

# 循环流化床锅炉全负荷调峰特性研究

乔磊磊<sup>1</sup>, 王孝全<sup>1</sup>, 聂浩<sup>1</sup>, 柳成亮<sup>1</sup>, 魏绍青<sup>2</sup>, 郝海俊<sup>1</sup>,  
李绍军<sup>1</sup>, 冯浩<sup>1</sup>, 吕俊复<sup>3</sup>, 柯希玮<sup>4\*</sup>

(1. 晋能控股电力集团有限公司, 山西省 太原市 030006; 2. 怀柔实验室山西研究院,  
山西省 太原市 030032; 3. 清华大学能源与动力工程系, 北京市 海淀区 100084;  
4. 北京怀柔实验室, 北京市 昌平区 101499)

## Investigation on the Operation Characteristics of Circulating Fluidized Bed Boiler Unit for Full-load Regulation

QIAO Leilei<sup>1</sup>, WANG Xiaoquan<sup>1</sup>, NIE Hao<sup>1</sup>, LIU Chengliang<sup>1</sup>, WEI Shaoqing<sup>2</sup>, HAO Haijun<sup>1</sup>,  
LI Shaojun<sup>1</sup>, FENG Hao<sup>1</sup>, LYU Junfu<sup>3</sup>, KE Xiwei<sup>4\*</sup>

(1. Jinneng Holding Power Group, Taiyuan 030006, Shanxi Province, China; 2. Shanxi Research Institute of Huairou Laboratory, Taiyuan 030032, Shanxi Province, China; 3. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China; 4. Beijing Huairou Laboratory, Changping District, Beijing 101499, China)

**ABSTRACT:** Coal-fired power generation units based on circulating fluidized bed (CFB) combustion technology can achieve long-period near-zero load (banked-fire) operation with rapid start and stop capabilities, thereby enabling full-load regulation. Experimental results on a 300 MW subcritical CFB boiler demonstrate that the unit's power can rapidly drop to 1 MW at a rate of 10.4% Pe/min and then maintain long-term stable operation at an ultra-low load ratio of 1%, with a total hot standby duration exceeding 110 minutes. After finishing the banked-fire operation, the unit can restart at a rate of 3.5% Pe/min. During this period, the average bed temperature decreases from 800 °C to 553 °C at a rate of 2.2 °C/min; the main steam temperature and pressure drop by 165 °C and 1.7 MPa, respectively; the lateral temperature deviation of each heating surface is basically within 10 °C; and the turbine and generator operate smoothly with all parameters within safe limits. During the load lift phase, the instantaneous CO concentration in the flue gas rises sharply above 1%, but there is no risk of explosion. The hourly average emissions of dust, sulfur dioxide, and nitrogen oxide pollutants throughout the peak regulation process meet ultra-low emission standards. This study provides a more competitive direction for further enhancing the flexibility of coal-fired power units, which is of great significance for accommodating a high proportion of

renewable energy sources, as well as for ensuring the reliable and stable operation of new electric power systems.

**KEY WORDS:** flexible coal-fired power generation; circulating fluidized bed (CFB); full-load regulation; fast start-stop; banked-fire operation

**摘要:** 基于循环流化床(circulating fluidized bed, CFB)燃烧技术的燃煤发电机组可实现长周期压火热备运行与快速启停, 即具备全负荷调峰能力。在某 300 MW 亚临界 CFB 锅炉上的试验结果显示, 机组功率能够以 10.4% Pe/min 的速率快速降至 1 MW, 后在 1% 极低负荷率下维持长时间稳定运行, 总压火时长超过 110 min, 压火结束后又能以 3.5% Pe/min 的速率实现热态再启。压火期间, 平均床温以 2.2 °C/min 的速度从 800 °C 降至 553 °C; 主汽温度和主汽压力分别下降了 165 °C 和 1.7 MPa; 各受热面横向温度偏差基本在 10 °C 以内; 汽轮机和发电机运行平稳, 各项参数都在安全限值以内。扬火瞬时烟气 CO 浓度急剧上升超过 1%, 但无爆燃风险。调峰全过程尘硫氮污染物排放小时均值满足超低排放要求。该研究为深入挖掘煤电机组灵活性提供了一个更具竞争力的方向, 对高比例消纳风光等可再生能源、保障新型电力系统可靠稳定运行具有重要意义。

**关键词:** 灵活煤电; 循环流化床(CFB); 全负荷调峰; 快速启停; 压火热备

## 0 引言

近年来, 以风能、太阳能等为代表的可再生能源技术及产业得到快速发展。截止 2023 年底, 我

基金项目: 怀柔实验室项目(ZD2023008A)。

Project Supported by the Program of Beijing Huairou Laboratory (ZD2023008A).



表1 某300 MW亚临界CFB锅炉额定工况设计参数  
Table 1 Design parameters under rated operating conditions for a 300 MW subcritical CFB boiler

主要设计参数	数值
设计煤种	烟煤(低位热值 12.5 MJ·kg <sup>-1</sup> )
蒸发量/(t·h <sup>-1</sup> )	1070
主蒸汽温度/°C	541
主蒸汽压力/MPa	17.4
(再热蒸汽进/出口温度)/°C	325 / 541
(再热蒸汽进/出口压力)/MPa	3.75 / 3.55
给水温度/°C	278
锅炉热效率/%	91

成一个烟道后,烟气依次流经管式省煤器和卧式空预器。

给煤系统含4个原煤仓,单仓容积421.5 m<sup>3</sup>,1个原煤仓对应2台皮带式给煤机,给煤机配有中心给料机,单台给煤机最大出力为50 t/h,8个给煤口采用前墙集中等间距布置方式。

采用炉内石灰石脱硫结合炉外石灰石-石膏湿法脱硫工艺,以满足SO<sub>2</sub>超低排放要求;NO<sub>x</sub>排放控制方面,采用炉内低氮燃烧技术路线辅助SNCR烟气脱硝。

汽轮机方面,该一次中间再热机组采用单轴、两缸两排汽、单抽供热直接空冷凝汽式汽轮机(CZK300/292.5—16.7/0.4/538/538型)。通流结构介于反动式与冲动式透平之间,级数少,效率高;整锻转子,高压通流反向布置,中压通流正向布置,低压通流对称布置,轴向推力自平衡;采用双层缸结构,通流部分轴向间隙大,径向间隙小,具有较好的热负荷适应性。

## 1.2 试验流程

试验所用烟煤的工业和元素分析数据如表2所示,要求粒度大于9 mm的煤粒占比<5%。

表2 试验煤种工业和元素分析

Table 2 Proximate and ultimate analysis of the coal

工业分析(ar)/%				热值 $Q_{ar,net,p}$ (MJ/kg)
M	A	V	FC	
7.01	52.99	10.78	29.22	11.01
元素分析(ar)/%				
C	H	O	N	S
33.36	2.01	2.25	0.61	1.77

围绕锅炉蓄能、汽轮机三缸微出力、水动力安全、CO防集聚爆燃等关键问题开展了系列研究,并对部分新技术进行了应用,在此基础上确定了本次试验操作规程。总体思路是先切断进入炉膛的所

有燃料,短时通风后逐步关停所有风机,床料停止流化,机组负荷快速下降并维持在2.5 MW左右。压火全过程不投入燃料,也不投油助燃。为尽可能提高压火前锅炉蓄热量,保证压火过程稳定,压火前锅炉运行状态设置为高床压、低流化风、较高床温、低负荷与低主汽压等,同时采用压火前汽包高水位、压火后汽包低水位的水位调整方式。具体试验步骤如下文所述。

1) 正式压火前,入炉总煤量增加15 t/h并维持超过10 min(如图2所示),以提高炉膛蓄热量;

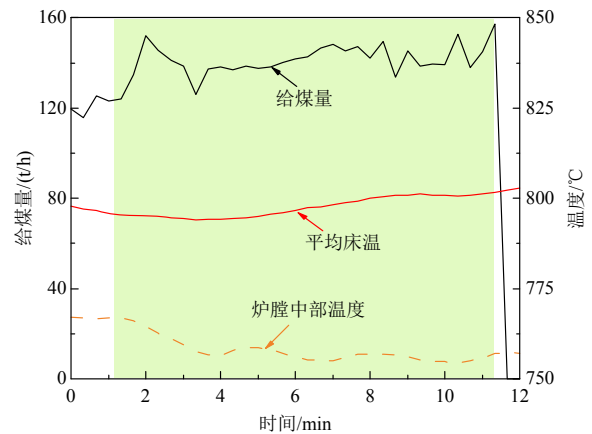


图2 压火前给煤量和炉膛温度变化

Fig. 2 Variation of coal feeding rate and furnace temperature before banked-fire operation

2) 待床温升至高点,手动切断所有燃料给入,检查床温是否有下降趋势;

3) 待炉膛氧量略有上涨,快速停运一、二次风机与一台引风机,经短暂时间后再停运另一台引风机,4.5 min后停运高流风机;

4) 关闭过热器、再热器减温水门与烟风挡板,保留净烟气挡板开启;

5) 根据汽压情况迅速关小综合阀位,维持主汽压力不超16.5 MPa,主、再热汽温最高不超过552°C;

6) 微开高压旁路系统(高旁),其开度依据高旁后温度不超过350°C且减温水不投入进行调节,同时控制高压缸排汽温度不超过320°C;

7) 调整综合阀位,控制机组负荷降至2.5 MW左右,注意低压缸进汽流量不低于20 t/h,避免发电机逆功率保护动作,之后在汽轮机数字式电液控制系统画面投入功率控制回路,设值目标负荷2.5 MW;

8) 控制发电机冷却水温度、定冷水进水温度不低于40°C。

本次试验设计近零负荷运行 1.5 h 以上。同时密切监视机组各运行参数，若床温低于 500℃、或主/再热汽温过热度低于 80℃、或调节级蒸汽与金属温度偏差达到 56℃，则提前退出压火状态，开始扬火。扬火过程不投油助燃，其主要操作如下文所述。

- 1) 打开烟风挡板，建立空气和烟气通道；
- 2) 先启动引风机，将炉内潜在积聚的 CO 抽走，再启动高压流化风机恢复返料，随后启动二、一次风机(二次风机保持微小出力)；
- 3) 恢复启动中间 6 台给煤机，点动投煤；
- 4) 其余按照正常并网带负荷操作执行。

试验过程中，机组功率、流量、温度、压力、振动等参数变化直接从电厂集散控制系统上读取。与此同时，借助手持式电化学烟气分析仪(Testo 340)实时测量分离器出口水平烟道处 CO 浓度变化。

## 2 结果与讨论

### 2.1 压火运行效果

如图 3 所示，停煤停风后，机组功率快速下降，4 min 内从 126 MW 降至 1 MW，负荷下降率达 10.4%Pe/min。之后机组进入压火运行状态，功率维持在 2~4 MW(负荷率~1%)，主蒸汽流量和进入低压缸蒸汽流量分别在 17.0 和 16.8 t/h 左右，此时机组发电量已与厂用电量相当，做到完全为新能源电力“让路”。总压火时长超过 110 min，期间锅炉、汽轮机、发电机三大主机及各辅机运行状态平稳，表明 CFB 锅炉机组具备长周期压火热备用能力。

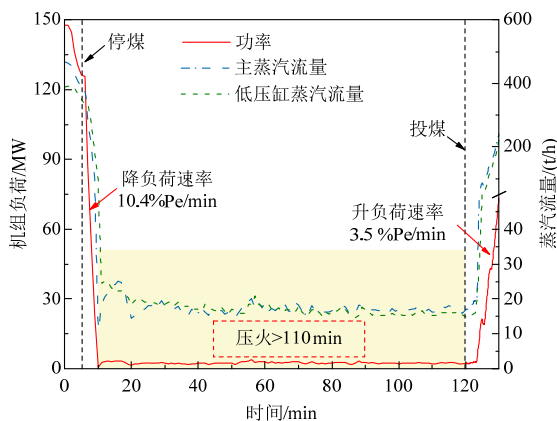


图 3 机组负荷和主汽流量随时间变化

Fig. 3 Variation of load and main steam flow over time

图 3 中：负荷变化率计算公式为  $r = (Q_{B,1} - Q_{B,2}) / (Q_{B,1} \Delta t) \times 100\%$ ； $Q_{B,1}$  和  $Q_{B,2}$  分别为变化前后负荷值，MW； $Q_{B,1}$  为额定负荷值，MW； $\Delta t$  为负荷变化时间，min。

退出压火状态准备扬火时，按操作流程依次启动各风机和给煤机。由于压火结束时炉内仍然积蓄了大量热量，且平均床温始终高于燃料着火点。因此，在未投油助燃条件下，煤颗粒重新给入后能够迅速着火燃烧，一次扬火成功，床温止跌回升，主蒸汽流量及机组功率快速爬升，不到 7 min 内从 3 MW 回升至 73 MW，再启速度达 3.5%Pe/min。之后按照电网调度要求滑参数停机。压火前后较高的负荷变化率，表明 CFB 锅炉机组同时具备快速启停能力。

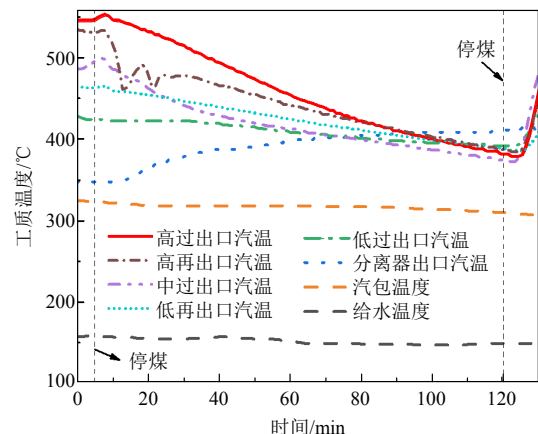
进一步地，若在压火运行期间，短时启动风机并给入适当燃料，即采用中间扬火策略，使床温和蒸汽参数得到一定回升(机组功率仍基本维持在近零负荷)，则有：

$$t_{\text{all}} = \tau_0(1+n) \quad (1)$$

式中： $t_{\text{all}}$  为总压火时长； $\tau_0$  为单次压火时长； $n$  为中间扬火次数。可以看出，提高锅炉蓄能潜力、下探扬火边界(保证燃料着火燃烧，确保水动力和汽轮机安全)，以延长  $\tau_0$ ；或寻求与床温相匹配的风煤中间给入时间窗口，借助少量多次能量输入以维持炉膛温度及蒸汽参数在“安全线”之上，从而显著延长总的压火调峰时间。

### 2.2 工质侧参数

图 4 展示了调峰试验期间各处工质参数随时间变化情况。其中，考虑到分离器内防磨浇注料蓄热量大和工质流量降低双重作用，分离器包墙过热器内汽温逐渐升高，110 min 压火时间内从 347℃ 升至 411℃。除此之外，由于炉膛温度降低(辐射换热减弱)、烟气及颗粒流动停滞(对流换热消失)，大部分受热面内工质参数均呈现下降趋势。例如，主蒸汽和再热蒸汽温度分别以 1.42 和 1.23℃/min 的速率下降；主汽压力在压火开始后先从 9.6 MPa 略微升



(a) 工质温度

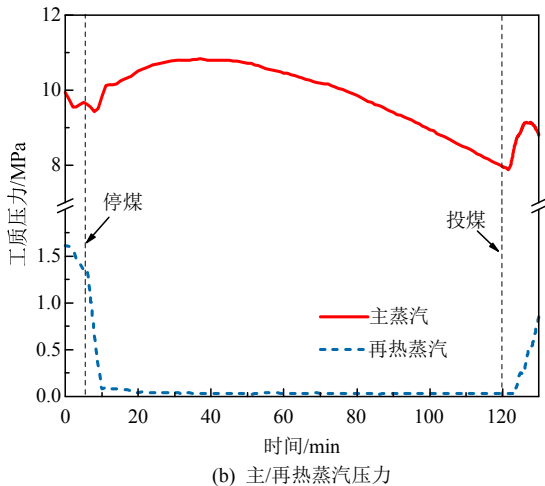


图4 工质参数随时间变化

Fig. 4 Variation of steam parameters over time

高至 10.8 MPa, 后逐渐降低至压火结束; 再热蒸汽压力则在 20 min 内快速降至 0.03 MPa, 后一直维持该低压状态。然而, 主汽过热度全程保持在 85℃ 之上, 保障了汽机侧安全。

从各级受热面进出口温升来看(如图 5 所示), 低温过热器(低过)和中温过热器(中过)随压火时间增加温升逐渐降低, 70 min 后均出现负值, 此时管内工质不再从外界吸收热量。高温过热器(高过)在压火开始阶段温升缓慢升高, 20 min 左右达到峰值(70℃), 此后也逐渐减小, 但至压火结束时仍能保持 5℃ 左右的温升。尽管高过和中过均位于炉膛上部, 由于高过布置位置更靠近侧墙, 与炉壁表面敷设的高温浇注料间辐射换热更显著, 即可依靠浇注料蓄热长时间加热主蒸汽。

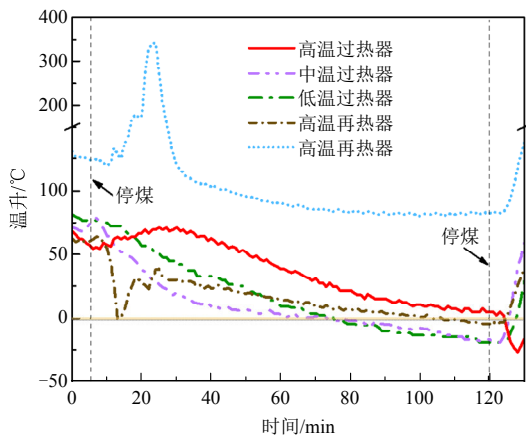


图5 各级受热面进出口温升随时间变化

Fig. 5 Variation of temperature rise at the inlet and outlet of each heating surface over time

值得注意的是, 当锅炉负荷快速降至最低值时, 由于减温水调门、电动门关闭不严, 低温再热器(低再)进口减温水过喷, 加上压火状态下再热蒸

汽流量很低, 导致低再进口温度快速下降 223℃, 而出口温度正常。虽然很快恢复, 但如此剧烈的温度升降会显著影响到受热面安全, 需对减温水控制逻辑以及减温水调门动作加以优化。

由于压火状态下床料及烟气均处于静止状态, 主要靠散料床层上表面向炉膛四周水冷壁和悬吊受热面辐射换热, 以及耐火材料向四周导热来加热管内工质(靠此即可在一定时间内维持极低蒸汽流量), 同一高度截面各处传热系数基本均匀; 且此时工质流量较小、参数偏低。因此各受热面横向温度偏差较小, 压火期间左右侧出口蒸汽温度偏差基本在 10℃ 以内(如表 3 所示), 水动力稳定, 受热面安全有所保障。然而, 高温再热器在刚开始压火后的 5 min 内, 由于左右减温喷水不一致, 导致温度偏差略高(>15℃), 但很快便恢复至 10℃ 以下。

表3 压火热备期间各受热面出口蒸汽左右侧温度偏差

Table 3 Temperature deviation of steam at the outlet of each heating surface during the banked-fire process 单位:℃

受热面	最大值	最小值	平均值
低温过热器	2.6	0.5	1.7
中温过热器	9.1	2.2	5.0
高温过热器	12.2	0.0	7.7
低温再热器	8.2	0.2	2.3
高温再热器	39.9	2.5	7.6

### 2.3 燃烧侧参数

调峰试验过程中, 床温及尾部烟温变化如图 6 所示。压火前平均床温控制在 800℃ 左右。停煤停风后, 床温以 2.2℃/min 的平均速率下降, 至压火结束时降至 553℃。而由于烟气及物料流动停滞, 炉膛中上部温度快速下降, 20 min 后即降至 422℃, 已低于中过进口汽温, 此时炉内各级过/再热器主要

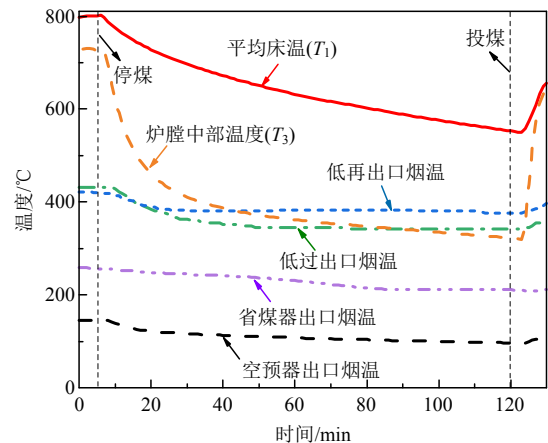


图6 炉内及烟气侧温度随时间变化

Fig. 6 Variation of furnace and flue gas temperatures over time

依靠与底部散料床层上表面辐射换热来加热管内工质。值得注意的是，由于热电偶探入深度有限，这里显示的床温只代表床层四周很薄范围内的温度，考虑到静止堆积颗粒间导热系数较小<sup>[29]</sup>，实际平均床温要远高于图 6 中数值。也就是说，到压火结束时床内仍然积蓄了大量热量。

本次试验中仅开启了净烟气挡板，其余各烟风挡板包括二次风入口均处于关闭状态，炉内烟气基本不流动，自然对流也不显著。因此，尾部竖井各点烟温变化较小，受热面表面对流换热作用很弱。

图 7 展示了空预器入口烟气氧量和分离器出口 CO 浓度随时间变化情况。可以看出，停风瞬时由于静态床中燃料欠氧燃烧，炉内氧气含量略有降低，而 CO 浓度显著升高。之后，在自然对流及少量漏风情况下，烟气氧量逐渐升高，至扬火前达到 18% 左右；而在微弱通风和低温氧化作用下，炉膛出口 CO 浓度缓慢下降。

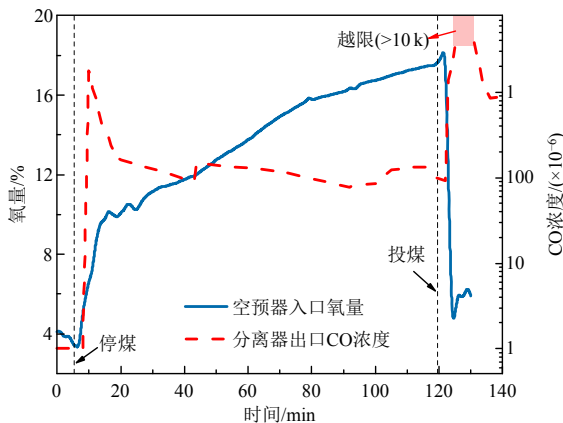


图 7 烟气气氛随时间变化  
Fig. 7 Variation of CO and O<sub>2</sub> concentration in flue gas over time

结束压火状态，打开烟风挡板，顺次启动各风机和给煤机后，由于炉内残炭及新投入燃料燃烧，烟气氧量迅速下降至 5%，而 CO 浓度急剧上升，最高超过 1% (超过烟气分析仪检测上限值)。除低温条件下不完全燃烧因素外，炉内压火期间积聚的高浓度 CO 也在短时间内被抽出，造成积聚。随着后续大量空气引入炉内，物料重新流化，燃烧恢复，CO 浓度也转为下降趋势。

本试验全过程中 CO 浓度始终低于爆炸极限，扬火启动时爆燃风险较低。但不排除有些压火工况下 CO 浓度过高，扬火瞬间可能发生局部爆燃，另外，强还原性气氛下受热面结渣腐蚀风险加剧，需引起注意。

## 2.4 汽机侧与发电机侧参数

如图 8 所示，压火开始阶段，随着主汽流量减少，汽机侧调门动作，汽轮机各轴振值变化幅度较大，Y 方向最大变化量为 19.8 μm；X 方向变化略小，最大变化量为 18.2 μm，但均在安全可靠运行限值以内。

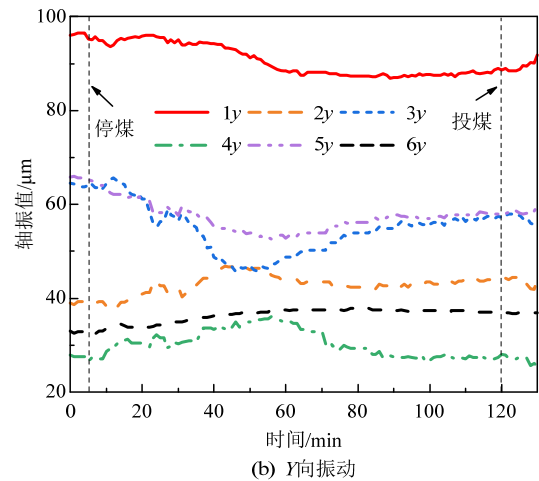
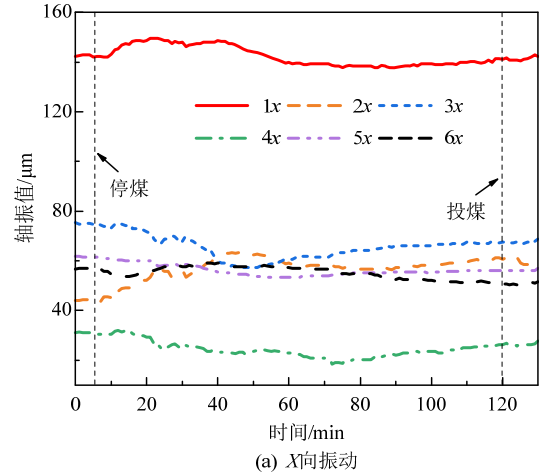


图 8 汽轮机各轴振值随时间变化  
Fig. 8 Time-varying vibration of the turbine bearings in the X and Y directions

汽轮机高压缸调节级蒸汽与金属温差作为汽机侧重点监测参数，在压火开始后逐渐增大，110 min 内从 1.1 °C 增大至 56.0 °C，达到试验设定安全阈值，如图 9 所示。也就是说，本次压火时长主要受到汽机侧安全限制。另外，图 10 显示压火期间汽轮机高压缸上下缸温差从开始时的 3.9 °C 逐渐变为 -11.0 °C；而中压缸上下缸温差变化较小，在 5 °C 以内。

图 11 展示了调峰过程中发电机各温度参数，均变化较小，保持在稳定安全工况下运行。

从本次试验结果来看，2~4 MW 负荷下汽轮机和发电机能够维持较长时间安全稳定运行。未来可

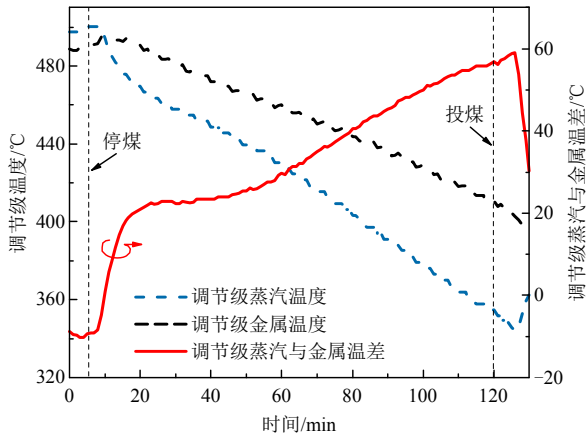


图9 汽轮机调节级蒸汽、金属温度随时间变化  
Fig.9 Variation of steam and metal temperatures in the governing stage of the gas turbine over time

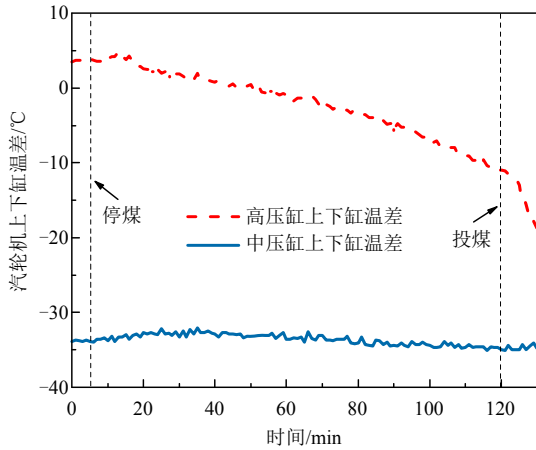


图10 汽轮机高、中压缸上下温差随时间变化  
Fig.10 Variation of temperature difference between the upper and lower parts of the high/intermediate pressure cylinders of the gas turbine over time

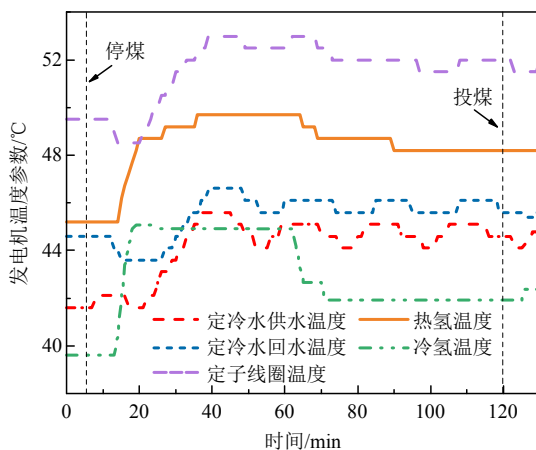


图11 发电机各温度参数随时间变化  
Fig.11 Variation of temperature parameters of the generator over time

探索进一步降低蒸汽流量的方法，以减少炉内蓄热流失速度，延长压火时间。需要深入分析全流程工质参数动态变化规律与匹配关系，探索极低蒸汽流

量下汽轮机热力特性与三缸微出力关键技术，解决发电机逆功率保护误动等问题。从而更好地评价长周期压火运行对汽轮机、发电机带来的新风险，并制定防范措施。

### 2.5 污染物排放

如图12所示，由于尾部湿法脱硫效率很高，SO<sub>2</sub>排放浓度一直低于35 mg·m<sup>-3</sup>。而粉尘和NO<sub>x</sub>排放浓度除短时超限外(扬火后几分钟内粉尘浓度最高到39 mg·m<sup>-3</sup>，压火期间NO<sub>x</sub>浓度最高升至60 mg·m<sup>-3</sup>)，大部分时间也分别控制在10 mg·m<sup>-3</sup>和50 mg·m<sup>-3</sup>以内。从小时均值来看，调峰全程尘硫氮均满足超低排放要求。

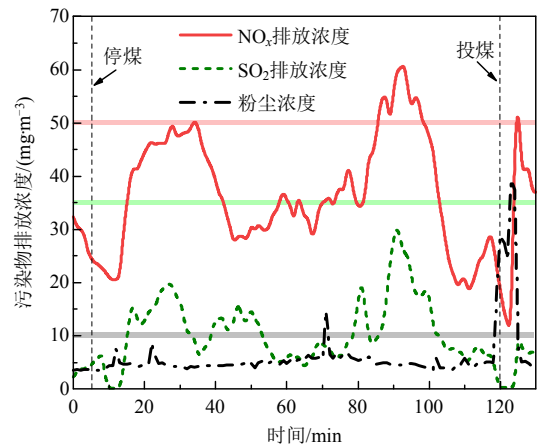


图12 尘硫氮污染物排放随时间变化  
Fig.12 Variation of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and dust emissions over time

但在部分情况下，锅炉快速启停阶段NO<sub>x</sub>排放浓度易出现陡增并超过限值较长时间。前期在同一机组上进行压火调峰尝试时发现，扬火后10 min内净烟气NO<sub>x</sub>浓度最高升至200 mg·m<sup>-3</sup>。这可能与压火操作时风煤配合及氧量控制策略有关。此前试验中，停止投煤后，待炉膛氧量涨至10%时再停运一、二次风机与引风机，因此炉内氧量一直处于高位，维持在20%左右。考虑到CFB燃烧条件下氮氧化物转化对氧浓度非常敏感<sup>[30-31]</sup>，氧量越高，NO<sub>x</sub>原始生成越多；加上此时炉温很低，偏离SNCR反应温度窗口，脱硝效率低，导致扬火阶段NO<sub>x</sub>排放瞬时超标。

本次试验中特地优化了氧量控制策略，停煤后仅过30s即快速停运一、二次风机和引风机，空预器入口氧量初值在3%左右，压火期间由于漏风等因素缓慢上升，最高不超过18%；而在扬火后初始短时间内有意采用低送风量，由于炉内大量残炭及新投入燃料燃烧，烟气氧浓度迅速下降至5%。因

此,在低氧条件下扬火时能较为容易地将  $\text{NO}_x$  排放控制在标准线以下。

围绕不同锅炉及不同种类燃料特性差异,未来还需进一步探究全负荷调峰过程中特别是快速启停期间的污染物排放控制问题。

### 3 结论

本文在某 300 MW 亚临界 CFB 锅炉上开展了全负荷调峰试验。结果显示,锅炉停煤停风后,机组负荷以 10.4% Pe/min 的平均速率快速下降,此后维持在 2~4 MW 稳定运行,总压火时长超过 110 min,压火结束后又能以 3.5% Pe/min 的速率实现热态再启。压火期间,平均床温以 2.2°C/min 的速度降低;空预器入口氧量逐渐升高至 18%,CO 浓度则缓慢下降。主蒸汽温度和再热汽温分别从 547 和 530°C,下降至 382 和 387°C,压力分别降低了 1.7 和 1.3 MPa;各受热面横向温度偏差基本保持在 10°C 以内,水动力稳定。在极低蒸汽流量工况下,汽轮机各轴承振动变化值不超过 20  $\mu\text{m}$ ,但高压缸调节级蒸汽与金属温差最大增至 56°C,达到设定安全阈值。发电机各温度参数都在安全可靠运行限值以内。重新给风投煤后,扬火瞬时 CO 浓度急剧上升超过 1%,但无爆燃风险。调峰全过程尘硫氮污染物排放小时均值满足超低排放要求。

试验表明,CFB 锅炉具备长周期全负荷调峰能力,对高比例消纳风光等可再生能源、保障新型电力系统可靠稳定运行具有重要意义。未来可从锅炉蓄能、扬火边界、床温调控、控制逻辑优化、 $\text{NO}_x$  排放控制等方面深入开展研究,进一步延长 CFB 锅炉压火时间。特别地,需关注近零出力热力系统和设备的安全性问题,如长时间偏离设计工况运行、频繁启停下的金属部件形变与疲劳损伤、浇注料开裂脱落、汽轮机低压缸末级叶片水蚀风险等,以尽可能减小对机组寿命影响。从而充分发挥 CFB 燃煤机组在灵活性方面的独特优势。

### 参考文献

- [1] 中国电力企业联合会. 2023-2024 年度全国电力供需形势分析预测报告[R]. 北京:中国电力企业联合会,2024. China Electricity Council. The analysis and forecast report on the supply and demand of national electric power from 2023 to 2024[R]. Beijing: China Electricity Council, 2024.
- [2] ELTIGANI D, MASRI S. Challenges of integrating renewable energy sources to smart grids: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 52: 770-780.
- [3] 黎博,陈民铀,钟海旺,等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-580. LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A Review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-580(in Chinese).
- [4] GU Yujiong, XU Jing, CHEN Dongchao, et al. Overall review of peak shaving for coal-fired power units in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 54: 723-731.
- [5] GONZALEZ-SALAZAR M A, KIRSTEN T, PRCHLIK L. Review of the operational flexibility and emissions of gas-and coal-fired power plants in a future with growing renewables[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 1497-1513.
- [6] 刘吉臻,李云鸷,宋子秋,等. 灵活智能燃煤发电技术及评价体系[J]. 动力工程学报, 2022, 42(11): 993-1004, 1012. LIU Jizhen, LI Yunzhi, SONG Ziqiu, et al. Flexible and intelligent coal-fired power generation technology and its evaluation system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(11): 993-1004, 1012(in Chinese).
- [7] PAWLAK-KRUCZEK H, MULARSKI J, OSTRYCHARCZYK M, et al. Application of plasma burners for char combustion in a pulverized coal-fired(PC) boiler-Experimental and numerical analysis[J]. Energy, 2023, 279: 128115.
- [8] MESSERLE V E, USTIMENKO A B. Plasma processing of uranium-containing solid fuels[J]. Fuel, 2019, 242: 447-454.
- [9] OUYANG Ziqu, SONG Wenhao, LIU Jingzhang, et al. Experimental study on  $\text{NO}_x$  emissions of pulverized coal combustion preheated by a 2MW novel self-sustained preheating combustor[J]. Fuel, 2021, 294: 120538.
- [10] ZHU Shujun, HUI Jicheng, LYU Qinggang, et al. Experimental study on pulverized coal combustion preheated by a circulating fluidized bed: Preheating characteristics for peak shaving[J]. Fuel, 2022, 324: 124684.
- [11] 宋民航,黄云,黄骞,等. 旋流煤粉燃烧器低负荷稳燃技术探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13):

- 4552-4565.  
SONG Minhang, HUANG Yun, HUANG Qian, et al. Discussion on low-load stable combustion technology of swirl pulverized-coal burner[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4552-4565(in Chinese).
- [12] 管晓艳, 孙绍增, 郝伟. 百叶窗煤粉浓缩器内流场显示的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(29): 57-62.  
GUAN Xiaoyan, SUN Shaozeng, HAO Wei. Experimental study on visualization of the flow field in a louver coal concentrator[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(29): 57-62(in Chinese).
- [13] ZHU Xiaojing, WANG Weishu, XU Weihui. A study of the hydrodynamic characteristics of a vertical water wall in a 2953 t/h ultra-supercritical pressure boiler [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 86: 404-414.
- [14] 周熙宏, 毕凌峰, 杨浩昱, 等. 燃煤机组锅炉深度调峰性能计算分析[J]. 动力工程学报, 2021, 41(10): 809-817.  
ZHOU Xihong, BI Lingfeng, YANG Haoyu, et al. Calculation and analysis of depth peak regulation performance of a coal-fired power plant[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(10): 809-817(in Chinese).
- [15] 欧阳子区, 王宏帅, 吕清刚, 等. 煤粉锅炉发电机组深度调峰技术进展[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8772-8789.  
OUYANG Ziqu, WANG Hongshuai, LYU Qinggang, et al. Research progress on deep peak shaving technology of pulverized coal-fired boiler power unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8772-8789(in Chinese).
- [16] CAO Ruifeng, LU Yue, YU Daren, et al. A novel approach to improving load flexibility of coal-fired power plant by integrating high temperature thermal energy storage through additional thermodynamic cycle [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 173: 115225.
- [17] 于伟静, 杨鹏威, 王放放, 等. 双碳战略背景下中国煤电技术发展与挑战[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2641-2656.  
YU Weijing, YANG Pengwei, WANG Fangfang, et al. Research and challenge of coal power technology development in China under the background of dual carbon strategy[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2641-2656(in Chinese).
- [18] 杨勇平, 陈衡, 郝俊红, 等. “双碳”目标下我国燃煤发电转型升级发展路径[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6900-6909.  
YANG Yongping, CHEN Heng, HAO Junhong, et al. Development pathways for the transformation and upgrading of China's coal-fired power generation under the goals of carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6900-6909(in Chinese).
- [19] ZHANG Hai, LYU Junfu, YUE Guangxi. A review on research and development of CFB combustion technology in China[J]. Powder Technology, 2023, 414: 118090.
- [20] LECKNER B. Hundred years of fluidization for the conversion of solid fuels[J]. Powder Technology, 2022, 411: 117935.
- [21] 岳光溪, 张扬, 张建春, 等. 面向双碳目标的多元燃料循环流化床燃烧技术展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6844-6854.  
YUE Guangxi, ZHANG Yang, ZHANG Jianchun, et al. Outlook for multiple fuel circulating fluidized bed combustion technologies for the dual carbon goals[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6844-6854(in Chinese).
- [22] 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(in Chinese).
- [23] 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(in Chinese).
- [24] 何映光. 300 MW 循环流化床锅炉压火对机组的影响分析[J]. 热力发电, 2009, 38(9): 48-51.  
HE Yingguang. Analysis about influence of banking fire in 300 MW CFB boiler upon the unit[J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(9): 48-51(in Chinese).
- [25] 吕俊复, 杨海瑞, 郭庆杰, 等. 水冷方形分离循环流化床锅炉的启动与压火[J]. 电站系统工程, 2000, 16(6): 323-325, 329.

- LYU Junfu, YANG Hairui, GUO Qingjie, et al. Start-up and hold-down performance of a CFB boiler with water cooled square cyclone[J]. Power System Engineering, 2000, 16(6): 323-325, 329(in Chinese).
- [26] 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(in Chinese).
- [27] 申欣, 赵强, 乔晓磊, 等. 超临界 CFB 锅炉压火特性现场试验与数值模拟[J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2797-2807.
- SHEN Xin, ZHAO Qiang, QIAO Xiaolei, et al. Field test and numerical simulation of banked fire characteristics of supercritical CFB boiler[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7): 2797-2807(in Chinese).
- [28] 徐顺智, 王孝全, 杨凤玲, 等. 某 300 MW 循环流化床煤机组灵活性运行技术探讨[J]. 电力学报, 2023, 38(1): 1-13.
- XU Shunzhi, WANG Xiaoquan, YANG Fengling, et al. Discussion on flexible operation technology of a 300 MW circulating fluidized bed coal power units [J]. Journal of Electric Power, 2023, 38(1): 1-13(in Chinese).
- [29] JIANG Ling, LI Yiran, YAO Yuge, et al. Heat transfer and protection of high-temperature reheater of a 660 MW circulating fluidized bed boiler after black out[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 213: 118654.
- [30] KE Xiwei, ZHU Shahong, HUANG Zhong, et al. Issues in deep peak regulation for circulating fluidized bed combustion: Variation of NO<sub>x</sub> emissions with boiler load[J]. Environmental Pollution, 2023, 318: 120912.
- [31] 柯希玮, 张纆, 杨海瑞, 等. 循环流化床锅炉 NO<sub>x</sub> 生成和排放特性研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2757-2770.
- KE Xiwei, ZHANG Man, YANG Hairui, et al. Research progress on the characteristics of NO<sub>x</sub> emission in circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2757-2770(in Chinese).



乔磊磊

收稿日期: 2024-05-28。

作者简介:

乔磊磊(1986), 男, 工程师, 主要从事火力发电技术研究与管理工 作, qiaolei0911@163.com;

\*通信作者: 柯希玮(1994), 男, 博士, 副研究员, 长期从事流化床燃烧和绿色低碳燃料技术研究工 作, kexiwei@sxri.hrl.ac.cn。

(编辑 张文鑫, 张蕾)