

市政污泥焚烧烟气净化工艺研究

张辉, 孔华

(深圳市能源环保有限公司, 广东 深圳 518048)

摘要:市政污泥成分复杂,除含有大量的水分外,还含有大量的病原菌、寄生虫、致病微生物,以及砷、铜、铬、汞等重金属和有毒有害物质,任意堆放、排放会造成环境污染,同时也是资源的浪费。城市污水污泥的妥善处理、处置的问题十分突出,其无害化处置已经成为各级政府和环保部门日益关注的重大环保课题。通过分析污泥成分,研究污泥处理方法,探索市政污泥焚烧方式处理。结合国内外相关标准,分析市政污泥焚烧过程中烟气净化系统的工艺组合,并给出了推荐方案。

关键词:市政污泥;焚烧处理;烟气净化;工艺系统;脱硫脱硝

中图分类号:X 703

文献标志码:B

文章编号:1674-1951(2017)09-0063-04

1 研究背景

随着我国经济的发展、市政基础设施的完善,城市污水处理率不断提高,伴生了大量的市政污泥。其成分复杂,含有大量有害物质,如不经处理会对人类的健康造成威胁。

目前,国内外污泥的处置方法主要是填埋、堆肥和焚烧 3 种。污泥填埋要占用大量土地和花费大量的运输费用,而且填埋场周围的环境也会恶化,易遭受渗沥水、臭气的困扰。污泥堆肥时,由于不能有效去除污泥中的重金属和有害物质,重金属离子易在土壤和植物体内积累,使土地利用受到限制。而污泥焚烧与其他方法相比具有以下突出优点:(1)可以杀死一切病原体,一切有机物在焚烧过程中均会最大限度地分解燃烧,焚烧产生的底渣和飞灰中几乎没有病原体存在;(2)可以最大限度地减少污泥体积(相对于机械脱水污泥而言,最终的焚烧产物体积只有最初污泥的 10%),它可以解决其他方法中污泥要占用大量空间的缺陷,这对于日益紧张的土地资源来说是很重要的;(3)焚烧后剩余污泥中的水分、有机物等都被分解,只剩下很少量的无机物成为焚烧灰,因而最终需要处置的物质很少,不存在重金属离子的问题,焚烧灰可制成建筑材料等有用的产品,是相对比较安全的一种污泥处置方式;(4)污泥处理速度快,不需要长期储存;(5)可就地焚烧,不需要长距离运输;(6)可以回收能量用于发电和供热。

由于焚烧法在污泥减量化、无害化等方面与其他方法相比具有突出优点,是最彻底的处理方法,因

此近几年来污泥焚烧技术已逐步成为处理污泥的主流,愈来愈受到世界各国的青睐,发达国家目前逐渐转向采用焚烧的方法进行无害化处理。

对比德、日等发达国家,我国目前的污泥处置大部分还是填埋,污泥焚烧应用较少^[1],具体见表 1。

表 1 德、日、中处理污泥各方法所占比例 %

国家	填埋	农用	焚烧	其他
德国	3.1	56.0	38.0	2.9
日本	—	31.9	62.7	5.4
中国	63.0	13.5	2.0	21.5

我国的城市污泥焚烧技术应用始于 2004 年,随后又通过引进国外先进技术的方式,成立了几家污泥焚烧厂。国内部分科研单位也进行了相关工艺技术的研究和试验,但多为基于国外技术基础之上或仅针对焚烧过程进行较为深入的研究,总体还未形成适应自身特点的成套工艺技术。

目前,国内外采用较多的是先将污泥干化,降低污泥的含水率后再进行焚烧。污泥焚烧普遍采用流化床焚烧炉,这种炉型的燃料适应性强,能保证污泥这种高水分、低热值燃料稳定燃烧,炉内温度场均匀,燃烧温度可控制在 850~950℃,以避免二噁英的产生。

2 污泥焚烧烟气污染物种类和大小

本研究针对国内外常用的“干化+流化床”的污泥焚烧方式进行烟气净化工艺组合的研究。

我国地域广阔,各地污泥成分相差较大,文献[2-5]中各地污泥成分分析结果见表 2。文献[4]还给出了绍兴污泥中重金属含量(见表 3)及焚烧后烟气中污染物的浓度(见表 4)。

表 2 污泥元素分析结果

%

污泥地点	w(C)	w(H)	w(O)	w(N)	w(S)	w(Cl)
北京市清河(收到基)	35.84	4.84	19.12	7.10	1.00	0.11
上海金山(收到基)	31.65	3.97	15.47	4.56	1.93	0.12
上海石洞口城市污水处理厂 (可燃基)	35.00~55.00	4.00~6.00	20.00~30.00	1.50~6.00	0.50~1.50	
大连开发区(空气干燥基)	46.85	7.50	37.01	7.30	1.34	
绍兴(空气干燥基)	27.96	3.53	12.79	2.24	6.10	

表 3 重金属元素质量比

mg/kg

项目	铬	镉	汞	铅	镍	铜	锌	砷
质量比	325.2	5.3	0.025	529.4	274.5	365	1428.9	106.0
GB 4284—1984	600	5	5	300	100	250	500	75
CJ/T 309—2009	1000	15	15	1000	200	150	3000	75

注:GB 4284—1984《农用污泥中污染物控制标准(酸性土壤)》;CJ/T 309—2009《城镇污水处理厂污泥处置农用泥质(B 级污泥)》。

表 4 绍兴污泥焚烧烟气中污染物

	质量浓度					mg/m ³
污染物	SO ₂	HCl	Hg	Cd	P	
质量浓度	9946.000	200.000	0.013	22.800	112.000	

由表 4 可以看出,相对城市生活垃圾,污泥含硫量很大,含氯量较小,重金属含量也较高,而且各地主要污染物 S 的变化很大,使得烟气中 SO₂ 的含量变化很大。进行污泥焚烧设计时要充分根据当地实际污泥成分检测数据进行设计。按照相关污泥焚烧烟气净化系统设计承包厂家的经验,目前国内各地烟气净化系统工艺烟气入口设计参数见表 5。

表 5 污泥焚烧烟气中污染物产生量

污染物	单位	数据范围
颗粒物	mg/m ³	25 000~40 000
CO	mg/m ³	—
HCl	mg/m ³	50~300
SO ₂	mg/m ³	2 000~5 000
NO _x	mg/m ³	50~300
Hg	mg/m ³	2
Cd+Ti	mg/m ³	3~5
其他重金属	mg/m ³	—
二噁英	ngTEQ/m ³	1

注:具体数据需根据项目污泥成分检测数据确定。

污泥焚烧产生的二噁英浓度很低,主要原因是:(1)污泥中的氯含量低,硫/氯摩尔比大,决定了其焚烧过程中二噁英的低排放;(2)污泥干化后形态类似于煤颗粒,是一种均质燃料,燃烧稳定;(3)污泥焚烧锅炉采用流化床焚烧锅炉,燃烧温度均匀。从国际上近几十年来的实践看,污泥焚烧后排放的二噁英浓度也是很低的。

3 烟气污染物排放要求

我国生活污水设施产生的污泥焚烧污染控制纳入 GB 18485—2014《生活垃圾污染焚烧污染控制标准》中,也就是说生活污水污泥焚烧污染物排放必须符合该标准要求的限值。欧洲污泥焚烧采用 2000/76/EC 标准,具体要求见表 6。

4 烟气净化系统工艺组合

根据污泥成分、所采用的烟气污染物排放标准,可以确定需要净化处理的烟气污染物有如下几类:(1)颗粒物;(2)酸性污染物,HCl、HF、SO₂、NO_x、CO 等;(3)重金属,Hg、Cd、Ti、Pb、Cr 等;(4)有机污染物,二噁英/呋喃、总有机碳(TOC)等。

根据污泥焚烧烟气特性及所采用的排放标准确定不同的净化措施。首先通过优化污泥焚烧控制烟气中一氧化碳和二噁英/呋喃的含量。同时,由于烟气中污染物种类繁多,无法用一种装置来达到目的,因此,需要采用不同工艺的组合才能达到排放标准的要求。

4.1 颗粒物

污泥焚烧采用流化床进行,流化床的燃烧特性以及污泥的性质决定了焚烧烟气中颗粒物的浓度很高,达到 25 000~40 000 mg/m³。

颗粒物采用除尘器去除,常用除尘器有旋风除尘器、静电除尘器、袋式除尘器等。按照污泥焚烧颗粒物的浓度大小,采用袋式除尘器为佳。但按照标准要求,污泥焚烧后烟气中颗粒物为一般工业废物,而经过烟气净化系统脱酸、脱除重金属、二噁英/呋喃等后收集的颗粒物为危险废物。由于污泥焚烧后烟气中颗粒物为一般工业废物,且由于流化床的特

表 6 我国及欧盟污泥焚烧烟气中污染物排放标准

序号	污染物	单位	GB 18485—2014		2000/76/EC		
			24 h 均值	小时均值	24 h 均值	半小时均值 97%	半小时均值 100%
1	烟尘	mg/m ³	20	30	10	10	30
2	HCl	mg/m ³	50	60	10	10	60
3	HF	mg/m ³	—	—	1	2	4
4	SO ₂	mg/m ³	80	100	50	50	200
5	NO _x	mg/m ³	250	300	200	200	400
6	CO	mg/m ³	80	100	50	50	100
7	TOC	mg/m ³	—	—	10	10	20
8	Hg	mg/m ³		0.05		0.05	
9	Cd + TI	mg/m ³		0.10		0.05	
	Sb + As + Pb +						
10	Cr + Co + Cu + Mn + Ni	mg/m ³		1.0		(+ V)0.5	
11	二噁英类	ngTEQ/m ³		0.1		0.1	

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;8,9,10,11 行数据为测定均值。

性其产生量很大,因此目前污泥焚烧烟气中颗粒物的去除一般采用两级除尘器的工艺措施:“静电除尘器(或旋风除尘器)+袋式除尘器”组合。

4.2 酸性污染物

(1)CO 通过污泥的充分燃烧来达到排放标准。

(2)NO_x 通过燃烧优化控制可以减少其产生量,根据污泥中氮含量的大小以及燃烧优化控制,流化床焚烧炉焚烧烟气中的 NO_x 在 50 ~ 300 mg/m³ 之间,一般低于 200 mg/m³,但考虑到存在排放超标的风险建议设置脱硝装置。由于污泥焚烧规模普遍较小且烟气排放中 NO_x 浓度低,建议脱硝装置选择运行费用低、占地面积小的选择性非催化还原(SNCR)脱硝工艺。

(3)HCl, HF, SO₂, SO₃ 等酸性污染物脱除工艺一般有干法、半干法、湿法 3 种,采用的吸收剂有 Ca(OH)₂, NaOH, NaHCO₃ 等 3 种。上述酸性污染物除 SO₂ 外,其他几种污染物均较容易脱除,且污泥焚烧烟气以 SO₂ 为主,其他几种产生量较少,因此脱酸工艺选择主要考虑 SO₂ 的脱除工艺。

由以上分析可以看出,污泥焚烧烟气脱酸工艺一般采用“干法 + 湿法”工艺。干法工艺吸收剂一般有 Ca(OH)₂ 和 NaHCO₃,采用 Ca(OH)₂ 脱硫效率很低(小于 50%),吸收剂消耗量很大,产生的固体废物很多(需作为危险废物处理处置),而且使后续的湿法负担太重,脱硫废水很多;采用 NaHCO₃ 虽然使运行成本增加,但其脱硫效率较高(可大于 80%),吸收剂消耗量较少,相应产生的固体废物较少,后续的湿法负担较轻,脱硫废水较少,因此,干法

工艺吸收剂一般采用 NaHCO₃ 粉末。

湿法工艺吸收剂一般有 NaOH 或 CaCO₃,采用 NaOH 脱硫效率高,进入洗涤塔的吸收剂及产生反应产物均为溶液状态,系统及运行简单,但该吸收剂价格高;采用 CaCO₃ 虽然吸收剂价格便宜,但进入洗涤塔的吸收剂及产生反应产物均为浆液状态,设备容易结垢而影响运行稳定性,且吸收剂浆液制备及反应产物处理系统复杂,在处理烟气量较小时不推荐使用,因此,湿法工艺吸收剂一般采用 NaOH。

综合以上分析,建议污泥焚烧烟气脱硫采用“干法 + 湿法”工艺,干法工艺吸收剂采用 NaHCO₃,湿法工艺吸收剂采用 NaOH。该工艺组合可以满足污泥焚烧烟气中 SO₂ 浓度在 2 000 ~ 10 000 mg/m³ 之间时,污染物排放达到国家和欧盟现行烟气排放标准要求,且实际运行中可以根据烟气中 SO₂ 浓度的大小,通过干法和湿法吸收剂的用量灵活调整各工艺的脱硫效果。

4.3 重金属

由于重金属的种类不同,特性不同,所以控制方法也不同,挥发性的汞和一部分固态重金属主要是通过 在袋式除尘器入口烟道上喷入活性炭来吸附,吸附有重金属的活性炭和其他固态重金属通过下游的袋式除尘器最终被收集除下。在保证袋式除尘器除尘效果的前提下,通过“活性炭来吸附 + 袋式除尘器”工艺,可以使烟气中的重金属达到国家和欧盟现行烟气排放标准要求。

4.4 有机污染物

(1)TOC 通过污泥的充分燃烧,高温分解来达

到排放标准。

(2)二噁英/呋喃的控制主要包括 2 个方面:一方面是控制焚烧炉内的燃烧减少二噁英/呋喃的生成,另一方面是在袋式除尘器入口烟道喷入活性炭吸附二噁英/呋喃,最终由袋式除尘器收集除下。

燃烧控制是要确保焚烧炉炉膛的烟气温度不低于 850 ℃,并保持此温度的烟气有 2 s 的停留时间,同时 O₂ 浓度不低于 6%,并合理控制助燃空气的风量、温度和注入位置,使空气有效地进行扰动(也称“三 T”控制法)。另外,通过下游的袋式除尘器,并在进入袋式除尘器的烟道上喷射活性炭进一步吸附二噁英/呋喃,最后可使污泥焚烧排放的二噁英/呋喃达到国家和欧盟现行烟气排放标准要求,甚至更低。

表 7 部分污泥焚烧厂的烟气净化系统工艺

厂家	烟气净化系统工艺组合	达到的标准
上海市石洞口城市污水处理厂污泥处理工程 64 tDS/d	半干法喷淋塔 + 活性炭吸附 + 袋式除尘器 ^[5]	GB 18485—2001
深圳上洋污泥处理厂 160 tDS/d	SNCR(尿素) + 旋风除尘器 + 急冷塔 + 活性炭 吸附 + 袋式除尘器 + 湿法脱酸	GB 18485—2001
成都市第一城市污水污泥处理厂工程 80 tDS/d	静电除尘器 + 干法脱酸(NaHCO ₃) + 活性炭吸 附 + 袋式除尘器 + 湿法脱酸(NaOH)	2000/76/EC
上海竹园污泥处理工程 150 tDS/d	静电除尘器 + 干法脱酸(Ca(OH) ₂) + 活性炭 吸附 + 袋式除尘器 + 一级湿法脱酸 + 二级湿法 脱酸(NaOH) ^[6]	2000/76/EC

6 结束语

我国城市污泥中污染物成分变化很大(主要为 SO₂),采用“SNCR + 静电除尘器 + 干法脱酸(NaHCO₃) + 活性炭吸附 + 袋式除尘器 + 湿法脱酸(NaOH)”的烟气净化系统工艺组合,一般可以满足国家和欧盟 2000/76/EC 标准要求的限值。针对具体工程,还要根据污泥中的成分进行分析,对以上工艺组合进行微调。

参考文献:

[1]王学魁,赵斌,张爱群,等.城市污水处理厂污泥处置的现状 & 研究进展[J].天津科技大学学报,2015,30(4):1-7.
[2]侯海盟.城市下水污泥循环流化床焚烧及排放特性试验

4.5 烟气净化系统工艺组合选择

从以上处理措施可知,污泥焚烧烟气净化系统工艺采用如下组合方式,可使其烟气排放达到国家和欧盟现行烟气排放标准要求:SNCR + 静电除尘器 + 干法脱酸(NaHCO₃) + 活性炭吸附 + 袋式除尘器 + 湿法脱酸(NaOH)。

由于烟气净化系统最后的设施为湿法脱酸,烟气出口温度只有 60 ℃ 左右,考虑到烟气对烟囱的腐蚀现象,建议在湿法洗涤塔出口设置烟气换热器(GGH)以提高排放烟气的温度,避免腐蚀。

5 国内污泥焚烧厂家的烟气净化系统工艺

目前,国内污泥焚烧应用业绩还不多,主要采用国外技术。部分污泥焚烧厂的烟气净化系统工艺见表 7。

研究[D].北京:中国科学院大学,2013.

[3]刘淑静.污泥燃烧与污染排放特性研究[D].大连:大连理工大学,2007.

[4]李博,王飞,严建华,等.污水处理厂污泥干化焚烧处理可行性分析[J].环境工程学报,2012,6(10):3399-3404.

[5]杨新海,张辰.上海市石洞口城市污水处理厂污泥干化焚烧工程[J].给水排水,2003,29(9):19-22.

[6]朱小玲.竹园污染干化焚烧厂运行技术优化研究[D].杭州:浙江大学,2012.

(本文责编:白银雷)

作者简介:

张辉(1978—),男,辽宁怀仁人,工程师,工学博士,从事环保电厂烟气治理及节能减排方面的工作(E-mail:bolat_zhang@163.com)。

带有中心值的百分数的公差表示方式

对于量值的公差,当上、下公差相同时,无歧义的表达方式,可以使用带有公差的中心值。例如:100 kPa ± 5 kPa 或(100 ± 5) kPa。但对于带有中心值的百分数的公差,唯一正确的表示形式是“(n ± m)%”,例如“(80 ± 5)%”。如将其表示成“80% ± 5%”则会产生歧义,有可能误将“± 5%”理解成“80% 的 5%”,即变为“(80 ± 4)%”了。实践中也有将其表示成“80 ± 5%”的,这更是错误的,因为它已不是百分数的公差了。