

烟气再循环对 350 MW CFB 锅炉深调运行特性影响

王家兴^{1,2}, 彭建升¹, 李凡³, 贺建平³, 杨天亮¹, 董永胜¹, 王帅²

(1. 烟台龙源电力技术股份有限公司, 山东烟台 264006; 2. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150006; 3. 神华神东电力山西河曲发电有限公司, 山西忻州 036501)

摘要:为解决超临界 CFB 锅炉超低负荷时流化安全性及 NO_x 超低排放, 引入烟气再循环技术, 以某电厂超临界 350 MW CFB 锅炉为研究对象, 搭建了循环半干法脱硫后烟气的再循环辅助调峰系统, 基于运行实测数据, 研究该锅炉在 30%~60% 负荷率下烟气再循环对平均床温、分离器入口温度、排烟温度、炉膛出口烟气 NO_x、CO 质量浓度、飞灰及底渣可燃物含量、汽水参数等运行参数的影响, 试验结果表明: 烟气再循环协同下, 30%~60% 负荷 SNCR 脱硝后 NO_x 最终排放小于 50 mg/m³, 30% 负荷实现锅炉原始 NO_x 超低排放; 床温降低 15~22 °C, 炉膛出口烟温提高 10~13 °C, 主再热汽温在 558 °C 以上; 随锅炉负荷降低, 飞灰及底渣含碳量升高, CO 质量浓度未见大幅增加; 40% 负荷炉膛二次风 SNCR 脱硝 NO_x 降幅约 15 mg/m³; 负荷上升/下降变化最小速率 1.23% Pe; 30% 负荷及以上保持干态运行, 水冷壁壁温最大偏差 55 °C, 屏过及屏再最大壁温差分别 55、47 °C, 均未出现壁温超温。

关键词:超临界; 循环流化床锅炉; 深度调峰; 烟气再循环; NO_x 超低排放; 锅炉运行特性

中图分类号:TK09; X511 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2024)09-0068-09

Influence of flue gas recirculation on deep peak regulation operation characteristics of 350 MW CFB boiler

WANG Jiaying^{1,2}, PENG Jiansheng¹, LI Fan³, HE Jianping³,

YANG Tianliang¹, DONG Yongsheng¹, WANG Shuai²

(1. Yantai Longyuan Power Technology Co., Ltd., Yantai 264006, China; 2. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China; 3. Shenhua Shendong Electric Power Shanxi Hequ Power Generation Co., Ltd., Xinzhou 036501, China)

Abstract: To solve the problems of fluidization safety and ultra-low NO_x emission of supercritical CFB boiler under ultra-low load, flue gas recirculation technology was introduced. Taking a supercritical 350 MW CFB boiler as the research object, a flue gas recirculation auxiliary peak-shaving system after semi-dry desulfurization was built. Based on the data of field operation, the effects of operating parameters such as the average bed temperature, separator inlet temperature, exhaust temperature, NO_x, CO mass concentration of outlet flue gas, combustible content of fly ash and bottom ash, steam-water parameter at 30%-60% load were studied under the flue gas recirculation. The results show that under the coordination of flue gas recirculation, the final emission of NO_x at 30%-60% load is less than 50 mg/m³ after SNCR, the original NO_x emission is less than 50 mg/m³ at 30% load; the bed temperature is reduced by 15-22 °C, the boiler exit flue temperature increases 10-13 °C, and the primary and reheat steam temperature is above 558 °C. With the decrease of boiler load, the carbon content of fly ash and bottom slag increases, and the mass concentration of CO does not increase significantly. The NO_x is reduced about 15 mg/m³ by SNCR arranged at secondary air; the minimum change rate of load rise/fall is 1.23% Pe; the boiler keeps dry operation above 30% load, the maximum deviation of water wall temperature is 55 °C at 30% load, the maximum deviation of overheated and reheated heating surfaces is 55 and 47 °C respectively, and no over-temperature appears.

Key words: supercritical; circulating fluidized bed; deep peak load regulation; flue gas recirculation; low-NO_x combustion; NO_x ultra-low emission; boiler operation characteristic

收稿日期: 2024-04-30; 责任编辑: 戴春雷 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.LHX24043001

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB4100302)

作者简介: 王家兴(1987—), 男, 山东临沂人, 高级工程师, 硕士。E-mail: 12075657@chnenergy.com.cn

通讯作者: 王帅(1985—), 男, 辽宁本溪人, 教授, 博士。E-mail: shuaiwang@hit.edu.cn

引用格式: 王家兴, 彭建升, 李凡, 等. 烟气再循环对 350 MW CFB 锅炉深调运行特性影响[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(9): 68-76.

WANG Jiaying, PENG Jiansheng, LI Fan, et al. Influence of flue gas recirculation on deep peak regulation operation characteristics of 350 MW CFB boiler[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(9): 68-76.



移动阅读

0 引言

循环流化床锅炉(CFB)用低温燃烧方式,燃烧污染物控制成本低、燃料适应性广,国内超临界 CFB 锅炉技术发展迅速,截至 2023 年已有 60 多台 350 MW 及以上超临界机组 CFB 锅炉投产^[1]。目前国家为构建新型电力系统,于 2024 年 1 月 1 日起实行煤电容量电价机制,推动煤电机组发挥基础性支撑调节作用,为此越来越多的超临界机组 CFB 锅炉将频繁参与调峰任务,且要求机组进一步增加调峰容量,从 45%~100% THA 负荷调峰逐步拓展至 20%~100% THA 负荷深度调峰,调峰控制包括燃烧污染物参数在内的各锅炉运行参数在合理区间安全、稳定达标运行。

目前 300 MW 等级及以上机组 CFB 锅炉在 45% THA 以下低负荷工况运行时,普遍存在一次风风率高、SNCR 脱硝尿素耗量大幅高于 45% THA 以上高负荷工况尿素耗量、尾部氨逃逸超标、空预器堵塞等问题^[2],导致锅炉无法参与 45% THA 负荷以下调峰运行。相比较于其他炉外脱硝方式(SCR、臭氧氧化脱硝等),烟气再循环技术由于投资成本低、可靠性高,逐渐在亚临界 CFB 锅炉深度调峰上应用推广,它是将锅炉引风机出口的低氧烟气(O_2 体积分数 5%~6%)通过烟气再循环风机再次送入一次风中,保证锅炉低负荷运行时一次流化风量不降低,减少一次风含氧量,增强锅炉密相区气氛还原性,从源头抑制燃烧过程中 NO_x 生成^[3-5],实现 20%~45% THA 深调工况 NO_x 超低排放。折建刚等^[6]研究亚临界 300 MW 机组 CFB 锅炉在 50% 以上负荷使用循环半干法脱硫后烟气的再循环系统对锅炉 NO_x 排放、分离器入口烟温、床温、排烟温度等运行参数及飞灰及底渣可燃物的影响。张思海等^[7]在 330 MW 亚临界机组 CFB 锅炉上使用循环湿法脱硫前烟气的再循环系统,实现锅炉 20% THA 负荷深度调峰安全稳定运行及 NO_x 等污染物超低排放。目前关于循环半干法脱硫塔后低温、低硫、低尘烟气对 350 MW 超临界机组 CFB 锅炉 30%~60% THA 深调工况运行特性及污染物排放影响实炉试验未见报道,仅有元泽民等^[8]通过一维燃烧准静态模型预测分析烟气再循环投用后 350 MW 超临界机组 CFB 锅炉 20%~40% THA 深度调峰工况运行特性。

笔者以某电厂 350 MW 超临界纯凝机组 CFB 锅炉为研究对象(调峰负荷 30%~100% THA),分析投用循环半干法脱硫后烟气的再循环系统在 30%~60% 深调工况时对锅炉床温、分离器入口温度、排烟

温度、炉膛出口烟气 NO_x 、 SO_2 、CO 质量浓度、 O_2 体积分数、飞灰底渣可燃物含量等运行参数影响,以期 350 MW 超临界纯凝机组 CFB 锅炉参与深度调峰运行提供参考。

1 试验

1.1 煤质特性及锅炉参数

某电厂超临界 350 MW 机组 CFB 锅炉最大连续蒸发量(BMCR)和额定蒸发量(BRL)条件下,锅炉主要技术参数见表 1,设计煤种及实际燃用煤质见表 2。

表 1 锅炉主要技术参数

Table 1 Main design parameters of the boiler

项目	BMCR	BRL
主蒸汽流量/($t \cdot h^{-1}$)	1 150	1 052
再热蒸汽流量/($t \cdot h^{-1}$)	935	893
主蒸汽压强/MPa	25.4	25.4
再热蒸汽进口压强/MPa	4.35	4.18
再热蒸汽出口压强/MPa	4.13	3.97
主蒸汽温度/℃	571	571
再热蒸汽进口温度/℃	319	316
再热蒸汽出口温度/℃	569	569
给水温度/℃	285.6	282.8

表 2 工业分析

Table 2 Proximate analysis

煤种	M_{ar}	A_{ar}	V_{daf}	FC_{ar}	S_{ar}	$Q_{net,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$
设计	6.5	45.2	35.9	30.9	2.1	13.8
实际	8.0	40.3	41.9	27.1	0.4	14.5

1.2 锅炉及环保设备概况

烟气研究对象为超临界 350 MW 机组 CFB 锅炉,单炉膛单布风板结构,用 3 台高温汽冷旋风分离器,二次风分 2 层送入,空气分级低 NO_x 燃烧。锅炉用两侧墙一次风进风方式,前墙 10 个给煤口,后墙 6 个排渣口。炉膛内布置有 5 片双面水冷壁,6 片中温过热器,6 片高温过热器和 6 片高温再热器管屏,后烟道布置有低温过热器、低温再热器和一、二、三级省煤器及空气预热器。锅炉结构示意图如图 1 所示。

锅炉烟气污染物按超低标准执行,用 SNCR 脱硝,在分离器入口水平烟道内布置喷枪,向炉内喷入质量分数 10% 尿素溶液,每个分离器布置 7 支喷枪,其中内外侧各 3 支,中心筒出口 1 支,每台炉共计 21 支喷枪,设计干尿素耗量 325 kg/h(THA 工况)。用炉内喷钙脱硫及炉外半干法脱硫实现 SO_2 超低排放,

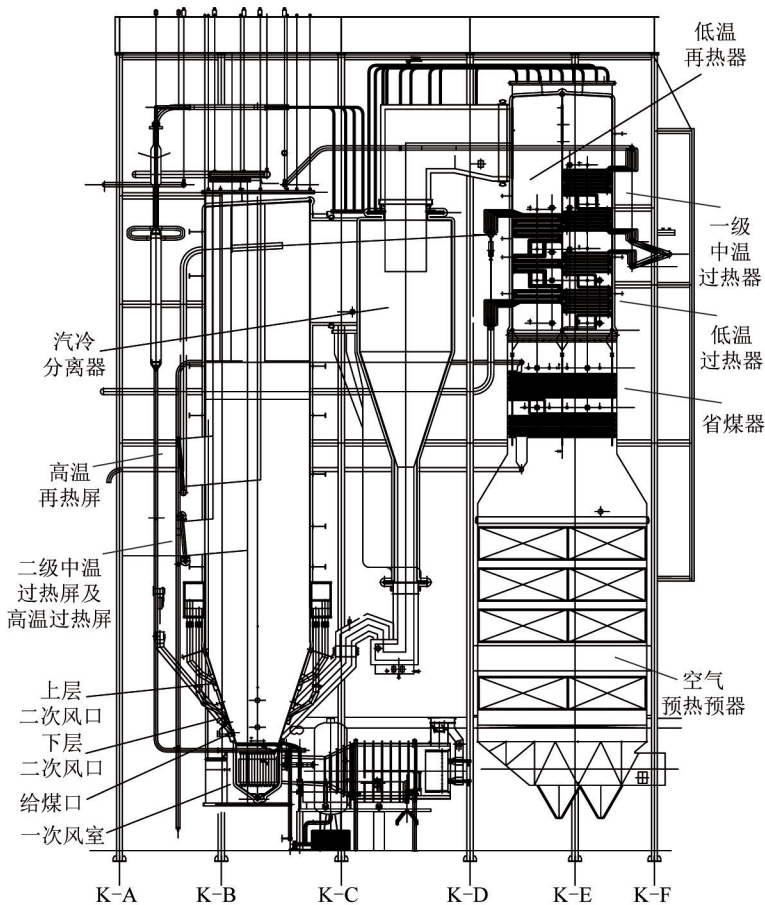


图1 超临界350 MW机组CFB锅炉示意

Fig.1 Schematic diagram of supercritical 350 MW CFB boiler

设计半干法脱硫系统入口 SO_2 质量浓度 $2\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$ 。

机组改造前已实现山西电网 45%~100% THA 负荷调峰,但锅炉低于 45%THA 负荷运行时,旋风分离器入口烟温低于 $660\ ^\circ\text{C}$,SNCR 脱硝效率低,无法实现 NO_x 超低排放、氨逃逸高、空预器堵塞明显;一次风量低、流化不良局部产生低温焦块、冷渣器排渣困难。

2 深度调峰烟气再循环系统方案

目前根据实际循环烟气成分不同,可将 300 MW 及以上机组 CFB 锅炉投用的烟气再循环系统分为 2 类:循环湿法脱硫前烟气的再循环系统(W-FGR)、循环半干法脱硫后烟气的再循环系统(SD-FGR)(图 2)。相比而言,循环半干法脱硫后烟气的再循环系统由于循环烟气经炉外半干法脱硫及除尘,烟气洁净度高、系统腐蚀风险低,但由于半干法脱硫塔出口中烟气温度 $70\sim 80\ ^\circ\text{C}$ 、湿度 8%(体积分数),在北方冬季气温低时,烟再系统启动阶段的前 1 h 内,循环烟道冷凝水疏水量大,通常需增加热风再循环或蒸汽暖风器配合烟气再循环系统使用,从而避免一次风机进口热烟气与冷一次风混合

后产生冷凝水。

超临界 350 MW 机组 CFB 锅炉实际炉膛出口 SO_2 质量浓度 $500\sim 1\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$,配置炉外半干法脱硫系统,用循环半干法脱硫后烟气的再循环系统,将脱硫后烟气(烟温 $70\sim 80\ ^\circ\text{C}$)经烟气再循环风机分别送至 2 台一次风机入口,再循环烟道上设置必要的电动关断门及风量测量装置,为防止烟气和一次冷风混合后出现冷凝水,一次风进口设置热风再循环系统,将热二次风送入一次风机进口并对一次风机叶轮进行合金喷涂防腐等措施。此外,原炉前 10 台给煤机密封风取自锅炉冷一次风,由于循环烟气引入冷一次风后,给煤机密封风中湿度及 SO_2 浓度增加,为避免给煤机链条、轴承等机械机构锈蚀,增设离心式密封风机提供洁净冷空气实现给煤机密封,并与原冷一次风密封风互为备用。

3 试验结果与讨论

3.1 烟气再循环协同 30%~100% THA 关键运行参数最优控制

改造前机组在 45%~100% THA 调峰运行,在烟气再循环协同下机组调峰区间拓展至 30%~100% THA。

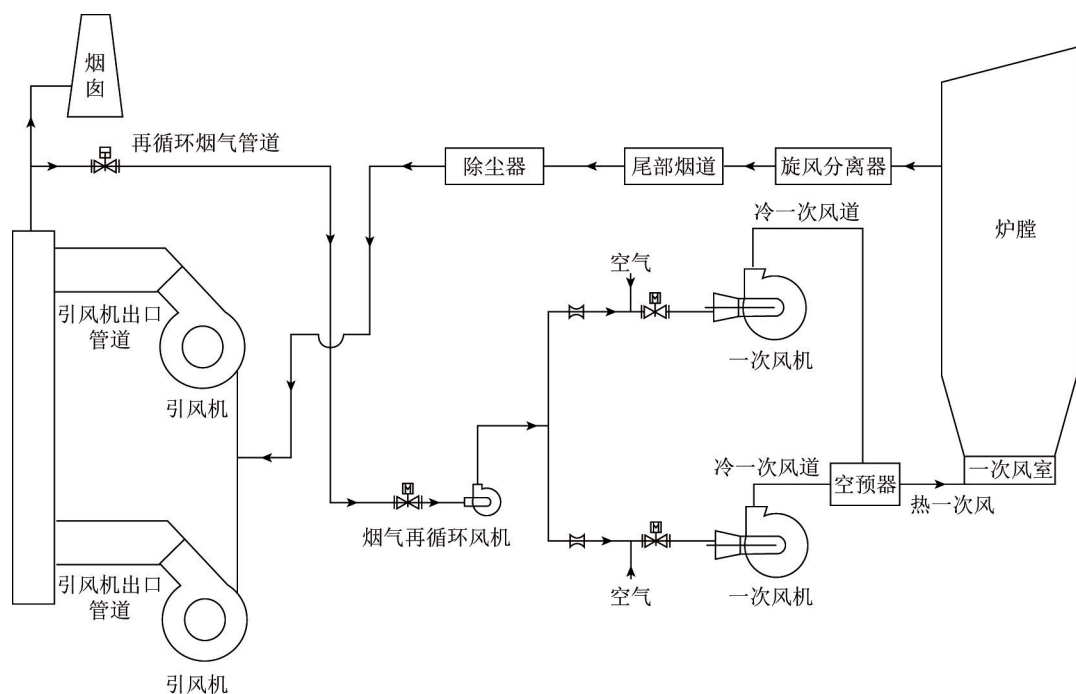


图 2 循环半干法脱硫后烟气的再循环系统

Fig.2 Layout of flue gas recirculation after SD-FGR

烟气再循环及时投入能优化锅炉燃烧工况,表现为高负荷抑制床温,低负荷降低密相区氧量。锅炉 30%~100% 负荷关键运行参数变化如图 3 所示,在降负荷至 175 MW 时提前开启烟道电动关断门,依靠烟道压差自流 $50 \text{ km}^3/\text{h}$ 烟气量,随锅炉负荷进一步降低,开启再循环风机逐渐增加循环烟气量,在保证一次流化风体积流量不降低前提下,维持调峰稳定工况锅炉省煤器入口烟气氧体积分数 2.5%~3.5%,机组 25%~50% 负荷运行氧体积分数相比较改前降低 11%~63%,烟气再循环协同下 160、140 MW 调峰工况尿素耗量分别减少 110、144 kg/h,105 MW 工况时投用循环烟气量 $135 \text{ km}^3/\text{h}$ 可实现锅炉原始 NO_x 超低排放,SNCR 尿素耗量为零。图 3 中典型调峰工况烟再投入不同循环烟气量后,由于密相区欠氧燃烧,平均床温出现 15~22 °C 不同程度下降,床温和分离器入口烟温差减小,沿炉膛高度方向温度梯度减小,且平均床温均在 740 °C 以上,低负荷稳燃能力较强。在起炉 70 MW 工况,通过烟气再循环和炉内脱硝能控制最终 NO_x 排放质量浓度低于 $50 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。

3.2 30% 负荷下烟气循环量对燃烧参数影响

研究对象在烟气再循环系统协同下,能实现 30% 负荷工况稳定运行并实现 NO_x 超低排放,不同循环烟气量对锅炉燃烧参数影响如图 4 所示,随循环烟气量增大,锅炉平均床温降低,瞬时降幅可超过 30 °C,随着料层的蓄积床温回升,稳定床温降幅控

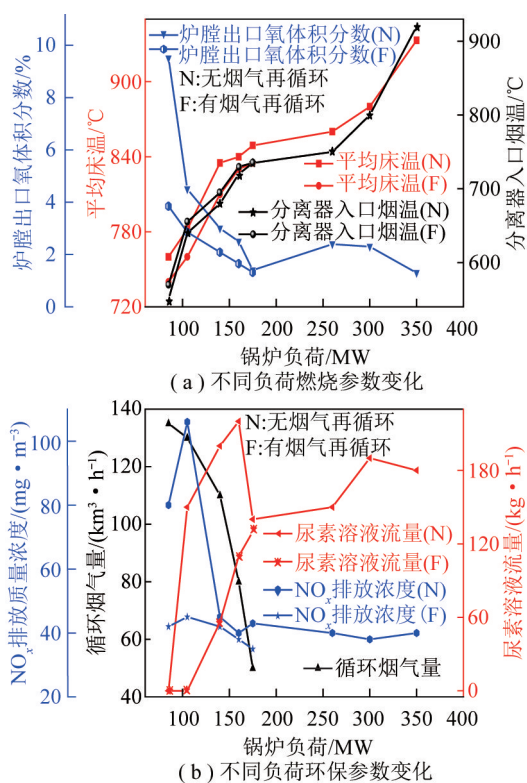
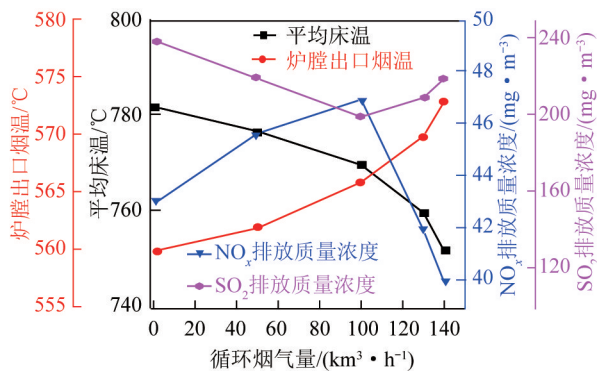


图 3 锅炉 30%~100% 负荷关键运行参数变化

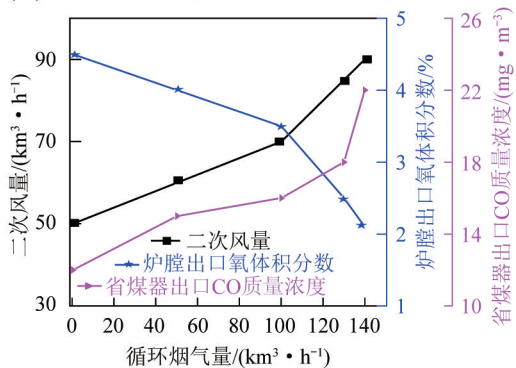
Fig.3 Variation of boiler key operating parameters between 30%-100% load

制在 22 °C 以内,锅炉 NO_x 初始排放逐渐减少,并最终稳定至 $50 \text{ mg}/\text{m}^3$ 以下。该变化的原因在于一次风含氧量降低,形成密相区局部欠氧气氛并提高了低负荷二次风风率,炉内分级燃烧抑制燃料型 NO_x

生成^[9]。运行调整过程中,为保证省煤器入口烟气中 O_2 体积分数稳定在2.5%~3.0%,随着循环烟气流量的增加,可逐渐增加二次风量约 $40\text{ km}^3/\text{h}$,调峰工况下增加二次风量能强化下层二次风冷却喷口作用,避免喷口碳化、变形及开裂。此外,炉膛出口温度随着烟气再循环量的增加升高约 $10\sim 13\text{ }^\circ\text{C}$,主要原因有2个:一是密相区缺氧后炉内燃烧后延;二是二次风量提高后,二次风穿透扰动能力提高,炉膛稀相区热物料浓度增加。根据上述运行参数变化并综合考虑机组能耗,推荐30%负荷工况最佳循环烟气流速 $135\text{ km}^3/\text{h}$,该值受锅炉炉膛结构尺寸、实际燃用煤质、空预器漏风率等因素影响,不同CFB机组略有区别。



(a) 循环烟气流速对炉膛温度、污染物浓度影响



(b) 循环烟气流速对二次风、氧量、CO影响

图4 锅炉30%负荷循环烟气流速对燃烧参数影响

Fig.4 Variation of combustion character under different flue gas recirculation volumes at 30% load

从省煤器出口CO浓度、飞灰及底渣可燃物含量等燃烧调整的重要指标,分析循环烟气流速对燃尽程度影响,如图4所示。省煤器出口烟气中CO浓度随着烟气再循环的增加略升高,但整体CO浓度低,CO质量浓度最大值未超过 $22\text{ mg}/\text{m}^3$,炉内风煤配比合理、燃尽程度高^[10-11]。

不同负荷时飞灰及底渣可燃物含量统计见表3。飞灰和底渣可燃物随着锅炉负荷降低而升高,锅炉飞灰含碳量较底渣含碳量涨幅大,主要由锅炉低负荷床温降低及旋风分离器效率下降造成。为防止局部流化不良,机组30%负荷工况运行时,控制一

次风量接近最小流化风量且不低于 $200\text{ km}^3/\text{h}$,根据调试经验,机组长时间低负荷运行需间歇增约 $25\text{ km}^3/\text{h}$ 一次风风量运行,对底部大颗粒床料进行充分扰动,实际扰动频次为每3h扰动20min。

表3 不同负荷时飞灰及底渣可燃物含量统计

Table 3 Statistics of combustible content in fly ash and bottom slag at various loads

机组负荷/ MW	飞灰含 碳量/%	底渣含 碳量/%	出口CO质量 浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$
105	2.04	2.92	22
350	1.54	2.84	15

3.3 40%负荷炉膛二次风SNCR对 NO_x 影响

超临界CFB锅炉45%THA负荷以下时,旋风分离器入口烟温仅 $650\text{ }^\circ\text{C}$,低于 $850\sim 1030\text{ }^\circ\text{C}$ 的SNCR脱硝反应窗口温度^[12-13],脱硝效率大幅降低,为此,在研究对象炉膛前后墙二次风管内布置16支SNCR双流体雾化喷枪,在某些低负荷极端工况 NO_x 超标时,作为备用 NO_x 超低排放控制手段。40%THA负荷稳定工况下,未使用烟气再循环风机(自流烟气流速约 $50\text{ km}^3/\text{h}$)而只用分离器处SNCR脱硝系统,喷入尿素溶液 $200\text{ kg}/\text{h}$ 控制 NO_x 最终排放低于 $50\text{ mg}/\text{m}^3$,对比试验如图5所示。第10min时通过二次风处16支SNCR脱硝喷枪喷入尿素 $150\text{ kg}/\text{h}$,旋风分离器处SNCR喷入尿素减少至 $50\text{ kg}/\text{h}$,第20min后CEMS测点 NO_x 由 $39\text{ mg}/\text{m}^3$ 逐渐降至 $24\text{ mg}/\text{m}^3$,氨逃逸由 $18\text{ mg}/\text{m}^3$ 降至 $4\text{ mg}/\text{m}^3$,第40min时停用二次风脱硝并恢复分离器处脱硝流量至 $200\text{ kg}/\text{h}$,第55min时 NO_x 排放值及氨逃逸恢复至试验前水平。分析由于二次风喷口处炉膛温度约 $860\text{ }^\circ\text{C}$,处于脱硝反应温度窗口内,SNCR效率高;同时自流循环烟气作用下,提高低负荷二次风穿透能力,雾化后尿素溶液借助二次风,更高效的进入锅炉密相区参与SNCR脱硝反应,降低烟气中 NO_x 及氨逃逸浓度。

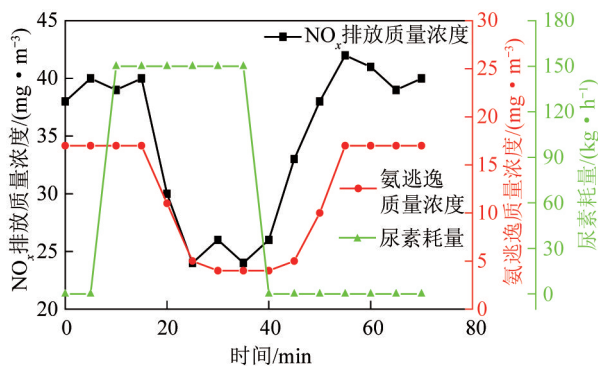


图5 NO_x 排放质量浓度及氨逃逸变化

Fig.5 Variation of NO_x emission mass concentration and ammonia escape

3.4 烟再投退瞬态运行参数响应

在 30%~60%THA 负荷区间,研究烟气再循环辅助调峰运行投入及退出瞬态参数响应情况。烟再投入瞬态响应曲线如图 6 所示。在降负荷试验过程中按先减煤再投烟再自流最后减风的顺序进行操作,可避免降负荷过程中氧量和 NO_x 大幅波动,且在旋风分离器入口烟温低于 SNCR 脱硝反应温度窗口前,50%THA 负荷时即逐渐投用循环烟气,以实现变负荷工况炉内燃烧平稳过渡,并能显著降低 NO_x 初始排放,减少尿素耗量。降负荷过程中尿素耗量呈下降趋势,不同于改造前降负荷过程中尿素耗量呈现的上升趋势。在降至 30% 负荷时,一次流化风量逐渐降至 $200 \text{ km}^3/\text{h}$,接近最低流化风量,循环烟气流保持 $135 \text{ km}^3/\text{h}$,维持二次风压不低于 2.0 kPa 、二次风量不低于 $80 \text{ km}^3/\text{h}$ 用于冷却喷口。在 30% 负荷工况,停喷尿素溶液,通过烟气再循环辅助炉内燃烧组织,在密相区构建还原气氛可实现原始 NO_x 超低排放。

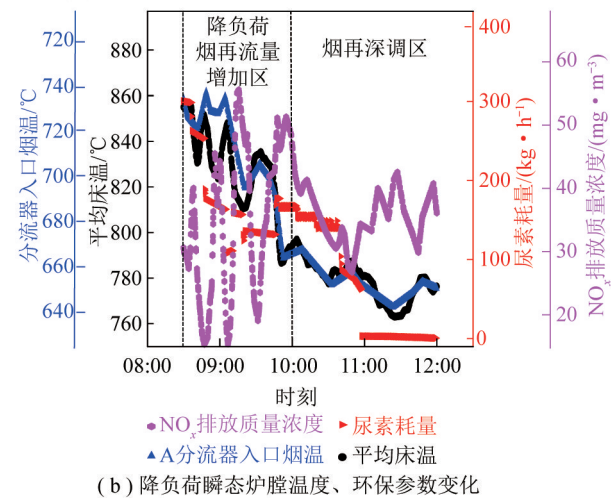
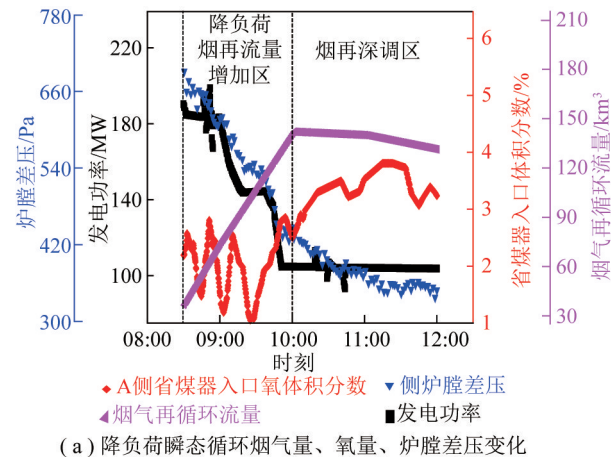


图 6 烟再投入瞬态响应曲线

Fig.6 Transient response curve of flue gas recirculation input

烟再退出瞬态响应曲线如图 7 所示。升负荷工

况尿素耗量呈上升趋势,烟再协同下 30%~60% THA 升负荷工况 NO_x 排放值稳定且尿素耗量稳定在 120 kg/h ,而改造前降负荷过程中尿素耗量高且波动大。由于 30% 负荷工况在烟气再循环的协同下,密相区处于还原气氛,长时间低床温运行,锅炉床料内残碳量增加^[14],当升负荷过程中减循环烟气流过快,会出现短时间床温升温速率快,升负荷速率过快的现象,因此需在试验升负荷过程中按先加风再减循环烟气流最后加煤顺序进行操作,控制燃煤加入速度,逐步释放密相区床料内大量即燃型残碳热量。如图 6、图 7 所示,在锅炉降负荷过程氧量波动幅度高于升负荷过程,变负荷过程中通过烟再协同可以控制省煤器入口氧体积分数在 1.5%~4.0%,避免氧量大幅度波动,同时 30%THA 负荷稳定工况控制省煤器入口氧体积分数控制在 3.5% 以内,稳定实现 NO_x 排放低于 $50 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。

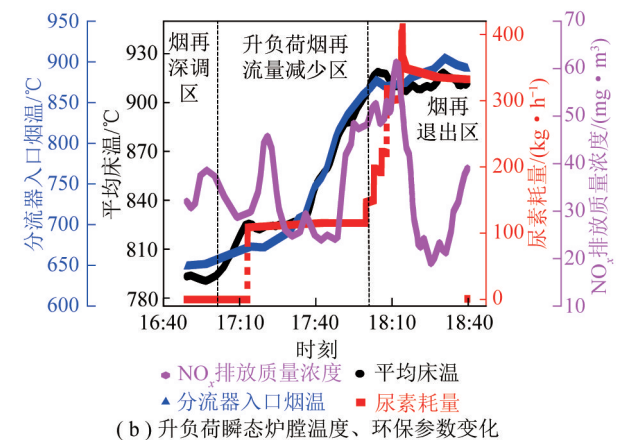
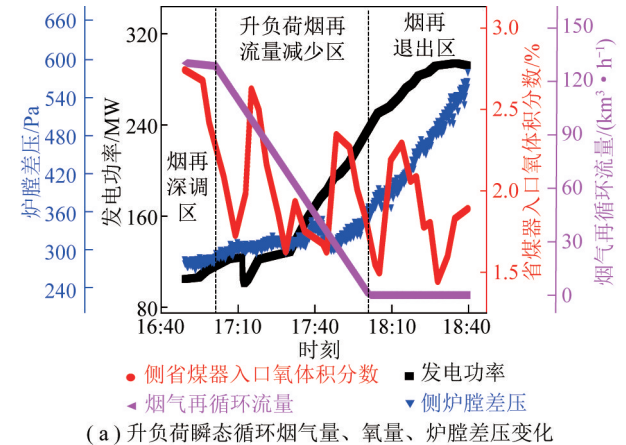


图 7 烟再退出瞬态响应曲线

Fig.7 Transient response curve of flue gas recirculation exit

3.5 升降负荷速率

国内先进的煤粉炉发电机组 AGC 过程变负荷速率能达到 $2.5\%Pe/\text{min}$ ^[15],而循环流化床锅炉受流动惯性、反应惯性、传热惯性及污染物排放影响^[16]升降负荷速率较慢,很多 CFB 机组 AGC 过程升降负荷速率

低于 $1\%Pe/\min^{[17]}$ 。试验机组在 $30\% \sim 60\%$ THA 负荷烟气再循环协同下、纯凝工况、协调投入、汽机滑压运行方式下,以设定 $4.5\text{ MW}/\min$ 负荷升/降速率进行单向斜坡指令变负荷联调试验,分别进行工况 1~6 (105 MW 升 140 MW、140 MW 升 175 MW、175 MW 升 210 MW、210 MW 降 175 MW、175 MW 降 140 MW、140 MW 降 105 MW) 负荷阶跃扰动升降负荷联调试验,结果见表 4。

表 4 省内闭环联调试验负荷参数变化统计

Table 4 Statistics of load variation parameters in closed-loop joint debugging test

试验工况	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6
负荷平均变化速率/ $(\text{MW} \cdot \text{min}^{-1})$	4.3	4.6	4.6	4.7	4.5	4.6
负荷响应时/S	46	42	45	30	35	41
负荷调节精度/MW	-1.2	1.3	-0.2	0.1	0.1	0.3

在自动发电控制 (AGC) 方式下,负荷上升/下降变化最小速率 $1.23\%Pe$ ($4.3\text{ MW}/\min$), AGC 负荷响应时间最大为 46 s , 调节精度最大为 1.3 MW 。试验期间 60% THA 负荷开始通过烟气再循环提前介入炉内燃烧组织, NO_x 等污染物排放值稳定达标。

3.6 烟气再循环对汽水参数影响

超临界 CFB 机组深度调峰相比较于亚临界机组还涉及水动力安全性问题^[18-20], 调峰过程中应尽量避免频繁干湿转态运行, 保证蒸汽参数稳定。超临界 CFB 锅炉用一次上升管水冷壁布置方式, 炉膛水冷壁用光管、双面水冷壁用内螺纹管, 在双面水冷壁、前墙水冷壁、后墙水冷壁、左右侧墙水冷壁上共计布置 122 个壁温测点, 30% THA 负荷运行时, 保持直流干态运行, 汽水分离器出口工质有一定过热度, 水冷壁出口工质温度最大偏差出现在 105 MW 。

122 个壁温如图 8 所示, 整体呈现“中心低、角部高”分布, 其中计算前墙最大壁温偏差为 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 、后墙最大壁温偏差为 $23\text{ }^\circ\text{C}$ 、左右侧墙最大壁温差为 55 和 $43\text{ }^\circ\text{C}$ 、前中隔墙同屏最大壁温偏差为 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 、后中隔墙同屏最大壁温差为 $22\text{ }^\circ\text{C}$, 分析由于未用二次上升水冷壁设计, 水冷壁工质质量流速低且炉内物料浓度分布不均引起炉内热负荷分布不均共同导致^[21]。100% 负荷运行时水冷壁最大壁温偏差降至 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 且出现在后中隔墙水冷壁出口, 均未出现壁温超温现象。

锅炉低负荷工况总煤量和总风量减少, 炉膛出口烟温下降, 再热受热面传热量降低, 会出现再热汽温下降的问题^[22-23], 烟气再循环已成为二次再热煤粉炉机组调节汽温的主要手段^[24-25]。锅炉不同负

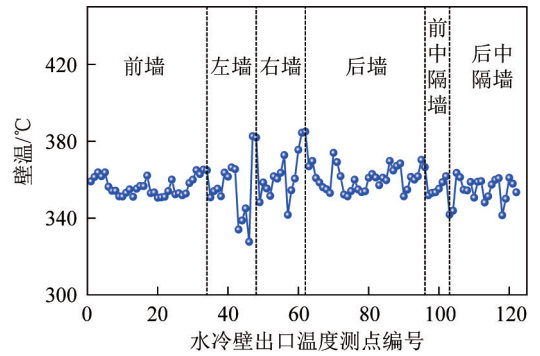


图 8 30% THA 负荷不同水冷壁出口温度

Fig.8 Outlet temperature of water wall of different pipes under 30% THA

荷主再热汽温如图 9 所示, 烟气再循环使用后, 超临界锅炉在 30% THA 负荷主再热汽温能维持在 $558\text{ }^\circ\text{C}$ 以上, 低再及低过无减温水, 相比较于无烟再时再热汽温升高 $5\text{ }^\circ\text{C}$, 主要因为烟气再循环使炉膛出口烟温升高且低负荷烟气量增加明显, 提高了再热受热面吸热量。30% THA 负荷中温过热屏最大壁温偏差 $19\text{ }^\circ\text{C}$, 高温过热屏最大壁温偏差 $55\text{ }^\circ\text{C}$, 低再最大壁温偏差 $52\text{ }^\circ\text{C}$, 屏再最大壁温偏差 $47\text{ }^\circ\text{C}$, 均未出现壁温超温现象。

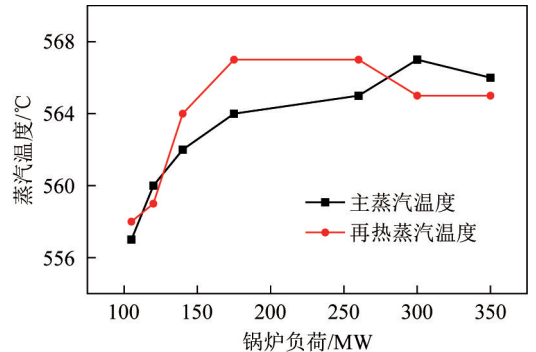


图 9 锅炉不同负荷主再热汽温

Fig.9 Primary and reheat steam temperature under different boiler load

4 结 论

1) 各负荷下存在最佳循环烟气量。30%~60% THA 低负荷运行工况下, 烟气再循环能保证一次流化风量始终高于最小流化风量同时提高二次风量, 炉膛出口氧体积分数降至 $1.5\% \sim 4.0\%$, NO_x 最终排放稳定在 $50\text{ mg}/\text{m}^3$ 以内, 通过炉内燃烧组织可实现 30% THA 锅炉原始 NO_x 超低排放, 40% 负荷二次风 SNCR 脱硝 NO_x 降幅约 $15\text{ mg}/\text{m}^3$ 。

2) 低负荷工况平均尿素消耗量减少 $1/3$, 平均床温降低 $15 \sim 22\text{ }^\circ\text{C}$, 炉膛稀相区燃烧份额增加, 炉膛出口烟温提高 $10 \sim 13\text{ }^\circ\text{C}$, 尾部对流换热能力提高, 烟再投用提高再热汽温 $5\text{ }^\circ\text{C}$, 锅炉飞灰及底渣含

碳量随着循环烟气量增加略升,省煤器出口 CO 质量浓度未见大幅上升,燃尽性好。

3) 调峰变负荷过程中考虑燃烧延迟,提前动作优化风量、煤量、循环烟气量等,可实现调峰过程燃烧及汽水参数平稳过渡,负荷上升/下降变化最小速率 1.23% Pe, 30%及以上 THA 负荷,锅炉保持直流干态运行,水冷受热面最大壁温差 55 °C 出现在侧墙水冷壁中,主再热汽温正常,未出现壁温超温。

参考文献 (References):

- [1] 吕俊复,蒋苓,柯希玮,等. 碳中和背景下循环流化床燃烧技术在中国的发展前景[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 514-522.
- LYU Junfu, JIANG Ling, KE Xiwei, et al. Future of circulating fluidized bed combustion technology in China for carbon neutralization [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 514-522.
- [2] 李寿军,尚曼霞,杨学宝,等. 350 MW 超临界循环流化床机组灵活性改造研究[J]. 节能, 2023, 42(12): 42-45.
- LI Shoujun, SHANG Manxia, YANG Xuebao, et al. Research on flexibility transformation of 350 MW supercritical CFB unit [J]. Energy Conservation, 2023, 42(12): 42-45.
- [3] 彭建升,王家兴,程昌业,等. 循环流化床锅炉燃用准东煤 NO_x 超低排放技术研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35(10): 65-71.
- PENG Jiansheng, WANG Jiaying, CHENG Changye, et al. Study on NO_x ultra-low emission technology of burning Zhundong coal in CFB boiler [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(10): 65-71.
- [4] 王志宁,蔡晋,张扬,等. 烟气再循环对燃烧过程 NO 生成的作用机理研究[J]. 热力发电, 2021, 50(3): 27-33.
- WANG Zhining, CAI Jin, ZHANG Yang, et al. Mechanism study on effect of flue gas recirculation on NO formation during combustion process [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(3): 27-33.
- [5] 厉彦民,严瑾,孙荣岳,等. 新型烟气再循环在流化床中的行为特性及 NO_x 排放分析[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(7): 71-80.
- LI Yanmin, YAN Jin, SUN Rongyue, et al. Behavior characteristics and NO_x emission analysis of new flue gas recirculation in fluidized bed [J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(7): 71-80.
- [6] 折建刚,谢国威,邹万竹. 烟气再循环对循环流化床锅炉燃烧影响的对比研究[J]. 能源科技, 2021, 19(5): 84-89.
- ZHE Jiangan, XIE Guowei, ZOU Wanzhu. Comparative study on influence of flue gas recirculation on combustion of circulating fluidized bed boiler [J]. Energy Science and Technology, 2021, 19(5): 84-89.
- [7] 张思海,李超然,万广亮,等. 330 MW 循环流化床锅炉深度调峰技术[J]. 发电技术, 2024, 45(2): 199-206.
- ZHANG Sihai, LI Chaoran, WAN Guangliang, et al. Deep peak shaving technology for 330 MW circulating fluidized bed boiler [J]. Power Generation Technology, 2024, 45(2): 199-206.
- [8] 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.

- [9] 靖长财,杨富鑫,谭厚章,等. 1 000 MW 机组炉烟再循环送粉改造技术研究[J]. 华北电力技术, 2017(5): 49-53.
- JING Changcai, YANG Fuxin, TAN Houzhang, et al. Study on the recycling of flue gas into the coal pulverizer system in 1 000 MW power plant [J]. North China Electric Power, 2017(5): 49-53.
- [10] 张晨浩,苏胜,常寿兵,等. 基于尾部烟道 CO 在线监测的锅炉燃烧优化[J]. 燃烧科学与技术, 2019, 25(4): 347-352.
- ZHANG Chenhao, SU Sheng, CHANG Shoubing, et al. Boiler combustion optimization based on online monitoring of CO in flue gas [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2019, 25(4): 347-352.
- [11] 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_x combustion retrofitting and optimal adjustment tests for a 130 t/h CFB boiler [J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(2): 81-87, 93.
- [12] YAN J, LU X F, ZHANG C F, et al. An experimental study on the characteristics of NO_x distributions at the SNCR inlets of a large-scale CFB boiler [J]. Energies, 2021, 14(5): 1267.
- [13] NIUS L, HAN K H, LU C M. Experimental study on the effect of urea and additive injection for controlling nitrogen oxides emissions [J]. Environmental Engineering Science, 2010, 27(1): 47-53.
- [14] 刘众元,武晓俊. 循环流化床锅炉压火启动调峰技术综述[J]. 热能动力工程, 2024, 39(3): 1-8.
- LIU Zhongyuan, WU Xiaojun. Review of banked fire and start-up peak regulation technology of circulating fluidized bed boiler [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(3): 1-8.
- [15] 赵永亮,许朋江,居文平,等. 燃煤发电机组瞬态过程灵活高效协同运行的理论与技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2080-2100.
- ZHAO Yongliang, XU Pengjiang, JU Wenping, et al. Overview of theoretical and technical research on flexible and efficient synergistic operation of coal-fired power units during transient processes [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2080-2100.
- [16] WANG L, YANG D, SHEN Z, et al. Thermal-hydraulic calculation and analysis of a 600 MW supercritical circulating fluidized bed boiler with annular furnace [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 95: 42-52.
- [17] 汤仔华,宋国良,宋维健,等. 循环流化床锅炉快速变负荷调节技术研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2279-2292. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.230515.
- TANG Zaihua, SONG Guoliang, SONG Weijian, et al. Research progress on rapid variable load regulation technology of circulating fluidized bed boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2279-2292. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.230515.

- [18] 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 Xiansheng, 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.
- [19] 聂鑫,谢海燕,杨冬,等.循环流化床机组锅炉深度调峰负荷水循环安全性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2022,53(7): 2766-2776.
NIE Xin, XIE Haiyan, YANG Dong, et al. Safety analysis for boiler thermal-hydraulic circulation with severe peak load regulation of a CFB unit[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2022,53(7): 2766-2776.
- [20] 王鹏程,邓博宇,蔡晋,等.超临界循环流化床锅炉深度调峰技术难点及控制策略[J]. 中国电力,2021,54(5): 206-212.
WANG Pengcheng, DENG Yubo, CAI Jin, et al. Technical difficulties and related control strategies on in-depth peak regulation for supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Electric Power,2021,54(5): 206-212.
- [21] 张西容,宋园园,周妍君,等.超临界循环流化床锅炉水冷壁吸热偏差计算及深度调峰水动力特性[J]. 中国电机工程学报,2024,44(15): 6047-6057.
ZHANG Xirong, SONG Yuanyuan, ZHOU Yanjun, et al. Hydrodynamic characteristics of deep peak shaving and calculation of water wall thermal[J]. Proceedings of the CSEE,2024,44(15): 6047-6057.
- [22] 姚力,崔亚明,冯云鹏.某330 MW循环流化床机组30%额定负荷深度调峰试验研究[J]. 山西电力,2023,(2): 53-57.
YAO Li, CUI Yaming, FENG Yunpeng. Test study on deep regulation at 30% rated load of a 330 MW circulating fluidized bed unit[J]. Shanxi Electric Power,2023,(2): 53-57.
- [23] 杨中智,卢啸风,角加艺,等.大型CFB锅炉低负荷再热汽温稳定特性[J]. 洁净煤技术,2023,29(6): 32-39.
YANG Zhongzhi, LU Xiaofeng, JUE Jiayi, et al. Stability characteristics of reheat steam temperature of large-scale CFB boilers at low load[J]. Clean Coal Technology,2023,29(6): 32-39.
- [24] 孙俊威,戴维葆,阎维平,等.不同烟气再循环方案对1000 MW超超临界二次再热锅炉的影响[J]. 热能动力工程,2019,34(5): 49-56.
SUN Junwei, DAI Weibao, YAN Weiping, et al. Influence of different flue gas recirculation schemes on 1000 MW ultra-supercritical double reheat boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2019,34(5): 49-56.
- [25] 董凌霄,姚峻鹏,靳晓灵,等.烟气再循环对660 MW二次再热塔式锅炉燃烧和传热特性影响的数值模拟研究[J]. 中国电机工程学报,2023,43(18): 7150-7160.
DONG Lingxiao, YAO Qiaopeng, JIN Xiaoling, et al. Numerical study on effects of flue gas recirculation on combustion and heat transfer characteristics in 660 MW double-reheat tower-type boiler[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(18): 7150-7160.