

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.11.019

# 某热水解+厌氧消化污泥处理工程热能浅析

肖冬杰, 刘李柱, 李方志

(湖南军信环保股份有限公司, 湖南 长沙 410000)

**摘要:** 以采用“热水解+高温厌氧消化+板框脱水+带式干化”工艺的某市政污泥集中处置工程为例,收集该工程一个自然年内的生产进泥泥质、沼气产量及各工段热能消耗等实际生产数据,分析泥质变化趋势与不同运行方式下的热能平衡情况。结果表明,污泥有机质与含固率呈季节性变化。当有机质含量为30%~46.16%的污泥采用全工艺链处理时,处理1 t干污泥(DS)需补充沼气19~92 m<sup>3</sup>,工程方可实现热能平衡。不考虑带式干化时,污泥有机质含量应高于36.88%方可保证工程能量平衡。高湿度季节以外的清灰作业可有效避免锅炉受热面积灰导致的短期锅炉热效率下降,并防止因积灰回潮导致的受热面整体腐蚀。

**关键词:** 污泥; 热水解; 厌氧消化; 热能平衡

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)11-0122-05

## Analysis on Thermal Energy of a Sludge Treatment Project Adopting Thermal Hydrolysis and Anaerobic Digestion Process

XIAO Dong-jie, LIU Li-zhu, LI Fang-zhi

(Hunan Junxin Environmental Protection Co. Ltd., Changsha 410000, China)

**Abstract:** This paper collected the actual operational data of a municipal sludge centralized disposal project with process consisting of thermal hydrolysis, high temperature anaerobic digestion, plate frame dewatering and belt drying in a natural year, such as the quality of sludge, biogas yield and thermal energy consumption of each section, and analyzed the variation of sludge quality and the thermal energy balance under different operational modes. The organic matter and solid content of the sludge changed seasonally. When the sludge with organic matter content of 30%~46.16% was treated in the whole process chain, biogas with volume of 19~92 m<sup>3</sup> should be added to treat each ton of dry sludge (DS), so that the project could achieve thermal energy balance. When the belt drying was not operated, the organic matter content of the sludge should be higher than 36.88% to achieve the thermal energy balance of the system. The ash-cleaning outside the season of high humidity effectively avoided the short-term reduction of boiler thermal efficiency caused by ash accumulation on boiler heating surface and prevented the overall corrosion of heating surface caused by moisture regain of accumulated ash.

**Key words:** sludge; thermal hydrolysis; anaerobic digestion; thermal energy balance

随着经济的快速发展,污泥产生量逐年增加,但环保标准日益提高,开发并完善符合“四化”要求(无

害化、稳定化、减量化和资源化)的市政污泥处理技术是解决“重水轻泥”问题的关键。采用热水解+厌

通信作者: 肖冬杰 E-mail: dongjieshoki@163.com

氧消化工艺处理污泥,可杀灭污泥中的病原菌,并将生物质转化为沼气,实现污泥的无害化、稳定化、减量化和资源化处置,已成为目前常用的处置技术之一,并得到了相关政策的鼓励<sup>[1-2]</sup>。我国市政污泥存在有机质含量低、含砂量高等问题,而热水解+厌氧消化工艺存在耗热量大、影响因素多和设计准确性不够等问题,容易出现工艺热能无法自持平衡的情况<sup>[3-4]</sup>。笔者以实际工程为基础,分析了污泥泥质的变化趋势和热能利用与分布情况,总结了工程热能特性与供热环节中存在的问题,明确了工艺的热能平衡点,并提出了供热控制与维护优化的建议。

1 工程概况

1.1 工艺流程及运行参数

某市政污泥集中处置工程设计处理污水厂剩余污泥及餐厨垃圾,采用的主体工艺为热水解+高温厌氧消化+板框脱水+带式干化,工艺流程如图1所示。该工程于2014年年初启动调试,同年10月厌氧罐全部投入运行。因餐厨垃圾一直未进入,因此该工程在未掺混餐厨垃圾的情况下已连续运行约8年。



图1 工艺流程

Fig.1 Flow chart of treatment process

该工程的处理规模为500 t/d(含固率为22.4%, VSS为53%),其中生活污水处理厂剩余污泥量为434 t/d(含固率为20%),餐厨垃圾为66 t/d(含固率为40%)。厌氧消化产生的沼气用于锅炉及污泥干化。锅炉产生的蒸汽用于热水解系统、厌氧消化保温及办公楼冬季供暖,污泥干化则利用沼气燃烧产生的高温烟气对经板框脱水的污泥进行深度干化处理。各工艺段设计及实际运行参数见表1。

表1 设计及实际运行参数

Tab.1 Design and actual operation parameters

项 目	设计值	实际值
进泥量/(t·d <sup>-1</sup> )	500	439~503
进泥含固率/%	22.4	19.75~27
进泥 VSS 含量/%	53	27~46
热水解温度/℃	120~165	135
厌氧消化温度/℃	55	55
厌氧消化含固率/%	10	8.6~9.9
板框脱水出泥含固率/%	40	40~42
带式干化出泥含固率/%	≥58	58~60
产气量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	26 200	10 800~18 600

1.2 分析项目及方法

污泥含固率采用《城镇污水处理厂污泥泥质》(GB 24188—2009)进行测定,有机质含量采用《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)进行测定,锅炉灰的灰分采用《煤的工业分析方法》(GB/T 212—2008)进行测定,锅炉积灰中的硅元素采用《铅精矿化学分析方法 第14部分:二氧化硅含量的测定 钼蓝分光光度法》(GB/T 8152.14—2019)进行测定。

2 结果与讨论

2.1 进泥泥质

工程实际进泥为污水处理厂经脱水后的剩余污泥,各月的日均进泥量和泥质情况如图2所示。可知,工程的进泥量全年基本稳定,进泥含固率先升高后降低的趋势,月度最高值与最低值分别出现在8月与1月;污泥有机质含量呈现先稳定再降低最后升高的趋势,月度极大值与极小值分别出现在3月与8月。全年含固率极大值与有机质含量极小值同时出现在8月,造成上述情况的原因是生活污水厂进水水质受季节性降雨的影响,导致污泥有机质含量波动,进而造成脱水后污泥的含固率变化。整体泥质情况与王磊<sup>[5]</sup>及陈思思等<sup>[6]</sup>结论相似。

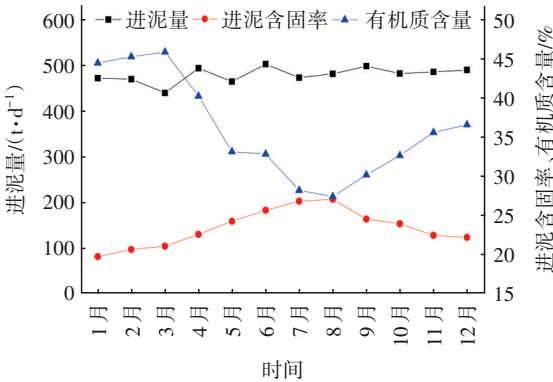


图2 进泥泥质

Fig.2 Quality of sludge into sewage treatment plant

2.2 工程热能消耗分布分析

工程热能消耗单元包括热水解、污泥干化、汽水换热器及锅炉除氧器4个部分。年内各单元不同月份热能消耗占比表明,各单元不同月份热能消耗占比基本稳定,其中热水解单元各月份的占比最高,达到48.43%~60.09%;其次是污泥干化,为34.39%~39.55%;汽水换热器的占比较小,为1.52%~

9.09%,受不同时段气温及厌氧消化罐保温作用的影响,其呈现夏季占比小、冬季占比大的季节性波动;锅炉除氧器的占比最低,仅为1.54%~3.23%。

### 2.3 整体热能平衡性分析

为保证工程正常运行,以邻近填埋场的填埋气发电余热锅炉作为安全补充热源。以当月沼气耗量为基础,结合当月沼气锅炉蒸汽的沼气耗量换算补充蒸汽量,在有补充蒸汽工况和折算热能(无补充蒸汽)工况下,工程全年热能产耗盈亏情况见图3。

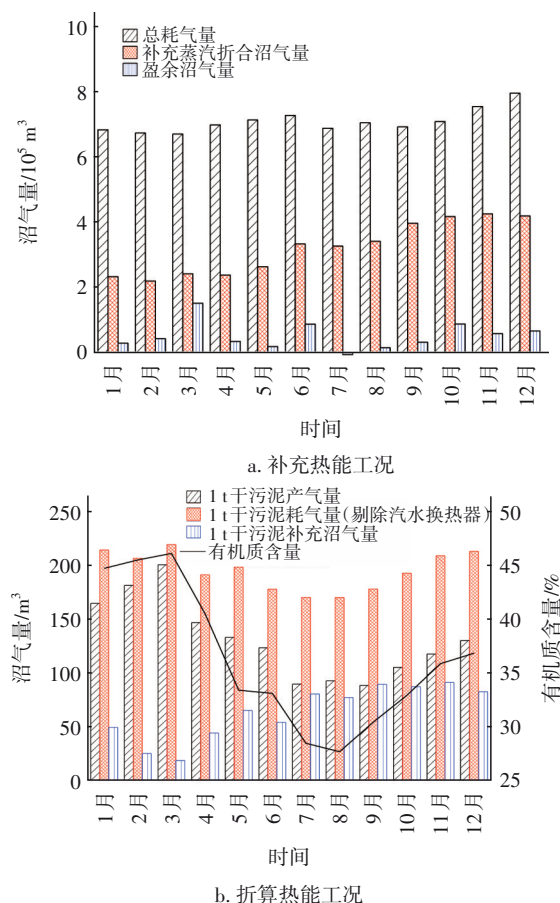


图3 补充热能和折算热能工况下工程沼气流量的变化

Fig.3 Variation of biogas volume under the conditions of supplementary thermal energy and converted thermal energy

由图3可知,在无补充蒸汽工况下,工程热能无法使用自持。为确保工程运行热能平衡,扣除汽水换热器(非必需)能耗,在进泥有机质含量为46.16%时,1t干污泥(DS)可产生沼气约为201 m<sup>3</sup>,生产耗气量为220 m<sup>3</sup>,需补充沼气约为19 m<sup>3</sup>;当进泥有机质含量为40%~45%时,工程可产生的沼气约为147~182 m<sup>3</sup>/t,生产耗气量为191~214 m<sup>3</sup>/t,需

补充沼气约为25~49 m<sup>3</sup>/t;当进泥有机质含量为30%~40%时,工程可产生的沼气约为89~131 m<sup>3</sup>/t,生产耗气量为187~234 m<sup>3</sup>/t,需补充沼气约为55~92 m<sup>3</sup>/t。综合污泥泥质全年的变化情况,建议后续工程在剩余污泥进行单独消化时,充分分析拟接收污泥有机质含量的变化,在设计阶段提前规划潜在补充热能来源或根据项目地点建立多项目间的协同供热机制,以保障工程热能平衡。

### 2.4 核心热能模拟消耗分析

因部分类似污泥处理工程未设置干化单元,同时将厌氧系统的保温热能与热水解降温热能进行综合利用<sup>[4]</sup>。为模拟类似工程工况,以无补充蒸汽热源为前提,对同时去除本工程污泥干化与汽水换热器热能消耗的工况进行模拟热能平衡分析。当热能消耗仅为热水解及锅炉补水除氧单元时,工程月度热能模拟消耗情况如图4所示。可知,模拟工况下存在两个热能平衡点。5月—6月,当进泥有机质含量在33.14%~33.43%之间时,热能已实现结余;12月,当进泥有机质含量达到36.88%时,热能实现基本平衡。推测出现该情况的原因为,5月—6月的环境气温较高,而12月较低,热水解单元向外散热损失受外界气温影响差异较大。

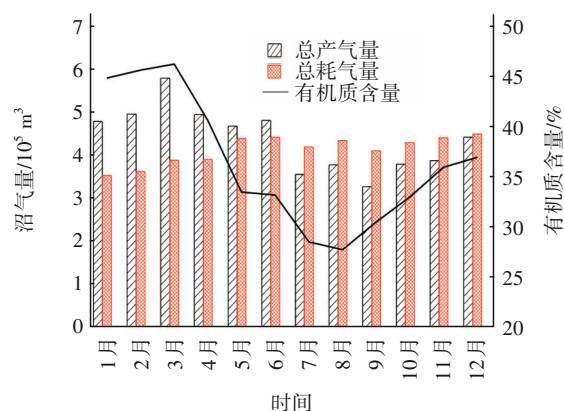


图4 核心系统热能平衡图

Fig.4 Thermal energy balance diagram of core system

相较包含干化的工况,模拟工况中热能平衡所需的污泥有机质含量已可由实际污泥泥质满足,建议后续类似联合处理工程应着重保障餐厨垃圾的收运工作。当剩余污泥需单独处理时,建议强化对厌氧消化后泥水混合物的化学调理,以期进一步降低脱水污泥的含水率。

### 2.5 热水解能耗特性分析

设计两套热水解系统并联运行,加热方式为蒸



汽直通,由两台设计蒸发量为5 t/h的锅炉负责提供所需蒸汽。热水解运行参数设定加热时长为15 min,单线和双线两种运行工况下,加热过程中蒸汽耗量情况见图5。系统中蒸汽耗量以15 min为1个周期,两种工况下1个周期内蒸汽耗量均存在快速陡升与缓慢下降的过程,初始蒸汽耗量远超出单台或两台锅炉的设计蒸发量。分析造成该现象的原因,热水解蒸汽加热方式为直通加热,起始加热阶段罐内为常温常压,加热阀门开启后蒸汽快速进入罐内。随着热水解温度升高,罐内压力上升,受背压升高的影响,蒸汽流量缓慢下降。上述现象导致在双线并联运行时,加热阶段锅炉汽包压力快速下降,同时出现假高水位。在单冲量锅炉补水调节下,若人工干预不及时,极易出现假高水位后的真低水位报警连锁停炉。同时,蒸汽耗量反复大幅超出锅炉设计的蒸发量易出现因汽化不均而引起的锅炉受热面温度分布不均,进而导致波纹炉胆变形。

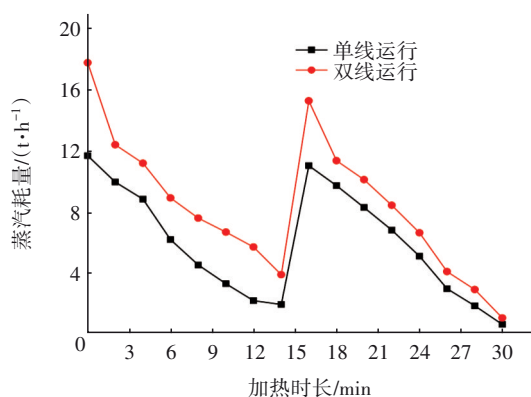


图5 不同工况下蒸汽耗量的变化

Fig.5 Change of steam consumption under different working conditions

因该类加热方式在短时间内引起蒸汽耗量的极大波动,锅炉火力与单冲量补水自动调节系统无法及时响应,必须人工提前对锅炉火力及补水流量进行多次干预,不仅存在较大安全隐患,且不利于整体系统的稳定运行。后续工程可考虑采用错峰运行方式来避免蒸汽耗量的同时叠加,缓解锅炉短时间的高低负载波动。同时,建议将锅炉补水控制改为三冲量调节,以优化假高水位时锅炉补水控制,缓解汽包水位的大幅变化。

## 2.6 锅炉运行特性分析

### 2.6.1 锅炉积灰影响分析

设计两台蒸发量为5 t/h的三回程火管锅炉,分

别于1月初和6月底进行清灰作业。以1月沼气中甲烷浓度为基准,换算锅炉全年各月吨蒸汽燃料单耗,结果如图6所示。可知,锅炉在使用厌氧沼气作为燃料时,运行6个月后燃料单耗上涨约8.4%,对沼气耗量的影响显著,但可通过定期清除炉膛及火管积灰的方式予以消除。

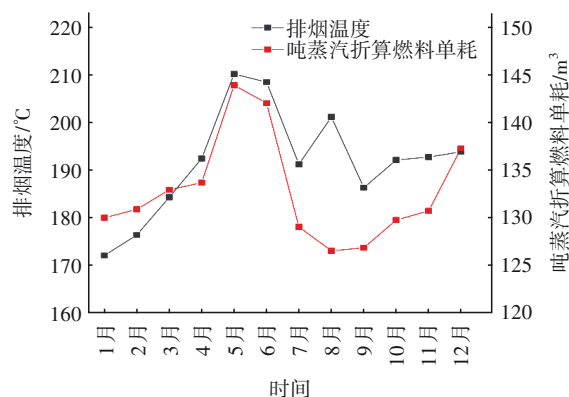


图6 锅炉燃料单耗与排烟温度的变化

Fig.6 Change of boiler fuel consumption and flue gas temperature

为进一步确定积灰成分,对锅炉积灰进行取样分析。积灰为灰白色粉,积灰溶水后pH为1.82,呈强酸性,成分含量(以质量分数计):灰分为78.9%、硅为27.25%、硫酸盐为0.11%、总铁为0.69%、总硫为0.95%。推测积灰中的灰分来自空气,硅来自厌氧消化产生的沼气<sup>[7]</sup>。因其中含有少量硫与铁元素,说明受热面存在一定酸腐蚀现象。

锅炉受热面积灰使其在短期内热效率降低,排烟温度与吨蒸汽燃料单耗明显上升。同时,因积灰水溶后pH呈强酸性,锅炉尾部烟道低温受热面(如烟换热器)易出现酸露点腐蚀问题。建议类似工程定期检查低温受热面腐蚀情况,锅炉清灰作业时段宜避开湿度较高的季节,以防因积灰回潮导致受热面整体腐蚀。

### 2.6.2 锅炉负荷分析

锅炉负荷取决于燃烧器功率。受空气灰分及燃料气特性影响,燃烧器稳焰盘极易积灰。稳焰盘积灰后,火焰在旋流燃烧的情况下容易因内部气场变化而产生脱盘熄火<sup>[8]</sup>。因沼气成分中甲烷含量低于天然气,在以沼气为燃料气时,相同燃料流量下热值偏低且火焰长度明显大于天然气,导致锅炉实际最大稳定蒸发量为4.1 t/h。因此。在后续类似工程设计中,锅炉设计负荷除应考虑整体蒸汽耗量外,

仍需进一步考虑生产负荷的变化,并适当预留部分蒸发量,避免因瞬时负载变化及燃料特性差异导致实际锅炉负荷小于设计或运行要求值的问题。

### 3 结论

① 污泥的有机质含量呈夏季低、冬季高的规律性变化。

② 采用热水解+高温厌氧消化+板框脱水+带式干化工艺处理市政污泥时,在不考虑厌氧罐二次保温的情况下,当进泥有机质含量为30%~46.16%时,处理1 t干污泥需补充的沼气量约为19~92 m<sup>3</sup>,工程可实现热能平衡。

③ 采用热水解+高温厌氧消化+板框工艺处理污泥时,在不考虑厌氧罐二次保温和行政办公取暖的情况下,当进泥有机质含量高于36.88%时,工程可实现热能平衡。

④ 热水解蒸汽负载特性对锅炉蒸发量的影响极大,宜采用错峰错时方式降低锅炉负荷,并考虑三冲量进水调控模式进行锅炉补水调节。

⑤ 空气灰尘及厌氧沼气中硅含量是锅炉热效率的关键限制因素,受热面清灰周期不宜高于6个月。负载端的变化特性及燃料燃烧特性是影响沼气锅炉稳定运行的重要因素,在进行设计时应予以充分考虑并适当提高锅炉余量。

### 参考文献:

- [1] 赵刚,唐建国,徐竟成. 污泥高温厌氧消化工程运行及碳足迹特点案例分析[J]. 净水技术, 2022, 41(7): 83-89.  
ZHAO Gang, TANG Jianguo, XU Jingcheng. Case analysis of operation and carbon footprint characteristics of sludge thermophilic anaerobic digestion project [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(7): 83-89 (in Chinese).
- [2] 贾川,张国芳. 国内外市政污泥处理处置现状与趋势[J]. 广东化工, 2020, 47(14): 123-124, 146.  
JIA Chuan, ZHANG Guofang. Sewage sludge treatment and disposal: status and prospects [J]. Guangdong Chemical Industry, 2020, 47(14): 123-124, 146 (in Chinese).
- [3] 胡维杰. 污水厂污泥消化处理系统关键的几个技术问题[J]. 中国市政工程, 2013(6): 55-57, 105.

HU Weijie. A discussion of several key technical problems of sludge digestion treatment system in sewage treatment plant[J]. China Municipal Engineering, 2013(6): 55-57, 105 (in Chinese).

- [4] 杜强强,戴明华,黄鸥. 污泥热水解厌氧消化工艺热系统设计探讨[J]. 中国给水排水, 2017, 33(6): 63-68.  
DU Qiangqiang, DAI Minghua, HUANG Ou. Discussion on design of thermal system of sludge thermal hydrolysis/anaerobic digestion process [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(6): 63-68 (in Chinese).
- [5] 王磊. 城市污水厂污泥产率季节变化与影响因素分析[J]. 净水技术, 2018, 37(6): 36-40.  
WANG Lei. Analysis of seasonal variation and influencing factors of sludge yield in municipal sewage plant [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(6): 36-40 (in Chinese).
- [6] 陈思思,杨殿海,庞维海,等. 我国剩余污泥厌氧转化的主要影响因素及影响机制研究进展[J]. 化工进展, 2019, 39(4): 1511-1520.  
CHEN Sisi, YANG Dianhai, PANG Weihai, et al. Main influencing factors and mechanisms of anaerobic transformation of excess sludge in China [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 39(4): 1511-1520 (in Chinese).
- [7] 王艺,陈川,张子峰,等. 甲基硅氧烷在污水处理厂中的环境行为[J]. 化工学报, 2016, 67(1): 83-88.  
WANG Yi, CHEN Chuan, ZHANG Zifeng, et al. Environmental behavior of siloxane in wastewater treatment plants [J]. CIESC Journal, 2016, 67(1): 83-88 (in Chinese).
- [8] 耿夏琰. 沼气锅炉低氮燃烧器性能优化及工程应用研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2017: 9-10.  
GENG Xiayan. Performance Optimization and Engineering Application Study on Low Nitrogen Burner for Biogas Boiler [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2017: 9-10 (in Chinese).

作者简介:肖冬杰(1990- ),男,湖南长沙人,本科,工程师,主要从事污水及污泥工程建设与运行管理工作。

E-mail: dongjieshoki@163.com

收稿日期:2022-10-27

修回日期:2023-02-07

(编辑:任莹莹)