

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.04.007

污泥干化焚烧系统的节能降耗研究

王丽花¹, 吕国钧², 王 飞², 胡扬清², 陈文迪², 池 涌², 蒋旭光²

(1. 上海市城市排水有限公司, 上海 200233; 2. 浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 以某污泥干化焚烧处理工程为研究对象, 分别建立污泥干化系统、焚烧及余热利用系统和烟气处理系统的能量平衡模型。基于实际运行数据和现场测定数据, 确定了运行期间污泥干化焚烧系统中主要的能量损失点, 包括干化载气洗涤水热损失、干化机散热损失、焚烧炉及余热利用系统散热损失、烟气洗涤水热损失等。针对系统主要的能量损失点, 提出了针对全过程的节能降耗方案。即, 首先通过运行参数调节来提高干化机和焚烧及余热利用系统效率从而减少散热损失, 再通过余热利用干化载气以及洗涤塔前烟气, 从而减少载气洗涤排污热损失和烟气洗涤水热损失。

关键词: 污泥; 干化; 焚烧; 能量平衡; 能量损失

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)04-0029-08

Research on Energy Saving and Consumption Reduction of Sludge Drying and Incineration System

WANG Li-hua¹, LÜ Guo-jun², WANG Fei², HU Yang-qing², CHEN Wen-di²,
CHI Yong², JIANG Xu-guang²

(1. Shanghai Municipal Sewage Company Ltd., Shanghai 200233, China; 2. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Energy balance models of sludge drying system, incineration and waste heat utilization system and flue gas treatment system were established based on a sludge drying and incineration project. According to the operation data and on-site analytic data, the main energy loss points in the system were determined including the heat loss of the carrier gas washing water of drying system, the heat loss of the drying machine due to radiation, the heat loss of the incinerator and the waste heat utilization system due to radiation, and the sensible heat loss of the washing water of flue gas. According to these main energy loss points, this paper proposed an energy saving and consumption reducing scheme for the whole process. Firstly, the operating parameters are adjusted to improve the efficiency of drying machine, incineration and waste heat utilization system to reduce the heat loss. Then, through the usage of waste heat, drying carrier gas and flue gas in front of scrubbing tower, the heat loss of carrier gas washing sewage and the flue gas washing water can be reduced.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFF0215001、2018YFC1901302、2017YFC0703100); 国家自然科学基金创新群体项目(51621005); 国家自然科学基金资助项目(51676172); 浙江大学基本科研业务费专项资金资助项目(2018FZA4010、2016FZA4010)

通信作者: 吕国钧 E-mail: lvguojun@zju.edu.cn

Key words: sludge; drying; incineration; energy balance; energy loss

以焚烧为核心的污泥处置方法是目前最安全彻底的方法,可以大幅度减少污泥体积,使有机物全部碳化,并消除臭味。污泥干化焚烧可以实现废弃物的能源化利用,并最大限度地实现减量化、无害化的处理要求,但是污泥干化焚烧处理面临能耗大、运行成本高等问题^[1-8]。造成污泥干化焚烧系统能量损失的原因有工艺设置不合理、高温设备保温厚度不够、设备选型或运行参数不合理、干化机及锅炉热效率低、系统产生能量未得到合理利用等^[9-10]。

我国污泥干化焚烧技术发展较晚,因此对节能降耗的研究往往基于实验数据和理论计算。以上海某规模为 750 t/d 的大型污泥处理厂污泥干化焚烧处理为研究对象,通过分析污泥干化焚烧系统能量损失点,提出针对全过程的节能降耗方案,为本工程及国内其他污泥焚烧项目的能量回收以及节能降耗提供参考。

1 工程概况

该污泥处理工程建设规模为干基污泥处理量 150 t/d,入厂污泥含水率为 80% 左右。工程共两条生产线,采用污泥半干化+焚烧工艺路线,每条工艺系统包括:3 台桨叶污泥干化机及其尾气处理系统、1 台流化床焚烧炉及余热利用系统、1 套烟气处理系统。工程的具体工艺流程如图 1 所示。

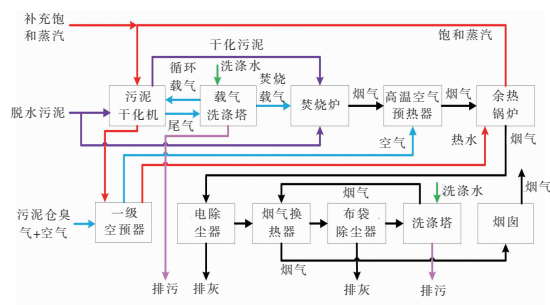


图 1 污泥干化焚烧系统工艺流程

Fig. 1 Process flow chart of sludge drying incineration system

干基质量为 5.5 t/h 的脱水污泥干化至含水率 40% 左右,再与干基质量为 1.8 t/h 的脱水污泥混合至含水率 60% 左右后送入流化床焚烧炉。焚烧产生的高温烟气经余热利用后产生的高温空气作为一次风进入焚烧炉,饱和蒸汽用于污泥干化。余热利用后的烟气经过静电除尘器、袋式除尘器、两级洗涤

塔后达标排放。

污泥干化机热源来自余热锅炉产生的饱和蒸汽以及部分外源蒸汽。饱和蒸汽在污泥干化过程中放热产生冷凝水,冷凝水经过一级空预器加热一次风后部分进入除氧器作为给水返回余热锅炉,其余冷凝水用于洗涤塔补水。

干化机内通入载气(空气)将水分快速带走,干化机排出的湿载气经洗涤塔洗涤降温除水后一部分送回干化机循环使用,其余 5% 左右作为二次风送入焚烧炉内。

余热锅炉出口烟气经静电除尘后进入烟气换热器与洗涤脱硫后的低温烟气进行换热,以提高烟囱排烟温度至 105 ℃,防止白烟的产生。热烟气经热交换降温后进入布袋除尘器,经布袋除尘后的烟气进入烟气洗涤塔进行降温、脱酸处理。洗涤后的低温烟气由烟气换热器升温后由引风机引入烟囱。

2 污泥干化焚烧系统能量平衡模型

污泥干化焚烧工程工艺环节复杂,设备繁多,主要工艺包括干化系统、焚烧及余热利用系统、烟气处理系统。

2.1 污泥干化系统能量平衡模型

污泥干化系统包括污泥干化机及载气洗涤系统,输入物料有饱和蒸汽、湿污泥以及载气洗涤水,输出物料有蒸汽冷凝水、干化污泥、洗涤水和焚烧载气,其质量和能量平衡如图 2 所示。

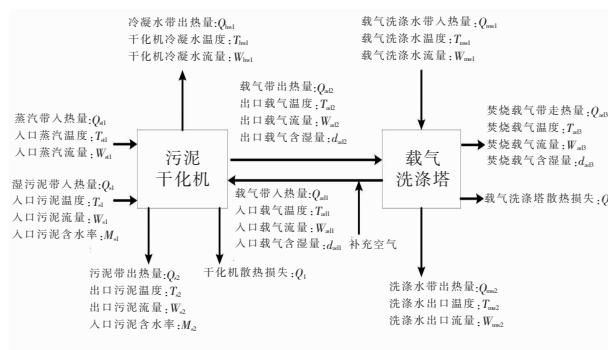


图 2 污泥干化系统质量和能量平衡

Fig. 2 Mass and energy balance diagram of sludge drying system

① 污泥干化机

对于污泥干化机,其能量平衡关系为:

$$Q_{st1} + Q_{s1} + Q_{ad1} = Q_{hw1} + Q_{s2} + Q_{ad2} + Q_1 \quad (1)$$

式中: Q_{st1} 为饱和蒸汽所带热量, kJ/h; Q_{s1} 为湿污泥所带热量, kJ/h; Q_{ad1} 为入口载气所带热量, kJ/h; Q_{hw1} 为冷凝热水所带热量, kJ/h; Q_{s2} 为干污泥所带热量, kJ/h; Q_{ad2} 为出口载气所带热量, kJ/h; Q_1 为干化机热损失, kJ/h。

Q_{st1} 、 Q_{hw1} 分别计算如下:

$$Q_{st1} = W_{st1} H_{st1} \quad (2)$$

$$Q_{hw1} = W_{hw1} H_{hw1} \quad (3)$$

式中: W_{st1} 为饱和蒸汽的质量流量, kg/h; W_{hw1} 为干化机出口冷凝水的质量流量, kg/h, $W_{st1} = W_{hw1}$; H_{st1} 为饱和蒸汽焓, kJ/kg; H_{hw1} 为冷凝水焓, kJ/kg。

Q_{s1} 、 Q_{s2} 计算分别为:

$$Q_{s1} = T_{s1} W_{s1} c_{s1} \quad (4)$$

$$Q_{s2} = T_{s2} W_{s2} c_{s2} \quad (5)$$

$$W_{s2} = W_{s1} \frac{(1 - M_{s1})}{(1 - M_{s2})} \quad (6)$$

式中: T_{s1} 、 T_{s2} 分别为干化前、后污泥温度, °C; W_{s1} 、 W_{s2} 分别为干化前、后污泥的质量流量, kg/h; M_{s1} 、 M_{s2} 分别为干化前、后污泥含水率, %; c_{s1} 、 c_{s2} 分别为干化前、后污泥的比热容, kJ/(kg · °C)。

不同含水率污泥的比热容 c_s 计算如下^[11]:

$$c_s = c_{dr}(1 - M_s) + 4.187M_s \quad (7)$$

式中: c_{dr} 为绝干污泥的比热容, 取常温条件下比热容值 1.3 kJ/(kg · °C); M_s 为污泥的含水率, %。

进、出干化机的载气以及焚烧载气所带热量 Q_{ad1} 、 Q_{ad2} 以及 Q_{ad3} ^[12] 计算分别为:

$$Q_{ad1} = T_{ad1} (W_{da1} c_{da1} + W_{da1} d_{ad1} c_{st1}) + W_{da1} d_{ad1} r_w \quad (8)$$

$$Q_{ad2} = T_{ad2} (W_{da2} c_{da2} + W_{da2} d_{ad2} c_{st2}) + W_{da2} d_{ad2} r_w \quad (9)$$

$$Q_{ad3} = T_{ad3} (W_{da3} c_{da3} + W_{da3} d_{ad3} c_{st3}) + W_{da3} d_{ad3} r_w \quad (10)$$

式中: T_{ad1} 、 T_{ad2} 及 T_{ad3} 分别为干化机进、出口载气以及焚烧载气温度, °C; W_{da1} 、 W_{da2} 以及 W_{da3} 分别为进、出口载气及焚烧载气中干空气量, kg/h; d_{ad1} 、 d_{ad2} 、 d_{ad3} 分别为干化机进、出口载气及焚烧载气的含湿量, kg 水/kg 干空气; c_{da1} 、 c_{da2} 和 c_{da3} 分别为干化机进、出口载气以及焚烧载气温度下的干空气比热容, kJ/(kg · °C); c_{st1} 、 c_{st2} 及 c_{st3} 分别为干化机进、出口载气及焚烧载气温度下的湿蒸汽比热容, kJ/(kg · °C); r_w 为水的汽化潜热, 取 2 500 kJ/kg^[13]。

W_{da1} 、 W_{da2} 、 W_{da3} 计算分别如下:

$$W_{da1} = \frac{W_{ad1}}{(1 + d_{ad1})} \quad (11)$$

$$W_{da2} = \frac{W_{ad2}}{(1 + d_{ad2})} \quad (12)$$

$$W_{da3} = \frac{W_{ad3}}{(1 + d_{ad3})} \quad (13)$$

式中: W_{ad1} 、 W_{ad2} 以及 W_{ad3} 分别为干化机进、出口载气以及焚烧载气的质量流量, kg/h。

② 载气洗涤系统

对于载气洗涤系统, 其能量平衡关系为:

$$Q_{ad2} + Q_{mw1} = Q_{ad1} + Q_{mw2} + Q_{ad3} + Q_2 \quad (14)$$

式中: Q_{mw1} 和 Q_{mw2} 分别为进、出载气洗涤塔的洗涤水所带热量, kJ/h; Q_2 为载气洗涤系统的散热损失, kJ/h。

Q_{mw1} 和 Q_{mw2} 计算分别为:

$$Q_{mw1} = W_{mw1} T_{mw1} c_w \quad (15)$$

$$Q_{mw2} = W_{mw2} T_{mw2} c_w \quad (16)$$

式中: W_{mw1} 和 W_{mw2} 分别为进、出洗涤水的质量流量, kg/h; T_{mw1} 和 T_{mw2} 分别为进、出洗涤水水温, °C; c_w 为水的比热容, 取 4.187 kJ/(kg · °C)。

2.2 污泥焚烧及余热利用系统能量平衡模型

在污泥焚烧及余热利用系统中, 输入物料有入炉污泥(包括干化污泥与脱水污泥)、一次风、二次风(焚烧载气)、干化冷凝水, 输出物料有饱和蒸汽、热水和烟气。根据这些物料的输入输出建立质量和能量平衡图, 具体如图3所示。

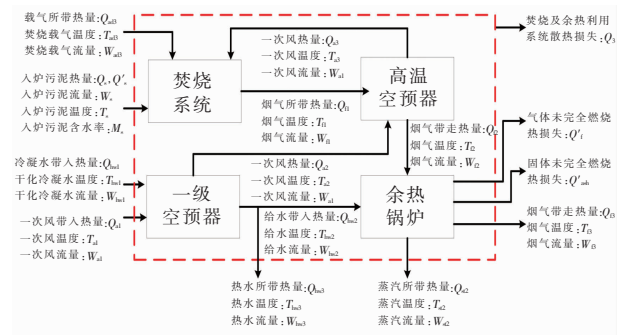


图3 污泥焚烧及余热利用系统质量和能量平衡

Fig.3 Mass and energy balance diagram of sludge incineration and waste heat utilization system

对于污泥焚烧及余热利用系统, 其能量平衡关系为:

$$Q_s + Q'_s + Q_{a1} + Q_{ad3} + Q_{hw1} = Q_{st1} + Q_{st2} + Q_{hw3} + Q'_f + Q'_{ash} + Q_3 \quad (17)$$

式中: Q_s 为入炉污泥的物理显热, kJ/h ; Q'_s 为入炉污泥的收到基发热量, kJ/h ; Q_{a1} 为一次风所带热量, kJ/h ; Q_{B3} 为余热锅炉出口排烟所带热量, kJ/h ; Q_{st2} 为余热锅炉产生蒸汽所带热量, kJ/h ; Q_{hw3} 为干化机冷凝水用于余热锅炉给水后剩余的热水所带热量, kJ/h ; Q'_f 为气体不完全燃烧热量损失, kJ/h ; Q'_{ash} 为固体未完全燃烧热量损失, kJ/h ; Q_3 为焚烧及余热系统散热损失, kJ/h 。

Q'_s 计算如下:

$$Q'_s = W_s E_s \quad (18)$$

式中: E_s 为入炉污泥的收到基低位热值, kJ/kg ; W_s 为入炉污泥的质量流量, kg/h 。

Q_s 计算如下:

$$Q_s = T_s W_s c_s \quad (19)$$

式中: T_s 为入炉污泥的温度, $^{\circ}\text{C}$; W_s 为入炉污泥的质量流量, kg/h ; c_s 为入炉污泥的比热容, 根据式(7)计算。

Q_{a1} 计算如下:

$$Q_{a1} = T_{a1} W_{a1} c_{a1} \quad (20)$$

式中: T_{a1} 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; W_{a1} 为一次风的质量流量, kg/h ; c_{a1} 为 T_{a1} 下的空气比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

来自污泥干化机的冷凝热水经一级空预器换热后产生的热水一部分作为余热锅炉给水回到余热锅炉, 其余部分进入冷凝水箱。 Q_{st2} 、 Q_{hw3} 计算分别为:

$$Q_{st2} = W_{st2} H_{st2} \quad (21)$$

$$Q_{hw3} = (W_{st1} - W_{st2}) H_{hw3} \quad (22)$$

式中: W_{st2} 为余热锅炉蒸汽产生量, kg/h ; H_{hw3} 以及 H_{st2} 分别为一级空预器出口热水焓以及余热锅炉产生的蒸汽焓, kJ/kg 。

Q_{B3} 计算如下:

$$Q_{B3} = I_{B3} W_s \quad (23)$$

式中: I_{B3} 为余热锅炉出口烟气焓, kJ/kg 。

焚烧炉正常运行中排渣量为 0, 因此燃料中未燃尽碳造成的损失在飞灰中, Q'_{ash} 计算如下^[14]:

$$Q'_{ash} = 32\,700 \cdot W_s \cdot \frac{A_{ar}}{100} \cdot \frac{C_{fa}}{100} \quad (24)$$

式中: A_{ar} 为污泥中灰分含量, %; C_{fa} 为余热锅炉出口烟气飞灰含碳量, %。

Q'_f 计算如下:

$$Q'_f = V_{g,d} \cdot (126.4\text{CO} + 108\text{H}_2 + 358.2\text{CH}_4) \cdot (1 - \frac{Q'_{ash}}{Q_{in}}) \quad (25)$$

式中: $V_{g,d}$ 为实际干烟气体积, m^3/h ; CO 、 H_2 、 CH_4 为其在干烟气中的体积分数, %, 通常 H_2 、 CH_4 量很少, 可以忽略; Q_{in} 为输入热量, $Q_{in} = Q_s + Q'_s + Q_{a1} + Q_{ad3} + Q_{hw1}$, 由式(17)可知。

2.3 烟气处理系统能量平衡模型

烟气处理系统主要包括静电除尘器、烟气换热器、布袋除尘器以及烟气洗涤塔四部分, 输入物料主要有余热锅炉出口烟气、洗涤塔中水, 输出物料主要有静电除尘排灰、布袋除尘排灰、洗涤排水以及排烟。根据这些物料的输入输出建立质量和能量平衡图, 如图 4 所示。

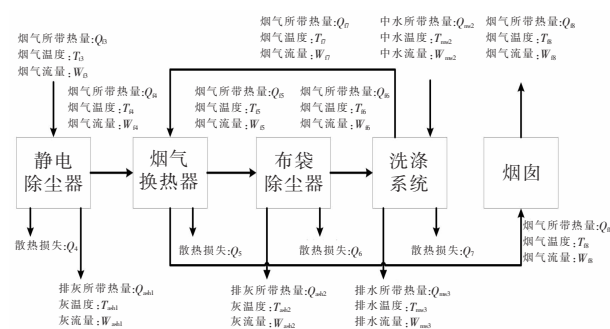


图4 烟气处理系统质量与能量平衡

Fig.4 Mass and energy balance diagram of flue gas treatment system

① 对于静电除尘系统, 其能量平衡关系如下:

$$Q_{B3} = Q_{f4} + Q_{ash1} + Q_4 \quad (26)$$

式中: Q_{f4} 为静电除尘器出口烟气所带热量, kJ/h ; Q_{ash1} 为静电除尘器排灰所带热量, kJ/h ; Q_4 为静电除尘器散热损失, kJ/h 。

Q_{f4} 、 Q_{ash1} 计算分别如下:

$$Q_{f4} = I_{f4} W_s \quad (27)$$

$$Q_{ash1} = c_{ash1} W_{ash1} T_{ash1} \quad (28)$$

式中: I_{f4} 为静电除尘器出口烟气焓, kJ/kg ; c_{ash1} 为静电除尘器排灰比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; T_{ash1} 为静电除尘器排灰温度, $^{\circ}\text{C}$; W_{ash1} 为静电除尘器排灰量, kg/h 。

② 对于烟气换热器系统, 其能量平衡关系如下:

$$Q_{f4} + Q_{f7} = Q_{f5} + Q_{f8} + Q_5 \quad (29)$$

式中: Q_{f5} 为经烟气换热器降温后的烟气所带热量, kJ/h ; Q_{f7} 为洗涤塔后烟气所带热量, kJ/h ; Q_{f8} 为经过烟气换热器升温后的烟气所带热量, kJ/h ; Q_5 为烟气换热器散热损失, kJ/h 。

Q_{f5} 、 Q_{f7} 、 Q_{f8} 计算分别为:

$$Q_{15} = I_{15} W_s \quad (30)$$

$$Q_{17} = I_{17} W_s \quad (31)$$

$$Q_{18} = I_{18} W_s \quad (32)$$

式中: I_{15} 为烟气换热器降温后烟气的焓, kJ/kg ; I_{17} 为洗涤塔后烟气的焓, kJ/kg ; I_{18} 为经过烟气换热器升温后烟气的焓, kJ/kg 。

③ 对于布袋除尘系统,其能量平衡关系如下:

$$Q_{15} = Q_{16} + Q_{\text{ash}2} + Q_6 \quad (33)$$

式中: Q_{16} 为布袋除尘器出口烟气所带热量, kJ/h ; $Q_{\text{ash}2}$ 为布袋除尘器排灰所带显热, kJ/h ; Q_6 为布袋除尘器散热损失, kJ/h 。

Q_{16} 、 $Q_{\text{ash}2}$ 计算分别为:

$$Q_{16} = I_{16} W_s \quad (34)$$

$$Q_{\text{ash}2} = c_{\text{ash}2} W_{\text{ash}2} T_{\text{ash}2} \quad (35)$$

式中: I_{16} 为布袋除尘器出口烟气焓, kJ/kg ; $c_{\text{ash}2}$ 为布袋除尘器排灰比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; $T_{\text{ash}2}$ 为布袋除尘器排灰温度, $^\circ\text{C}$; $W_{\text{ash}2}$ 为布袋除尘器排灰量, kg/h 。

④ 对于洗涤系统,其能量平衡关系如下:

$$Q_{16} + Q_{\text{mw}2} = Q_{17} + Q_{\text{mw}3} + Q_7 \quad (36)$$

式中: $Q_{\text{mw}2}$ 为洗涤水所带热量, kJ/h ; $Q_{\text{mw}3}$ 为烟气洗涤后排水所带热量, kJ/h ; Q_7 为洗涤系统散热损失, kJ/h 。

$Q_{\text{mw}2}$ 、 $Q_{\text{mw}3}$ 计算分别如下:

$$Q_{\text{mw}2} = c_w W_{\text{mw}2} T_{\text{mw}2} \quad (37)$$

$$Q_{\text{mw}3} = c_w W_{\text{mw}3} T_{\text{mw}3} \quad (38)$$

式中: $W_{\text{mw}2}$ 为洗涤水量, kg/h ; $T_{\text{mw}2}$ 为洗涤水水温, $^\circ\text{C}$; $W_{\text{mw}3}$ 为排水水量, kg/h ; $T_{\text{mw}3}$ 为排水水温, $^\circ\text{C}$ 。

3 全系统能量损失分析

该污泥处理工程全系统的能量损失可分为以下三方面:①污泥干化系统能量损失;②污泥焚烧及余热利用系统能量损失;③烟气处理系统能量损失。为进一步分析实际运行中系统能量流向及主要能量损失点,通过现场取样分析样品及收集运行数据,绘出系统运行工艺和能量分布图,并以能量平衡模型计算系统主要的能量损失点,为全系统节能降耗提供方向。该厂共有 2 条生产线,实际运行中 A、B 线会有一定的差异,因此,按照 A、B 线展开系统分析。

3.1 干化系统能量损失分析

污泥干化系统的能量损失有干化机散热损失、干化污泥显热损失、载气洗涤塔散热损失、载气洗涤后排污热损失。工况运行参数及能量损失分布如图

5 所示。

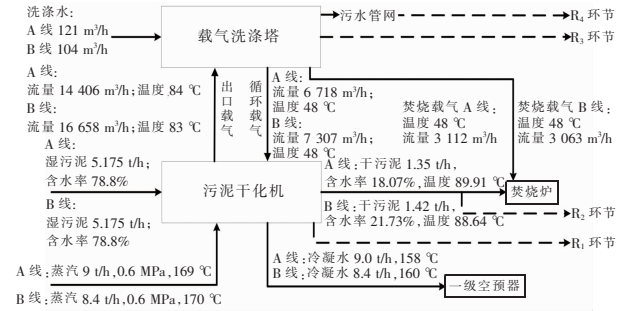


图 5 污泥干化系统运行工艺及能量损失

Fig. 5 Operation process and energy loss of sludge drying system

根据式(1)和(14)可以求出干化机散热损失和洗涤塔散热损失。干化污泥在进入焚烧炉前经过干污泥储仓,期间干化污泥温度下降 10°C 左右,造成干化污泥显热损失,可根据式(5)计算得出。污泥干化过程中最大的能量消耗来源于水分的蒸发,干化机出口 85°C 左右的载气中包含干空气以及水蒸气所带热量,经过洗涤后载气中的水分冷凝进入洗涤水中,载气温度降至 48°C ,洗涤水温由 40°C 上升到 50°C 后进入洗涤塔排水系统,连续排污至污水管网,这部分能量没有收集利用,造成排污热损失。该环节热损失由式(16)计算得出。

3.2 焚烧及余热利用系统能量损失分析

污泥焚烧及余热利用系统能量损失主要包括:固体不完全燃烧热损失,气体不完全燃烧热损失以及系统散热损失。实际工艺运行参数与能量损失点如图 6 所示。

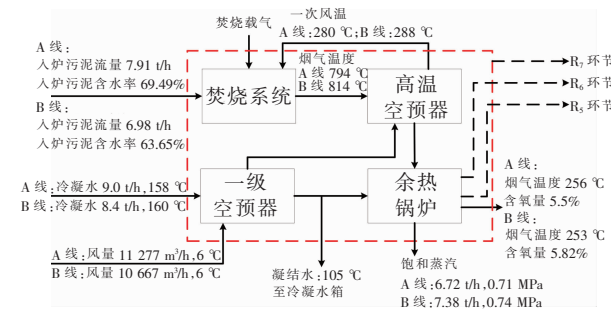


图 6 污泥焚烧及余热利用系统运行工艺及能量损失

Fig. 6 Operation process and energy loss of sludge incineration and waste heat utilization system

实际入炉污泥为干化污泥以及脱水污泥的混合污泥,A、B 两条线的污泥工业元素热值分析结果见表 1(以收到基计)。A、B 线中干化污泥的质量占比

分别为15.33%和26.55%,B线中干化污泥的比例更高,因此入炉污泥的含水率更低,混合热值更高。

表1 入炉污泥的工业分析和元素分析

Tab.1 Proximate and ultimate analysis of sludge as received

项 目	A 线	B 线
工业分析/%	$w(M)$	69.49
	$w(A)$	11.69
	$w(V)$	16.64
	$w(FC)$	2.17
元素分析/%	$w(C)$	10.04
	$w(H)$	1.40
	$w(N)$	1.10
	$w(TS)$	0.34
	$w(O)$	5.94
	$w(S)$	7.08
低位发热量/($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)		2 740
注: M 为湿度, A 为灰分, V 为挥发分, FC 为固定碳, TS 为全硫。		3 705

烟气排放数据取自现场在线监测数据,飞灰含碳量数据取自余热锅炉出口静电除尘器下飞灰数据,具体参数如表2所示。

表2 余热锅炉出口主要烟气参数

Tab.2 Smoke parameters of waste heat boiler outlet

项 目	A 线	B 线
烟气温度/ $^{\circ}\text{C}$	256	253
氧气含量/%	5.50	5.82
二氧化碳含量/%	8.48	8.64
一氧化碳含量/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	21.68	20.29
飞灰含碳量/%	0.61	0.60

对于固体不完全燃烧热损失和气体不完全燃烧热损失主要由焚烧系统的燃烧工况决定,分别由式(24)和(25)可得,焚烧与余热利用系统散热损失与系统部件的设计制造保温相关,可由式(17)求得。

3.3 烟气处理系统能量损失分析

烟气处理系统能量损失主要包括:静电除尘器排灰所带显热,静电除尘器散热损失,烟气换热器散热损失,布袋除尘器排灰所带显热,布袋除尘器散热损失,烟气洗涤后排水所带的热量,洗涤系统散热损失,烟气排烟损失热量。实际工艺运行参数与能量损失点如图7所示。

静电除尘器散热损失、烟气换热器散热损失、布袋除尘器散热损失和洗涤系统散热损失都与系统部件的设计制造保温相关,分别由式(26)、(29)、(33)和(36)求得。静电除尘器排灰所带显热和布袋除尘器排灰所带显热,分别由式(28)和(35)求得,属

于无法利用的显热损失。布袋除尘系统的排烟经洗涤系统后温度大幅下降,同时去除了其中的污染性气体,水喷淋后通过循环泵循环使用,烟气洗涤过程中造成洗涤水显热损失由式(37)和(38)求得。

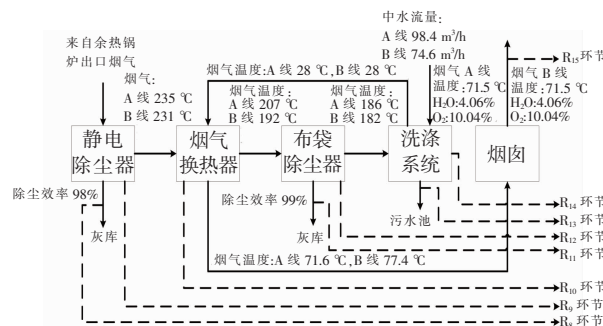


图7 烟气处理系统运行工艺及能量损失

Fig.7 Operation process and energy loss of flue gas treatment system

3.4 节能降耗建议

根据污泥干化焚烧系统的质量与能量平衡模型及运行工艺参数,计算出全系统能量损失分析结果,如图8所示。

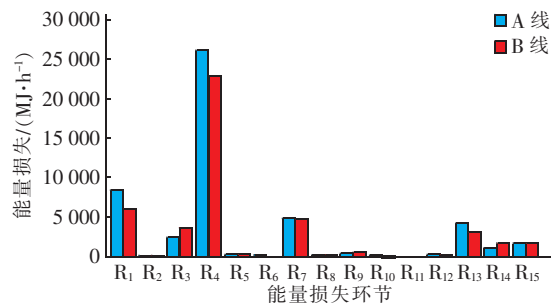


图8 全系统能量损失分析结果

Fig.8 Energy loss analysis results of system-wide

由图8可知,A、B两线的能量损失图相似,主要能量损失分别为载气洗涤排污热损失、污泥干化机散热损失、焚烧炉及余热利用系统散热损失、洗涤水显热损失、载气洗涤塔散热损失、洗涤系统散热损失以及排烟热损失。

污泥干化机散热损失在A、B线中都很大,需对干化机进行全面检查,以确定是否存在隔热保温层破损、干化机叶片破损导致蒸汽外泄等现象,同时可通过运行工况调节以提高干化热效率,减少干化机热损失。针对焚烧及余热利用系统散热损失,除了检查系统管道漏风并加强设备保温外,也可通过调整焚烧炉运行工况,提高运行效率以减少散热损失。

污泥干化过程中蒸发的水分主要以水蒸气的形

式存在于载气中,载气经过洗涤水喷淋后将热量传递给洗涤水,洗涤水没有经过利用全部排至污水管网,造成载气洗涤排污热损失。由于载气洗涤水量大,洗涤后温度为40~50℃的洗涤水没有经过循环利用或者能量回收直接排至污水管网,使得这部分能量损失在所有能量损失中占比最大,占总能量损失的50%左右。载气洗涤水的主要目的是为了冷凝干化尾气中大量的水蒸气,因此可以通过对干化机出口85℃左右的载气进行余热利用,在冷凝载气中水蒸气的同时还可以吸收载气余热,节省载气洗涤水量,从而大大减少载气洗涤排污热损失。

烟气洗涤水显热损失也较大,但由于洗涤水中含有腐蚀性物质,且水温较低难以直接通过换热器进行余热利用,可考虑在未进入洗涤塔前进行烟气余热利用,该部分烟气的温度在180℃左右,可用于一次风的预热。

载气洗涤塔散热损失、洗涤系统散热损失都属于散热损失,与设备的安装制作等相关,可通过检查设备保温及漏风等情况,做好保温隔热措施以降低该部分热量损失。排烟损失尽管数字较大,但是排烟温度不宜过低,此部分余热难以利用。

4 结论

① 通过建立能量平衡模型对某污泥干化焚烧工程进行详细的质量和能量分析计算,结合现场运行工况数据,分析确定了该工程主要的能量损失分别为载气洗涤排污热损失、污泥干化机散热损失、焚烧炉及余热利用系统散热损失和洗涤水显热损失等,为全系统的节能降耗提供了方向。

② 载气洗涤排污热损失最大,提出通过干化载气的余热利用来减少载气排污热损失。建议全面检查干化设备以排除干化设备叶片是否存在破损现象,同时通过对运行工况调节来提高干化机和焚烧及余热利用系统效率,从而减少散热损失。提出通过利用洗涤塔前烟气余热从而减少烟气洗涤水显热损失。

参考文献:

- [1] 孙慧,王佳伟,吕竹明,等. 北京某大型城市污水处理厂节能降耗途径和效果分析[J]. 中国给水排水, 2019,35(16):31-34.
SUN Hui, WANG Jiawei, LÜ Zhuming, *et al.* Analysis of approaches and effects of energy saving and consumption reduction in a large scale wastewater treatment plant in Beijing[J]. China Water & Wastewater, 2019,35(16): 31-34(in Chinese).
- [2] 陈少卿,王飞,池涌,等. 污泥干燥焚烧工程系统质能平衡分析[J]. 环境工程学报, 2017, 11(1):515-521.
CHEN Shaoqing, WANG Fei, CHI Yong, *et al.* Analysis on mass and energy balance of sludge drying and incineration system [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(1):515-521 (in Chinese).
- [3] 胡维杰,周友飞,陈汝超,等. 石洞口污水处理厂污泥干化焚烧二期工艺要点解析[J]. 中国给水排水, 2019,35(16):41-47.
HU Weijie, ZHOU Youfei, CHEN Ruchao, *et al.* Analysis of process design of the sludge drying and incineration project phase II in Shidongkou WWTP[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(16):41-47 (in Chinese).
- [4] LI B, WANG F, CHI Y, *et al.* Study on optimal energy efficiency of a sludge drying-incineration combined system[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2014, 16(4):684-692.
- [5] 刘永付,王飞,吴奇,等. 大型燃煤电站锅炉协同处置污泥的试验研究[J]. 能源工程, 2013(6):64-69.
LIU Yongfu, WANG Fei, WU Qi, *et al.* Experimental study of sludge disposal in a large coal-fired power plant [J]. Energy Engineering, 2013(6):64-69 (in Chinese).
- [6] LI B, WANG F, CHI Y, *et al.* Adhesion and cohesion characteristics of sewage sludge during drying[J]. Drying Technology, 2014, 32(13):1598-1607.
- [7] CHEN S Q, WANG F, MILHE M, *et al.* Experimental and theoretical research on agitated contact drying of sewage sludge in a continuous paddle dryer[J]. Drying Technology, 2016, 34(16):1979-1990.
- [8] FENG Y H, YU T C, CHEN D Z, *et al.* The effect of hydrothermal treatment on steam gasification behavior of sewage sludge: reactivity and nitrogen emission[J]. Energy & Fuels, 2018, 32(1):581-587.
- [9] 李博. 污泥高效干化方法及干化焚烧系统的优化运行研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
LI Bo. Study on Efficient Sludge Drying Method and Optimal Energy Efficiency of Sludge Drying-incineration Combined System[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014(in Chinese).
- [10] 李博,王飞,朱小玲,等. 污泥干化焚烧联用系统最佳

- 运行工况研究[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(8): 29-33.
- LI Bo, WANG Fei, ZHU Xiaoling, *et al.* Study on the optimal operation condition for sludge drying-incineration combined system [J]. Environmental Pollution and Prevention, 2014, 36(8): 29-33 (in Chinese).
- [11] 严建华, 王飞, 池涌, 等. 污泥无害化能源化热处置技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- YAN Jianhua, WANG Fei, CHI Yong, *et al.* Heat Disposal Technology for Harmless Energy of Sludge [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016 (in Chinese).
- [12] 陈少卿. 污泥在桨叶干燥机内干燥的模拟和试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- CHEN Shaoqing. Modelling and Experimental Research on Sludge Drying in Paddle Dryer [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018 (in Chinese).
- [13] 容銮恩, 袁镇福, 刘志敏, 等. 电站锅炉原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- RONG Luan'en, YUAN Zhenfu, LIU Zhimin, *et al.* Principle of Boiler [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009 (in Chinese).
- [14] 刘弘睿. 工业锅炉技术标准规范应用大全[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- LIU Hongrui. Application of Technical Standards for Industrial Boiler [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000 (in Chinese).
-
- 作者简介:** 王丽花 (1973 -), 女, 山西朔州人, 博士, 高级工程师, 主要从事污泥处理处置技术研究和管理工作。
- E-mail:** wanglihua73@aliyun.com
- 收稿日期:** 2019-10-18
- 修回日期:** 2019-11-11

(编辑: 丁彩娟)

(上接第28页)

期改造计划, 中央公园以北大部分雨水排往芳村大道南新建的 5 m × 2 m 渠箱。

控规中的雨水工程规划按远期理想目标考虑, 以最短距离坡向水体, 实际上南侧除了团结路外, 其他道路近期无法与规划十九路接通, 近期雨水需重新组织收集至团结路再排入东塍涌。

③ 细化次支系统

综合分析各管线专项规划、相关重点项目、地铁、地下空间等多个因素, 统筹市政管线平面、竖向空间布局, 明确每条市政道路上的管线布置, 形成地下管线综合规划建设指引。虽然在规划层面提出地面及地面以下深度 8 m, 市政管线具有优先权^[1], 但是现实中仍有地下交通、地下空间等在浅层地下空间建设, 经常会与现状管线冲突, 带来既有管线的迁改问题, 对于重要节点涉及管线迁改应进行方案比选, 在规划层面提出实施性建议。

3 结论与建议

随着城市更新项目的推进, 更强调规划落地实施及成本核算, 控制性详细规划因市政规划深度、规

划周期的限制, 未考虑建设时序, 不能有效指导下一步工程设计, 无法提供具备参考性的成本估算, 因此编制面向实施的 3 地下管线综合专项规划是非常有必要的。广钢新城是广州市第一个开展的“交通、景观、市政”三位一体实施性专项规划, 可为广州市其他重点地区实施性专项规划提供借鉴参考。

参考文献:

- [1] 陈克坚, 郑承军, 郭树河. 广州市地下管线综合规划探讨[J]. 中国给水排水, 2017, 33(24): 40-43.
- CHEN Kejian, ZHENG Chengjun, GUO Shuhe. Discussion on Guangzhou comprehensive planning of underground pipelines [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(24): 40-43 (in Chinese).

作者简介: 吴娇 (1982 -), 女, 江西萍乡人, 硕士, 高级工程师, 从事市政规划工作。

E-mail: 27169068@qq.com

收稿日期: 2019-06-04

修回日期: 2019-12-30

(编辑: 丁彩娟)