

污泥超声处理及其在好氧消化中的应用

李欢¹, 金宜英^{1*}, 聂永丰¹, 李雷², 杨海英²

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 广州铬渣处理新技术工程有限公司, 广州 510600)

摘要: 污泥好氧消化工艺可以有效实现污泥的稳定和减量, 为了进一步提高好氧消化的效率, 促进有机质的降解, 在对污泥超声处理性能研究的基础上, 考察了不同超声辅助处理手段对污泥好氧消化的影响. 结果表明, 经 1.0 W/mL 超声处理 10 min 后, 污泥上清液中溶解性 COD 增加了 5.4 倍, 污泥总悬浮固体减少了 16%; 而经 0.05 W/mL 超声处理 10 min 后, 污泥比耗氧速率可提高 29%. 用这 2 种超声预处理好氧消化的进泥时, 污泥有机质降解率没有明显改变, 但用 1.0 W/mL 超声处理好氧消化的回流污泥时, 污泥有机质降解率提高了 15%, 而且消化污泥的沉降性能良好, 上清液中有有机质含量增加很少, 因此, 后者可以用于改善污泥好氧消化工艺.

关键词: 剩余污泥; 好氧消化; 超声破解; 污泥活性

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)07-1512-06

Ultrasonic Sludge Treatment and Its Application on Aerobic Digestion

LI Huan¹, JIN Yi-ying¹, NIE Yong-feng¹, LI Lei², YANG Hai-ying²

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Chrome Residue Treatment Technology and Engineering Inc, Guangzhou 510600, China)

Abstract: In order to enhance the degradation efficiency of waste activated sludge (WAS) in conventional aerobic digestion, various ultrasonic assisted treatment methods were investigated including ultrasonic disintegration of influent sludge, ultrasonic improvement of influent sludge activity and ultrasonic disintegration of return sludge. Firstly the effects of ultrasonic sludge treatment were studied to choose appropriate ultrasonic parameters, and then the experiments of aerobic digestion with different ultrasonic treatments were carried out. The results show that 1.0 W/mL, 10 minutes ultrasonic treatment can increase soluble chemical oxygen demand (SCOD) in the supernatant phase of sludge sample by 5.4 times and decrease total suspended solid (TSS) by 16%; 0.05 W/mL, 10 min ultrasonic treatment can increase the specific oxygen uptake rate (SOUR) of sludge sample by 29%. The two kinds of ultrasonic influent sludge pretreatment can't improve aerobic digestion effectively. Ultrasonic return sludge disintegration can enhance the volatile suspended solid (VSS) degradation ratio by 15%. Furthermore, the settlement performance of digested sludge is still good and the pollutant concentrations of supernatant phase increase slightly. So ultrasonic return sludge disintegration is considered as the most appropriate assisted treatment mode for aerobic digestion.

Key words: waste activated sludge; aerobic digestion; ultrasonic disintegration; microbial activity

在污水污泥处理过程中, 一般采用厌氧消化工艺或好氧消化工艺以减少污泥质量, 实现污泥稳定. 虽然传统污泥好氧消化工艺 (conventional aerobic digestion, CAD) 投资低, 操作简单, 无臭味, 消化污泥上清液有机质含量低, 但由于曝气能耗较高, 一般仅用于中小型污水处理厂^[1]. 为了进一步改善 CAD 工艺, 研究者又开发了缺氧/好氧消化工艺 (anoxic/aerobic digestion, A/AD)^[2~4], 高温好氧消化工艺 (thermophilic aerobic digestion, TAD)^[5, 6] 和自热式高温好氧消化工艺 (autothermal thermophilic aerobic digestion, ATAD)^[7, 8] 等, 虽然这些工艺不同程度地改善了好氧消化的处理效果, 但也提高了工艺费用和操作难度. 由于颗粒态有机质的水解是消化的限速步骤, 因此通过破解污泥促进有机质溶出, 提高水解效率有可能以比较简单的方式改善污泥的好氧消化. 这些破解方法包括超声处理^[9~13]、热处理

碱处理^[16]和机械处理^[17]等, 它们可以打破污泥絮体乃至细胞, 释放出絮体和细胞内的有机质, 目前这些方法主要用于研究改善污泥的厌氧消化, 而用于好氧消化的研究报道很少, 仅 Kim 等^[18]报道了用不同破解方法处理进泥对 TAD 工艺的影响. 除破解预处理外, 刺激污泥的生物活性, 提高其内源呼吸效率, 也可能改善污泥的好氧消化, 目前低声能密度超声刺激污泥生物活性已经被用于研究提高污水的处理效率^[19~22]. 既然好氧消化过程是活性污泥工艺的延续, 因此低声能密度超声处理也可能改善污泥的好氧消化.

超声破解污泥需要较高的声能密度, 而刺激污泥活性需要较低的声能密度. 本实验为了研究超声

收稿日期: 2006-07-18; 修订日期: 2006-09-03

作者简介: 李欢 (1979 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为污泥处理与资源化, E-mail: sunpace@vip.163.com

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

处理污泥的 2 种效应及其在好氧消化中的作用,参考相关报道,分别选择代表性的 1.0 W/mL 和 0.05 W/mL 2 种声能密度,考察了污泥破解效果和生物活性随超声处理时间的变化规律,在此基础上选择适当的超声参数,比较了超声破解进泥、超声刺激进泥生物活性和超声破解回流污泥等 3 种作用方式对好氧消化的影响。

1 材料与方 法

1.1 污泥性质

污泥样品为深圳市某污水处理厂浓缩剩余污泥,在 4℃ 下保存,污泥总悬浮固体 (total suspended solid, TSS) 为 11.5 ~ 19.5 g/L,挥发性悬浮固体 (volatile suspended solid, VSS) 为 9.5 ~ 14.7 g/L。

1.2 超声处理实验

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。本实验中,超声破解污泥采用浙江宁波新芝生物科技股份有限公司生产的 JY92- 型超声波细胞粉碎机 [图 1(a)], 频率 20 kHz,最大功率 600 W,变幅杆直径为 6 mm,反应容器采用 200 mL 烧杯,变幅杆浸入液面下 1 cm。破解时,采用 1.0 W/mL 的超声声能密度,作用时间 0 ~ 25 min,处理后测定污泥性质的变化。超声改善污泥生物活性采用江苏昆山超声设备有限公司生产的 KQ318T 超声清洗器 [图 1(b)], 频率 25 kHz,功率 50 W,反应容器尺寸为 15 cm × 15 cm × 10 cm,声能密度通过加入污泥样品的体积来控制。处理污泥时,采用 0.05 W/mL 的超声声能密度,作用时间 0 ~ 16 min,处理后测定污泥性质的变化。

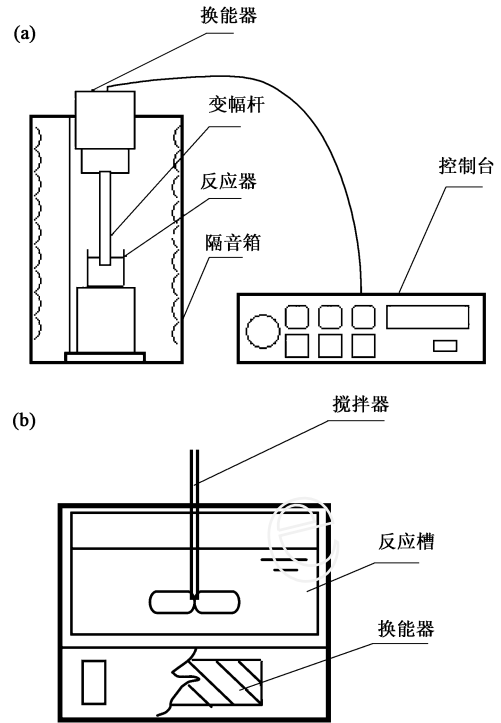


图 1 超声处理实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagrams of experimental devices

1.3 好氧消化实验

好氧消化试验装置采用湖南大学科教器材有限公司生产的 SBR-3 型柱式反应器,共 2 套反应系统,1 套用于超声辅助处理,另 1 套用于参比。每个反应柱有效容积 7 L,利用曝气系统实现搅拌功能,通过外部水循环可控制反应温度为 30℃。采用间歇式操作,污泥停留时间为 10 d,每日 1 次定时排泥进泥各 0.7 L,排泥用于分析。好氧消化反应器运行稳定后进行超声辅助处理试验 (表 1)。

表 1 超声辅助污泥好氧消化实验方式

Table 1 Operational modes of ultrasonic assisted aerobic digestion of sludge

超声作用方式	超声参数	运行时间/d	备注
超声破解进泥	1.0 W/mL, 10 min	0 ~ 21	每日在排泥后进泥前按回流比 1:7 取污泥进行破解,然后加回反应器
超声处理进泥	0.05 W/mL, 10 min	22 ~ 33	
破解回流污泥	1.0 W/mL, 10 min	34 ~ 45	

1.4 测定项目和方法

(1) 污泥含水率、TSS、VSS 采用重量法测定;pH 和温度采用 Cyberscan 510 台式 pH 计测定。

(2) 污泥破解效果用 COD 溶出情况 (soluble COD, SCOD) 表示。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。

(3) 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)] ,则 :

$$SOUR = \frac{-Slope \times 0.5}{0.05 \times TSS} \text{ mg/(g} \cdot \text{min)}$$

(4) 总氮 (TN) 测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 ; 总磷 (TP) 测定采用钼酸铵分光光度法 .

(5) 污泥沉降性能用 SV_{120} 表示 , 表示消化污泥在 100 mL 量筒中沉降 120 min 后的体积 .

2 结果与讨论

2.1 污泥超声处理的效果

2.1.1 破解污泥

超声处理对污泥性质的影响如图 2 . 在 1.0 W/mL 较高声能密度超声作用下 , 污泥 SCOD 迅速增加 , 0 ~ 25 min 内从 810 mg/L 增加至 6 499 mg/L , 在这一过程中 , 前 10 min 污泥 SCOD 增加较快 , 10 min 后增加减慢 [图 2 (a)] , 因此破解污泥时可以采用 1.0 W/mL , 10 min 的超声参数 .

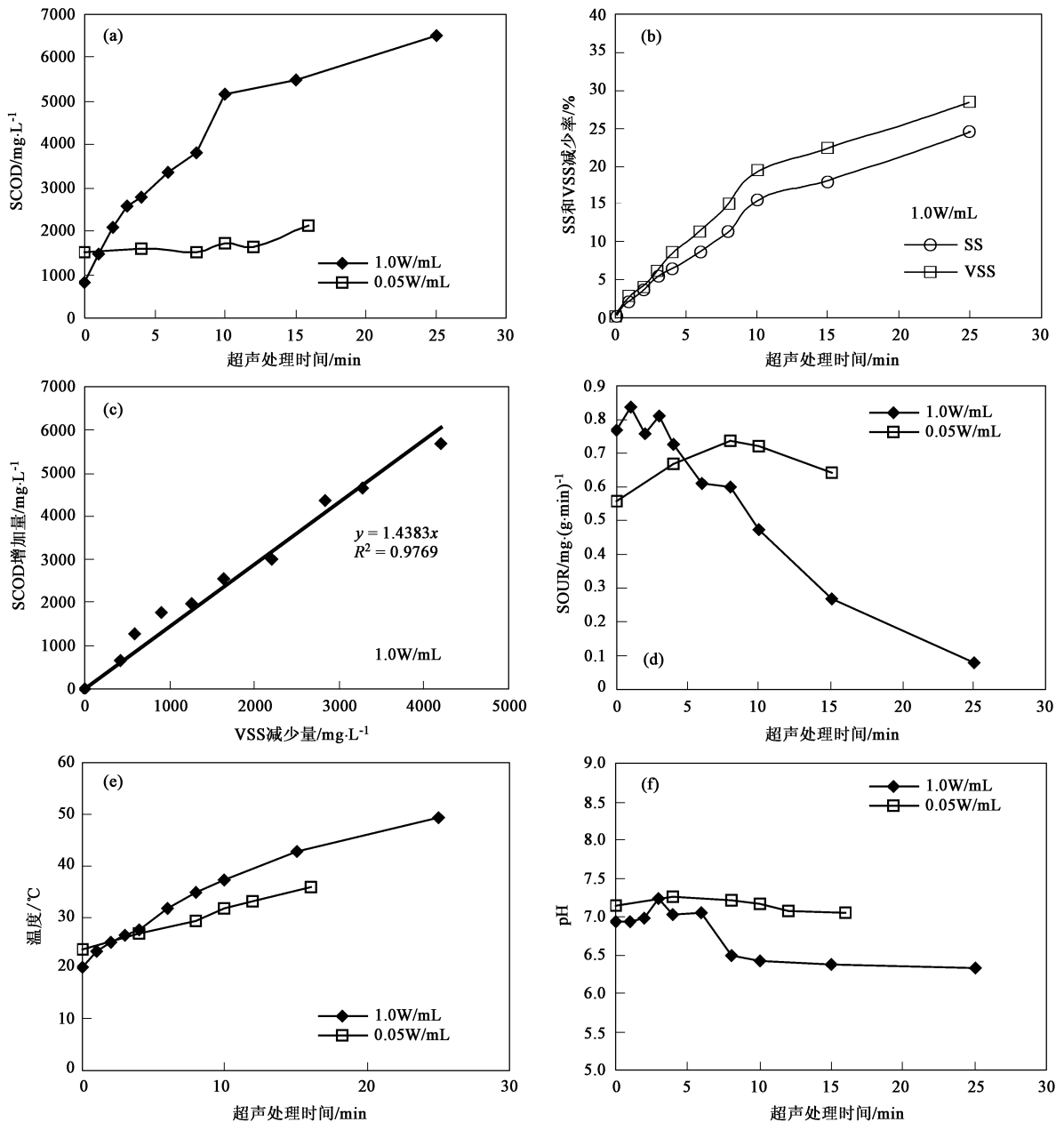


图 2 超声处理对污泥性质的影响

Fig. 2 Effects of ultrasonic sludge treatment for various duration of time

与此相应的是污泥 SS 和 VSS 的减少,10 min 时 SS、VSS 分别比超声前减少了 15.5%、19.3%,VSS/SS 从 75.4% 降至 72.0%,25 min 时 SS、VSS 分别比超声前减少了 24.3%、28.6%,VSS/SS 进一步降低到 71.1% [图 2(b)]. 比较 SS 和 VSS 的减少量发现,悬浮固体的减少主要是由于其中有机质的溶出,因此悬浮固体有机物含量逐渐降低,而无机物变化不大. 这说明较高声能密度超声作用下污泥絮体和部分细胞解体,有机质溶出,破解效果显著. 比较污泥上清液中 SCOD 的增加量和污泥中有机质的减少量可以发现两者有较好的相关性 [图 2(c)],说明污泥中有机质的溶出导致了 SCOD 的增加.

污泥 SOUR 的变化也可以从侧面说明污泥破解的效果,从图 2(d) 可以看出,1.0 W/mL 超声作用时,除开始的 2 min 外,污泥活性迅速下降,10 min 内从 0.77 mg/(g·min) 下降至 0.07 mg/(g·min). 这是由于超声处理在促进污泥有机质溶出的同时,也使污泥中的微生物受到了不同程度的损伤.

2.1.2 促进污泥生物活性

在 0.05 W/mL 超声作用下,SCOD 在试验期间变化很小,10 min 内从 1 501 mg/L 增加至 1 726 mg/L,说明低声能密度的超声在短时间内不能对污泥形成有效破解,文献 [12, 24] 也报道了类似结果.

污泥 SOUR 的变化呈现出先增加后降低的趋势 [图 2(d)],将 0.05 W/mL 与 1.0 W/mL 超声作用的效果进行比较,可以发现,声能密度越高,污泥活性达到最大值所需的时间越短,污泥活性增加的时间范围也越小. 低声能密度如 0.05 W/mL 超声对污泥活性的促进效应明显,而且在较长的时间范围内污泥活性均有明显增加. 这说明低强度、短时间的超声处理可以打破污泥絮体,促进氧气和底物的传输,从而提高微生物活性;提高超声强度或进一步延长作用时间,细菌受到损伤分解,污泥活性下降较快. 文献 [23] 也报道了类似现象.

2.1.3 温度和 pH 值变化

在 1.0 W/mL 和 0.05 W/mL 超声作用下,污泥温度随着作用时间的延长而增加,增加趋势基本符合线性关系,温度上升幅度取决于超声输入能量 [图 2(e)],这说明超声能量除用于产生空化作用外,还会转化为热能被污泥吸收,而热处理也有利于污泥的破解或促进污泥生物活性.

污泥 pH 值从另一方面反映了污泥上清液有机质的变化情况 [图 2(f)]. 1.0 W/mL 超声作用时,pH 值在初始阶段有所升高,这可能与蛋白质氨基酸碱

基的解离有关,污泥 pH 值整体呈下降趋势,这是由于污泥破解过程中脂肪会分解产生脂肪酸,此外核酸的溶出也会使 pH 下降,但总的 pH 变化范围不大 (最大降低 0.6). 而 0.05 W/mL 超声作用时,由于不能有效破解污泥,促进污泥有机质溶出,因此上清液 pH 变化也较小.

2.2 超声处理对污泥好氧消化的影响

根据 2.1 对试验结果的分析,超声破解污泥选择 1.0 W/mL 超声作用 10 min,超声促进污泥生物活性时选择 0.05 W/mL 超声作用 10 min. 将这 2 种参数超声按表 1 方式分别用于辅助污泥好氧消化,消化污泥 TSS 和 VSS 的变化如图 3,其平均值和 VSS 降解率如表 2. 根据污泥 VSS 降解率,不同超声处理方式的有效性为:超声破解回流污泥 > 超声改善进泥生物活性 > 超声破解进泥 > 传统好氧消化工艺. 考虑到实验误差,后 2 种方式对好氧消化几乎没有影响.

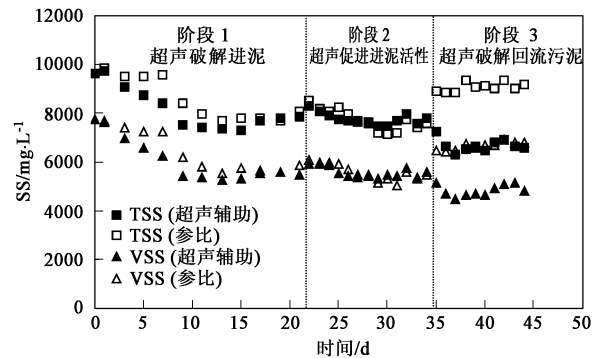


图 3 超声处理辅助污泥好氧消化的效果

Fig. 3 Effect of ultrasonic treatment on sludge degradation in aerobic digestion

2.2.1 超声破解进泥的效果

在开始的 10 d 内,2 个反应器处于启动阶段,此时超声辅助好氧消化反应器 (UAAD) 的 VSS 降解率明显高于参比反应器,然而随着消化反应器逐渐趋于稳定,两者消化污泥的悬浮固体含量也逐渐接近. 这是由于,一方面超声破解促进了污泥有机质释放,使其更容易被微生物利用;但另一方面,进泥中的微生物同时受到超声损伤,内源呼吸速率降低甚至停止,破解污泥只能被反应器内的微生物分解. 在 UAAD 反应器启动阶段,反应器内的污泥活性较高,破解污泥被充分利用,VSS 降解率较高,随着消化反应的进行,反应器内污泥活性逐渐降低,污泥破解的效果逐渐消失. 因此超声破解进泥不适于改善污泥好氧消化.

表 2 不同超声处理方式下进泥和消化污泥的悬浮固体浓度¹⁾

Table 2 Suspended solid concentrations of raw sludge and digestion sludge at three stages

阶段	污泥状况	TSS/mg L ⁻¹	VSS/mg L ⁻¹	VSS 平均降解率/%
1	进泥	11 528	9 463	
	UAAD ²⁾ 排泥	7 572 ±97	5 422 ±54	42.7
	CAD ³⁾ 排泥	7 833 ±65	5 678 ±52	40.0
2	进泥	12 164	9 994	
	UAAD ²⁾ 排泥	7 756 ±75	5 568 ±67	44.3
	CAD ³⁾ 排泥	7 738 ±133	5 574 ±101	44.2
3	进泥	13 780	11 140	
	UAAD ²⁾ 排泥	6 780 ±130	4 889 ±97	56.1
	CAD ³⁾ 排泥	8 932 ±143	6 553 ±118	41.2

1)表中数据为每个阶段的平均值和 95%置信区间(阶段 1 采用后 11 d 数据计算);2)超声辅助污泥好氧消化工艺(ultrasonic assisted aerobic digestion, UAAD);3)传统污泥好氧消化工艺,参比

2.2.2 超声促进进泥生物活性的效果

0.05 W/mL 超声预处理时,消化污泥 VSS 与 CAD 工艺相比没有明显变化.这可能有 2 个原因,一方面,低强超声的作用效果受到多种因素的影响^[20],污泥性质改变时,即使考虑实验误差,低强超声的作用效果也不稳定.在该阶段 UAAD 工艺中,0.05 W/mL 超声处理 10 min 使污泥 SOUR 值从 0.35 mg/(g·min) 升高至 0.45 mg/(g·min).另一方面,污泥消化是 1 个减速过程,进泥的活性相对较高,本身容易消化分解,此时再加低强超声作用就不明显.

如果对系统内污泥进行低强超声处理,试验表明,经 0.05 W/mL 超声作用 5 min 和 10 min,污泥生物活性分别降低了 7.8% 和 4.1%.这说明经一段时间消化后,微生物趋于死亡,对超声的抵抗力明显下降.因此低强超声也不适宜用于系统内污泥的处理.

2.2.3 超声破解回流污泥的效果

每日取出部分污泥,经 1.0 W/mL 超声处理 10 min 后加回反应器内,这种方式可以明显改善污泥的好氧消化.由于回流污泥已经经过约 24 h 消化,易降解有机物已经被消化除去,而剩余有机物主要以颗粒态存在,难以被进一步分解利用,通过超声处理使这部分有机物溶出,从而可以提高污泥的 VSS 降解率.除 VSS 降解率外,消化污泥其它性质如表 3. UAAD 反应器消化污泥 SV₁₂₀ 低于参比,而 SV₁₂₀/TSS 值类似,表明 UAAD 消化污泥具有良好的沉降性能,这是由于在好氧消化过程中微生物活动可以促使被超声破碎的污泥絮体重新絮凝^[24].消化污泥 pH 值略高于参比,这是由于回流污泥增加了系统内可利用的有机物,一定程度抑制了硝化反应^[25],从而使 pH 值略有增加,有利于污泥消化.消化污泥液

相 SCOD、TN 和 TP 的浓度相对参比略有增加.因此超声破解回流污泥,当回流比适当时,可以在促进有机质降解的同时,保证消化污泥的良好性质.

表 3 超声破解回流污泥对好氧消化污泥性质的影响¹⁾

Table 3 Effects of ultrasonic return sludge disintegration on digested sludge

消化污泥性质	UAAD 反应器	参比反应器
SV ₁₂₀	75 ±2	94 ±1
pH	4.91 ±0.22	4.62 ±0.19
SCOD/mg L ⁻¹	441 ±17	317 ±21
TN/mg L ⁻¹	83 ±4	73 ±2
TP/mg L ⁻¹	23 ±5	21 ±4

1)表中数据为每个阶段的平均值和 95%置信区间

3 结论

(1)污泥超声处理实验表明,1.0 W/mL 的高声能密度超声处理可以破解污泥,从污泥颗粒中释放有机质,而 0.05 W/mL 的低声能密度超声作用短时间,可以改善污泥的生物活性.在超声处理过程中,污泥温度明显上升,而 pH 值略有下降.

(2)超声用于污泥好氧消化过程时,如处理进泥,无论是采用高声能密度超声进行破解,还是用低声能密度超声进行处理,均不能明显改善污泥的好氧消化.当采用 1.0 W/mL 超声破解回流污泥,回流比为 1.7 时,消化污泥 VSS 降解率得到明显提高,而且消化污泥的沉降性能良好,上清液污染物增加很少.

(3)虽然超声破解回流污泥可以明显改善污泥的好氧消化,但其对好氧消化的长期影响还需要进一步观察,为了优化工艺,降低能耗,超声强度、回流比、进泥浓度等参数还需要进一步优化.

参考文献:

- [1] Barbusinski K, Kóscielniak H. Activated sludge floc structure during aerobic digestion [J]. *Water Sci Technol*, 1997, **36**(11): 107 ~ 114.
- [2] Hashimoto S, Fujita M, Terai K. Stabilization of waste activated sludge through the anoxic-aerobic digestion process [J]. *Biotechnol Bioeng*, 1982, **24**(8): 1789 ~ 1802.
- [3] Warner A P C, Ekama G A, Arais G V R. Comparison of aerobic and anoxic-aerobic digestion of waste-activated sludge [J]. *Water Sci Technol*, 1985, **17**(8): 1475 ~ 1478.
- [4] Al-Ghusain I, Hamda M F, El-Ghany M A. Nitrogen transformations during aerobic/anoxic sludge digestion [J]. *Bioresour Technol*, 2002, **85**(2): 147 ~ 154.
- [5] Murray K C, Tong A, Bruce A M. Thermophilic aerobic digestion — A reliable and effective process for sludge treatment at small works [J]. *Water Sci Technol*, 1990, **22**(3 ~ 4): 225 ~ 232.
- [6] Chu A, Mavinic D S, Kelly H G, *et al.* Volatile fatty acid production in thermophilic aerobic digestion of sludge [J]. *Water Res*, 1994, **28**(7): 1513 ~ 1522.
- [7] Deeny K, Hahn H, Leonhard D, *et al.* Autoheated thermophilic aerobic digestion [J]. *Water Environ Technol*, 1991, **3**(10): 65 ~ 72.
- [8] Kelly H G, Melcer H, Mavinic D S. Autothermal thermophilic aerobic digestion of municipal sludges: a one-year, full-scale demonstration project [J]. *Water Environ Res*, 1993, **65**(7): 849 ~ 861.
- [9] Tiehm A, Nickel K, Neis U. The use of ultrasound to accelerate the anaerobic digestion of sewage sludge [J]. *Water Sci Technol*, 1997, **36**(11): 121 ~ 128.
- [10] Wang Q, Kuninobu M, Kakimoto K, *et al.* Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by ultrasonic pretreatment [J]. *Bioresour Technol*, 1999, **68**(3): 309 ~ 313.
- [11] Tiehm A, Nickel K, Zellhorn M, *et al.* Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization [J]. *Water Res*, 2001, **35**(8): 2003 ~ 2009.
- [12] Lafitte-Trouque S, Forster C F. The use of ultrasound and γ -irradiation as pre-treatments for the anaerobic digestion of waste activated sludge at mesophilic and thermophilic temperatures [J]. *Bioresour Technol*, 2002, **84**(2): 113 ~ 118.
- [13] Gronroos A, Kyllonen H, Korpijarvi K, *et al.* Ultrasound assisted method to increase soluble chemical oxygen demand (SCOD) of sewage sludge for digestion [J]. *Ultrason Sonochem*, 2005, **12**(1 ~ 2): 115 ~ 120.
- [14] Stuckey D C, McCarty P L. The effect of thermal pretreatment on the anaerobic biodegradability and toxicity of waste activated sludge [J]. *Water Res*, 1984, **18**(11): 1343 ~ 1353.
- [15] Camacho P, Deleris S, Geaugey V, *et al.* A comparative study between mechanical, thermal and oxidative disintegration techniques of waste activated sludge [J]. *Wat Sci Tech*, 2002, **46**(10): 79 ~ 87.
- [16] Lin J G, Chang C N, Chang S C. Enhancement of anaerobic digestion of waste activated sludge by alkaline solubilization [J]. *Bioresour Technol*, 1997, **62**(3): 85 ~ 90.
- [17] Muller J, Lehne G, Schwedes J, *et al.* Disintegration of sewage sludges and influence on anaerobic digestion [J]. *Water Sci Technol*, 1998, **38**(8 ~ 9): 425 ~ 433.
- [18] Kim Y K, Kwak M S, Lee S B, *et al.* Effects of pretreatments on thermophilic aerobic digestion [J]. *J Environ Eng*, 2002, **128**(8): 755 ~ 763.
- [19] 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.
- [20] Schlaefer O, Onyeché T, Bormann H, *et al.* Ultrasound stimulation of micro-organisms for enhanced biodegradation [J]. *Ultrasonics*, 2002, **40**(1 ~ 8): 25 ~ 29.
- [21] Pitt W G, Ross S A. Ultrasound increases the rate of bacterial cell growth [J]. *Biotechnol Prog*, 2003, **19**(3): 1038 ~ 1044.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Chu C P, Chang B V, Liao G S, *et al.* Observations on changes in ultrasonically treated waste-activated sludge [J]. *Water Res*, 2001, **35**(4): 1038 ~ 1046.
- [25] Genc N, Yonsel S, Dagasan L, *et al.* Investigation of organic nitrogen and carbon removal in the aerobic digestion of various sludges [J]. *Environ Monit Assess*, 2002, **80**(1): 97 ~ 106.