

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.11.020

污泥流化床焚烧烟气污染物排放特性研究

朱运涛, 林莉峰, 赵林辉

(上海市工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

摘要: 结合石洞口污泥处理二期工程的鼓泡流化床焚烧炉工艺设计以及调试情况,通过研究不同工况下半干污泥的焚烧特性,获得焚烧过程中产生的烟气污染物 NO_x 、 SO_2 、CO的排放数据,分析了一次风量、污泥给料量和污泥含水率对烟气污染物排放特性的影响,并对焚烧炉性能考核期间CEMS在线检测系统检测到的各烟气污染物指标与《生活垃圾焚烧大气污染物排放标准》(DB 31/768—2013)进行比较,结果显示,烟气污染物全部达标。同时,通过研究污泥焚烧工艺的运行特性和烟气污染物排放特性,给出了污泥焚烧炉燃烧工况控制的建议。

关键词: 污泥焚烧; 鼓泡流化床; 烟气污染物

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)11-0115-06

Emission Characteristics of Pollutants in Flue Gas from Sludge Fluidized Bed Incineration Process

ZHU Yun-tao, LIN Li-feng, ZHAO Lin-hui

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

Abstract: The design and debugging of a bubbling fluidized bed incinerator in Shidongkou sludge treatment phase II project were analyzed. The incineration characteristics of semi-dry sludge under different working conditions were investigated, and the emission data of pollutants such as NO_x , SO_2 and CO in the flue gas produced in the incineration process were obtained. The influence of primary air volume, sludge feed volume and sludge moisture content on emission characteristics of the pollutants in the flue gas was analyzed. The pollutants indicators of flue gas detected by CEMS online detection system during the performance evaluation period were compared with those specified in *Emission Standard of Air Pollutants for Municipal Solid Waste Incineration* (DB 31/768-2013), and the results showed that all the pollutants in the flue gas conformed to the requirements of the standard. Based on the operation characteristics of the sludge incineration process and the emission characteristics of the pollutants in the flue gas, the suggestions on control of combustion condition in sludge incinerators was given.

Key words: sludge incineration; bubbling fluidized bed; flue gas pollutants

污泥含水量高、易腐烂、有强烈的臭味,同时还可能含有重金属和难降解的有机污染物等有害成分,污泥的处理与处置一直是国内水环境治理领域的一个难点,污泥处理和处置的最终目的是稳定化、

减量化、无害化与资源化。上海市石洞口污泥处理二期工程采用了目前国际上主流的焚烧处理工艺。污泥焚烧利用了污泥中的能量,释放的热量被余热锅炉回收,焚烧时的温度可以达到 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$,可使污泥

基金项目: 上海市科委基金资助项目(20230730100)

中的可燃成分充分燃烧、有害成分充分分解,焚烧后最终成为稳定的灰渣,可以实现脱水污泥90%以上的减量,是一种最彻底的污泥处理方式^[1]。

笔者通过石洞口污泥处理二期工程2020年6月和9月两次调试考核过程中获得的烟气污染物排放数据,研究一次风量、污泥给料量、污泥含水率对烟气污染物排放特性的影响,以掌握半干污泥焚烧运行和污染物排放特性,为污泥流化床焚烧技术的深入研究提供有益参考。

1 工程整体设计参数

石洞口污泥处理二期工程主要处理石洞口污水处理厂与泰和污水处理厂产生的污泥,建设内容包括新建污泥脱水、干化、焚烧、烟气处理及相关配套设施,共设污泥脱水线3条、污泥干化处理线4条、污泥焚烧线3条。污泥处理规模为128 t/d(以干质量计,下同)。采用“脱水+干化+焚烧+烟气处理”工艺,其中,石洞口污水处理厂的污泥浓缩脱水后,再经干化进入焚烧系统,处理量为20 t/d;泰和污水处理厂含水率在40%以下的污泥产量为108 t/d,通过卡车运至本工程半干污泥接收坑,通过半干污泥输送设备输送至焚烧单元进行焚烧处理。污泥干化焚烧处理工艺流程如图1所示。

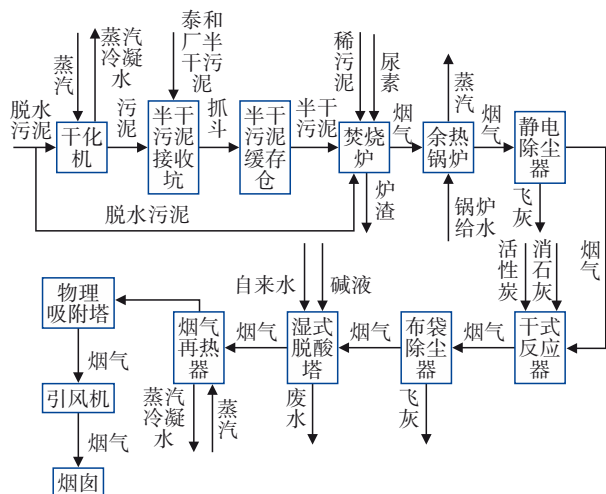


图1 污泥干化焚烧处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of sludge drying and incineration treatment process

2 焚烧系统工艺设计

流化床焚烧炉是整个工程的核心,储存于半干污泥缓存仓中的污泥与含水率为80%左右的湿污泥通过污泥给料机混合后进入焚烧炉。污泥进入流化床后,与一次风机送入焚烧炉中的经预热器预

热的空气充分接触,同时被流化的砂层释放的大量热量加热,实现污泥快速、完全燃烧。污泥焚烧后的灰大部分被烟气携带走,后经除尘器捕集。所产生的850℃高温烟气排出并进入余热锅炉,产生蒸汽用于污泥的干化。污泥焚烧系统工艺流程如图2所示。焚烧炉结构如图3所示。

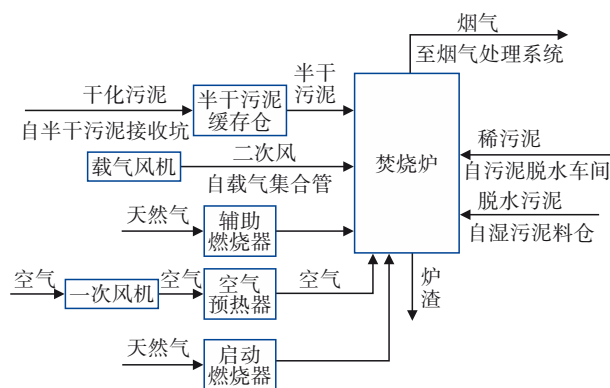


图2 污泥焚烧系统工艺流程

Fig.2 Flow chart of sludge incineration system

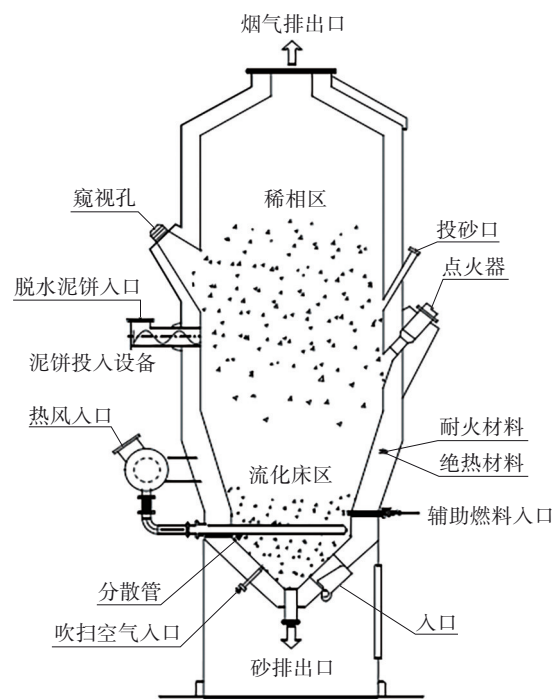


图3 流化床焚烧炉示意

Fig.3 Schematic diagram of fluidized bed incinerator

焚烧炉是立式圆柱钢壳体,分为稀相区和流化床区。每台焚烧炉床层上部设置两套启动燃烧器用于焚烧炉启动时的升温,使用天然气作为燃料,底部设有辅助燃烧系统,配有8支辅助燃烧器,用于运行中炉温的调节。布风管插入流化床区下部,空

气喷嘴均匀地分布在布风管下方。燃烧空气(用作流化空气)通过布风管进入到下部流化床。炉底设有排渣设施,石英砂和燃烧残渣从焚烧炉底部排出。污泥给料机将脱水污泥和干污泥送入焚烧炉流化区,并与焚烧炉底部送入的燃烧空气充分接触燃烧。流化区的温度可达到800~870℃。待充分燃烧后,燃烧气体和飞灰从焚烧炉的顶部排出。焚烧炉顶部设有冷却水喷枪和喷尿素系统,用于防止焚烧炉超温和减少氮氧化物的产生。

本工程中污泥焚烧系统的设计有如下特点:

① 污泥热值低、含水率高、性质波动大且难以燃尽。鼓泡流化床焚烧炉最大的特点是底部流化砂床有着相当大的热容量,在焚烧炉内的高温条件下,污泥可以被完全焚烧,燃烧室烟气(约850℃)停留时间 ≥ 2 s,同时抑制了二噁英的产生。

② 焚烧炉锥形流化区的设计,使稳定的流化状态得以实现,不会形成燃烧死角。其中,布风管设计形式简单、维修方便,保证了砂床的流动均匀性及合理的粒径分布。在实际运行过程中发现,焚烧炉正常流化燃烧时,布风管磨损和堵塞情况极少,炉渣和砂石也容易从炉底排出。

③ 全厂污泥储存和输送的设施设备通过臭气收集系统的抽吸形成负压,防止臭味扩散。臭气作为一次供风,部分干化不凝气作为二次供风,通过高温焚烧的方式实现高效除臭。由于焚烧炉烟气温度在850℃左右,臭气成分可以被有效去除。

④ 采用具有耐磨、耐热特性的耐火材料作为内衬,线性膨胀系数小,可以避免炉内温差伸缩而导致衬砌材料的脱落。

3 污泥特性及焚烧烟气污染物

3.1 污泥特性

该工程的焚烧炉进口混合污泥的设计热值:干燥基低热值约为10.8 MJ/kg,干燥基高热值约为19.9 MJ/kg。污泥特性见表1。

表1 污泥特性

Tab.1 Characteristics of sludge

项 目	高位发热量/ (MJ·kg ⁻¹)	污泥组成/%					
		灰分	C	H	O	N	S
低热值污泥	10.8	50.56	27.94	3.76	12.50	4.14	1.10
一般工况污泥	13.5	44.66	30.82	4.40	14.18	5.17	0.76
高热值污泥	19.9	24.38	44.20	6.17	17.85	5.26	2.14

3.2 焚烧烟气中的典型污染物

本研究主要通过对焚烧过程中烟气成分的在线检测,分析烟气污染物中CO、NO_x、SO₂的含量变化情况,研究一次风量、污泥含水量、污泥给料量等因素对烟气污染物的影响。

NO_x的生成机理:污泥焚烧过程中,NO_x的来源主要有两个,污泥所含氮元素氧化燃烧产生和空气中的氮在高温燃烧时与氧气发生反应产生^[2]。

SO₂的生成机理:污泥中所含的硫发生氧化反应可直接生成SO₂,而发生还原反应时,首先分解成H₂S,然后再氧化生成SO₂,部分SO₂会转化成SO₃。SO₃的生成量除与污泥含硫量有关外,主要与烟气中的氧浓度有关,降低剩余氧的浓度可使SO₃转化率降低^[2]。

CO的生成机理:污泥焚烧烟气中的CO通常是由污泥中含碳化合物不充分燃烧产生,其浓度由燃烧工况决定,因此CO含量通常作为判别燃料是否完全燃烧的指标。如果对污泥燃烧过程进行良好的控制,使其燃烧过程中具备充足的氧气、充分的混合,以及足够高的温度和较长的滞留时间,可实现CO的低指标排放^[3]。

焚烧产生的烟气污染物应达到《生活垃圾焚烧大气污染物排放标准》(DB 31/768—2013),具体指标限值如下:CO为100 mg/m³(小时均值)或50 mg/m³(日均值),SO₂为100 mg/m³(小时均值)或50 mg/m³(日均值),NO_x为250 mg/m³(小时均值)或200 mg/m³(日均值),以上均为标准状态下的数值。

4 焚烧烟气污染物的影响因素分析

4.1 一次风量的影响

本工程中焚烧炉的一次风大部分为半干污泥接收坑内的空气,通过一次风机进入焚烧炉作为燃烧空气,设计一次风量为7 500~16 000 m³/h。2020年6月,进炉干污泥量为62 t/d,污泥综合含水率为53%,此时NO_x排放指标良好,炉内未投用SNCR,湿式脱酸塔碱液投加量基本保持不变,在此条件下,污泥流化床焚烧温度、NO_x、SO₂、CO和余热锅炉出口氧含量随一次风量的变化如图4所示。

从图4可以看出,在污泥给料量和污泥含水率不变的条件下,随着一次风量的增加,焚烧温度先增加而后趋于平稳,烟气中的氧含量变大;NO_x和SO₂的排放量先逐渐增加而后趋于平稳。经分析认

为:在污泥给料量稳定的条件下,由于一次风量增加,导致炉内的氧含量变大,而使得CO、C等还原性物质的含量减少,因而 NO_x 的生成反应增强,从而使得 NO_x 的排放量增加。

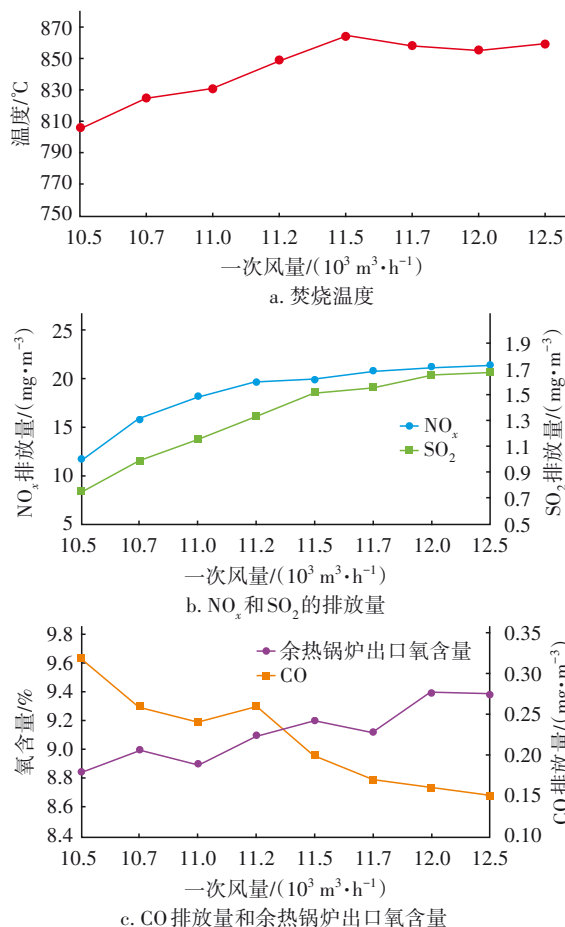


图4 一次风量对污泥焚烧烟气污染物的影响

Fig.4 Effect of primary air volume on flue gas pollutants in sludge incineration process

综上,一次风量不可一直增大,非但不能提高焚烧温度,还会使一次风机出力增大,加快设备磨损,将风量控制在11 200~11 700 m^3/h ,焚烧温度在850℃左右,能保证半干污泥充分燃烧,根据烟气排放标准, NO_x 和 SO_2 也能稳定达标排放。

4.2 污泥给料量的影响

本工程单台焚烧炉考核处理量为57 t/d,在现场调试运行过程中处理量范围为40~85 t/d,可以根据实际燃烧工况适时调节污泥给料量以保持炉内燃烧稳定。在2020年9月一次风量为11 550 m^3/h 、污泥综合含水率为46%的条件下,不同半干污泥给料量对污泥流化床焚烧温度、 NO_x 、 SO_2 、CO和余热锅炉

出口氧含量的影响如图5所示。

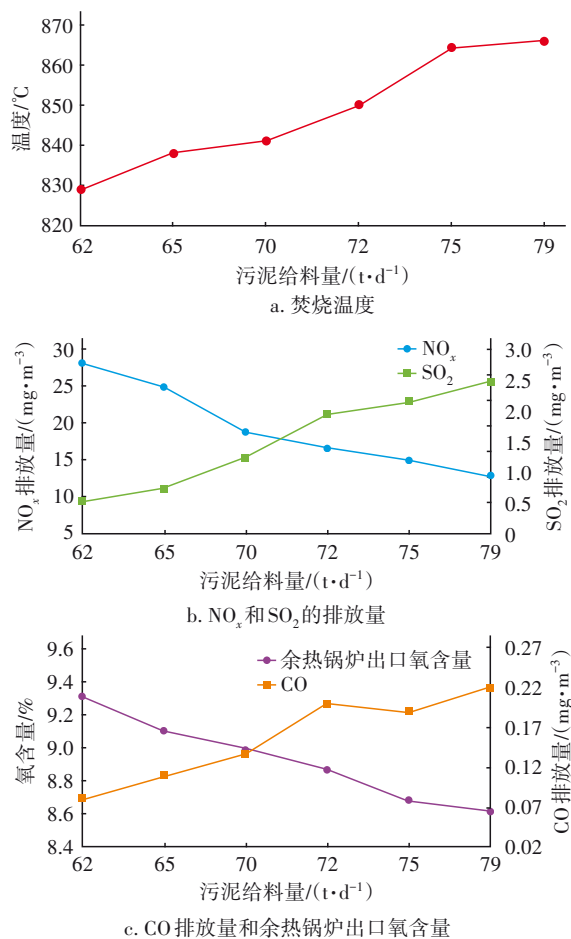


图5 污泥给料量对污泥焚烧烟气污染物的影响

Fig.5 Effect of sludge feed volume on flue gas pollutants in sludge incineration process

从图5可以看出,在一次风量和污泥含水率不变的条件下,随着污泥给料量的增加, NO_x 排放量逐渐减少, SO_2 排放量逐渐增加。

经分析认为:随着污泥给料量的增加,燃料燃烧耗氧量增加,沿炉膛高度的氧量减少,使得CO、C等还原性物质含量增加,CO和C的还原反应增强,从而使得 NO_x 的排放量减少。而随着污泥给料量的增加,进入炉内的有机硫增加,使得烟气中的 SO_2 含量呈上升趋势。

4.3 污泥含水率的影响

本工程中焚烧炉的设计污泥入炉含水率为30%~65%,在一次风量为11 300 m^3/h 和污泥给料量为59 t/d的条件下,不同污泥含水率对污泥流化床焚烧温度、 NO_x 、 SO_2 、CO和余热锅炉出口氧含量的影响如图6所示。

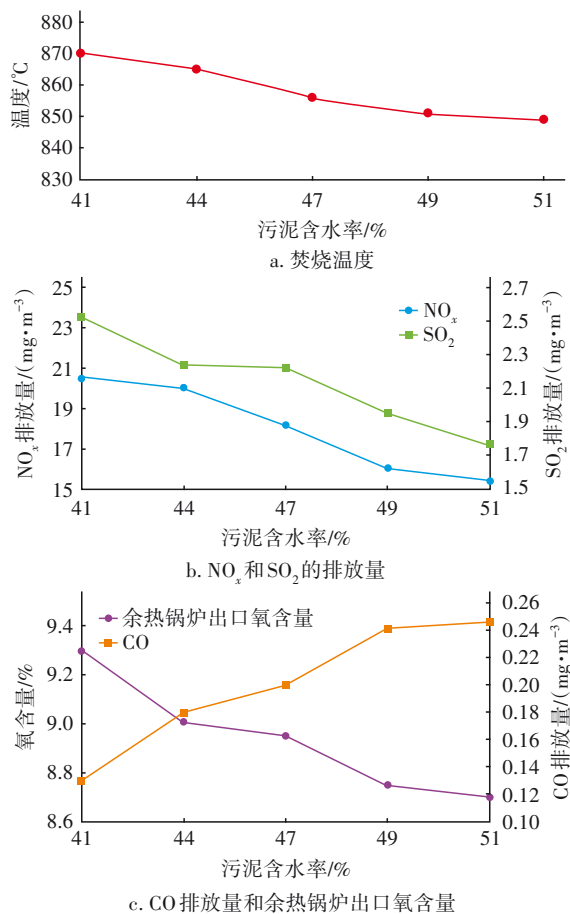


图6 污泥含水率对污泥焚烧烟气污染物的影响

Fig.6 Effect of sludge moisture content on flue gas pollutants in sludge incineration process

由图6可以看出,在一次风量和污泥给料量不变的条件下,随着污泥含水率的增加,焚烧炉温度呈现逐渐下降的趋势,余热锅炉出口的氧含量亦呈下降的趋势,CO排放量逐渐增加,NO_x和SO₂排放量减少。

经分析认为:污泥入炉含水率增加,水分的汽化会吸收炉内的热量,致使炉温下降;物料燃烧不充分,使得CO生成量增加,污泥含水率的提高,使得气化反应和还原反应极易发生,因此一定程度上抑制了NO_x的生成,并且促使已经生成的NO_x发生还原反应,而且由于大量水分蒸发形成水蒸气,也减少了NO_x生成所需要的O₂含量^[4]。同时,由于炉内水分的增加,导致烟气总量增加,也造成了烟气中SO₂含量的降低。

4.4 焚烧烟气污染物实际排放情况分析

本工程于2020年6月和9月分别对焚烧炉进行性能考核,根据可行性研究报告批复和工程合同文件,焚烧产生的烟气污染物应达到《生活垃圾焚烧大气污染物排放标准》(DB 31/768—2013),考核期间采用CEMS在线检测系统检测各烟气污染物指标,并请第三方监理单位实时监督,结果如表2~4所示。

从表2~4可以看出,参照DB 31/768—2013标准,本工程中的3条污泥焚烧线产生的烟气污染物都可以达标排放。

表2 焚烧A线的烟气污染物排放情况

Tab.2 Flue gas emission of incineration line A

mg·m⁻³

项 目	烟气污染物的日均值/最大小时均值							
	排放限值	9月4日	9月5日	9月6日	9月7日	9月8日	9月9日	9月10日
颗粒物	10/20	0.17/0.20	0.19/0.20	0.36/0.40	0.25/0.60	0.32/0.50	0.30/0.40	0.34/0.60
HCl	10/50	0.34/0.40	0.15/0.50	0.49/0.90	0.50/0.90	0.35/1.20	0.82/2.70	1.27/2.20
SO ₂	50/100	2.20/36.2	1.99/23.4	1.70/7.80	2.76/39.0	1.23/18.1	1.61/9.50	0.19/0.70
NO _x	200/250	21.5/62.2	29.9/59.5	36.8/75.0	54.9/79.8	46.9/84.1	52.1/68.6	52.5/79.0
CO	50/100	0.28/2.10	0/0.10	1.08/2.20	0/0.20	0.01/0.10	0.01/0.20	0.01/0.20

表3 焚烧B线的烟气污染物排放情况

Tab.3 Flue gas emission of incineration line B

mg·m⁻³

项 目	烟气污染物的日均值/最大小时均值							
	排放限值	9月4日	9月5日	9月6日	9月7日	9月8日	9月9日	9月10日
颗粒物	10/20	0.27/3.20	0.19/2.20	0.56/4.70	0.75/1.60	0.32/0.50	0.20/0.90	0.24/1.60
HCl	10/50	0.24/5.40	0.45/1.60	0.12/0.80	0.50/3.20	0.25/1.20	0.80/2.90	1.40/2.90
SO ₂	50/100	6.20/29.7	5.90/23.4	1.80/9.80	2.90/38.6	3.80/38.1	1.90/9.50	0.30/5.70
NO _x	200/250	30.5/72.2	15.8/29.5	36.8/75.0	54.9/79.8	29.9/84.1	42.2/78.6	17.5/49.0
CO	50/100	0.28/0.40	0.10/0.40	1.08/2.20	0/0.20	0/0.30	0.06/0.30	0.03/1.20

表4 焚烧C线的烟气污染物排放情况
Tab.4 Flue gas emission of incineration line C

mg·m⁻³

项 目	烟气污染物的日均值/最大小时均值							
	排放限值	6月22日	6月23日	6月24日	6月25日	6月26日	6月27日	6月28日
颗粒物	10/20	0.46/0.65	0.43/0.70	0.36/0.40	0.33/0.60	0.39/0.50	0.30/0.40	0.30/0.40
HCl	10/50	0.31/0.50	0.39/0.60	0.79/3.90	0.50/0.90	0.45/1.20	0.41/0.70	0.54/0.80
SO ₂	50/100	2.20/36.2	1.99/23.4	0.70/6.80	2.76/49.0	1.23/18.1	0.61/6.50	0.19/0.70
NO _x	200/250	51.5/82.2	39.9/79.5	46.8/65.0	54.9/89.8	46.9/84.1	50.1/66.6	52.5/89.0
CO	50/100	0.03/0.40	0.01/0.10	1.10/3.20	0.01/0.20	0.01/0.10	0.01/0.20	0.01/0.20

5 结论和建议

① 本工程结合上海特大型城市的实际情况,选择了减量化最彻底的污泥干化焚烧工艺。鼓泡流化床是目前国内外主流的污泥焚烧炉型,在本工程上的成功应用表明其能够很好地适应市政污泥的焚烧特性,确保了污泥的稳定和完全燃烧。在调试考核期间,通过CEMS在线检测系统检测各烟气指标,烟气污染物可稳定达到排放标准。

② 在污泥给料量和含水率稳定的条件下,当一次风量在11 200~11 700 m³/h范围时,焚烧炉温度能稳定保持在850℃左右,此时,再增加一次风量,温度趋于平稳,但会增加焚烧炉周边的一次风机和空预器出力,加快设备磨损和老化。

③ 在一次风量和污泥含水率稳定的条件下,随着污泥给料量的增加,NO_x生成量逐渐减少,SO₂生成量逐渐增加。增大污泥给料量,炉内含氧量降低,CO含量增加,造成污泥的不充分燃烧,同时,增大给料量也要防止炉内超温现象的发生。

④ 在一次风量和污泥给料量稳定的条件下,随着污泥含水率的增加,大量水蒸气生成,引起炉温下降,含氧量降低,炉内燃烧工况波动,NO_x生成量呈下降趋势,SO₂生成量亦逐渐下降。此时,污泥含水率应保持稳定,避免波动太大而引起炉内燃烧的扰动。

⑤ 在污泥焚烧过程中,根据燃烧工况的变化,实时进行风量、给料量和入炉污泥含水率的调整,才能保证燃烧的稳定,确保相关设备的稳定运行。

参考文献:

- [1] 杨新海,张辰.上海市石洞口城市污水处理厂污泥干化焚烧工程[J].给水排水,2003,29(9):19-22.
YANG Xinhai, ZHANG Chen. Sludge incineration in Shidongkou Wastewater Treatment Plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2003, 29(9): 19-22 (in Chinese).
- [2] 姬鹏.市政污泥流化床焚烧试验研究[D].上海:上海交通大学,2009.
JI Peng. Experimental Research of Incineration of Municipal Sewage Sludge in a Circulation Fluidized Bed [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009 (in Chinese).
- [3] 许洲.上海石洞口污水厂污泥处置系统的调试[J].中国给水排水,2005,21(12):98-99.
XU Zhou. Commissioning of sludge disposal system of Shanghai Shidongkou Municipal Wastewater Treatment Plant [J]. China Water & Wastewater, 2005, 21(12): 98-99 (in Chinese).
- [4] 周法.污泥焚烧污染物排放及灰渣理化特性研究[D].杭州:浙江大学,2012.
ZHOU Fa. Study on Pollutant Emissions from Sludge Combustion and Physico-chemical Properties of Ash and Slag [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012 (in Chinese).

作者简介:朱运涛(1991-),男,河南郑州人,硕士,工程师,研究方向为污泥的处理与处置。

E-mail: zhuyuntao@smedi.com

收稿日期:2021-05-26

修回日期:2021-08-04

(编辑:刘贵春)