

不同工况的低强度超声波处理对活性污泥活性的影响

龙腾锐, 蒋洪波, 丁文川

(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:采用好氧活性污泥为试验材料, 以污泥的比好氧呼吸速率(SOUR)、混合液悬浮固体浓度(MLSS)、COD 去除率及污泥产率系数 λ ($\Delta\text{MLSS}/\Delta\text{COD}$) 为指标, 通过对超声频率、声强和作用时间 3 个参数设计的均匀试验, 研究不同参数组合的超声处理对活性污泥的活性和代谢过程的影响. 结果表明, 采用 28 kHz、20 W/L、2 min 这一参数组合的超声处理可以有效增强活性污泥的活性, 提高 COD 去除效果, 并减少污泥产量. 同时还研究了污泥浓度 MLSS 对超声处理效果的影响. 通过单因素多水平试验, 确定了适合于最佳超声参数组合的 MLSS 值. 对于本次试验所用污泥, MLSS 为 3 000 mg/L 时, 超声处理达到了理想效果. 根据试验结果, 还对低强度超声波影响活性污泥活性和代谢过程的机理提出了假说性解释.

关键词: 低强度超声波; 超声处理; 活性污泥; 参数组合

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)02-0392-05

Various Effects on the Activity of Activated Sludge by Low Intensity Ultrasonic Treatments with Different Parameter Combinations

LONG Teng-rui, JIANG Hong-bo, DING Wen-chuan

(Key Eco-Environment of Laboratory of Three Gorges Reservoir Region Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Aerobic activated sludge was used as experimental material. Specific oxygen uptake rate (SOUR), mixed liquor suspended solids (MLSS), COD ratio and λ ($\Delta\text{MLSS}/\Delta\text{COD}$) were taken as experimental indexes to indicate the changes of sludge activity and metabolism. The influences on activated sludge induced by ultrasonic treatments with different parameter combinations were studied by equal-distribution experiments about frequency, ultrasound intensity and irradiation time. The results indicated that the best parameter combination (28 kHz, 20 W/L, 2 min) led to an evident enhancement of sludge activity and reduced the sludge production at the same time. MLSS, as a vital factor which influences the ultrasonic treatment, was concerned in this study. To the sludge used in these experiments, the results of multilevel experiments showed that the MLSS of 3 000 mg/L induced to a relative highest performance after ultrasonic treatment with the best parameter combination. This article also hypothetically presented the mechanism of sludge activity enhancement stimulated by low intensity ultrasound.

Key words: low intensity ultrasound; ultrasonic treatment; activated sludge; parameter combination

超声波是一种特殊的能量传递方式, 在液态介质中传播时会产生热效应、机械效应以及空化效应^[1]. 低强度超声波可以改善细胞的传质效率^[2,3], 并提高整个细胞的新陈代谢效率, 加速细胞生长^[4~7]. 刘红^[8]等研究了强度为 0.3 W/cm², 辐照时间为 10 min 的超声波处理后 0~48 h 内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. 但活性污泥是一个复杂的微生物系统, 包含的物种丰富, 各种类的微生物对超声效应的适应能力是不同的; 而活性污泥的絮体结构、絮体强度、絮体颗粒大小、泥水混合液的粘度及表面张力等方面直接影响超声处理的效果. 因此, 各种活性污泥所对应的最佳超声作用参数组合(频率、声能密度、作用时间)是不相同的. 为不同性质的活性污泥选择最适宜的超声作用参数组合, 是目前尚未解决的问题.

本研究是在模拟高负荷活性污泥法处理高浓度有机废水的工艺中引入超声处理单元, 以 MLSS 和

SOUR 为主要考察指标, 结合 COD 去除率和污泥产率系数 λ 构成一个评价体系, 对各参数组合的超声作用效果进行评价, 以确定相对最佳超声作用参数组合. 同时, 根据试验结果, 对超声波影响污泥活性及代谢的机理进行了假说性解释.

1 材料与方法

1.1 污泥驯化

试验污泥取自重庆市某污水厂曝气池, 按序批次反应方式进行培养, 反应周期 12 h, 定时补充人工污水和排泥. 人工污水以葡萄糖为碳源, 尿素和硫酸氨为氮源, 磷酸氢二钾为磷源, 按照 COD:N:P=100:5:1 的比例进行配制. 溶液 pH 值控制在 6.7~7.5 之间, COD 污泥负荷率为 1.5 kg/(kg·d), 污泥龄

收稿日期: 2006-03-01; 修订日期: 2006-04-24

基金项目: 国家“十五”科技攻关计划项目(2004BA604A0T)

作者简介: 龙腾锐 (1939~), 男, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为水资源保护及水处理理论与技术, E-mail: Longtr@126.com

为 10 d.污泥经 3 周培养,性质基本稳定,MLSS 稳定在 3 000 mg/L.

1.2 试验仪器和测定方法

试验装置如图 1 所示,超声波发生器采用宁波新芝公司 CY-5D 型超声波生物促进生长仪,输出功率 0~50 W 可调,探头式换能器频率分别为 20 kHz、28 kHz 和 40 kHz.

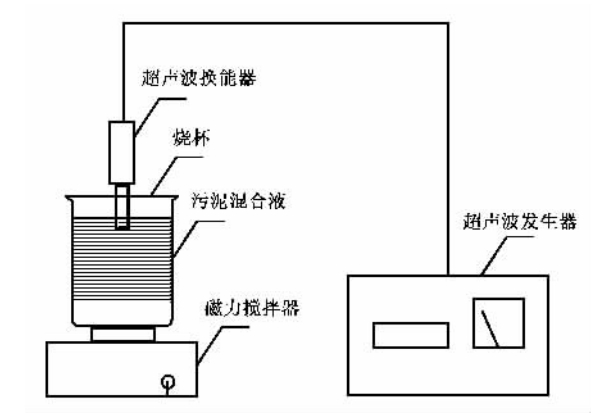


图 1 超声装置示意
Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic treatment system

试验中测定的指标包括 MLSS(混合液悬浮固体浓度)、SOUR(污泥比耗氧速率)及出水 COD. MLSS 的变化能直接反映活性污泥中微生物的生长情况. SOUR 是衡量污泥微生物代谢活性的重要指标.而 COD 随时间的变化则直接反映了污水中有机物的去除情况.

混合液 MLSS 采用 ROYCE 公司 MODEL-711 型 SS 仪测定. SOUR 采用 HACH 公司 HQ-10 便携式溶解氧仪测定,并按文献[9]中的方法操作. COD 采用 HACH 公司 DR/2010 型 COD 测定仪(PROGRAM 435)测定.

1.3 试验设计

1.3.1 均匀试验

频率、声能密度和作用时间是超声处理工况的基本参数.为考察不同工况对活性污泥活性及生长的影响,从而获得最佳超声作用参数组合,根据综合考察多个因素的试验特点,用 $U_7(7^6)$ 均匀设计表来安排试验^[10],具体的试验安排如表 1 所示.

0~6 号为有效容积均为 2L 的烧杯,在每个烧杯中投加 2 L 污泥(试验前将污泥空曝 12 h,调整 MLSS 为 2 000 mg/L).1~6 号烧杯具有相同的操作流程:①先将烧杯中的污泥充分曝气,使泥水混合液中的溶解氧浓度基本达到饱和(大约 7 mg/L);②按表 1 中的安排,对烧杯中的污泥进行超声处理;③按照 COD/MLSS = 1.5(质量比)的负荷率,向烧杯中加入

人工污水(成分组成与驯化污泥所用的人工污水相同);④连续反应 24 h,其中,前 6 h,每 1 h 测定 1 次 MLSS 及 SOUR;后 18 h,每 2 h 测定 1 次 MLSS 及 SOUR;整个运行过程中,每 2 h 测定 1 次出水 COD.0 号烧杯是对照反应器,其操作流程中,除没有超声处理外,其余同 1~6 号烧杯.

表 1 均匀试验安排表
Table 1 Arrangement of equal-distribution experiments

烧杯编号	超声工况	频率/kHz	声能密度/ $W \cdot L^{-1}$	作用时间/min
1	a	20	5	5
2	b	20	10	8
3	c	28	20	2
4	d	28	5	8
5	e	40	10	2
6	f	40	20	5

1.3.2 MLSS 单因素多水平试验

用 4 个有效容积均为 2 L 的烧杯作为 1~4 号反应器,各自对应的起始 MLSS 水平分别为 1 000 mg/L、2 000 mg/L、3 000 mg/L 和 4 000 mg/L.以 1.3.1 确定的最佳超声作用参数组合对各烧杯中的污泥进行超声处理,考察不同 MLSS 水平的污泥生长情况以及对 COD 的去除效果.连续反应时间均为 24 h,每 2 h 时测定 1 次 MLSS 及出水 COD,其余操作同 1.3.1.

2 结果与讨论

2.1 不同超声工况对污泥活性和代谢的影响

均匀试验结果如图 2~4 和表 2 所示.由图 2 可知,在 MLSS 上升阶段,即反应过程的前 6 h,1~6 号烧杯中污泥(以下简称 1~6 号)的 MLSS 增长速率均高于 0 号烧杯中的污泥(以下简称 0 号).各烧杯中污泥的 $MLSS_{max}$ 是不同的,与 0 号比较,1 号、2 号和 5 号的 $MLSS_{max}$ 高于 0 号;6 号的 $MLSS_{max}$ 与 0 号基本持平;而 3 号和 4 号的 $MLSS_{max}$ 则低于 0 号.如图 3 所示,在反应开始时,用不同工况超声处理后的 2~6 号的 SOUR 比 0 号均有大幅提升.值得注意的是,尽管各反应器污泥的 SOUR 变化曲线形状不同,但采用相同频率超声波处理的污泥,其变化趋势是相同的.其中,采用频率为 28 kHz 的超声波处理后,3 号和 4 号的 SOUR 在反应进行 2 h 后均达到了最大值,较其它烧杯中的污泥提前了 2 h.图 4 则反映了各烧杯中的污泥对 COD 的去除情况,1~6 号的 COD 去除速率和去除效果都较 0 号有不同程度地提高,其中以 3 号的 COD 去除速率最快,去除效果最好.由均匀试验的结果可以看出,各工况的超声处理均能

促进活性污泥的生长并提高 COD 去除效果,但是对污泥活性的影响具有一定差异.这些差异可以通过对各烧杯中污泥的产率系数和 COD 去除率的比较反映出来.

从表 2 可知,经 a、b、e 和 f 工况处理后,污泥的产率系数变化不明显,但 COD 去除率均有不同程度地提高;而采用频率为 28 kHz 的 c 和 d 工况处理后,

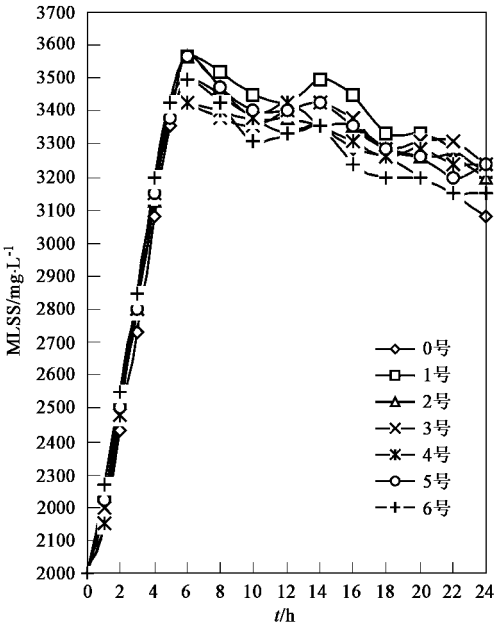


图 2 不同参数的超声处理对污泥增长的影响
Fig.2 Effects of different ultrasonic treatments on sludge growth

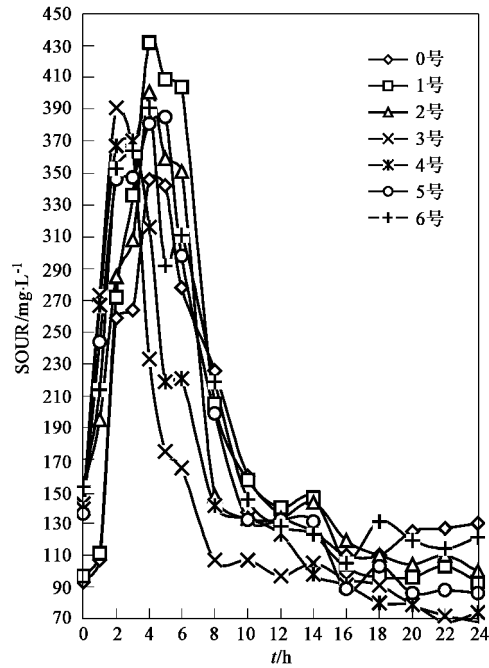


图 3 超声处理后污泥活性随时间的变化

Fig.3 Changes of activities of sludge after different ultrasonic treatments

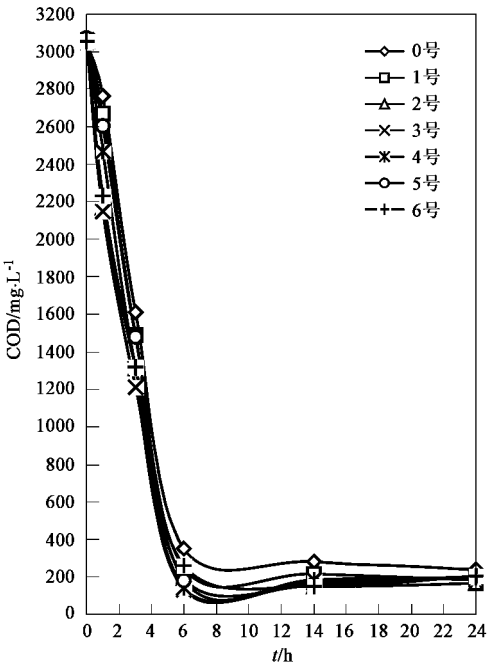


图 4 各反应器中 COD 随时间的变化

Fig.4 Changes of COD in different reactors

表 2 均匀试验数据分析¹⁾

Table 2 Data of equal-distribution experiments

烧杯 编号	超声 工况	MLSS _{max} /mg·L ⁻¹	COD ₀ /mg·L ⁻¹	COD ₁ /mg·L ⁻¹	λ	η /%
0		3 496	3 050	350	0.554	88.5
1	a	3 565	3 062	246	0.556	92.0
2	b	3 565	3 053	196	0.548	93.6
3	c	3 426	3 050	132	0.489	95.7
4	d	3 426	3 061	144	0.491	95.3
5	e	3 565	3 072	182	0.542	94.1
6	f	3 496	3 055	260	0.535	91.5

1) MLSS_{max} 为 MLSS 最大值; COD₀ 为 COD 起始值; COD₁ 为 MLSS 达到最大值时的出水 COD 值; η 为 MLSS 达到最大值时的 COD 去除率; λ 为 MLSS 达到最大值时污泥的产率系数($\Delta\text{MLSS}/\Delta\text{COD}$),下同

污泥的产率系数有明显下降, COD 去除率有显著提高.因此, c 和 d 工况导致的污泥活性的改变具有特殊性,特别是 c 工况(28 kHz、20 W/L、2 min),经其处理后的污泥 MLSS_{max} 最小,同时具有最高的 COD 去除率,而产率系数又最低. Yoon^[11] 等在膜生物反应器(MBR)中引入了超声处理单元,他们采用 20 ~ 40 kHz, 216 MJ/kg 的高强度超声波对剩余污泥进行分解破碎处理,可将 70% ~ 100% 的剩余污泥溶解.将处理后的污泥回流到 MBR 中,从而实现了剩余污泥的零产量.这一工艺虽然可以有效地抑制剩余污泥的产生,但其导致了 MBR 中污泥沉降和脱水性能的下降,出水水质恶化,同时还消耗大量能量.在本试验中,经 c 工况处理后,污泥的产率系数降低了 11.7%, COD 去除率提高了 8.1%,由于采用了低声

强,故能耗很低. Schläefer^[12]等的研究表明,间歇且多次的超声处理比连续长时间的超声处理更加有利于激活微生物的活性,而 c 工况仅仅是单次短时间的超声处理,若用 c 工况以适当的间歇时间和次数对污泥进行处理,能否更有效地提高出水水质,并更多地降低污泥产量,这还需要进一步的试验研究来证实.因此 c 工况对于活性污泥法工艺的改进具有积极意义,在均匀试验中,c 工况对应的超声参数组合为最佳参数组合.

低强度超声波处理对微生物活性的影响机理主要归结为 2 方面^[13]:①超声波对细胞传质效率的影响,这主要是通过超声空化效应导致细胞壁通透性的改变来实现;②超声波对酶活性的影响,这方面的机理目前尚处于探索阶段,机理尚不明确.从代谢的角度看,细胞内的代谢可以分为 2 个过程,即分解代谢和合成代谢^[14].Schläefer^[12]等提出:仅有细胞代谢的几个步骤会受到超声波的促进,而对于其他代谢步骤,超声波不但不会起促进作用甚至会有负面影响.对于活性污泥而言,可以将 SOUR 及 MLSS 的变化情况分别看作污泥中微生物细胞分解代谢和合成代谢的宏观表现.对本次试验中 c 工况的试验结果进行分析不难发现,c 工况对细胞的分解代谢有明显促进作用,而对细胞的合成代谢有一定的抑制作用.由此可以推测,超声作用对于酶活性的影响具有一定的选择性.c 工况很可能在促进了分解酶活性的同时抑制了合成酶的活性.经 c 工况处理后的细胞与正常细胞相比,分解代谢会更多地消耗 COD,然而分解代谢所产生的能量和小分子物质有相当部分并未被用于细胞的合成,其去向如何有待探索.刘红^[8]等提出,适当强度的超声波对细胞造成的微损伤可能会激活细胞的自我修复机能,在维持自身生长的同时还兼顾细胞的修复,以保证完整的细胞功能.所以,细胞的修复过程将消耗部分由分解代谢所产生的能量和小分子物质.但这一假说还需要更进一步的研究来加以证实.

2.2 污泥浓度 MLSS 对超声作用效果的影响

分析图 5、图 6 和表 3 可知,污泥的起始 MLSS 分别为 1 000 mg/L、2 000 mg/L 和 3 000 mg/L 时,对 1.3.1 得出的最佳超声参数组合均有很好的适应性,COD 去除速率快,去除效果好;当起始 MLSS 为 4 000 mg/L 时,污泥在超声作用后,达到 $MLSS_{max}$ 的时间较其它 MLSS 水平的污泥延迟了 2 h;同时,COD 去除速率变慢,达到最大去除率的时间推迟了 2 h.比较表 3 中的数据可知,污泥的 MLSS 起始值对超声

处理效果有显著影响,但两者之间并无线性关系,所以存在最佳 MLSS 起始值.浓度为 3 000 mg/L 时,污泥经最佳参数组合的超声处理后,COD 去除速率最快,最大去除率最高,故该浓度最适合于最佳参数组合的超声处理.

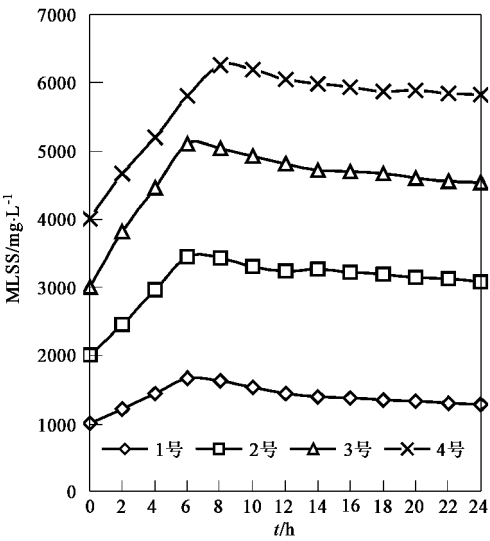


图 5 不同 MLSS 的污泥在超声处理后的生长曲线

Fig.5 Growths of sludge with different MLSS after ultrasonic treatments

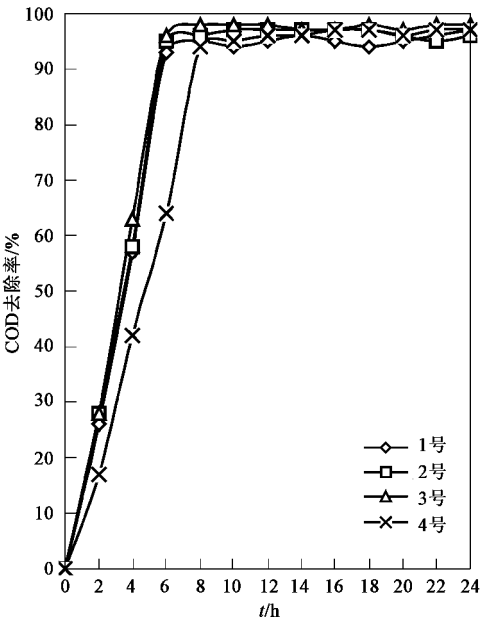


图 6 各反应器 COD 去除率随时间的变化

Fig.6 Changes of COD ratios in different reactors

超声波对微生物活性的影响主要是依靠超声空化效应,不论是细胞通透性的改善还是酶的催化活性的改变,都与空化效应的范围和强度密切相关^[13].泥水混合液是污泥絮体颗粒在水中形成的一个分散系,由于分散的固体颗粒会破坏液态介质的

表 3 MLSS 单因素多水平试验数据
Table 3 Data of MLSS multilevel experiments

烧杯 编号	MLSS ₀ /mg•L ⁻¹	MLSS _{max} /mg•L ⁻¹	COD ₀ /mg•L ⁻¹	COD ₁ /mg•L ⁻¹	λ	η / %
1	1 000	1 664	1 550	98	0.457	93.7
2	2 000	3 443	3 052	146	0.497	95.2
3	3 000	5 107	4 562	178	0.480	96.1
4	4 000	6 263	6 051	378	0.398	93.8

连续性和完整性.因此,在超声场中,絮体颗粒与液态介质之间的固-液交界面很容易形成空化核,这些空化核分布于絮体颗粒的表面及内部,当空化核的谐振频率等于超声波频率时,就会发生超声波能量的最大耦合,此时最容易产生空化^[15].另一方面,介质的粘滞系数和表面张力系数直接影响着超声空化的强度,对于相同的声强引发的空化效应而言,介质的粘滞系数和表面张力系数越高,则空化的强度越高^[16].所以 MLSS 值应该适宜,过低或过高都会对最佳参数组合的超声波产生的空化效应的范围和强度产生影响,进而影响超声处理的效果.对图 6 和表 3 进行分析,可以推测,当 MLSS 起始值达到4 000 mg/L 时,很可能由于过高的空化范围和空化强度,对细胞产生了过度损伤,细胞的代谢功能受到负面影响,从而导致了 COD 的降解速率变缓.虽然产率系数有明显降低,但由于细胞被过度破坏,部分死亡细胞的残体进入到混合液中,这相当于增加了难生物降解的物质并提高了污泥的 COD 负荷率,从而使得出水 COD 明显增加.所以,用最佳参数组合的超声波对 4 000 mg/L 的污泥进行处理,没有达到理想的效果.但另一方面,很可能高浓度的污泥采用更低强度的超声波处理就能获得理想的处理效果.若将污泥浓缩后再进行适当强度的超声处理,将会节约大量的电能,同时可以缩小超声处理构筑物的规模,节约基建投资.

3 结论

(1) 不同工况的超声作用对活性污泥的活性及代谢会产生不同的影响.因此在确定最适宜工况时,可以对频率、声能密度、作用时间这 3 个超声参数选取适当的水平范围,进行多因素多水平均匀试验或正交试验,以确定相对最佳的参数组合.

(2) 本试验中,28 kHz、20 W/L、2 min 这一参数组合的超声作用对污泥的处理达到了最理想的效果,在提高 COD 去除速率和去除率的同时,减少了污泥的产量,这一现象对活性污泥法工艺具有积极

意义.本试验只研究了单次短时间超声处理,但其提高污泥活性的效果有限.因此,采用间歇且多次的超声处理来达到更好的处理效果是很有可能.

(3) 超声波对污泥的处理过程,主要是利用了超声空化效应.用不同浓度污泥进行试验的结果表明:污泥的 MLSS 值会影响超声处理的效果.其原因主要在于不同的 MLSS 对超声空化的范围和强度的影响不同.所以,确定适合于某参数组合超声处理的 MLSS 值是必要的.本试验中,适应最佳超声参数组合的 MLSS 值为3 000 mg/L.

参考文献:

[1] 袁易全,陈思忠.近代超声原理与应用[M].南京:南京大学出版社,1996. 5~6.

[2] Prausnitz M R, Keyhani K, Parsons A. Size, lifetime and permeability of ultrasound-mediated cell membrane disruptions [J]. American Society of Mechanical Engineers, Bioengineering Division (Publication) BED, 1999, 42: 679~680.

[3] Chu C P, Chang B V, Liao G S, *et al.* Observations on changes in ultrasonically treated waste-activated sludge [J]. Water Research, 2001, 35(4): 1038~1046.

[4] Stephen B, Clive B, Deborah W. The effects of ultrasound on the activities of some glycosidase enzymes of industrial importance [J]. Enzyme and Microbial Technology, 1996, 18(3): 190~194.

[5] 张元标,李文权,王清池,等.超声辐射对海水小球藻的生物效应[J].厦门大学学报(自然科学版),2001, 40(3): 653~657.

[6] Dai C Y, Wang B C, Duan C R, *et al.* Low ultrasonic stimulates fermentation of riboflavin producing strain *Ecemothecium ashbyii* [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2003, 30: 37~41.

[7] 高大维,高文宏,雷德柱,等.线形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.

[8] 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.

[9] 郝晓地,张自杰.活性污泥耗氧速率的测定及其影响因素试验分析[J].环境科学与技术,1991, 3: 35~39.

[10] 邓勃.分析测试数据的统计处理方法[M].北京:清华大学出版社,1995. 346.

[11] Yoon Seong-Hoon, Kim Hyung-Soo, Lee Sangho. Incorporation of ultrasonic cell disintegration into a membrane bioreactor for zero sludge production [J]. Process Biochemistry, 2004, 39: 1923~1929.

[12] Schlaefer O, Sievers M, Klotzbuecher H, *et al.* Improvement of biological activity by low energy ultrasound assisted bioreactors [J]. Ultrasound, 2000, 38: 711~716.

[13] 刘晓艳,丘泰球,刘石生,等.超声对细胞膜通透性的影响及应用[J].应用声学,2002, 21(2): 26~29.

[14] 王希成.生物化学[M].北京:清华大学出版社,2000. 199~200.

[15] 李晖.超声波强化液-固传质的机理研究[J].沈阳化工学院学报,1994, 8(30): 175~182.

[16] 王萍辉.超声空化影响因素[J].河北理工学院学报,2003, 25(4): 154~161.