

# 燃煤热电厂掺烧污水厂污泥焚烧灰渣属性鉴别研究

孙亚敏

(安徽省生态环境监测中心, 安徽 合肥 230061)

**摘要:** 污泥焚烧是具有良好发展前景的污泥减量化技术。依据 GB 5085.1-2007 至 GB 5085.6-2007 等相关规范, 对合肥东方热电有限公司燃煤锅炉掺烧污泥飞灰和炉渣属性进行了分析和鉴别。鉴别结果表明, 燃煤热电厂锅炉掺烧城市生活污水处理厂污泥比例在不高于 6.7% 的情况下, 飞灰和炉渣均不具备危险废物特性, 可按照一般工业固体废物进行综合利用。同时, 焚烧飞灰和炉渣 pH 较高, 已接近《危险废物鉴别标准 腐蚀性鉴别》(GB 5085.1-2007) 标准限值, 故飞灰和炉渣综合利用时应选择对 pH 值要求较低的综合利用方式。

**关键词:** 污泥; 掺烧; 飞灰; 炉渣; 属性鉴别

**中图分类号:** X799.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-8382 (2021) 01-062-06

## Study on the characteristics identification of fly ash and cinder generated by coal-burned thermal power plant blending sewage sludge

SUN Yamin

(Anhui Eco-environmental Monitoring Center, Hefei 230061, China)

**Abstract:** Sludge burning is considered to be a kind of sludge reduction technology which has good prospects for development. According to standards GB 5085.1-2007—GB 5085.6-2007, the characteristics of ash and cinder generated by coal-burned boilers blended with sludge of Hefei Dongfang Thermal Power Plant are analyzed and identified. It is recognized that when the blended sludge proportion is not higher than 6.7%, the fly ash and cinder from coal-burned boilers blended with sewage sludge does not have the characteristics of hazardous solid waste and can be utilized as general solid waste. However the pH of fly ash and cinder is high and nearly close to the standard limit “Identification standards for hazardous wastes — Identification for corrosivity” (GB 5085.1-2007). The utilization way of ash and cinder with lower requirements for pH should be selected.

**Key words:** sludge; blended burning; fly ash; cinder; characteristics identification

城市污水处理厂污泥是城市生活污水在处理过程中产生的固态或半固态物质。随着城市污水处理厂的建设, 污泥产生量也随之增多。污泥处理处置应遵循“三化”原则(稳定化、减量化、无害化), 提倡因地制宜, 采用填埋、焚烧、综合利用等多种方式对污泥进行处理处置。《城镇污水处理厂污泥处理处置及污染防治技术政策(试行)》中提出, 在经济较为发达的大中城市等地区, 鼓励污

泥作为低质燃料掺烧在燃煤发电厂锅炉、水泥窑或砖窑中<sup>[1-3]</sup>。

燃煤热电厂掺烧污泥是一种污泥减量化的有效方法, 但污泥本身携带的有毒有害物质和焚烧过程中产生的二噁英等有毒有害物质可能会进入飞灰、炉渣。二噁英(Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans, 简称 PCDD/Fs) 是氯化多核芳香化合物的总称, 主要有多氯二苯并呋喃和多

收稿日期: 2020-08-18

作者简介: 孙亚敏(1975-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事建设项目竣工环保验收、环境管理等。

氯二苯并对二噁英两种。二噁英在常温状态下为固体,熔点较高,蒸汽压以及水溶性低,易吸附于颗粒物<sup>[4]</sup>。自 1977 年 Olive 等人在荷兰阿姆斯特丹垃圾焚烧炉烟气中首次检测出二噁英以来<sup>[5-6]</sup>,多国学者对焚烧产生二噁英的机理进行了较为深入的研究。焚烧过程中二噁英的形成机理主要有以下两类:①反应载体为大分子的碳结构,在催化剂(主要为铜族化合物)作用下反应,生成二噁英。②不完全燃烧和飞灰表面的异相催化反应,形成多种有机前驱物,再生成二噁英<sup>[7]</sup>。若焚烧过程产生的飞灰、炉渣中有毒、有害物质含量过高或处置不当,可能会对大气、土壤、地表水、地下水等产生不利的影响<sup>[8]</sup>。因此,热电厂掺烧城市污水处理厂污泥产生的焚烧飞灰、炉渣应进行危险废物属性鉴别。文章以合肥东方热电有限公司 1# 锅炉掺烧污泥为实例,对焚烧飞灰、炉渣属性鉴别进行了研究。

## 1 污泥掺烧实例

合肥东方热电有限公司位于安徽省合肥市新站高新技术产业开发区,是一家燃煤热电厂,其一期工程装机规模为 2 台 75 t/h 循环流化床锅炉(1# 锅炉、2# 锅炉),配备 1 台 6 MW 背压式汽轮发电

机组。项目于 2016 年 10 月投产,2018 年完成锅炉的技术改造。依托现有处理能力 300 t/d 的市政污泥干化系统和东方热电有限公司现有 2 台 75 t/h 循环流化床锅炉,将干化后的干污泥和煤按比例进行掺烧,干化污泥含水率 40%。

根据工程经验及文献[2]、文献[9]等研究,不同污泥掺烧比例对锅炉燃烧效率以及燃烧产污可能会产生重要影响。污泥含水率高、热值低,也给锅炉安全运行带来了风险,故污泥掺烧应保障炉膛燃烧的安全性。实验表明污泥掺烧比例在 7% 以内时,不会对锅炉效率产生明显变化。掺烧 7% 污泥后炉膛温度较未掺烧时降低了 90℃~298℃,但都在 1100℃ 以上<sup>[10]</sup>,对二噁英的产生不会产生明显影响。当掺烧比例增加至 10% 以上时,炉膛燃烧状态变化明显,表现为烟气温度下降或是燃烧火焰延长<sup>[2]</sup>。

为确保锅炉燃烧效率,减轻运行风险,合肥东方热电有限公司锅炉污泥掺烧比例不高于 6.7%,干化污泥日掺烧量约为 30 t,并配套建设辅助设施。为有效控制二噁英产生,在点火、升温过程投加纯煤粉,不投加掺有污泥的燃料。公司原煤年用量 12.375 万 t,年实际掺烧污泥量约 8250 t,年产生飞灰和炉渣分别约 1200 t。

表 1 典型干化污泥和混合燃料主要成分及热值一览表

序号	项目	符号	单位	干化污泥	原煤	混合燃料(原煤+干化污泥)
1	收到基碳元素	Car	%	13.21	52.31	49.87
2	收到基氢元素	Har	%	1.60	3.64	3.51
3	收到基氧元素	Oar	%	5.10	6.50	6.41
4	收到基氮元素	Nar	%	1.80	0.84	0.90
5	全硫	St.ar	%	0.24	0.30	0.30
6	全水分	Mt	%	38.42	7.44	9.38
7	收到基灰分	Aar	%	39.63	28.97	29.64
8	挥发份	Var	%	19.52	26.02	25.61
9	低位发热值	Qnet.ar	kJ/kg	3550	20400	19347
10	氯	Clar	%	0.027	0.012	0.013
11	总砷	As, ar	μg/g	15	1	1.88
12	总汞	Hg, ar	μg/g	0.275	0.195	0.2
13	总镉	Cd, ar	μg/g	1.3	3.8	3.64
14	总铬	Cr, ar	μg/g	2	2	2
15	总铅	Pb, ar	μg/g	73	100	98

公司接收处置的污泥来源限定为城市生活污水处理厂污泥,不混入其他工业污泥,主要包括蔡田铺污水处理厂、王小郢污水处理厂、朱砖井污水处理厂等合肥市中心城区污水处理厂产生的市政污泥。表 1 为公司委托山东泰山矿产资源检测研究院对典型掺烧干化污泥、原煤和混合燃料主要成分及热值的检测结果。从表 1 可见,除总砷、总汞、氯元素外,干化污泥其余重金属成分均低于原煤。

## 2 危险废物鉴别方案

### 2.1 危险废物鉴别流程

危险废物是指列入《国家危险废物名录(2016 版)》或者根据 GB5085.1-2007 至 GB5085.7-2007、HJ 298-2019 等危险废物鉴别标准和鉴别方法认定的具有危险特性的固体废物。危险废物鉴别流程如下:

第一步,判断待鉴别废物是否属于固体废物范畴,判断依据《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》、《固体废物鉴别导则》。

第二步,如待鉴别废物属于固体废物,再进一步判断其是否属于危险废物。凡列入《国家危险废物名录(2016 版)》的固体废物可直接判定为危险废物,不需要进行鉴别。未列入《国家危险废物名录(2016 版)》的固体废物,按《危险废物标准鉴别 通则》<sup>[11]</sup>和《危险废物鉴别技术规范》<sup>[12]</sup>相关要求属性鉴别。

第三步,按照 GB5085.1-2007 至 GB5085.6-2007 鉴别标准进行危险废物属性鉴别,凡具有腐蚀性、急性毒性、浸出毒性、易燃性、反应性等一种或一种以上危险特性的固体废物,属于危险废物。

### 2.2 鉴别方案

#### 2.2.1 检测项目筛选

##### (1) 腐蚀性

腐蚀性<sup>[13]</sup>鉴别标准主要检测指标为 pH。

##### (2) 急性毒性

急性毒性<sup>[14]</sup>检测项目为口服毒性半致死量(LD<sub>50</sub>)、皮肤接触毒性半致死量(LD<sub>50</sub>)和吸入毒性半数致死浓度(LC<sub>50</sub>)。灰渣中含有的毒性物质主要为二噁英,类比同类型项目的分析结果<sup>[2]</sup>,其分析样品均不具备急性毒性,故不考虑急性毒性。

##### (3) 浸出毒性

根据合肥东方热电有限公司生产工艺和原辅料使用情况及污泥掺烧工艺,污泥在循环流化床锅炉内经过高温焚烧(炉温设计值为 850~950℃)后,灰渣基本不含有毒有机物、农药、烷基汞等,故合肥东方热电有限公司锅炉掺烧污泥焚烧产生的飞灰和炉渣浸出毒性<sup>[15]</sup>鉴别指标主要为重金属及无机氟化物等。灰渣毒性物质主要考虑二噁英。

##### (4) 易燃性和反应性

根据合肥东方热电有限公司生产工艺和原辅料使用情况及污泥掺烧工艺,污泥在锅炉内经过高温焚烧后的残余物已不具有易燃性和爆炸性,故不考虑易燃性<sup>[16]</sup>。焚烧残余物不属于废弃氧化物和有机过氧化物,与水接触时一般也不发生化学反应,故不考虑反应性<sup>[17]</sup>。

通过以上分析,合肥东方热电有限公司污泥掺烧后飞灰和炉渣鉴别检测项目筛选结果及判定限值见表 2。

表 2 检测项目汇总表

检测类别	检测项目	鉴别标准判定限值	
毒性物质含量	多氯代二苯并-对-二噁英,多氯代二苯并呋喃	≥ 15 μg-TEQ/kg	
	总砷	5 mg/L	
	总汞	0.1 mg/L	
	总铬	15 mg/L	
	总铅	5 mg/L	
	浸出毒性	总铜	100 mg/L
		总锌	100 mg/L
		总镍	5 mg/L
		总镉	1 mg/L
		六价铬	5 mg/L
	无机氟化物	100 mg/L	
腐蚀性	pH 值	pH ≥ 12.5 或 pH ≤ 2.0	

#### 2.2.2 采样方法

##### (1) 采样点位

飞灰采样点位于 1# 锅炉除尘器下灰口,炉渣采样点位于 1# 锅炉出渣系统出渣口。

##### (2) 份样数和份样量

根据《危险废物鉴别技术规范》相关要求,如果固体废物来源于长期运行稳定的生产工艺及设施,固体废物采样数可适当减少,但一般不少于 5 个<sup>[12]</sup>。据了解,合肥东方热电有限公司每天处置

污泥的来源、处置量、掺烧方式、掺烧比例基本一致。具体采样方式为:连续采集 5 天,每天以等时间间隔(1 次/1h)采集飞灰和炉渣各 20 次,各制成 20 个混样。每天采集的飞灰和炉渣 20 个混样按要求制成一个大样,共得到飞灰鉴别 5 个大样、炉渣鉴别 5 个大样。

2.2.3 运行工况

采样期间,合肥东方热电有限公司 1# 锅炉负荷、用煤量、污泥掺烧量等情况见表 3。由于污泥掺烧对燃烧稳定性已造成一定的影响,故采样期间锅炉负荷不宜设计太低。根据锅炉实际出力工况,采样期间,1# 锅炉负荷率为 80.4%~81.6%,污泥掺烧比为 6.56%~6.63%。

2.3 鉴别结果

2.3.1 毒性物质含量鉴别结果

样品鉴别时只对飞灰中二噁英进行毒性物质含量鉴别。从 5 个飞灰样品中随机选取一个样品

进行毒性物质含量分析。飞灰中二噁英毒性鉴别检测结果见表 4。

表 3 采样期间热电厂 1# 锅炉运行工况

日期	锅炉负荷 / (t/h)	用煤量 / (t/h)	干化污泥掺烧量 / (t/h)	污泥掺烧比 / (%)
2019-05-09	61.0	9.96	0.66	6.63
2019-05-10	60.3	9.85	0.65	6.60
2019-05-11	61.0	9.97	0.66	6.62
2019-05-12	59.8	9.76	0.64	6.56
2019-05-13	61.2	10.00	0.66	6.60

依据《危险废物鉴别标准 毒性物质含量鉴别》(GB5085.6-2007)条款 4 的鉴别标准中 4.8 项要求:含有多氯二苯并对二噁英和多氯二苯并呋喃的含量  $\geq 15 \mu\text{g TEQ/kg}$  判定固体废物是危险废物<sup>[16]</sup>。从表 4 可以看出,飞灰中二噁英毒性当量质量浓度为  $4.1 \times 10^{-1} \text{ ng TEQ/kg}$ ,远低于毒性当量判定限值  $15 \mu\text{g TEQ/kg}$ ,鉴别结果表明飞灰不是具有毒性物质的危险废物。

表 4 飞灰毒性物质当量、急性毒性和腐蚀性检测结果

二噁英类	实测质量浓度 (w) / 毒性当量 (TEQ) 质量浓度 /		GB 5085.6-2007 鉴别标准判定限值		
	ng/kg	1-TEF ng/kg			
多氯二苯并 对二噁英 (PCDDs)	2,3,7,8-T <sub>4</sub> CDD	N.D.	1	$3.0 \times 10^{-2}$	15 $\mu\text{g-TEQ/kg}$
	1,2,3,7,8-P <sub>5</sub> CDD	N.D.	0.5	$3.5 \times 10^{-2}$	
	1,2,3,4,7,8-H <sub>6</sub> CDD	$3.4 \times 10^{-1}$	0.1	$3.4 \times 10^{-2}$	
	1,2,3,6,7,8-H <sub>6</sub> CDD	$2.3 \times 10^{-1}$	0.1	$2.3 \times 10^{-2}$	
	1,2,3,7,8,9-H <sub>6</sub> CDD	N.D.	0.1	$1.0 \times 10^{-2}$	
	1,2,3,4,6,7,8-H <sub>7</sub> CDD	$6.4 \times 10^{-1}$	0.01	$6.4 \times 10^{-3}$	
	O <sub>8</sub> CDD	3.1	0.001	$3.1 \times 10^{-3}$	
	2,3,7,8-T <sub>4</sub> CDF	N.D.	0.1	$2.0 \times 10^{-2}$	
	1,2,3,7,8-P <sub>5</sub> CDF	N.D.	0.05	$1.0 \times 10^{-2}$	
	2,3,4,7,8-P <sub>5</sub> CDF	N.D.	0.5	$1.0 \times 10^{-1}$	
多氯二苯并呋喃 (PCDFs)	1,2,3,4,7,8-H <sub>6</sub> CDF	$3.7 \times 10^{-1}$	0.1	$3.7 \times 10^{-2}$	15 $\mu\text{g-TEQ/kg}$
	1,2,3,6,7,8-H <sub>6</sub> CDF	$4.5 \times 10^{-1}$	0.1	$4.5 \times 10^{-2}$	
	2,3,4,6,7,8-H <sub>6</sub> CDF	N.D.	0.1	$2.0 \times 10^{-2}$	
	1,2,3,7,8,9-H <sub>6</sub> CDF	N.D.	0.1	$2.0 \times 10^{-2}$	
	1,2,3,4,6,7,8-H <sub>7</sub> CDF	1.0	0.01	$1.0 \times 10^{-2}$	
	1,2,3,4,7,8,9-H <sub>7</sub> CDF	N.D.	0.01	$2.0 \times 10^{-2}$	
	O <sub>8</sub> CDF	$7.2 \times 10^{-1}$	0.001	$7.2 \times 10^{-4}$	
二噁英类总量 $\Sigma$ (PCDDs+ PCDFs)		$4.1 \times 10^{-1}$			

注:1. 实测质量浓度 (w):二噁英类质量浓度测定值,ng/kg;2. 毒性当量因子 (TEF):采用国际毒性当量因子 1-TEF 定义;3. 毒性当量 (TEQ) 质量浓度:折算为相当 2,3,7,8-T<sub>4</sub>CDD 的质量浓度,ng/kg;4. 样品量:4.97 kg;5. 当实测质量浓度低于检出限时,以“N.D.”表示,计算毒性当量 (TEQ) 质量浓度时以 1/2 检出限计算。

表 5 飞灰浸出毒性检测结果

单位:mg/L

样品编号	总铜	总锌	总铅	总镉	总镍	总砷	总汞	总铬	六价铬	无机氟化物
飞灰-1	0.03	0.013	0.3	0.026	<0.04	$2.4 \times 10^{-3}$	$1.38 \times 10^{-3}$	0.411	0.232	2.86
飞灰-2	0.04	0.008	0.3	0.039	<0.04	$3.6 \times 10^{-3}$	$1.03 \times 10^{-3}$	0.625	0.345	0.37
飞灰-3	0.03	0.007	0.3	0.034	<0.04	$3.7 \times 10^{-3}$	$0.10 \times 10^{-3}$	0.598	0.346	1.48
飞灰-4	0.03	0.005	0.2	0.041	<0.04	$2.6 \times 10^{-3}$	$0.65 \times 10^{-3}$	0.478	0.334	1.63
飞灰-5	0.04	0.009	0.2	0.044	<0.04	$3.9 \times 10^{-3}$	$0.72 \times 10^{-3}$	0.411	0.364	1.30
GB 5085.3-2007 鉴别标准判定限值	100	100	5	1	5	5	0.1	15	5	100

表 6 炉渣浸出毒性检测结果

单位:mg/L

样品编号	总铜	总锌	总铅	总镉	总镍	总砷	总汞	总铬	六价铬	无机氟化物
炉渣-1	0.02	0.012	0.2	0.032	<0.04	$1.3 \times 10^{-3}$	$7.07 \times 10^{-3}$	0.052	0.037	0.18
炉渣-2	0.02	<0.005	0.1	0.030	<0.04	$0.9 \times 10^{-3}$	$3.08 \times 10^{-3}$	0.033	0.016	0.36
炉渣-3	0.02	0.007	0.1	0.031	<0.04	$5.2 \times 10^{-3}$	$1.76 \times 10^{-3}$	0.114	0.035	0.24
炉渣-4	0.02	0.007	0.1	0.035	<0.04	$<0.2 \times 10^{-3}$	$0.61 \times 10^{-3}$	0.242	0.027	0.22
炉渣-5	0.02	0.010	0.1	0.037	<0.04	$4.4 \times 10^{-3}$	<0.005	0.047	0.026	0.46
GB 5085.3-2007 鉴别标准判定限值	100	100	5	1	5	5	0.1	15	5	100

### 2.3.2 浸出毒性鉴别结果

飞灰和炉渣浸出毒性检测结果分别见表 5 和表 6。

依据《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB 5085.3-2007) 条款 3:按照《固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法》制备的固体废物浸出液中重金属或无机氟化物含量超过判定限值,则该固体废物是具有浸出毒性的危险废物<sup>[15]</sup>。从表 5 和表 6 可以看出,5 个飞灰和 5 个炉渣样品浸出液中总铜、总锌、总铅、总镉、总镍、总砷、总汞、总铬、六价铬、无机氟化物的含量均未超过鉴定标准判定限值,故飞灰、炉渣不是具有浸出毒性的危险废物。

### 2.3.3 腐蚀性鉴别结果

飞灰和炉渣腐蚀性监测结果见表 7。

依据《危险废物鉴别标准 腐蚀性鉴别》(GB 5085.1-2007) 条款 3:符合下列条件之一的固体废物属于危险废物。①在 55℃条件下,对《优质碳素结构钢》中规定的 20 号钢材的腐蚀速率大于等于 6.35 mm/a;②按照《固体废物 腐蚀性测定 玻璃电极法》制备的固体废物浸出液,pH 值大于等于 12.5 或者小于等于 2.0<sup>[13]</sup>。从表 7 可以看出,5 个飞灰样品浸出液中 pH 值范围为 12.17~12.36,5 个炉渣样品浸出液中 pH 值 12.22~12.34,飞灰和炉渣均不

是具有腐蚀性的危险废物。

从表 7 可以看出,飞灰和炉渣 pH 值较高,已接近《危险废物鉴别标准 腐蚀性鉴别》(GB 5085.1-2007) 标准限值,主要原因可能是由于循环流化床锅炉采用炉内喷钙脱硫法,钙硫比控制不当导致未完全反应的石灰石粉随飞灰和炉渣外排,从而提高了飞灰和炉渣的 pH 值。建议企业进一步加强炉内脱硫钙硫比的控制措施,降低飞灰和炉渣 pH 值。

表 7 飞灰和炉渣腐蚀性检测结果

样品编号	pH(飞灰)	样品编号	pH(炉渣)
飞灰-1	12.20	炉渣-1	12.22
飞灰-2	12.36	炉渣-2	12.34
飞灰-3	12.17	炉渣-3	12.24
飞灰-4	12.35	炉渣-4	12.33
飞灰-5	12.24	炉渣-5	12.30
GB 5085.1-2007 pH ≥ 12.5 或 pH ≤ 2.0 鉴别标准判定限值			
GB 5085.1-2007 pH ≥ 12.5 或 pH ≤ 2.0 鉴别标准判定限值			

## 3 结论

(1) 依据《危险废物鉴别标准 腐蚀性鉴别》(GB 5085.1-2007)、《危险废物鉴别标准 浸出毒

性鉴别》(GB 5085.3-2007)、《危险废物鉴别标准 毒性物质鉴别》(GB 5085.6-2007)对飞灰和炉渣进行分析鉴别,合肥东方热电有限公司飞灰和炉渣均不是具有腐蚀性和浸出毒性的危险废物。燃煤热电厂锅炉掺烧城市生活污水处理厂污泥比例不高于 6.7% 的情况下,产生的飞灰和炉渣属性为一般工业固体废物。

(2) 合肥东方热电有限公司燃煤锅炉掺烧污泥产生的飞灰和炉渣 pH 较高,已接近《危险废物鉴别标准 腐蚀性鉴别》(GB 5085.1-2007)标准限值,建议企业进一步加强炉内脱硫钙硫比的控制措施,降低飞灰和炉渣 pH 值。在飞灰和炉渣 pH 值较高的情况下,选择对 pH 值要求较低的综合利用方式。

(3) 热电厂掺烧污泥产生的飞灰和炉渣特性取决于掺烧污泥的来源和组分,有毒有害成分含量过高的污泥焚烧产生的飞灰和炉渣可能具有一定的危险特性。因此,不同热电厂锅炉掺烧污泥产生的飞灰和炉渣应按要开展危险废物鉴别工作,并根据鉴别结果判定其是否属于危险废物。如不属于危险废物,可进行有效的综合利用。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇污水处理厂污泥处理处置及污染防治技术政策(试行): 建城[2009] 23 号[S].
- [2] 何洪浩,李文军,徐众,等. 火力发电厂污泥掺烧技术应用[J]. 热力发电,2020,49(3):137-140.
- [3] 马睿,王波. 污泥掺烧对燃煤电站锅炉热效率的影响[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2018,34(2):200-204.
- [4] 陈彤. 城市生活垃圾焚烧过程中二噁英的形成机理及控制技术[D]. 杭州:浙江大学,2006.
- [5] Stieglitz L, Vogg H. On formation conditions of PCDD/

- PCDF in fly ash from municipal waste incinerators[J]. Chemosphere,1987,16(8/9):1917-1922.
- [6] Hagenmaier H, Kraft M, Brunner H, et al. Catalytic effects of fly-ash from waste incineration facilities on the formation and decomposition of polychlorinated dibenzo-para-dioxins and polychlorinated dibenzofurans [J]. Environmental Science & Technology,1987,21(11):1080-1084.
- [7] Tuppurainen K, Halonen I, Ruokojärvi P, et al. Formation of PCDDs and PCDFs in municipal waste incineration and its inhibition mechanisms: a review[J]. Chemosphere,1998,36(7):1493-1511.
- [8] 吴高强,施晓亮,顾红波,等. 燃煤热电厂掺烧城镇污泥的飞灰属性鉴别研究[J]. 环境工程,2015,33(2):113-116,163.
- [9] 陈大元,王志超,李宇航,等. 燃煤机组耦合污泥发电技术[J]. 热力发电,2019,48(4):15-20.
- [10] 刘帅,吕当振,杨剑锋,等. 大型电站锅炉污泥掺烧比例对飞灰特性及锅炉经济性与安全性的影响[J]. 粉煤灰综合利用,2018,31(5):123-126,132.
- [11] 中国环境科学研究院. 危险废物鉴别标准通则: GB5085.7-2019[S].
- [12] 中华人民共和国生态环境部. 危险废物鉴别技术规范: HJ 298-2019[S].
- [13] 国家环境保护总局. 危险废物鉴别标准 腐蚀性鉴别: GB 5085.1-2007[S]. 北京: 中国环境科学出版社,2007.
- [14] 国家环境保护总局. 危险废物鉴别标准 急性毒性初筛: GB 5085.2-2007[S]. 北京: 中国标准出版社,2007.
- [15] 国家环境保护总局. 危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别: GB 5085.3-2007[S]. 北京: 中国环境出版社,2007.
- [16] 国家环境保护总局. 危险废物鉴别标准 易燃性鉴别: GB 5085.4-2007[S]. 北京: 中国环境出版社,2007.
- [17] 国家环境保护总局. 危险废物鉴别标准 反应性鉴别: GB 5085.5-2007[S]. 北京: 中国标准出版社,2007.
- [18] 国家环境保护总局. 危险废物鉴别标准 毒性物质含量鉴别: GB 5085.6-2007[S]. 北京: 中国标准出版社,2007.