

# 内环流系统中污泥厌氧消化效能及其流变特性研究

吴楚明, 汤 兵, 黎杰华, 刘文杰

(广东工业大学 环境科学与工程学院, 广东 广州 510006)

**摘 要:** 自主设计的搅拌内环流厌氧反应器连续运行 64 d, 考察了高有机浓度剩余污泥厌氧消化过程中有机物转化与生物产气之间的关系, 分析了污泥流变特性的变化, 并探讨了污泥消化效能和流动特征。结果表明, 消化过程中平均总有机物去除率在 30% 以上, 最高为 45%, VSS 含量从 16.92 g/L 降低至 3.575 g/L, VFA 浓度从  $(460.02 \pm 0.5)$  mg/L 降低至  $(50.20 \pm 0.26)$  mg/L, 且产气率迅速增加, 甲烷含量高达 52.9%。污泥 TSS 与污泥稳态黏度呈正相关, Pearson 系数为 0.816 2。在反应器消化过程中, 微生物和内环流体系的作用对絮体结构和污泥成分的影响可减缓污泥流变特性(黏度和触变性)随污泥量增加而增强的趋势。

**关键词:** 内环流系统; 污泥厌氧消化; 流变特性; 沼气

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)03-0101-05

## Sludge Anaerobic Digestion Efficiency and Rheological Properties in Internal Circulation System

WU Chu-ming, TANG Bing, LI Jie-hua, LIU Wen-jie

(School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The relationship between organic substance transformation and biogas production in sludge anaerobic digestion with high organic concentration was investigated in a self-designed internal circulation stirring anaerobic reactor which operated continuously for 64 days. Meanwhile, variation of sludge rheological properties was analyzed, and sludge digestion efficiency and flow characteristics were discussed. The results showed that the average removal rate of total organic substance could reach more than 30% and the highest was 45%. The VSS content decreased from 16.92 g/L to 3.575 g/L. The concentration of VFA decreased from  $(460.02 \pm 0.5)$  mg/L to  $(50.20 \pm 0.26)$  mg/L, and the biogas yield improved rapidly and the methane content was up to 52.9%. The TSS of the sludge was positively correlated with sludge viscosity under steady state, and the Pearson's coefficient was 0.816 2. The effect of microorganisms and the internal circulation system on the floc structure and sludge composition reduced the sludge rheological properties (viscosity and thixotropy) during digestion process, which represented an increasing trend with the increase of sludge dosage.

**Key words:** internal circulation system; sludge anaerobic digestion; rheological property; biogas

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(510110078)

通信作者: 汤兵 E-mail: renytang@163.com

厌氧消化不仅可以实现污泥稳定化和减量化,还可以回收能源,因此得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。在污泥厌氧消化过程中,厌氧微生物生态系统的不断演化受多种因素的影响,如污泥性质、pH 值、温度和流变特性等。目前,科研人员利用预处理方法加快厌氧消化<sup>[2]</sup>,但预处理方式的物耗和能耗较大,因而不能很好地实现节能减排的效果。污泥的流变特性在消化工艺设计和运行中具有重要作用<sup>[3-5]</sup>,但关于厌氧消化污泥流变特性的研究主要集中于污泥原料,而对于内环流系统中厌氧消化过程的污泥含量、成分和结构的改变以及污泥流变特性影响的分析还较少。近年来,国内外针对预处理方法的研究日益增加<sup>[6]</sup>,主要关注对有机质和溶解性有机物的改善,而对于未经处理的污泥,自身厌氧消化效能及其流变特性变化的研究却很少,缺少剩余污泥在自身厌氧消化中流变行为的理论数据,因而厌氧消化工艺设备的优化设计过程受到制约。

笔者通过分析污泥厌氧消化过程中污泥参数的变化及流变特性,考察了搅拌内环流在中温条件下对污泥消化效能及生物产气的影响,并探讨了随着污泥投加量的积累,污泥浓度和内部结构的变化对其流变行为的影响,确定了合适的数学模型,旨在为厌氧消化技术和工艺设计及运行提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

试验装置见图1。厌氧消化体系由进泥系统、反应器主体消化系统(32 L)、气体计量和收集系统组成。由蠕动泵将储泥池的污泥泵进主体反应器中,反应器主体消化系统中配有由程序控制系统调控的螺旋上升搅拌桨、三相分离器和外围恒温槽。

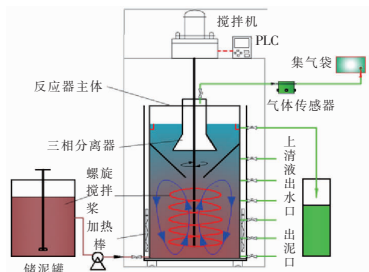


图1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experiment device

### 1.2 接种污泥及消化底物

试验中的接种污泥取自广州市沥窖污水处理厂

的消化池,消化底物取自该污水厂的浓缩池。接种污泥和消化污泥的主要参数见表1。

表1 接种污泥和消化污泥的主要参数

Tab.1 Characteristics of inoculated sludge and digested sludge

项 目	接种污泥	消化污泥
pH 值	6.32 ± 0.05	6.42 ± 0.06
TSS/(g · L <sup>-1</sup> )	41.24 ± 0.14	52.70 ± 0.22
VSS : TSS/%	19.18 ± 0.05	25.23 ± 0.08
TCOD/(mg · L <sup>-1</sup> )	28 921.33 ± 726.66	45 634.66 ± 423.33
VFA/(mg · L <sup>-1</sup> )	—	459.00

### 1.3 试验设计

污泥取回后过筛并密封静置1个月,反应器运行期间搅拌速度为(40 ± 1) r/min,主体装置的温度保持在(35 ± 2) °C,利用两个加热棒水浴保温。接种污泥量(1 ~ 10 d)达到反应器主体体积的1/3(10 L),在消化阶段(10 ~ 70 d),相同浓度的消化污泥间歇式通过蠕动泵进入反应器,分前后两阶段缩短进泥时间以提高污泥负荷。第1阶段每2 d的污泥投配率为10%(即每个周期投加3 L消化污泥),污泥停留时间(SRT) > 22 d;第2阶段每天的投配率相同,SRT > 11 d。当达到设定液位时在最上层的出泥口将等量体积的污泥排出,同时取少量污泥检测相关指标。

### 1.4 分析方法

TCOD采用重铬酸钾法测定,TSS和VSS采用重量法测定,VFA采用回流滴定法测定,生物产气组分采用气相色谱法测定。

### 1.5 污泥流变特性分析及流变模型

采用具有超低黏度适配器(DV-III ULTRA)的流变仪进行流变学测试,适配器装有样品瓶和转子。每次试验时,将16 mL的污泥样品放入样品瓶中,然后按照文献[5]的方法进行流变学分析试验<sup>[7-8]</sup>。采用常用的Herschel-Bulkley模型、Bingham模型以及幂律方程来描述厌氧消化器内流体的基本流变行为<sup>[7]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 反应器的运行情况

反应器进泥TCOD为45 634.66 mg/L,未经预处理的剩余污泥还含有较多的不可降解有机物,进入厌氧环境后水解酸化菌会分泌多种水解酶逐渐对其进行分解,生成小分子有机物,然后被其他微生物利用。因此,在初始阶段可以看到TCOD的含量有

稍微上升的趋势(见图2)。并且在厌氧微生物繁殖过程中,不断投加新的污泥,TCOD去除效果会随之波动。随着厌氧微生物的不断增殖,在第1阶段后期污泥的TCOD开始稳定下降,即使在第2阶段缩短污泥投加时间,TCOD也能保持相对稳定的趋势,平均总有机物去除率可达到30%以上,最高去除率为45%。

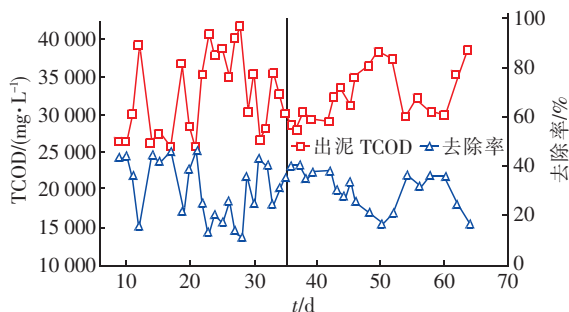


图2 出泥TCOD的变化

Fig. 2 Change of TCOD of extracted sludge

挥发性脂肪酸在启动初期快速降低,说明在污泥储藏过程中已有VFA的积累,进入厌氧环境后,厌氧微生物快速增殖,尤其是产氢产乙酸菌在初期能迅速增殖,可将VFA快速转化成乙酸或氢气。酸化过程的产物导致污泥pH值下降,但10 d之后pH值又迅速上升,这是因为在酸化过程中产甲烷菌快速增殖将VFA转化为沼气,后期pH值保持在相对稳定的范围(6.7~6.9)。

试验分析了厌氧反应器中甲烷产率的变化,结果表明沼气量迅速上升,说明厌氧反应器能快速形成厌氧阶段所需的条件。反应器中甲烷含量在前期快速增加,甚至达到52.9%,并在后期运行中保持相对稳定的状态。

图3为污泥中TSS、VSS和VSS/TSS的变化。

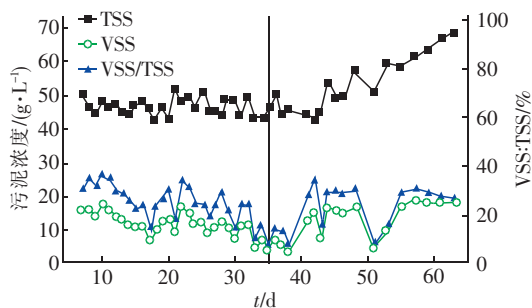


图3 TSS、VSS和VSS/TSS的变化

Fig. 3 Change of TSS, VSS and VSS/TSS

从图3可以看出,在装置启动阶段,VSS含量从16.92 g/L逐渐降低至3.575 g/L,表明微生物在增

殖过程中不断利用了污泥中的有机物。随着后期污泥浓度的不断增加,反应器的运行能够保持相对稳定的状态,说明其有一定的抗冲击能力,因此后期改变污泥停留时间出现了VSS快速上升然后趋于平稳的趋势,即使该过程中污泥浓度已经相对较高。另外,在整个运行过程中污泥的含水率从95.66%降低至92.97%,说明达到了明显的浓缩效果,也表明污泥自身微生物的增殖和搅拌内环流系统不仅能提高污泥有机物的去除率和流动性能,还能提高反应器的抗冲击负荷能力。

## 2.2 消化污泥流变特征及模型拟合分析

污泥流变分析过程中,设置剪切速率从 $10 \text{ s}^{-1}$ 逐渐增大到 $300 \text{ s}^{-1}$ ,所有样品的污泥剪切应力和剪切速率均呈非线性关系。随着污泥剪切速率的增加,其剪切应力也增大,但变化趋势逐渐减缓,表现出剪切稀化现象,且具有明显的屈服应力(见图4),表明厌氧消化污泥可以视为假塑性非牛顿流体,具有剪切变稀的作用效果<sup>[9-10]</sup>。

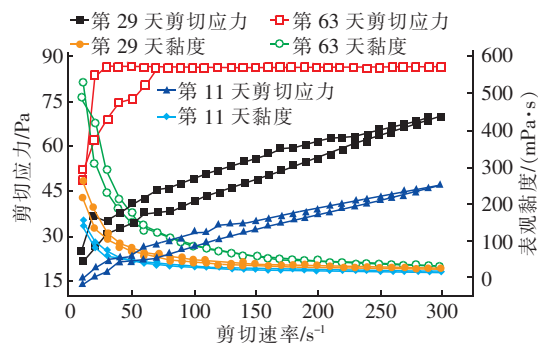


图4 Herschel-Bulkley模型拟合的流变曲线

Fig. 4 Rheological curve fitted by Herschel-Bulkley model

研究表明,Herschel-Bulkley模型适用于描述不同种类的高浓度污泥,且可以拟合有屈服应力的流变曲线<sup>[11]</sup>。选用运行期间第11天、第29天和第63天的消化污泥样品来分析流变特性,3个样品的污泥浓度分别为41.245、48.95和68.245 g/L。当剪切速率较低时,相同剪切速率下污泥的表观黏度随着污泥浓度的变化而改变,污泥浓度越大,其表观黏度越大,但在较高剪切速率时,其表观黏度趋于同一值,说明一定程度上污泥黏度受污泥浓度的影响。然而,在相同剪切速率( $281.29 \text{ s}^{-1}$ )下,当剪切时间达到一定程度后,黏度变化趋于平缓,并达到一个相对稳定的黏度,即为该剪切速率下污泥的稳态剪切黏度(见图5)。



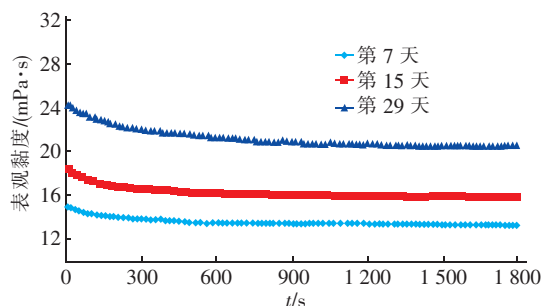


图5 污泥稳态黏度的变化

Fig. 5 Change of steady state viscosity of sludge

### 2.3 厌氧消化对污泥稳态黏度的影响

本试验中,污泥浓度和污泥稳态黏度的变化趋势一致,它们之间的关联程度可以通过 Pearson 系数来表征,且 Pearson 系数为 0.816 2。因此,污泥浓度是影响污泥稳态黏度的一个重要因素。污泥 TSS 越高,污泥颗粒之间的挤压使颗粒之间的间隙越小,这会限制污泥的流动性<sup>[1]</sup>。然而,在反应器运行过程中,43 d 之前的污泥浓度和污泥稳态黏度并没有随着投加量的积累而增加,其中污泥稳态黏度在 25 d 之后出现下降的趋势,这可能是反应器搅拌内环流和污泥自身厌氧消化两个因素共同作用的结果。然而,机械搅拌不能改变污泥内部的性质,但通过厌氧微生物对污泥有机物的利用、水解及产酸菌的作用,使得消化污泥中的大分子有机物降解为小分子有机物,改变了污泥絮体以及污泥颗粒之间的结构,使其成分和内部结构发生了实质性变化,因而从根本上改变了污泥的流变特征,使污泥的黏度降低,而机械搅拌在这个过程中起到提高传质效率的作用,提高了微生物活性和厌氧消化效率。污泥消化效率的提高可加快污泥中有机物的利用,这在一定程度上能降低污泥浓度,从而使污泥的稳态黏度变小。然而,污泥黏度在 TSS 高于 55 g/L 时增长趋势变快,含水率急剧降低,流动性变差。

### 2.4 污泥消化过程中的触变性

厌氧消化污泥具有触变性,触变性污泥在外力作用下有趋于维持自身空间结构的特性<sup>[12]</sup>。破坏污泥结构的时间比其恢复时间长很多,在这个过程中,剪切应力-剪切速率的曲线可以形成封闭的环,即触变环。有研究表明,触变环面积的大小可以反映污泥的触变性,面积越大说明污泥的触变性越大,面积越小则触变性越小<sup>[13]</sup>。经计算,图 4 中第 11、29 和 63 天的污泥样品触变环的面积分别为

669.68、1 555.62 和 3 784.67 Pa/s (理论值)。并且,触变环的面积同时受剪切作用时间和最大剪切速率的影响。可以看出,3 个样品中污泥的触变环面积随着污泥浓度的增大而增加,说明其触变性也变大。除此之外,在剪切作用下污泥的流变性可以更完整直观地通过触变指数的变化来表征,即在特定剪切速率下,污泥的触变指数  $K$  可以根据污泥黏度随时间的变化来计算,见式(1)<sup>[13]</sup>。

$$\frac{\mu - \mu_e}{\mu_i - \mu_e} = \exp(-Kt) \quad (1)$$

式中: $K$  为动力学系数,  $s^{-1}$ ;  $\mu_e$  为稳态时的黏度,  $Pa \cdot s$ ;  $\mu$  为黏度,  $Pa \cdot s$ ;  $\mu_i$  为剪切速率增加时的初始黏度,  $Pa \cdot s$ ;  $t$  为时间,  $s$ 。

图 6 为触变指数的变化。可以看出,污泥的触变指数随着污泥投加量的增加并没有持续快速增加,且在一定的污泥浓度范围内能保持触变性的稳定,触变指数保持在 4~5 之间,在厌氧消化过程中,污泥中大分子有机物被分解,高分子胞外聚合物被转化,因而改变了污泥的内部结构,持续性的螺旋搅拌可加快污泥的消化过程,使污泥絮体之间的联系减弱,从而影响污泥的触变性,同时也会对反应器内的传质和传热产生重大影响。总之,污泥触变性参数是改善厌氧反应器运行管理和提高厌氧消化效能的重要参数。该试验设计的反应器可能存在的相对局限性是当污泥浓度超过限值时,反应器污泥的流动性就会受到限制,因此需要提高反应器的螺旋搅拌速率或控制污泥浓度,并定期将部分底泥排出,从而保持反应器适合的污泥浓度。

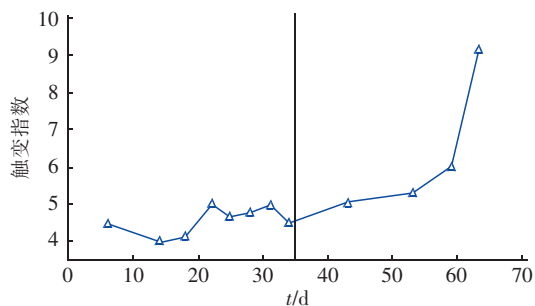


图6 触变指数的变化

Fig. 6 Change of thixotropic index

## 3 结论

① 经过厌氧消化,污泥的平均总有机物去除率可达到 30% 以上,最高为 45%; VSS 含量从 16.92 g/L 逐渐降低至 3.575 g/L, VFA 浓度从  $(460.02 \pm$

0.5) mg/L 降低至  $(50.20 \pm 0.26)$  mg/L, 甲烷含量在前期可快速增加至 52.9%, 说明内环流系统对污泥有一定的消化效能。

② 本试验经过厌氧消化的污泥存在触变环, Herschel-Bulkley 模型适用于描述其流变行为, 同时触变指数能直观反映污泥的触变性。污泥 TSS 与污泥稳态黏度呈正相关, Pearson 系数为 0.816 2。

③ 在微生物的作用下, 污泥的流变特性随着污泥自身结构的变化而改变, 且在一定程度上厌氧消化可以缓解污泥的黏度和触变性随污泥投加量增加而增大的趋势, 因而可以大胆假设厌氧消化过程和搅拌体系能提高污泥的流动性能和传质效果, 从而提高反应器的抗冲击负荷能力。

#### 参考文献:

- [1] 戴晓虎, 盖鑫, 董滨. 高含固厌氧消化污泥流变特性[J]. 环境工程学报, 2014, 8(9): 3912-3918.  
Dai Xiaohu, Gai Xin, Dong Bin. Rheological characteristics of sludge in high-solids anaerobic digestion[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(9): 3912-3918 (in Chinese).
- [2] 曹秀芹, 王鑫, 蒋竹荷, 等. 高含固污泥在热水解-厌氧消化工艺中的流变特性分析[J]. 环境工程学报, 2017, 11(4): 2493-2498.  
Cao Xiuqin, Wang Xin, Jiang Zhuhe, et al. Analysis on rheological characterization of high solid sludge in process of thermal hydrolysis-anaerobic digestion[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(4): 2493-2498 (in Chinese).
- [3] Pollice A, Giordano C, Laera G, et al. Physical characteristics of the sludge in a complete retention membrane bioreactor [J]. Water Res, 2007, 41(8): 1832-1840.
- [4] Laera G, Giordano C, Pollice A, et al. Membrane bioreactor sludge rheology at different solid retention times[J]. Water Res, 2007, 41(18): 4197-4203.
- [5] Feng X F, Tang B, Bin L Y, et al. Rheological behavior of the sludge in a long-running anaerobic digester: Essential factors to optimize the operation[J]. Biochem Eng J, 2016, 114: 147-154.
- [6] Carvajal A, Peña M, Pérez-Elvira S. Autohydrolysis pretreatment of secondary sludge for anaerobic digestion [J]. Biochem Eng J, 2013, 75: 21-31.
- [7] Baroutian S, Eshtiaghi N, Gapes D J. Rheology of a primary and secondary sewage sludge mixture: Dependency on temperature and solid concentration[J]. Bioresour Technol, 2013, 140: 227-233.
- [8] Eshtiaghi N, Yap S D, Markis F, et al. Clear model fluids to emulate the rheological properties of thickened digested sludge[J]. Water Res, 2012, 46(9): 3014-3022.
- [9] Wang Y L, Dentel S K. The effect of high speed mixing and polymer dosing rates on the geometric and rheological characteristics of conditioned anaerobic digested sludge (ADS) [J]. Water Res, 2010, 44(20): 6041-6052.
- [10] Baudez J C, Markis F, Eshtiaghi N, et al. The rheological behaviour of anaerobic digested sludge[J]. Water Res, 2011, 45(17): 5675-5680.
- [11] Baudez J C, Gupta R K, Eshtiaghi N, et al. The viscoelastic behaviour of raw and anaerobic digested sludge: Strong similarities with soft-glassy materials [J]. Water Res, 2013, 47(1): 173-180.
- [12] 王彦祥, 何琴, 李蕾, 等. 餐厨垃圾中温干式厌氧消化污泥的流变特性研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(12): 3171-3178.  
Wang Yanxiang, He Qin, Li Lei, et al. Rheological characteristic analysis of dry anaerobic digestion sludge of food waste under mesophilic conditions [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(12): 3171-3178 (in Chinese).
- [13] Ruiz-Hernando M, Labanda J, Llorens J. Structural model to study the influence of thermal treatment on the thixotropic behaviour of waste activated sludge [J]. Chem Eng J, 2015, 262: 242-249.



作者简介: 吴楚明 (1990 - ), 男, 广东湛江人, 硕士研究生, 主要研究方向为内环流体系厌氧污泥消化及其流变特性。

E-mail: qq494417692@126.com

收稿日期: 2018-07-31