

# 热水解 + 厌氧消化处理市政污泥示范工程

杜朝丹<sup>1,2</sup>, 陈美香<sup>1,2</sup>, 林志龙<sup>1,2</sup>, 李华藩<sup>3,4</sup>, 刘常青<sup>2,4,5</sup>, 郑育毅<sup>2,3,4</sup>

(1. 福建海峡环保集团股份有限公司, 福建 福州 350009; 2. 福建海峡环保集团股份有限公司  
专家工作站, 福建 福州 350009; 3. 福建师范大学 环境科学与工程学院, 福建 福州 350007;

4. 福建师范大学 环境科学研究所, 福建 福州 350007; 5. 福建师范大学 地理科学学院,  
福建 福州 350007)

**摘要:** 某市政污泥处理示范工程处理规模为 5 t/d, 采用热水解 + 厌氧消化工艺。近一年的稳定运行表明, 厌氧消化过程的甲烷产量约 6 m<sup>3</sup>/d, 甲烷最高产率可达 353 L/kgVS, 污泥中有机质降解率为 29.68%, TOC 降解率为 21.7%, 能较好地实现污泥的稳定化与资源化。

**关键词:** 市政污泥; 热水解; 厌氧消化; 甲烷

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2019)10-0097-04

## Demonstration Project of Municipal Sludge Treatment by Thermal Hydrolysis and Anaerobic Digestion Process

DU Chao-dan<sup>1,2</sup>, CHEN Mei-xiang<sup>1,2</sup>, LIN Zhi-long<sup>1,2</sup>, LI Hua-fan<sup>3,4</sup>, LIU Chang-qing<sup>2,4,5</sup>,  
ZHENG Yu-yi<sup>2,3,4</sup>

(1. Fujian Haixia Environmental Protection Group Co. Ltd., Fuzhou 350009, China; 2. Expert Workstation, Fujian Haixia Environmental Protection Group Co. Ltd., Fuzhou 350009, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 4. Institute of Environment Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 5. College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** A demonstration project of municipal sludge treatment with scale of 5 t/d was built using thermal hydrolysis and anaerobic digestion process. About one year's steady operation of the project showed that the methane production in anaerobic digestion process was about 6 m<sup>3</sup>/d, the maximum methane yield could reach 353 L/kgVS, the degradation rate of VS/TS in sludge was 29.68%, and the reduction rate of TOC was 21.7%. It indicated that this technology efficiently had realized the stabilization and resource utilization of the sludge.

**Key words:** municipal sludge; thermal hydrolysis; anaerobic digestion; methane

常见的污泥处理方法有填埋、堆肥、焚烧、热干化和厌氧消化等。相对而言, 污泥厌氧消化具有占地小、投资少、运行费用低等特点, 是一种性价比较

高的污泥处理方式。上海白龙港污水处理厂污泥厌氧消化工程设计规模为 204 tDS/d, 平均沼气产量可达 44 512 m<sup>3</sup>/d<sup>[1]</sup>。大连夏家河污水处理厂的污泥

厌氧消化工程规模为  $1\,200\text{ m}^3/\text{d}$ , 污泥含水率为 90%, 沼气产量可达  $18\,000\text{ m}^3/\text{d}$ , 除项目保温需求外, 可剩余 70% 的沼气用作城市燃气<sup>[2]</sup>。

厌氧发酵是有机质能源转化的主要途径之一, 不仅可以获取清洁能源气体, 而且可以有效解决污泥污染问题。污泥厌氧消化过程主要面临的问题: 污泥中大部分活性有机质为细胞壁所包围, 可溶性有机质含量较少, 可供后续资源化直接利用的有效成分(可溶有机物质)含量很低, 直接进行厌氧消化时效果很不理想, 从而严重阻碍污泥后续的资源化途径和效率。

为解决该问题, 利用热水解对污泥进行预处理, 以便释放溶解性有机物质, 提高污泥的厌氧消化效率, 为利用热水解—厌氧消化技术安全有效地解决当前市政污泥处置难题提供工程示范。

## 1 工程概况

本项目建在福州某大型污水处理厂内。该污水处理厂服务于福州城区 60% ~ 70% 的生活污水处理, 总规模为  $60 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ , 采用了氧化沟、 $A^2/O$ 、 $A^2/O + \text{深床滤池}$ 、MBR 等多种工艺, 剩余污泥产量达  $100\text{ t/d}$  (以脱水后含水率为 55% 计)。

由于该大型污水处理厂的污泥产量很大, 因而亟需在脱水预处理技术上获得突破, 以及安全处置去向方面能够得到持续、可靠支撑。为探索出污泥处理处置的可行性实用技术, 结合技术团队在实验室小试与中试的研究成果, 根据重大专题的任务约定, 放大建设一套处理能力  $\geq 5\text{ t/d}$  (以含水率为 99% 计) 的污泥热水解 + 厌氧消化装置, 具体包括污泥预脱水系统、热水解系统、厌氧消化系统、沼气收集与利用系统。污泥性质见表 1。

表 1 污泥性质

Tab. 1 Characteristics of sludge

项目	pH 值	ORP/ mV	污泥比阻/ ( $10^{15}\text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	TCOD/ ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	VS/ ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	VS : TS/%	C/N	粪大肠菌群/ ( $\text{MPN} \cdot \text{L}^{-1}$ )
初始污泥	6.65	-98	4.06	350	2.4	36.54	6.51	$3.2 \times 10^8$
消化后污泥	7.13	-221	9.55	297	1.8	25.69	7.08	$2.0 \times 10^6$

注: 表中数值为运行期间的平均值。

工艺流程见图 1。

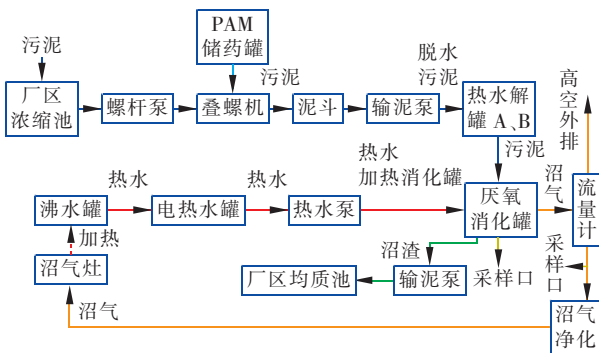


图 1 污泥热水解厌氧消化工艺流程

Fig. 1 Flow chart of sludge thermal hydrolysis anaerobic digestion process

主要设备与装置见表 2。

表 2 主要设备与装置

Tab. 2 Main equipment and devices

设备	型号与规格	数量
螺杆泵	G30-1, $Q=5\text{ m}^3/\text{h}$ , $N=2.2\text{ kW}$	2 台
叠螺机	TECH-201A, $N=1.5\text{ kW}$	1 台
污泥泵	QW50-12-20, $N=1.5\text{ kW}$	1 台
热水解罐	$V=0.8\text{ m}^3$ , 不锈钢	2 个

续表 2 (Continued)

设备	型号与规格	数量
搅拌机	$N=5.5\text{ kW}$ , 防爆	2 台
厌氧消化罐	$V=20\text{ m}^3$ , 不锈钢	1 个
搅拌机	$N=22\text{ kW}$ , 防爆	1 台
温度监控与传感器	范围 $0 \sim 150\text{ }^\circ\text{C}$ , 精度 $\pm 0.2\text{ }^\circ\text{C}$	1 套
pH 监控与传感器	范围 $0 \sim 14$ , 精度 $\pm 0.01$	1 套
ORP 监控与传感器	范围 $\pm 2\,000\text{ mV}$ , 精度 $\pm 2\text{ mV}$	1 套
湿式气体流量计	SSQ-20, 量程 $0.6 \sim 6.0\text{ m}^3/\text{h}$	1 台
气体净化器	内置脱硫剂	1 套

## 2 主要处理单元

### 2.1 污泥预脱水

为提高热水解和厌氧消化反应器的固体停留时间(SRT), 减少反应器体积, 需对进泥进行预脱水。预脱水系统由螺杆泵、叠螺机、加药装置组成。二沉池含水率为 99.0% ~ 99.2% 的剩余污泥经储泥池浓缩至含水率为 96.0% ~ 97.0%, 由螺杆泵抽至叠螺机进料斗, 经  $1\text{ g/kgDS}$  的 PAM 调理絮凝后进入叠螺机脱水, 脱水污泥含水率为 90.0% ~ 92.0%。

### 2.2 污泥热水解

预脱水后污泥由污泥泵抽送到热水解罐。热水

解条件:反应温度 90 ℃、停留时间 24 h。为便于操作,热水解采取序批式运行,故设置两个热水解罐,交替使用。热水解罐为不锈钢材质,外设电热水的保温夹套,罐体尺寸为  $\varnothing 0.9\text{ m} \times 1.6\text{ m}$ ,有效容积为  $0.8\text{ m}^3$ 。热水解过程由内置的搅拌器连续搅拌,转速为 70 r/min。热水解完毕出料前,向夹套通入冷水,将罐中污泥冷却至  $(40 \pm 2)\text{ }^\circ\text{C}$ 。

### 2.3 污泥厌氧消化

冷却后水解污泥重力自流进入厌氧消化罐。采用中温厌氧条件,温度为  $(35 \pm 1)\text{ }^\circ\text{C}$ ,停留时间为 20 d,保温方式为外夹套热水循环。不锈钢厌氧消化罐尺寸为  $\varnothing 2.4\text{ m} \times 5.4\text{ m}$ ,有效容积为  $20\text{ m}^3$ ,内置连续搅拌的桨式搅拌器,转速为 60 r/min。罐体安装有温度、ORP、pH 传感器,与自控监控 PLC 系统相连,数据实时传输与显示。保温热水由热水泵从供热水箱泵给,它们与沼气热水炉灶、保温夹套、管道等构成热水循环系统。消化后污泥由螺杆泵送回污水厂的均质池,由厂区污泥脱水系统一并处理。

### 2.4 沼气收集与利用

厌氧消化产生的沼气从罐顶排气管导出,由湿式气体流量计累计产气量。沼气经气体净化器脱硫后接入沼气灶燃烧,用于预热循环热水。基于安全设计考虑,在气体净化器前安装旁通阀,未利用沼气可直接由专管引到室外高空排放。

## 3 工程建设与运行

### 3.1 工程建设

前期研究于 2016 年结束,2017 年 3 月完成示范工程施工图设计,5 月设备招标并加工制作,8 月—10 月现场实施基础浇筑与安装工程,11 月开始联动试车和控制系统调试,同年底正式投料运行。

### 3.2 系统运行

示范工程至今已连续运行近一年,总体稳定。在稳定工况下,污泥进料量为  $0.7\text{ t/d}$ (含水率为 90%~92%),可产生沼气体积约  $6\text{ m}^3/\text{d}$ ,其中甲烷含量为 60%~80%,甲烷产率最高可达  $353\text{ L/kgVS}$ ,产甲烷水平与相关文献报道相当<sup>[3-4]</sup>。污泥的 VS/TS 由厌氧消化前的 36.54% 降至 25.69%,降解率为 29.68%,TCOD 降解率为 21.7%,C/N 值由 6.51 提高到 7.08,可见示范工程的污泥厌氧消化效果较好。对比消化前后的污泥比阻与脱水效率,虽然污泥比阻前后变化不明显,但脱水后污泥含水率

由 54.1% 降至 51.4%,表明厌氧消化较好地改善了污泥的脱水性能。对比消化前后污泥的粪大肠菌群由  $3.2 \times 10^8\text{ MPN/L}$  降至  $2 \times 10^6\text{ MPN/L}$ ,无害化程度明显提高。

## 4 成本与效益分析

### 4.1 成本分析

示范工程依托现有污水处理厂,节约了储泥池、厂房、配电等部分建设费用,土建、设备、安装、设计咨询等直接投资为 121.35 万元。运行成本包括水、电、药剂、工资及维护等,合计约 33.6 元/t 污泥(含水率为 99%)。

### 4.2 效益分析

工程效益包括直接的经济效益和间接的环境与社会效益。其中经济效益有回收约  $6\text{ m}^3/\text{d}$  的沼气能源,收益为 7.55 元/t 污泥(含水率为 99%,沼气单价按 2.2 元/ $\text{m}^3$  测算<sup>[5]</sup>);还有因脱水效率提高而减少的污泥运输与处置费,约 1.02 元/t 污泥(含水率为 99%)。相对而言,厌氧消化的直接经济效益低于工程运行成本,由于本项目的电费、人工费与维护费占总运行成本 90% 以上,若实现更大处理规模,并采用所产生的沼气供热,其经济性也将大大提高。此外,厌氧消化提高了污泥的稳定化程度,具有良好的环境效益和社会效益。

## 5 结语

基于实验室小试与中试等研究成果,建设了处理规模  $\geq 5\text{ t/d}$ (以含水率为 99% 计)的污泥“热水解+厌氧消化”示范工程,从其运行成效来看,“热水解+厌氧消化”污泥处理工艺具有可行性。单从经济效益而言,该技术的优势很有限,但厌氧消化更具有提高污泥稳定化程度的环境生态效益,该成果对市政污泥的处理处置及资源化有很好的示范作用。在工程运行中,由于进厂污水的碳源低,产生的剩余污泥有机质少,以及基质 C/N 的不均衡,造成系统的产沼及甲烷浓度出现一定范围的波动,这需要特别地关注。

## 参考文献:

- [1] 蒋玲燕,杨彩凤,胡启源,等.白龙港污水处理厂污泥厌氧消化系统的运行分析[J].中国给水排水,2013,29(9):33-37.

Jiang Lingyan, Yang Caifeng, Hu Qiyuan, et al. Operation  
(下转第 104 页)