

DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2020.12.004

# 660 MW 超临界电站煤粉锅炉大比例掺烧兰炭 试验研究

Experimental study on large-proportion semi coke co-combustion in a 660 MW supercritical pulverized coal boiler

赵晓鹏, 苏永健, 徐义巍, 李彦军, 刘君, 郭洪远, 谭恺

ZHAO Xiaopeng, SU Yongjian, XU Yiwei, LI Yanjun, LIU Jun, GUO Hongyuan, TAN Kai

(宁夏京能宁东发电有限责任公司, 银川 750000)

(Ningxia Jingneng Ningdong Power Generation Company Limited, Yinchuan 750000, China)

**摘要:**针对660 MW超临界烟煤锅炉大比例掺烧兰炭煤种适应性试验的研究,从兰炭燃料特性分析,提出锅炉掺烧面临的问题,通过数值模拟试验结果确定兰炭掺烧位置,对磨煤机兰炭适应性调整试验,确定兰炭的煤粉细度 $R_{90}$ 控制在10%,以及烟煤锅炉采用中间磨组掺烧兰炭的方式。通过掺烧试验验证了电站锅炉燃用兰炭具有炉内结渣轻的特点;锅炉排放的 $\text{NO}_x$ 质量浓度略有增加,增加幅度为18.42%;锅炉烟气 $\text{SO}_2$ 质量浓度大幅下降,下降幅度达40.65%,对掺烧高硫高热值煤种的电站锅炉具有较好的替代优势;锅炉效率下降0.82%,但锅炉煤粉燃烧效率达99.09%。通过试验研究了兰炭燃料与所配中速磨直吹式制粉系统烟煤锅炉的适应性,掌握了烟煤锅炉掺烧兰炭燃料的关键技术,提出了兰炭掺烧适宜的燃烧方式、锅炉调整方式及原则,超临界电站烟煤锅炉掺烧质量分数为50%的兰炭能够稳定安全经济运行。

**关键词:**燃煤锅炉;兰炭;掺烧;煤种适应性;锅炉效率;锅炉燃烧效率

中图分类号:TK 16

文献标志码:A

文章编号:1674-1951(2020)12-0022-06

**Abstract:** In the research on the adaptability of large-proportion semi coke co-combustion in a 660 MW supercritical bituminous coal boiler, the problems faced by the boiler was pointed out through semi coke characteristic analysis. And numerical simulation results located the blending position for semi coke. Semi coke adaptability adjustment test was made on the coal pulverizers. In the test, the pulverized coal fineness  $R_{90}$  was controlled below 10% and co-combustion was taken by the pulverizer group in the middle. The test results verify that semi coke combustion can alleviate the coking in power plant boilers, and reduce the mass concentration of  $\text{SO}_2$  by 40.65%, while slightly increase the  $\text{NO}_x$  mass concentration by 18.42%. The boiler co-combusting coals with high sulfur content and high calorific value shows advantage over its substitutes, since its pulverized coal combustion efficiency reaches 99.09% while its boiler efficiency shows a 0.82% decline. Studying the adaptability of semi coke in bituminous coal boilers with medium-speed mill direct-firing pulverizing systems, the key points of semi coke co-combustion, an appropriate co-combustion method, and principles of boilers' adjustment can be obtained. It is considered that the 660 MW supercritical bituminous coal boiler blending with 50% semi coke during its co-combustion runs safely and economically.

**Keywords:** coal-fired boiler; semi coke; co-combustion; coal adaptability; boiler efficiency; boiler combustion efficiency

## 0 引言

兰炭是无黏结性或弱黏结性的高挥发分烟煤在中低温条件下干馏热解,释放出挥发分、硫、氮等杂原子和水分后得到的产品,与半焦类似<sup>[1-2]</sup>。兰炭是一种不可多得的新型清洁能源,具有高固定炭、

高比电阻、高化学活性、低灰分、低铝、低硫、低磷“三高四低”的特性,尤其在国家不断提倡绿色环保的前提下,提高兰炭的利用比例显得至关重要。经过近30年的工业发展,兰炭产业已经形成遍布中国的循环经济产业链,总产能已经超过1亿t<sup>[3]</sup>。开展不同比例兰炭燃用试验研究,通过制粉系统调整、煤粉细度控制、燃烧优化运行、掺混方式调整等技术手段,形成完善的电站煤粉锅炉燃用兰炭技术体系,目的在于实现电站煤粉锅炉安全稳定大比例掺

收稿日期:2020-08-02;修回日期:2020-12-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0602004)

烧兰炭及气化残炭(超低挥发分碳基燃料)。

本文通过对兰炭煤质进行分析,开展兰炭与烟煤的掺烧特性试验研究,在 660 MW 超临界烟煤电站锅炉机组上开展了大比例掺烧兰炭试验,对兰炭与电站锅炉的适应性进行分析,初步判断大容量机组适宜的兰炭掺烧比例,可为电站锅炉大规模燃用兰炭提供理论支撑和技术参考。

## 1 电站锅炉系统设备简介

京能宁东电厂 2 台 HG-2210/25.4-YM16 型锅炉是哈尔滨锅炉厂有限责任公司自主开发制造的烟煤超临界 660 MW 锅炉,锅炉设计煤质见表 1。

表 1 锅炉设计煤质

Tab. 1 Design coal quality of the boiler

名称	符号	设计煤种	校核煤种 1	校核煤种 2
全水分/%	$\omega(M_f)$	13.50	12.50	18.30
收到基灰分/%	$\omega(A_{ar})$	19.11	28.38	12.69
干燥无灰基挥发分/%	$\omega(V_{daf})$	35.32	37.36	32.01
收到基碳/%	$\omega(C_{ar})$	52.96	46.44	55.06
收到基氢/%	$\omega(H_{ar})$	2.89	2.70	2.85
收到基氧/%	$\omega(O_{ar})$	10.21	8.60	10.28
收到基氮/%	$\omega(N_{ar})$	0.54	0.54	0.53
收到基硫/%	$\omega(S_{ar})$	0.79	0.84	0.29
低位发热量/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	$Q_{net,ar}$	19.09	17.11	19.83
哈氏可磨性指数	HGI	69	75	78
煤灰软化温度/℃	ST	1 310	1 430	1 290

锅炉为一次中间再热、超临界压力变压运行,采用不带再循环泵的大气扩容式启动系统的直流锅炉,单炉膛、平衡通风、固态排渣、全钢架、全悬吊结构、II 型布置、紧身封闭。炉膛断面尺寸为 19.082 3 m×19.082 3 m,水冷壁下集箱标高 7.0 m,顶棚管标高 75.5 m。制粉系统采用中速磨直吹式制粉系统,每炉配 6 台 ZGM113G-II 型磨煤机,5 台运行,1 台备用;煤粉细度  $R_{90}=18\%$ 。主燃烧器采用固定式,共设 6 层水平浓淡煤粉一次风喷口,4 层分离型燃尽风室和 8 层辅助风室。其中分离型燃尽风(SOFA)室采用水平摆动形式,可以调节燃烧火球在炉膛中的位置,并用于调节由于切圆燃烧产生的炉膛出口处的烟温偏差。主燃烧器布置在水冷壁的 4 面墙上,每层 4 只燃烧器对应 1 台磨煤机。SOFA 燃烧器布置在主燃烧器区上方的水冷壁的四角,以实现分级燃烧,降低 NO<sub>x</sub> 排放。燃烧器共 3 组,其中主燃烧器 2 组布置于 4 面墙上,形成一个大的切圆。SOFA 燃烧器布置于 4 个角上,SOFA 燃烧器出口射流中心线和水冷壁中心线的夹角分别为 42°和 48°,形成一个小的反切风切圆。燃烧器共 6 层煤粉喷

口,二次风喷嘴交替布置于其间,在主燃烧器的上方的二次风喷口可作为 SOFA 喷嘴,在距上层煤粉喷嘴上方约 6.2 m 处有 4 层附加燃尽风 SOFA 喷嘴。燃烧器喷口布置及标高,如图 1 所示。

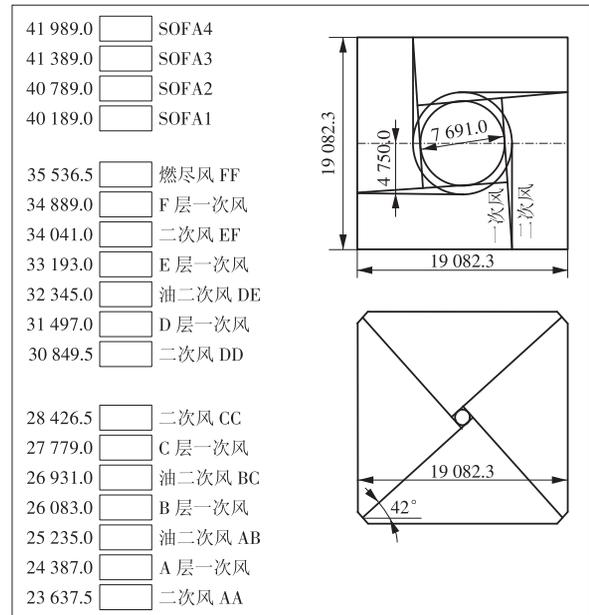


图 1 燃烧器喷口布置

Fig. 1 Layout of burner nozzles

## 2 兰炭燃料特性及掺烧面临的挑战

本文采用宁夏本地兰炭作为掺烧试验煤种,烟煤及兰炭煤质特性见表 2,兰炭灰分分析见表 3。按照 GB/T 7562—2018《高品煤质量 发电煤粉锅炉用煤》<sup>[4]</sup>划分,兰炭煤质属于低-特低挥发分、中高-高热值、低灰分、特低硫分、低灰熔点、难可磨性煤种;根据 DL/T 831—2015《大容量煤粉燃烧锅炉炉膛选型导则》<sup>[5]</sup>,兰炭煤灰软化温度(ST)为 1 190 ℃,灰分碱酸质量比为 1.3,综合结渣指数为 4.14,属于严重结焦煤质。

根据兰炭工业分析和灰分分析,综合判断兰炭煤粉气流着火性能属于难着火,燃尽性能属于难燃尽,结渣性能属于严重结焦<sup>[6]</sup>。

对本机组锅炉而言,由于掺烧兰炭煤质偏离设计煤质较多,随掺烧比例增加,入炉煤质的挥发分大幅下降,炉内燃烧稳定性和燃尽性下降;兰炭哈氏可磨性指数低,磨煤机出力降低,煤粉细度升高,冲刷磨损指数升高;在兰炭掺烧过程中可能存在锅炉结焦、减温水流量过大、锅炉受热面壁温超温、低负荷燃烧不稳、炉膛出口 NO<sub>x</sub> 质量浓度升高、煤粉燃尽率降低和锅炉效率下降等问题<sup>[7]</sup>。因此,需要通过掺配及燃烧调整确定合理的兰炭掺烧比例及掺烧方式。

表 2 兰炭煤质特性

Tab. 2 Semi coke characteristic

名称	符号	烟煤	兰炭
全水分/%	$\omega(M_d)$	3.10	12.00
收到基灰分/%	$\omega(A_{ar})$	37.27	9.73
干燥无灰基挥发分/%	$\omega(V_{daf})$	39.30	9.74
收到基碳/%	$\omega(C_{ar})$	45.19	75.35
收到基氢/%	$\omega(H_{ar})$	3.20	1.48
收到基氧/%	$\omega(O_{ar})$	0.77	1.12
收到基氮/%	$\omega(N_{ar})$	7.80	0.02
全硫/%	$\omega(S_{t,ar})$	2.67	0.28
收到基低位发热量/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	$Q_{net,ar}$	18.27	25.51
哈氏可磨性指数	HGI	60	49
煤灰软化温度/℃	ST	1 450	1 100

表 3 兰炭灰分分析

Tab. 3 Semi coke ash content analysis

项目	检测值	%
$\omega(S_{t,ar})$	0.57	
$\omega(CaO)$	27.15	
$\omega(MgO)$	0.63	
$\omega(Fe_2O_3)$	16.60	
$\omega(Na_2O)$	2.52	
$\omega(K_2O)$	0.28	
$\omega(SiO_2)$	22.30	
$\omega(Al_2O_3)$	13.20	
$\omega(TiO_2)$	0.71	
$\omega(MnO_2)$	0.62	
$\omega(SO_3)$	14.90	

### 3 兰炭掺烧试验研究

#### 3.1 磨煤机适应性调整

由于兰炭 HGI 较低,为控制兰炭煤粉细度、保证兰炭煤粉气流着火及时和燃尽,需将磨煤机动态分离器转速提高,但分离器转速的提高会增加磨煤机阻力和电流,单台磨煤机出力平均降低 15%~20%,综合考虑磨煤机出力及煤粉细度  $R_{90}$  的变化,将兰炭磨煤机动态分离器转速由原来 85 r/min 提高至 105 r/min,控制兰炭磨煤粉细度在 10%~15%。#21, #23, #24 磨煤机动态分离器转速与煤粉细度变化如图 2 所示。

#### 3.2 掺烧方式及位置的确定

由于兰炭 HGI 较低,如采用混煤炉内掺烧方式<sup>[8]</sup>,则混煤的煤粉细度将难以保证,混煤的煤粉细度偏向于兰炭特性,混煤的煤粉细度偏大,不利于混煤的着火和燃尽。根据数值模拟试验结果,结合锅炉实际运行状况,兰炭掺烧采用分磨制粉炉内掺烧方式。

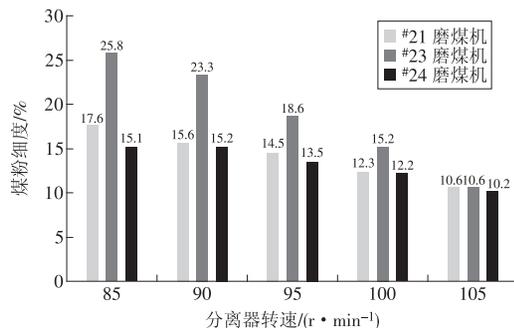


图 2 #21, #23, #24 磨煤机动态分离器转速与煤粉细度对比

Fig. 2 Comparison of dynamic separator rotating speed and pulverized coal fineness between #21, #23 and #24 pulverizers

为了达到兰炭掺烧试验要求,对于兰炭掺烧质量分数为 45% 以上时的不同兰炭燃烧器配置情况进行数值模拟试验。本锅炉共 6 层燃烧器,自下而上分别称为 A, B, C, D, E, F 层。基于锅炉安全稳定运行的考虑, B 层燃烧器需喷入烟煤稳定锅炉燃烧,则兰炭可从 A, C 层, A, D 层, A, E 层, C, D 层, C, E 层, D, E 层均匀喷入炉膛,其余层燃烧器均匀喷入烟煤。通过对不同兰炭掺烧位置进行数值模拟试验,数值模拟结果见表 4。

表 4 不同兰炭掺烧位置下炉膛出口参数

Tab. 4 Parameters at furnace outlet with semi coke added from different positions

掺烧位置	炉膛出口温度/℃	NO <sub>x</sub> 质量浓度 (6% O <sub>2</sub> )/(mg·m <sup>-3</sup> )	飞灰中碳的质量分数/%	燃烧效率/%
A, C 层	1 092.5	459.42	3.27	97.94
A, D 层	1 093.1	431.44	3.59	98.05
A, E 层	1 096.4	471.66	4.93	97.86
C, D 层	1 100.9	433.53	3.63	98.74
C, E 层	1 100.1	460.72	5.19	97.68
D, E 层	1 101.5	445.96	5.23	97.73

由表 4 可见,当兰炭掺烧位置改变时,炉膛出口温度变化幅度不大,当最上层燃烧器用于燃烧兰炭时,炉膛出口温度略有提高。对比 A, E 层, C, E 层, D, E 层 3 种工况与其他工况,可以发现,当兰炭从 E 层喷口喷入时,NO<sub>x</sub> 排放质量浓度明显增加,最高为 471.66 mg/m<sup>3</sup>。兰炭掺烧位置的上移会使得炉膛出口飞灰中碳的质量分数增加,但燃尽率呈现出相对增加的趋势,炉膛出口 NO<sub>x</sub> 质量浓度也随之增加。兰炭从 C, D 层喷入,由于此区域内温度较高,且兰炭在炉膛中停留的时间相对较长,使得兰炭燃料的燃尽率最高。

综合考虑兰炭燃烧性能和 NO<sub>x</sub> 排放性能,确定兰炭从 A, C, D 层燃烧器喷入时的燃尽情况与生成的 NO<sub>x</sub> 的质量浓度均相对较理想。因此,确定 A, C,

D层燃烧器分别对应的#21, #23, #24磨煤机单独掺烧兰炭煤种,其他磨煤机掺配烟煤。

### 3.3 不同负荷下大比例掺烧兰炭对锅炉性能的影响

#### 3.3.1 掺烧兰炭对锅炉汽水系统的影响

选取机组负荷 450, 550, 660 MW 3 个工况, A, C, D 磨煤机掺烧兰炭的质量分数为 50%, 对比掺烧前后锅炉汽水系统的影响, 在 3 个不同工况下, 锅炉过热器减温水流量略有升高, 再热器减温水流量基本未变, 相同负荷下锅炉总煤量下降约 25 t/h 左右, 锅炉排烟温度升高, 主要原因是兰炭热值高, 挥发分低, 火焰中心升高, 中间点过热度升高, 其他汽水系统各参数正常, 未出现明显异常变化, 锅炉未出现明显结渣情况。具体试验数据见表 5。

#### 3.3.2 掺烧兰炭对锅炉 NO<sub>x</sub> 排放的影响

由表 5 可见, 在 660, 450 MW 负荷时, 掺烧质量分数为 50% 的兰炭前后锅炉 NO<sub>x</sub> 的质量浓度分别为 258.20, 262.65 mg/m<sup>3</sup>, 略有升高; 在 550 MW 负荷时, NO<sub>x</sub> 质量浓度为 208.3 mg/m<sup>3</sup>, 略有下降但变化幅度不大。锅炉 NO<sub>x</sub> 质量浓度变化的主要原因为高负荷时炉膛温度高, 锅炉热型 NO<sub>x</sub> 质量浓度增加; 低负荷时锅炉运行氧气的体积分数增高, 锅炉燃料型 NO<sub>x</sub> 质量浓度增加。对锅炉整体 NO<sub>x</sub> 质量浓度来说, 增加幅度最大为 18.42%, 具体试验数据见表 6。

#### 3.3.3 掺烧兰炭对锅炉 SO<sub>2</sub> 排放的影响

选取机组负荷 450, 550, 660 MW 3 个工况, A, C, D 磨煤机掺烧兰炭的质量分数为 50%, 对比掺烧前后锅炉 SO<sub>2</sub> 质量浓度, 在 3 个不同负荷时 SO<sub>2</sub> 质量浓度分别为 3 812.5, 2 700.4, 3 842.5 mg/m<sup>3</sup>, 锅炉 SO<sub>2</sub> 质量浓度呈下降趋势, 尤其在中高负荷段锅炉 SO<sub>2</sub> 质量浓度最大下降幅度达 40.65%, 锅炉 SO<sub>2</sub> 质量浓度下降的主要原因为兰炭收到基硫分只有 0.28%, 锅炉入炉煤整体硫分降低, 烟气脱硫 (FGD) 系统的 SO<sub>2</sub> 排放质量浓度下降, 有利于降低环保排放总量。具体试验数据见表 7。

#### 3.3.4 掺烧兰炭对锅炉效率及燃烧效率的影响

同样选取机组负荷 450, 550, 660 MW 3 个工况, A, C, D 磨煤机掺烧兰炭的质量分数为 50%, 对比兰炭掺烧前后锅炉飞灰中碳的质量分数、排烟温度、锅炉效率及锅炉燃烧效率的变化情况。在 3 个不同负荷时, 锅炉飞灰中碳的质量分数、排烟温度呈升高趋势, 锅炉效率呈下降趋势, 主要原因为兰炭挥发分低, 燃尽时间增加, 兰炭煤粉在炉内停留时间短, 造成炉膛火焰中心升高, 炉膛出口温度升高, 锅炉排烟温度和飞灰及炉渣中碳的质量分数升高, 锅炉效率有所下降, 影响机组的煤耗升高<sup>[9-15]</sup>。在 550 MW 和 450 MW 时, 尽管锅炉效率分别下降 0.82% 和 0.23%, 但燃烧效率升高 0.72% 和 0.56%, 主要

表 5 不同负荷下掺烧兰炭后锅炉汽水系统参数对比

Tab. 5 Parameters of the boiler's steam and water system taking semi coke co-combustion under different loads

项目	450 MW 负荷		550 MW 负荷		660 MW 负荷	
	纯烟煤	掺烧 50% 兰炭	纯烟煤	掺烧 50% 兰炭	纯烟煤	掺烧 50% 兰炭
主蒸汽质量流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1 280.1	1 278.2	1 591.6	1 586.8	1 999.1	1 984.8
主蒸汽压力/MPa	20.30	20.30	22.81	22.80	25.10	25.03
主蒸汽温度/°C	556.50	557.20	553.50	554.70	552.50	553.32
给水质量流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1 271.2	1 268.2	1 561.8	1 562.6	1 910.2	1 905.7
给水压力/MPa	22.50	22.48	26.21	26.10	29.31	29.23
给水温度/°C	250.20	250.40	263.10	262.03	274.60	273.50
中间点过热度/°C	27.50	25.30	29.60	32.80	40.00	42.80
总煤量/(t·h <sup>-1</sup> )	207.8	189.7	256.2	223.1	310.2	283.4
过热器减温水质量流量/(t·h <sup>-1</sup> )	107.6	105.2	116.0	123.8	133.6	152.3
再热器减温水质量流量/(t·h <sup>-1</sup> )	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	0.9
空预器进口烟温/°C	328.50	339.90	345.50	357.70	361.60	370.70
排烟烟温/°C	129.50	135.40	135.40	139.60	143.70	148.50

表 6 不同负荷下兰炭掺烧前后锅炉 NO<sub>x</sub> 生成量对比

Tab. 6 Comparison of NO<sub>x</sub> emission from the boiler before and after semi coke co-combustion under different loads

项目	660 MW 负荷		550 MW 负荷		450 MW 负荷	
	纯烟煤	掺烧 50% 兰炭	纯烟煤	掺烧 50% 兰炭	纯烟煤	掺烧 50% 兰炭
NO <sub>x</sub> 质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	230.70	258.20	215.15	208.30	221.80	262.65
NO <sub>x</sub> 质量浓度变化/%		↑ 11.92		↓ 3.18		↑ 18.42

原因为中低负荷段锅炉一次风压降低,兰炭煤粉细度下降控制在 10% 左右,煤粉均匀性达到 1.35,整体锅炉煤粉燃烧效率均值升高到 99.09%。具体试验数据见表 8。

表 7 不同负荷下兰炭掺烧前后锅炉 SO<sub>2</sub> 质量浓度对比Tab. 7 Comparison of SO<sub>2</sub> emission from the boiler before and after semi coke co-combustion under different loads

项目	660 MW 负荷		550 MW 负荷		450 MW 负荷	
	纯烟煤	掺烧 50% 兰炭	纯烟煤	掺烧 50% 兰炭	纯烟煤	掺烧 50% 兰炭
FGD 系统入口 SO <sub>2</sub> 质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	6 136.00	3 842.49	4 550.00	2 700.38	4 673.00	3 812.53
FGD 系统入口 SO <sub>2</sub> 质量浓度变化/%		↓ 37.38		↑ 40.65		↓ 18.41

表 8 不同负荷下兰炭掺烧前后锅炉效率及燃烧效率对比

Tab. 8 Comparison of boiler efficiency and combustion efficiency before and after semi coke co-combustion under different loads

项目	660 MW		550 MW		450 MW	
	纯烟煤	掺烧 50% 兰炭	纯烟煤	掺烧 50% 兰炭	纯烟煤	掺烧 50% 兰炭
飞灰可燃物质量分数/%	1.75	3.33	2.58	2.72	2.10	2.30
飞灰中碳的质量分数变化/%		↑ 1.59		↑ 0.14		↑ 0.21
炉渣可燃物质量分数/%	0.00	0.60	0.48	0.60	0.49	0.50
空气预热器出口烟气温度/°C	131.70	135.70	127.90	130.60	122.30	127.50
固体未完全燃烧热损失/%	1.06	1.09	1.61	0.89	1.31	0.75
化学未完全燃烧热损失/%	0	0	0	0	0	0
锅炉效率/%	93.29	92.80	93.20	92.44	92.57	92.36
锅炉效率变化/%		↓ 0.53		↓ 0.82		↓ 0.23
锅炉燃烧效率/%	98.94	98.91	98.39	99.11	98.69	99.25
锅炉燃烧效率变化/%		↓ 0.03		↑ 0.72		↑ 0.56

#### 4 结束语

本文在充分掌握兰炭燃料特性的基础上,在 660 MW 超临界锅炉上开展了大比例掺烧兰炭试验,实现了质量分数为 50% 的兰炭掺烧,NO<sub>x</sub> 原始排放质量浓度达 258 mg/m<sup>3</sup>,锅炉燃烧效率达 98.91%。同时,通过试验得出兰炭燃料与所配中速直吹式制粉系统烟煤锅炉的适应性,掌握了烟煤锅炉掺烧兰炭燃料的关键技术,提出兰炭掺烧适宜的燃烧方式、锅炉调整方式及原则,主要结论如下。

(1) 电站煤粉锅炉大比例掺烧燃用兰炭在实践中是可行的,以本机组锅炉为例,可以实现安全稳定掺烧质量分数为 50% 的兰炭。

(2) 电站锅炉燃用兰炭具有炉内结渣轻,大幅度降低烟气 SO<sub>2</sub> 质量分数的特点,对高硫高热值煤具有较好的替代优势。

(3) 对于兰炭造成磨煤机出力降低的问题,可以采取加强设备维护水平或技术改造,提高磨煤机出力。

(4) 在综合考虑锅炉燃烧稳定性和经济性方面,兰炭掺烧采用分磨制粉炉内掺烧方式,分层燃烧保持燃烧稳定性;同时,可通过优化锅炉燃烧配风方式、调整风煤比,提高兰炭掺烧的经济性。

#### 参考文献:

- [1] 兰炭产品技术条件:GB/T 25211—2010[S].
- [2] JAYARAMAN K, GÖKALP I, JEYAKUMAR S. Estimation of synergetic effects of CO<sub>2</sub> in high ash coal - char steam gasification [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 991-998.
- [3] 榆林市兰炭产业发展调研组. 榆林市兰炭产业发展调研报告[J]. 中国经贸导刊, 2010(18): 20-23.
- [4] 发电煤粉锅炉用煤:GB/T 7562—2018[S].
- [5] 大容量煤粉燃烧锅炉炉膛选型导则:DL/T 831—2015[S].
- [6] 李晓伟, 赵红伟, 王志超, 等. 兰炭与典型煤种掺烧特性试验研究[J]. 煤质技术, 2015(6): 56-59.  
LI Xiaowei, ZHAO Hongwei, WANG Zhichao, et al. Experimental research on co-combustion of blue-coke and typical coal[J]. Coal Quality Technology, 2015(6): 56-59.
- [7] 杨忠灿, 王志超, 李炎, 等. 电站煤粉锅炉掺烧兰炭试验研究[J]. 锅炉技术, 2017, 48(3): 31-36.  
YANG Zhongcan, WANG Zhichao, LI Yan, et al. Experimental research on pulverized coal power station blending with semi-coke [J]. Boiler Technology, 2017, 48(3): 31-36.
- [8] 段学农, 朱光明, 姚斌, 等. 混煤可磨特性与掺烧方式试验研究[J]. 热能动力工程, 2010, 25(4): 1-3.  
DUAN Xuenong, ZHU Guangming, YAO Bin, et al.

Experimental study of the grindability and mixed - diluted combustion mode of a blended coal [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2010, 25 (4) : 1-3.

[9] 辛收良. 兰炭掺烧技术的研究与应用[J]. 化肥设计, 2013, 51(1):53-55.  
XIN Shouliang. Research and application for combustion technology mixing with blue carbon [J]. Chemical Fertilizer Design, 2013, 51(1):53-55.

[10] 李瑶, 徐婕, 王奕晨, 等. 半焦成型技术用于民用燃料的可行性分析[J]. 华电技术, 2020, 42(7):57-62.  
LI Yao, XU Jie, WANG Yichen, et al. Feasibility analysis on applying semi-coke molding technology in civil fuels [J]. Hua dian Technology, 2020, 42(7):57-62.

[11] 王志超, 王莹燕, 李彦军, 等. 兰炭燃烧特性及其在 660MW 机组上的大比例掺烧试验研究[J]. 华电技术, 2020, 42(7):35-41.  
WANG Zhichao, WANG Yingyan, LI Yanjun, et al. Combustion characteristics of semi - coke and its large - proportion co - combustion experimental research in a 660 MW unit [J]. Huadian Technology, 2020, 42(7):35-41.

[12] 戴若薇, 赵瑞东, 秦建光, 等. 热解半焦与褐煤掺烧及气体污染物排放特性 TG-FTIR 研究[J]. 华电技术, 2020, 42(7):28-34.  
DAI Ruowei, ZHAO Ruidong, QIN Jianguang, et al. Study on co - combustion and gaseous pollutants emission characteristics of pyrolysis semi-coke and lignite by TG-FTIR [J]. Huadian Technology, 2020, 42(7):28-34.

[13] 于强, 王明昊, 关靖宇, 等. 半焦和烟煤混合燃料挥发分释放和氮转化特性[J]. 华电技术, 2020, 42(10):95-98.  
YU Qiang, WANG Minghao, GUAN Jingyu, et al. Devolatilization and nitrogen conversion characteristics of the mixture of semi-coke and bituminous coal [J]. Huadian Technology, 2020, 42(10):95-98.

[14] 刘忠轩, 宁新宇, 王亚顺, 等. 电站锅炉褐煤掺烧现状及其影响研究分析[J]. 华电技术, 2019, 41(1):77-79.  
LIU Zhongxuan, NING Xinyu, WANG Yashun, et al. Research and analysis on boilers status quo of lignite mixed burning and its effect [J]. Huadian Technology, 2019, 41(1):77-79.

[15] 李明玉, 申新峰, 乔永生, 等. 630 MW 机组贫煤锅炉掺烧神华煤应用简析[J]. 华电技术, 2018, 40(6):28-31, 40.  
LI Mingyu, SHEN Xinfeng, QIAO Yongsheng, et al. Brief introduction of Shenhua coal's mix burning by 630 MW lean coal boiler [J]. Huadian Technology, 2018, 40(6):28-31, 40.

(本文责编:张帆)

作者简介:

赵晓鹏(1973—),男,宁夏青铜峡人,高级工程师,从事火力发电厂技术管理方面的工作(E-mail:chnazxp@163.com)。

\*\*\*\*\*

广告索引

郑州科润机电工程有限公司 ..... (后插 1)	华电通用轻型燃机设备有限公司 ..... (后插 9)
华电水务科技股份有限公司(跨版) ..... 后插 2,3)	郑州科源耐磨防腐工程有限公司(跨版) ..... (后插 10,11)
华电环保系统工程有限公司(跨版) ..... (后插 4,5)	华电重工股份有限公司(跨版) ..... (后插 12,13)
中国华电科工集团有限公司新能源技术开发公司 ..... (后插 6)	环保公益广告 ..... (后插 14)
国家能源生物燃气高效制备及综合利用技术研发(实验)中心 ..... (后插 7)	华电度度关爱公益广告 ..... 后插 15)
华电分布式能源工程技术有限公司 ..... (后插 8)	华电技术 ..... (后插 16)
	华电郑州机械设计研究院有限公司 ..... (封三)
	中国华电科工集团有限公司 ..... (封底)