

运行与管理

小红门污泥热水解厌氧消化项目运行两周年之回顾

宋晓雅

(北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100044)

摘 要: 小红门热水解厌氧消化系统,是国内首个采用康碧热水解+厌氧消化工艺的大型污泥升级改造工程。通过回顾两年的实际运行情况,全面总结了热水解、厌氧消化、板框脱水的生产和技术指标,并与主要设计值进行对比。热水解处理后的污泥含水率稳定,镜检显示活性污泥破壁效果明显,消化产气量、有机物分解率、板框脱水后泥饼含水率等指标均优于设计指标。沼气品质较好,但厂内利用有限,需进一步考虑沼气的综合利用问题。同时,针对除渣、除砂装置运行效率低,热水解系统稀释水用量较多等问题,提出优化建议。

关键词: 污泥处理; 热水解; 厌氧消化; 板框脱水; 沼气利用

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)22-0116-07

Review of Biennial Operation of Xiaohongmen Thermal Hydrolysis Anaerobic Digestion System

SONG Xiao-ya

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

Abstract: Xiaohongmen thermal hydrolysis anaerobic digestion system was the first large-scale sludge upgrading project in China which adopted Cambi thermal hydrolysis anaerobic digestion process. By reviewing two years of operation, the operation indexes of project, such as thermal hydrolysis, anaerobic digestion, plate and frame filter, were summarized and compared with the design values. The moisture of sludge treated by thermal hydrolysis was stable and the cell-wall breaking effect was obvious under microscopy. The indexes of digestion gas yield, organic matter decomposition rate and moisture content of cake after dehydration by plate and frame filter were all better than the design indexes. The quality of biogas was good, however, the utilization of biogas plant was limited at present, so the comprehensive utilization of biogas should be further considered. At the same time, the problems in actual operation were summarized, and the optimization suggestions were put forward in view of the low operation efficiency of the slag removal, sand removal devices and the large amount of dilution water in the thermal hydrolysis system.

Key words: sludge treatment; thermal hydrolysis; anaerobic digestion; plate and frame filter dewatering; biogas utilization

热水解厌氧消化,是当今国际市政污泥处理的主流技术。国内从 2015 年开始,引进、建设和运转了一批采用热水解厌氧消化工艺的污泥处理设施。

其中,小红门热水解厌氧消化项目(以下简称小红门项目)是国内第一个采用康碧热水解+厌氧消化的泥区升级改造项目。2016 年 7 月 18 日启动,截

至2018年7月18日该项目已稳定运转两周年。

1 小红门项目改造前后设计概述

小红门项目改造前后工艺流程见图1。

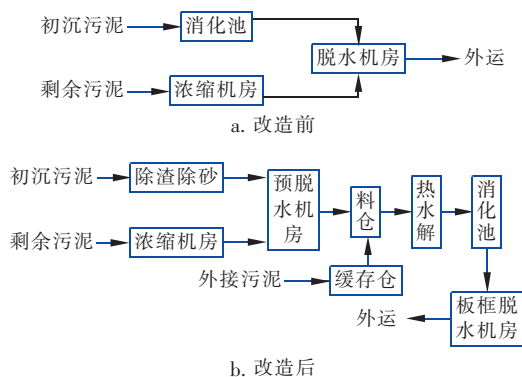


图1 小红门项目改造前后工艺流程

Fig.1 Flow chart of Xiaohongmen project before and after reconstruction

1.1 改造前设计

小红门项目位于北京市小红门污水处理厂内,是泥区升级改造项目。改造前的泥区污泥处理能力为150 tDS/d,原设计^[1]中初沉污泥和剩余污泥分别单独浓缩后混合,经厌氧消化后进入脱水机,脱水后泥饼含水率为80%。消化池设计进泥量为3 000 t/d,沼气产量为30 000 m³/d。运行温度为35℃,采用沼气搅拌。消化池产生的沼气用于驱动沼气拖动鼓风机,冬季可用于厂内供暖。多余的沼气利用废气燃烧器烧掉。但在实际运行时只浓缩剩余污泥,初沉污泥不浓缩,进消化池的只有初沉污泥。即,经消化处理的初沉污泥和浓缩处理的剩余污泥在脱水前混合,进行带式压滤脱水。消化池进泥量为1 200~3 000 t/d,产气量为12 000~30 000 m³/d。

改造前主要设施有1座浓缩脱水机房、5座卵型消化池(单池有效容积为12 000 m³)、3座沼气柜(单座容积为4 500 m³)。

1.2 改造后设计

2016年小红门项目泥区实施升级改造。改造后的污泥消化系统设计处理能力为900 t/d(以含水率为80%的泥饼计),沼气产量为45 000 m³/d,有机物分解率≥40%(当污泥中有机物含量≥60%且COD/VSS≥1.4,有机物分解率≥45%;当污泥中有机物含量≥45%,有机物分解率≥40%)。消化池运行温度为39~41℃^[2]。全部热水解污泥消化后,

板框脱水后污泥含水率≤60%。

改造后的泥区以处理本厂污泥为主,还处理少量车载外接污泥。本厂污泥全部经过预脱水,再和外接污泥在料仓混合,进入热水解+厌氧消化+板框脱水流程。板框脱水滤液经厌氧氨氧化系统处理后,尾水排到小红门污水处理厂进水泵前池。

改造后保留利用原有消化池(使用4座消化池)、沼气柜,更新沼气搅拌用压缩机,新增3条热水解生产线(单线处理量为60 tDS/d,最大为90 tDS/d)、1座板框脱水机房、1座蒸汽锅炉房等。

2 整体回顾

为减少对水区运行的影响,在热水解、厌氧消化和板框脱水三个工艺板块中,板框最先运行,其次是厌氧消化,最后是热水解。以热水解启动为项目启动标志,以厌氧消化运行效果为项目主要衡量标准。

从时间节点看,主要分为四个阶段。①准备期。2016年4月11日—2016年7月17日,主要是在消化池改造完成后,进行常规中温厌氧消化的运行,培养甲烷菌。消化池进泥为厂内初沉污泥。②启动期。2016年7月18日—2016年11月28日,热水解系统启动,完成消化池从常规中温厌氧消化向热水解高级厌氧消化转变,消化池进泥为初沉污泥和经热水解后的剩余污泥。在此阶段,逐渐增加热水解污泥的比例,减少初沉污泥比例。③稳定观察期。2016年11月29日—2017年3月8日,消化池进泥全部为热水解后污泥(此时热水解污泥为浓缩后的剩余污泥和初沉污泥的混合污泥)。④全面运行期。从2017年3月9日起,整个系统进入全面运行期,实现其他厂车载脱水污泥的接收。

以2017年3月9日为时间节点,忽略准备期的工作,将两年运行回顾分为启动稳定期(2016年7月18日—2017年3月8日)和全面运行期(2017年3月9日—2018年7月18日)两部分。需说明的是,由于化验及取样原因,会导致部分时间段数据存在不连续的情况。

3 启动稳定期

3.1 热水解启动

3.1.1 进泥

启动时,热水解进泥为浓缩后预脱水的剩余污泥,其平均含水率为87.1%。采用剩余污泥,一方面是急于验证热水解对活性污泥破壁的实际效果;另一方面,也是考虑到剩余污泥直接脱水比较困难。

污泥经热水解后,平均含水率为91.8% (见图2)。热水解处理后出泥温度为100~107℃,还需降温,方可进入消化池。

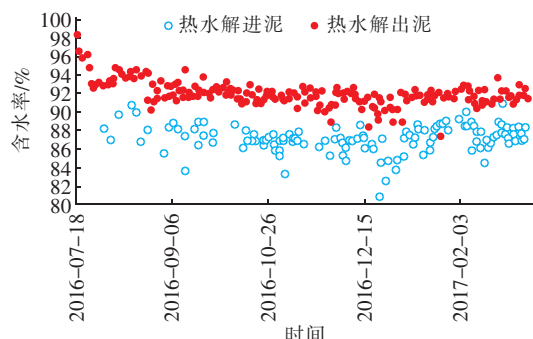


图2 热水解进、出泥含水率变化

Fig. 2 Change of moisture content before and after thermal hydrolysis of sludge

3.1.2 热解效果

污泥热水解过程可细分为以下4个过程^[3]:污泥絮体结构的解体、污泥细胞破碎和有机物的释放、有机物的水解和有机物发生美拉德反应。相应的,对于热水解前后污泥性状的变化,实际生产中采用微生物镜检、理化指标进行监测。

微生物镜检,就是采用常规的电子显微镜观察热水解前后的细胞形态变化,如细胞絮体结构是否解体和污泥细胞是否破碎等。

热水解前后微生物镜检结果见图3。

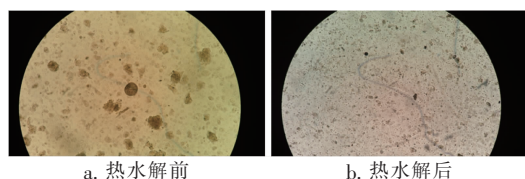


图3 热水解前后微生物镜检(10×20倍)

Fig. 3 Microorganisms before and after thermal hydrolysis

理化指标,就是检测热水解前后SCOD、氨氮等变化,主要检测有机物的释放和水解。这两类指标在现场均易于操作且检测方便。检测结果见表1。

表1 热水解前后SCOD和氨氮变化

Tab. 1 Change of SCOD and ammonia nitrogen before and after thermal hydrolysis $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

日期	项目	SCOD	氨氮
2016-08-12	热水解进泥	1 750	118
	热水解出泥	14 400	732
2016-08-18	热水解进泥	1 640	176
	热水解出泥	10 800	553

3.2 消化池

3.2.1 进泥

启动初期,由于热水解分阶段提升处理负荷,热水解处理泥量较少,此时消化池进泥为初沉污泥和热水解后污泥。初沉污泥含水率平均为96.8%,热水解后污泥平均含水率为91.8%。随着热水解处理量的提升,消化池中初沉污泥比例越来越少,逐步被热水解污泥所取代,直至消化池进泥全部为热水解污泥。启动时消化池进泥情况见图4。

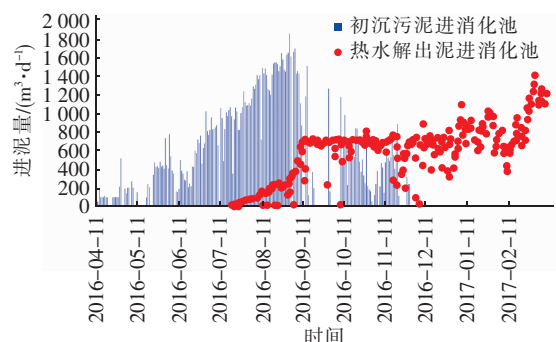


图4 启动时消化池进泥情况

Fig. 4 Sludge in the digester during start-up

3.2.2 产气量的变化

启动阶段,消化池进泥中有未经热水解处理的污泥和经过热水解处理的污泥,且这两部分物料的比例不固定。生产中采用吨干泥产气量(m^3/tDS)来比较不同物料的产气情况。消化池启动阶段进泥物料和产气量变化见图5。

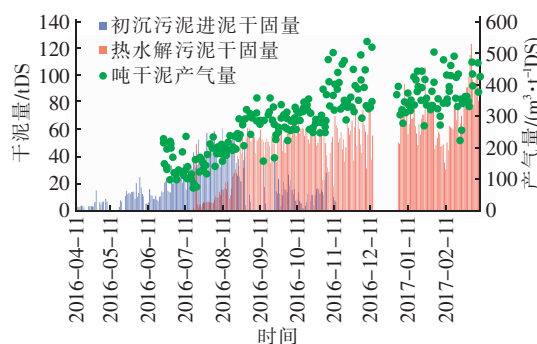


图5 消化池启动阶段进泥物料及产气量变化

Fig. 5 Change of sludge and gas production at start-up

从图5看出,在热水解启动之前,产气量平均为 $200 \text{ m}^3/\text{tDS}$,随着热水解泥量增加,产气量的数值也增加;待消化池进泥全部调整为热水解污泥时,产气量提升并稳定在 $350 \text{ m}^3/\text{tDS}$ 左右。

4 全面运行期

在全面运行阶段,主要分析2017年3月9日—

2018年7月18日的运行情况。

4.1 外接污泥

小红门项目外接污泥以吴家村和卢沟桥为主,吴家村占46%,卢沟桥占29%。外接污泥量平均为213 t/d,含水率约81%。前期由于外接设备磨合,接收泥量较少,约30 d后外接污泥量开始稳定。2017年9月高安屯污泥处理中心项目启动后,小红门项目原来承接的酒仙桥、肖家河、清河、高安屯等污水处理厂的污泥分流到高安屯污泥处理中心。

4.2 热水解

4.2.1 处理量

热水解共3条生产线,日常运转2条生产线,平均处理量为117 tDS/d,占设计负荷(180 tDS/d)的65%。

与设计量相比,处理量较少的主要原因一是流域内水量分流到槐房再生水厂,本厂自产泥量少;二是外接污泥少。酒仙桥、清河等外接污泥逐渐分流到新近投产运行的槐房和高安屯等污泥处理中心。

4.2.2 沼气耗量

热水解需要的蒸汽来自消化池产生的沼气驱动的蒸汽锅炉。生产中引入热水解吨干泥沼气耗量(m^3/tDS)指标。在运行时段内,热水解进泥含水率平均为86.99%,吨干泥沼气耗量平均为158.4 m^3/tDS (见图6)。

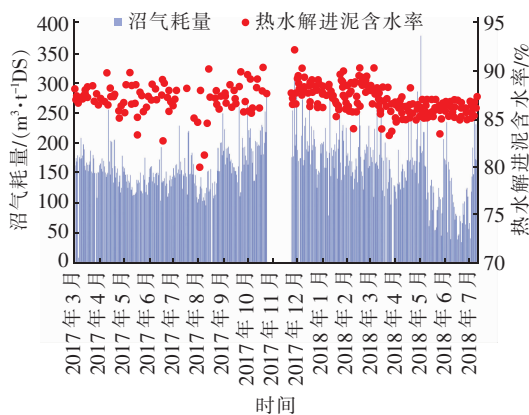


图6 热水解沼气消耗量

Fig. 6 Biogas requirement for thermal hydrolysis system

4.2.3 稀释水量

热水解运行中需要添加稀释水。水源为污水处理厂深度处理出水。稀释水分为一次稀释水和二次稀释水。一次稀释水有两个添加点,分别在浆化罐前和闪蒸罐之后。添加在浆化罐前的主要用于稀释

污泥,提高污泥的流动性,一般利用管道压力控制添加量;添加在闪蒸罐后的主要用于降低闪蒸后的污泥温度,闪蒸后的污泥温度为100~107℃,添加稀释水后,可降至87℃以下,一般采用按出泥比例添加;二次稀释水添加在一级换热器之后,主要用于降低污泥温度,稀释氨氮浓度,吸收工艺气冷凝水,一般也是按比例添加。

从稀释水用途看,多用于污泥降温。稀释水用量多,热水解出泥含水率增加;稀释水用量少,污泥流动性差,在冬季易出现管线堵塞。

在运行时段内,热水解平均处理量为117 tDS/d,一次稀释水平均添加量为647 m^3/d ,二次稀释水平均添加量为294 m^3/d 。从稀释水用量分布看,热水解一次稀释水用量较多。

4.3 消化池

4.3.1 进泥

从2017年3月9日开始全面运行阶段,消化池的进泥中逐渐增加外接污泥,进泥泥质见图7。可以看出,刚开始接收外部污泥时,由于其来源和含水率变化较大,导致消化池进泥含水率不稳定。随着稀释水、换热系统调整,进泥逐步稳定,进泥含水率平均为93.5%,有机分平均为58.4%。

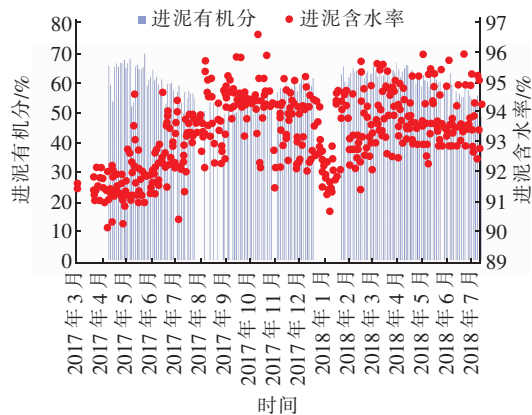


图7 全面运行期消化池进泥泥质

Fig. 7 Sludge properties in the digestion tank at stable stage

4.3.2 消化效率

在运行时段内消化池内污泥挥发性脂肪酸(VFA)平均为552 mg/L,碱度(ALK)平均值为6 052 mg/L,氨氮平均值为1 532 mg/L,酸碱比<0.1。有机物分解率平均为45.06%,超过设计目标值(40%)。分解有机物的沼气产量为1.17 m^3/kgVSS ,消化池有机负荷为1.35 $\text{kgVSS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。

消化池理化指标变化见图8。

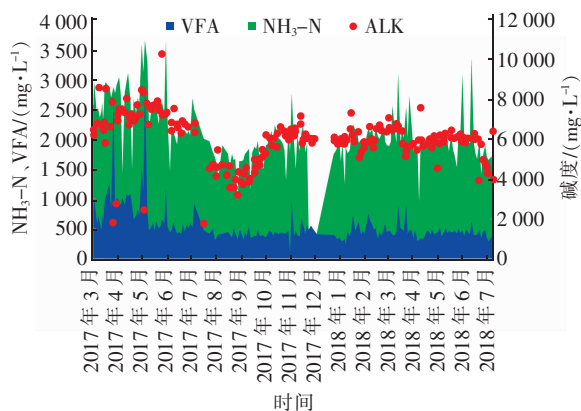


图8 消化池理化指标变化

Fig. 8 Changes of physicochemical indexes in digester

与改造前相比,改造后的有机物分解率(45.06%)略低于改造前(51%)^[4],但与小试装置40℃时混合污泥热水解厌氧消化的有机物分解率(46%)^[5]非常接近。分析原因主要是改造前后进泥泥质发生变化,改造前消化池进泥为初沉污泥,改造后为热水解后的混合污泥。改造后的消化池沼气产量(1.17 m³/kgVSS)要优于改造前(0.93 m³/kgVSS)^[6]。与国内其他污泥消化项目^[7]相比,消化池的有机负荷基本一致,但是与国外项目[6.1~8.8 kgVSS/(m³·d)]^[8]和常规厌氧消化[2~6 kgVSS/(m³·d)]^[9]相比,还有提升空间。

消化池效率主要衡量指标变化见图9。

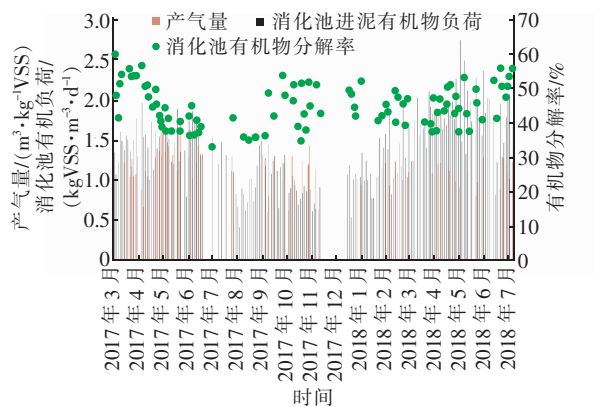


图9 消化效率主要衡量指标

Fig. 9 Indicators of digestive efficiency

4.3.3 沼气产量

在运行时段内,沼气产量约40319 m³/d,平均值为352 m³/tDS,超过设计目标值(222 m³/tDS),与热水解启动稳定观察期的产气量(350 m³/tDS)基本

一致。沼气产量变化曲线见图10。

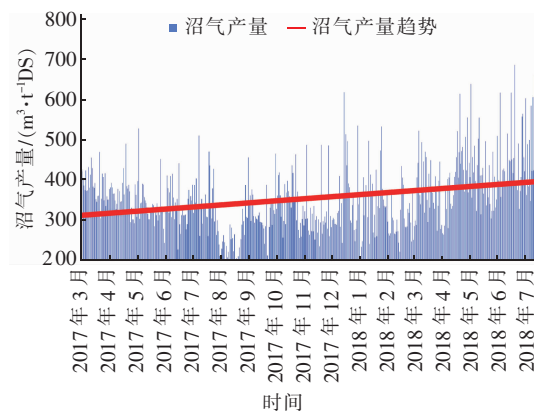


图10 沼气产量变化曲线

Fig. 10 Biogas production

4.3.4 沼气成分

沼气成分变化见图11。

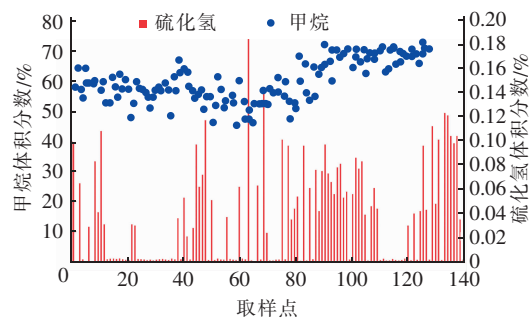


图11 沼气成分

Fig. 11 Composition of biogas

沼气中甲烷含量(体积分数)平均为60%,硫化氢含量(体积分数)为0.135%。

4.3.5 沼气利用

沼气利用情况见图12。

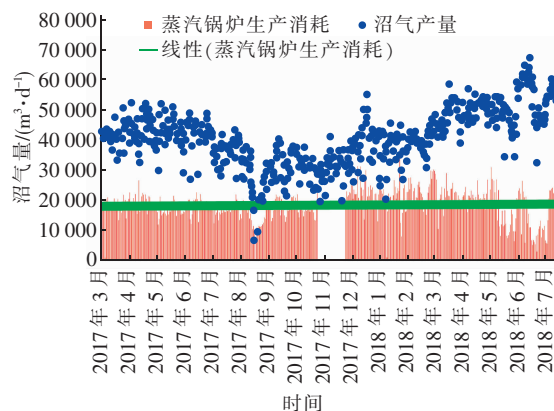


图12 沼气利用

Fig. 12 The utilization of the biogas

从运行时段看,沼气产量约 $40\,319\text{ m}^3/\text{d}$,其中用于生产蒸汽消耗量约 $18\,150\text{ m}^3/\text{d}$,沼气富余量约 $22\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 。富余的沼气,现况用于沼气拖动鼓风机约 $7\,219\text{ m}^3/\text{d}$ 。供暖季节,供热的水热水锅炉已经采用沼气作为气源。由于现况沼气拖动鼓风机(3台)使用年限超过10年,设备故障较多,可利用的沼气的量有限,即使在供暖季沼气富余量也较多。剩余沼气只能通过废气燃烧器烧掉。

4.4 板框脱水

板框脱水的主要指标变化见图13。

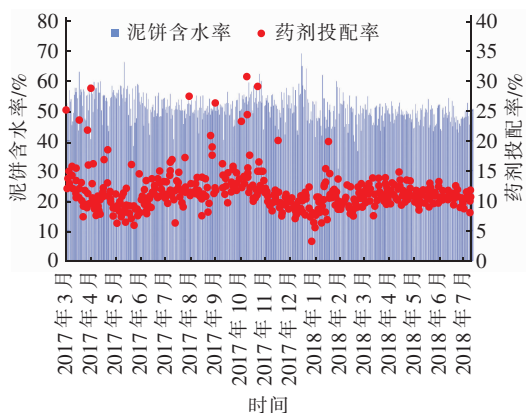


图13 板框脱水的主要指标

Fig. 13 Main indexes of plate and frame dewatering

板框脱水使用的复合药剂平均投配率(t/tDS)为11.4%。板框脱水后泥饼pH值在7左右,平均泥饼含水率 $<60\%$,达到设计值。

按照工艺设计,板框滤液进入北京排水集团自主研发的厌氧氨氧化处理设施后,尾水排放到污水处理厂泵前池。目前,由于厌氧氨氧化设施正在调试,处理的板框滤液量较少,现况板框滤液大部分排放到污水处理厂泵前池。

5 问题及对策

5.1 砂渣预处理

小红门项目自2016年7月18日热水解系统启动,截至2018年7月18日已稳定运行两周年。在实际生产中,虽在初沉污泥管线上设置了旋流除砂器和滚筒格栅装置去除砂、渣和杂物,但由于砂、渣去除系统普遍运行不够稳定,出现砂、渣、杂物等进入污泥料仓,堵塞浆化罐和闪蒸罐的排泥泵,以及污泥管道上的流量计、压力计等。2018年3月,小红门项目首次实施热水解生产线大修,对罐体泄空检查,发现反应罐的蒸汽喷嘴出现不同程度的磨损,怀

疑与进泥砂、渣、杂物有关。

建议加强现况污泥区域内的除渣、除砂等设施设备的精细运行,如进行除渣量、除砂量的计量统计,加强设备的维护维修等。

5.2 热水解优化

热水解污泥在进入消化池前需要稀释和降温^[10],目地在于降低污泥温度以保护消化池进泥泵运行,降低污泥粘度以及避免氨浓度过高对厌氧消化产生抑制等。这就需要添加稀释水,而稀释水的大量添加,降低了消化池进泥的含固量,导致消化池进泥的含水率较高、消化池有机负荷较低。

建议今后开展生产性试验,统筹考虑热水解前的预脱水机系统,结合外接污泥处理量、稀释水量等,优化热水解系统的稀释、降温等功能。

可以考虑采用本厂未预脱水的剩余污泥替代少量一次稀释水,在浆化罐内进行污泥稀释,能够减少部分预脱水药剂、电耗等费用;可考虑评估换热器换热能力与稀释水的用量。通过减少稀释水用量,提高消化池进泥的有机负荷,增加总产气量。可考虑热水解系统各类换热工序产生的低温余热^[11]的综合利用。

6 结论

小红门项目2016年7月18日—2018年7月18日从启动到全面运行,热水解厌氧消化系统整体运行平稳。沼气产气量 $>350\text{ m}^3/\text{tDS}$,超过设计值($222\text{ m}^3/\text{tDS}$)。有机物分解率 $>45\%$,超过设计值(40%)。板框脱水后泥饼含水率 $<60\%$,达到设计标准。建议采用生物镜检等作为热水解生产运行监控指标。建议用未预脱水的剩余污泥替代部分一次稀释水,综合评估换热器换热能力与稀释水用量,通过减少稀释水用量,提升消化池进泥有机负荷,增加总产气量。进一步加大热水解换热系统低温余热的利用。

参考文献:

- [1] 陈怡. 污水处理厂污泥厌氧消化工艺选择与设计要点[J]. 给水排水, 2013, 39(10): 41-43.
Chen Yi. Key points of the process selection and design of the sludge anaerotic digestion in wastewater treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(10): 41-43 (in Chinese).
- [2] 杜强强,戴明华,张晏,等. 热水解厌氧消化工艺用于

- 污水厂泥区升级改造[J]. 中国给水排水, 2016, 32(22): 46-48.
- Du Qiangqiang, Dai Minghua, Zhang Yan, *et al.* Anaerobic digestion process of thermal hydrolysis for upgrading and rebuilding of sewage plant mud area[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(22): 46-48 (in Chinese).
- [3] 肖本益, 阎鸿, 魏源送. 污泥热处理及其强化污泥厌氧消化的研究进展[J]. 环境科学学报, 2009, 29(4): 673-682.
- Xiao Benyi, Yan Hong, Wei Yuansong. State of the art of thermal sludge pretreatment and its enhancement for anaerobic sludge digestion[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 29(4): 673-682 (in Chinese).
- [4] 韩春荣, 谢继荣, 宋晓雅, 等. 污水处理厂沼气利用的经济和能源性分析[J]. 给水排水, 2012, 48(12): 54-57.
- Han Chunrong, Xie Jirong, Song Xiaoya, *et al.* Economy and energy analysis of the usage of methane from the wastewater treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 48(12): 54-57 (in Chinese).
- [5] 张晓红, 李冰, 马文瑾, 等. 温度及热水解对污泥厌氧消化的影响研究[A]. 2015年中国环境科学学会学术年会论文集[C]. 北京: 中国环境科学学会, 2015.
- Zhang Xiaohong, Li Bing, Ma Wenjin, *et al.* Effects of temperature and hydrolysis on sludge anaerobic digestion [A]. Proceedings of the Annual Meeting of the Chinese Society of Environmental Sciences[C]. Beijing: Chinese Society for Environmental Sciences, 2015 (in Chinese).
- [6] 宋晓雅, 杨向平, 王东生. 大型污泥厌氧消化系统的启动与运行调控[J]. 给水排水, 2011, 37(3): 32-34.
- Song Xiaoya, Yang Xiangping, Wang Dongsheng. Start up and operation of large scale anaerobic sludge digestion system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(3): 32-34 (in Chinese).
- [7] 王社平, 赵恩泽, 韩芸, 等. 西安第五污水处理厂污泥消化及沼气利用效果分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(9): 18-19.
- Wang Sheping, Zhao Enze, Han Yun, *et al.* Analysis of sludge anaerobic digestion and biogas utilization in Xi'an No. 5 WWTP[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(9): 18-19 (in Chinese).
- [8] 陶亚强, 李军, Chang Cheinchi. Blue Plains 污水处理厂提标改造——后置反硝化、污泥热水解和深层隧道[J]. 净水技术, 2016, 35(1): 11-15.
- Tao Yaqiang, Li Jun, Chang Cheinchi. Upgrading reconstruction of Blue Plains wastewater treatment plant—post-denitrification, sludge thermal hydrolysis and deep tunnels [J]. Water Purification Technology, 2016, 35(1): 11-15 (in Chinese).
- [9] Leslie C P, Daigger G T, Henry C. 废水生物处理(第2版)[M]. 张锡辉, 刘勇弟, 译. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- Leslie C P, Daigger G T, Henry C. Biological Wastewater Treatment (2nd ed) [M]. Zhang Xihui, Liu Yongdi, Translation. Beijing: Chemical Industry Press, 2003 (in Chinese).
- [10] 王平, 黄鸥. 热水解厌氧消化在污水处理厂泥区改造中的应用探讨[J]. 给水排水, 2015, 41(10): 41-45.
- Wang Ping, Huang Ou. Application of thermal hydrolysis anaerobic digestion in the sludge treatment upgrading project in wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(10): 41-45 (in Chinese).
- [11] 晏发春, 汪恂, 张雷. 高温热水解预处理厌氧消化技术实例分析[J]. 中国给水排水, 2016, 32(18): 35-37.
- Yan Fachun, Wang Xun, Zhang Lei. Case analysis of anaerobic digestion technology with high temperature thermal hydrolysis [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(18): 35-37 (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, 先后参与高碑店、小红门、槐房、高安屯等消化系统的启动调试, 参与高碑店、延庆康庄、小红门再生水等污水和再生水系统的调试运行工作。

E-mail: songxy@bdc.cn

收稿日期: 2018-08-16