

垃圾焚烧电厂机组运行性能对比试验研究

任刚¹, 马江¹, 王为术², 刘军²

(1. 河南省锅炉压力容器安全检测研究院, 河南 郑州 450016; 2. 华北水利水电大学 电力学院, 河南 郑州 450045)

摘要:为研究3台老旧垃圾焚烧机组的运行性能,现场实测3台机组的主要运行参数,定量计算各项热损失,对比分析3台机组焚烧炉-余热锅炉及烟气净化设备性能。结果表明:A、B、C 3台机组实测焚烧炉-余热锅炉效率分别为77.44%, 80.14%和82.70%,效率偏低的主要原因为燃用的生活垃圾热值高于机组设计垃圾热值导致排烟温度过高;机组各项热损失中,排烟热损失所占比例最大,其次为炉渣热损失;3台机组排烟热损失分别占总热损失的84.79%, 74.21%及76.58%;B机组半干式反应塔漏风率最大(8.56%),C机组最小(2.90%);3台机组布袋除尘器漏风率均偏大,分别为12.12%, 6.54%及11.23%,远高于其设计值(2%)。

关键词:垃圾焚烧;焚烧炉-余热锅炉;运行性能;性能试验;漏风率

中图分类号:TM619 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.11.020

[引用本文格式]任刚,马江,王为术,等.垃圾焚烧电厂机组运行性能对比试验研究[J].热能动力工程,2021,36(11):141-146. REN Gang, MA Jiang, WANG Wei-shu, et al. Comparative test study on unit operation performance of waste incineration power plants [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(11): 141-146.

Comparative Test Study on Unit Operation Performance of Waste Incineration Power Plants

REN Gang¹, MA Jiang¹, WANG Wei-shu², LIU Jun²

(1. The Boiler & Pressure Vessel Safety Inspection Institute of Henan Province, Zhengzhou, China, Post Code: 450016;
2. School of Electric Power, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, China, Post Code: 450045)

Abstract: In order to study the operation performance of three aging waste incineration units, the main operation parameters of three waste incinerators were tested on site, each heat loss was calculated quantitatively, and the performance of incinerator-waste heat boilers and flue gas purification equipments of the three units was comparatively analyzed. The results show that the tested efficiencies of incinerator-waste heat boilers of units A, B and C are 77.44%, 80.14% and 82.70% respectively. The main reason for low efficiency is that the calorific value of burned domestic waste is higher than that of designed unit waste, resulting that the flue gas temperature is too high. Among the various heat losses of the units, the heat loss from flue gas accounts for the largest proportion, followed by the heat loss from slag. The heat losses from flue gas of three units account for 84.79%, 74.21% and 76.58% of total heat losses respectively. The test results of air leakage rate show that the air leakage rate of semi-dry reactor in unit B is the largest, which is 8.56%, while that of unit C is the smallest, which is 2.90%. The air leakage rates of bag dust collector of the three units are all higher, 12.12%, 6.54% and 11.23% respectively, which are much higher than the designed value of 2%.

收稿日期:2021-03-30; 修订日期:2021-04-21

基金项目:河南省市场监督管理局科技计划项目(2020sj61)

Fund-supported Project: Science and Technology Project of Henan Market Supervision Administration(2020sj61)

作者简介:任刚(1972-),男,河南许昌人,河南省锅炉压力容器安全检测研究院高级工程师。

通讯作者:刘军(1985-),男,河南南阳人,华北水利水电大学讲师。

Key words: waste incineration, incinerator-waste heat boiler, operation performance, performance tests, air leakage rate

引 言

随着我国城镇化及工业化进程不断加速,城市生活垃圾数量逐年剧增^[1-2]。与垃圾堆肥及垃圾填埋技术相比,垃圾焚烧发电技术因其“减量化、无害化和资源化”的优势备受关注^[3-4]。垃圾焚烧发电技术已成为城镇生活垃圾处理的主导技术。

目前,有关垃圾焚烧发电的研究主要针对新建或投运年限较少的机组。研究方法主要采用实验室内小试试验^[5-6]及数值模拟^[7-8]方法,研究方向集中在垃圾焚烧电厂运行优化^[9-11]、污染物排放^[12-14]、灰渣综合利用^[15-16]及控制系统调整^[17-18]等方面。王进^[19]针对某 500 t/d 垃圾焚烧炉排炉,研究了烟气再循环对脱硝效果、燃尽率和运行经济性的影响,结果表明烟气再循环技术相比其他脱硝技术具有较为明显的环保效益和经济效益,并且几乎不影响料层燃尽。曾祥浩等人^[20]数值方法研究了 900 t/d 垃圾焚烧炉掺烧污泥的燃烧及排放特性,结果表明,随污泥掺烧量增加,挥发分析出及焦炭燃烧速率均下降,NO_x 排放增加。文献[21-23]对垃圾焚烧炉配风优化展开研究,分析了二次风投停、喷射角度和二次风量等对炉内流场及燃烧的影响,得到最佳配风方式。针对垃圾焚烧电厂 NO_x 排放,已有的研究主要集中在传统的脱硝技术,包括燃烧温度、过量空气系数、选择性非催化还原(selective non-catalytic reduction, SNCR)及选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)等^[3]。Hu^[24]系统研究了 SNCR 中氨水喷射位置、喷射角度等对炉内燃烧及 NO_x 排放及氨逃逸的影响规律。Gan^[25]研究了垃圾焚烧电厂中 NO_x 及氯苯协同降解机制,研制了新型催化剂以提高 SCR 系统性能。Caneghem^[26]从全生命周期角度分析了垃圾焚烧电厂 SNCR 及 SCR 系统,表明增设 SCR 系统可降低污染物排放,但同时会产生温室气体,不利于全球变暖

的控制,因此 SNCR 系统运行优化将是最优选择。

现有对在役老旧机组的相关研究较少,因人力、财力限制,加之设备老化严重,老旧机组普遍存在机组效率低、能耗大等技术难题,为掌握现役老旧机组运行状况,选取 3 台老旧机组开展性能试验研究,现场测试机组运行参数,定量计算各项热损失,获得焚烧炉-余热锅炉效率及烟气净化设备漏风率等技术指标,进一步总结机组运行中存在的技术问题及解决措施。

1 设备与方法

1.1 机组概况

A、B、C 3 台机组焚烧炉均采用西格斯多级倾斜式往复炉排炉,B 机组余热锅炉采用中温次高压自然循环单汽包炉,A、C 机组为中温中压自然循环单汽包炉。3 台机组烟气净化系统均采用“SNCR + 半干法脱酸 + 活性炭喷射 + 袋式除尘器”的工艺,脱除垃圾焚烧过程中生成的污染物。3 台机组设计垃圾成分分析如表 1 所示。

表 1 3 台机组设计垃圾成分分析
Tab. 1 The designed waste composition
analysis of three units

名称	元素分析/%						工业分析/%		
	C	H	O	N	S	Cl	M	F _{C+v}	A
A ¹	18.00	2.53	12.29	0.67	0.16	0.35	50.23	34.21	15.56
B ¹	22.53	11.32	6.52	0.68	0.38	/	49.31	38.52	12.17
C ²	54.55	7.72	34.62	1.89	0.31	0.90	44.31	35.38	20.31

注: ¹以收到基为基准, ²以可燃基为基准。

3 台机组主要技术参数如表 2 所示,由表 2 可知,3 台机组焚烧炉额定处理垃圾量及余热锅炉额定蒸发量依次增加,A 机组设计进炉垃圾低位发热量最低,为 5 861 kJ/kg,C 机组设计进炉垃圾低位发热量最高,为 7 118 kJ/kg。3 台机组布袋除尘器漏风率设计值均为 2%,热灼减率保证值均为 3%。

表 2 3 台机组主要技术参数对比

Tab.2 Comparison of the main technical parameters of three units			
参 数	A	B	C
进炉垃圾低位发热量设计值/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	5 861.00	6 700.00	7 118.00
热灼减率/%	<3.00	<3.00	<3.00
余热锅炉额定蒸发量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	40.00	48.70	70.90
过热器出口蒸汽压力/MPa	4.00	6.50	4.00
过热器出口蒸汽温度/ $^{\circ}\text{C}$	400.00(- 5/ + 10)	450.00	400.00
汽包工作压力/MPa	4.90	7.30	5.10
给水温度/ $^{\circ}\text{C}$	140.00	130.00	130.00
排烟温度/ $^{\circ}\text{C}$	200.00 ~ 230.00	196.00	190.00 ~ 210.00
850 $^{\circ}\text{C}$ 以上停留时间/s	≥ 2.00	≥ 2.00	≥ 2.00
锅炉效率(清洁锅炉)/%	80.00	78.00	80.00
布袋除尘器漏风率/%	≤ 2.00	≤ 2.00	≤ 2.00

1.2 计算方法

将焚烧炉与余热锅炉看作一个整体,划分合理的边界条件后,采用热平衡法计算焚烧炉 - 余热锅炉效率^[27]。根据系统能量平衡,得出进出焚烧炉 - 余热锅炉的能量为:

$$Q_{\text{in}} = Q_{\text{loss}} + Q_{\text{N}} \tag{1}$$

式中: Q_{in} —焚烧炉 - 余热锅炉系统总输入能量; Q_{loss} —系统总损失的能量; Q_{N} —系统有用输出能量。

其中, Q_{N} 可由测量或计算系统给水及过热蒸汽的物理性质获得。 Q_{loss} 可由式(2)计算获得。

$$Q_{\text{loss}} = Q_{\text{G}} + Q_{\text{CO}} + Q_{\text{RA}} + Q_{\text{FE}} + Q_{\text{ST}} \tag{2}$$

式中: Q_{G} —系统中排烟造成的热损失,可通过测量省煤器出口的烟气流量及烟气温度计算获得; Q_{CO} —化学不完全燃烧造成的热损失,通常,垃圾焚烧机组运行过程中运行氧量较高(3% ~ 8%),燃料燃烧较为充分,化学不完全燃烧造成的热损失可忽略不计; Q_{RA} —垃圾焚烧后剩余的炉渣造成的热损失,通过统计炉渣量及热值计算获得; Q_{FE} —烟道中飞灰造成的热损失,通过统计飞灰量及热值计算获得; Q_{ST} —辐射及对流造成的热损失,可根据经验公式计算获得。

焚烧炉 - 余热锅炉效率详细的计算方法参考欧盟测试标准^[27]。由公式(1)可得焚烧炉 - 余热锅

炉效率 η :

$$\eta = \frac{Q_{\text{N}}}{Q_{\text{in}}} = \frac{Q_{\text{N}}}{Q_{\text{N}} + Q_{\text{loss}}} \tag{3}$$

为掌握烟气净化设备运行性能,需了解设备漏风情况。试验过程中分别测试半干式反应塔及布袋除尘器进出口氧量,根据氧量测试结果,计算设备漏风率^[28]:

$$\text{AL} = 90 \frac{O'' - O'}{21 - O''} \tag{4}$$

式中:AL—所测试设备的漏风率; O'' —设备出口氧气体积分数; O' —设备进口氧气体积分数。

1.3 测试方法

利用等截面网格法在烟风管道及省煤器出口分别布置测点,现场实测 3 台机组烟/风温度、流量和烟气成分等运行参数。采用 K 型铠装热电偶及点温计(型号 F-51-2)现场实测烟/风温度,包括一次风温度、二次风温度和省煤器出口烟气温度,取温度的平均值作为所测截面的平均温度。采用毕托管及微压计(型号:HM7750)测试烟风管道内的动压及静压,进而计算烟/风流量。通过 NGA2000 型烟气分析仪现场实测省煤器出口烟气成分(包括 NO 、 O_2 和 CO 等),详细的烟气取样流程见文献[3]。试验过程中,按照国家标准^[29]每隔 2 h 称取灰渣并制样、灼烧,根据测试结果计算灰渣热灼减率。

2 结果与分析

2.1 焚烧炉 - 余热锅炉效率

与燃煤发电机组燃料成分相比,垃圾焚烧机组燃用垃圾成分复杂多变。试验过程中,为保证机组燃烧稳定,减少负荷波动,燃用的垃圾均已充分发酵。以机组机械负荷为基准,3 台机组均在 100% 最大连续蒸发量(MCR)负荷工况下测试焚烧炉 - 余热锅炉性能。机组负荷稳定 0.5 h 后,开始进行性能测试,每个试验工况维持 6 h。分别测试烟/风流量、温度及烟气成分,计算各项热损失,定量分析影响焚烧炉 - 余热锅炉性能的主要因素。根据测试结果分别计算焚烧炉 - 余热锅炉效率,结果如表 3 所示。A、B、C 3 台机组的焚烧炉余热锅炉效率分别为 77.44%、80.14% 和 82.70%,其中 A 机组的焚烧炉 - 余热锅炉效率远低于设计值(80%)。A 机组焚

烧炉－余热锅炉效率偏低的主要原因为排烟温度过高,现场实测 A、B、C 3 台机组省煤器出口主要排烟温度分别为265.62,221.83 和 232.81 ℃,A 机组排烟温度远高于其设计排烟温度(200~230 ℃)。排烟温度过高可导致焚烧炉－余热锅炉效率降低,并加速炉内及尾部受热面腐蚀。根据电厂运行经验,排烟温度每增加约20 ℃,焚烧炉余热锅炉效率下降约1.00%,因此 A 机组实测焚烧炉－余热锅炉效率偏低。A、B、C 3 台机组炉渣热灼减率分别为2.01%、2.96%和2.69%,炉渣热灼减率过高可造成机组炉渣热损失及飞灰热损失增加,焚烧炉－余热锅炉效率降低。

表 3 焚烧炉－余热锅炉效率计算表

Tab.3 Calculation table of incinerator-waste heat boiler efficiencies

参 数	A	B	C
主蒸汽流量/t·h ⁻¹	40.47	47.47	74.31
主蒸汽温度/℃	398.7	438.70	394.92
主蒸汽压力/MPa	3.85	6.54	3.95
汽包压力/MPa	4.96	7.19	4.65
给水温度/℃	134.70	128.12	120.24
省煤器出口排烟温度/℃	265.62	221.83	232.81
省煤器出口氧气含量/%	4.74	6.58	6.89
炉渣灼减率/%	2.01	2.96	2.69
实测焚烧炉－余热锅炉效率/%	77.44	80.14	82.70
垃圾热值/kJ·kg ⁻¹	7 318.20	7 337.64	8 218.46

2.2 焚烧炉－余热锅炉各项热损失

表 4 给出 3 台机组各部分能量所占比例,表 5 给出总热损失中各项热损失所占比例。机组总热损失中,排烟热损失所占比例最大,其次为炉渣热损失,其中 A 机组系统总能量中排烟热损失所占比例最大,为19.13%,总热损失中排烟热损失所占比例为84.79%。由表 3 垃圾热值计算结果可知,A 机组燃用垃圾热值为 7 318.20 kJ/kg,远高于其设计垃圾热值5 861.00 kJ/kg。机组垃圾处理量不变时,垃圾热值大幅升高,有利于炉内燃料的燃烧;然而垃圾热值大幅升高,相当于焚烧炉－余热锅炉系统输入的热量大幅增加,而机组换热设备未进行改造,机组常年运行后,换热系统与烟气的换热能力变差,因此系统可有效利用的热量降低,造成排烟温度大幅提

升,排烟热损失增大。此为 A 机组焚烧炉－余热锅炉效率偏低的根本原因。针对 A 机组存在的问题,一方面可对换热系统进行升级改造,提高受热面吸热量,另一方面可对尾部高温烟气进行余热回收利用。同时,由表 4 及表 5 可看出,B 机组焚烧炉－余热锅炉系统总能量中炉渣热损失所占比例最高为3.97%,总热损失中炉渣热损失所占比例为19.98%。

表 4 3 台机组各部分能量所占比例

Tab.4 The proportion of each partial energy in three units

参 数	A	B	C
有用输出热量/MW	29.80	40.01	58.94
排烟热损失/MW	7.36	7.54	9.45
排烟热损失所占比例/%	19.13	14.74	13.25
气体未完全燃烧热损失/MW	0	0	0
炉渣热损失/MW	0.79	2.03	1.89
炉渣热损失所占比例/%	2.05	3.97	2.65
飞灰热损失/MW	0.21	0.19	0.48
飞灰热损失所占比例/%	0.55	0.37	0.67
辐射对流热损失/MW	0.32	0.40	0.52
辐射对流热损失所占比例/%	0.83	0.78	0.73

表 5 3 台机组总热损失中各项热损失所占比例

Tab.5 The proportion of each heat loss in total heat loss in three units

参 数	A	B	C
排烟热损失/%	84.79	74.21	76.58
炉渣热损失/%	9.10	19.98	15.32
飞灰热损失/%	2.42	1.87	3.89
辐射与对流热损失/%	3.69	3.94	4.21

2.3 烟气净化设备漏风率

垃圾焚烧电厂烟气净化设备主要包括半干式反应塔、布袋除尘器等。随国家环保标准日益严格,部分新建电厂还增设了 SCR 系统。漏风率是烟气净化设备的一项主要性能指标。设备漏风率过大时,冷空气的掺入可造成局部烟气温度低于其露点温度,导致半干式反应塔或除尘器等设备发生积灰、结垢及腐蚀。粉尘结露后,结露的粉尘会堵塞布袋除尘器滤料的孔隙,使滤袋板结,无法过滤烟气,造成

污染物排放超标。同时,结露的粉尘也导致泵与风机能耗增大,机组厂用电率提高。选取的 A、B、C 3 台机组的烟气净化系统均采用“SNCR + 半干法脱酸 + 活性炭喷射 + 袋式除尘器”工艺,试验过程中,分别测试了半干式反应塔进口、布袋除尘器进口(即半干式反应塔出口)及布袋除尘器出口氧量,由此计算半干式反应塔及布袋除尘器漏风率,计算结果如表 6 所示。

表 6 漏风率测试结果

Tab.6 The test results of air leakage rates

参 数	A	B	C
半干式反应塔进口氧量/%	5.34	6.58	7.51
布袋除尘器进口氧量/%	6.25	7.83	7.93
布袋除尘器出口氧量/%	8.00	8.72	9.82
半干式反应漏风率/%	5.55	8.56	2.90
布袋除尘器漏风率/%	12.12	6.54	11.23

由表 6 可知,B 机组半干式反应塔漏风率最大,为 8.56%,C 机组最小,为 2.90%。A、B、C 3 台机组布袋除尘器漏风率均偏大,分别为 12.12%,6.54% 和 11.23%。设备漏风率偏大的原因可能为:3 台机组运行时间均较长,烟气净化设备存在老化现象;除尘器均由人工焊接,焊缝处可能存在漏风;除尘器卸料口密封阀或管道法兰等连接处存在漏风;除尘器内成分复杂,可能存在未脱除干净的酸性气体,造成除尘器腐蚀,导致滤袋发生破损。

3 结 论

(1) 通过现场测试及计算,获得 A、B、C 3 台机组的焚烧炉 - 余热锅炉效率,分别为 77.44%,80.14% 及 82.70%,A 机组效率偏低的主要原因为排烟温度偏高,根本原因为燃用的生活垃圾热值高于设计垃圾热值。

(2) 机组各项热损失中排烟热损失所占比例最大,A、B、C 3 台机组总热损失中排烟热损失所占比例分别为 84.79%,74.21% 及 76.58%,其次为炉渣热损失。

(3) A、B、C 3 台机组半干式反应塔及布袋除尘器的漏风率均偏大,3 台机组布袋除尘器的漏风率分别为 12.12%,6.54% 和 11.23%。过大的漏风率

可严重影响烟气净化设备性能,建议电厂及时消缺。

参考文献:

[1] 张世鑫,许燕飞,吕 勇,等. 垃圾衍生燃料焚烧技术研究[J]. 洁净煤技术,2019,25(6):184-191.
ZHANG Shi-xin,XU Yan-fei,LYU Yong, et al. Research on waste derived fuel incineration technology[J]. Clean Coal Technology, 2019,25(6):184-191.

[2] 刘建伟,赵高辉. 城市生活垃圾资源化综合处理技术研究和应用进展[J]. 科学技术与工程,2019,19(34):40-47.
LIU Jian-wei,ZHAO Gao-hui. Research progress of city life solid waste comprehensive treatment technology and application progress [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19 (34): 40-47.

[3] 刘 军,李全功,廖义涵,等. 垃圾焚烧电厂焚烧炉 - 余热锅炉性能及 NO_x 排放[J]. 浙江大学学报(工学版),2020,54(5):1014-1021.
LIU Jun,LI Quan-gong,LIAO Yi-han,et al. Performance of incinerator-waste heat boiler and NO_x emissions in solid waste incineration power plants[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science) ,2020,54(5):1014-1021.

[4] 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.
CHEN Da-yuan,WANG Zhi-chao,LI Yu-hang, et al. Sludge-coupled power generation technology in coal-fired power plant [J]. Thermal Power Generation,2019,48(4):15-20.

[5] 孙 进,李清海,李国岫,等. 城市生活垃圾焚烧中 NaCl 迁移转化的实验和热力学平衡分析[J]. 中国电机工程学报,2014,34(2):272-278.
SUN Jin,LI Qing-hai,LI Guo-xiu, et al. Experimental and thermodynamic investigation on partitioning and speciation of NaCl during municipal solid waste incineration [J]. Proceedings of the CSEE, 2014,34(2):272-278.

[6] 孙 立,吴 新,刘道洁,等. 基于硅基的垃圾焚烧飞灰中温热处理重金属稳固化实验 [J]. 化工进展,2017,36(9):3514-3522.
SUN Li,WU Xin,LIU Dao-jie, et al. Stabilization of heavy metals in municipal solid waste incineration fly ash using thermal treatment with silica-based material [J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2017,36(9):3514-3522.

[7] 单 朋,夏梓洪,陈彩霞,等. 垃圾焚烧炉炉排气固两相燃烧数值模拟[J]. 中国电机工程学报,2020,40(2):601-608.
SHAN Peng,XIA Zi-hong,CHEN Cai-xia, et al. CFD model of gas-solid combustion in moving grate MSW incinerator [J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(2):601-608.

[8] 杨栩聪,廖艳芬,林 涛,等. 350 t/d 垃圾焚烧炉污泥掺混燃烧与 SNCR 脱硝特性的数值模拟[J]. 中国电机工程学报,2020,40(21):6964-6973.

- YANG Xu-cong, LIAO Yan-fen, LIN Tao, et al. Numerical study of 350 t/d MSW incinerator on sludge blending combustion and SNCR denitration characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6964 – 6973.
- [9] RETO S, MAURICE H W, HELEN G. Highly efficient combustion with low excess air in a modern energy from-waste (EfW) plant [J]. Waste Management, 2018, 73: 301 – 306.
- [10] HUANG Tao, LIU Long-fei, ZHOU Lu-lu, et al. Operating optimization for the heavy metal removal from the municipal solid waste incineration fly ashes in the three-dimensional electro kinetics [J]. Chemosphere, 2018, 204: 294 – 302.
- [11] 韦尚正, 石生春. 某垃圾焚烧发电厂循环水系统的优化运行方式[J]. 热力发电, 2012, 41(12): 8 – 11.
- WEI Shang-zheng, SHI Sheng-chun. Operation optimization of circulating water system for a waste incineration power plant [J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(12): 8 – 11.
- [12] HU Zhi-feng, JIANG En-chen, MA Xiao-qian. Numerical simulation on NO_x emissions in a municipal solid waste incinerator [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233: 650 – 664.
- [13] TANG Yu-ting, MA Xiao-qian, LAI Zhi-yi, et al. NO_x and SO₂ emissions from municipal solid waste (MSW) combustion in CO₂/O₂ atmosphere [J]. Energy, 2012, 40: 300 – 306.
- [14] ZHU Feng, LI Xiao-fei, LU Jia-wei, et al. Emission characteristics of PCDD/Fs in stack gas from municipal solid waste incineration plants in northern China [J]. Chemosphere, 2018, 200: 23 – 29.
- [15] TAKASHI O, HIROKI T. Effects of chemical composition of fly ash on efficiency of metal separation in ash-melting of municipal solid waste [J]. Waste Manage. 2013, 33: 605 – 614.
- [16] 徐 颖, 陈 玉, 冯岳阳. 重金属螯合剂处理垃圾焚烧飞灰的稳定化技术[J]. 化工学报, 2013, 64(5): 1833 – 1839.
- XU Ying, CHEN Yu, FENG Yue-yang. Stabilization technology in treating municipal solid waste incineration [J]. CIESC Journal, 2013, 64(5): 1833 – 1839.
- [17] 曾卫东, 田 爽, 袁亚辉, 等. 垃圾焚烧炉自动燃烧控制系统设计与实现[J]. 热力发电, 2019, 48(3): 109 – 113.
- ZENG Wei-dong, TIAN Shuang, YUAN Ya-hui, et al. Design and implementation of ACC system for waste incinerator [J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(3): 109 – 113.
- [18] 罗 嘉. 大型垃圾焚烧发电厂燃烧控制策略[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 146 – 148.
- LUO Jia. Combustion control strategy of large incineration power plant [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7): 146 – 148.
- [19] 王 进, 许岩韦, 王沛丽, 等. 垃圾焚烧炉烟气再循环改造的数值模拟与试验研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2019, 25(5): 468 – 473.
- WANG Jin, XU Yan-wei, WANG Pei-li, et al. Numerical simulation and experimental investigation on retrofit of flue gas recirculation in waste incinerator [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2019, 25(5): 468 – 473.
- [20] 曾祥浩, 马晓茜, 廖艳芬, 等. 900 t/d 高热值垃圾焚烧炉污泥掺烧数值模拟 [J]. 工程热物理学报, 2020, 41(9): 2324 – 2332.
- ZENG Xiang-hao, MA Xiao-qian, LIAO Yan-fen, et al. Numerical simulation of co-combustion of sludge in a 900 t/d waste incinerator [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(9): 2324 – 2332.
- [21] 刘瑞媚, 刘玉坤, 王智化, 等. 垃圾焚烧炉排炉二次风配风的 CFD 优化模拟 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(3): 500 – 507.
- LIU Rui-mei, LIU Yu-kun, WANG Zhi-hua, et al. CFD simulation and optimization of secondary air distribution for waste combustion in grate furnace [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(3): 500 – 507.
- [22] 曾祥浩, 马晓茜, 王海川, 等. 900 t/d 生活垃圾焚烧炉二次风优化数值模拟 [J]. 热能动力工程, 2020, 35(9): 95 – 103.
- ZENG Xiang-hao, MA Xiao-qian, WANG Hai-chuan, et al. Numerical simulation of secondary air optimization in a 900 t/d waste incinerator [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(9): 95 – 103.
- [23] 郑新港, 黄 云, 陈 竹, 等. 垃圾焚烧炉二次配风优化数值研究 [J]. 热能动力工程, 2019, 34(8): 116 – 121, 181.
- ZHENG Xin-gang, HUANG Yun, CHEN Zhu, et al. Numerical simulation for the optimization of secondary air distribution in a waste incineration furnace [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(8): 116 – 121, 181.
- [24] HU Zhi-feng, JIANG En-chen, MA Xiao-qian. Numerical simulation on operating parameters of SNCR process in a municipal solid waste incinerator [J]. Fuel, 2019, 245: 160 – 173.
- [25] GAN Li-na, WANG Yu, CHEN Jian-jun, et al. The synergistic mechanism of NO_x and chlorobenzene degradation in municipal solid waste incinerators [J]. Catalysis Science Technology, 2019, 9: 4286 – 4292.
- [26] CANEGHEM J V, GREEF J D, BLOCK C, et al. NO_x reduction in waste incinerators by selective catalytic reduction (SCR) instead of selective non catalytic reduction (SNCR) compared from a life cycle perspective: a case study [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 4452 – 4460.
- [27] FDBR. FDBR RL 7: 2013: Acceptance testing of waste incineration plants with grate firing systems [S].
- [28] ASME. ASME PTC4. 3 – 2017: Air heaters performance test codes [S].
- [29] 中国城市建设研究院有限公司. CJ/T 531 – 2018: 生活垃圾焚烧灰渣取样制样与检测 [S].
- China urban construction design and research institute Co LTD. CJ/T 531 – 2018: Testing, sampling and sample preparation of slag and ash from waste incinerator [S].