥体积为 70 mL,污泥浓度为 9~962 mg/L,置于 4℃冰箱中待用,实验过程中随用随取.

1.2.1 不同强度及时间的超声波辐照处理

取装有污泥的烧杯分别采用不同强度的超声波辐照 20 min,然后立即进行 OUR 与 SVI 的测试,以确定最佳的超声处理强度.在确定的最佳超声强度下,将装有污泥的烧杯分别进行不同时间的超声辐照,立即测试其 OUR,以确定最佳的超声辐照时间.该试验各进行 2 次重复.

1.2.2 超声辐照后污泥活性的变化

根据超声强度和辐照时间的试验结果,将 2 L 污泥浓度为 9962 mg/L 的污泥分别放入 2 个 1 L 的广口瓶中,并置于清洗槽中进行最优化条件下的超声强化处理.然后将处理后的污泥倒入一个 16 L 的塑料桶中,加入 8 L 人工配制的生活污水(表 1)进行模拟 SBR 反应.反应周期 8 h,其中瞬间进水,曝气 6 h,沉淀 1 h,排水和闲置 1 h.在不同的时间取污泥样,进行 OUR 的测定,同时测定没有经超声处理的污泥的 OUR 值作为对照.

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 PO ₄	CaCl ₂	MgCl ₂	CuSO ₄
浓度	300	22.5	7.32	0.8	1.0	0.002

1.3 测试指标及分析方法

本试验的测试指标包括悬浮固体浓度(Mix Liquor Suspended Solids, MLSS)、OUR、SVI 以及超声场强的分布. MLSS 和 SVI 的分析都采用标准方法^[13]. OUR 的测试采用一个自制的完全封闭的呼吸仪,如图 2 所示.

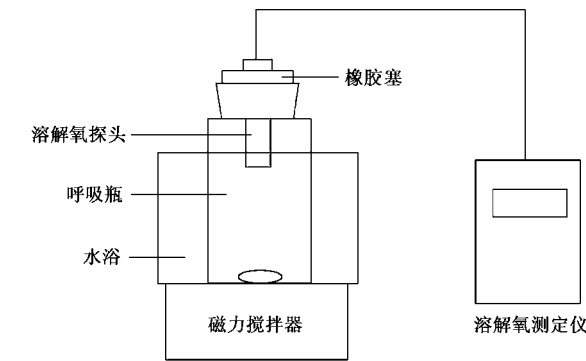
将待测污泥用蒸馏水洗涤 3 次,使其中的有机物完全洗净,再加入经充分曝气的人工配制生活污水(主要成分见表 1),立即放入密闭呼吸仪中,温度保持在 25~26℃,测量 DO 浓度随时间的变化,做出 DO-t 曲线.同时分析其污泥浓度 MLSS,根据下列公式进行计算:

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

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.

场强的分布采用中科院声学所提供的 CS-3 型水听器.固定超声波清洗机的声强,将水听器针头置

于距烧杯底面 5 mm 处,对该平面内不同点的电压进行测量.然后通过示波器(Tektronix , USA) 显示的电压值计算出该点的声强.



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:250 mL 广口瓶,实际容积约为 350 mL

图 2 OUR 测量装置

Fig. 2 Experimental setup for measuring OUR

2 结果与讨论

2.1 超声强度对污泥特性的影响

2.1.1 超声强度对 OUR 的影响

不同超声波强度对污泥活性的影响试验结果见图 3.可以看出,低强度超声波可显著促进污泥活性,随着超声波强度的增加,污泥活性也逐渐增强,当声强为 0.3 W/cm² 时,活性达到最高.随着超声强度的进一步增大,污泥的活性呈下降趋势,当超声强度大于 0.5 W/cm² 时,污泥的活性降低到低于对照.

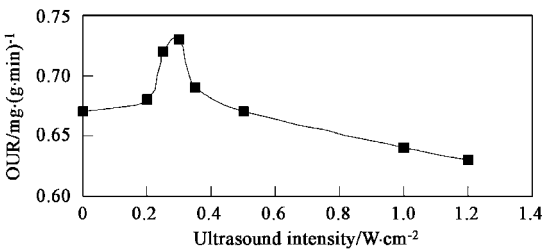


图 3 超声波强度对污泥活性的影响

Fig. 3 Effect of ultrasound intensity on sludge activity

在活性污泥种群中,总是有某些细菌对所加载的超声场不适应,其活性受到抑制.但是在低声强条件下,大部分细菌可以适应并且表现出活性的显著增加,而且随着超声强度的增加,空化泡的数目增多以及振幅增大,污泥的活性也持续增大.但是,当超声强度大于某一最优数值时(本实验中为 0.3

W/cm²),不适应的细菌越来越多,污泥的活性开始下降,当超声强度超过 0.5 W/cm² 时,大部分的细菌活性受到抑制或者死亡,说明此时超声强度过大,对细胞结构产生了严重破坏,并且使酶失活,因此污泥活性低于对照.

2.1.2 超声强度对 SVI 的影响

不同强度超声对污泥沉降性能的影响如图 4 所示,随着超声强度的增大,污泥的 SVI 值持续升高,说明污泥沉降性能不断下降.但是当超声波强度大于 0.5 W/cm² 以上时,污泥的 SVI 值开始下降.声强 0.3 W/cm² 的超声波对 SVI 值的影响不大.

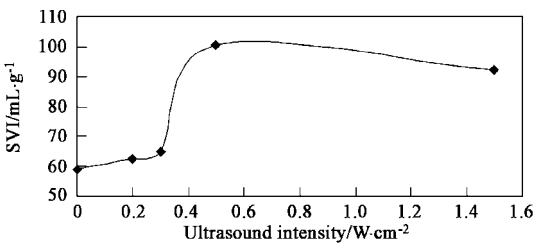


图 4 超声波强度对污泥沉降性能的影响

Fig. 4 Effect of ultrasound intensity on settleability of sludge

分析原因,可能是低强度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,因此导致活性污泥沉降性能下降,并随着超声强度的增加以及振动效果的加强,污泥沉淀性能愈发恶化^[14].过高强度的超声波已经将细胞粉碎,粉碎的细胞壁在系统中会残留,而且超声粉碎了细胞后,污泥絮体的尺寸变小,因此沉降性能有所恢复.由此可见,当采用超声波来强化污水生物处理过程时,只能将系统内的部分污泥进行超声强化处理,且采用较低强度的超声波,否则就有导致污泥膨胀的可能.

2.2 超声辐照时间对污泥活性的影响

根据超声强度试验结果,采用 0.3 W/cm² 的声强对污泥进行辐照,采用 0 ~ 40 min 的辐照时间,观察其对污泥活性的影响,试验结果如图 5 所示.

分析图 5 可以看出,超声波强化污泥活性存在着一个最佳的辐照时间,在本实验条件下,经超声辐照 10 min 污泥活性即可达到最大值.继续延长辐照时间,污泥活性呈下降趋势,说明长时间地持续超声辐照对生物活性的提高不利.分析原因可能是即使在低强度超声辐照下,细胞膜表面受到的切应力依

然可能在细胞表面造成微伤,辐照时间短,伤口很小,容易被细胞自身修复,而随着辐照时间延长,伤口增大,细胞自身修复困难,导致活性下降. Schlafle^[5]认为这也可能是由于超声辐照只能强化细胞内新陈代谢过程中的某些步骤,而对其他步骤反而会产生抑制作用,所以长时间地辐照对微生物活性没有强化效果.

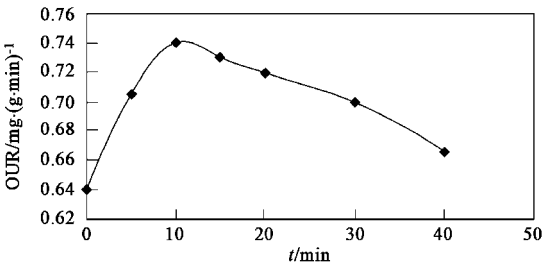


图 5 超声辐照时间对污泥活性的影响

Fig. 5 Effect of irradiation time on sludge activity

2.3 超声波辐照处理后污泥活性的变化规律

超声辐照处理后,需隔多长时间再行处理,涉及处理周期问题.采用强度 0.3 W/cm^2 、辐照时间 10 min 超声波辐射处理后污泥的 OUR 值随时间的变化见图 6,其中对照为没有经超声处理的污泥的 OUR 值.

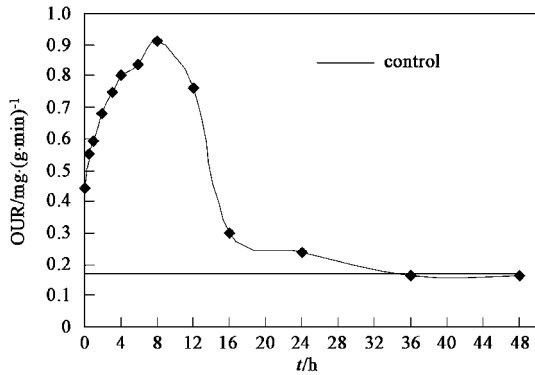


图 6 超声处理后污泥活性随时间的变化

Fig. 6 Changes of activities of sludge after ultrasound irradiation

分析图 6 可见,超声处理后污泥活性随时间的延长逐渐提高,8h 后活性达到最大值,比反应起始活性提高 1 倍以上.说明低强度超声对活性污泥活性的强化作用,在处理后的时间延长而逐渐升高,在一定时间之后强化作用会达到最大.然后随着时间的延长,污泥活性持续降低,在 16h 左右基本降到低于处理后起始活性,24h 以后超声波作用的效果基本消失.分析原因可能是超声辐照后,细胞膜在超

声波的作用下其通透性发生改变,促进了营养物质及氧气等进入以及生成物离开酶或细胞活性部位的过程,因此,细胞活性增加,这一效果在超声辐照后立刻反映出来,表现为 OUR 比对照有较大的提高;但是由于在超声辐照过程中机械应力对细胞膜造成了微伤,细胞本身要产生防御反应,并对其伤口进行修复,表现为酶的分泌增多,细胞繁殖加快,活性增强.这个过程在停止超声辐照后需要一段反应时间,而且污泥中不同的细菌反应时间不同,在 8h 后细菌的总体活性水平最高,再随着时间的延长,大部分细菌的修复过程完成,活性逐渐降低,当所有细胞的修复过程完成后,细胞活性恢复到对照水平.

根据实验结果,对于处理城市污水的活性污泥反应器,每隔 16h 应该对反应器中的污泥进行超声强化一次.但是在实际工程应用中,将污泥全部依次进行超声处理需要较大的超声设备,基建费用高.因此可以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.可以考虑每 8h 或更短的时间周期处理一定量的污泥,这样可以保证反应器中总有污泥处于活性高峰.

2.4 超声波在反应器中的分布

固定声强为 0.3 W/cm^2 ,对超声辐照下烧杯内距瓶底 5 mm 平面上的声强分布进行测定,得到声强平面分布图(图 7).

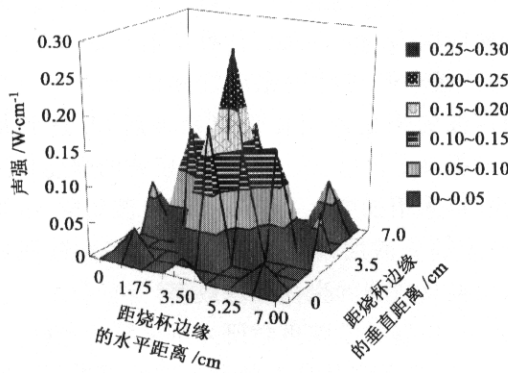


图 7 超声场强的分布

Fig. 7 Distribution of ultrasound field inside of the reactor

分析图 7 可以看出,声强在平面上的分布是不均匀的,在烧杯的中心也就是距超声波换能器最近的位置声强最大,随着离中心距离的增大声强逐渐减小.而且由于清洗槽及烧杯内会发生声波的反射,因此造成部分区域超声波的叠加或抵消.因此,在设计超声波强化生物反应器以及今后的实际应用中应

充分考虑这些问题。

3 低强度超声波在强化污水生物处理中的应用

对于不同的微生物组成,理想的超声波强度和超声辐照持续时间会有所差别,超声波处理后其活性的变化也会有所不同,因此对于不同的污水需对其活性污泥所适宜的超声波强度和超声辐照持续时间及处理周期,通过实验进行优化选择。如果辐照处理后 t 时刻活性最高,那么应采用小于 t 的时间周期来对污泥进行处理,以保证反应器中总有污泥处于活性高峰。选用更小的时间周期,则有利于降低其设备投资费用。值得重视的是,在实际中应选择处理经二沉池分离后的活性污泥,这样与超声处理反应器中的泥水混合物相比,其设备投资和运行费用可降低 80 % 以上。

4 结论

(1) 低强度超声波对污泥活性有显著促进作用,通过不同声强超声波处理研究表明,当超声波声强为 0.3 W/cm^2 时,其提高污泥活性的效果最明显。

(2) 随着超声强度的增加,污泥的沉降性能逐渐降低。但是在低声强范围内,污泥沉降性能仍可保持较佳状态,而且,每次只处理部分污泥,不会对系统的沉降性能造成很大影响,因此,选择声强为 0.3 W/cm^2 的超声波处理是可行的。

(3) 长时间地超声辐照对污泥活性的提高不利,辐照时间 10 min 对污泥活性的提高效果最显著。

(4) 超声处理后污泥活性随时间变化规律表明,超声波的强化作用在辐照处理后 8 h 达到最大值,活性提高 1 倍以上,24 h 后超声波的强化作用基本消失。可采用强度 0.3 W/cm^2 超声波每隔 8 h 取反应器中的部分活性污泥辐照 10 min 后再返回反应器,来提高反应器的生物处理效率。

致谢:中国科学院声学研究所朱厚卿老师、北京师范大学物理系张仲秋老师为本试验提供了水听器 and 示波器,谨表示感谢。

参考文献:

- [1] 应崇福. 超声学[M]. 北京:科学出版社,1990. 1~7.
- [2] 冯若,赵逸云,李化茂,王进. 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.
- [3] Pitt Willam G, Ross S Aaron. Ultrasound Increases the Rate of Bacterial Cell Growth[J]. Biotechnol. Prog., 2003,19(3):1038~1044.
- [4] Liu Yiyao, Takatsuki Hideyo, Yoshikoshi Akio, Wang Bochu, Sakanishi Akio. 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.
- [5] Schlafer O, Sievers M, Klotzbucher H, Onyeché T I. Improvement of biological activity by low energy ultrasound assisted bioreactor[J]. Ultrasonics, 2000,38(1-8):711~716.
- [6] Wu Jianyong, Lin Lidong. Ultrasound-induced stress responses of *Panax ginseng* cells: enzymatic browning and phenolics production[J]. Biotechnol. Prog., 2002,18:862~866.
- [7] Wood B E, Aldrich H C, Ingram L O. Ultrasound stimulates ethanol production during the simultaneous scarification and fermentation of mixed waste office paper[J]. Biotechnol. Prog., 1997,13:232~237.
- [8] Schlafer O, Onyeché T, Bormann H, Schröder C, Sievers M. Ultrasound stimulation of microorganisms for enhanced biodegradation[J]. Ultrasonics, 2002,40(1-8):25~29.
- [9] Lin Lidong, Wu Jianyong. Enhancement of shikonin production in single and two-phase suspension cultures of *Lithospermum erythrorhizon* cells using low-energy ultrasound[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2002,78(1):81~88.
- [10] 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.
- [11] Liu Yiyao, Yoshikoshi Akio, Wang Bochu, Sakanishi Akio. Influence of ultrasonic stimulation on the growth and proliferation of *Oryza sativa* Nipponbare callus cells[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2003,27:287~293.
- [12] 高大维,高文宏,雷德柱,等. 线性超声波辐照对啤酒酵母细胞生长的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),1999,27(12):34~37.
- [13] 高廷耀,顾国维. 水污染控制工程(下册)[M]. 北京:高等教育出版社,1999. 177~187.
- [14] 王红武,李晓岩,赵庆祥. 胞外聚合物对活性污泥沉降和絮凝性能的影响研究[J]. 中国安全科学学报,2003,13(9):31~34.