

220 t/h 煤粉锅炉臭氧氧化 NO_x 超低排放试验研究张利波¹,刘佩希²,张 椰³,徐超群²,邵嘉铭²,何 勇²,王智化²

(1. 中国华电集团哈尔滨发电有限公司,黑龙江 哈尔滨 150040;2. 浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室,浙江 杭州 310027;3. 吉林浙达能源清洁利用技术有限公司,吉林 吉林 130213)

摘要:近年来,国家对于环境保护的要求愈发严苛,煤电行业节能减排任务愈加艰巨,燃煤电厂的超低排放改造工作迫在眉睫。笔者针对3台220 t/h煤粉锅炉 NO_x 进行臭氧脱硝改造和脱硝试验研究,采用烟气分析仪及电厂在线检测系统,探究了 O_3/NO 摩尔比及 NO_x 初始浓度等对脱硝效果的影响。试验结果表明,活性分子臭氧脱硝技术对该煤粉炉锅炉具有较好的脱硝效果, NO_x 脱除效率可达90%以上。锅炉出口 NO_x 浓度随锅炉负荷波动较大,呈正相关关系,锅炉负荷升高,出口 NO_x 浓度升高;锅炉负荷降低,出口 NO_x 浓度随之降低。臭氧脱硝效率随 O_3/NO 摩尔比和臭氧投加量的增加而增大,但当 O_3/NO 摩尔比超过一定值后,其增大速率随臭氧量的增加而逐渐变缓。臭氧脱硝技术中脱硝效率受 NO_x 初始浓度的影响较小, O_3/NO 摩尔比达到一定量时,可保证不同 NO_x 初始浓度波动下的脱硝效率。本试验获得的特性曲线为臭氧脱硝技术最佳臭氧喷射量的确定提供了依据,即在保证脱硝效率的前提下,如何选择最佳的 O_3/NO 摩尔比。应用臭氧脱硝技术后,该电厂顺利通过了168 h测试,烟气排放中 NO_x 浓度稳定在 $50 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 以下,满足国家超低排放要求,可见采用活性分子臭氧对烟气中的 NO_x 具有良好的脱除效果。

关键词:煤粉炉;臭氧;脱硝; NO_x ;超低排放

中图分类号:X773

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)03-0105-05

Experimental study on ultra-low emission of nitrogen oxide using ozone oxidation in 220 t/h coal-fired boiler

ZHANG Libo¹, LIU Peixi², ZHANG Ye³, XU Chaoqun², SHAO Jiaming², HE Yong², WANG Zhihua²

(1. China Huadian Power Group Harbin Power Generation Co., Ltd., Harbin 150040, China; 2. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. Jilin Zheda Energy Clean Utilization Technology Co., Ltd., Jilin 130213, China)

Abstract: In recent years, the requirement of environmental protection has become more and more stringent, and the task of energy saving and emission reduction in coal-fired power industry has become more and more arduous. The transformation of ultra-low emission of coal-fired power plants is imminent. In this paper, three 220 t/h pulverized coal fired boilers were revamped with ozone denitration technology, and a series of debugging tests were carried out. With the help of flue gas analyzer and on-line detection system of power plant, the effects of O_3/NO molar ratio and initial concentration of NO_x on denitration effect were mainly explored. The experimental results show that the application of ozone denitration technology in the pulverized coal boiler has a very good denitration effect, and the removal efficiency of NO_x reaches more than 90%. The NO_x concentration at the outlet of the boiler fluctuates greatly with the boiler load. The boiler load increases and the NO_x concentration at the outlet increases. If the boiler load decreases, the NO_x concentration at the outlet also decreases, showing a positive correlation. The efficiency of ozone denitration increases with the increase of the molar ratio of O_3/NO and ozone dosage, but when the molar ratio of O_3/NO exceeds a certain value, the rate of ozone denitration increases slowly with the increase of ozone dosage. In ozone denitration technology, the denitration efficiency is less affected by the initial concentration of NO_x . When the molar ratio of O_3/NO reaches

收稿日期:2019-04-02;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.19040209

基金项目:浙江省自然科学基金杰出青年基金资助项目(LR16E060001)

作者简介:张利波(1962—),男,黑龙江巴彦人,工程师,主要从事电站设备检修,锅炉脱硫、脱硝及除尘等环保改造工程技术管理。

E-mail: 13895725521@139.com。通讯作者:徐超群,工程师,主要从事锅炉燃烧及烟气脱硝研究。E-mail: originzero@zju.edu.cn

引用格式:张利波,刘佩希,张椰,等.220 t/h煤粉锅炉臭氧氧化 NO_x 超低排放试验研究[J].洁净煤技术,2019,25(3):105-109.

ZHANG Libo, LIU Peixi, ZHANG Ye, et al. Experimental study on ultra-low emission of nitrogen oxide using ozone oxidation in 220 t/h coal-fired boiler[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(3): 105-109.



移动阅读

a certain value, the denitration efficiency can be guaranteed under different conditions of the initial concentration fluctuation of NO_x . The characteristic curve obtained in this experiment provides a basis for determining the optimum ozone injection quantity in the application of ozone denitration technology, that is, how to select the optimum O_3/NO ratio on the premise of ensuring the denitration efficiency. After the application of ozone denitration technology, the power plant passed 168 hours of test successfully. The concentration of NO_x in flue gas emission is stable below $50 \text{ mg}/\text{Nm}^3$, which meets the national ultra-low emission requirements. It can be seen that the use of ozone denitration technology to control the emission of NO_x in flue gas has a very good effect.

Key words: coal fired boiler; ozone; denitration; NO_x concentration; ultra-low emission

0 引言

我国以煤为主的能源资源条件决定了我国以煤为主的能源消费结构,也决定了我国电力生产和消费行业现状,煤电仍将是我国电力行业的主力供电来源和基础供电来源^[1]。但煤燃烧过程释放大量的大气污染物(SO_2 、 NO_x 、PM等),严重破坏了生态环境,威胁人类健康。随着环境污染的形势越发严峻,煤电节能减排的任务越发艰巨,2015年环境保护部、国家发展和改革委员会、国家能源局于联合发布的《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》^[2]中明确提出,截至2020年,全国所有具备改造条件的燃煤电厂实现 NO_x 排放浓度不高于 $50 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 、 SO_2 排放浓度不高于 $35 \text{ mg}/\text{Nm}^3$,这对燃煤电厂的脱硝工作提出了更加严格的要求。

由于 SO_2 具有较好的水溶性,湿法脱硫技术(WFGD)可有效控制 SO_2 排放。对于 NO_x 脱除技术,当前较为成熟的技术包括选择性非催化还原(SNCR)技术、选择性催化还原(SCR)技术等。其中SCR技术相对成熟,脱硝效率可达90%以上,适应温度窗口为 $290 \sim 430 \text{ }^\circ\text{C}$,但投资成本高、催化剂受烟气条件影响大,且由于改造要求空间大,在部分老机组的改造中存在投资高、场地不足等困难。此外,由于燃煤成分复杂、飞灰浓度高,催化剂易出现堵塞和腐蚀问题^[3], SO_2 少量催化生成的 SO_3 会与泄漏的氨反应生成高黏结性的硫酸氢铵,造成下游空预器堵塞^[4];SNCR技术的初始投资相对较低、工艺简单,温度窗口在 $800 \sim 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[5],但其脱硝效率较低,一般为30%~50%^[6]。这2种脱硝技术均需要特定的温度窗口,且在低负荷深度调峰条件下,会造成脱硝效率下降、氨逃逸增加,引发二次污染^[7]。

目前,利用臭氧氧化结合碱液吸收的锅炉烟气多种污染物一体化协同脱除技术^[8]逐渐成为研究热点,该技术已在多项脱硝工程中取得成功应用^[9-10]。活性分子一体化协同脱除技术是指利用活性分子臭氧的强氧化性将烟气中难溶于水的 $\text{NO}(>95\%)$ 氧化为水溶性更强的 NO_2 或更高价态的

N_2O_5 ,再通入后置的湿法脱硫洗涤塔中进行洗涤脱除^[11]。活性分子一体化协同脱除技术结合湿法脱硫塔可对烟气中 NO_x 、 SO_2 、Hg等污染物同时脱除,真正实现“一塔多脱”^[12];臭氧氧化法适用于 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下的低温烟气,不受复杂烟气成分的影响,在工业锅炉的烟气处理方面具有明显优势。此外,由于臭氧脱硝技术可达到90%以上的脱硝效率,而且对现有电厂改造较少,仅需在尾部烟道进行臭氧喷嘴和管路布置,因此,近几年活性分子一体化脱除技术在燃煤电厂的超低排放改造中得到了较为广泛的应用^[7]。本文针对臭氧脱硝技术在煤粉炉烟气脱硝中的应用展开试验研究,分析煤粉炉烟气中 NO_x 的排放特性、臭氧投加量和 O_3/NO 摩尔比对臭氧脱硝效率的影响,为臭氧脱硝技术在煤粉炉中脱硝改造的应用提供了参考依据。

1 试验锅炉

中国华电集团哈尔滨发电有限公司现有5台锅炉(1~5号),其中1~3号锅炉是额定蒸发量为 $220 \text{ t}/\text{h}$ 的煤粉炉,4、5号锅炉是 $90 \text{ t}/\text{h}$ 的层燃炉。1~3号锅炉都是单锅筒、自然循环、集中下降管呈倒U型布置的固态排渣煤粉炉,采用正四角切向布置角式煤粉燃烧器,其额定蒸发量为 $220 \text{ t}/\text{h}$,过热器出口工作压力为 9.8 MPa ,过热蒸汽温度为 $540 \text{ }^\circ\text{C}$,给水温度为 $215 \text{ }^\circ\text{C}$,排烟温度为 $142 \text{ }^\circ\text{C}$,锅炉效率达91.53%。1~5号锅炉尾部烟气汇合统一进入石灰石-石膏法脱硫塔内处理,共配备2个脱硫塔,1、2号锅炉共用一塔,3~5号锅炉共用一塔,脱硫塔前总烟道为连通烟道并设有挡板门,运行时挡板门的开关可控制1、2号锅炉烟气是否与3~5号锅炉烟气混合再分配的形式进入脱硫塔。本文在1~3号煤粉炉上进行臭氧脱硝调试现场试验。

1~5号锅炉煤粉炉的设计煤种为鸡西烟煤,其煤质特性见表1。根据GB/T 15224.1—2018^[13]和GB/T 15224.2—2010^[14],灰分在30%~40%,属于高灰煤,硫分 $<0.5\%$,属于特低硫煤。该煤粉炉的鸡西烟煤为特低硫、中高灰、高挥发性煤,水分和灰分均很高,易点燃,需设计烟气污染物脱除装置。

表 1 锅炉设计煤质性质

Table 1 Quality information of design coal for boiler

$w(C_{ar})$	$w(H_{ar})$	$w(O_{ar})$	$w(N_{ar})$	$w(S_{ar})$	M_{ar}	A_{ar}	V_{ar}	$Q_{net,ar}/(kJ \cdot kg^{-1})$
46.25	3.04	4.94	0.57	0.42	8.00	36.78	20.19	18 095

2 臭氧脱硝工艺流程

活性分子臭氧脱硝系统主要包括制氧系统、活性分子发生系统、活性分子反应系统、吸收系统等,如图 1 所示。制氧系统由 2 台 800 Nm³/h 和 2 台 400 Nm³/h 变压吸附(VPSA)制氧机构成;活性分子产生系统由 3 台 100 kg/h 的臭氧发生器构成。制氧系统得到的富氧气源通入臭氧发生器,高压放电产生活性分子臭氧后,由活性分子分配器均匀喷入特殊流场设计的活性分子反应器中与烟气反应。哈尔滨发电有限公司共配备 2 个石灰石-石膏湿法脱硫塔,其中,1、2 号锅炉的烟气通往 1 号脱硫塔,3~5 号锅炉的烟气通往 2 号脱硫塔进行洗涤吸收。1、2 号脱硫塔前各有一个活性分子反应器,反应后的气体通入脱硫塔中进行湿法洗涤吸收,达到 NO_x 污染物脱除的目的。

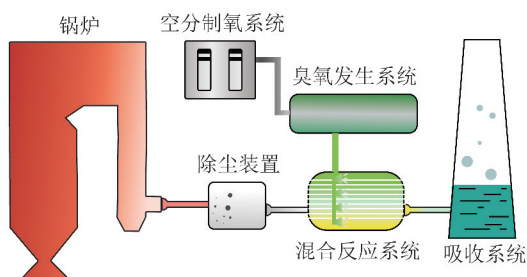


图 1 臭氧脱硝技术工艺流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of ozone denitration technology process

3 试验方法

采用德图烟气分析仪(Testo 350)及在线烟气分析系统(CEMS)对 SCR 出口、活性分子臭氧喷入前的脱硫塔入口烟气和脱硫塔出口烟囱处的烟气组分进行检测。将烟气中 NO_x 浓度折算到 6% 含氧量的计算公式为

$$c_{inlet,NO_x} = c_{inlet,NO_x}^0 \frac{21 - 6}{21 - c_{inlet,O_2}} \quad (1)$$

$$c_{outlet,NO_x} = c_{outlet,NO_x}^0 \frac{21 - 6}{21 - c_{outlet,O_2}} \quad (2)$$

NO_x 脱除效率 $\eta(NO_x)$ 的计算公式为

$$\eta(NO_x) = \frac{c_{inlet,NO_x} - c_{outlet,NO_x}}{c_{inlet,NO_x}} \times 100\% \quad (3)$$

其中, c_{inlet,NO_x}^0 、 c_{outlet,NO_x}^0 分别为折算前脱硫塔入口 NO_x 初始浓度和 NO_x 出口浓度, mg/Nm³; c_{inlet,O_2} 、 c_{outlet,O_2} 分别为脱硫塔入口和出口的氧含量, %; c_{inlet,NO_x} 、 c_{outlet,NO_x} 分别为折算后脱硫塔入口 NO_x 初始浓度和 NO_x 出口浓度, mg/Nm³。NO_x 浓度均为折算到氧含量 6% 干烟气中的 NO_x 浓度。

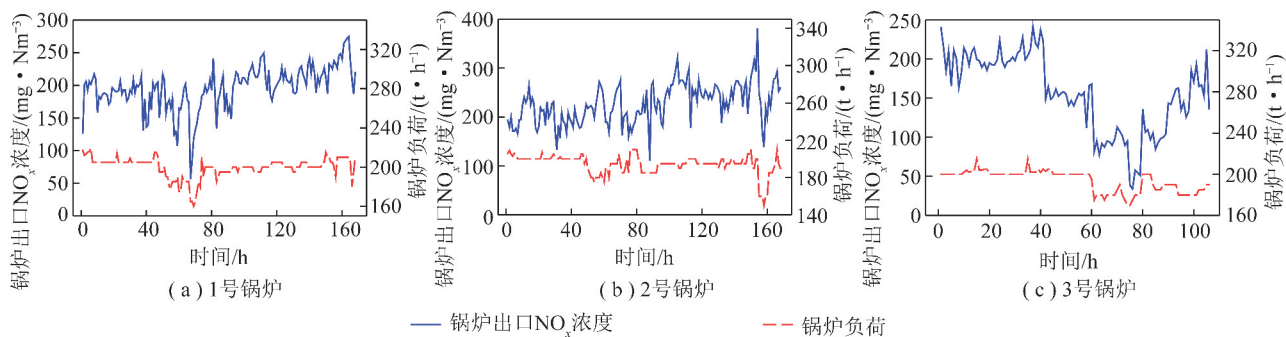
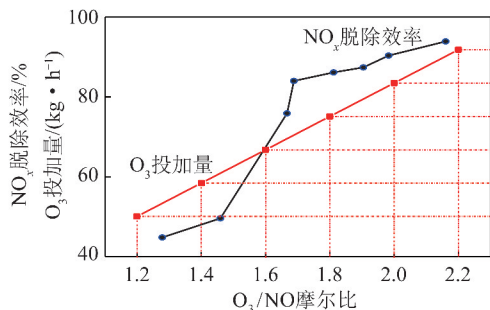
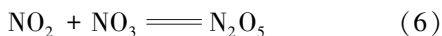
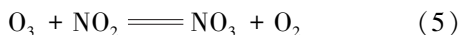
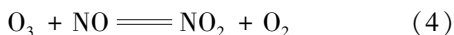
4 试验结果及讨论

4.1 锅炉出口 NO_x 排放特性

图 2 为 1~3 号锅炉的负荷和出口 NO_x 浓度随时间的变化。可以看出, NO_x 浓度随锅炉负荷波动较大。1~3 号锅炉出口 NO_x 浓度的平均值分别达到 196.5、226.5、155.7 mg/Nm³, 锅炉出口 NO_x 浓度的最大值可达 381.5 mg/Nm³, 最低浓度仅为 34.1 mg/Nm³。由于实际运行中煤粉炉燃用的煤种与设计煤种有偏差, 煤粉燃烧状况变化导致炉膛火焰温度变化, 从而导致锅炉负荷波动较大, 锅炉出口的 NO_x 浓度也随之波动。此外, 锅炉出口 NO_x 浓度随负荷的变化呈正相关关系, 随锅炉负荷的升高, NO_x 排放浓度升高, 可通过调整风煤等措施维持锅炉负荷和炉膛温度的稳定性, 以保证锅炉出口 NO_x 的浓度范围^[15]。

4.2 O₃/NO 摩尔比对 NO_x 脱除效率的影响

臭氧脱硝技术中 NO_x 脱除效率与 O₃/NO 摩尔比之间的关系如图 3 所示。可见, NO_x 脱除效率随 O₃/NO 摩尔比的增大而增大, 在 O₃/NO 摩尔比为 1.7 左右时, NO_x 脱除效率在 84% 以上; 当 O₃/NO 摩尔比 < 1 时, NO 和 O₃ 的反应产物是 NO₂ (式(4))。研究表明^[16], O₃/NO 摩尔比 > 1 时, O₃ 可将 NO₂ 进一步氧化为 N₂O₅ (式(5)、(6)), 在 O₃/NO 摩尔比 > 1.5 时, 反应基本达到稳定, 氧化效率随 O₃/NO 摩尔比的增长逐渐稳定。当 O₃/NO 摩尔比 < 1.7 时, NO_x 脱除效率随 O₃/NO 摩尔比增大急剧增大, 这是因为 O₃ 将 NO 氧化为 NO₂ 和水溶性更强的 N₂O₅, 随着 NO₂ 和 N₂O₅ 被后置的洗涤塔吸收, NO_x 脱除效率随之增大; O₃/NO 摩尔比 > 1.7 后增加速率变缓, 这与理论上的变化趋势相符^[16], 推断是因为剩余的 NO、NO₂ 量逐渐减少, 导致脱硝效率的上升曲线逐渐变缓^[17]。

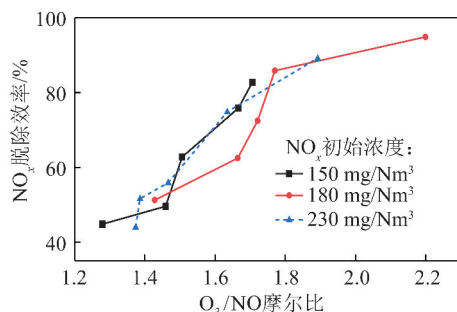
图2 1~3号锅炉出口NO_x排放特性Fig. 2 Characteristics of NO_x 1-3 boiler outlet NO_x emission图3 NO_x脱除效率随O₃/NO摩尔比变化曲线Fig. 3 Curves of NO_x removal efficiency at different O₃/NO molar ratio

由图3可见,NO_x初始浓度为160 mg/Nm³、烟气流量为250 000 Nm³/h的工况下,臭氧投加量随O₃/NO摩尔比的增加逐渐增大,两者呈正比例关系。当臭氧投加量由53 kg/h升至70 kg/h时,O₃/NO摩尔比由1.28增大到1.69,NO_x脱除效率由44.8%增长到了84.0%;当臭氧投加量继续增至90 kg/h时,O₃/NO摩尔比达2.16,此时NO_x脱除效率达93.9%,表明NO_x脱除效率随臭氧投加量的增加而增大的速率变缓。因此,脱硝过程中投加的臭氧量不宜过多,过量投加会造成残留臭氧的泄漏。文献[18]试验表明,通过添加还原性添加剂可分解残留的臭氧,但臭氧残留量越大,造成分解成本增加。这也为臭氧脱硝技术应用中臭氧喷射量的确定提供了依据,即在保证脱硝效率的前提下选择最佳的O₃/NO摩尔比。为保证脱硝效率达80%以上,最佳O₃/NO摩尔比应设置在1.7左右。

4.3 NO_x初始浓度对NO_x脱除效率的影响

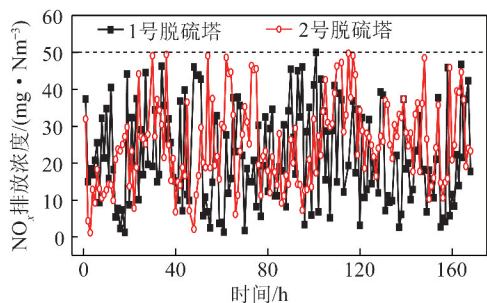
图4为不同初始浓度下NO_x脱除效率随O₃/NO摩尔比的变化,可知,NO_x初始浓度分别

为150、180、230 mg/Nm³时,NO_x脱除效率均随O₃/NO摩尔比的增加而增大。NO_x初始浓度为180 mg/Nm³时,O₃/NO摩尔比>1.77,脱硝效率的增长速率变缓,这与4.2节的变化规律相符。在O₃/NO摩尔比为1.5~1.7时,初始浓度为180 mg/Nm³条件下的NO_x脱除效率略低于其他2种工况,但总体上NO_x初始浓度对NO_x脱除效率影响不大,且在O₃/NO摩尔比达1.72时,3种不同初始浓度情况下脱硝效率均达70%以上,说明O₃/NO摩尔比达到一定量时,可保证不同NO_x初始浓度波动下的脱硝效率。

图4 不同初始浓度下NO_x脱除效率随O₃/NO摩尔比变化曲线Fig. 4 Curves of NO_x removal efficiency's changing with O₃/NO molar ratio at different initial concentrations of NO_x

4.4 脱硫塔出口NO_x排放特性

图5为活性分子脱硝改造完成后,连续168 h的1、2号脱硫塔出口的NO_x排放浓度。可以看出,由于臭氧的喷入,NO_x的排放浓度得到明显降低。1、2号脱硫塔出口的NO_x浓度的平均值分别为21.8 mg/Nm³和25.6 mg/Nm³,NO_x脱除效率平均值分别达87%和85%。在168 h的稳定运行过程中,1、2号脱硫塔出口NO_x浓度始终低于50 mg/Nm³,满足国家超低排放标准,可见采用活性分子臭氧对烟气中的NO_x具有良好的脱除效果。

图 5 脱硫塔出口 NO_x 排放特性Fig. 5 Characteristics of desulfurization tower outlet NO_x emission

5 结 论

1) 锅炉出口的 NO_x 浓度随负荷的变化呈正相关关系, 锅炉负荷升高, 出口 NO_x 浓度升高。

2) 臭氧脱硝效率随 O₃/NO 摩尔比和臭氧投加量的增加而增大, O₃/NO 摩尔比 > 1.7 后增加的速率变缓。臭氧脱硝技术中臭氧投加量需要进行精确设计, 以达到最优的环保效益和经济效益。

3) 活性分子脱硝技术受 NO_x 初始浓度的影响较小, O₃/NO 摩尔比达到一定量时, 可保证不同 NO_x 初始浓度波动下的脱硝效率。

4) 臭氧的喷入使 NO_x 的排放浓度明显的降低。脱硝效率可达 85% 以上, 可见采用活性分子臭氧对烟气中的 NO_x 具有良好的脱除效果。

参考文献 (References):

[1] 中国电力企业联合会. 中国煤电清洁发展报告 [EB/OL]. [2017 - 09 - 22]. <http://www.cec.org.cn/zhuanti/2017nianzhuanti/zhongguomeidianqingjief-azhanyuhuanjingyingxiangfabuyantaohui/meitibaodao/2017-09-22/173392.html>.

[2] 中华人民共和国环境保护部. 全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案 [EB/OL]. [2015 - 12 - 11]. <http://power.in-en.com/html/power-2249399.shtml>.

[3] 陈玉龙, 王锐. 关于锅炉脱硝改造后产生堵灰及腐蚀问题探讨 [J]. 锅炉制造, 2018(6): 40-41.
CHEN Yulong, WANG Rui. Discussion on blockage and corrosion of boiler after denitrification [J]. Boiler Manufacturing, 2018(6): 40-41.

[4] 官家宏. 电站煤粉炉氮氧化物控制技术 [J]. 电力设备管理, 2018(10): 84-88.
GONG Jiahong. Nitrogen oxide control technology for pulverized coal fired boilers in power plants [J]. Electric Power Equipment Management, 2018(10): 84-88.

[5] ØSTBERG M, DAM-JOHANSEN K. Empirical modeling of the selective non-catalytic reduction of NO_x: Comparison with large-scale

experiments and detailed kinetic modeling [J]. Chemical Engineering Science, 1994, 49(12): 1897-1904.

[6] 王小娥. 选择性非催化还原烟气脱硝技术在 CFB 锅炉及煤粉炉上的应用比较 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.

[7] 姜树栋. 利用臭氧及活性分子协同脱除多种污染物的实验及机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.

[8] 王智化. 燃煤多种污染物一体化协同脱除机理及反应流直接数值模拟 DNS 的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

[9] 张建平, 万凯迪, 王荣涛, 等. 生物质循环流化床锅炉臭氧脱硝试验研究 [J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(1): 8-13.
ZHANG Jianping, WAN Kaidi, WANG Rongtao, et al. Experimental study on ozone denitration of a biomass circulating fluidized bed boiler [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019, 9(1): 8-13.

[10] 朱燕群, 杨业, 黄建鹏, 等. 橡胶厂 60 000 m³/h 炭黑干燥炉烟气臭氧脱硝试验研究 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2016, 50(10): 1865-1870.
ZHU Yanqun, YANG Ye, HUANG Jianpeng, et al. Removal of NO_x by ozone oxidation from flue gas of 60 000 m³/h carbon black drying furnace of rubber plant [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(10): 1865-1870.

[11] 马强. 烟气中多种污染物超低排放的活性分子氧化及一体化脱除机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

[12] WANG Z H, ZHOU J H, ZHU Y Q, et al. Simultaneous removal of NO_x, SO₂ and Hg in nitrogen flow in a narrow reactor by ozone injection: Experimental results [J]. Fuel Processing Technology, 2007, 88(8): 817-823.

[13] 国家市场监督管理总局. 煤炭质量分级 第 1 部分: 灰分: GB/T 15224. 1—2018 [S/OL]. [2018 - 09 - 01]. <http://www.gb688.cn/bzgk/gb/newGbInfo?hcno=0B7290DEB716BE83A82D1B5E86DAFC13>.

[14] 煤炭工业协会. 煤炭质量分级 第 2 部分: 硫分: GB/T 15224. 2—2010 [S/OL]. [2010 - 09 - 26]. <http://www.zgbg.org/2/StandardDetail498185.htm>.

[15] 张洪柱. 高效工业煤粉炉替代传统工业锅炉的实践与研究 [D]. 天津: 天津大学, 2017.

[16] ASIF M, KIM W S. Numerical study of NO_x abatement using ozone injection integrated with wet absorption [J]. Ozone Science & Engineering, 2014, 36(5): 472-484.

[17] MA Qiang, WANG Z H, LIN F W, et al. Characteristics of O₃ oxidation for simultaneous desulfurization and denitration with limestone-gypsum wet scrubbing: Application in a carbon black drying kiln furnace [J]. Energy & Fuels, 2016, 30(3): 2302-2308.

[18] 林法伟, 朱燕群, 徐超群, 等. 臭氧多脱过程中残留臭氧的分解试验研究 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2015, 49(7): 1249-1254.
LIN Fawei, ZHU Yanqun, XU Chaoqun, et al. Experimental study of residual ozone decomposition in process of multi-pollutants removal by ozone [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(7): 1249-1254.