



移动扫码阅读

马达夫, 张守玉, 何翔, 等. 改善准东煤锅炉受热面沾污的燃烧优化试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 304-312.

MA Dafu, ZHANG Shouyu, HE Xiang, *et al.* Experimental study on combustion optimization to alleviate fouling on heating surface of a Zhundong coal Boiler[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 304-312.

## 改善准东煤锅炉受热面沾污的燃烧优化试验研究

马达夫<sup>1,2</sup>, 张守玉<sup>1</sup>, 何翔<sup>1,2</sup>, 赵旭<sup>2</sup>, 吕为智<sup>2</sup>, 吴玉新<sup>3</sup>

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海发电设备成套设计研究院有限责任公司, 上海 200240;

3. 清华大学热能工程系, 北京 100084)

**摘要:** 2021 年国内大部分煤价暴涨, 影响到部分地区的电力供应, 而新疆准东煤价格稳定且处于低水平, 因此安全、稳定地大比例燃烧准东煤的研究非常重要。但是, 燃烧准东煤的锅炉会由于准东煤煤质特性及烟气温度过高而产生受热面沾污的现象。以某燃用 95% 准东煤的 660 MW 容量四角切圆锅炉为研究对象, 研究掌握一次风速、运行氧量、空气分级策略以及煤粉细度对锅炉燃烧温度和 NO<sub>x</sub> 排放的影响与控制规律, 并在静态和动态工况下实施了针对受热面沾污的控制函数改进。最后, 利用受热面沾污监测方法证明了改进对受热面沾污的影响。结果表明, 660 MW 工况下运行氧量对烟气温度影响最明显, 运行氧量由 2.0% 提升至 3.5% 时, 烟气温度下降 99 °C; 运行氧量及主燃区局部平均化学当量比降低可导致 NO<sub>x</sub> 明显降低, 煤粉细度的变化对 NO<sub>x</sub> 的影响不明显; 投入改进后的控制函数后, 升负荷过程中烟气温升速率从 6.18 °C/min 下降至 4.26 °C/min, 660 MW 工况下最高烟气温度从 1 104 °C 下降至 1 023 °C, 屏式过热器、低温过热器和低温再热器吸热比例分别上升了 0.6%、1.6% 和 0.9%, 表明沾污情况得到了明显改善。330 MW 负荷工况下, 提高最上层磨煤机的煤粉细度  $R_{90}$  至 4.9% 左右, 可有效降低高温再热器底部附近烟气温度, 减少可燃物及飞灰沉积, 抑制沾污的形成。

**关键词:** 准东煤; 四角切圆锅炉; 受热面; 燃烧温度; 沾污改善

**中图分类号:** TK123      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0253-2336(2023)08-0304-09

### Experimental study on combustion optimization to alleviate fouling on heating surface of a Zhundong coal Boiler

MA Dafu<sup>1,2</sup>, ZHANG Shouyu<sup>1</sup>, HE Xiang<sup>1,2</sup>, ZHAO Xu<sup>2</sup>, LU Weizhi<sup>2</sup>, WU Yuxin<sup>3</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 20093, China; 2. Shanghai Power Equipment Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200240, China; 3. Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In 2021, the price of most of the domestic coal skyrocketed, affecting the stable supply of electric power supply in some regions, while the price of Xinjiang Zhundong coal remains stable at a low level. Thus, the study of safe and stable large-scale combustion of Zhundong coal in boilers is more and more important for the energy supply. However, fouling and slagging often occur on the heating surfaces of the boiler due to the characteristics of Zhundong coal and the high temperature of the flue gas. The effects of the operating parameters, including the primary air velocity, operating oxygen content, air staging and coal fineness on the combustion temperature and NO<sub>x</sub> emission were investigated on a four-corner tangentially fired boiler of 660 MW capacity, which burned 95% Zhundong coal to get the relevant control criterion. Based on the research, the improvement of control function for contamination of heating surfaces was implemented under steady and dynamic working conditions. Finally, the influence of the improvement on the contamination of the heating surfaces was proved by the method of the contamination monitoring of heated surfaces. The results show that, at 660 MW load condition, the operating

收稿日期: 2022-06-21      责任编辑: 黄小雨      DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0941

基金项目: 国家自然科学基金重点国际(地区)合作研究资助项目(51761125011)

作者简介: 马达夫(1989—), 男, 湖南岳阳人, 高级工程师, 博士。E-mail: madafu@speri.com.cn

通讯作者: 张守玉(1971—), 男, 吉林集安人, 教授, 博士生导师。E-mail: zhangsy-guo@163.com

oxygen content had the most obvious influence on the flue gas temperature at the outlet of the furnace. The flue gas temperature decreased 99 °C when it increased from 2.0% to 3.5%. The reduction of the operating oxygen content and the local mean stoichiometric ratio of the main combustion zone could lead to a significant reduction of NO<sub>x</sub> emission and the change of the coal fineness had no obvious effect on NO<sub>x</sub> emission. After the improved control function was implemented, the rate of flue gas temperature decreased from 6.18 to 4.26 °C min<sup>-1</sup> during the load increase process, the maximum temperature decreased from 1104 to 1023 °C under 660 MW. The heat absorption ratio of the platen superheater, low-temperature superheater and low-temperature reheater increased by 0.6%, 1.6% and 0.9%, respectively, indicating that the fouling and slagging was significantly reduced. At 330 MW load condition, increasing the coal fineness  $R_{90}$  to around 4.9% of the uppermost mill could effectively reduce the flue gas temperature near the bottom of the high-temperature reheater, reduce the deposition of combustible matter and fly ash, and inhibit the formation of fouling and slagging.

**Key words:** Zhundong coal; four-corner tangential boiler; heating surface; combustion temperature; fouling improvement

## 0 引 言

2021年上半年开始,我国煤矿产能不足,加上市场需求量强劲,导致标准煤单价疯涨,在2020年从约900元/t达到了最高3049.5元/t。2021年10月环渤海动力煤价格指数报收830元/t,较3月份增长43%<sup>[1]</sup>。因此,大部分火力发电厂因亏损而停止发电,引发了国内部分地区“限电”,对居民的日常生活和工业生产造成了极大的影响。新疆准东煤储量高达3900亿t<sup>[2-3]</sup>,其价格并未受到严重影响,坑口煤的协议到厂价仅由100元/t上升至115元/t。由于准东煤掺烧比例趋近于100%时易造成锅炉严重的沾污结渣,因此,研究并解决准东煤在煤电机组大比例掺烧或纯烧时所产生的沾污、结渣现象对我国“保电”具有重要意义。

关于准东煤燃烧的沾污结渣问题近年来成为了国内外学者的研究重点<sup>[4]</sup>。研究发现主要是由于该煤种碱金属含量高导致其灰熔点下降,将炉膛折焰角附近烟气温度控制在1050 °C左右可以较好地防止屏式过热器等高温过热器上沾污及结渣的产生<sup>[5]</sup>。黄东东等<sup>[6]</sup>研究了高岭土、二氧化硅及膨润土作为捕钠剂对NaCl的捕获效果,发现膨润土的钠捕获性能最佳,高岭土次之,二氧化硅最差。但考虑到膨润土的存量比高岭土少,另外准东煤中掺入高岭土后,煤灰中CaSO<sub>4</sub>的分解温度降低了120 °C以上,在1150 °C时灰分中的硫含量全部消失,消除了受热面表面严重的灰沉积和污垢,并将PM<sub>1.0</sub>的质量浓度降低了一半<sup>[7]</sup>。因此,工程应用上较多采用高岭土掺烧来控制燃准东煤沾污结渣。另一方面,环保排放是不可逾越的底线,为防止污染物的超标,运行时需要采取较高程度的空气分级将NO<sub>x</sub>控制在很低的程度<sup>[8]</sup>,同时,为了减缓氨逃逸引起的空预器堵塞,喷氨量也需要控制<sup>[9]</sup>。因此,在研究燃准东煤锅炉低温燃烧特性的同时也需要考虑对NO<sub>x</sub>排放的影响<sup>[10]</sup>。

但目前鲜有同时兼顾燃准东煤锅炉的燃烧温度控制及NO<sub>x</sub>排放量控制以减缓受热面沾污的实炉试验研究。本文研究了某燃用95%准东煤的660 MW四角切圆锅炉满负荷工况下一次风速、运行氧量、二次风及燃尽风配风、煤粉细度等对燃烧温度及NO<sub>x</sub>生成量的影响,对我国西北地区大量燃准东煤切圆锅炉的防结渣及降低燃料成本具有一定的指导意义。

## 1 试验设备及煤质

### 1.1 设备参数

哈尔滨锅炉厂有限责任公司自主研发的HG-2042/28.25-HM15型660 MW超超临界燃煤机组锅炉为单炉膛、平衡通风、固态排渣的Π型锅炉,设计煤种为纯天池煤。采用正压直吹式冷一次风机制粉系统,每炉配6台MPS200HP-II型中速碗式磨煤机,燃用设计煤种时5台运行,1台备用;煤粉细度 $R_{90}$ 为15%。

炉膛断面尺寸为20.4 m×20.1 m,炉膛高、下层燃烧器位于标高24.5~31.9 m、上层燃烧器位于标高34.3~41.9 m、折烟角标高68.0 m、上排燃烧器至屏底距离为27.2 m。如图1所示,锅炉采用低NO<sub>x</sub>的水平浓淡燃烧器,在靠近水冷壁区域形成氧化性气氛。为了避免一次风粉混合物副墙引起结焦或高温腐蚀,采取了小切圆和风包粉的设计理念,一、二次风假想切圆直径设计值分别为0.9 m和1.7 m。主燃烧器上下一次风喷嘴拉开2.4 m的距离,降低燃烧器区域热负荷,以有效减少炉膛结焦。在距最上层煤粉喷嘴的上方5.8 m处布置有7层分离燃尽风(SOFA)喷嘴,其作用是补充燃料后期燃烧所需要的空气,同时实现分级燃烧降低炉内温度水平以抑制NO<sub>x</sub>的生成。燃烧器共设6层水平浓淡煤粉一次风喷口,7层SOFA风室和辅助风室。根据准东煤的特点,为避免下游燃烧器一次风冲刷冷灰斗并保证火焰充满炉膛空间及煤粉的充分燃尽,从燃烧器下排

一次风口中心线到冷灰斗拐角处留有较大的距离。为了保证煤粉的充分燃尽及避免炉膛上部高温受热面挂焦,从燃烧器最上层一次风口中心线到分隔屏下沿设计有较大的燃尽高度。

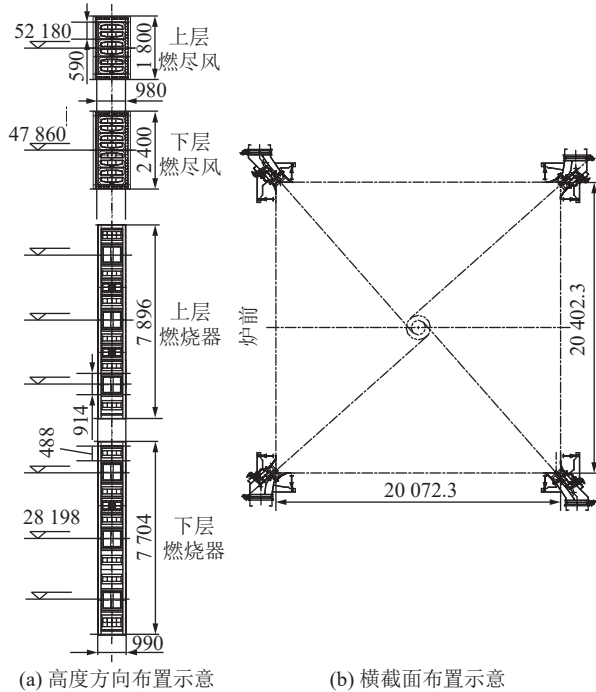


图 1 锅炉燃烧器示意

Fig.1 Schematics of boiler burners

### 1.2 煤质分析

锅炉燃用准东煤与高岭土掺混后的燃料, A 磨为纯天池煤, 其余磨为天池煤与高岭土质量比为 93 : 7, 因此, 660 MW 工况下天池煤的比例为 95%, 高岭土比例为 5%。天池煤的工业分析、元素分析及热值数据汇总在表 1 中。

表 1 煤种的工业分析、元素分析及热值

Table 1 Proximate analysis, ultimate analysis and heat value of fuels

项目	A磨	B~F磨
收到基水分/%	29.00	26.97
收到基固定碳/%	45.03	41.88
收到基灰分/%	4.80	11.46
干燥无灰基挥发分/%	31.98	29.74
收到基含碳量/%	53.30	49.57
收到基含氢量/%	2.29	2.13
收到基含氧量/%	9.55	8.88
收到基含氮量/%	0.47	0.44
收到基含硫量/%	0.59	0.55
收到基低位发热量/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	18.78	17.47

掺混高岭土后 B、C、D、E、F 磨只有灰分增加, 其他成分减少, 整体区别不大。无论是否掺高岭土, 该燃料均为水分和挥发分高、灰分低的煤种。

## 2 稳态工况试验

### 2.1 一次风速

电厂运行人员为了防止磨煤机出口粉管堵塞, 习惯于设置较高的一次风速, 因此一次风刚性过强, 导致炉内假想切圆难以形成。由于准东煤含水率大, 热一次风门通常全开, 因此一次风速度由一次风母管压力控制, 而一次风母管压力的设定值是一个跟随锅炉负荷的函数关系。研究了采用由大到小的 3 个函数关系(表 2)对应的一次风速度对烟气温度(本文中指的是屏式过热器底部烟气温度, 额定工况下该温度设计值为 1090 °C)的影响。当烟气温度超过设计值时可能导致各过热器或再热器产生严重的沾污结渣。由图 2 可知, 函数 1 工况下的烟气温度为 1093 °C, 高于设计烟气温度, 随着风速的降低, 660 MW 工况下烟气温度略有降低。其原因是一次风速从 38 m/s 降低至 27 m/s 后煤粉着火提前, 火焰中心下移。但另一方面, 随着一次风量的降低, 磨煤机出口一次风粉混合物温度下降, 有可能导致煤粉着火延迟。因此, 根据着火热计算公式<sup>[11]</sup>来判断一次风速对着火热的影响。

表 2 三个一次风量与给煤量的函数关系

Table 2 Three functional relationships between primary air volumes and coal feed rates

函数	给煤量/(t·h <sup>-1</sup> )	一次风量/(t·h <sup>-1</sup> )
函数1	30/45/60	120/130/140
函数2	30/45/60	115/125/135
函数3	30/45/60	110/120/130

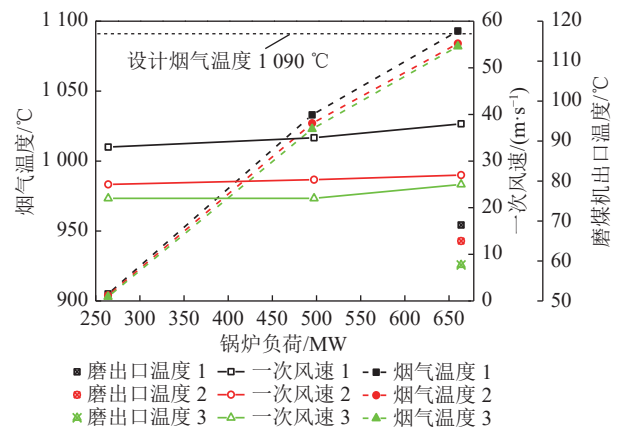


图 2 不同负荷下一次风速与磨出口温度、烟气温度的关系  
Fig.2 Relationship between primary air velocity and mill outlet temperature or flue gas temperature under different loads

$$Q_i = B_b [V_1 c_{o1} (1 - q_4) + c_f (1 - M_{ar})] (T_i - T_{o1}) + B_b \left\{ M_{ar} [Q_R + c_w (T_i - 373)] - \frac{M_{ar} - M_m}{1 - M_m} [Q_R + c_w (T_{o1} - 373)] \right\} \quad (1)$$

式中： $B_b$  为燃料量，kg/s； $V_1$  为一次风量， $m^3/s$ ； $c_{o1}$  为一次风比热容， $kJ/(m^3 \cdot K)$ ； $q_4$  为机械不完全燃烧损失； $c_f$  为煤的干燥基比热容， $kJ/(kg \cdot K)$ ； $M_{ar}$  为煤的收到基水分，%； $T_i$  为着火温度，K； $T_{o1}$  为燃烧器出口一次风温度，K； $Q_R$  为水的汽化潜热，2 512 kJ/kg； $M_m$  为煤粉的水分，%； $c_w$  为水蒸气比热容， $kJ/(kg \cdot K)$ 。据此可得到 660 MW 工况下一次风速为函数 1、2、3 时的着火热分别为 19 108、17 759、16 852 kW，表明一次风速越低，着火热越小，越有利于煤粉提前着火。此外，图 2 中函数 2 与函数 3 烟气温度区别不大，主要是由于一次风量的设置较大的重合度，而准东煤的着火、燃尽特性较好，当一次风量低于函数 2 时，煤粉的燃尽距离不再明显缩短，燃烧中心不再明显下移。

从炉内流场的物理角度分析，随着煤粉喷嘴风速的降低，一次风射流深度减少，风头深度及相邻风墙受到的挤压减轻，使得风墙变形缓解，由此形成切圆的四道风墙更稳定<sup>[12]</sup>。此外，根据文献 [13] 可知当一次风速度从 27 m/s 增加到 32 m/s 后切圆直径变小，从 27 m/s 减小到 22 m/s 后切圆直径变大，一次风速降低到 20 m/s 时由燃烧器出口一次风会出现刷壁的现象，将导致高温腐蚀的产生。

实际上，为了保证不堵磨，在此次试验过程中最低一次风速设置为 22 m/s，此时 4 根粉管中一次风速最低为 20 m/s，磨碗压差由 2.8 ~ 3.9 kPa 上升至 4.3 ~ 5.2 kPa，长时间运行时有堵塞粉管的风险。加之函数 2 与函数 3 工况下的烟气温度区别不大，因此推荐将一次风母管压力设置在函数 2 的工况下运行，即 660 MW 工况下的一次风风速为 27 m/s。

## 2.2 运行氧量

660 MW 工况下，通过改变运行氧量指令来控制选择性催化还原 (SCR) 系统入口运行氧量的值，其对 660 MW 工况下烟气温度和 SCR 入口  $NO_x$  浓度的影响见图 3。随着运行氧量增加，烟气温度显著降低，当运行氧量从 2.0% 升高至设计值 3.5% 时，烟气温度从 1 114 °C 降低至 1 015 °C。这是因为：①高负荷下热力型  $NO_x$  生成量较高，为了降低  $NO_x$  排放量运行人员采取了较大程度的空气分级，导致了二次风风箱差压低于 0.6 kPa，主燃烧区域形成较强的还原性气氛；②如此配风虽然有利于抑制燃烧初期  $NO_x$  的形成，但是在运行氧量较低的前提下，大量煤

粉在主燃烧区域的燃尽程度较差，推迟至 SOFA 风区域燃尽，导致了火焰中心抬高。易引起屏式过热器及高温过热器、高温再热器管间生成以  $CaSiO_3$ 、 $(Ca, Na)(Si, Al)_4O_8$  为主及少量  $CaSO_4$ 、 $SiO_2$ 、 $Na(AlSi_3O_8)$  的硅酸盐类沉积<sup>[14]</sup>。此类沾污结渣吹灰器难以处理，一旦累积到一定程度，受热面间烟气阻力增大导致锅炉停运。

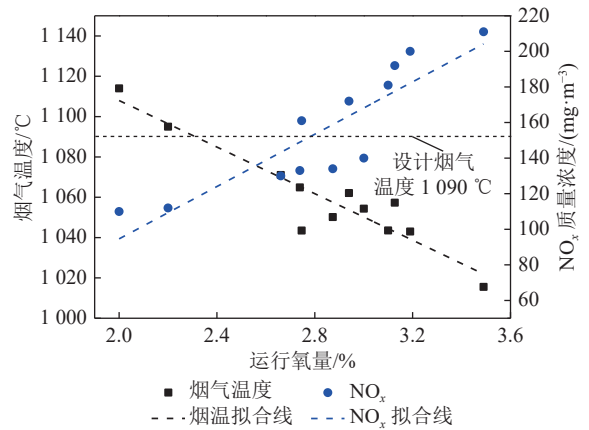


图 3 660 MW 工况运行氧量与烟气温度、 $NO_x$  质量浓度的关系

Fig.3 Relationship between oxygen and flue gas temperature or  $NO_x$  mass fraction under 660 MW

另一方面，如图 3 所示，当运行氧量从 2.0% 升高至设计值 3.5% 时， $NO_x$  质量浓度由 110  $mg/m^3$  升高至 211  $mg/m^3$ 。为了环保排放达标而增加喷氨量，因此提高了空预器堵塞的可能性。但是，鉴于空预器堵塞情况目前仍可控(空预器差压最高为 1.7 kPa)，相比于高温下准东煤产生的严重沾污结渣，应优先降低烟气温度，提高准东煤的燃用比例，以降低燃料成本。

## 2.3 空气分级

试验锅炉采用了低  $NO_x$  燃烧器并加装了 7 层 SOFA 风，二次风配风工况较复杂，对燃烧特性的影响较大。因此，本文采用局部平均化学当量比的大小来表征空气分级的程度。局部平均化学当量比定义为主燃烧区所供空气质量流量与煤粉完全燃烧所需的理论空气质量流量之比。其中，主燃烧区空气质量流量为一次风质量流量与二次风质量流量之和，而根据煤的元素分析可计算出煤粉完全燃烧所需的理论空气质量流量<sup>[15]</sup>。此外，二次风风量的准确测量对燃烧特性研究具有重要意义，本文通过网格法测量方式使用靠背管测得二次风风量<sup>[16]</sup>。

如图 4 所示，随着化学当量比由 0.43 增加至 0.68，烟气温度有小幅降低，这是因为主燃区风量

增加时更多煤粉在主燃区发生氧化反应,火焰中心高度略有下移。此外,当化学当量比低于0.4时,铁榴石与铁橄榄石的相对含量明显增加,灰渣中组分种类显著减少,部分铁的硅铝酸盐形成低温共熔体,造成严重结渣<sup>[17]</sup>。但是,化学当量比对烟气温度的敏感程度小于运行氧量,这可能是由于整体空气量没有发生变化,化学当量比引起的烟气温度变化在SOFA风至屏式过热器底部的15.8 m中得到部分弥补,而运行氧量带来的烟气温度变化持续到了后续烟气流程中,因此化学当量比的变化幅度对烟气温度的影响有限。

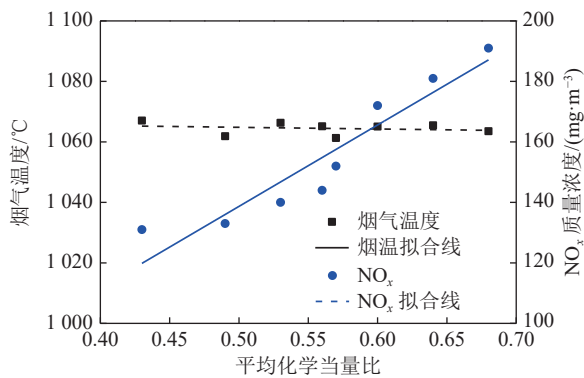


图4 660 MW 工况局部平均化学当量比与烟气温度和 $\text{NO}_x$ 质量浓度的关系

Fig.4 Relationship between local mean stoichiometric ratio and flue gas temperature or  $\text{NO}_x$  mass concentration under 660 MW

随着化学当量比增加, $\text{NO}_x$ 质量浓度有较明显的增加,这是因为在总风量不变的情况下,增加主燃烧区域的风意味着在燃烧初期提供了大量氧气,改善了煤粉的着火和燃尽特性,燃烧温度的增加导致了热力型 $\text{NO}_x$ 增加。另一方面,运行氧量在主燃烧区域的大量加入在一定程度上破坏了还原性气氛,影响了空气分级效果,导致燃料型 $\text{NO}_x$ 增加。

## 2.4 煤粉细度

660 MW 稳定负荷工况下,考察了5台磨煤机不同分离器转速时的煤粉细度、烟气温度、 $\text{NO}_x$ 浓度及飞灰、大渣含碳量,结果如图5所示。随着分离器转速升高,煤粉细度 $R_{90}$ 表现出了非常好的随之降低的线性关系。但是,煤粉细度的变化对烟气温度没有明显影响,与煤粉越细燃尽越早及火焰中心下移的传统观念不相符<sup>[18-19]</sup>。其主要原因是磨煤机对煤粉细度的实际影响并不大:虽然 $R_{90}$ 从12.9%降低到4.8%,但其平均煤粉细度仅从73.14  $\mu\text{m}$ 降低至64.87  $\mu\text{m}$ 。也就是说,虽然从 $R_{90}$ 看来降到了之前的37.2%,但是从平均煤粉细度看来仅是原来的88.7%。

其次,电站锅炉与试验台的试验条件不同,前者

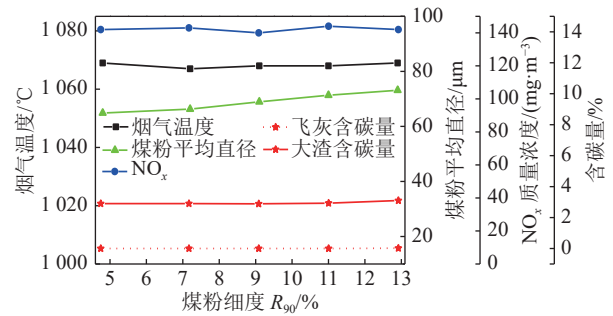


图5 660 MW 工况不同煤粉细度时的 $R_{90}$ 、烟气温度、 $\text{NO}_x$ 质量浓度和碳含量变化

Fig.5 Variations of  $R_{90}$ , flue gas temperature,  $\text{NO}_x$  mass concentration and carbon content at different coal fineness under 660 MW

在燃烧过程中具有复杂的速度场、温度场及较大的负压抽力。高负荷下煤粉量大时,煤粉的细度增加后煤粉的浮升力增加,有可能尚未充分燃尽即被牵引至燃尽风甚至屏式过热器附近<sup>[16]</sup>,尤其在660 MW 工况下开启了上层E磨煤机,表明此条件下燃烧过程推迟。因此,在燃尽推迟和煤粉细度增加引起的燃尽提前相互作用下,烟气温度没有明显的变化。值得注意的是,当煤粉颗粒越小,单位质量的钠原子释放越强<sup>[20]</sup>,沉积物的厚度也会增加<sup>[21]</sup>,因此建议在运行过程中不宜设置低于8%的煤粉细度。另一方面,飞灰中的未燃碳含量几乎为零,当煤粉细度 $R_{90}$ 为12.9%时大渣含碳量仅略有上升,其原因是准东煤的燃尽特性较好,在高炉膛温度下可使各种粒径煤粉的含碳量保持在很低的水平。

相对于高负荷工况,低负荷工况下炉膛温度明显下降,运行氧量明显升高,燃烧工况发生了较大变化<sup>[22]</sup>,煤粉细度对燃烧特性的影响也随之变化,见图6。由图6可知330 MW 负荷工况下, $R_{90}$ 增加时大渣含碳量增加,尤其是当 $R_{90}$ 大于9%时,大渣含碳

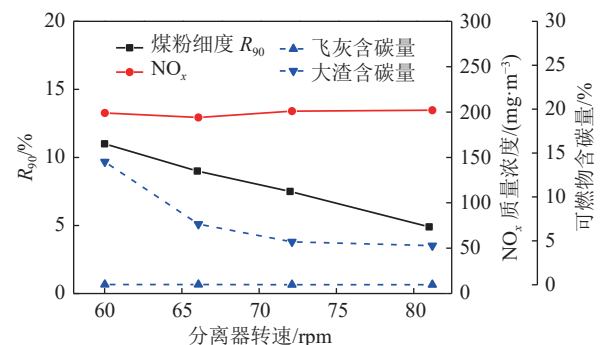


图6 330 MW 工况不同分离器转速时的 $R_{90}$ 、 $\text{NO}_x$ 质量浓度、和可燃物碳含量

Fig.6  $R_{90}$ ,  $\text{NO}_x$  mass concentration and carbon contents at different separator frequencies under 330 MW

量从 4.9% 增加至 14.0%，而飞灰含碳量几乎没有变化。其原因是，高岭土的密度为 3 560 ~ 4 150 kg/m<sup>3</sup><sup>[23]</sup>，而准东煤的密度仅为 1 200 ~ 1 500 kg/m<sup>3</sup><sup>[24]</sup>，因此密度大的高岭土与大渣一起下落至捞渣机，增加了下落的可燃物达到燃尽所需要的热量，使下落大渣的燃尽特性变差；另一方面，受引风机牵引向上移动的准东煤飞灰中碳的燃尽特性则不受影响。而高负荷下炉内燃烧温度较高，因此高岭土的存在没有使燃烧效率受到影响。

如图 7a 所示，在 BCD 磨运行时的 330 MW 负荷稳定工况下，在折焰角附近人孔门观察到大量在燃烧的颗粒向高温过热器底部附着，有增加沾污结渣的趋势，判断可能是含有未燃尽碳的飞灰颗粒。将运行氧量由 4.2% 增加至 4.8% 后该趋势没有明显改善，由此判断不是因主燃区缺氧导致煤粉未燃尽。将主燃区化学当量比由 0.71 降至 0.67 后仍未发现明显变化，由此可能不是配风引起的，而是煤粉侧的原因。将 D 磨分离器转速由 56 r/min 提高至 83 r/min，R<sub>90</sub> 由 12% 降至 4.9% 后高温再热器底部再无飞灰颗粒出现，煤粉附着的现象明显改善，如图 7b 所示。



(a) D 磨煤机 R<sub>90</sub>=12.0%；烟气温度 887 °C



(b) D 磨煤机 R<sub>90</sub>=4.9%；烟气温度 851 °C

图 7 330 MW 工况不同煤粉细度对高温再热器底部可见飞灰量的影响

Fig.7 Influence of different coal fineness on visible fly ash amount at the bottom of high-temperature reheater under 330 MW

而且煤粉变细后屏式过热器底部附近环境颜色由亮度较高的红色转呈暗红色，通过 FLUKE Raytek 3i Plus 高精度工业高温红外测温仪测量可知该处温度由 887 °C 下降至 851 °C，表明上层磨煤机煤粉细度增加后煤粉燃尽提前。因此，低负荷下最上层投运磨的煤粉应适当偏细以改善煤粉燃尽特性，可以减缓低负荷下的沾污结渣。

### 2.5 控制参数改进

通过以上试验，掌握了稳态工况下一次风速、运行氧量、化学当量比与煤粉细度等特性对烟气温度和 NO<sub>x</sub> 排放的影响。因此，根据试验结果，在保证 NO<sub>x</sub> 排放浓度不超过 220 mg/m<sup>3</sup> 的前提下，以最低烟气温度为目标，可得到最合适的一次风母管压力设定值(设置为图 2 中的函数 2)、运行氧量设定值(满负荷下设置为 3.5%)、二次风门开度(满负荷下采用当量化学比为 0.68 左右时的挡板开度)、动态分离器转速(低负荷下设置为 83 r/min)等设定值。用这些设定值与负荷的关系函数替换掉之前的旧函数关系，可以有助于缓解快速升负荷时烟气温度的飙升情况，并防止升负荷动态过程中产生的受热面沾污结渣。

### 3 动态工况试验

动态升负荷过程中燃烧工况较差，烟气温度可能会远高于 660 MW 稳态工况，将导致受热面沾污结渣的形成。采用第 2 节中一次风速、运行氧量、二次风门挡板(空气分级)及动态分离器转速(煤粉细度)的控制函数进行改进，改进前后对烟气温度的影响如图 8 所示。由前文可知运行氧量对烟气温度影响较大，所以此处仅以运行氧量曲线的变化为代表，升

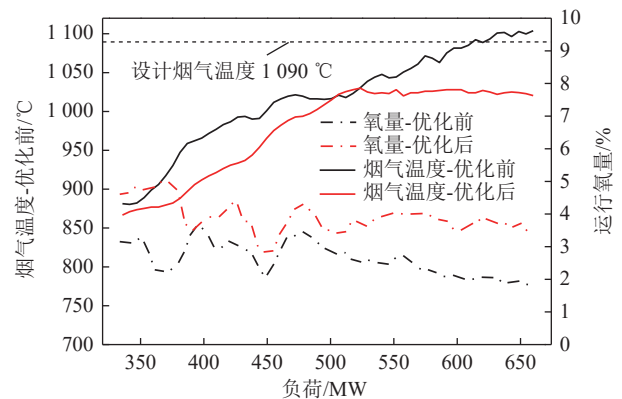


图 8 升负荷工况下控制函数改进前后运行氧量与烟气温度的变化

Fig.8 Changes of oxygen and flue gas temperature before and after control function improvement under increasing load

负荷速率为9 MW/min。由图8可知,随着负荷增加,改进前的烟气温度在前期增长较快,速率达到8.12 °C/min,主要表现为几次启磨时烟温速度较快,其原因是当新投入一台磨煤机时,一次风携带煤粉大量涌入炉膛,此时运行氧量会发生突降,导致燃尽推迟,烟气温度陡增。因此在新投入磨煤机之前,应将对应燃烧器上方的二次风门提前打开,形成较强的氧化性气氛,即“风等煤”,改进后没有再出现烟气温度升速率超过7 °C/min的现象。改进后运行氧量高于改进前,而且平均烟气温度升速率由6.18 °C/min降低至4.26 °C/min,改进后烟气最高温度由1104 °C降低至1023 °C,远低于设计烟气温度1090 °C,很大程度上降低了受热面沾污结渣的可能性。

#### 4 受热面沾污监测

各受热面的吸热量可反映其传热系数和沾污厚度(图9),因此,根据各受热面的吸热量可以对改进前后的受热面的结焦沾污进行监测。将锅炉蒸汽侧受热面分为:低温过热器、屏式过热器、高温过热器,以及低温再热器、高温再热器,各级受热面的布置见。已知工质的压力、温度,通过汽水参数在该状态下的进、出口焓值<sup>[25]</sup>可计算出上述各个受热面的吸热量,最后将单位受热面的吸热量除以上述所有受热面的总吸热量,得到上述各受热面的吸热比例。

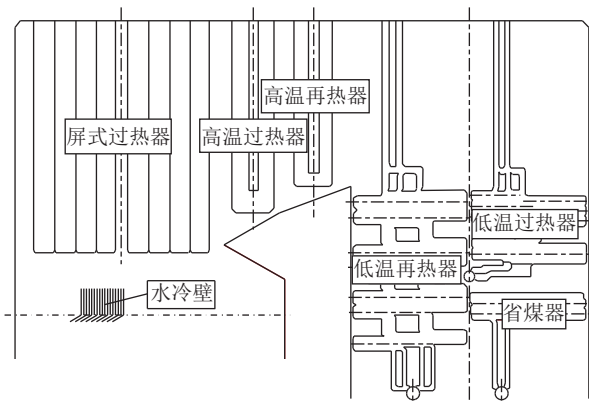


图9 各级受热面布置示意

Fig.9 Schematic diagram of the heating surfaces arrangement

图10给出了投入改进的控制函数前后的受热面吸热比例。由于水冷壁壁面整体的沾污结渣程度较过热器、再热器等受热面要轻<sup>[26]</sup>,当过热器、再热器吸热量减少可认为是这些受热面的沾污程度加剧。当试验第3天投入了改进的控制函数后,可见水冷壁吸热量从47.5%降低至46.1%,而屏式过热器、低温过热器和低温再热器的吸热比例分别上升了0.6%、1.6%和0.9%,表明改进的控制函数投入后屏式过热器、低温过热器和低温再热器的传热系数增加,沾污系数降低,沾污情况得到了明显的好转。

器、低温过热器和低温再热器的传热系数增加,沾污系数降低,沾污情况得到了明显的好转。

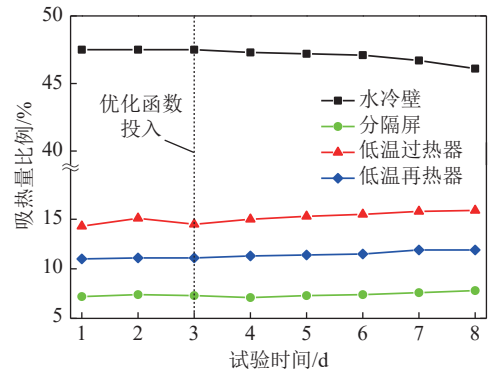


图10 控制函数改进前后受热面吸热比例变化

Fig.10 Change of heat absorption ratio of the heating surfaces before and after control function improvement

通过标高67.3 m处看火孔观察可知(图11),改进后屏式过热器管屏的沾污情况由改进前被结渣裹覆(图11a)而只能看到一个孔转变为可以看到较清晰的管子间隙(图11b)。表明在准东煤中添加5%高岭土的前提下,将控制函数改进后可以使最外层松脆的沾污、结渣层在降负荷过程中顺利剥落<sup>[27-28]</sup>,改善屏式过热器的沾污程度。

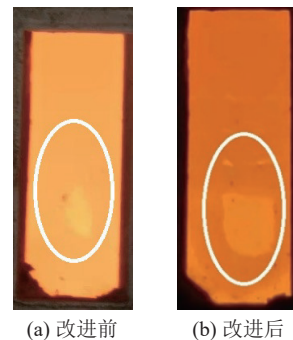


图11 控制函数改进前后屏式过热器沾污情况对比

Fig.11 Comparison of contamination on the platen superheater before and after control function improvement

#### 5 结论

1)660 MW工况下运行氧量对烟气温度影响最明显,由2.0%提升至3.5%时,烟气温度下降99 °C。一次风速的降低和主燃区局部平均化学当量比的增加使烟气温度略有降低,煤粉细度对烟气温度影响不明显。

2)运行氧量及主燃区局部平均化学当量比的降低可导致NO<sub>x</sub>质量浓度有较明显的降低,煤粉细度的变化对NO<sub>x</sub>的影响不明显。

3)投入改进的控制函数后,升负荷过程中烟气

温度升温速率得到有效控制,从之前的 6.18 °C/min 下降至 4.26 °C/min,最高温度也从 1 104 °C 下降至 1 023 °C,低于设计烟气温,很大程度上降低了受热面沾污结渣的可能性。

4)投入改进的控制函数后,通过受热面吸热比例分析,屏式过热器、低温过热器和低温再热器吸热比例分别上升了 0.6%、1.6% 和 0.9%,结合现场观察可知沾污结渣情况得到了明显改善。

5)330 MW 负荷工况下提高最上层磨煤机的煤粉细度  $R_{90}$  至 4.9% 左右,可有效降低高温再热器底部附近烟气温,减少可燃物及飞灰沉积,抑制低负荷工况下沾污结渣的形成。

参考文献(References):

[ 1 ] 高兰英. 2021年10月份沿海地区煤炭市场运行分析[J]. 中国港口, 2021(11): 44-45.  
GAO Lanying. Analysis of coal market operation in Coastal area in October 2021 [J]. China Ports, 2021(11): 44-45.

[ 2 ] LI Jing, ZHUANG Xinguo, QUERO X, *et al.* Environmental geochemistry of the feed coals and their combustion by-products from two coal-fired power plants in Xinjiang Province, Northwest China[J]. Fuel, 2012, 95: 446-456.

[ 3 ] LI Xiao, LI Jing, WU Guoguang, *et al.* Clean and efficient utilization of sodium-rich Zhundong coals in China: Behaviors of sodium species during thermal conversion processes[J]. Fuel, 2018, 218: 162-173.

[ 4 ] 黄东东, 张守玉, 常明, 等. 高钠煤灰烧结特性研究进展[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(1): 83-94.  
HUANG Dongdong, ZHANG Shouyu, CHANG Ming, *et al.* Research progress on sintering characteristics of high sodium coal ash[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(1): 83-94.

[ 5 ] 张守玉, 陈川, 施大钟, 等. 高钠煤燃烧利用现状[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(5): 1-12.  
ZHANG Shouyu, CHEN Chuan, SHI Dazhong, *et al.* Situation of combustion utilization of high sodium coal[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(5): 1-12.

[ 6 ] 黄东东, 张守玉, 江锋浩, 等. 固钠剂对NaCl蒸气的钠捕获性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(21): 7403-7409.  
HUANG Dongdong, ZHANG Shouyu, JIANG Fenghao, *et al.* Study on the sodium capture performance of sodium adsorbent for NaCl vapor[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41( 21 ) : 7403-7409.

[ 7 ] WANG Xuebin, RUAN Renhui, YANG Tao, *et al.* Sulfate removal by Kaolin addition to address fouling in a full-scale furnace burning high-alkaline Zhundong Coal[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(11): 12823-12830.

[ 8 ] 杨天华, 杨小龙, 魏砾宏, 等. 水溶Na对高碱煤热解及氮热变迁的影响[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3284-3292.  
YANG Tianhua, YANG Xiaolong, WEI Lihong, *et al.* Influence of water-soluble sodium on the pyrolysis and thermal nitrogen trans-

formation of high alkali coal[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9): 3284-3292.

[ 9 ] BU Yufan, WANG Limin, CHEN Xun, *et al.* Numerical analysis of ABS deposition and corrosion on a rotary air preheater[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 131: 669-677.

[ 10 ] 孙瑞金, 王长安, 赵林, 等. 氧分级对准东煤富氧燃烧NO<sub>x</sub>生成与积灰特性的影响[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(4): 42-50.  
SUN Ruijin, WANG Changan, ZHAO Lin, *et al.* Effects of staged oxygen on NO<sub>x</sub> formation and ash deposition characteristics during oxy-fuel combustion of high-alkali coal[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(4): 42-50.

[ 11 ] 徐旭常, 吕俊复, 张海. 燃烧理论与燃烧设备[M]. 北京: 科学出版社, 2012.  
XU Xuchang, LU Junfu, ZHANG Hai. Combustion theory and combustion equipment[M]. Beijing: Science Press, 2012.

[ 12 ] 葛帅, 张莉, 冀思哲, 等. 一次风入射角对四角切圆锅炉流场对称性影响的研究[J]. 锅炉技术, 2020, 51(1): 15-19.  
GE Shuai, ZHANG Li, JI Sizhe, *et al.* Study on the influence of Primary air injection angle on the symmetry of flow field in four corner tangentially fired boiler[J]. Boiler Technology, 2020, 51(1): 15-19.

[ 13 ] 刘建全, 孙保民, 胡永生, 等. 某1000 MW超超临界双切圆锅炉燃烧特性的数值模拟与优化[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20): 34-41.  
LIU Jianquan, SUN Baomin, HU Yongsheng, *et al.* Numerical simulation and optimization on combustion of a 1 000 MW ultra supercritical dual tangential circle boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20): 34-41.

[ 14 ] 王永贞, 金晶, 刘敦禹, 等. 330 MW燃准东煤电站锅炉烟气沿程灰沉积特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6373-6380.  
WANG Yongzhen, JIN Jing, LIU Dunyu, *et al.* Characterization of ash deposits along the flue gas for Zhundong coal combustion in a 330 MW boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6373-6380.

[ 15 ] LI Song, CHEN Zhichao, HE Erdemtu, *et al.* Combustion characteristics and NO<sub>x</sub> formation of a retrofitted low-volatile coal-fired 330 MWe utility boiler under various loads with deep-air-staging[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 223-233.

[ 16 ] 马达夫, 何翔, 张守玉, 等. 燃用混煤的1 000 MW旋流对冲锅炉宽负荷稳燃特性研究[J]. 动力工程学报, 2021, 41(10): 45-52.  
MA Dafu, HE Xiang, ZHANG Shouyu, *et al.* Study on blending coal combustion stability of 1000 MW Swirl-opposed firing boiler under wide load[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2021, 41(10): 45-52.

[ 17 ] 吴江全, 孟建强, 严泰森, 等. 过量空气系数对准东煤结渣特性的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(7): 78-83.  
WU Jiangquan, MENG Jianqiang, YAN Taisun, *et al.* Effect of excess air coefficient on slagging characteristics of Zhundong coal[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(7): 78-83.

[ 18 ] 魏砾宏, 李润东, 李爱民, 等. 超细煤粉着火特性的热重分



- 析[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(11): 1292–1295.
- WEI Lihong, LI Rundong, LI Aimin, *et al.* Study on ignition characteristics of micro-pulverized coal by thermogravimetry[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(11): 1292–1295.
- [19] 姜秀民, 刘辉, 闫澈, 等. 超细煤粉NO<sub>x</sub>和SO<sub>2</sub>排放特性与燃烧特性[J]. *化工学报*, 2004, 55(5): 783–787.
- JIANG Xiumin, LIU Hui, YAN Che, *et al.* NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> emission and combustion characteristics of super fine pulverized coal particle[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2004, 55(5): 783–787.
- [20] WANG Zhihua, LIU Yingzu, Whiddon Ronald, *et al.* Measurement of atomic sodium release during pyrolysis and combustion of sodium-enriched Zhundong coal pellet[J]. *Combustion and Flame*, 2017, 176: 429–438.
- [21] REPIC B, MLADENOVIC M, MARINKOVIC A. Investigation of ash deposit formation on heat transfer surfaces of boilers using coals and biomass[J]. *Thermal Science*, 2019, 23: 1–13.
- [22] CHANG Jian, WANG Xin, ZHOU Zhijian, *et al.* CFD modeling of hydrodynamics, combustion and NO<sub>x</sub> emission in a tangentially fired pulverized-coal boiler at low load operating conditions[J]. *Advanced Powder Technology*, 2020, 32(6): 290–303.
- [23] GUO Kai, YANG Kun, HUANG Shaolong, *et al.* Study on the preparation of super-light aggregate with sludge[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 174-177: 1574–1578.
- [24] 高琦. 煤粉燃烧全粒径飞灰生成机理研究[D]. 北京: 清华大学, 2019.
- GAO Qi. Mechanistic study on the formation of fly ash with full particles in full sizes during pulverized coal combustion [D]. Beijing: Tsinghua University, 2019.
- [25] WAGNER W, COOPER JR, DITTMANN A, *et al.* The IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-transactions of the ASME*, 1998, 122(1): 150–182.
- [26] WEI Bo, TAN Houzhang, WANG Yibin, *et al.* Investigation of characteristics and formation mechanisms of deposits on different positions in full-scale boiler burning high alkali coal[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 119: 449–458.
- [27] DAI Baiqian, WU Xiaojiang, GIROLAMO A D, *et al.* Inhibition of lignite ash slagging and fouling upon the use of a silica-based additive in an industrial pulverised coal-fired boiler: Part 1. Changes on the properties of ash deposits along the furnace[J]. *Fuel*, 2014, 139: 720–732.
- [28] LI Mingqiang, ZHANG Zhongxiao, WI Xiaojiang, *et al.* Experiment and mechanism study on the effect of Kaolin on melting characteristics of Zhundong Coal ash[J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(9): 7763–7769.