

贫煤锅炉灵活性调峰优化调整研究

刘建浩¹, 李战国², 马乐乐¹, 刘成永²

(1. 华北电力科学研究院有限责任公司西安分公司, 陕西 西安 710065; 2. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045)

摘要:针对贫煤锅炉低负荷稳燃困难、灵活性差的问题,以350 MW超临界贫煤锅炉为对象,进行烟花动力场试验和灵活性调峰优化调整。优化后,锅炉在不投油情况下的最低负荷可降至35%最大连续蒸发量(BMCR),炉内燃烧良好,燃烧器火检无闪烁,炉膛压力稳定;水动力稳定安全,垂直水冷壁相邻测点壁温差小于10℃;脱硝入口烟温351℃,炉膛出口烟温608℃,环保参数优良,调峰经济性良好,优化效果显著。

关键词:贫煤锅炉;灵活性;调峰;优化

中图分类号:TK221 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.01.017

[引用本文格式]刘建浩,李战国,马乐乐,等. 贫煤锅炉灵活性调峰优化调整研究[J]. 热能动力工程,2022,37(1):124-131. LIU Jian-hao, LI Zhan-guo, MA Le-le, et al. Study on optimization and adjustment of flexible peak regulation of lean coal boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(1): 124-131.

Study on Optimization and Adjustment of Flexible Peak Regulation of Lean Coal Boiler

LIU Jian-hao¹, LI Zhan-guo², MA Le-le¹, LIU Cheng-yong²

(1. Xi'an Branch of North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an, China, Post Code: 710065;

2. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing, China, Post Code: 100045)

Abstract: Aiming at the problems of difficult low-load stable combustion and poor flexibility of lean coal boilers, a 350MW supercritical lean coal boiler is used as the object to conduct the fireworks dynamic field tests and the flexible peak regulation optimization. After optimization, the minimum load of the boiler without oil input is reduced to 35% boiler maximum continuous rating (BMCR), the combustion in the furnace is good, the fire detection of combustor does not flicker, and the furnace pressure is stable. The hydrodynamics are stable and safe, and the temperature difference between the adjacent measuring points of the vertical water wall is less than 10℃. The flue gas temperature at the denitration inlet is 351℃, and the flue gas temperature at the furnace outlet is 608℃. The environmental protection parameters are excellent, the economy of peak regulation is good, and the optimization effect is remarkable.

Key words: lean coal boiler, flexibility, peak regulation, optimization

引言

2016年,中国政府签订《巴黎气候变化协定》,国家“十四五”规划也提出了要建设“清洁低碳、安

全高效的能源体系”^[1],电力发展低碳化成为必然。风能、太阳能等新能源的大力发展为如期实现碳达峰和碳中和目标奠定了重要基础,但各地仍存在不同程度的弃风、弃光现象^[2]。为提高新能源消纳能力,火电机组需承担电网调峰任务,提升灵活调峰

能力。

深度调峰需将火电机组最低发电负荷由 50% 下调至 35% 甚至更低^[3-4],因此锅炉低负荷稳燃能力是制约机组能否进行深度调峰的关键。文献[5-6]对 600 MW 机组进行了深度调峰研究和实践,在无设备改造及助燃的前提下,实现烟煤锅炉在 30% 左右负荷工况下稳定燃烧,达到预期调峰的目的。文献[6-8]对锅炉低负荷运行工况下的水动力安全性、流动不稳定性、壁温安全性等问题进行了研究,为锅炉低负荷安全运行提供了指导。文献[5,9]对机组深度调峰工况下的环保性进行了研究,结果表明, SO_x 和颗粒物排放浓度受负荷变化影响很小, NO_x 在负荷降低后明显增多,并且脱硝入口烟温下降,不利于脱硝装置运行。文献[10-11]从锅炉效率、汽轮机热耗、厂用电率、政策补贴等几个方面详细分析了深度调峰背景下的机组经济性。参与深度调峰的机组多燃用干燥无灰基挥发分高达 36% 以上的烟煤,由于贫煤挥发分低,机组存在低负荷稳燃困难^[12]、灵活性差的问题,会造成机组深度调峰能力不足。贫煤作为动力煤在我国的电站锅炉中被广泛应用^[13],因此研究和挖掘贫煤机组的深度调峰能力意义重大。

以 350 MW 超临界贫煤锅炉为对象,针对贫煤机组低负荷稳燃困难、灵活性差、深度调峰能力不足等问题,通过对燃烧优化调整以及安全性、环保性、经济性三个维度的分析研究,以期在不进行设备改造的前提下,实现贫煤机组深度调峰。

1 锅炉构造及燃烧器结构布置

1.1 锅炉基本构造

锅炉为 350 MW 超临界直流锅炉,其结构为单炉膛、一次中间再热、平衡通风、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构、Π 型布置。炉膛断面宽 15.29 m、深 13.22 m、高 56 m,炉膛由膜式壁组成,在设计 BMCR 工况下的主汽温和再热汽温分别为 574 和 572 ℃。锅炉采用前后墙对冲燃烧方式,燃烧器分 5 层布置,每层布置 4 只低 NO_x 旋流燃烧器,其中前墙布置 A、B、C 层燃烧器,后墙布置 D、E 层燃烧器。在煤粉燃烧器的上方,各布置 2 层燃尽风,每层有 4 只喷嘴,共 16 只燃尽风,如图 1 所示。

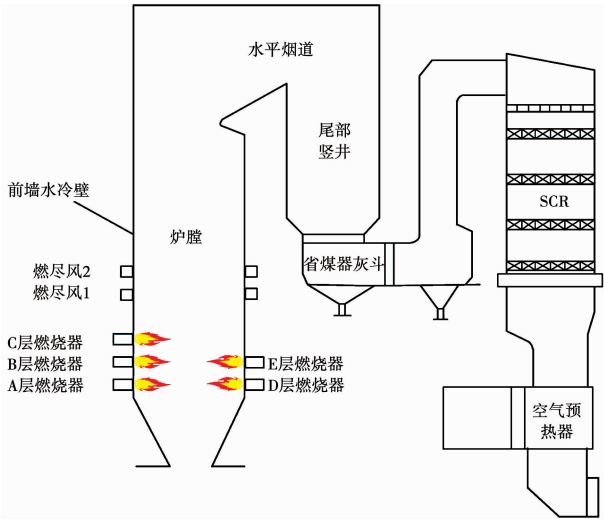


图 1 锅炉及燃烧器布置形式

Fig. 1 Boiler and burner layout forms

锅炉可采用微油点火的方式启动,A 层燃烧器内设有 4 支微油点火小油枪,单支出力为 100 kg/h。B、C、D、E 层燃烧器内设有 16 支大油枪,单支出力为 1 000 kg/h。锅炉燃烧用油为 0 号普通柴油。

1.2 燃烧器结构

锅炉采用中速磨制粉系统,每炉配 5 台磨煤机,每台磨煤机对应同一层的四只燃烧器。燃烧器中的空气被分成五股,分别是中心风、一次风、二次风、三次风和四次风,燃烧器喷口形状如图 2 所示。中心风的主要作用是在点火运行阶段配风及停运冷却。一次风携带煤粉进入磨煤机中,形成一次风和煤粉的混合物,经燃烧器一次风管送入炉膛。主燃烧空气分为二次风、三次风和四次风,分别通过燃烧器内同心的环形通道,在燃烧的不同阶段进入炉膛,有助于降低 NO_x 总量和燃料燃尽。二次风为直流风,三次风和四次风为轴向旋流风,在近燃烧器区形成环形回流,将高温烟气带回近燃烧器区,加热一次风,点燃煤粉,保持火焰稳定性,同时带回的高温烟气含氧量低,有利于 NO_x 还原。在远燃烧器区通过三次风和四次风来完成未燃尽碳的燃烧。燃烧器配有总调风挡板、二次风挡板和三次风挡板,用来调节每个燃烧器的总风量、二次风量、三次风量和四次风量之间的比例。此外,还配有三次风叶片和四次风叶片,用来调节三次风和四次风旋流强度。

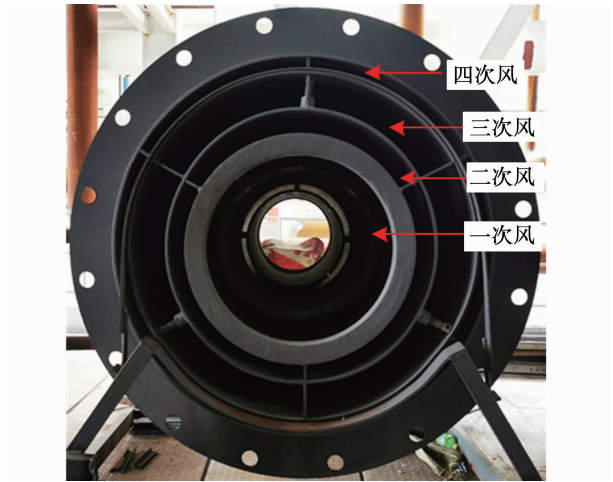


图 2 燃烧器喷口形状
Fig.2 Burner nozzle shape

2 烟花动力场试验及煤质分析

2.1 烟花动力场试验分析

采用烟花示踪法^[14],利用摄像技术将烟花喷射的示踪轨迹记录下来,观察燃烧器出口的射流形态并分析燃烧器的空气动力特性。通过冷态空气动力场试验,确定燃烧器二次风、三次风、四次风的分配情况,了解燃烧器的流体动力特性以及各次风调整对回流情况的影响,分析炉内火焰刷墙及结焦的空气动力原因等。

试验前将燃烧器总调风挡板和三次风挡板全开,通过改变二次风挡板开度和三次风、四次风叶片角度来改变燃烧器配风。试验工况如表 1 所示,其中工况 1 为基础工况,其他工况均在工况 1 基础上进行调整。

表 1 冷态空气动力场试验工况划分

Tab.1 The division of cold aerodynamic field test conditions

工况	二次风挡板开度/%	三次风叶片角度/(°)	四次风叶片角度/(°)
1	50	45	45
2	100	45	45
3	50	60	45
4	50	45	60

冷态空气动力场试验结果如图 3 所示。由图可知,在工况 1 条件下燃烧器喷口附近形成回流区,火焰包裹性好,喷口气流扩张角在 85°左右;工况 2 二次风挡板开至 100%,喷口气流扩张角在 85°左右,二次风气流刚性增强,回流区不明显且距离喷口较远,不利于煤粉稳定燃烧;工况 3 三次风叶片开至 60°,燃烧器喷口气流发散,喷口气流扩张角接近 180°,出现“刷壁”现象,说明三次风与一次风气流分离,卷吸能力反而减弱,无法形成回流区;工况 4 四次风叶片开至 60°,燃烧器喷口气流与工况 3 相似,喷口气流扩张角接近 180°,四次风与一次风气流分离,无法形成回流区,气流“刷壁”,说明热态工况不利于煤粉稳燃。

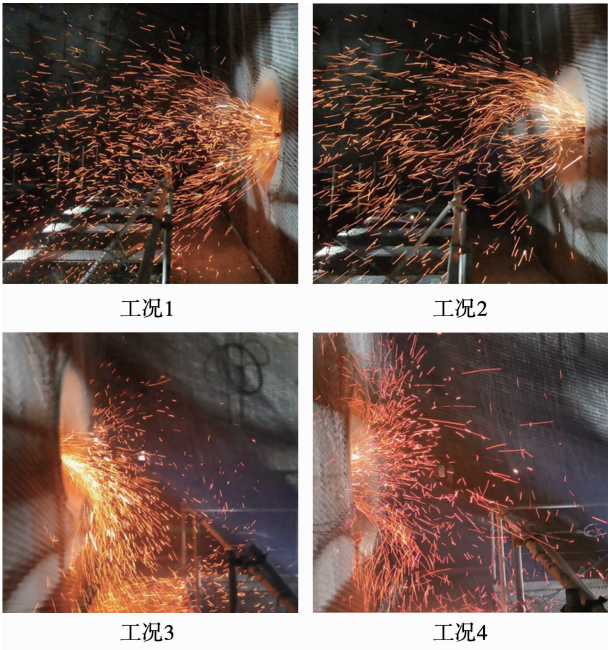


图 3 动力场试验结果

Fig.3 Dynamic field test results

锅炉燃烧器静态调整参数为总调风挡板全开,二次风挡板开 50%,三次风挡板全开,三次风和四次风叶片角度均为 45°。

2.2 燃料特性分析

试验采用贫煤煤质分析,如表 2 所示。贫煤煤化程度高,挥发分及其释放速率低,可燃性差,极不易着火与燃尽,稳定着火温度高达 850℃以上^[15],因此贫煤机组调峰运行困难。

表 2 煤质分析结果

Tab.2 Coal quality analysis results

元素分析/%					工业分析/%				热值 $Q_{\text{net,ar}}/$	煤粉细度
C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}	A_{ar}	M_{ar}	FC_{ar}	V_{daf}	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$R_{75}/\%$
51.8	2.1	3.38	0.79	2.6	32.83	6.5	42.77	17.9	20 803	6.55

3 灵活性调峰优化调整措施

3.1 优化燃烧器组合及二次配风

传统对冲燃烧方式的锅炉在低负荷稳燃时一般选用对冲的底层燃烧器,即 A、D 层,使对冲火焰相互支撑达到稳燃目的。但由于 A 层燃烧器内部装有微油点火小油枪,将燃烧器内部原有的稳燃浓缩装置拆除,因此在不投微油的情况下 A 层燃烧器稳燃效果偏差。此外,由于燃烧器着火后,火焰长度有限,而对冲的两层燃烧器之间的距离长达 13 m,很难达到对冲火焰相互稳燃的作用。为规避上述燃烧器组合的弊端,采用后墙两层燃烧器,即 D、E 层燃烧器进行低负荷优化调整。由于 D、E 层燃烧器未经过改造,内部有完整的稳燃浓缩装置,先天稳燃效果较好。此外,由于 D、E 层燃烧器上下相邻,燃烧器的中心距离为 4 m,所以 D 层燃烧器与 E 层燃烧器之间可以实现相互支撑,区域温度更高,燃尽率高,可达到更好的稳燃效果。

通过适当提高 D、E 层燃烧器区域的二次风量,降低其他未投运层的风量,并结合炉内火焰燃烧状况,使 D、E 层燃烧器的配风达到最优;将 D、E 层燃烧器对应的中心风档板关小至 15%,缩短燃烧器的着火距离。经优化后,锅炉负荷在 35% BMCR 时,炉内煤粉燃烧剧烈,火焰明亮发白,炉内温度高。

3.2 提高中间点温度

通过微调锅炉水煤比,提高中间点温度,关小过热器和再热器减温水,提高主蒸汽温度和再热蒸汽温度可以使汽水系统整体温度水平提高,进而有效提高炉内温度水平,促进炉内燃烧更加稳定充分。中间点温度的提高与炉内煤粉稳定燃烧、炉内温度水平提高和过热汽温及再热汽温的提高相互促进。

由图 4 可知,在锅炉由额定负荷(BRL)降至 50% BRL 过程中,中间点温度、主蒸汽温度、再热蒸

汽温度逐渐降低,分别由 412,569 和 568 ℃降低至 370.5,563 和 560 ℃。锅炉负荷在 35% BMCR 时通过优化调整将中间点温度提高至 369.5 ℃,随后主蒸汽温度和再热蒸汽温度升至 571 ℃和 570 ℃。

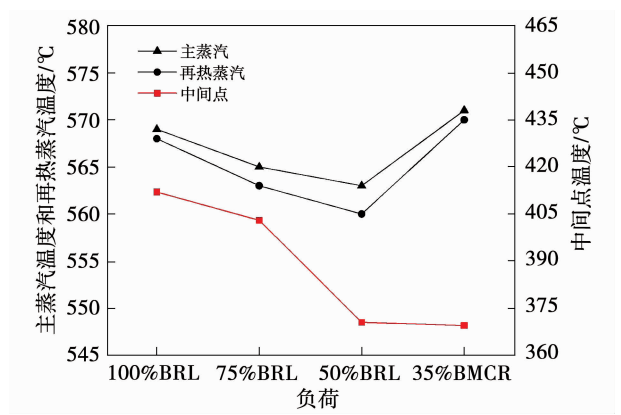


图 4 中间点温度、主蒸汽温度和再热蒸汽温度随负荷变化

Fig.4 Variations of intermediate point temperature,main steam temperature,reheat steam temperature with load

3.3 优化磨煤机一次配风

贫煤挥发分低,磨煤机及粉管着火风险也低。随着锅炉负荷降低,一次风温度相应下降,通过切断磨煤机入口冷风,提高磨煤机入口风温,维持磨煤机出口温度在 100 ℃左右。进入炉膛的煤粉温度提高后,炉内燃烧更加稳定。此外,磨煤机入口风温提高后,体积流量增大,干燥和携带煤粉能力增强,一次风率可适当降低。

由图 5 中可知,锅炉负荷由 100% BRL 降至 50% BRL 的过程中,一次风率基本维持在 25% 左右,负荷向 35% BMCR 降低的过程中,一次风率通过调整降低至 19.5%。一次风率的降低缩短了煤粉的着火距离,有助于高温烟气回流,增强了燃烧器的稳燃效果。

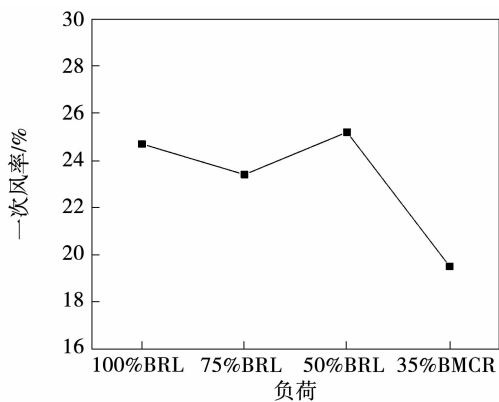


图 5 一次风率随负荷变化

Fig. 5 Variation of primary wind rate with load

4 灵活性调峰优化结果

锅炉运行的安全性、环保性、经济性是制约机组灵活性调峰程度的关键,安全性主要由低负荷工况的稳燃能力和水动力稳定性决定,环保性主要由脱硝系统是否具备投入条件决定。

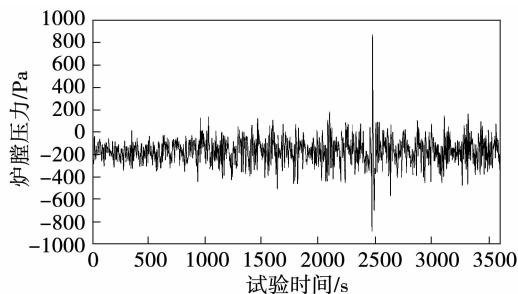
锅炉低负荷运行时,炉内温度水平低,稳燃能力变差,炉膛压力可直观迅速地表征炉内燃烧情况,是最简单有效的炉内燃烧监视手段。此外,负荷降低后水动力稳定性变差,水冷壁流动不稳定性增加,易引发受热面撕裂及过热损坏,水冷壁壁温可以直接反馈炉内水动力的变化情况。

电站锅炉的环保参数主要有 NO_x 、 SO_x 、颗粒物排放浓度等。其中, SO_x 和颗粒物排放浓度受锅炉负荷变化影响很小,各负荷均能满足国家环保要求,而 NO_x 排放浓度受锅炉负荷影响较大。选择性催化还原(SCR)脱硝装置入口烟温的正常运行区间为 $310 \sim 420\text{ }^{\circ}\text{C}$,当锅炉负荷降低到一定程度时,脱硝装置入口烟温将低于 $310\text{ }^{\circ}\text{C}$,不满足脱硝系统运行的条件,限制了机组进一步调峰的能力。

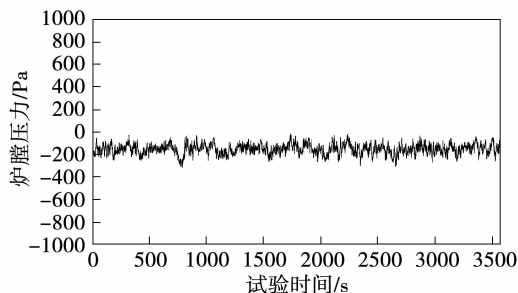
4.1 低负荷炉内燃烧稳定

优化调整前,不投油低负荷稳燃试验采用 A、D 层燃烧器组合方式,锅炉负荷降低至 35% BMCR 后,A 层燃烧器开关量火焰检测器频繁闪烁,平均每分钟 1 次。炉膛压力波动剧烈,由图 6(a)可知,优化前炉膛压力最低降至 -884 Pa ,并伴有炉膛压力冒正,说明炉内燃烧不稳,有灭火趋势,随后投油助

燃,试验中断。经优化调整后,试验顺利完成,由图 6(b)可知,优化后炉膛压力平稳,最低降至 -316 Pa 且无冒正,各燃烧器开关量火焰检测器无闪烁,炉内燃烧稳定。



(a) 优化前炉膛压力



(b) 优化后炉膛压力

图 6 炉膛压力随时间变化

Fig. 6 Variation of furnace pressure with time

4.2 水动力稳定性

超临界直流锅炉在低负荷运行时,水动力安全尤为重要。因为在低负荷运行时,给水流量和压力较低,流动不稳定性增加,水动力相对不足,水冷壁易出现流量分配不均的情况,并联管周期性脉动,引起金属受热面疲劳损伤^[6,9,15]。此外,流动不稳定性增加,易造成水冷壁管道温度偏差,严重时可能造成水冷壁撕裂、爆管,影响机组安全。

由图 7 可知,锅炉在 35% BMCR 负荷下,垂直水冷壁左墙、右墙、前墙壁温呈现中间高两侧低的“抛物线”型分布特点,后墙壁温基本持平。水冷壁相邻两个测点温差小于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高壁温 $405.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 位于右墙中间,低于 $475\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的报警值,锅炉水动力良好,运行安全。

此外,机组降负荷时,变负荷速率缓慢,保持锅炉干态运行,汽水分离器出口过热度始终维持在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,防止锅炉转湿态运行或工质气液相态频繁转换,以免造成受热面壁温交替变化、金属管材出

现疲劳裂纹^[16-17]的情况。

由图 8 可知,优化后主蒸汽温度提升 31 ℃,再热蒸汽温度提升 52 ℃,中间点温度提升 5 ℃,有效提升了汽水系统温度水平。

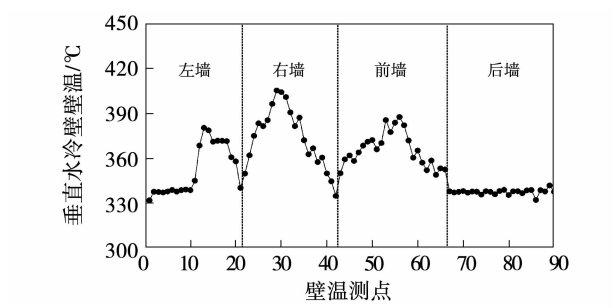


图 7 35% BMCR 负荷下锅炉垂直水冷壁壁温分布
Fig. 7 Temperature distribution of boiler vertical water wall at 35% BMCR load

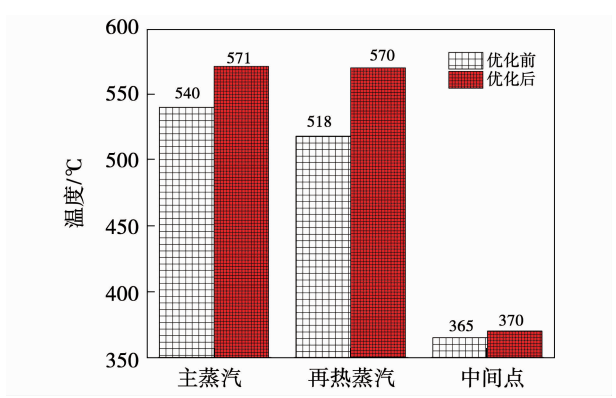


图 8 主蒸汽温度、再热蒸汽温度和中间点温度优化前后对比
Fig. 8 Comparison before and after the optimizations of main steam temperature, reheated steam temperature and intermediate point temperature

4.3 环保参数

由图 9 可知,在锅炉负荷由 100% BRL 降低至 50% BRL 的过程中,脱硝入口烟温基本稳定在 371 ~ 375 ℃之间。随着负荷降低至 35% BMCR,脱硝入口烟温稳定在 351 ℃左右,比运行区间低限值高 41 ℃,有利于机组进一步降负荷,深度调峰空间充足。

当锅炉负荷为 35% BMCR 时,机组 NO_x排放浓度为 27 mg/m³,SO_x排放浓度为 12.6 mg/m³,颗粒物排放浓度为 3.8 mg/m³,环保参数良好,优于超低

排放标准。

此外,在锅炉负荷由 100% BRL 开始降低的过程中,炉膛出口烟温由 811 ℃开始逐渐降低,负荷降至 35% BMCR 时,炉膛出口烟温稳定在 608 ℃左右,相较同负荷下的设计值提高了 20 ℃。

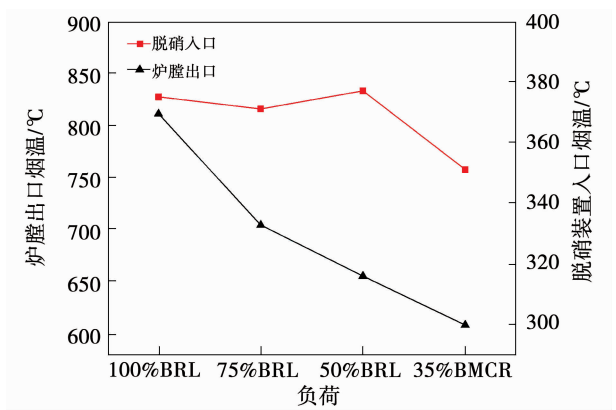


图 9 炉膛出口烟温与脱硝装置入口烟温随负荷变化
Fig. 9 Variations of the flue gas temperature at the outlet of the furnace and the flue gas temperature at the inlet of denitration device with load

4.4 调峰经济性

国家能源局华中监管局于 2020 年 9 月下发修订版的“两个细则”,明确了常规火电机组运行调峰机制和补偿标准,当机组负荷低于基本调峰下限时,按低于基本调峰下限少发电量给予补偿^[17],本发电机组额定负荷为 350 MW 基本调峰负荷为额定负荷的 50%。

表 3 低于基本调峰下限少发电量补偿标准
Tab. 3 Compensation standard for less power generation below the low limit of basic peak regulation

负荷率/%	补偿标准/元 · (MW · h) ⁻¹
45 ~ 50	100
40 ~ 45	200
35 ~ 40	300
< 35	500

对于火电机组,燃料为主要成本,其他成本可忽略不计。当机组负荷降低后,锅炉效率下降,汽轮机热耗增加,厂用电率上升,供电煤耗增加^[10-11]。通过对多台各类型机组统计分析可知,当负荷率由 50% 降至 40% 时,机组供电煤耗上升 13.7 ~ 22.1

$\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})^{[10]}$,上升平均值为 $17.9 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

以某电厂为例,机组在 50% 额定负荷条件下综合供电煤耗约 $340 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,则 40% 额定负荷时供电煤耗约 $357.9 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。由于 35% 与 40% 负荷接近,假定 35% ~ 40% 负荷段供电煤耗相同。参考 2020 年 11 月底 CCTD 环渤海动力煤现货 5 000 大卡发热量标准动力煤的 573 元/吨的价格和 0.34 元/ $(\text{kW} \cdot \text{h})$ 的综合上网电价,供电成本可通过式 (1) 计算:

$$E = \frac{7\,000 \times B \times D \times W}{Q}$$

(1)

式中: E —供电成本; B —供电煤耗; Q —燃煤发热量; D —燃煤市场价; W —发电量。

该电厂深度调峰 35%、40% 额定负荷与基本调峰 50% 额定负荷时,发电 1 小时的收益与成本计算结果如表 4 所示。

表 4 发电收益与成本

Tab.4 Benefits and costs of power generation

负荷率/%	上网电量 收益/元	调峰补偿 收益/元	供电成 本/元	净收 益/元
50	59 500	0	47 731	11 769
40	47 600	10 500	40 195	17 905
35	41 650	15 750	35 170	22 230

由表 4 可知,35% 和 40% 负荷率的深度调峰净收益分别比 50% 负荷率的基本调峰提高 88.8% 和 52.1%,35% 负荷率调峰净收益最大。从当前深度调峰补偿政策来看,调峰深度越深,补贴收益越大。考虑到实际情况,尽管机组处于低负荷运行工况,会造成单位发电量能耗检修维护成本增加等问题,但成本增长幅度较小,深度调峰净收益仍可观。随着动力煤价格上涨,供电成本增高,正常发电甚至可能出现亏损,深度调峰将成为增加收益的优良途径。

5 结 论

以 350 MW 超临界贫煤锅炉为对象,分析烟花动力场试验结果,并进行灵活性调峰优化调整研究,得出结论:

(1) 燃烧器总调风挡板全开、二次风门挡板开 50%、三次风门挡板全开、三次风和四次风叶片角度

均为 45° 的稳燃效果最佳。

(2) 优化调整后,锅炉不投油稳燃负荷降至 35% BMCR,炉内燃烧稳定,燃烧器开关量火焰检测器无闪烁,炉膛压力稳定,波动最低至 -316 Pa 。

(3) 锅炉水动力稳定安全,垂直水冷壁相邻测点壁温差小于 $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$,优化后主蒸汽温度提升 $31 \text{ }^{\circ}\text{C}$,再热蒸汽温度提升 $52 \text{ }^{\circ}\text{C}$,中间点温度提升 $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(4) 脱硝入口烟温 $351 \text{ }^{\circ}\text{C}$,比脱硝装置低限值 $310 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 高 $41 \text{ }^{\circ}\text{C}$,炉膛出口烟温 $608 \text{ }^{\circ}\text{C}$,相较设计值提高 $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$,环保参数良好,有利于机组进一步降负荷,深度调峰空间充足。

(5) 调峰经济性良好,35% 和 40% 负荷率的深度调峰净收益分别比 50% 负荷率的基本调峰提高 88.8% 和 52.1%,35% 负荷率的调峰净收益最大。

参考文献:

[1] 新华网. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-03-12). http://www.xinhuanet.com/2021-03/13/c_1127205564.htm. Xinhua Net. The fourteenth Five-Year plan for the national economic and social development of the People's Republic of China and the outline of the long-term goals for 2035[EB/OL]. (2021-03-12). http://www.xinhuanet.com/2021-03/13/c_1127205564.htm.

[2] 周强,汪宁渤,冉亮,等. 中国新能源弃风弃光原因分析及前景探究[J]. 中国电力,2016,49(9):7-12,159. ZHOU Qiang, WANG Ning-bo, RAN Liang, et al. Cause analysis on wind and photovoltaic energy curtailment and prospect research in China[J]. Electric Power, 2016, 49(9):7-12, 159.

[3] 中国电力网. 电力发展“十三五”规划(2016—2020 年)[EB/OL]. (2016-11-08). <http://www.chinapower.com.cn/focus/20161108/64097.html>. China Power Website. The electric power development planning in the “13th Five-Year” (from 2016 to 2020)[EB/OL]. (2016-11-08). <http://www.chinapower.com.cn/focus/20161108/64097.html>.

[4] 周科,成沛坤,解冰,等. 典型旋流燃烧器低负荷稳燃特性试验[J]. 热力发电,2020,49(9):121-126. ZHOU Ke, CHENG Rui-shen, XIE Bing, et al. Experimental study on combustion stability characteristics of typical swirl burners at low load[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(9):121-126.

[5] 刘文胜,吕洪坤,蔡洁聪,等. 600 MW 亚临界锅炉 30% 额定负荷深度调峰试验研究[J]. 锅炉技术,2019,50(4):59-65.

- LIU Wen-sheng, LYU Hong-kun, CAI Jie-cong, et al. Experimental study on 30% rated depth peak-load for 600 MW sub-critical boiler[J]. Boiler Technology, 2019, 50(4): 59–65.
- [6] 张广才, 周科, 柳宏刚, 等. 某超临界 600 MW 机组直流锅炉深度调峰实践[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 83–88.
- ZHANG Guang-cai, ZHOU Ke, LIU Hong-gang, et al. Practice of deep peak load regulation for a 600 MW supercritical concurrent boiler[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 83–88.
- [7] 吴鹏举, 朱超, 万李, 等. 超临界机组锅炉 20% 负荷深度调峰水动力实炉试验研究[J]. 热力发电, 2021, 50(4): 59–66.
- WU Peng-ju, ZHU Chao, WAN Li, et al. Actual furnace test research on hydrodynamics of a supercritical boiler at 20% deep peak load[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(4): 59–66.
- [8] 欧阳诗洁, 李娟, 董乐, 等. 超超临界锅炉低负荷运行时的流动不稳定性计算分析[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(7): 84–91.
- OUYANG Shi-jie, LI Juan, DONG Le, et al. Calculation and analysis on the flow instability of an ultra supercritical boiler under low load[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(7): 84–91.
- [9] 马达夫, 张守玉, 何翔, 等. 煤粉锅炉超低负荷运行的技术问题和应对措施[J]. 动力工程学报, 2019, 39(10): 784–791.
- MA Da-fu, ZHANG Shou-yu, HE Xiang, et al. Technical problems occurring in ultra-low load operation of pulverized coal-fired boilers and the solutions[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(10): 784–791.
- [10] 包劲松, 顾正皓, 秦攀, 等. 浙江省燃煤机组深度调峰能耗试验与分析[J]. 浙江电力, 2019, 38(5): 98–102.
- BAO Jin-song, GU Zheng-hao, QIN Pan, et al. Test and analysis of energy consumption for deep peak regulation of coal-fired power generating units in Zhejiang province[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(5): 98–102.
- [11] 何志瞧, 陈巍文, 张江丰. 660 MW 超临界机组深度调峰试验及低负荷段经济性分析. 浙江电力, 2020, 39(6): 68–73.
- HE Zhi-qiao, CHEN Wei-wen, ZHANG Jiang-feng. Deep peak regulation test and economic efficiency analysis for the 660 MW supercritical unit under low load[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(6): 68–73.
- [12] 王菁, 孟江涛, 张瑞婷, 等. 贫煤直接混烧低氮稳燃研究[J]. 煤炭转化, 2020, 43(3): 17–25.
- WANG Jing, MENG Jiang-tao, ZHANG Rui-ping, et al. Research on low nitrogen stable combustion of lean coal direct-cofiring[J]. Coal Conversion, 2020, 43(3): 17–25.
- [13] 赵伶玲, 周强泰, 赵长遂. 旋流煤粉燃烧第四类稳燃技术[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, 36(4): 551–555.
- ZHAO Ling-ling, ZHOU Qiang-tai, ZHAO Chang-sui. Fourth technology of combustion stability for swirl combustion[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2006, 36(4): 551–555.
- [14] 华北电力科学研究院有限责任公司. 电站锅炉标准化调试技术[M]. 中国电力出版社, 2015: 172.
- North China Electric Power Research Institute Co., Ltd. Power Station Boiler Standardization Commissioning Technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015: 172.
- [15] 闫高程. 交流等离子点火方法在 600 MW 贫煤机组的应用[J]. 燃烧科学与技术, 2020, 36(4): 316–324.
- YAN Gao-cheng. AC plasma ignition method in 600 MW lean coal unit[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2020, 36(4): 316–324.
- [16] 汪华剑, 周虹光, 王洋, 等. 1 000 MW 垂直管圈超超临界锅炉水冷壁工质相变转换对金属壁温影响的试验研究[J]. 锅炉技术, 2017, 48(6): 13–18.
- WANG Hua-jian, ZHOU Hong-guang, WANG Yang, et al. Experimental study on influence of working medium phase change on metal temperature of water wall tube in a 1 000 MW ultra supercritical vertical water wall boiler[J]. Boiler Technology, 2017, 48(6): 13–18.
- [17] 李斌, 汪华剑, 梁学东, 等. 超超临界锅炉水冷壁管传热恶化对横向裂纹影响的有限元分析[J]. 中国电力, 2015, 48(12): 64–69.
- LI Bin, WANG Hua-jian, LIANG Xue-dong, et al. FEM analysis of heat transfer crisis of water wall tube on transverse crack in ultra-supercritical pressure boiler[J]. Electric Power, 2015, 48(12): 64–69.
- [18] 国家能源局华中监管局. 关于印发《华中区域并网发电厂辅助服务管理实施细则》和《华中区域发电厂并网运行管理实施细则》的通知[EB/OL]. (2020–09–04). <http://hzj.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.pk=AEB05CC013329FBDE050A8C0C1C8659B>.
- Central China Energy Regulatory Bureau of National Energy Administration of the People's Republic of China. Notice on issuing the “implementation rules for the management of auxiliary services for grid-connected power plants in central China” and “implementation rules for the management of grid-connected operation of power plants in central China”[EB/OL]. (2020–09–04). <http://hzj.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.pk=AEB05CC013329FBDE050A8C0C1C8659B>.