

低强度超声场促进剩余污泥好氧消化

丁文川 龙腾锐 曾晓岚 许 龙

(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 为了提高剩余污泥好氧消化效率,在消化过程中对剩余污泥进行超声辐射,声强为 0.53 W/cm^2 ,频率 28 kHz ,分别选用 0.045 W/mL 、 0.09 W/mL 两个功率密度,每次超声辐射时间 20 min 或 10 min ,辐射频次选用4次或2次,组成4个组合。研究表明,未经超声处理的污泥在消化第17天达到稳定,而经超声作用的污泥消化稳定时间较前者提前 $3 \sim 7 \text{ d}$ 。在相同好氧消化时间内,经超声波处理后污泥能获得更高的有机物降解率。同时对超声波促进污泥好氧消化工艺进行了工程经济评价。

关键词 低强度超声波 剩余污泥 好氧消化 经济评价

Low intensity ultrasonic treatment to enhance aerobic digestion of excess sludge

Ding Wenchuan, Long Tengrui, Zeng Xiaolan, Xu Long

(Key Laboratory for Three Gorges Reservoir Area's Ecology and Environment of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: In order to enhance the efficiency of aerobic digestion, the excess sludge was irradiated by low intensity ultrasound at a frequency of 28 kHz and acoustic intensity of 0.53 W/cm^2 during the process. Four groups of the same excess sludge treated by different ultrasonic parameters including acoustic density (0.045 W/mL or 0.09 W/mL), irradiation time (within 20 min or 10 min) and frequency of treatment during digestion cycle (four or two times) were arranged. The results showed that sludge stabilization without ultrasonic treatment could achieve after 17 days digestion, whereas the ultrasonic groups could shorten the stabilization of 3 to 7 days. Higher MLVSS removal rate in ultrasonic groups could be obtained during the same digestion elapsing than that of the control group. An economical evaluation on the ultrasound assisted process has been made.

Keywords: Low intensity ultrasound; Excess sludge; Aerobic digestion; Economical evaluation

将超声波技术引入污泥处理从20世纪90年代才开始兴起,目前国内外研究基本处于尝试和探索阶段,但已显示出一定的应用和开发前景^[1]。超声波在污泥处理中的作用分为高强度和低强度两个方面,其中把声强小于 10 W/cm^2 超声波称为低强度超声波^[2]。高强度超声波对污泥絮体和细胞具有破解作用,因此利用高强度超声波可改善污泥絮体结构,提高污泥脱水性^[3],缩短厌氧消化的时间和提高产气量^[4,5]。也有研究者将活性污泥经高强度超声波处理后再回流到曝气池,有效地减少了剩余污泥产

量^[6]。低强度超声波能强化液—固体系传质^[7]和提高生物代谢活性,且促进效应在超声波停止后数小时内依然存在^[8],利用低强度超声波可增强污泥微生物对有机物的分解作用,提高反应器处理效率^[9,10]。

污泥好氧消化作为污泥处理的手段之一,具有反应终产物稳定、臭味少、上清液 BOD_5 低等优点。国外研究指出^[11],污水设计流量低于 $2 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 的污水处理厂,好氧消化工艺对于污泥稳定可能是一个有利于环境的最优选择。发达国家有不少中小型污水处理厂采用好氧消化工艺处理污泥。好氧消化

污泥减量的机理是基于微生物的隐性生长^[12]。因此,在好氧消化过程中输入低强度超声波改善传质和刺激微生物代谢,强化微生物内源呼吸过程,理论上将提高剩余污泥好氧消化效率。

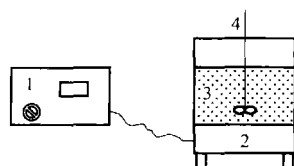
1 材料和方法

1.1 剩余污泥

试验的剩余污泥取自重庆市唐家桥城市污水处理厂的回流污泥泵房,试验前曝气 24 h,以去除剩余污泥上清液中残余的营养物质,重力浓缩后污泥的 MLSS 约 5.5 g/L,MLVSS/MLSS 为 0.59。

1.2 超声辐射处理装置

超声波发生器采用深圳市时代超声设备有限公司生产的 TEA-1018 型清洗机,电功率 0~900 W 可调,频率 28 kHz,清洗内槽尺寸 $L \times W \times H$ 为 460 mm $\times$ 330 mm $\times$ 400 mm,电声效率 90%,超声波处理污泥装置如图 1。



1 控制器 2 超声波清洗机 3 剩余污泥 4 搅拌器

图 1 超声辐射剩余污泥装置示意

污泥好氧消化反应器由若干 20 L 的塑料桶制成,在每个桶底均匀布置 3 个多孔石曝气头,接空压机连续供氧,机械搅拌转速为 55 r/min,保证消化过程中剩余污泥均匀混合。

1.3 超声波处理参数

超声波辐射选用 0.045 W/mL 和 0.09 W/mL 两个功率密度,声强均为 0.53 W/cm²;每次超声辐射时间选用 20 min 和 10 min;整个试验过程辐射次数为 4 次和 2 次,组成 4 个组合,试验主要参数如表 1 所示。超声波辐射时将反应器中剩余污泥直接倒入超声波清洗槽内,超声作用后再返回反应器继续消化。

每日测定各反应器中 MLSS 和 MLVSS,测试均采用标准方法^[13],同时计算 MLSS 和 MLVSS 去除率。SV 值测定时用 100 mL 量筒取 100 mL 剩余污泥,静置 30 min 后观察固液界面刻度获得。每日反应器蒸发和取样损失的溶液体积加蒸馏水补充,在数据处理时考虑取样损失污泥量。参照《城镇污

表 1 超声波处理操作参数

反应器编号	1	2	3	4	5*
功率密度 W/mL	0.045	0.045	0.09	0.09	
每次辐射时间/min	20	10	10	10	
每次输入能量/kJ/L	54.0	27.0	54.0	54.0	
总辐射次数/次	4	4	4	2	
输入总能量/kJ/L	216.0	108.0	216.0	108.0	
剩余污泥体积/L	18	18	18	18	18
初始 MLSS/g/L	5.57	5.73	5.88	5.70	5.56
辐射频次	3 天 1 次	3 天 1 次	3 天 1 次	6 天 1 次	

注: * 为对照反应器。

水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中污泥稳定指标,当反应器中污泥 MLVSS 降解率 > 40 %时,认为污泥好氧消化稳定,结束试验。

2 结果与讨论

2.1 MLSS 和 MLVSS 去除率变化

各反应器剩余污泥的 MLSS 和 MLVSS 去除率随时间变化如图 2 和图 3 所示。可以看出,经超声波处理的各反应器剩余污泥 MLSS 和 MLVSS 去除率均高于对照。对照反应器 MLVSS 去除率在好氧消化的第 17 天达到 40.8 %,满足污泥稳定指标,而 1[#]~4[#] 反应器污泥分别在消化的第 14 天、第 12 天、第 10 天和第 14 天 MLVSS 去除率就超过 40 %,较对照提前 3~7 d。在消化第 17 天,1[#]~4[#] 反应器 MLVSS 去除率分别达到 45.4 %、46.0 %、46.8 %和 44.3 %,即在相同好氧消化时间内,经超声波处理后污泥获得更高的有机物降解率。由于试验污泥 MLVSS/MLSS 比值小,表明污泥中无机成分较多,这部分物质一般不能通过污泥生物分解去除,所以各反应器 MLSS 去除率均较 MLVSS 去除率低,但两者的变化规律基本一致。1[#] 和 3[#] 反应器在消化过程中超声波作用输入总能量和每次输入能量相同,但每次作用的功率密度相差一倍(见表 1)。从污泥消化效果看,3[#] 反应器达到稳定时间比 1[#] 短,表明超声波作用强度对提高污泥消化效率影响明显,采用较高超声波强度的作用效果好于低的超声波强度。2[#] 和 4[#] 反应器在消化过程中超声波作用输入总能量相同,虽然每次输入能量 4[#] 反应器比 2[#] 高一倍,但整个过程 4[#] 反应器只进行 2 次超声波作用。从污泥消化效果看,2[#] 反应器达到稳定时间比 4[#] 短,同时相同时间内的 MLVSS 去除率 2[#] 反应器

也高于 4[#] 反应器,表明增加超声波作用次数比提高每次输入能量对促进污泥消化过程影响更大。

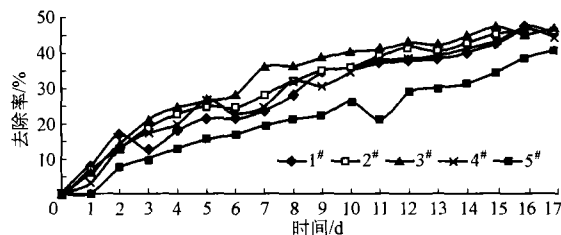


图 2 不同超声波作用方式的 MLVSS 去除率

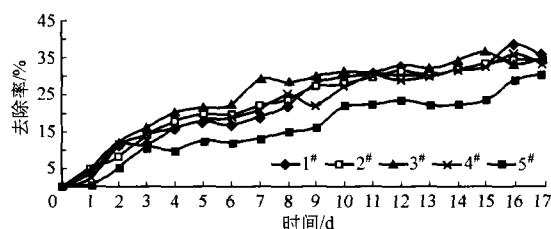


图 3 不同超声波作用方式的 MLSS 去除率

2.2 SV 值变化

各反应器剩余污泥的 SV 值随时间变化如图 4 所示。经超声波作用的 1[#] ~ 4[#] 反应器在消化开始时污泥 SV 值均较对照反应器增大,同时试验中观察到经超声波处理的污泥,沉淀后上清液浑浊,而对照污泥上清液相对清澈。由于超声波辐射将污泥絮体破碎分散为小单元,破坏了污泥的絮凝作用^[14],导致沉降速率变慢,SV 值升高。但在消化的第 4 ~ 6 天,超声波作用的反应器污泥 SV 出现急剧下降,从 90 %左右降到 30 %,并逐渐稳定在 20 %。对照反应器初始污泥 SV 值较低,但在消化过程中下降缓慢,消化第 6 天出现较快下降,从 64 %降为 45 %,此后污泥 SV 一直高于经超声波处理的各反应器污泥并持续到试验结束。

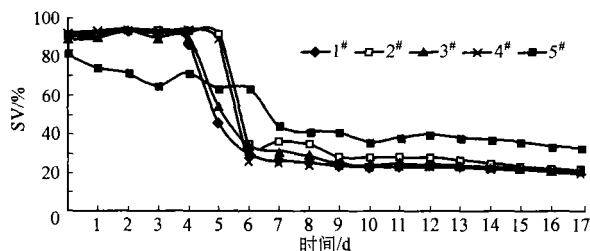


图 4 好氧消化过程中各反应器污泥 SV 值变化

2.3 低强度超声波促进污泥好氧消化机理

污泥好氧消化实质是污泥微生物处于内源呼吸阶段,微生物以其自身生物体作为底物进行代谢获

得能量和再合成,通过重复这一过程达到污泥减量的目的。根据 Henze 等^[15]的研究,内源呼吸分为三个阶段:微生物死亡,细胞水解,分解代谢。Lishman 等^[16]证实了有机体细胞的水解是反应速率的控制步骤。因此,无论污泥厌氧消化或是好氧消化工艺,其缩短反应时间的出发点大多都是提高污泥中有机体细胞的水解速率,使颗粒性有机物转化为溶解性的有机物。采取碱溶、酸解、高强度超声波、 γ 射线等措施直接破碎细胞壁,促进细胞溶解已成为近几年常用的污泥处理强化方法。然而,一般条件下细胞水解是依赖微生物的酶催化反应完成,研究表明,在不破坏酶蛋白质结构的条件下,低强度超声辐照能提高酶活性,使酶促反应速率提高^[17],因此作者认为低强度超声波虽不能直接破碎细胞壁,但同样可以达到促进细胞水解作用,从而提高了污泥有机物降解速率。

已有的研究发现,低强度超声波辐射污泥能提高污泥的 OUR 值 (Oxygen Uptake Rate, 摄氧速率)^[4,10],作者在前期研究中采用功率密度 0.045 W/mL 和 0.09 W/mL 超声波辐射污泥 5 min, OUR 值可达到初始值的 2 倍。由此可见,污泥经超声波处理后,提高了污泥微生物活性及对有机物好氧分解的强度,使 MLVSS 去除率明显高于对照 (见图 3)。但超声波对微生物活性增强作用只能持续数小时^[7,10],因此在污泥好氧消化过程中增加超声波作用频次以保持微生物活性有利于 MLVSS 去除率提高,这也解释了本研究中的 2[#] 和 4[#] 反应器的对比结果。

由污泥 SV 值试验结果,作者认为超声波辐射促进污泥好氧消化另一原因在于超声波对污泥絮体的分散作用。超声波的机械效应使絮体尺寸变小,不仅能保证溶解氧向絮体中心渗透,满足微生物好氧分解反应条件,同时增大了微生物或酶与底物接触机会,促进了反应底物或产物在固-液体体系的交换。不过试验结果中,1[#] 和 2[#] 反应器超声作用的功率密度相同,且 1[#] 反应器总输入能量高于 2[#] 反应器,但消化稳定时间却迟于 2[#],作者认为可能是 1[#] 反应器超声波辐射时间较长,开始对某些微生物细胞酶活性产生抑制效应,反而降低了对有机物去除的促进作用。Schläfer^[18]的研究曾指出,低强度

超声辐射引起污泥活性增长只在一个非常窄的参数范围内。

3 工艺经济分析

以重庆地区某 $1\text{万 m}^3/\text{d}$ 处理规模的城镇污水处理厂作为量化分析的功能单位,污泥产率按 5% (含水率 $98\%\sim 99.5\%$) 计,则日产剩余污泥 $50\text{ m}^3/\text{d}$,对比常规工艺和低强度超声波间歇作用(以下简称“超声促进法”)工艺 2 种污泥好氧消化处理系统的投资和运行成本。超声促进法工艺如图 5。

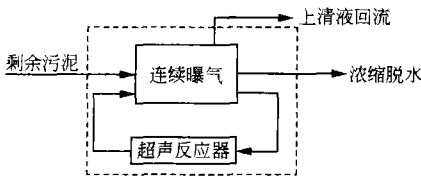


图 5 超声波辐射促进污泥好氧消化工艺流程

为简化评价过程,仅考虑 1 座消化池主体构筑物和设备投资(即图 5 中虚框内部分),未将 2 种工艺相同的消化污泥后续脱水处理部分投资包括在内,则投资估算结果见表 2。

表 2 主体构筑物和关键设备投资估算

工艺	设备	数量	主要参数	投资估算 / 万元	总投资 / 万元
常规工艺	好氧消化池	1 座	$V = 850\text{ m}^3$ $H = 3.5\text{ m}$	51	63
	曝气搅拌设备	1 套	功率 25 kW	12	
超声波促进法	好氧消化池	1 座	$V = 600\text{ m}^3$ $H = 3.5\text{ m}$	36	91.6
	曝气搅拌设备	1 套	功率 18 kW	10	
	超声波反应器	1 套	功率 90 kW 频率 28 kHz	45	
	循环泵	1 台	$Q = 12\text{ m}^3/\text{h}$ 功率 0.75 kW	0.6	

主要运行成本包括人工费、电费、维修费等;本文中未计人工费(2 种工艺相同)部分,将其余部分作为评价对象。评价结果如表 3 所示。从投资看,由于超声反应器设备投资高,使得低强度超声辐射处理工艺投资比常规工艺高 45% ,但随着技术进步,超声设备费用有大幅降低的可能;运行成本上超声促进法远大于常规工艺,折合处理费高出 $0.07\text{ 元}/\text{m}^3$,但超声促进法缩短消化稳定时间,可节省消化池容积及占地,对于类似三峡库区的山地城镇有一定的适用性。

表 3 运行成本估算

工艺	电费 / 元/ m^3 污泥	维修费 / 元/ m^3 污泥	合计	
			/ 元/ m^3 污泥	/ 元/ m^3 污水
常规工艺	8.00	0.35	8.35	0.042
超声促进法	22.62	0.50	23.12	0.116

注:电费以 $0.5\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 计,维修费率以 1% 计。

4 结论

(1) 低强度超声波辐射剩余污泥能显著提高好氧消化效率,经不同参数超声波处理后,可使剩余污泥的好氧消化稳定时间提前 $3\sim 7\text{ d}$;而在相同消化时间内,经超声波处理后污泥能获得更高的有机物降解率。

(2) 超声波辐射功率密度、作用频次和输入总能量对促进污泥消化过程有较明显影响。低强度超声波促进污泥好氧消化的机理可能是超声辐射提高微生物酶活性,促进了细胞水解反应和对有机物的分解代谢,以及超声波对污泥絮体的分散作用,强化了液—固体系传质和生化反应。

(3) 工程经济评价表明,低强度超声辐射处理从投资和运行成本上与传统方法相比没有优势,但其优点在于可节省占地面积,处理效果稳定;在消化后期,经超声波辐射后污泥混合液的沉降性能得到改善,有利于污泥后续浓缩脱水处理。

参考文献

- 1 张光明,吴敏生,张维昊,等. 城市污泥超声波处理技术. 城市环境与城市生态,2003,16(6):258~259
- 2 Pitt W G.,Ross S A. Ultrasound increases the rate of bacterial cell growth. Biotechnol. Prog. 2003,19(3):1038~1044
- 3 Bien J, Wolny L. Changes of some sewage sludge parameters prepared with an ultrasonic field. Water Science Technology, 1997,36(11):101~106
- 4 Tiehm A, Nickle K, Neis U. Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization. Water Research, 2001,35(8):2003~2009
- 5 Bougrier C, Carrée H, Delgen J P. Solubilisation of waste-activated sludge by ultrasonic treatment. Chemical Engineering Journal, 2005,106(2):163~169
- 6 Gonze E, Pillot S, Valette E. Ultrasonic treatment of an aerobic activated sludge in a batch reactor. Chemical Engineering and Processing, 2003,42(12):965~975
- 7 李晖. 超声波强化液—固传质的机理研究. 沈阳化工学院学报,

下凹式绿地雨水渗蓄效应及其影响因素

程 江 徐启新 杨 凯 刘兰岚 李 博

(华东师范大学环境科学系,上海 200062)

摘要 下凹式绿地是一种具有渗蓄雨水、削减洪峰流量、减轻地表径流污染等优点的生态型排水设施。对不同设计参数的下凹式绿地雨水渗蓄能力的计算和分析表明:下凹式绿地面积比例 f 、绿地下凹深度 Δh 、绿地土壤稳定入渗速率 K 和设计暴雨重现期 P 是影响其雨水渗蓄效率 N 的主要因素。经分析计算,一般情况下的下凹式绿地设计参数选择范围为:绿地面积比例 10%~30%,下凹深度 0.1~0.3 m,土壤稳定入渗速率大于 5×10^{-7} m/s,设计暴雨重现期可选择一年、三年和五年一遇标准。

关键词 下凹式绿地 雨水渗蓄 雨水径流

城市化导致土地利用、土地覆被显著变化,致使区域雨水截留、下渗、蒸发等水文要素及产汇流过程发生变化,加大了区域洪涝灾害发生的频率和强度,增加了城市排水系统建设及运行压力^[1~5]。城市绿地作为城市生态系统的重要组成部分,有着诸多生态环境效应^[1,3,5]。在发达国家,绿地的雨水径流调蓄效应已得到相当重视,例如德国的 MR 系统 (Mulden Rigolen system,洼地渗渠系统)、下凹式绿

国家自然科学基金 (70673022,40471019);2004 年度上海市科委项目 (04DZ12024)。

地及日本的多功能调蓄设施等使得尽可能多的雨水得以下渗,较好地发挥了绿地在城市水文生态循环中的作用^[6,7]。近年来,国内城市绿地面积不断扩大,但在城市绿地的规划、设计及建设中,对绿地在水文循环中的作用重视不足,雨水渗蓄型绿地尤其是下凹式绿地尚不多见。本文尝试探讨了下凹式绿地的雨水渗蓄效应及影响因素,并提出了相关设计参数,以期在城市绿地规划与建设中发挥绿地在削减雨水径流、缓减排水系统建设运行压力、维护城市水安全等效应方面提供参考依据。

- 1994,8(3):175~181
- 8 Schl fer O,Sievers M,Klotzbucher H,et al. Improvement of biological activity by low energy ultrasound assisted bioreactors. Ultrasonics,2000,38(1~8):711~716
- 9 Neis U,Nickel K,Teihm A. Enhancement of anaerobic sludge digestion by ultrasonic disintegration. IAWQ Specialized Conference on Sludge Treatment. Athens,Greece,1999:129~136
- 10 刘红,闫怡新,王文燕,等. 低强度超声波改善污泥活性. 环境科学,2005,26(4):124~128
- 11 Bernard S,Gray N F. Aerobic digestion of pharmaceutical and domestic wastewater sludges at ambient temperature. Water Research,2000,34(3):725~734
- 12 Rocher M,Goma G,Begue A P,et al. Towards a reduction in excess sludge production in activated sludge process: biomass physicochemical treatment and biodegradation. Appl Microbiol Biotechnol,1999,51:883~890
- 13 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法. 第3版. 北京:中国环境科学出版社,1997
- 14 Urbain V,Block J,Manem J. Bioflocculation in activated sludge:

- an analytic approach. Water Research,1993,27(5):829~838
- 15 Henze M,Mladenovski C. Hydrolysis of particulate substrate by activated sludge under aerobic-anoxic and anaerobic conditions. Water Research,1991,25(1):61~64
- 16 Lishman L A,Murphy K L. The significance of hydrolysis in microbial death and decay. Water Research,1994,28(11):2417~2419
- 17 Barton S,Bullock C. The effects of ultrasound on the activities of some glycosidase enzymes of industrial importance. Enzyme and Microbial Technology,1996,18(30):190~194
- 18 Schl fer O,Onyeche T,Bormann H,et al. Ultrasound stimulation of micro-organisms for enhanced biodegradation. Ultrasonics,2002,40(1-8):25~29

& E-mail:watsonding2003@163.com

收稿日期:2006-03-20

修回日期:2007-01-10