

超声波对污泥破解及改善其厌氧消化效果的研究

蒋建国, 张妍, 张群芳, 陈懋喆, 杜雪娟

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 利用槽式超声波发生器对城市污水处理厂剩余污泥进行处理, 研究超声波对污泥的破解效果以及破解后污泥消化产气能力的改善情况, 分别比较超声波发生方式、处理时间、功率和声能密度等因素对污泥破解及厌氧消化等特性的影响。结果表明, 经过超声波处理后的污泥在厌氧反应初期, 其产气速率增长较为明显。同时, 单频超声波处理后污泥的厌氧产气累积增量高于双频超声波, 为 40.93%, 而双频超声波处理后污泥的 SCOD 溶出量大, 比单频高 23.5%。

关键词: 超声波; 污泥; 双频; 破解; 厌氧消化

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)10-2815-05

Improvement of Disintegration and Anaerobic Digestion for Sewage Sludge with Ultrasonic Generator

JIANG Jian-guo, ZHANG Yan, ZHANG Qun-fang, CHEN Mao-zhe, DU Xue-juan

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Ultrasonic generating trough was applied to study the impact of ultrasonic on conditioning of sewage sludge. There are few ultrasonic generators for sludge treatment specifically, so we designed a double-frequency ultrasonic generating trough which could adjust frequency, energy density and treating time flexibly. In the research characteristics of sewage sludge treated by single-frequency and double-frequency ultrasonic were compared. According to the results, the digestion biogas of the sewage sludge treated by ultrasonic increase obviously, and the digestion biogas increment of the sewage sludge treated by single-frequency is 40.93%, higher than that treated by double-frequency. But the SCOD of the sewage sludge treated by double-frequency is 23.5%, more than that treated by single-frequency.

Key words: ultrasonic; sludge; double-frequency; disintegration; digestion

城市生活污水厂污泥是由有机残片、细菌菌体、胶体、各种微生物和有机、无机颗粒组成的, 含水率 达到 90% ~ 99%^[1]. 目前我国城市污水处理厂的污泥(干)年排放量约 120 万 t^[2], 英国污水厂污泥(干)年产量也达到 110.7 万 t^[3]. 如此大量的污泥积累, 将会占用大面积的土地, 同时其性质很不稳定, 如果处理不当, 将对生态环境造成极其严重的影响. 厌氧消化技术是实现污泥减量化、无害化和资源化的有效途径, 但常用的厌氧消化工艺存在着污泥生物降解性能低、产气速率慢、消化池体积庞大等缺点. 已有研究表明超声波的空化作用可使得污泥溶液中的溶解性有机物(SCOD)含量增高^[4], 实现污泥性质的改变^[5]. 杨金美等^[6]利用超声波强化初沉池污泥沉降与脱水, 使得一次污泥脱水泥饼含水率降低 2.9%. Tiehm 等^[7]利用低频超声波技术处理污泥, 使厌氧消化的停留时间从 22 d 下降至 8 d, 产气量也有显著提高. 声化学研究结果表明, 双频、三频超声波辐照产生的效果远大于单频产生效果之和^[8]. 污泥超声波破解技术, 可有效改善污泥生物降解性能, 提高厌氧消化速率, 已成为当前污泥处理技术研究的热点. 但同时超声波对污泥结构和性质的影响还

未得到系统研究, 用于污泥处理的超声波设备研发在国内也尚处空白.

为了更好地利用超声波技术强化污泥厌氧消化的效果, 本试验针对污泥特性, 设计了槽式双频超声波发生器, 研究污泥超声波破解促进厌氧消化技术, 以期后续开发实用的污泥超声波预处理技术及相关设备提供参考.

1 材料与方法

1.1 污泥来源

试验用污泥取自北京市某污水处理厂浓缩池, 该厂污水处理工艺采用活性污泥法. 污泥含水率为 96% ~ 97%, 溶解性有机物(SCOD)为 693.76 ~ 747.29 mg/L.

1.2 试验装置

破解装置: 试制超声波发生器, 频率在 19、25、40、80 kHz, 功率 200 ~ 500 W, 时间 0 ~ 60 min. 装置见图 1(a). 该实验装置上下面均有独立控制的换能

收稿日期: 2007-10-09; 修订日期: 2007-12-15

作者简介: 蒋建国(1970 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为固体废物处理处置与资源化, E-mail: jiangguoj@tsinghua.edu.cn

器,可实现单频、双频甚至副频超声发生方式.同时可以弥补目前普遍使用的探头式发生器能量过于集中的缺点,达到超声波能量的均匀分布.

厌氧消化装置:由 500 mL 锥形瓶和导气管组成,采用排水法测定产气量.试验中取 100 mL 污泥样品,100 mL 接种污泥和 50 mL 去离子水混合装入密封瓶,在 $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$ 恒温条件下培养.实验装置图见图 1(b).

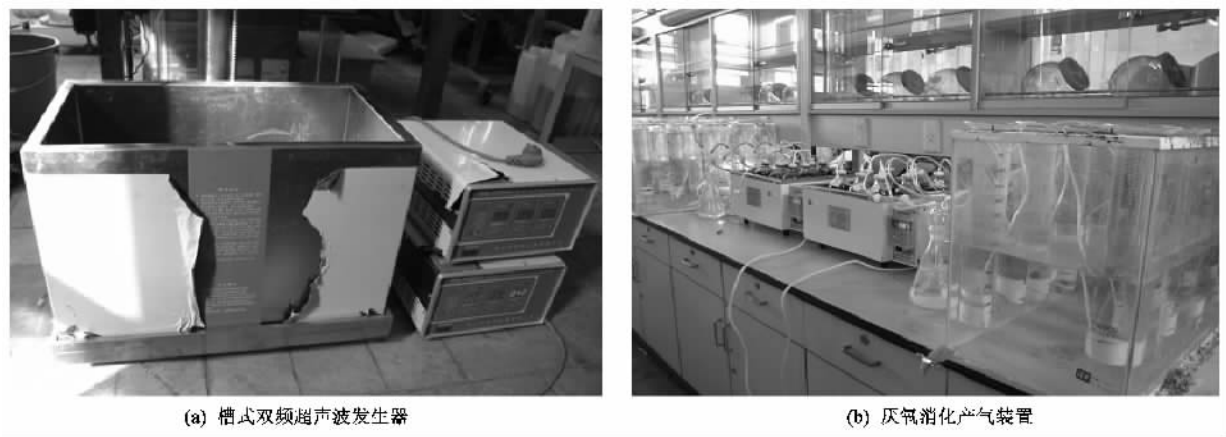


图 1 实验装置

Fig.1 Experiment equipment

2 结果与讨论

2.1 不同超声波发生方式对污泥厌氧产气量和产气率的影响

图 2 与图 3 分别比较了在同等能量输入条件下,不同超声波发生方式对污泥厌氧产气总量与产气速率的影响.试验中采用 80 kHz 的超声波,辐射时间为 20 s.从图 2 可以看出,在输入总能量相等的情况下,单频超声波破解后的污泥其产气量要高于

1.3 试验步骤

将污泥置于超声波发生器内,设定不同的超声波发生方式、功率、频率与时间,对污泥进行破解处理.

用超声波处理后的污泥、接种污泥、水等加入厌氧消化瓶,置于 $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$ 恒温水浴反应,间歇摇动消化瓶以使各相混合均匀,以相同量接种污泥作空白对比,每日测定污泥产量.

双频超声波.当输入能量达到 100 W/L时,单频超声波的产气增量为 40.93%,而双频超声波仅为 23.98%;当输入能量达到 125 W/L时,单频超声波的产气增量为 40.93%,而双频超声波仅为 26.32%.从图 3 可以看到,单频和双频超声波处理后的污泥在厌氧产气前期其产气率提高较为显著,同时 2 种超声波发生方式对污泥厌氧产气速率提高的影响较为接近,而在后期,这种影响就变得较小.

2.2 超声波频率对污泥厌氧产气量和产气速率的影响

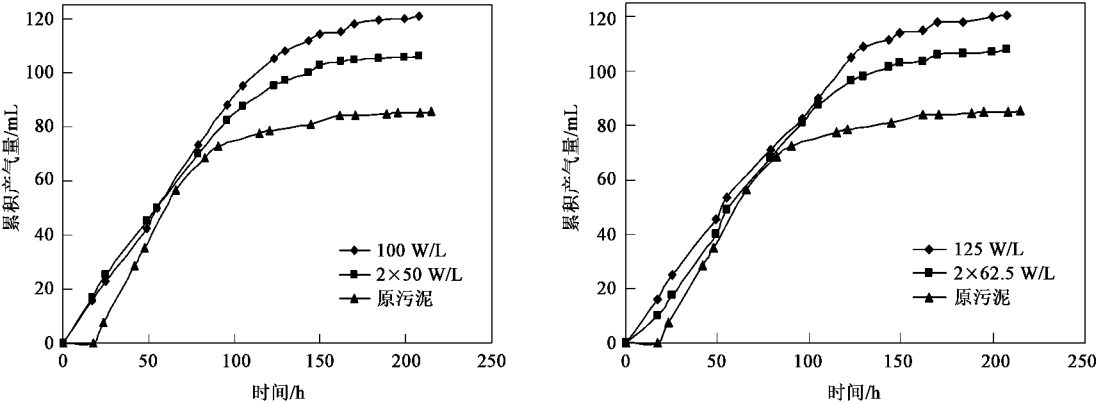


图 2 超声波发生方式对累积产气量的影响

Fig.2 Effect of ultrasonic generating mode on cumulative gas production

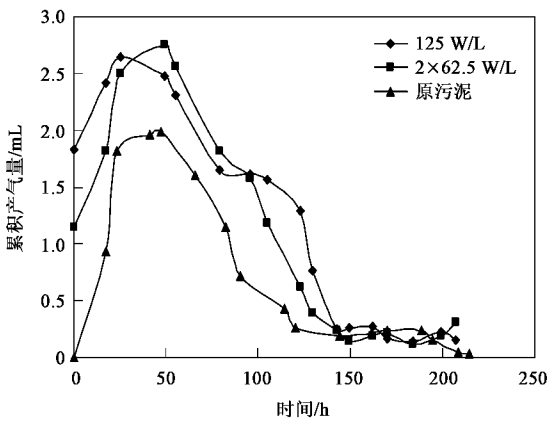
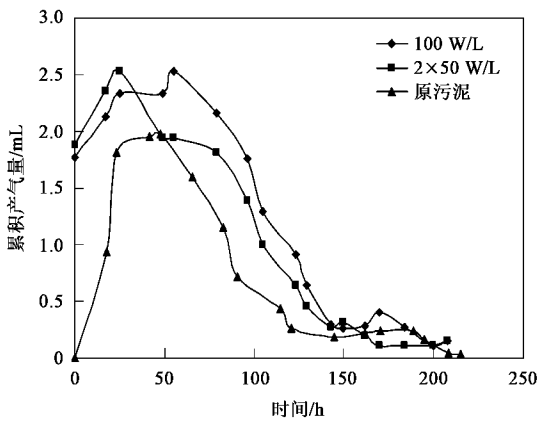


图 3 超声波发生方式对产气速率的影响

Fig.3 Effect of ultrasonic generating mode on gas production rate

影响

从图 4 可以看出,能量密度为 75 W/L 时,80 kHz 的超声波处理后的污泥产气量增加 30% ~ 50%,而 19 kHz 的超声波则使产气量增加 20% ~ 40% .

由于细胞壁结构比较紧密,需要较强的空化作用才能将其破坏,使污泥的可生化性能提高^[9],因此,较高的超声波频率更有利于污泥的厌氧产气.但是,并非频率越高越有利.过高的超声波频率会限制溶液空化过程的启动^[10].因此在实际应用中一般考虑使用中低频超声波.

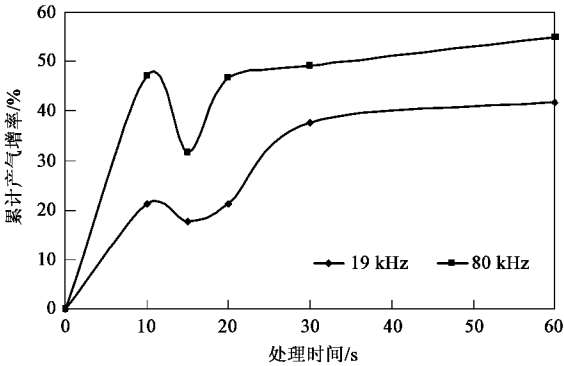


图 4 超声波频率对累积产气增率的影响

Fig.4 Effect of ultrasonic frequency on cumulative gas production increment ratio

2.3 超声波处理时间对污泥厌氧产气能力的影响

图 5 和图 6 分别比较了 19 kHz、75 W/L 的超声波处理不同时间后污泥样品的累积产气量与产气速率.从图 5 可知,超声处理可明显提高污泥的产气量,且随着处理时间的增加,污泥产气能力也随之增加.10 s 超声处理可使得累积产气量提高 31 mL,增加率为 21.23%,处理 60 s 后累积产气量可增加 61

mL,增加率为 41.78%,约为前者增加量的 2 倍.

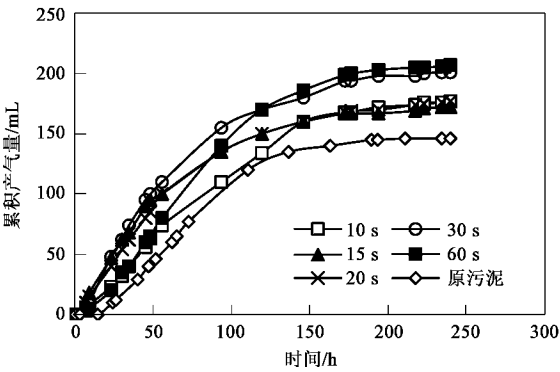


图 5 超声波处理不同时间的累积产气量

Fig.5 A cumulative gas production at various treatment time with ultrasonic(19 kHz)

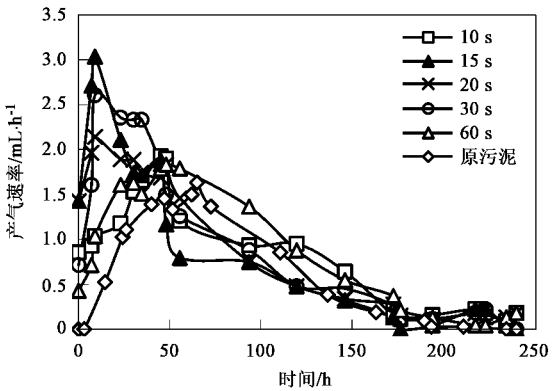


图 6 超声波不同处理时间的产气速率

Fig.6 Gas production rate at various treatment time with ultrasonic

此外,超声波也能加速污泥的产气速率,特别是在污泥产气的初期.从图 6 可以看到,经过超声波预处理后的污泥启动时产气速率均大大高于原污泥.

以处理时间 15 s 为例,厌氧产气开始,其产气速率即达到 1.5 mL/h,到约 20 h 时,产气速率达到最大值为 3.04 mL/h,约为原污泥的 2 倍。

在本试验中,采用的超声波频率、声能密度及处理时间都相对较小,对细胞产生创伤较小,却增加了物质进出细胞的容易程度,因此可以增加污泥的产气量与速率.但是过多的延长超声波处理时间,既会增加污泥预处理的成本,也有可能杀死污泥中的微生物,反而降低污泥活性从而限制污泥厌氧产气的能力^[11]。

2.4 超声波声能密度对污泥厌氧产气能力的影响

从图 7 中可以看出,随着能量输入的增加,污泥厌氧产气总量也随之逐渐增大.当声能密度为 75 W/L 时,经过超声波处理后污泥产气量比原污泥增加 61 mL,增加率为 41.78%.当声能密度为 125 W/L 时,累积产气量比原污泥增加约 1 倍。

超声波声能密度决定了溶液中空化数目的多少以及振幅的大小.声能密度越大,空化数目也越多,振幅越大,从而对污泥细胞壁的破坏程度越高.在试验中的声能密度范围内,超声波声能密度的增加显著改善污泥的厌氧产气能力.但是有报道称,污泥中细菌对超声波相当敏感,对超声波场的适应是局限于一个较小的范围内^[12].因此,过高的能量输入可能严重抑制污泥中细菌的活性,使得酶失活,从而降低污泥厌氧产气的能力。

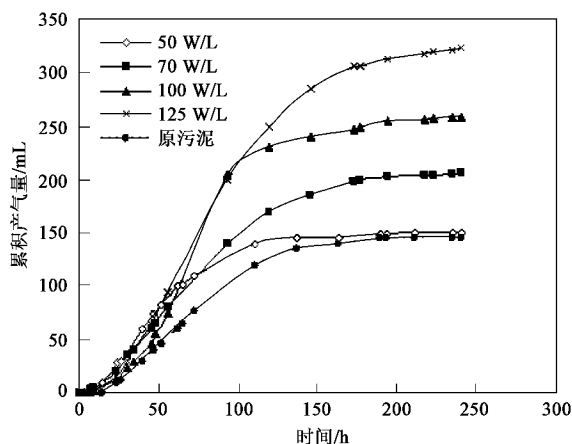


图 7 超声波处理时声能密度对累积产气量的影响(25 kHz, 60 s)

Fig.7 Effect of ultrasonic intensity on cumulative gas production

2.5 超声波破解对污泥中 SCOD 的影响

本实验从污泥 SCOD 及架桥离子浓度变化两方面研究超声波对污泥破解性能的影响。

由图 8 知,在超声频率、总能量输入、处理时间完全相同的条件下,双频超声波处理的效果优于单

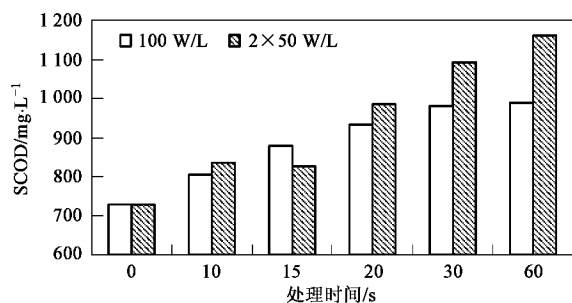


图 8 单频与双频超声波对污泥溶液中 SCOD 的影响

Fig.8 Effect of single-frequency ultrasonic and double-frequency ultrasonic on SCOD in sludge solution

频超声波.当处理时间 > 20 s 时,双频超声处理产生的 SCOD 增量大于单频,处理时间越长,双频 SCOD 增量比单频越大.当处理时间为 60 s 时,双频 SCOD 增量为 432 mg/L,比单频 SCOD 增量 260 mg/L 增加了约 23.5%。

图 9 比较了同等条件下单、双频超声波对架桥离子的影响.可以看出,两者对架桥离子影响的程度与趋势相当,对于 Ca^{2+} ,其浓度都有随时间先增长而后缓慢降低的过程; Mg^{2+} 的浓度则经历一个增长后进入平台期,时间的延长对浓度的影响不再明显.2 种发生方式处理后, Ca^{2+} 的浓度均在 20 s 时达到最大值,其中单频浓度为 1037 mg/L,双频浓度为 979 mg/L,之后有所降低. Mg^{2+} 的浓度最大值分别为 57 mg/L 和 60 mg/L,并且基本维持不变。

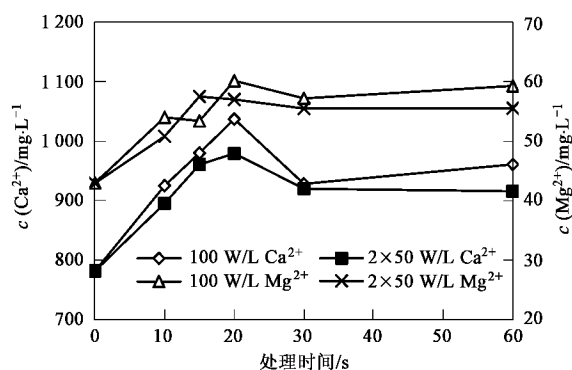


图 9 单频与双频超声波对架桥离子浓度的影响

Fig.9 Effect of single-frequency ultrasonic and double-frequency ultrasonic on bridging ion concentration

双频超声波能够明显提高污泥的 SCOD,表明双频超声波对于污泥破解有明显的促进作用.而对架桥离子浓度的影响,本试验条件下双频效果则与单频相当,可能是由于影响污泥架桥离子释放的因素更为复杂.虽然双频超声波能带来更高的化学产额,

可以产生更多的空化气泡与水力剪切作用,但是 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与絮体之间的吸附作用还受到絮体电位、不同价态离子的竞争等作用的制约,因此双频超声波带来的架桥离子浓度增加,为上述因素所缓冲,故而在结果中双频超声波对架桥离子浓度的影响不如SCOD的明显.

研究表明,超声波除了可以提高污泥的 SCOD,还会直接或间接影响微生物的活性^[13,14],从而影响厌氧消化的效果.但是,超声波辐射强度超过一定值,会严重影响微生物活性.几乎所有细菌菌体都会被高强度的超声波破坏,但敏感程度有所差异^[15].在本试验中,虽然双频超声波产生的较高化学产额能够有效提高 SCOD 的溶出,但是过高的空化效果也可能损害微生物的活性,因此本试验中双频超声波对污泥厌氧产气能力的提高不及单频超声波.但是根据以上分析,双频超声波应该存在一个参数范围,使得 SCOD 的增加与微生物活性的降低之间取得较好的平衡,从而获得良好的促进效果.

3 结论

(1)经过超声波处理后,污泥的初期厌氧产气速率和产气累积增量明显增加,说明超声波处理有利于污泥厌氧消化反应的启动,污泥的厌氧产气性能得到了显著改善.

(2)影响污泥破解效应的主要因素为超声波频率、声能密度和作用时间,在一定范围内采用低频超声波,处理时间越长、声能密度越大,则污泥厌氧产气能力越大.

(3)双频超声波对污泥 SCOD 溶出的促进效果优于单频.当处理时间为 60 s 时,双频超声波作用后 SCOD 增量比单频时增加了约 23.5%.架桥离子浓度受超声波发生方式影响的差异不大.

(4)输入总能量相等情况下单频超声波作用后污泥厌氧产气总量略大,而声波发生方式对于厌氧产气速率的影响较小,单频、双频的发生方式其产气速率的变化曲线基本相同,且都较原污泥的产气速

率有所提高.

参考文献:

- [1] Ormeci B, Vesilind P A. Development of an improved synthetic sludge: A possible surrogate for studying activated sludge dewatering characteristics [J]. *Water Research*, 2000, **34**(4): 1069-1078.
- [2] 尹军, 谭学军. 污水污泥处理处置与资源化利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.18-19.
- [3] Davis R D, Hall J E. Production, treatment and disposal of wastewater sludge in Europe from a UK perspective [J]. *European Water Pollution Control*, 1997, **7**(2): 9-17.
- [4] Chu C P, Chang B V, Liao G S, *et al.* Observation on Changes in Ultrasonically Treated Waste-activated Sludge [J]. *Water Research*, 2001, **35**(4): 1038-1046.
- [5] 王琳, 王宝贞. 污泥减量技术[J]. *给水排水*, 2000, **26**(10): 28-31.
- [6] 杨金美, 张光明, 王伟. 超声波强化一次污泥沉降与脱水性能的研究[J]. *应用声学*, 2006, **25**(4): 206-211.
- [7] Tiehm A, Nickel K, Neis U. The use of ultrasound to accelerate the anaerobic digestion of sewage sludge [J]. *Water Science & Technology*, 1997, **36**(11): 121-128.
- [8] 冯若, 朱昌平, 赵逸云, 等. 双频正交辐照的声化学效应研究[J]. *科学通报*, 1997, **42**(9): 925-928.
- [9] Tiehm A, Nickle K, Neis U. Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization [J]. *Water Research*, 2001, **35**(8): 2003-2009.
- [10] 冯若, 黄金兰. 超声清洗及其物理机制 [J]. *应用声学*, 1993, **13**(1): 42-47.
- [11] Bruus J H, Nielsen P, Kieding K. The stability of activated sludge flocs with implications to dewatering [J]. *Water Research*, 1992, **26**: 1597-1602.
- [12] Piyasena P J, Mohareb E, McKellar R C. Inaction of microbes using ultrasound: a review[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2003, **87**: 207-216.
- [13] 林影, 高大维, 梁宏. 微超声波对胞壁克鲁维氏酵母葡萄糖酶生产的作用[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 1997, **25**(10): 110-113.
- [14] Dinno M, Dyson M, Young S, *et al.* The significance of membrane changes in the safe and effective use of therapeutic and diagnostic ultrasound[J]. *Phys Med Bio*, 1989, **15**: 397-401.
- [15] Sfaa A H, Christina B. Effect of low-dose ultrasonic treatment on *Spirulina maxima*[J]. *Aquacultural Engineer*, 1998, **19**: 17-28.