

360 MW 机组贫煤锅炉燃用高挥发分煤种的研究与工程应用

曹嘉乐¹, 欧 妙², 高 振², 孙路石¹

(1. 华中科技大学 煤燃烧与低碳利用全国重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 广西投资集团来宾发电有限公司, 广西 来宾 546138)

摘 要:为适应某电厂 360 MW 机组贫煤锅炉安全高效燃用高挥发分煤种的要求, 本文在煤质分析和热重实验的基础上分析了烟煤、褐煤及其混合煤种的着火、燃尽和结渣等燃烧特性, 通过对机组制粉、燃烧、风烟等主要系统设备燃料适应性的研究, 提出了“钢球磨机炉烟干燥-乏气/热风复合送粉技术”改造方案。热态试验结果表明: 技术改造后机组系统设备可根据燃用煤质实现灵活切换, 显著提升了机组的燃料适应性; 在全烧烟煤及烟煤掺烧褐煤的不同负荷工况下, 机组各系统运行安全稳定, 各运行参数均满足设计要求, 锅炉热效率达到 92% 以上, 炉膛出口 NO_x 质量浓度大幅下降, 实现了机组 40% 负荷下稳燃要求, 技术改造在安全、经济及环保方面取得了显著的效果。

关 键 词: 贫煤锅炉; 高挥发性煤种; 燃烧特性; 煤种适应性; 锅炉热效率

中图分类号: TK223; TK16

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.12.011

[引用本文格式] 曹嘉乐, 欧 妙, 高 振, 等. 360 MW 机组贫煤锅炉燃用高挥发分煤种的研究与工程应用[J]. 热能动力工程, 2024, 39(12): 95-103. CAO Jiale, OU Miao, GAO Zhen, et al. Research and engineering application of burning bituminous coals with high volatile content in a 360 MW lean coal-fired boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(12): 95-103.

Research and Engineering Application of Burning Bituminous Coals with High Volatile Content in a 360 MW Lean Coal-fired Boiler

CAO Jiale¹, OU Miao², GAO Zhen², SUN Lushi¹

(1. State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074;

2. Guangxi Investment Group Laibin Power Generation Co., Ltd., Laibin, China, Post Code: 546138)

Abstract: In order to meet the requirements of safe and efficient combustion of high volatile coal in a 360 MW unit lean coal-fired boiler, the ignition, burnout and slagging characteristics of the bituminous coal, lignite and its mixed coal types were studied on the basis of coal quality analysis and thermogravimetric experiment. Through the research on the fuel adaptabilities of main systems such as coal pulverizing system, combustion system, air and flue gas system, the transformation scheme was put forward, which was conducted with a ball mill using flue gas drying, exhaust-air and hot air composite powder feeding technology. The hot-state experimental results show that the system equipment of the unit can be flexibly switched according to the coal quality after transformation, which significantly improves the fuel adaptability. All systems of the unit operate safely under different load conditions of fully burned bituminous coal and bituminous coal mixed with brown coal, and all operating parameters meet the design requirements. The thermal efficiency of the boiler is more than 92%, the NO_x mass fraction at the furnace outlet is greatly reduced, and the requirement of stable combustion under 40% load of the unit is realized. The

technical transformation has achieved remarkable effect on safety, economic and environmental protection.

Key words: lean coal-fired boiler, coal sorts with high volatile content, combustion characteristics, adaptability of coal sorts, boiler thermal efficiency

引 言

在国家“双碳”政策背景下,提升机组运行灵活性与深度调峰能力是火电机组的必然选择^[1-4]。相比于贫煤、无烟煤等煤种,烟煤、褐煤等高挥发分煤种来源丰富且具有较好的着火与燃尽性能。研究表明,贫煤机组燃用高挥发分煤种可在一定程度上提高锅炉低负荷稳燃能力和燃烧经济性,有利于降低NO_x排放量^[5-10]。

沈跃良等人^[11]通过加装一次冷风旁路管和运行调整措施,实现了热风送粉系统贫煤锅炉改烧中等挥发分、不易结渣烟煤的效果。李德波等人^[12]采用不同煤种分磨掺烧、优化燃烧器配风及煤粉细度调整等技术,拓宽了锅炉及制粉系统对实际煤种的适用能力。张云等人^[13]通过实施冷、热炉烟联合制粉和一次风降温技术,有效降低了中储式热风送粉系统在燃用烟煤过程中制粉系统爆炸、一次风送粉管道烧损的风险。但由于在煤质特性、制粉系统、燃烧系统、炉膛热负荷参数等方面存在较大差异,贫煤锅炉在燃用高挥发分煤种过程中普遍存在炉膛火焰中心升高、受热面结焦、燃烧器烧损等问题以及制粉系统出力不足、送粉管道自燃等安全风险^[14-16]。因此,深入开展贫煤锅炉燃用高挥发分煤种的可行性研究,提出切实可行的技术改造方案,对于提高机组燃料适应性、运行安全性与经济性具有重要的现实意义。

本文以某 360 MW 贫煤机组为对象,开展烟煤、褐煤及其混合煤种的燃烧特性分析,深入研究机组原有制粉、燃烧、安防等系统的煤种适应性,提出“钢球磨煤机炉烟干燥-乏气/热风复合送粉技术”改造方案,实现贫煤锅炉全烧高挥发分烟煤及大比例掺烧褐煤,并保证改造后系统仍具备燃用贫煤的能力,通过现场试验分析技术改造对锅炉出力、锅炉热效率和 NO_x 排放的影响。

1 研究对象

某 360 MW 机组锅炉为亚临界控制循环、一次中间再热、露天 Π 型布置,型号为 HG-1069/18.2-YM1。锅炉采用四角切圆燃烧方式,一、二次风燃烧器间隔布置,主燃区上部布置分离式燃尽风。锅炉原始设计煤种为云南金佳贫煤(校核煤种 I)与贵州盘江洗混煤(校核煤种 II)按 4:6 比例混合的混煤,煤种特性分析结果如表 1 所示。制粉系统采用钢球磨煤机中间仓储式热风送粉方式,以高温炉烟、低温炉烟和热空气作为干燥剂进入磨煤机。锅炉主要设计性能参数如表 2 所示。

为拓宽机组煤种适应范围,提高锅炉燃烧经济性和环保排放能力,选择北方烟煤为设计煤种,北方烟煤与印尼褐煤掺配的混煤为校核煤种,通过综合技术改造实现贫煤机组全烧高挥发分烟煤及大比例掺烧烟煤/褐煤的改造目标。

表 1 锅炉原始设计煤种分析结果
Tab. 1 Analysis result of original designed coal sort of the boiler

煤种	元素分析					工业分析			发热量 $Q_{\text{net,ar}}/$
	$C_{\text{ar}}/\%$	$H_{\text{ar}}/\%$	$O_{\text{ar}}/\%$	$N_{\text{ar}}/\%$	$S_{\text{ar}}/\%$	$M_1/\%$	$V_{\text{daf}}/\%$	$A_{\text{ar}}/\%$	$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
原始设计煤种	56.15	2.98	3.25	0.93	0.99	9.44	24.31	26.27	21 616
校核煤种 I	59.34	2.76	2.40	1.12	1.20	9.18	12.13	24.00	22 600
校核煤种 II	54.00	3.13	3.81	0.81	0.85	9.61	32.43	27.79	20 960

表 2 锅炉设计性能参数

Tab.2 Designed performance parameters of the boiler

参 数	设计工况 (MCR)	额定工况 (ECR)
过热蒸汽流量/ $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$	1 069	1 006
过热器出口压力/MPa	18.30	18.23
过热蒸汽出口温度/ $^{\circ}\text{C}$	543	542
再热蒸汽流量/ $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$	962	907
再热蒸汽进口压力/MPa	4.14	3.90
再热蒸汽出口压力/MPa	3.90	3.68
再热蒸汽进口温度/ $^{\circ}\text{C}$	331	327
再热蒸汽出口温度/ $^{\circ}\text{C}$	541	541
给水温度/ $^{\circ}\text{C}$	254	250

2 煤种特性分析

2.1 煤质分析

北方烟煤 (YM)、印尼褐煤 (YN) 及其按 65:35 掺配的混煤 (HM) 样品的煤质分析结果如表 3 所示。

由马弗炉制得不同煤种及混煤的灰样,采用 X 射线荧光光谱仪和灰熔点分析仪分析不同样品的灰成分和灰熔融特征温度。本文共定义 4 个灰熔融特征温度,分别为变形温度 (DT)、软化温度 (ST)、半球温度 (HT) 和流动温度 (FT),分析结果如表 4 所示。

表 3 煤质分析结果

Tab.3 Coal quality analysis results

样品	元素分析/%					工业分析/%			发热量 $Q_{\text{net,ar}}/$
	C_{ar}	H_{ar}	N_{ar}	S_{ar}	O_{ar}	M_{t}	V_{daf}	A_{ar}	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
YM	55.5	3.17	0.70	0.65	8.05	13.30	37.93	18.63	22 140
YN	47.5	3.64	0.65	0.11	14.30	29.60	51.50	4.20	16 990
HM	52.7	3.33	0.68	0.46	10.24	19.01	42.68	13.58	20 340

表 4 煤样的灰成分与灰熔点分析

Tab.4 Analysis of ash composition and ash melting point of coal samples

样品	酸性氧化物/%			碱性氧化物/%					灰熔融特征温度/ $^{\circ}\text{C}$			
	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	K_2O	Fe_2O_3	MgO	CaO	MnO	DT	ST	HT	FT
YM	43.93	37.61	1.38	0.60	3.49	0.43	5.94	0.10	1 300	1 440	1 450	1 490
YN	52.98	26.75	0.95	2.19	8.66	1.47	2.88	0.03	1 180	1 260	1 280	1 340
HM	46.18	35.63	1.35	1.07	4.99	0.57	5.54	0.07	1 260	1 396	1 410	1 450

利用热重实验得到煤样着火温度 t_{i} 、燃尽温度 t_{b} 、最大失重速率 $(dw/dt)_{\text{max}}$,以及最大燃烧速率对应的温度 t_{max} 等特征参数^[17-18],结果如表 5 所示。

由以上分析结果可知,本次改造煤种与原始设计煤种差异较大,北方烟煤、印尼褐煤及混煤挥发分高,磨煤机、粉仓、粉管等设备存在爆炸危险,需对锅炉制粉、送粉及燃烧系统采取有效措施,提高设备安全性^[19]。

表 5 煤样热重分析特征参数

Tab.5 Characteristic parameters of coal samples under thermogravimetric analysis

样品	$t_{\text{i}}/^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{b}}/^{\circ}\text{C}$	$(dw/dt)_{\text{max}}/$ $\% \cdot \text{min}^{-1}$	$t_{\text{max}}/^{\circ}\text{C}$
YM	466	593	15.3	540
YN	383	562	13.8	495
HM	431	593	13.4	517

2.2 燃烧特性分析

在煤质特性测试与实验的基础上,从着火稳定性、燃尽特性和结渣特性等方面进行煤种燃烧特性分析^[20-22]。

2.2.1 着火特性

着火稳定性指数 F_I 表达式为:

$$F_I = \frac{a}{t_i} + \frac{b}{t_{\max}} + c \left(\frac{dw}{dt} \right)_{\max}$$

(1)

式中: a, b, c —计算常数,不同煤种的计算常数有所不同; t_i —着火温度,℃; $t_{\max}$ —最大燃烧速率对应的温度,℃; $(dw/dt)_{\max}$ —最大失重速率,%/min。

$F_I > 5.7$ 为极易着火, $5.0 < F_I < 5.1$ 为易着火, $4.5 < F_I < 5.0$ 为中等易着火, $4.0 < F < 4.65$ 为难着火,否则为极难着火。

2.2.2 燃尽特性

燃尽特性指数 F_B 表达式为:

$$F_B = 10 / (xG + yt_{\max} + z\tau + h\tau')$$

(2)

式中: G —燃烧后期的燃烧量,mg; τ —煤燃尽时间,min; τ' —煤焦燃尽时间,min; x, y, z, h —计算常数,不同煤种的计算常数有所不同。

$F_B > 5.7$ 为极易燃尽, $4.4 < F_B < 5.7$ 为易燃尽, $3.0 < F_B < 4.4$ 为中等燃尽, $2.5 < F_B < 3.0$ 为难燃尽,否则为极难燃尽。

2.2.3 结渣特性

采用综合判别指数 R_Z 判断煤灰的结渣倾向。 $R_Z > 2$ 为高结渣, $1.5 < R_Z < 2$ 为中等结渣,否则为低结渣。

$$R_Z = 1.237R_{B/A} + 0.282R_{S/A} - 0.0023ST - 0.0189G + 5.415$$

(3)

$$R_{B/A} = \frac{M_{Fe_2O_3} + M_{CaO} + M_{MgO} + M_{Na_2O} + M_{K_2O}}{M_{SiO_2} + M_{Al_2O_3} + M_{TiO_2}}$$

(4)

$$R_{S/A} = \frac{M_{SiO_2}}{M_{Al_2O_3}}$$

(5)

$$G = \frac{M_{SiO_2}}{M_{SiO_2} + M_{Fe_2O_3} + M_{CaO} + M_{MgO}}$$

(6)

式中: $R_{B/A}$ —碱酸比; $R_{S/A}$ —硅铝比; G —硅比; ST —软化温度,℃; M —质量分数,%。

煤样燃烧特性指数如表 6 所示。由表 6 可知,掺混印尼褐煤后北方烟煤的着火稳定性指数有所增

加,但印尼褐煤在改善北方烟煤着火的同时,增加了燃料自燃的风险。3 组样品的燃尽特性均为易燃尽,通过向北方烟煤中掺混印尼褐煤可以改善样品的燃尽特性,提高燃烧效率。相比于北方烟煤,印尼褐煤的碱性氧化物含量更高,特征温度更低,导致在向北方烟煤中掺混印尼褐煤后,混煤的结渣特性更靠近于易结渣的印尼褐煤。因此,在掺混印尼褐煤时需要对炉膛内的结渣提出应对措施。

表 6 煤样燃烧特性指数

Tab.6 Combustion characteristics indexes of coal samples

煤样	着火特性		燃尽特性		结渣特性	
	F_I	特性	F_B	特性	R_Z	特性
YM	4.91	易着火	4.74	易燃尽	1.03	低结渣
YN	5.01	极易着火	5.55	易燃尽	1.80	中等结渣
HM	4.94	易着火	4.96	易燃尽	1.23	低结渣

3 设备与系统适应性分析

3.1 制粉系统

机组中间仓储式热风送粉系统以热炉烟为干燥介质,采用冷炉烟和热二次风进行调温,磨煤机入口设计温度 450~700℃,出口温度大于 100℃。为满足燃用干燥无灰基挥发分大于 37% 煤种的安全运行要求^[23],需要对制粉系统进行相应改造,将磨煤机出口温度、氧气量分别控制在 90℃ 和 12% 以下。同时利用高温炉烟保障磨煤机干燥出力,防止褐煤含水率偏高导致粉仓堵粉。针对低挥发分煤种设计,机组原有制粉系统只布置了 CO₂ 灭火管道,为提高制粉系统的防爆、防自燃和消防能力,需要采取提高防爆门面积、增加蒸汽灭火系统等技术措施。

3.2 风烟系统

锅炉热一次风温度为 332.2℃,燃用贫煤等低挥发分煤种时送粉管风粉混合物温度大于 230℃。为适应燃用高挥发分煤种的要求^[24],需对锅炉热风系统进行相应改造,引入低温、低氧介质将热一次风温度控制在 200℃ 以下,风粉混合物温度、氧气量分别降低至 160℃ 和 14% 以下。

3.3 燃烧系统

锅炉的设计炉膛容积热负荷 q_v 、断面热负荷 q_F 分别为 120.25 kW/m^3 和 5.825 MW/m^2 , 热负荷参数高于其他同类型锅炉^[25-26]。在燃用高挥发分、低灰熔点、易结焦煤种时应采取优化炉内动力场、调整卫燃带布置、优化吹灰等措施降低受热面结渣风险。燃烧系统采用炉内空气分级低氮燃烧方式,能够满足高挥发分煤粉炉内燃烧稳定性、经济性和低氮氧化物排放的要求。

锅炉受热面系统、脱硝系统和除尘系统等均能够满足燃用高挥发分煤种的要求。

4 技术改造方案及改造内容

4.1 技术方案

依据《DL/T466-2017 电站磨煤机及制粉系统选型导则》^[27] 的推荐意见,结合目前低挥发分燃煤机组锅炉改扩烧高挥发分烟煤的研究和实践^[28], 本文提出“钢球磨煤机炉烟干燥-乏气/热风复合送粉技术”方案,将高温炉烟、低温炉烟及部分空气作为干燥介质降低制粉系统温度与氧气量,采用乏气替代部分热一次风引入送粉系统降低送粉介质的温度与氧气量。在磨煤机停运时,将一次风机出口冷一次风接入热一次风箱,保证送粉介质温度满足安全要求,同时对制粉系统、燃烧系统、风烟系统进行优化改造。改造方案最大限度地利用旧制粉系统的主要设备,通过送粉方式在热风送粉和乏气/热风复合送粉之间灵活切换,保证机组适应同时燃用低挥发分贫煤和高挥发分烟煤、褐煤的需求。

在当前改造方案下对锅炉原设计煤种、北方烟煤及混煤进行制粉系统与锅炉热力计算。制粉系统热力计算结果如表 7 所示。当前改造方案通过高温炉烟、低温炉烟及热风的切换,可以同时满足低挥发分煤种与高挥发分煤种的需要。燃用北方烟煤与混煤的磨煤机出口氧气含量分别不超过 14% 和 12%。当一次风中掺入 71% 的乏气时,送粉温度可降低至 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, 此时燃用北方烟煤及混煤具有较高的安全性,而在燃用低挥发分煤种时,只需掺入 10% 的乏

气即可满足 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 送粉温度的需要。

表 7 制粉系统热力计算结果

Tab. 7 Thermodynamic calculation result of pulverizing system			
参 数	原始设计煤种	YM	HM
干燥剂初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	540	520	495
干燥剂中热风比例/%	28.4	21.2	30.7
干燥剂中高温炉烟比例/%	59.0	57.6	50
干燥剂中低温炉烟比例/%	12.6	21.2	19.3
终端干燥剂中氧气体积分数/%	14.02	13.94	11.11
乏气温度/ $^{\circ}\text{C}$	110	90	90
送粉温度/ $^{\circ}\text{C}$	300	160	160
乏气占一次风比例/%	10	71	71

锅炉热力计算结果如表 8 所示。与原始设计煤种相比,燃用高挥发分煤种可以提升锅炉热效率,炉膛出口烟温升高约 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 不会影响机组负荷。同时,燃用高挥发分煤种时空气过量系数减少了烟气总量,保证烟气总焓与设计煤种相当,不会引起因排烟温度升高而增加的排烟热损失。

表 8 锅炉热力计算结果

Tab. 8 Thermodynamic calculation result of the boiler			
参 数	原始设计煤种	YM	HM
燃料消耗量/ $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$	146.50	143.10	155.70
炉膛出口过量空气系数	1.25	1.20	1.20
热效率/%	92.31	93.48	93.59
炉膛出口烟气温度/ $^{\circ}\text{C}$	1 358	1 369	1 371

4.2 主要技术改造内容

4.2.1 制粉系统技术改造

为提升制粉系统安全性,新增磨煤机进出口防爆门、蒸汽灭火蒸汽管道系统。为防止和应对粗粉分离器、细粉分离器、粉仓等设备发生自燃、爆燃,对 CO_2 灭火系统进行增容改造。

4.2.2 送粉技术改造

增设乏气-热一次风联管道系统,根据转移乏气量对比不同管道直径下的乏气风速与沿程阻力,选取最佳布置方式,并对相应风箱、管路进行防

积粉改造。为提高风粉温度调节能力,对冷一次风旁路进行扩容改造。

4.2.3 燃烧系统技术改造

将原有一次风燃烧器更换为低 NO_x 燃烧器,并进行同轴偏转二次风(CFS)技术改造,强化炉内水平空气分级燃烧以降低 NO_x 排放量,提高水冷壁面氧化性以降低受热面结焦的风险。采取燃尽风(OFA)喷口反切的布置方式,保证炉内动力场有效调节手段,降低在低负荷工况下出现烟温偏差的风险。CFS 喷口与 OFA 喷口结构示意图如图 1 和图 2 所示。

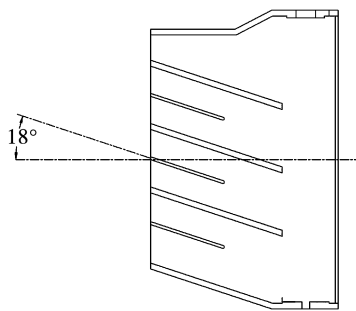


图 1 CFS 喷口结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of nozzle structure of CFS

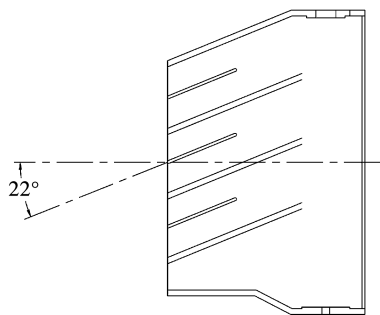


图 2 OFA 喷口结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of nozzle structure of OFA

5 改造效果分析

5.1 空气动力场试验

技术改造完成后进行了冷态空气动力场试验。图 3 为空气动力场切圆测量结果。由图 3 可知,切圆基本处于炉膛中心且大小适中。在各层一次风喷口撒放纸屑发现,各层一次风喷口气流情况良好,未出现一次风气流冲刷水冷壁现象。

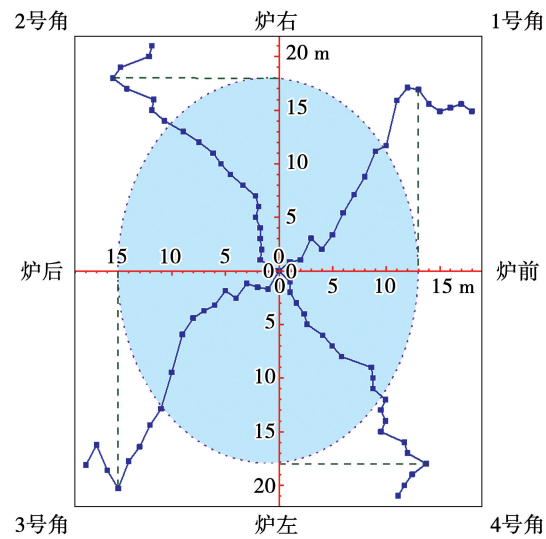


图 3 空气动力场切圆测量结果

Fig.3 Measuring result of tangential circle
in aerodynamic field

5.2 热态性能试验

在空气动力场试验结束后,开展不同煤种不同负荷工况下的热态性能试验,试验工况与结果如表 9 所示。其中,工况 1 燃用以 2:4:4 比例混合的无烟煤、贫煤与烟煤低挥发分煤种,收到基灰分为 24.35%,干燥无灰基挥发分为 16.4%。对工况 1 进行配风调整试验发现,采用正宝塔配风、炉膛出口氧气量设为 2.0% 时锅炉热效率最高,同时对炉膛出口 NO_x 质量浓度影响不大。工况 2 ~ 工况 4 燃用 100% 烟煤,工况 5 ~ 工况 8 燃用高挥发分混煤(65% 烟煤 + 35% 褐煤),其中工况 8 为 40% 负荷稳燃试验。

现场试验期间,根据燃用煤种切换不同运行工况,在燃用低挥发分煤种时切换至贫煤工况。现场试验结果表明,技术改造效果良好,锅炉煤种适应性大幅提升,现有设备可以满足贫煤与烟煤工况的灵活切换,实现了贫煤锅炉全烧烟煤并掺烧褐煤的改造目标,褐煤掺烧比例可达到 35% 以上。燃用高挥发分煤种对锅炉出力影响不大,不同负荷下主、再热蒸汽压力能够维持稳定,不同工况下的主蒸汽温度相差不超过 2℃,且均满足锅炉设计要求。

表 9 热态性能试验结果

Tab.9 Experimental results of thermal performance

参 数	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8
机组负荷/%	100	100	75	60	100	75	60	40
主蒸汽温度/℃	538	540	539	538	538	540	540	533
主蒸汽压力/MPa	17.60	17.90	12.60	12.20	17.20	13.40	11.60	9.50
再热蒸汽温度/℃	512	534	534	531	526	540	537	505
再热蒸汽压力/MPa	3.50	3.30	2.60	2.50	3.10	2.70	2.50	1.46
排烟温度/℃	145.10	137.80	130.30	124.50	133.70	130.70	129.60	137
飞灰可燃物/%	5.44	2.96	1.40	1.60	1.74	2.61	2.71	—
锅炉热效率/%	91.72	92.10	93.59	92.01	92.72	92.40	92.44	—
左侧 NO _x 质量浓度/mg·m ⁻³	622	400	376	415	359	343	366	382
右侧 NO _x 质量浓度/mg·m ⁻³	591	344	340	397	354	334	356	354

注：“—”表示未测量。

低挥发分煤种的灰分含量较高,受燃尽阶段灰分对焦炭燃烧的抑制作用,锅炉飞灰可燃物为 5.44%,燃用高挥发分煤种后飞灰可燃物均小于 3%,锅炉效率有所提升且均大于 92%。在低负荷下进入炉内的燃料量减少,炉内实际热负荷降低导致燃烧质量不佳,在 60% 负荷时,YM 与 HM 两个煤种下的飞灰含碳量较 75% 负荷时分别增加了 0.2% 和 0.1%。

同时,燃用高挥发分煤种时炉膛内火焰温度低、氧气量少,热力型 NO_x 和燃料型 NO_x 的生成量减少,与工况 1 相比,炉膛出口 NO_x 排放质量浓度由 600 mg/m³ 减少至 400 mg/m³ 以下。

由工况 8 可以看出,40% 负荷时锅炉可以不投油稳定燃烧,炉膛压力稳定,左、右两侧 NO_x 排放质量浓度低于 400 mg/m³,环保参数良好,机组负荷仍有下调空间,可以满足电网短时间内深度调峰要求。

在中间仓储式制粉系统中,磨煤机始终保持额定功率运行,对煤粉细度进行测量,结果显示煤粉细度 R75 最大为 22.7%,最小为 12.9%,平均为 16.88%,煤粉均匀性系数为 1.15。

现场试验期间及后期运行过程中未发现系统安全隐患,制粉系统未出现超温现象,一次风箱与乏气管内未发生积粉,煤粉着火距离在设计范围内,不烧损燃烧器喷口。观察各燃烧器及附近受热面,未发现明显结渣现象,锅炉稳定燃烧,炉膛负压未出现明

显波动,除渣装置正常运行。改造后运行一年多以来未因为结渣出现事故。

6 结 论

(1) 本文提出“钢球磨煤机炉烟干燥-乏气/热风复合送粉技术”,根据锅炉燃用煤质,利用部分乏气与热一次风灵活调整送粉温度与氧气量,同时配合燃烧器运行,有效防止燃烧器烧损,具有低成本、高收益优势,对于国内同类型锅炉具有良好的实用性,改造方案可以实现贫煤锅炉燃用煤种在贫煤与烟煤之间的灵活切换,掺烧高挥发分印尼褐煤比例高于 35%,不同煤种下锅炉燃烧稳定。

(2) 贫煤锅炉改烧高挥发分煤种后,锅炉出力稳定,主再热蒸汽满足设计要求,不同工况下的锅炉效率均有所提高,掺烧印尼褐煤不影响锅炉燃烧,不同负荷下的热效率为 92.01%~93.59%。锅炉受热面未出现明显结渣,炉内 NO_x 生成量减少,SCR 系统运行良好,除个别低负荷工况外,炉膛出口 NO_x 排放质量浓度均小于 400 mg/m³,可大幅降低企业燃煤采购成本和脱硝成本。

(3) 在 65% 烟煤 + 35% 印尼褐煤配煤方式下进行不投油最低稳燃试验,发现在 40% 负荷下锅炉具备无助燃稳定燃烧能力,锅炉出力稳定,低负荷下未出现 NO_x 排放超标现象,燃用高挥发分煤种后机组深度调峰空间充足。

参考文献:

[1] 苏 鹏,王文君,杨 光,等.提升火电机组灵活性改造技术方案研究[J]. 中国电力,2018,51(5):87-94.
SU Peng, WANG Wenjun, YANG Guang, et al. Research on the technology to improve the flexibility of thermal power plants[J]. Electric Power, 2018, 51(5): 87-94.

[2] 李 晖,刘 栋,姚丹阳.面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6259.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6259.

[3] 刘 云.我国能源电力发展及火电机组灵活性改造综述[J]. 洁净煤技术,2023,29(S2):319-327.
LIU Yun. Overview of energy and power system development and the flexibility retrofit of thermal power units in China[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(S2): 319-327.

[4] 董 洁,乔建强.“双碳”目标下先进煤炭清洁利用发电技术研究综述[J]. 中国电力,2022,55(8):202-212.
DONG Jie, QIAO Jianqiang. A review on advanced clean coal power generation technology under "carbon peaking and carbon neutrality" goal[J]. Electric Power, 2022, 55(8): 202-212.

[5] 刘建浩,李战国,马乐乐,等.贫煤锅炉灵活性调峰优化调整研究[J]. 热能动力工程,2022,37(1):124-131.
LIU Jianhao, LI Zhanguo, MA Lele, et al. Study on optimization adjustment of flexible peak regulation of lean coal boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(1): 124-131.

[6] 鲁鹏飞,薛 宁.超临界锅炉超低负荷调峰运行稳燃改造方案研究[J]. 热力发电,2022,51(1):87-92.
LU Pengfei, XUE Ning. Flame stability upgrading scheme of supercritical boilers for ultra low load peak regulation operation[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 87-92.

[7] 张广才,周 科,柳宏刚,等.某超临界 600 MW 机组直流锅炉深度调峰实践[J]. 热力发电,2018,47(5):83-88.
ZHANG Guangcai, ZHOU Ke, LIU Honggang, et al. Practice of deep peak load regulation for a 600 MW supercritical concurrent boiler[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 83-88.

[8] LIU X, ZHANG J Y, TAN H Z, et al. Numerical and experimental study on co-firing of low volatile coal in a 330 MW tangentially fired boiler [J]. Journal of the Energy Institute, 2021, 96: 242-250.

[9] 王小龙,张飞龙,王 里,等.330 MW 机组燃用贫煤锅炉配煤掺烧数值模拟研究[J]. 热力发电,2022,51(2):112-116.
WANG Xiaolong, ZHANG Feilong, WANG Li, et al. Numerical simulation on coal blending in a 330 MW unit boiler firing lean coal[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(2): 112-116.

[10] MA L, FANG Q, YIN C, et al. A novel cornerfired boiler system of improved efficiency and coal flexibility and reduced NO_x emissions [J]. Applied Energy, 2019, 238: 453-465.

[11] 沈跃良,陈如森,李季梅,等.300 MW 机组贫煤锅炉改烧烟煤的研究和实践[J]. 南方电网技术,2009,3(B11):57-61.
SHEN Yueliang, CHEN Rusen, LI Jimei, et al. Study and actualization of burning bituminous coal in lean coalfired boiler of the 300 MW unit [J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(B11): 57-61.

[12] 李德波,狄万丰,李 鑫,等.1 045 MW 超超临界贫煤锅炉燃用高挥发分烟煤的燃烧调整研究及工程实践[J]. 热能动力工程,2016,31(1):117-123,139-140.
LI Debo, DI Wanfeng, LI Xin, et al. Study of the adjustment to the combustion in a 1 045 MW ultra-supercritical boiler burning bituminous coal with a high volatile content instead of lean coal and its engineering practice[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and power, 2016, 31(1): 117-123, 139-140.

[13] 张 云,黄 俊,田科峰.贫煤煤粉锅炉烟煤适应性改造技术优化及应用[J]. 锅炉制造,2023(4):15-17.
ZHANG Yun, HUANG Jun, TIAN Kefeng. Optimization and application of adaptability renovation technology of bituminous coal for pulverized coal boiler[J]. Boiler Manufacturing, 2023(4): 15-17.

[14] 段学农,朱光明,宾谊沅,等.湖南省电厂锅炉混煤掺烧技术应用[J]. 中国电力,2010,43(2):48-51.
DUAN Xuenong, ZHU Guangming, BIN Yiyuan, et al. Application and development of coal-blended combustion technology in boiler in Hunan power plant[J]. Electric Power, 2010, 43(2): 48-51.

[15] 李 钧,阎维平,刘亚芝.煤质变化对锅炉燃烧工况的影响[J]. 热力发电,2009,38(8):59-64.
LI Jun, YAN Weiping, LIU Yazhi. Influence of coal quality variation upon combustion performance of tangential firing boilers[J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(8): 59-64.

[16] 郑 国,龙新峰.300 MW 机组锅炉改烧烟煤改造及防结焦措施[J]. 热力发电,2015,44(11):118-123.
ZHENG Guo, LONG Xinfeng. Retrofitting of burning bituminous coal for a 300 MW unit boiler and the anti-coking countermeasures[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(11): 118-123.

[17] WU T, GONG M, LESTER E, et al. Characteristics and synergistic effects of co-firing of coal and carbonaceous wastes [J]. Fuel, 2013, 104: 194-200.

[18] 罗 睿,王智微,陈华冬,等.煤与生物质混燃动力学分析及协同效应[J]. 洁净煤技术,2023,29(S2):196-205.

LUO Rui,WANG Zhiwei,CHEN Huadong,et al. Kinetic analysis and synergistic effect of coal and biomass blending combustion [J]. Clean Coal Technology,2023,29(S2):196–205.

[19] 王春昌,王志刚. 锅炉掺烧或改烧高挥发分煤时制粉系统适应性研究[J]. 热力发电,2015,44(5):35–38.

WANG Chunchang,WANG Zhigang. Adaptability of coal pulverizing systems when high-volatile coal is burned or co-fired[J]. Thermal Power Generation,2015,44(5):35–38.

[20] 孙路石,陆继东,曾 丽,等. 大型电站锅炉煤种适应性分析实例[J]. 热能动力工程,2002,17(4):353–355,433.

SUN Lushi,LU Jidong,ZENG Li,et al. Analysis of the adaptability of large-sized power plant boilers to various kinds of coals[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2002, 17(4):353–355,433.

[21] 谢毓麟,陈春元,胡仁德. 煤特性与锅炉炉膛特性的相关性[J]. 动力工程,1992,12(1):9–15,63.

XIE Yulin, CHEN Chunyuan, HU Rende. Correlation between coal characteristics and boiler furnace features[J]. Power Engineering,1992,12(1):9–15,63.

[22] ZHU C,TU H,BAI Y,et al. Evaluation of slagging and fouling characteristics during Zhundong coal co-firing with a Si/Al dominated low rank coal[J]. Fuel,2019,254(2):115730.

[23] DL/T 5203-2022,火力发电厂煤和制粉系统防爆设计技术规范[S].

DL/T 5203-2022,Technical code for explosion prevention design of coal and pulverized coal preparation system of fossil-fired power plant[S].

[24] DL/T 5145-2012,火力发电厂制粉系统设计计算技术规范[S].

DL/T 5145-2012,Technical code for design calculation of coal pulverizing system of fossil-fired power plant[S].

[25] DL/T 831-2015,大容量煤粉燃烧锅炉炉膛选型导则[S].

DL/T 831-2015,Guide on selection of furnace characteristic parameters for large pulverized coal fired boilers[S].

[26] 姚 伟,郝 兵,刘家利,等. 配煤掺烧方式主要特点及燃煤适应性分析[J]. 中国电力,2018,51(9):20–27.

YAO Wei,HAO Bing,LIU Jiali,et al. Main characteristics of coal blending method and adaptability analysis for blended coal[J]. Electric Power,2018,51(9):20–27.

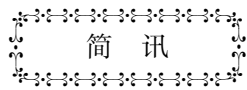
[27] DL/T 466-2017,电站磨煤机及制粉系统选型导则[S].

DL/T 466-2017,Guide on selection of pulverizers and pulverizing systems for power station[S].

[28] 杨忠灿,姚 伟. 电厂锅炉变煤种掺烧问题研究[J]. 中国电力,2010,43(11):42–45.

YANG Zhongcan,YAO Wei. Study on burning blending coals in coal-fired boilers of power plants [J]. Electric Power, 2010, 43(11):42–45.

(王治红 编辑)



Suzlon 风力机将为印度绿色钢铁项目提供电力

2024 年 10 月,印度风力机制造商苏司兰(Suzlon)集团与印度大型钢铁集团金达尔集团(Jindal Groop)旗下子公司金达尔可再生能源(Jindal Renewables Power Private Limited)签署了在印度卡纳塔克邦钢铁资源丰富的 Koppal 地区建设 400 MW 风力项目的订单。

在该项目中,Suzlon 将提供 127 台带有混合格子管塔的风力发电机,每台额定容量为 3.15 MW。所产生的电力将为恰蒂斯加尔和奥里萨当地的钢铁厂供电,推动该地区的能源脱碳。钢铁是印度的一个重要产业,2018 年该国已超过日本,成为全球第二大钢铁生产国。此次合作标志着钢铁可持续生产新时代的开始,使金达尔可再生能源子公司能够在 2047 年之前实现集团的净零排放承诺。

(孙嘉忆摘译自 [https://www. powerengineeringint. com](https://www.powerengineeringint.com))