



移动扫码阅读

崔兵,金怡.病死动物无害化焚烧烟气净化系统的应用研究[J].能源环境保护,2022,36(1):83-88.

CUI Bing, JIN Yi. Application of incineration flue gas purification system in harmless disposal of dead animals[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(1): 83-88.

# 病死动物无害化焚烧烟气净化系统的应用研究

崔兵<sup>1</sup>, 金怡<sup>2</sup>

(1. 中煤科工集团杭州研究院有限公司, 浙江 杭州 311201; 2. 杭州电子科技大学 材料与工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**针对焚烧法无害化处理病死动物产生的废气,设计了以“急冷+干法脱酸+活性炭吸附+布袋除尘”工艺为核心的烟气净化系统,考察了冷却水量、熟石灰添加量、活性炭投加量等因素的影响。结果表明:在冷却水量为0.9 t/h、钙酸比为1.4、活性炭投加量为3 kg/h的条件下,酸性气体和二噁英去除率分别达到75.32%和95.42%,二噁英的平均排放浓度为0.023 ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>,总运行成本约为137.35元/h。

**关键词:**病死动物;焚烧法;二噁英;烟气净化;工业应用

中图分类号:X701

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2022)01-0083-06

## Application of incineration flue gas purification system in harmless disposal of dead animals

CUI Bing<sup>1</sup>, JIN Yi<sup>2</sup>

(1. Hangzhou Research Institute of China Coal Technology &amp; Engineering Group, Hangzhou 311201, China; 2. College of Materials &amp; Environmental Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to treat the waste gas produced during harmless disposal of dead animals by incineration method, a flue gas purification system based on the process of "quench+dry deacidification+activated carbon adsorption+bag dust removal" was designed. The effects of cooling water consumption, hydrated lime consumption and activated carbon consumption on the treatment were investigated. The results shows that when the cooling water consumption is 0.9 t/h, the calcium acid ratio is 1.4 and the dosage of activated carbon is 3 kg/h, the removal rates of acid gas and dioxin reach 75.32% and 95.42%, respectively. The average emission concentration of dioxin is 0.023 ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>. The total operating cost is about 137.35 yuan/h.

**Key Words:** Dead animals; Incineration method; Dioxin; Flue gas purification; Industrial application

## 0 引言

现阶段国内外病死动物的主要处理方法包括填埋法、焚烧法、化制法和发酵堆肥法<sup>[1]</sup>。焚烧法的无害化、减量化程度高,同时产生的热能可回收利用,具有技术成熟可靠、占地面积小等优势<sup>[2]</sup>,因此,国际上普遍采用焚烧法处理病死动物尸体及其产品<sup>[3]</sup>。然而传统的焚烧工艺在环保上很难达标,产生的烟气中含有粉尘、酸性气体、二噁英

等二次污染物<sup>[4-5]</sup>。单一除尘、脱酸处理工艺难以确保污染因子满足排放标准,尤其是高毒性的二噁英,更是烟气中的治理难点<sup>[6-7]</sup>。因此,本文设计“急冷降温+干法脱酸+活性炭吸附+布袋除尘”净化工艺,并提供了设备参数以及运行数据,以期为病死动物无害化焚烧处理烟气净化工艺的推广提供参考和借鉴。

## 1 工程设计

### 1.1 工程概况

浙江省某市生物开发有限公司处理该市各大畜禽养殖场的病死动物尸体,日处理规模约 15 t/d。在热解气化过程中,颗粒物、HCl、SO<sub>2</sub>、二噁英等指标超标,考虑净化效率、投资费用、运行费用等因素,设计了一种“急冷降温+干法脱酸+活性炭吸附+布袋除尘”治理工艺,可以实现上述污染物浓度均达标排放。

### 1.2 设计条件

该公司处理的烟气主要来源于气化炉,设计处理废气量为 30 000 Nm<sup>3</sup>/h,运行时间均按 24 h/d 计。根据《浙江省死亡动物无害化集中处置技术导则(试行)》规定,本项目烟气排放执行《危险废物焚烧污染控制标准》(GB 18484—2001),其中二噁英排放限值应低于 0.1 ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>。根据农医发[2017]25号的要求,烟气需达到《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996)二级标准,取 2 个标准中更严格的标准限值,具体见表 1。

表 1 烟气源折算浓度及排放标准

Table 1 Conversion concentrations and emission standard of flue gas source

序号	污染物	单位	折算浓度	排放标准
1	烟尘	mg/m <sup>3</sup>	750	80
2	HCl	mg/m <sup>3</sup>	196	70
3	SO <sub>x</sub>	mg/m <sup>3</sup>	420.7	300
4	NO <sub>x</sub>	mg/m <sup>3</sup>	59.6	240
5	CO	mg/m <sup>3</sup>	155	80
6	汞及其化合物 (以 Hg 计)	mg/m <sup>3</sup>	0.19	0.1
7	镉及其化合物 (以 Cd 计)	mg/m <sup>3</sup>	0.16	0.1
8	二噁英类	ng-TEQ/Nm <sup>3</sup>	0.5	0.1

注:烟温:900~1 100 ℃;各标准均以标准状态 11%O<sub>2</sub>的干烟气为参考值换算;NO<sub>x</sub>参照执行《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996)二级标准,其余污染因子执行《危险废物焚烧污染控制标准》(GB 18484—2001)

### 1.3 工艺流程

企业在热解气化病死动物过程产生的烟气采用“急冷+干法脱酸+活性炭喷射+布袋除尘”的净化工艺,流程图详见图 1。

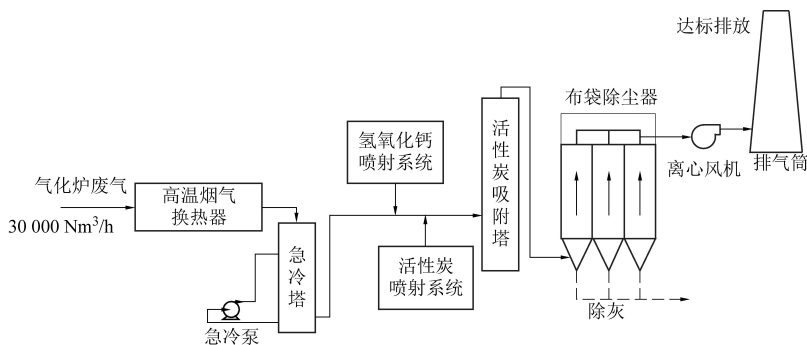


图 1 烟气净化系统工艺流程

Fig.1 Process flow of the flue gas purification system

(1) 换热。高温烟气换热器直径 2.5 m,高 12 m,设计处理风量为 16 000 Nm<sup>3</sup>/h,采用列管式换热形式,有效换热面积 190 m<sup>2</sup>。高温烟气换热器采用通过浮球开关自动补充的工业自来水作为冷却介质将气化炉产生的约 1 000 ℃烟气降至 650 ℃左右,而后离开换热器。

(2) 急冷。急冷塔主体直径 2.8 m,高 12 m,内壁为耐高温耐腐蚀耐火砖堆砌而成。烟气从急冷塔顶部进入塔内,停留约 6.5 s。急冷塔顶部配备 3 支双流体喷枪,喷嘴上都分布 8 个 6.3 mm 的喷孔,喷水量 0.6~3 t/h 可调,喷射角度为 30°呈锥形雾场,调压至 0.5 MPa 左右的工业自来水和

压缩空气经双流体雾化喷枪均匀喷入急冷塔,将烟气迅速冷却到 150~190 ℃,烟气离开急冷塔。脱除的一部分飞灰从急冷塔底部排出,收集后外运处理。

(3) 吸附脱酸。烟气进入干法脱酸塔,通过管道直接向烟气中喷射熟石灰粉末和活性炭粉末,熟石灰粉末与 HCl、HF、SO<sub>2</sub> 等酸性气体充分接触反应,能有效地去除烟气中酸性气体。活性炭粉末可吸附烟气中 Hg 等重金属以及二噁英等污染物。烟气从干法脱酸塔底部进入,给料机通过变频器控制,均匀、连续给料。通过罗茨风机鼓出的压缩空气将熟石灰喷入干法脱酸塔内,与烟气中

的酸性气体发生化学反应。

(4)除尘。除尘器采用的工艺为袋式除尘,设计处理风量为 40 000 Nm<sup>3</sup>/h,过滤面积 960 m<sup>2</sup>,共计 400 条直径 16 cm、长 6 m 的布袋,布袋材质为氟美斯+聚四氟乙烯覆膜(PTFE)。烟气夹带粉尘进入袋式除尘器,含尘气体通过布袋除尘器内的导流板,使烟气均匀分布,粗尘粒受重力沉降至灰斗底部,细尘粒随气流转折向上进入过滤室,粉尘被拦截在 PTFE 膜材质的滤袋外侧,表面形成滤饼。当系统阻力大于设定值时(一般设定为 1 200 Pa,可调),开始脉冲喷吹清灰。净化后的气体进入清洁室,随后排出。由于动物焚烧烟气中的氯化物具有较强的吸水性,故在除尘器灰斗上设有电加热器,确保外表面温度不小于 50 ℃,避免出现灰搭桥、板结和酸结露等现象出现。在袋式除尘器中,烟气中的酸性气体继续和熟石灰反应,活性炭继续吸附烟气中的重金属和二噁英。各种颗粒(包含烟气中的烟尘,凝结的重金属、反应剂、反应生成物以及吸附后的活性炭)附着在除尘器滤袋表面,再经压缩空气脉冲清灰进入除尘器灰斗中,从而实现清灰过程。

(5)在线监测。在接入烟囱之前的烟道上设置在线监控系统,对焚烧烟气进行在线监控,并与当地环保部门联网,在线监控系统监测包含 NO<sub>x</sub>、CO、SO<sub>2</sub>、HCl、粉尘等参数指标。

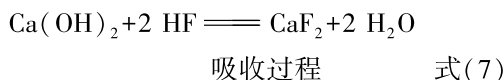
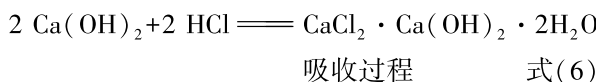
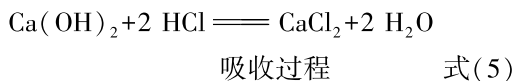
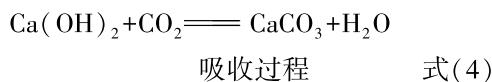
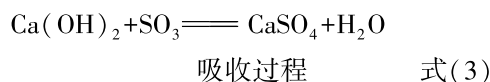
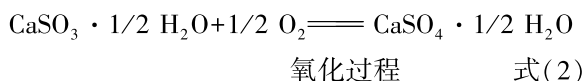
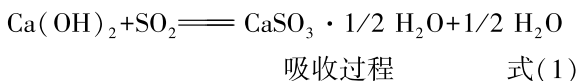
(6)排放。净化后的废气经过离心风机和排气筒 35 m 高空达标排放。

## 2 工艺选择

### 2.1 脱酸

烟气中酸性气体主要包括 HCl、SO<sub>2</sub>、HF 等,干法脱酸是将碱性脱酸剂(如碳酸氢钠或氢氧化钙)喷入脱酸塔内,与酸性气体发生中和反应,烟气中的酸性成分变成中性盐粒子,从而被脱除<sup>[8]</sup>,反应见式(1)~式(7)。在一般情况下,烟气中吸收酸性成分的能力是随温度的降低而增加的,所以脱酸的温度应要尽可能低,一般将烟气温度控制在酸露点以上 10~20 ℃,在本工程中烟气温度在 150 ℃左右。

焚烧尾气处理常使用干式脱酸塔与布袋除尘器组合工艺,其具有设备简单、投资成本低、维修容易、管线不易阻塞等优点,本工程选择使用干法脱酸即可达到排放要求。



### 2.2 二噁英的去除

二噁英是指多氯二苯并二噁英,多氯二苯并呋喃及其同系物(PCDDs 和 PCDFs),是毒性极强的污染物,其熔点较高、难溶于水、易溶于脂肪,在强酸强碱中能够保持稳定<sup>[9]</sup>。

减少二噁英排放主要可以采用以下三种技术:利用“3T+E”原则控制焚烧的工艺条件、减少燃烧后区的低温再生、利用尾气净化装置<sup>[10]</sup>。

在本工程中,首先烟气通过急冷塔急冷至 160 ℃,缩短了 250~500 ℃的停留时间,减少了二噁英的再生。其次,利用活性炭较大的比表面积以及其表面官能团<sup>[11-12]</sup>,深度吸附处理烟气中二噁英以及重金属,确保烟气达标排放,本工程使用活性炭的规格参数为粒度:200 目或更小;表面积:≥800 m<sup>2</sup>/g;堆积密度:0.4~0.6 kg/L;碘吸附值:≥950 mg/g;四氯化碳吸附率:≥60%。

### 2.3 运行参数控制

为实现烟气净化工艺系统高效节能地运行,通过三个控制回路,精准合理地确定冷却水量、熟石灰配料比、活性炭添加量。

第一个控制回路是通过测量急冷塔出口烟气温度来控制给水量,烟气冷却到适当的温度,使其保持在露点温度以上,确保布袋除尘器安全运行,提高脱酸过程化学反应率。

第二个控制回路是通过监测入口烟气的流量和出口气体的酸性气体含量控制熟石灰的添加量,计算熟石灰的配料比(即 Ca/酸比:Ca 与 SO<sub>2</sub>+HCl 的摩尔比)。

第三个控制回路是通过根据烟囱处检测出有害物量控制活性炭添加量。粉末活性炭由给料机经罗茨风机加速混合,喷入布袋除尘器进口的烟道中,在该处设置喷嘴,使得活性炭均匀分散,确

保对烟气中的二噁英类毒物、重金属的吸附达到最佳效果,达到环保要求。

经现场调试,当冷却水以 0.9 t/h 持续冷却,即可达到稳定运行效果,通过单因素控制变量,研究了 Ca/酸 1.0~1.8,活性炭投加量 2.5~3.3 kg/h 时的去除率。根据图 2 和 3 可知,当冷却水量为 0.9 t/h, Ca/酸比为 1.4,活性炭投加量为 3 kg/h 时,酸性气体去除率达 75.32%,二噁英去除率达 95.42%。

以工业自来水约 3.5 元/t,200 目消石灰约 3 元/kg,200 目碘值活性炭约 15 元/kg,工业用电 0.5元/(kW·h) 计算,冷却水约需 3.15 元/h,消石

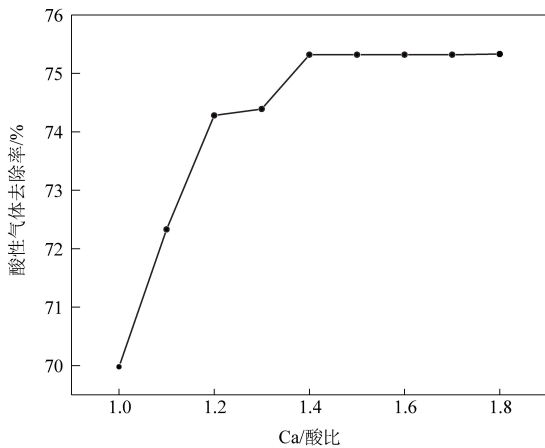


图 2 Ca/酸比对酸性气体去除率的影响

Fig.2 Influence of calcium acid ratio on the acid gas removal rate

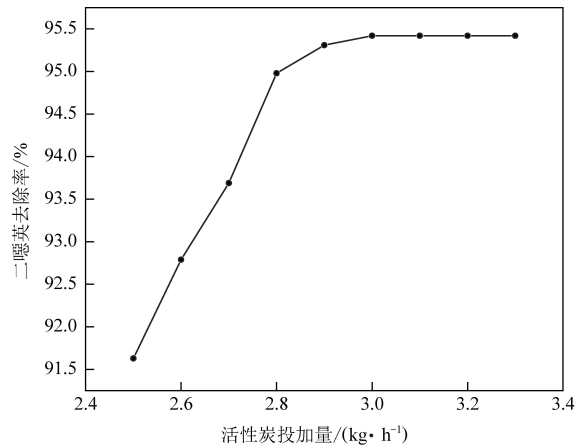


图 3 活性炭投加量对二噁英去除率的影响

Fig.3 Influence of dosage of activated carbon on the dioxin removal rate

灰约需 4.2 元/h,活性炭约需 45 元/h,再加上耗电为 170 kW·h,电费约需 85 元/h,总运行成本约为 137.35 元/h,经济效益最好。根据检测结果分析,本项目采取干式脱酸法对 HCl 的去除率可以达到 80%~90%。通过前端急冷塔迅速降温的抑制再生成作用,再加上活性炭吸附可以实现二噁英 95%以上的去除率。

### 3 主要设备参数

烟气净化工艺系统主要包括:烟气换热系统、急冷塔系统、熟石灰/活性炭喷射系统、干式脱酸塔、袋式除尘器系统、引风机、烟道及烟囱,主要设备参数见表 2。

表 2 设备参数

Table 2 Parameters of equipment

系统名称	设备名称	设备参数
烟气换热系统	烟气换热器	一套,设计风量 16 000 Nm <sup>3</sup> /h,设计烟气进口温度 1 000 ℃,出口温度为 650 ℃
	热电偶	一批,k 分度;量程:0~1 300 ℃,刚玉陶瓷
	出口烟道	一套,材质:Q235+耐火材料
急冷塔系统	急冷塔	1 套,设计风量 16 000 Nm <sup>3</sup> /h,设计烟气进口温度 650 ℃,出口温度约 160 ℃,φ2 500×12 000 mm
	供水槽	1 台,外形尺寸:φ1 400×4 500 mm
	急冷降温管路	1 套,材质:Q235,含管阀件
	雾化喷枪	3 套,材质:SUS316L,角度:30°,喷水量 3 t/h
	压缩空气管路	1 套,含气源件、管道阀门等
	出口烟道	1 套, DN 1 200
	急冷泵	2 台, Q=12 m <sup>3</sup> /h, H=50 m, N=3.0 kW
		配套的电动调节阀、磁翻板液位计等设备

续表

系统名称	设备名称	设备参数
熟石灰/ 活性炭 喷射系统	消石灰料仓	1套,储罐容量:500 L
	活性炭料仓	1套,储罐容量:500 L
	活性炭吸附塔	1套,外形尺寸:φ2 000×92 000 mm
	计量进料器	2套,功率:0.75 kW,变频控制
配套的加料平台爬梯、消石灰输送管路、活性炭输送管路等设备		
袋式除尘 系统	高压风机	2台,功率:1.5 kW;风压:2 642 Pa,风量:600 m <sup>3</sup> /h,转速:2 900 r/min
	布袋除尘器	1套,设计风量 40 000 Nm <sup>3</sup> /h
	脉冲式离线清灰系统	1套,过滤风速<0.8 m/min;布袋氟美斯+PTFE 覆膜,总过滤面积 960 m <sup>2</sup> ,含龙骨架、5.5 kW 出灰蛟龙、1.5 kW 星型卸料器,含电磁阀、提升阀、热电偶;最大阻力≤1 700 Pa, DN 1 000 旁通烟道、旁通阀门,正通阀 DN 1 200

#### 4 烟气净化系统运行效果

为评估本项目烟气净化系统运行效果,当系统稳定运行后,连续一个月在线监测烟囱 NO<sub>x</sub>、CO、SO<sub>2</sub>、HCl 和烟尘等烟气指标,并委托浙江某检测技术有限公司对废气中二噁英的浓度进行检测。

烟气检测数据具体见表 3。结果显示,焚烧烟气经过净化处理后,PM<sub>10</sub> 去除率达 90.58%,SO<sub>2</sub> 去除率达 64.41%,HCl 去除率达 86.94%,二噁英去除率达 95.42%。检测结果表明通过本装置可以实现焚烧废气中主要污染组分,尤其是二噁英的达标控制与排放。

表 3 烟气检测结果

Table 3 Test results of flue gas

日期	烟尘*	二氧化硫*	氯化氢*	一氧化碳*	氮氧化物*	总 PCDD/Fs
	折算浓度均值/(mg·m <sup>-3</sup> )					ng-TEQ/Nm <sup>3</sup>
9月28日	77.30	163.00	22.30	70.90	10.30	0.023
10月1日	71.60	158.90	26.10	66.60	11.40	0.034
10月4日	68.50	155.30	23.10	65.50	10.10	0.019
10月7日	74.50	157.90	32.90	69.70	12.90	0.021
10月10日	66.20	141.80	28.20	70.10	12.30	0.026
10月13日	70.10	143.90	24.30	68.40	10.10	0.022
10月16日	72.50	150.60	27.10	70.30	11.60	0.026
10月19日	70.30	149.70	23.80	68.80	11.20	0.019
10月21日	68.50	141.90	22.90	65.40	10.60	0.021
10月24日	69.60	143.40	27.20	66.90	10.40	0.022
10月27日	67.80	140.50	23.60	68.40	10.10	0.019
平均排放浓度	70.63	149.42	25.59	68.27	11.00	0.023
去除率/%	90.58	64.41	86.94	55.95	81.54	95.42

注: \* 为当天测量记录的最高值;总 TEQ 为各异构体未修约 TEQ 值加和后的修约值

#### 5 结论及展望

结合实际案例中病死动物焚烧尾气成分,设计了“急冷+干法脱酸+活性炭吸附+布袋除尘”烟气处理工艺,通过三个控制回路,合理投加冷却水、熟石灰、活性炭的量,降低运行成本。经过现场调试,在冷却水量为 0.9 t/h, Ca/酸比为 1.4 且

活性炭投加量为 3 kg/h 的运行条件下,经济效益最佳。同时通过减少燃后低温再生成、提高尾气处理装置净化效率等手段,全面控制二噁英等有害物质产生,二噁英去除率达 95.42%,平均排放浓度为 0.023 ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>,满足《危险废物焚烧污染控制标准》(GB 18484—2001)要求。处理后的 SO<sub>2</sub> 等指标尚不能达到超低排放限值,可将干

法脱酸替换成半干法/湿法可进一步提高 SO<sub>2</sub> 和 HCl 等酸性气体以及颗粒物的去除率<sup>[13]</sup>,但是会提高投资成本、易堵塞管路、影响布袋除尘运行效果<sup>[14]</sup>。

## 参考文献

- [1] 尹斐斐, 王贵升, 田夫林. 病死动物无害化处理技术及其应用研究 [J]. 山东畜牧兽医, 2017, 38: 65-66+70.
- [2] 王兴平. 病死动物尸体处理的技术与政策探讨 [J]. 甘肃畜牧兽医, 2011, 41 (6): 26-29.
- [3] Kalbasi A, Mukhtar S, Hawkins S E, et al. Carcass composting for management of farm mortalities: A review [J]. Compost Science & Utilization, 2005, 13 (3): 180-193.
- [4] 阳兆明, 粟兴旺. 集中处置病死动物的方法 [J]. 广西畜牧兽医, 2016, 32 (3): 157-158.
- [5] Haoming L, Ning Z, Xuan G, et al. Summary of flue gas purification and treatment technology for domestic waste incineration [J]. 2020 6th International Conference on Energy Materials and Environment Engineering, 2020: 508.
- [6] 周治云. 湖北省推广高温生物降解无害化处理技术实践 [J]. 兽医导刊, 2013 (8): 13-15.
- [7] 宋建德, 黄保续, 袁丽萍, 等. 有关国家常用病死动物无害化处理方法应用情况研究 [J]. 中国动物检疫, 2013, 30 (9): 11-15.
- [8] 邢春燕. 垃圾焚烧烟气脱酸工艺的性能比较及应用 [J]. 中国资源综合利用, 2021, 39 (6): 150-152.
- [9] Fiedler H. National PCDD/PCDF release inventories under the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants [J]. Chemosphere, 2007, 67 (9): S96-S108.
- [10] 蔡东方, 陆俞辰, 卢东亮, 等. 城市可燃固废焚烧二噁英产生机理及控制技术探讨 [J]. 能源环境保护, 2021, 35 (4): 14-20.
- [11] Hung, PC, WC, et al. Reduction of dioxin emission by a multi-layer reactor with bead-shaped activated carbon in simulated gas stream and real flue gas of a sinter plant [J]. Chemosphere, 2011, 82 (1): 72-77.
- [12] 陆胜勇, 吴海龙, 陈彤, 等. 活性炭和焦炭吸附气相二恶英的效率比较 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2011, 45 (10): 1799-1803.
- [13] 赵丹. 垃圾焚烧电厂烟气超低排放技术路线研究 [J]. 锅炉技术, 2019, 50: 75-79.
- [14] 李庄, 李金林, 赵凤伟. 含油污泥焚烧技术及其在海外油田项目的应用 [J]. 中国给水排水, 2015, 31 (16): 76-79.