

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.24.009

热水解厌氧消化池甲烷含量异常及应对措施

宋晓雅

(北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100044)

摘要: 针对某热水解厌氧消化池甲烷含量明显降低的情况,分析了挥发性脂肪酸、碱度和沼气产率等指标变化,并与正常消化池进行对比。异常消化池内挥发性脂肪酸 $>5\,000\text{ mg/L}$,表明出现挥发性脂肪酸积累(酸化)。进一步分析有机负荷、停留时间和温度对酸化的影响,发现温度过高是导致酸化的主要因素,而 $51\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是重要分界点。针对异常情况采取的应急措施是通过减少进泥量和清洗换热器的方式降低消化池温度。消化池恢复过程中甲烷含量指示作用最灵敏,其次是挥发性脂肪酸,碱度最不敏感。对热水解厌氧消化池的优化建议是进行温度控制和建立监控体系。近期温度控制以 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为警示值,远期考虑进行设施和自控改造。监控体系以甲烷含量为首选监测指标,可采用便携式分析仪检测,频次以周为单位。

关键词: 热水解; 厌氧消化池; 挥发性脂肪酸; 酸化; 温度控制; 甲烷

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)24-0059-05

Abnormal Methane Content in a Thermal Hydrolysis Anaerobic Digestion Tank and Countermeasures

SONG Xiao-ya

(Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: In view of the obvious decrease of methane content in a thermal hydrolysis anaerobic digestion tank, the changes of volatile fatty acids, alkalinity and biogas yield were analyzed and compared with those in a normal digestion tank. The content of volatile fatty acids in the abnormal digestion tank exceeded $5\,000\text{ mg/L}$, indicating the accumulation of volatile fatty acids, i.e., acidification. The effects of organic load, residence time and temperature on acidification were further analyzed. Excessive temperature was the main factor leading to acidification, and $51\text{ }^{\circ}\text{C}$ was an important critical point. The emergency measures taken for abnormal conditions were to reduce the temperature of the digestion tank by reducing the amount of inlet sludge and cleaning the heat exchanger. The methane content index was the most sensitive in the recovery process of digestion tank, followed by volatile fatty acids, and alkalinity was the least sensitive. The optimization suggestions of thermal hydrolysis anaerobic digestion tank are temperature control and establishment of monitoring system. Temperature control should take $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ as the warning value in the near future, and facilities and automatic control transformation should be considered in the long term. The methane content detection is recommended as the preferred monitoring index in monitoring system, using a portable detector with frequency of week.

Key words: thermal hydrolysis; anaerobic digestion tank; volatile fatty acid; acidification; temperature control; methane

近年来,大型热水解厌氧消化项目如湖南省长沙市污水处理厂污泥集中处理工程^[1](设计规模500 t/d,污泥含水率80%)、陕西省西安市污泥集中处置项目^[2](设计规模1 000 t/d,污泥含水率80%)等建成并投运。针对热水解厌氧消化池的运行,杜朝丹等^[3]关注沼气产量和甲烷含量波动;张新勃等^[4]强调换热器温度控制和冬季防冻措施;谭学军等^[5]指出沼液中总氮和氨氮浓度较高。结合北京某实际生产系统中热水解厌氧消化池甲烷含量异常情况,探讨其产生原因及应对措施。

1 项目概况

该生产系统位于北京市朝阳区,采用热水解+单级中温厌氧消化+板框脱水处理工艺。设计单池进泥量为46.25 tDS/d,池容12 000 m³,消化时间15 d,温度38~40℃,沼气产率185~315 m³/tDS。工艺流程如图1所示。目前4座消化池在运转,其中A消化池和D消化池进泥为同一来源热水解预处理后污泥,进泥方式为序批式。

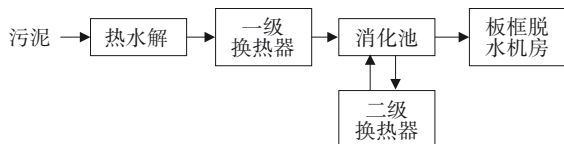


图1 污泥消化系统工艺流程

Fig.1 Flow chart of sludge digestion system

2 存在的问题

2023年4月1日,运行人员使用便携式沼气分析仪检测消化池气相空间甲烷含量时,发现D消化池甲烷含量为44.4%,与A消化池甲烷含量(57.9%)有明显差异。随即安排连续检测D消化池甲烷含量并与A消化池进行对比,同步下调D消化池进泥量。4月4日,D消化池甲烷含量为34.4%,明显低于A消化池(62%);在同日对比挥发性脂肪酸和碱度时,发现D消化池挥发性脂肪酸含量(5 380 mg/L)明显高于A消化池(2 320 mg/L),其碱度(12 600 mg/L)与A消化池(13 100 mg/L)基本持平。计算D消化池的酸碱比(挥发性脂肪酸与碱度的比值)为0.43,远高于A消化池(0.18)。查看沼气产率变化,发现近20 d内D消化池总体呈现下降趋势。D消化池沼气产率由3月16日的11.42 m³沼气/m³进泥降至4月4日的3.89 m³沼气/m³进泥,远低于A消化池沼气产率同期值(3月16日—4月4日平均值为11.52 m³沼气/m³进泥),如图2所示。

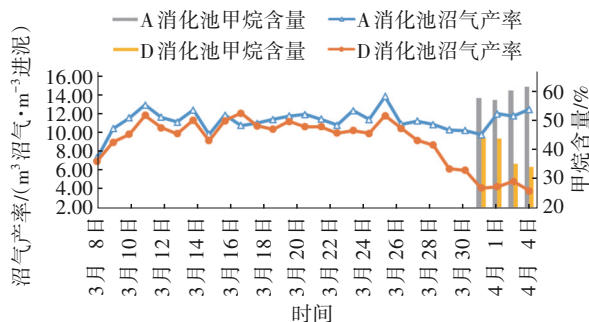


图2 消化池的甲烷含量和沼气产率变化

Fig.2 Changes of methane content and biogas yield in digestion tanks

曾静^[6]研究餐厨垃圾厌氧消化时指出,挥发性脂肪酸含量为3 000~6 000 mg/L时会轻微酸化,超过6 000 mg/L时发酵完全停止。分析D消化池挥发性脂肪酸达到5 380 mg/L,接近6 000 mg/L限值,再结合消化池甲烷含量降低和沼气产率下降明显的情况,可判断D消化池甲烷含量异常的原因是挥发性脂肪酸大量积累出现酸化。

3 异常原因分析

3.1 有机负荷

于涛等^[7]研究餐厨垃圾厌氧消化时指出,反应器有机负荷达到4.2 kgVS/(m³·d)时,消化系统出现明显抑制。仲猛等^[8]研究渗滤液与猪粪联合厌氧消化时提出,有机负荷达到10.40 gVS/(L·d)时厌氧消化系统无法维持。这表明有机负荷可能是影响D消化池酸化的原因。

消化池进泥有机负荷变化如图3所示。

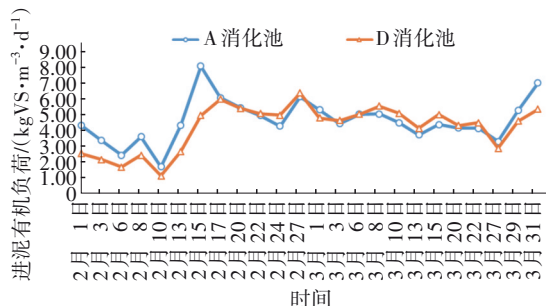


图3 消化池进泥有机负荷变化

Fig.3 Change of organic load in digestion tanks

分析2023年2月1日—4月4日数据,D消化池有机负荷变动范围为1.16~6.42 kgVS/(m³·d),平均为4.26 kgVS/(m³·d)。进入3月以来,D消化池有机负荷波动较小。进一步与A消化池进行对比,两者有机负荷变化趋势基本相同,但D消化池平均有

机负荷值低于A消化池[4.67 kgVS/(m³·d)]。对有机负荷峰值进行比较,D消化池[6.42 kgVS/(m³·d)]也远低于A消化池[8.13 kgVS/(m³·d)]。故可判断有机负荷变化不是导致D消化池酸化的原因。

3.2 停留时间

2023年2月1日—4月4日,D消化池平均停留时间为15.2 d,与设计停留时间(15 d)一致,比A消化池平均停留时间(13.1 d)略长,如图4所示。虽然A消化池停留时间更短,但未出现酸化,这表明停留时间不是导致D消化池酸化的原因。

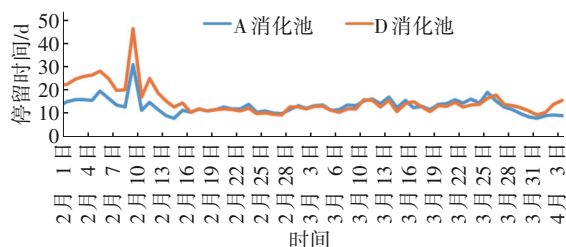


图4 消化池停留时间变化

Fig.4 Change of residence time in digestion tanks

3.3 温度

许昊等^[9]试验指出,温度为47℃时的甲烷产率高于37、55℃工况,且随着温度的升高(47~55℃),细菌种群结构会发生改变。A、D消化池温度变化如图5所示。

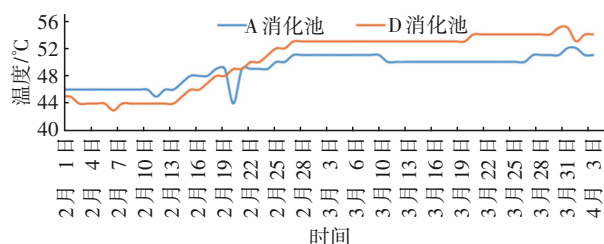


图5 消化池的温度变化

Fig.5 Change of temperature in digestion tanks

由图5可知,2月下旬D消化池温度波动明显,如在20日—28日共计9天内,温度由48℃升至53℃;进入3月后,D消化池温度持续上升,并于3月31日达到峰值(55℃)。对比D消化池与A消化池,两者共同点是消化池温度均超过50℃,远高于设计温度(38~40℃);不同点是D消化池温度更高。D消化池温度在超过51℃后继续提高,而A消化池温度在超过51℃后迅速回落到50℃。这表明51℃是一个重要分界点。

进一步查看温度与沼气产率的变化,如图6所

示。D消化池和A消化池的温度超过51℃后,沼气产率均表现为明显下降,再次验证51℃是重要分界点。与韩育宏等^[10]结论(51℃时厌氧反应器中水解菌数量较多而高温产甲烷菌数量有限,导致挥发性脂肪酸积累进而影响产气量)一致。故判断温度超过51℃后仍持续上升是导致D消化池酸化的主要原因。

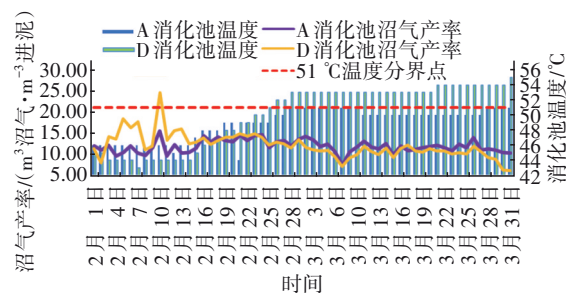


图6 消化池沼气产率随温度的变化

Fig.6 Variation of biogas yield with temperature in digestion tanks

4 应对措施

4.1 紧急应对

既然温度上升是导致D消化池酸化的主要原因,那么紧急应对措施就是降温。基于热水解厌氧消化的特点,消化池降温可从两方面着手:一是减少进泥量,二是加大循环污泥散热量。减少进泥量,可通过缩短消化池进泥时间来完成。加大循环污泥散热量需检查消化池一级和二级换热器的换热效率。检查后发现,D消化池的二级换热器存在结垢,影响换热量,需要实施离线清洗。故在紧急应对措施中,先降低D消化池进泥量,再开展二级换热器清洗工作,同步监控其甲烷、挥发性脂肪酸和碱度变化,并与A消化池进行对比。

采取上述紧急措施后,D消化池温度由2023年4月1日的55℃开始下降,4月12日降至51℃,4月28日降至45℃。4月11日,检测发现D消化池甲烷含量降到谷值(30.9%),随后甲烷含量开始逐步回升;到4月29日,D消化池甲烷含量达到59.2%,与A消化池甲烷含量(60.4%)基本持平,这标志D消化池恢复正常。各因素变化如图7所示。

进一步分析恢复期间挥发性脂肪酸、碱度和甲烷含量的指示灵敏性,4月11日—13日的数据较为典型。4月11日,D消化池挥发性脂肪酸回落至1100 mg/L,与A消化池挥发性脂肪酸含量(1080

mg/L)持平;12日和13日D消化池挥发性脂肪酸(分别为1 120、1 060 mg/L)无明显变化。同样,D消化池碱度也无明显变化。但从消化池甲烷含量看,3 d内D消化池甲烷含量由30.9%增至35%,且与A消化池甲烷含量差值(A消化池甲烷含量与D消化池甲烷含量的数学差)从32.1%缩至27.3%。三者比较,甲烷含量因其高灵敏性更适合作为消化池的监控指标。

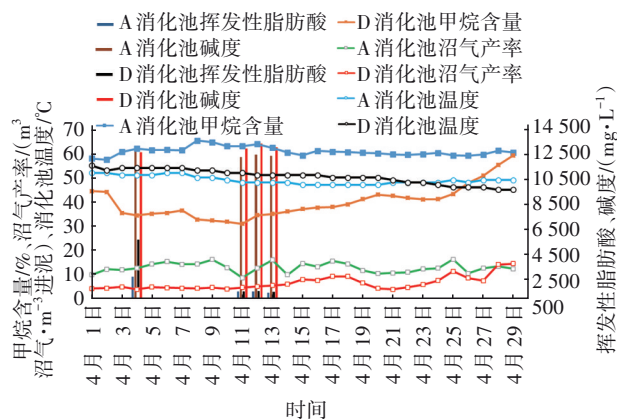


图7 D消化池逐步恢复期间甲烷含量、沼气产率、温度、挥发性脂肪酸和碱度的变化

Fig.7 Changes of methane content, biogas yield, temperature, volatile fatty acids and alkalinity during the gradual recovery of D digestion tank

4.2 系统优化

4.2.1 近期温度控制

D消化池与A消化池进泥泥质相同,2023年3月后的进泥量接近,但D消化池温度较A消化池高(见图8),这表明二级换热器运行异常是温度差异原因,故近期温度控制的重点应为二级换热器。结合51℃为分界点,考虑到预留空间,近期温度控制建议以50℃作为预警值实施消化池二级换热器的清洗工作。

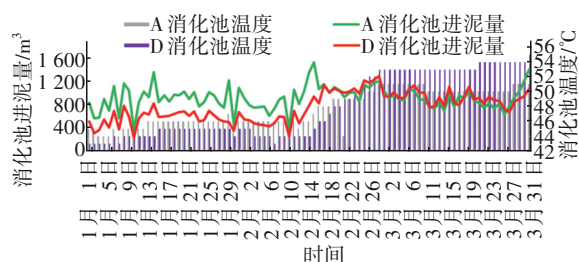


图8 消化池进泥量与温度变化

Fig.8 Changes of influent sludge volume and temperature in digestion tanks

4.2.2 远期温度控制

D消化池和A消化池设计均为中温厌氧消化,实际运行温度均超过设计温度,但A消化池在51℃以下运行未出现酸化。远期温度控制有两个方向:一是设施改造,加大一级和二级换热器的换热量等,将消化池运行温度控制在设计范围内;二是自控系统改造,将消化池运行温度与进泥量、换热器运行实现连锁,避免消化池温度异常。此外,可斟酌系统设施配置、能源消耗、成本控制、运行维护等因素,考虑开展高温消化的可行性论证。

4.2.3 监控指标的遴选

D消化池甲烷含量异常发现源于对消化池进行逐个气相空间甲烷含量检测,但在实际生产中,更关注整个沼气系统的甲烷含量变化,多针对沼气系统脱硫前后的甲烷含量检测。由于沼气系统多由2座及以上消化池构成,因此单个消化池甲烷含量异常可能会被气体混合所掩盖。此外,在消化池恢复运行中,甲烷含量检测也较灵敏。因此应将消化池甲烷含量检测列为重要的生产监控指标。

甲烷含量检测可通过安装在线甲烷分析仪查看实时数据,现场采用便携式沼气分析仪检测,采集气样后在实验室用气相色谱法检测。其中便携式沼气检测仪由于经济适用、检测灵敏,数据反馈及时,实用性最好。

故综合仪表配置、检测设施现状,建议在消化池运行监控体系构建中将甲烷含量列为首选监测指标,采用便携式分析仪实施检测,分析频次以周为单位开展;有条件的情况下,同步实施单个消化池挥发性脂肪酸含量的检测,采用滴定法,分析频次以周为单位。

5 结论

北京某热水解污泥消化系统的D消化池出现酸化时,沼气中甲烷含量明显降低,最低值为30.9%。检测其挥发性脂肪酸含量为5 380 mg/L,明显高于正常消化池;碱度含量为12 600 mg/L,与正常消化池相比差异不明显。分析酸化的主要原因是温度过高,51℃是分界点。酸化后采取的应急措施是减少进泥量和清洗二级换热器。甲烷含量作为恢复运行的监控指标最敏感,其次是挥发性脂肪酸含量。D消化池优化方向是实施温度控制和建立监控体系。建议监控体系以甲烷含量为首选监测指标,采用便携式分析仪,频次以周为单位。

针对同类热水解厌氧消化池,在运行中应密切关注温度变化,可将50℃作为预警值。应加强换热器的清洗维护,建立以消化池甲烷含量为首选指标的消化池运行监控体系。

参考文献:

- [1] 薛勇刚. 城市污泥高级厌氧消化工程案例[J]. 净水技术, 2019, 38(S1): 151-154.
XUE Yonggang. A case study for advanced anaerobic digestion of sewage sludge [J]. Water Purification Technology, 2019, 38 (S1) : 151-154 (in Chinese).
- [2] 戴晓虎. 我国污泥处理处置现状及发展趋势[J]. 科学, 2020, 72(6): 30-34.
DAI Xiaohu. Applications and perspectives of sludge treatment and disposal in China [J]. Science, 2020, 72 (6): 30-34(in Chinese).
- [3] 杜朝丹, 陈美香, 林志龙, 等. 热水解+厌氧消化处理市政污泥示范工程[J]. 中国给水排水, 2019, 35(10): 97-99, 104.
DU Chaodan, CHEN Meixiang, LIN Zhilong, *et al.* Demonstration project of municipal sludge treatment by thermal hydrolysis and anaerobic digestion process [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35 (10) : 97-99, 104 (in Chinese).
- [4] 张新勃, 于澜, 张志渊, 等. 北京某大型再生水厂高级消化系统运行管理经验探讨[J]. 给水排水, 2021, 47(S2): 108-112.
ZHANG Xinbo, YU Lan, ZHANG Zhiyuan, *et al.* Experience and challenge of safe and stable operation of advanced digestive system in a large scale reclaimed water plant in Beijing [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(S2): 108-112(in Chinese).
- [5] 谭学军, 王磊, 王逸贤, 等. 城市污水处理厂污泥厌氧消化沼液特性研究[J]. 给水排水, 2020, 46(S2): 237-241.
TAN Xuejun, WANG Lei, WANG Yixian, *et al.* Characteristics of sludge anaerobic digestion effluent in municipal sewage plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(S2): 237-241(in Chinese).
- [6] 曾静. 餐厨垃圾厌氧酸化及其系统恢复产甲烷的研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2021: 46-49.
ZENG Jing. Study on Recovery of Methane Production and Microbial Changes in Anaerobic Acidification System of Kitchen Waste [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2021: 46-49(in Chinese).
- [7] 于涛, 黄涛, 潘膺希, 等. 厌氧发酵连续运行中有机负荷与工艺参数相互作用研究[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(4): 181-185.
YU Tao, HUANG Tao, PAN Yingxi, *et al.* Test of interaction between the organic load and the processing parameters on the continuous operation of anaerobic fermentation [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(4): 181-185(in Chinese).
- [8] 仲猛, 张文阳, 耿晓丽, 等. 焚烧发电厂储坑渗滤液在CSTR厌氧消化系统中递进式进料有机负荷极限研究[J]. 四川环境, 2015, 34(4): 12-16.
ZHONG Meng, ZHANG Wenyang, GENG Xiaoli, *et al.* Study on the organic loading limit in CSTR anaerobic digestion by semi-continuous feeding for the leachate from the bunker of waste incineration power plant [J]. Sichuan Environment, 2015, 34(4): 12-16(in Chinese).
- [9] 许昊, 戴晓虎. 40~50℃污泥厌氧消化性能探究[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(4): 5-12.
XU Hao, DAI Xiaohu. Study on anaerobic digestion performance of sludge at 40-50℃[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38 (4) : 5-12 (in Chinese).
- [10] 韩育宏, 季民, 柴建荣, 等. 高温厌氧消化污泥的培养试验研究[J]. 环境工程, 2009, 27(1): 78-80, 84.
HAN Yuhong, JI Min, CHAI Jianrong, *et al.* Cultivation of thermophilic anaerobic digested sludge [J]. Environmental Engineering, 2009, 27(1): 78-80, 84 (in Chinese).

作者简介: 宋晓雅(1971-), 女, 河北石家庄人, 大学本科, 教授级高级工程师, 主要研究方向为污水污泥的处理处置、运行管理等。

E-mail: songxy@bdc.cn

收稿日期: 2023-10-11

修回日期: 2023-11-20

(编辑: 衣春敏)