

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.08.012

# 市政污泥独立焚烧项目烟气处理工艺设计

宋世琨, 杨巍, 刘波, 郭韵, 李亮  
(中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610084)

**摘要:** 通过污泥泥质对焚烧烟气中的主要污染物,即颗粒物、 $\text{NO}_x$ 、酸性气体、重金属的初始设计浓度进行分析预测,结合项目需执行的烟气排放标准,对不同污染物的去除率提出要求。针对不同污染物,考虑其特性、去除率需求和运行成本,选择最经济合理的烟气处理工艺。结合国内处于运行状态的污泥焚烧项目所采用的烟气净化工艺,提出适用于市政污泥独立焚烧项目的烟气处理工艺技术路线,为未来更多类似项目的工艺设计提供参考。

**关键词:** 污泥焚烧; 烟气处理; 工艺设计

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)08-0070-05

## Design of Flue Gas Treatment Technology for Municipal Sludge Independent Incineration Project

SONG Shi-kun, YANG Wei, LIU Bo, GUO Yun, LI Liang  
(Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu 610084, China)

**Abstract:** This paper introduced the flue gas emission standards for domestic sludge incineration project, predicted the initial design concentration of major pollutants such as particulate matter,  $\text{NO}_x$ , acidic gas and heavy metal in incineration flue gas according to sludge component, and proposed the removal rates of different pollutants in combination with the emission standards to be implemented in the project. For different pollutants, the most economical and reasonable flue gas treatment process was selected by considering its characteristic, removal rate and operating cost. The flue gas treatment technologies suitable for municipal sludge independent incineration projects were proposed based on the flue gas treatment technology being applied in domestic sludge incineration projects. The results aim to provide reference for the process design of more similar projects in the future.

**Key words:** sludge incineration; flue gas treatment; process design

作为一种彻底的污泥减量化措施,市政污泥独立焚烧项目近年来得到了快速的发展,逐步成为国内大中型城市污泥处理的主要方式之一,目前已在上海、成都、盐城等地建成了一批代表性项目。污泥焚烧过程中的主要污染物是其在燃烧中排放的烟气,国内目前缺少针对污泥独立焚烧的相关标准,已建的污泥独立焚烧项目主要参照国家及地方垃圾焚烧的排放要求,但污泥焚烧产生的烟气污染

物的特点与垃圾焚烧项目有所不同,因此针对污泥焚烧制定专门的排放标准十分必要。由于各地的环境容量、排放标准及建设标准不同,各个项目采用的烟气处理工艺也有所差异,且国内尚无针对污泥焚烧烟气处理的工艺选择指南,大多只能参考类似项目经验,因此项目设计时需从污泥焚烧中烟气污染物的特点出发,综合考虑选择适用于此类项目的烟气处理工艺。

## 1 污泥焚烧烟气特点

### 1.1 烟气中主要污染物种类

污泥焚烧烟气中的污染物主要来源于污泥自身成分。市政污泥中含有各种有机物、硫化物、氯化物等,在焚烧过程中,大部分有机物在焚烧炉高温条件下分解为 $\text{CO}_2$ 、水蒸气等无害物质,无法燃烧的物质、重金属的元素态及化合态物质则会以飞灰或炉渣的形式排出系统,污泥中的硫元素、氯元素、卤化物等最终以 $\text{SO}_2$ 、HF、HCl等酸性气体的形式进入烟气。以上各类污染物初始排放浓度可通过污泥泥质检测结果结合污泥焚烧烟气量进行预测。由于烟气中 $\text{NO}_x$ 的生成机理相对复杂,其初始排放浓度与焚烧炉的燃烧状态有关,难以直接通过污泥成分判断,需结合类似项目的经验进行预估。张鹏飞<sup>[1]</sup>对国内污泥独立焚烧项目的烟气初始浓度进行了预测,其中颗粒物为25 000~80 000  $\text{mg}/\text{m}^3$ ,HCl为50~300  $\text{mg}/\text{m}^3$ , $\text{SO}_2$ 为2 000~5 000  $\text{mg}/\text{m}^3$ , $\text{NO}_x$ 为50~500  $\text{mg}/\text{m}^3$ ,重金属初始浓度需根据污泥中重金属的种类及浓度确定,以上浓度均以11%氧含量计。

由于国内项目大多在设计时未在余热锅炉出口设置在线仪表,可供参考的污染物初始浓度数据较少,建议在后续项目设计之初即考虑设置在线监测仪表,为未来的项目提供更多数据参考,并结合烟气污染物初始浓度及排放标准,合理选择烟气净化工艺,以满足烟气排放要求。

### 1.2 烟气污染物初始浓度设计值

污泥焚烧项目实施前期,通常需要对拟接收的污泥进行定期泥质检测,检测时间应尽量长,从而充分反映一年内各季度的泥质变化情况和各年度的泥质变化趋势。检测项目除常规的污泥含水率、干基热值、灰分外,也应对污泥进行金属和非金属元素的分析,其中污泥含水率和热值可用于指导焚烧系统热平衡计算,而灰分及各元素分析则可以用于预测烟气中主要污染物指标。

由于全国各地的污水厂进厂水质不同,导致其污泥泥质也存在一定差别。在无相关案例参考的情况下,对污泥来源相对单一的污泥焚烧项目,可结合来泥的热值情况,综合项目焚烧曲线的各边界点,对各项污染物初始浓度进行逐月分析,选取浓度最高月的数值作为初始设计排放浓度。对污泥来源较多且生产线数量较多的污泥焚烧项目,可根

据项目设计的生产线数量,采用高浓度污染物同时出现在其中一条线的工况进行设计。

### 1.3 烟气中主要污染物排放标准

由于国内目前尚无针对污泥独立焚烧的相关排放标准,现有污泥焚烧项目大多参照其他排放标准,如《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)、《欧盟工业排放指令》(2010/75/EC)、《欧盟垃圾焚烧烟气污染控制指令》(2000/76/EC)等。其中上海地区的独立污泥焚烧项目大多执行上海地方标准《生活垃圾焚烧大气污染物排放标准》(DB 31/768—2013),该标准在适用范围中明确“其他非废物焚烧设施和掺烧其他非危险废物的生活垃圾焚烧设施的大气污染物排放限值按本标准执行”,这说明一定程度上放宽了标准的适用范围,可以作为污泥独立焚烧项目参照该标准执行的依据。广东地区的项目大多参照深圳地方标准《生活垃圾处理设施运营规范》(SZDB/Z 233—2017)进行设计,该标准相较于国家标准和上海标准已有较大程度的提高,但广东地区的项目目前大多处于设计或招标阶段,而国内已经建成且在运行的污泥独立焚烧项目未按照该项标准执行,且该标准中的主要污染物指标,如颗粒物、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 等与《欧盟工业排放指令》(2010/75/EC)和美国联邦法典第40卷第503部分《污水污泥利用和处置标准》(40 CFR Part 503)的要求仍有较大差距。由于目前国内已有近10座处于运行状态的污泥独立焚烧项目,建议对现有项目的烟气运行指标进行充分调研后逐步制定出适用于国内污泥独立焚烧项目的烟气排放标准。

## 2 污泥焚烧烟气处理工艺选择

### 2.1 污染物的设计去除率

污泥焚烧烟气中重点关注的污染物种类主要有颗粒物、以 $\text{SO}_2$ 为代表的酸性气体、 $\text{NO}_x$ 、重金属等。二噁英虽然毒性较大,但由于污泥中的氯含量不高,且硫元素较氯元素比例更高,在“3T+E”(即高温850~1 000  $^{\circ}\text{C}$ 焚烧、二燃室停留时间超过2.0 s、较大的湍流程度以及过量空气量)的燃烧控制下通常初始排放浓度不高,吕家扬等<sup>[2]</sup>发现在生活垃圾发电厂内掺烧污泥甚至可以降低烟气中的二噁英浓度。结合1.2节对烟气中主要污染物的初始浓度预测及国内现行可参考的主要排放标准,各项污染物的设计去除率如表1所示。

表1 不同排放标准下主要污染物去除率

Tab.1 Main pollutant removal rates under different emission standards %

污染物种类	推荐去除率		
	GB 18485— 2014	DB 31/768— 2013	SZDB/Z 233— 2017
颗粒物	99.92~99.98	99.96~99.99	99.97~99.99
HCl	0~83	80~96.67	84~97.33
SO <sub>2</sub>	96~98.4	97.5~99	98.5~99.4
NO <sub>x</sub>	0~50	0~60	0~84
重金属	0~90		

由表1可知,即使执行最宽松的GB 18485—2014,对烟气中颗粒物的去除率要求也需达到99.92%以上,以SO<sub>2</sub>为代表的酸性气体去除率要求同样较高,需达到96%以上,NO<sub>x</sub>和重金属由于初始浓度随项目变化幅度较大,去除率的波动范围同样较大,需根据项目进行具体分析。

## 2.2 除尘工艺选择

由于污泥焚烧烟气处理对颗粒物的去除率要求较高,采用单级除尘器通常无法满足要求,需采用两级除尘组合工艺。除尘器需要兼顾拦截去除烟气处理系统中喷射的活性炭或干法脱酸药剂,因此二级除尘工艺一般采用布袋除尘器,其除尘效率可达到99.9%以上,基本可以保证出口颗粒物浓度小于10 mg/m<sup>3</sup>。根据现有污泥焚烧项目经验,二级布袋除尘器拦截的飞灰多数情况下会被环保部门认定为危险废物,因此一级除尘器的除尘效率在压降和投资可控的情况下应尽可能提高,以降低整体运行成本。常规机械除尘器中旋风除尘器的除尘效率可达到90%以上,整体压降约400~1 300 Pa,在初始颗粒物浓度不高的情况下可以选用。相较而言,静电除尘器对小粒径颗粒的去除效果优于旋风除尘器,且除尘效率可达99%以上,压降通常不超过300 Pa,在用地面积充足的情况下,更适合作为污泥焚烧项目烟气处理的一级除尘器。

## 2.3 脱酸工艺选择

污泥中硫元素含量较高,因此烟气中的SO<sub>2</sub>往往是需要重点关注的对象。由表1可知,脱酸工艺对酸性气体尤其是SO<sub>2</sub>的去除率通常需达到96%以上。由于污泥焚烧项目烟气量往往较少,半干法脱酸工艺的雾化喷头选型相对困难,且对比湿法脱酸,其设备及管理复杂程度大,故障率更高,因此国

内近期新建的污泥焚烧项目几乎没有1例采用半干法脱酸。为达到较高的酸性气体去除率,湿法脱酸系统往往是必须的,且由于国内污泥焚烧项目大多紧邻大型污水处理厂,湿法产生废水的处理费用相对低廉,此情况下采用湿法脱酸是相对经济的手段。而对废水处理条件较差的项目,干法脱酸效率应尽可能提高,以减少湿法废水高离子浓度带来的高昂废水处理费用。目前常用的干法脱酸药剂有氢氧化钙和碳酸氢钠,氢氧化钙的脱酸效率受温度影响较大,而布袋除尘器前的烟气温度往往接近200℃,根据现有项目经验,在此温度下直接使用氢氧化钙,其脱酸效率往往低于30%,因此若采用氢氧化钙脱酸,建议同时设置烟气降温措施,但应注意控制烟气温度高于酸露点,以防止设备腐蚀。若采用碳酸氢钠干法脱酸,酸性气体的去除率通常可达到90%以上,但由于脱酸后会产生含可溶性钠盐的飞灰,而各地填埋场接收飞灰的定价原则不同,收费可能随飞灰含盐量增加而增加,需在设计之初考虑此因素。从运行经济性角度出发,以SO<sub>2</sub>初始浓度3 000 mg/m<sup>3</sup>为基准、干法与湿法总脱酸效率99%为基础,测算脱酸工艺主要运行成本见图1。

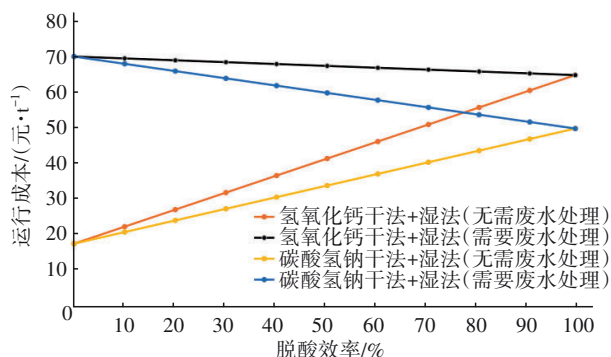


图1 脱酸工艺运行成本

Fig.1 Operation cost of deacidification process

若项目周边存在污水处理设施,则无论采用碳酸氢钠还是氢氧化钙作为干法脱酸药剂,湿法脱酸的成本均明显占优,此时应将湿法脱酸作为主要脱酸工艺。若湿法废水需要污泥焚烧厂自行处理,受其中硫酸根离子影响,往往需采用蒸发结晶工艺,会带来高昂的废盐处置费用,整体经济效益不佳,此情况下以干法脱酸为主则成本更优。图1为采用广东地区调研单价进行测算的结果,由于各地的药剂成本、飞灰及废盐处置成本均有所差异,项目实施时应根据所在地情况进行调研修正。



2.4 脱硝工艺选择

污泥焚烧过程中,燃料型 $\text{NO}_x$ 为 $\text{NO}_x$ 的主要来源,其初始浓度与焚烧炉类型、入炉含水率、燃烧温度、过剩空气系数等因素均有关联,难以直接通过理论计算进行预测,工程中大多情况下需根据类似项目经验进行预估。国内现有的污泥焚烧项目大多采用鼓泡流化床焚烧炉,燃烧温度控制为 $850\sim 900\text{ }^\circ\text{C}$ ,减少了热力型 $\text{NO}_x$ 的生成,且多数项目的污泥入炉含水率控制为 $60\%\sim 70\%$ ,更有利于抑制燃料型 $\text{NO}_x$ 的生成。由于目前国内执行的烟气排放标准相对宽松,即使采用最严格的深圳地方标准SZDB/Z 233—2017,对 $\text{NO}_x$ 的排放要求也仅为 $80\text{ mg/m}^3$ ,因此国内已建成的污泥焚烧项目大多通过燃烧控制法和选择性非催化还原(SNCR)对 $\text{NO}_x$ 进行控制,选择性催化还原(SCR)在多数情况下仅作为预留设施。根据调研,目前上海、成都等已长期运行的污泥焚烧项目,即使在未运行SNCR脱硝的情况下, $\text{NO}_x$ 的初始浓度也能控制在 $100\text{ mg/m}^3$ 以下。考虑到各地的污泥热值不同,其含水率也有所差异,在可满足自持燃烧的情况下,建议尽可能提高入炉污泥的含水率,以控制 $\text{NO}_x$ 的生成量。若项目按GB 18485—2014及类似的排放标准设计,可在焚烧炉设置SNCR接口,根据焚烧炉工况选择性地投加还原剂;若项目以SZDB/Z 233—2017或更加严格的排放标准设计,建议设置末端SCR系统作为应急处理设施,常规情况下可使用运行成本更低的SNCR系统。

2.5 重金属去除工艺选择

污泥焚烧厂烟气中重金属含量的多少,与污泥

性质、重金属存在形态、焚烧炉操作方式等关系密切。含重金属的污泥经高温焚烧后,一部分会因为燃烧而挥发,其余部分则残留在灰渣中。参照国内外项目运行经验,焚烧后绝大多数重金属,如Mn、Ti等,会以氧化物形态富集于飞灰中,在布袋除尘器中得到去除。重金属离子中Hg的化学形态相对复杂,包括 $\text{Hg}^0$ 、 $\text{Hg}^+$ 、 $\text{Hg}^{2+}$ ,物理形态分为气态单质汞和固态颗粒物汞。烟气经过余热回收及除尘后温度通常为 $180\sim 200\text{ }^\circ\text{C}$ ,部分单质汞可得到较好的冷凝成为固态,在布袋除尘器得到去除,其余气态汞则需要通过湿法洗涤工艺进一步冷凝,进入到湿塔排放废水进行去除。

目前污泥焚烧项目中针对重金属的控制手段主要为在布袋除尘器前通过粉末活性炭喷射进行吸附去除。国内外相关学者对焚烧过程中的重金属迁移转化及焚烧烟气中重金属去除做了大量的研究,发现活性炭对重金属的吸附效果随烟气温度升高而降低<sup>[3]</sup>,因此在不对烟气进行降温的情况下,直接在布袋除尘器前进行活性炭喷射往往不能取得很好的效果,需在喷射处辅以降温措施。在项目用地充足的情况下,建议在烟气处理系统末端预留物理吸附装置的接口及安装位置,保证重金属达标排放。

3 部分污泥焚烧项目烟气净化工艺

国内市政污泥焚烧项目仍处于起步阶段,已建成运行的项目不多,各地泥质和执行的烟气排放标准多样,因此在烟气处理工艺的选择上有所差异,部分污泥焚烧厂的烟气处理工艺整理如表2所示。

表2 国内部分污泥焚烧项目烟气净化工艺

Tab.2 Flue gas treatment process for some sludge incineration projects in China

项目	烟气处理工艺	执行排放标准
上海市石洞口城市污泥处置工程	旋风除尘器+半干法喷淋 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ +布袋除尘器+脱酸洗涤	《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2001)
上海市石洞口城市污泥完善工程	旋风除尘器+半干法喷淋 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ +布袋除尘器+脱酸洗涤	镍和氟化氢执行《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996)二级标准,其他执行《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2001)
上海市石洞口污泥处理处置二期工程	SNCR+静电除尘器+干法脱酸 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ +布袋除尘器+湿法脱酸(NaOH)	《生活垃圾焚烧污染控制标准》(DB 31/768—2013)
上海竹园污泥处理工程	静电除尘器+干法脱酸 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ +活性炭吸附+布袋除尘器+湿法脱酸(NaOH)	《欧盟垃圾焚烧烟气污染控制指令》(2000/76/EC)
上海白龙港污泥处理项目	SNCR+静电除尘器+干法脱酸 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ +活性炭喷射+布袋除尘器+湿法脱酸(NaOH)+物理吸附器	《生活垃圾焚烧污染控制标准》(DB 31/768—2013)
成都市第一城市污水处理厂一、二期工程	静电除尘器+活性炭喷射+布袋除尘器+湿法脱酸(NaOH)	《欧盟垃圾焚烧烟气污染控制指令》(2000/76/EC)

上海是国内污泥焚烧项目最多的城市,从上海各个项目的情况来看,烟气排放执行的标准日趋严格,其处理工艺设计也更加完备,通常在设计和建设过程中充分考虑各项污染物的处理设施,在运行过程中根据实际情况控制处理单元的投加药量<sup>[4-5]</sup>。由于国内的污泥焚烧项目基本建设于室内,一旦厂房修建完成,未来提标改造相当困难,因此建议新建项目在条件允许的情况下尽可能充分考虑环保设施的设置。针对颗粒物的去除,建议至少考虑静电除尘器和布袋除尘器的两级除尘。若考虑应对未来更严格的颗粒物排放标准,可在系统末端预留湿式电除尘器的安装位置。针对酸性气体的去除,需考虑项目初始酸性气体浓度、周边是否有可接纳湿法废水的大型污水厂等因素,进行干法和湿法脱酸的比选,比选过程中应重点关注药剂单价、飞灰处置成本、废盐处置费用等问题。针对 $\text{NO}_x$ 的去除,需重点关注入炉污泥的含水率,若无需以目前最严格的SZDB/Z 233—2017作为排放标准,可以只考虑设置SNCR系统,并预留SCR的安装位置。针对重金属的去除,可考虑以活性炭喷射为主,同时在喷射处辅以降温措施,保证活性炭吸附效率,并根据场地条件在末端预留物理吸附装置。

#### 4 结语

虽然污泥焚烧烟气中的污染物为该类焚烧项目的主要污染物排放源,但目前国内尚未形成专门针对污泥焚烧的烟气排放标准,已建项目大多参照垃圾焚烧排放标准执行。由于市政污泥焚烧产生的烟气污染物种类和浓度不同于垃圾焚烧项目,设计之初就需要根据项目拟接收的污泥性质对烟气中初始污染物进行预测,结合项目需执行的排放标准,合理选择烟气处理工艺。项目前期应结合项目周边情况及用地条件,适当考虑更完备的烟气处理系统,并尽量在系统末端预留未来提标改造的空间。

#### 参考文献:

- [1] 张鹏飞. 石洞口污泥处理完善工程烟气处理系统试运行效果分析[J]. 华电技术, 2020, 42(9):76-81.  
ZHANG Pengfei. Trial operation performance of the flue gas treatment system for a Shidongkou sludge treatment upgrading project [J]. Huadian Technology, 2020, 42(9):76-81 (in Chinese).
- [2] 吕家扬, 林颖, 蔡凤珊, 等. 市政污泥与生活垃圾协同焚烧的二噁英排放特征及毒性当量平衡[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2020, 52(5):31-40.  
LÜ Jiayang, LIN Ying, CAI Fengshan, et al. PCDD/Fs emission and toxic equivalent balance of municipal sewage sludge cocombustion in a solid waste incinerator [J]. Journal of South China Normal University (Natural Science), 2020, 52(5): 31-40 (in Chinese).
- [3] MALERIUS O. Modeling the adsorption of mercury in the flue gas of sewage sludge incineration [J]. Chemical Engineering Journal, 2003, 96(1/3): 197-205.
- [4] 胡维杰, 邱凤翔, 卢骏营. 上海市白龙港污泥干化焚烧工程工艺设计与思考[J]. 中国给水排水, 2019, 35(4): 54-58.  
HU Weijie, QIU Fengxiang, LU Junying. Process design and consideration of Shanghai Bailonggang sludge drying and incineration project [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(4): 54-58 (in Chinese).
- [5] 周骅. 基于上海市污泥干化焚烧运行研究的若干建议[J]. 中国给水排水, 2018, 34(16):17-21.  
ZHOU Hua. Some suggestions on the research of sludge drying and incineration operation in Shanghai [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(16): 17-21 (in Chinese).

作者简介:宋世琨(1991—),男,四川成都人,硕士,工程师,主要从事污水处理、污泥处理工程设计与研究工作。

E-mail:songsk@foxmail.com

收稿日期:2023-06-27

修回日期:2023-08-04

(编辑:沈靖怡)