

超声波污泥裂解技术在污水厂应用概述

杨顺生

(西南交通大学土木工程学院, 成都 610031)

摘要: 本文介绍了超声波污泥处理技术的原理及其在污水厂的几种应用,阐述了该技术在生物脱氮除磷、污泥厌氧消化、污泥减量、节能减排以及消除膨胀污泥等方面的经济和技术优势。

关键词: 超声波 污泥裂解 生物脱氮除磷 厌氧消化 节能减排 沼气

1 超声波的概念及其裂解污泥的原理

频率 20 千赫以上的声波叫做超声波,这是一个很宽的频段。不同频段的超声波对介质的作用差异很大,适合处理污泥的是低频超声波,频率在 20 ~ 100 千赫之间。由于其声学特点,该频段的超声波可以在介质里产生强烈的成穴作用(cavitation),无数直径 100 ~ 150 微米的微气泡不断形成并消失,其寿命一般在 400 ~ 500 微秒(见图一)。微气泡消失的瞬间会产生“热点”(hot spot),是一个能量密度极大而范围很小的空间,其中的温度和压力可分别达到 5 000 ℃ 和 500 巴,并且伴随着极强的水力剪切力。在这个环境里,水分子也被电离成 H^+ 和 OH^- ,而后者(羟基自由基)是强氧化剂。这些因素的综合作用,使难降解物质的稳定结构被摧毁,转化成易降解物质,剩余污泥中的微生物细胞被击破,释放出碳源和催化物质,后两种物质可以投加到污水及污泥处理工艺,强化生物过程。遇到生物池出现膨胀污泥的情况,利用超声波可以将丝状菌击碎,从而消除并预防再次出现膨胀污泥。

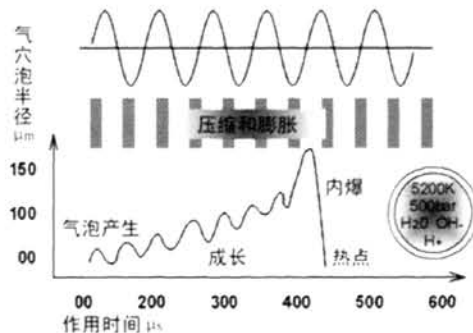


图1 超声波产生的成穴作用

超声波对污泥的作用直接取决于能量输入。根据的不同情况,一般将超声波处理污泥分为低能量输入、中等能量输入和高能量输入。其对污泥的作用如下(图2):

- 低能量输入 (< 3 Wh/L): 菌胶团变小、空隙变大、颗粒尺寸变小;扩散和物质交换容易;EPS(蛋白质、碳水化合物、腐殖酸)释放。

- 中等能量输入(3 ~ 10 Wh/L): 菌胶团和颗粒更小;细胞壁破损和被击破;细胞质溶入混合液,

易降解的溶解性 COD 产生(蛋白质、氨基酸等)。

- 高能量输入(能量输入 > 10 Wh/L);细胞击破继续发生。

由此可见,超声波对污泥的作用有三个方面:其一是将菌胶团打散,使其中的可利用物质暴露出来;其二是击破微生物细胞,使其内部物质释放出来,后者可作为碳源和催化剂;其三是将一些难降解物质转化成易降解物质。**这几方面的效果的本质都是释放碳源,这种方式释放出的碳源可以用溶解性 COD 衡量(SCOD)。** **SCOD 的释放不但和能量输入有关,也和各厂的污泥特性有关。**即使同样的能量输入,污泥特性不同,SCOD 的释放也必然不同。

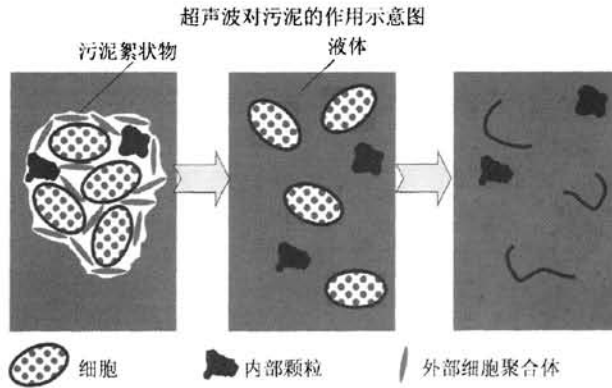


图2 超声波对污泥的作用

为了对不同污泥裂解处理的效果作比较,可引入一个无量纲的量 A_{COD} ,称为**击破率**。其计算公式如下:

$$A_{COD} = [(COD_{US} - COD_0) / (COD_{NaOH} - COD_0)] \times 100\% \quad (1)$$

式中:

COD_{US} = 超声波处理后溶解性 COD 的增加值,确定方法是:将超声波处理后的污泥样本在离心机上高速旋转半个小时,其离心加速度达到 10000g ~ 40000 g (g = 重力加速度),然后过滤(孔径 0.45 μm),再测透过液中的 COD 值;

COD_{NaOH} = 击破率的参照值,即某个污泥样本可以提供的 SCOD 的上限。确定方法是:向污泥样本加入等体积的烧碱溶液,溶液浓度是 1.0 摩尔,在摄氏 20 度的环境里静置 22 小时,然后确定 COD 值。方法同上。

COD_0 = 污泥样本中 SCOD 的初始值。方法同上。

适合工程应用的击破率一般在 2% ~ 5%。击破率大于 0.5% 即开始对生物系统发挥作用。

上述击破率是超声处理后可以**直接检测到的碳源释放量**。事实上,裂解后的污泥回流到生物池以后,上文提到的生物酶就发挥催化作用,使多种原来不能被微生物利用的营养物转化成可利用的,主要形式是将固态或半溶解态营养物转化为溶解态。这些生物酶原来储存在微生物细胞内,而微生物有一种本能,就是根据遇到的营养物的特性释放出适量的生物酶,将营养物转化成溶解态,便于其利用。一旦微生物细胞被击破,这些生物酶便弥漫在生物池,提前将营养物转化,这是一种很好的放大作用,通过这种方式转化的碳源比按照式(1)计算的**值要大几倍到几十倍。**因此,污泥经超声波处理并回流后,所产生的总的碳源浓度是:

$$C = \text{COD}_{\text{US}} \cdot (1 + \varepsilon) \quad (2)$$

式中: ε 是上述转化倍数,一般在8~50之间。

2 超声波技术在国内外的研究和应用情况

由于超声波的这些作用,近几十年以来,其工程应用一直是国内外学者研究的热点,例如天津大学、汉堡工业大学等单位,在这方面进行了系统研究,并取得了重要成果^[1-5]。根据奈斯等人的研究和欧美日的工程实践,总体产出效果和污泥的粘滞性密切相关,粘滞性越大,超声场的范围越小,获得的有用物质就越少;反之,粘滞性越小,超声场的影响范围就越大。同时,污泥的粘滞性又和浓度直接相关,浓度越高,粘滞性越大。对于城市污水厂污泥而言,粘滞性一般以不超过0.5 PaS为宜,这个值对应的污泥浓度大约是3~6%,这也是一般重力浓缩所能达到的浓度。

季民的研究发现,超声波裂解的污泥投配到污泥厌氧消化池以后可以大大提高消化效率,停留时间缩短到八天左右^[1],而且沼气产量并不减少,甚至增加。

据报道,超声波技术在德国2001年已经实现了工程应用,随后每年均有新的应用实例报道,用途主要包括:强化生物脱氮除磷、补充内部碳源以改善污水可生化性、缩短污泥厌氧消化周期并增加沼气产量、污泥减量、消除膨胀污泥等。在污水厂的类型方面,有新建厂,也有老厂改造。

3 裂解污泥在污水处理中的用途

3.1 裂解污泥在强化生物脱氮除磷中的应用(碳源)

生物脱氮和除磷是国内污水厂目前面临的主要问题之一,即使在生物学环境具备的情况下,也必须有相应的碳源提供,这正是制约因素,主要有下述两个原因:其一,目前市场上甲醇的价格还不是所有的污水厂都能承受的,许多污水厂没有这笔预算;其二,增加系统负荷和污泥产量。

反之,利用自产污泥裂解作碳源,则可以避免上述成本和污泥产量增加,相反会减少污泥量。在裂解污泥处理量上,一般不低于30%剩余污泥量,投加点应当在反硝化区的进水处(图3)。这个比例可以将出水中总氮浓度降低3~10 mg/L,如德国的滨德污水厂。

图4显示滨德污水厂2005年和2006年出水无机氮的对比,该厂2006年2月到7月做了超声波设备试运行。图中两条竖线分别代表2006年现场试运行开始和结束的时刻。左右两边的竖轴分别表示出水无机氮浓度和每天投加的裂解污泥,单位分别是mg/L和m³/d。图中最低和中间的曲线分别是2006年和2005年的出水无机氮浓度,最高的曲线是每天投加的裂解污泥量。可以很清楚看出,在超声波设备试运行期间,因为向反硝化区投加了污泥碳源,反硝化进行得更彻底,出水无机氮值明显低于2005年。而在试运行前和试运行后,两条曲线互相缠绕,分不出高低。

在国内也取得了类似的结果,例如,2007年最后一个季度在北京高碑店污水厂利用超声波设备所做的中试(A²O工艺),结果出水总氮明显下降,而其他水质指标无变化(图5a)。

3.2 裂解污泥在污泥厌氧消化中的应用(催化剂)

污泥厌氧消化一共有四个阶段,其中限速步骤是水解段。常规厌氧工艺仅仅水解阶段一般要用12天以上的时间,这是导致污泥厌氧消化时间长,消化池容积大的主要原因。水解过程是一个生物化学过程,借助水解菌的作用,复杂物质被转化成简单的易于被微生物降解的物质形式,污泥水解主要包括污泥所含有机质的水解和污泥中好氧微生物细胞的水解,尤其是后者是有生命的,对水解环境具

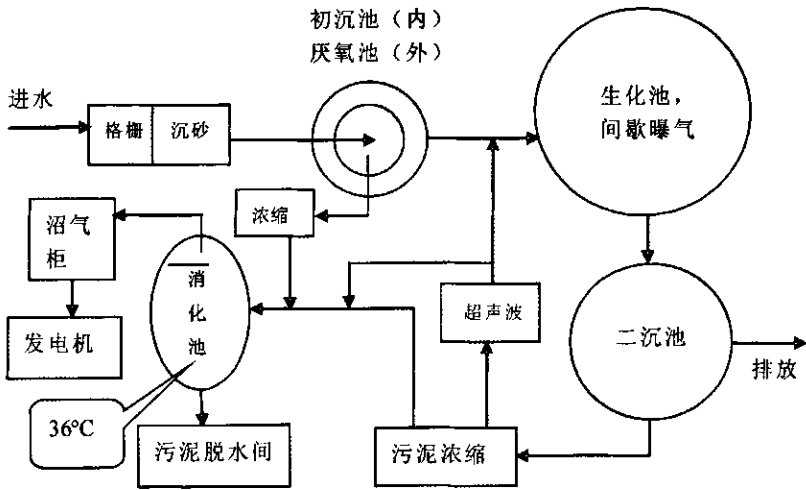


图3 德国滨德污水厂流程示意图

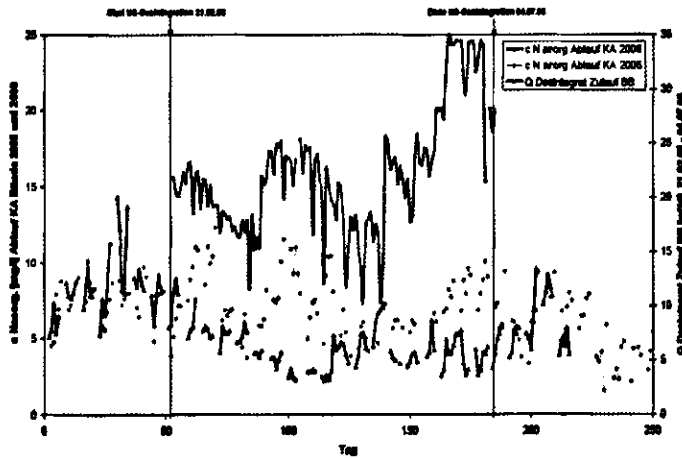
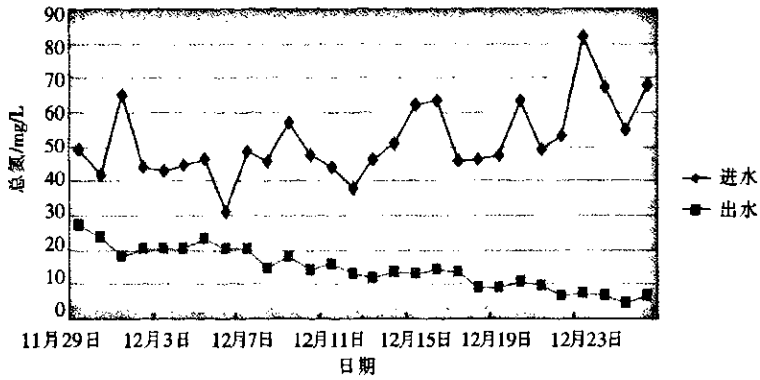


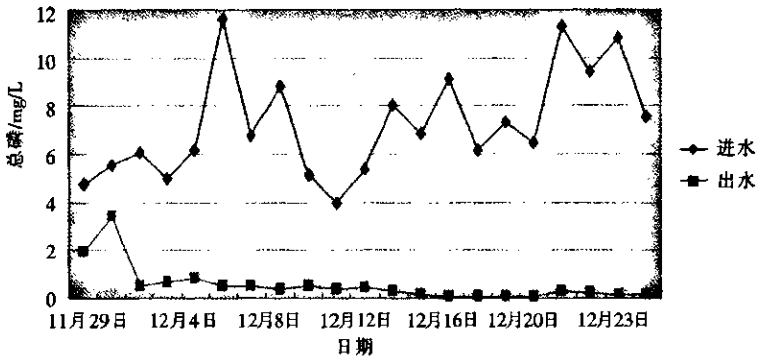
图4 德国滨德污水厂超声波设备试运行对出水硝态氮的影响

(图中横轴单位是天,从当年元旦起算)

有本能的抵抗和适应能力,要攻破其细胞壁十分不易。这些因素导致常规情况下,污泥水解不但时间长,而且水解程度有限。裂解污泥投加后,首先,其自身是裂解状态,其次,其所携带的物质有催化作用,使得污泥水解速度快、程度深。目前在欧洲,采用超声波裂解污泥的消化装置停留时间均不超过12天。另外,各厂污泥品质不同(主要是碳水化合物、蛋白质和脂肪之间的比例不同,有无重金属等因素),其水解过程以及产沼特性也不相同。表1和表2分别列出了常规条件下不同生物质的产沼能力以及常见种植养殖业废弃物的产沼半值期^[5]。需要说明的是:表中的半值期温度是按照30℃为基础的。如果采用中温消化(温度35~37℃),则其半值期要相应缩短,这不仅因为温度高微生物活性好,还因为这个温度是中温消化效率的极值点。



(a)总氮进出水变化曲线



(b)总磷变化曲线

图5 高碑店污水厂超声波强化脱氮除磷中试结果

表1 不同生物质的产沼能力(单位: Nm^3/kg 降解 oDS)

生物质	碳水化合物	蛋白质	油脂/脂肪	污泥
产沼能力	0.6~0.7	0.7~0.8	1.3~1.4	0.8~1.0

表2 常见生物质产生沼气能力(单位: L/kg), 30 °C

序号	生物质	产沼能力	半值期(天)
1	菜市场垃圾	608	6
2	屠宰场废弃物	461	13
3	牛奶加工	975	4
4	啤酒厂废弃物	426	2
5	橙汁加工	482	5
6	香蕉叶	413	18
7	猪粪(干稀混合)	257	13
8	牛粪(干稀混合)	250	13
9	麦秆	348	12
10	土豆蔓	526	3
11	玉米秸秆	485	5
12	草	490	4

德国威塞尔市的沼气设施(图6),采用超声波设备后,其沼气产量增加19%。该设施的参数如下:两个沼气池,容积各1000立方米;每日进料27吨玉米和8吨动物粪便;停留时间40天;每小时产

气量 220 立方米,甲烷含量 55%;热机组电功率 500 千瓦。

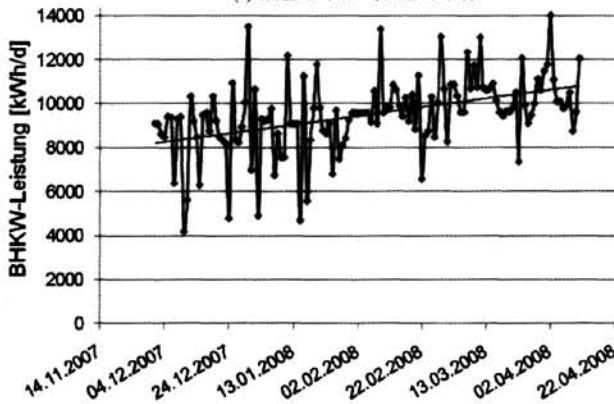
值得一提的是,超声波裂解污泥走厌氧消化所产沼气品质明显优于常规厌氧消化,品质优主要表现在:i) 甲烷含量高;ii) 色度物质少,尤其是硅氧烷一类的物质少。后者对发电机组气缸的寿命影响极大,必须去除,否则会在燃烧过程中形成石英,导致气缸和活塞受损。总体上说,超声波裂解污泥有以下积极作用:沼气产量增加 30%左右;沼气中甲烷含量增加 2%;沼气中色度物质减少;消化污泥中可挥发物质减少 9%~16%;污泥脱水性能改善 2%~5%。

许多污泥消化或者农业沼气设施还有一个重要的功能和收益点就是生产高品质有机肥。厌氧消化进行得越彻底,就有越多的肥效物质转变为植物可吸收的形式,如氨基酸、氨等。超声波强化产沼气的过程也是强化这种转变的过程,因此所产有机肥肥效更好。

Biogasanlage Wesel



(a) 威塞尔市沼气设施的罐体



(b) 该厂 2007 年 12 月到 2008 年 4 月每日发电量的变化情况

图 6 威塞尔市沼气设施采用超声波增加沼气产量

在流程布置上,超声波设备和罐体形成一个回路,即从沼气罐内抽取污泥处理后泵回沼气罐,每天处理 25 立方米污泥(混物质)。

2.3 裂解污泥在污泥减量中的应用

污泥源自进水携带的污染物,进厂后其出路有四个:i) 形成初沉污泥(如果有初沉池的话);ii) 被氧化(降解),变成二氧化碳和水;iii) 形成生物污泥(即微生物增殖的部分);iv) 随出水排放。通过回流裂解污泥,生物池内菌群活性和降解效率大大提高,能够把更多地污染物转化成二氧化碳和水,宏观上就表现为污泥量的减少。这种机理是污水厂运行方希望的,但是通常情况下有许多污染物不

能被降解,从而进入污泥,形成污泥产量,而投加裂解污泥正是强化这种机理。以德国滨德污水厂为例子,该厂2005年和2006年污泥产量等数据对比如表3。由表3可以看出,2006年尽管进水量和污染物携带量均有增加,由于超声裂解污泥的作用,该厂的产泥量和出水无机氮都在下降。

表3 滨德污水厂采用超声波设备试运行各项指标2005/2006 环比

年份	对比时段	处理量	生物池进水	厂出水	产泥量	
		Q	COD	TN	无机氮	干泥量
		m ³ /d	kg/d	kg/d	kg/d	T
2005	3月1日~7月4日	12 834	3 838	494	93.6	267
2006		16 101	4 682	669	65.4	232

2.4 裂解污泥在消除膨胀污泥中的应用

膨胀污泥是污水厂常见的一种生物学故障,在好氧和厌氧工段均可出现,绝大多数情况下,其原因是丝状菌的大量繁殖。对于这种情况,超声波提供了非常高效的手段消除膨胀污泥,恢复污水或污泥处理的正常工况。以德国赛维塔尔污水厂为例,该厂曾经遇到非常严重的污泥膨胀问题,多种尝试后最后用超声波解决(图7),其生产和超声波运行参数如下:



(a) 赛维塔尔污水厂的膨胀污泥



(b) 超声波设备在赛维塔尔污水厂投用后膨胀污泥消失

图7 赛维塔尔污水厂使用超声波设备前后生物池外观

- 生物池进水量: $Q_B = 230 \text{ m}^3/\text{h}$;
- 污泥回流量: $Q_{RS} = 400 \text{ m}^3/\text{h}$;
- 泥龄: $\Theta = 32$ 天;
- 超声波处理的回流污泥: $Q_{US} = 3 \text{ m}^3/\text{h}$;
- 污泥在反应器内水力停留时间: $t_{US} = 30 \text{ s}$;
- 平均功率消耗: 3.36 kW ;

- 超声系统每天耗电:80.6 kWh。

4 结论

1,利用超声波裂解污泥后获得的碳源,可以替代商品碳源投加到反硝化区强化生物脱氮除磷。这种方法不但可以减少乃至避免外购碳源、降低生产成本,而且减少污泥量,符合可持续发展要求;

2,利用超声波裂解污泥可以增加沼气产量大约30%,并改善其品质,减少有害物质的浓度,防止杂质危害发电机组。沼气的增加多少取决于泥质、投配比等。投配比越大,沼气产量增加越多;

3,裂解污泥通过提高微生物活性增加污水处理深度,减少污泥量;

4,超声波是消除和预防膨胀污泥的强有力手段,对很小一部分混合液进行处理即可达到消除和预防膨胀污泥的目的。

参考文献

- [1] 王芬,季民,卢姗,剩余污泥超声破解性能研究,《全国污水处理节能减排新技术新工艺新设施高级研讨会》2008. 11.
- [2] Neis, Uwe, *Intensification of Biological and Chemical Processes by Ultrasound in Environmental Engineering*, May 2004, Hamburg, Germany.
- [3] 杨顺生,等,超声波技术在污泥处理利用中的应用现状及前景预测,四川环境,2006/1.
- [4] Nickel, Klaus, et al, *Langj? hrige Erfahrungen auf deutschen Kl? ranlagen mit der Intensivierung der Schlammstabilisierung durch Ultraschall*, DWA Kl? rschlammstage 2009, Hennef, Germany.
- [5] Karl und Klaus R. Imhoff, *Taschenbuch der Stadtentwässerung*, 29. Auflage, Seite 289, R. Oldenbourg Verlag, Muenchen Wien 1999, (专著).

作者简介:杨顺生,1961年11月生于陕西西安市,1997年在德国埃森大学获工学博士,现任西南交通大学土木工程学院教授。长期从事污水和污泥处理技术研究。世界银行咨询专家。作者通讯地址:610031成都市北二环路111号,西南交通大学土木工程学院。

E-mail: seanse@126.com

超声波污泥裂解技术在污水厂应用概述

作者: [杨顺生](#)

作者单位: [西南交通大学土木工程学院, 成都 610031](#)

本文读者也读过(9条)

1. [刘彩](#), [高静](#), [王宝霞](#) [浅谈超声波剩余污泥减量化技术](#)[会议论文]-2009
2. [林楚娟](#), [孙水裕](#), [方明中](#), [郑雪丹](#), [Lin Chujuan](#), [Sun Shuiyu](#), [Fang Mingzhong](#), [Zheng Xuedan](#) [超声波技术在污泥减量化中的应用研究现状](#)[期刊论文]-广东化工2007, 34(5)
3. [刘春红](#) [超声波处理的污泥中温厌氧消化能量效率研究](#)[学位论文]2007
4. [李伶俐](#) [超声波污泥减量化技术的研究](#)[学位论文]2007
5. [王晓青](#), [杨顺生](#), [杨少武](#), [WANG Xiao-qin](#), [YANG Shun-sheng](#), [YANG Shao-wu](#) [超声波污泥水解酸化的研究](#)[期刊论文]-环境科技2010, 23(3)
6. [闫怡新](#), [刘红](#), [YAN Yi-xin](#), [LIU Hong](#) [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](#)[期刊论文]-环境科学2006, 27(5)
7. [毛惟德](#) [落实污水厂节能减排措施保障水环境的质量和安](#)[会议论文]-2009
8. [曾志江](#) [试论城镇污水处理厂污泥处理技术分析](#)[期刊论文]-中国新技术新产品2010(24)
9. [沈劲锋](#), [殷绚](#), [谷和平](#), [吕效平](#) [超声波预处理强化处理剩余活性污泥](#)[会议论文]-2005

引用本文格式: [杨顺生](#) [超声波污泥裂解技术在污水厂应用概述](#)[会议论文] 2009