

SNCR/烟气再循环协同脱硝技术研究

雷雨¹, 刘洋², 牛艳青¹, 惠世恩¹

(1. 西安交通大学 能源与动力工程学院 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710032)

摘要:短期内煤炭作为我国主要能源的现状不会改变。由于煤燃烧会释放大量 NO_x ,造成严重的环境污染,因此煤炭燃烧过程中的 NO_x 控制至关重要。链条锅炉作为我国工业应用最为广泛的燃煤锅炉之一,是降低 NO_x 排放的重点对象,尤其在新实施的GB 13271—2014《锅炉大气污染物排放标准》中规定重点地区锅炉 NO_x 排放值不得高于 200 mg/m^3 后,链条炉低氮燃烧和 NO_x 脱除技术受到广泛关注。为降低链条锅炉 NO_x 排放,满足国家环保要求的同时,降低企业运行维护成本,提高企业经济效益,以西安高新区某供热站 $4 \times 75 \text{ t/h}$ 链条锅炉为研究对象,进行烟气再循环与SNCR耦合低氮燃烧 NO_x 脱除技术改造研究。研究了SNCR与烟气再循环耦合低氮燃烧系统参数,如烟气再循环率,再循环烟气一、二次风室送入比例,氨氮摩尔比,锅炉负荷变化等脱硝系统参数对 NO_x 脱除效率及链条炉燃烧特性的影响,确定了烟气再循环与SNCR技术耦合脱硝的最佳运行参数,结果表明:SNCR耦合烟气再循环低氮燃烧技术能有效降低链条锅炉 NO_x 排放。烟气再循环率为 $16\% \sim 18\%$,再循环烟气一次风室送入比例为 82% ,氨氮摩尔比为 0.78 时,SNCR耦合烟气在循环脱硝系统可达最佳脱硝效率。此时SNCR耦合烟气再循环联合脱硝效率可达到 56% ,SNCR单独运行脱硝效率可达 40% , NO_x 实际排放可从 250 mg/m^3 降至 110 mg/m^3 ,远高于国家 NO_x 排放标准。

关键词:链条炉;SNCR;烟气再循环;脱硝; NO_x

中图分类号:X701.7;TQ534

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)03-0110-06

Research on SNCR/flue gas recycling synergistic denitration technologyLEI Yu¹, LIU Yang², NIU Yanqing¹, HUI Shien¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710032, China)

Abstract: In the short term, the status quo of coal as the main energy in China will not change. Because coal combustion will release a lot of NO_x and cause serious environmental pollution, so the control of NO_x in coal combustion process is very important. Chain grate furnace as one of the most widely used coal-fired boilers in China must be paid more attention to the reduction of NO_x emission. Especially with the implementation of Boiler Air Pollutant Emission Standard (GB 13271—2014), the NO_x emission value of grate furnace in key areas should not be higher than 200 mg/m^3 , the technology of low-nitrogen combustion and NO_x removal in chain grate furnace has attracted wide attention. In order to reduce the NO_x emission of chain grate furnace, meet the requirements of national environmental protection, reduce the cost of operation and maintenance of enterprises and improve the economic benefits of enterprises, the technical improvement study of flue gas recirculation and SNCR denitrification system was performed in a $4 \times 75 \text{ t/h}$ chain grate furnace of a heating station at Gaoxin District in Xi'an to reduce the NO_x emission. The influence of the parameters of SNCR and flue gas recirculation coupled low nitrogen combustion system, such as flue gas recirculation ratio, the feed ratio of recirculation flue gas in primary and second air chamber, the ammonia nitrogen molar ratio and the change of boiler load on NO_x removal efficiency and combustion characteristics were researched. The optimum operating parameters of flue gas recirculation coupled with SNCR technology were determined. The results show that the SNCR coupled flue gas recir-

收稿日期:2019-01-04;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.19010402

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51776161)

作者简介:雷雨(1991—),男,山东泰安人,博士研究生,从事煤清洁燃烧及颗粒物排放研究。E-mail:lei19920303@mail.xjtu.edu.cn。通讯作者:牛艳青(1985—),男,山西长治人,副教授,博士生导师,从事煤清洁燃烧及污染物控制研究。E-mail:yqniu85@mail.xjtu.edu.cn

引用格式:雷雨,刘洋,牛艳青,等. SNCR/烟气再循环协同脱硝技术研究[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(3):110-115.

LEI Yu, LIU Yang, NIU Yanqing, et al. Research on SNCR/flue gas recycling synergistic denitration technology[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(3):110-115.



移动阅读

ulation low nitrogen combustion technology can effectively reduce the NO_x emission of chain grate furnace. When the flue gas recirculation rate is 16%–18%, the feed ratio of recirculation flue gas in primary air chamber is 82%, and the molar ratio of ammonia nitrogen is 0.78, the SNCR coupled flue gas can achieve the best denitrification efficiency in the circulating system. At this point, the denitrification efficiency of SNCR coupling flue gas recycling is up to 56% and the denitrification efficiency of SNCR single operation is 40% and the actual NO_x emission is reduced from 250 mg/m^3 to 110 mg/m^3 , which is much higher than the national emission standard of NO_x .

Key words: chain grate furnace; SNCR; flue gas recirculation; NO_x

0 引 言

煤炭燃烧会产生大量的氮氧化物,研究表明近70%氮氧化物排放来自煤炭直接燃烧^[1]。此外,氮氧化物作为 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源,是近年来全国大范围雾霾发生的主要元凶之一^[2]。如何有效治理氮氧化物已经成为当前十分紧迫的环境问题之一^[3-4]。链条炉作为我国工业应用最为广泛的燃煤工业锅炉之一,受到广泛关注和重视。尤其是新的《火电厂大气污染排放标准》和《锅炉大气污染物排放标准》的实施加快了 NO_x 脱除技术的发展。

目前, NO_x 脱除技术主要分为燃烧中脱除和燃烧后脱除2种方式^[5],燃烧中脱除即通过低氮燃烧技术如空气分级燃烧、烟气再循环等减少 NO_x 生成;燃烧后脱除即通过烟气脱硝技术如 SCR 和 SNCR 等脱硝技术降低烟气中 NO_x 含量。工业锅炉脱硝改造中烟气再循环脱硝技术应用广泛,一般是在空气预热器前抽取一部分烟气送入炉内降低炉内氧浓度和火焰温度进而抑制热力型 NO_x 的产生,脱硝效率一般在 10%~30%。烟气再循环技术的研究主要集中在再循环烟气进入炉膛的位置对脱硝效率的影响^[6]。胡满银等^[7]研究发现从二次风口将循环烟气送入炉膛会进一步降低 NO_x 生成。国内针对链条炉 SNCR 烟气脱硝系统研究较少,现有研究一般关注 SNCR 喷枪布置位置及喷枪自身特性。胥波等^[8]将喷氨口设置在炉拱处但脱硝效果一般;李维成等^[9]在炉膛上方高 5 m 左、右墙设置喷氨口,调整喷氨口及喷氨速度,脱硝效果较为理想,但仅适用于左右墙间距较小的情况。孙献斌

等^[10]研发了一种空气冷却式空气雾化喷枪,解决了喷枪雾化效果差、尿素及氨水耗量大等问题,在 300 MW 机组上取得了良好效果。本文以西安市高新区热力公司 4×75 t 链条锅炉为试验对象进行烟气再循环(FGR)^[11-13]耦合 SNCR^[14-17]联合脱硝改造研究。本文抽取烟气位置及烟气送入炉膛位置与前人不同,且 2 处送入炉膛烟气的比例可调节。在除尘器后方抽取净烟气一部分作为一次风从链条炉排底部送入降低炉内氧含量,另一部分作为二次风从链条炉后拱上方以气幕方式喷入燃烧区域上层,实现对上升烟气的封锁和扰动,保证再循环烟气与上升气流的充分混合,延长上升气流在炉内的停留时间,减少 NO_x 的生成和排放,且循环烟气作为一次风二次风比例通过阀门可实时调节,确保烟气再循环发挥最大脱硝效率。烟气再循环(FGR)耦合 SNCR 联合脱硝技术最高脱硝效率可达 56%,在满足国家环保要求的同时,具有建设周期短、设备投资少、运行成本低等优点。

1 试 验

链条炉燃烧用煤工业分析及元素分析见表 1,按照 GB 13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》,将所有 NO_x 含量均转化成氧含量为 9% 时的值。链条炉 SNCR 和烟气再循环耦合脱硝系统如图 1 所示,试验系统由电站锅炉、SNCR 系统、烟气再循环系统以及电厂基本热力系统组成。本文通过改变 SNCR 系统及烟气再循环系统的运行参数,并检测、分析链条炉内 NO_x 浓度变化来确定 SNCR 系统和烟气再循环系统耦合运行的最佳运行参数。

表 1 热力公司用煤工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of coal for a thermal company

工业分析/%				元素分析/%				
M_{ad}	A_{ar}	V_{daf}	FC_{ad}	C_{ar}	H_{ar}	N_{ar}	O_{ar}	S_{ar}
5.44	9.93	31.55	57.72	68.68	4.37	0.66	7.93	0.23

由图 1 可知,SNCR 和烟气再循环耦合脱硝系统在链条炉运行时,在一定炉膛高度混合均匀的尿

素溶液从锅炉的前墙和侧墙喷入;低温再循环烟气送入一次风配给风室(预燃区风室 1 与燃尽区风室

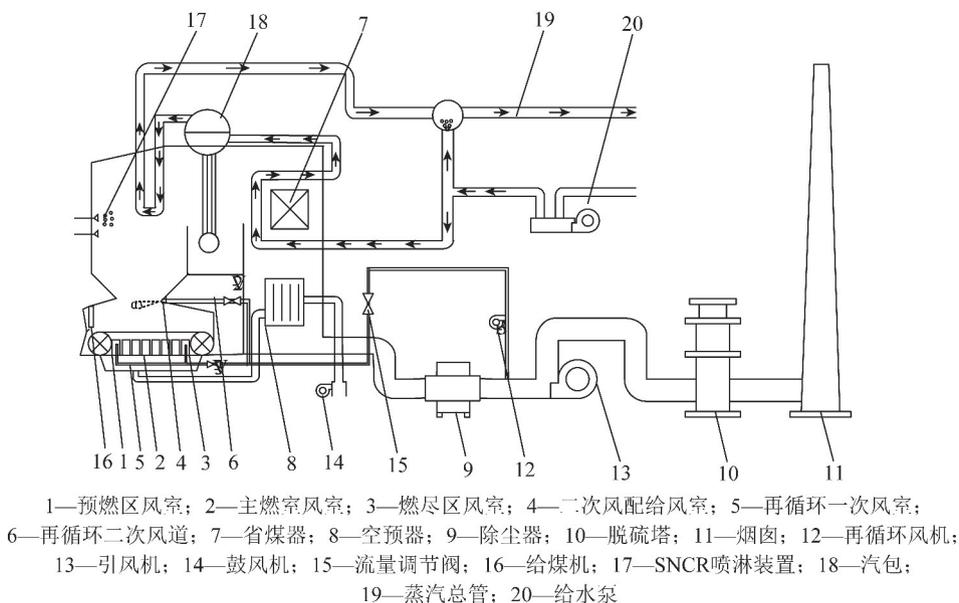


图1 SNCR耦合烟气再循环脱硝系统

Fig. 1 SNCR coupling FGR denitration system

3)及二次风配给风室4;二次风在后拱顶部喷入,喷入方向与水平方向夹角 α 在 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 变化。

2 试验结果与分析

2.1 SNCR+烟气再循环综合改造结果

对链条炉进行低氮燃烧及SNCR改造前后 NO_x 排放值用CEMS烟气在线分析仪TR-9300实时测量,试验结果如图2所示。由图2可知,锅炉未改造前 NO_x 排放值为 250 mg/m^3 (文中脱硝效率计算均以此值为基准)。根据GB 13271—2014《锅炉大气污染物排放标准》中重点地区锅炉 NO_x 排放值为 200 mg/m^3 (基准氧含量9%)。因此,该西安高新区某供热站 $4 \times 75 \text{ t/h}$ 链条锅炉 NO_x 排放值 250 mg/m^3 ,属于严重超标,脱硝改造十分必要。单独使用SNCR脱硝 NO_x 排放平均值降低到 150 mg/m^3 ,脱硝效率40%;烟气再循环耦合SNCR脱硝后, NO_x 排放平均值降低至 110 mg/m^3 以下,此时脱硝效率达56%,较单独使用SNCR工艺脱硝效率提高16%。结果表明将烟气再循环耦合SNCR脱硝能有效降低链条炉 NO_x 排放值。

2.2 烟气再循环率的影响

烟气再循环可有效控制链条炉煤炭颗粒燃烧过程中 NO_x 的生成,但烟气再循环率有一个最佳值,偏离最佳值会使其脱硝效率降低^[18]。研究表明烟气再循环率取15%~20%比较合适,本文保持SNCR运行工况稳定,烟气再循环率为10%~25%进行试验,得到烟气再循环率对锅炉脱硝效率的影响如图3所示。

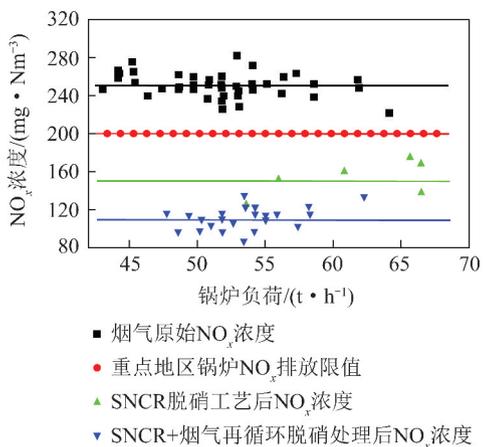
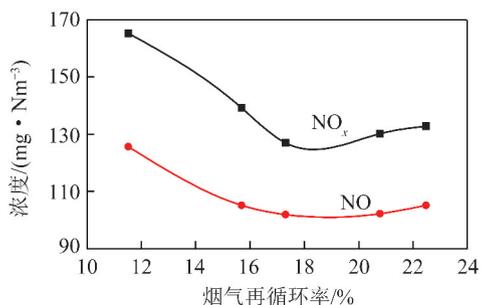
图2 改造前后 NO_x 排放对比Fig. 2 Comparison of NO_x emission values before and after modification

图3 烟气再循环率对锅炉脱硝的影响

Fig. 3 Effect of FGR ratio on boiler denitration

由图3可知,随烟气再循环率上升, NO_x 浓度先降后升。烟气再循环率为18%时 NO_x 排放最低,为 120 mg/m^3 ,脱硝效率达52%。烟气再循环率为

11%时, NO_x 排放量为 160 mg/m^3 , 脱硝效率为 36%, 脱硝效率下降了 16%, 在试验条件范围及所示锅炉条件下, 烟气再循环率控制在 18% 左右为宜。

烟气再循环率对锅炉燃烧效率的影响如图 4 所示。由图 4 可知, 炉渣含碳量随着烟气再循环率的提高不断升高, 烟气再循环率大于 18% 时炉渣含碳量基本保持在 46% 左右, 可见烟气再循环影响了链条炉内燃料的燃烧, 链条炉炉排上的煤炭颗粒没有完全燃烧。认为引入烟气再循环工艺降低了链条炉内氧含量, 使煤炭颗粒燃烧需要的氧气供应不足, 导致煤炭颗粒无法完全燃烧, 所以炉渣含碳量随着再循环率的升高而升高。因此采用烟气再循环降低炉内 NO_x 生成时, 必须考虑到烟气再循环对锅炉燃烧效率的负面影响, 确定低氮燃烧和锅炉经济燃烧的最佳平衡点, 实现锅炉经济环保运行。

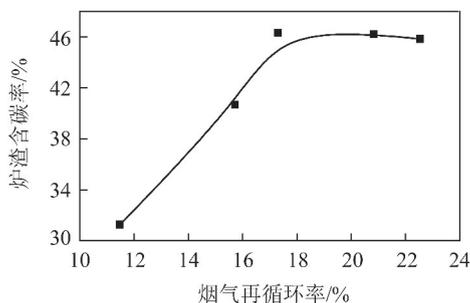


图 4 烟气再循环率对炉渣含碳率的影响

Fig. 4 Effect of FGR ratio on carbon content of ash

2.3 再循环烟气一次风室送入比例的影响

在组织烟气再循环时充分考虑燃料燃烧的全过程, 将部分再循环烟气按一次风的供给方式分级从锅炉左右炉排的第 1 个及第 8 个风室送入, 满足燃料干燥和燃尽的需求。部分再循环烟气作为二次风从后拱按一定角度以气幕的方式喷入燃烧区域上层, 实现对上升烟气的封锁和扰动, 保证再循环烟气与上升气流的充分混合, 延长上升气流在炉内的停留时间, 减少 NO_x 的生成和排放, 保证燃料充分燃烧^[19]。

再循环烟气总量不变, 改变再循环烟气送入一、二次风风室比例, 研究其对 NO_x 排放量的影响, 结果如图 5 所示。随着再循环烟气一次风室送入比例的提高, NO_x 排放量呈现先下降后上升再下降的趋势。再循环烟气作为一次风的比例为 82%, 即再循环烟气从二次风室送入比例为 18% 时 NO_x 排放量最低, 此时 NO_x 含量低于 120 mg/m^3 , 脱硝效率最高。

再循环烟气作为一次风和二次风分别送入锅炉

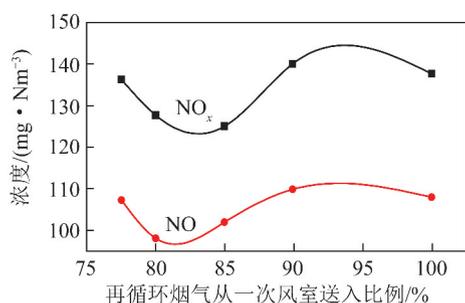


图 5 再循环烟气一次风室送入比例对锅炉脱硝的影响

Fig. 5 Effect of the ratio of primary air chamber of recirculation flue gas on boiler denitration

时, 两者比例变化对锅炉煤炭燃尽率的影响如图 6 所示。可知炉渣含碳率随着一次烟气比例的上升整体呈升高趋势, 再循环烟气一次风室送入比例小于 85% 时炉渣含碳率升高较为缓慢, 当一次烟气比例大于 85% 时, 炉渣含碳率急剧提升。

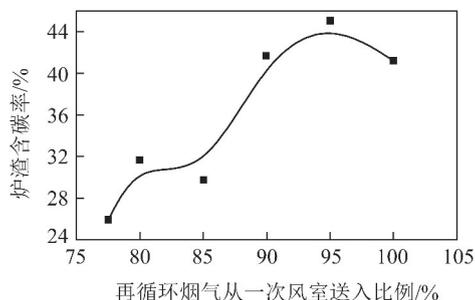


图 6 再循环烟气一次风室送入比例对炉渣含碳率的影响

Fig. 6 Effect of the ratio of primary air chamber of recirculation flue gas on carbon content of ash

分析认为提高再循环烟气一次风室送入比例降低了链条炉特别是燃尽区的氧浓度, 影响了焦炭颗粒的燃尽, 从而降低了锅炉的燃烧效率。考虑到再循环烟气一次风室送入比例 82%、二次风室送入比例 18% 时, 脱硝效率最高为 51%, 而此时炉渣含碳率水平仍较低, 说明此时锅炉的燃烧效率和脱硝效率都能达到最佳, 可实现锅炉低氮经济运行。

2.4 氨氮摩尔比的影响

SNCR 脱硝技术原理是将含有 NH_x 基的还原剂喷入炉膛 $800 \sim 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 区域形成一个自维持链式反应, 通过氧化还原反应将 NO_x 还原达到降低 NO_x 排放的效果。SNCR 脱硝过程中氨氮摩尔比 (喷氨量) 是重要的技术经济指标, 在不同燃烧系统中, 氨消耗量通过工程试验确定^[20]。本文 SNCR 工艺采用尿素溶液雾化后作为还原剂, 系统设计时每支喷枪连接有尿素溶液和压缩空气 2 股流体, 其中尿素溶液和水以 1:3 混合, 然后由压缩空气雾化后喷入炉膛进行化学反应。

氨氮摩尔比对应实测 NO_x 排放浓度变化曲线,

氨氮摩尔比变化通过改变 SNCR 喷尿素量控制,氨氮摩尔比对炉渣含碳率的影响如图 7 所示。由图 7 可知,随着氨氮摩尔比的增大,NO_x 排放量不断降低。特别是氨氮摩尔比从 0.45 增加到 0.78 时,NO_x 排放量显著减小,氨氮摩尔比进一步增至 0.78 以上时,随着氨氮摩尔比的增大,烟气中 NO_x 排放量降低速度减缓,此时氨氮摩尔比对 NO_x 排放量影响减小。

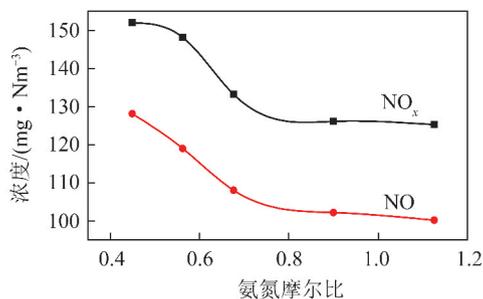


图 7 氨氮摩尔比对锅炉脱硝的影响

Fig. 7 Effect of ammonia nitrogen molar ratio on boiler denitration

分析认为氨氮摩尔比小于 0.78 时,尿素溶液雾化加热产生的还原气体 NH₃ 越多,与锅炉燃烧烟气中 NO_x 发生的化学反应越完全,降低 NO_x 排放的效果越明显;氨氮摩尔比大于 0.78 时,随着氨氮摩尔比增大,NO_x 排放量下降速度逐渐降低。分析认为氨氮摩尔比大于 0.78 时还原气体 NH₃ 与 NO_x 的氧化还原反应达到化学平衡,此时再增大氨氮摩尔比,尿素热解产生的 NH₃ 对 NO_x 还原作用不明显,反而会增加氨的逃逸。因此 SNCR 脱硝过程中氨氮摩尔比控制在 0.78 左右最佳,此时 NO_x 排放浓度达到最低值,接近 120 mg/m³,较原始 NO_x 排放浓度下降了 130 mg/m³,脱硝效率达到 52%。氨氮摩尔比在 0.78 时 SNCR 工艺实现最优运行,减少 NO_x 排放,节约尿素用量。

本文还发现向炉内喷入尿素溶液会影响锅炉燃烧,实测尿素喷射量对炉渣含碳量的影响如图 8 所示。由图 8 可知,随着喷尿素量的增加,炉渣含碳量迅速提高。说明向锅炉内喷入尿素溶液对锅炉内燃烧产生负面影响,不利于燃烧。分析认为尿素溶液从炉膛上部喷入锅炉后会迅速气化,体积急剧增大,导致炉膛上部负压减小,引起炉排火床上面压力增大,通风阻力增加,导致供风量减小,使燃尽率降低,炉渣含碳量增加。因此 SNCR 工艺改造中,要注意喷尿素量对锅炉燃烧的负面影响,不断改进工艺实现锅炉的最优运行。

2.5 锅炉负荷的影响

锅炉负荷改变,燃煤消耗量随之改变,增加燃煤

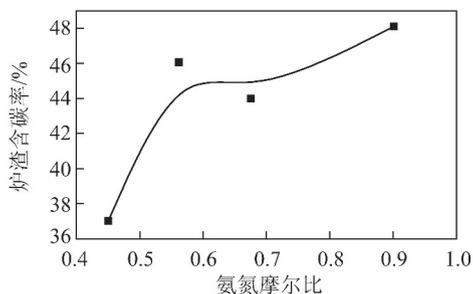


图 8 氨氮摩尔比对炉渣含碳率的影响

Fig. 8 Effect of ammonia nitrogen molar ratio on carbon content of ash

量或减小燃煤量直接影响 NO_x 生成量。尿素喷射量不变时,锅炉负荷对 NO_x 排放量的影响如图 9 所示。喷尿素量不变时,随着锅炉负荷的提高,NO_x 排放量不断上升。对比图 2 可知,只要尿素喷射量产生的 NH₃ 能满足氨氮摩尔比,锅炉负荷变化对 NO_x 排放量影响不显著。

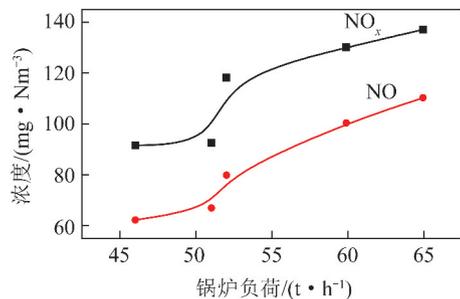


图 9 锅炉负荷对锅炉脱硝的影响

Fig. 9 Effect of the boiler load on boiler denitration

锅炉负荷变化还会对炉渣含碳率产生影响,如图 10 所示。可知随着锅炉负荷的增加,炉渣含碳量呈线性增加。分析认为炉渣含碳率增加与 SNCR 加烟气再循环工艺无直接关系。锅炉负荷增加,煤炭消耗量增加,此时采取增加煤层厚度,减慢链条转动速度,合理配风,优化运行,灰渣含碳量可控制在合理范围内。

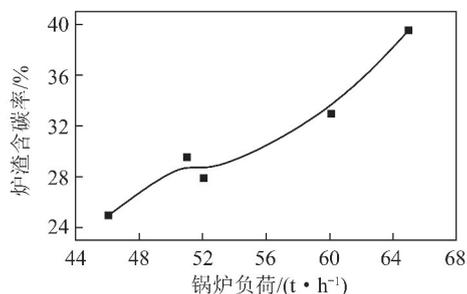


图 10 锅炉负荷对炉渣含碳率影响

Fig. 10 Effect of the boiler load on carbon content of ash

3 结 论

1) 本文以西安高新区某供热站 4×75 t/h 链条

锅炉为研究对象,进行烟气再循环与 SNCR 改造,分析了 SNCR 与烟气再循环耦合低氮燃烧系统参数对 NO_x 脱除影响。链条锅炉 NO_x 初始排放值为 250 mg/m^3 ,属于严重超标,脱硝改造十分必要。SNCR 单独使用脱硝效率为 40%,使 NO_x 排放值由 250 mg/m^3 降为 150 mg/m^3 。

2) SNCR 与烟气再循环联合脱硝效率可达 56%,较 SNCR 单独使用脱硝效率提高 16%, NO_x 最终排放值低于 110 mg/m^3 ,表明将烟气再循环耦合 SNCR 脱硝能有效降低链条炉 NO_x 排放值。

3) 烟气再循环率为 16% ~ 18%,再循环烟气作为一次风送入比例为 82%,氨氮摩尔比为 0.78 时,SNCR 耦合烟气的循环脱硝效率达到最佳。

参考文献 (References):

[1] 王少波. 660 MW 火电机组降低 NO_x 排放试验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.

[2] 于林平, 贾建军. 城市光化学烟雾的形成机理及防治[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2001, 20(4): 111-114.
YU Linping, JIA Jianjun. The mechanism of photochemical smog formation in the city and its prevention and control[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2001, 20(4): 111-114.

[3] 聂虎, 余春江, 柏继松, 等. 生物质燃烧中硫氧化物和氮氧化物生成机理研究[J]. 热力发电, 2010, 39(9): 21-26, 34.
NIE Hu, YU Chunjiang, BAI Jisong, et al. Study on formation mechanism of sulphide and nitrogen oxides in combustion of biomass[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(9): 21-26, 34.

[4] 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.

[5] 徐天平, 王永忠. 燃煤工业锅炉污染物协同治理与超低排放技术研究[J]. 环境工程, 2017, 35(9): 71-73.
XU Tianping, WANG Yongzhong. Study on synergy treatment & ultra-low emission technology for pollutants from coal fired industrial boilers[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(9): 71-73.

[6] HOUSHFAR E, KHALIL R A T. Enhanced NO_x reduction by combined staged air and flue gas recirculation in biomass grate combustion[J]. Energy & Fuels, 2012, 26: 3003-3011.

[7] 胡满银, 韩静, 刘忠. 烟气再循环及分段送风对链条炉 NO_x 生成的数值模拟[J]. 洁净煤技术, 2009, 16(3): 70-73.
HU Manyin, HAN Jing, LIU Zhong. Numerical simulation for influence of flue gas recycle and zoned air on NO_x formation in chain boiler[J]. Clean Coal Technology, 2009, 16(3): 70-73.

[8] 胥波, 张彦文, 蔡宁生. 链条炉 SNCR 脱除 NO_x 数值模拟研究[J]. 热力发电, 2009, 38(3): 18-25.
XU Bo, ZHANG Yanwen, CAI Ningsheng. Simulation study on SNCR for NO_x removal from chain-grate furnace[J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(3): 18-25.

[9] 李维成, 李振山, 蔡宁生. 35 t/h 链条炉氨水 SNCR 数值模拟[C]//中国工程热物理年会(燃烧学). 广州: [s. n.], 2010.

[10] 孙献斌, 时正海, 金森旺. 循环流化床锅炉超低排放技术研究[J]. 中国电力, 2014, 47(1): 142-145.
SUN Xianbin, SHI Zhenghai, JIN Senwang. Research on ultra-low emission technology for CFB boilers[J]. Electric Power, 2014, 47(1): 142-145.

[11] 贾力, 殷龙. 烟气再循环实现低 NO_x 排放的实验研究[J]. 工业加热, 2003, 19(6): 47-49.
JIA Li, YIN Long. The experimental research on realizing low NO_x emission with recycle of flue gas[J]. Industrial Heating, 2003, 19(6): 47-49.

[12] 陈杏. 低氮燃烧+选择性非催化还原烟气脱硝技术(SNCR)在循环流化床锅炉脱硝工程上的应用[J]. 能源环境保护, 2013, 27(4): 33-35.
CHEN Xing. Engineering application of low NO_x combustion + SNCR technology for flue gas DeNO_x of CFB boilers[J]. Energy and Environmental Protection, 2013, 27(4): 33-35.

[13] 凌忠钱, 况敏, 谭立武. 具有两级烟气再循环的低氮燃烧链条炉: CN104791772B[P]. 2017-02-01.

[14] 王方群, 杜云贵, 刘艺, 等. 国内燃煤电厂烟气脱硝发展现状及建议[J]. 中国环保产业, 2007(1): 18-22.
WANG Fangqun, DU Yungui, LIU Yi, et al. Development status and recommendations on flue gas denitration in coal-fired power plant in China[J]. China Environmental Protection Industry, 2007(1): 18-22.

[15] 顾卫荣, 周明吉, 马薇. 燃煤烟气脱硝技术的研究进展[J]. 化工进展, 2012, 31(9): 2084-2092.
GU Weirong, ZHOU Mingji, MA Wei. Technology status and analysis on coal-fired flue gas denitration[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(9): 2084-2092.

[16] 胡浩毅. 以尿素为还原剂的 SNCR 脱硝技术在电厂的应用[J]. 热力发电, 2009, 38(3): 22-24, 28.

[17] 巩志强, 周托, 刘志成, 等. 循环流化床燃用半焦 SNCR 脱硝特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(S2): 517-523.
GONG Zhiqiang, ZHOU Tuo, LIU Zhicheng, et al. Experimental study on NO_x removal characteristics of SNCR in a char-fired circulating fluidized bed[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S2): 517-523.

[18] 宋少鹏, 卓建坤, 李娜, 等. 燃料分级与烟气再循环对天然气低氮燃烧特性影响机理[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 6849-6858.
SONG Shaopeng, ZHUO Jiankun, LI Na, et al. Low NO_x combustion mechanism of a natural gas burner with fuel-staged and flue gas recirculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24): 6849-6858.

[19] 郭欣维, 张健, 张忠孝, 等. 新型烟气再循环技术对链条锅炉 NO_x 脱除的试验研究[J]. 能源工程, 2017(4): 48-52.
GUO Xinwei, ZHANG Jian, ZHANG Zhongxiao, et al. Test study of new flue gas re-circulation techniques working on NO_x removal in chain-stoked boiler[J]. Energy Engineering, 2017(4): 48-52.

[20] 陈国伟, 张棋霞, 万睿. 反应温度和氨氮摩尔比对 SNCR 脱硝效果的影响[J]. 化学工程与装备, 2016(6): 265-266.