

DOI: 10.19666/j.rlfed.202401010

超临界 660 MW 循环流化床锅炉 NO_x 排放 控制困难分析及处理

张文祥¹, 晏海能¹, 孙志军¹, 雷雨², 薛宁², 武晓峰¹

(1. 苏晋朔州煤矸石发电有限公司, 山西 朔州 036800;

2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘要] 为解决某电厂超临界 660 MW 循环流化床 (circulating fluidized bed, CFB) 锅炉满负荷运行 NO_x 排放较难控制、瞬时值易超过超低排放限值且选择性非催化还原 (selective non-catalytic reduction, SNCR) 脱硝系统氨耗量较大氨逃逸严重的问题, 现场进行了 NO_x 原始排放、SNCR 脱硝效率、CO 质量浓度及底渣可燃物的试验, 并进行了二次风量布置优化试验。研究发现: 锅炉原始 NO_x 排放较低, 满负荷运行时不超过 120 mg/m³ (标准状态, 下同); 中低负荷时 NO_x 质量浓度低于 50 mg/m³, 但炉膛前后 NO_x 质量浓度偏差较大, 烟气中的 NO_x 主要在炉膛前部产生。NO_x 排放较难控制的原因是 SNCR 脱硝效率较低和炉膛给煤不均。6 台分离器入口的 SNCR 脱硝效率均低于 50.0%, 其中 B、C、E、F 4 台分离器脱硝效率低于 40.0%。此外, 从原始 NO_x 生成来看, 根据炉膛深度方向上床温分布、底渣可燃物质量分数和 CO 质量浓度变化可以确定, 炉膛给煤不均也对满负荷 NO_x 排放控制影响显著。当前, 电厂若不进行给煤系统改造暂无法实现给煤均匀, 但可以通过调整炉膛深度方向二次风量配比降低原始 NO_x 生成, 降幅可达 9.77%。

[关键词] 循环流化床锅炉; NO_x 排放; 选择性非催化还原; 给煤

[引用本文格式] 张文祥, 晏海能, 孙志军, 等. 超临界 660 MW 循环流化床锅炉 NO_x 排放控制困难分析及处理[J]. 热力发电, 2024, 53(5): 109-114. ZHANG Wenxiang, YAN Haineng, SUN Zhijun, et al. Analysis and treatment of difficulties in NO_x emission control of a supercritical 660 MW circulating fluidized bed boiler[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(5): 109-114.

Analysis and treatment of difficulties in NO_x emission control of a supercritical 660 MW circulating fluidized bed boiler

ZHANG Wenxiang¹, YAN Haineng¹, SUN Zhijun¹, LEI Yu², XUE Ning², WU Xiaofeng¹

(1. SujinShuozhou Gangue Power Generation Co., Ltd., Shuozhou 036800, China; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: It is difficult to control NO_x emissions during full load operation of a 660 MW supercritical circulating fluidized bed (CFB) boiler in a certain power plant, and its instantaneous value is prone to exceed the ultra-low emission limit. In addition, the selective non-catalytic reduction (SNCR) system has a high ammonia consumption and severe ammonia escape issues. To solve these problems, on-site experiments on NO_x original emissions, SNCR denitrification efficiency, CO mass concentration and bottom slag combustibles were conducted, and optimization experiments on secondary air volume layout were also performed. It was found that, the original NO_x emissions of the CFB boiler were relatively low, with a maximum of 120 mg/m³ (standard condition) during full load operation and a NO_x mass concentration below 50 mg/m³ during medium and low loads. However, there was a significant deviation in NO_x mass concentration between the front and rear ends of the furnace, and the NO_x in flue gas was mainly generated in front of the furnace. The reason why NO_x emissions are difficult to control is due to the low denitrification efficiency of SNCR and uneven coal feeding in the furnace. The SNCR denitrification

收稿日期: 2024-01-12

第一作者简介: 张文祥 (1984), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为火力发电系统及污染物控制, hyczw@163.com。

通信作者简介: 雷雨 (1991), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为固体燃料燃烧及污染物控制, leiyu@tpri.com.cn。

efficiency at inlet of the 6 separators was all below 50%, among which the denitrification efficiency of four separators B, C, E, and F was below 40%. Furthermore, according to the distribution of parameters in the furnace depth direction, such as the bed temperature, the content of combustible materials in bottom slag, and the variation of CO mass concentration, it can be determined that the uniformity of coal feeding in the furnace also had a significant effect on the control of NO_x emissions at full load. Currently, the power plant cannot achieve uniform coal feeding without renovation, but the original NO_x generation can be reduced by adjusting the secondary air volume ratio in the depth direction of the furnace, with a reduction of up to 9.77%.

Key words: circulating fluidized bed boiler; NO_x emission; SNCR; coal feeding

循环流化床 (circulating fluidized bed, CFB) 锅炉得益于其煤种适应性广、污染物原始排放低的优点而取得迅速发展^[1-3]。当前由于燃煤成本及深度调峰的影响,燃煤电厂实际使用煤种往往偏离设计煤种较大且存在调峰过程 NO_x 控制困难的问题^[4-5]。为满足国家环保要求的超低排放标准,大部分 CFB 锅炉通常采用增大选择性非催化还原 (selective non-catalytic reduction, SNCR) 还原剂喷入量来提高脱硝效率,降低 NO_x 排放,但这种方法经济性不佳且氨逃逸严重,同时会增大锅炉尾部设备堵塞和腐蚀的风险,最终影响机组运行安全^[6-8]。

大量学者针对 CFB 锅炉 NO_x 排放控制进行了研究。当前的研究重点主要集中于运行床温和氧量的控制、一二次风配比和 SNCR 喷枪及布置优化^[2,9-14]。研究表明,入炉煤质偏离设计煤质会影响物料循环的建立^[15-16],进而导致床温偏差增大和 NO_x 排放控制困难^[4,17],最终影响锅炉运行经济性。钟犁等^[10]发现,可以通过调节一二次风配比达到降低锅炉平均床温、降低 NO_x 排放的效果。何川等针对多数现役 CFB 机组各分离器对应脱硝喷枪为统一调节,还原剂耗量较高的问题^[18-20],提出了一种基于气体组分分区喷氨的方法,在保证脱硝效率、降低氨逃逸的同时提高锅炉运行经济性^[21]。但当前研究基本聚焦于 330 MW 以下 CFB 机组,且研究方法主要局限于通过燃烧调整或设备优化改造降低 NO_x 排放或提高 SNCR 脱硝效率以满足超低排放要求,针对 660 MW CFB 锅炉 NO_x 排放特性及 NO_x 控制限制因素的研究鲜有报道。

基于此,本文对某电厂 660 MW CFB 锅炉当前存在问题及限制锅炉 NO_x 排放的影响因素进行研究,并针对限制因素给出给煤均匀性改造和二次风配风调整的优化方向,为大型 CFB 锅炉运行及 NO_x 控制提供借鉴参考。

1 锅炉设备概况

该电厂现服役锅炉为东方锅炉厂自主研发的

双布风板单炉膛、H 型布置、平衡通风、一次中间再热的超临界 660 MW CFB 锅炉。其两侧共对称布置 6 台高温冷却式旋风分离器,其中锅炉左侧 (A 侧) 从炉前至炉后依次布置 A、B、C 3 台分离器,右侧 (B 侧) 布置 D、E、F 3 台分离器。分离的物料一部分经过布置在炉膛两侧的外置式换热器后返回炉膛,另一部分经 U 型阀后直接返回炉膛。6 台分离器入口均布置 SNCR 脱硝系统进行 NO_x 脱除。锅炉采用长链给煤方式。锅炉两侧各布置 2 台刮板给煤机,单台给煤机在炉前、炉中、炉后部设 3 个给煤口。锅炉尾部烟道内从上到下依次布置低温过热器、低温再热器、省煤器和空气预热器,其中空气预热器采用 2 台四分仓回转式空气预热器。锅炉主要设计参数及入炉煤煤质特性见表 1、表 2。

表 1 锅炉主要设计参数
Tab.1 Main design parameters of the boiler

项目	锅炉最大连续出力工况	锅炉额定出力工况
锅炉蒸发量/(t·h ⁻¹)	2 162	2 099
过热器出口蒸汽压力/MPa	25.40	25.40
过热器出口蒸汽温度/℃	571.0	571.0
再热蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	1 781.96	1 727.50
再热器进口蒸汽压力/MPa	5.798	5.614
再热器出口蒸汽压力/MPa	5.558	5.381
再热器进口蒸汽温度/℃	346.8	345.0
再热器出口蒸汽温度/℃	569.0	569.0
省煤器进口给水温度/℃	295	293

表 2 煤质特性
Tab.2 The coal properties

项目	设计煤种	实际煤种	
元素分析	w(C _{ar})/%	31.50	41.50
	w(H _{ar})/%	1.88	2.83
	w(O _{ar})/%	6.13	8.95
	w(N _{ar})/%	0.61	0.76
	w(S _{ar})/%	1.81	0.46
工业分析	w(M _{ar})/%	4.92	6.30
	w(A _{ar})/%	53.15	39.20
	w(V _{daf})/%	48.19	42.22
Q _{net,ar} /(MJ·kg ⁻¹)	11.83	15.47	

2 锅炉存在问题及分析

2.1 锅炉 NO_x 排放

当前该 660 MW CFB 锅炉通过布置在 6 台分离器入口的 SNCR 脱硝系统降低 NO_x 排放,脱硝还原剂为厂区对面化工厂生产的氨气。锅炉满负荷运行时 NO_x 排放较难控制,瞬时值易超出超低排放限值,此时 SNCR 增大喷氨量脱硝效果不佳且氨耗量较大氨逃逸严重。基于此,本文对锅炉 NO_x 原始排放及 SNCR 脱硝效果进行研究,通过不锈钢管在分离器进出口抽取烟气经混合器过滤降温后,测量了 660、495、330 MW 3 个不同负荷下 NO_x 原始排放及 SNCR 脱硝效率。由于分离器出口之后烟气温度低于 SNCR 脱硝温度区间^[22-23],此位置之后 SNCR 无脱硝效果,故分离器进、出口 NO_x 质量浓度分别为锅炉原始 NO_x 质量浓度和脱硝后 NO_x 质量浓度,两者之差为 SNCR 脱除 NO_x 质量浓度。图 1 为不同负荷下锅炉 NO_x 原始排放情况。由图 1 可知:当前锅炉原始 NO_x 排放质量浓度较低,660 MW 负荷下 D 分离器入口 NO_x 质量浓度最高,但也未超过 120 mg/m³ (标准状态,下同);495 MW 和 330 MW 负荷时,NO_x 原始生成质量浓度相比 660 MW 负荷明显降低,此时分离器入口 NO_x 质量浓度平均值小于 50 mg/m³,SNCR 脱硝系统无需投运;此外,3 个负荷下,炉前 A、D 分离器入口 NO_x 质量浓度明显高于炉中部 B、E 分离器,也明显高于炉后 C、F 分离器,说明当前 NO_x 排放较难控制主要是由于燃烧过程中炉前 NO_x 生成质量浓度较高导致的。

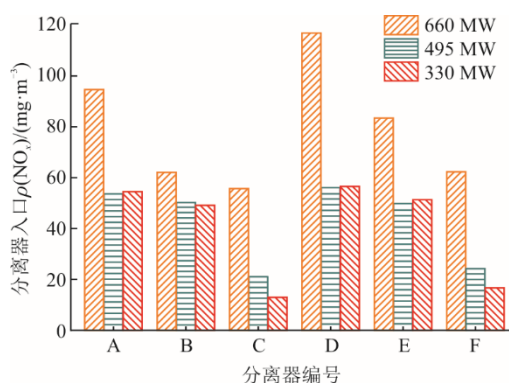


图 1 不同负荷 NO_x 原始排放 (O₂ 体积分数 6%)
Fig.1 Raw NO_x emissions at different loads (O₂ volume fraction is 6%)

NO_x 原始排放质量浓度不高,但锅炉满负荷运行时 NO_x 排放难于控制,说明当前 SNCR 脱硝系统运行存在问题。因此,本文在 660 MW 负荷下对 SNCR 脱硝系统的脱硝效率进行了研究,结果如图 2 所示。

由图 2 可知,6 台分离器入口 SNCR 脱硝系统的脱硝效率较低均低于 50.0%。其中炉前 A、D 分离器处 SNCR 脱除 NO_x 质量浓度最高约 50 mg/m³,脱硝效率分别为 49.0%和 41.8%,其余 4 台分离器脱硝效率均低于 40.0%。这主要是因为该电厂 SNCR 采用氨气经管道喷入分离器入口,在分离器内与烟气发生反应,但喷口处氨气气流刚性较差且分离器入口烟气流场湍动剧烈,氨气与烟气无法均匀混合并发生反应,进而导致 SNCR 脱硝效率较低^[24],锅炉满负荷运行时 NO_x 排放控制困难。

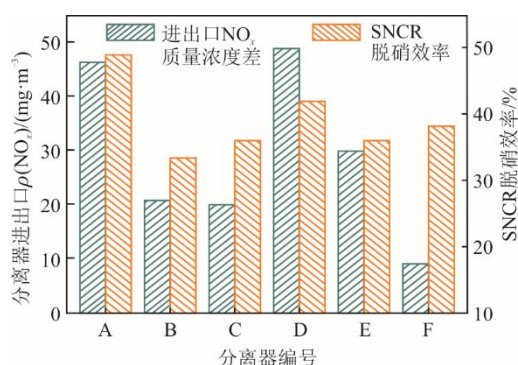


图 2 SNCR 脱硝效率
Fig.2 The denitrification efficiency of SNCR

2.2 炉内燃烧情况分析

在 SNCR 脱硝系统脱硝效率较低的情况下,只有通过降低燃烧过程中 NO_x 原始排放才能提高锅炉满负荷运行时 NO_x 控制能力。基于此,本文对满负荷时炉内的燃烧情况进行研究。满负荷工况下炉膛 A 侧和 B 侧的床温沿炉膛深度方向的变化如图 3 所示。

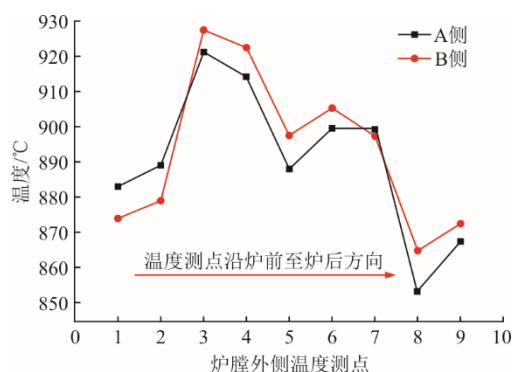


图 3 炉膛深度方向床温分布
Fig.3 The bed temperature distribution in depth direction of the furnace

由图 3 可知:锅炉满负荷运行时 A、B 两侧的床温偏差较小;A 侧和 B 侧的床温测点最高温度分别为 921.0 °C 和 927.3 °C,最低温度分别 853.4 °C

和 865.9 °C；A 侧床温偏差为 67.6 °C，B 侧床温偏差为 61.4 °C；床温沿着炉膛深度方向整体呈现炉前高炉后低的趋势。该锅炉密相区与稀相区共布置 3 层温度测点，测量结果均呈现炉前高炉后低的趋势。这与 2.1 节炉前 A、D 分离器入口 NO_x 质量浓度显著高于炉后 4 台分离器入口 NO_x 质量浓度的趋势相同。

同时，本文还对锅炉底渣可燃物和烟气中 CO 质量浓度进行分析以研究炉内实际燃烧情况。该 660 MW CFB 锅炉在炉膛底部从炉前至炉后方向依次布置 5 条输渣皮带，满负荷情况下对 5 条输渣皮带上的底渣分别取样。不同输渣皮带上的底渣可燃物质量分数如图 4 所示。由图 4 可知，沿炉前至炉后方向底渣可燃物整体呈上升趋势，第 1、2 条输渣皮带上的底渣可燃物质量分数低于 3%，而第 5 条输渣皮带上的底渣可燃物质量分数高于 10%。

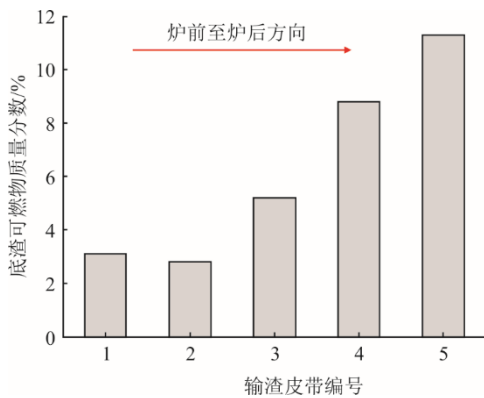


图 4 不同输渣皮带底渣可燃物质量分数
Fig.4 The combustible content of bottom slag on different belts

满负荷工况 6 台分离器出口 CO 质量浓度如图 5 所示。由图 5 可知：炉前的 A、D 分离器出口 CO 质量浓度较低，低于 134 mg/m³；而炉后的 C、F 分离器出口 CO 质量浓度超过烟气分析仪量程 10 720 mg/m³。二次风沿炉膛深度方向均匀分布，而炉前炉后的底渣可燃物和 CO 质量浓度存在明显差异，这表明当前锅炉采用的长链给煤方式存在给煤不均的问题。炉前给煤量少，风量较为充足，同时床温较高，燃烧较为充分，底渣可燃物质量分数和 CO 质量浓度较低；炉后给煤量过大，风量不足，同时床温偏低，导致燃烧不充分，底渣可燃物质量分数和 CO 质量浓度较高。此外，燃烧过程中炉前风量充足为氧化性气氛，同时炉前床温较高有助于 NO_x 的生成(图 3)，而炉后风量不足为还原性气氛，且炉后床温较低不

利于 NO_x 的生成^[25-26]。因此，给煤不均是床温偏差和 2.1 节中炉膛前后 NO_x 质量浓度偏差产生的根本原因。

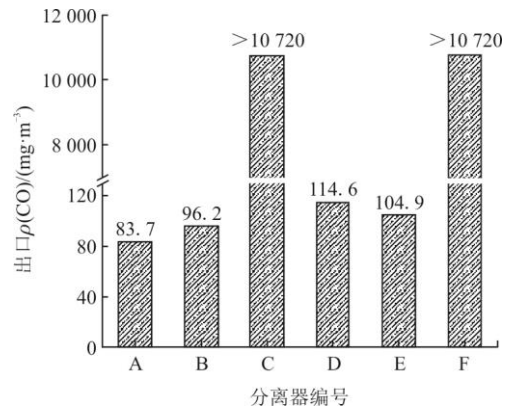


图 5 不同分离器出口 CO 质量浓度
Fig.5 The CO mass concentration at outlet of the cyclone separator

2.3 锅炉 NO_x 减排措施

锅炉满负荷运行 NO_x 排放控制困难的根本原因是锅炉入炉煤存在给煤不均的问题。但当前电厂入炉煤质较差导致入煤量大，给煤机出力较大，给煤口易于卡塞且单个给煤口入炉煤计量困难。对此，可以通过优化炉内配风，改善炉内燃烧进而降低原始 NO_x 排放，故本文进行了炉膛前后二次风进风量对 NO_x 排放质量浓度影响的研究。

当前锅炉二次风布置在锅炉下部 2 个裤衩腿内外两侧，裤衩腿内侧布置上下 2 层二次风，裤衩腿外侧布置 1 层二次风，共计 42 个二次风口。其中 A、B 两侧外侧各布置 8 个外二次风口，内侧分上下 2 层共布置 13 个内二次风口，内侧上二次风口 7 个，下二次风口 6 个。二次风阀门布置及初始开度见表 3。

表 3 二次风电动阀门原始开度 单位：%
Tab.3 Original opening of the secondary air electric valve

阀门	左外	左内上	左内下	右内下	右内上	右外
1	99	100	99	97	100	99
2	94	89	86	84	85	95
3	85	84	79	80	84	84
4	79	78	79	79	80	78
5	67	75	44	45	45	55
6	66	44	39	40	45	50
7	45	44			43	43
8	44					42

其中阀门 1—8 为炉后至炉前方向依次编号。试验期间通过调节各二次风阀门开度，调整炉膛深

度方向不同位置二次风的进风量,进而研究不同阀门开度对炉膛 NO_x 排放的影响。具体阀门开度对 NO_x 影响如图 6 所示。试验期间保持 SNCR 脱硝系统各阀门开度不变,其中部分工况入炉煤质较好 SNCR 并未投运。试验过程中保持负荷稳定,其他运行参数不变,二次风阀门开度调节后每 5 min 记录 1 组数据,并进行分析。

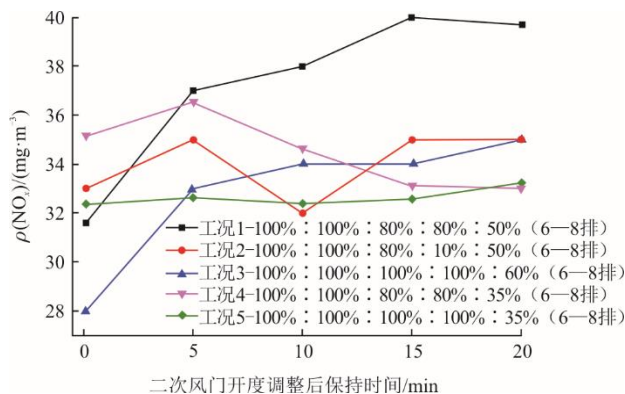


图 6 二次风阀门开度对 NO_x 排放的影响

Fig.6 The effect of secondary air valve opening on NO_x emissions

由图 6 可知,炉膛前后二次风进风量对 NO_x 排放影响显著。当炉前阀门开度增大、炉后阀门开度减小,即炉前二次风量增大时(工况 1 和工况 3),NO_x 排放显著升高,2 个工况下 NO_x 质量浓度升高超过 21.40%。这是由于炉前煤量较小,风量较大,氧化性气氛较强,入炉煤在料层分布不均时易产生局部高温点,导致热力型 NO_x 生成,致使 NO_x 质量浓度增加。而当炉前二次风量减小时(工况 5),NO_x 排放基本未发生变化,当炉前与炉中部风量均减小(工况 4),NO_x 排放明显降低,从 36.54 mg/m³ 降低至 32.97 mg/m³,降幅达 9.77%。

3 结 论

1) 满负荷锅炉原始 NO_x 排放较低不超过 120 mg/m³,中低负荷时 NO_x 质量浓度低于 50 mg/m³,SNCR 无需投运。但炉膛前后 NO_x 质量浓度偏差较大,烟气中的 NO_x 主要在炉膛前部产生。

2) 当前锅炉 SNCR 脱硝效率较低,6 台分离器入口的 SNCR 脱硝效率均低于 50.0%,A、D 分离器处 SNCR 脱硝效率较高,分别为 49.0% 和 41.8%,其余 4 台分离器脱硝效率均低于 40.0%。

3) NO_x 原始生成方面,从炉膛深度方向床温分布、底渣可燃物质量分数和 CO 质量浓度变化可以确定,给煤不均造成满负荷 NO_x 排放控制困难的

根本原因。对此,可以通过调整炉膛深度方向二次风量降低原始 NO_x 生成,降幅可达 9.77%。

[参 考 文 献]

- [1] XU M X, LI S Y, LI W, et al. Effects of gas staging on the NO emission during O₂/CO₂ combustion with high oxygen concentration in circulating fluidized bed[J]. Energy & Fuels, 2015, 29(5): 3302-3311.
- [2] KE X, ENGBLOM M, YANG H, et al. Prediction and minimization of NO_x emission in a circulating fluidized bed combustor: a comprehensive mathematical model for CFB combustion[J]. Fuel, 2022, 309: 122133.
- [3] 史修立. 145 MW 循环流化床锅炉降低飞灰可燃物含量的燃烧调整试验分析[J]. 山东电力技术, 2020, 47(3): 77-80.
SHI Xiuli. Analysis on combustion adjustment test for reducing carbon content of fly ash in a 145 MW circulating fluidized bed boiler[J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(3): 77-80.
- [4] 张思海, 张双铭, 张俊杰, 等. 330 MW 亚临界 CFB 锅炉烟气再循环深度调峰运行性能研究[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(1): 291-298.
ZHANG Sihai, ZHANG Shuangming, ZHANG Junjie, et al. Performance research on deep peak regulation with flue gas recirculation in a 330 MW subcritical CFB boiler[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(1): 291-298.
- [5] ZHAO J, LIU Y, YANG H, et al. Eulerian investigation of the mechanism of ultra-low NO_x emissions from CFB boilers with finer bed material[J]. Fuel, 2024, 359: 130180.
- [6] 辛胜伟, 韩平, 段彩丽, 等. 300 MW 机组循环流化床锅炉选择性非催化还原系统模拟及优化研究[J]. 热力发电, 2021, 50(11): 122-129.
XIN Shengwei, HAN Ping, DUAN Caili, et al. Simulation and optimization of SNCR system of 300 MW circulating fluidized bed boiler[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(11): 122-129.
- [7] 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): 390-395.
KE Xiwei, CAI Runxia, YANG Hairui, et al. Formation and ultra-low emission of NO_x for circulating fluidized bed combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 390-395.
- [8] 韩应, 高洪培, 王海涛, 等. SNCR 烟气脱硝技术在 330 MW 级 CFB 锅炉的应用[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(6): 85-88.
HAN Ying, GAO Hongpei, WANG Haitao, et al. Application of SNCR flue gas denitration technology in 330 MW CFB boiler[J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(6): 85-88.
- [9] 洪喜生. 300 MW 机组循环流化床锅炉低氧量燃烧优化调整试验分析[J]. 内蒙古电力技术, 2016, 34(2): 56-58.
HONG Xisheng. Optimization and adjustment of low oxygen content combustion in 300 MW CFB boiler[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2016, 34(2): 56-58.
- [10] 钟犁, 徐正泉, 曹幸卫, 等. 300 MW 机组循环流化床锅炉燃烧调整的试验研究[J]. 热力发电, 2012, 41(5): 69-76.
ZHONG Li, XU Zhengquan, CAO Xingwei, et al. Test

- study on combustion adjustment of one CFB boiler for 300 MW unit[J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(5): 69-76.
- [11] 胡玉, 吴海波. 330 MW CFB 锅炉燃烧调整与经济运行技术研究[J]. 电站系统工程, 2016, 32(5): 23-27.
HU Yu, WU Haibo. Study of 330 MW CFB boiler combustion adjustment and economic operation technology[J]. Power System Engineering, 2016, 32(5): 23-27.
- [12] LU J, ZHANG S, LIU Q, et al. Investigation of carbon content in fly ash in circulating fluidized bed boilers[J]. Power Engineering, 2004, 24(2): 170.
- [13] ZHU J, OUYANG Z, LU Q. Numerical simulation on pulverized coal combustion and NO_x emissions in high temperature air from circulating fluidized bed[J]. Journal of Thermal Science, 2013, 22(3): 261-268.
- [14] 谢民, 陈佳丽, 吴燕雄. 300 MW 级循环流化床机组调峰能力改造分析[J]. 特种设备安全技术, 2023(6): 13-15.
XIE Min, CHEN Jiali, WU Yanxiong, et al. Analysis of peak shaving capacity transformation for 300 MW CFB boiler[J]. Safety Technology of Special Equipment, 2023(6): 13-15.
- [15] 孙美枝, 王晓炜. 循环流化床锅炉物料平衡状态的优化研究[J]. 工业锅炉, 2019(6): 7-11.
SUN Meizhi, WANG Xiaowei. Research on optimization of material balance state of circulating fluidized bed boilers[J]. Industrial Boiler, 2019(6): 7-11.
- [16] XU L, CHENG L, JI J, et al. Effect of anti-wear beams on waterwall heat transfer in a CFB boiler[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 115: 1092-1098.
- [17] 高明明, 郭炯楠, 于浩洋, 等. 适应深度调峰的循环流化床 NO_x 排放建模[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(6): 24-31.
GAO Mingming, GUO Jiongnan, YU Haoyang, et al. Modeling of nitrogen oxide emission in circulating fluidized bed for deep peak regulation[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(6): 24-31.
- [18] 凌文, 吕俊复, 周托, 等. 660 MW 超超临界循环流化床锅炉研究开发进展[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2515-2524.
LING Wen, LYU Junfu, ZHOU Tuo, et al. Research and development progress of the 660 MW ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2515-2524.
- [19] 莫鑫, 蔡润夏, 吕俊复, 等. 600 MWe 超临界循环流化床锅炉的运行特性[J]. 锅炉技术, 2016, 47(4): 34-38.
MO Xin, CAI Runxia, LYU Junfu, et al. The performance evaluation of the 600 MWe supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Boiler Technology, 2016, 47(4): 34-38.
- [20] 张鹏, 范浩东, 余耀, 等. 350 MW 超临界 CFB 锅炉不同负荷下运行影响试验[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(6): 93-99.
ZHANG Peng, FAN Haodong, YU Yao, et al. Performance of 350 MW supercritical circulating fluidized bed boiler under different loads[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(6): 93-99.
- [21] LI J J, ZHANG M, YANG H R, et al. The theory and practice of NO_x emission control for circulating fluidized bed boilers based on the re-specification of the fluidization state[J]. Fuel Processing Technology, 2016, 150: 88-93.
- [22] 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 Xiaobing, LUO Chen, WU Guangjian, et al. Experimental study on low temperature synergistic denitration of circulating fluidized bed on low nitrogen combustion[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(11): 84-89.
- [23] 张媛媛, 曲江源, 苏欣欣, 等. 循环流化床燃煤机组 SNCR 脱硝过程气液传质和反应特性[J]. 化工学报, 2023, 74(6): 2404-2415.
ZHANG Yuanyuan, QU Jiangyuan, SU Xinxin, et al. Gas-liquid mass transfer and reaction characteristics of SNCR denitration in CFB coal-fired unit[J]. CIESC Journal, 2023, 74(6): 2404-2415.
- [24] 周迎迎, 李阳. 还原剂雾化效果对燃煤循环流化床锅炉 SNCR 脱硝性能影响研究[J]. 煤化工, 2023, 51(5): 80-84.
ZHOU Yingying, LI Yang. Study on influence of reducing agent atomization effect on SNCR denitrification performance of coal-fired circulating fluidized bed boiler[J]. Coal Chemical Industry, 2023, 51(5): 80-84.
- [25] 段元强, 洪溥, 仇兴雷, 等. 增压富氧气氛下 NO_x 均相生成及 SNCR 反应机理研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(1): 96-105.
DUAN Yuanqiang, HONG Pu, QIU Xinglei, et al. Study of homogeneous formation of NO_x and SNCR reaction mechanism in pressurized oxy-fuel atmosphere[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(1): 96-105.
- [26] 郝艳红, 孟江涛, 王菁, 等. CFB 锅炉低氮燃烧对炉内固硫影响研究进展[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(6): 43-50.
HAO Yanhong, MENG Jiangtao, WANG Jing, et al. Research progress on the effect of low-NO_x combustion on furnace sulfur fixation in the CFB boiler[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(6): 43-50.

(责任编辑 刘永强)