

# 污泥热水解-厌氧消化系统设计优化

杜强强<sup>1</sup>, 任丽超<sup>2</sup>, 戴明华<sup>1</sup>, 黄 鸥<sup>1</sup>, 温 瑛<sup>2</sup>

(1. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082; 2. 普拉克环保系统  
<北京>有限公司, 北京 100020)

**摘 要:** 北京市已完成三座以热水解-厌氧消化为核心的再生水厂泥区升级改造, 采用了 Cambi 的污泥热水解技术及 Purac 的厌氧消化技术, 共 11 条热水解处理线完成启动调试进入正式生产。在系统启动调试及运行中, 出现了换热系统效率未达到设计值致使消化池温度超标、工艺气管道超压停机等问题。通过将两条热水解处理线的出泥管路串联并使污泥两次经过一次热交换器, 在冷却水总管中增加管道式紫外消毒器, 加强外来污泥的管理, 重新确认改造工艺气管线高程坡度等措施, 有效解决上述问题, 换热效率达到设计要求, 消化池内的实测污泥温度为 39~41℃、含水率为 92%, 满足设计及运行要求。设计换热系统时, 应保证换热器内传热介质的流速, 同时充分考虑污泥与冷却水的设计品质, 减少设备内结垢、堵塞等影响系统的换热效果; 设计及施工过程中, 需严格按照设计坡度铺设工艺气管道, 防止工艺气管道冷凝液水封现象的发生; 在系统改造及调试阶段需注意消泡, 严格监控消化池内控制指标, 尤其是消化温度, 保证整个系统的稳定安全运行; 需加强对于整个泥区内换热系统、工艺气系统以及自控系统设备仪表的日常维护及保养。

**关键词:** THP; 换热系统; 运行问题; 改造方案

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)02-0068-05

## Design and Optimizing of Sludge Thermal Hydrolysis and Anaerobic Digestion Process

DU Qiang-qiang<sup>1</sup>, REN Li-chao<sup>2</sup>, DAI Ming-hua<sup>1</sup>, HUANG Ou<sup>1</sup>, WEN Ying<sup>2</sup>

(1. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China; 2. PURAC Environmental System <Beijing> Co. Ltd., Beijing 100020, China)

**Abstract:** There has been finished three sludge treatment process upgrading and retrofitting of reclaimed water plants in Beijing. Based on thermal hydrolysis (THP) and anaerobic digestion process from Cambi and Purac respectively, 11 THP disposing treatment lines were in normal production after starting and commissioning. During starting, commissioning and normal operation process, several problems occurred, such as heat transfer efficiency below design value resulting in digestion tank temperature out of limits, gas pipeline over pressure resulting in THP system halt, and so on. In order to solve the problems above, some design measures were adopted as follows: the sludge treatment line of two thermal hydrolysis lines was connected in series and the sludge could pass through two primary heat exchangers in two times; tube type ultraviolet sterilizer was installed on header pipe of cooling water; out-plant sludge management was strengthened; elevation and gradient of gas pipeline was reconfirmed and retrofitting. As

a result, the heat transfer system efficiency could achieve the design requirements. Actual sludge temperature and moisture content in digestion tank was 39 – 41 °C and 92% respectively, which could meet the design and operation requirements. When designing heat transfer system, the flow rate of heat-transfer medium should be ensured and the design parameters of sludge and cooling water should be also taken into account to avoid reduction of heat transfer system efficiency via equipment internal scaling and blocking. Through design and construction process, gas pipeline should be laid according to design gradient strictly to prevent condensate water from blocking the gas pipelines. During retrofitting and debugging, defoaming should be paid more attention, and control index should be strictly monitored, especially temperature in digestion tank, to ensure safety operation of the system. Maintenance management of equipment and instrument in heat transfer, gas and autonomous system should be strengthened as well.

**Key words:** THP; heat transfer system; operation problems; retrofitting scheme

目前,北京市已完成三座以热水解-厌氧消化为核心的再生水厂泥区升级改造,采用了 Cambi 的污泥热水解技术及 Purac 的厌氧消化技术,共 11 条热水解处理线完成启动调试工作进入正式生产,三座水厂的总处理能力可达到 715 tDS/d。在热水解厌氧消化系统启动调试及运行过程中,出现换热系统效率未达到设计值、工艺气管道超压停机等问题,影响了系统运行效果。为了达到热水解系统的最佳工况,针对上述问题,对原热水解-厌氧消化设计方案进行了局部修改并提出了优化建议。

## 1 换热系统效率未达到设计值

### 1.1 换热系统问题概述

热水解处理后高温污泥需经过稀释和冷却,使污泥温度达到 39 ~ 41 °C、含水率约 92% 后进入消化池厌氧消化。设计方案对高温污泥进行两次换热冷却(见图 1)<sup>[1]</sup>,一次换热在新建热交换间(热污泥与冷却水 I),二次换热在消化池内(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),高温污泥的两次换热均采用两套不同换热效率的管式换热器,每套换热器与每条热水解处理线组成一条完整的处理系统。

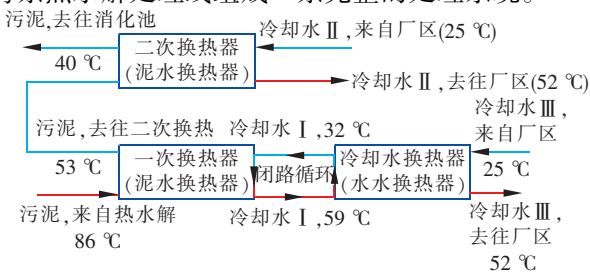


图1 热交换流程(设计方案)

Fig. 1 Flow chart of heat transfer (design scheme)

热水解厌氧消化系统的启动泥量为每套处理线设计泥量的 5% ~ 10%, 在启动泥量达到平稳运行后, 定量定时逐步提升处理泥量至设计泥量, 热水解系统的每条处理线需独立启动, 所有处理线调试完毕后, 可同时运行达到设计处理负荷。

在系统启动及处理设备的调试阶段, 热水解后污泥换热温度达到 45 °C, 高于 41 °C 的设计值, 但启动期处理的泥量较小, 同时消化池运用常规方式启动后的温度一直未超过 25 °C, 故投加少量的高温污泥, 并未引起消化池内温度的异常升高。调试运行结束后, 整个系统运转至设计处理泥量后, 消化池运行温度达到了设计温度的最高限 42 °C。热水解后污泥达不到预期换热效果, 高温进入消化池, 会导致消化温度过高, 进而降低有机物分解率和产气率, 甚至会导致改造土建消化池的结构安全等一系列问题。分析其原因, 主要是由于污泥换热效率不高所致。

### 1.2 换热系统问题分析

影响换热效率的主要因素是两种热交换介质的流速以及流体性质(如密度、粘度等)。由于冬季冷却水的温度较低, 从设计角度考量, 冬季换热效果好于夏季, 故整个换热系统冷却水需求量大以及最不利的情况均在夏季时期。

#### 1.2.1 污泥流速低于有效热交换速率

整个换热系统的原设计方案按照原常规污泥输送系统进行设计, 同时考虑了当平行运行的热水解处理线故障停运时, 其他处理线承担此部分污泥处理量, 并超过设计处理量运行, 故每条处理线的配套管线规模均按同时承担两条热水解污泥处理线出泥量的规模进行设计。

污泥换热系统选择套管式换热器,使污泥与冷却水做间壁式换热以达到冷却效果。此种换热器以对流的传热方式为主,伴随着一定的传导作用。套管式换热器需要两种传热介质达到较高流速以提高给热系数,达到相应及更好的对流传热效果。原设计管线规模过大,管道内污泥实际最大流速仅为 $0.8\text{ m/s}$ 左右,而一般要求在污泥及冷却水在管道内的流速均大于 $1\text{ m/s}$ <sup>[2,3]</sup>。污泥流速过低且污泥在管道中的流态不稳定,导致进入换热器内污泥的流速未达到要求,致使换热效率不高,污泥经过两次换热后的温度仍高于设计值,而在流速过低的同时,也会加大换热器内的结垢程度。

### 1.2.2 处理泥质与设计泥质不符

原设计方案中,处理的污泥均为厂区内自产的初沉污泥与剩余污泥。而在实际启动和投产后,处理的污泥中均加入了其他污水处理厂的脱水污泥,即外运污泥。原设计中,对于本厂内所产污泥均进行了针对热水解工艺的预处理(见表1),而外运污泥均未采取过相应的措施。

表1 本厂污泥与外来污泥预处理工艺对比

Tab.1 Comparison of pretreatment process between in-plant and out-plant sludge

预处理措施	设计污泥	外运污泥
水区3 mm孔板格栅	水区具备	大部分水区不具备
污泥除砂处理	具备	不具备
污泥除渣处理	具备	不具备
除纤维处理	具备	不具备

污泥处理系统泥质也会受污水处理工艺过程的影响。当处理厂中设置3 mm孔板格栅的预处理措施时,进厂污水中大部分的杂质将会去除,大大减少了后续初沉污泥以及剩余污泥中的杂质,而设计污泥再经过除砂、除渣与除纤维措施后,污泥性状能够得以保证。但当大量的外运污泥与设计污泥混合后,其成分较为复杂,运行阶段,在热交换器内泥路管内出现了堵塞现象,严重影响了传热效果。

### 1.2.3 冷却水品质劣于设计品质

图1中,一次换热器与二次换热器为高温污泥与冷却水之间的换热,选用套管式换热器;冷却水换热器为水水换热,选用板式换热器。在原设计方案中,为了减少换热过程中的结垢现象,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,而二次换热器与冷却水换热器的冷侧进水均采用厂区内

的再生水或是经过处理后的二沉池出水,具体冷却水水源、处理措施及运行效果等见表2。

表2 不同再生水厂的冷却水参数及工艺气系统设计方案

Tab.2 Cooling water parameters and gas system design scheme in different reclaimed water plants

项 目	小红门	高碑店	槐房
冷却水水源	二沉池出水	二沉池出水	MBR池出水
处理措施	2 mm转鼓格栅	2 mm转鼓格栅	不处理,直接使用
杂质含量	较多	较多	较少
铺设方式	架空铺设	架空铺设	埋地铺设
管道坡度/%	0.1	0.1	0.3
冷凝储罐容积/L	125	150	150

在热水解厌氧消化启动的三个泥区的运行中,均存在板式换热器中冷却水Ⅰ与冷却水Ⅲ的换热效率较低的现象,热侧出水温度高于 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的设计出水温度,导致污泥一次换热后未达到设计温度,其原因在于冷却水品质较低,主要体现在冷却水的水质与温度。

① 水质:原方案通过转鼓格栅过滤试验后,对水中杂质去除效果较好,但实际运行中,水质参数以及微生物的影响更为突出。运行中,冷却水水源为MBR池出水的换热效果要好于处理后的二沉池出水的水源,但两种水源均未经过消毒杀菌,故在冷却水中包含大量的杂质与微生物。由于板式换热器的结构十分紧凑,使用原设计所选的冷却水,使得换热器内结垢程度较快,最后导致了换热器的堵塞。

② 温度:冷却水水源的原设计最高温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (夏季温度,下同),但在实际运行中,三个水厂的冷却水水源的取水温度最高在 $28\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,导致冷却水的实际用量变大。由于取水温度随季节变化,调试期间换热温度与流量均在设计范围内,当进入运行投产阶段时,正处于夏季,冷却水水源温度与用量均超过最大设计值,这也是冷却水引起整个污泥换热效率不高的原因之一。

## 1.3 换热系统设计优化方案与效果

### ① 污泥管路改造方案

将原设计换热系统为每条热水解处理线与每套换热器组成一条完整的对应关系进行改造,将两条热水解处理线的出泥管路串联后,先进入一套一次换热器,经换热后,再进入第二套一次换热器,使热水解后污泥进行“两次”一次换热。

改造方案见图2。



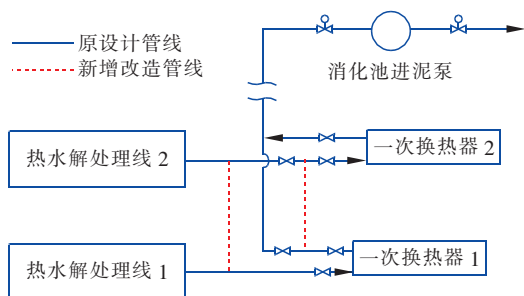


图2 热交换流程(优化方案)

Fig. 2 Flow chart of heat transfer (optimizing scheme)

将两条热水解处理线的出泥管路串联后,增大了管路中的出泥量,使管道中污泥的流速达到一次换热器内的介质热交换的流速要求,并使污泥两次经过一次热交换器,使热水解处理后高温污泥经过充分的一次换热后进入消化池进行二次换热,这也是在短时间内无法改善冷却水品质的改造方案。此种改造方法可通过阀门间的切换恢复到原设计方案的一次换热系统。

由于系统投入运行后消化池已经开始产气,对消化池控制塔内的污泥二次换热系统进行改造是十分危险的,故没有对二次换热系统进行改造。

## ② 冷却水优化方案

由于部分再生水厂的再生水区还处于调试阶段,短时间内无法供应再生水作为冷却水水源,现行在冷却水总管中增加管道式紫外消毒器,减少微生物在换热器中的附着与繁殖,减缓堵塞情况。

## ③ 优化运维方案

在调试及运行阶段,一、二次换热器的结垢以及堵塞现象较为严重,为保证系统的运行,需定时检查换热器的工作情况,及时清垢,并对设备进行维护保养。对仪表也需进行定期维护检查,以保证各控制参数的准确反馈。

## ④ 提高外运污泥标准

污泥处理运营单位需对外运污泥品质提出要求,要求其进行一定的除砂、除渣以及除纤维处理,并对进厂的外来污泥进行检查,拒收不合格的外来污泥。同时,运营单位需对外来污泥的泥质及常规管理具备相应的管理措施。

对三个再生水厂的泥区进行上述改造后,泥区系统运行平稳,换热效率达到设计要求。现消化池内的实测污泥温度为 $39\sim 41\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、含水率为92%,满足设计及运行要求。

## 1.4 换热系统设计反思

在设计热水解系统换热系统时,没有掌握充足的热水解处理后污泥成分变化、流态变化等设计资料,仍遵循着以往处理脱水后污泥的经验进行设计,未达到理想换热效果;同时,并未对冷却水其他相关的水质参数以及微生物的问题加以重视,导致了换热器频繁结垢、堵塞,影响整个系统运行。

因此,设计中应重视换热系统介质流速校核,满足换热基本要求;重视冷却水水质及管道微生物滋生、结垢问题,防止其降低换热效率;重视季节变化对换热系统的影响,能够适应冬夏对系统的要求;重视启动调试期对系统控制要求的响应;建议对待处理污泥进行小试,对处理后污泥的成分,特别是流态、粘度等设计参数进行收集总结归纳,使整个污泥管道的规模及换热系统的方案更加合理、高效。

## 2 工艺气(不可凝气体)管道超压停机

在污泥热水解处理过程中会产生不可凝气体<sup>[4]</sup>,即工艺气,其成分复杂、呈酸性且具有腐蚀性,设计中将热水解产生的不可凝气体通过DN100的不锈钢管道送至消化池内处理。

热水解系统产生的工艺气温度较高,约为 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在输送至消化池的过程中由于温度降低会产生冷凝液,其性质与不可凝气体相同,不可排入厂区污水系统内。设计方案中,将整个管道按一定坡度送至消化池,在整个管路的最低点设置一个125~150 L的冷凝液储罐,使管道中的冷凝液自流进入其中<sup>[5]</sup>。冷凝液储罐内设置液位计,通过液位控制,由负压泵将冷凝液送进污泥管道中,最后进入消化池,同时不可凝气体进入消化池的管道上也必须设置止回阀,以防止污泥倒灌。不同的处理厂对管道铺设不同需求,具体见表2。

系统运行期间,在工艺气管道中会出现冷凝液无法自流进入冷凝液储罐内,造成大量冷凝液积压在管道中造成水封,使工艺气无法排入消化池内的现象。工艺气管道与热水解设备接口相连,当工艺气由于冷凝液水封无法排入消化池后,长期积压会使整个连通系统超过运行压力,此时热水解设备就会自动停止运行,导致整个泥区处理系统停滞。

工艺气管道系统按0.1%~0.3%的坡度铺设至消化池,其对土建施工的精度要求较高,在对管道高程复查中发现,冷凝液水封现象出现在管道的低点,但此低点是由于施工所产生的,此问题在埋地铺

设的管道中频繁出现,而在架空管道中出现较少。

由于埋地工艺气管道中的水封现象较为严重,针对设计方案,将整个埋地工艺气管道扩增至DN200,并严格监管施工过程,保证管道按设计坡度实施。针对架空工艺气管道,需复查整个系统管道高程,对未达到设计要求的管道,通过调节管道支架的垫片来调整。

对三个再生水厂的泥区进行上述改造后,工艺气管道内的冷凝液水封问题再未出现。

### 3 泥区运行中其他问题

#### 3.1 纤维丝状物缠绕问题

在实际运行中,整个污泥系统中的输送设备、搅拌设备以及在线监测仪表多次出现了由纤维物缠绕产生堆积,导致管道堵塞、设备无法运行及监测数据不准确等诸多问题。整个泥区系统的纤维缠绕物来自厂内所产的初沉污泥以及外运污泥,对于纤维物的控制及处理还需要在运行中加强监管。

#### 3.2 监测仪表测量精准度

由于启动阶段泥量、水量均未达到设计负荷,会对自控仪表的检测产生一定的影响;另由于在换热系统中,对于污泥的热交换与冷却水水量的控制原理不相同,导致其测量控制数据以及信号反馈中存在参数差异,致使部分设备出现工作异常的情况。故对于整个污泥热水解厌氧消化系统,自控系统的稳定性与准确性尤为重要。

### 4 改造及调试阶段注意事项

热水解厌氧消化工艺系统运行效果的好坏主要取决于污泥厌氧消化是否稳定高效。无论在启动调试阶段,还是在优化改造阶段,以下几个厌氧消化的问题都值得引起注意:

① 泡沫问题:在热水解厌氧消化启动调试阶段,消化池内的负荷会逐步提高,在增长过程中,可能出现泡沫问题,注意监控,及时投加消泡剂。

② 消化池内各项数据的监测:进泥过程中需密切监测消化池内 pH 值、TAC、沼气中甲烷含量等指标,根据数据值来决定改造及调试期间热水解处理后污泥的实际进料量。

③ 消化池温度:消化过程中,必须维持消化池内温度为 $(40 \pm 1)^\circ\text{C}$ ,保证消化效果以及改造后消化池的结构安全。

### 5 结论

① 通过将两条热水解处理线的出泥管路串联

并使污泥两次经过一次热交换器、在冷却水总管中增加管道式紫外消毒器、加强外来污泥的管理等措施,有效解决了换热系统效率不高问题,换热效率达到设计要求,消化池内的实测污泥温度为 $39 \sim 41^\circ\text{C}$ 、含水率为92%,满足设计及运行要求。

② 污泥热水解厌氧消化工艺换热系统的设计,应保证换热器内传热介质的流速,同时充分考虑污泥与冷却水的设计品质,减少设备内结垢、堵塞等影响污泥系统的换热效果。

③ 设计及施工中,需严格按设计坡度铺设工艺气管道,防止工艺气管道冷凝液水封现象发生。

致谢:感谢北京市排水集团、北排建设 EPC 团队以及普拉克环保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] 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.
- [2] 胡维杰. 大型污泥消化工程热水系统的设计优化研究[J]. 给水排水,2014,40(2):34-36.
- [3] 吴长春,张静思,李卓,等. 热水解污泥在波节管中流动传热的数值研究[J]. 环境工程,2016,34(8):135-140.
- [4] 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.
- [5] 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,2017,33(2):46-50.



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:bjutdq@126.com

收稿日期:2017-08-28