

DOI: 10.19666/j.rlfed.202303039

基于最小综合供电成本的电站锅炉 多元燃料掺烧方法研究

张向宇^{1,2}, 何军福³, 王志超¹, 杨忠灿¹, 张喜来¹, 刘家利¹, 姚伟¹

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

2.陕西省燃煤电站锅炉环保工程技术研究中心, 陕西 西安 710054;

3.云南能投曲靖发电有限公司, 云南 曲靖 655099)

[摘要] 为解决电站锅炉掺烧煤气、褐煤、煤泥等多元燃料时的安全性和经济性问题, 提出了一种针对多元燃料掺烧的评估方法。首先结合燃料特性和机组安全运行各方面要求, 建立不同负荷下入炉燃料水分、挥发分、热值和硫分的约束条件, 然后通过掺烧试验确定最低综合供电成本, 提出不同负荷时的多元燃料最佳掺配方案, 并在一台300 MW电站锅炉上开展了掺烧试验。结果表明, 在满足入炉燃料约束条件的前提下, 以综合供电成本最低为原则提高经济煤种掺配比例, 可降低电厂燃料成本。本研究将为我国电站锅炉多元燃料掺烧研究提供重要参考。

[关键词] 电站锅炉; 掺烧; 综合供电成本; 煤泥; 煤气

[引用本文格式] 张向宇, 何军福, 王志超, 等. 基于最小综合供电成本的电站锅炉多元燃料掺烧方法研究[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 150-156. ZHANG Xiangyu, HE Junfu, WANG Zhichao, et al. Research on the method of multi fuel blending in power plant boilers based on minimum power supply cost[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 150-156.

Research on the method of multi fuel blending in power plant boilers based on minimum power supply cost

ZHANG Xiangyu^{1,2}, HE Junfu³, WANG Zhichao¹, YANG Zhongcan¹, ZHANG Xilai¹,
LIU Jiali¹, YAO Wei¹

(1.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2.Shaanxi Coal Fired Power Plant Boiler Environmental Protection Engineering Technology Research Center, Xi'an 710054, China;

3.Yunnan Energy Investment Qujing Power Generation Co., Ltd, Qujing 655099, China)

Abstract: In order to solve the safety and economic issues of mixed combustion of multiple fuels such as gas, lignite, and coal slurry in power plant boilers, an evaluation method for the blending of multiple fuels was proposed. Firstly the constraints on the moisture, volatile matter, calorific value, and sulfur content of the fuel entering the furnace under different loads are established, based on the fuel characteristics and various requirements for safe operation of the unit, and then the minimum comprehensive power supply cost and the optimal blending scheme for multiple fuels under different loads are determined through blending experiments. The experiments were conducted on a 300 MW power plant boiler, and the results showed that, on the premise of meeting the constraints of the incoming fuel, the fuel cost for power plants can be decreased by increasing the proportion of economic coal blending based on the principle of minimizing comprehensive power supply costs. This study will provide important reference for the study of multi fuel blending in power plant boilers.

Key words: utility boiler; co-firing; comprehensive power supply cost; slush; coal gas

新能源的大规模建设需要火电的支撑, 在未来很长一段时间内电力保供的主体仍将是煤电^[1]。但

是, 在“双碳”大背景下煤电机组面临严峻的转型压力, 一方面水电、风电和光伏等清洁能源的大力

收稿日期: 2023-03-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1910000)

Supported by: National Key Research and Development Program (2020YFC1910000)

第一作者简介: 张向宇(1984), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为锅炉数字孪生, zhangxiangyu@tpri.com.cn.

发展使火电机组负荷率逐渐走低,另一方面煤炭供给侧改革和煤炭产能供应不足进一步推高了动力煤价格,煤价高、负荷率和电价低导致火电厂生产经营较为困难。

燃煤费用约占电厂发电运行成本的70%以上,降低燃料价格是控制成本的重中之重^[2]。我国煤炭资源丰富、品种齐全,但其价格差异巨大,其中开采成本较低的经济煤种标准煤单价较优质煤种低10%~20%以上,而煤炭加工过程形成的煤泥等副产品价格更为低廉^[3]。为降低燃煤成本,国内各电厂多方开拓低成本燃料来源,掺烧高水分褐煤、高灰低热值烟煤、煤泥等多元经济煤种;另外,垃圾、污泥、生物质等非常规燃料也开始进入电厂掺烧,并且掺烧比例逐渐提高^[4]。但是,由于对多元燃料特性认识不足和设备条件限制,导致在燃用过程中出现磨煤机干燥出力不足、锅炉带负荷受限、空气预热器堵塞、落煤管下煤不畅等问题,严重影响了锅炉设备的安全稳定运行^[5];另外,电厂对多元燃料掺烧的经济性无法进行准确评估。

国内学者围绕多元燃料燃烧开展了大量基础和试验研究,为电厂实际掺烧提供了技术支撑。王强等^[6]基于元素富集理论,结合锅炉设备与燃用煤种的适应性分析、实炉试验,研究了在煤中掺入灰渣减缓结渣的最优掺配方式及掺配比例。高建强等^[7]利用数值模拟方法研究了不同比例无烟煤和烟煤掺烧对W火焰锅炉运行参数的影响。段慧等^[8]对提升机组配烧经济煤种能力和降低入炉煤标准煤单价等配煤掺烧的核心问题做了详细的技术经济比较。刘国峰^[9]分析和总结了经济煤种掺烧中对锅炉设备的影响和改进、调整措施。张学威等^[10]研究了多煤种炉内混烧对炉膛结渣特性的影响规律,发现不同的混烧方案下炉膛内结渣发生的主要部位与燃用单一煤种时相似。马仑等^[11]通过混煤燃烧特性实验研究了炉外和炉内2种掺烧方式下煤种对混煤燃尽及NO_x排放特性的影响。目前建立的各种配煤掺烧模型往往忽略了对机组设备运行现状和负荷的考虑^[12],而且在实际掺烧过程中很难同时兼顾安全、高效、经济、环保的运行要求。

针对上述问题,本文提出了一种针对多元燃料掺烧的评价方法,在深入掌握多元燃料特性的基础上,在实际电站锅炉上开展了不同负荷、不同配煤方案下的掺烧试验,研究了锅炉与多元燃料的适应性,评估了锅炉燃用多元燃料的安全经济性,针对

不同负荷提出了经济煤种掺配方案。通过提高经济煤种掺配比例,不仅能够提高电厂的燃料灵活性,改善电厂生产经营困境,也有助于实现低质能源的有效利用。

1 多元燃料掺烧评估方法

在进行多元燃料掺烧时,需要详细评价不同掺烧方案对锅炉运行安全性的影响,具体涉及带高低负荷能力、磨煤机干燥能力、低负荷稳燃能力、脱硫脱硝能力等多方面要求,对入炉燃料的热值、挥发分、硫分、水分等提出了约束性条件。

在确定入炉燃料热值时,除了满足低负荷稳燃、辅机出力要求外,主要应考虑锅炉带负荷要求。在机组各典型负荷下,根据热负荷和磨煤机最大出力,推算出入炉煤最低热值要求,如式(1)所示。

$$m_b \times \sum_{i=1}^n (Q_{\text{net,ar},i} P_i) \geq Q_v (P_e) \quad (1)$$

式中: m_b 为磨煤机最大出力,t/h; $Q_{\text{net,ar},i}$ 为燃料 i 的低位热值,MJ/kg; P_i 为燃料 i 的掺烧比例,%; Q_v 为锅炉热负荷,MW; P_e 为机组电功率,MW。

入炉燃料的挥发分对煤粉气流的着火、燃尽均有较大影响,根据入炉燃料的挥发分、灰分来计算着火温度(式(2)),从而判断多元燃料的着火稳定性。当煤粉着火温度高于638℃后进入极难稳定区,当煤粉着火温度低于593℃时进入着火易稳定区^[13]。同时应注意控制入磨煤挥发分,将低挥发分煤与高挥发分煤掺磨,避免出现入磨煤挥发分过高引起的自燃、爆炸风险。

$$T_d = 654 - 1.9 \times \sum_{i=1}^n V_{\text{daf},i} P_i + 0.43 \times \sum_{i=1}^n A_{\text{ad},i} P_i - 4.5 \times \sum_{i=1}^n M_{\text{ad},i} P_i \quad (2)$$

式中: T_d 为着火温度,℃; $V_{\text{daf},i}$ 为燃料 i 的干燥无灰基挥发分,%; $A_{\text{ad},i}$ 为燃料 i 的干燥基灰分,%; $M_{\text{ad},i}$ 为燃料 i 的空气干燥基水分,%。

入炉煤硫分的高低主要受脱硫系统出力的影响,另外还受锅炉受热面高、低温腐蚀的限制。对各负荷入炉煤的硫分按式(3)进行折算,然后拟合入炉煤折算硫分与原烟气二氧化硫质量浓度的关系曲线,建立入炉煤硫分的约束条件。

$$S_{\text{ar,zs}} = 4182 \times \sum_{i=1}^n (S_{\text{t,ar},i} P_i) / \sum_{i=1}^n (Q_{\text{net,ar},i} P_i) \quad (3)$$

式中: $S_{\text{ar,zs}}$ 为混合燃料折算硫分,%; $S_{\text{t,ar},i}$ 为燃料 i

的收到基全硫, %。

入炉燃料的水分对磨煤机的干燥出力产生较大影响。根据电厂实际混煤情况、磨煤机进口风温和通风量条件计算磨煤机干燥出力, 同时保证磨煤机出口风温高于水露点温度^[4], 建立入炉燃料水分的约束条件, 如式(4)所示。

$$f(T_{m,in}, \sum_{i=1}^n (M_{t,i} P_i), V_{PA}) \geq m_b, \quad T_{m,out} > T_{w,d} \quad (4)$$

式中: $T_{m,in}$ 为磨煤机进口风温, °C; $T_{m,out}$ 为磨煤机出口风温, °C; $M_{t,i}$ 为燃料 i 的全水分, %; V_{PA} 为磨煤机通风量, t/h; $T_{w,d}$ 为水露点温度, °C。

为保证制粉系统干燥出力, 可以考虑将高水分煤和低水分煤掺配, 充分利用制粉系统的现有干燥能力; 另外应考虑将难磨煤与易磨煤掺烧, 充分利用磨煤机的研磨能力, 保证制粉系统研磨出力。

多元燃料的结渣特性采用结渣指数来表征, 在一维火焰炉上采用渣型对比的试验方法确定混煤样的结渣性能^[15]。结渣指数 S_c 的计算公式为:

$$S_c = 100 \cdot N_{max} / (\theta - 1000) \quad (5)$$

式中: N_{max} 为结渣最严重的渣型对应的赋值; θ 为渣型相对应的表征温度值, °C。

在保证多元燃料掺烧安全性的前提下, 需要根据不同煤种确定合适的配煤比例, 在高中低负荷下, 检测不同配煤方案时的锅炉效率、发/供电煤耗率等主要技术指标, 结合燃料成本、环保成本、检修维护费用等, 计算各配煤方案时的综合供电成本(式(6)), 并以综合供电成本最低为原则, 推荐不同负荷时的经济性配煤方案。

$$\min(P_{r,z}) = B_g \times \sum_{i=1}^n P_{r,i} P_i + P_{r,NO_x} + P_{r,SO_2} + P_{r,w} \quad (6)$$

式中: $P_{r,z}$ 为综合供电成本, 元/(kW·h); B_g 为供电煤耗率, g/(kW·h); $P_{r,i}$ 为煤种 i 的标准煤单价, 元/t; P_{r,NO_x} 为脱硝成本, 包括耗氨成本和 NO_x 排放成本, 元/(kW·h); P_{r,SO_2} 为脱硫成本, 包括脱硫剂成本和 SO_2 排放成本, 元/(kW·h); $P_{r,w}$ 为机组维护检修成本, 元/(kW·h)。

2 掺烧方法应用案例分析

2.1 机组及燃料特性

某电厂 300 MW 锅炉为亚临界自然循环汽包炉, 采用四角切圆燃烧方式, 设置 6 层一次风喷口、8 层二次风喷口和 1 层 OFA 喷口, 配 4 套钢球磨中间储仓式乏气送粉系统。

电厂燃用的煤种包括高水分褐煤、高灰分高硫/低硫烟煤、高热值新疆烟煤和焦炉煤气、煤泥等燃料。在锅炉上开展了多元燃料掺烧试验, 对各种燃料进行了现场取样, 并进行煤质测试和燃烧、结渣性能测试, 各种燃料的工业分析数据见表 1。

表 1 多元燃料工业分析数据
Tab.1 Coal characteristic analysis of co-firing fuels

燃料	w/%				$Q_{net,ar}$ (MJ·kg ⁻¹)
	M_t	A_{ar}	V_{daf}	$S_{t,ar}$	
焦炉煤气					15 846.6
褐煤 1	44.50	22.73	38.84	0.37	8 849.4
褐煤 2	40.60	16.41	56.00	0.58	10 374.0
烟煤 1	10.90	47.39	33.38	2.04	11 982.6
烟煤 2	10.00	37.19	21.09	1.51	16 926.0
烟煤 3	17.20	3.69	37.81	0.32	25 321.8
煤泥	12.30	46.81	39.36	1.98	12 108.6

多元燃料着火温度、结渣指数的测试结果如图 1 所示。煤粉气流着火温度是模拟煤粉气流在炉内状态得出的指标参数, 该指标越低, 则煤样的着火稳定性越好。由图 1 可以看到, 2 种褐煤均达到极易着火等级, 烟煤 3 达到易着火等级, 烟煤 1 和烟煤 2 属于难着火的煤种。在掺配时应将易着火煤种与难燃煤种掺烧, 保证燃烧器的着火稳定性。根据结渣指数的判别, 5 个试验煤样均为严重结渣煤种, 在掺配时应优选出结渣指数较小的混煤方案。

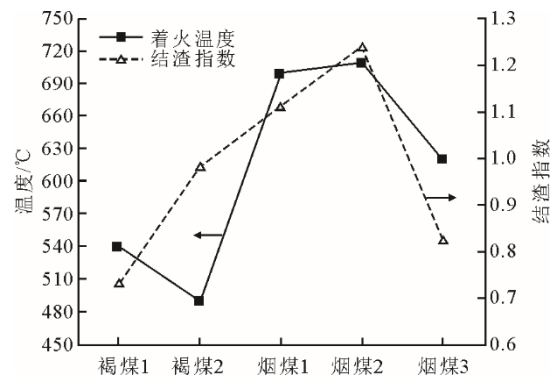


图 1 多元燃料着火温度、结渣指数测试结果
Fig.1 Ignition temperature and slag index of co-firing fuels

结合各煤样的检测数据, 电厂磨煤机、燃烧器、脱硫脱硝装置等设备运行情况, 以及机组历史运行数据, 建立针对某电厂多元燃料掺烧的燃料指标约束条件, 具体见表 2。

在机组各负荷下, 根据排除焦炉煤气带入热量后的入炉煤热量要求和磨煤机最大出力, 推算出入炉煤最低热值。受磨煤机出力条件限制, 入炉煤

热值不宜太低,在常见的160~300 MW负荷内,入炉煤的收到基低位发热量在低负荷时不低于11 760 MJ/kg,满负荷时不低于16 380 MJ/kg,这样就要求低负荷时多烧褐煤和低热值烟煤,中高负荷时提高中高热值煤比例。

表2 锅炉运行所需的燃料约束指标
Tab.2 Fuel quality required for boiler operation

项目	负荷/MW			
	160	220	260	300
$w(M_d)/\%$	≤ 33	≤ 25	≤ 18	≤ 12
$w(V_{daf})/\%$	≥ 30	≥ 28	≥ 27	≥ 27
$Q_{net,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$	$\geq 11\ 760$	$\geq 13\ 440$	$\geq 15\ 120$	$\geq 16\ 380$
$w(S_{tar})/\%$	≤ 1.45	≤ 1.44	≤ 1.40	≤ 1.40

在目前中低负荷底层燃烧器配煤方式下,混煤挥发分为40%~45%,着火温度500~550 °C,属于极易稳定区,运行安全性较高。随着混煤挥发分下降,在挥发分30%时着火温度为594 °C,着火稳定性下降。在中低负荷下,此挥发分不宜再继续降低;随着负荷升高,炉温水平升高,锅炉燃烧稳定性对低挥发分煤的容忍度增强,底层燃烧器燃用煤的挥发分可适当降低。

目前电厂高负荷时烟气SO₂运行控制值为4 500 mg/m³,根据入炉折算硫分与原烟气SO₂质量浓度关系曲线,计算得到各负荷下的入炉煤硫分为

1.45%、1.44%、1.40%、1.40%,对应的高负荷脱硫入口SO₂质量浓度为4 410 mg/m³。需要说明的是,所计算出的硫分与燃煤低限热值时的含硫量相对应,如果实际运行中的燃煤热值升高,入炉硫分还可以提高。根据其他同等级亚临界锅炉运行经验,入炉煤硫分应不超过1.5%,以免引起锅炉脱硫装置出力不足、SO₂排放超标及炉内水冷壁高温腐蚀^[16]。低负荷时如要多烧高硫煤,需相应提高入炉煤热值。

实际运行过程中,出于多烧低价褐煤的需要,兼顾磨煤机出力满足锅炉带负荷要求,同时考虑目前给粉机出力和混煤热值限制,计算出各负荷时磨煤机入磨煤水分限值。在目前的磨煤机进口风温和通风量条件下,磨煤机出口温度最低控制在52 °C,较水露点温度(49 °C)高3 °C,长期运行时未出现粉管堵塞现象,基本满足锅炉输粉的安全要求。

另外在掺烧过程中还应该注意混煤的灰分,当燃煤热值较低、灰分较高时,烟气中的灰含量较大,锅炉受热面结渣和磨损风险增加,严重时还会造成除灰系统出力不足,影响机组安全稳定运行。

2.2 多元燃料掺烧试验

在不同负荷下改变掺烧煤种及其比例,测试各配煤掺烧方式下的锅炉运行性能,并根据试验测试结果和锅炉运行参数,计算变煤种掺烧经济性。不同负荷下的掺烧方案见表3。

表3 不同负荷下多元燃料掺烧方案
Tab.3 Multiple fuel blending schemes under different loads

单位: %

燃料	160 MW			220 MW			260 MW		
	工况1	工况2	工况3	工况4	工况5	工况6	工况7	工况8	工况9
焦炉煤气	4.21	5.02	3.71	4.06	3.64	4.17	3.59		3.15
褐煤1		60.71							
褐煤2	27.71		24.85	17.02	16.43	48.90	36.11		
烟煤1	83.13	45.53	62.13	102.14	98.59	65.59	72.22	34.11	65.5
烟煤2		15.18	12.43	17.02	16.433			102.32	32.75
烟煤3						16.33	36.11		32.75

在160 MW负荷下开展了3个掺烧工况的性能试验,燃料参数见表4。

表4 160 MW负荷时入炉燃料指标
Tab.4 Fuel index for furnace input at 160 MW load

项目	工况1	工况2	工况3
$w(M_d)/\%$	19.60	30.10	19.40
$w(V_{daf})/\%$	38.06	44.78	38.17
$Q_{net,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$	3 204.6	2 903.9	3 414.4
$w(S_{tar})/\%$	0.73	0.96	0.84
S_c	1.08	0.94	1.09

由表4可以看到,3个工况下混合燃料的水分、挥发分、热值和硫分参数均满足该负荷下入炉燃料的约束指标,不存在限制机组安全稳定运行的因素。混煤的结渣倾向均较为严重。低负荷下通过掺烧焦炉煤气,改善了燃烧稳定性,能够显著提高低热值褐煤和烟煤的掺烧比例。

对3个掺烧工况下的锅炉效率进行测试,结果如图2所示。3个工况下修正后的排烟温度分别为145.7、146.9、148.6 °C,修正后锅炉效率分别为

88.03%、87.94%、88.16%，锅炉效率以工况3为最高。考虑到厂用电因素，3个掺烧工况下的供电煤耗率分别为371.90、375.15、372.68 g/(kW·h)，尽管工况1对应的锅炉效率低于工况3，但工况1的供电煤耗率相对较低。

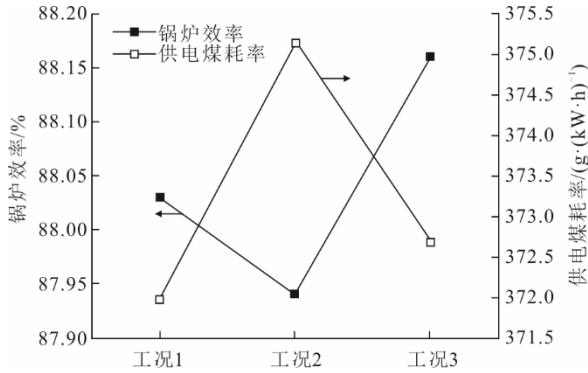


图2 160 MW 负荷时锅炉效率和供电煤耗率
Fig.2 Boiler efficiency and coal consumption for electricity supply under 160 MW load

结合燃料成本、环保成本(脱硫、脱硝排放成本,下同)、检修维护费用,对160 MW 负荷下3个掺烧工况时的发电成本进行计算,结果如图3所示。可以看到,同一负荷下不同煤种的掺烧配比,其经济指标存在着显著不同。工况1、工况2、工况3的综合供电成本分别为0.295 1、0.314 3、0.303 7元/(kW·h)。从综合供电成本来看,工况1最佳。

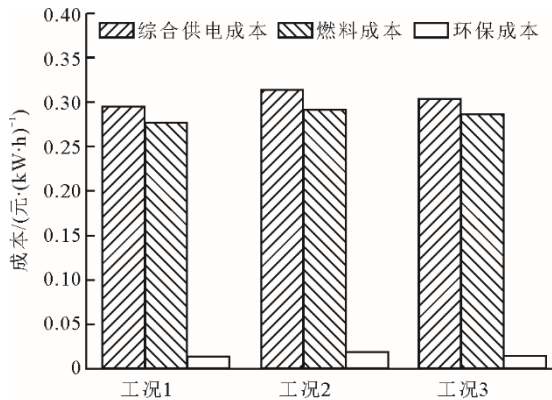


图3 160 MW 负荷时不同掺烧工况下的供电成本
Fig.3 Electricity supply cost under different coal blending schemes at 160 MW load

220 MW 负荷下3个掺烧工况的燃料指标见表5。由表5可见,混合燃料的水分、挥发分、热值和硫分参数均满足该负荷下入炉燃料约束条件,混煤的结渣倾向均较为严重。

220 MW 负荷3个掺烧工况下的锅炉效率和供电煤耗率如图4所示。修正后的排烟温度分别为

143.2、140.5、146.8 °C,锅炉效率分别为89.53%、89.42%、88.60%,锅炉效率在工况4、工况5时较高。3个工况下供电煤耗率分别为353.80、353.18、358.65 g/(kW·h),工况5的供电煤耗率相对较低。此外可以看出,220 MW 负荷下机组的供电煤耗率要明显低于160 MW 工况。

表5 220 MW 负荷时入炉燃料指标
Tab.5 Fuel index for furnace input at 220 MW load

项目	工况4	工况5	工况6
w(M _t)/%	12.90	17.70	23.20
w(V _{dar})/%	32.09	35.81	42.16
Q _{net,ar} /(MJ·kg ⁻¹)	14 683.2	15 325.8	13 330.8
w(S _{t,ar})/%	0.92	0.71	0.67
S _c	1.11	1.11	1.02

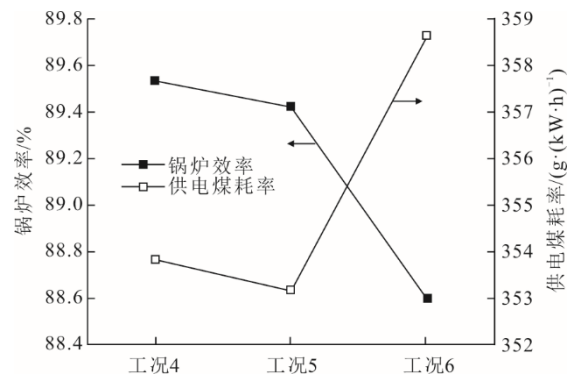


图4 220 MW 负荷时锅炉效率和供电煤耗率
Fig.4 Boiler efficiency and coal consumption for electricity supply under 220 MW load

220 MW 负荷下3个掺烧工况的发电成本如图5所示。由图5可知,在工况4、工况5、工况6下综合供电成本分别为0.278 0、0.284 6、0.341 1元/(kW·h)。可以看出,尽管工况5的供电煤耗率较低,但工况4的综合供电成本最低,为最优掺配方案。

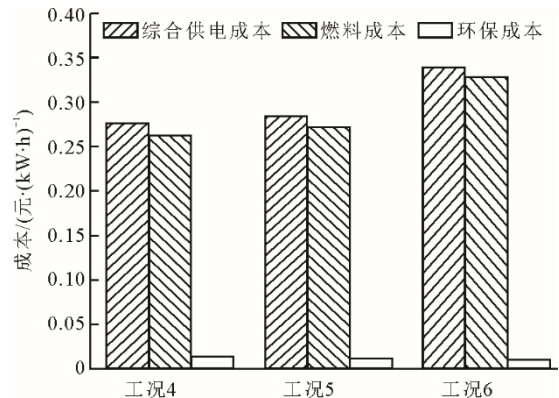


图5 220 MW 负荷时不同掺烧工况下的供电成本
Fig.5 Electricity supply cost under different coal blending schemes at 220 MW load

260 MW 负荷下 3 个掺烧工况的燃料指标见表 6。表 6 中, 工况 8 为纯燃煤工况。由表 6 可知, 3 个工况下混合燃料的水分、挥发分、热值和硫分参数均满足该负荷下入炉燃料约束指标, 混煤的结渣倾向均较为严重。

表 6 260 MW 负荷时入炉燃料指标
Tab.6 Fuel index for furnace input at 260 MW load

项目	工况 7	工况 8	工况 9
$w(M_i)/\%$	17.90	12.80	9.80
$w(V_{daf})/\%$	37.62	36.58	30.12
$Q_{net,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$	15 888.6	16 800.0	19 152.0
$w(S_{t,ar})/\%$	0.88	0.78	1.24
S_c	1.005	1.207	1.070

260 MW 负荷下 3 个掺烧工况下的锅炉效率和供电煤耗率如图 6 所示。修正后 3 个工况下的排烟温度分别为 143.2、145.5、147.3 °C, 锅炉效率分别为 88.19%、88.93%、89.33%, 供电煤耗率分别为 347.50、345.43、344.46 g/(kW·h), 锅炉效率逐渐升高, 供电煤耗率逐渐下降, 工况 9 对应的供电煤耗率较低。

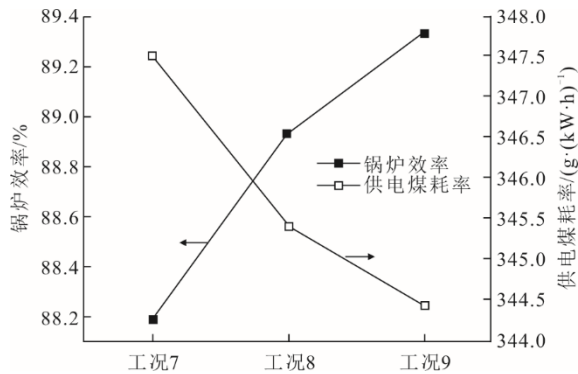


图 6 260 MW 负荷时锅炉效率和供电煤耗率
Fig.6 Boiler efficiency and coal consumption for electricity supply under 260 MW load

260 MW 负荷下 3 个掺烧工况的发电成本如图 7 所示。工况 7、工况 8、工况 9 的综合供电成本分别为 0.333 0、0.333 9、0.319 2 元/(kW·h)。从综合供电成本来看, 工况 9 对应的掺配方案最佳。从 3 个负荷下的供电成本来分析, 综合供电成本中起决定性影响的为燃料成本, 环保、检修维护成本较低。不同负荷点时掺烧收益存在较大区别, 按照时均盈利考虑, 220 MW 负荷为该电厂的经济负荷。

在 260 MW 负荷下, 对煤泥掺烧前后的锅炉性能进行了测试, 试验结果见表 7。煤泥属于高灰分低热值燃料, 当煤泥的掺烧质量比为 26% 时, 混合

燃料的煤质参数满足该负荷下入炉煤质指标。掺烧煤泥后, 锅炉的排烟温度升高约 2.7 °C, 飞灰含碳量由 3.30% 升高至 4.24%, 锅炉排烟热损失和固体未完全燃烧热损失均升高, 锅炉效率下降 0.93 百分点, 机组煤耗升高。但是由于煤泥的价格较低, 掺烧煤泥后的综合供电成本显著降低。

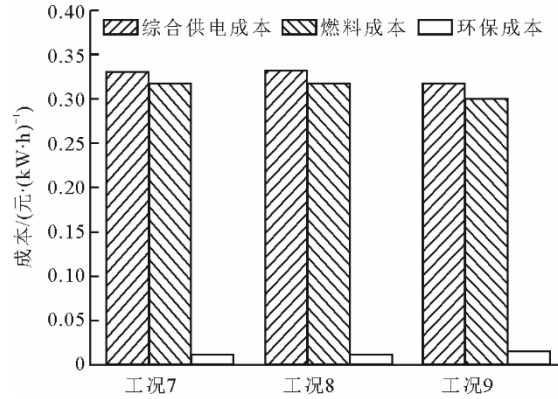


图 7 260 MW 负荷时不同掺烧工况下的供电成本
Fig.7 Electricity supply cost under different coal blending schemes at 260 MW load

表 7 掺烧煤泥对比测试结果
Tab.7 Comparison tests of blended coal slime and coal

项目	工况 10	工况 11
燃料配比	100% 烟煤 2	74% 烟煤 2+26% 煤泥
$w(M_i)/\%$	12.80	9.79
$w(V_{daf})/\%$	36.58	29.51
发热量 $Q_{net,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$	16 800	15 918
$w(S_{t,ar})/\%$	0.78	1.27
锅炉效率/%	90.16	89.23
综合供电成本/(元·(kW·h) ⁻¹)	0.319 8	0.316 3

3 结论与建议

在一台亚临界 300 MW 锅炉开展了焦炉煤气、褐煤、低质烟煤、煤泥等多元燃料的掺烧试验, 根据不同燃料的着火、燃尽和结渣特性, 兼顾锅炉带高低负荷能力、磨煤机干燥能力、制粉和送粉安全、低负荷稳燃能力、脱硫脱硝能力等多方面要求, 提出了入炉燃料的约束性条件。进一步通过不同负荷下不同燃料配比方案的掺烧试验, 计算机组真实的综合供电成本, 并以综合供电成本最低为原则确定了不同负荷时最佳的多元燃料掺配方案。

同一负荷下不同煤种的掺烧配比以及不同负荷间的掺烧经济性均有显著差别, 应尽量提高褐煤和低质烟煤等经济煤种的掺烧比例, 掺烧焦炉煤气能够提高低质煤的燃用比例, 煤泥的最大掺烧比例为 26%。

[参考文献]

- [1] 董晴. 300 MW 燃煤锅炉煤种掺烧适应性研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2020: 1.
DONG Qing. Study on the adaptability of coal combustion of 300 MW coal-fired boiler[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2020: 1.
- [2] 李皓宇, 朱宪然, 刘彦鹏, 等. 600 MW 机组锅炉深度掺烧劣质煤技术[J]. 热力发电, 2018, 47(7): 99-104.
LI Haoyu, ZHU Xianran, LIU Yanpeng, et al. Technical research on in-deep mixedly burning inferior coal in a 600 MW unit boiler[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(7): 99-104.
- [3] 赵志宏. 火电厂多煤种掺烧的应用研究[J]. 吉林电力, 2017, 45(5): 35-38.
ZHAO Zhihong. Study on the application of multi-coal blending in thermal power plant[J]. Jilin Electric Power, 2017, 45(5): 35-38.
- [4] 周永刚, 王欢, 王景, 等. 制粉方式及煤种对煤炭掺烧锅炉热力性能影响与方案优化[J]. 中国电力, 2017, 50(3): 77-82.
ZHOU Yonggang, WANG Huan, WANG Jing, et al. Impact of coal types and pulverizing methods on the thermal performance of blending coal-fired boilers and their operation optimization[J]. Electric Power, 2017, 50(3): 77-82.
- [5] 夏季, 张成, 袁向宇, 等. 基于物理规划的混煤掺烧方案优化模型[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2654-2660.
XIA Ji, ZHANG Cheng, YUAN Xiangyu, et al. Coal blending optimization model based on physical programming[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2654-2660.
- [6] 王强, 贾子秀, 肖海林, 等. 基于元素富集理论的烟煤掺烧灰渣防结焦试验研究[J]. 节能, 2022, 41(6): 13-18.
WANG Qiang, JIA Zixiu, XIAO Hailin, et al. Experimental study on anti-coking of ash cinder blended with bituminous coal based on element enrichment theory[J]. Energy Conservation, 2022, 41(6): 13-18.
- [7] 高建强, 全国兴. 掺烧煤质差异较大煤种对“W”火焰炉运行参数的影响[J]. 热力发电, 2022, 51(4): 18-22.
GAO Jianqiang, TONG Guoxing. Effect of blending coals with great difference in coal quality on operating parameters of W-flame boiler[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(4): 18-22.
- [8] 段慧, 罗立洁, 于大龙. 基于实时计算的配煤掺烧技术经济对比分析[J]. 东北电力技术, 2022, 43(7): 37-39.
DUAN Hui, LUO Lijie, YU Dalong. Analysis of economic comparison for coal blending combustion technology based on real time calculation[J]. Northeast Electric Power Technology, 2022, 43(7): 37-39.
- [9] 刘国锋. 徐州华润电厂锅炉经济煤种掺烧优化研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021: 1.
LIU Guofeng. Study on optimization of mixed burning of economical coal in Xuzhou China Resources Power Plant[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021: 1.
- [10] 张学威, 钟文琪, 陈曦, 等. 前后墙对冲锅炉炉内混烧下受热面结渣特性数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1902-1912.
ZHANG Xuewei, ZHONG Wenqi, CHEN Xi, et al. Numerical simulation of slagging characteristics of co-fired in opposed boiler heating surface[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1902-1912.
- [11] 马仑, 方庆艳, 汪涂维, 等. 混煤燃烧过程中的交互作用: 煤种对混煤燃烧与 NO_x 排放特性的影响[J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2440-2446.
MALun, FANG Qingyan, WANG Tuwei, et al. Interaction of blended-coal combustion process: influence of coal rank on combustion and NO_x emission characteristics[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2440-2446.
- [12] 张健, 李兴智. 百万塔式炉机组神华煤掺烧试验研究[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(1): 65-68.
ZHANG Jian, LI Xingzhi. Experimental research on Shenhua coal blending combustion in a 1 000 MW tower type boiler unit[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(1): 65-68.
- [13] 傅维标. 一种预报煤焦着火温度及判别煤粉着火与稳燃特性的新方法—F_z法[J]. 电站系统工程, 1993, 9(5): 43-52.
FU Weibiao. F_z method—A new way to predict the temperatures of char igniting and of distinguishing the pulverized behaviour of igniting and firing stability[J]. Power System Engineering, 1993, 9(5): 43-52.
- [14] 煤的燃烧特性测定方法 一维炉法: GB/T 39833—2021[S]. 北京: 中国煤炭工业协会, 2021: 1.
Determination of combustion characteristics of coal one-dimensional furnace method: GB/T 39833—2021[S]. Beijing: China National Coal Association, 2021: 1.
- [15] 煤粉燃烧结渣特性和燃尽率一维火焰炉测试方法: DL/T 1106—2009[S]. 北京: 中华人民共和国国家能源局, 2009: 1.
Test method of one-dimensional flame furnace for slagging characteristics and burnout rate of pulverized coal combustion: DL/T 1106—2009[S]. Beijing: National Energy Administration of the People's Republic of China, 2009: 1.
- [16] 电站煤粉锅炉燃煤掺烧技术导则: DL/T 1445—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 1-5.
Technical guidelines of burning blended coal in pulverized coal fired power plant boilers: DL/T 1445—2015[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2015: 1-5.

(责任编辑 刘永强)