

# 超临界 350 MW 循环流化床锅炉宽负荷 NO<sub>x</sub> 排放特性及控制技术

杨敬池<sup>1</sup>, 王菁<sup>1</sup>, 王鹏程<sup>2</sup>, 王飞<sup>1</sup>, 杨凤玲<sup>1</sup>

(1.山西大学 资源与环境工程研究所 国家环境保护煤炭废弃物资源化高效利用技术重点实验室, 黄河流域资源增效减碳教育部工程研究中心, 山西太原 030006; 2.山西平朔煤矸石发电有限责任公司, 山西朔州 036000)

**摘要:**“双碳”背景下,随着新能源装机容量的持续增加,火电机组逐步从主体性电源向辅助服务型电源转变,由于新能源具有间歇性特点,火电机组需频繁进行变负荷以深度调峰的形式维持电网稳定。为解决深度调峰过程中低负荷下的 NO<sub>x</sub> 排放控制这一行业共性难题,以某超临界 350 MW 循环流化床锅炉为研究对象,分析深度调峰条件下锅炉机组运行数据,综合床温、煤种特性、固硫剂添加等多方面因素对 NO<sub>x</sub> 质量浓度的影响,探究变负荷及中低负荷工况下 NO<sub>x</sub> 排放特性及影响机制。研究发现床温的变化与负荷呈正相关,温度降低时挥发分氮的氧化作用明显削弱,减少了 NO<sub>x</sub> 的生成;但随着锅炉负荷连续降低,为保持流化状态,密相区过量空气系数增加,导致 NO<sub>x</sub> 质量浓度相对中高负荷时更高;同时燃用硫分更高的煤种时,炉内脱硫所需的石灰石量增加,对 NO<sub>x</sub> 的催化作用越明显。为控制 NO<sub>x</sub> 超低排放,采用分区低氮燃烧技术和上二次风 SNCR 脱硝技术来进行调节。分区低氮燃烧精细化合理化控制给煤量、布风量分布,合理匹配燃料与空气量使得 NO<sub>x</sub> 得到精细化控制;而上二次风 SNCR 改造技术则在更合适位置喷入还原剂,使得脱硝反应处在较合理的温度区间内,从而提高脱硝效率。结果表明这 2 种技术可以有效控制低负荷工况下的 NO<sub>x</sub> 排放,为火力发电机组在新能源频繁波动的背景下保持稳定运行提供了可行的技术路径,对实现更低的排放水平、保障电网稳定运行具有重要意义。

**关键词:**循环流化床锅炉;宽负荷运行;石灰石对 NO<sub>x</sub> 影响;分区低氮控制;二次风 SNCR

**中图分类号:** TQ53; TK114 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2025)01-0061-08

## Characterization and mitigation of NO<sub>x</sub> emissions across a wide load range in supercritical 350 MW circulating fluidized bed boiler

YANG Jingchi<sup>1</sup>, WANG Jing<sup>1</sup>, WANG Pengcheng<sup>2</sup>, WANG fei<sup>1</sup>, YANG Fengling<sup>1</sup>

(1. Engineering Research Center of Ministry of Education for Resource Efficiency Enhancing and Carbon Emission Reduction in Yellow River Basin, National Key Laboratory for Efficient Resource Utilization Technologies of Coal Waste, Institute of Resources and Environmental Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Shanxi Pingshuo Gangue Power Generation Limited Liability Company, Shuozhou, 036000, China)

**Abstract:** Under the background of “dual carbon”, with the continuous increase of new energy installed capacity, thermal power units are gradually transforming from primary power sources to auxiliary service power sources. Due to the intermittent nature of new energy, thermal power units need to frequently change loads to maintain grid stability in the form of deep peak shaving. In order to solve the common problem of NO<sub>x</sub> emission control under low load during deep peak shaving, this paper takes a certain supercritical 350 MW circulating fluidized bed boiler as the research object, analyzes the operating data of the boiler unit under deep peak shaving conditions, and comprehensively investigates the influence of various factors such as bed temperature, coal type characteristics, and sulfur fixing agent

收稿日期: 2023-11-03; 策划编辑: 常明然; 责任编辑: 刘雅清 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.23110303

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2020YFB0606203); 国家自然科学基金联合基金项目 (U21A20321); 国家自然科学基金基金青年基金资助项目 (22108162)

作者简介: 杨敬池 (1999—), 男, 山西临汾人, 硕士。E-mail: y15536307862@126.com

通讯作者: 王菁 (1988—), 女, 山西太原人, 副教授, 博士。E-mail: jingwang@sxu.edu.cn

引用格式: 杨敬池, 王菁, 王鹏程, 等. 超临界 350 MW 循环流化床锅炉宽负荷 NO<sub>x</sub> 排放特性及控制技术 [J]. 洁净煤技术, 2025, 31(1): 61-68.

YANG Jingchi, WANG Jing, WANG Pengcheng, et al. Characterization and mitigation of NO<sub>x</sub> emissions across a wide load range in supercritical 350 MW circulating fluidized bed boiler [J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(1): 61-68.



addition on  $\text{NO}_x$  mass concentration, and explores the  $\text{NO}_x$  emission characteristics and influencing mechanisms under variable load and low load conditions. Research has found that changes in bed temperature are positively correlated with load, and the oxidation of volatile nitrogen is significantly weakened when the temperature decreases, reducing the generation of  $\text{NO}_x$ ; but as the boiler load continues to decrease, in order to maintain the fluidized state, the excess air coefficient in the dense phase zone increases, resulting in a relatively higher  $\text{NO}_x$  concentration compared to medium to high loads; when using coal with higher sulfur content simultaneously, the amount of limestone required for desulfurization in the furnace increases, and the effect of promoting  $\text{NO}_x$  becomes more significant. To control ultra-low  $\text{NO}_x$  emissions, zone based low nitrogen combustion technology and upper secondary air SNCR denitrification technology are used for regulation. Refine and rationalize the control of coal feeding and air distribution in low nitrogen combustion zones, and match the fuel and air quantities reasonably to achieve precise control of  $\text{NO}_x$ ; the secondary air SNCR retrofit technology sprays reducing agents at more suitable locations to keep the denitrification reaction within a reasonable temperature range, thereby improving denitrification efficiency. The results indicate that these two technologies can effectively control  $\text{NO}_x$  emissions under low load conditions, providing a feasible technical path for thermal power generation units to maintain stable operation in the context of frequent fluctuations in new energy. This is of great significance for achieving lower emission levels and ensuring stable operation of the power grid. The study confirms that employing zoned low- $\text{NO}_x$  combustion strategies or denitrification techniques such as secondary air SNCR can effectively reduce  $\text{NO}_x$  emissions during low-load operations, thereby addressing this environmental challenge in the power generation industry.

**Key words:** circulating fluidised bed boiler; wide load operation; limestone effect on  $\text{NO}_x$ ; zonal low- $\text{NO}_x$  control; secondary air SNCR

## 0 引言

与传统的煤粉炉、层燃炉相比,循环流化床锅炉(CFB)具有煤种适应性广、运行控制好、燃烧效率高、低污染物排放等优势,适合我国复杂的煤炭能源现状<sup>[1-2]</sup>。自2013年神华国神集团四川白马发电厂600 MW超临界机组CFB锅炉正式投运以来,超临界CFB锅炉技术在我国快速发展。截至2023年,我国已有60台超临界CFB锅炉正式投运。随着近年来能源电力低碳发展战略的实施,火电机组需求增长逐步放缓,而新能源装机容量与发电量保持着较高增速。截至2022年底,我国风电装机容量与太阳能发电装机容量分别同比增长11.2%与28.1%。而火电装机容量仅同比增长2.7%,且火电发电量比重已从2012年的78.6%持续下降到2022年的69.8%<sup>[3]</sup>。在新能源发电的不断冲击下,火力发电由主体性电源逐步向辅助服务型电源转变。但在风小、枯水期、阴雨天等特殊条件下,新能源发电不能保证稳定供电,因此火电机组需频繁进行变负荷运行。循环流化床锅炉机组具备宽负荷条件下稳定运行的能力,是保障新能源上网的有利支撑<sup>[4-5]</sup>。

在CFB机组调峰变负荷过程中,降低负荷使炉膛内温度、氧气体积分数等变化显著,导致 $\text{NO}_x$ 排放量不同与常规负荷。为了保持低负荷流化状态,无法使用传统贫氧低氮燃烧方法;另外低负荷下烟温降低,使选择性非催化还原反应(SNCR)偏离适宜温区, $\bullet\text{OH}$ 生成受限,抑制了 $\text{NH}_3$ 还原 $\text{NO}$ 链式反应,致使CFB炉依赖的脱硝技术效率大幅降低。因此,低负荷时 $\text{NO}_x$ 质量浓度达到超低排放要求变得困难<sup>[6-7]</sup>,这是目前公认的行业难题。因此分析

CFB锅炉宽负荷、变负荷运行过程 $\text{NO}_x$ 的生成规律,优化低负荷运行 $\text{NO}_x$ 控制技术具有重要实际意义。

柯希玮等<sup>[8]</sup>通过探究CFB锅炉燃烧中 $\text{NO}_x$ 的异相还原机理和床内流动特性与炉内还原性气氛的关系,提出了改善循环系统性能强化 $\text{NO}_x$ 还原的低氮燃烧技术路线:①减小给煤和石灰石粒度、采用高效分离器、低流阻返料阀以减少床料中粗颗粒的存量;②通过减小料层厚度控制循环量;③反应温度应设计运行在850℃左右。于洁等<sup>[9]</sup>在1台140 t/h循环流化床锅炉上进行了实炉试验与改造研究,发现提高上二次风高度以及风量能够明显抑制 $\text{NO}_x$ 生成。陈建军等<sup>[10]</sup>通过对130 t/h循环流化床锅炉进行低氮改造和调整试验发现:通过增加烟气再循环系统可以降低床温、降低密相区氧量和形成还原性氛围。除低氮燃烧技术外,王文杰等<sup>[11]</sup>研究发现,在循环流化床锅炉优良的低氮燃烧特性基础上,在旋风分离器入口烟道处增加合适的SNCR脱硝设备,可以将锅炉 $\text{NO}_x$ 排放质量浓度控制在100 mg/ $\text{Nm}^3$ (氧体积分数6%,干基)以内,氨逃逸量控制在8 mg/ $\text{Nm}^3$ 以内。罗朝晖等<sup>[12]</sup>则发现在分离器区域使用SNCR脱硝系统时,选择合理的还原剂喷射点及合适的氨氮比,控制反应温度800~950℃、反应停留时间大于1 s、还原剂和烟气良好的混合情况,可以将 $\text{NO}_x$ 的排放量控制在100 mg/ $\text{Nm}^3$ (氧体积分数6%,干基)以下,氨逃逸量控制在4~8 mg/ $\text{Nm}^3$ 。

近来,低负荷下循环流化床锅炉 $\text{NO}_x$ 控制技术的开发引起行业内广泛关注。段守保等<sup>[13]</sup>在1台280 t/h CFB锅炉上开展了实炉试验,通过在CFB锅炉炉膛中部增加喷枪以及利用氨水替代尿素作为

SNCR 还原剂,提高了锅炉在低负荷时的 SNCR 脱硝性能。元泽民等<sup>[14]</sup>对某超临界 350 MW CFB 锅炉建立了一维燃烧准静态数学模型,分析采用烟气再循环系统后炉内低负荷时的温度分布与 NO<sub>x</sub> 排放。结果表明:在低负荷投入烟气再循环系统时,NO<sub>x</sub> 原始排放降低,同时避免了因一次风份额过低导致炉内密相区流化质量不高的问题。吴剑恒等<sup>[15]</sup>在 1 台 75 t/h 中温分离 CFB 锅炉上进行实炉试验,通过适当减小过量空气系数以及控制二次风率在 45%,从源头上降低了 NO<sub>x</sub> 的生成量。综上,目前关于 300 MW 级以上等级锅炉低负荷下低氮燃烧控制技术的报道较少。

本文以某超临界 350 MW CFB 锅炉为研究对象,分析深度调峰变负荷条件下锅炉机组运行数据,探究变负荷及低负荷工况下 NO<sub>x</sub> 排放特性及影响机制,并提出相应的低负荷 NO<sub>x</sub> 控制技术。通过对比中低负荷稳定运行下 NO<sub>x</sub> 质量浓度,综合床温、煤种特性、固硫剂添加等多方面因素对 NO<sub>x</sub> 质量浓度的影响,探讨低负荷工况 NO<sub>x</sub> 调控机制,进而提出适应低负荷运行的分区低氮控制技术和二次风位置 SNCR 技术,并进行工程验证。本研究为同类型 350 MW 机组中低负荷运行 NO<sub>x</sub> 调控提供有力技术支撑。

## 1 锅炉概况与主要设计特点

本文所选锅炉为某超临界 350 MW CFB 锅炉,单炉膛、半露天 M 型布置、平衡通风、一次中间再热、循环流化床燃烧方式,机组配备 3 个高温冷却式旋风分离器进行气固分离。锅炉主要设计参数与设计煤种煤质见表 1 与表 2。

该锅炉有前墙 10 个给煤口,后墙 6 个排渣口。

表 1 锅炉主要设计参数

Table 1 Boiler main design parameters

项目	BMCR	BRL
过热蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1 184.34	1 127.94
过热蒸汽压力/MPa	25.31	25.31
过热蒸汽温度/℃	571.0	571.0
再热蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1 000.76	9 499.45
再热器进口蒸汽压力/MPa	4.76	4.51
再热器出口蒸汽压力/MPa	4.54	4.30
再热器进口蒸汽温度/℃	329.7	324.0
再热器出口蒸汽温度/℃	568.0	5 688.0
给水温度/℃	286.3	282.7

表 2 锅炉设计煤种

Table 2 Boiler design coal type

项目名称	设计煤种
收到基碳/%	44.69
收到基氢/%	2.38
收到基氧/%	3.32
收到基氮/%	0.67
收到基全硫/%	2.01
收到基灰分/%	38.05
收到基水分/%	8.88
空气干燥基水分/%	0.53
收到基挥发分/%	10.06
可燃基挥发分/%	18.96
收到基低位发热量/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	16.97

炉膛内前墙还布置了 12 片屏式过热器和 6 片屏式再热器管屏,以及 5 片水冷分隔屏。为尽量确保各屏式受热面受热均匀,高温屏式再热器、中温屏式过热器、高温屏式过热器采取交叉间隔布置的方式。锅炉采用炉内脱硫和湿法脱硫工艺协同脱除 SO<sub>2</sub>,采用在旋风分离器入口处安装尿素喷枪进行 SNCR 脱硝。

## 2 锅炉变负荷下动态运行特性

### 2.1 变负荷过程炉膛温度分布

炉膛温度是反映循环流化床锅炉运行状况的关键参数<sup>[16]</sup>。CFB 锅炉最佳运行温度为 850~950℃,炉内合理的温度分布可在保证燃烧效率的同时满足旋风分离器处 SNCR 脱硝反应的需要。图 1 为 100%~40% 负荷内升降负荷过程中,炉膛左右侧出口和炉膛内部上二次风口位置处温度变化情况。图中虚线左侧为降负荷过程,右侧为升负荷过程。如图 1 所示,炉膛温度与负荷成正比,降负荷时,床温呈下降趋势,负荷达到 40% 左右时,炉膛内、炉膛出口温度低于 700℃。左右侧炉膛温度略有差异,升负荷时左右温度差在 4~12℃ 波动,降负荷波动范围为 2~20℃。分析认为,该锅炉采用前墙集中给煤,后墙设有 6 个冷渣器排渣的结构,在升降负荷时,通过调整冷渣器的开度来调整床层温度,故在快速变负荷时,导致左右侧物料量略有不均。

炉膛温度变化与给煤量、给风量、一二次风配比等因素直接相关<sup>[17]</sup>。图 2 为变负荷过程锅炉风量和给煤量变化情况。由图可知,给煤量和锅炉风量



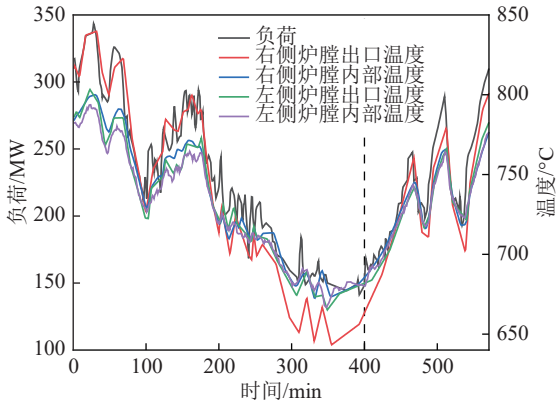


图1 锅炉变负荷下的床温分布

Fig. 1 Bed temperature distribution at variable boiler loads

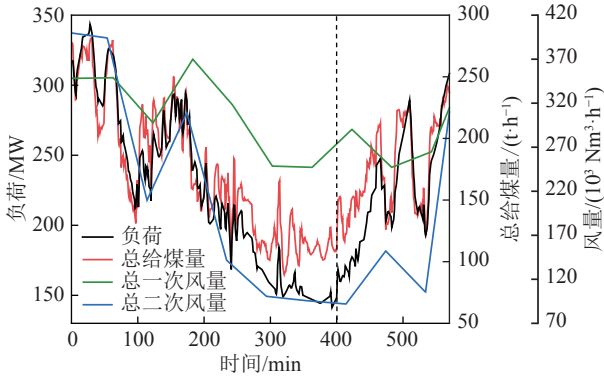


图2 变负荷下锅炉风量、给煤量变化曲线

Fig. 2 Change curves of boiler airflow and coal feed under variable loads

与负荷成正相关。降负荷时，迅速降低给煤量和二次风量，一次风量降幅(29%)较二次风量(77%)小。可见降负荷过程中，负荷变化过程总风量控制主要靠二次风量进行调节。但由于给煤量的大幅降低，炉膛密相区中可燃质与一次风量比显著减小，燃料在过量空气系数较高的条件下燃烧，这样容易造成NO<sub>x</sub>生成量的增加<sup>[18-19]</sup>。

### 2.2 变负荷过程NO<sub>x</sub>排放特性

图3为锅炉在变负荷时NO<sub>x</sub>原始排放质量浓度及炉膛出口烟气含氧量的变化趋势。由图可知，烟气含氧量基本稳定在3%~8%，升负荷时NO<sub>x</sub>排放质量浓度的变化范围为30~50 mg/Nm<sup>3</sup>(标准状态，下同)，降负荷时的变化范围为20~50 mg/Nm<sup>3</sup>，小于DB14/T1703—2018要求的超低排放标准<sup>[20]</sup>。由于该机组运行床温较低，二次风配比合理，且入炉燃料氮含量较低，其NO<sub>x</sub>排放水平较同类型机组偏低。但从图中仍然可以看出，当负荷连续降低时，NO<sub>x</sub>的排放并未随炉膛温度降低而降低。由2.1的分析可知，低负荷区间运行时，由于需要维持最低流化风量，随着负荷降低，一次风量占比逐渐增大，炉膛配风不能发挥分级优势，密相区的空气

过量系数增加，通过对比不同负荷下的烟气含氧量可以看出，低负荷时的含氧量(8%左右)高于中高负荷(6%、4%左右)，炉膛内较高的氧化性气氛致使NO<sub>x</sub>的原始排放质量浓度不降反增<sup>[21]</sup>。

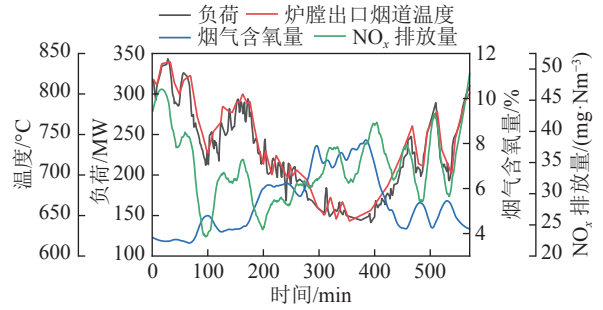


图3 变负荷下原始NO<sub>x</sub>排放量、烟气含氧量

Fig. 3 Raw NO<sub>x</sub> emissions, flue gas oxygen content at variable loads

## 3 宽负荷运行下NO<sub>x</sub>排放特性及调控方法

### 3.1 NO<sub>x</sub>排放特性

图4中柱状图为燃用不同硫分煤种时，在30%与60%负荷下一定时间段内的原烟气折标NO<sub>x</sub>含量变化。由图可见，两个负荷下随着燃煤中硫含量增高，原烟气中NO<sub>x</sub>排量均随之增高。大量研究表明，石灰石分解生成的CaO对NO<sub>x</sub>具有催化作用<sup>[22-23]</sup>。因此，本研究对不同硫含量煤种对应的石灰石用量进行了分析。为了比较燃烧不同硫分煤种炉内脱硫所需的石灰石用量，排除每日煤耗量的影响，采用折标法，计算每日单位燃煤量所对应炉内脱硫石灰石耗量作为对比参数，折标式如下：

$$m_{CaCO_3} = \frac{M_{CaCO_3}}{M_{Coal}}$$

式中： $m_{CaCO_3}$ 为单位质量煤耗炉内脱硫消耗石灰石量，t； $M_{CaCO_3}$ 为当日投加石灰石用量，t； $M_{Coal}$ 为当日机组燃煤耗量，t。

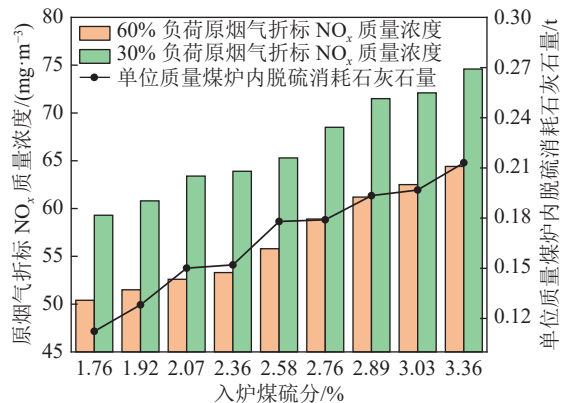


图4 30%与60%负荷的NO<sub>x</sub>排放特性

Fig. 4 NO<sub>x</sub> emission characteristics for 30% and 60% loads

图 4 中折线为燃烧不同含硫量煤种时对应的石灰石耗量,由图可见,CFB 锅炉内随煤中硫含量增加,投加石灰石量随之增加,石灰石用量与 NO<sub>x</sub> 排放量成正相关是石灰石催生 NO<sub>x</sub> 的现场运行数据证明。电厂以本地煤为主要燃料,不同煤种的氮含量在 0.6%~0.7% 内变化,差距不大。因此氮含量的差异对 NO<sub>x</sub> 排放影响不大,石灰石是主要的影响原因。

对比 30% 与 60% 负荷下的 NO<sub>x</sub> 排放量,在燃用相同硫分的煤种时,较低的负荷下 NO<sub>x</sub> 的原始生成量更高。图 5 为不同负荷运行时,一、二次风量变化及一、二次风配比情况。图中可见,负荷越低一、二次风量均越低。而与二次风相比,一次风下降率远低于二次风,一次风占比显著增加。与变负荷运行工况相同,为保证低负荷时的正常流化,一次风占比增加,无法发挥分级配风的优点,致使炉膛密相区氧化性气氛增强,促使 NO<sub>x</sub> 生成增加<sup>[16]</sup>。

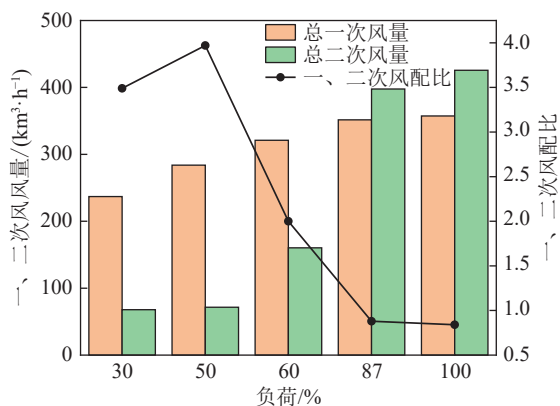


图 5 不同负荷下一、二次风量

Fig. 5 Primary and secondary airflow under different loads

## 3.2 低负荷低氮调控方法及现场验证

### 3.2.1 低氮燃烧分区控制技术

目前的低氮燃烧技术都是从锅炉整体进行燃烧调控<sup>[24]</sup>。但是随着 CFB 锅炉技术的不断发展,CFB 锅炉炉膛体积越来越庞大,300 MW 级别炉膛水平截面积大多在 300 m<sup>2</sup> 左右。大体积带来的现象是:炉体内不同位置的燃烧状况不同,NO<sub>x</sub> 生成量也不同。由图 6 可见,某电厂 350 MW 炉膛内床温分布不均,越靠近中心位置床温越高,越靠近两侧温度越低。其原因为:循环流化床锅炉炉膛形状呈长条形,即炉膛前后墙尺寸较长而左右墙尺寸较短;炉膛内在边壁附近由下行固体颗粒形成的环,在中心附近由上升气流形成的核,形成整体炉内“环核结构”,造成炉膛各区域内物料质量浓度分布不均<sup>[25]</sup>。由于物料和布风的不均匀性,导致炉膛内的流化和燃烧呈分布不均的特点<sup>[26]</sup>。因此,CFB 锅炉沿水平

方向存在着区域差异。各区域工况不同,其 NO<sub>x</sub> 产生环境不同,生成量就不同。而仅从整体上进行低氮燃烧调控,不能有效地控制局部反应环境,无法有针对性地降低燃烧源头大幅降低 NO<sub>x</sub> 生成量<sup>[27]</sup>。

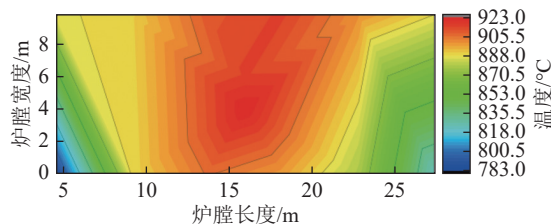


图 6 40% 负荷下锅炉床温分布

Fig. 6 Distribution of boiler bed temperature at 40% load

针对 CFB 锅炉低氮燃烧技术由于依赖整体调控,造成炉膛水平方向上 NO<sub>x</sub> 生成不均的问题,现提出一种 CFB 锅炉全负荷下低氮燃烧分区控制方法:将矩形 CFB 锅炉炉膛根据给煤口进行区域划分,每个给煤口划分为一个区域,通过精细控制每个区域内给煤量、供风量等可控参数,实现锅炉各区域内温度均匀分布以及 NO<sub>x</sub> 深度减排。具体调整原则是:减少进入 NO<sub>x</sub> 生成量多的区域内的给煤量、二次风量、石灰石给料量,NO<sub>x</sub> 生成量少的区域调整则反之。在给煤量不变的情况下,进行局部差异调整,即 NO<sub>x</sub> 生成量相对较多区域,给煤量适当减少;NO<sub>x</sub> 生成量相对较少区域,给煤量适当增加,同时保证总给煤量不变。每个区域的给煤量调整通过称重输送带给煤机实现,石灰石喷入量通过调整旋转给料机转速实现,二次风量调整通过风管上的节流挡板开关实现。

为验证分区控制方法,在 40% 负荷情况下,比较整体调控和分区调控两种方案对炉内 NO<sub>x</sub> 原始生成量的控制效果。如图 7 所示,将炉膛按照给煤口数量进行区域划分,每一个给煤口划分为一个区域,在总给煤量不变的情况下,对 NO<sub>x</sub> 生成较多的区域适当减小给煤量,NO<sub>x</sub> 生成较少的区域增大给煤量,深度挖掘分区调控的降氮能力,从而节约 SNCR 脱硝剂的使用量。

图 8 为锅炉在 40% 负荷不同时间段分区调控时 NO<sub>x</sub> 净排放质量浓度 (SNCR 设备之后) 的变化趋势。如图 8 所示,在 0~60 min 分区调控过程中 NO<sub>x</sub> 净排放质量浓度较低,处在 30~36 mg/m<sup>3</sup> 的变化范围内且波动不大。当从 60 min 开始取消分区调控时,NO<sub>x</sub> 质量浓度逐渐升高,且需要进行喷氨来控制 NO<sub>x</sub> 质量浓度。120 min 时,重新进行分区调控且暂停喷氨后,NO<sub>x</sub> 排放质量浓度显著下降。由上述试验结果可见,分区控制给煤量,可以实现较低负荷下 NO<sub>x</sub> 高效控制。

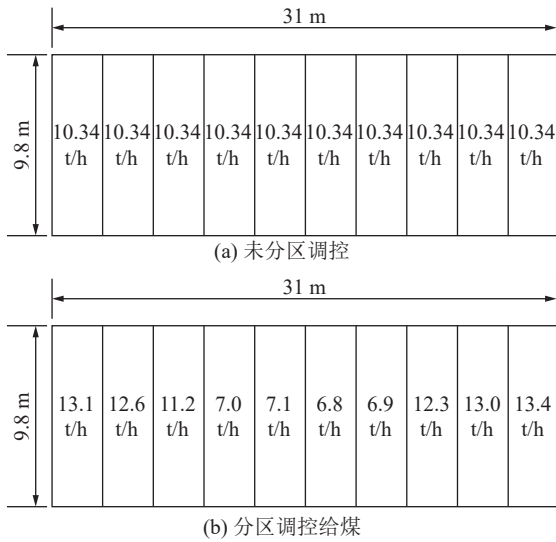
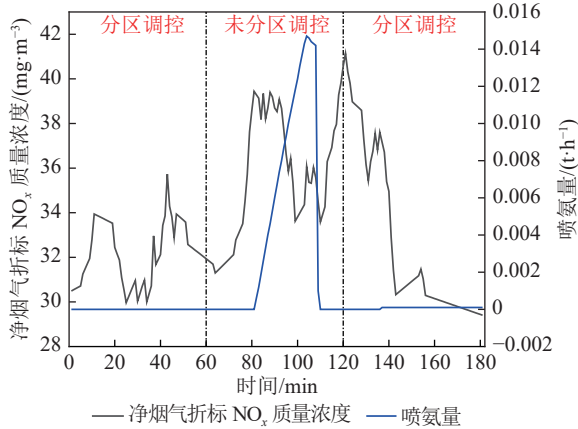


图7 40%负荷低氮燃烧给煤量示意

Fig.7 Schematic diagram of 40% load low-NO<sub>x</sub> combustion coal fee图8 40%负荷NO<sub>x</sub>净排放质量浓度及喷氨量Fig.8 Net NO<sub>x</sub> emission concentration and ammonia injection at 40% loading

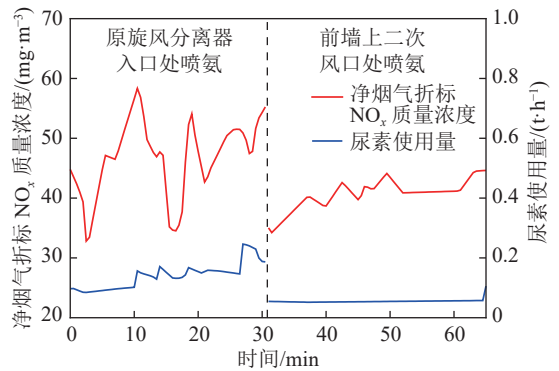
由于炉膛体积较大且呈长条状，炉内各区域物料质量浓度分布不均、燃烧状况不同，故此，合理的调控方式是控制NO<sub>x</sub>排放质量浓度的有效方式。分析认为，在保证负荷不变的前提下，分区调控使还原性气氛较为明显的炉膛两侧区域多燃煤，而炉膛中间富氧区域减少燃煤量，从而在总燃煤量不变的情况下，使NO<sub>x</sub>的总生成量减少，NO<sub>x</sub>的排放质量浓度降低。因此，现场验证证明给煤量分区调控方法，通过精细化、合理化控制给煤量，合理匹配燃料与空气量，能够在低负荷有效减少NO<sub>x</sub>生成，降低低负荷脱硝压力。

### 3.2.2 SNCR 二次风喷口改造技术

CFB锅炉在中低负荷运行的时候，布置在旋风分离器前的SNCR系统脱硝能力及效率不能满足燃煤电厂超低排放的要求<sup>[28-29]</sup>。针对较低负荷下SNCR系统因为脱离适宜反应温区造成的脱硝效率

低的问题，该电厂通过在前墙上二次风口内部新增8支喷枪，以使选择性非催化还原反应在低负荷工况下的较高温区进行。本研究通过对比二次风和原旋风分离器两处尿素喷枪脱硝效果，验证该技术改造的合理性。

图9为脱硝喷枪改造前后NO<sub>x</sub>排放量以及尿素使用量的曲线。由图可见，在40%负荷运行时，旋风分离器前喷氨时，NO<sub>x</sub>的排放质量浓度变化范围在35~60 mg/m<sup>3</sup>；在上二次风位置喷氨时，NO<sub>x</sub>变化范围为35~45 mg/m<sup>3</sup>。可见，在一定负荷范围内，二次风位置喷氨可以起到提高NO<sub>x</sub>控制效率的作用，NO<sub>x</sub>排放质量浓度也可以控制在超低排放要求以内。

图9 SNCR脱硝改造前后NO<sub>x</sub>排放对比Fig.9 Comparison of NO<sub>x</sub> emission before and after SNCR denitration modification

分析认为因为较低负荷下，旋风分离器处的烟温在700℃以下(图2、图4)，远离脱硝最佳反应温度区间850℃以上<sup>[30]</sup>，导致NH<sub>3</sub>与NO均相还原反应中·OH生成不足，限制了真正能还原NO·NH<sub>2</sub>生成，从而限制了NO还原反应的发生。而炉膛内部二次风位置处于密相区，燃料在此处燃烧，其温度大于旋风分离器处，更有利于SNCR反应的发生。此外，二次风喷口位置颗粒质量浓度大，这些含碳煤颗粒对NO的还原也有促进的作用，可以与氨协同还原NO。若500~800℃温区内焦炭和NH<sub>3</sub>协同还原NO的反应机理和影响机制得以明确，则有望通过燃料混配和选择有效反应位置实现反应的定向调控，提高炉内喷氨脱硝率及稳定性。在不增加额外手段的前提下解决低负荷下CFB炉NO<sub>x</sub>控制难题。

## 4 结论

1) 炉膛内床温的变化与负荷呈正相关，但负荷连续降低时，NO<sub>x</sub>的排放由于过量空气增多不降反升。



2) 在锅炉机组中低负荷运行时,受温度影响挥发份氮的氧化作用明显削弱,减少了 NO<sub>x</sub> 的生成;然而由于需要维持最低流化风速,炉膛配风不能发挥分级优势,密相区的空气过量系数增加,致使 NO<sub>x</sub> 的原始排放质量浓度不降反增。同时对比相同负荷时的情况,燃用硫分更高的煤种时,炉内脱硫所需的石灰石量增加,NO<sub>x</sub> 质量浓度随之升高。

3) 在锅炉机组低负荷工况运行时,可采用分区调控方法,即保证总给煤量、总风量不变的前提下,精细化合理化控制给煤量、布风量分布,合理匹配燃料与空气量使得 NO<sub>x</sub> 得到精细化控制;另外,低负荷运行旋风分离器入口处温度过低时,可将喷氨口改造至二次风口等处,使得脱硝反应处在较合理的温度区间内,从而提高脱硝效率。

## 参考文献 (References) :

- [1] 宋畅,吕俊复,杨海瑞,等.超临界及超超临界循环流化床锅炉技术研究与应用[J].中国电机工程学报,2018,38(2):338-347,663.  
SONG Chang, LYU Junfu, YANG Hairui, et al. Research and application of supercritical and ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 338-347, 663.
- [2] 张曼,蔡润夏,姜孝国,等.660 MW 高效超超临界双炉膛循环流化床锅炉的设计开发[J].动力工程学报,2018,38(5):341-346.  
ZHANG Man, CAI Runxia, JIANG Xiaoguo, et al. Design and development of a 660 MW high efficiency ultrasupercritical double-furnace CFB boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(5): 341-346.
- [3] 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 Guangxi, LU Junfu, 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.
- [4] 葛宪福,张建新,辛胜伟,等.超超临界循环流化床锅炉深度调峰技术可行性探讨[J].锅炉技术,2022,53(6):34-40.  
GE Xianfu, ZHANG Jiansheng, XIN Shengwei, et al. Discussion on the feasibility of in-depth peak regulation for an ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Boiler Technology, 2022, 53(6): 34-40.
- [5] 胡仙楠,邓博宇,刘欢鹏,等.循环流化床锅炉负荷快速调节技术现状及发展趋势[J].洁净煤技术,2023,29(6):11-23.  
HU Xiannan, DENG Boyu, LIU Huanpeng, et al. Status and development trend of rapid load regulation technology for circulating fluidized bed boiler[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(6): 11-23.
- [6] 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.
- [7] 王虎,范浩东,辛胜伟,等.超临界循环流化床锅炉深度调峰技术研究与应用[J].洁净煤技术,2022,28(12):11-17.  
WANG Hu, FAN Haodong, XIN Shengwei, et al. Research and application of depth peak regulation technology for supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(12): 11-17.
- [8] 柯希玮,蔡润夏,杨海瑞,等.循环流化床燃烧的 NO<sub>x</sub> 生成与超低排放[J].中国电机工程学报,2018,38(2):390-396,669.  
KE Xiwei, CAI Runxia, YANG Hairui, et al. Formation and ultra-low emission of NO<sub>x</sub> for circulating fluidized bed combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 390-396, 669.
- [9] 于洁,于理,武文珏,等.140 t/h 循环流化床锅炉低氮燃烧改造与运行[J].能源研究与管理,2019(1):109-112.  
YU Jie, YU Li, WU Wenjue, et al. Low NO<sub>x</sub> combustion retrofit and operation of 140 t/h circulating fluidized bed boiler[J]. Energy Research and Management, 2019(1): 109-112.
- [10] 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):81-87,93.  
CHEN Jianjun, ZHOU Junhu, ZHU Zhanheng, et al. Low-NO<sub>x</sub> combustion retrofitting and optimal adjustment tests for a 130 t/h CFB boiler[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(2): 81-87, 93.
- [11] 王文杰,董建庭. SNCR 在循环流化床 DENO<sub>x</sub> 技术探讨与应用[J].资源节约与环保,2014(8):47-48.  
WANG Wenjie, DONG Jianting. Exploration and application of snrc in circulating fluidized bed DENO<sub>x</sub> technology[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2014(8): 47-48.
- [12] 罗朝晖,王恩禄.循环流化床锅炉选择性非催化还原技术及其脱硝系统的研究[J].动力工程,2008,28(3):442-446.  
LUO Zhaohui, WANG Enlu. Selective non-catalytic reduction technology and its denitrification systems used in CFB boilers[J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(3): 442-446.
- [13] 段守保,辛胜伟,顾从阳,等.循环流化床锅炉低负荷下超低 NO<sub>x</sub> 排放研究[J].洁净煤技术,2021,27(S2):299-303.  
DUAN Shoubao, XIN Shengwei, GU Congyang, et al. Research on ultra-low NO<sub>x</sub> emission of CFB boiler under low load[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(S2): 299-303.
- [14] 元泽民,柯希玮,黄中,等.烟气再循环对大型循环流化床锅炉低负荷运行特性的影响研究[J].热力发电,2023,52(9):58-64.  
YUAN Zemin, KE Xiwei, HUANG Zhong, et al. Influence of flue gas recirculation on operation characteristics of large scale CFB boiler under low load[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 58-64.
- [15] 吴剑恒,何宏舟,俞金树.二次风对 CFB 锅炉 NO<sub>x</sub> 排放的影响[J].电力学报,2014,29(6):542-547,553.  
WU Jianheng, HE Hongzhou, YU Jinshu. The influence on NO<sub>x</sub> emission of secondary-air in CFB boiler[J]. Journal of Electric Power, 2014, 29(6): 542-547, 553.
- [16] 蔡晋,单露,王志宁,等.超临界 350 MW 循环流化床锅炉变负荷特性[J].热力发电,2020,49(9):98-103,108.  
CAI Jin, SHAN Lu, WANG Zhining, et al. Variable load characteristics of a supercritical 350 MW circulating fluidized bed boiler[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(9): 98-103, 108.

- [17] 李楠, 赵鹏勃, 施斌, 等. 330 MW 循环流化床锅炉的燃烧优化试验研究 [J]. 洁净煤技术, 2018, 24(3): 85-90.  
LI Nan, ZHAO Pengbo, SHI Bin, et al. Experimental study on optimized combustion regulation of 330 MW circulating fluidized bed boiler[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(3): 85-90.
- [18] 刘吉臻, 洪烽, 高明明, 等. 循环流化床机组快速变负荷运行控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4130-4137, 4292.  
LIU Jizhen, HONG Feng, GAO Mingming, et al. Research on the control strategy for quick load change of circulating fluidized bed boiler units[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4130-4137, 4292.
- [19] 孙献斌, 石波, 时正海, 等. 国产 330 MW CFB 锅炉的调节和变负荷性能 [J]. 中国电力, 2013, 46(9): 16-20.  
SUN Xianbin, SHI Bo, SHI Zhenghai, et al. Regulation and load variation performance of the domestic 330 MW CFB boiler[J]. Electric Power, 2013, 46(9): 16-20.
- [20] 山西省质量技术监督局, 山西省环境保护厅. 燃煤电厂大气污染物排放标准: DB14/T 1703—2018[S/OL]. [2023-10-30]. <https://std.samr.gov.cn/db/search/stdDBDetailed?id=998D49D260F3A624E05397BE0A0AC94D>.
- [21] 洪金彪. 锅炉低负荷运行时  $\text{NO}_x$  排放偏高的原因分析及调整措施 [J]. 锅炉技术, 2021, 52(3): 46-49.  
HONG Jinbiao. Cause analysis and adjustment measures of high  $\text{NO}_x$  emission during low load operation of boiler[J]. Boiler Technology, 2021, 52(3): 46-49.
- [22] 柯希玮, 蔡润夏, 吕俊复, 等. 钙基脱硫剂对循环流化床  $\text{NO}_x$  排放影响研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2019, 25(1): 1-11.  
KE Xiwei, CAI Runxia, LYU Junfu, et al. Research progress of the effects of Ca-based sorbents on the  $\text{NO}_x$  reaction in circulating fluidized bed boilers[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(1): 1-11.
- [23] 侯祥松, 王进伟, 张海, 等. 石灰石脱硫反应对喷氨脱硝反应影响的实验研究 [J]. 热能动力工程, 2007, 22(6): 669-672, 691.  
HOU Xiangsong, WANG Jinwei, ZHANG Hai, et al. An experimental study of the effect of limestone desulfurization reaction on ammonia-injected denitrification reaction[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007, 22(6): 669-672, 691.
- [24] 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.
- [25] 向柏祥, 李建锋, 杨海瑞, 等. 大中型循环流化床锅炉机组运行现状分析 [J]. 锅炉技术, 2016, 47(5): 31-39, 46.  
XIANG Baixiang, LI Jianfeng, YANG Hairui, et al. The operation analysis of medium-sized circulating fluidized bed boiler units[J]. Boiler Technology, 2016, 47(5): 31-39, 46.
- [26] 柯希玮, 张缙, 杨海瑞, 等. 循环流化床锅炉  $\text{NO}_x$  生成和排放特性研究进展 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2757-2771.  
KE Xiwei, ZHANG Man, YANG Hairui, et al. Research progress on the characteristics of  $\text{NO}_x$  emission in circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2757-2771.
- [27] 刘春, 高明明, 张洪福, 等. 300 MW 亚临界循环流化床机组  $\text{NO}_x$  排放建模 [J]. 洁净煤技术, 2023, 29(8): 109-115.  
LIU Chun, GAO Mingming, ZHANG Hongfu, et al.  $\text{NO}_x$  emission model of 300 MW subcritical circulating fluidized bed unit[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(8): 109-115.
- [28] 李宽, 曲耀鹏, 郑媛, 等. 300 MW 循环流化床锅炉低负荷  $\text{NO}_x$  生成特性分析及应对措施 [J]. 东北电力技术, 2019, 40(11): 46-49.  
LI Kuan, QU Yaopeng, ZHENG Yuan, et al. Analysis and response measures of  $\text{NO}_x$  low load formation characteristics in 300 MW CFB and countermeasures[J]. Northeast Electric Power Technology, 2019, 40(11): 46-49.
- [29] 刘彬, 吴喜军, 王海涛. 喷枪对 SNCR 工艺脱硝效率的影响 [J]. 洁净煤技术, 2021, 27(S2): 308-312.  
LIU Bin, WU Xijun, WANG Haitao. Effect of spray Gun on the denitration efficiency of SNCR system[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(S2): 308-312.
- [30] 李明磊, 张海龙, 杨明强. 循环流化床锅炉 SNCR 反应机理与脱硝特性数值模拟 [J]. 洁净煤技术, 2018, 24(3): 96-102.  
LI Minglei, ZHANG Hailong, YANG Mingqiang. Numerical simulation of SNCR reaction mechanism and de- $\text{NO}_x$  characteristics in circulating fluidized bed boiler[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(3): 96-102.