

廉珂, 余波, 赵浩, 等. 市政污泥焚烧烟气处理典型工艺及发展趋势[J]. 净水技术, 2026, 45(5): 25-31.

Lian K, Yu B, Zhao H, et al. Typical process of flue gas treatment and development trends in municipal sludge incineration[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(5): 25-31.

## 市政污泥焚烧烟气处理典型工艺及发展趋势

廉珂<sup>1,\*</sup>, 余波<sup>1</sup>, 赵浩<sup>2</sup>, 李海洋<sup>2</sup>, 李箫宁<sup>1</sup>, 王雷<sup>1</sup>

(1. 中铁水务集团有限公司, 陕西西安 710018; 2. 西安中铁生态环境科技有限公司, 陕西西安 710301)

**摘要** 【目的】市政污泥焚烧是当前实现污泥减量化与无害化处置的主流技术,其烟气处理系统的稳定运行与效能直接影响项目的环保达标率和长期经济性。为应对日益严格的环保要求与行业挑战,本文系统研究了不同污泥焚烧烟气处理工艺及其发展趋势。【方法】通过分析某 600 t/d 典型污泥热解气化-焚烧耦合项目近 3 年的实际运行数据,总结污泥焚烧烟气中主要污染物的生成浓度及关键特性;对比不同地区、不同规模污泥焚烧项目的烟气污染物排放限值指标差异;并结合西安和成都两地工程案例,分析烟气系统运行中存在的典型问题及其应对策略。【结果】污泥焚烧烟气具有湿度高、腐蚀性强的特点(其中以硫酸和盐酸引起的露点腐蚀最为突出),在烟气处理系统设备选材上需格外关注耐腐蚀性能。目前国内尚未形成统一污泥焚烧烟气排放标准,未来排放标准将在污染物控制种类和限值要求上趋于严格。本文进一步详细论述了当前主流烟气处理工艺的选择依据及适用条件。【结论】在“双碳”目标背景下,污泥焚烧烟气处理技术将朝着和碳捕集与封存(CCS)技术集成、多污染物协同控制与资源化利用的方向发展。本文可为同类项目的工艺设计、运行优化及标准制定提供实证依据,推动行业向低碳化、资源化与可持续发展迈进。

**关键词** 市政污泥焚烧 热解气化 烟气处理工艺 烟气特性 腐蚀 排放标准

**中图分类号:** X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2026)05-0025-07

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.05.004

## Typical Process of Flue Gas Treatment and Development Trends in Municipal Sludge Incineration

Lian Ke<sup>1,\*</sup>, Yu Bo<sup>1</sup>, Zhao Hao<sup>2</sup>, Li Haiyang<sup>2</sup>, Li Xiaoning<sup>1</sup>, Wang Lei<sup>1</sup>

(1. China Railway Water Group Co., Ltd., Xi'an 710018, China;

2. Xi'an China Railway Eco-Environment Technology Co., Ltd., Xi'an 710301, China)

**Abstract** [Objective] Municipal sludge incineration is currently a mainstream technology for achieving sludge reduction and harmless disposal, the stable operation and efficacy of its flue gas treatment system to ensure both environmental compliance and long-term economic viability of projects. In response to increasingly stringent environmental requirements and industry challenges, this paper systematically investigates different flue gas treatment processes for sludge incineration and their development trends. [Methods] By analyzing the actual operation data of a typical 600 t/d sludge pyrolysis-gasification and incineration coupling project over the past three years, the concentration and key characteristics of major pollutants in the flue gas are summarized. Differences in flue gas pollutant emission limit indices among sludge incineration projects of different regions and scales are compared. Engineering cases in Xi'an and Chengdu are also utilized to analyze typical issues in the operation of flue gas systems and corresponding countermeasures. [Results] Generated flue gas is characterized by high humidity, and severe corrosivity—particularly sulfuric/hydrochloric acid dew point corrosion—so special attention must be paid to the corrosion resistance of materials when selecting equipment for the flue gas treatment system. Currently, there is no unified national emission standard for sludge incineration flue gas in China, and future standards would tend to be stricter in terms of pollutant control categories and limit requirements. This paper further elaborates on the selection basis and applicable conditions of current mainstream flue gas treatment processes. [Conclusion] Against the backdrop of the "dual carbon" goal, the technology for treating sludge incineration flue gas will develop in the directions of integration with carbon

[收稿日期] 2025-07-10

[通信作者] 廉珂(1990—),男,高级工程师,主要从事固废、废水、废气处理过程优化与控制等工作,E-mail:xdhg201220@163.com。

capture and storage (CCS) technology, synergistic control of multiple pollutants, and energy utilization. This paper can provide empirical evidence for the process design, operation optimization, and standard formulation of similar projects, and promote the industry towards low-carbonization, resource utilization, and sustainable development.

**Keywords** municipal sludge incineration pyrolysis and gasification flue gas treatment flue gas characteristics corrosion emission standard

当前我国每年产生超过 6 000 万 t (80% 含水率) 的市政污泥, 城市生活污水在处理过程中会产生大量脱水污泥, 如果处置不当, 将会对环境产生二次污染。现阶段, 污泥集中焚烧是污泥处置主要技术路线之一, 污泥焚烧处置工艺的关键之一是烟气的稳定达标排放<sup>[1-2]</sup>。本文基于对国内多个污泥焚烧项目的实地调研, 系统梳理了各项目的污泥处置技术路线、烟气排放标准及治理工艺, 深入剖析了不同工艺的遴选依据; 同时, 通过对 2 个典型案例烟气处理系统实际运行过程的解析, 总结了其面临的挑战与优化策略, 旨在为同类工程的设计与运行提供理论支持与实践参考。

## 1 污泥焚烧烟气主要污染物生成浓度及其特性

污泥组成复杂, 主要含有碳 (C)、氢 (H)、氧 (O)、氮 (N) 4 种元素, 同时含有少量硫 (S)、氯 (Cl)、磷 (P)、氟 (F) 和多种金属等, 以及其他惰性物质<sup>[3]</sup>。我国市政污泥中有机物质量分数为 15%~75%, 其余为无机物。焚烧后产生污染物种类较多: 氮氧化物 (NO<sub>x</sub>)、硫氧化物 [ 二氧化硫 (SO<sub>2</sub>) / 三氧化硫 (SO<sub>3</sub>) ]、氯化氢 (HCl)、一氧化碳 (CO)、颗粒物、重金属、二噁英类等物质, 且污泥焚烧排放污染物初始浓度高, 烟气排放量大, 烟气处理难度较大。

### 1.1 颗粒物生成浓度

污泥流化床焚烧和污泥热解气化焚烧工艺在国内均有成熟项目案例, 经流化床焚烧后, 污泥中的无机物基本转化为飞灰, 飞灰质量浓度为 50~60 g/m<sup>3</sup> (标准工况, 下同)。热解气化焚烧工艺中, 污泥中的无机物主要转化为炉渣, 少部分转化为飞灰, 飞灰质量浓度小于 1 g/m<sup>3</sup>。

### 1.2 酸性污染物生成浓度

污泥中的 S 含量通常是干基的 0.5%~2.0%, 主要分为有机硫和无机硫两大类, 在污泥焚烧过程中, 部分 S 转化为 SO<sub>2</sub>。通常有以下转化路径: (1) 有机硫 [ 硫醚等 ] 在氧化性气氛下几乎完全分解为 SO<sub>2</sub>; (2) 还原性无机硫 [ 二硫化铁 (FeS<sub>2</sub>)、硫化氢 (H<sub>2</sub>S) 等 ] 直接氧化或在高温下分解氧化成 SO<sub>2</sub>;

(3) 硫酸盐 [ 如硫酸钙 (CaSO<sub>4</sub>) ] 在还原性气氛中分解为 SO<sub>2</sub>。通常污泥焚烧后烟气中初始 SO<sub>2</sub> 质量浓度在 600~3 500 mg/m<sup>3</sup><sup>[4-5]</sup>。经调研, 全国各地污泥中 S 含量差异较大: 西南某污泥焚烧项目污泥全年 S 质量分数约为 0.5%; 西北某污泥焚烧项目污泥全年 S 质量分数约为 1.0%; 中部某污泥焚烧项目污泥全年 S 质量分数约为 1.5%, 因此采用焚烧法处置市政污泥, 务必做好污泥中 S 含量的长期监测, 重视污泥中 S 含量的波动性, 为设计提供依据。

污泥中 Cl 的质量分数为 0.1%~1.2%, 当污泥脱水时, 三氯化铁 (FeCl<sub>3</sub>) 的投加量高, 沿海区域排水管道受海水侵蚀等原因可能造成污泥中 Cl 含量较高。在焚烧过程中, Cl 元素可以与 H 结合生成 HCl, 污泥焚烧烟气中 HCl 质量浓度为 100~700 mg/m<sup>3</sup>。

### 1.3 NO<sub>x</sub> 生成浓度

燃烧生成的 NO<sub>x</sub> 有 3 种类型: 燃料型、热力型、瞬时型。燃料型 NO<sub>x</sub> 由燃料中的氮化物热分解后氧化产生。燃料中的含 N 有机物在 600~800 °C 热解生成中间产物 [ 氨气 (NH<sub>3</sub>)、氰化氢 (HCN) 等 ], 进一步氧化为 NO<sub>x</sub>。温度较低时, 固体燃料燃烧主要生成燃料型 NO<sub>x</sub>。热力型 NO<sub>x</sub> 是空气中的氮气 (N<sub>2</sub>) 在高温下氧化而成, 与温度有强烈的关系, 温度低于 1 300 K 时基本不生成, 温度超过 1 500 K 时, 反应速率急剧增加, 在过剩空气系数为 1.1 的条件下, 炉内温度达到 1 300~1 500 °C 时, 烟气中 NO<sub>x</sub> 质量浓度高达 1 000~2 000 mg/m<sup>3</sup>。污泥中的 N 含量通常是干基的 2%~12%, 其在燃烧过程中部分转变成 N<sub>2</sub> 或 NO<sub>x</sub>, 取决于炉内的温度和空气量, 原始质量浓度为 100~1 500 mg/m<sup>3</sup>。通常, 对于鼓泡流化床焚烧工艺, 焚烧炉内温度为 800~900 °C, 其焚烧生成 NO<sub>x</sub> 质量浓度较低, 一般在 150 mg/m<sup>3</sup> 以内, 且以燃料型 NO<sub>x</sub> 为主。污泥热解气化焚烧工艺, 因最终焚烧的是可燃气体, 燃烧温度较高, 其焚烧生成的 NO<sub>x</sub> 质量浓度通常超过 150 mg/m<sup>3</sup>。同时实际运行发现, 热解气化焚烧时 NO<sub>x</sub> 生成浓度与氧

量控制密切相关,低氧量运行对降低 NO<sub>x</sub> 浓度非常关键<sup>[3]</sup>。瞬时型 NO<sub>x</sub> 生成机理比较复杂,主要发生在火焰燃烧位置,通过挥发分氮与焦炭氮氧化生成,占生成 NO<sub>x</sub> 量的份额小于 1%。

### 1.4 烟气的高湿度及强腐蚀性

污泥焚烧烟气中水蒸气含湿量为 155~621 g/(kg 干空气) (对应入炉污泥含水率为 30%~80%)<sup>[3]</sup>。污泥热解气化反应需要补充部分蒸汽气化剂,入炉污泥表观含水率为 30%~40%;鼓泡流化床入炉焚烧污泥含水率为 30%~70%。燃煤锅炉常用煤种含水率为 8%~15%,经计算其烟气水蒸气含

湿量为 70~150 g/(kg 干空气)<sup>[6]</sup>。可见污泥焚烧烟气属于高湿度烟气。同时因为污泥焚烧后烟气中含有较高浓度酸性气体(SO<sub>3</sub>、HCl 等),烟气的腐蚀性较强,因此在设备选材上,需要特别考虑烟气的硫酸和 HCl 腐蚀问题。一般污泥焚烧含水率为 30%~40%,经计算,烟气 SO<sub>3</sub> 酸露点温度约为 110℃;烟气 HCl 酸露点温度约为 70℃,因此应加强烟气排烟温度的管理,从设计、设备和运营调整上,避免烟温长时间低于酸露点,降低设备腐蚀风险。污泥焚烧后主要烟气污染物生成浓度及特性如图 1 所示。

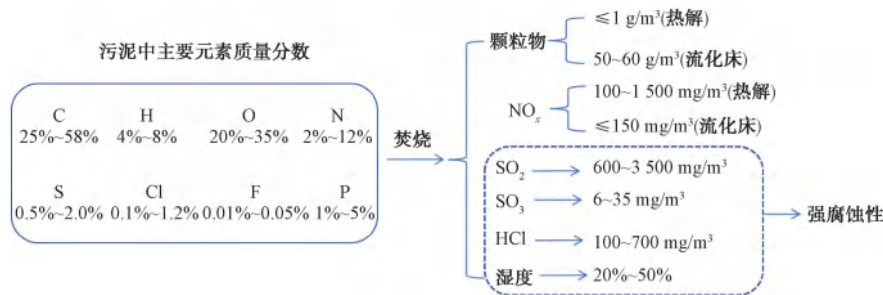


图 1 污泥焚烧后烟气主要污染物生成浓度及特性

Fig. 1 Generation Concentration and Characteristics of Major Pollutants in Flue Gas after Sludge Incineration

## 2 国内典型污泥焚烧项目介绍及其烟气排放标准

国内污泥焚烧烟气排放标准主要参照《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—

2014), 当前我国尚未设立专门的污泥焚烧的烟气排放标准。下面对 5 个典型污泥焚烧项目进行简要介绍。各项目污染物排放限值如表 1 所示。

表 1 北京、上海、成都、西安四地及美国污泥焚烧项目烟气排放标准对比

Tab. 1 Comparison of Flue Gas Emission Standards for Sewage Sludge Incineration Projects in Four Chinese Cities (Beijing, Shanghai, Chengdu, Xi'an) and the United States

参数	北京	成都	西安	上海	美国	备注
颗粒物/(mg·m <sup>-3</sup> )	30	30	20	10	6.9	小时均值
	20	10		10		日均值
NO <sub>x</sub> /(mg·m <sup>-3</sup> )	300	200	150	250	20~30	小时均值
	250	80		200		日均值
SO <sub>2</sub> /(mg·m <sup>-3</sup> )	100	100	35	100	11	小时均值
	80	50		50		日均值
CO/(mg·m <sup>-3</sup> )	100	100	100	100	24	小时均值
	80	80	80	50	0.3	日均值
HCl/(mg·m <sup>-3</sup> )	60	60	60	50	0.3	小时均值
	50	50	50	10		日均值
汞及其化合物(以 Hg 计)/(mg·m <sup>-3</sup> )	0.05	0.05	0.05	0.05	0.000 71	测定均值
镉、铊及其化合物(以 Cd+Tl 计)/(mg·m <sup>-3</sup> )	0.1	0.1	0.1	0.05	0.000 79	测定均值
锑、砷、铅、铬、钴、铜、锰、镍、钒及其化合物(以 Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V 计)/(mg·m <sup>-3</sup> )	1.0	1.0	1.0	0.5	0.000 44	测定均值
二噁英类/(ng TEQ·m <sup>-3</sup> )	0.1	0.1	0.1	0.1	0.003 10	测定均值

注:TEQ 为毒性当量。

西安某污泥焚烧项目规模为 600 t/d[20%含固量],采用“两段式干化+热解气化工艺”,污泥干化采用“薄层+带式两段式干化”,热解气化采用固定床上吸式气化炉。热解气化系统设置 4 条线,烟气处理系统设置 1 条生产线。烟气排放执行标准:颗粒物、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 排放符合陕西省地方标准《锅炉大气污染物排放标准》(DB61/1226—2018)中标准值;HCl、氟化氢(HF)和各重金属污染物排放浓度满足《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)<sup>[7]</sup>。

成都某污泥焚烧项目一期规模为 400 t/d[20%含固量],采用“薄层干化+鼓泡流化床焚烧工艺”,入炉污泥含水率约为 60%,焚烧系统设置 2 条生产线,烟气处理系统设置 2 条生产线。烟气 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、颗粒物参照《深圳市生活垃圾处理设施运营规范》(SZDB/Z 233—2017)中焚烧炉大气污染物排放限值。烟气中其余污染物执行《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)<sup>[8]</sup>。

上海某污泥焚烧项目二期规模为 640 t/d[20%含固量],采用“桨叶式干化+鼓泡流化床焚烧工艺”,焚烧系统设置 3 条生产线,烟气处理系统设置 3 条生产线。烟气排放标准执行《生活垃圾焚烧大气污染物排放标准》(DB31/768—2013)(项目执行时参照该标准,非最新版)<sup>[9]</sup>。

北京某污泥焚烧项目规模为 400 t/d[20%含固量],采用“桨叶式干化+循环流化床焚烧工艺”,入炉污泥含水率约为 40%,焚烧系统设置 2 条生产线,烟气处理系统设置 2 条生产线。烟气排放标准执行

《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)<sup>[10]</sup>。

东莞某污泥焚烧项目规模为 2 000 t/d[40%含固量](建设中),采用“厂外半干化+鼓泡流化床焚烧工艺”,入炉污泥含水率约为 60%。焚烧系统设置 5 条生产线,烟气处理系统设置 5 条生产线。烟气排放标准执行《生活垃圾焚烧大气污染物排放标准》(DB31/768—2013),实际设计 NO<sub>x</sub> 排放标准更高。

综上,国内污泥焚烧项目多参考国家或地方生活垃圾焚烧烟气排放标准及锅炉排放标准,没有针对污泥的专门排放标准。美国针对污泥焚烧设置了专门的烟气排放标准,相比国内烟气排放标准,要严格得多。有学者<sup>[11]</sup>认为,由于污泥与生活垃圾组成成分上相差较大,国内污泥焚烧烟气排放限值直接参照《生活垃圾焚烧大气污染物排放标准》(DB31/768—2013)限值有待商榷。同时,从美国污泥焚烧烟气排放浓度的限值来看,我国污泥焚烧烟气处理烟气排放标准仍有较大提升空间,如表 1 所示。

### 3 各污泥焚烧项目烟气处理工艺及部分项目运行效果

#### 3.1 西安某污泥焚烧项目烟气处理工艺及效果

该项目烟气排放要求较高,且同时为了提高烟气系统的热量回收,降低烟气处理的能耗,烟气系统工艺流程较长,且工艺复杂。烟气经处理后达标排放,污泥焚烧后烟气处理流程如图 2 所示。烟囱高度约为 23 m。

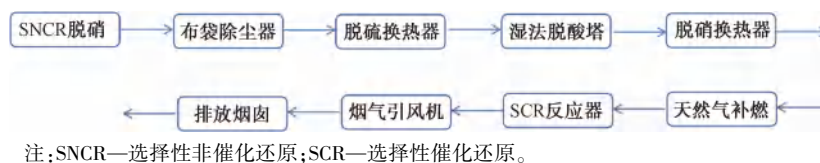


图 2 西安某污泥焚烧项目烟气处理工艺

Fig. 2 Flue Gas Treatment Process of a Sludge Incineration Project in Xi'an

项目投运以来,烟气中各污染物稳定达标排放,如图 3 所示,NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、颗粒物质量浓度小时均值分别稳定控制在 100、25、10 mg/m<sup>3</sup> 以内。通过近 3 年的实际运行,总结发现以下特点:(1)与污泥流化床焚烧法相比,污泥热解气化焚烧工艺烟气中原始 NO<sub>x</sub> 浓度偏高一些,因此烟气脱硝优选“SNCR+SCR”联合技术;(2)污泥热解气化

后烟气腐蚀性较强,烟气系统低温段换热器等设备可以选用氟塑料,延长设备使用寿命<sup>[12-13]</sup>;(3)烟气生产线只有 1 条,当其出现故障时,需要停运整个焚烧工段,生产压力较大;(4)采用低温 SCR 脱硝工艺,需要定期对催化剂进行原位加热再生,因此设计和建设上需要考虑原位再生配套的设备<sup>[14-15]</sup>。

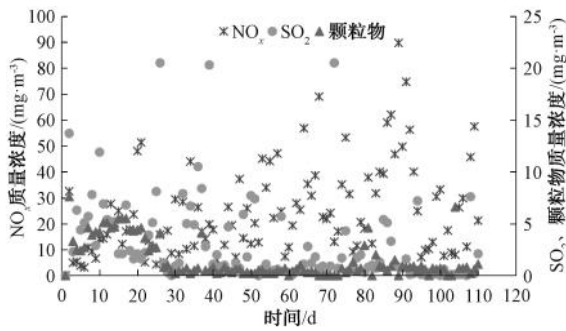


图3 西安某污泥焚烧项目烟气主要污染物排放浓度数据  
Fig. 3 Key Flue Gas Pollutant Emission Concentrations of a Sludge Incineration Project in Xi'an



图4 成都某污泥焚烧项目烟气处理工艺

Fig. 4 Flue Gas Treatment Process of a Sludge Incineration Project in Chengdu

料塔改为喷淋塔,设置2层喷淋层,使得酸性气体与浆液接触更充分,增加了脱硫脱酸效率,且采用2层不锈钢填料作为除雾器,进一步抑制颗粒物的排放。

### 3.3 上海某污泥焚烧项目烟气处理工艺

烟气经处理后达标排放,污泥焚烧后烟气处理流程如图5所示。烟囱高度为45 m。

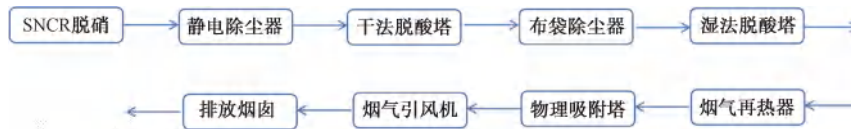


图5 上海某污泥焚烧项目烟气处理工艺

Fig. 5 Flue Gas Treatment Process of a Sludge Incineration Project in Shanghai

### 3.4 北京某污泥焚烧项目烟气处理工艺

烟气经处理后达标排放,污泥焚烧后烟气处理

流程如图6所示。烟囱高度为79 m。



图6 北京某污泥焚烧项目烟气处理工艺

Fig. 6 Flue Gas Treatment Process of a Sludge Incineration Project in Beijing

### 3.5 东莞某污泥焚烧项目烟气处理工艺

烟气经处理后达标排放,污泥焚烧后烟气处理流程如图7所示。烟囱高度为60 m。烟气排放参照上海市地方标准《生活垃圾焚烧大气污染物排放

标准》(DB31/ 768—2013)。该工艺为了适应今后污泥泥质的变化和环保提出更高的要求,在焚烧炉和药剂设施方面增加干法脱酸段、炉外脱硝设施(SCR)及固定式汞吸附器。



图7 东莞某污泥焚烧项目烟气处理工艺

Fig. 7 Flue Gas Treatment Process of a Sludge Incineration Project in Dongguan

## 4 污泥焚烧烟气处理工艺选择依据探讨

当前污泥焚烧项目主要参照国家和地方的垃圾焚烧发电的烟气排放标准,其中烟气污染物主要包括:颗粒物、NO<sub>x</sub>、酸性污染物(SO<sub>2</sub>/HCl)、CO、重金属、二噁英类。

### 4.1 颗粒物

颗粒物主要执行2个排放标准:10 mg/m<sup>3</sup>和20 mg/m<sup>3</sup>。除尘工艺包括:布袋除尘、静电除尘+布袋除尘、布袋除尘+湿式静电除尘。除尘工艺的选择一方面要结合烟气中原始颗粒物的浓度,另一方面要结合颗粒物排放标准,污泥热解气化焚烧烟气中原始颗粒物质量浓度低于1 g/m<sup>3</sup>,因此西安某污泥焚烧项目只采取了布袋除尘工艺;污泥鼓泡流化床焚烧烟气中原始颗粒物质量浓度高达60 g/m<sup>3</sup>,因此一般会采用静电除尘预除尘,先脱除80%以上的颗粒物,再通过布袋除尘器进一步降低颗粒物浓度。

### 4.2 NO<sub>x</sub>

NO<sub>x</sub>执行排放标准较多:80、150、200、250 mg/m<sup>3</sup>。脱硝工艺包括:SNCR、SNCR+SCR。脱硝工艺的选择一方面要结合烟气中原始NO<sub>x</sub>的浓度,另一方面要结合NO<sub>x</sub>排放标准,西安某污泥焚烧项目采用热解气化工艺,烟气中原始NO<sub>x</sub>浓度较高,单靠SNCR难以稳定地将NO<sub>x</sub>质量浓度控制在150 mg/m<sup>3</sup>,因此选取了SNCR+SCR工艺。鼓泡流化床污泥焚烧温度为800~900℃,焚烧温度较低,NO<sub>x</sub>质量浓度一般在150 mg/m<sup>3</sup>以内,因此大多数项目只采用SNCR工艺即可满足排放标准。东莞某污泥焚烧项目建设标准较高,考虑了未来可能的烟气排放标准提标,选取了SNCR+SCR工艺。

### 4.3 酸性污染物

酸性污染物主要指SO<sub>2</sub>和HCl,SO<sub>2</sub>执行3个排放标准:35、50、80 mg/m<sup>3</sup>。HCl执行2个排放标准:10、50 mg/m<sup>3</sup>。脱酸工艺包括:湿法脱酸、半干法脱酸+湿法脱酸。污泥中S含量波动大,导致烟气中原始SO<sub>2</sub>浓度波动较大,因此各污泥焚烧项目基本都会选取脱除效率高且稳定的湿法脱酸工艺,有些工艺会采用半干法进行预脱酸,降低烟气中酸性物质含量,减轻烟气对设备的腐蚀,然后通过湿法脱酸,确保酸性污染物的达标排放。

### 4.4 重金属及二噁英

二噁英基本都执行0.1 ng TEQ/m<sup>3</sup>的标准,主要通过2种手段来去除:一是控制焚烧炉温度大于850℃,烟气停留时间大于2s;二是采用活性炭吸附烟气中的二噁英,基本都是在布袋除尘器入口烟道喷射活性炭,用布袋将吸附后的活性炭及飞灰收集,交由有危废处理资质的企业处理。重金属的排放标准基本上一致,上海地方标准中重金属排放标准要高一些,重金属的去除主要采用活性炭吸附工艺。

### 4.5 CO

CO没有专门的去除设备,主要是通过燃烧控制,使得污泥燃烧充分。一般通过正常的燃烧控制,CO都能稳定达标排放。

## 5 结论

当前各污泥焚烧项目烟气处理主体工艺基本一致,总结某典型污泥焚烧项目烟气系统实际运营数据,得到了污泥焚烧烟气中各主要污染物原始浓度数据,在开展污泥焚烧新项目设计时,应根据各污染物原始浓度及烟气排放标准,选取适宜的烟气处理工艺。同时某污泥热解气化焚烧项目理论和实践均表明,污泥焚烧烟气具有较强腐蚀性,在烟气处理系统设备的选材上要特别注意;烟气中原始SO<sub>2</sub>生成浓度范围较大,应重视对污泥中S含量的长期监测,为脱硫设计提供依据;对于采用低温SCR工艺的烟气处理工艺,要特别关注低温脱硝催化剂的原位再生。通过以上措施确保烟气处理系统稳定运行。

未来污泥焚烧烟气各污染物排放标准会进一步严格,尤其是NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、重金属等的排放要求会更加严格。在新建项目时,要特别注意未来可能的烟气排放标准提标,必要时在工艺上预留SCR汞吸附等工艺单元。最后展望在“双碳”目标下,污泥焚烧烟气碳捕集与多污染物协同控制可能会成为未来的研究热点。

## 参考文献

- [1] 张惠. 城镇污水处理行业低碳技术研究现状与发展趋势分析[J]. 净水技术, 2024, 43(7): 1-9.  
Zhang H. Analysis on research status and development trend of low-carbon treatment and disposal technologies for urban sewage and sludge[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(7): 1-9.

- [ 2 ] 刘庄泉. 青浦污泥干化焚烧项目设计运行分析[J]. 净水技术, 2024, 43(S2): 192-200.  
Liu Z Q. Design and operation analysis of Qingpu sludge drying and incineration project [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(S2): 192-200.
- [ 3 ] T/CECS 20008—2021 城镇污水处理厂污泥干化焚烧工艺设计与运行管理指南[S].  
T/CECS 20008—2021 Guidelines for the design and operation management of sludge drying and incineration process in urban sewage treatment plants[S].
- [ 4 ] 蒋文举. 烟气脱硫脱硝技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.  
Jiang W J. Technical manual of flue gas desulfurization and denitrification[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [ 5 ] 夏霄. 脱硫石膏气相还原分解过程中钙、硫迁移转化特性及机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.  
Xia X. Study on the characteristics and mechanism of calcium and sulfur migration and transformation during the gas-phase reductive decomposition of desulfurization gypsum[D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [ 6 ] 盛益平. 锅炉燃煤所需理论空气量和烟气中水蒸气量的计算[J]. 河北电力技术, 2004, 23(1): 9-10.  
Sheng Y P. Calculations of theoretical combustion air demand and steam vapour amount in flue-gas of coal-fired boiler[J]. Hebei Electric Power, 2004, 23(1): 9-10.
- [ 7 ] 赵浩, 王雷, 廉珂, 等. 污泥热解气化可燃气焚烧烟气处理工艺关键技术探讨[J]. 生物化工, 2023, 9(4): 134-137.  
Zhao H, Wang L, Lian K, et al. Discussion on key technologies of sludge pyrolysis gasification combustible incineration flue gas treatment process[J]. Biological Chemical Engineering, 2023, 9(4): 134-137.
- [ 8 ] 文筑秀. 成都市第一城市污水污泥处理厂工程设计及体会[J]. 给水排水, 2021, 47(6): 55-60.  
Wen Z X. Design and experience of the project of Chengdu No. 1 wastewater sludge treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(6): 55-60.
- [ 9 ] 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程工艺要点解析[J]. 中国给水排水, 2019, 35(16): 41-47.  
Hu W J, Zhou Y F, Chen R C, 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.
- [ 10 ] 李彪, 周欣, 高波, 等. 顺义区污泥干化焚烧处理工程工艺设计[J]. 中国给水排水, 2021, 37(14): 63-68.  
Li B, Zhou X, Gao B, et al. Design of sludge drying incineration treatment process in Shunyi district [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(14): 63-68.
- [ 11 ] 邱凤翔, 胡维杰, 卢骏莹, 等. 美国污水污泥焚烧烟气排放标准分析与启示[J]. 给水排水, 2023, 59(9): 158-164.  
Qiu F X, Hu W J, Lu J Y, et al. Analysis and enlightenment of flue gas emission standard of sewage sludge incineration in the United States[J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 59(9): 158-164.
- [ 12 ] 张宇扬, 吴兆恺. 低温烟气余热利用系统在垃圾焚烧电厂中的应用[J]. 节能, 2024, 43(4): 70-73.  
Zhang Y Y, Wu Z K. Application of low temperature flue gas waste heat utilization system in waste incineration power plant [J]. Energy Conservation, 2024, 43(4): 70-73.
- [ 13 ] 李新义, 毕战利, 滕海云, 等. 基于烟气余热回收的氟塑料换热器换热性能分析[J]. 电站系统工程, 2025, 41(2): 24-26.  
Li X Y, Bi Z L, Teng H Y, et al. Analysis of heat exchange performance of fluoroplastic heat exchanger based on flue gas waste heat recovery[J]. Power System Engineering, 2025, 41(2): 24-26.
- [ 14 ] 张旭. 垃圾焚烧用脱硝催化剂原位再生性能分析[J]. 工业催化, 2023, 31(1): 52-55.  
Zhang X. Performance analysis of *in-situ* regeneration of SCR-catalyst for waste incineration[J]. Industrial Catalysis, 2023, 31(1): 52-55.
- [ 15 ] 徐奎, 孟东祥, 许晓龙, 等. 生物质锅炉低温 SCR 脱硝催化剂失活与再生[J]. 安徽化工, 2025, 51(2): 118-122, 135.  
Xu K, Meng D X, Xu X L, et al. Deactivation and regeneration of low temperature SCR denitrification catalysts for biomass boilers[J]. Anhui Chemical Industry, 2025, 51(2): 118-122, 135.