

生活垃圾焚烧烟气脱硫技术应用分析

梁梅

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 本文分析了国内垃圾焚烧烟气产生情况,对比各地垃圾焚烧烟气排放标准、国家标准和国际标准,并结合国内项目脱硫技术的应用情况,对半干法脱硫、干法脱硫以及湿法脱硫的方法原理、脱硫影响因素、设备、优缺点以及项目中存在的问题进行了分析和对比。根据不同烟气特性和环保排放要求,可对半干法、干法和湿法脱硫工艺进行组合,脱硫效果较好,但如何从投资和运行成本角度选择合适的脱硫技术仍处于探索中。

[关键词] 垃圾焚烧烟气;酸性污染物;脱硫技术;干法脱硫;半干法脱硫;湿法脱硫

[中图分类号] X799.3

[文献标志码] A

[文章编号] 1008-5122(2021)06-0041-05

DOI:10.19610/j.cnki.cn11-4011/tf.2021.06.009

Application Analysis of MSW Incineration Off-gas Desulfurization Technology

LIANG Mei

Abstract: This paper analyzed the off-gas generation situation of domestic waste incineration, compared the local emission standards, national standards and international standards of waste incineration off-gas. Combined with the application of desulfurization technology in domestic projects, this paper also analyzed and compared the principles, influencing factors, equipment, advantages and disadvantages of semi-dry desulfurization, dry desulfurization and wet desulfurization technologies, as well as the problems existing in projects. According to different off-gas characteristics and environmental protection emission requirements, semi-dry, dry and wet desulfurization processes can be combined to achieve better results, however, how to choose the appropriate desulfurization technology to lower the investment and operation cost is still being explored.

Key words: waste incineration off-gas; acid pollutant; desulfurization technology; dry desulfurization; semi-dry desulfurization, wet desulfurization

0 前言

根据2020年6月《第二次全国污染源普查公

报》数据,2019年全国生活垃圾焚烧处理量达 1.2×10^8 t/a;2019—2020年,我国已投产垃圾焚烧厂由401座增至455座。2021年5月,国家发展改革委、住房城乡建设部日前发布《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》(发改环资〔2021〕642号)提出,到2025年底,全国城镇生活垃圾焚烧处理能力达到80万t/d左右,城市生活垃圾焚烧处理能力约占65%。由此可见,垃圾焚烧作为无害化最彻底、减容化最显著、可资源化利用程度最高的一种处理技术,已成为我国生活垃圾处理的主要方式^[1]。近些年,生活垃圾组分中可燃物含量提高,根据现有项目烟气产生量分析,每吨垃圾焚烧产生的烟气量

[收稿日期] 2021-09-27

[基金项目] 国家重点研发计划课题“多源固废协同利用技术、模式与集成示范”(2019YFC1904605)

[作者简介] 梁梅(1985—),女,湖北天门人,硕士,高级工程师,主要从事垃圾焚烧发电项目工程设计以及相关研发工作。

[引文格式] 梁梅.生活垃圾焚烧烟气脱硫技术应用分析[J].有色冶金节能,2021,37(6):41-45.

达 $5\ 300\ \text{Nm}^3$, 垃圾焚烧烟气特性复杂, 所含污染物种类较多, 含水率较高(约 20%), 是垃圾焚烧不容忽视的问题。

生活垃圾焚烧烟气中含有 1% 左右的有害污染物, 主要包括酸性气体、粉尘(颗粒物)、重金属和有机剧毒性污染物(二噁英、呋喃等)等几大类。原始焚烧烟气中 SO_2 典型含量为 $200 \sim 800\ \text{mg}/\text{Nm}^3$, HCl 典型含量为 $600 \sim 1\ 200\ \text{mg}/\text{Nm}^3$, HF 典型含量为 $1 \sim 20\ \text{mg}/\text{Nm}^3$ [2]。考虑到 HCl 和 HF 相对容易去除, 而 SO_2 较难去除, 同时 SO_2 含量也是大气污染物总量控制指标, 故文章以 SO_2 为对象进行分析。按《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB18485—2014) (以下简称《标准》) 中污染物的排放日均值计算, 2025 年每日生活垃圾焚烧产生的 SO_2 排放量达 339.2 t, 年排放量为 11.29 万 t, 数量十分可观, 会对环境造成很大的污染。因此, 经济适用的脱硫工艺在生活垃圾

焚烧项目上的应用研究, 具有十分重要的意义。

本文基于国内垃圾焚烧烟气产生情况, 对比各地垃圾焚烧烟气排放标准、国家标准和国际标准, 以及各地采用的脱硫工艺, 介绍半干法脱硫、干法脱硫以及湿法脱硫的方法原理、脱硫影响因素、设备、优缺点以及项目中存在的问题。

1 生活垃圾焚烧污染控制标准分析

目前国内已建成运营的生活垃圾焚烧发电厂烟气排放均执行《标准》, 部分项目要求执行欧盟 2010/75/EU 要求。2020 年第十三届全国人大三次会议上, 政府报告指出生态环境方面要持续推进污染防治, 巩固扩大蓝天保卫战成果, SO_2 、 NO_x 排放量要下降 3%。为了满足日益提高的环保要求以及相关政策要求, 国内很多城市已出台生活垃圾焚烧污染控制方面的地方标准及要求, 详见表 1。

表 1 各地垃圾焚烧污染控制标准指标对比

控制项目/ $\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$	数值含义	国标 GB18485 —2014 ^[4]	上海 DB31/768 —2013 ^[5]	深圳 SZDB/Z233— 2017 ^[6]		海南 DB45/484 —2019 ^[7]	福建 DB35/ 1976— 2021 ^[8]	河北 DB13/5325 —2021 ^[9]	河南省 2020 年大气污染防治 攻坚战 实施方案 ^[10]	天津《生活垃	欧盟 2010/75/ EU ^[12]
				圾焚烧大气 污染物排放 标准》(征求 意见稿) ^[11] (2021 年)							
颗粒物	小时均值	30	10	10	30	10	—	10	10	10	30
	日均值	20	10	8	10	8	—	8	—	8	10
SO_2	小时均值	100	100	30	100	30	—	40	35	40	200
	日均值	80	50	30	50	20	—	20	—	20	50
HCl	小时均值	60	50	8	60	10	—	20	—	20	60
	日均值	50	10	8	10	8	—	10	—	10	10
NO_x	小时均值	300	250	80	200	150	150	150	100	120	400
	日均值	250	200	80	80	120	120	120	—	80	200
CO	小时均值	100	100	50	100	50	—	100	—	80	100
	日均值	80	50	30	50	30	—	80	—	50	50
汞及其化合物	测定均值	0.05	0.05	0.02	0.05	0.02	—	0.02	—	0.02	0.05
$\text{Cd} + \text{Ti}$	测定均值	0.10	0.50	0.30	0.50	0.03	—	0.03	—	0.03	0.05
Pb 及其化合物	测定均值	1.00	0.50	0.30	0.50	0.30	—	0.30	—	0.30	0.50
二噁英 (ngTEQ/Nm^3)	测定均值	0.10	0.10	0.05	0.05	0.05	—	0.10	—	0.10	0.10
NH_3	小时均值	—	—	—	—	—	—	8	8	8	—

从表 1 可以看出, 国内大部分重要城市对于 SO_2 、 NO_x 及粉尘三项大气污染物总量控制指标的排放限值进一步降低。以 SO_2 为例, 上海 2013 年已提出 SO_2 日均排放值需与欧盟 2010/75/EU 一致

($\text{SO}_2 \leq 50\ \text{mg}/\text{Nm}^3$), 随后深圳、海南、河北以及天津对新建项目的 SO_2 日均排放限值提出更为严格的要求, 甚至低于燃煤电厂的超低排放限值 ($\text{SO}_2 \leq 35\ \text{mg}/\text{Nm}^3$)。

《RISN-TGO22—2016 生活垃圾清洁焚烧指南》^[3]中明确提出烟气污染物总体控制的三道线,即现行国标、环境影响评价批复的污染物排放指标、按切实保证达标排放的工程余量即排放指标+工程余量。

按各地标准要求,上海、深圳、海南以及河北等地的地方标准中的SO₂排放浓度要求均比现行国家标准严格。

2 烟气脱硫技术分析

垃圾焚烧行业烟气中SO₂的脱除技术主要包括半干法脱硫、干法脱硫以及湿法脱硫三种,三种工艺区别在于中和剂和产物的形态不同以及最终的处理效果不同^[13],各有利弊。

2.1 半干法脱硫技术

在生活垃圾焚烧烟气净化工艺中,半干法通常利用喷嘴或高速旋转的旋转雾化器将石灰浆形成粒径极细的液滴,通过导流装置使烟气在反应塔内分布均匀,强化烟气与雾滴的混合和接触,使高温烟气和石灰浆雾滴之间进行热交换及反应,在有限的时间段内获得干燥反应物。半干法脱硫具有脱硫效率高(90%左右)、流程短、运行成本低等优点,不足之处在于浆液制备系统工序相对复杂,由于中和剂品质不一,许多项目出现雾化器磨损、堵塞等问题,对石灰品质要求较高。

2.1.1 机械旋转喷雾半干法

机械旋转喷雾半干法脱硫是国内垃圾焚烧行业普遍认可的主流技术。经处理后,烟气中酸性污染物浓度指标可达到欧盟2010/75/EU要求。机械旋转雾化器属于高速旋转设备,转速高达8000~15000 r/min,雾滴粒径为30~50 μm,雾化器容易出现堵塞、磨损等问题。目前普遍采用国外进口设备,如丹麦NIRO旋转雾化器、比利时SEGHERS旋转雾化器及美国K-S(Komline-Sanderson)旋转雾化器,三种雾化器性能比较见表2。

2.1.2 固定喷嘴半干法脱硫

固定喷嘴法烟气脱硫技术采用双流体喷嘴,与机械旋转雾化器相比,雾化效果稍差,但其设备简单,投资低。该系统选用纯度大于90%的Ca(OH)₂粉末调制低浓度的石灰浆(8%左右),雾滴粒径80 μm左右,脱硫效率约90%。该技术适用于单条线垃圾处理量为300 t/d的小型烟气处理系统。

表2 三种进口旋转雾化器的性能表

项目	丹麦 NIRO	比利时 SEGHERS	美国 K-S
转速/r·min ⁻¹	13 500	≤ 12 000, 变频可调	≤ 16 200, 变频可调
雾化粒径/μm	30~50	30~50	30~50
雾化能力/t·h ⁻¹	1~10	1~6.9	1~6.9
浆液浓度/%	≤20	≤15, 常规10	≤15, 常规10
传动形式	齿轮传动	直接驱动, 变频	直接驱动
冷却形式	风冷	水冷	水冷
设备费用	高	较高	较高
雾化盘使用情况	磨损相对较小, 喷嘴可单独更换	磨损快, 雾化盘寿命3个月左右	磨损快, 雾化盘寿命3个月左右
故障情况	环境温度高时, 容易跳机	振动要求高, 转速高时, 故障报警	振动要求高, 转速高时, 故障报警
适用生活垃圾焚烧线处理规模(单条线)	大中型(≥600 t/d)	中小型(300~600 t/d)	中小型(300~600 t/d)

2.2 干法脱硫技术

干法脱硫技术主要有两种方式,一种设置干式反应塔,如传统的循环流化床脱硫工艺(CFB)、改进后的增湿灰循环脱硫工艺(NID)以及增强干法工艺(IDR),在火电厂以及循环流化床锅炉的烟气处理应用较多;另一种是在袋式除尘器前烟道上设置喷射点,喷入中和剂,主要反应在滤袋表面完成,这种方式作为半干法脱硫的辅助手段在目前的垃圾焚烧行业应用最广泛。干法脱硫技术优势在于工艺简单,设备投资和维护量较低,但脱硫效率相对较低,为70%~80%,中和剂以消石灰和碳酸氢钠为主,钙(钠)硫比高,消耗量大^[14]。

采用消石灰粉脱硫,反应温度低于200℃时,随着喷水量的增加,烟气温度降低,湿度增加,SO₂脱除率显著提高,但为了避免烟气低温结露影响后续工艺的运行,反应温度一般控制在150℃左右。这是因为水雾与消石灰粉形成浆滴,浆滴中水分少,蒸发快,会导致SO₂在浆滴表面的物理吸收、SO₂水合及电离成HSO₃⁻和SO₃²⁻过程受限,反应速度变慢,从而导致脱硫效率降低。而湿度越大,烟气中水蒸气分压越大,浆滴中水蒸发越慢,SO₂水合速度提高,SO₂电离成HSO₃⁻和SO₃²⁻、Ca²⁺和SO₃²⁻反应的时间增加,因而反应效果更好,脱硫效率提高^[15]。

采用碳酸氢钠粉脱硫时,粉末比表面积以及反应温度是决定其脱硫效率的两大因素。碳酸氢钠粉末在仓内储存易潮解成块,且粒径过大,粉末比表面积小,直接与烟气中的 SO_2 接触时,反应不充分,反应效率降低,因此配置研磨机,将碳酸氢钠粉末研磨至粒径为 $20\ \mu\text{m}$ 左右,以增大比表面积,提高反应效率,并降低碳酸氢钠的消耗量。碳酸氢钠的脱硫效率与反应温度也有很大关系,有研究^[16]表明在 $140\sim 200\ \text{℃}$ 下灼烧碳酸氢钠后,颗粒物孔隙分布均匀丰富,脱硫效率达 95% ,这很可能是因为孔隙率的增加,使 SO_2 扩散至 Na_2CO_3 颗粒内部,增加了反应时间和提高了反应效率,但当温度升高至 $280\ \text{℃}$ 时,颗粒表面明显致密,多孔碳酸氢钠有可能发生烧结和孔道损失的现象,导致脱硫效率降低。

如果选择合适的反应温度以及增加研磨设备来增大药剂的比表面积及活性,碳酸氢钠脱硫效率可媲美湿法脱硫效率,但其设备投资、运行控制要求以及运行成本却比湿法脱硫技术低,可作为超低排放的可选工艺进行深入地探索研究。

2.3 湿法脱硫技术

湿法洗涤是一种比较成熟的脱硫技术,随着生活垃圾焚烧行业对酸性污染物排放标准的提高,湿法脱硫因效率高($\geq 95\%$)被行业采用。湿法塔一般设置在除尘器下游,采用 NaOH 作为中和剂。经湿法脱硫处理后,烟气温度一般降为 $65\ \text{℃}$ 左右,因此需要配置烟气再加热装置,增加设备投资及场地,同时该工艺会产生高浓度废水,需单独设置废水处理站。总体而言,该技术设备投资高,运营费用高,占地较大。我国垃圾焚烧行业采用的湿法工艺主要引进日本三菱及日立造船株式会社的湿法脱硫塔,这两种脱硫塔塔体内部设计有所区别,效率和投资上相差不大。

2.4 组合工艺

根据烟气的不同特性和环保排放要求,可对上述烟气脱硫处理工艺进行不同的组合。

上海市共有生活垃圾焚烧发电厂11座,焚烧处理设计能力 $1.38\ \text{万 t/d}$,其中江桥一期、金山一期以及崇明一期烟气净化工艺采用“SNCR+半干法+干法+活性炭吸附+布袋除尘”;江桥二期、老港一期及松江一期烟气净化采用“SNCR+干法+活性炭吸附+布袋除尘+湿法+烟气再热”工艺;黎明项目烟气净化采用“SNCR+干法+活性炭喷射+袋式除尘器+湿式洗涤塔+蒸汽加热器+活性炭吸附”工

艺^[17]。由此可以看出,上海市已建成的垃圾焚烧厂中,少部分焚烧烟气处理系统采用“半干法+干法”脱硫工艺,自2013年发布DB 31/768—2013生活垃圾焚烧大气污染物排放标准后,投运的项目均采用“干法+湿法”脱硫工艺。

深圳市已建及在建生活垃圾焚烧厂共13座,焚烧处理设计能力 $2.635\ \text{万 t/d}$ 。其中平湖能源生态园一期和二期项目烟气处理采用“SNCR+半干法+干法+活性炭吸附+布袋除尘”工艺;南山能源生态园、盐田能源生态园、宝安能源生态园一期和二期烟气处理采用“SNCR+半干法+干法+活性炭吸附+布袋除尘+SCR”工艺;龙岗能源生态园、宝安三期、光明能源生态园以及龙华生态园烟气处理采用“SNCR+半干法+干法+活性炭吸附+布袋除尘+湿法+SCR”工艺。深圳近期建设项目烟气净化系统均采用“半干法+干法+湿法”的脱硫工艺,确保 SO_2 排放浓度满足当地污染物控制标准要求。

海南省已有13座垃圾焚烧厂,生活垃圾焚烧处理能力达 $1.1575\ \text{万 t/d}$,其中2018年后建设的9座垃圾焚烧厂的烟气净化处理均采用“SNCR+半干法+干法+活性炭吸附+布袋除尘+湿法+SCR”工艺,确保 SO_2 排放浓度满足当地污染物控制标准要求。

根据《河北省生活垃圾焚烧发电中长期专项规划(2018—2030年)》(修订版),2020年全省建成垃圾焚烧发电项目65项,已建垃圾焚烧发电厂烟气处理绝大部分采用“SNCR+半干法+干法+活性炭吸附+布袋除尘”工艺。雄安新区作为河北省管辖的国家级新区,正在建设的生活垃圾焚烧发电厂($3\times 750\ \text{t/d}$)烟气净化处理工艺为“SNCR+炉内干法+预除尘+碱液喷射+备用干法+活性炭吸附+布袋除尘+湿法+SCR”,确保雄安新区烟气污染物的达标排放。

浙江伊布提出“双干法+双袋式除尘器”的组合工艺, SO_2 排放浓度可达到超低排放要求,但目前在国内还没有应用业绩。

综上,我国早期城市生活垃圾焚烧项目多采用“半干法+干法”的脱硫工艺,而后期建设项目基本都增设湿法工艺来确保烟气中 SO_2 稳定达标排放。

组合工艺处理效果好,但占地面积大、设备投资和运行成本高,各工艺在整体运行中如何分担达到最佳的运行效果,同时控制最优的运行成本尚在摸索之中。

3 结束语

生活垃圾焚烧行业主流的“机械旋转雾化半干法+干法”组合工艺能够满足 $\text{SO}_2 \leq 50 \text{ mg/Nm}^3$ 的排放要求,但随着环保要求的提高,如地方标准的出台、环境影响评价的要求加严,生活垃圾焚烧项目多数选择配置湿法脱硫工艺来保证污染物的排放要求,虽然 SO_2 的排放量将大大降低,但同时项目的投资及运行成本也将大幅提高,导致生活垃圾处理成本增加。经济效益与环境效益的和谐统一,将是生活垃圾焚烧厂烟气脱硫处理工艺的发展趋势,探索组合工艺中各技术的最佳分担比例、干法脱硫药剂以及稳定控制的最佳反应条件都可作为满足超低排放工艺进行深度研究的课题。

[参考文献]

- [1] 陈宋璇,黎小保. 生活垃圾焚烧发电中二噁英控制技术研究进展[J]. 环境科学与管理,2012,37(5):89-93.
- [2] 住房和城乡建设部标准定额研究所. 生活垃圾焚烧技术导则:RISN-TG009—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [3] 住房和城乡建设部标准定额研究所. 生活垃圾清洁焚烧指南:RISN-TG022—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [4] 中华人民共和国环境保护部,国家质量监督检验检疫总局. 生活垃圾焚烧污染控制标准:GB 18485—2014[S]. 北京:中国环境科学出版社,2014.
- [5] 上海市环境保护局,上海市质量技术监督局. 生活垃圾焚烧大气污染物排放标准:DB 31/768—2013[S].
- [6] 深圳市市场监督管理局. 生活垃圾处理设施运营规范:SZDB/Z 233—2017[S].
- [7] 海南省市场监督管理局. 生活垃圾焚烧污染控制标准:DB 45/484—2019[S].
- [8] 福建省市场监督管理局. 生活垃圾焚烧氮氧化物排放标准:DB 35/1976—2021[S].
- [9] 河北省市场监督管理局. 生活垃圾焚烧大气污染控制标准:DB 13/5325—2021[S].
- [10] 河南省污染防治攻坚战领导小组. 关于印发河南省2020年大气污染防治攻坚战实施方案的通知(豫环攻坚办[2020]7号)[R/OL]. [2020-05-04]. <https://www.eqxun.com/news/12487.html>.
- [11] 天津市生态环境厅. 天津市市场监督管理局. 生活垃圾焚烧大气污染物排放标准(征求意见稿)[R/OL]. [2021-03-10]. http://scjg.tj.gov.cn/tjsscjdglwyh_52651/xwdt/gztz/202103/t20210310_5380925.html
- [12] European Union. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council on Industrial Emissions (Integrated Pollution Prevention and Control) [S]. 2010.
- [13] 国家能源局. 垃圾发电厂烟气净化系统技术规范:DL/T 1967—2019[S]. 北京:中国电力出版社,2019.
- [14] 姜廷伟,刘超. 垃圾焚烧炉烟气干法脱硫[J]. 中国有色冶金,2007(3):63-65.
- [15] 樊保国,项光明,陈昌和,等. 循环流化床烟气脱硫机理研究[J]. 环境科学,1998(3):16-19.
- [16] 刘海弟,李伟曼,陈运法,等. 陶瓷管表面 NaHCO_3 粉体干法脱硫研究[J]. 环境影响评价,2020,42(1):66-70.
- [17] 龚燊,赵联森. SCR脱硝技术在中国生活垃圾焚烧厂的运用及发展分析[C]//《环境工程》2019年全国学术年会论文集(下册),2019,(37):656-660.