

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0768

韩芸, 宜慧, 卓杨, 等. 2015. 低温短时水热预处理混合及初沉污泥的高温厌氧消化特性研究[J]. 环境科学学报, 35(2): 461-467

Han Y, Yi H, Zhuo Y, et al. 2015. Thermophilic anaerobic digestion of mixed sludge and primary sludge pretreated by short time and low temperature thermal condition[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(2): 461-467

低温短时水热预处理混合及初沉污泥的高温厌氧消化特性研究

韩芸^{1,*}, 宜慧¹, 卓杨¹, 董涛¹, 彭党聪¹, 李玉友^{1,2}

1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055

2. 东北大学大学院工学研究科土木工学专攻, 仙台 980-8579

收稿日期: 2014-04-23 修回日期: 2014-05-23 录用日期: 2014-05-31

摘要: 以低温短时(90 °C、30 min)水热预处理后的混合及初沉污泥为研究对象, 分别进行了高温((55±1) °C)厌氧消化连续性试验. 研究了该预处理条件下这两类污泥在水力停留时间(HRT)为 20 d 时的产气量、有机物分解率及物料平衡等, 探讨了低温短时水热预处理对提高污泥厌氧消化性能的效果. 结果表明: TS 约为 35 g·L⁻¹ 的预处理混合污泥与初沉污泥经高温厌氧消化后, 投加单位 VS 的产气量分别为 (343.00±9.86) mL·g⁻¹ 和 (365.00±7.61) mL·g⁻¹, VS 去除率分别为 38.9% 和 45.8%. COD 物料平衡计算结果表明, 混合和初沉污泥中分别有 33.6% 和 43.9% 的固体有机物被分解转化, 生物气中 CH₄ 含量均在 70% 左右.

关键词: 厌氧消化; 低温短时预处理; 高温; 混合污泥; 初沉污泥

文章编号: 0253-2468(2015)02-461-07 中图分类号: X703 文献标识码: A

Thermophilic anaerobic digestion of mixed sludge and primary sludge pretreated by short time and low temperature thermal condition

HAN Yun^{1,*}, YI Hui¹, ZHUO Yang¹, DONG Tao¹, PENG Dangcong¹, LI Yuyou^{1,2}

1. School of Municipal and Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055

2. Department of Civil and Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai 980-8579

Received 23 April 2014; received in revised form 23 May 2014; accepted 31 May 2014

Abstract: Thermophilic anaerobic digestion of thermal pretreated sludge was investigated using completely stirred tank reactors (CSTRs) at (55±1) °C. Two kinds of concentrated sludge, mixed sludge and primary sludge, both with a TS concentration of 35 g·L⁻¹, were thermally pretreated at 90 °C for 30 minutes, respectively. The performance and stability of thermophilic anaerobic digestion were investigated at a hydraulic retention time (HRT) of 20 days, including biogas production rate, removal efficiency of organic matter, and COD mass balance. The results showed that the biogas production rate of the mixed and primary sludge were (343.00±9.86) mL·g⁻¹, and (365.00±7.61) mL·g⁻¹, respectively; and VS removal efficiencies of those two kinds of sludge were 38.9% and 45.8% in the thermophilic anaerobic digestion. The results of COD mass balance of mixed and primary sludge showed that over 33.6% and 43.9% of the influent organic matters were transformed to biogas with a methane content about 70%.

Keywords: anaerobic digestion; short time thermal pretreatment; thermophilic; mixed sludge; primary sludge

1 引言 (Introduction)

随着城市污水处理厂数量的增加和处理效率的不断提高, 污水厂污泥产量也随之迅猛增长. 截止

到 2010 年底, 全国城镇污水处理厂数量达 2496 座, 建成投运的城镇污水处理厂日处理能力已达 1.25 亿 m³ (中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012), 含水率为 80% 的湿污泥产量超过 2000 万 t, 其中, 60% 是典型生物工艺处理后的有机污泥 (Liu *et al.*,

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (No.2013ZX07315-001-04); 陕西省科技统筹创新重大项目 (No.2011KTZB-03-03-03)

Supported by the National Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Management (No.2013ZX07315-001-04) and the Shaanxi Province Major Project of Innovation of Science and Technology (No.2011KTZB-03-03-03)

作者简介: 韩芸 (1974—), 女, 副教授 (博士); * 通讯作者 (责任作者), E-mail: hanyun@xauat.edu.cn

Biography: HAN Yun (1974—), female, associate professor (Ph.D.); * Corresponding author, E-mail: hanyun@xauat.edu.cn

2012).厌氧消化可有效减少污泥体积、降低含水率、消灭病菌,同时产生可利用生物质气体,满足减量、无害化和资源化的污泥处理处置原则(Liu *et al.*, 2009).厌氧消化时,污泥在微生物作用下主要经历水解、产酸、产甲烷3个阶段.传统的厌氧消化存在消化速率低、停留时间长、处理效率低等特点(王治军等,2005),因为水解阶段是厌氧消化过程的速度控制步骤(Pavlostathis *et al.*, 1986),污泥大部分的有机物存在于微生物细胞内,微生物半刚性细胞壁的保护作用使得其他微生物所分泌的水解酶对这部分有机物进行水解的速率低,而厌氧消化的第一步水解阶段的缓慢进行影响了整个厌氧消化进程.因此,要对污泥进行强化预处理以破除污泥细胞壁的保护,释放其中的有机物,进而可达到提高污泥厌氧消化速度及性能的目的.

未经任何预处理的污泥厌氧消化的生物降解率低(Ferrer *et al.*, 2008),且对病原微生物的灭活作用不明显(Song *et al.*, 2004).热解可有效提高污泥的厌氧消化性能和微生物降解率(王治军等,2005).其中,高温(130~210 °C)、短时(15~60 min)预处理是一种常用的预处理方法,对污泥破坏程度大,但高温作业缺点甚多,如能耗大、对设备要求高、操作运行危险等(董滨等,2013);低温(50~100 °C)热解也是一种提升产气及有机物降解性能的有效方式(Climent *et al.*, 2007).低温处理对污泥的破坏程度虽不如高温处理,但有研究人员采用长时间(3~10 h)的处理也能达到不错的破胞效果(Appels *et al.*, 2010),而长时间的预处理同样会大大增加污泥热解装置体积,使能耗剧增.权衡利弊,在实际工程中,低温短时水热预处理将更适合推广,因此,该

预处理方式对厌氧消化性能的提高更值得深入研究.

基于此,本文以低温短时水热预处理后的城市污水处理厂初沉污泥和混合污泥(剩余污泥+初沉污泥)为研究对象,在实验室进行高温厌氧消化试验研究.通过对不同类型的污泥在相同预处理(90 °C、30 min)及高温厌氧消化((55±1) °C, HRT=20 d)条件下的研究,分析低温短时水热预处理污泥的高温厌氧消化的产气状况、有机物分解率及其稳定性等特性.

2 材料及方法(Materials and methods)

2.1 污泥

接种污泥取自西安市邓家村污水处理厂厌氧消化后的污泥均质池,其pH为7.1,总固体(TS)为29.3 g·L⁻¹,挥发性固体(VS)为12.6 g·L⁻¹.原始污泥取自西安市第四污水处理厂初沉池(作为试验用初沉污泥)和二沉池(剩余污泥),试验用的混合污泥由初沉污泥与剩余污泥经沉降24 h后按体积比1:1混合获得.

根据前期对低温短时水热预处理条件的研究结果,当90 °C、处理时间达到30 min后,细胞破裂比例大幅提高(Appels *et al.*, 2010),SCOD/TCOD和产气量也显著增加,因此,选择90 °C、30 min为污泥低温短时水热预处理条件.混合污泥和初沉污泥经低温短时水热预处理后,加水稀释到总固体TS为35 g·L⁻¹左右作为高温厌氧消化试验用泥(基质),于4 °C冰箱保存待用.原始污泥与基质特性如表1所示.

表1 原始污泥与基质特性

Table 1 Characteristics of the raw material and substrates

物料	pH	TS/ (g·L ⁻¹)	VS/ (g·L ⁻¹)	COD/ (g·L ⁻¹)		碳水化合物/ (g·L ⁻¹)		蛋白质/ (g·L ⁻¹)		VFA/ (g·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/ (g·L ⁻¹)
				T	S	T	S	T	S		
原始污泥 混合污泥	6.5	32.1	20.8	32.1	1.1	4.1	0.08	12.4	0.3	0.7	0.15
初沉污泥	6.6	35.0	22.7	35.4	1.9	3.7	0.08	12.9	0.5	1.0	0.16
基质 混合污泥	6.6	32.0	18.2	31.8	4.2	4.0	0.73	10.7	1.3	3.1	0.51
初沉污泥	6.8	35.0	20.0	36.5	5.8	3.8	0.74	11.7	1.6	2.9	0.54

注:T: Total; S: Soluble; VFA 以乙酸计; 基质是指经低温短时水热预处理后的污泥.

2.2 试验装置

污泥厌氧消化采用完全混合式反应器(Completely Stirred Tank Reactors, CSTRs),试验装置如图1所示.反应器总容积为5 L,有效容积为4 L.

进泥的投加与消化液的排出由时间控制器控制投料-排液蠕动泵(BT100-2J,保定兰格)完成,每天进泥排泥各1次,每次200 mL;循环加热装置控制消化罐内温度为(55±1) °C,循环加热装置为外循环

温控水浴加热,采用冷却泵外循环保持进泥槽温度为 4 ℃,进泥槽和各消化罐采用机械搅拌方式进行连续搅拌.产气量经气液分离装置后用湿式气体流量计测定.

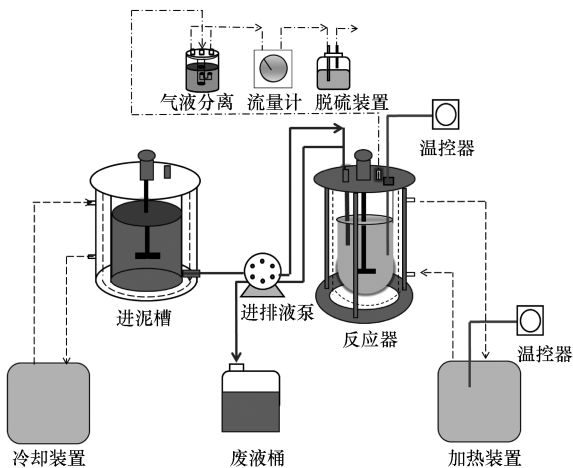


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic of the experimental apparatus

两种不同类型的污泥分别在两个相同的反应器内进行, R1 为混合污泥, R2 为初沉污泥.反应器启动成功后分别进行 HRT = 20 d 的高温 ((55 ± 1) ℃) 厌氧消化试验.

2.3 测试项目与分析方法

pH 采用雷磁 PHs-3C pH 计测定; TS、VS、SS、VSS 采用称重法测定; 碳水化合物采用苯酚-硫酸比

色法测定,以葡萄糖为标准样品 (Sponza, 2002); 蛋白质采用 Folin-酚法,以牛血清蛋白为标准蛋白 (Sawasaki *et al.*, 2002); VFA 采用气相色谱法 (BEIFEN Corp. 3420A) 测定, FID 检测器、BB-WAX123-7033 毛细柱 (30 m × 0.25 mm × 0.15 mm), 进样口温度 150 ℃, 柱箱温度 230 ℃, 检测器温度 250 ℃; 气体组分 (H₂、N₂、CH₄、CO₂) 采用气相色谱法 (BEIFEN Corp. 3420A) 测定, TCD 检测器、TDX-01 填充柱, 进样口温度 130 ℃, 柱箱温度 140 ℃, 检测器温度 150 ℃; H₂S 采用美国 PE600 气相色谱仪测定, FPD 检测器、PoraPakQ 填充柱, 柱箱温度 120 ℃, 检测器温度 350 ℃; 气量由湿式气体流量计 (LML-2) 测定; 其他指标测定参考《水和废水监测分析方法 (第 4 版)》(国家环境保护局, 2002).

3 结果 (Results)

3.1 反应器运行

试验是利用已经运行稳定的高温厌氧消化反应器开展的, 直接投加预处理后的基质, 每日进、排泥各一次 (200 mL), 保持反应器在 HRT = 20 d 条件下运行. 18 d 后日产气量达到稳定状态, 系统启动成功, 系统运行稳定状态达 120 d 以上. 图 2 所示为反应器运行阶段的日产气量、消化液 pH 及 VS 情况, 可看出 R1 和 R2 两个反应器的日产气量均在稳定范围内波动, pH 稳定在 7.6~8.0 之间, 消化液 VS 也较稳定, 说明反应器已处于稳定运行状态.

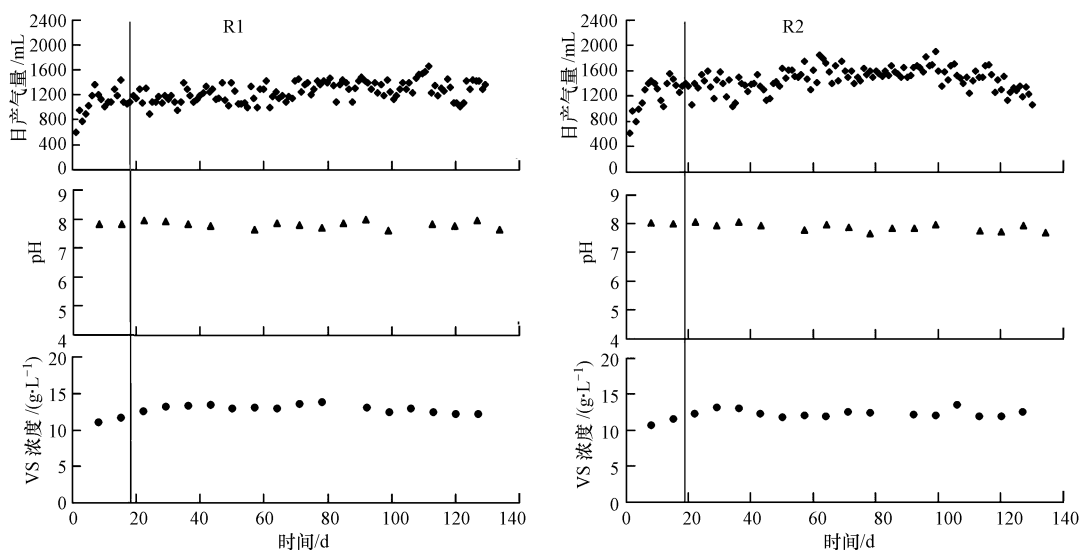


图 2 R1、R2 运行阶段的日产气量、pH 及 VS 变化

Fig.2 Characteristics of daily biogas production, pH and VS during the operation duration

表 2 为稳定状态下各反应器的产气状况. 从表 2

可明显看出, 在 HRT = 20 d 的条件下, 不管是日产气

量、产气速率,还是投加单位质量 VS 的产气量,初沉污泥(R2)的数值均高于混合污泥(R1),这与污泥类型有较大关系.R2 为未经降解的初沉污泥,其中含有大量的易被微生物利用的有机物,而 R1 中

有一半的污泥是经过生物降解的剩余污泥,因此,R2 的 VS_{投加} 产气量要高于 R1.各反应器的 CH₄ 含量均在 70% 左右, H₂S 含量则在 0.003% ~ 0.025% 之间.

表 2 不同基质的产气状况

Table 2 Summary of gas production at different reactors

反应器 编号	日产气量/ (mL·d ⁻¹)	产气速率/ (mL·L ⁻¹ ·d ⁻¹)	产气量 ^a / (mL·g ⁻¹)	产气量 ^b / (mL·g ⁻¹)	生物气体组分				
					CH ₄	CO ₂	N ₂	H ₂	H ₂ S
R1	1250	312.0±37.5	343.00±9.86	1136.0±32.3	69.1%	27.3%	3.5%	0.01%	0.003%
R2	1460	365.0±30.0	365.00±7.61	948.0±20.5	70.4%	26.5%	2.7%	0.02%	0.025%

注:a.投加单位 VS 的产气量;b.降解单位 VS 的产气量.

3.2 消化液特性

消化液的 pH、碱度、氨氮及 VFA 浓度是表征厌氧反应器是否稳定运行的重要指标.厌氧微生物可在 pH=4.0~8.5 内发挥作用(Hwang *et al.*, 2004), 由于试验系统具有一定的缓冲能力,当反应器运行出现较大波动时,pH 有时也只会出现较小范围的波动(Bprönsson *et al.*, 2000).在测定 pH 的同时,结合碱度、氨氮、VFA 等则可较准确地判断出反应器的运行状况,同时,消化液 VFA 浓度越低则说明其生物降解进行的越彻底.表 3 和表 4 所列数据为反应器运行稳定后 R1、R2 消化液的各种指标及去除率情况.

表 3 R1、R2 的消化液特性

Table 3 Characteristics of the anaerobic digestion liquid of R1 and R2

指标	单位	取值	
		R1	R2
pH		7.83±0.12	7.89±0.16
TS	g·L ⁻¹	24.2±2.3	23.8±2.1
VS	g·L ⁻¹	12.7±1.2	12.3±1.4
VFA	g·L ⁻¹	0.25±0.04	0.21±0.03
TCOD	g·L ⁻¹	20.5±2.4	19.2±3.1
SCOD	g·L ⁻¹	2.10±0.48	2.37±0.71
蛋白质 T	g·L ⁻¹	8.50±0.90	8.68±1.30
蛋白质 S	g·L ⁻¹	0.89±0.06	1.10±0.11
碳水化合物 T	g·L ⁻¹	3.40±0.32	3.16±0.28
NH ₄ ⁺ -N	g·L ⁻¹	0.82±0.07	0.77±0.09
碱度	g·L ⁻¹	3.56±0.39	3.51±0.21

从表 3 可以看出,各反应器 pH 均在 7.8 左右.厌氧消化过程中,NH₄⁺-N 浓度和碱度过高会对厌氧微生物产生抑制作用(Salminen *et al.*, 2002), 高温消化时 NH₄⁺-N 浓度超过 2000 mg·L⁻¹ 会导致 VFA 积累和产甲烷活性降低(Li *et al.*, 2004).本试验过程中 NH₄⁺-N 浓度均维持在 1000 mg·L⁻¹ 以下,即在

反应器运行过程中没有发生 NH₄⁺-N 抑制.研究表明,消化液碱度(以 CaCO₃ 计)在 1000~5000 mg·L⁻¹ 之间时厌氧反应可以稳定进行(Ren *et al.*, 2004), R1、R2 消化液碱度在 3400~3650 mg·L⁻¹ 之间,说明反应器在稳定范围内运行.

厌氧消化的主要目的是降低污泥的有机物含量,稳定污泥的同时获得资源性气体.混合和初沉污泥经低温短时水热预处理再高温厌氧消化后主要有机物的去除率见表 4.从表中数据可看出,R2 的有机物去除率普遍高于 R1.与同类研究对比,严媛媛等(2012)用 VS/TS 小于 0.5 的混合污泥经 100 °C、30 min 预处理再高温消化后的 VS 去除率为 34%,董滨等(2013)通过对 VS/TS = 0.54 的剩余污泥经 90 °C、20 min 预处理后,发现 VS 去除率为 33%,本试验中混合污泥的 VS 去除率为 38.9%.针对初沉污泥,本试验 VS 去除率为 45.8%,与王素春(2013)所研究的未经任何预处理的初沉污泥经同条件的高温厌氧消化后的结果相比要高出 18.5%,说明低温短时水热预处理可有效提高污泥的高温厌氧消化性能.

表 4 R1、R2 的消化液降解情况

Table 4 Characteristics of the organic matter reduction rate of R1 and R2

指标	去除率	
	R1	R2
TS	25.0%±4.6%	34.2%±5.1%
VS	38.9%±3.1%	45.8%±2.3%
TCOD	36.1%±3.5%	45.7%±3.1%
蛋白质 T	31.4%±6.9%	32.7%±5.1%
碳水化合物 T	17.7%±2.1%	14.5%±1.9%

3.3 VFA 特性

消化液测定的挥发性脂肪酸为 C2~C6,包括乙

酸、丙酸、异丁酸、正丁酸、异戊酸、正戊酸、异己酸。表 5 为各基质与消化液 VFA 各组分浓度情况。由表可知,消化过程中消耗了大部分的 VFA,消化液中 VFA 浓度均小于 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,说明基质消化较彻底

(朱明权等,1997)。进泥组分的 VFA 浓度大小为 $C2 > C3 > C4 > C5 > C6$,且异酸盐浓度大于正酸盐。该结果与韩芸等(2007)和 Wang 等(1999)的报道相符。

表 5 消化液中 VFA 浓度

Table 5 VFA concentration in the anaerobic digester effluent

 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

泥样	VFA 各组分浓度							合计 (以乙酸计)
	乙酸	丙酸	异丁酸	丁酸	异戊酸	戊酸	异己酸	
R1 基质	1780	430	188	32	59	10	8	3120
R1 消化液	84	0	0	42	0	57	0	260
R2 基质	1400	420	182	85	140	82	0	2910
R2 消化液	57	0	38	10	0	30	0	199

4 讨论(Discussion)

4.1 国内外污泥泥质及消化效果比较

污泥中有机物含量的多少是影响污泥厌氧消化工艺的直接因素之一。不同地区由于气候、环境、生活习惯不同使得不同城市的污水和污泥性质会有较大差异,尤其是其有机物含量。表 6 列出了国内外一些污水处理厂的污泥泥质(VS/TS)及经预处理消化后 VS 的去除率情况。从表 6 可以看出,研究者采用的热解预处理条件不同,预处理温度在 $70 \sim 170$

$^{\circ}\text{C}$ 内变化,时间在 $20 \text{ min} \sim 9 \text{ h}$ 范围内变化。一般来说,温度越低所需预处理时间越长,低温处理数小时可达到高温短时预处理的效果, $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的预处理效果明显,但属于高温高压操作,处理成本增大,对设备的要求提高。与国外相比较,国内污泥的 VS/TS 比值较低(普遍低于 60%),无机物含量高,可生物降解的有机物含量则相对较少,这可能是造成国内厌氧消化产气量低、有机物去除率低的主要原因之一。

表 6 部分国内外污泥热解预处理研究结果

Table 6 Overview of some thermal pretreatment studies around the world

污泥来源	污泥类型	原始污泥 VS/TS	消化类型	预处理方法	VS 去除率	文献来源
比利时	剩余污泥	69.9%	高温	$90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、60 min	37%	Apples <i>et al.</i> , 2010
西班牙	混合污泥	74.1%	高温	$70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、9 h	62%	Ferrer <i>et al.</i> , 2008
西班牙	剩余污泥	64.9%	高温	$70 \sim 134 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、90 min~9 h	41%	Climent <i>et al.</i> , 2007
加拿大	剩余污泥	78.3%	高温	$170 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、1 h	58%	Nicholas <i>et al.</i> , 2009
日本	混合污泥	87.1%	高温	$165 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、30 min	53%	韩芸, 2007
北京	—	53.6%	高温	$170 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、30 min	54%	王治军, 2005
上海	剩余污泥	55.1%	高温	$90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、20 min	33%	董滨等, 2013
安徽	剩余污泥	48.0%	高温	$90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、5 h	36%	盛广宏等, 2013
上海	高含固污泥	$<50\%$	中温	$120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、30 min	37%	严媛媛, 2012
西安	混合污泥	56.8%	高温	$90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、30 min	39%	本研究, 2013
西安	初沉污泥	57.1%	高温	$90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、30 min	46%	本研究, 2013

4.2 COD 物料平衡

COD 的物料平衡计算可以了解厌氧污泥反应器内的固态、溶解态(溶解性蛋白质、碳水化合物、VFA 等有机物)、气态(CH_4)之间的转化关系,其表述污泥减量效果更直观。为进行准确分析,将原始污泥(预处理前)、基质(预处理后)及消化液中有机物的存在形式分为固态、溶解态和气态 3 大类进行

污泥厌氧消化物料平衡计算,均以 COD 来计。以投入量为 100% 算,按照公式(1)~(7)的计算方法得出 R1 和 R2 的 COD 物料平衡关系(表 7)。

$$P_{\text{进泥}} = \frac{T_{\text{COD}} - S_{\text{COD}}}{T_{\text{COD}}} \quad (1)$$

$$P_{\text{出泥}} = \frac{T'_{\text{COD}} - S'_{\text{COD}}}{T_{\text{COD}}} \quad (2)$$

$$S_{\text{进泥}} = \frac{S_{\text{COD}}}{T_{\text{COD}}} \quad (3)$$

$$S_{\text{出泥}} = \frac{S'_{\text{COD}}}{T'_{\text{COD}}} \quad (4)$$

$$Q_{\text{进泥}} = 0 \quad (5)$$

$$Q_{\text{消化}} = \frac{Q'_{\text{COD}}}{T_{\text{COD}}} \quad (6)$$

$$T = P + Q + S \quad (7)$$

式中, T_{COD} 为进泥总 COD ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), S_{COD} 为进泥溶解性 COD ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), T'_{COD} 为消化液总 COD ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), S'_{COD} 为消化液溶解性 COD ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), Q'_{COD} 为生物

气转化成 COD 的当量 ($Q'_{\text{COD}} = 2.857Q_{\text{CH}_4}$).

表 7 所示为 R1、R2 的 COD 物料平衡关系, 各消化液 COD 的回收率在 100% 左右, 误差小于 10%. 预处理可明显增加污泥中溶解态有机物含量, R1 和 R2 分别比原始污泥增加了 4.1 和 2.1 倍. 预处理和高温厌氧消化过程均可大大降低污泥中的固态物质含量, R1 和 R2 中的固态物质分别由原始污泥的 96.6% 和 94.6% 降到 55.4% 和 46.3%; 消化液中溶解态物质分别为 7.6% 和 6.5%; 投入 COD 的甲烷转化率为 39.0% 和 40.3%. 原始污泥中固态物质实现不同程度的转化, 达到了污泥减量化目的.

表 7 COD 物料平衡计算

Table 7 Calculation method of COD mass balance

污泥类型		固态 P	溶解态 S	气态 Q	总量 T
混合污泥(R1)	原泥	96.6%	3.4%	0	100%
	进泥	82.4%	17.6%	0	100%
	消化后	55.4%	7.6%	39.0%	102%
初沉污泥(R2)	原泥	94.6%	5.4%	0	100%
	进泥	82.5%	17.5%	0	100%
	消化后	46.3%	6.5%	40.3%	93.1%

5 结论 (Conclusions)

将混合污泥与初沉污泥分别经低温短时 (90 °C, 30 min) 水热预处理后作为基质, TS 维持在 35 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 进行高温 ((55 ± 1) °C) 厌氧消化研究, 得出以下结论:

1) 预处理后的混合污泥与初沉污泥经 HRT = 20 d 的高温厌氧消化后, 其产气速率分别是 (312.0 ± 37.5) $\text{mL} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 (365.0 ± 30.0) $\text{mL} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; 投加单位 VS 的产气量分别为 (343.00 ± 9.86) $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 (365.00 ± 7.61) $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$, VS 去除率分别为 38.9% 和 45.8%. 与国外数据相比, 导致我国污泥厌氧消化降解效率较低的原因与污泥泥质中有机物含量少 (VS/TS 比值低) 有关.

2) COD 物料平衡计算结果表明, R1 和 R2 进泥中有 33.6% 和 43.9% 的固体有机物被分解转化, 可以达到污泥减量化目的; 两个反应器所产生物气中 CH_4 含量均达 70% 左右.

3) 初沉污泥 (R2) 的有机物去除率总体上高于混合污泥 (R1), 初沉污泥的 TCOD 去除率高出混合污泥 21%, VS 去除率高出混合污泥 15%.

责任作者简介: 韩芸 (1974—), 女, 工学博士, 副教授, 硕士

生导师, 主要从事环境工程领域方面的研究, 研究方向为城市污水厂污泥处理及处置、污水再生利用等.

参考文献 (References):

- Appels L, Degève J, Van der Bruggen B, *et al.* 2010. Influence of low temperature thermal pre-treatment on sludge solubilisation, influence of low temperature thermal [J]. *Bioresource Technology*, 101(15): 5743-5748
- Björnsson L, Murto M, Mattiasson B. 2000. Evaluation of parameters for monitoring an anaerobic co-digestion process [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 54(6): 844-849
- Climent M, Ferrer I, M M B, *et al.* 2007. Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions [J]. *Chemical Engineering*, 133: 335-342
- 董滨, 刘晓光, 戴翎翎, 等. 2013. 低温短时热水解对剩余污泥厌氧消化的影响 [J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 41(5): 716-721
- Ferrer I, Ponsab S, Vázquez C F, *et al.* 2008. Increasing biogas production by thermal (70 °C) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 42(2): 186-192
- 国家环境保护局. 2002. 水和废水监测分析方法 (第 4 版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社
- 韩芸, 李玉友, 任勇翔, 等. 2007. 城市污水处理厂预处理混合污泥的高温厌氧消化特性研究 [J]. *环境科学学报*, 27(7): 1174-1180
- Hwang M H, Jang N J, Hyum S H, *et al.* 2004. Anaerobic bio-hydrogen

- production from ethanol fermentation; the role of pH[J]. *Journal of Biotechnology*, 111(3): 297-309
- Li Y Y, Ko I B, Noike T, *et al.* 2004. Comparison of ammonia inhibition between the mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of municipal solid wastes[A]. *The Proceedings of 10th world congress on Anaerobic Digestion*[C]. Montreal. 507-514
- Liu X L, Liu H, Du G C, *et al.* 2009. Improved bioconversion of volatile fatty acids from waste activated sludge by pretreatment[J]. *Water Environment Research*, 81(1): 13-20
- Liu X, Wang W, Gao X B, *et al.* 2012. Effect of thermal pretreatment on the physical and chemical properties of municipal biomass waste[J]. *Waste Management*, 32(2): 249-255
- Nicholas W, Honghi T, Emma M. 2009. Pretreatment of pulp mill secondary sludge for high-rate anaerobic conversion to biogas[J]. *Bioresource Technology*, 100: 5729-5735
- Pavlostathis S, Gosset J. 1986. A kinetic model for anaerobic digestion of biological sludge[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 28(10): 1519-1530
- Salminen E A, Rintbla J A. 2002. Semi-continuous anaerobic digestion of solid poultry slaughterhouse waste: effect of hydraulic retention time and loading[J]. *Water Research*, 36(13): 3175-3182
- Sawasaki T, Hasegawa Y, Tsuchimochi M, *et al.* 2002. A bilayer cell-free protein synthesis system for high-throughput screening of gene products[J]. *Federation of European Biochemical Societies Letters*, 514(1): 102-105
- Song Y C, Kwon S J, Woo J H. 2004. Mesophilic and thermophilic temperature co-phase anaerobic digestion compared with single-stage mesophilic and thermophilic of sewage sludge[J]. *Water Research*, 38(7): 1635-1662
- Sponza D T. 2002. Extracellular polymer substances and physicochemical properties of floss in steady and unsteady-state activated sludge systems[J]. *Process Biochemistry*, 9(37): 983-998
- Wang Q H, Kuninobu M, Ogawa H I, *et al.* 1999. Degradation of volatile fatty acids in highly efficient anaerobic digestion[J]. *Biomass and Bioenergy*, 16(6): 407-416
- 王素春. 2013. 利用 Fe(III) 抑制污泥厌氧消化中硫化氢形成的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学
- 王治军, 王伟. 2005. 热水解预处理改善污泥的厌氧消化性能[J]. *环境科学*, 26(1): 68-71
- 严媛媛, 陈汉龙, 何群彪, 等. 2012. 热碱预处理改善低有机质污泥厌氧消化性能的效果[J]. *中国给水排水*, 28(23): 9-13; 17
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2012. 中国城镇排水与污水处理状况公报 2006—2010[R]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部
- 朱明权, 周冰莲. 1997. 污水厂污泥稳定方法及稳定化程度的评价指标[J]. *给水排水*, 23(10): 5-10