

基于反应温度控制的低氮燃烧调整技术研究与应用

施斌¹, 但振宇¹, 牟克慧¹, 李楠², 赵鹏勃², 孙献斌²

(1. 国家电投集团江西电力有限公司 分宜发电厂, 江西 分宜 336607; 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:为提高选择性非催化还原反应(SNCR)脱硝效率,实现SNCR宽负荷脱硝,以1台130 t/h CFB(循环流化床)锅炉为研究对象,进行低氮燃烧调整试验,通过研究分离器温度控制机理,探究影响分离器温度的影响因素,研究分离器出口温度 T_{sep} 控制方法。结果表明:SNCR温度窗口存在1个高效反应温度点 T_{opt} ,将分离器出口温度精准控制在 T_{opt} 附近可获得更高的SNCR脱硝效率;烟气再循环(FGR)对分离器 T_{sep} 具有调节作用,分别在130、90、70 t/h负荷投入FGR,分离器温度分别提高了30、40、70℃,随负荷降低,FGR对分离器温度的调控能力增强;上、下二次风比例对 T_{sep} 同样起调节作用,通过切换上、下层二次风门, T_{sep} 的调节范围约为30℃; T_{sep} 随一次风率的提高而降低,在4.5%氧量下, T_{sep} 的调节幅度为18℃;在3.5%氧量下, T_{sep} 的调节幅度为35℃,低氧量下一次风率对 T_{sep} 的调节范围更大;锅炉110~130 t/h负荷期间,经分离器温度精准控制在 (850 ± 5) ℃后,质量分数20%氨水由350 kg/h降低至200 kg/h。实炉应用表明,分离器温度控制技术可以在高负荷时优化SNCR反应效率,降低脱硝运行成本,低负荷时可将停止的SNCR反应重启,实现 NO_x 达标排放,节约氨水费用280万元。

关键词:循环流化床锅炉;分离器出口温度;烟气再循环;二次风系统;燃烧调整

中图分类号:TK16 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2022)04-0160-06

Research and application of low nitrogen combustion adjustment technology based on reaction temperature control

SHI Bin¹, DAN Zhenyu¹, MOU Kehui¹, LI Nan², ZHAO Pengbo², SUN Xianbin²

(1. Fenyi Power Plant, SPIC Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Fenyi 336607, China. 2. Huaneng Clean Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of SNCR denitrification and realize SNCR denitrification with wide load, a low nitrogen combustion adjustment test was carried out on a 130 t/h CFB boiler. Through the research on the temperature control mechanism of the separator, the influencing factors affecting the temperature of the separator were explored, and the control method of separator outlet temperature (T_{sep}) were studied. The results show that, there is a most efficient reaction temperature point T_{opt} , in the SNCR temperature window. Higher SNCR denitrification efficiency can be obtained by precisely controlling the T_{sep} around T_{opt} . Flue gas recirculation (FGR) can adjust T_{sep} . FGR is put into operation at 130, 90 and 70 t/h respectively, and the separator temperature is increased by 30, 40 and 70 °C. With the decrease of boiler load, the control ability of FGR to T_{sep} is enhanced. The ratio of upper and lower secondary air also also can adjust T_{sep} . By switching the upper and lower secondary air, The change range of T_{sep} is about 30 °C. T_{sep} decreases with the increase of primary air rate, the adjustment range of T_{sep} is 18 °C at 4.5% oxygen content and the adjustment range of T_{sep} is 35 °C at 3.5% oxygen content, and the regulation range of primary air rate on T_{sep} is larger under low oxygen content. During the boiler load of 110–130 t/h, after the separator temperature is accurately controlled at (850 ± 5) °C, the 20% mass concentration of ammonia is reduced from 350 kg/h to 200 kg/h. The practical application shows that the separator temperature control technology can optimize the SNCR reaction efficiency at high load, and reduce the operation cost of denitration, restart the SNCR reaction at low load to achieve NO_x emission standard, save 2.8 million yuan of

收稿日期:2020-10-21;责任编辑:张鑫 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.20102101

基金项目:国家电投集团科技创新资助项目(26005306200101)

作者简介:施斌(1981—),男,江西新余人,高级工程师。E-mail:34877011@qq.com

通讯作者:李楠(1984—),男,河南焦作人,高级工程师,硕士。E-mail:154405552@qq.com

引用格式:施斌,但振宇,牟克慧,等.基于反应温度控制的低氮燃烧调整技术研究与应用[J].洁净煤技术,2022,28(4):160-165.

SHI Bin, DAN Zhenyu, MOU Kehui, et al. Research and application of low nitrogen combustion adjustment technology based on reaction temperature control[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(4): 160-165.



移动阅读

ammonia cost.

Key words: CFB boiler; separator outlet temperature; flue gas recirculation; secondary air; combustion adjustment

0 引言

选择性非催化还原反应(SNCR)脱硝广泛应用于循环流化床(CFB)锅炉,由于旋风分离器对还原剂颗粒的充分扰动,SNCR脱硝效率最高约80%。影响SNCR脱硝效率的关键因素为反应温度,已有研究表明^[1-3],SNCR反应的温度窗口为800~1 150℃,该因素是导致目前多数CFB锅炉启动阶段NO_x排放超标的直接原因。入炉煤挥发分、灰分等参数偏离设计值、深度调峰运行同样导致分离器温度偏移而使SNCR反应效率降低,尤其是入炉煤灰分低于20%时,锅炉负荷略降低,从而导致分离器温度明显下降,造成氨氮比大幅增加,甚至SNCR反应终止。

国内CFB锅炉NO_x超低排放技术研究主要在2方面:①通过对锅炉进行深度空气分级燃烧改造、优化布风板阻力、提效分离器、增加烟气再循环(FGR)等手段降低NO_x原始生成;②利用数值模拟提高还原剂扩散效果,通过增加反应表面积提高SNCR反应效率。陈建军等^[4-5]通过提高二次风入射高度、增加受热面、增加FGR等手段降低密相区温度,在额定负荷下使NO_x质量浓度降至50 mg/m³以下,张向宇等^[6]通过监测全炉膛温度场

分布,根据SNCR反应区温度窗口优化还原剂喷入位置,提高了脱硝效率;李竞岷等^[7]通过降低无效颗粒占比,重构炉内流态控制床层温度和氧化还原氛围,使某220 t/h CFB锅炉NO_x原始质量浓度由192 mg/m³降至113 mg/m³。前人研究多侧重于锅炉改造以降低NO_x原始排放量,鲜见控制分离器温度以适应高效脱硝温度窗口相关报道。笔者通过实炉试验,分析烟气再循环、一次风率、上下二次风比率等关键运行参数对分离器温度的影响,利用控制分离器温度,使SNCR始终处于高效反应状态下,实现NO_x超低排放、节约氨水用量,为相关人员提供参考。

1 研究对象

某电厂锅炉型号为YG-130/9.8-M,单炉膛,自然循环,全悬吊结构,全钢架π型布置。炉膛采用膜式水冷壁、绝热式旋风分离器,尾部竖井烟道布置两级3组对流过热器,过热器下方布置3组省煤器及一、二次风各3组空气预热器。锅炉设置10%烟气流量的FGR系统,从引风机出口送至一次风机入口。三层二次风口距离布风板高度分别为3 600、2 626和1 626 mm。锅炉采用SNCR脱硝方式,以2台绝热式旋风分离器为反应器。锅炉常用燃料为烟煤,同时掺入5%干污泥,入炉燃料分析见表1。

表1 入炉燃料工业分析与元素分析

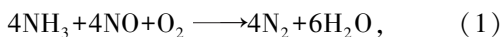
Table 1 Proximate and ultimate analysis of fuel

燃料	工业分析/%					元素分析/%				$Q_{gr,ar}/$ (MJ·kg ⁻¹)	$Q_{net,ar}/$ (MJ·kg ⁻¹)
	V_{dar}	A_{ar}	M_t	FC_{ad}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	$S_{t,ar}$		
入炉煤	37.09	11.19	22.60	47.75	52.79	3.14	9.04	0.70	0.54	27.06	19.77
干污泥	87.36	35.36	42.50	4.59	10.19	0.97	8.68	1.89	0.41	8.38	3.64

2 研究方法

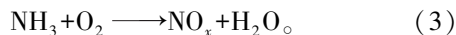
2.1 分离器温度控制机理

SNCR反应复杂,卢志民^[8]通过敏感性分析,将MILLER等^[9]、ZABETTA等^[10]提出的基元反应简化为14步,可较好预测NO、NH₃浓度随温度的变化规律。反应式为:



NH₃/NO反应进行的关键连锁因子OH⁻的生成速率与温度密切相关,当达到一定温度,NH₂离子与NO开始产生OH⁻,此时脱硝效率较低,随着温度

升高,OH⁻大量生成,NH₃和NO反应快速进行,式(1)、式(2)占据主导地位,脱硝效率提高,当反应器温度继续升高,NH₂离子与OH⁻氧化反应速率加快,生成NO,反应式为



温度上升过程中,式(3)中NO_x生成量逐渐抵消式(1)、式(2)NO还原量,脱硝效率先升高后降低。因此,对于脱硝效率而言,反应温度存在一个高效点称为高效反应温度点 T_{opt} 。LUCAS等^[11],王林伟等^[12]通过不同试验装置分别发现 T_{opt} 为952和900℃;李明磊^[13]利用Fluent软件通过两步简化机理发现 T_{opt} 为925℃。

2.2 分离器温度控制方法

燃用低挥发分煤种的 CFB 锅炉绝热式旋风分离器出口温度普遍高于进口温度^[14],挥发分 20% 的分离器温升 $T_{sep,r}$ 在 20 °C 左右,挥发分 10% 时 $T_{sep,r}$ 可达 80 °C 左右, $T_{sep,r}$ 的存在说明烟气中固体颗粒在分离器内可以进一步燃烧, $T_{sep,r}$ 越大,颗粒进入分离器前未燃尽物质含量越高。正常情况下,锅炉的燃烧调整力求降低 $T_{sep,r}$,减小燃烧的不完全损失,提高锅炉效率。韩奎华等^[15]采用锅炉燃烧模拟装置燃烧石油气,发现在 800~1 150 °C,SNCR 反应效率相差悬殊,反应效率 70% 以上时的温度反应区间只有 150 °C 左右,SNCR 反应温度窗口如图 1 所示。分离器出口温度随负荷过度降低会导致 SNCR 反应效率降低,还原剂耗量成倍增加,ARTUR 等^[16]在 1 台 966 MW_{th} CFB 锅炉燃烧调整试验,结果显示 T_{opt} 在 720~790 °C。 T_{opt} 随燃烧设备、还原剂类型、运行工况的不同而不同。通过试验确定 T_{opt} ,并在不同负荷下将 T_{opt} 始终控制在高效反应区间内,可大幅降低脱硝运行成本。

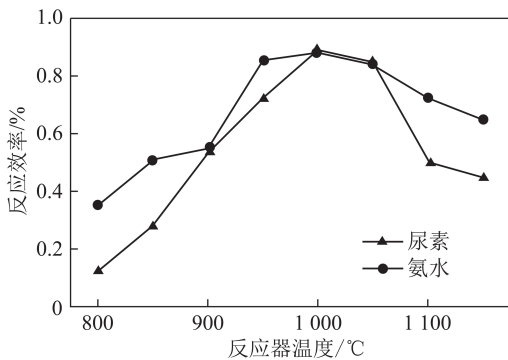


图 1 SNCR 反应温度窗口

Fig.1 SNCR temperature window

基于分离器温度控制的 SNCR 脱硝技术,利用燃料的后燃特性,控制燃料燃烧时间,实现分离器温度控制。高负荷下,炉内循环物料充足,分离器入口温度通过上升的循环物料可轻易达到反应温度窗口,此时应保证物料在炉膛内充分燃烧,降低分离器内燃烧份额,降低 $T_{sep,r}$,防止分离器温度超过 SNCR 温度窗口上限;低负荷情况下,炉膛输入热量减少,携带热量的循环物料量减少,使分离温度降低,此时应控制燃料燃烧延迟,提高分离器内燃烧份额,提高 $T_{sep,r}$,防止分离器温度低于温度窗口下限,从而实现低负荷 SNCR 高效脱硝。

3 分离器温度影响因素

3.1 FGR 对分离器温度的影响

研究表明,FGR 对高床温有明显的改善作用。

胡满银等^[17]通过数值模拟发现投入 FGR 时,炉内平均温度和最大温度均明显降低;陈建军等^[4]对某 130 t/h CFB 锅炉实炉改造,发现 10% 烟气量的 FGR 可以降低床温 30~50 °C,ARTUR^[18]在 1 台 1 296 t/h 的 CFB 锅炉试验发现,FGR 可以均衡炉膛纵向温度,上述现象均由燃料后燃现象导致,燃料充分燃烧的必要条件是 O₂ 充足,FGR 通过将 8% O₂ 的烟气送入炉膛替代部分 21% O₂ 的一次风,炉膛截面风速不变而 O₂ 降低,由于燃料炉内停留时间没有改变,O₂ 降低必然引起燃烧延迟,床层温度降低。对 130 t/h CFB 锅炉的 FGR(按 10% 烟气量设计)进行了性能试验,FGR 对床温、分离器入口和出口温度影响如图 2 所示。由图 2(a)、图 2(b) 可知,随着 FGR 投入,由于物料燃烧逐渐延迟,3 个工况床层温度、分离器入口温度显著降低,且各工况降幅较一致,床层温度均降低 40 °C 左右,炉膛上部温度(分离器入口处)130 t/h 负荷降低 40 °C,90 和 70 t/h 负荷降低 20 °C,炉膛上部温度的降幅随负荷的降低逐渐减小,FGR 对炉膛纵向温差的调节在较低负荷下更加明显。随后燃程度加深, $T_{sep,r}$ 逐渐增大, T_{sep} 逐渐升高。由图 2(c) 可知,130 t/h 负荷分离器温度提高 30 °C,90 t/h 负荷提高 40 °C,70 t/h 负荷提高 70 °C,随负荷降低,FGR 对 T_{sep} 的调控能力增强,这是由于负荷降低后,炉膛温度随之降低,物料不完全燃烧颗粒增加,分离器内部燃烧份额增加,当采用绝热式旋风分离器时,分离器温度明显上升。

3.2 二次风对分离器温度的影响

对上、下二次风比例进行试验,结果如图 3 所示。工况 1 保持中、下层风门开启,上层风门关闭,逐渐开启上层风门,通过适当关闭下层风门的方式控制二次风总量不变。结果表明,上层风门开启可提高分离器出口温度 30 °C 左右。工况 2 保持上、中层风门开启,下层风门关闭,逐渐开启下层风门,通过适当关闭上层风门的方式控制二次风总量不变。结果表明,下层风门开启可降低分离器出口温度 28 °C 左右。李楠等^[19]研究表明,通过调节上、下二次风比例,可改变二次风整体入射高度,从而改变密相区高度。密相区高度降低,未燃尽的燃料颗粒提前接触二次风,燃烧提前发生, T_{sep} 降低;密相区高度增加,未燃尽颗粒燃烧推迟, T_{sep} 升高。孙绍增等^[20]通过搭建冷态试验台研究了二次风入射高度对炉内物料浓度轴向分布影响,发现二次风高度提高后,密相区在炉内作用范围增大,稀相区作用范围相应减小,炉内高浓度区域向上延伸。王正阳等^[21]系统研究了二次风分布对 CFB 锅炉炉内气固混合及燃烧的影响。

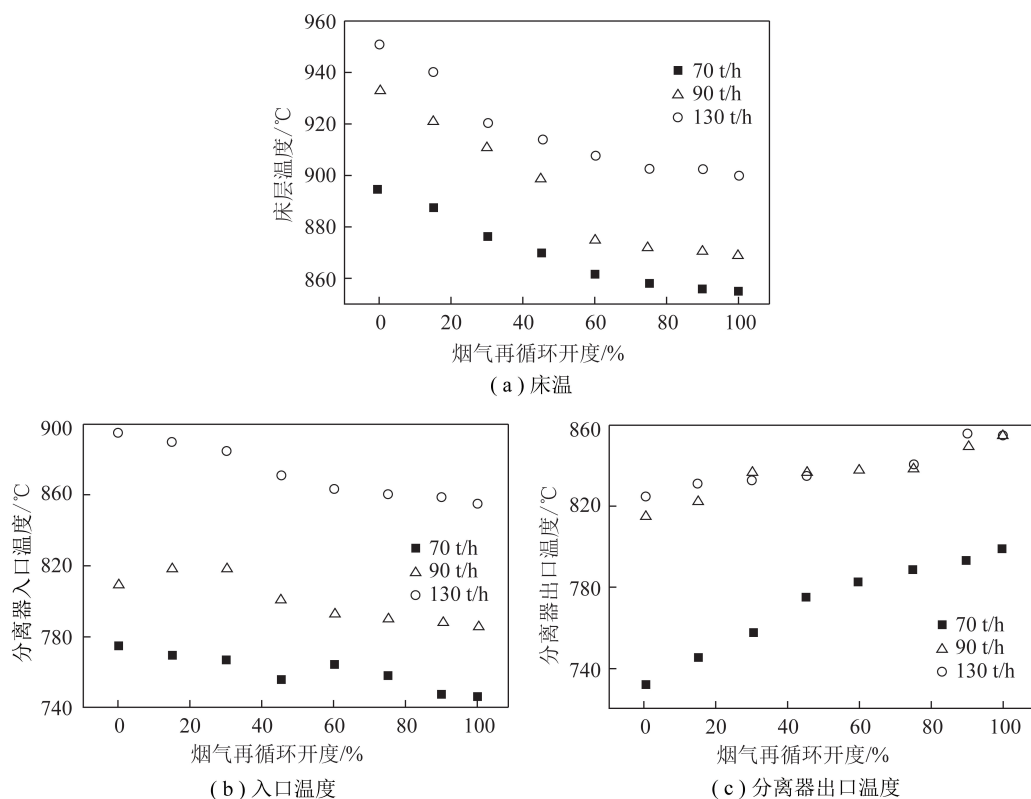


图2 FGR对床温、分离器入口和出口温度影响

Fig.2 Effect of FGR on bed temperature, separator inlet and outlet temperature

响,认为降低中、下层二次风量可以抑制密相区燃烧,上层二次风量的增加使二次风射流的穿透性增强,加强了稀相区燃烧,从而提高 T_{sep} 。笔者认为这3种观点一致,由于试验前后炉膛截面风速不变,对密相区燃烧的抑制或浓度、范围的增加,必然导致密相区未燃尽的颗粒增加,增加的未燃尽颗粒进入稀相区燃烧^[22-25],提高 T_{sep} 。

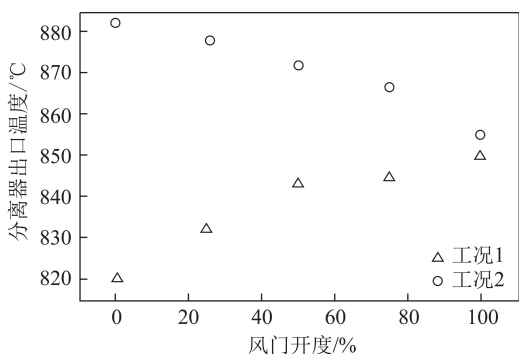


图3 二次风对分离器出口温度影响

Fig.3 Effect of secondary air on separator outlet temperature

3.3 一次风对分离器温度的影响

在4.5%、3.5%氧量下研究一次风率对 T_{sep} 的影响,如图4所示。维持锅炉氧量4.5%,减小二次风量,增加一次风量,使一次风率由0.52提高至0.59, T_{sep} 由835 °C降低至817 °C;维持锅炉氧量3.5%,一

次风率由0.56提高至0.64, T_{sep} 由855 °C降低至820 °C。2种试验工况下, T_{sep} 均随一次风率的提高而降低。这是因为总风量不变时,相比较低一次风率,较高的一次风率为密相区燃烧的初期提供了更多 O_2 ,使高一次风率下的燃烧提前,分离器内物料燃尽率提高,放热量降低, T_{sep} 降低。

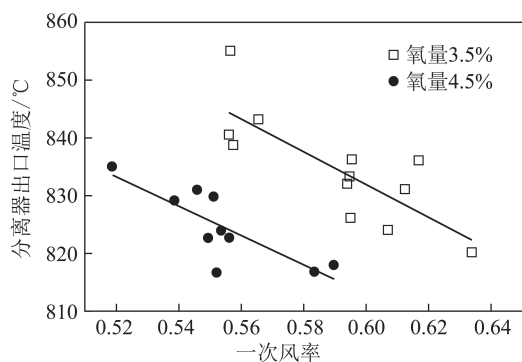


图4 一次风对分离器出口温度影响

Fig.4 Effect of primary air on separator outlet temperature

4.5%氧量下, T_{sep} 调节幅度为18 °C;3.5%氧量下, T_{sep} 调节幅度为35 °C,低氧量下,一次风率对 T_{sep} 调节范围更大,这是由于低氧量下炉膛出口物料未燃尽碳含量更高,这在试验得到验证,如图4所示,未燃尽的碳导致低氧量下 T_{sep} 整体处于较高水平。未燃尽碳所含的潜在热量可由一次风率控制,

故低氧量下 T_{sep} 的控制更加灵活。

4 分离器温度控制的应用

利用温度测量组件检测分离器出口温度 T_{sep} , 计算分离器的实际温升速率 $T_{sep,sj}$, 将检测到的 T_{sep} 与 T_{opt} ($T_{opt,min} \sim T_{opt,max}$), $T_{sep,sj}$ 与分离器预设温升 $T_{sep,ys}$ 进行比较: ① 当 $T_{sep} > T_{opt,max}$ 或 $T_{sep,sj} > T_{sep,ys}$ 时, 逻辑控制组件生成分离器温度高信号或分离器温升速率高信号, 向上二次风门发出关小指令, 向下二次风门发出开大指令, 向 FGR 发送减小出力指令, 使 T_{sep} 降低到 T_{opt} 范围内; ② 当检测到 $T_{sep} < T_{opt,min}$ 或 $-T_{sep,sj} < -T_{sep,ys}$ 时, 逻辑控制组件生成分离器温度低信号或分离器温降速率高信号, 向上二次风门发送开大指令, 向下二次风门发送关小指令, 向 FGR 发送增加出力指令, 使 T_{sep} 升高到 T_{opt} 范围内; ③ 当 $T_{opt,min} \leq T_{sep} \leq T_{opt,max}$, 同时 $|T_{sep,sj}| \leq |T_{sep,ys}|$ 时, 逻辑控制组件生成分离器温度正常信号或分离器温降速率正常信号, 向二次风系统和 FGR 发送保持指令, T_{sep} 维持在 T_{opt} 范围内。因此, 可在反应器温度偏离温度窗口导致还原剂耗量增加或反应停止时, 提高反应效率, 降低循环流化床锅炉脱硝运行成本^[21]。

基于分离器温度控制的低氮燃烧调整发现, 研究对象的 T_{opt} 为 850 °C。研究对象额定负荷 130 t/h, 负荷在 80~110 t/h, 分离器温度较低, SNCR 脱硝效率低甚至不反应, 导致 NO_x 排放超标或氨氮比过高, 通过控制分离器温度可实现低负荷 SNCR 反应重启, NO_x 排放明显降低, 保证全厂总排口 NO_x 超低标准, 避免低负荷 NO_x 超标。同时, 锅炉 110~130 t/h 负荷, 质量分数 20% 氨水耗量约 350 kg/h, 经分离器温度精准控制在 (850±5) °C 后, 质量分数 20% 氨水可控制在 200 kg/h 以下, 节约氨水费用约 280 万元/a。全年低负荷运行时间按 2 000 h 估算, 2 台炉每年可多收益超低排放电价补贴 50 万元左右。

5 结 论

1) SNCR 反应的温度窗口存在一个最高效反应温度点 T_{opt} , T_{opt} 随燃烧设备、还原剂类型、运行工况变化而不同。可通过燃烧调整试验确定 T_{opt} , 后将分离器温度精准控制在 T_{opt} 附近以获得较高的 SNCR 反应效率。

2) 烟气再循环系统对 T_{sep} 具有调节作用, 由于低负荷炉内未燃尽颗粒的增加, 随负荷降低, 烟气再循环对 T_{sep} 的调节能力增强。

3) 上、下二次风比例对 T_{sep} 同样起调节作用, 通过切换上、下层二次风门, 可控制分离器出口温度。

4) 分离器温度随一次风率的提高而降低, 且氧量较低时, 一次风率对分离器温度的调节更加灵活。

5) 实炉应用表明, 通过分离器温度控制, 在高负荷时优化 SNCR 反应效率, 降低脱硝运行成本; 低负荷时可将停止的 SNCR 反应重启, 实现 NO_x 达标排放。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 史磊, 张世鑫. 循环流化床锅炉 SNCR 脱硝技术优化改造 [J]. 洁净煤技术, 2018, 24(6): 107-111.
SHI Lei, ZHANG Shixin. Optimization of SNCR denitration technology in circulating fluidized bed boiler [J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(6): 107-111.
- [3] 周棋, 王勇, 刘松霖, 等. 煤粉燃烧过程强化脱硝技术研究 [J]. 洁净煤技术, 2019, 25(4): 111-118.
ZHOU Qi, WANG Yong, LIU Songlin, et al. Research on enhanced denitration technology in pulverized coal combustion process [J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(4): 111-118.
- [4] 陈建军, 周俊虎, 朱占恒, 等. 130 t/h 循环流化床锅炉低氮燃烧改造及调整试验 [J]. 热力发电, 2017, 46(2): 81-93.
CHEN Jianjun, ZHOU Junhu, ZHU Zhanheng, et al. Low- NO_x combustion retrofitting and optimal adjustment tests for a 130 t/h CFB boiler [J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(2): 81-93.
- [5] 王勇. 240 t/h 循环流化床锅炉低氮燃烧技术应用探讨 [D]. 济南: 山东大学, 2017: 38-43.
- [6] 张向宇, 乔海勇, 周怀春, 等. 基于燃烧温度场测量的 SNCR 优化调整试验 [J]. 热力发电, 2014, 43(11): 92-96.
ZHANG Xiangyu, QIAO Haiyong, ZHOU Huaichun, et al. Optimization adjustment research on SNCR based on combustion temperature distribution measurement [J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(11): 92-96.
- [7] 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 Jingji, YANG Hairui, LYU Junfu, 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.
- [8] 卢志民. SNCR 反应机理及混合特性研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 122-132.
- [9] MILLER J A, BOWMAN C T. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1989, 15(4): 287-338.
- [10] ZABETTA E C, HUPA M. A detailed kinetic mechanism including methanol and nitrogen pollutants relevant to the gas-phase combustion and pyrolysis of biomass-derived fuels [J].

- Combustion and Flame, 2008, 152: 14-27.
- [11] LUCAS D, BROWN N J. Characterization of the selective reduction of NO by NH₃ [R]. Washington: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2014: 1-10.
- [12] 王林伟, 段钰锋, 姚婷, 等. SNCR脱硝及添加CO对其特性的影响[J]. 热力发电, 2016, 45(5): 41-47.
WANG Linwei, DUAN Yufeng, YAO Ting, et al. Experimental study on SNCR process of the effect of CO additive on denitration performance [J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(5): 41-47.
- [13] 李明磊. 循环流化床锅炉选择性非催化还原反应脱硝数值模拟与应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2014: 33-56.
- [14] 张敏. CFB锅炉燃烧优化调整试验方法研究与应用[J]. 热力发电, 2009, 38(9): 63-69.
ZHANG Min. Research and application of tuning test for optimizing CFB boiler combustion [J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(9): 63-69.
- [15] 韩奎华, 路春美, 王永征, 等. 选择性非催化还原脱硝特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 24(14): 80-85.
HAN Kuihua, LU Chunmei, WANG Yongzheng, et al. Experimental study on de-NO_x characteristics of selective non-catalytic reduction [J]. Proceeding of the CSEE, 2008, 24(14): 80-85.
- [16] ARTUR Błaszczyk, WOJCIECH Nowak, SZYMON Jagodzick. Effects of operating conditions on de-NO_x system efficiency in supercritical circulating fluidized bed boiler [J]. Journal of Power Technologies, 2013, 93(1): 1-8.
- [17] 胡满银, 乔欢, 杜欣, 等. 烟气再循环对炉内氮氧化物生产影响的数值模拟[J]. 华北电力大学学报, 2007, 34(6): 77-82.
HU Manyin, QIAO Huan, DU Xin, et al. Numerical simulations of the influence of flue gas recycle on nitrogen oxide formation in boiler [J]. Journal of North China Electric Power University, 2007, 34(6): 77-82.
- [18] ARTUR Błaszczyk. Effect of flue gas recirculation on heat transfer in a supercritical circulating fluidized bed combustor [J]. Archives of Thermodynamics, 2015, 36(3): 61-83.
- [19] 李楠, 张世鑫, 赵鹏勃, 等. 低氮燃烧技术在循环流化床锅炉上的应用与分析[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.
- [20] 孙绍增, 王正阳, 杜明坤, 等. 循环流化床中心二次风的设计及实验研究[J]. 热能动力工程, 2010, 25(1): 51-56.
SUN Shaozeng, WANG Zhengyang, DU Mingkun, et al. Design and experimental study of the centrally-located secondary air of a circulating fluidized bed [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2010, 25(1): 51-56.
- [21] 王正阳, 秦明, 孙绍增, 等. 二次风分布对CFB锅炉炉内气固混合及燃烧的影响[J]. 热能动力工程, 2009, 24(2): 205-210.
WANG Zhengyang, QIN Min, SUN Shaozeng, et al. Influence of secondary air distribution on the gas-solid mixing and combustion condition in a CFB boiler furnace [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2009, 24(2): 205-210.
- [22] 孙献斌, 黄中. 大型循环流化床锅炉技术与工程应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 23.
- [23] 巴苏P, 弗雷泽S A. 循环流化床锅炉的设计与运行[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 138.
- [24] MURAT Varol, AYSEL T Atımtay, HAYATI Olgun. Emission characteristics of co-combustion of a low-calorie and high-sulfur lignite coal and woodchips in a circulating fluidized bed combustor: Part 2. Effect of secondary air and its location [J]. Fuel, 2014, 130(15): 1-9.
- [25] 李楠, 赵鹏勃, 张世鑫, 等. 一种循环流化床锅炉高效SNCR脱硝系统: ZL 2018 2 2222169.8 [P]. 2020-02-07.