

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.24.006

## 两段式干化+热解气化工工艺碳排放核算及碳减排策略

刘杏<sup>1,2</sup>, 李旭芳<sup>1,2</sup>, 余波<sup>2,3</sup>, 赵浩<sup>4</sup>, 李箫宁<sup>2,3</sup>, 沈鹏飞<sup>1,2</sup>

(1. 中国铁工投资建设集团有限公司, 北京 101300; 2. 中国中铁生态环境专业研发中心, 北京 101300; 3. 中铁水务集团有限公司, 陕西 西安 712000; 4. 西安中铁生态环境科技有限公司, 陕西 西安 710301)

**摘要:** 污泥处理处置过程会产生大量碳排放,不同的污泥处理处置工艺路线产生的碳排放量有一定的差异。热解气化作为一种新兴的污泥处理处置技术,目前缺乏相关的碳排放核算研究。以某市政污泥处理处置项目为例,利用实际运行数据核算两段式干化+热解气化工工艺各环节碳排放量,并分析其主要碳排放来源。试运行期间,该工艺总碳排放量为20 851 tCO<sub>2</sub>/a,处理单位干基污泥(DS)产生的碳排放量平均为1.732 tCO<sub>2</sub>/tDS,干化阶段碳排放量占总碳排放量的78.9%,尾渣资源化利用产生的碳补偿量为0.162 tCO<sub>2</sub>/tDS。两段式干化+热解气化工工艺碳排放水平优于目前国内主流的污泥处理处置方式,并具有较高的碳补偿量。结合项目实际情况,提出优化干化系统效率、采用光伏发电和低温脱硝工艺3种碳减排措施,可降低0.396 tCO<sub>2</sub>/tDS的碳排放。

**关键词:** 碳排放核算; 碳减排; 污泥处理处置; 热解气化; 市政污泥

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)24-0044-08

## Carbon Emissions Calculation and Carbon Emission Reduction Strategy of Two-stage Drying + Pyrolysis and Gasification Process

LIU Xing<sup>1,2</sup>, LI Xu-fang<sup>1,2</sup>, YU Bo<sup>2,3</sup>, ZHAO Hao<sup>4</sup>, LI Xiao-ning<sup>2,3</sup>, SHEN Peng-fei<sup>1,2</sup>

(1. China Tiegong Investment & Construction Group Co. Ltd., Beijing 101300, China; 2. Eco-Environmental Research and Development Center of China Railway Group Limited, Beijing 101300, China; 3. China Railway Water Group Co. Ltd., Xi'an 712000, China; 4. Xi'an China Railway Eco-environment Technology Co. Ltd., Xi'an 710301, China)

**Abstract:** The sludge treatment and disposal process generates significant carbon emissions, with varying levels of emissions depending on the treatment methods used. As a new sludge treatment technology, research on the carbon emission accounting for pyrolysis+gasification process is limited. The carbon emissions of each link of the two-stage drying + pyrolysis and gasification process was calculated by using actual operation data from a municipal sludge treatment and disposal project, and the main source of carbon emissions was analyzed. During the trial operation of the case project, the total carbon emission for the sludge treatment and disposal process was 20 851 tCO<sub>2</sub>/a, and the average carbon emission per unit dry sludge was 1.732 tCO<sub>2</sub>/tDS, with the carbon emissions of drying stage accounting for 78.9% of the total carbon emissions, and the carbon compensation from the utilization of tailings was

通信作者: 李旭芳 E-mail: xufang\_lee@163.com

0.162 tCO<sub>2</sub>/tDS。The carbon emission level of the two-stage drying + pyrolysis and gasification process was more favorable than the current mainstream sludge treatment and disposal methods in China, with a higher carbon compensation rate. Based on the actual project situation, three carbon emission reduction measures were proposed, including the optimization of the drying system efficiency, adopting photovoltaic power generation, and implementing the low-temperature denitration of flue gas. These measures can reduce the carbon emissions by 0.396 tCO<sub>2</sub>/tDS.

**Key words:** carbon emission calculation; carbon emission reduction; sludge treatment and disposal; pyrolysis and gasification; municipal sludge

污泥处理处置全流程需消耗大量的能源和资源,从而产生较大的碳排放量<sup>[1]</sup>。随着我国“双碳”政策的出台,污泥的能源回收及物质循环利用是市政污泥处理处置的重点发展方向。污泥热解气化工技术是污泥在热解气化炉内依次经过干馏段、碳化段、气化段和燃烧段,其间温度不断升高,利用污泥中有机物的热不稳定性,在贫氧条件下使有机物产生热裂解,产生利用价值较高的热解可燃气体的工艺过程。热解气化工技术和焚烧技术均属于热化学技术,但与焚烧技术相比,热解气化工技术具有二次污染少、动力消耗低等特点<sup>[2-4]</sup>。热解气化工工艺作为市政污泥处理处置领域的一种新技术,目前尚无其碳排放水平相关研究。以某市政污泥处理处置项目为例,根据实际运行数据,分析两段式干化+热解气化工工艺的碳排放量和碳排放水平,并结合该项目的实际运营情况,提出碳减排策略。

## 1 项目概况

### 1.1 工艺流程

该污泥处理项目设计处理规模为600 t/d(污泥含水率以80%计),采用两段式干化+热解气化工工艺,污泥来源为处理范围内生活污水处理厂产生的脱水污泥。工艺流程如图1所示。

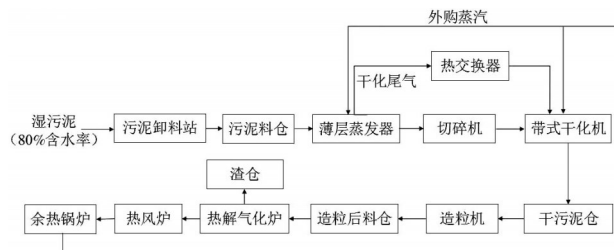


图1 污泥处理处置工艺流程

Fig.1 Process flow of sludge treatment and disposal

污泥处理处置过程主要包括两段式干化、热解气化和余热利用等工艺段,在两段式干化中,湿污

泥先经过薄层蒸发器,含固率提高到45%~50%;然后经带式干化进一步提高污泥含固率至80%以上。干化污泥进入污泥造粒机挤出成型后进入料仓作为热解气化工工艺段原料。热解气化工工艺段涉及气化炉系统、热风炉系统、余热锅炉系统、蒸汽系统等,其主要目标是将污泥进行热解气化,并回收污泥能量产生蒸汽。在气化炉系统内,污泥与气化剂(空气和高温蒸汽)相向运动。污泥从设备上端进入并自上而下移动,温度随之升高,依次经过烘干、干馏、碳化、气化、燃烧等阶段,最终变成残渣从底部排出;气化剂从设备底端通入并自下而上流动,经碳化和气化后的半焦状污泥与空气中的氧气接触燃烧,维持燃烧段以上的贫氧还原环境,实现污泥热解和气化。热解后的可燃气(组分主要为CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>、H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>等)从顶部出气口排出,经除尘后进入热风炉系统燃烧,并经余热锅炉生成蒸汽用于污泥烘干,为污泥干化提供热源,从而实现能量内部循环使用。锅炉燃烧烟气主要污染物包括烟尘(颗粒物)、NO<sub>x</sub>、酸性气体(HCl、HF、SO<sub>x</sub>等)、重金属、二噁英类等。

该项目配套建设废水处理系统和烟气处理系统,废水处理采用冷却+调节池+AAO生化处理工艺,出水满足《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015)中B级标准后进入城市污水处理厂处理;热风炉烟气采用选择性非催化还原法(SNCR)脱硝+活性炭+袋式除尘+石灰石-石膏法脱硫+烟气加热+选择性催化还原法(SCR)脱硝处理工艺处理,满足陕西省《锅炉大气污染物排放标准》(DB61/1226—2018)中生物质锅炉标准值后排放。

### 1.2 资源能源消耗

项目能源消耗主要包括电力、天然气和蒸汽。其中,电力为各种设备提供电能支持;天然气主要

用于热解气辅助燃烧和SCR脱硝工艺系统加热;蒸汽主要为污泥干化提供所需要的热能,少量作为热解气化阶段的气化剂。项目所需部分蒸汽来自余热锅炉的回收利用,不足部分通过外购蒸汽补充。

该项目消耗的药剂主要用于废气和废水处理,包括次氯酸钠、氢氧化钠、聚合氯化铝(PAC)、聚丙烯酰胺(PAM)、石灰石、氨水、活性炭等,均为外购。该项目能源和药剂使用情况如表1所示。

表 1 能源和药剂使用情况

Tab.1 Consumption of energy and reagents

类别	名称	用途	碳排放因子	数据来源
能源	电力	为各种设备供电	0.570 3 tCO <sub>2</sub> /(MW·h)	《关于做好2023—2025年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知》
	天然气	热解气辅助燃烧、SCR脱硝系统加热	21.62 tCO <sub>2</sub> /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	《工业其他行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》
	蒸汽	污泥干化热源、热解气化工工艺的气化剂	0.315 3 tCO <sub>2</sub> /t	《工业其他行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》
药剂	氨水	废气和废水处理	1.377 kgCO <sub>2</sub> /kg	《中国产品全生命周期温室气体排放系数库》
	硫酸		1.6 kgCO <sub>2</sub> /kg	
	活性炭		1.6 kgCO <sub>2</sub> /kg	
	氢氧化钠		1.12 kgCO <sub>2</sub> /kg	
	石灰石		0.68 kgCO <sub>2</sub> /kg	
	PAC		1.62 kgCO <sub>2</sub> /kg	
	PAM		1.5 kgCO <sub>2</sub> /kg	
	次氯酸钠		0.92 kgCO <sub>2</sub> /kg	

## 2 碳排放核算

### 2.1 核算边界

根据世界资源研究所(WRI)与世界可持续发展工商理事会(WBCSD)开发的《温室气体核算体系:企业核算与报告标准》,温室气体碳排放分为3个范围:范围一是企业活动过程中的直接碳排放,包括能源燃烧和工艺过程碳排放,该项目主要是天然气燃烧和污水处理工艺过程产生的直接碳排放;范围二是外购能源产生的间接碳排放,该项目包括外购电力和蒸汽;范围三是其他间接碳排放,该项目主要是外购药剂产生的碳排放。为保证项目工艺碳排放核算结果的代表性,核算从含水率80%的市政

污泥进入卸料站开始,到残渣外运出厂前作为核算边界,考虑过程中的直接排放和间接排放,计算得到项目的碳排放量,即包括两段式干化、热解气化、废气和废水处理在内的工艺过程碳排放,不包括污泥和残渣在厂内外运输以及办公生活设施产生的碳排放。此外,考虑污泥处理过程的尾渣资源化利用所产生的碳补偿量,通过计算可得到项目的净碳排放量。该项目净碳排放边界如图2所示。

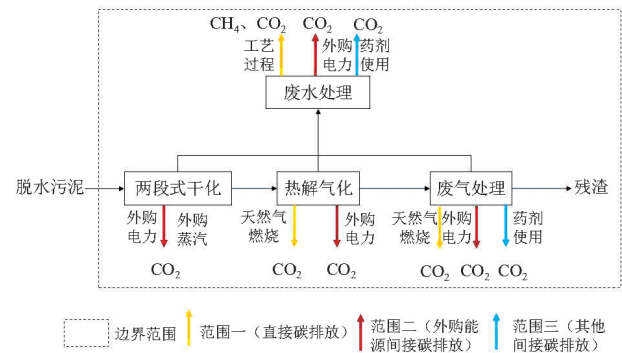


图 2 污泥处理处置净碳排放核算边界

Fig.2 System boundary for carbon emission calculation of sludge treatment and disposal

### 2.2 碳排放核算方法

采用联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)《国家温室气体清单指南》提供的核算方法计算两段式干化+热解气化工工艺产生的碳排放量,其中,N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>的温室气体增温潜势(GWP)以CO<sub>2</sub>当量计入碳排放量中,根据IPCC提供的数据,N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>的GWP分别为265和28。

#### 2.2.1 范围一排放(直接碳排放)

根据《工业其他行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》,天然气燃烧碳排放量计算如下:

$$E_{\text{Fuel}} = AD \times EF_{\text{Fuel}} \quad (1)$$

式中: $E_{\text{Fuel}}$ 为天然气燃烧碳排放量,tCO<sub>2</sub>/a;AD为天然气消耗量,10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>;EF<sub>Fuel</sub>为天然气燃烧CO<sub>2</sub>排放因子,取21.62 tCO<sub>2</sub>/10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。

污水处理过程中碳排放包括CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放,其碳排放量计算依据为《污水处理厂低碳运行评价技术规范》(T/CAEPI 49—2022)。

#### ① CH<sub>4</sub>排放

污水处理过程中,CH<sub>4</sub>直接排放主要发生在沉淀池及生物处理等单元的厌氧环节,根据T/CAEPI 49—2022,直接碳排放量计算公式如下:

$$m_{\text{CH}_4,i} = \left[ \frac{Q_{\text{ra},i} \times (\text{COD}_{\text{ra},i} - \text{COD}_{\text{ea},i})}{1000} - \text{SG}_i \times P_{\text{v},i} \times \rho_s \right] \times B_0 \times \text{MCF} - R_{\text{CH}_4,i} \times 0.717 \quad (2)$$

式中: $m_{\text{CH}_4,i}$ 为污水处理厂第*i*天 $\text{CH}_4$ 直接排放量,  $\text{kgCH}_4$ ;  $Q_{\text{ra},i}$ 为污水处理厂第*i*天进水量,  $\text{m}^3$ ;  $\text{COD}_{\text{ra},i}$ 为污水处理厂第*i*天平均进水COD浓度,  $\text{mg/L}$ ;  $\text{COD}_{\text{ea},i}$ 为污水处理厂第*i*天平均出水COD浓度,  $\text{mg/L}$ ;  $\text{SG}_i$ 为污水处理厂第*i*天产生的干污泥量,  $\text{kgDS}$ ;  $P_{\text{v},i}$ 为污水处理厂第*i*天干污泥有机分比例, %;  $\rho_s$ 为污泥中有机物与COD的转化系数, 取 $1.42 \text{ kgCOD/kg}$ 干基污泥;  $B_0$ 为厌氧过程中降解单位COD时 $\text{CH}_4$ 的产率系数, 取 $0.25 \text{ kgCH}_4/\text{kgCOD}$ ; MCF为污水处理过程中 $\text{CH}_4$ 修正因子, 沉淀池正常刮泥排泥、厌氧和缺氧区充分搅拌、好氧区曝气均匀时, 各构筑物内无污泥淤积, 取 $0.003$ , 反之, 构筑物内存在污泥淤积, 取 $0.03$ ;  $R_{\text{CH}_4,i}$ 为污水处理厂第*i*天 $\text{CH}_4$ 回收体积,  $\text{m}^3$ ;  $0.717$ 为标准状况(1个标准大气压,  $0^\circ\text{C}$ )下 $\text{CH}_4$ 的密度,  $\text{kg/m}^3$ 。

## ② $\text{N}_2\text{O}$ 排放

污水处理过程 $\text{N}_2\text{O}$ 直接排放主要发生在生物处理单元, 根据T/CAEPI 49—2022, 其排放量计算公式如下:

$$m_{\text{N}_2\text{O},i} = \frac{Q_{\text{rb},i} \times (\text{TN}_{\text{rb},i} - \text{TN}_{\text{eb},i}) \times \text{EF}_{\text{N}_2\text{O}}}{1000} \times C_{\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2} \quad (3)$$

式中: $m_{\text{N}_2\text{O},i}$ 为污水生物处理单元第*i*天 $\text{N}_2\text{O}$ 直接排放量,  $\text{kg}$ ;  $Q_{\text{rb},i}$ 为污水生物处理单元第*i*天进水量,  $\text{m}^3$ ;  $\text{TN}_{\text{rb},i}$ 为污水生物处理单元第*i*天平均进水TN浓度,  $\text{mg/L}$ ;  $\text{TN}_{\text{eb},i}$ 为污水生物处理单元第*i*天平均出水TN浓度,  $\text{mg/L}$ ;  $\text{EF}_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 $\text{N}_2\text{O}$ 排放因子, 取 $0.016 \text{ kgN}_2\text{O}-\text{N}/\text{kgTN}$ ;  $C_{\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2}$ 为 $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ 分子质量之比, 取 $44/28$ 。

## 2.2.2 范围二排放(外购能源间接碳排放)

电力或蒸汽消耗碳排放量计算公式如下:

$$E_{\text{电/蒸汽}} = M \times \text{EF} \quad (4)$$

式中: $E_{\text{电/蒸汽}}$ 为电力或蒸汽消耗碳排放量,  $\text{tCO}_2/\text{a}$ ;  $M$ 为企业净购入能源消耗量,  $\text{MW}\cdot\text{h/a}$ (电力)或 $\text{GJ/a}$ (热力);  $\text{EF}$ 为企业净购入能源消费 $\text{CO}_2$ 排放因子, 根据生态环境部《关于做好2023—2025年发电行业

企业温室气体排放报告管理有关工作的通知》, 2022年度我国电网平均碳排放因子为 $0.5703 \text{ tCO}_2/(\text{MW}\cdot\text{h})$ ; 案例项目热源为 $0.8 \text{ MPa}$ 、 $250^\circ\text{C}$ 的过热蒸汽, 热焓约为 $2950 \text{ kJ/kg}$ , 根据《工业其他行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》提供的方法计算, 蒸汽供应的碳排放因子为 $0.3153 \text{ tCO}_2/\text{t}$ 蒸汽。

## 2.2.3 范围三排放(其他碳排放)

采用排放因子法计算药剂消耗碳排放量, 计算方法如下:

$$E_i = m_i \times \text{EF}_i \quad (5)$$

式中: $E_i$ 为药剂*i*消耗碳排放量,  $\text{tCO}_2/\text{a}$ ;  $m_i$ 为药剂*i*的使用量,  $\text{t/a}$ ;  $\text{EF}_i$ 为药剂*i*的碳排放因子, 取值见表1。

## 3 碳排放量分析和讨论

### 3.1 碳排放总量及分布情况

#### ① 按产生类别分

收集了2022年12月—2023年4月项目试运行期间的数据, 经核算, 该项目范围一、范围二、范围三碳排放量分别为 $906$ 、 $19530$ 、 $415 \text{ tCO}_2/\text{a}$ , 碳排放总量为 $20851 \text{ tCO}_2/\text{a}$ 。

范围一(直接碳排放)碳排放量为 $906 \text{ tCO}_2/\text{a}$ , 占工艺碳排放总量的 $4.3\%$ 。其中, $87.6\%$ 为天然气燃烧产生, $12.4\%$ 为污水处理过程产生。对于天然气燃烧产生的直接碳排放, 其中约有 $80.6\%$ 来自脱硝系统加热, 其余 $19.4\%$ 来自热解气辅助燃烧。该项目采用SCR脱硝工艺, 要求烟气温度保持在 $220^\circ\text{C}$ 左右, 但在经过除尘和石灰石-石膏法脱硫后, 烟气的温度降至 $50^\circ\text{C}$ 左右。为保证系统的脱硝效果, 必须重新提升烟气温度, 从而产生较多的燃料消耗。

范围二(外购能源间接排放)碳排放量为 $19530 \text{ tCO}_2/\text{a}$ , 占工艺碳排放总量的 $93.7\%$ , 是全厂碳排放的主要贡献者。通常, 污泥干化为污泥处理主要耗能环节<sup>[5]</sup>, 主要消耗蒸汽和电能。该项目外购蒸汽间接碳排放占范围二的 $68.1\%$ , 全部用于污泥干化, 即实现进厂污泥含水率从 $80\%$ 降至 $20\%$ 以下。而在电力消耗中, 约 $50.7\%$ 的电力用于污泥干化阶段, 主要原因是干化阶段需使用较多的大功率设备, 如薄层蒸发器、循环风机、污泥造粒机等单机功率均大于 $100 \text{ kW}$ , 且未使用变频设备。其余 $49.3\%$ 用于热解气化、废气处理和废水处理, 其中, 废气处

理约占此部分的53.3%，主要原因是废气处理系统需使用大量风机。

范围三(其他间接排放)碳排放量为415 tCO<sub>2</sub>/a,占工艺碳排放总量的2.0%，主要为废气处理和废水处理过程中使用药剂产生的碳排放。药剂消耗产生的间接碳排放量占前3位的分别是石灰石(30.4%)、氨水(29.4%)和氢氧化钠(18.6%)，合计占范围三的78.4%；其中，石灰石用于脱硫系统，氨水用于脱硝系统，氢氧化钠用于除臭系统，均为废气处理使用药剂。

### ② 按工艺产生环节分

该项目工艺系统包括干化系统、热解气化系统和废气废水处理系统，按不同工艺环节分别计算单位干基污泥(DS)的碳排放量。根据2022年12月—2023年4月项目试运行期间数据分析计算，干化系统碳排放量为1.367 tCO<sub>2</sub>/tDS，热解气化系统碳排放量为0.076 tCO<sub>2</sub>/tDS，废气废水处理系统碳排放量为0.288 tCO<sub>2</sub>/tDS，干化系统碳排放量占项目工艺碳排放总量的78.9%，是主要的碳排放环节。

## 3.2 现状碳减排情况

该项目在工艺设计阶段即考虑了降低工艺系统碳排放，主要体现在两个方面：①选用两段式干化工艺，并将薄层蒸发器产生的热蒸汽用于后续带机干化；②利用余热锅炉回收污泥热解的能量，并将产生的蒸汽用于污泥干化。

### 3.2.1 干化工艺过程碳减排

干化工艺的主要目标是去除污泥中的水分，因此会消耗大量能源。一般而言，带式热干化水蒸发能耗为3 200 kJ/kg，旋转盘式热干化水蒸发能耗为2 700 kJ/kg，流化床干化水蒸发能耗为2 800 kJ/kg<sup>[6]</sup>，换算为蒸发单位水量产生的碳排放量分别为0.352、0.297、0.308 tCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>。根据试运行期间数据统计，该项目污泥干化阶段平均能耗为2 269 kJ/kg，折合蒸发单位水量碳排放量为0.250 tCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>，与其他工艺相比，碳减排15.8%~29.0%，即该项目干化过程较其他工艺碳减排量为0.256~0.558 tCO<sub>2</sub>/tDS。在两段式干化工艺中，前段薄层蒸发器产生的热蒸汽被抽出送入交换器中，为后段带式干化机提供部分热量，减少干化系统外购蒸汽需求，从而实现碳减排。

### 3.2.2 余热回收碳减排

该项目利用余热锅炉对污泥能量进行回收利

用，虽然未实现全厂能量平衡，但提供了33.7%的热蒸汽。采用上述碳排放核算方法，根据项目试运行期间所消耗的蒸汽量数据计算，热干化阶段使用的热耗碳排放量为1.630 tCO<sub>2</sub>/tDS(平均值)，实际外购蒸汽产生的碳排放量为1.080 tCO<sub>2</sub>/tDS(平均值)，余热回收实现0.550 tCO<sub>2</sub>/tDS的碳减排(平均值)，占所需热能的33.7%。

### 3.2.3 碳补偿

该项目资源化产物炉渣以及废气处理产生的石膏可资源化利用，其中炉渣主要化学成分为二氧化硅和氧化铝，此外还含有三氧化二铁、氧化钙、氧化镁、氧化钾、氧化钠、二氧化钛等；热解残渣浸出液中重金属含量均符合《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007)要求。该项目热解残渣不属于危险废物，且与水泥原料中的硅质原料相同，因此，可替代部分水泥原料。根据《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)，使用热解炉渣作为再生原料生产建材时，应按其所替代原料碳排放的50%计算。按炉渣和石膏资源化制建材估算，碳减排量计算公式如下：

$$R_{\text{副产物}} = m \times \varphi_{\text{副产物}} \times EF_{\text{副产物}} \times 50\% \quad (6)$$

式中： $R_{\text{副产物}}$ 为副产物资源化利用产生的碳补偿量，tCO<sub>2</sub>/a； $m$ 为污泥处理量，tDS/a； $\varphi_{\text{副产物}}$ 为副产物产率，该项目炉渣产率为0.38 t/tDS，石膏产率为0.013 t/tDS； $EF_{\text{副产物}}$ 为副产物生产碳排放因子，根据《中国产品全生命周期温室气体排放系数集(2022)》，水泥为0.74 tCO<sub>2</sub>/t<sup>[7]</sup>，石膏为0.20 tCO<sub>2</sub>/t。

根据试运行期间的数据统计，通过对炉渣等副产物的资源化利用，该项目的碳补偿量为0.162 tCO<sub>2</sub>/tDS。

## 3.3 工艺碳排放水平对比分析

根据2022年12月—2023年4月项目试运行期间的数据统计，当不考虑尾渣资源化利用时，污泥产生的碳排放量为0.452~2.665 tCO<sub>2</sub>/tDS，平均为1.732 tCO<sub>2</sub>/tDS。考虑尾渣资源化利用时，污泥产生的净碳排放量平均为1.570 tCO<sub>2</sub>/tDS。

该项目以含水率80%污泥为起点，计算两段式干化+热解气化工艺全过程碳排放量，包括直接排放、外购能源间接碳排放和其他间接碳排放；同时，计算尾渣利用可产生的碳补偿。为考察两段式干化+热解气化工艺路线的碳排放水平，参考相关研究结果<sup>[8-11]</sup>，将两段式干化+热解气化+建材利用(A

路线)与干化+焚烧+建材利用(B路线)、厌氧消化+土地利用(C路线)、好氧堆肥+土地利用(D路线)、碱性热水解+土地利用(E路线)、脱水+填埋(F路线)等工艺路线进行对比。实际工程中,相同技术路线存在设备选型、处理规模等差异,会对工艺碳排放量计算造成一定影响,故选取以上研究结果的平均值。不同工艺路线碳排放核算对比结果如图3所示。

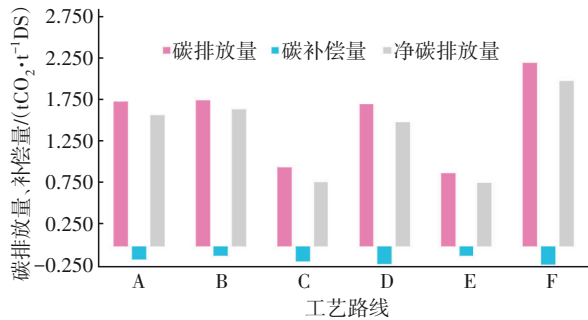


图3 不同工艺路线碳排放量对比

Fig.3 Comparison of carbon emissions of different process routes

由图3可知,两段式干化+热解气化工工艺产生的碳排放量(1.732 tCO<sub>2</sub>/tDS)和净碳排放量(1.570 tCO<sub>2</sub>/tDS)均低于脱水+填埋工艺(2.201 tCO<sub>2</sub>/tDS)和干化+焚烧+建材利用工艺(1.754 tCO<sub>2</sub>/tDS),高于厌氧消化+土地利用(0.946 tCO<sub>2</sub>/tDS)、好氧堆肥+土地利用(1.703 tCO<sub>2</sub>/tDS)和碱性热水解+土地利用(0.874 tCO<sub>2</sub>/tDS)三种工艺。然而,以土地利用为末端处置方式的污泥处理处置技术路线在实际应用过程中存在一定的局限性,例如,处理后的污泥中重金属和微塑料浓度未知,土地利用方式可能会对土壤和地下水造成影响。因此,从低碳角度来看,两段式干化+热解气化工工艺在污泥处理处置领域具有较好的发展前景。

### 3.4 碳减排策略

#### ① 干化系统效率优化

该项目自试运行以来,系统运行相对稳定,但运行效率有待提升。苏州某工业园区污泥干化项目采用与案例项目相同的两段式干化工艺,日常运行时,污泥中水蒸发热耗为1810 kJ/kg,水蒸发电耗为0.053 kW/kg<sup>[5]</sup>,而案例项目的水蒸发热耗和电耗相对较高,分别为2269 kJ/kg和0.058 kW/kg,其中热耗相比高25.4%、电耗相比高9.4%。经分析,两段式干化工艺在不考虑热损失的情况下,单位水蒸

发能耗主要受进泥量、污泥含固率、蒸汽压力和温度等因素影响<sup>[5]</sup>。该项目热源为垃圾焚烧发电厂产生的蒸汽,日常运行中应对进厂蒸汽压力和温度进行监测,保证蒸汽质量满足品质要求;同时,根据进泥量和污泥含固率变化,合理确定系统干化温度、干化目标和干化生产线开启数量、锅炉热蒸汽回收量。此外,干化系统带泥停机时,系统仍然存在蒸汽消耗,后续可研究停机流程和待机过程对项目碳排放的影响,合理优化作业流程,降低因停机带来的蒸汽消耗所产生的碳排放。通过工艺优化降低能耗,与当前能耗相比,按热干化能耗降低25%考虑,即热干化阶段外购蒸汽碳排放量可减少0.276 tCO<sub>2</sub>/tDS。

#### ② 光伏发电

该项目占地约4.4×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>,建筑系数为34%。厂区内屋顶、污水处理站上部闲置区域约1.5×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>。除去部分风机等屋顶设备占用面积外,按建(构)筑物屋顶光伏利用面积为1×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>计算,类比陕西某污水处理厂光伏装机容量<sup>[12]</sup>,该项目光伏系统发电量为6680 kW·h/d,可提供20%左右的用电需求,即可实现碳减排0.104 tCO<sub>2</sub>/tDS。

#### ③ 低温脱硝工艺

该项目采用的SCR脱硝技术是我国主流的工业脱硝工艺,其脱硝温度为220℃,而传统SCR脱硝工艺在200℃以上可以取得较好的脱硝效果,在330℃左右脱硝效果最佳<sup>[13]</sup>。为满足脱硝效果,一般需升高烟气温度,从而耗费大量能源。从节能低碳角度出发,改善低温条件下SCR的脱硝效果是减排关键。目前,已有低温(150~200℃)脱硝<sup>[14]</sup>和超低温(<150℃)脱硝<sup>[15]</sup>工艺NO<sub>x</sub>转化率>90%的报道,但相关工程应用仍较少。未来,随着低温脱硝技术的成熟,可对项目实施低温脱硝工艺进行改造,降低脱硝工艺天然气燃烧产生的碳排放量。按脱硝工艺控制温度在150℃计算,约可降低30%的能耗,即可实现碳减排0.016 tCO<sub>2</sub>/tDS。

在采取以上3种减排措施后,该项目预计碳减排潜力为0.396 tCO<sub>2</sub>/tDS,降低约22.8%的碳排放量。采取碳减排措施后与其他工艺相比,两段式干化+热解气化工工艺碳排放水平与原有排序一致,即优于目前国内主流的好氧堆肥+土地利用和干化+焚烧两种工艺路线。该项目工艺碳排放情况及碳减排措施效果如表2所示。

表2 工艺碳排放情况及碳减排措施效果

Tab.2 Carbon emissions and effect of carbon emission reduction measures

tCO<sub>2</sub>·t<sup>-1</sup>DS

类别	现状碳减排量 (余热回收)	现状碳排放量	潜在减排措施碳减排量				
			干化系统 效率优化	低温脱硝 工艺	光伏发电	合计	
范围一	天然气燃烧		0.066		-0.016		-0.016
	废水处理(工艺过程直接排放)		0.009				
范围二	外购电力		0.518			-0.104	-0.104
	外购蒸汽	-0.550	1.105	-0.276			-0.276
范围三	废水处理(药剂使用)		0.006				
	废气处理		0.029				
合计碳排放量		-0.550	1.733	-0.276	-0.016	-0.104	-0.396
尾渣利用碳补偿量			-0.162				
净碳排放量		-0.550	1.570				-0.396

#### 4 结论

该项目采用两段式干化+热解气化工艺,经核算,工艺碳排放总量为20 851 tCO<sub>2</sub>/a,处理单位污泥产生的碳排放量平均为1.732 tCO<sub>2</sub>/tDS。该项目工艺碳排放量高于厌氧消化+土地利用工艺(0.946 tCO<sub>2</sub>/tDS)、好氧堆肥+土地利用工艺(1.703 tCO<sub>2</sub>/tDS)和碱性热水解+土地利用工艺(0.874 tCO<sub>2</sub>/tDS),但低于干化+焚烧+建材利用工艺(1.754 tCO<sub>2</sub>/tDS)和脱水+填埋工艺(2.201 tCO<sub>2</sub>/tDS)。

两段式干化+热解气化工艺具有更高的碳补偿量。干化阶段选择两段式干化工艺,前段薄层干化阶段蒸发产生的热蒸汽为后段带式干化机提供部分热量,与其他干化工艺相比,可实现0.256~0.558 tCO<sub>2</sub>/tDS的碳减排量;热解气化阶段产生的热量经余热锅炉回收,用于前段干化阶段,产生的碳补偿量为0.550 tCO<sub>2</sub>/tDS;尾渣可实现资源化利用制建材,产生的碳补偿量为0.162 tCO<sub>2</sub>/tDS。

根据碳排放产生类别,两段式干化+热解气化工艺碳排放主要为范围二(外购能源间接碳排放)产生,主要包括蒸汽和电力,占全厂碳排放量的93.7%。按工艺系统不同产生环节,干化系统产生的占全部碳排放的78.9%。因此,针对性提出了碳减排策略。综合采用干化效率优化、光伏发电和低温脱硝工艺3种碳减排措施,可降低0.396 tCO<sub>2</sub>/tDS的碳排放。

#### 参考文献:

[1] WEI L L, ZHU F Y, L Q Y I, *et al.* Development, current state and future trends of sludge management in

China: based on exploratory data and CO<sub>2</sub>-equivalent emissions analysis[J]. *Environment International*, 2020, 144: 106093.

[2] 邹正康,郭晓,梁莎,等. 市政污泥热化学转化技术研究进展[J]. *能源环境保护*, 2023, 37(5): 110-120.

ZOU Zheng kang, GUO Xiao, LIANG Sha, *et al.* Research progress on thermochemical conversion technology of sewage sludge[J]. *Energy Environmental Protection*, 2023, 37(5): 110-120(in Chinese).

[3] 庞贇佶,王宏东,陈义胜,等. 城市干污泥热解气化[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(11): 6022-6027.

PANG Yunji, WANG Hongdong, CHEN Yisheng, *et al.* Pyrolysis and gasification of municipal dry sludge[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(11): 6022-6027(in Chinese).

[4] 李升,焦方方,王航航,等. 污泥厌氧消化/热解气化耦合技术处理市政污泥[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(16): 110-115.

LI Sheng, JIAO Fangfang, WANG Hanghang, *et al.* Municipal sludge treatment by anaerobic digestion and pyrolysis gasification coupling technology[J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(16): 110-115(in Chinese).

[5] 孙明华. 城市污泥“两段式”干化及协同焚烧研究[D]. 北京:清华大学,2017.

SUN Minghua. Research on Two-stage Drying and Synergetic Incineration of Municipal Sludge[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017(in Chinese).

[6] 陆瑞榴,骆华强. 新型动能干化系统用于污泥干化的中试研究[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(3): 107-109.

LU Ruiliu, LUO Huaqiang. Performance of innovative kinetic drying system for sludge drying in WWTP[J].

- China Water & Wastewater, 2017, 33(3): 107-109 (in Chinese).
- [ 7 ] 沈镛,赵建安,王礼茂,等. 中国水泥生产过程碳排放因子测算与评估[J]. 科学通报,2016,61(26):2926-2938.
- SHEN Lei, ZHAO Jian'an, WANG Limao, *et al.* Calculation and evaluation on carbon emission factor of cement production in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(26):2926-2938(in Chinese).
- [ 8 ] ZHAO G, TANG J G, ZHOU C T, *et al.* A megacity-scale analysis of sludge management and carbon footprint in China [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2022, 31(3):2451-2460.
- [ 9 ] 张楠,孟祥瑞. 城市污水处理厂污泥处理处置碳排放分析——以淮南市为例[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2023,43(5):83-93.
- ZHANG Nan, MENG Xiangrui. Carbon emissions from sludge treatment and disposals in municipal sewage treatment plant: a case study of Huainan City [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2023, 43(5):83-93(in Chinese).
- [10] 李爱民,李羽志,宋联,等. 无锡市典型污泥处理处置全过程碳排放特征研究[J]. 给水排水,2022,48(11):28-34.
- LI Aimin, LI Yuzhi, SONG Lian, *et al.* Carbon emission characteristics of typical sludge treatment and disposal process in Wuxi [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(11):28-34(in Chinese).
- [11] 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).
- [12] 王兴元,张继明. 陕西省某试验区污水处理厂提标改造分析[J]. 甘肃冶金,2021,43(4):111-115.
- WANG Xingyuan, ZHANG Jiming. Analysis on upgrading and reconstruction of wastewater treatment plant in the experimental area of Shaanxi Province [J]. Gansu Metallurgy, 2021, 43(4):111-115(in Chinese).
- [13] 叶宗权,龚德鸿. 基于蒙特卡洛算法的SCR脱硝性能影响因素分析[J]. 热能动力工程,2023,38(7):85-93.
- YE Zongquan, GONG Dehong. Analysis of influencing factors of SCR denitrification performance based on Monte Carlo algorithm [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(7): 85-93 (in Chinese).
- [14] 蒋进,夏勇军,胡笛,等. 低温NH<sub>3</sub>-SCR催化剂及脱硝机理研究进展[J]. 能源环境保护,2021,35(5):7-15.
- JIANG Jin, XIA Yongjun, HU Jia, *et al.* Research progress of low-temperature NH<sub>3</sub>-SCR catalysts and denitration mechanism [J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(5):7-15(in Chinese).
- [15] 汤常金,孙敬方,董林. 超低温(<150 °C)SCR脱硝技术研究进展[J]. 化工学报,2020,71(11):4873-4884, 5362.
- TANG Changjin, SUN Jingfang, DONG Lin. Recent progress on elimination of NO<sub>x</sub> from flue gas via SCR technology under ultra-low temperatures (<150 °C) [J]. CIESC Journal, 2020, 71(11): 4873-4884, 5362 (in Chinese).

作者简介:刘杏(1987- ),女,湖北荆门人,硕士,工程师,研究方向为“双碳”运营优化。

E-mail:583428019@qq.com

收稿日期:2023-12-05

修回日期:2024-03-15

(编辑:丁彩娟)