

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.22.015

# 城市污水污泥与生物质共气化资源化利用实证研究

任少辉<sup>1,2</sup>, 姚学同<sup>3</sup>, 余桥<sup>2</sup>, 张立民<sup>2</sup>, 向家涛<sup>1</sup>, 林立<sup>2</sup>,  
张世红<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学能源与动力工程学院 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;  
2. 湖北加德科技股份有限公司, 湖北 武汉 430000; 3. 河南城乡规划设计研究总院股份  
有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 介绍了钟祥市污泥热解气化项目(规模为120 t/d)双流闪蒸干化耦合流化床热解气化技术的技术原理、工艺流程、污泥处置效果、设计及运行管理经验等。该工艺分为湿污泥贮存系统、污泥干燥系统、热解气化系统、热能利用系统、尾气处理系统和灰渣系统等6大系统。其中核心设备为双流闪蒸干燥机和流化床气化炉。含水率为30%的干污泥和生物质在流化床气化炉内气化产生可燃气,可燃气燃烧产生超850℃高温烟气,经配风降温至600℃作为干化热源用于80%含水率湿污泥干化,可使污泥减量超90%,气化灰渣可作为建材利用。系统设计时充分考虑了关键设备选型、物料输送、负荷调节等因素,具有良好的调整适应能力,可为污泥处置提供新思路 and 示范案例。

**关键词:** 城市污水污泥; 生物质; 闪蒸干化; 热解气化; 资源化利用

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)22-0090-07

## Demonstration Study on Co-gasification of Sewage Sludge and Biomass for Reclamation Utilization

REN Shao-hui<sup>1,2</sup>, YAO Xue-tong<sup>3</sup>, YU Qiao<sup>2</sup>, ZHANG Li-min<sup>2</sup>, XIANG Jia-tao<sup>1</sup>,  
LIN Li<sup>2</sup>, ZHANG Shi-hong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Combustion, School of Energy and Power Engineering,  
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Green  
Development Technology Co. Ltd., Wuhan 430000, China; 3. Henan Urban and Rural Planning  
Design Research Institute Co. Ltd., Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** The technical principle, process flow, sludge disposal effect, design and operation management of the coupled fluidized bed pyrolysis gasification technology of the sludge pyrolysis gasification project in Zhongxiang (120 t/d) are introduced. The process is divided into six systems including wet sludge storage system, sludge drying system, pyrolysis and gasification system, heat energy utilization system, tail gas treatment system, ash and slag system. The core equipment is a double-flow flash dryer and a fluidized bed gasifier. Dry sludge with 30% moisture content and biomass are gasified in the fluidized bed gasifier to produce gas, the flue gas generated at over 850℃ high temperature by gas combustion is cooled to 600℃ by distributing air as a drying heat source to dry the wet sludge with 80%

基金项目: 武汉市成果转化项目(2019030703011534); 武汉市企业技术创新项目(2020020602012149)

通信作者: 张世红 E-mail: shzhang@hust.edu.cn

moisture content, which can reduce the sludge by more than 90%, besides gasification ash can be used as building materials. The design of the system fully considers the selection of key equipment, material transportation, load adjustment capacity, etc., and has good adjustment and adaptation ability. It can provide a new idea and demonstration case for sludge disposal.

**Key words:** sewage sludge; biomass; flash drying; pyrolysis gasification; reclamation utilization

到2025年,我国污泥产量预计超过 $0.9 \times 10^8 \text{ t/a}$ <sup>[1]</sup>。有数据表明,目前我国有超70%污泥未得到妥善处理,污泥任意堆放不仅占用大量土地资源,其造成的污染和再污染问题已日益严重,并引发社会的广泛关注。

污泥中包含一系列有机污染物(苯、氯酚、多氯联苯等)、病原微生物、重金属(Cu、Cd、Cr等)、盐分及氮、磷等养分,若处置不当,这些有害物质可能以其他形式转移到环境中<sup>[2]</sup>,可能造成水体与土壤中有机污染物与重金属超标、病原体泛滥及水体富营养化等严重生态环境污染<sup>[3-5]</sup>。研发适合我国污泥特性和符合“美丽中国”建设需求的先进污泥处置技术刻不容缓<sup>[6]</sup>。

生物质是自然界唯一的含碳且可再生资源,具备量大、易得、燃烧产物对环境友好等一系列特点<sup>[7]</sup>。氢能是替代能源中最清洁的能源,产生的水是最唯一的燃烧产物,从而能够真正实现污染物的“零排放”<sup>[8-10]</sup>。Baykara等<sup>[9]</sup>从环境影响的角度进行分析,认为生物质的碳中性特征使生物质气化制氢变得非常理想。Dincer等<sup>[10]</sup>评估了使用可再生和不可再生资源的19种制氢方法,结果显示:在能源效率、烟效率及生产成本方面,生物质气化具有显著优势。

污泥也是一种可再生资源,在某种程度上可以通过热解气化的方式回收具有一定品质的燃料,然而受限于污泥挥发分含量低、灰分和硫含量高、固定碳反应性较差等特点,污泥热解气化产生高附加值产物有待深入研究;同时,由于湿污泥干化过程中需消耗大量热能,污泥热解气化能耗大、成本高,也是制约污泥高质资源化利用的瓶颈。综合湿污泥含水量大的特点,采用秸秆、木片等农林生物质废弃物作调节剂,充分利用其含水率低、挥发分含量高、碳含量高的优点进行污泥+生物质共气化,不仅能控制物料含水率,降低能耗,还可以改善污泥

气化特性,提升产气量、产气率和产气热值,进而实现高质气化效果。

以湖北省钟祥市污泥气化工程项目为例,全面介绍了污泥与生物质共气化技术的原理、工艺流程、运行效果及相关管理经验,可为生活污泥处置和高质资源化利用提供新思路、新技术和示范案例。

## 1 项目概况

该污泥气化项目设计规模为处置80%含水率污水污泥120 t/d,位于湖北省钟祥市南湖经济开发区第一污水处理厂内。生产区占地约2 000 m<sup>2</sup>,主要负责处置钟祥市第一污水处理厂、第二污水处理厂以及12个乡镇污水厂产生的污泥。钟祥市第一污水厂设计处理规模为 $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,钟祥市第二污水厂设计处理规模为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,其余乡镇污水厂设计处理规模总计约 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,产生污泥(含水率为80%)35~45 t/d,其中钟祥市第一污水处理厂污泥为30~35 t/d,占比约80%。该项目采用湖北加德科技股份有限公司自主研发的双流闪蒸干化耦合流化床热解气化技术,采用EPCO模式,建设单位为钟祥城市建设投资公司,工程总投资为2 221万元。

## 2 闪蒸干化耦合流化床热解气化工艺

### 2.1 工艺原理及流程

该工艺对旋风干燥技术进行改进,形成独特的双流闪蒸干燥技术,并针对城市污泥等有机固废干燥后形成颗粒可燃物与生物质颗粒,利用流化床协同热解气化二次燃烧,将干化和气化两个相对独立的系统强耦合,形成独具特色的污泥闪蒸干燥耦合热解气化技术路线。该技术高效利用干燥后污泥颗粒与生物质颗粒在流化床中热解气化产生的可燃气二次燃烧后产生的余热烟气作为双流闪蒸干燥装置的热源,干化污泥经输送装置进入流化床耦合生物质共气化产生可燃气,整个系统实现能量的闭式循环,气化终产物灰渣可用作建材,污泥得到

减量化、无害化、资源化和稳定化处置。

污泥闪蒸干化耦合热解气化工艺的核心关键是双流闪蒸干燥技术和污泥流化床热解气化技术,其中双流闪蒸干燥技术通过一体化双流闪蒸干燥机,利用污泥热解气化产生的可燃气燃烧后的余热烟气将含水率80%的污泥雾化成颗粒,污泥和热烟气接触面积扩大上千倍,含水率80%的湿污泥在干燥机中3~6 s内瞬间完成热交换,实现湿污泥水分蒸发。污泥流化床热解气化技术利用空气和水蒸气作为气化剂,在缺氧条件下,以干燥后污泥和生物质颗粒作为原料,通过自燃放热、吸热裂解和气化等化学反应实现能量迁移,将能量转化后保留在可燃气中,可燃气含有氢气、一氧化碳和甲烷等高热值气体,可燃气实现二次燃烧释放热量作为污泥干燥热源,同时,可燃气也可作为绿色能源。

工艺流程如图1所示。

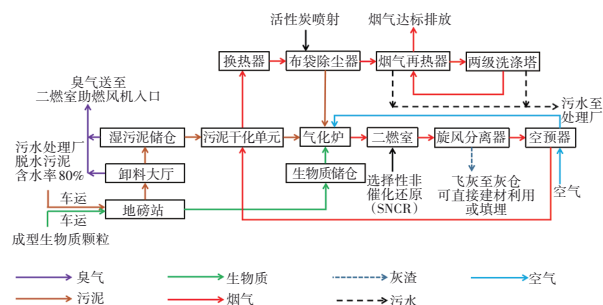


图1 污泥闪蒸干化耦合热解气化工工艺流程

Fig.1 Flow chart of sludge flash drying coupled with pyrolysis and gasification process

## 2.2 各子系统设计

污泥闪蒸干化耦合热解气化工艺分为6个子系统,包括湿污泥贮存系统、污泥干燥系统、热解气化系统、热能利用系统、尾气处理系统和灰渣系统。其中核心设备为双流闪蒸干燥机和流化床气化炉。

### ① 湿污泥贮存系统

含水率为80%的湿污泥通过污泥专用运输车经地磅称量后卸入湿污泥储仓,经螺杆泵输送至干燥机前湿污泥中转仓。中转仓内污泥干燥给料螺旋安装有计量装置,整个湿污泥转运过程密封运输,系统维持负压,避免臭气外逸。

### ② 污泥干燥系统

中转仓内含水率为80%的湿污泥经给料螺旋输送机定量输送至干燥机;湿污泥在硫化机内经尾部再循环烟气高速气流破碎、流化后,由热风炉中

可燃气燃烧产生的热烟气作为热源进行干燥,双流闪蒸干燥机可在3~6 s内将污泥由含水率80%左右干燥至30%左右;干化后的污泥颗粒粒径约1 mm,由烟气气力输送后经旋风分离器和布袋除尘器进行粗细干污泥颗粒与烟气的气固分离,分离出来的干污泥颗粒经输送装置送入气化炉,烟气进入环保尾气处理系统。

### ③ 热解气化系统

干污泥颗粒经刮板输送装置送至干污泥炉前料仓,与生物质成型燃料经给料螺旋送入流化床气化炉。在流化床气化炉中低氧还原性氛围进行热解气化反应,气化剂为空气,在高温条件下干污泥和生物质发生干燥、热解、氧化、还原、重整反应,热解产生的焦油进一步热裂化或催化裂化,转化为小分子碳氢化合物,最终得到可燃气,可燃气主要成分为CO、H<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>等。系统产生的可燃气进入热风炉燃烧。

### ④ 热能利用系统

可燃气体在热风炉内进行完全燃烧,产生850~1 000 ℃高温烟气,温度控制既要满足二噁英的控制条件,又要考虑灰熔点,避免结焦。高温烟气经配风降温后进入干燥机用于80%含水率湿污泥的干燥,作为可燃气助燃剂的空气经空预器加热,该方式可有效降低排烟温度,提高整个系统的能源利用率。

### ⑤ 尾气处理系统

经气固分离的烟气,由空预器回收部分热量,用作气化系统气化剂和热能利用系统助燃剂,烟气进入喷淋洗涤塔去除氨气、二次除尘、急冷至50 ℃以下,送入生物除臭系统进行除臭处理达标后,经15 m高烟囱排入大气。按照环评批复,该项目厂界恶臭污染物NH<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>S排放浓度应达到《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—1993)相关限值,粉尘、SO<sub>2</sub>排放浓度应达到《工业炉窑大气污染物排放标准》(GB 9078—1996)中二级限值要求,NO<sub>x</sub>排放浓度应达到《锅炉大气污染物排放标准》(GB 13271—2014)中燃气锅炉排放标准。

### ⑥ 灰渣系统

气化飞灰由可燃气、烟气携带经旋风分离器分离,飞灰经冷却螺旋冷却至150 ℃以下后,经仓泵气力输灰系统送入灰渣仓,然后由专用车辆运出厂,气化灰渣可用于土壤改良和作为建材使用。

3 运行效果

该项目于2018年8月建成并进行调试、试运行,2020年9月完成环保验收,2020年10月开始进入商运期,截至目前已稳定持续运营超过3年。实际污泥处置量平均为70~80 t/d,污泥减量化程度达90%以上,灰渣供周边建材厂使用。该项目废水水质满足《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)的三级标准及钟祥市第一污水处理厂污水接管标准后,通过污水管网排放至钟祥市第一污水处理厂处理。厂界噪声满足《工业企业厂界噪声排放标准》(GB 12348—2008)中3类标准限值。一般工业固废严格按照《一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准》(GB 18599—2020)有关规定,配套建设规范的物料堆放场,污泥气化后产生的灰渣用于混凝土掺和料、土壤改造,以及水泥原料、水泥混合材料、高级填料等资源化利用途径。废活性炭属于危险废物,按《危险废物贮存污染控制标准》(GB 18597—2023)的有关规定建设危废暂存间,按其规定进行管理,并委托有相应危险废物处置资质的单位处理。

3.1 污泥处置效果

原泥泥质分析见表1。

表1 原泥泥质测试数据

Tab.1 Test data of raw sludge composition

检测项目	检测数据	《城镇污水处理厂污泥处置 单独焚烧用泥质》(GB/T 24602—2009)
无机氟化物/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.490	≤100
砷(以总砷计)/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.035 5	≤5
汞(以总汞计)/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.000 09	≤0.1
锌(以总锌计)/(mg·L <sup>-1</sup> )	ND	≤100
铜(以总铜计)/(mg·L <sup>-1</sup> )	ND	≤100
铅(以总铅计)/(mg·L <sup>-1</sup> )	ND	≤5
镍(以总镍计)/(mg·L <sup>-1</sup> )	ND	≤5
总铬/(mg·L <sup>-1</sup> )	ND	≤15
镉(以总镉计)/(mg·L <sup>-1</sup> )	ND	≤1
铍(以总铍计)/(mg·L <sup>-1</sup> )	ND	≤0.02
钡(以总钡计)/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.009	≤100
六价铬/(mg·L <sup>-1</sup> )	ND	≤5
氰化物/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.071 2	≤5
烷基汞/	甲基汞	不得检出
(mg·L <sup>-1</sup> )	乙基汞	
含水性/%	84.6	<80
pH	6.89	5~10
有机物含量/%	41.0	>50

由表1可知,污泥含水率为84.6%,有机质含量为41.0%,不满足《城镇污水处理厂污泥处置 单独焚烧用泥质》(GB/T 24602—2009)标准要求,因此未采用污泥单独焚烧工艺。该项目采用双流闪蒸干化耦合流化床热解气化工艺,含水率约80%的湿污泥经双流闪蒸干燥机3~6 s内瞬间被干燥至含水率30%~40%,生物质成型颗粒和干污泥从不同的进料口经螺旋输送至气化炉(流化床),二者在炉内共气化产生可燃气,可燃气燃烧超850℃经配风降温至600℃左右进入干燥机作干燥热源,热解气化的最终产物(灰渣)质量不超过最初污泥质量的10%,减量化程度高达90%以上,灰渣符合《城镇污水处理厂污泥处置 制砖用泥质》(GB/T 25031—2010)中各项指标要求。

热解气化后灰渣检测见表2。由表2可知,污泥减量化、无害化、资源化利用得以实现,真正达到“以废治废,变废为宝”目的。

表2 热解气化后灰渣检测

Tab.2 Detection of ash residue after pyrolysis and gasification

检测项目	检测数据	《城镇污水处理厂污泥处置 制砖用泥质》(GB 25031—2010)
含水率/%	0.50	≤40
pH	9.66	5~10
总砷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	35.0	<75
总汞/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.044	<5
总锌/(mg·kg <sup>-1</sup> )	898	<4 000
总铜/(mg·kg <sup>-1</sup> )	178	<1 500
总铅/(mg·kg <sup>-1</sup> )	84.8	<300
总镍/(mg·kg <sup>-1</sup> )	71.2	<200
总铬/(mg·kg <sup>-1</sup> )	158	<1 000
总镉/(mg·kg <sup>-1</sup> )	3.42	<20
矿物油/(mg·kg <sup>-1</sup> )	3.57	<3 000
挥发酚/(mg·kg <sup>-1</sup> )	ND	<40
总氰化物/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.08	<10

图2为不同阶段污泥形态。



a. 含水率为80%污泥      b. 干化后污泥      c. 气化灰渣

图2 不同阶段污泥形态

Fig.2 Sludge morphology at different stages

### 3.2 尾气处理效果

在生产过程中严格要求、积极落实各项大气污染防治措施。生产线设置在封闭的厂房内,加强传输料口的衔接、物料传输带应封闭,认真落实污泥在装卸料、贮存和烘干过程及生物质堆场扬尘等无组织排放废气措施。厂界恶臭污染物( $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{NH}_3$ )外排应达到《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—1993)表 1 的二级标准;生产装置尾气经 1 套布袋除尘-喷淋洗涤-生物除臭-活性炭装置处理后,由 15 m 高烟囱排放。 $\text{NH}_3$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  排放浓度应达到《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—1993)相关限值,粉尘、 $\text{SO}_2$  排放浓度应达到《工业炉窑大气污染物排放标准》(GB 9078—1996)的二级限值要求, $\text{NO}_x$  排放浓度达到《锅炉大气污染物排放标准》(GB 13271—2014)的燃气锅炉排放标准。该项目有组织排放检测数据见表 3。

表 3 有组织排放废气检测结果

Tab.3 Test results of organized exhaust emission

采样 点位	采样 日期	检测 项目	采样 频次	检测结果			排放浓 度标准 限值/ ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
				排放浓 度/( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	折算浓 度/( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	排放速 率/( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ )	
烟囱, 排气筒高 15 m	2020 年 7 月 17 日	颗粒 物	第 1 次	18.8	51.6	0.33	200
			第 2 次	19.5	57.4	0.34	
			第 3 次	12.7	43.6	0.21	
		二氧化 硫	第 1 次	ND			850
			第 2 次	4	12	0.069	
			第 3 次	6	21	0.10	
		氮氧化 物	第 1 次	35	93	0.61	200
			第 2 次	32	91	0.55	
			第 3 次	36	120	0.61	
	2020 年 7 月 18 日	颗粒 物	第 1 次	12.3	47.5	0.21	200
			第 2 次	12.9	55.0	0.23	
			第 3 次	11.3	48.1	0.20	
		二氧化 硫	第 1 次	6	23	0.10	850
			第 2 次	7	30	0.13	
			第 3 次	10	43	0.18	
		氮氧化 物	第 1 次	32	120	0.54	200
			第 2 次	32	132	0.58	
			第 3 次	38	157	0.67	

无组织排放检测数据见表 4。由表 3、4 可知,废气排放浓度均达到相关排放标准要求。

表 4 无组织排放废气检测结果

Tab.4 Test results of unorganized exhaust emission

采样点位	检测 项目	检测结果				标准 限值
		第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	
1#项目厂界上 风向参照点	氨	0.04	0.05	0.04	0.04	1.5
	$\text{H}_2\text{S}$	0.007	0.008	0.007	0.008	0.06
2#项目厂界下 风向监测点	氨	0.10	0.11	0.11	0.12	1.5
	$\text{H}_2\text{S}$	0.009	0.010	0.010	0.009	0.06
3#项目厂界下 风向监测点	氨	0.13	0.13	0.11	0.12	1.5
	$\text{H}_2\text{S}$	0.010	0.010	0.011	0.012	0.06
4#项目厂界下 风向监测点	氨	0.11	0.10	0.12	0.12	1.5
	$\text{H}_2\text{S}$	0.010	0.011	0.011	0.009	0.06
1#项目厂界上 风向参照点	氨	0.05	0.05	0.04	0.05	1.5
	$\text{H}_2\text{S}$	0.007	0.008	0.008	0.008	0.06
2#项目厂界下 风向监测点	氨	0.11	0.09	0.10	0.10	1.5
	$\text{H}_2\text{S}$	0.010	0.010	0.012	0.010	0.06
3#项目厂界下 风向监测点	氨	0.12	0.12	0.11	0.11	1.5
	$\text{H}_2\text{S}$	0.010	0.009	0.011	0.012	0.06
4#项目厂界下 风向监测点	氨	0.10	0.10	0.11	0.10	1.5
	$\text{H}_2\text{S}$	0.010	0.011	0.010	0.010	0.06

## 4 项目总结

### 4.1 经济性分析

该项目直接运行费用包括生物质成型燃料、水、电、人工、药剂等,其中生物质费用占比高达 50% 以上。生物质的添加量受污泥有机质含量、含水率、热值的影响较大,约为 100~150 kg/t 湿污泥。生物质采用农林废弃物作成型燃料,其售价约 800 元/t,污泥处置生物质燃料费用约 80~120 元/t;电耗约 60  $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$  湿污泥,电价为 0.75 元/( $\text{kW}\cdot\text{h}$ ),污泥处置电费约 45 元/t;由于该项目位于钟祥市第一污水处理厂区内,设备冷却及洗涤用水采用中水,可不计水费;总直接运行费用为 180~200 元/t,与常州市污泥焚烧中心一期工程 260~290 元/t<sup>[11]</sup>和鄂州污泥碳化项目 213~247 元/t<sup>[12]</sup>相比,更有经济优势。

### 4.2 运行管理

该项目为湖北加德科技股份有限公司自主研发设计实施的国内首个污泥热解气化项目。在调试和运行过程中积累了丰富的经验,并不断优化改造和调整,可为后续污泥热解气化项目提供参考。

#### ① 气化炉设计

系统两大核心工艺是热解气化和污泥干化,干化是系统最大的能量消耗部分,热解气化是整个系统的驱动力,因此气化炉的设计至关重要。在气化

炉设计过程中最关键的是流化风的设计和污泥与生物质入料口的设计,既要满足良好的流化需要,又要避免气化分层炉内温度分布不均匀。

### ② 系统调节能力设计

由于污泥含水率和热值以及污泥量波动较大,为保证多介质气化系统运行平稳,要求系统具备较大处置能力调整区间,抗逆性强,外界变化系统可快速响应调节,具备较强的自适应及调整能力。为保证系统物料平衡和热力烟风平衡,该项目风机及给料机均采用变频控制,可满足60%~110%设计处置量(120 t/d)的较大调整区间。

### ③ 物料输送

系统运行过程中涉及含水率80%污泥输送、30%含水率干污泥长距离输送、30%干污泥入炉输送、生物质成型燃料输送等。对于含水率80%湿污泥输送,建议采用螺杆泵变频连续运行。含水率80%湿污泥具有一定的流动性,可长距离输送,严禁空转损坏螺杆泵,长期停用管道内污泥易板结,再次启动时应低频点动。对于含水率30%干污泥长距离输送,建议采用刮板输送,可有效避免污泥黏壁,运行过程中要做好逻辑连锁保护,后段刮板比前段刮板输送量大,这样可以避免污泥堵料,后段跳闸而前段刮板联跳,启动阶段先开后段刮板,前段刮板才可以启动。对于干污泥和生物质入炉,建议采用无轴料塞螺旋,既可避免有轴螺旋干污泥黏附轴上导致出力减小,又可以避免炉内烟气反串。

### ④ 节能减排

生物质耗量是系统最大成本,运行过程中严格按照运行操作规程控制污泥干化程度,定期检测原泥含水率,及时反馈数据给污水处理厂,减少生物质耗量。系统运行过程中严格控制流化床的床压和布袋进口温度,在流化良好前提下尽量维持低床压运行,减少流化风机电耗,严格控制布袋进口温度为180~220℃,避免排烟温度过高造成热量损失。严格控制环保药剂使用量,增加在线投加药剂和检测设备,提高设备自动化水平和可靠性。

### ⑤ 人员管理

该项目配备运行人员12人,采用“四班三倒”模式,每班组3人,其中2人负责运行监护操作,另1人负责设备巡检。运行人员严格执行“两票三制”,杜绝违章指挥和违章作业,定期组织相关培训考核,

持证上岗。

### ⑥ 标准规范

目前,国内污泥热解气化技术缺乏统一的标准和规范,仅安徽等地出台了地方标准,导致市场无序竞争,执法单位无统一标准可依。关于污泥热解气化尾气排放,国内目前没有统一标准,可供参考的有《工业炉窑大气污染物排放标准》(GB 9078—1996)、《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996)、《锅炉大气污染物排放标准》(GB 13271—2014)。建议尽快出台污泥热解气化国家和行业技术标准等指导性文件,助推热解气化技术良性发展。

## 4.3 环保分析

采用热解气化工艺,流化床气化炉内空气仅为完全焚烧理论空气量的30%,气化炉内气流速度低,经旋风分离器和布袋除尘后尾气中颗粒物含量低。灰炉内为还原性氛围,反应温度控制在700~750℃,热力型氮氧化物几乎不产生,即使热解过程中产生部分SO<sub>x</sub>和NO<sub>x</sub>也会被气化过程中产生的CO、H<sub>2</sub>还原而无害化。二燃室内采用分级燃烧和烟气再循环等低氮燃烧技术,在二燃室设置SNCR系统控制氮氧化物的生成。气化工况处于缺氧的还原性气氛状态,无二噁英前体物生成,从根本上抑制了二噁英产生。二燃室内主反应区温度为850~950℃,停留时间>3 s,可进一步燃烧去除可燃气体中的二噁英及VOCs气体。NH<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>S主要来源于污泥干化过程,污泥干化过程中应严格控制含氧量不超过3%,干化温度约600℃,反应时间极短(3~6 s),可极大降低湿污泥干化过程中与氧发生反应生成NH<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>S的可能性。气化相较于焚烧烟气量小,环保设备投入小,极大降低了投资和运行成本。采用生物质与污泥共热解气化,有助于解决农村生物质禁烧难、出路难的问题,增加农民收入,改善农村居民生产、生活条件和居住环境。该污泥处置技术将城镇污泥高效清洁处置与农村生物质固废处理有机结合,实现固废资源化循环利用,从而构筑生态安全屏障,改善人居环境,助推美丽中国建设。

## 5 结论

钟祥市污泥热解气化项目采用污泥闪蒸干化耦合流化床热解气化技术,实现了污泥处置及资源化利用的实证示范。该技术对氮氧化物、二噁英的

生成均有较好的抑制作用,污泥减量化程度可达90%以上。气化产物灰渣满足污泥制砖标准可用作建材等,真正实现了“以废治废,变废为宝”,运行成本低,经济效益好,满足环保排放要求,为城市污水污泥处置高质资源化利用提供了新技术路径和案例示范。该系统设计时应充分考虑物料输送、设备选型、负荷调节等因素,运行过程中应加强人员管理,以达到预期效果。

### 参考文献:

- [1] 戴晓虎. 我国污泥处理处置现状及发展趋势[J]. 科学, 2020, 72(6): 30-34.  
DAI Xiaohu. Current situation and development trend of sludge treatment and disposal in China [J]. Science, 2020, 72(6): 30-34 (in Chinese).
- [2] 熊思江. 污水污泥热解制取富氢燃气实验及机理研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2010.  
XIONG Sijiang. Experiment and Mechanism Study on Hydrogen-rich Gas Production by Sewage Sludge Pyrolysis [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010 (in Chinese).
- [3] ÁLVAREZ E A, MOCHÓN M C, SÁNCHEZ J, *et al.* Heavy metal extractable forms in sludge from wastewater treatment plants [J]. Chemosphere, 2002, 47 (7): 765-775.
- [4] FUENTES A, LLORENS M, SAEZ J, *et al.* Phytotoxicity and heavy metals speciation of stabilised sewage sludges [J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, 108(3): 161-169.
- [5] WERLE S, WILK R K. A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: the polish perspective [J]. Renewable Energy, 2010, 35 (9): 1914-1919.
- [6] 薛重华, 孔祥娟, 王胜, 等. 我国城镇污泥处理处置产业化现状、发展及激励政策需求[J]. 净水技术, 2018, 37(12): 33-39.  
XUE Zhonghua, KONG Xiangjuan, WANG Sheng, *et al.* Industrialization status, development analysis and incentive policy demands of municipal sludge treatment and disposal industry in China [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(12): 33-39 (in Chinese).
- [7] 邹俊, 陈应泉, 杨海平, 等. 生物质高值化利用研究综述[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50 (7): 79-88.  
ZOU Jun, CHEN Yingquan, YANG Haiping, *et al.* Review on high value utilization of biomass [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50 (7): 79-88 (in Chinese).
- [8] ACAR C, DINCER I. Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(1): 1-12.
- [9] BAYKARA, SEMA Z. Hydrogen: a brief overview on its sources, production and environmental impact [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43 (23): 10605-10614.
- [10] DINCER I, ACAR C. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40 (34): 11094-11111.
- [11] 卢义程. 常州市污泥焚烧中心一期工程设计及运行[J]. 中国给水排水, 2022, 38(10): 63-69.  
LU Yicheng. Design and operation of Changzhou sludge incineration center phase I project [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(10): 63-69 (in Chinese).
- [12] 朱羽廷, 余斌, 何婷. 污水厂污泥连续高速碳化及资源化全链条实证研究[J]. 中国给水排水, 2023, 39 (8): 127-132.  
ZHU Yuting, YU Bin, HE Ting. Full chain empirical study on continuous high-speed carbonization and recycling of sewage sludge [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(8): 127-132 (in Chinese).

**作者简介:**任少辉(1988-),男,湖北宜城人,博士研究生,高级工程师,高级经济师,一级建造师(市政),主要研究方向为城乡有机固废处理处置及资源化利用。

**E-mail:**renshaohui@163.com

**收稿日期:**2023-10-27

**修回日期:**2023-12-12

(编辑:衣春敏)