

135 MW 机组锅炉掺烧半焦试验及经济性分析

刘家利, 郭孟狮, 李炎

(西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要:为了推广半焦在大型煤粉锅炉上的应用,通过在 135 MW 煤粉锅炉上的半焦掺烧性能试验,分别从电厂锅炉效率、厂用电率、供电煤耗、环保指标、检修维护成本以及煤炭价格等方面分析了煤粉锅炉掺烧半焦对电厂供电成本的影响。研究表明,掺烧 30% 左右的半焦对锅炉运行经济性影响较小,在目前的煤炭价格下,掺烧 30% 半焦时机组运行经济性变化对供电成本的影响在 1% 以下,半焦自身价格是影响其在电厂大规模推广应用的核心因素。

关键词:半焦;掺烧;厂用电率;供电煤耗

中图分类号:TK229.66 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2017)02-0086-06

Economic analysis for a 135 MW pulverized coal fired boiler blending with semi-coke

Liu Jiali, Guo Mengshi, Li Yan

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

Abstract: In order to promote the application of semi-coke on large-scale pulverized coal fired boiler, the impacts of coal blending with semi-coke on the operational economic of power plant such as the boiler gross efficiency, the station service power consumption rate, the net coal consumption, the environmental protection indicators, maintenance cost, and coal price etc were systematically analyzed by testing the performance of coal blending on a 135 MW power plant. Results show that coal blending with 30% semi-coke has little effect on the operational economic, and it demonstrates less than 1% impact on the power supply cost, while the price of semi-coke is the main factor affecting the widely application of semi-coke on power plant.

Key words: semi-coke; blending; station service power consumption rate; net coal consumption

0 引言

根据煤在不同转化阶段反应性的不同特点,实现煤炭分质分级转化和能量梯级利用是最为合理的煤炭能源利用方式之一。根据 GB/T 25210—2010《兰炭用煤技术条件》和 GB/T 25211—2010《兰炭产品技术条件》的定义,兰炭(又称“半焦”)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得到的较低挥发分的固体炭质产品。作为一种清洁环保燃料,半焦具有(特)低灰、低硫、中高发热量等特点^[1],可广泛用于冶金、化工、型焦、吸附剂、清洁燃料等诸多领域,并于 2008 年被工信部列入国家产业

政策目录焦炭序列。目前全国半焦总产能已经超过 1 亿 t,但由于传统半焦市场需求不足导致半焦产业产能过剩,半焦企业开工率普遍偏低^[2]。为了扩大半焦的应用范围,推动半焦在电站动力燃料领域的安全高效利用是一种可行的解决之道。

辛收良^[3]研究了兰炭代替无烟煤在造气炉中的应用,掺烧比例可达 50%。张鑫^[4]利用民用取暖炉考察兰炭作为清洁燃料替代无烟煤的可行性,试验结果表明兰炭利用率高于无烟煤,且产生的灰渣和有害气体污染物少。牛芳^[5]在煤粉工业锅炉上进行了兰炭的燃烧试验,分析了兰炭的着火、稳燃和燃尽性能。刘家利等^[6]在试验台进行了兰炭作为

收稿日期:2017-01-28;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.02.017

基金项目:陕西省科技统筹创新工程计划资助项目(2015KTZDGY05-03)

作者简介:刘家利(1976—),女,四川新都人,高级工程师,硕士,从事燃煤特性与锅炉设备匹配性的研究。E-mail:liujiali@tpri.com.cn

引用格式:刘家利,郭孟狮,李炎.135 MW 机组锅炉掺烧半焦试验及经济性分析[J].洁净煤技术,2017,23(2):86-91.

Liu Jiali, Guo Mengshi, Li Yan. Economic analysis for a 135 MW pulverized coal fired boiler blending with semi-coke[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(2): 86-91.

动力用煤的着火、燃尽、结渣等燃烧特性研究。李晓伟等^[7]在试验台研究了兰炭和国内典型煤种的掺烧特性。刘家利等^[8]对电站锅炉燃用半焦进行了制粉系统选型的研究。杨忠灿等^[9]对电站锅炉燃用半焦提出了全面的防磨措施推荐。这些研究成果表明了半焦和常规煤种的煤质特性和燃烧性能等具有相似性但又不同,在大型煤粉锅炉上掺烧一定比例的半焦在技术上可行。

蔡笑等^[10]通过 630 MW 超临界机组的掺烧试验表明,如果掺烧比例不合适以及不进行相应的燃烧调整,在掺烧过程中将会引起锅炉严重结焦、飞灰含碳量升高、不能满负荷运行等问题。李春雷^[11]对掺烧非设计煤种,从煤炭价格、掺烧前后的供电煤耗、辅机电耗等变化,全面分析了烟煤机组掺烧褐煤的经济性。梁学东等^[12]通过在 1 000 MW 机组上掺烧低热值煤的燃烧试验,从掺烧对锅炉效率、厂用电率、供电煤耗、污染物排放、检修维护费及配煤成本等评估了掺烧对机组经济运行的影响。因此,为了保证机组安全稳定运行并降低燃料采购及运行成本,需要对电厂运行经济性进行深入分析。

本文通过 135 MW 机组锅炉上掺烧半焦,进行锅炉效率、辅机耗电量、脱硫脱硝成本等经济性指标、设备维护成本等的定量对比,分析了掺烧半焦对锅炉经济性的影响程度。

1 影响电厂掺烧经济性的因素

在不考虑人员工资的情况下,影响电厂发电成本的经济性指标包括:① 燃料价格,是影响发电成本的重要指标^[13];② 锅炉效率,受煤质、排烟温度以及飞灰大渣含碳量影响最大,其中排烟温度影响排烟损失 q_2 ,而飞灰及大渣含碳量影响固体未完全燃烧热损失 q_4 ^[14];③ 厂用电率,主要包括制粉系

统、风机(一次风机、送风机、引风机等)以及除尘、脱硫、脱硝系统电耗等;④ 污染物排放成本,包括脱硫脱硝剂成本^[15];⑤ 机组综合供电成本;⑥ 设备检修维护成本;⑦ 其他成本,如掺配煤和上煤费用、汽机热耗等。一般情况下,锅炉在燃用设计煤种时机组性能最好、效益最佳。当现役机组锅炉掺烧一定比例半焦时,会对机组运行经济性产生一定的影响。

2 135 MW 机组设备特点及掺烧工况

2.1 某电厂 135 MW 机组锅炉设备简介

某电厂 1 号机组锅炉为哈尔滨锅炉厂设计和制造的单炉膛、自然循环、集中下降管、一次中间再热、四角切向燃烧、 Π 形布置的固态排渣煤粉锅炉,锅炉型号 HG-440/13.7-YM14。锅炉在低氮燃烧器改造完成后,采用上下浓淡直流煤粉燃烧器,布置在炉膛四角。煤粉燃烧器共分为 4 层,每层对应一台磨煤机出口的 4 个一次风管道,煤粉燃烧器配置周界风。在每个角共设置 9 层二次风喷口,每角最上部设燃尽风,最下部设燃油二次风。在主燃烧器区上方 6 m 处布置有 3 层分离燃尽风,以实现炉内空气的深度分级。锅炉采用冷一次风机正压直吹式制粉系统,每台炉配 4 台 MPS140 中速磨机(正常运行三运一备)。

2.2 掺烧工况

表 1 为掺烧试验时的工况汇总,T1 为基本工况,100% 燃用银河煤,半焦掺烧试验均与银河煤进行,不同半焦的掺烧比例分别为 17% 和 33%,试验煤样的煤质分析见表 2。现场掺烧试验结果表明,该烟煤机组掺烧 33% 半焦在技术上可行,锅炉运行稳定、汽水和风烟系统正常、排烟温度、大渣含碳量等未见明显增加。受制粉系统出力限制,掺烧半焦后煤粉变粗,飞灰含碳量略有升高。

表 1 半焦掺烧试验的基本工况

Table 1 Basic test cases of blending semi-coke

工况	掺烧煤种	掺烧质量比例/%	掺烧方式	运行磨煤机	电负荷/MW	表盘氧含量/%
T1	—	0	—	ABD	110	3.2
T2	低温粉末	17	C 磨 5 : 5 混煤	ABC	110	3.2
T3	低温粉末	33	C 磨单烧	ACD	110	3.4
T4	中温粉末	17	B 磨 5 : 5 混煤	ABC	110	3.4
T5	中温粉末	33	BC 磨 5 : 5 混煤	ABC	110	3.3
T6	中温小料	17	B 磨 5 : 5 混煤	ABC	110	3.3
T7	中温小料	33	BC 磨 5 : 5 混煤	ABC	100	3.3

3 煤粉锅炉掺烧半焦经济性影响分析

3.1 到厂煤价格

电厂到厂煤种、煤质参数及价格见表2。由表2可见,半焦的煤质特性和银河煤接近,主要是挥发分降低、水分升高和热值有不同程度降低,相关的燃烧性能试验表明半焦的着火和燃尽性能较银河煤略微偏差,而结渣和沾污性能与银河煤接近。因此掺烧半焦后主要是影响着火和燃尽。

3.2 锅炉效率

表3为135 MW机组掺烧半焦时的锅炉效率比较。由表3可见,掺烧半焦后,由于中速磨制粉系统裕量较小,半焦具有难磨性,磨制半焦时煤粉较粗,导致掺烧半焦后,飞灰含碳量略有升高,而大渣含碳量基本不变,因此,随着半焦掺烧比例的增加,锅炉

效率有降低的趋势。

表2 某电厂135 MW机组燃煤煤质及到厂煤价格

Table 2 Coal quality and coal price of a 135 MW coal-fired power plant

项目	榆林银 河煤	低温半 焦粉末	中温半 焦粉末	中温半 焦小料
$M_v/\%$	10.0	11.2	14.6	16.7
$M_{ad}/\%$	5.10	7.86	7.08	7.35
$A_{ar}/\%$	6.24	8.98	13.29	6.69
$V_{daf}/\%$	38.38	10.96	9.92	8.16
$Q_{net,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$	26.37	25.84	23.15	25.16
哈氏可磨指数 HGI	49	52	51	43
冲刷磨损指数 K_e	—	27.7	29.4	39.4
灰熔融温度 ST/ $^{\circ}C$	1 100	1 120	1 190	1 130
到厂价(标煤)/(元 $\cdot t^{-1}$)	352.2	360.0	298.0	520.0

表3 135 MW机组掺烧半焦的锅炉效率比较

Table 3 Comparison of boiler gross efficiency with blending of semi-coke on a 135 MW power plant

项目	榆林银 河煤	17%低温 半焦粉末	33%低温 半焦粉末	17%中温 半焦粉末	33%中温 半焦粉末	17%中温 半焦小料	33%中温 半焦小料
锅炉负荷/MW	110	110	110	110	110	110	100
飞灰可燃物含量/%	5.3	6.2	7.2	7.7	7.9	4.4	8.4
大渣含碳量/%	3.0	2.8	3.3	3.4	2.8	3.0	3.2
固体未完全热燃烧损失/%	0.38	0.48	0.62	0.69	0.84	0.33	0.66
排烟温度/ $^{\circ}C$	173	168	172	172	173	171	173
排烟氧含量/%	5.30	5.65	5.80	5.50	5.70	6.00	6.00
排烟损失/%	7.69	7.63	7.75	7.50	7.26	7.82	7.53
锅炉效率/%	91.52	91.45	91.20	91.21	91.04	91.39	91.10

3.3 辅机电耗

表4为掺烧半焦时辅机电耗的汇总,由于中速磨磨制半焦需要更高的一次风率,掺烧半焦后导致一次风机电耗增加,同时,由于掺烧半焦后煤粉变粗,磨煤机电耗略有降低,制粉系统总的电耗随着半焦掺烧比例的升高而增加。另外,由于掺烧半焦后煤粉变粗,为了获得更好的燃烧经济性,需适当提高运行氧含量,导致风机电耗也有所增加。

3.4 脱硫脱硝成本

表5为掺烧半焦时的脱硫脱硝剂成本核算。由表5可见,掺烧半焦后, SO_2 生成浓度降低,脱硫成本降低,而 NO_x 生成浓度没有明显变化,脱硝成本变化不大,脱硫脱硝的综合成本明显降低。因此,在环保要求越来越严格的情况下,掺烧半焦对环保是有利的。

3.5 供电煤耗

表6为掺烧半焦时的供电煤耗比较。由表6可以看出,掺烧半焦后,由于发电煤耗和厂用电率略有增加,供电煤耗随着半焦掺烧比例的升高而增加。

3.6 供电成本

表7为根据前述测试数据对电厂的综合发电成本预算。由于半焦的磨损性能达到极强等级,在费用计算中考虑了中速磨制粉系统检修和维护费用的增加。掺烧半焦后,锅炉的主要供电成本受不同半焦产品价格差异影响而波动。虽然掺烧半焦后锅炉的供电煤耗均增加,但受半焦价格影响,使得掺烧33%价格最低的中温半焦粉末后的主要供电成本依然降低,由0.143 1元/kWh降低到0.141 9元/kWh;掺烧33%价格稍高的低温半焦粉末后供

电成本增加到 0.144 5 元/kWh;而掺烧 33% 价格最高的中温半焦小料后供电成本增加到 0.166 3 元/kWh。按该电厂 135 MW 机组年运行 5 000 h、负荷率 75% 计算,电厂采用榆林银河煤掺烧 33% 低温

半焦粉末,每年增加发电成本 120.3 万元;采用榆林银河煤掺烧 33% 中温半焦粉末,每年减少发电成本 14.2 万元;采用榆林银河煤掺烧 33% 中温小料,每年增加发电成本 1 475.5 万元。

表 4 掺烧不同比例半焦对辅机电耗的影响

Table 4 Effect of semi-coke blending on auxiliary power consumption

项目	榆林银河煤	17% 低温半焦粉末	33% 低温半焦粉末	17% 中温半焦粉末	33% 中温半焦粉末	17% 中温半焦小料	33% 中温半焦小料
计算燃料量/(t · h ⁻¹)	49.11	48.07	45.32	47.87	48.39	47.04	44.31
中速磨电机功率/kW	502.6	468.5	458.4	475.0	477.9	481.6	456.9
一次风机电机功率/kW	860.0	955.3	920.1	938.1	934.7	915.0	906.4
制粉单耗/(kWh · t ⁻¹ (煤))	27.75	29.62	30.42	29.52	29.19	29.69	30.77
送风机电机功率/kW	560.3	570.8	588.2	617.8	737.8	628.2	658.7
引风机电机功率/kW	673.7	729.2	765.4	721.7	780.6	713.3	778.2
风机单耗/(kWh · t ⁻¹ (煤))	25.0	26.9	29.7	27.8	31.1	28.4	32.43
电除尘器功率/kW	284.7	281.4	270.3	265.9	254.1	277.2	262.2
辅机功率/kW	2 881	3 005	3 002	3 018	3 185	3 015	3 062

表 5 掺烧不同比例半焦对脱硫脱硝剂成本的影响

Table 5 Effect of semi-coke blending on desulfurization and denitrification agents cost

项目	榆林银河煤	17% 低温半焦粉末	33% 低温半焦粉末	17% 中温半焦粉末	33% 中温半焦粉末	17% 中温半焦小料	33% 中温半焦小料
SO ₂ 生成浓度/(mg · m ⁻³)	1 285	1 123	945	1 161	1 034	1 057	952
NO _x 生成浓度/(mg · m ⁻³)	238	218	262	215	193	221	202
脱硫剂量/(t · h ⁻¹)	0.506	0.442	0.372	0.446	0.402	0.411	0.354
脱硫剂单价/(元 · t ⁻¹)	486	486	486	486	486	486	486
脱硫剂费用/(元 · h ⁻¹)	246.1	214.6	180.8	216.9	195.5	199.8	172.1
SO ₂ 排放费用/(元 · kWh ⁻¹)	0.002 2	0.002 0	0.001 6	0.002 0	0.001 8	0.001 8	0.001 7
NO _x 排放量/(t · h ⁻¹)	0.107	0.098	0.112	0.094	0.086	0.100	0.086
脱硝剂单价/(元 · t ⁻¹)	632	632	632	632	632	632	632
NO _x 排放费用/(元 · kWh ⁻¹)	0.000 6	0.000 6	0.000 6	0.000 5	0.000 5	0.000 6	0.000 5
脱硫脱硝成本/(元 · kWh ⁻¹)	0.002 9	0.002 5	0.002 3	0.002 5	0.002 3	0.002 4	0.002 3

表 6 掺烧不同比例半焦对供电煤耗的影响

Table 6 Effect of semi-coke blending on net coal consumption

项目	榆林银河煤	17% 低温半焦粉末	33% 低温半焦粉末	17% 中温半焦粉末	33% 中温半焦粉末	17% 中温半焦小料	33% 中温半焦小料
上网电价/(元 · kWh ⁻¹)	0.358 8	0.358 8	0.358 8	0.358 8	0.358 8	0.358 8	0.358 8
汽轮机热耗率/(kJ · kWh ⁻¹)	8 650	8 650	8 650	8 650	8 650	8 650	8 650
厂用电率/%	8.64	8.75	8.75	8.76	8.92	8.76	8.62
管道效率(设计 99%)/%	99	99	99	99	99	99	99
发电煤耗/(g · kWh ⁻¹)	325.7	326.0	326.9	326.9	327.5	326.2	329.1
供电煤耗/(g · kWh ⁻¹)	356.6	357.3	358.2	358.3	359.5	357.5	360.2

表7 掺烧不同比例半焦对综合发电成本的影响

Table 7 Effect of semi-coke blending on integrated power generation cost

项目	榆林银河煤	17% 低温 半焦粉末	33% 低温 半焦粉末	17% 中温 半焦粉末	33% 中温 半焦粉末	17% 中温 半焦小料	33% 中温 半焦小料
制粉系统检维护费用/(万元·a ⁻¹)	150	175	200	175	200	175	200
年发电量/亿 kWh	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06
新增上煤费用/(万元·a ⁻¹)	0	30	30	30	30	30	30
混煤热值/(MJ·kg ⁻¹)	25.68	25.70	25.73	25.30	24.92	25.60	25.52
燃料到厂价/(元·t ⁻¹)	352.2	353.4	354.5	344.1	335.9	377.4	402.5
燃料到厂价(标煤)/(元·t ⁻¹)	401.4	402.4	403.3	398.1	394.6	431.4	461.6
主要供电成本/(元·kWh ⁻¹)	0.143 1	0.143 8	0.144 5	0.142 6	0.141 9	0.154 2	0.166 3
附加发电成本/(元·kWh ⁻¹)	0.005 8	0.006 6	0.006 8	0.006 6	0.006 8	0.006 4	0.006 8
综合发电成本/(元·kWh ⁻¹)	0.148 9	0.150 3	0.151 3	0.149 2	0.148 7	0.160 7	0.173 1

综合主要供电成本和附加发电成本,对综合发电成本影响最大的为燃料价格,此外引起发电成本升高的主要因素是煤场配煤成本、设备检维护成本、辅机电耗增加,而脱硫脱硝成本下降,使发电成本降低 0.000 6 元/kWh。在半焦到厂价合理的情况下,如果掺烧中温粉末,综合发电成本降低,但如果半焦价格过高,会提高电厂的发电成本,影响电厂经济性。

4 半焦生产成本核算

半焦的生产成本、定价与半焦生产原料价格、半焦生产工艺水平、半焦产品市场价格等相关。榆林半焦生产原料一般采用榆林地区当地侏罗纪不黏煤和弱黏煤,按照榆林地区的中低温干馏工艺水平,1 t 原煤可以生产出约 60 kg 焦油、100 ~ 120 m³ 焦炉煤气及 600 kg 半焦(中温干馏工艺产生的半焦中大中料占 60% 左右、小料和粉末各占 20% 左右)。其中,焦油主要用作高附加值的化工原料;焦炉煤气因其热值较低(6 700 ~ 9 200 kJ/kg),一般由半焦生产企业自行回收利用;半焦产品中大小中料可代替冶金焦、无烟煤块和木炭等;半焦粉末只能作为工业燃料。

在不考虑半焦生产设备投资成本条件下,按 2014 年榆林地区 23 000 kJ/kg 热值混煤到厂价 330 元/t、半焦生产成本 50 ~ 60 元/t(原煤)进行估算,干馏每吨原煤的生产成本在 380 ~ 390 元。以 2014 年 4—6 月半焦产品均价估算(数据来自中国半焦信息网),半焦产业链各级产品市场收益估算见表 8,干馏每吨原煤得到的煤焦油、煤气、半焦大中料以

及小料的收益之和在 352 ~ 367 元。当半焦粉末的市场价格达到 213.3 元/t 时,总收益达到 385 元左右,可实现半焦生产的收支平衡。

表8 半焦生产成本及各级产品市场收益估算

Table 8 Cost of semi-coke production and market revenue estimate of different levels of products

项目	每吨原 煤产量	2014 年市场 平均价格	合计/ (元·t ⁻¹ (原煤))
煤焦油	60 kg	2 100 元/t	126.0
焦炉煤气	110 m ³	0.06 元/m ³	6.6
半焦大中料	360 kg	500 元/t	180.0
半焦小料	120 kg	390 元/t	46.8
半焦粉末	120 kg	213.3 元/t	25.6

注:213.3 元/t 为半焦企业盈亏平衡点对应的半焦粉末价格。

可以看出,在当前半焦生产工艺条件下,半焦粉末的价格在 213.3 元/t 以上时,半焦企业才能获得一定的利润。当然,通过降低半焦生产成本,如进行生产工艺改进、采用低成本的原煤进行生产以及提高高价值的焦油产量等途径,可以增加半焦企业生产利润,使半焦在电站锅炉领域的定价更具优势。

5 结 论

1) 现役煤粉电站锅炉掺烧半焦时,SO₂、粉尘等污染物生成浓度降低,排污费用有所降低,在环保上具有一定优势。

2) 配中速磨煤机制粉系统的烟煤机组掺烧半焦时由于制粉电耗升高,导致辅机电耗有所升高。掺烧半焦后,混煤煤粉细度 R₉₀ 有所升高将导致锅

炉效率略有下降,同时掺烧成本以及检修和维护成本的升高,都将导致电厂的运行经济性略有下降。

3) 现役电站锅炉掺烧 30% 左右的半焦对机组的运行经济性影响较小,半焦产品的价格是影响电厂经济性的最大因素。半焦产品的合理定价需要兼顾半焦生产企业的经营成本与电厂燃用半焦的积极性 2 个方面。

参考文献 (References) :

[1] 侯吉礼,尚文智,刘军利,等. 兰炭(半焦)替代原煤清洁燃烧的排放对比研究[J]. 煤炭技术,2016,35(8):287-288.
Hou Jili, Shang Wenzhi, Liu Junli, et al. Comparison of emission from lantan (semi-coke) instead of raw coal for clean and efficient combustion[J]. Coal Technology, 2016, 35(8):287-288.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 张鑫. 兰炭替代无烟煤高效清洁利用的研究[J]. 洁净煤技术, 2015,21(3):103-106.
Zhang Xin. Feasibility on semi-coke substitute for anthracite in energy conservation and emissions reduction[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(3):103-106.

[5] 牛芳. 煤粉工业锅炉燃烧兰炭试验研究[J]. 洁净煤技术, 2015,21(2):106-108.
Niu Fang. Feasibility of semi-coke combustion in industrial pulverized coal boiler[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2):106-108.

[6] 刘家利,杨忠灿,王志超,等. 兰炭作为动力用煤的燃烧性能研究[J]. 洁净煤技术,2016,22(2):84-88.
Liu Jiali, Yang Zhongcan, Wang Zhichao, et al. Combustion characteristics of blue-coke as fuel for pulverized coal boiler[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(2):84-88.

[7] 李晓伟,赵红伟,王志超. 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. Experimental research on co-combustion of blue-coke and typical coal[J]. Coal Technology, 2015(6):56-59.

[8] 刘家利,姚伟,王桂芳,等. 660 MW 机组半焦煤粉锅炉制粉系统选型[J]. 热力发电,2016,45(11):75-81.

Liu Jiali, Yao Wei, Wang Guifang, et al. Type Selection of coal pulverizing system for 660 MW coal fired boiler burning semi-coke[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(11):75-81.

[9] 杨忠灿,刘家利,王志超,等. 半焦磨损特性及在电站锅炉上的防磨措施[J]. 洁净煤技术,2016,22(3):74-75.
Yang Zhongcan, Liu Jiali, Wang Zhichao, et al. Abrasion characteristics and anti-abrasion measures of semi-coke used for power station boiler[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(3):74-75.

[10] 蔡笑,王小军. 630 MW 超临界锅炉多煤种掺配掺烧试验分析[J]. 华电技术,2012,34(6):1-4.
Cai Xiao, Wang Xiaojun. Experimental analysis on blended burning of multiple kinds of coal in 630 MW supercritical boiler[J]. Huadian Technology, 2012, 34(6):1-4.

[11] 李春雷. 燃煤电厂掺烧褐煤对机组供电煤耗及经济性影响分析[J]. 技术经济与管理,2016(12):145-146.
Li Chunlei. Analysis of effect on the net coal supply cost and economy when coal-fired power plants blending lignite coal[J]. Technology Economy and Management, 2016(12):145-146.

[12] 梁学东,谢昆. 1 000 MW 机组锅炉低热值煤种掺烧的经济性分析[J]. 热力发电,2014,43(11):1-5.
Liang Xuedong, Xie Kun. Economy analysis on co-combustion with low calorific coal in a 1 000 MW coal-fired unit[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(11):1-5.

[13] 谢隼,谭忠富,程晋,等. 节能减排调度环境下燃煤电厂发电成本分析[J]. 电网技术,2011,35(2):137-141.
Xie Ying, Tan Zhongfu, Chen Jin, et al. Generation cost analysis of coal-fired power plant in environment of energy saving and emission reduction dispatching[J]. Power System Technology, 2011, 35(2):137-141.

[14] 袁德权,张继轩,刘长禄,等. 煤质变化对锅炉经济性影响的试验研究[J]. 锅炉制造,2011(6):9-14.
Yuan Dequan, Zhang Jixuan, Liu Changlu, et al. Changes in coal quality on boiler study on the economic impact[J]. Boiler Manufacturing, 2011(6):9-14.

[15] 王文欢,潘秉超,王爱晨,等. 燃煤锅炉掺烧褐煤的经济性与环保特性分析[J]. 锅炉技术,2014,45(2):67-71.
Wang Wenhuan, Pan Bingchao, Wang Aichen, et al. Analysis on economy and environmental characteristics of coal-fired boiler blending brown coal[J]. Boiler Technology, 2014, 45(2):67-71.