

# 330 MW 循环流化床锅炉深度调峰技术

张思海<sup>1</sup>, 李超然<sup>2</sup>, 万广亮<sup>1</sup>, 刘印学<sup>1</sup>, 徐海楠<sup>1</sup>, 黄中<sup>2</sup>, 杨海瑞<sup>2\*</sup>

(1. 国能宁东第一发电有限公司, 宁夏回族自治区 银川市 750408; 2. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学能源与动力工程系), 北京市 海淀区 100084)

## Deep Peak Shaving Technology for 330 MW Circulating Fluidized Bed Boiler

ZHANG Sihai<sup>1</sup>, LI Chaoran<sup>2</sup>, WAN Guangliang<sup>1</sup>, LIU Yinxue<sup>1</sup>, XU Hainan<sup>1</sup>, HUANG Zhong<sup>2</sup>, YANG Hairui<sup>2\*</sup>

(1. Guoneng Ningdong No. 1 Power Generation Co., Ltd., Yinchuan 750408, Ningxia Hui Autonomous Region, China;

2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments (Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

**摘要:** 为推进“双碳”政策的实施, 消纳波动性较强的新能源并网发电, 当前对火电机组的深度调峰要求越来越高。循环流化床(circulating fluidized bed, CFB)锅炉机组在深度调峰低负荷运行工况有着先天优势, 但实现20%以下的超低负荷运行依然面临众多的困难, 如炉内流化的稳定性、氮氧化物的排放及炉内局部超温带来的安全性等问题。以某330 MW CFB锅炉的深度调峰技术应用为例, 介绍了输煤筛分破碎系统、风帽节流圈、下二次风管等机组部件的改造, 并配合烟气再循环等技术应用, 成功实现了18%的超低负荷深度调峰运行, 同时也很好地控制了NO<sub>x</sub>的排放。最后总结了CFB机组超低负荷深度调峰技术的关键点和难点, 对深度调峰运行带来的潜在问题进行了分析, 并提出了相应的解决措施。研究结果具有重要的工程借鉴作用。

**关键词:** 火电机组; 循环流化床(CFB)锅炉; 深度调峰; 超低排放; 烟气再循环

**ABSTRACT:** To promote the implementation of the “double carbon” policy and to manage the high volatility of new energy, the current requirements for deep peak shaving of thermal power units are getting higher and higher. Circulating fluidized bed (CFB) boiler units have inherent advantages under low load operation conditions. However, the ultra-low load operation below 20% still faces many difficulties, such as the stability of the fluidization in the furnace, the emission of nitrogen oxides, and the safety issues caused by local over-temperature in the furnace. This paper took the application of deep peaking technology of a 330 MW CFB boiler as an example and introduced the modification of the unit

components, such as the coal conveying screening and crushing system, throttling rings of wind caps and lower secondary air pipes, etc. With the application of flue gas recirculation and other technologies, an 18% ultra-low load operation was successfully realized on this CFB boiler, and the NO<sub>x</sub> emission was also well controlled. The key points and difficulties of the ultra-low load operating technology of CFB unit were summarized. The potential problems caused by deep peaking operation were analyzed, and corresponding measures were proposed. The results of this study have an important engineering reference value.

**KEY WORDS:** coal-fired power unit; circulating fluidized bed (CFB) boiler; deep peak shaving; ultra-low emission; flue gas recirculation

## 0 引言

为推动“双碳”技术发展, 应对新能源大幅度增长变化的需求, 平衡新能源发电时空分布出力不均的现状, 火电机组需要多频次、大幅度调峰运行, 因此, 深入研究火电机组深度调峰迫在眉睫<sup>[1-5]</sup>。宁夏电网深度调峰补偿电价收益可观, 负荷率≤40%时对应的电价是0.75元/(kW·h), 而调峰深度越深, 单位发电量所获得的调峰收益也越多, 而这对电力公司减亏扭亏具有重大意义<sup>[6]</sup>。

循环流化床(circulating fluidized bed, CFB)锅炉燃烧技术具有燃料适应性广、燃烧效率高、高效脱硫、低氮氧化物排放、负荷调节范围宽等优点, 成为我国低热值燃料规模化利用的最佳方式, 能够满足超低排放和火电调峰需求<sup>[7-11]</sup>, 但机组在

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4100300)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China (2022YFB4100300).

升降负荷过程中, 炉内大量的床料以及煤颗粒中未完全燃烧的残碳和未完全反应的钙基脱硫剂, 使流动、燃烧、污染物生成与还原和传热过程都存在较大的系统惯性<sup>[12-14]</sup>, 此外, 各种反应物比率在发电负荷变化时容易出现失衡现象, 无法实现快速匹配。这样不仅会影响锅炉的负荷变化率, 同时也影响炉内的燃烧状况和燃烧中污染物的生成与排放, 导致污染物控制偏离最佳值, 出现超标排放, 从而使CFB电厂面临超低排放和自动发电控制(automatic generation control, AGC)<sup>[15-17]</sup>考核的双重压力。

因此, 流态化安全、超低排放性能、热应力带来的安全隐患等均是CFB锅炉机组深度调峰过程中亟待解决的难点问题<sup>[8]</sup>。本文通过对输煤筛分破碎系统等组件进行改造, 并配合烟气再循环等技术应用, 在某330 MW亚临界CFB锅炉上不仅成功实现了18%超低负荷的深度调峰运行, 还实现了NO<sub>x</sub>的超低排放。另外, 本文对深度调峰运行带来的负面影响进行了分析, 并提出了相应的解决措施, 对于同类CFB锅炉机组实现深度调峰运行具有重要的工程借鉴意义。

## 1 机组情况介绍

某电厂2台锅炉均采用东方锅炉厂设计制造的330 MW亚临界CFB锅炉(型号: DG 1177/17.5-II 3), 该锅炉整体布置为单炉膛、单布风板、一次中间再热、汽冷式旋风分离器、尾部双烟道结构。炉膛内布置有屏式受热面, 该屏式受热面由12片膜式过热器管屏(12Cr1MoV)、6片膜式再热器管屏(SA213-T91)和2片水冷蒸发屏构成。锅炉共布置10个给煤口, 全部布置于炉前, 在前墙水冷壁下部收缩段沿宽度方向均匀布置。6个排渣口布置在炉膛后水冷壁下部, 分别对应6台滚筒冷渣器。水冷风室两侧布置有一次热风道, 进风型式为从风室两侧进风。炉膛与尾部竖井之间布置有3台汽冷式旋风分离器, 其下部各布置1台“J”阀回料器, 回料器为一分为二结构。该330 MW CFB机组设计参数如表1所示。

汽轮机采用上海汽轮机厂设计制造的亚临界、一次中间再热、单轴、双缸双排汽、直接空冷凝

表1 330 MW CFB机组设计参数

Tab. 1 Design parameters of 330 MW CFB boiler

锅炉主要参数	锅炉最大连续出力工况下的数值
过热蒸汽流量/(t/h)	1 177
过热蒸汽压力/MPa	17.5
过热蒸汽温度/°C	541
再热蒸汽流量/(t/h)	979.6
再热蒸汽进(出)口压力/MPa	4.12(3.94)
再热蒸汽进(出)口温度/°C	341(541)
给水温度/°C	279.6

汽式汽轮机, 型号为NZK330-16.67/538/538。高、中压缸采用合缸顺流结构, 低压缸采用双流反向结构。汽轮机组有7级非调整抽汽, 1、2、3级抽汽分别供给3台高压加热器; 4级抽汽供给除氧器、高压辅汽系统及供热系统; 5、6、7级抽汽分别供给3台低压加热器, 而5级抽汽还向低压辅汽系统供汽。3、4、5级抽汽抽自中压缸; 6、7级抽汽抽自低压缸。给水系统配有2台50%容量电动给水泵。

输煤系统采用双线布置一筛一破工艺。细筛采用高幅振动筛(进料粒径30 mm, 筛分粒径<12 mm), 细碎机采用可逆式反击破碎机(入料粒度≤30 mm, 出料粒度≤12 mm)。煤源以原煤、煤矸石、煤泥为主, 入炉煤平均发热量在12.5~13.8 MJ/kg。

脱硝采用选择性非催化还原法(selective non-catalytic reduction, SNCR)<sup>[18]</sup>, 还原剂采用氨水(20%溶液), 氨水与除盐水稀释混合成5%左右的溶液后输送至喷枪处, 每台分离器入口烟道加装12支喷枪, 3台共安装36支。冷却风取自高压流化风, 雾化风取自杂用压缩空气。

脱硫采用“炉内石灰石干法”+“炉外石灰石湿法”, 根据入炉煤所含硫份额不同, 炉内钙硫摩尔比控制在1.5~1.8, 通过煤场的一台带式称重给料机, 将石灰石与煤均匀混配至输煤皮带上, 最终通过给煤机进入锅炉。

## 2 限制深度调峰运行的主要问题

1) 入炉煤粒径偏大, 为保证流化质量, 一次流化风量控制偏大, 导致氧量偏高, NO<sub>x</sub>控制难度大。

2) 布风均匀性差, 尤其低负荷时局部区域易出现流化不良、结焦等问题。

3) 深度调峰工况下, 二次风量偏低, 下二次风口背压偏高, 易发生下二次风管超温、膨胀不均、开焊漏灰的问题。

4) 深度调峰工况下, 一次流化风量已接近最小流化风量保护定值, 二次风量也仅能满足最小冷却风量, 但氧量仍偏高, 导致 $\text{NO}_x$ 无法满足超低排放标准。

5) 锅炉热惯性大, 变负荷过程中, 仅通过改变风量和煤量的方式, 变负荷速率无法满足深度调峰的动态要求。

### 3 系统改造及运行效果

#### 3.1 输煤筛分破碎系统

1) 改造情况。由于入炉煤中矸石质量分数为10%~20%, 煤质硬、热值低, 导致细碎机逃逸率偏高。为有效控制入炉煤粒径, 将原有的高幅振动筛(孔径12 mm)改为琴弦筛(孔径8 mm), 将筛下物粒径控制到8 mm以下。同时在原细碎机出口反向增设交叉筛和细碎反击破, 交叉筛筛分粒径为8 mm, 筛下物(即合格粒径物料)直接落入皮带上, 筛剩物则进入细碎反击破, 破碎粒径 $<10$  mm。筛分破碎改造工艺如图1所示。

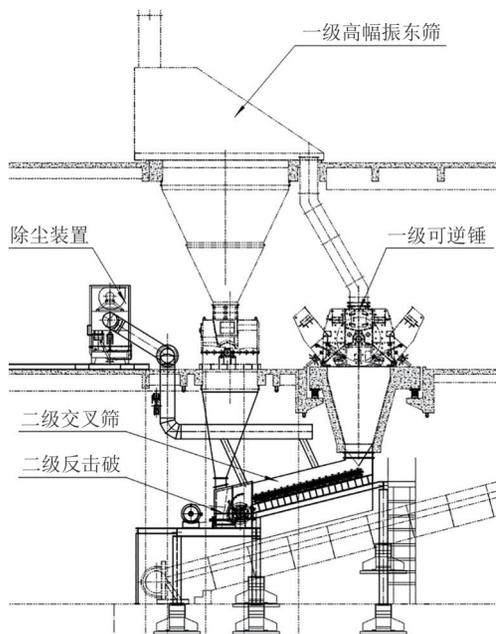


图1 输煤筛分破碎改造工艺图

Fig. 1 Retrofitted coal crusher system

2) 改造前后粒径指标对比。经过上述改造以后, 给煤粒度明显降低, 粒度3 mm以下的质量占比从62%增加到71%, 输煤筛分破碎系统改造前后的性能对比见表2。

表2 输煤筛分破碎系统改造前后性能对比

Tab. 2 Performance comparison of coal crusher system before and after transformation

类别	粒径范围			
	>13 mm	10~13 mm	3~10 mm	<3 mm
改造前质量占比/%	2.45	9.45	25.82	62.73
改造后质量占比/%	0.21	1.55	27.20	71.04

3) 运行效果。给煤粒度降低后, 进入炉膛的给煤经过磨耗入炉灰粒度降低<sup>[9]</sup>, 在CFB锅炉“一进二出”的平衡体系<sup>[20]</sup>下, 降低了整个床料的平均粒度, 提高了炉内的流化质量, 有效改善了炉内循环物料量和燃烧气氛分布的均匀性<sup>[21]</sup>, 为解决深度调峰工况下一次流化风量接近最小流化风量保护定值的运行问题提供参考。

#### 3.2 风帽节流圈

1) 改造情况。风帽加装2种规格的节流圈, 沿布风板四周外环加装1 546个直径33 mm的节流圈, 其他区域加装1 378个直径30 mm的节流圈。改造前对应的热一次风(温度245 °C, 风量380 000 m<sup>3</sup>/h)的布风板阻力为4 622 Pa, 改造后对应的热一次风(温度245 °C, 风量380 000 m<sup>3</sup>/h)的布风板阻力为6 280 Pa, 布风阻力提高了1 658 Pa。

2) 运行效果。通过风帽加装节流阀, 布风均匀性提高, 改善了炉内的流化质量, 保证了在较低的一次流化风量运行工况下物料的充分流化<sup>[22]</sup>, 为深度调峰工况下进一步降低一次流化风量创造了条件。

#### 3.3 下二次风管

1) 改造情况。将下层二次风口上移1 500 mm, 下二次风管增加一个膨胀节, 并在其上加装壁温测点, 同时在炉膛结合处增加密封盒和加强筋, 如图2所示。

2) 运行效果。下层二次风口上移后, 降低了下二次风管喷口背压, 使得二次风更易流通, 同时强化了分级燃烧效果, 抑制了 $\text{NO}_x$ 的生成。通过增加膨胀节和壁温测点, 将下二次风管壁温控

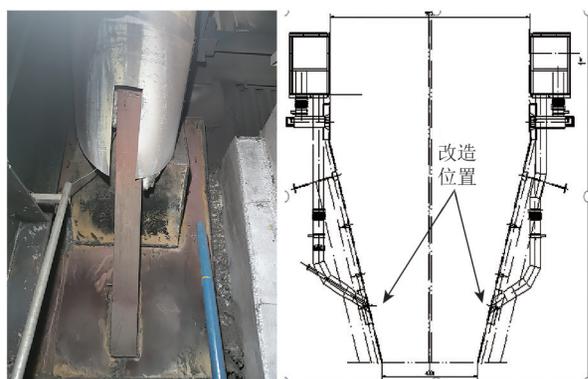


图2 下二次风管改造示意图

Fig. 2 Retrofitted lower secondary air pipe

制在 350 °C 以下, 从而解决了超温带来的膨胀不均、开焊漏灰问题。

### 3.4 烟气再循环系统

1) 改造情况。将增压风机及配套管道接入到 2 台一次风机入口, 将氧体积分数约 6% 的烟气从引风机出口引出, 烟气与空气混合后进入一次风机。烟气再循环系统工艺流程<sup>[23]</sup>如图 3 所示。

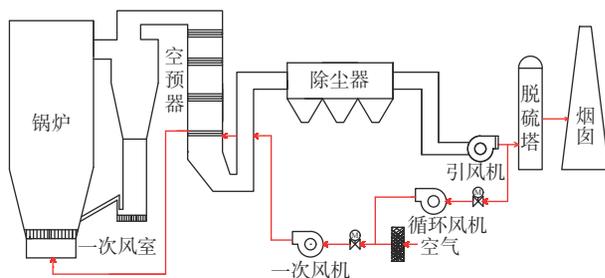


图3 烟气再循环系统工艺流程

Fig. 3 Process flow of flue gas recirculation system

2) 运行效果。在低负荷工况下, 锅炉需要保持最低流化风量, 这使得密相区氧量偏高, 不利于控制  $\text{NO}_x$  的生成。通过烟气再循环技术可以获得低负荷下低氮燃烧氧量的理想匹配, 使料层在欠氧模式下充分流化, 同时密相区氧量降低后减弱了燃烧强度, 降低了密相区温度, 有效抑制了

$\text{NO}_x$  的生成。此外, 通过调整烟气再循环量, 可以改变密相区燃烧强度, 有效提高锅炉变负荷速率, 达到快速响应的目的, 具体方法如下: 降负荷过程中增加烟气再循环量, 可以快速降低燃烧强度, 降低主汽压力, 提高降负荷速率; 升负荷过程中减少并退出烟气再循环量, 可以快速提高燃烧强度, 提高主汽压力, 提高升负荷速率。

## 4 深度调峰运行情况

### 4.1 入炉煤特性

经过上述改造之后, 在机组成功实现了 20% 负荷的深度调峰后, 经过运行班组进一步摸索, 又成功实现了 18% 的深度调峰运行。机组 18% 负荷深度调峰运行期间的入炉煤特性见表 3。

表3 机组 18% 负荷深度调峰入炉煤特性

Tab. 3 Coal characteristic of deep peak shaving of the unit under 18% load

检测项目	入炉煤	原煤	煤泥
收到基碳质量分数/%	32.56	41.66	28.79
收到基氢质量分数/%	1.78	2.27	1.58
收到基氧质量分数/%	6.55	8.32	5.81
收到基氮质量分数/%	0.38	0.49	0.34
收到基硫质量分数/%	0.40	0.46	0.38
收到基水分质量分数/%	26.30	14.00	31.40
收到基灰分质量分数/%	32.02	32.80	31.70
收到基挥发分质量分数/%	35.70	35.81	35.66
收到基低位发热量/(MJ/kg)	11.30	15.39	9.60

注: 入炉煤由 29.3% 的原煤和 70.7% 的泵送煤泥组成。

### 4.2 机组深度调峰工况下的运行参数

2022 年 7 月 26 日, 机组进行了 18% 负荷下深度调峰运行试验, 具体运行参数见表 4。从表 4 中可以看出, 在 18% 的低负荷下, 炉膛温度基本在 700 °C 左右。从分离器脱硝氨水消耗量可以推测, 炉膛到分离器入口的  $\text{NO}_x$  浓度不高于 50  $\text{mg}/\text{m}^3$ ,

表4 机组 18% 负荷锅炉运行参数

Tab. 4 Operation parameters at 18% load of the unit

参数	时段				
	12:00—13:00	13:00—14:00	14:00—15:00	15:00—16:00	16:00—17:00
电负荷/MW	58	60	58	58	60
给煤机煤量/(t/h)	14	15	15	15	15
泵送煤泥量/(t/h)	39	37	37	37	32
环境温度/°C	27	28	27	28	28

续表

参数	时段				
	12:00—13:00	13:00—14:00	14:00—15:00	15:00—16:00	16:00—17:00
背压/kPa	6.8	6.1	5.6	5.9	6.3
给水流量/(t/h)	170	172	165	165	171
给水温度/°C	192	192	190	190	192
主汽流量/(t/h)	190	193	188	188	196
主汽温度/°C	517	520	518	518	519
再热汽温度/°C	497	492	491	489	489
一次风机出口风压/kPa	11.47	11.84	12.02	12.13	11.91
风室风压/kPa	10.51	10.84	11.1	11.21	10.93
平均床压/kPa	8.55	8.81	9.20	9.33	8.98
炉膛出口压力/Pa	-34	-55	-45	-52	-66
炉膛上部差压/kPa	0.27	0.30	0.24	0.23	0.25
总风量/( $\times 10^3$ m <sup>3</sup> /h)	293	299	292	291	297
一次总风量/( $\times 10^3$ m <sup>3</sup> /h)	258	265	256	256	262
一次流化风量/( $\times 10^3$ m <sup>3</sup> /h)	221	227	218	218	225
A侧烟气再循环量/( $\times 10^3$ m <sup>3</sup> /h)	59	59	59	59	60
B侧烟气再循环量/( $\times 10^3$ m <sup>3</sup> /h)	62	62	62	62	62
二次风量/( $\times 10^3$ m <sup>3</sup> /h)	20	18	21	20	19
空预器一次进口风温/°C	91	89	90	91	91
空预器一次出口风温/°C	180	175	175	176	177
空预器二次进口风温/°C	30	31	31	31	31
空预器二次出口风温/°C	248	246	250	251	254
空预器入口氧体积分数/%	1.23	0.94	1.41	1.16	1.34
引风机出口氧体积分数/%	5.04	4.95	5.33	5.15	5.27
原烟气SO <sub>2</sub> 质量浓度/(mg/m <sup>3</sup> )	391	425	472	619	695
氨水流量/(m <sup>3</sup> /h)	0	0.1	0	0	0
净烟气NO <sub>x</sub> 质量浓度/(mg/m <sup>3</sup> )	44.0	38.8	41.3	40.7	43.2
A返料器料位压力/kPa	5	5	5	5	5
B返料器料位压力/kPa	3	4	3	3	3
C返料器料位压力/kPa	4	4	4	4	4
平均床温/°C	706	701	694	688	691
分离器出口烟温/°C	607	606	600	599	600
空预器入口烟温/°C	220	222	223	222	224
空预器出口烟温/°C	143	144	145	145	146
引风机入口烟温/°C	134	133	134	134	135
引风机出口烟温/°C	139	139	140	140	140
引风机入口压力/kPa	-0.623	-0.679	-0.666	-0.648	-0.688
引风机出口压力/kPa	0.135	0.132	0.146	0.156	0.152
过热器一减喷水量/(t/h)	20	21	20	20	23
过热器二减喷水量/(t/h)	0	0	0	0	0
再热器减温水总量/(t/h)	0	0	0	0	0
再热器烟气挡板开度/%	95	95	95	95	95
过热器烟气挡板开度/%	5	5	5	5	5
飞灰含碳质量分数/%					5.4
大渣含碳质量分数/%					4.19

注:表内“空白”代表未测此项。

说明烟气再循环技术的引入可以显著降低密相区的氧浓度, 从而有效抑制密相区内 $\text{NO}_x$ 的生成。

## 5 CFB深度调峰技术关键点及潜在问题

### 5.1 技术关键点

#### 1) 安全流化稳燃技术

通过严控入炉煤粒径, 以较低的一次流化风量达到料层安全流化的运行要求。同时提高密相区床压, 以本文锅炉机组为例, 平均床压应达到9.0 kPa, 而床压与料层有一定关系, 较高的料层可确保大比例泵送煤泥的安全稳定燃烧。采用烟气再循环技术时, 烟气再循环量与一次总风量的比例应控制在46%左右, 两者混合后进入密相区的一次风氧体积分数约14%, 在欠氧一次风流化模式下燃烧, 平均床温约700℃, 飞灰和底渣可燃物质量分数平均为4.8%, 最终实现低负荷工况下的安全流化稳定燃烧。

#### 2) 低温低氧控氮技术

通过烟气再循环技术, 在低负荷工况下料层以欠氧模式充分流化, 使得炉膛内燃烧温度较低和还原性气氛均匀, 有效降低了 $\text{NO}_x$ 浓度。以本文运行试验为例, 机组在18%负荷工况下稳定运行, 实现了炉内的低氮燃烧, 并在SNCR系统还原剂全部关闭的情况下, 达到了 $\text{NO}_x$ 超低排放标准。

#### 3) 可调碳存量调峰技术

通过调整一次风机入口的烟气再循环量来改变一次风氧量, 从而改变炉膛密相区的燃烧强度, 使密相区未燃尽碳的燃烧能在较短的时间内快速抑制或增强, 有效解决因锅炉热惯性大导致汽水侧热负荷与燃烧侧热负荷不协调的问题, 提高负荷响应速率。在AGC方式下, 本文的变负荷速率为2.5 MW/min。

### 5.2 存在问题及解决措施

1) 屏式过热器内弯开裂和管间填块焊缝拉裂。针对屏式过热器内弯开裂问题, 主要通过日常性检修换管的方式来解决。另外, 在锅炉防磨防爆检修治理时对金属进行监督检测和检修更换, 并将屏式过热器的检修列入锅炉防磨防爆检修治理滚动规划中, 在计划性检修中进行抽查, 以确

保及时发现并解决问题。

2) 炉外屏式再热器出口分配集箱接管座焊口开裂。针对此问题, 主要通过优化结构设计来解决: 将原过渡垂直管段取消, 改为将直径76 mm的S弯管直接接入集箱的结构设计, 改造后的集箱接管座如图4所示。通过对集箱接管座的结构优化, 增加了集箱接管座的连接面积, 同时也提高了金属热应力强度, 最终解决了机组内2台CFB锅炉屏式再热器出口分配集箱管座频繁开裂的问题。

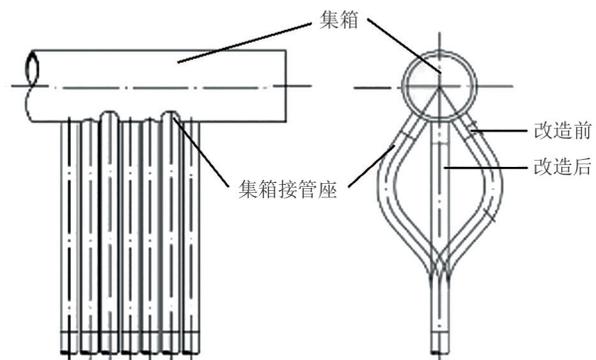


图4 改造后的集箱接管座

Fig. 4 Retrofitted combined box tube connectors

3) 一次风机叶轮腐蚀。针对烟气再循环系统投运后, 一次风机叶轮出现的防腐漆脱落腐蚀问题, 建议在每年的计划性检修中, 对一次风机叶轮进行喷砂除锈, 并重新喷涂防腐漆。然后在此基础上进行动平衡试验, 直至风机转速合格。

## 6 结论

通过对输煤筛分破碎系统、风帽节流圈、下二次风管等机组部件进行改造, 配合烟气再循环系统等改进措施, 在某330 MW亚临界CFB锅炉上成功实现了18%负荷的超低深度调峰运行, 并实现了 $\text{NO}_x$ 的超低排放。主要结论如下:

1) 输煤筛分破碎系统改造是必要且效果显著的, 通过对该系统的改造, 显著降低了入炉物料的平均粒度。布风板加装风帽节流阀使得布风更加均匀, 在显著提高流化质量的同时, 有效改善了炉内循环物料量和燃烧气氛分布的均匀性, 为深度调峰过程中降低一次流化风量提供了可能。下二次风管的改造及风口上移使得二次风更易流

通,强化了分级燃烧效果。

2) 通过烟气再循环技术获得了低负荷下低氮燃烧氧量的理想匹配,使料层在欠氧模式下充分流化,达到了减弱密相区燃烧强度、降低密相区温度的效果,有效抑制了 $\text{NO}_x$ 的生成。

3) 深度调峰运行带来了热应力导致的开焊及裂缝等问题。通过优化结构设计,解决了屏式再热器出口分配集箱接管座的开裂问题。针对屏式过热器内弯开裂和管间填块焊缝拉裂、一次风机叶轮腐蚀等问题,建议强化金属监督检测和检修更换,并将此列入锅炉防磨防爆检修治理滚动规划中,在计划性检修中进行抽查。

## 参考文献

- [1] 张全斌,周琼芳. 基于“双碳”目标的中国火力发电技术发展路径研究[J]. 发电技术, 2023, 44(2): 143-154.  
ZHANG Q B, ZHOU Q F. Research on the development path of China's thermal power generation technology based on the goal of "carbon peak and carbon neutralization"[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(2): 143-154.
- [2] 张松岩,苗世洪,尹斌鑫,等. 考虑火电深度调峰的多类型储能经济性分析[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 132-142.  
ZHANG S Y, MIAO S H, YIN B X, et al. Economic analysis of multi-type energy storages considering the deep peak-regulation of thermal power units[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 132-142.
- [3] 魏文,姜飞,戴双凤,等. 计及需求侧储能事故备用风险与火电机组深度调峰的经济优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 153-162.  
WEI W, JIANG F, DAI S F, et al. Economic optimization of deep peak regulation of thermal power units taking into account the risk of emergency storage on the demand side[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 153-162.
- [4] 于国强,刘克天,胡尊民,等. 大规模新能源并网下火电机组深度调峰优化调度[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 243-250.  
YU G Q, LIU K T, HU Z M, et al. Optimal scheduling of deep peak regulation for thermal power units in power grid with large-scale new energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 243-250.
- [5] 孙浩程,宋民航,郭璞维,等. 辅助火电机组调峰系统的储热参数设计研究[J]. 南方能源建设, 2022, 9(3): 9-15.  
SUN H C, SONG M H, GUO P W, et al. Parameter design of heat storage for auxiliary peak regulation system in thermal power unit[J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(3): 9-15.
- [6] 张广才,周科,鲁芬,等. 燃煤机组深度调峰技术探讨[J]. 热力发电, 2017, 46(9): 17-23.  
ZHANG G C, ZHOU K, LU F, et al. Discussions on deep peaking technology of coal-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(9): 17-23.
- [7] 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/OL]. 中国电机工程学报: 1-17[2024-02-23]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230515>.  
TANG Z H, SONG G L, SONG W J, et al. Research progress on rapid variable load regulation technology of circulating fluidized bed boiler[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-17[2024-02-23]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.Pcsee.230515>.
- [8] 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 X N, DENG B Y, LIU H P, 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.
- [9] 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.  
CAI J, SHAN L, WANG Z N, et al. Variable load characteristics of a supercritical 350 MW circulating fluidized bed boiler[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(9): 98-103.
- [10] 张鹏,范浩东,余耀,等. 350 MW超临界CFB锅炉不同负荷下运行影响试验[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(6): 93-99.  
ZHANG P, FAN H D, YU Y, et al. Performance of 350 MW supercritical circulating fluidized bed boiler under different loads[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(6): 93-99.
- [11] 王洪健,王海洋,孔皓,等. 135 MW循环流化床锅炉纯燃准东煤改造策略与运行技术研究[J]. 发电技术, 2022, 43(6): 918-926.  
WANG H J, WANG H Y, KONG H, et al. Retrofitting strategy and operating technology of pure burning Zhundong coal in a 135 MW circulating fluidized bed boiler[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(6): 918-926.

- 2022, 43(6): 918-926.
- [12] 于浩洋, 高明明, 张缦, 等. 循环流化床机组深度调峰性能分析与评价[J]. 热力发电, 2020, 49(5): 65-72.  
YU H Y, GAO M M, ZHANG M, et al. Performance analysis and evaluation of deep peak-regulating for circulating fluidized bed units[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(5): 65-72.
- [13] 单露, 张缦, 张翼, 等. 循环流化床全回路气固流动动态模型及分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(S1): 98-104.  
SHAN L, ZHANG M, ZHANG Y, et al. Dynamic model establishment and analysis on gas-solid flow in CFB whole loop[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(S1): 98-104.
- [14] DENG B, ZHOU T, YI Z, et al. Hydrodynamic characteristics in the full-loop circulating fluidized bed under load regulation. Part 1: experimental investigation[J]. Chemical Engineering Science, 2022, 268(7): 118361.
- [15] 韩锐, 吴军, 廖清芬, 等. 基于NSGA-III算法的光-水-火电机组AGC协调优化策略[J]. 智慧电力, 2022, 50(1): 45-52.  
HAN R, WU J, LIAO Q F, et al. AGC coordination and optimization strategy of photovoltaic-hydropower-thermal power units based on NSGA-III algorithm[J]. Smart Power, 2022, 50(1): 45-52.
- [16] 袁岑颀, 戴敏敏, 周旭, 等. 电力市场环境下火电机组调频性能提升研究[J]. 浙江电力, 2022, 41(6): 84-91.  
YUAN C J, DAI M M, ZHOU X, et al. Research on frequency modulation performance improvement of thermal power units in the context of power market[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(6): 84-91.
- [17] 杨健, 柳玉, 黄坤鹏, 等. 考虑发电工况和站内损耗的风电场可用发电功率估算方法[J]. 发电技术, 2023, 44(2): 235-243.  
YANG J, LIU Y, HUANG K P, et al. A method for estimating available power of wind farms by considering the power generation conditions and station losses[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(2): 235-243.
- [18] 张志勇, 莫华, 王猛, 等. 600 MW燃煤机组烟气污染物控制研究[J]. 中国电力, 2022, 55(5): 204-210.  
ZHANG Z Y, MO H, WANG M, et al. Study of flue gas pollutant control in a 600 MW coal-fired unit[J]. Electric Power, 2022, 55(5): 204-210.
- [19] 杨海瑞, 岳光溪, 王宇, 等. 循环流化床锅炉物料平衡分析[J]. 热能动力工程, 2005, 20(3): 291-295.  
YANG H R, YUE G X, WANG Y, et al. Analysis of mass balance in a circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005, 20(3): 291-295.
- [20] 杨海瑞, 肖显斌, WIRSUM M, 等. 循环流化床锅炉内的灰平衡模型研究[J]. 煤炭转化, 2002, 25(3): 59-64.  
YANG H R, XIAO X B, WIRSUM M, et al. Modeling of ash balance in cfb boiler[J]. Coal Conversion, 2002, 25(3): 59-64.
- [21] MIAO M, ZHOU T, ZHANG M, et al. Transformation of CFB boilers pollutant treatment strategies under China's stricter requirements and the background of carbon neutrality (FBC24) [J]. Fuel, 2023, 342: 127009.
- [22] 刘旋坤, 邓博宇, 张思海, 等. 330 MW CFB锅炉机组深度调峰运行优化[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(12): 87-93.  
LIU X K, DENG B Y, ZHANG S H, et al. Operation and optimization technology of deep peak for 330 MW CFB boiler units[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(12): 87-93.
- [23] 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 S H, ZHANG S M, ZHANG J J, 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.

收稿日期: 2023-12-12。

作者简介:



张思海

张思海(1984), 男, 高级工程师, 研究方向为CFB锅炉运行, 544919049@qq.com;



杨海瑞

杨海瑞(1972), 男, 博士, 教授, 研究方向为CFB锅炉煤清洁燃烧技术, 本文通信作者, yhr@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 苗雪连)