

污泥电厂掺烧烟气二次污染物来源及控制标准分析

顾敏燕¹, 段妮娜¹, 朱 俊²

[1.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092; 2.上海外高桥第三发电有限责任公司, 上海市 200129]

摘要: 针对污泥电厂掺烧二次污染物,总结了污泥电厂掺烧系统中特征污染物的种类和来源,重点阐述了二噁英和重金属的形成过程与机理。通过总结国内外焚烧相关的烟气排放标准,对比分析了国内外污染物控制种类和限值差异。梳理现有燃煤电厂烟气处理系统及功能,重点阐述了二噁英和重金属的控制方法与机理。

关键词: 污泥;电厂掺烧;焚烧;烟气;二次污染物

中图分类号: X703

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)01-0186-06

0 引言

污水处理厂污泥是水处理过程的主要副产物,也是生物质中的特殊一员。污泥具有“资源”和“污染”的双重属性,充分利用其“资源”属性,合理控制其“污染”属性,通过因地制宜的路径实现两者的平衡成为了污泥资源化的重要发展方向。

污泥处理处置技术路线大致可以分为三类^[1,2]。第一是土地利用导向^[3],包括厌氧消化+土地利用和好氧发酵+土地利用。第二是卫生填埋导向,因为填埋缺乏资源化利用且环境风险比较大,目前污泥0填埋已经成为了各政府的目标。第三是热氧化处理导向(焚烧导向),主要分为独立焚烧^[4,5]和混合掺烧,混合掺烧包括与生活垃圾共焚烧进行热能利用^[6],与水泥窑共处置进行建材利用^[7-9],与电厂掺烧进行热能利用,飞灰进行建材利用^[10,11]。

污泥热氧化处理是污泥资源化的重要方式之一,能够实现污泥最大程度的减量化,同时实现飞灰资源化利用。近年来,国际上热氧化处理的应用比例呈迅速上升的趋势。在日本,污泥热氧化处理比例已达到67%以上^[12];在欧洲,比利时、德国和荷兰热氧化处理均占50%以上,特别地,荷兰几乎所有的污泥采用热氧化处理方式^[13,14]。目前,我国污泥处理处置也在加速向热氧化方向转变,以上海市为例,2020年末污泥热氧化处理的占比快速提升至近90%,其

中电厂掺烧达到45%左右^[15]。国内外焚烧的类型具有一定差别,国外以独立焚烧和垃圾掺烧为主,国内以燃煤电厂掺烧和独立焚烧为主。国家能源局和生态环境部于2018年6月28日批准全国84个燃煤火电厂生物质耦合发电的试点项目(国能发电力[2018]53号),其中燃煤耦合污泥发电试点项目共计29个,鼓励污泥产生量大、土地利用困难或空间有限的地区布局燃煤耦合污泥发电项目。

污泥电厂掺烧是我国“多煤”能源结构下特有的污泥掺烧方式,鲜有发达国家工程经验和参考,特别是针对二次污染物^[16]。污泥与燃煤耦合发电不仅仅会产生颗粒物、二氧化硫、氮氧化物等常规污染物,更重要的是污泥重金属含量约为燃煤的10-100倍^[17],同时含有氯元素,燃烧过程中会产生大量二噁英类、重金属等有毒有害物质。因此,本文总结了污泥电厂掺烧系统特征污染物的种类和来源,重点阐述了二噁英和重金属的形成过程与机理。通过总结国内外焚烧相关的烟气排放标准,对比分析了污染物控制种类和限值差异。通过梳理现有燃煤电厂烟气处理系统和功能重点阐述了二噁英和重金属的控制方法与机理。

1 污泥电厂掺烧系统特征污染物来源

1.1 二噁英

污泥电厂掺烧过程中二噁英的生成机理非常复杂,目前国内外普遍接受的燃烧过程中二噁英生成机理主要有三种:高温气相生成、从头合成和前驱体合成。对这三类过程产生的二噁英主要可以采用过程管理和末端净化的相关措施。

(1)二噁英的高温生成主要发生在炉膛的高温换

收稿日期: 2022-08-22

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFC1908700);上海市“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(19DZ1204907)

作者简介: 顾敏燕(1990—),女,博士,工程师,从事多源污泥处理处置与资源化相关科研和咨询工作。

热区。主要是炉膛反应区生成的氯苯和氯酚等氯代前驱物在温度 500℃~800℃时的热解重排结果^[18]。

(2)从头合成反应是通过飞灰中的大分子碳与有机或无机氯在低温下(约 250℃~450℃)经飞灰中某些具有催化性的成分(如 Cu、Fe 等过渡金属或其氧化物)催化生成二噁英类。此外,烟气中高浓度的 HCl 提供了从头合成的环境,二噁英可以由化学结构不想近的化合物,如聚氯乙烯或不含氯的有机物如聚苯乙烯、纤维素、木质素、煤、颗粒碳与氯源反应生成。总结从头合成二噁英类的条件为:有碳、有氧气、有氯源、催化剂和特定的反应温度(200℃~400℃)^[19-21]。

(3)二噁英前驱体合成主要指烟气中已生成的气态前驱物氯苯、氯酚等与飞灰表面吸附的二噁英类前驱物在催化剂催化作用下生成二噁英的过程^[22]。

综上所述,烟气中二噁英主要来源于以下途径:污泥中含有微量的 PCDD/Fs 时,在未充分燃烧的条件下,其排放出的烟气中残留的 PCDD/Fs;有机物和氯在燃烧过程中有氧条件下高温合成,产生 PCDD/Fs;未经燃烧的挥发物质(前驱物)在燃烧温度较低的条件下同烟气中的氯化物、碳氢化合物极易反应生成 PCDD/Fs^[23]。

1.2 重金属

污泥中存在比燃煤中比例更高的重金属,干污泥重金属含量约为煤的 10~100 倍^[17]。在污水处理过程中绝大多数重金属通过物理/生物吸附、化学沉淀等作用最终进入污泥,存在形态主要包括氢氧化物、碳酸盐、磷酸盐、硅酸盐、硫酸盐以及有机络合物等,其次为硫化物,很少以自由离子形式存在^[24]。污泥中的重金属主要有 8 种,按其在污泥中的含量依次排序为:Zn>Cu>Cr>Pb>Ni>As>Cd>Hg^[25]。污泥在焚烧过程中,重金属因温度和挥发性不同其存在形式也不尽相同,挥发性大小依次为:Hg>Cd>Pb>As>Cr>Cu>Zn>Ni,根据重金属的挥发特性,可将重金属元素分为 4 类,见表 1,其中:不挥发类,完全被结合到飞灰或炉渣中;难挥发类元素 Pb 和 Cd,这类化合物在 700℃~900℃温度范围内冷凝,在锅炉内,高温燃烧时气化,但在烟气后续换热、处理过程中迅速冷凝,大部分附着在飞灰中;易挥发的元素 Tl 一般在 450℃~500℃的温度区冷凝,其行为也是随着烟气的降温,附着在飞灰中;高挥发元素 Hg,在锅炉及尾气处理系统内均不能冷凝和分离出来,主要除部分附着在飞灰中,大部分随尾气排放。

表 1 重金属元素的挥发性分级分析

等级	元素	冷凝温度/℃
不挥发	Cu、Cr、As、Zn、Ni	—
难挥发	Cd、Pb	700~900
易挥发	—	450~550
高挥发	Hg	<250

2 国内外焚烧/掺烧烟气排放标准

2.1 欧盟

欧盟尚无专门针对污泥焚烧或污泥掺烧的烟气排放标准,仅有针对所有废弃物(包括污泥)单独焚烧和混烧的烟气排放标准 2010/75/EC,废弃物单独焚烧烟气排放标准限值见表 2,废弃物混烧烟气排放标准限值见式(1)和表 3。

表 2 欧盟 2010/75/EC 废弃物焚烧设施大气污染物排放限值

序号	污染物	排放限值日均值/(mg·Nm ⁻³)	排放限值半小时均值/(mg·Nm ⁻³)
1	烟尘	10	30
2	挥发性有机物质(有机碳总量)	10	20
3	氮氧化物	200	200
4	二氧化硫	50	200
5	氯化氢	10	60
6	氟化氢	1	4
7	一氧化碳	50	100
8	二噁英类	0.1(6~8 h 采样值)	
9	镉+铊	0.05(0.5~8 h 值)	
10	汞	0.05(0.5~8 h 值)	
11	铅+镉+砷+铬+钴+铜+锰+镍+钒	0.5(0.5~8 h 时值)	

注:本表规定的各项标准限值,均以标准状态下含 11% O₂ 的干烟气为参考值换算。

$$C = \frac{V_{waste} \times C_{waste} + V_{proc} \times C_{proc}}{V_{waste} + V_{proc}} \tag{1}$$

式中:V_{waste} 为废弃物烟气体积,掺烧放热量比小于 10%,按 10%计;C_{waste} 为废弃物焚烧装置排放限值;V_{proc} 为常规燃料烟气体积;C_{proc} 为常规燃料焚烧装置排放限值。

表 3 欧盟 2010/75/EC 废弃物混烧设施大气污染物排放限值

序号	污染物	0.5~8 h 均值/(mg·Nm ⁻³)
1	二噁英类	0.1(6~8 h 采样值)
2	镉+铊	0.05
3	汞	0.05
4	铅+镉+砷+铬+钴+铜+锰+镍+钒	0.5

如表 2 所示,废弃物单独焚烧烟气污染物控制指标共 11 项。较我国《生活垃圾焚烧大气污染物排放

标准》GB18485多2项指标,为挥发性有机物(TOC)和氟化氢。9个相同指标中,二噁英类(0.1 ng TEQ/m^3)和汞(0.05 mg/m^3)限值与我国国标相同,其余均显著低于我国标准限值,例如氯化氢(10 mg/m^3)仅为我国限值的1/5。总体而言,欧洲废弃物单独焚烧排放标准比我国更加严格。

欧盟针对废弃物与常规能源物质混烧具有专门的规定,其中常规能源物质包括固体燃料、液体燃料和气体燃料,固体燃料则包括煤等。针对7项常规污染物,即烟尘、挥发性有机物质、有机碳总量、氮氧化物、二氧化硫、氯化氢、氟化氢和一氧化碳,依照式(1)进行混烧标准值换算。针对废弃物涉及的特征污染物,即常规燃料限值里没有的四项指标,按照表3执行。

2.2 美国

美国具有单独针对污泥焚烧的排放标准(40 CFR Part 60),无混烧标准。针对不同污泥焚烧装置具有不同的排放限值,例如流化床污泥焚烧设施、多炉缸焚烧设施等。表4为新型流化床污泥焚烧装置的排放限值和标准。较我国垃圾焚烧标准多1项指标,为“灰处理过程中不定期排放的废气”,该指标对飞灰收集过程溢出作出了要求,有效保障安全和健康。美国重金属控制指标仅涉及汞、镉、铅,而欧洲和我国分别涉及12和11种金属。限值方面,总体而言美国污泥焚烧排放标准的要求远远高于欧盟和我国,例如二噁英毒性当量限值为 0.004 4 ng/m^3 ,较欧盟严格了约23倍。

表4 美国40 CFR Part 60 新建流化床污泥焚烧装置的排放限值和检测要求

序号	污染物	排放限值	检测要求
1	颗粒物	9.6 mg/m^3	3次均值
2	氯化氢	0.24 ppm	3次均值
3	一氧化碳	27 ppm	24 h均值
4	二噁英(质量)	0.013 ng/m	3次均值
	二噁英(毒性当量)	30.004 4 ng/m^3	
5	汞	0.0010 mg/m^3	3次均值
6	氮氧化物	30 ppm	3次均值
7	二氧化硫	5.3 ppm	3次均值
8	镉	0.001 1 mg/m^3	3次均值
9	铅	0.000 62 mg/m^3	3次均值
10	灰处理过程中不定期排放的废气	在每小时观察周期内,灰分输送系统(包括输送机传输点)的可见燃烧灰分排放不超过5%	

注:以标准状态下含7% O₂的干烟气为参考值换算。

2.3 日本

日本尚无专门针对污泥焚烧或污泥掺烧的烟气排放标准,仅有针对所有废弃物(包括污泥)单独焚烧的烟气排放标准。表5为新建垃圾焚烧设施污染控制标准,一共包含8项指标,仅有重金属指标与我国垃圾焚烧标准不同,较我国标准少9种重金属控制指标。6项相同指标在限值方面,较我国标准更严格,例如颗粒物限值($10\text{ mg/m}^3\text{N}$)和二噁英类($0.05\text{ ng-TEQ/m}^3\text{N}$)仅为我国标准限值的一半。

表5 日本《公害防止基准》新建垃圾焚烧设施污染控制标准

序号	污染物	限值
1	颗粒物	$10\text{ mg/m}^3\text{N}$
2	二氧化硫	10 ppm
3	氯化氢	10 ppm
4	氮氧化物	30 ppm
5	二噁英类	$0.05\text{ ng-TEQ/m}^3\text{N}$
6	汞	$0.05\text{ mg/m}^3\text{N}$
7	铅	$0.1\text{ mg/m}^3\text{N}$
8	一氧化碳	$30\text{ ppm}(4\text{ h均值})$
		$100\text{ ppm}(1\text{ h均值})$

2.4 中国

我国具有《生活垃圾焚烧污染控制标准》GB 18485—2014,各地具有与国标相衔接的相关地方标准。目前尚无专门针对污泥焚烧的排放标准,仍参考生活垃圾焚烧标准控制其焚烧烟气污染。上海市基于污泥电厂掺烧的工程实践和烟气检测监测数据,并结合《燃煤与污泥耦合电厂大气污染物排放标准》DB31/1291和《生活垃圾焚烧大气污染物排放标准》DB31/768,研究形成了《燃煤电厂大气污染物排放标准》DB31/963。该标准专门针对污泥电厂掺烧工程,是全国首部污泥燃煤电厂掺烧烟气排放标准,标准的指标融合了燃煤电厂排放标准和垃圾焚烧的标准,并大大地提高了限值的要求。

表6对比分析了燃煤、污泥+燃煤和污泥三类物料焚烧的排放标准。燃煤单独焚烧时只有前5个常规污染物指标,而污泥单独或者掺烧则增加了后5个指标,我们可以认为后5个指标是污泥的特征污染物。此外,烟气黑度是燃煤的特征污染物。因此,在污泥电厂掺烧工程中应当特别关注这5类污泥特征污染物的排放规律(浓度、总量和处理系统去除率等)。

如表7所示,污泥电厂掺烧标准中各类污染物的限值较生活垃圾焚烧标准显著降低,同时显著

表 6 不同物料焚烧烟气排放控制指标

序号	控制指标	物料			特征污染物归属
		燃煤 a	污泥 + 燃煤 b	污泥 c	
1	颗粒物	√	√	√	
2	二氧化硫	√	√	√	
3	氮氧化物	√	√	√	
4	汞及其化合物	√	√	√	
5	烟气黑度	√	√		燃煤
6	氯化氢		√	√	污泥
7	镉、铊及其化合物		√	√	污泥
8	锑、砷、铅、铬、钴、铜、锰、镍、钒及其化合物		√	√	污泥
9	二噁英		√	√	污泥
10	一氧化碳			√	污泥

注:a.《燃煤电厂大气污染物排放标准》DB31/963
b.《燃煤与污泥耦合电厂大气污染物排放标准》DB31/1291
c.《生活垃圾焚烧大气污染物排放标准》DB31/768

低于欧盟和日本,例如颗粒物从生活垃圾焚烧标准的 30 mg/m³ 降低至 5 mg/m³;镉、铊及其化合物从 0.1 mg/m³ 降低至 0.01 mg/m³;二噁英从 0.1 ngTEQ/m³ 降低至 0.02 ngTEQ/m³。该标准污染物限值浓度显著降低的主要原因有二:第一是通过掺烧工程实践及检测监测数据分析,更低的限值是可以实现的,从而降低标准限值尽可能减少环境污染;第二是污泥电厂掺烧过程中,由于燃煤烟气量巨大,掺烧比例低(约 5%),导致污泥产生的特征污染物得到稀释排放,因此浓度显著降低。此外,因为存在稀释排放的问题,所以对污泥电厂掺烧工程的烟气排放二次污染物评价时,除了考虑烟气浓度达标外,还应当关注污泥 5 个特征污染物的排放总量。

表 7 上海市燃煤耦合污泥电厂大气污染物排放标准 (DB31/1291—2021)

序号	污染物	限值 / (mg·m ⁻³)	监测位置
1	颗粒物	5	烟囱或烟道
2	二氧化硫	35	
3	氮氧化物	50	
4	氯化氢	10	
5	汞及其化合物	0.01	
6	镉、铊及其化合物 (以 Cd+Tl 计)	0.01	
7	锑、砷、铅、钴、铜、锰、镍、钒及其化合物	0.08	
8	二噁英类	0.02 ngTEQ/m ³	
9	烟气黑度 / 级	1	烟囱排放口

3 污泥电厂掺烧烟气污染物控制

目前,燃煤电厂原有烟气处理系统主要针对颗粒物、二氧化硫及氮氧化物等污染物,由表 6 排放标准中也可以看到,涉及控制的 5 项指标为颗粒物、二氧化硫、氮氧化物、汞及其化合物和烟气黑度。燃煤电厂烟气处理系统通常包括脱硝系统、除尘系统和脱硫系统。典型烟气净化工艺流程见图 1。烟气经过脱硝反应器后降温,之后进入除尘器,随后进入脱硫吸收塔,脱硫后的烟气经过烟囱排出。针对掺烧污泥,一般不改造原有烟气处理系统,使用相同处理流程。下文对燃煤电厂现有设施的相关技术,以及对污泥焚烧飞灰二次污染物(常规污染物和特征污染物)的有效性原理进行了总结。

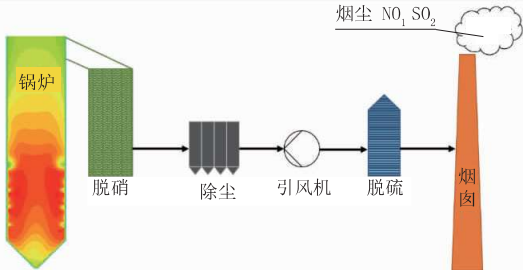


图 1 典型燃煤电厂烟气处理工艺示意图

3.1 常规污染物

- (1)氮氧化物。目前,我国绝大部分机组均采用了低氮燃烧器 +SCR 的脱硝技术路线,在超低排放改造方面,主要是对低氮燃烧进一步优化,通过增加填料层、全负荷脱硝等方式对 SCR 系统进一步完善。
- (2)颗粒物。颗粒物的控制技术主要为静电 / 布袋除尘器、湿式静电除尘器以及湿法脱硫塔协同控制技术^[26]。其中,电除尘器因具有除尘效率高、阻力小、能耗低、烟气处理量大、维护简单、长期运行费用低且不会产生二次污染等突出优点^[27],是燃煤电厂中应用最广泛的颗粒物脱除装备,欧美日等发达国家静电除尘器作为脱除颗粒物的优先技术,在美国应用占比约 80%左右,欧盟应用占比约 85%左右,在日本的燃煤电厂的使用比例更高,其在我国燃煤电的应用占比更是达到 90% ~ 95%。近年来,为满足我国日益严格的排放要求,电袋复合除尘技术、低低温电除尘技术和湿式静电除尘技术等多场协同作用下颗粒物高效控制新技术获得推广应用^[28]。
- (3)二氧化硫。我国燃煤电厂二氧化硫控制技术基本上为湿式石灰石 - 石膏法。为应对超低排放改造,一是传统脱硫技术的提效改造,如组合喷淋、改善塔内气流分布均匀性、改善塔壁区域的传质状况

等,二是一些新技术的研发,如双 pH 值循环脱硫技术、双托盘技术、脱硫除尘一体化等。

3.2 特征污染物

(1)二噁英

为了控制二噁英生成的风险,可通过以下两种思路来实现。第一,通过管理手段来控制。燃煤机组采用启动初期只烧煤,待温度升至 1 200℃ 以上时才开始掺入污泥,尽量避免在低于 850℃ 时掺烧污泥,通过管理手段控制二噁英的产生量。第二,污泥焚烧过程中二噁英的控制措施。措施之一是保证完全燃烧,保持污泥等废弃物燃烧在 850℃ 以上,保证烟气停留时间大于 2 s^[29,30]。措施之二是氧量控制,在 300℃ 的环境中二噁英的浓度主要取决于氧含量的多少^[29]。过氧环境中二噁英的浓度大大增加,一般工程中控制氧量在 8% 以下,研究表明减少 50% 的氧气就可以减少 30% 的二噁英的再次形成^[30]。总体而言,控制二噁英需要遵循“3T+E”工作原则,即 1T: 燃烧温度(Temperature); 2T: 停留时间(Time); 3T: 紊流度(Turbulence), E: 过氧控制(Excess)^[29]。

对已生成的二噁英可通过燃煤电厂现有烟气处理系统进行协同去除。研究表明:用于 NO_x 选择性催化还原(SCR)的催化剂,例如 TiO₂-V₂O₅/WO₃, 也可以用于氧化 PCDD/PCDFs, 两个过程具有相同的反应温度^[31]。该技术可以实现对二噁英 98% 以上的破坏率。美国戈尔和德国杜尔等公司正在推广利用负载 SCR 催化剂的烟气过滤材料来协同处理破坏二噁英类物质的工艺和材料。国内也有 SCR 装置对焦炉煤气燃烧废气中 PCDD/Fs 的协同脱除的研究报道^[32]。

(2)重金属

燃煤电厂现有燃烧方式和烟气净化系统对重金属具有一定的净化作用。重金属类可以通过源头控制、湿式洗涤和高效除尘协同去除。不同重金属在现有烟气处理设施中的去除效率与重金属的挥发性十分相关。针对不挥发类重金属,完全被结合到飞灰或炉渣中,随着除尘工艺绝大多数能够被去除;针对难挥发类重金属 Pb 和 Cd, 在锅炉内高温燃烧时气化,在烟气后续换热、处理过程中迅速冷凝,大部分附着在飞灰中,往往也能够被除尘工艺去除;针对易挥发的元素 Tl 一般在 450℃ ~ 500℃ 的温度区冷凝,也是随着烟气的降温,附着在飞灰中,与飞灰同时被去除;针对高挥发元素 Hg, 在锅炉及尾气处理系统内均不能冷凝和分离出来,存在烟气中的比例较大。

4 结 论

(1)污泥电厂掺烧系统污泥的特征污染物主要包括氯化氢、镉、铊及其化合物、锑、砷、铅、铬、钴、铜、锰、镍、钒及其化合物、二噁英和一氧化碳 4 项指标。其中二噁英可能主要来源于焚烧过程中高温气相生产、从头合成和前驱体合成三种途径,重金属主要来源于污泥中重金属挥发。

(2)欧盟目前无专门针对污泥焚烧的相关排放标准,具有针对废弃物单独焚烧和混烧的烟气标准,控制指标共 11 项,限值较我国标准更严格。美国具有针对污泥单独焚烧的标准,指标共 10 项,限值较我国和欧盟更严格。日本无专门针对污泥的排放标准,具有废弃物排放标准,指标共 8 项,绝大多数指标限值比我国严格。我国无专门针对污泥焚烧的排放标准,具有生活垃圾焚烧排放标准,上海市专门针对污泥电厂掺烧编制了地方标准,共 9 项指标,限值较我国生活垃圾排放标准更为严格。

(3)目前,污泥电厂掺烧烟气处理系统大多为原有燃煤电厂系统,无新增工艺。原有烟气处理系统对常规污染物和特征污染物均有处理效果。

参考文献:

- [1] 段妮娜,王逸贤,王磊,等.我国污泥处理处置主流技术路线的发展概况及制约因素[J].城市道桥与防洪,2019(11):86-89.
- [2] 饶远红.城市污泥资源化利用现状及发展趋势[J].中国资源综合利用,2022,40(7):91-93.
- [3] 吕伟,刘春楠,彭磊,等.污泥炭化产物园林基质利用研究[J].环境科学导刊,2022,41(3):49-53.
- [4] 卢义程.常州市污泥焚烧中心一期工程设计及运行[J].中国给水排水,2022,38(10):63-69.
- [5] 段妮娜,谭学军,张辰.污水处理厂污泥独立焚烧的热力计算方法解析[J].中国给水排水,2021,37(16):83-88.
- [6] 乔旭.协同焚烧干化污泥对垃圾锅炉性能的影响研究[J].四川环境,2021,40(3):5.
- [7] 孙承斌,安延生,王玉楷,等.水泥窑协同处置城市污泥探讨及试生产总结[J].水泥,2022(2):19-23.
- [8] 姜海英,党振辉,单锋.几种水泥窑处置污泥方式的分析与对比[J].水泥,2022(2):24-26.
- [9] 宋承楠,孙志.市政污泥资源化利用与水泥窑协同处置[J].中国建材,2022(1):132-134.
- [10] 朱凌君,陈林峰.1000MW 火电机组污泥掺烧比例影响研究[J].上海电力大学学报,2022,38(2):133-138.
- [11] 吕杨,常少英,王利,等.2×660MW 燃煤锅炉污泥掺烧关键技术研究及工程示范应用[J].当代化工研究,2022(7):84-86.
- [12] 水落元之,久山哲雄,小柳秀明,等.日本生活污水污泥处理处置的现状与特征分析[J].给水排水,2015,51(11):13-16.

- [13] 王成,陈柏校,夏玉坤,等.污泥焚烧技术现状及发展趋势[J].中国资源综合利用,2022,40(6):121-124.
- [14] SCHNELL M, HORST T, QUICKER P. Thermal treatment of sewage sludge in Germany: A review[J]. Journal of Environmental Management, 2020(263):110367.
- [15] 上海市排水管理事务中心. 2020 上海市排水行业发展报告[R]. 上海: 2021.
- [16] 张宗振,李德波,李新虎,等.污泥掺烧对燃煤机组锅炉效率及环保系统的影响[J].浙江电力,2020,39(7):93-101.
- [17] 苏杭. 不同污泥与煤混烧过程中重金属迁移规律及灰渣中重金属浸出特性研究[D]. 武汉:华中科技大学,2015.
- [18] 周莉菊,冯家满,赵由才.二噁英高温气相生成机理研究进展[J].有色冶金设计与研究,2007,28(2):77-80,87.
- [19] 王永基.含氮物质与中高温烟气中 NO_x 和二恶英的反应行为研究[D]. 上海:同济大学,2008.
- [20] 蒲舸.垃圾与煤循环流化床混烧污染物生成与净化特性研究[D].重庆:重庆大学,2006.
- [21] 徐旭,严建华,岑可法.垃圾焚烧过程二恶英的生成机理及相关理论模型[J].能源工程,2004(4):42-45.
- [22] 董长青,金保升,仲兆平,等.城市生活垃圾(MSW)与煤混烧过程中气体污染物的排放[J].热能动力工程,2001,16(6):586-590.
- [23] 董长青. 城市生活垃圾中主要有机组份流化床气化和混烧特性研究[D].南京:东南大学,2003.
- [24] 张建平. 城镇污水处理厂污泥与生活垃圾混烧项目环评关注重点探析[J].环境影响评价,2018,40(1):58-62.
- [25] 刘秀秀.污泥絮凝剂的研制及其应用性能研究[D].大连:大连理工大学,2015.
- [26] 雷宇,贺克斌,张强,等.基于技术的水泥工业大气颗粒物排放清单[J].环境科学,2008,29(8):2366-2371.
- [27] 聂孝峰,李东阳,郭斌.燃煤电厂电袋复合除尘器技术优势[J].电力科技与环保,2013,29(1):24-27.
- [28] 娄彤,CHEN KUIXU, ZHU ZHAOPING,等.耦合增强电袋复合除尘器除尘性能实验测试研究[J].锅炉技术,2020,51(2):68-72.
- [29] 符成龙,黄耀辉.上海某燃煤电厂干化污泥掺烧项目的案例分析[J].科技与创新,2019(18):147-148,150.
- [30] 周炫,蔡小兵.城市污泥和焚烧垃圾生产烧结砖二恶英等有害物的产生机理检测技术及减排措施探讨[J].砖瓦,2009(9):33-37.
- [31] Busca G, Baldi M, Pistarino C, et al. Evaluation of V₂O₅-WO₃-TiO₂ and alternative SCR catalysts in the abatement of VOCs[J]. Catalysis Today, 1999, 53(4):525-533.
- [32] 任美慧,樊芸,王胜,等.SCR 装置对焦炉煤气燃烧废气中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的协同脱除[J].环境科学,2019,40(1):143-148.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com