

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.24.007

城镇污水厂污泥脱水干化焚烧工艺全流程碳排放研究

卢骏营

(上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

摘要: 以南方某城市污水处理厂污泥处理处置为例,从污水处理厂浓缩后污泥开始,研究厂内脱水干化+异地集中焚烧(出厂污泥含水率为40%)、厂内深度脱水+异地集中焚烧(出厂污泥含水率为60%)、厂内常规脱水+异地干化/焚烧工艺(出厂污泥含水率为80%)的碳排放情况。结果表明,基于该城市泥质特点,污水处理厂出厂污泥含水率越低,污泥干化焚烧工艺的计算碳排放量越低。当出厂污泥含水率分别为40%和60%时,电耗碳排放量占比最大,分别占总碳排放量的31%和27%。当污水处理厂出泥含水率为80%时,外加燃料带来的碳排放约占全流程的43%。因此,污泥处理处置中应尽量采用高效节能的设备,减少处理程中的药剂添加,处理过程减少天然气等能源的使用,尽可能采用废热蒸汽、生物质等热源。

关键词: 污泥处理; 碳排放; 污泥含水率; 污泥脱水干化; 污泥焚烧

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)24-0052-04

Research on Carbon Emissions of Sludge Dewatering Drying and Incineration Process of Municipal Sewage Treatment Plant

LU Jun-ying

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Taking a city in southern China as a case study, this research examines the carbon emissions of different sludge treatment scenarios, starting from the thickened sludge at the wastewater treatment plant. The three scenarios analyzed are: on-site dewatering and drying + off-site centralized incineration (with sludge moisture content of 40% upon leaving the wastewater treatment plant), on-site deep dewatering + off-site centralized incineration (with sludge moisture content of 60% upon leaving the wastewater treatment plant), and on-site conventional dewatering + off-site drying/incineration (with sludge moisture content of 80% upon leaving the wastewater treatment plant). The result shows that lower water content in the sludge discharged from the WWTP leads to lower calculated carbon emissions. When the water content of sludge is 40% and 60%, the carbon emission of electricity usage accounts for the largest proportion of total carbon emissions, accounting for 31% and 27%, respectively. However, when the water content of sludge is 80%, the carbon emissions from additional fuel usage contributes to approximately 43% of the total carbon emissions. Therefore, to reduce carbon emissions in the sludge treatment and disposal process, it is recommended to utilize energy-efficient equipment, minimize chemical additives, reduce reliance on natural gas and other energy sources, and maximize the utilization of incorporate waste heat steam, biomass, and other sustainable heat sources.

基金项目: 上海市科技计划项目(23230730600); 上海市住建委科研项目(沪建科2022-002-001)

通信作者: 卢骏营 E-mail: ljy3415@163.com

Key words: sludge treatment; carbon emissions; water content of sludge; sludge dewatering and drying; sludge incineration

随着经济社会的快速发展,城镇污水处理厂污泥的处理处置日渐成为水环境治理的重要环节,污泥焚烧工艺具有减量化彻底、设施占地小等优点,在部分城市成为主要的污泥处理处置路线。由于受“邻避”效应的影响,部分城市污泥焚烧设施的选址难度较大,因此,在部分地区城镇污水处理厂污泥采用厂内脱水干化+异地集中焚烧的处理处置工艺^[1]。

为响应国家实现碳达峰碳中和的目标,污泥处理处置技术须加快绿色低碳转型发展。而我国城镇污水处理厂污泥焚烧工艺总体上处于起步阶段,在碳减排上具有较大的潜力。为此,以南方某城市污水处理厂污泥处理处置为例,以城镇污水处理厂浓缩污泥为起点,针对污泥脱水干化+焚烧工艺,研究不同出厂污泥含水率下污泥处理处置全流程在运行期的碳排放。

1 工艺流程和计算参数

1.1 工艺流程

根据该城市污泥处理现状,市内各城镇污水处理厂出厂污泥含水率主要有 40%、60%、80% 三种,全市污泥干基低位热值平均约 9.30 MJ/kg,在此热值下,入炉污泥含水率须达到 50% 以下才能维持自持焚烧,否则需要补充天然气辅助燃烧^[2]。根据国内外经验,污泥脱水干化焚烧处理处置工艺主要有以下三种方案:

① 方案一:污泥脱水干化至含水率 40% 后外运集中焚烧处置。在污水处理厂内建设深度脱水+低温干化设施,低温干化采用电力为热源,将污泥含水率降至 40% (过程中不添加石灰、 FeCl_3 等药剂),之后车运至集中焚烧设施进行焚烧,产生的蒸汽用于发电,烟气处理达标后排放,焚烧灰渣外运处置。工艺流程见图 1。

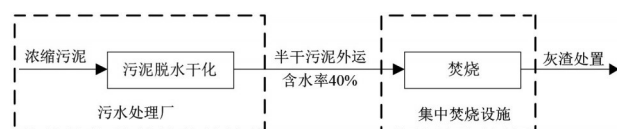


图 1 方案一工艺流程

Fig.1 Process flow diagram of route 1

② 方案二:污泥深度脱水至含水率 60% 后外

运集中焚烧处置。在污水处理厂内建设深度脱水设施,将污泥含水率降至 60% (过程中不添加石灰、 FeCl_3 等药剂),之后车运至集中焚烧设施并直接送入污泥焚烧炉焚烧。由于污泥热值较低,无法自持焚烧,焚烧炉内须补充少量天然气,产生的蒸汽用于发电,烟气处理达标后排放,焚烧灰渣外运处置。工艺流程见图 2。

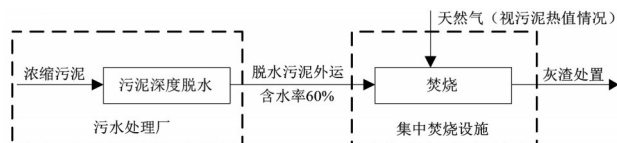


图 2 方案二工艺流程

Fig.2 Process flow diagram of route 2

③ 方案三:污泥常规脱水至含水率 80% 后外运集中干化焚烧处置。在污水处理厂内利用常规脱水设施,将污泥脱水至含水率 80% 以下,之后车运至集中焚烧设施,干化后送入污泥焚烧炉焚烧,产生的蒸汽用于干化,烟气处理达标后排放,焚烧灰渣外运处置。由于污泥热值较低,污泥干化焚烧系统热量缺口较大,系统须补充天然气作为外来热源。工艺流程见图 3。

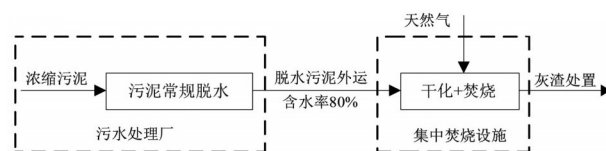


图 3 方案三工艺流程

Fig.3 Process flow diagram of route 3

1.2 主要计算参数

按污泥处理处置流程,碳排放主要在厂内处理、外部运输、集中处理处置三个阶段产生。考虑到计算边界条件差异及碳排放占比较低,污泥处理处置各阶段产生的废水处理碳排放不计入。为便于比较,碳排放量以单位干基污泥(DS)为基数进行计算。

① 厂内处理阶段

根据污水处理厂不同出厂污泥含水率,基于实际运行情况,分别对厂内污泥处理过程中涉及碳排放的消耗进行核算,主要包括电力、聚合氯化铝(PAC)和聚丙烯酰胺(PAM),具体消耗情况如表 1

所示。

表1 污水厂内污泥处理过程中电力及药剂消耗情况

Tab.1 Main consumption of electricity and agent consumption of sludge treatment in wastewater treatment plant

项目	方案一	方案二	方案三
出厂污泥含水率/%	40	60	80
污泥外运量/t	1.7	2.5	5.0
电耗/(kW·h·t ⁻¹ DS)	450	180	150
PAM/(kg·t ⁻¹ DS)	5	5	5
PAC/(kg·t ⁻¹ DS)	80	80	

② 外部运输阶段

污泥运输过程中的碳排放量与污泥运输量和运输距离直接相关,根据测算,运输距离按150 km计,碳排放因子按重型柴油货车(18 t)运输,取0.12 kgCO₂/(t·km)。

③ 集中处理处置阶段

污泥集中焚烧处置均采用鼓泡流化床焚烧工艺,方案一和方案二采用直接焚烧工艺,方案二污泥热值偏低,需在焚烧炉内补充少量天然气,产生的烟气经余热回收后产生蒸汽用于发电,产生的电力用于本厂或外供。方案三采用干化+焚烧工艺,整个系统能量不足部分由天然气补充。各方案主要能源和药剂消耗如表2所示。

表2 集中焚烧工艺主要能源和药剂消耗情况

Tab.2 Main consumption of energy and agent for sludge incineration process

项目	方案一	方案二	方案三
出厂污泥含水率/%	40	60	80
处理处置工艺	直接焚烧+烟气处理	直接焚烧+烟气处理	干化+焚烧+烟气处理
电耗/(kW·h·t ⁻¹ DS)	140	180	320
天然气/(m ³ ·t ⁻¹ DS)		20	160
尿素/(kg·t ⁻¹ DS)	6.3	6.3	6.3
NaOH/(kg·t ⁻¹ DS)	62	62	62
消石灰/(kg·t ⁻¹ DS)	5.0	5.4	5.2
活性炭/(kg·t ⁻¹ DS)	0.50	0.54	0.52
石英砂/(kg·t ⁻¹ DS)	0.22	0.22	0.22

2 全流程碳排放计算

按碳排放的种类,污泥处理处置全过程中碳排放计算主要包括3部分:①污泥脱水干化处理、运输和焚烧环节等因耗能、耗药所产生的间接温室气体排放(称为能量源CO₂排放);②污泥焚烧环节产生的CO₂等排放(称为生物源CO₂排放);③污泥焚烧环节利用产生的能量形成电能或热能等(称为替代源CO₂排放)。

基于模型估算法中的排放系数法进行估算,碳排放因子优先参考国家相关部委和行业协会发布的规范、标准、指南,如《企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施》《污水处理厂低碳运行评价技术规范》(T/CAEPI 49—2022)、《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)、《省级温室气体清单编制指南(试行)》、《尿素单位产品碳排放限额(意见征求意见稿)》,未有相关标准规范文件的药剂则参考相关文献^[3]。3种污泥脱水干化焚烧方案全流程处理处置的碳排放计算结果见表3。

表3 3种污泥脱水干化焚烧方案碳排放计算结果

Tab.3 Carbon emission calculation results for three projects of sludge dewatering+drying and incineration process

项目	碳排放源	排放类型	CO ₂ 排放量/(kg·t ⁻¹ DS)			碳排放因子
			方案一	方案二	方案三	
厂内处理阶段	能量源	电力	261.0	104.4	87.0	0.58 kgCO ₂ /(kW·h)
		PAM	7.5	7.5	7.5	1.5 kgCO ₂ /kg
		PAC	129.6	129.6	0	1.62 kgCO ₂ /kg
外部运输阶段	能量源	柴油	30.1	45.0	90.0	0.12 kgCO ₂ /(t·km)
集中处理处置阶段	能量源	电力	81.2	104.4	185.6	0.58 kgCO ₂ /(kW·h)
		天然气	0	43.2	345.6	2.16 kgCO ₂ /m ³
		尿素	2.2	2.2	2.2	0.35 kgCO ₂ /kg
		NaOH	72.5	72.5	72.5	1.17 kgCO ₂ /kg
		消石灰	4.9	5.3	5.1	0.98 kgCO ₂ /kg
		活性炭	3.0	3.2	3.1	6.0 kgCO ₂ /kg
		石英砂	0.6	0.6	0.6	2.51 kgCO ₂ /kg
	替代源	电力	232.0	92.8	0	0.58 kgCO ₂ /(kW·h)
合计	碳排放量(生物源不计入)		592.6	517.9	799.2	
	计算碳排放量		360.6	425.1	799.2	

根据《省级温室气体清单编制指南(试行)》,废弃物焚烧过程中的碳排放需要区分化石和生物成因,其中生物质材料燃烧产生的 CO_2 不计入清单总量。因此,污泥集中焚烧产生的生物源碳排放不计入污泥处理处置全流程碳排放量。

由表3可以看出,电力消耗带来的碳排放占比较大,三个方案中电力带来的碳排放占计算碳排放量比例分别为31%、27%、34%。方案一和方案二中厂内处理阶段投加PAC带来的碳排放量占计算碳排放量的比例较大,分别为36%和30%。方案三中集中处理处置阶段,天然气碳排放占计算碳排放量比例较大,达到43%。

方案三即出厂污泥含水率为80%时,全流程碳排放量最大,为 $799.2 \text{ kgCO}_2/\text{tDS}$,主要是因为污泥集中处理处置阶段,由于污泥热值偏低,干化焚烧系统热量缺口较大,需要补充天然气,带来大量的碳排放。方案二即出厂污泥含水率为60%时,全流程碳排放量最低,为 $517.9 \text{ kgCO}_2/\text{tDS}$ 。

由于方案一和方案二厂内进行了深度脱水或干化,在集中处理处置阶段,整体热量有富余,可供发电作为替代源碳排放,分别为 $232.0 \text{ kgCO}_2/\text{tDS}$ 和 $92.8 \text{ kgCO}_2/\text{tDS}$ 。在扣除替代源碳排放后,方案三计算碳排放量仍为最大,为 $799.2 \text{ kgCO}_2/\text{tDS}$,方案一计算碳排放量最低,为 $360.6 \text{ kgCO}_2/\text{tDS}$ 。

3 结论

① 基于该城市污泥处理处置特点,污水处理厂污泥出厂含水率越低,计算碳排放量越低。随着污水处理厂出泥含水率的降低,厂内处理阶段的碳排放量升高,外部运输和集中处理处置阶段的碳排放量降低。

② 全流程中电力消耗带来的碳排放占比较大,三个方案中电力带来的碳排放占比分别为31%、27%、34%。随着相关部委对电力碳排放因子的下调,全流程中电力碳排放的占比将会降低。

③ 集中处理处置阶段的碳排放主要来自电力和补充的燃料(天然气),当污水处理厂出泥含水

率为80%时,消耗的天然气碳排放量最大,约占全流程计算碳排放量的43%。若有废热蒸汽、生物质燃料等,则可以大幅降低该阶段的碳排放。

④ 随着污水厂出泥含水率的降低,污泥焚烧系统热量缺口逐渐变小,碳排放量降低显著。同时,随着污水厂出泥含水率的降低,系统热平衡由负转正,用于产热发电,可作为碳排放的替代源。

综上,从降低污泥脱水干化焚烧工艺全流程碳排放的角度,可采取以下措施:①采用高效节能的设备,减少电力和能源消耗;②减少污泥处理处置过程中药剂添加量;③处理处置过程减少天然气等能源的使用,尽可能采用废热蒸汽、生物质等热源。

参考文献:

- [1] 郝晓地,陈奇,李季,等. 污泥干化焚烧乃污泥处理/处置终极方式[J]. 中国给水排水,2021,35(4):35-42.
HAO Xiaodi, CHEN Qi, LI Ji, et al. Ultimate approach to handle excess sludge: incineration and drying [J]. China Water & Wastewater, 2021, 35 (4) : 35-42 (in Chinese).
- [2] 生骏,胡维杰. 半干污泥焚烧工程设计分析及探讨[J]. 中国给水排水,2020,36(6):45-49.
SHENG Jun, HU Weijie. Analysis and discussion on semi-dry municipal sludge incineration project design [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36 (6) : 45-49 (in Chinese).
- [3] 纪莎莎. 污泥干化焚烧工艺碳排放研究及优化策略[J]. 环境科技,2019,32(1):49-53.
JI Shasha. Study on carbon emission and optimization strategy of sludge drying and incineration process [J]. Environmental Science and Technology, 2019, 32 (1) : 49-53(in Chinese).

作者简介:卢骏营(1985-),男,浙江东阳人,硕士,高级工程师,主要研究方向为污泥及固体废物的处理处置。

E-mail:ljy3415@163.com

收稿日期:2023-12-25

修回日期:2024-01-21

(编辑:丁彩娟)