

DOI: 10.19666/j.rlfed.202305081

煤粉锅炉高比例燃用准东高碱煤试验研究

白 杨^{1,2}, 郭洋洲³, 高国栋⁴, 李兴智³, 张喜来³, 邓 磊¹

(1.西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710075;

2.国家能源集团国源电力有限公司, 北京 100033;

3.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

4.华电新疆准东五彩湾发电有限公司, 新疆 昌吉 831700)

[摘 要] 准东煤储量大、开采成本低, 是新疆准东地区最经济的动力煤种。但准东煤结渣、沾污性极强, 严重制约锅炉安全稳定运行。准东地区锅炉通常需要掺烧 20% 以上低碱煤, 而该地区低碱煤储量少、价格贵, 发电厂降本增效受到严重制约。为了促进企业降本增效, 在五彩湾电厂 350 MW 机组锅炉上开展了高比例燃用准东高碱煤试验研究。采用燃料燃烧全过程协同优化策略防控锅炉受热面结渣沾污, 向煤中添加高岭土调控煤灰成分, 对制粉系统、燃烧系统、吹灰系统的运行参数进行了深度优化。现场试验结果显示: 协同优化策略解决了该型锅炉长期存在的水冷壁大面积流渣、燃烧器喷口结渣堵塞、对流受热面严重沾污的难题, 锅炉运行安全性和带负荷能力大幅度提高, 入炉煤结构可长期保持为 92.5% 准东高碱煤+7.5% 高岭土, 综合经济效益显著。

[关 键 词] 高碱煤; 结渣; 沾污; 高岭土; 协同优化

[引用本文格式] 白杨, 郭洋洲, 高国栋, 等. 煤粉锅炉高比例燃用准东高碱煤试验研究[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 157-166.
BAI Yang, GUO Yangzhou, GAO Guodong, et al. Experimental study on burning high ratio of Zhundong high alkali coal in a pulverized coal boiler[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 157-166.

Experimental study on burning high ratio of Zhundong high alkali coal in a pulverized coal boiler

BAI Yang^{1,2}, GUO Yangzhou³, GAO Guodong⁴, LI Xingzhi³, ZHANG Xilai³, DENG Lei¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China Energy Guoyuan Electric Power Co., Ltd., Beijing 100033, China;

3. Xi'an Thermal Power Research Institute CO., Ltd., Xi'an 710054, China;

4. Huadian Xinjiang Zhundong Wucaiwan Power Generation Co., Ltd., Changji 831700, China)

Abstract: Zhundong has large coal reserves and low mining costs, making it the most economical fuel in the Xinjiang Zhundong region. However, Zhundong coal has strong slagging and fouling properties, which seriously restricts the safe and stable operation of boilers. Boilers in the Zhundong region usually require burning at least 20% low alkali coal, the low reserves and high prices of low alkali coal seriously constrain the cost reduction of power plants. In order to promote cost reduction, an experimental study on burning high ratio of Zhundong high alkali coal was conducted on the 350 MW unit boiler of Wucaiwan Power Plant. A collaborative optimization strategy was adopted to prevent and control slag and contamination on the heating surface of the boiler. This included adding kaolin to coal to regulate the composition of coal ash, and deeply optimizing the operating parameters of the pulverization system, combustion system, and soot blowing system. The test results show that the collaborative optimization strategy has solved the long-standing problems of large-scale slag flow on the water-cooled wall, clogging of the burner nozzle, and severe fouling of the convective heating surface of this type of boiler. The safety and load capacity of the boiler operation have been greatly improved, and the coal structure can be lastingly maintained as 92.5% Zhundong high alkali coal and 7.5% kaolin, with significant safety and economic benefits.

Key words: high alkali coal; slagging; ash fouling; kaolin; collaborative optimization

收稿日期: 2023-05-20

基金项目: 神华神东电力有限责任公司科技创新及技术标准项目 (GSKJ-19-08)

Supported by: Technology Innovation and Technical Standards Project of Shenhua Shendong Electric Power Co., Ltd. (GSKJ-19-08)

第一作者简介: 白杨 (1984), 男, 高级工程师, 主要研究方向为煤的安全清洁高效燃烧技术, 11170283@chnenergy.com.cn.

通信作者简介: 邓磊 (1983), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为煤的安全清洁高效燃烧技术, leideng@mail.xjtu.edu.cn.

准东煤田探明煤炭储量超过 2 000 亿 t, 预测煤炭储量近 4 000 亿 t, 是我国目前最大的整装煤田, 准东煤电基地是我国主要煤电基地之一^[1-5]。准东煤田煤层厚, 煤矿多采用露天开采, 开采成本和市场售价均较低, 是准东地区最经济的动力煤种。准东煤属于典型高碱煤, 结渣、沾污性极强。燃用准东煤的锅炉大量出现炉膛水冷壁流渣和燃烧器喷口结渣堵塞现象^[2-6]。炉膛掉大渣或者流渣容易堵塞冷灰斗, 导致排渣困难, 进而迫使机组停运。另一方面, 炉膛水冷壁结渣会导致水冷壁吸热效率显著下降, 火焰峰值温度升高, 进而导致炉内烟气高温区向炉膛上部延伸, 加重屏式过热器和尾部受热面的结渣沾污程度。大量燃烧过程生成的在一定温度范围呈现强粘附性的飞灰遇到屏式过热器、高温过热器、高温再热器、低温再热器, 形成不断增长的沾污层, 沾污加重后极易堵塞烟道, 制约机组带负荷能力, 严重的情况下会直接迫使机组停运。因此, 防控结渣沾污是锅炉安全燃用准东煤的关键难题。准东地区锅炉通常需要掺烧 20% 以上低碱煤, 而该地区低碱煤储量极少, 远远无法满足市场需要, 低碱煤到厂价格是准东高碱煤的数倍, 造成企业降本增效受到严重制约。

近十年来, 为了解决准东地区煤炭利用和煤电企业生产难题, 国内外学者对高碱煤的燃烧过程、结渣机理进行了大量研究。樊斌等^[7]研究表明准东煤中主要矿物为方解石、高岭石、含铁类物质以及未分类(复杂)矿物; 准东煤燃烧后, 灰中石英、铁的氧化物、白云石的含量急剧增加, Na 发生了硅酸盐化和气化; 含 Fe 物质主要转变为铁的氧化物, 同时发生了熔融聚合; 含 Ca 物质发生了硅酸盐化和硫酸盐化, 同时颗粒发生了破碎行为。王永贞等^[8]采集了燃用准东宜化煤 330 MW 机组锅炉烟气沿程沉积样, 研究表明分隔屏过热器与后屏过热器为硅酸盐类沉积样, 后墙水冷壁、后屏再热器至低温过热器为硫酸盐类沉积样; 硅酸盐沉积样黏度、灰渣熔点较高, 而硫酸盐沉积样黏度及灰渣熔点较低。史航等^[9]采集了燃用准东五彩湾煤 350 MW 机组锅炉烟气沿程沉积样品, 研究显示中低温区域沉积样(末级再热器及一级过热器)以硫酸盐为主, 高温区域沉积样(水冷壁及屏式过热器)以硅酸盐/硅铝酸盐为主; 末级再热器沉积样结构分层明显, 沾污最为严重, 其 Na 含量高于其他区域, 且 Na 含量从贴近管壁内层到外层逐渐降低, 同时 Ca 含量

逐渐增加; 末级再热器沉积样品中, 内底层成熔融状态, 主要以 Na_2SO_4 为主, CaSO_4 含量稍低于 Na_2SO_4 , 含有较少的钠长石 $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ 和 $\text{Na}_3\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$; 中间层成熔融状态/半熔融状态, 组成主要以 CaSO_4 为主, Na_2SO_4 及钠长石 $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ 含量均小于内底层; 外表层则由小颗粒聚合而成, 未见熔融颗粒, 组成以 CaSO_4 和 Na_2SO_4 为主, 并含有 SiO_2 , CaSiO_3 和钠长石 $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ 。已有大量研究表明, 新疆准东高碱煤燃烧过程大量的含 Na 组分与含 Si、Al、Fe、Ca 等物质反应生成低灰熔点物质, 同时 Na 大量发生气化、迁移反应、固化沉积, 是准东高碱煤易诱发锅炉结渣沾污的关键机制^[2-16], 这使得准东高碱煤的结渣沾污问题与其他煤种存在显著的差别。

实际锅炉结渣沾污的发生, 不仅与上述高碱煤的煤质特性有关, 还与现场燃烧设备特性、炉膛热负荷参数、炉内流场、吹灰性能等实际条件密切相关。杨忠灿等^[16]研究显示准东煤具有高水分、中等热值、低灰分、中高挥发分、低-特低硫分、低-中等煤灰软化温度、易着火燃尽、反应活性高等煤质特性, 提出在役锅炉燃用准东煤应从合理控制准东煤掺烧比例、改造设备条件、优化运行方式来提高锅炉运行安全性和经济性, 设计新锅炉应在燃烧方式、炉膛热负荷参数、主辅机配置及参数优化方面防控结渣沾污。陈大元等^[17]研究提出为了保证准东煤锅炉的安全运行, 必须控制入炉煤的灰成分相关指标, 其中关键的 Na_2O 含量应不高于 4%。

从以上进展可知, 灰的组成和性质, 对准东高碱煤的结渣沾污性具有决定性作用, 特别是高含量的 Na、Ca; 对煤灰进行改性, 提高灰中含 Si、Al 相关组分的含量, 降低 Na、Ca 含量, 是减轻入炉煤灰结渣、沾污性的重要手段。企业早期大量掺烧低碱煤, 即是基于此原理。向煤中添加高岭土调控煤灰成分, 也是安全燃用高碱煤的重要技术路线之一。Takuwa 等人^[18]研究显示向入炉煤中掺入高岭土可以在燃烧过程中有效地捕获气相含钠组分, 煤质、气氛会影响钠的捕集效率, 在 Na 迁移过程中, HCl 气体的影响较 SO_2 气体更为显著。陈媛等^[19]研究显示添加高岭土可有效抑制煤粉热解、燃烧和气化气氛下细颗粒物的生成, 且气化气氛下高岭土对的 Na 元素的捕集效果最好。李宇航等^[20]研究显示向煤中添加高岭土、黏土类矿物土可使极低熔点的钠、钾、钙等碱/碱土金属化合物形成熔点相对较高

的硅铝酸盐,进而缓解准东煤结渣,实际锅炉应用时应将入炉煤灰中 Na_2O 质量分数降低到3%以下。Zhang Zhen等^[21]研究了不同种类的钠蒸气(Na 、 NaCl 和 NaOH)在高岭土表面的吸附和捕获机制,显示 Na 原子主要以化学吸附的方式吸附在高岭石表面中空位点上,高岭土在高温下深度脱羟基过程中具有更大的钠吸附和固定能力,高岭土捕获钠的过程可分为物理吸附阶段、内部扩散阶段和化学吸附3个阶段,3个阶段之间没有明确的边界,钠捕获过程可以同时连续发生,直到高岭石结构饱和和失活。已有报道充分显示,高岭土等富含 Si 、 Al 组分的添加剂在物理化学机理上对抑制高碱煤结渣具有显著作用^[19-28]。

为了结合生产实际,进一步探索、验证上述煤灰成分改性方法和协同优化策略在解决准东高碱煤安全燃用问题的潜力,在五彩湾电厂350 MW机组锅炉上开展了高比例燃用准东高碱煤试验研究。

1 设备概况

五彩湾电厂2×350 MW机组锅炉型号为DG1200/25.4-II4,是由东方锅炉(集团)股份有限公司生产的单炉膛、超临界、一次再热、前后墙对冲燃烧、平衡通风、固态干排渣、 Π 型布置、本生型直流锅炉,锅炉的主要参数见表1。

表1 锅炉设备主要设计参数
Tab.1 Main design parameters of the boiler

项目	BMCR 工况数值
锅炉最大连续蒸发量/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	1 200.00
过热器出口蒸汽压力/MPa	25.40
过热器出口蒸汽温度/ $^{\circ}\text{C}$	571.00
再热器出口蒸汽压力/MPa	4.80
再热器出口蒸汽温度/ $^{\circ}\text{C}$	569.00
锅炉炉膛宽度/m	15.10
锅炉炉膛深度/m	13.68
上一次风中心距屏下缘高度/m	23.66
炉膛截面热负荷/($\text{MW}\cdot\text{m}^{-2}$)	4.44
炉膛容积热负荷/($\text{kW}\cdot\text{m}^{-3}$)	86.27
燃烧器区壁面热负荷/($\text{MW}\cdot\text{m}^{-2}$)	1.48
设计锅炉效率/%	93.97
设计排烟温度/ $^{\circ}\text{C}$	122.00

锅炉采用中速磨正压冷一次风机直吹式制粉系统,配置5台ZGM95N-1型中速磨煤机,设计煤粉细度 $R_{90}=20\%$ 。每台磨煤机上部的动态分离器出口引出4根一次风煤粉管道,对应同一层的4只燃烧器。20只低 NO_x 旋流式煤粉燃烧器,分前墙3层、

后墙2层布置在炉膛前后墙上,前墙最下层燃烧器(磨煤机B层)配置微油点火装置,锅炉煤粉燃烧器结构如图1所示。

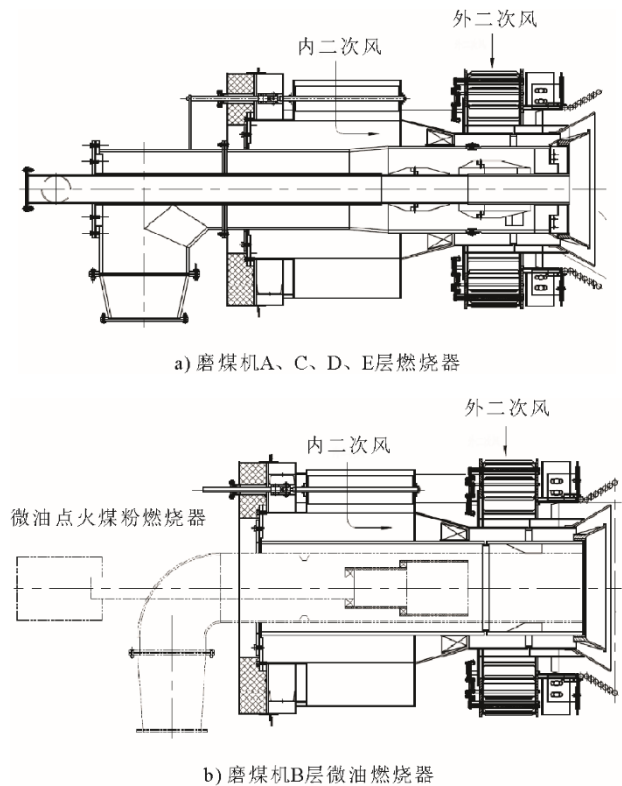


图1 锅炉煤粉燃烧器结构
Fig.1 Structure diagram of burners

燃烧器上部布置上下2层燃尽风喷口,下层燃尽风为直流与旋流结合燃尽风喷口(前后墙共12只),上层为直流燃尽风喷口(前、后墙各4只)。锅炉前、后墙靠近侧面水冷壁区域设置了6层贴壁风喷口(共24只)。

2 锅炉结渣沾污现象

锅炉于2010年前后设计,设计可燃用100%准东高碱煤,由于当时准东高碱煤尚未大规模开采利用,其极强结渣沾污性等煤质特点尚未充分显现,结渣沾污防控能力主要参照常见结渣性烟煤进行设计,锅炉于2012年建成投入商业化运行后无法安全燃用设计煤。运行初期燃用50%左右的新疆准东神华五彩湾矿高碱煤,掺烧50%左右的低碱煤(神华新疆乌东矿煤),高碱煤和低碱煤分磨入炉,结渣沾污严重,但机组可勉强维持正常运行。随着低碱煤价格攀高,锅炉掺烧低碱煤的比例逐年降低。锅炉投运第7年,准东高碱煤燃用比例持续超过70%,出现了极为严重的炉膛结渣(图2a)、尾

部烟道沾污堵塞的问题,热态条件下通过吹灰器难以有效控制结渣、沾污,机组带负荷能力大幅度降低,严重时段机组只能维持最高 220 MW 负荷运行,并多次迫使机组停运。历次停炉检查均可观察到燃烧器区域水冷壁附着有厚度超过 10 cm 以上坚硬结渣层,局部渣层厚度超过 20 cm。炉膛流渣还使得燃烧器出口射流的火焰温度攀升至 1 450 °C 以上(红外测温);燃烧器发生严重变形、烧损和通道堵塞问题(图 2b)、图 2c);炉底渣多为黑色致密硬渣(图 2d),严重威胁干式除渣系统正常运行。

3 燃烧诊断与优化

3.1 燃烧诊断概况

为了更好地施行协同优化策略治理锅炉出现的严重结渣沾污,首先对锅炉实际燃烧状况开展现场诊断,并分析优化燃烧运行方式。燃烧诊断期间,锅炉结渣沾污严重,炉膛换热差,竖井烟道入口烟温高,因此低温再热器壁温频繁超限,严重结渣和金属温度超限导致机组最高仅可带 280 MW 负荷运行。此时全部 5 台磨煤机均运行,前墙上层(D 层)和后墙中层(E 层)燃烧器燃用低碱煤(1/3 乌东煤+2/3 北塔山煤),其他 3 层燃烧器燃用五彩湾高碱

煤,高碱煤燃用比例约 60%。190~245 MW 负荷段,停运 D 层燃烧器,高碱煤燃用比例约 75%;145~190 MW 负荷段,停运磨煤机 C、D 层燃烧器,锅炉燃用高碱煤的比例约 70%。以上所述各负荷段底部,磨煤机 A、B 层燃烧器出力相对偏大以减少低碱煤燃用量。实际入炉混煤的煤质特性参数见表 2。

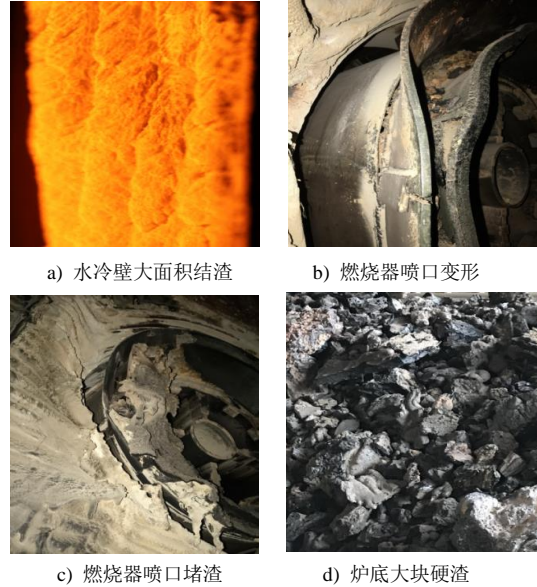


图 2 锅炉结渣沾污现象

Fig.2 Slagging and fouling phenomenon of the boiler

表 2 燃烧诊断与优化期间锅炉入炉煤质参数

Tab.2 Coal quality parameters of the coal fed into the boiler during combustion diagnosis and optimization

项目	5 台磨煤机运行	停运 D 层燃烧器	停运 C、D 层燃烧器
全水分 $w_t(M)/\%$	20.97	23.42	22.62
灰分 $w_{ar}(A)/\%$	10.22	8.31	8.93
干燥无灰基挥发分 $w_{daf}(V)/\%$	35.18	34.29	34.60
碳分 $w_{ar}(C)/\%$	55.69	55.37	55.46
氢分 $w_{ar}(H)/\%$	2.84	2.64	2.71
氧分 $w_{ar}(O)/\%$	9.19	9.22	9.22
氮分 $w_{ar}(N)/\%$	0.55	0.50	0.51
硫分 $w_{ar}(S)/\%$	0.55	0.55	0.55
收到基低位发热量 $Q_{net,v,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$	20.13	19.73	19.85
灰中二氧化硅 $w(SiO_2)/\%$	41.04	35.52	37.57
灰中三氧化二铝 $w(Al_2O_3)/\%$	18.64	16.41	17.26
灰中三氧化二铁 $w(Fe_2O_3)/\%$	10.39	10.24	10.36
灰中氧化钙 $w(CaO)/\%$	12.35	16.35	14.83
灰中氧化镁 $w(MgO)/\%$	4.76	5.72	5.34
灰中氧化钠 $w(Na_2O)/\%$	2.59	3.27	3.02
灰中氧化钾 $w(K_2O)/\%$	1.72	1.41	1.53
灰中二氧化钛 $w(TiO_2)/\%$	0.78	0.73	0.75
灰中三氧化硫 $w(SO_3)/\%$	6.80	9.35	8.39

3.2 结渣观察炉内偏烧情况

通过观火孔,观测了水冷壁和喷口结渣情况,

并采用红外测温法测量了机组在 240~280 MW 负荷段燃烧器出口可观测的火焰峰值温度。通过该项工

作发现: 1) 后墙 A、E 层燃烧器喷口及附近水冷壁流渣现象相对更严重, 火焰温度持续高于 1 400 °C; 2) 相同高度的炉膛横截面, 靠近后墙区域的烟气温度显著高于前墙烟气温度, 高负荷前后墙烟气温差高达 100 °C 以上; 3) 炉膛火焰温度整体较高, 高负荷下燃烧器出口火焰温度普遍高于 1 300 °C; 4) 前墙底部 B 层燃烧器喷边缘存在较严重的结渣现象, 明显堵塞燃烧器喷口, 影响了正常的出口流场。这些现象说明燃烧器区域流场整体偏向后墙区域, 后墙火焰在前墙火焰的压迫下, 无法保持伸展状态, 发散贴墙趋势明显, 并造成后墙燃烧器出风量少, 加剧喷口堵塞。

通过长期观察分析, 确定这种现象来源于 4 个方面的共同作用, 按主次排序依次为: 1) 前墙底部的 B 层微油点火燃烧器, 一次风为直筒型出口, 出口射流刚性强, 而 A、C、D、E 层燃烧器由于结构原因, 一次出口射流刚性较弱, 因此 B 层射流对后墙 A、E 层燃烧器出口射流具有显著的压迫作用; 2) 前后墙对冲燃烧锅炉二次风母管风速惯性导致前墙风量大于后墙; 3) 前墙 3 层燃烧器、后墙 2 层燃烧器布置方式造成前墙射流总动量大于后墙, 形成对后墙的压迫; 4) II 型锅炉折焰角结构导致燃烧器区域火焰倾向于偏向后墙。

3.3 配风方式调整

基于上述前后墙实际燃烧偏差, 在配风方式上强化了后墙燃烧器二次风动量, 具体是将后墙燃烧二次风门相对于前墙进行偏大设置 (表 3)。配风方式调整后, 炉膛前后墙火焰温度偏差幅度明显缩小, 后墙流渣现象减轻, 炉底渣量有所减少, 但燃烧器喷口和水冷壁结渣仍然严重。

表 3 调整前后配风方式对比 单位: %
Tab.3 Comparison of air distribution modes before and after adjustment

二次风门层编号	调整前开度值	调整后开度值
E (后墙中层)	60	85
D (前墙上层)	60	60
C (前墙中层)	60	60
B (前墙下层)	60	60
A (后墙下层)	60	65

3.4 燃烧器参数调整

该锅炉的容积热负荷和截面热负荷相对较高, 旋流燃烧器射流下游, 在流场作用下, 燃料粒子易飞水冷壁, 发生结渣。准东煤着火、燃尽性好, 故为了减轻结渣, 外二次风宜采用较弱的旋流, 控

制火焰形状避免过早发散, 强化二次风对一次风射流的包覆。燃烧器初始状态下, 外二旋流强度接近最弱位置, 故未变动外二次风旋流叶片角度, 保持原 70°设置 (最弱旋流对应叶片角度 75°)。

内二次风门控制内二次量大小和旋流强度, 内二次风门开度由 80% 调整至 65% 后, 炉内结渣减轻, 内二次风门开度由 65% 调整至 40% 后, 炉内结渣加重。综合考虑, 将内二次风门开度调整至 70%, 调整后燃烧器喷口结渣减轻, 但仍存在堵渣现象。仍然存在堵渣的原因是, 燃烧器区域水冷壁始终附着了厚度达 10~300 mm 的渣层, 导致炉膛温度高, 燃烧器喷出的煤粉在高温作用下迅速着火, 进而剧烈燃烧, 燃料粒子融化乃至液滴化严重, 故在这种情况下很难进一步大幅扭转结渣情况。

由于低碱煤到厂价格是高碱煤的 2 倍以上, 因此不宜通过大幅度提高低碱煤燃用比例避免结渣沾污问题。对于上述现状下难以彻底扭转的锅炉结渣沾污, 最终采取的应对措施是利用停炉检修机会清理灰渣。清理水冷壁、二次风通道、对流受热面等各处的灰渣后, 锅炉再次启动运行时处于相对良好的初始状态, 在启动运行初期采用了燃烧诊断及优化得出的推荐运行配风方式, 有效避免了燃烧器二次风通道再次堵塞, 采取应对措施前后燃烧火焰温度偏差缩小至 50 °C 内, 且测得最高火焰温度始终低于 1 350 °C, 但锅炉水冷壁的结渣现象依然严重, 特别是在 310~350 MW 负荷段尤其严重, 主要原因是高碱煤极易着火, 即使采用弱旋流燃烧方式仍然燃烧剧烈, 同时由于炉膛热负荷参数偏高、炉膛截面尺寸偏小, 因此熔融粒子触壁概率高, 易造成严重结渣。从诊断分析看, 需要进一步抑制煤粉初期燃烧的剧烈程度来缓解水冷壁结渣。

4 高比例燃用准东高碱煤试验研究

4.1 入炉煤灰成分调控

本文试验采用了燃料燃烧全过程协同优化策略防控锅炉受热面结渣沾污, 该策略具体包括向煤中添加高岭土调控煤灰成分, 对制粉系统、燃烧系统、吹灰系统的运行参数进行了深度优化, 协同减轻锅炉结渣沾污程度。其中的关键是基于高碱煤特性调整全要素设备的配置和运行方式, 优化高碱煤燃烧过程条件。

已有研究揭示了高岭土捕集 Na, 减轻煤灰结渣沾污性的作用机理。综合已有基础研究^[18-28]和实际

锅炉设备各要素相互作用机制^[29],可推知向高碱煤中添加高岭土可能具有如下几方面作用缓解结渣:

1) 高岭土不发生燃烧放热,其随煤粉进入炉膛后具有吸热作用,可降低煤粉燃烧峰值温度,有利于控制煤粉燃烧速率,进而减弱煤粉粒子熔融、液化倾向,减少碱金属元素挥发比例;

2) 高岭土对气相碱金属盐的物理吸附以及高岭土与碱金属的反应整体起到了捕集碱金属的作用^[18-28],减少碱金属在煤灰颗粒上的冷凝富集,进一步降低灰分黏性;

3) 添加高岭土能够提供比准东高碱煤本身更多的灰分,这些灰分本身灰熔点高,结渣沾污性弱,其微观孔隙结构捕集碱金属后仍然呈现高灰熔点,表观上起到了稀释黏性颗粒浓度的作用,进而降低了飞灰整体黏附性。

为了避免燃用低碱煤,开展了添加高岭土高比例燃用准东高碱煤试验。高岭土来自电厂周边露天煤矿的剥离土。在输煤系统上使高岭土料流与准东煤流汇流,实现高岭土与高碱煤均匀预混,入炉煤结构大致为92.5%准东高碱煤+7.5%高岭土。煤和高岭土的质量检测参数见表4。

准东煤和高岭土哈氏可磨指数 HGI 均大于100,均属易磨。准东煤冲刷磨损指数 Ke 为0.8,磨损性弱;高岭土 Ke 高达7.2,磨损性达到二级极强;准东煤添加8%高岭土后,煤样磨损性相对于原煤由较大增强,达到3.0。所采高岭土样灰分高达96%,灰成分中 SiO_2 含量高达72.39%, SiO_2 与 Al_2O_3 的和高达89.27%,高含量的硅铝物质是其磨损性极强的原因。

准东五彩煤结渣沾污性极强,但灰熔融温度高,这与已有文献报道的准东煤的沾污结渣性能同煤灰熔点相关性不佳有关,其灰熔点判别结渣沾污的方法对于准东高碱煤仅能作为参考^[30]。

4.2 磨煤机适应性调整

在磨煤机B单磨煤机掺配约8%高岭土情况下,磨煤机电流相对于不掺高岭土时升高近10A,通风阻力增大,石子煤量增多,堵磨煤机风险增高。分析认为,高岭土密度(堆积密度约 1.6 t/m^3)远高于煤(堆积密度约 0.9 t/m^3),磨煤机内临界吹出速度比煤粉高。因此,单磨煤机掺烧高岭土时,掺烧磨煤机内煤层厚度首先会变厚,导致该磨煤机通风阻力增加,风量降低,进而形成运行电流和石子煤量的恶化趋势。试验中针对该现象及时将分离器转速

控制值由50 r/min 降至42 r/min,磨煤机B通风阻力、出口温度逐步恢复正常,同等出力下磨煤机电流与未添加高岭土前相当。其余4台磨煤机掺烧高岭土运行参数参考磨煤机B调整,未出现通流阻力增大、磨煤机出口温度降低、电流激增现象。

表4 煤和高岭土及掺混燃料煤质参数
Tab.4 Quality parameters of coal, clay and blended fuel

名称	准东煤	高岭土	准东煤+8% 高岭土
全水分 $w_t(M)/\%$	27.30	4.00	25.57
灰分 $w_{ar}(A)/\%$	4.35	96.00	11.14
干燥无灰基挥发分 $w_{daf}(V)/\%$	32.72		32.72
碳分 $w_{ar}(C)/\%$	54.99		50.92
氢分 $w_{ar}(H)/\%$	2.32		2.15
氧分 $w_{ar}(O)/\%$	9.16		8.48
氮分 $w_{ar}(N)/\%$	0.41		0.38
硫分 $w_{ar}(S)/\%$	0.55		0.51
收到基低位发热量 $Q_{net,v,ar}/(MJ\cdot kg^{-1})$	19.13		17.71
灰变形温度 $DT/^\circ C$	1 360	1 380	1 371
灰软化温度 $ST/^\circ C$	1 370	1 390	1 381
灰流动温度 $FT/^\circ C$	1 390	1 440	1 418
灰中二氧化硅 $w(SiO_2)/\%$	18.70	72.39	52.98
灰中三氧化二铝 $w(Al_2O_3)/\%$	9.21	16.88	14.11
灰中三氧化二铁 $w(Fe_2O_3)/\%$	8.65	4.25	5.84
灰中氧化钙 $w(CaO)/\%$	29.28	0.73	11.05
灰中氧化镁 $w(MgO)/\%$	9.02	0.88	3.82
灰中氧化钠 $w(Na_2O)/\%$	5.28	1.21	2.68
灰中氧化钾 $w(K_2O)/\%$	0.46	2.03	1.46
灰中二氧化钛 $w(TiO_2)/\%$	0.59	0.94	0.81
灰中三氧化硫 $w(SO_3)/\%$	17.53	0.51	6.66

全部磨煤机均添加高岭土后,同等出力下磨煤机电流与掺烧高岭土前相比基本不变或小幅降低,未造成磨煤单耗显著升高,原因是:1)全部磨煤机均掺烧高岭土时,通风阻力得到平衡,磨运转趋向正常,不再有石子煤量增大现象;2)分离器转速频率降低后,物料循环倍率减小,磨电流降低;3)高岭土的强磨损性对准东煤形成研磨作用,使得准东煤更高效地被磨细。上述3个因素综合作用避免了添加高岭土磨煤机耗电量大幅上涨。

高岭土质地较硬、密度大、磨损性强,在磨煤机中对准东煤形成了研磨作用,因此准东煤的粉化效率得到显著提高,最终结果是在相近操作参数下,添加高岭土煤粉的细度显著低于不添高岭土细度。表5给出了不同工况下,按等速取样方法采集的磨煤机出口煤粉的细度对比情况。由表5可知:不添高岭土情况下,分离器转速设置至约60 r/min

时,煤粉细度 R_{90} 约为 13%;基本不做调整的情况,向煤中添加 10%高岭土,则出口煤粉细度明显变细, R_{90} 降低至 8%以下。

表 5 煤和高岭土及掺混燃料煤质参数
Tab.5 Quality parameters of coal, clay and blended fuel

项目	准东煤	准东煤+8%高岭土			
		43.60	43.10	42.10	42.10
磨煤机出力/(t·h ⁻¹)	43.00	43.60	43.10	42.10	42.10
分离器转速/(r·min ⁻¹)	60	61	52	42	26
入磨煤机风量/(t·h ⁻¹)	95	100	101	101	98
入磨煤机风温/℃	302	315	313	312	308
磨煤机电流/A	29.5	37.4	34.9	30.9	28.5
磨煤机出口温度/℃	60	61	61	59	60
煤粉细度 $R_{200}/\%$	0.19	0.22	0.34	0.52	2.49
煤粉细度 $R_{90}/\%$	13.06	7.73	8.42	14.36	17.93
煤粉均匀性 n	1.41	1.09	1.04	1.25	0.96

从燃烧器喷口着火观察情况看,添加高岭土后,喷口煤粉着火距离仍然较小,喷口周围结渣仍然较显著。 R_{90} 小于 10%的煤粉细度显然过细,因此进一步降低分离器转速。分离器转速降至 52 r/min 左右时,煤粉细度变化不大;进一步降低至 42 r/min 左右时, R_{90} 升至 14.36%,按照工业经验,该值较为适宜;当分离器转速再进一步降至 26 r/min 左右时,煤粉中开始出现明显的粗颗粒,说明未能有效控制煤粉均匀性。

另外一方面观察煤粉细度对燃烧器喷口结渣的影响可知:当分离器转速维持在 48 r/min 以上时,微油点火燃烧器喷口结渣非常严重,有时沿燃烧器出口射流方向形成长达 1 m 以上的柱状渣,比不添加高岭土纯烧高碱煤时更为严重;但当分离器转速相对值降至 36~42 r/min, R_{90} 升至 14.36%以上时,燃烧器喷口渣柱逐渐脱落,结渣得到有效抑制。综上测试观察,认为添加高岭土可能导致煤粉细度过细,需要重新调整磨煤机参数,控制煤粉细度 R_{90} 至适宜值,推荐值为 15%~20%。

4.3 吹灰系统适应性调整

长伸缩吹灰器的灰污清除能力与对流受热面沾污程度是否能可逆控制密切相关。为了确保长伸缩蒸汽吹灰器的高效清灰能力,在吹灰试验过程中测试了中长伸缩吹灰器的提升阀后蒸汽压力,发现实际阀后压力普遍在 0.5~0.7 MPa,远低于其设计值 1.2~1.4 MPa。因此,将吹灰器吹灰压力提高至 0.9~1.0 MPa 后,吹灰器清除受热面沾污的能力显著增强。调整吹灰压力后受热面新增沾污层能够吹除,但紧挨管壁的致密粘污层无法吹净,这是锅炉长期

大比例掺烧高碱煤形成的顽固沾污底层,顽固沾污层在试验过程中基本没有变化。为了避免吹灰器对受热面形成吹损,未再进一步提高蒸汽吹灰压力。

4.4 试验效果及分析

高比例燃用准东高碱煤试验期间,锅炉负荷在 145~345 MW 范围波动,为检验结渣沾污防控效果,还进行 1 号锅炉连续 15 日机组负荷不低于 240 MW 考核试验,其中 320 MW 以上负荷最长持续时间超过 16 h。2 台锅炉现场试验中,高岭土添入准东高碱煤后 1~3 天内,均发生了排渣量的集中猛增,从渣型可判断炉膛水冷壁原有厚渣层陆续大面积脱落,炉膛水冷壁结渣现象自此基本消失,燃烧器出口火焰峰值温度大幅度降低至 1 270~1 340 ℃,降幅达 100 ℃以上。添加高岭土的 7 天内,燃烧器喷口仍然存在较为严重的结渣堵塞现象,但通过前文所述的制粉系统适应性调整,调粗了入炉煤粉细度,进一步降低了燃烧温度,彻底抑制了喷口结渣堵塞倾向。

添加高岭土前,燃用 75%准东高碱煤+25%低碱煤,燃烧器喷口和附近水冷壁结渣严重,看火孔存在流焦现象;添加高岭土并优化运行参数后,燃用 92.5%准东高碱煤+7.5%高岭土,燃烧器喷口结渣、堵焦明显减轻,看火孔流焦、结渣现象消失。试验前炉渣密实、硬、不易破碎,掺烧后炉渣多孔、易碎。添加高岭土后,炉渣量明显降低,且不再出现大块硬渣(单块重大于 20 kg),绝大部分为多孔疏松渣(单块重小于 0.5 kg)。图 3 显示了添加高岭土前后炉渣形态的变化。

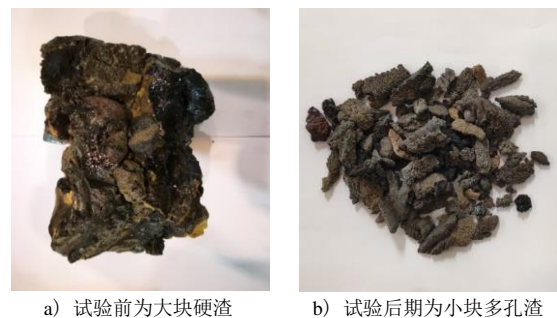


图 3 添加高岭土前后炉渣形态的变化
Fig.3 Change of slag morphology

表 6 给出了试验前后的烟气温度的对比。由表 6 可以看出,炉膛火焰温度降低,屏底烟气温度的上升,脱硝入口烟气温度的基本不变。表 7 给出了试验前后受热面金属温度对比。由表 7 可知,水冷壁、低温过热器金属壁温下降,屏过、高过、低再金属壁温

上升,高再金属壁温基本不变。表 8 给出了试验前后受热面吸热量对比。由表 8 可知,水冷壁吸热量下降,低过、屏过、高过吸热量上升,省煤器、低再、高再吸热量略有上升。

表 6 试验前后的烟气温度对比 单位: °C
Tab.6 Comparison of flue gas temperature before and after the experiment

项目	340 MW 准东煤 掺低碱煤	344 MW 准东煤掺 高岭土
CE 侧后 21 m 处	1 384	1 279
SOFA 上 36 m 处	1 221	1 171
屏中前墙 50 m 处	1 044	1 084
高再出口(表盘)	717	715
SCR 入口(表盘)	398	398

表 7 试验前后受热面金属温度对比 单位: °C
Tab.7 Comparison of metal temperatures on heating surfaces before and after the experiment

项目	340 MW 准东 煤掺低碱煤	344 MW 准东 煤掺高岭土
水冷壁出口金属壁温	413.3	405.5
低温过热器出口金属壁温	460.2	456.3
屏式过热器出口金属壁温	525.0	526.3
高温过热器出口金属壁温	549.5	550.5
低温再热器出口金属壁温	501.8	510.5
高温再热器出口金属壁温	560.8	560.5

表 8 试验前后受热面吸热量对比 单位: MJ/s
Tab.8 Comparison of heat absorption of heating surfaces before and after the experiment

掺烧情况	340 MW 准东煤 掺低碱煤	344 MW 准东煤 掺高岭土
省煤器吸热量	67.9	68.9
水冷壁吸热量	337.7	333.7
低过吸热量	62.5	74.7
屏过吸热量	94.0	103.3
高过吸热量	53.7	58.1
低再吸热量	101.3	103.9
高再吸热量	57.0	57.4

表 9 给出了试验前后空气预热器(空预器)参数及锅炉效率对比。由表 9 可知:一次风进出口压差增大,原因是磨煤机冷风挡板完全关闭,叠加入磨煤机物料量增大,空预器一次风量大幅增加;二次风进出口压差、烟气侧进出口压差略有增加,这与锅炉烟气量增大一致;空预器通流情况未发生明显变化;排烟温度降低约 8 °C,原因是掺烧高岭土后关闭冷风挡板,一次风全部通过空预器,提高了空气侧总吸热量,降低了排烟温度;锅炉效率由掺烧前的 91.54% 增加至 91.81% (按空预器出口排烟热损失计算)。

表 9 试验前后空预器参数及锅炉效率对比
Tab.9 Comparison of air preheater parameters and boiler efficiency before and after the test

掺烧情况	340 MW 准 东煤掺低 碱煤	344 MW 准 东煤掺高 岭土
空预器一次风进出口压差/kPa	1.77	2.33
空预器二次风进出口压差/kPa	0.39	0.42
空预器烟气侧进出口压差/kPa	1.17	1.20
实测空预器排烟温度/°C	184.0	175.3
修正空预器排烟温度/°C	168.2	160.2
修正锅炉效率(按空预器出口)/%	91.54	91.81

表 10 给出了试验前后主要环保参数对比。由表 10 可知:脱硝反应器入口 NO_x 质量浓度有所降低,可能原因是燃烧器区域燃烧峰值温度降低,一定程度抑制了快速型 NO_x 的生成;除尘器出口粉尘质量浓度基本不变,说明除尘器裕度足以满足当前的折算灰分;硫入口 SO₂ 质量浓度明显降低,原因是准东煤含硫量相对较低碱煤低(准东煤硫分 0.45%,低碱煤硫分 0.62%)。综合对比,添加高岭土全烧准东煤的环保性能明显优于准东煤掺低碱煤,同时减少了公路远距离大量运输低碱煤带来的污染物排放,利于地区环境治理。

表 10 试验前后主要环保参数对比
Tab.10 Comparison of main environmental parameters before and after the experiment

掺烧情况	340 MW 准东煤 掺低碱煤	344 MW 准东 煤掺高岭土
脱硝反应器入口 NO _x 质量浓度(标况下)/(mg·m ⁻³)	281.2	263.0
除尘器出口粉尘质量浓度(标况下)/(mg·m ⁻³)	15.7	15.2
脱硫入口 SO ₂ 质量浓度(标况下)/(mg·m ⁻³)	1 362.3	1 178.3
入炉煤折算硫质量分数/%	0.105	0.097

准东地区低碱煤、煤矸石到厂标煤单价是高碱煤的 2 倍以上,据实际生产数据计算,80%高碱煤+20%低碱煤标煤单价相对于高碱煤约增加 50 元/t 标准煤;85%高碱煤+15%煤矸石标煤单价相对于高碱煤大约增加 25 元/t 标准煤;92.5%高碱煤+7.5%高岭土标煤单价相对于高碱煤大约增加 7 元/t 标准煤。由此可见,92.5%高碱煤+7.5%高岭土较其他技术路线的降本优势十分显著。从该锅炉连续数年的实际应用结果看,添加高岭土高比例燃用高碱煤的燃料技术路线对煤粉管道、燃烧器、锅炉受热面、脱硝、空预器、除尘器、脱硫、风机等均未出现明显的负面影响,该技术的不足较少,主要为:

1) 添加高岭土后, 磨煤机磨辊磨损速率较碾磨低碱煤低, 但较碾磨高碱煤快, 相对于单上高碱煤, 磨煤机磨辊每 1~2 年需要额外堆焊 1 次;

2) 飞灰总量相对于掺低碱煤或纯烧高碱煤较多, 处置燃煤飞灰会产生一定成本。

上述不足对锅炉安全生产和成本的轻微影响, 相对其产生的安全效益和经济效益可忽略不计。综合上述, 现场试验表明通过向煤中添加高岭土调控煤灰成分, 对制粉系统、燃烧系统、吹灰系统的运行参数进行深度协同优化, 可实现锅炉长期安全燃用 92.5% 准东高碱煤+7.5% 高岭土, 安全、经济效益均十分显著。

5 结 论

1) 准东高碱煤极强的结渣、沾污特性, 引发了严重的水冷壁流渣和燃烧器喷口结渣堵塞问题, 锅炉参数进入恶性发展后很容易导致带负荷能力快速降低, 甚至迫使停炉。彻底治理结渣沾污是安全燃用准东高碱煤的前提。

2) 采用燃料燃烧全过程协同优化策略防控锅炉受热面结渣沾污, 向煤中添加高岭土调控煤灰成分, 对制粉系统、燃烧系统及吹灰系统的运行参数进行了深度优化, 能够有效解决准东煤锅炉面临的严重结渣沾污问题。

3) 现场试验结果锅炉燃用 92.5% 准东高碱煤+7.5% 高岭土, 结合燃料燃烧全过程协同优化, 锅炉运行安全性和带负荷能力大幅度提高, 各项主要性能参数大幅度优于高碱煤掺烧低碱煤工况。该试验结果应用后大幅度降低了电厂综合发电成本, 安全、经济效益显著。

【参 考 文 献】

- [1] 霍超. 新疆煤炭资源分布特征与勘查开发布局研究[J]. 中国煤炭, 2020, 46(10): 16-21.
HUO Chao. Research on distribution characteristics and exploration and development layout of coal resources in Xinjiang[J]. China Coal, 2020, 46(10): 16-21.
- [2] 吕俊复, 史航, 吴玉新, 等. 燃用准东煤过程中碱/碱土金属迁移规律及锅炉结渣沾污研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 377-385.
LYU Junfu, SHI Hang, WU Yuxin, et al. Transformation of AAEM and ash deposition characteristics during combustion of Zhundong coal[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 377-385.
- [3] 江锋浩, 张守玉, 黄小河, 等. 高碱煤燃烧过程中结渣机理研究进展[J]. 煤炭转化, 2018, 41(2): 1-8.
JIANG Fenghao, ZHANG Shouyu, HUANG Xiaohu, et al. Research progress on slagging mechanism during high alkali coal combustion process[J]. Coal Conversion, 2018, 41(2): 1-8.
- [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] 魏砾宏, 崔保崇, 陈勇, 等. 高碱煤钠赋存形态及其燃烧过程中迁移转化的研究进展[J]. 燃料化学学报, 2019, 47(8): 897-906.
WEI Lihong, CUI Baochong, et al. Occurrence of sodium in high alkali coal and its transformation during combustion[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2019, 47(8): 897-906.
- [6] 梁鼎成, 解强. 煤中碱(土)金属形态在煤转化过程中的作用及不同形态间转化的研究进展[J]. 化工进展, 2018, 37(7): 2577-2587.
LIANG Dingcheng, XIE Qiang. Occurrence, roles in coal conversion processes, and transformation of alkali/alkaline earth metals in coal: a review[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(7): 2577-2587.
- [7] 樊斌, 于敦喜, 曾宪鹏. 准东煤燃烧中矿物质转化行为的 CCSEM 研究[J]. 化工学报, 2016, 67(5): 2117-2123.
FAN Bin, YU Dunxi, ZENG Xianpeng. Mineral transformation during Zhundong coal combustion by CCSEM[J]. CIESC Journal, 2016, 67(5): 2117-2123.
- [8] 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.
- [9] 史航, 吴玉新, 郭前鑫, 等. 准东煤碱金属在 350 MW 煤粉炉内的沿程分布特性[J]. 中国电机工程学报, 2020, 38(23): 6981-6986.
SHI Hang, WU Yuxin, GUO Qianxin, et al. Distribution characteristics of the alkali in Zhundong coal along the flue gas of a 350 MW pulverized coal furnace[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 38(23): 6981-6986.
- [10] 唐诗, 傅培舫, 刘洋, 等. 准东煤及配煤的矿物相变及熔融机理[J]. 燃烧科学与技术, 2019, 25(4): 324-330.
TANG Shi, FU Peifang, LIU Yang, et al. Mineral phase transformation and ash melting mechanism of Zhundong coal and blended coal[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2019, 25(4): 324-330.
- [11] 代百乾, 乌晓江, 张忠孝. 高碱煤燃烧过程中灰中主要元素的迁移规律[J]. 动力工程学报, 2014, 34(6): 438-442.
DAI Baiqian, WU Xiaojiang, ZHANG Zhongxiao. Transition behavior of main elements in fly ash during high alkali coal combustion[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2014, 34(6): 438-442.
- [12] XU Jingying, YU Dunxi, FAN Bin, et al. Characterization of ash particles from co-combustion with a Zhundong coal for understanding ash deposition behavior[J]. Energy & Fuels, 2014, 28: 678-684.
- [13] LI Gengda, LI Shuiqing, HUANG Qian, et al. Fine particulate formation and ash deposition during pulverized coal combustion of high-sodium lignite in a down-fired furnace[J]. Fuel, 2015, 143: 430-437.
- [14] HUANG Qian, LI Shuiqing, LI Gengda, et al.

- Mechanisms on the size partitioning of sodium in particulate matter from pulverized coal combustion[J]. *Combustion and Flame*, 2017, 218: 313-323.
- [15] 肖海平, 时浩, 李昕耀, 等. 硫酸钠沉积转化特性及对灰熔融性的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(1): 257-266.
XIAO Haiping, SHI Hao, LI Xinyao, et al. Deposition and conversion characteristics of Na_2SO_4 and its effect on ash fusibility[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(1): 257-266.
- [16] 杨忠灿, 刘家利, 何红光, 等. 新疆准东煤特性研究及其锅炉选型[J]. *热力发电*, 2010, 39(8): 38-40.
YANG Zhongcan, LIU Jiali, HE Hongguang. Study on properties of Zhundong coal in Xinjiang region and type-selection for boilers burning this coal sort[J]. *Thermal Power Generation*, 2010(8): 38-40.
- [17] 陈大元, 刘家利, 方顺利, 等. 准东煤锅炉掺烧时煤灰成分控制研究[J]. *锅炉制造*, 2020, 49(1): 26-33.
CHEN Dayuan, LIU Jiali, FANG Shunli, et al. Control of coal ash composition during co-combustion of Zhundong coal boiler[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(1): 26-33.
- [18] TAKUWA Tsuyoshi, NARUSE Ichiro. Emission control of sodium compounds and their formation mechanisms during coal combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31: 2863-2870.
- [19] 陈媛, 许杨, 盛昌栋. 准东煤热解、燃烧和气化过程中Na的行为及高岭土的捕获作用[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(16): 4396-4401.
CHEN Yuan, XU Yang, SHENG Changdong. Behavior of Na and its capture by adding kaolin during devolatilization, combustion and gasification of zhundong coal[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(16): 4396-4401.
- [20] 李宇航, 张喜来, 张森, 等. 准东煤防结渣添加剂应用试验[J]. *热力发电*, 2017, 46(9): 135-140.
LI Yuhang, ZHANG Xilai, ZHANG Sen, et al. Experimental study on additives applied to against slagging of Zhundong coal[J]. *Thermal Power Generation*, 2017, 46(9): 135-140.
- [21] ZHANG Zhen, LIU Jing, YANG Yingju, et al. Theoretical investigation of sodium capture mechanism on kaolinite surfaces[J]. *Fuel*, 2018, 234: 318-325.
- [22] 姚斌, 胡文博, 余亚成, 等. 高岭土对准东煤中不同赋存形态钠释放的影响[J]. *电力科技与环保*, 2019, 35(4): 14-18.
YAO Bin, HU Wenbo, YU Yacheng, et al. Effect of kaolin on sodium release of different forms in Zhundong coal[J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2019, 35(4): 14-18.
- [23] JIANG Fenghao, ZHANG Shouyu, HUANG Xiaohu, et al. Sodium vapor capture by coal ash during sodium-rich coal combustion[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 161: 114127.
- [24] 张利孟, 董信光, 刘科, 等. 高岭土对准东煤结渣特性及矿物质演变的影响[J]. *燃料化学学报*, 2015, 43(10): 1176-1181.
ZHANG Limeng, DONG Xinguang, LIU Ke, et al. Effect of kaolin on ash slagging and mineral conversion of Zhundong coal[J]. *Thermal Power Generation*, 2015, 43(10): 1176-1181.
- [25] 邢浩轩. 高岭土结构衍化对低阶煤燃烧过程中钠砷协同控制的影响[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021: 103-105.
XIN Haoxuan. The influence of kaolinite structural derivation on the collaborative control of sodium and arsenic during low-rank coal combustion[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021: 103-105.
- [26] 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.
- [27] 赵京, 张玉锋, 魏小林, 等. 高碱煤燃烧过程中亚微米颗粒物 PM_{10} 的生成特性[J]. *化工学报*, 2019, 70(8): 3113-3120.
ZHAO Jing, ZHANG Yufeng, WEI Xiaolin, et al. PM_{10} formation characteristics during high-alkali coal combustion[J]. *CIESC Journal*, 2019, 70(8): 3113-3120.
- [28] 刘炎泉, 程乐鸣, 季杰强, 等. 添加剂对高碱煤钠迁移和灰分烧结温度的影响[J]. *燃料化学学报*, 2018, 46(11): 1298-1304.
LIU Yanquan, CHENG Leming, JI Jieqiang, et al. Influence of additives on sodium release and ash sintering temperature of a high-alkali coal[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2018, 46(11): 1298-1304.
- [29] 郭洋洲, 白新奎, 张喜来, 等. 现役锅炉燃用高碱煤结渣沾污防控技术研究[J]. *热力发电*, 2022, 51(3): 131-140.
GUO Yangzhou, BAI Xinkui, ZHANG Xilai, et al. Study on techniques for slagging prevention and ash deposition control in existing boilers burning high-alkali coal[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(3): 131-140.
- [30] 茅锦达, 王恩禄, 李德立, 等. 煤灰沾污结渣判别指标与准东煤实际沾污结渣程度关联分析[J]. *锅炉技术*, 2022, 53(5): 15-20.
MAO Jinda, WANG Enlu, LI Deli, et al. Correlation analysis between the identification indicators of coal ash fouling and slagging and Zhundong coal fouling and slagging degree in the utility boilers[J]. *Boiler Technology*, 2022, 53(5): 15-20.

(责任编辑 邓玲惠)