

设计经验

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.18.009

污泥热水解-厌氧消化沼气利用系统设计方案探讨

杜强强¹, 米智晨², 靳 坤³, 戴明华¹, 黄 鸥¹

(1. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082; 2. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100044; 3. 北京北排建设有限公司, 北京 100013)

摘 要: 北京市的5座以热水解-厌氧消化为核心的污泥处理中心中有4座已投入生产, 通过分析改造厂A和新建厂B的污泥处理规模、沼气产量等的实际运行参数, 得出了必须设计有效的沼气利用系统, 以避免资源的浪费的结论。结合A、B两厂的实际运行参数, 对沼气发电、沼气提纯以及沼气拖动鼓风机的沼气利用技术进行工艺技术特点及经济分析对比, 确定效率高、灵活性强且收益更好的燃气轮机的沼气发电的方案最佳。分析中发现了A、B两厂消化后所产沼气中的 H_2S 浓度高于设计值, 且现况干式脱硫系统运行费用高的问题, 为此, 将脱硫系统设计优化为运行成本低、运行简单以及抗负荷冲击能力强的生物脱硫系统, 并保留现况干式脱硫, 以保证沼气利用系统的运行稳定。

关键词: 运行参数; 沼气利用系统; 沼气发电; 生物脱硫

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)18-0051-05

Discussion on the Design of Thermal Hydrolysis - Anaerobic Digestion Biogas Utilization System for Sludge

DU Qiang-qiang¹, MI Zhi-chen², JIN Shen³, DAI Ming-hua¹, HUANG Ou¹

(1. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China; 2. Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100044, China; 3. Beijing Drainage Construction Co. Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: Four of the five sludge treatment centers with the core process of thermal hydrolysis - anaerobic digestion have been put into production in Beijing. Based on the analysis of the actual operation parameters such as the actual sludge treatment scale and biogas output of retrofitting plant A and new construction plant B, it was concluded that an effective biogas utilization system must be designed to avoid the waste of resources. Combined with the actual operating parameters of plant A and B, the technological characteristics and economic analysis of biogas power generation, biogas purification and biogas utilization technology of biogas drive blower were compared to determine the best scheme for biogas power generation of gas turbines with high efficiency, flexibility and better income. The analysis showed that the H_2S concentration in the biogas produced by the two plants after digestion was found to be higher than the design value, and the current operation cost of dry desulfurization system was high. Therefore, the design of the desulfurization system was optimized to be a biological desulfurization system with low operating cost, simple operation and strong resistance to load shock, and the dry desulfurization of the current situation was retained to ensure the stable operation of the biogas utilization system.

Key words: operation parameters; biogas utilization system; biogas power generation; biological desulfurization

1 项目背景

目前,北京市新建的 5 座以热水解-厌氧消化为核心的污泥处理中心,其中 4 座已经全部投入使用,设计日处理总能力可达到 1 063 tDS/d。沼气产量大幅增加后,存在沼气资源未充分利用的问题。

这 4 座污泥处理中心中,2 座为现况水厂利旧改造,另 2 座为新建,笔者分别选取改造厂 A 和新建厂 B 进行分析,两厂现况污泥处理规模及设施如表 1 所示。

表 1 A、B 两厂现况污泥处理规模及设施

Tab. 1 Sludge treatment scale and facilities of plant A and B

项 目	改造厂 A	新建厂 B
设计水区处理规模/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	60	60
设计污泥处理规模/ ($\text{tDS} \cdot \text{d}^{-1}$)	180	244
热水解处理线/条	3	4
消化池	5 座卵形混凝土消化池(利旧改造,4 座投入使用)	5 座钢制消化池(新建)
设计产气量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	45 000	55 000
实际产气量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	27 887 ~ 54 045	38 272 ~ 58 354
沼气净化系统 (脱硫系统)	干式脱硫设备共 3 组,每组设置 2 座(1 用 1 备)脱硫塔,单座处理能力 $1\,000 \text{ m}^3/\text{h}$	干式脱硫设备共 3 组,每组设置 2 座(1 用 1 备)脱硫塔,单座处理能力 $1\,000 \text{ m}^3/\text{h}$
沼气储存系统	钢制气柜 3 座,每座储气量 $5\,000 \text{ m}^3$,工作压力 3.0 kPa	双膜气柜 4 座,每座储气量 $5\,000 \text{ m}^3$,工作压力 $1.5 \text{ kPa}^{[1]}$
配套热水解系统	沼气锅炉 3 台(2 用 1 备),单台制备蒸汽能力为 6 t/h ,蒸汽温度 190°C ,蒸汽压力 1.15 MPa	沼气锅炉 3 台(2 用 1 备),单台制备蒸汽能力为 6 t/h ,蒸汽温度 190°C ,蒸汽压力 1.15 MPa
沼气利用系统	沼气拖动鼓风机 3 台,每台耗气量 $125 \text{ m}^3/\text{h}$ (利旧)	无
沼气安全系统	沼气燃烧器 2 座,单座处理能力为 $1\,600 \text{ m}^3/\text{h}$,进气压力 $0.5 \sim 1.0 \text{ kPa}$	沼气燃烧器 2 座,单座处理能力为 $1\,600 \text{ m}^3/\text{h}$,进气压力 $0.5 \sim 1.0 \text{ kPa}^{[1]}$

为满足北京市新三年计划中对出厂污泥及污泥后续处置的要求,在泥区的先期建设中,只针对各厂的设计处理能力及产沼能力采取临时处理措施。现阶段投入生产后,沼气产量大幅度增加,相应的利用及处理设施未配套实施,造成了大量沼气资源的浪费。

为达到沼气资源的合理利用,针对热水解-厌氧消化的沼气的产量与品质,对其利用系统及净化系统进行讨论分析及方案设计。

改造厂 A 和新建厂 B 均采用热水解-厌氧消化工艺,稳定运行后的实际运行效果均优于预期,产气量较设计值大^[2]。富余沼气每天均会通过燃烧器燃烧^[3],在泥区已运行的 1 年多时间内造成资源的极大浪费。

为达到资源的有效回用,同时展现热水解-厌氧消化技术的产能的核心优势,设计有效的沼气利用系统变得尤其重要。

2 沼气利用系统设计方案分析

为满足热水解系统需求,A、B 两厂均配套沼气锅炉制备蒸汽,并利用多余蒸汽满足厂区的冬季采暖需求,而可将富余沼气综合利用并产生效益的可靠工艺有沼气发电、沼气提纯以及沼气拖动鼓风机等。

2.1 沼气发电方案

沼气燃烧发电是随着大型沼气池建设和沼气综合利用的不断发展而出现的一项沼气利用技术,它将厌氧发酵处理产生的沼气用于发动机上,并装有综合发电装置,以产生电能和热能。沼气发电具有创效、节能、安全和环保等特点,是一种分布广泛且价廉的分布式能源。目前,沼气利用系统主要选用的发电机形式有内燃机与燃气轮机,其特点如表 2 所示。

由表 2 对上述两种沼气发电机机型特点对比分析可见,燃气轮机的使用条件较为灵活,发电效率高,同时能够满足泥区沼气产量在污泥处理量变化、污泥有机质含量变化以及不同季节沼气用途不同等引起的用量变化的情况,所以燃气轮机是沼气发电方案中的推荐使用机型。

表 2 内燃机与燃气轮机特点对比

Tab.2 Comparison of characteristics of internal combustion engine and gas turbine

项 目	内燃机	燃气轮机
工作原理	使燃料在机器内部燃烧,并将其放出的热能直接转换为动力	压气机将压缩后的空气与喷入的燃料混合后燃烧,推动涡轮叶轮带着压气机叶轮一起旋转并输出机械功
产生能源种类及效率	发电(40%~43%)、蒸汽(18%~20%)、热水(22%~25%)	发电(30%~35%)、蒸汽(40%~45%)
单台发电功率/MW	1.2~20	0.4~3.8
热、电效率	热效率高,产热全部为蒸汽;2 MW 机组电效率 18%~31%,热效率 61%;4 MW 机组电效率约 29%,热效率约 45%;6 MW 以上机组电效率约 31%,热效率约 45%	发电效率高,40% 以上;热效率低,产热包括缸套水(23%)和热蒸汽(18%)
并网实施	单台功率大,仅上游并网	单台功率小,可下游并网,接入点多,相对灵活
单台停机影响	对电网冲击负荷大	对电网冲击负荷小
分期实施灵活性	不灵活,首次投资高,不利于分期实施	较灵活,首次投资低,利于分期实施

2.2 沼气提纯方案

沼气提纯是去除沼气中的杂质组分,使之成为甲烷含量高、热值和杂质气体组分品质符合天然气标准要求的高品质燃气。A、B 两厂在 2017 年—2018 年针对消化后沼气含量进行了连续 1 年的检测,其沼气主要成分:甲烷占比约 62%,二氧化碳占比约 30%,氮气占比约 3%,氧气占比约 2%,硫化氢占比约 0.2%~0.5%。

提纯之后的沼气产品气技术标准应参考《天然气》(GB 17820—2018)中的二类气要求,其中,提纯后的甲烷含量需在 92% 以上。目前,变压吸附法、膜分离法、加压水洗法、胺液洗涤法均是技术较为成熟的沼气提纯工艺^[4],各种工艺优缺点对比见表 3。

结合以上各种沼气提纯工艺的特点以及 A、B 两厂的沼气提纯规模,选用变压吸附法作为沼气提纯的处理工艺。

表 3 沼气提纯工艺对比

Tab.3 Comparison of biogas purification processes

工艺	投资	运行成本	对环境影响	处理效果	业绩情况
变压吸附法	高	成本较高,维护少	良好	好	工艺成熟,应用业绩多
膜分离法	较少,用于小规模处理	较少	好	好,但脱氮效果差	工艺成熟,应用业绩多
胺液洗涤	高	较高	易产生有害气体	好,无法脱氮	工艺成熟,应用业绩少
加压水洗法	较少,用于大规模处理	较高	大量废水处理	好,无法脱氮	工艺成熟,应用业绩少

2.3 沼气拖动鼓风机方案

目前,改造 A 厂内现况采用沼气拖动鼓风机的沼气利用系统,为了延续这种系统,对全厂的水区曝气系统进行核算,其全厂曝气量见图 1。

沼气拖动鼓风机是沼气通过内燃式发动机并驱动鼓风机,替代电拖动鼓风机,以节约电能的方案。由图 1 可知,如 A 厂采用沼气拖动鼓风机曝气,按照 2019 年平均小时曝气量 $9.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 计算,以沼气拖动鼓风机的产气量核算需要沼气量约 $2.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,而 A 厂的设计沼气产量为 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,不能达到沼气全利用的目标。

2.4 沼气提纯与沼气发电方案对比

经过 3 种方案的介绍,能够达到沼气全利用的目标的可行方案为沼气发电与沼气提纯方案,对两种方案在同种处理规模下进行经济分析,结果如表 4 所示。

由表 4 可知,在同规模的处理量下,采用沼气提纯工程投资较低,但沼气发电产生的利润更多,经核

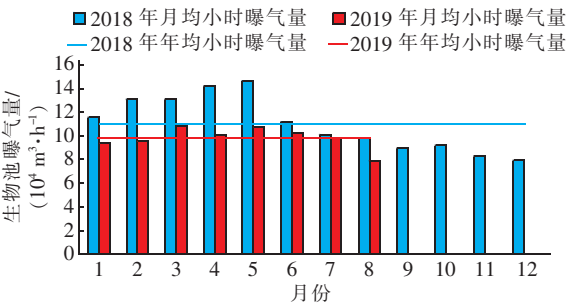


图 1 A 厂水区曝气系统用量

Fig.1 Consumption of aeration system in water area of plant A

算,沼气提纯项目回收周期5.7年,沼气发电项目回收周期3.7年,故A、B厂及后续污泥处理中心的沼气利用系统采用沼气发电效率高且收益更好。

表4 经济效益对比

Tab.4 Comparison of economic benefits

项 目	沼气提纯	沼气发电
处理规模/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	1 000	1 000
产品用途	提纯的产品气计量后 输送入天然气管网	产生电、蒸汽、热量
产品售卖 单价	1.9 元/ m^3	综合电价 0.8 元/ ($\text{kW} \cdot \text{h}$)
项目投资/万元	2 400	2 800
核算收入/ (万元· a^{-1})	937	1 472
综合成本/ (万元· a^{-1})	514	713
折旧/ (万元· a^{-1})	161	186
运营成本/ (万元· a^{-1})	301	466
资金成本/ (万元· a^{-1})	52	61
项目毛利润/ (万元· a^{-1})	423	759
注: 项目周期以15年计。		

2.5 沼气净化系统优化

沼气净化系统主要指脱硫系统, H_2S 会对沼气管道以及后续沼气利用系统(如发电机、锅炉等)造成腐蚀,导致设备的使用寿命缩短和维护费用增加等问题。

现况A、B两厂内均设置干式脱硫系统净化沼气,设计进口处 H_2S 浓度 $<0.1\%$,处理后沼气内 H_2S 含量 $<0.005\%$ 。但目前在实际运行情况下,脱硫设备进口端 H_2S 浓度高于设计值。A、B两厂内消化后 H_2S 浓度约为 0.12% ,均高于 0.1% 的设计值。

基于现况运行数据,A、B两厂目前只运用单级干式脱硫工艺处理现况两厂内消化后含有较高 H_2S 浓度的沼气,其运行成本较高^[5],需要考虑更为经济的沼气脱硫工艺。

从节省运行成本、运行简单以及抗负荷冲击性(如气量变化或 H_2S 含量变化)的能力强等需求考虑,生物脱硫即碱液洗涤塔与生物反应器的结合处理技术较其他化学脱硫工艺更具有优势^[6]。

生物脱硫的主要工艺流程如图2所示。

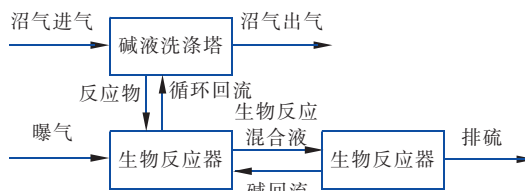


图2 生物脱硫工艺流程

Fig.2 Process flow chart of biological desulfurization

待处理沼气首先进入碱液洗涤塔,在塔内与混合液中碱反应,从沼气中脱除绝大部分 H_2S ,经处理后的沼气排出洗涤塔,经过后续气液分离器除水后送至后端进行沼气利用。碱液洗涤塔的反应液流至塔底,进入生物反应器。在反应器底部有空气分布系统进行微生物曝气,通过生物反应将反应器中的硫化物转化为单质硫,同时碱得到生物再生。从生物反应器出来的含有生物再生碱的混合液可循环回流至碱液洗涤塔,以去除沼气中所含 H_2S 气体。单质硫在分离器中分离。设计选用生物脱硫工艺,在去除沼气中 H_2S 气体的同时,生物反应所得单质S贮存在专用容器中,定期由专业化工公司进行回收再利用,如处理不及时也可排入水区曝气池内进行临时处理。而现况干式脱硫塔可保留,在生物脱硫检修或故障时,保证沼气中的 H_2S 得到有效去除,维护后续沼气利用设备。根据实际运行数据,最后确定生物脱硫的基本设计参数为沼气进气 H_2S 浓度 $\leq 0.35\%$,处理后沼气 H_2S 浓度 $\leq 0.002\%$,处理气量及具体工艺由各处理厂处理规模确定。

3 沼气系统设计方案

沼气系统工艺流程如图3所示。

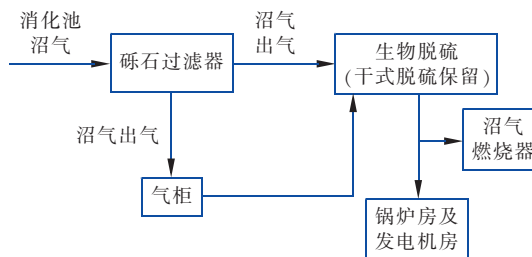


图3 沼气系统工艺流程

Fig.3 Process flow chart of biogas system

通过对沼气利用系统及净化系统的对比分析,确定沼气的工艺流程为热水解-厌氧消化所产沼气经过砾石过滤器后进入厂区沼气干线,根据沼气系统内的气量需求,沼气可以进入气柜贮存或直

接进入生物脱硫系统进行净化,脱硫后沼气输送至沼气锅炉房和发电机房进行利用。当沼气产量超过系统使用量和贮存量或沼气系统发生故障时,不能利用部分或全部沼气进入燃烧器燃烧。

4 结论

通过研究已投入生产的改造A厂、新建B厂的实际污泥处理规模、沼气实际产气量以及现况沼气系统等参数,分析出必须设计有效的沼气利用系统,以避免资源的浪费,同时,热水解-厌氧消化技术的产能的核心优势得到体现。通过分析两厂的实际运行参数,对沼气发电、沼气提纯以及沼气拖动鼓风机的沼气利用工艺进行工艺技术及经济分析对比,确定采用燃气轮机的沼气发电效率高且收益更好。针对A、B两厂的沼气系统的 H_2S 浓度高于设计值且现况干式脱硫运行成本过高的情况,对脱硫系统进行设计优化,选用运行成本低、运行简单以及抗负荷冲击能力强的生物脱硫系统,并保留现况干式脱硫以保证运行稳定。

致谢:感谢北京市排水集团、北排建设团队对改造设计方案提供的运行经验与相关的技术支持。

参考文献:

- [1] 董沫,朱晓丹,戴明华. 某再生水厂沼气系统设计探讨[J]. 市政技术,2017,35(5):98-101.
Dong Mo, Zhu Xiaodan, Dai Minghua. Discussion of biogas system design of a reclaimed water plant[J]. Municipal Engineering Technology, 2017, 35(5): 98-101(in Chinese).
- [2] 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).
- [3] 宋晓雅. 小红门污泥热水解厌氧消化项目运行两周年之回顾[J]. 中国给水排水,2018,34(22):116-122.
Song Xiaoya. Review of biennial operation of Xiaohongmen thermal hydrolysis anaerobic digestion system[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(22): 116-122(in Chinese).
- [4] 甄峰,李东,孙永明,等. 沼气高值化利用与净化提纯技术[J]. 环境科学与技术,2012,35(11):103-108.
Zhen Feng, Li Dong, Sun Yongming, et al. High value application and purification technology of biogas[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(11): 103-108(in Chinese).
- [5] 陈智远. 大型沼气工程中生物脱硫技术[J]. 安全与环境工程,2010,17(2):30-32.
Chen Zhiyuan. Analysis of hydrogen sulfide removed by bio-process on large-scale biogas project[J]. Safety and Environmental Engineering, 2010, 17(2): 30-32(in Chinese).
- [6] 王智鹏,桑义敏,徐超,等. 生物法去除厌氧发酵所产沼气中的 H_2S [J]. 环境工程学报,2017,11(11):5923-5929.
Wang Zhipeng, Sang Yimin, Xu Chao, et al. Hydrogen sulfide removal from biogas in anaerobic fermentation by use of biological process[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(11): 5923-5929(in Chinese).



作者简介:杜强强(1988-),男,北京人,硕士,高级工程师,主要从事给排水工程设计工作。

E-mail:bjutdqq@126.com

收稿日期:2019-11-22