

# 污泥热水解厌氧消化工艺热系统设计探讨

杜强强, 戴明华, 黄 鸥

(北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082)

**摘 要:** 北京某污水处理厂泥区升级改造,采用热水解作为预处理进行强化厌氧消化。热水解-厌氧消化工艺中的热系统,主要是供热及换热系统,是整个设计考虑的核心环节。分析了换热系统的技术方案及工艺参数选择,比较了换热器选型,交代了整个换热系统及附属系统的设计,说明了启动后整个系统的运行情况。供热系统利用厌氧消化所产沼气作为能源,在厂区新建一座沼气锅炉房并保留原热水锅炉房,保证热水解系统的蒸汽用量的同时兼顾厂区采暖;换热系统对热水解后污泥采取两次换热,一次换热在新建热交换间、二次换热在消化池内完成,整个换热系统的冷却水由厂区新建的冷却水泵房提供。改造后热水解厌氧消化系统所产气量完全达到厂区运行能量需求,并且会有至少12%的能量节余。同时,指出了热系统设计中低品位热能难回收、冷却水选用、污泥换热方案以及剩余能源未全部利用等问题,并提出了优化建议。本项目已处于调试阶段,消化池完成常规启动,所产沼气量满足新建蒸汽锅炉房内单台蒸汽锅炉的要求,同时满足单条热水解处理线的蒸汽需求,热系统运行良好,保障了整个工艺的正常高效运行。

**关键词:** 热水解; 厌氧消化; 供热; 换热; 能量平衡

**中图分类号:** X703      **文献标识码:** C      **文章编号:** 1000-4602(2017)06-0063-06

## Discussion on Design of Thermal System of Sludge Thermal Hydrolysis/ Anaerobic Digestion Process

DU Qiang-qiang, DAI Ming-hua, HUANG Ou

(Beijing General Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China)

**Abstract:** There was an upgrading project of sludge treatment zone in a WWTP in Beijing, and thermal hydrolysis process (THP) was used as pre-treatment process for enhanced anaerobic digestion. Thermal system in THP/anaerobic digestion process included heat supply system and heat exchange system, which were the core part of the whole design considerations. The technical solutions and process parameters of heat exchange system were analyzed, exchanger selection was compared, the design of the heat exchange system and ancillary systems were explained, and the operation of whole system after the start-up was introduced. The heat supply system used anaerobic digestion biogas production as an energy source. A new biogas boiler room in the plant was built and the original hot water boiler room was remained to ensure the amount of steam for THP and plant heating. Heat exchange system performed twice heat exchange for sludge after THP, once in the heat exchange room and once in the digestion tank. Cooling water in the heat exchange system was provided by the new cooling water pump house. After the upgrading, anaerobic digestion biogas produced by THP/anaerobic digestion process could fully meet the

基金项目:北京市市属企业优秀科技创新团队“污水厂污泥资源化创新”项目(2015-CXTD-03)

energy demand, and there were savings of at least 12% energy. Meanwhile, several problems during design were pointed out, such as difficulty in low-grade heat recovery, the choice of cooling water, sludge heat exchange program and no full utilization of the remaining energy, and optimization suggestions were proposed. The project has been in the commissioning phase. Routine start-up of digester was completed. The amount of produced biogas could meet the single steam boiler requirements and the needs of a single THP line. Thermal system is running well, protecting normal and efficient operation of entire process.

**Key words:** THP; anaerobic digestion; heat supply; heat exchange; energy balance

北京某污水处理厂水线升级改造后,泥线需同时进行改造,核心工艺采用热水解-厌氧消化,在不扩建消化池的情况下,满足污泥处理需求。设计污泥处理量由改造前的 137.5 tDS/d 增至 180 tDS/d,采用“浓缩→预脱水→热水解→厌氧消化→板框脱水”流程。其中,浓缩、预脱水利用现况设施,新增热水解,消化池不扩建,仅更新维护设备,新增板框脱水,出厂污泥设计近期含水率 <60%,远期 <50%。

热水解为成套设备,其技术参数由设备厂商提供,设计方主要任务:一则在前期考察相关技术参数的合理性及对项目的适用性,二则进行配套设计。

## 1 项目简介

原污泥处理采用常规厌氧消化工艺,以厌氧消化产生的沼气为能源,通过沼气热水锅炉为整个消化池加热,并满足厂区供暖需求;多余沼气用于拖动鼓风机;同时消化池内有 5 台套管式换热器用于加热污泥,保证进泥温度。原系统参数见表 1、2。

表 1 原污泥处理流程设计及运行参数

Tab. 1 Original design and operation parameters of sludge disposal process

项 目	设计值	实际值
设计泥量/(tDS·d <sup>-1</sup> )	137.5	100
有机质降解率/%	40~50	45
沼气产量/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	1.6~3.0	1.2~3.0
沼气产率/(m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> DS)	133~250	125~250
能源自给率*/%	约 150	90
注: *能源自给率按厌氧消化产生能量/消耗能量计。		

表 2 原污泥处理流程主要设备参数

Tab. 2 Original equipment parameters of sludge disposal process

项 目	主要参数
沼气热水锅炉	3 台热水锅炉,制备量为 3 t/h
沼气鼓风机	600 kW,每台耗气为 5 000 m <sup>3</sup> /d
套管式换热器	热交换量为 850 kW,污泥出口温度为 35 ℃,热水进口温度为 80 ℃

改造后污泥处理采用热水解厌氧消化工艺,预计沼气产量达到  $(3.4 \sim 5.6) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,对热系统提出以下要求:①满足热水解加热需求。本工程的设计三条热水解处理线,每条处理能力为 60 tDS/d,需要蒸汽量为 2.5 t/h 且需保证连续供气,供应温度需达到 190 ℃,热水解的接口压力需达到 1.15 MPa 以上<sup>[1]</sup>。②满足消化池进泥温度需求。热水解处理后的污泥达到 80 ℃,消化池的运行温度为 40~41 ℃,进泥需进行换热冷却至 40 ℃。③满足能量平衡需求。热水解可提高沼气产量,实现完全以产生沼气为整个系统供能,做好系统能源综合利用及能量平衡估算,保证系统的可持续运行。为满足上述需求,需对现况厂区的热系统进行相应改造。

## 2 热系统设计

### 2.1 供热系统设计

热水解系统需要高温蒸汽来处理污泥,同时热水解厌氧消化会产生更多的沼气,故利用沼气作为能源,在厂区新建沼气锅炉产生蒸汽供热水解使用。

新建一座沼气锅炉房,设置燃气锅炉 3 台(2 用 1 备),单台制备蒸汽能力为 6 t/h,蒸汽温度为 190 ℃,蒸汽压力为 1.15 MPa,所产生蒸汽供热水解及泥区采暖使用。

### 2.2 换热系统方案选择及设计

#### 2.2.1 换热系统方案选择

热水解处理后的高温污泥需要进行换热后才能进行厌氧消化,否则现况消化池的结构无法承受高温应力,且综合产气及能耗,40~41 ℃的中温厌氧消化性价比更高。

本厂区换热系统拟对污泥进行两次冷却,主要原因是:①热水解处理后污泥呈现酸性,如只经过一次冷却达到消化池反应温度(即 41 ℃左右),输泥管路会因温度过低出现油脂凝固,即所谓的“蜡化”现象,堵塞换热器和管道等<sup>[2]</sup>;②运用两次冷却可以保护消化池进泥泵的正常运行;③现况消化池内

原热交换器不满足热水解后高温污泥的冷却需求,若更换热交换器,则现况消化池用地不满足新设备的安装要求;④采用两级冷却可以回收更高温度的热水。

同时,拟对热水解冷却水进行两次换热。污泥换热对冷却水要求较高,需采用软水,为减少软水用量,拟对冷却水实施二次换热,一次换热冷却水为闭路循环使用。

2.2.2 换热系统工艺流程及设计参数

污泥两次换热,一次在新建热交换车间内完成(热污泥与冷却水 I),二次在消化池内利用现况的管式换热器(热污泥与冷却水 II)。冷却水 I 再次换热在热交换车间内完成(冷却水 I、冷却水 III),具体设计参数如表 3 所示,共新建热交换车间 1 座、冷却水泵房 1 座,整体热交换工艺流程如图 1 所示。

表 3 换热系统设计参数

Tab. 3 Design parameters of heat transfer system

项 目	介质	流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	$T_{\text{in}}/^\circ\text{C}$	$T_{\text{eff}}/^\circ\text{C}$	备 注
一次换热器	热污泥	37.9	86	53	热侧
一次换热器	冷却水 I	40~60	32	59	冷侧,闭路,软水
二次换热器	热污泥	37.9	53	40	热侧
二次换热器	冷却水 II	32~93	25	38	冷侧
冷却水换热器	冷却水 I	40~60	59	32	热侧,闭路,软水
冷却水换热器	冷却水 III	36~120	25	52	冷侧

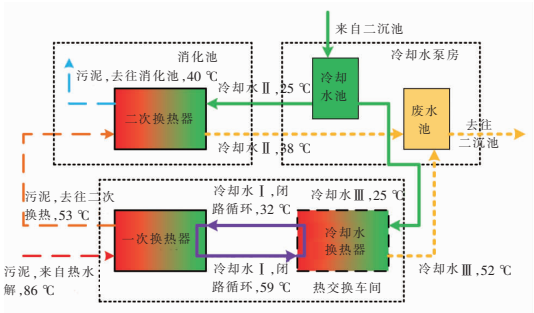


图 1 热交换流程

Fig. 1 Flow chart of heat transfer

2.2.3 换热器选型

在常规厌氧消化中,针对污泥高黏度、高颗粒度、强腐蚀性的特性,设计多采用套管式换热器<sup>[3]</sup>,其具有传热速度快、设备简单、检修方便等优点;相比于套管式换热器,板式换热器的换热效率更高,结构更紧凑,但是其结构形式紧凑,流动通道只有 2~

10 mm,对污泥这种颗粒大、黏度高的介质极易造成堵塞,同时由于其密封垫片难以承受高温,所以本改造工程一次换热器采用套管式换热器,二次换热器利用原消化池内的套管式换热器,而冷却水换热器为板式换热器。

在这两种热交换器中,不同温度的换热介质形成对流完成热量交换,特别在套管式换热器中需要污泥与冷却水的流速均大于 1 m/s,所以,选择适宜的污泥泵与热水循环泵也十分重要。

2.2.4 热交换车间设计

一次热交换器功率为 920 kW,冷却水换热器功率为 1 890 kW。一次热交换器中,热水解处理后的高温污泥与冷却水做间壁式换热,即泥水换热器;冷却水换热器中,运用厂区的冷却水与一次热交换后的热水进行换热,即水水换热器。连接一次换热器与冷却水换热器的闭路循环水采用软化水,这样会提升换热效率,同时减少一次热交换器中的板结现象。用管路连接两组换热器,管路中设置变频循环泵,使连接之后的软化水管路形成一个闭路循环,且在一次换热器冷水进水端设置电动调流阀,如果换热器内泥温变化超出设定范围,由电动阀门调节冷却水的进水量;进入冷却水换热器另一端的冷却水为经过处理的现况二沉池出水。一次热交换器与冷却水换热器各进出端口均设置阀门。

换热流程见图 2。

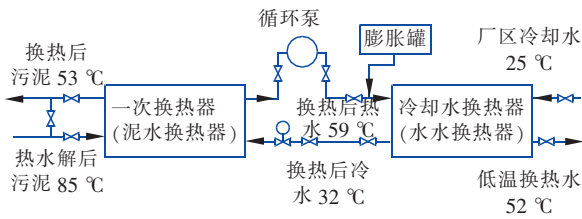


图 2 热交换车间工艺布置

Fig. 2 Technical arrangement plan of heat transfer shop

2.2.5 污泥二次换热设计

经冷却和稀释等处理后,将含水率为 90%、温度为 53℃左右的污泥送入消化池进行第二次换热。二次换热器利用原消化池内泥水换热器,由于工艺的改变,需在冷侧进水路上新增调流阀并且配备适合流量及扬程的变频循环泵。这也使原常规厌氧消化的污泥加热系统变为热水解后高温污泥的二次冷却,即消化池的控制系统。

为适应热水解厌氧消化工艺的需要,对消化池



进行改造,主要包括按照热水解工艺的出泥温度进行消化池外保温措施的更换、对进出泥管道和原加热系统进行改造等。

原消化池运行温度为 35 ℃,改造后消化池的运行温度为 41 ℃,改造后消化池投配率为 5%。为确保污泥消化处理的效果以及消化池结构的稳定性,消化池内污泥温度的变化范围应当保持在 2 ℃ 左右,因此对换热污泥的温度有比较严格的要求。

本改造设计方案中,将经过一次换热和稀释后的含水率为 90%、温度为 53 ℃ 的污泥首先送入消化池中,而后利用现况的污泥循环泵将污泥送往消化池内的二次换热器进行二次换热,换热后污泥温度为 40~41 ℃;改造方案中,在二次换热器冷却水管路中设置了循环泵与电动调流阀,这样无论换热器处于小循环还是大循环,温度计均能及时测量和反映换热器内部的温度,做到随时调节供应给换热器的冷却水水温与水量,保证污泥消化系统对水温控制的精确性和及时性要求(见图 3)。

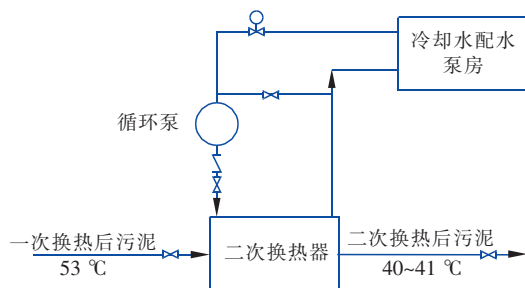


图3 消化池内污泥二次换热工艺布置

Fig. 3 Technical arrangement plan of second heat transfer for sludge

## 2.2.6 格栅间及冷却水配水泵房设计

在厂区内新建一座格栅间及冷却水配水泵房,此构筑物为整个热水解系统及相关泥区构筑物提供冷却水。构筑物由格栅间、冷却水池及冷却水废水池组成。冷却水池有效容积为 300 m<sup>3</sup>,冷却水废水池有效容积为 150 m<sup>3</sup>;转鼓格栅过滤孔径为 2 mm,处理能力为 370 m<sup>3</sup>/h。格栅间及冷却水配水泵房取水自现况二沉池,来水经格栅处理后进入冷却水池内,经水池内一次冷却水泵及二次冷却水泵提升后,去往热交换车间及消化池进行对热水解处理后高温污泥的一、二次冷却。而冷却之后的低温换热水回到冷却水废水池,经水泵提升进入二沉池退水渠,如图 4 所示。

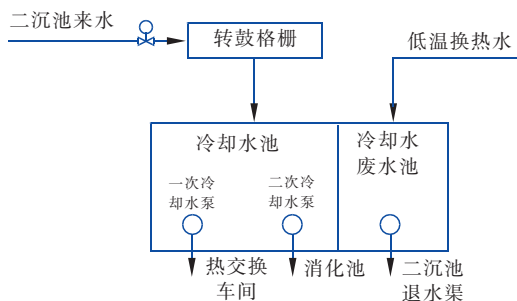


图4 格栅间及冷却水配水泵房工艺布置

Fig. 4 Technical arrangement plan of grid and cooling water pump room

## 2.3 调试、运行及应急处理措施

本工程属于改造工程,消化池改造与热水解系统的建设同时进行,由于热水解系统建设安装周期较长,消化池改造会先于热水解系统完成。为使泥区能够正常运转,改造后的消化池需先于热水解系统进行常规消化启动。

原热水锅炉房保留,用于消化池常规启动时加热消化池以及投配的污泥。而当热水解系统故障或检修时,现况热水锅炉房也可满足消化池对常规厌氧消化的加热功能,确保污泥得到无害化处理。

在热水解及整个泥区的换热系统中,在污泥管路、冷却水管路中均设计旁通及放空管路,确保污泥在应急状况下可完成换热工作。如果整个热水解系统故障,污泥也可经预留管路进入消化池进行常规厌氧消化或进入污泥料仓外运处置。

在新建蒸汽锅炉房与原热水锅炉房中,均设置了天然气管路,如消化沼气产量不足以及常规消化启动时,均可使用天然气产能。

新建双膜沼气柜 3 个,单套储气量为 5 000 m<sup>3</sup>。如超过储存量,多余沼气经废弃燃烧器燃烧耗尽。

设计时,按功能对整个换热系统进行独立的控制,功能块之间的控制点应尽可能少,避免多系统之间的联锁控制。避免因为一套系统出现问题而影响其他系统的运行,防止由于一处小故障而导致整个系统的瘫痪。因此,在换热系统设计中,对于热交换车间、消化池以及格栅间及冷却水配水泵房中的设备均设计了不低于 30% 的备用设备且均有独立的操控系统。另外,独立的系统可进行单独调试,这样调试周期会相应缩短。在某一系统发生故障时,可分别进行故障判断,便于发现故障点,从而缩短判断故障所需要的时间。

### 3 能量估算及探讨

经热水解厌氧消化处理后,因污泥有机质含量随季节变化,沼气的理论设计产量达到 $(3.4 \sim 5.6) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,产生沼气先去往新建锅炉房产蒸汽,过量的沼气再去往现况热水锅炉房与沼气鼓风机。

本次设计中3条热水解处理线估算其所需热量为5 600 kW,经过热水解处理后需进行两次冷却,一次冷却的散热量为2 000 kW,二次冷却的散热量为1 200 kW,两次冷却均通过冷却水实现,最后进入消化池的热量为2 400 kW;整个泥区的建筑冬季采暖需要1 600 kW;当产能超过工艺及采暖要求时,多余沼气去往厂区现况有三台沼气拖动鼓风机、现况热水锅炉房以及沼气储柜;沼气拖动鼓风机耗气量为 $5 000 \text{ m}^3/\text{d}$ ,耗能约4 000 kW;而经改造后,厌氧消化产沼气体积为 $(3.4 \sim 5.6) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,满足厂区新建锅炉需求与供暖需求需利用沼气产能约7 200 kW,消耗沼气约 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (见图5)。热量平衡基于全年均值计算,但根据此污水厂多年运行经验,进泥的有机质含量有明显的季节性变化的特点,冬季有机质含量高,最高可达70% VS/DS,夏季偏低,最低达到55% VS/DS,表明热水解厌氧消化沼气产量在冬季时高,夏季时低;同时,消化池夏季耗热低,冬季耗热高,消化池运行的能耗却与产能相反。总体上,全年能量平衡受季节影响性不大,可实现全年热量盈利。

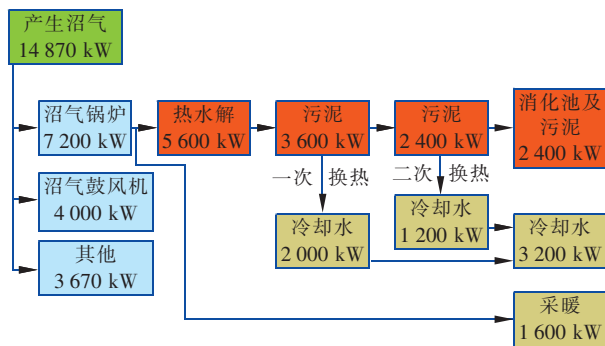


图5 热量平衡图

Fig. 5 Heat balance diagram

经厌氧消化后沼气产能约14 870 kW,其中7 200 kW用于沼气锅炉产蒸汽供热水解系统及新建泥区和部分水区构筑物的采暖;4 000 kW用于拖动沼气鼓风机;剩余沼气未被利用,通过沼气的储柜储存。

本方案沼气产量需达到 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,才可满足

热水解厌氧消化系统及供热系统的正常运转。原厂区常规厌氧消化产气量已达到 $(1.2 \sim 3.0) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,此产气量基本可以满足热水解系统的运行需求,而经改造后运用热水解厌氧消化技术,理论产气量会提高约1.8倍,完全达到厂区运行能量需求,并且会有至少12%的能量节余。

### 4 供热及换热系统设计存在问题

#### 4.1 换热系统设计中的能源回收

由于本工程对于热水解处理后污泥采用两次换热,耗用冷却水量达到 $300 \text{ m}^3/\text{h}$ ,经两次冷却进入冷却水配水泵房的废水池中混合,温度在 $35 \sim 45^\circ\text{C}$ 。但其冷却交换后的热量属于低品位热能,难以回收再利用。本次方案设计将此部分低温热水用于沼液处理单元的调温水及稀释水,但此部分低温水用量仅为 $60 \text{ m}^3/\text{h}$ ,未能使全部低温热水得到利用,造成资源浪费。

近年来,污水源热泵空调技术的发展为提取污水中大量低品位热能提供了直接条件,也是一项具有节能环保意义的应用技术<sup>[4,5]</sup>。设计方案中的低温热水为经过转鼓格栅处理之后的二沉池出水,且温度远远高于污水进厂温度,满足污水源热泵设置要求且其供热量高于一般的污水源热泵<sup>[6]</sup>,但受改造项目的诸多限制,本项目无法实施此措施,而其他项目则可以根据项目情况考虑采用污水源热泵技术利用这部分低品位热能<sup>[7]</sup>。

#### 4.2 冷却水选用

本设计中冷却水采用经过转鼓格栅处理后的现况二沉池出水,其水质还未达到再生水标准,可能会对换热器的运行造成一定的影响,因此,设计中备用了一台板式换热器,即冷却水换热器。

采用二沉池出水作为冷却水会降低运行费用,减少工程投资,但需在工程实践中长期考察其对换热器运行状况的影响。

#### 4.3 换热方案

由于泥区改造用地受限、对消化池进泥泵的保护且现况消化池内二次换热器运行状况良好,所以在保证处理效果且减少投资的情况下,本工程对于热污泥采取两次冷却方案。

鉴于本改造工程中利用现况二次换热器,节省部分工程投资且可以回收一次换热后温度更高的热水。在其他实际工程的应用中,一次冷却与二次冷却均可实施,采用二次冷却工艺的工程投资略高。

#### 4.4 能源综合利用

由于本项目为泥区改造项目,受用地、设备老化等因素的限制,只新建一座沼气锅炉房,更换原破损废弃燃烧器,并利用原沼气拖动鼓风机与热水锅炉房。从能量流程上看,剩余能源为3 670 kW,还可以选用发电机对多余的沼气能源加以利用。

在现行能源使用方案中,众多污水处理厂均设置了沼气发电机来使用多余沼气能源。使用燃气发电机可以发电、产蒸汽,而在采暖季还可以利用产生的烟气供厂区采暖,沼气发电方案是沼气利用较为合理的方案。但对于沼气发电内燃机与轮机的选择,还需要结合具体项目情况综合考虑。

由于设备运行良好,本设计方案利用原沼气拖动鼓风机,但出现现况设备与多余能源不匹配的问题,同时也可能会出现夏季产气量低导致鼓风量不足等问题。

所以,对于其他新建运用热水解厌氧消化工艺的项目可结合自身特点考虑运用沼气的可行方案。

#### 5 系统运行情况

本改造项目现正处于调试运行阶段,消化池已完成常规厌氧消化启动,现阶段消化池污泥含水率为97.5%~98%,沼气产量约5 000~8 000 m<sup>3</sup>/d。随着热水解系统的调试运行,正逐步向消化池内投加热水解处理后含水率为95%的污泥,使消化池的浓度逐步达到设计运行的污泥浓度。

在此调试运行期间,换热系统运行正常,由于热水解启动时处理的泥量较少,利用变频泵与调流阀调整流量,使整个换热系统保持在设计温度范围内,整个运行期间,冷却水的总用量在60~100 m<sup>3</sup>/d。而在调试期间,由于冷却水用量较小,出现了冷却水循环泵超压的现象,对此已在闭路冷却水循环管路上设置泄压阀,保护泵组安全运行。

在热水解系统调试运行前,消化池完成常规启动,所产沼气量满足新建蒸汽锅炉房内单台蒸汽锅炉的要求。由于每条热水解处理线需独立调试运行,所以单台蒸汽锅炉所产蒸汽满足调试运行期间系统运行热量要求,同时随着消化池内热水解后污泥浓度的增加,沼气产量也会提升。

#### 6 结论

① 本次泥区改造中热系统设计新建一座蒸汽锅炉房以满足热水解运行以及泥区供热需求,并对热水解后污泥进行两次冷却,使污泥达到41℃后进

入改造后的消化池进行厌氧消化。

② 改造后厌氧消化产沼气达到 $3 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d以上时,即可满足热水解厌氧消化系统以及泥区供热的正常运转,而热水解厌氧消化的理论产气量可达 $(3.4 \sim 5.6) \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d,满足运行能量需求且有部分能源节余。

③ 保留原泥区热水锅炉房,满足当热水解系统故障以及热水解未建成时消化池进行常规厌氧消化的加热需要,确保污泥得到稳定无害化处理。

#### 参考文献:

- [1] Norli M. The cambi thermal hydrolysis process (THP)-dramatically improving sludge digestion and dewatering-11 years experience of full scale project [A]. Gdansk Conference [C]. Poland:Gdansk,2006.
- [2] 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.
- [3] 肖金花,钱才富,王凤林. 波纹管对高黏度介质的强化传热研究[J]. 北京化工大学学报:自然科学版,2007,34(1):53-57.
- [4] 邝春英,刘康,郑杰,等. 污水源热泵为污水厂供热的应用研究[J]. 中国给水排水,2011,27(17):91-95.
- [5] 刘如玲,宋鹏,戴卫东. 青岛市团岛污水处理厂污水源热泵技术应用[J]. 中国给水排水,2015,31(12):86-89.
- [6] 马最良,姚杨,赵丽莹. 污水源热泵系统的应用前景[J]. 中国给水排水,2003,19(7):41-43.
- [7] 高琼,吴春江,杨士安. 卢沟桥污水厂二级出水热泵系统的运行经验[J]. 中国给水排水,2006,22(20):57-60.



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

E-mail:bjtddq@126.com

收稿日期:2016-09-29