

污泥的超声破解及其对微生物活性的影响

李欢, 金宜英*, 聂永丰

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 同步测定了超声处理过程中污泥破解程度、微生物活性、颗粒大小等参数的变化, 并分析了不同参数之间的内在联系及超声参数对污泥微生物活性的影响. 结果表明, 污泥颗粒的超声处理过程可以分为 2 个阶段: 首先絮体破碎为直径十几 μm 的小凝集体, 胞外有机质溶出, 微生物游离出来, 活性增强; 随后小凝集体被进一步破坏, 污泥颗粒直径降至 10 μm 以下, 微生物胞内有机质溶出, 活性明显下降. 由于污泥的不均匀性, 2 个阶段并非截然分开, 短时间内, 污泥破解程度低于 20% 时, 以絮体破碎为主, 污泥活性提高 20% 以上; 当污泥破解程度在 20% ~ 40% 之间时, 部分微生物开始受到损伤, 污泥活性提高不到 20%; 当污泥破解程度高于 40% 时, 大部分微生物受到损伤, 污泥活性迅速下降. 低强超声可以在较长处理时间内使大部分污泥颗粒停留在絮体破碎阶段, 有效避免微生物的破坏, 因此适用于增强污泥微生物活性.

关键词: 剩余污泥; 超声处理; 微生物活性

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)09-2674-04

Ultrasonic Sludge Disintegration and Its Influence on Sludge Microbial Activity

LI Huan, JIN Yi-ying, NIE Yong-feng

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

Abstract: The changes of sludge disintegration degree, microbial activity and particle size were examined synchronously, and the relationships between the changes and the effect of ultrasonic parameters on microbial activity were also analyzed. The results show that the process of ultrasonic sludge treatment can be divided into two stages: at the first stage, sludge flocs are disrupted into small micro-floc aggregates with the diameter of 10-20 μm , the extracellular organic substances are dissolved, bacteria are dissociated from flocs, and the microbial activity is enhanced; at the second stage, the micro-floc aggregates are disintegrated further into bacteria bodies with the diameter less than 10 μm , the intracellular organic substances are released, and the microbial activity are decreased. The two stages are not entirely separated because sludge is inhomogeneity. When sludge disintegration degree is lower than 20%, sludge floc disruption is the main effect and the microbial activity can increase over 20%; when sludge disintegration degree is between 20%-40%, some bacteria are hurt and the microbial activity can increase by less than 20%; when sludge disintegration degree is over 40%, most bacteria are damaged and sludge activity would decrease quickly. Because low energy ultrasonic can disrupt sludge floc with no damage to microorganism in a long treatment duration time, it is suitable to stimulate sludge microbial activity.

Key words: waste activated sludge; ultrasonic treatment; microbial activity

低频超声在液体中传播时会产生空化作用, 并在空化泡破碎瞬间产生高温、冲击波和射流, 这种极端的物理环境也会在水中形成羟基自由基, 此外超声作用还会引起污泥温度的上升. 这些效应可以促使污泥絮体破碎, 细胞解体, 固态有机质溶出^[1], 因此从 20 世纪 90 年代起, 超声处理作为一种污泥破解技术被引入到污泥处理领域^[2]. 经超声破解预处理后, 污泥的厌氧消化性能可以得到大幅提升, 消化时间缩短, 而产气量增加^[3].

虽然持续的超声处理会使污泥中的细菌灭活, 但研究者也发现, 低强度的超声刺激不仅不会灭活细菌, 反而有助于提高微生物活性^[4]. 一般认为, 这是由于适当的超声处理促进了反应物质的扩散和传输, 改变了细胞膜的通透性, 提高了胞外酶的产率^[5]. 对于不同类型的微生物而言, 适用的超声强度和作用时间都不同^[6-8]. 对于活性污泥而言, 适当的

低强超声处理可以打破絮体, 使细菌游离出来, 从而促进底物和氧气的传输, 增强微生物代谢活性, 进而提高活性污泥处理污水的效率^[9].

目前超声破解预处理改善污泥厌氧消化性能的研究已经引起了广泛关注^[10], 而超声刺激污泥活性提高污水处理效率的研究也已起步^[11-14]. 虽然在超声处理污泥的过程中, 存在着污泥微生物活性增强和灭活 2 种情况, 但由于这 2 种效应应用于不同的领域, 对它们的研究也一直分别进行. 本研究试图通过同步进行的污泥破解和微生物活性实验, 揭示超声处理过程中污泥破解和微生物活性之间的内在联系.

收稿日期: 2008-10-07; 修订日期: 2008-12-25

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAC02A18); 国家博士后科学基金项目(20080430368)

作者简介: 李欢(1979~), 男, 博士后, 主要研究方向为污泥和生活垃圾处理与资源化, E-mail: sunpace@vip.163.com

* 通讯联系人, E-mail: jinyy@tsinghua.edu.cn

系,并对超声处理改善污泥微生物活性的机制进行探讨,从而有利于更好地掌握超声处理污泥的规律,促进超声技术在污泥处理领域的应用.

1 材料与方法

1.1 试验装置

在超声处理污泥的规模应用中,一般采用阵列式或管道式反应器,而在实验室中一般采用探头式或槽式反应器.本实验采用昆山超声设备有限公司生产的 KQ318T 超声清洗器,超声频率为 25 kHz,固定功率 50 W,反应容器总容积约 2 L,声能密度通过加入污泥样品的体积来控制.由于刺激污泥微生物活性适宜采用较低强度的超声处理,因此试验中超声声能密度为 0.05 ~ 0.4 W/mL,作用时间 0 ~ 16 min.

1.2 试验样品

污泥样品为深圳某污水处理厂剩余浓缩污泥,污泥含水率 98.7%,悬浮固体含量(SS)为 11 500 mg/L,挥发性悬浮固体含量(VSS)为 9 460 mg/L.污泥 TCOD_{NaOH} 为 7 216 mg/L.污泥样存放在 4℃ 冰箱内待用.

1.3 分析方法

污泥含水率、SS、VSS 采用重量法测定;pH 和温度采用 Cyberscan 510 台式 pH 计测定;污泥粒径分布测定采用马尔文 mastersizer2000 激光粒径分析仪.

超声处理过程中污泥的破解程度一般用污泥有机质的溶出量对污泥最大可溶出量的比值表示,即:

$$DD_{COD} = \frac{SCOD - SCOD_0}{TCOD_{NaOH} - SCOD_0} \quad (1)$$

式中,SCOD 为污泥样中溶解性 COD,SCOD₀ 为原污泥样的溶解性 COD,TCOD 为污泥总的可溶出 COD,但由于活性污泥存在颗粒结构,TCOD 很难准确测定,因此一般用 0.5 mol/L NaOH 处理 24 h 后污泥的 SCOD 值表示,即 TCOD_{NaOH},该条件下污泥有机碳溶出量超过 55%^[15].

测定 SCOD 时,污泥样首先经离心机离心 10 min(5 000 r/min),上清液经 0.45 μm 滤膜过滤后采用重铬酸钾法测定 COD,其中消解步骤采用广东韶关科力实验仪器有限公司生产的 WMX-III-A 型微波消解仪.

污泥比耗氧速率(specific oxygen uptake rate, SOUR)的测定:取污泥样 50 mL 放入 500 mL 广口瓶中,再加入纯水(25℃)充满,溶氧探头和曝气头通过带孔橡胶塞插入溶液中,用磁力搅拌器进行搅拌.首

先用曝气头充氧至饱和,停止曝气,在密封条件下用 Orion850A⁺ 溶氧仪测定溶解氧(DO)值随时间的变化曲线至 DO 低于 2.0 mg/L,得到曲线的下降斜率 Slope [mg·(L·min)⁻¹],则:

$$SOUR = \frac{-Slope \times 0.5}{0.05 \times SS} \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1} \quad (2)$$

2 结果与讨论

2.1 超声处理过程中污泥的破解效果及微生物活性变化

在不同低声能密度条件下,污泥的有机质溶出量和微生物活性的变化如图 1 所示.总体上,污泥有机质的溶出量随声能密度的提高和处理时间的延长而增加,但污泥微生物活性却先增加后减小.这说明在超声作用下,污泥絮体首先发生解体,絮体内包含的有机质和细菌被释放出来,一方面污泥 SCOD 增加,同时由于氧气和营养底物传输的增强,污泥微生物活性增加;而随着超声输入能量的进一步增强,缺乏絮体保护的细菌胞体也逐渐被破坏,胞内有机质开始泄漏,这导致污泥 SCOD 的进一步增加,但污泥微生物活性逐渐下降.

图 1 还说明,不同声能密度条件下,超声作用对污泥破解和微生物活性的影响不同.在 0.05 W/mL 的声能密度下,污泥 SCOD 在试验时间范围内变化很小,但在较大作用时间范围内均促进了污泥微生物活性,这说明虽然过低声能密度的超声并不能明显有效破解污泥,但也可以通过改变污泥絮体结构(如使其更加松散)来促进传质,进而提高污泥微生物活性.0.2、0.3 和 0.4 W/mL 等 3 种声能密度的超声,对污泥微生物活性有促进作用的时间范围较窄,促进效果有限,而且一旦超过某一作用时间,污泥微生物活性即急剧下降;而 0.05 和 0.1 W/mL 2 种低声能密度的超声,对污泥微生物活性的促进效应最明显,而且在一定时间范围内污泥微生物活性均有明显增加.因此综合考虑,低声能密度的超声更适用于提高污泥微生物活性.

2.2 污泥破解程度与微生物活性的关系

比较污泥有机质溶出情况和微生物活性的变化情况,用 DD_{COD} 表示污泥的超声破解程度,用 SOUR 的增加率表示污泥活性的变化,两者之间的关系如图 2.可以看出,整体上污泥 SOUR 提高率随着破解程度的增加而逐渐减小,这一变化可以大致划分为:破解程度在 1% ~ 20% 时,污泥絮体或菌胶团破碎,微生物游离出来,氧气和底物交换增强,活性明显增

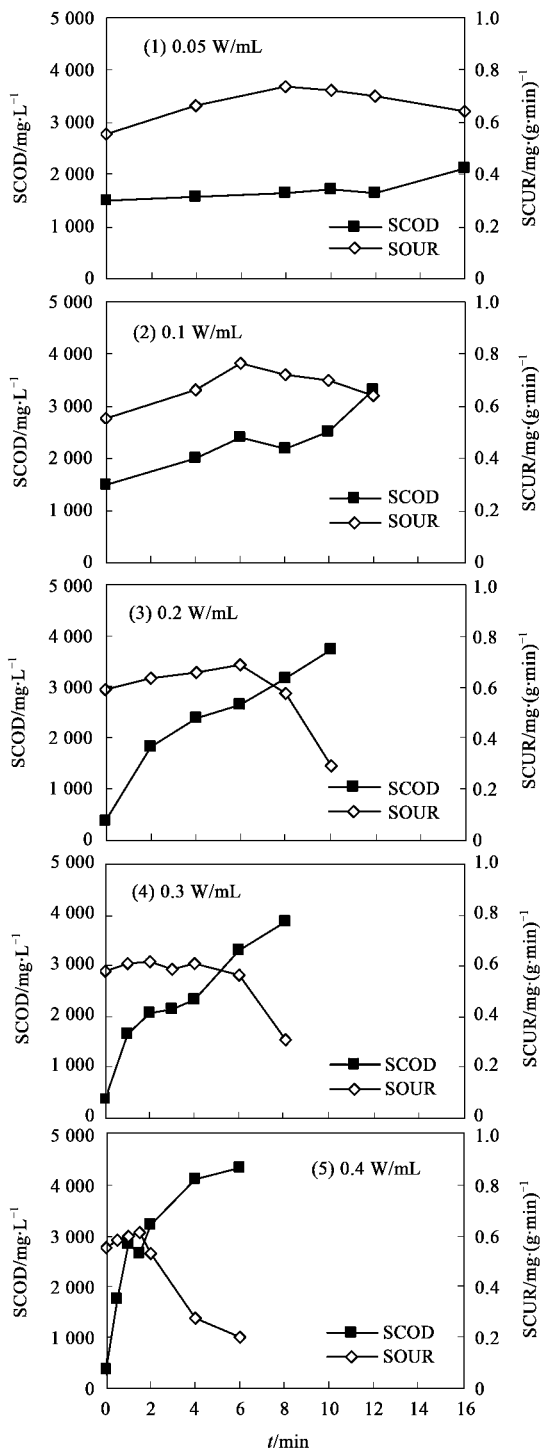


图1 超声处理过程中污泥破解效果(SCOD)和微生物活性(SOUR)的变化

Fig.1 Variation of SCOD and SOUR during ultrasonic sludge treatments

加, SOUR 提高 20% ~ 40%; 破解程度在 20% ~ 40% 时, SOUR 提高在 20% 以内, 这一阶段部分细菌开始受到超声损伤, 但整体上由于传质的改善, 污泥活性仍有一定增加; 破解程度超过 40% 后, 大部分细菌发生不同程度的分解, 污泥活性下降较快. 当然, 污

泥并不是均一物质, 不同菌胶团或细菌的外部抵抗力不同, 所以灭活和活化作用必定同时存在, 主导效应依赖于不同的超声参数.

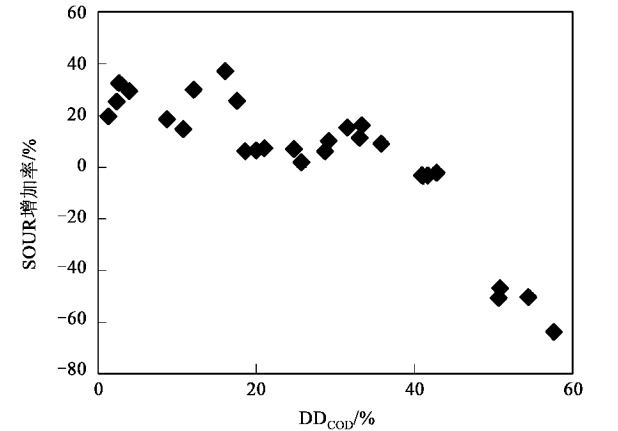


图2 超声处理过程中污泥微生物活性变化与污泥破解程度的关系
Fig.2 Relationship between sludge microbial activity and disintegration degree during ultrasonic treatment

2.3 超声参数对污泥微生物活性的影响

根据前面的分析, 提高超声声能密度, 则污泥活性出现最大值所需的超声作用时间越短, 这说明超声输入能量影响污泥破解程度并进而影响污泥活性变化, 但超声输入能量并不直接决定污泥活性变化. 声能密度和作用时间的乘积为超声输入能量, 表 1 表明, 在同样能耗条件下, 较低的声能密度和较长的作用时间更有利于污泥活性的改善, 即低强度长时间的超声刺激比短时间高强度的刺激更有效. 虽然可以用 DD_{COD} 的变化大致控制污泥的 SOUR 变化范围, 但在不同的污泥破解程度范围内, SOUR 的变化并不与 DD_{COD} 呈明显的线性相关关系, 这是因为 DD_{COD} 反映的是污泥 SCOD 的变化情况, 而 SCOD 的增加并不与污泥絮体颗粒的变化情况直接有关, 在低强度超声作用下, 经过较长时间, 污泥的破解有可

表 1 固定输入能量条件下超声参数对污泥破解效果和微生物活性的影响

Table 1 Effects of ultrasonic energy intensity and duration time on sludge disintegration degree and microbial activity at the same energy inputs				
输入能量 /J·mL ⁻¹	声能密度 /W·mL ⁻¹	作用时间 /min	DD _{COD} /%	SOUR 提高率 /%
24	0.05	8	2.62	32.51
	0.1	4	8.57	18.51
	0.2	2	21.05	7.38
48	0.1	8	12.09	29.97
	0.2	4	29.17	10.26
	0.4	2	41.67	-3.16

能仍以絮体破碎为主,而高强度超声作用时,短时间内,即有可能造成污泥絮体内微生物的损伤.

2.4 污泥微生物活性变化时的颗粒尺寸特征

为了进一步了解超声处理过程中污泥微生物活性变化的过程和机制,实验同步考察了污泥颗粒尺寸分布的变化(图 3).根据 Jorand 等^[16]的污泥絮体结构模型,污泥絮体约 125 μm ,它由大小约 13 μm 的微絮凝体组成,而微絮凝体由更小的约 2.5 μm 的颗粒(单个细菌或多个细菌等)组成.当微絮凝体从污泥絮体上脱离下来时,由于传质的增强,微生物活性将增加.在本试验中,由于污泥样品经过放置,絮体有所解体,尺寸相对较小.采用超声处理,当声能密度为 0.4 W/mL 时,处理 1.5 min 后,污泥 SOUR 达到最大值,此时污泥颗粒的分割粒径(d_{50})为 18.6 μm ,略大于微絮凝体的尺寸,而进一步延长超声处理时间,受到损伤的细菌增多,污泥颗粒的分割粒径(d_{50})也逐渐减少到 10 μm 以下,而污泥微生物活性大幅降低.

虽然根据上述分析,污泥微生物活性的变化与污泥絮体结构存在相关性.但是由于不同来源污泥的絮体结构存在较大差异,并不能根据统一的污泥颗粒尺寸变化推断污泥活性的改变.

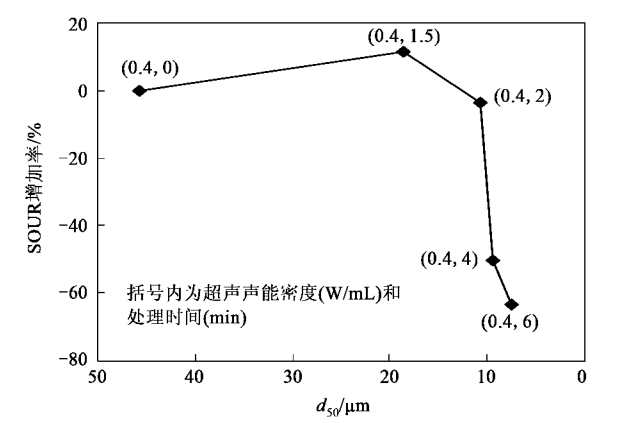


图 3 超声处理过程中污泥微生物活性变化与污泥颗粒尺寸分布的关系

Fig.3 Relationship between the changes of sludge microbial activity and sludge particle size distribution during ultrasonic treatment

3 结论

(1)污泥破解程度在 20% 以下,以絮体破碎为主,污泥微生物活性明显增加;污泥破解程度在 20% ~ 40%,部分细菌受到损伤,污泥微生物活性转为下降,但总体活性仍高于未处理时;污泥破解程度在 40% 以上,大量细菌受到破坏,污泥微生物活性迅速降低.

(2)超声作用下,首先污泥絮体分散为小凝集体,释放出絮体内部的有机质,氧气和底物的传输增强,微生物活性提高;随着超声的进一步作用,组成小凝集体的细菌或细菌团被进一步破坏,胞内有机质泄漏,溶解性有机物进一步增加,微生物活性迅速下降.

(3)低声能密度超声适于刺激污泥生物活性,它能在不损伤微生物的同时改变污泥絮体结构,从而在较大的处理时间范围内促进氧气和底物的传输.

参考文献:

[1] 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.

[2] Tiehm A, Nickel K, Neis U. The use of ultrasound to accelerate the anaerobic digestion of sewage sludge [J]. *Water Science and Technology*, 1997, **36**(11): 121-128.

[3] Gronroos A, Kyllonen H, Korpijarvi K, *et al.* Ultrasound assisted method to increase soluble chemical oxygen demand (SCOD) of sewage sludge for digestion [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2005, **12**(1-2): 115-120.

[4] 胡嘉东, 王宏杰, 董文艺, 等. 低强度超声提高污泥活性的运行条件优化[J]. *给水排水*, 2008, **34**(1): 20-23.

[5] Pitt W G, Ross S A. Ultrasound increases the rate of bacterial cell growth [J]. *Biotechnology Progress*, 2003, **19**(3): 1038-1044.

[6] Wu J, Lin L. Ultrasound-induced stress responses of *Panax ginseng* cells: Enzymatic browning and phenolics production [J]. *Biotechnology Progress*, 2002, **18**(4): 862-866.

[7] Liu Y, Yoshikoshi A, Wang B, *et al.* Influence of ultrasonic stimulation on the growth and proliferation of *Oryza sativa* Nipponbare callus cells [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2003, **27**(4): 287-293.

[8] Liu 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**(2): 105-116.

[9] Rai C L, Struenkmann G, Mueller J, *et al.* Influence of ultrasonic disintegration on sludge growth reduction and its estimation by respirometry [J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, **38**(21): 5779-5785.

[10] 杨洁, 季民, 刘卫华, 等. 污泥超声预处理促进厌氧消化反应试验[J]. *天津大学学报*, 2006, **39**(10): 1205-1208.

[11] Schlaefer O, Sievers M, Klotzbuecher H, *et al.* Improvement of biological activity by low energy ultrasound assisted bioreactor [J]. *Ultrasonics*, 2000, **38**(1-8): 711-716.

[12] Schlafer O, Onyeché T, Bormann H, *et al.* Ultrasound stimulation of micro-organisms for enhanced biodegradation [J]. *Ultrasonics*, 2002, **40**(1-8): 25-29.

[13] 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.

[14] 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.

[15] Tiehm A, Nickel K, Zellhorn M, *et al.* Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization [J]. *Water Research*, 2001, **35**: 2003-2009.

[16] Jorand F, Zartarian F, Thomas F, *et al.* Chemical and structural (2D) linkage between bacteria within activated sludge flocs [J]. *Water Research*, 1995, **29**: 1649-1654.