

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.16.019

# 污泥厌氧消化/热解气化耦合技术处理市政污泥

李升, 焦方方, 王航航, 于文静, 郭兆广  
(郑州市污水净化有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 污泥厌氧消化、干化焚烧、热解气化焚烧等污泥处理工艺和技术,是进入高质量发展阶段以及践行“双碳”政策的重要技术选择。郑州新区污水处理厂一期污泥采用厌氧消化干化工艺,二期污泥采用热解气化焚烧工艺,并在一、二期基础上实现污泥厌氧消化和污泥热解气化焚烧耦合,最终实现污泥处置的减量化、无害化、稳定化、资源化。该污水处理厂1 000 t/d污泥消化和100 t/d污泥气化焚烧实际运行数据表明,污泥厌氧消化和污泥焚烧不是必须二选一,相反,从全过程能量平衡角度,污泥厌氧消化和污泥热解气化焚烧耦合技术是实现能量利用最大化的优选工艺组合。

**关键词:** 污泥厌氧消化; 污泥热干化; 污泥热解气化焚烧; 余热回收

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)16-0110-06

## Municipal Sludge Treatment by Anaerobic Digestion and Pyrolysis Gasification Coupling Technology

LI Sheng, JIAO Fang-fang, WANG Hang-hang, YU Wen-jing, GUO Zhao-guang  
(Zhengzhou Sewage Purification Co. Ltd., Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** Sludge treatment processes and technologies such as anaerobic digestion, drying and incineration, and pyrolysis gasification and incineration must be considered at the stage of high-quality development and implementing “carbon emission reduction and carbon neutrality” policy. Phase I sludge of Zhengzhou New Area wastewater treatment plant (WWTP) adopts sludge anaerobic digestion and drying process, and phase II sludge adopts pyrolysis gasification and incineration process. On the basis of phase I and phase II, the coupling of sludge anaerobic digestion, pyrolysis gasification and incineration is realized, and finally the reduction, harmlessness, stabilization and resource utilization are realized. The actual operation data of 1 000 t/d sludge anaerobic digestion and 100 t/d sludge gasification and incineration project of Zhengzhou New Area WWTP show that sludge anaerobic digestion and sludge incineration are not either one or the other. On the contrary, from the perspective of energy balance in the whole process, the coupling technology of sludge anaerobic digestion and sludge pyrolysis gasification is the optimal process combination to maximize energy utilization.

**Key words:** sludge anaerobic digestion; sludge thermal drying; sludge pyrolysis gasification and incineration; waste heat recovery

在国家“双碳”政策引领下,将污水处理厂变成一个“资源中心”的理念越来越被污水处理行业接受,国内外市政污水处理厂资源化的典型案例也不

断涌现。污泥厌氧消化、干化焚烧、热解气化,以及沼气发电、水源热泵、光伏发电等技术已经逐步应用于污水处理厂。在此基础上,诞生了一种新兴的污

泥处置技术——污泥厌氧消化与污泥热解气化耦合技术。

郑州新区污水处理厂一期污泥采用厌氧消化干化工艺,二期污泥采用热解气化焚烧工艺,最终实现污泥厌氧消化和污泥热解气化焚烧耦合的工程创新实践,可为其他类似工程提供借鉴。

## 1 污泥厌氧消化和热解气化耦合技术

污泥厌氧消化是利用厌氧微生物在一定温度条件下将污泥有机质分解为二氧化碳和甲烷等物质的技术手段。微生物分解生物质原料的作用可以分为两个方面:一是厌氧发酵过程从生物质原料中释放能量,赋存在以甲烷为主要成分的沼气产品中;二是大分子生物质原料碳链断开,生成分子质量较小的有机副产物,赋存于消化污泥中<sup>[1]</sup>。沼气作为生物质燃料可用于沼气锅炉、沼气发电和污泥干化气化焚烧系统补燃;消化后的污泥经过脱水和干化后进行热解气化;热解气化产生的可燃气经热风炉(也称焚烧炉)焚烧,由余热锅炉产蒸汽后用于污泥干化;热解气化焚烧后的污泥则变成稳定化、无害化的炉渣。

污泥厌氧消化后进行污泥焚烧的技术案例在国内外屡见不鲜,而污泥厌氧消化和污泥热解气化耦合技术则刚刚兴起,其技术流程见图1。

以 100 t 含水率 80% 的污泥为例,污泥厌氧消化+热解气化焚烧耦合与污泥干化焚烧工艺能量衡

算比较如下:消化前污泥有机质含量为 50%~70%;污泥厌氧消化产气率为 0.85~0.95 m<sup>3</sup>/kgVS,沼气热值为 23 MJ/m<sup>3</sup>;污泥干化需热量为 2 244~2 323 MJ/m<sup>3</sup>;污泥热解气化焚烧后烟气(1 050 ℃)产热为 18 885 kJ/kgVS(干化前的污泥均进行深度脱水处理,使污泥含水率降至 60%,以减少热干化热量消耗)。

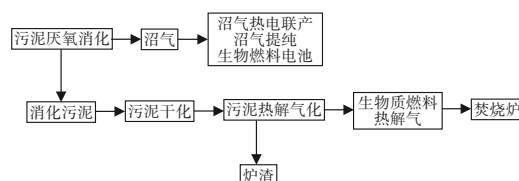


图1 污泥厌氧消化-热解气化耦合技术流程

Fig.1 Sludge anaerobic digestion and pyrolysis gasification coupling technological process

将全过程能量衡算(见图2、3)进行比较,污泥厌氧消化+干化+热解气化焚烧耦合技术的可剩余热量为 153 761~261 618 MJ,污泥干化+焚烧可剩余热量为 126 018~199 346 MJ。从能量平衡角度来看,污泥厌氧消化+热解气化焚烧耦合技术的剩余热量多出 22%~30%,具有明显的优势。类似的案例在德国汉堡、慕尼黑等大型污水厂均得到了验证<sup>[2]</sup>。因此,污泥厌氧消化和污泥焚烧并不矛盾,通过污泥厌氧消化可以实现污泥稳定化和大幅减量化,降低污泥后续处理量。厌氧消化是污泥处置过程中污泥稳定化、减量化和资源化的重要处理环节。

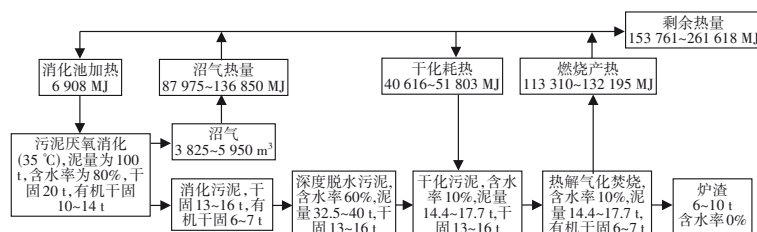


图2 100 t污泥厌氧消化+干化+热解气化焚烧工艺能量衡算

Fig.2 Energy balance calculation of 100 t sludge anaerobic digestion+drying+pyrolysis gasification incineration process

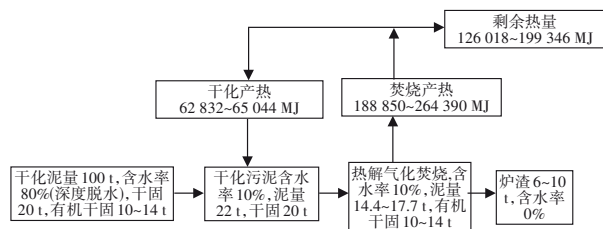


图3 100 t污泥干化+焚烧工艺能量衡算

Fig.3 Energy balance calculation of 100 t sludge drying+incineration process

## 2 郑州新区污水处理厂概况

郑州新区污水处理厂规划总处理规模为 100×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,位于中牟县姚家镇规划新城以北区域,占地面积 49×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>,集污水处理、再生水回用、污泥处理为一体,努力打造“零碳厂”。一期污水处理规模为 65×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,已于 2016 年建成投入运行,出水水质优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准。二期处理规模为 35×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,已于 2021 年开工建设,建成后将成为中原

地区首座百万吨级的污水处理厂,是河南省及淮河流域规模最大、功能最全的污水处理厂,也是全国第七座百万吨级的大型污水处理厂。

郑州新区污水处理厂是国内规模最大的采用污泥厌氧消化+热干化技术的污水处理厂,一期工程湿污泥消化处理规模1 000 t/d(污泥含水率80%),污泥干化规模300 t/d(污泥含水率80%),一期工程污泥消化+热干化余热回收系统已于2020年正式投产运行。

2017年底,在郑州新区厂内以研发为目的建成了100 t/d(污泥含水率80%)的污泥气化焚烧项目,通过理论研究+实际运行+技术改造的模式,该技术逐渐成熟和稳定。2019年底相关技术难点均被攻克,实现了连续稳定运行,为污泥热解气化技术积累了大量运行数据。在此基础上,新区二期项目1 000 t/d污泥焚烧项目上马,按照污泥厌氧消化与污泥热解气化焚烧耦合技术思路进行设计和建设。

### 3 一期污泥厌氧消化及干化工艺

一期工程采用6座圆柱形消化池,直径25 m,单座有效容积为12 700 m<sup>3</sup>,底部呈斗状。消化池设计停留时间为20 d。消化池设置了多层桨叶机械搅拌器,以保证消化池内新鲜污泥和消化污泥的充分混合,使池内各点温度、浓度均匀达到设计值,产生的沼气顺利排放,并防止顶部浮渣堆积、底部泥砂沉积。搅拌器可按顺时针和逆时针两个方向旋转变频控制。

沼气脱硫采用生物脱硫和干式脱硫相结合的方法,脱硫后沼气的硫化氢含量低于30 mg/m<sup>3</sup>,可作为污泥干化燃料供给导热油锅炉使用。干化尾气余热作为消化池加热热源,不足部分采用沼气热水锅炉补充。

污泥干化采用3台双轴桨叶式干化机,以高温导热油作为导热介质。干化进泥含水率80%,处理量300 t/d(污泥含水率80%),出泥含水率为20%~30%,最大蒸发量为236 t/d。

污泥厌氧消化、干化及余热回收工艺流程见图4。

在系统调试阶段和初始启动阶段,沼气产量不足时,热水锅炉使用天然气运行,供回水温度90/70℃,经板式换热器换热后,去泥水换热器供回水温度为62/47℃。沼气产量正常、干化机运行不正

常工况下,热水锅炉燃烧沼气运行,热水参数同上。干化机、消化池均正常运行时,消化加热用水来自干化机余热回收热水,干化机余热供回水热水温度为62/47℃,满足污泥加热温度要求。干化机正常运行、消化池不正常运行时,干化机余热经过封闭式冷却塔散热。封闭式冷却塔与干化机回水温度联动,当回水温度高于47℃时,冷却塔启动运行,满足干化机冷凝水温度要求。

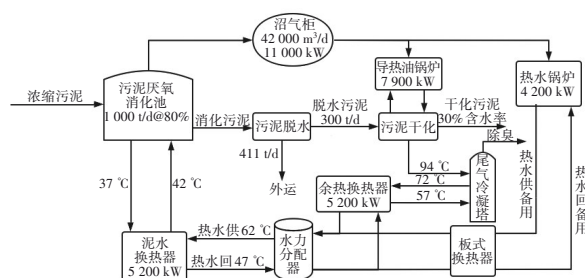


图4 污泥厌氧消化、污泥干化能量利用流程

Fig.4 Flow chart of energy utilization of sludge anaerobic digestion and sludge drying

一期工程采用水力分配器技术,热源侧热水和需热侧热水通过水力分配器中转,每一个热水回路都独立循环,供热侧和需热侧流量根据自身工艺需要运行,不足热量由热水锅炉进行补充,多余热量采用冷却塔散热。水力分配器的使用很好地解决了供热侧和需热侧的热量平衡,便于运行管理。

### 4 一期污泥厌氧消化运行分析

#### 4.1 沼气产量及VSS削减率

2021年厌氧消化污泥量、沼气产量的变化见图5。

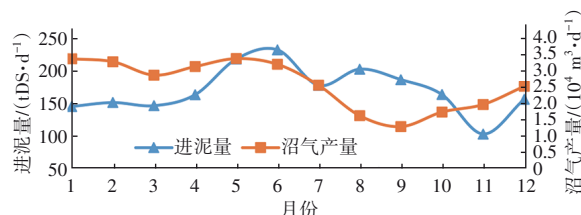


图5 2021年厌氧消化污泥量、沼气产量的变化

Fig.5 Changes of anaerobic digestion sludge volume and biogas production in 2021

厌氧消化全年进泥干质量61 121 t,日均进泥干质量167 t;全年沼气总产量9 092 804 m<sup>3</sup>,日均沼气产量24 912 m<sup>3</sup>;年均进泥有机分占52%。

#### 4.2 污泥消化耗热量和干化余热回收

2021年污泥消化耗热量、干化余热回收量见图



6。全年脱水污泥总量为 253 388 t(污泥含水率 80%),其中 54 309 t 进入干化系统。全年干化产泥量为 13 059 t,干化出泥含水率 15%。干化系统沼气体量为  $583 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。由图 6 可知,全年干化余热回收量均大于消化池加热所需热量。

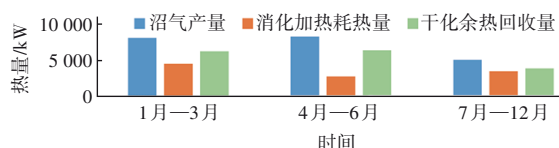


图 6 2021 年污泥消化、干化余热回收量

Fig.6 Waste heat recovery from sludge digestion and drying in 2021

通过余热回收可节约沼气约  $500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ,沼液中甲烷平均含量为 61%,甲烷燃烧热值取  $37\,960 \text{ kJ/m}^3$ ,则估算沼气年产热量为 115 TJ;一期污泥处理工程通过干化余热回收的年碳减排量约为:  $115 \div 90\% \times 56.1 = 7\,168 \text{ tCO}_2$ 。

## 5 100 t/d 污泥热解气化焚烧运行情况

100 t/d 污泥热解气化项目的污泥经深度脱水-热干化-造粒-气化焚烧后变成无机炉渣,气化产生的可燃气体在焚烧炉燃烧,产生的高温烟气经换热后进入干化机用于干燥污泥中的水分,烟气经除尘、脱硫、脱硝、除臭后排放。部分运行数据见表 1。

表 1 100 t/d 污泥气化焚烧项目生产数据

Tab.1 100 t/d(80% water content) sludge polysys gasification and incineration data

项 目	连续 31 d 数据
累计处理污泥量(污泥含水率 80%)/t	3 003
日均处理污泥量(污泥含水率 80%)/(t·d <sup>-1</sup> )	96.87
气化炉日均进泥量(污泥含水率为 18.01%)/(t·d <sup>-1</sup> )	23.63
进泥平均有机质/%	40.47
进泥平均热值/(kJ·kg <sup>-1</sup> DS)	8 173.2
气化平均产气量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	31 320
可燃气体平均热值(含少量焦油,在热风炉内一并燃烧)/(kJ·m <sup>-3</sup> )	3 834.6
炉渣热灼减率/%	1.59

### 5.1 污泥热解气化技术原理

污泥热解气化是一种绿色的污泥独立焚烧技术,原理是在高温、贫氧的条件下使污泥中的有机物产生裂解,形成利用价值较高的可燃气体产物及无机残渣的化学反应过程<sup>[3]</sup>,是传统的煤气化技术在污泥处理处置上的创新性应用,可有效遏制灰飞

和二噁英的产生,并能通过高温固化重金属,充分利用污泥既是“污染物”又是“资源”的双重属性,彻底实现污泥“减量化、稳定化、无害化、资源化”目的。

热解气化是以空气、水蒸气作为气化剂,在还原性气氛下将污泥中的有机成分转化为可燃性气体的过程,通过造粒系统将污泥成型后送入气化炉内,在气化剂的作用下将污泥转化为  $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$ 、烷类等可燃气体及无机残渣<sup>[4]</sup>。可燃气体通过燃烧系统转化为热能,可为干化系统供热,无机炉渣可用于制作水泥添加料、加气块、透水砖等建筑材料,最终排放的尾气经过处理实现达标排放。

污泥热解气化焚烧与其他形式的污泥焚烧(如流化床等)相比,具有诸多优势:

① 气化炉为固定床形式,无需流化,在气化炉内只需配送少量空气和蒸汽,在焚烧炉内只有燃烧配风,因此烟气产生量远远小于其他焚烧工艺。同理,烟气中的粉尘含量以及气化炉动力消耗也远远低于其他焚烧工艺。

② 热解系统二次污染小,烟气处理简便,温室气体排放远低于焚烧法,无二噁英排放,污泥重金属实现固化,环境安全性高<sup>[5]</sup>。

③ 炉渣成型,基本维持造粒后形态,其粉尘含量低,方便收集、存储、输送、运输和利用。

④ 环评排放标准根据项目地的实际情况,有多种选择可能,相应烟囱高度设计也有多种可能,所以对有限高要求的项目所在地的适用性也更强。

⑤ 烟气温度高,余热利用效率高。

### 5.2 二期污泥干化热解气化焚烧能量利用方案

二期工程污泥处理采用污泥热解气化焚烧工艺,设计污泥处理规模为 1 000 t/d(污泥含水率 80%)。污泥经深度脱水、热干化、造粒、气化焚烧后变成无机炉渣,气化产生的可燃气体在焚烧炉燃烧,产生的高温烟气进入余热锅炉,锅炉产出的饱和蒸汽用于污泥热干化,烟气经除尘、脱硫、脱硝后排放,余热蒸汽锅炉日产生饱和蒸汽约 570 t,气化炉日产炉渣约 100 t。

二期污泥采用干化+热解气化处理工艺,通过对污泥中能量的充分利用,在污泥热值一定的情况下,实现了系统的热平衡,无需添加外部能源,每天完成 500 t 含水率 60% 的污泥焚烧和残留 100 t 无机炉渣的过程。主要能量利用过程是污泥气化产生

的可燃气进入热风炉燃烧,产生 1 050~1 200 ℃左右的烟气,烟气经过余热锅炉产出 184 ℃的饱和蒸汽,作为干化机干化污泥的热介质使用。污泥气化焚烧工艺流程见图 7。

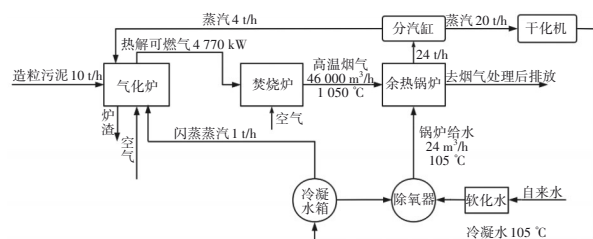


图 7 污泥气化焚烧工艺流程

Fig.7 Process flow diagram of sludge gasification and incineration

### 5.3 二期污泥能源综合管理方案

在二期工程设计阶段,针对各种极端热量工况,分析两期工程的工艺及设施情况,结合一期、二期工程的工艺和设施条件,将污泥厌氧消化和污泥热解气化焚烧工艺进行耦合,形成最终的能源综合利用方案:

① 污泥消化产生的沼气和热解气化产生的可燃气体作为全厂的优质能源,通过二期燃烧系统的热风炉燃烧,产生的高温烟气通过余热锅炉产出蒸汽,蒸汽作为全厂能量循环利用的主要介质;在污泥热值偏低时,一期沼气可通过焚烧炉给二期污泥干化+热解气化系统补充热量。

② 余热锅炉产出的蒸汽主要用来供给干化机,以蒸发掉污泥中的水分。

③ 干化机利用过的蒸汽产生的高温过热水,

通过闪蒸技术制造蒸汽,然后供给气化炉作为气化剂使用。

④ 二期干化机的尾气,通过冷凝换热器提取热量,产出热水供给消化系统加热消化污泥,以维持生产沼气所需的池内温度。

⑤ 系统多余的沼气通过沼气热电联产发电,日产绿电 49 200 kW·h/d。

一期消化工艺和二期干化+气化焚烧工艺的全厂热能利用系统见图 8。

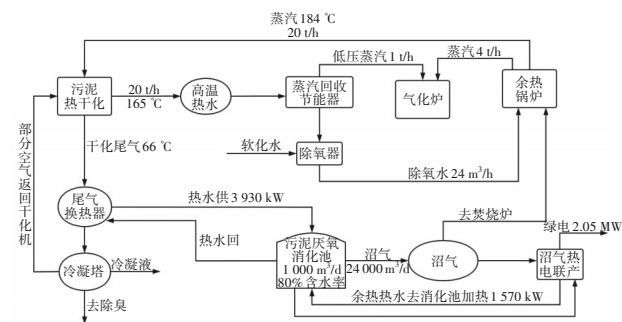


图 8 污泥消化和热解气化焚烧耦合热量利用平衡

Fig.8 Heat utilization balance diagram after coupling sludge digestion and pyrolysis gasification incineration

综上,全厂主要能量产出单元有:①消化池产生的沼气;②干化机尾气冷凝产生的热水;③干化机蒸汽介质产生的高温热水以及余热锅炉等。主要用热单元有干化机、气化炉、消化池(加热)。

2021 年平均沼气产量 24 000 m³/d;沼气平均热值为 22 680 kJ/m³;沼气发电机发电效率 38%,余热回收效率 25%,全厂一、二期污泥处理系统热量供需数据汇总见表 2。

表 2 一、二期 1 000 t/d 污泥耦合处理后全厂热平衡

Tab.2 Heat balance of the entire plant after coupling treatment of 1 000 t/d sludge in phase I and phase II

项目	需热侧			供热侧					
	干化需要蒸汽量/(t·h <sup>-1</sup> )	气化需要蒸汽量/(t·h <sup>-1</sup> )	消化池加热需热量/kW	余热回收蒸汽量/(t·h <sup>-1</sup> )	热电联产回收热水热量/kW	气化焚烧余热锅炉产蒸汽量/(t·h <sup>-1</sup> )	消化池产沼气量/(m³·d <sup>-1</sup> )	热电联产发电量/MW	干化尾气余热回收热量/kW
数值	20	5	5 500	1	1 570	24	24 000	2.05	3 930

从表 2 可以看出,污泥处理二期工程建成后,通过设置余热锅炉对气化焚烧工艺产生的烟气进行余热回收,并且设置换热器对干化尾气冷凝热量进行回收后,全厂的能量产出盈余,可产生绿电 49 200 kW·h/d。在夏季产泥量偏小的不利工况下,沼气产量下降,沼气优先去热风炉补燃,产生污泥

干化系统需要的蒸汽,然后进行热电联产。经测算,仍有 50% 约 12 000 m³/d 的沼气用来发电,可产生绿电 24 600 kW·h/d。

本项目对全厂热量消耗和产出单元进行了梳理,通过一定的技术手段将工艺流程中的废热回收利用,变废为宝,符合能源再循环利用的环保理念,

并且可以带来一定的经济效益。

## 6 耦合技术在污泥处理项目中的优势

① 污泥先进行厌氧消化后,脱水污泥含固率高,减少了污泥干化的耗热量。

② 污泥干化气化焚烧余热用于污泥厌氧消化池加热,合理利用了系统产生的大量低品位热源。

③ 污泥厌氧消化系统对生化污泥和初沉污泥的排放有较大的调峰作用,也就意味着对全厂污泥的有机分有很好的调节作用,有利于保障污泥焚烧设施的稳定性。

④ 污泥厌氧消化与气化焚烧耦合后,最终产物为无害化炉渣,炉渣的资源化利用可以解决污泥的最终出路问题。

⑤ 污泥厌氧消化可以协同消化外来餐厨有机质,让污水处理厂变成能源中心成为可能,最大化发挥已建成设施的经济效益、环保效益和社会效益,并且可作为保障污泥焚烧热量供应的便捷、稳定手段。

⑥ 污泥厌氧消化系统产生的多余沼气作为优质能源,沼气热电联产可产出绿色电力,减少了整个系统外来电力用量,减少了碳排放。

## 7 结论

郑州新区污水处理厂将厌氧消化和气化焚烧耦合后,每日可处理污泥 1 000 t,产生无害化炉渣约 100 t,产生绿色电力约 2 MW,实现了污泥处理减量化、无害化、稳定化、资源化的目标。污泥厌氧消化和污泥热解气化焚烧耦合技术是实现污泥资源化的重要创新,厌氧消化产生了生物质燃料(沼气),再结合沼气发电和余热回收技术使得污泥资源得到最大化提取和利用,同时使污水处理厂变为能源资源中心成为可能。

污泥热值以及进入污泥干化气化焚烧系统的污泥含水率会显著影响系统热平衡,在较低污泥热值的条件下可通过降低进入系统的污泥含水率实现系统的热平衡,并可通过从厌氧消化系统所产沼气获得更多热能和电能,来稳定和保障热解气化焚烧系统的稳定,降低运行费用。

污泥厌氧消化和热解气化焚烧耦合技术在“双碳”时代具有一定的推广价值。

## 参考文献:

- [1] 陈冠益, 颜蓓蓓, 程占军. 有机废物热解气化技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2022: 260.  
CHEN Guanyi, YAN Beibei, CHENG Zhanjun. Pyrolysis-Gasification of the Organic Wastes [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2022: 260 (in Chinese).
- [2] 戴晓虎. 城镇污水处理厂污泥生物处理及稳定化 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2018: 118-120.  
DAI Xiaohu. Sludge Biological Treatment and Stabilization of Municipal Wastewater Treatment Plant [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2018: 118-120 (in Chinese).
- [3] 田禹, 左薇, 陈琳, 等. 城市污水污泥过程减量及资源化利用理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 257-258.  
TIAN Yu, ZUO Wei, CHEN Lin, et al. Theory and Technology of Reduction and Resource Utilization of Urban Sewage Sludge Process [M]. Beijing: Science Press, 2012: 257-258 (in Chinese).
- [4] 严建华. 污泥无害化能源化热处置技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2016: 226-227.  
YAN Jianhua. Harmless, Energy Conversion and Heat Treatment Technology for Sludge [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016: 226-227 (in Chinese).
- [5] 孔祥娟, 戴晓虎, 张辰. 城镇污水处理厂污泥处理处置技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 132.  
KONG Xiangjuan, DAI Xiaohu, ZHANG Chen. Sludge Treatment and Disposal Technology for Urban Wastewater Treatment Plant [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015: 132 (in Chinese).

作者简介: 李升(1983-), 男, 河南南阳人, 本科学历, 工程师, 项目经理, 主要从事污水污泥处理处置设施的建设及运营工作。

E-mail: 251361933@qq.com

收稿日期: 2023-04-22

修回日期: 2023-05-31

(编辑: 衣春敏)