

300 MW CFB 锅炉 SNCR+SCR 深度脱硝性能研究

马涛¹, 茹宇², 李克章¹, 惠建飞¹, 朱海¹, 李萌¹

(1. 秦皇岛秦热发电有限责任公司, 河北 秦皇岛 066000; 2. 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209)

摘要:随着环保压力不断提高,流化床锅炉需进行深度脱硝改造以实现超低排放,但目前 SCR 改造在流化床锅炉上的应用研究较少。某厂 320 MW 流化床机组改造增加了 SCR 脱硝系统,基于该工程改造项目,笔者使用网格法对烟气场温度、烟气成分等参数进行测定,进行了改造前后的锅炉性能试验,研究了改造后 SCR 的脱硝性能及其影响因素,并测试锅炉效率。结果表明,不同负荷下,SCR 入口平均温度在 268.11~309.53 °C,基本满足拓展的 SCR 反应温度窗口(260~420 °C)。机组满负荷 320 MW 下,实测反应器脱硝效率为 72.48%,对应的氨逃逸浓度为 0.7 mg/Nm³。40%~100% 负荷下,NO_x 排放均低于 25 mg/Nm³,氨逃逸浓度不大于 1 mg/Nm³。由于烟气温度水平较煤粉炉低,因此本试验中 SCR 反应器的脱硝效率低于应用于煤粉炉的 SCR 反应器。40%~100% 负荷下的尿素耗量均低于同等级的煤粉锅炉,其中满负荷下的尿素耗量为 279.09 kg/h。在相同排放数值下尿素耗量降低 50% 以上,节能降耗效果显著。排放结果与尿素耗量统计结果表明,SNCR 与 SCR 耦合良好,应用于 CFB 锅炉具有较大优势。SCR 出口处 NO_x 分布并不均匀,在烟道水平截面上呈 NO_x 浓度右侧高、左侧低的趋势,与 SCR 入口温度分布一致,温度是影响脱硝效率和 NO_x 分布的主要因素。改造后平均锅炉效率为 90.07%,与改造前锅炉效率持平,表明 SCR 改造对锅炉效率影响较小。锅炉 90% 以上热损失由排烟和物理未完全燃烧热损失造成,控制排烟热损失 q_2 和物理未完全燃烧热损失 q_4 是锅炉热效率提升的关键。

关键词:SCR; 循环流化床锅炉; 脱硝; NO_x; 锅炉效率

中图分类号:TK16;X71

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2020)03-0099-07

Study on deep denitrification performance of SNCR+SCR for a 300 MW CFB boilerMA Tao¹, RU Yu², LI Kezhang¹, HUI Jianfei¹, ZHU Hai¹, LI Meng¹

(1. Qinhuangdao Qinre Power Generation Co., Ltd., Qinhuangdao 066000, China;

2. China Huaneng Clean Energy Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: With the continuous improvement of environmental protection pressure, in-depth denitrification retrofit for many fluidized circulating bed (CFB) boilers needs to be carried out to achieve ultra-low emissions, while there is little research on the application of SCR retrofit in CFB boilers at present. SCR denitrification system has been added to a 320 MW fluidized bed unit. Based on this project, the grid method was used to measure the parameters of flue gas temperature, flue gas composition, etc., the boiler performance test before and after the retrofit was carried out, and the denitrification performance and its influencing factors after SCR retrofit were studied. Besides, the boiler efficiency was measured. The results show that the average temperature at SCR inlet is 268.11~309.53 °C under different loads, which basically meets the extended temperature window for SCR reaction(260~420 °C). With 320 MW load, the measured denitrification efficiency is 72.48%, and the corresponding ammonia escape concentration is 0.7 mg/Nm³. Under 40%~100% load, the NO_x emission is lower than 25 mg/Nm³, and the ammonia escape concentration is lower than 1 mg/Nm³. Because the flue gas temperature is lower than that of pulverized coal boiler, the denitrification efficiency of SCR reactor in this test is lower than that used in pulverized coal boiler. The

收稿日期:2020-05-20;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.CFB20052001

基金项目:中国华能集团有限公司总部科技项目(HNKJ18-H13)

作者简介:马涛(1968—),男,河北秦皇岛人,高级工程师,主要研究电力行业发展及管理方向。E-mail:powermat@163.com。通讯作者:朱海,高级工程师,从事燃煤电厂技术管理工作。E-mail:zhuhai2001115@163.com

引用格式:马涛,茹宇,李克章,等.300 MW CFB 锅炉 SNCR+SCR 深度脱硝性能研究[J].洁净煤技术,2020,26(3):99-105.

MA Tao, RU Yu, LI Kezhang, et al. Study on deep denitrification performance of SNCR+SCR for a 300 MW CFB boiler[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(3): 99-105.



移动阅读

urea consumption under 40%–100% load is lower than that of pulverized boiler with the same grade, and the urea consumption under full load is 279.09 kg/h. Under the same emission value, the urea consumption is reduced by more than 50%, and the effect of energy saving is significant. The results of emission and urea consumption show that SNCR are well coupled with SCR, and this technology has a great advantage in CFB boiler. The NO_x distribution at the SCR outlet is not uniform, showing a trend of high NO_x concentration on the right side and low NO_x concentration on the left side on the horizontal section of flue, which is consistent with the temperature distribution at the SCR inlet. Temperature is the main factor affecting the denitrification efficiency and NO_x distribution. The average boiler efficiency after retrofit is 90.07%, which is basically equal to that before retrofit, indicating that SCR retrofit has little effect on boiler efficiency. More than 90% of the heat loss of the boiler is caused by the heat loss of exhaust gas and incomplete combustion. The key to improve the boiler thermal efficiency is to reduce q_2 (heat loss of exhaust gas) and q_4 (incomplete combustion of solid).

Key words: SCR; circulating fluidized bed boiler; denitrification; NO_x ; boiler efficiency

0 引言

鉴于日趋严峻的能源形势背景,发展传统燃煤锅炉将受到限制。循环流化床锅炉是一种清洁煤燃烧技术,具有燃烧效率高、燃料适应性广泛、污染物排放强度低、负荷调节性能好以及可高效综合利用资源等优势,已广泛应用于国内外发电行业^[1-3]。随着环保形势日益严峻,循环流化床锅炉需要提高烟气处理技术,如进行超低排放改造等。针对 NO_x 的排放,火力发电厂的控制方法主要有2类,一是低 NO_x 燃烧技术,即在燃烧过程中减少 NO_x 的生成^[4-5];二是烟气脱硝技术,即从烟气中脱除生成的 NO_x ^[6-8]。火电厂大规模应用的烟气脱硝技术主要包括选择性非催化还原法(Selective non-catalytic reduction, SNCR)、选择性催化还原法(Selective catalytic reduction, SCR)和 SNCR/SCR 联合脱硝技术^[8-10]。

张其良等^[11]、马大卫等^[12]对1台超低排放改造后煤粉炉机组的脱硝反应器性能进行研究,发现 SCR 改造后需进行流场优化、喷氨优化调整试验,从而有效改善 NO_x 分布均匀性、降低氨逃逸。张杨等^[13]针对 SCR 和 SNCR 应用于“W”火焰锅炉实现 NO_x 超低排放的技术难点、边界条件等进行了论述,提出了“W”火焰锅炉 NO_x 超低排放技术路线。唐树芳等^[14]针对某六角切圆的超高压自然循环煤粉锅炉进行了现场试验测试,研究了六角切圆煤粉锅炉在超低排放改造后脱硝进出口 NO_x 分布及出口逃逸氨浓度的特点。目前关于 SCR 改造的研究主要针对传统煤粉锅炉,鲜见流化床锅炉。由于流化床锅炉烟气温度水平较煤粉炉低,而温度是影响 SCR 反应的重要因素^[10,15-16]。因此煤粉锅炉的 SCR 改造研究对流化床锅炉的参考意义不大。

河北某 320 MW 流化床机组为控制 NO_x 排放,同时采用炉内空气分级的低氮燃烧技术与 SNCR 烟

气脱硝技术,低负荷下 NO_x 排放浓度约为 35 mg/Nm³,脱硝效率 85%~89%。由于日益增大的环保压力,京津冀地区要求 NO_x 排放低于 30 mg/Nm³,该联合脱硝技术已不能满足环保要求,因此该厂进行深度脱硝改造增加 SCR 脱硝系统。基于该工程改造项目,本文进行了改造前后的锅炉性能试验,研究了改造后 SCR 的脱硝性能及其影响因素,并测试锅炉效率,以为流化床锅炉的脱硝超低排放改造提供参考。

1 锅炉基本情况

1.1 模型描述

该 2×320 MW 循环流化床(CFB)锅炉东方锅炉股份有限公司采用引进 Alstom 技术设计制造的 1 025 t/h 亚临界、中间再热、汽包式循环流化床锅炉,型号为 DG1025/17.4-III。锅炉为亚临界压力中间一次再热、单汽包自然循环。锅炉主要性能指标见表 1。

表 1 锅炉主要性能参数

Table 1 Main performance parameters of boiler

项目	BMCR	ECR
过热蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	1 025	979
过热器出口蒸汽压力/MPa	17.4	17.4
过热器出口蒸汽温度/°C	540	540
再热蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	839.5	799.4
再热器进口蒸汽压力/MPa	3.713	3.535
再热器出口蒸汽压力/MPa	3.533	3.348
再热器进口蒸汽温度/°C	325.0	320.2
再热器出口蒸汽温度/°C	540	540
省煤器进口给水温度/°C	281.9	278.6

锅炉炉膛为裤衩型结构,所用分离器为高温绝热旋风分离器。4 台旋风分离器以 H 型左右对称布置在炉膛两侧,每台旋风分离器下方均按次序布置 1 台回料器、1 台外置式换热器及 1 台冷渣器。外置换热器用于调节床温与再热蒸汽温度。

1.2 试验样品

设计煤种来自开滦煤矿的劣质煤,校核煤种为蔚洲煤,煤种煤质特性分析见表 2,入炉石灰石特性见表 3。锅炉燃用煤种为低硫煤,煤质较差,挥发分

和发热量较低,适合使用流化床锅炉燃烧。入炉石灰石纯度约为 90%,纯度较低,但由于锅炉尾部还设置有海水脱硫装置,因此石灰石纯度可以满足脱硫要求。

表 2 设计及校核煤种特性

Table 2 Characteristics of designing and checking coal

煤种	工业分析/%				元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/$ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
	M_t	M_{inh}	V_{daf}	A_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	$S_{\text{t,ar}}$	
设计煤种	5.22	1.01	37.97	43.69	40.04	2.89	6.49	0.71	0.94	15 557
校核煤种	8.60	0.70	28.40	37.61	43.79	2.53	5.36	0.70	1.41	16 590

表 3 入炉石灰石特性

Table 3 Characteristics of limestone in furnace

成分	烧失量	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	$\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$
含量/%	~40	4.79	1.29	0.93	49.63	1.60	0.55

1.3 烟气脱硝系统

锅炉改造前使用 SNCR 烟气脱硝技术,于炉膛出口水平烟道布置 12 根喷枪,脱硝剂为稀释后的尿素。改造方案为增加 SCR 脱硝系统,SCR 反应器水平布置于省煤器后、空预器前的烟道内,SCR 反应器本体内装有 1 层板式催化剂,混合好的烟气与氨进入反应器本体后,在催化剂的催化作用下烟气中 NO_x 与氨进行氧化还原反应,生成 N_2 和水,达到脱硝的目的,改造系统如图 1 所示。

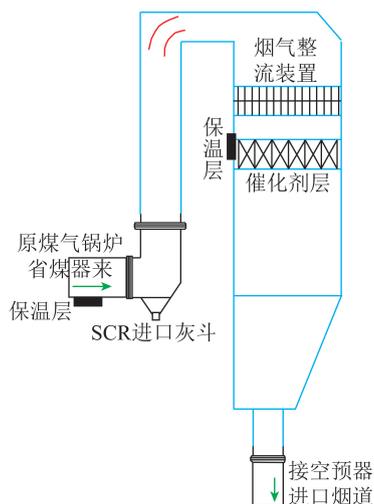


图 1 改造系统

Fig.1 System diagram after transformation

2 结果与讨论

2.1 改造前后温度场

2.1.1 改造前空预器入口温度场

为了对 SCR 反应效果做出预估判断,在 SCR 安装位置上,即空预器入口进行低负荷下的温度场测量,结果如图 2 所示。

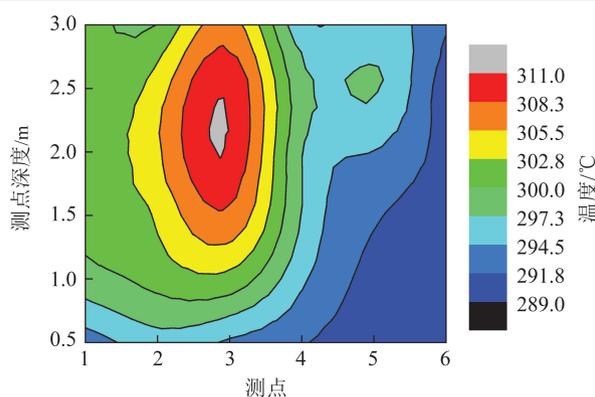


图 2 空预器入口温度场

Fig.2 Temperature field at inlet of air preheater

SCR 反应需要特定的温度区间^[10,15-16],实际运行中反应温度不能过低,否则造成硫酸铵及硫酸氢铵结晶现象,覆盖在催化剂表面,堵塞催化剂反应位点,降低其活性,因此 SCR 系统的温度水平应保持在 280 °C 以上。

改造前 160 MW 负荷下,空预器入口平面最低温度为 289 °C,最高温度为 311 °C,平均温度为 297.64 °C。因此,改造前锅炉在低负荷下运行时能保证 SCR 反应温度窗口,但更低负荷下需注意烟气温度水平,可能出现逃逸氨生成硫酸铵或硫酸氢铵结晶堵塞空预器的情况^[17]。

由图 2 可知,空预器温度场高温核心偏向左侧,因此预测安装 SCR 装置后, NO_x 出口浓度分布也会呈现不均匀的现象,由于左侧温度偏高,因此预测 NO_x 浓度分布呈现左侧低、右侧高的趋势。

2.1.2 改造后 SCR 入口温度场

温度是影响 SCR 系统的脱硝能力的关键因素,改造后 SCR 系统入口烟气温度场如结果如图 3 所示。

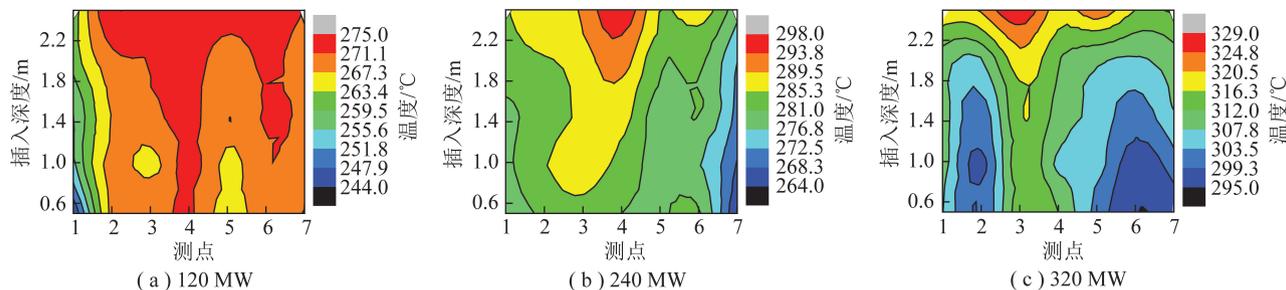


图3 SCR入口温度场

Fig.3 Temperature field at SCR inlet

120 MW下,最低温度为244℃,最高温度为275℃,平均温度为268.11℃;240 MW下,最低温度为264℃,最高温度为298℃,平均温度为282.11℃;320 MW下,最低温度为275℃,最高温度为329℃,平均温度为309.53℃。

传统SCR反应的最佳温度窗口在320~420℃,拓展的SCR反应温度区间可达260~420℃。但锅炉实际运行中,由于烟气中含有酸性成分 SO_x ,温度不能过低,否则不仅催化剂活性和整体脱硝效率下降,还会导致硫酸铵/硫酸氢铵结晶问题^[10,15-16]。催化剂层平均温度应尽量控制在280℃以上(对应负荷不低于150 MW),才能保证最低点烟温高与设计值。试验期间,240与320 MW负荷下SCR入口温度满足要求,但低负荷120 MW时烟气温度水平较低,尤其是局部温度低于250℃,需要严格控制运行时间,以防止过多的逃逸氨产生硫酸铵及硫酸氢铵。

由图3可知,SCR入口温度分布趋势为:烟道中心温度较高,而靠近炉墙外侧温度较低,整体上左侧高于右侧,温度在水平面上的不均匀将会影响SCR反应后 NO_x 浓度分布,SCR出口 NO_x 在右侧及靠近炉墙侧可能偏高。

2.2 改造后脱硝性能

通过网格法测量机组320、240及120 MW三个负荷下SCR反应器进出口水平面上 NO_x 、 O_2 浓度分布,具体见表4。数据用于脱硝效率计算,氨逃逸浓度为电厂热控运行数据。

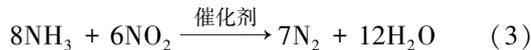
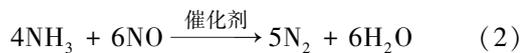
表4 脱硝效率分析结果

Table 4 Analysis results for denitration efficiency

项目	120 MW	240 MW	320 MW
NO_x 入口浓度平均值(6% O_2)/(mg·Nm ⁻³)	24.45	21.35	18.08
NO_x 出口浓度平均值(6% O_2)/(mg·Nm ⁻³)	10.31	9.23	4.32
脱硝效率/%	40.08	50.36	72.48
氨逃逸浓度/(mg·Nm ⁻³)	0.9	0.6	0.7

由表4可知,120 MW下,SCR系统实际脱硝效率为40.08%,该负荷下实际的氨逃逸浓度达0.9 mg/Nm³;240 MW负荷下,实际脱硝效率为50.36%,此时氨逃逸浓度为0.6 mg/Nm³;满负荷320 MW下,脱硝效率达到72.48%,而氨逃逸浓度为0.7 mg/Nm³。低负荷下,由于温度低导致SCR效率下降,不足50%,脱硝效率的降低导致来自上游SNCR的氨气反应程度较低,因此氨逃逸浓度较高,但仍低于要求的最大氨逃逸值(1 mg/Nm³)。

SCR反应器内发生的SCR脱硝反应方程式为



影响反应效率的主要因素有烟气流速和烟气温度。不同负荷下烟气流速不同,高负荷烟气体量大,在SCR反应器处烟气停留时间较短,但实际随负荷提高,SCR反应器脱硝效率明显提高,由低负荷下的40.08%提高至72.48%,这表明烟气温度是实际运行中决定SCR脱硝效率的主要因素,应特别关注SCR反应器处的烟温水平。

由表4可知,5号炉SCR脱硝装置的效率在40%~73%,低负荷脱硝效率低主要由于烟气温度低,考虑测试期间环境温度较低,而实际运行中深度调峰工况主要在夏季,气温升高10~20℃,相应入口烟温提升,脱硝效率更高。另外,由于烟气温度水平较煤粉炉低,因此本试验中SCR反应器的脱硝效率低于应用于煤粉炉的SCR反应器^[9-10]。但在耦合上游的SNCR技术后,从最终排放值看,40%~100% BMCR工况下,满足 NO_x 排放浓度低于25 mg/Nm³的改造目标,氨逃逸浓度也低于要求值,表明SNCR与SCR耦合良好。因此只要保证SCR入口温度高于280℃,即有50%左右的SCR脱硝效率。

SCR 出口的 NO_x 浓度分布如图 4 所示。可知出口处 NO_x 分布并不均匀,在水平面上呈右侧高、左侧

低的趋势,这与前文中依据空预器入口的温度分布结果所做出的预测一致。

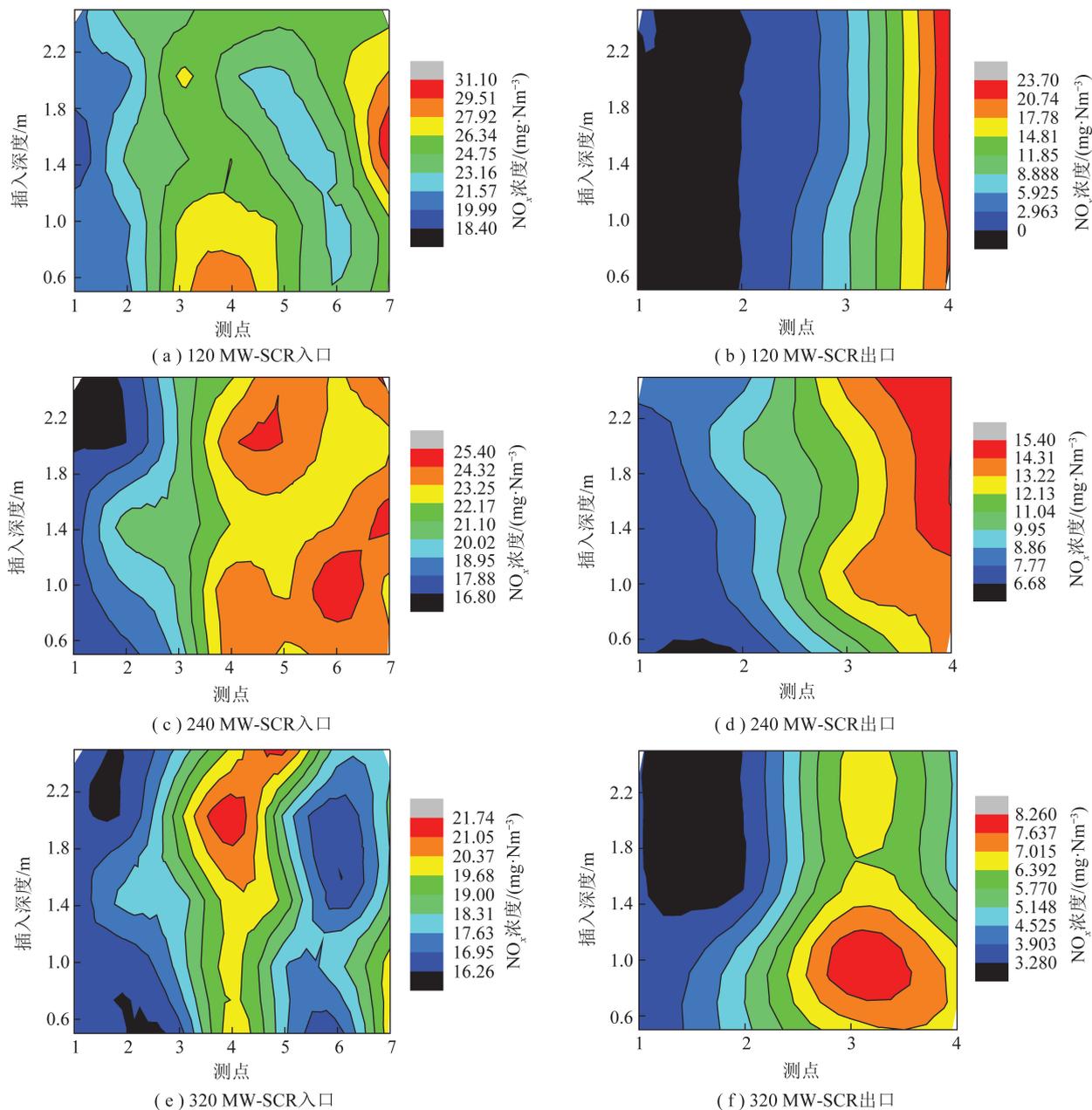


图4 SCR 进出口 NO_x 浓度分布

Fig.4 Distribution of NO_x concentration at SCR inlet and outlet

2.3 改造前后尿素耗量

SCR 改造后的尿素消耗量根据热控采集的连续运行数据计算得到,结果见表 5。可知,改造后 320 MW 负荷下尿素耗量为 279.09 kg/h;240 MW 负荷下尿素耗量为 110.61 kg/h;120 MW 负荷下尿素耗量为 177.83 kg/h。改造后高负荷下尿素耗量低于改造前,但由于低负荷下烟温较低,SCR 脱硝能力略低,低负荷尿素耗量略高于改造前。改造后在不同负荷下尿素耗量均满足低于 300 kg/h 设计值的要求。由于设计耗量为对应排放 25 mg/Nm^3 的控

表 5 尿素耗量

Table 5 Urea consumption

项目	负荷/MW	尿素耗量/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)
改造前	160	147.73
	220	398.09
	320	360.36
改造后	120	177.83
	240	110.61
	320	279.09

制目标,测试时控制排放为 10.31 mg/Nm^3 以下,因此折算到设计工况尿素耗量会更低。综合分析认为,在相同排放数值下尿素耗量降低 50% 以上,节能降耗效果显著。

同等级 300 MW 煤粉炉所用 SCR 催化剂基本为 2+1 或 2+0 布置,即至少布置 2 层催化剂,且可能预留 1 层布置的空间,而本次改造 SCR 反应器所占空间相对较小;由于流化床锅炉设有旋风分离器,可将较大粒径飞灰分离送回炉膛,因此尾部烟道飞灰浓度一般低于煤粉炉,催化剂堵塞少,且仅有 1 层催化剂,催化剂更换成本较低。此外,该厂联合脱硝技术由于使用上游 SNCR 未反应的尿素热解氨气,SNCR 与 SCR 耦合良好,尿素耗量也低于同等级的煤粉锅炉^[18-19],故该技术应用于 CFB 锅炉具有较大优势。

2.4 改造前后锅炉效率

5 号锅炉于 2019 年 10 月改造期间安装了 SCR 脱硝装置,根据运行数据及电厂煤质等化验结果,对改造后锅炉进行了热效率计算。改造前后不同负荷下的锅炉热效率的测试结果见表 6。

表 6 各工况锅炉热效率

Tab.6 Thermal efficiency of boiler under various working conditions

项目	改造前			改造后		
	160 MW	220 MW	320 MW	120 MW	240 MW	320 MW
排烟热损失/%	7.889	8.418	7.816	9.392	7.657	8.440
化学未完全燃烧热损失/%	0.076	0.071	0.081	0.086	0.057	0.077
物理未完全燃烧热损失/%	0.60	1.31	1.76	1.07	1.01	0.87
锅炉散热损失/%	0.100	0.138	0.200	0.075	0.150	0.200
灰渣显热损失/%	0.012	0.013	0.017	0.018	0.017	0.017
锅炉热效率/%	91.32	90.05	90.13	89.36	91.11	89.74

由表 6 可知,不同负荷下锅炉的各项热损失中排烟和物理未完全燃烧热损失占比最大。根据计算可知,各负荷下 90% 以上热损失是由这 2 项热损失带来,这与文献[20-21]得到的结论一致,这 2 项热损失是影响锅炉效率最主要的因素。排烟热损失的主要影响因素为排烟温度,锅炉效率低于设计值的一个重要原因即排烟温度较高。

改造前,160 MW 负荷下,锅炉效率为 91.32%; 220 MW 负荷下,锅炉效率为 90.05%; 320 MW 负荷

下,锅炉效率为 90.13%。根据现场试验结果,160 MW 低负荷下烟气氧量偏高,飞灰燃烧较为充分,因此飞灰含碳量较低,相比于 220 和 320 MW 工况锅炉热效率略高。

改造后,120 MW 负荷下,锅炉效率为 89.36%; 240 MW 负荷下,锅炉效率为 91.11%; 320 MW 负荷下,锅炉效率为 89.74%。试验表明,改造后锅炉效率基本不受影响。

3 结 论

1) 机组满负荷 320 MW 下,SCR 反应系统的脱硝效率达到 72.48%,对应氨逃逸浓度为 0.7 mg/Nm^3 。40%~100% 负荷下,NO_x 排放均低于 25 mg/Nm^3 ,均满足“氨逃逸浓度不大于 1 mg/Nm^3 ”的要求。试验结果表明 SNCR 与 SCR 耦合良好。

2) 40%~100% 负荷下的尿素耗量均低于同等级的煤粉锅炉,其中满负荷下的尿素耗量为 279.09 kg/h。在相同排放数值下尿素耗量降低 50% 以上,节能降耗效果显著。

3) 改造后锅炉效率基本不受影响。不同负荷下锅炉的 90% 以上热损失由排烟和物理未完全燃烧热损失带来,这 2 项热损失是影响锅炉效率最主要的因素。

参考文献 (References):

- [1] 李明,徐向东. 循环流化床锅炉控制系统[J]. 清华大学学报(自然科学版),2002,42(5):665-668.
LI Ming, XU Xiangdong. Circulating fluidized bed boiler control system [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2002, 42(5): 665-668.
- [2] 黄元生,张利君,王虎,等. 300 MW 机组循环流化床锅炉外置床运行特性试验[J]. 热力发电,2019,48(8):101-105.
HUANG Yuansheng, ZHANG Lijun, WANG Hu, et al. Test on operation characteristics of fluidized bed heat exchanger of a 300 MW unit circulating fluidized bed boiler [J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(8): 101-105.
- [3] 黄中,杨娟,车得福. 大容量循环流化床锅炉技术发展应用现状[J]. 热力发电,2019,48(6):1-8.
HUANG Zhong, YANG Juan, CHE Defu. Application and development status of large-scale CFB boilers [J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(6): 1-8.
- [4] 王文军,吴海粟. 330 MW 循环流化床锅炉低氮燃烧改造[J]. 山西电力,2018(4):48-51.
WANG Wenjun, WU Haisu. Low NO_x combustion transformation for a 330 MW CFB boiler [J]. Shanxi Electric Power, 2018(4): 48-51.
- [5] 李楠,张世鑫,赵鹏勃,等. 循环流化床锅炉低氮燃烧技术试验研究[J]. 洁净煤技术,2018,24(5):84-89.
LI Nan, ZHANG Shixin, ZHAO Pengbo, et al. Experimental study

- on low-nitrogen combustion technology of circulating fluidized bed boiler [J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(5): 84-89.
- [6] 韩立鹏,刘冠杰,张东,等. 循环流化床锅炉掺烧污泥的氮氧化物超低排放研究[J]. 应用能源技术, 2018(3): 21-26.
HAN Lipeng, LIU Guanjie, ZHANG Jiandong, et al. Research on NO_x ultra-low Emission in CFB boiler with sludge co-combustion [J]. Applied Energy Technology, 2018(3): 21-26.
- [7] 赵强,向轶,冷健,等. SNCR 脱硝技术在中高温分离器型循环流化床锅炉上的运行分析[J]. 工业炉, 2020, 42(1): 41-45.
ZHAO Qiang, XIANG Yi, LENG Jian, et al. Operation analysis of SNCR denitration technology on circulating fluidized bed boiler with medium and high temperature separators [J]. Industrial Furnace, 2020, 42(1): 41-45.
- [8] 赵强,向轶,张玉洋,等. 煤泥循环流化床锅炉 SNCR 脱硝系统的优化措施研究[J]. 工业加热, 2019, 48(3): 15-19.
ZHAO Qiang, XIANG Yi, ZHANG Yuyang, et al. Research on optimization measures of SNCR denitrification system for coal slime circulating fluidized bed boiler [J]. Industrial Heating, 2019, 48(3): 15-19.
- [9] 陈欢哲,何海霞,万亚萌,等. 燃煤烟气脱硝技术研究进展[J]. 应用化工, 2019, 48(5): 1146-1151, 1155.
CHEN Huanzhe, HE Haixia, WAN Yameng, et al. Research progress of coal-fired flue gas denitrification technology [J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(5): 1146-1151, 1155.
- [10] 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 denitrification [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(9): 2084-2092.
- [11] 张其良,马大卫,陈中元,等. 超低排放改造后 SCR 脱硝出口 NO_x 分布和氨逃逸异常分析[J]. 华电技术, 2019, 41(9): 12-17.
ZHANG Qiliang MA Dawei, CHEN Zhongyuan, et al. Analysis on uneven NO_x distribution and high-concentration escaped ammonia at SCR outlet after ultra-low transformation [J]. Huadian Technology, 2019, 41(9): 12-17.
- [12] 马大卫,张其良,黄齐顺,等. 超低排放改造后 SCR 出口 NO_x 分布及逃逸氨浓度评估研究[J]. 中国电力, 2017, 50(5): 168-171.
MA Dawei, ZHANG Qiliang, HUANG Qishun, et al. Assessment of NO_x distribution and ammonia escape concentration at SCR outlet after ultra-low emission retrofit [J]. Electric Power, 2017, 50(5): 168-171.
- [13] 张杨,蒋志强,孙路长,等. W 火焰锅炉 NO_x 超低排放技术路线分析与讨论[J]. 电力科技与环保, 2019, 35(1): 4-6.
ZHANG Yang, JIANG Zhiqiang, SUN Luchang, et al. Analysis and discussion on ultra-low emission technology route of W-flame boilers [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2019, 35(1): 4-6.
- [14] 唐树芳,唐郭安,喻小伟,等. 六角切圆锅炉改造后 NO_x 排放特性研究[J]. 发电技术, 2018, 39(6): 533-536.
TANG Shufang, TANG Guoan, YU Xiaowei, et al. Research on characteristics of NO_x Emission after reformation for six-corner tangentially fired boiler [J]. Power Generation Technology, 2018, 39(6): 533-536.
- [15] 费明明,崔雷,苏传好,等. 水泥窑烟气脱硝技术现状及展望[J]. 水泥技术, 2019(3): 89-94.
FEI Mingming, CUI Lei, SU Chuanhao, et al. Present situation and prospect of exhaust gas denitrification technology in cement kiln [J]. Cement Technology, 2019(3): 89-94.
- [16] 田明泉,张勇,李娜,等. 余热锅炉尾部烟道脱硝方案数值模拟[J]. 热力发电, 2013, 42(10): 32-38, 77.
TIAN Mingquan, ZHANG Yong, LI Na, et al. Numerical analysis on denitration scheme in flue duct of a waste heat boiler [J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(10): 32-38, 77.
- [17] 钟礼金,宋玉宝. 锅炉 SCR 烟气脱硝空气预热器堵塞原因及其解决措施[J]. 热力发电, 2012, 41(8): 45-47, 50.
ZHONG Lijin, SONG Yubao. Air preheater blocking in boiler with SCR denitrification device: Reason analysis and solutions [J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(8): 45-47, 50.
- [18] 段传和,李春雨,谷小兵. 燃煤电站 SCR 系统尿素热解和催化水解的能耗[J]. 电力科技与环保, 2016, 32(1): 17-18.
DUAN Chuanhe, LI Chunyu, GU Xiaobing. Energy consumption of pyrolysis and catalytic hydrolysis of urea SCR system in coal-fired power station [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2016, 32(1): 17-18.
- [19] 郭伟,崔宁. 尿素热解制氨 SCR 脱硝技术在电厂的应用与优化[J]. 锅炉技术, 2012, 43(3): 77-80.
GUO Wei, CUI Ning. Application and optimization of urea pyrolysis to prepare ammonia SCR denitrification technology in power plant [J]. Boiler Technology, 2012, 43(3): 77-80.
- [20] 张国光,隋艳. 排烟热损失对燃煤工业锅炉热效率的影响[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(4): 77-79, 84.
ZHANG Guoguang, SUI Yan. Influence of heat loss from smoke exhaust on thermal efficiency of industrial coal fired boiler [J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(4): 77-79, 84.
- [21] 张国光,姜英. 锅炉各种热损失对锅炉效率的影响程度分析[J]. 煤质技术, 2009(4): 46-49.
ZHANG Guoguang, JIANG Ying. Discussion on the influence of boiler heat loss on the boiler thermal balance efficiency [J]. Coal Quality Technology, 2009(4): 46-49.