

基于低氮燃烧的循环流化床低温增效脱硝实验研究

魏小兵¹, 罗晨², 武广剑³, 马素霞²

(1. 晋能鑫磊煤电有限公司, 山西 阳泉 045100; 2. 太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024;
3. 晋能大土河热电有限公司, 山西 吕梁 033099)

摘要:为探究循环流化床(CFB)锅炉的低 NO_x 排放性能,在热输入功率为81.3 kW的CFB热态实验台上研究了燃煤平均粒径与二次风对 NO_x 原始生成量的影响,考察了以碳酸氢铵为还原剂,以碳酸钠和乙醇为添加剂的选择性非催化还原(SNCR)低温脱硝增效性能。结果表明:随燃煤平均粒径的减小, NO_x 生成量降低;提高二次风比例及二次风口位置可降低 NO_x 生成量;以碳酸氢铵为还原剂的SNCR法在氨氮摩尔比为1.7时脱硝效率达到65.2%,还原剂利用率达到峰值;在650~800℃的低温范围内,添加碳酸钠较无添加剂工况的脱硝效率平均提升24.5个百分点,750℃时的脱硝效率提升34.8个百分点;添加乙醇后的低温区效率平均提升28.2个百分点,温度低于700℃时增效性能优于添加碳酸钠工况;添加剂主要通过自由基链式反应提升SNCR法的低温脱硝性能。

关键词:循环流化床;低 NO_x 燃烧;低温;添加剂;脱硝

中图分类号:X773 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.mdjgc.2023.11.010

[引用本文格式]魏小兵,罗晨,武广剑,等.基于低氮燃烧的循环流化床低温增效脱硝实验研究[J].热能动力工程,2023,38(11):84-89. WEI Xiao-bing, LUO Chen, WU Guang-jian, et al. Experimental study on low temperature synergistic denitration of circulating fluidized bed based on low nitrogen combustion[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(11): 84-89.

Experimental Study on Low Temperature Synergistic Denitration of Circulating Fluidized Bed based on Low Nitrogen Combustion

WEI Xiao-bing¹, LUO Chen², WU Guang-jian³, MA Su-xia²

(1. Jinneng Xinlei Coal Power Co., Ltd., Yangquan, China, Post Code: 045100;
2. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, China, Post Code: 030024;
3. Jinneng Datuhe Thermal Power Co., Ltd., Lyuliang, China, Post Code: 033099)

Abstract: In order to explore the low NO_x emission performance of circulating fluidized bed (CFB) boiler, on a thermal state test rig with input power of 81.3 kW, the effects of the average particle size of coal and the secondary air on the original NO_x generation were studied, the synergistic denitration performance of selective non-catalytic reduction (SNCR) at low temperature was investigated with ammonium bicarbonate as reducing agent and sodium carbonate and ethanol as additives. The experimental results show that the NO_x generation of CFB boiler decreases with the decrease of average particle size of coal; increasing the proportion and the vent position of secondary air can decrease NO_x generation; the SNCR method with ammonium bicarbonate as reducing agent achieves a denitration efficiency of 65.2% at an ammonia to nitrogen molar ratio of 1.7, with peak reducing agent utilisation; in the low temperature range of 650-800℃, the denitration efficiency with sodium carbonate is increased by 24.5 percentage

收稿日期:2023-06-02; 修订日期:2023-07-10

基金项目:国家重点研发计划(2020YFB0606300)

Fund-supported Project: National Key R&D Program of China (2020YFB0606300)

作者简介:魏小兵(1975-),男,晋能鑫磊煤电有限公司高级工程师。

通讯作者:马素霞(1966-),女,太原理工大学教授。

points on average compared with that without additive, and at 750 °C, the denitration efficiency is increased by 34.8 percentage points; after adding ethanol, the average efficiency of low temperature zone is improved by 28.2 percentage points, and the synergistic performance is better than that of adding sodium carbonate when the temperature is lower than 700 °C; the additive enhances the low-temperature denitration performance of SNCR mainly by simulating the free radical chain reaction.

Key words: circulating fluidized bed (CFB), low NO_x combustion, low temperature, additives, denitration

引 言

氮氧化物(NO_x)作为燃煤电厂排放的主要污染物之一,对大气环境造成了严重的危害。近年来,我国提出燃煤 NO_x 排放浓度不高于 50 mg/m^3 的“超低排放”要求^[1]。循环流化床(Circulating Fluidized Bed, CFB)锅炉具有分段送风及炉内燃烧温度低的特点,具备 NO_x 原始生成量低的天然优势^[2],且采用选择性非催化还原(SNCR)脱硝技术,在分离器入口布置脱硝喷枪可有效控制 NO_x 的排放量^[3]。

众多学者致力于通过燃烧控制进一步降低 CFB 锅炉 NO_x 原始排放。李竞岌等人^[4]提出了基于流态重构的低床压降节能型 CFB 锅炉技术,通过提高细颗粒床料占比、优化床存量等方式改善炉内燃烧及还原性气氛分布,强化 CFB 锅炉低氮排放特性;杜佳军等人^[5]在某台 600 MW CFB 锅炉上进行了实验,提出优化一二次风配比、提高二次风口位置及采用烟气再循环和低过量空气系数等措施降低 NO_x 原始排放量;王丰吉等人^[6]对某厂 CFB 锅炉进行低氮燃烧优化改造并联合 SNCR 脱硝满足了高、中负荷段 NO_x 超低排放要求。SNCR 脱硝技术对反应温度有着严格的要求,有效的脱硝“温度窗口”一般为 $900 \sim 1100 \text{ °C}$ ^[7],但当锅炉在低负荷下运行时,分离器入口烟温低于 800 °C ,采用 SNCR 法的脱硝效率严重下降。已有研究表明,使用活性还原剂或采用还原剂结合添加剂的方式可提升低温下的脱硝效率^[8-13]。卢志民等人^[8]研究发现,以碳酸氢铵为还原剂的 SNCR 脱硝法在低温范围内可获得 65% 以上的 NO_x 还原率,且相较尿素为还原剂时可产生更少的二次污染物 N_2O ;Javed 等人^[9]的实验结果表明,醇类添加剂可改善尿素 SNCR 法在低温下的脱硝效果;高攀等人^[10]的研究结果表明,钠盐可提高低温下以氨水或尿素为还原剂的 SNCR 脱硝效率;气态添加剂如 H_2 ^[11]、 CO ^[12]、 CH_4 ^[13] 等都能使脱硝“温度窗口”向低温方向移动。以往针对低温 SNCR

脱硝的研究多在一维管式炉实验装置中进行,实验条件无法准确还原实际的 CFB 炉内复杂气固两相流动及烟气成分。

本研究在热输入功率为 81.3 kW 的循环流化床热态实验系统中进行 NO_x 生成及低温 SNCR 脱硝实验研究,探讨入炉煤粒径、二次风口位置及二次风比例对炉膛出口 NO_x 原始排放量的影响;考察以碳酸氢铵为还原剂,辅以碳酸钠与乙醇作添加剂的 SNCR 低温脱硝增效性能。研究结果可为 CFB 锅炉低负荷下控制 NO_x 排放提供工业应用参考。

1 实验系统及方法

1.1 实验系统简介

循环流化床热态实验系统如图 1 所示。该系统主要由 CFB 炉膛、旋风分离器与返料系统、给煤系统、配风系统、换热系统、SNCR 喷射系统及烟气成分分析系统组成^[14]。

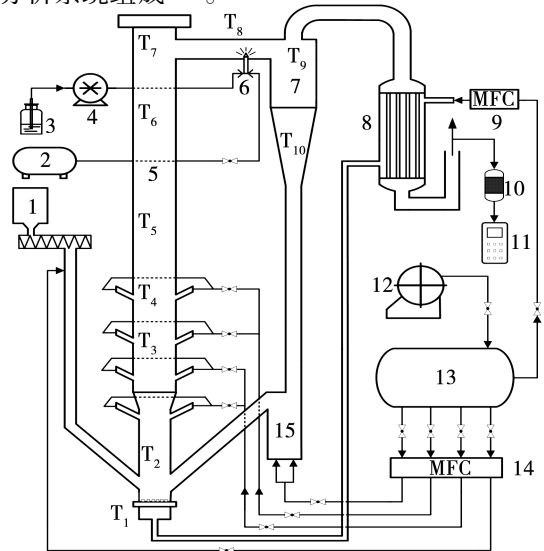


图 1 CFB 热态实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thermal state experimental system in CFB

1 - 螺旋给料机;2 - 空气压缩机;3 - 还原剂/添加剂溶液;4 - 蠕动泵;5 - 炉膛燃烧室;6 - 脱硝喷枪;7 - 旋风分离器;8 - 换热器;9,14 - 质量流量计;10 - 干燥过滤筒;11 - 烟气分析仪;12 - 风机;13 - 气罐;15 - 返料器

炉膛不锈钢管净高 3 250 mm, 燃烧区域分密相区和稀相区, 其横截面直径分别为 160 和 220 mm。外壁配有 3 根电加热丝, 一次风经分离器出口烟气预热后通入炉膛底部。以布风板(加载 19 个钟罩型风帽)所在平面为坐标零点, 竖直向上为正方向, 在 500 ~ 1 100 mm 内均匀布置 4 层二次风, 每层均左右对称布置两处喷口, 各喷口与水平面夹角为

60°。入炉膛一次风与二次风温度分别为 210 和 30 °C。在旋风分离器入口处布置 1 支气力雾化式喷枪, 入炉喷管为扁平射流口。沿炉膛不同高度及分离器入口布置 10 支 K 型热电偶($T_1 \sim T_{10}$)。所用床料为电熔石英砂(平均粒径为 0.73 mm), 所用煤种为陕西府谷烟煤, 入炉煤煤质的工业分析及元素分析如表 1 所示。

表 1 煤质元素分析和工业分析

Tab. 1 Ultimate and proximate analyses of coal quality

元素分析/%					工业分析/%			$Q_{\text{net,ar}}/$
C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	$S_{\text{t,ar}}$	A_{ar}	$M_{\text{t,ar}}$	V_{daf}	$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
66.08	3.92	8.18	0.71	0.69	9.84	10.58	36.32	24.4

1.2 实验方法及计算

首先向炉膛内投入 5.5 kg 的石英砂床料(料层高度为 260 mm), 开启电加热装置及风机预热设备。当密相区床温 t_2 升至 600 °C 后开始投煤, 通过螺旋给料机控制给煤量并利用质量流量计精确控制二次风量、给煤风量及返料风量, 控制过量空气系数在 1.2 左右。配置质量浓度为 12% 的碳酸氢铵溶液作为还原剂, 经蠕动泵控制流量后进入喷枪并经压缩空气携带后喷入分离器入口水平烟道内。烟气采样设备位于换热器出口, 取样烟气经冷却、干燥并除尘后进入分析仪进行成分分析。

利用烟气分析仪测得各工况下的 NO_x 质量浓度(以 10^{-6} 显示), 将其统一折算到 6% O_2 下的 NO_x 质量浓度。各反应条件需进行 3 次重复实验并取结果的平均值。

SNCR 脱硝效率计算公式为:

$$\eta_{\text{NO}_x} = \frac{\varphi_i - \varphi_o}{\varphi_i} \times 100\% \quad (1)$$

还原剂利用率计算公式为:

$$\eta = \frac{\eta_{\text{NO}_x}}{\text{NSR}} \quad (2)$$

式中: φ_i, φ_o —还原剂反应前和反应后的 NO_x 质量浓度, mg/m^3 ; NSR—喷入烟气中的 NH_4HCO_3 与烟气中 NO_x 的摩尔比。

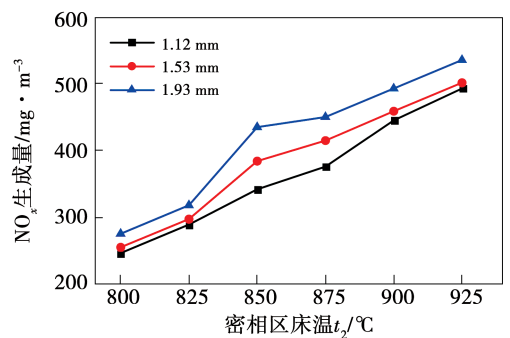
2 结果与讨论

实验分析改变燃料粒径、二次风比例和二次风口高度的低氮燃烧对 CFB 锅炉炉膛出口 NO_x 原始排放量的影响。

2.1 燃料粒径对炉膛出口 NO_x 原始生成量的影响

实验中筛选的给煤平均粒径分别为 1.12, 1.53 和 1.93 mm, 调整给煤机频率及给煤风量, 保证相同的燃煤落料量, 开启布风板上方 700 mm 处二次风口并调整二次风比例为 45%。

图 2 为 3 种给煤平均粒径条件下 NO_x 原始生成量随密相区温度的变化。整体而言, 燃煤平均粒径越小, NO_x 生成量越少; 随密相区温度的升高, NO_x 生成量不断提高。在 800 ~ 925 °C 的温度下, 平均粒径 1.12 mm 的 NO_x 生成量较 1.93 mm 时降低约 53 mg/m^3 。

图 2 不同燃煤粒径下 NO_x 生成量随温度的变化Fig. 2 Variation of NO_x generation at different coal particle sizes with temperature

CFB 燃烧生成的 NO_x 主要为燃料型 NO_x , 随着燃烧温度的升高, 煤热解生成的含氮化合物随挥发分不断析出, 生成 $\text{NO}, \text{N}_2\text{O}$ 等^[15]。燃煤粒径对炉内的还原性气氛有重要影响^[16], 随着粒径减小, 气固两相传质阻力增大, 燃料颗粒获得的 O_2 减少, 使其处于欠氧燃烧状态; 且炉膛上部颗粒团增多, 颗粒团

内部贫氧的还原性气氛可抑制 NO_x 的生成;燃煤颗粒粒径越小,其比表面积越大,因此碳颗粒上发达的孔隙结构为焦炭和 CO 还原 NO_x 提供了丰富的吸附表面,有效降低了 NO_x 的原始生成量^[17]。燃料颗粒平均粒度过小易导致密相区床料不足,碳颗粒难以稳燃,且碳颗粒在炉内停留时间过短而使飞灰含碳量增大。基于此,本研究选取的燃煤颗粒平均粒径为 1.12 mm。

2.2 二次风对 NO_x 原始生成量的影响

CFB 锅炉一次风从布风板给入,满足布风均匀并保证床料的正常流化,提供燃烧所需的部分 O_2 ,二次风从炉膛下部还原区以上送入,增强炉内的气固扰动并保证燃料的充分燃烧^[18]。二次风比例和二次风口高度对炉内的还原性气氛有重要影响,从而影响 NO_x 的原始生成量。实验中分别开启距布风板 500,700,900 及 1 100 mm 处的二次风口,并在 35% ~ 55% 的范围内改变二次风比例,考察二次风口位置及二次风比例对炉膛出口烟气中 NO_x 质量浓度的影响,结果如图 3 所示。

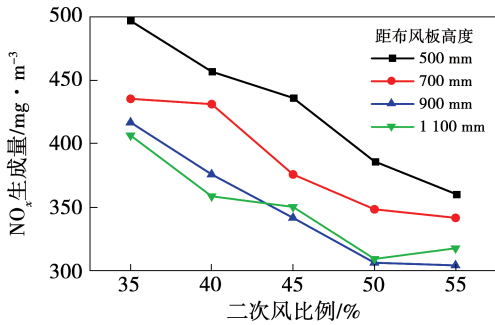


图 3 二次风比例对 NO_x 生成量的影响

Fig. 3 Effect of secondary air proportion on NO_x generation

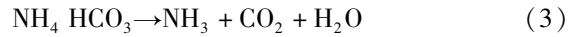
可以发现,在相同二次风口高度下,炉膛出口 NO_x 质量浓度随二次风比例的增加整体呈现下降趋势;在相同的二次风比例下,随二次风口的上移, NO_x 质量浓度下降,但二次风口高度从 900 mm 提升至 1 100 mm 时, NO_x 质量浓度趋于稳定。

2.3 还原剂辅以添加剂的 SNCR 脱硝增效特性

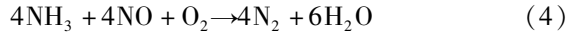
相较于尿素而言, NH_4HCO_3 在高温烟气中的热分解温度低且分解特性简单,在 250 °C 的温度下可完全分解为 NH_3 , CO_2 和 H_2O ,其中 NH_3 作为还原剂在合适的温度范围内将烟气中的 NO_x 还原脱除^[19]。由式(4)可知, NH_3 与 NO 的反应理论摩尔比为 1:1,

实际反应中考虑到还原剂在分离器内与烟气的混合效果及反应时间等因素的影响,通常选用较大的氨氮摩尔比。

NH_4HCO_3 分解反应式:



总包反应式:



SNCR 脱硝效率与还原剂喷入点的烟气温度及成分、氨氮摩尔比 (Normalized Stoichiometric Ratio, NSR)、还原剂与烟气的混合程度等因素密切相关。实验中,利用气力雾化式喷枪将还原剂溶液喷入高温烟气中。

2.3.1 反应温度及氨氮摩尔比对 SNCR 脱硝效率的影响

实验考察了反应温度为 650,750 和 850 °C 时 NO_x 脱除效率及 850 °C 时还原剂利用率随 NSR 的变化关系,结果如图 4 所示。

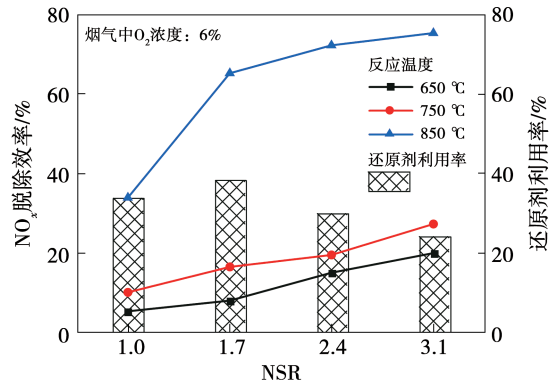


图 4 NSR 对 NO_x 脱除性能的影响

Fig. 4 Effect of NSR on NO_x removal performance

可以发现,在 850 °C 的反应温度下,NSR 为 1 时的 SNCR 脱硝效率仅有 33.9%,在 NSR 为 1.7 时脱硝效率达到 65.2%,此时还原剂利用率最高,此后随着 NSR 的增加,脱硝效率不断提高但增幅逐渐减小。而在 650 和 750 °C 的低温条件下,脱硝效率虽能随着 NSR 的增加而提高,但提升幅度较小,在 NSR 增至 3.1 时脱硝效率仍不足 30%,造成氨逃逸严重。

2.3.2 添加剂对低温 SNCR 脱硝效率的影响

CFB 锅炉低负荷运行时,分离器入口烟温低于 800 °C,SNCR 脱硝效率显著下降。研究考察碳酸钠与乙醇两种添加剂对碳酸氢铵 SNCR 法的低温脱硝

增效性能。实验中,在NSR为1.7的条件下,通过控制蠕动泵转速使 Na_2CO_3 与 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 在烟气中的浓度分别为50和200 $\mu\text{L/L}$ 。

添加剂对低温SNCR脱硝效率的影响如图5所示。可以发现,添加 Na_2CO_3 与 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 均可有效提高低温SNCR的脱硝效率。与无添加剂工况相比,在750~800 $^\circ\text{C}$ 的温度范围内,添加 Na_2CO_3 后脱硝效率平均提升24.5个百分点,750 $^\circ\text{C}$ 的脱硝效率达到了51.3%,提升34.8个百分点。添加 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 后的低温区效率平均提升28.2个百分点,温度低于700 $^\circ\text{C}$ 时增效性能优于添加 Na_2CO_3 。

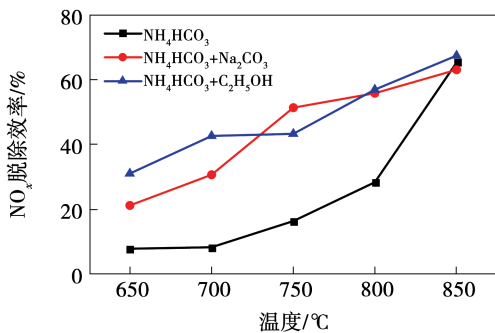


图5 添加剂对低温SNCR脱硝效率的影响

Fig. 5 Effect of additives on denitration efficiency of SNCR at low temperature

如图6所示,添加剂 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 可经自身热分解和氧化反应生成大量自由基^[14]。

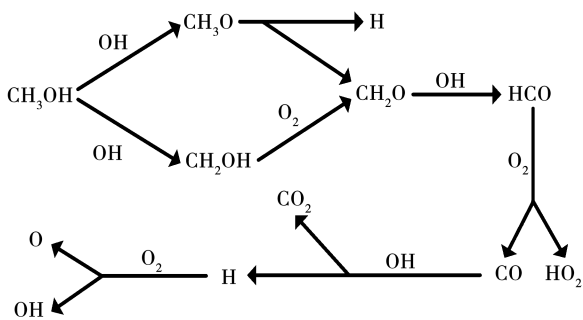


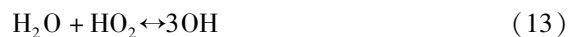
图6 乙醇热分解反应路径

Fig. 6 Reaction path of ethanol thermal decomposition

其中OH自由基和O自由基可有效促进基元反应(5)、(6)的进行,进而提高了SNCR反应体系内的 NH_2 自由基浓度。 NH_2 自由基对NO的还原脱除有高度的选择性,因此添加 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 使得SNCR反应在较低的温度下被提前激活,低温脱硝效率得到显著提升。



Zamansky等人^[20]研究表明, Na_2CO_3 可在高温烟气中与 H_2O 反应迅速转化为NaOH。在SNCR反应体系内,NaOH主要通过反应(7)消耗,产物 NaO_2 经反应(8)~(10)重新转化为NaOH,其循环反应链的总体效应为反应(11),与反应(12)的整体作用促进净反应(13)的进行,最终提高低温下OH自由基的浓度,进而促进 NH_2 自由基对NO的还原脱除,因此有效改善了低温区间的SNCR脱硝效果^[14]。



3 结论

(1) 减小给煤平均粒径、增加二次风比例、提升二次风口高度能够显著降低CFB锅炉 NO_x 的生成量。

(2) 以 NH_4HCO_3 为还原剂辅以 Na_2CO_3 和 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 添加剂可有效提高SNCR的低温脱硝反应性能,与无添加剂工况相比,添加 Na_2CO_3 后低温区脱硝效率平均提升24.5个百分点,750 $^\circ\text{C}$ 时的脱硝效率提升34.8个百分点;添加 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 后的低温区效率平均提升28.2个百分点,温度低于700 $^\circ\text{C}$ 时增效性能优于添加 Na_2CO_3 工况。

(3) $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 或 Na_2CO_3 作为SNCR添加剂时,均通过促进OH自由基的生成而提高体系内 NH_2 自由基的浓度,并由此选择性还原NO,通过该自由基链式反应可提升SNCR低温脱硝性能。

(4) 循环流化床锅炉低负荷运行时,可通过耦合炉内低氮燃烧和低温SNCR增效脱硝的方法解决 NO_x 难以控制、氨逃逸量大的技术难题。

参考文献:

- [1] 原奇鑫,赵立正,翟刚,等. NH_3 选择性非催化还原脱硝影响因素[J]. 燃烧科学与技术,2017,23(4):378-382.
YUAN Qi-xin, ZHAO Li-zheng, ZHAI Gang, et al. Impact factors of selective non-catalytic reduction denitration by NH_3 [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2017, 23(4): 378-382.

- [2] 岳光溪,吕俊复,徐鹏,等.循环流化床燃烧发展现状及前景分析[J].中国电力,2016,49(1):1-13.
YUE Guang-xi, LYU Jun-fu, XU Peng, et al. The up-to-date development and future of circulating fluidized bed combustion technology[J]. Electric Power, 2016, 49(1):1-13.
- [3] 赵凯,康利生,管辉尧,等.循环流化床锅炉 SNCR 脱硝技术研究现状[J].节能技术,2017,35(6):514-519.
ZHAO Kai, KANG Li-sheng, GUAN Hui-yao, et al. A review of selective non-catalytic reduction (SNCR) denitrification in circulating fluidized bed [J]. Energy Conservation Technology, 2017, 35(6):514-519.
- [4] 李竞岌,杨海瑞,吕俊复,等.节能型循环流化床锅炉低氮氧化物排放的分析[J].燃烧科学与技术,2013,19(4):293-298.
LI Jing-ji, YANG Hai-rui, LYU Jun-fu, et al. Low NO_x emission characteristic of low energy consumption CFB boilers [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2013, 19(4):293-298.
- [5] 杜佳军,李井峰,胡昌华,等.超临界 600 MW 机组 CFB 锅炉 NO_x 排放分布特性实炉试验[J].热力发电,2020,49(5):119-125.
DU Jia-jun, LI Jing-feng, HU Chang-hua, et al. Real tests on NO_x emission distribution characteristics of a supercritical 600 MW CFB boiler [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(5):119-125.
- [6] 王丰吉,王东,冯前伟.超低排放形势下 CFB 锅炉低氮燃烧和 SNCR 联合脱硝提效研究[J].发电与空调,2017,38(5):6-10.
WANG Feng-ji, WANG Dong, FENG Qian-wei. Study on low-nitrogen combustion and SNCR combined denitrification system of CFB boiler under ultra-low emission situation [J]. Power Generation & Air Condition, 2017, 38(5):6-10.
- [7] 曹庆喜.气体添加剂对选择性非催化还原脱硝反应过程影响的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
CAO Qing-xi. Effects of gaseous additives for selective non-catalytic reduction of NO_x [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [8] 卢志民,周俊虎,王智化,等.碳酸氢铵选择性非催化还原烟气中的氮氧化物[J].燃烧科学与技术,2005,11(6):511-514.
LU Zhi-min, ZHOU Jun-hu, WANG Zhi-hua, et al. Selective non-catalytic reduction of NO_x in the flue gas by ammonium bicarbonate solution [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2005, 11(6):511-514.
- [9] JAVED M T, NIMMO W, MAHMOOD A, et al. Effect of oxygenated liquid additives on the urea based SNCR process [J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(11):3429-3435.
- [10] 高攀,路春美,韩奎化,等.添加剂协同选择性非催化还原 NO 的过程研究[J].燃烧科学与技术,2008,14(4):333-337.
GAO Pan, LU Chun-mei, HAN Kui-hua, et al. NO removal by adding additives in the selective non-catalytic reduction process [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2008, 14(4):333-337.
- [11] 吕宏坤,杨卫娟,周俊虎,等.添加 H_2 对选择性非催化还原影响的实验与模拟研究[J].中国电机工程学报,2009,29(26):36-42.
LYU Hong-kun, YANG Wei-juan, ZHOU Jun-hu, et al. Experimental and modeling study on the influence of H_2 addition on selective non-catalytic reduction process [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(26):36-42.
- [12] WANG Zhi-hua, ZHOU Jun-hu, ZHANG Yan-wei, et al. Experiment and mechanism investigation on advanced reburning for NO_x reduction; influence of CO and temperature [J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE, 2005, 6B(3):187-194.
- [13] GASNOT L, DAO D Q, PAUWELS J F. Experimental and kinetic study of the effect of additives on the ammonia based SNCR process in low temperature conditions [J]. Energy & Fuels, 2012, 26(5):2837-2849.
- [14] 罗晨.循环流化床锅炉低温 SNCR 脱硝实验及模拟研究[D].太原:太原理工大学,2022.
LUO Chen. Experimental and simulation study on SNCR denitration of circulating fluidized bed boiler at low temperature [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.
- [15] HAYHURST A N, LAWRENCE A D. The amounts of NO_x and N_2O formed in a fluidized bed combustor during the burning of coal volatiles and also of char [J]. Combustion and Flame, 1996, 105(3):341-357.
- [16] 张曜,于娟,林晨,等.循环流化床床料与燃料粒径对脱硝反应的影响[J].洁净煤技术,2020,26(6):196-202.
ZHANG Yao, YU Juan, LIN Chen, et al. Influence of particle sizes of bed material and fuel on denitration reaction in circulating fluidized bed [J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(6):196-202.
- [17] 柯希玮,蔡润夏,杨海瑞,等.循环流化床燃烧的 NO_x 生成与超低排放[J].中国电机工程学报,2018,38(2):390-396.
KE Xi-wei, CAI Run-xia, YANG Hai-rui, et al. Formation and ultra-low emission of NO_x for circulating fluidized bed combustion [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2):390-396.
- [18] 曹勇,周托,那永洁.循环流化床锅炉炉膛低氧燃烧尾部补燃降低 NO_x 排放的试验研究[J].锅炉技术,2019,50(2):35-42.
CAO Yong, ZHOU Tuo, NA Yong-jie. Tests of lean-oxygen combustion and post-combustion on a CFB boiler for reduction of NO_x emission [J]. Boiler Technology, 2019, 50(2):35-42.
- [19] 周俊虎,卢志民,王智化,等.氮还原剂 NO_x 还原反应及热分解的实验研究[J].电站系统工程,2006,22(1):4-7.
ZHOU Jun-hu, LU Zhi-min, WANG Zhi-hua, et al. Experimental study on NO_x reduction by nitrogen agents and pyrolysis characteristic of nitrogen agents [J]. Power System Engineering, 2006, 22(1):4-7.
- [20] ZAMANSKY V M, LISSIANSKI V V, MALY P M, et al. Reactions of sodium species in the promoted SNCR process [J]. Combustion & Flame, 1999, 117(4):821-831.