

电站煤粉锅炉掺烧兰炭试验研究

杨忠灿¹,程国安²,李炎¹,王志超¹,姚伟¹

(1. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 嘉峪关宏晟电热有限责任公司, 甘肃 嘉峪关 735100)

摘要:为考察兰炭在电站煤粉锅炉上的适应性,确定兰炭在煤粉锅炉上的掺烧比例和方式,在充分掌握兰炭燃料特性基础上,在国内首次进行了配中速磨制粉系统的电站煤粉锅炉掺烧兰炭试验。试验结果表明,电站锅炉燃用兰炭具有减轻燃烧器喷口结渣、大幅降低烟气污染物生成量、对低热值煤具有较好替代作用等优势,试验锅炉可以预混掺烧方式实现安全稳定燃用33%比例的兰炭。针对兰炭的强磨损、低燃尽特性对制粉系统以及锅炉安全经济运行可能产生的不利影响,提出了“预混+防磨+燃烧调整”的燃用兰炭原则。

关键词:煤粉锅炉;兰炭;磨损;预混;掺烧比例;低污染

中图分类号:TK11 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2017)01-0080-06

Experimental research on pulverized coal power station blending with semi-coke

YANG Zhongcan¹, CHENG Guoan², LI Yan¹, WANG Zhichao¹, YAO Wei¹

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. Jiayuguan Hongsheng Electro-Thermal Co., Ltd., Jiayuguan 735100, China)

Abstract: To study the adaptability of semi-coke in power plant boiler, determine its blending ratio and the way when burned in pulverized coal fired boilers, based on the full grasp of fuel properties of the semi-coke, the blending and combustion test of semi-coke in a pulverized coal fired boiler of power station with medium speed mill pulverizing system was carried out for the first time at home. The results showed that blending and combustion with semi-coke had the advantages of reducing slagging, significantly reducing the pollutants generated and alternative the low calorific value coal, and that the pulverized coal fired boiler could blend 33% semi-coke stably by pre-mixing. Considering the effects of semi-coke on the milling system as well as boiler operation, the premix blending mode of utilizing the milling system output margin blending semi-coke and the burning principle of premixing coupled with anti-wearing and combustion adjustment were recommended.

Key words: pulverized coal fired boiler; semi-coke; abrasion; pre-mixing; blending ratio; low pollution

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。自20世纪80年代以

来,陕西省榆林地区企业不断尝试采用中低温干馏工艺,将侏罗纪不黏煤和弱黏煤热解生成固定碳含量较高的兰炭、煤焦油和煤气,逐步成为上接原煤开采,下连载能、煤化工、电力等产业的循环经济链,并形成市场遍布全国、生产集中在陕蒙晋宁接壤区的特色产业,被称为“榆林版煤制油”。

目前全国兰炭总产能已经超过1亿t,但由于传统兰炭市场需求不足导致兰炭产业面临严重的过剩局面,兰炭企业开工率普遍偏低^[1]。为了扩大兰炭

收稿日期:2016-08-19;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.01.015

基金项目:国家能源应用技术研究及工程示范资助项目(20130303);陕西省科技统筹创新工程计划资助项目(2015KTZDGY05-03)

作者简介:杨忠灿(1977—),男,山东阳谷人,高级工程师,从事燃料特性以及电站锅炉高效清洁技术研究工作。E-mail: yangzhongcan@tpri.com.cn

引用格式:杨忠灿,程国安,李炎,等. 电站煤粉锅炉掺烧兰炭试验研究[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(1): 80-85.

YANG Zhongcan, CHENG Guoan, LI Yan, et al. Experimental research on pulverized coal power station blending with semi-coke[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(1): 80-85.

的应用范围,推动兰炭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。杜刚等^[2]通过试验分析兰炭在高炉喷吹上的应用,研究结果表明采用无烟煤、烟煤和兰炭的混合煤可以获得更优良的冶金性能。李硕等^[3]研究了兰炭改性剂配煤炼焦优化。董洁吉等^[4]在实验室条件下进行了烧结矿/兰炭混装还原试验,认为兰炭可以部分代替焦炭。辛收良^[5]分析了兰炭用于化肥造气的试验过程及工艺指标,认为使用兰炭可以实现较佳的经济效益。张鑫^[6]考察了兰炭在民用取暖领域替代无烟煤的可能。但锅炉燃用兰炭的研究甚为缺乏,仅牛芳^[7]在实验室台架上开展了兰炭在煤粉工业锅炉上的燃烧试验。作为一种新型燃料,兰炭具有其特殊性。本文在掌握兰炭的煤粉燃烧特性基础上^[8-10],首次在实际电站煤粉锅炉上开展了不同比例的兰炭掺烧试验,对兰炭在电站锅炉上的安全燃用进行分析,提出电站锅炉在掺烧兰炭时的运行调整方法和注意事项,可为在役电站锅炉燃用兰炭提供理论支撑和技术参考。

1 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锅筒、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。锅炉本体截面为10380 mm×10380 mm,高度为32187 mm。炉膛上部布置有前屏过热器、后屏过热器,水平烟道内由前向后分别布置有末级再热器和末级过热器。水平

烟道转向室和尾部烟道均采用膜式管屏包敷,并由垂直方向的中隔墙使尾部形成前后双烟道。锅炉的炉膛、水平烟道、尾部烟道分别装设有24台炉膛吹灰器、14台长伸缩式吹灰器、4台固定旋转式吹灰器。锅炉在低氮改造完成后,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1台磨煤机出口的4个一次风管道,煤粉燃烧器配置有周界风。在每个角共设置9层二次风喷口,每角最上部设有燃尽风,最下部设有燃油二次风。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4套中速辊式磨煤机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(正常运行三用一备),沿燃烧器高度方向由下至上分别对应A、B、C、D层燃烧器。

2 兰炭燃料特性及掺烧问题

2.1 兰炭燃料特性分析

选取3种典型兰炭粉末、小料与2种典型榆林烟煤及其混煤作为研究对象,煤质数据及燃烧性能见表1。按照GB/T 7562—2010《发电煤粉锅炉用煤质量》标准划分,兰炭产品属于低~特低挥发分、中高~高热值、低灰分、特低硫分、低灰熔融性、难可磨性煤种。根据工业分析、煤粉气流着火炉、一维火焰炉着火距离、一维火焰炉燃尽率以及结渣渣型综合判定得出兰炭产品的着火性能属于中等~难着火、燃尽性能属于难燃尽、结渣性能属于严重结渣。

表1 试验煤样煤质数据及燃烧性能评价

Table 1 Coal quality and combustion performance evaluation of tested samples

项目	低温粉末	中温粉末	中温小料	榆林银河煤	榆林凉水井煤
$M_1/\%$	11.20	14.60	16.70	10.00	10.10
$A_{ar}/\%$	8.98	13.29	6.69	6.24	19.22
$V_{daf}/\%$	10.96	9.92	8.16	38.38	38.27
$w(S_{t,ar})/\%$	0.40	0.39	0.23	0.57	0.37
$Q_{net,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$	25.84	23.15	25.16	26.37	21.88
哈氏可磨性指数 HGI	52	51	43	49	56
软化温度 ST/ $^{\circ}C$	1 120	1 190	1 130	1 100	1 140
磨损指数 Ke	27.7(三级极强)	29.4(三级极强)	39.4(三级极强)	<1(轻微)	<1(轻微)
着火性能	中等着火	难着火	难着火	易着火	中等着火
燃尽性能	难燃尽	难燃尽	难燃尽	易燃尽	易燃尽
结渣性能	严重结渣	严重结渣	严重结渣	严重结渣	严重结渣

2.2 电站煤粉锅炉与兰炭适应性分析

对本试验机组而言,随着兰炭比例的升高,混煤的挥发分大幅下降,冲刷磨损指数大幅升高,硫分和热值小幅下降,灰分和水分小幅升高。考虑到试验机组锅炉的设备特性,兰炭掺烧过程中可能存在锅炉结渣、减温水量过大、壁温超温、低负荷燃烧不稳、煤粉燃尽率低以及磨煤机部件、燃烧器喷口和粉管磨损等风险。因此,需要通过掺配及燃烧调整试验确定合理的兰炭掺烧比例及机组运行方式。

3 试验结果及分析

通过调整制粉系统、燃烧系统运行参数,在保证运行安全的前提下,将兰炭掺烧比例由7%提高至17%、33%;对锅炉的主要运行参数和掺烧方法进行进一步调整,以提高锅炉运行经济性,给出优化的锅炉运行方式。

3.1 制粉系统运行性能

兰炭比例对煤粉细度及磨煤单耗的影响如图1所示。由图1可知,C磨掺烧兰炭后,随着兰炭比例的升高,煤粉细度 R_{90} 值由22.88%逐渐升高至44.60%,磨煤单耗则由11.2 kWh/t下降至9.9 kWh/t;同时磨煤机通风量增加,磨煤机进出口压差由6.6 kPa升高至7.9 kPa,磨煤机最大出力由磨制原煤的20 t/h下降至15 t/h,说明兰炭自身可磨度虽然与原煤基本相同,但会导致磨煤机出力下降,这与刘家利等^[1]在小型钢球磨上试磨时得出的磨制半焦会造成磨煤机出力降低、煤粉细度变粗的结论一致。

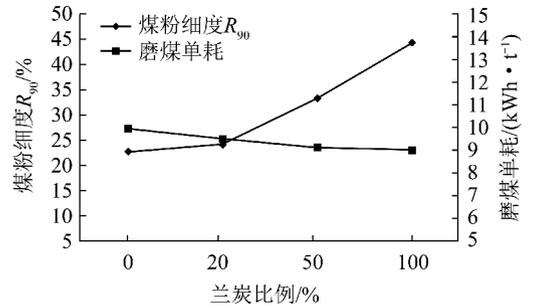


图1 兰炭比例对煤粉细度及磨煤单耗的影响

Fig. 1 Effect of semi-coke ratio on coal fineness and grinding consumption

随着磨煤机内兰炭比例的升高,磨煤机进出口压差升高,出力出现较明显下降,为维持磨煤机出力,需提高磨煤机一次风量。但是由于兰炭的冲刷磨损指数较高,加之提高磨煤机通风量,磨煤机内部件、一次风管、燃烧器喷口磨损可能性增加,试验期间曾出现B、D磨密封圈泄漏和C磨磨辊堆焊部位脱落、粗粉分离器叶片磨损等问题。

3.2 不同掺烧比例下锅炉运行性能

3.2.1 汽水参数

掺烧不同比例兰炭时锅炉汽水参数见表2。由表2可知,随着机组掺烧兰炭比例的提高,锅炉主、再热蒸汽参数正常,过、再热器减温水量有小幅下降,未出现因燃烧推迟导致的减温水量超限、受热面管壁超温问题,低负荷时再热汽温偏低现象得到改善。整体来看,掺烧33%比例兰炭后锅炉汽水参数正常、锅炉能够安全稳定运行。

表2 掺烧不同比例兰炭时锅炉汽水参数

Table 2 Boiler parameters blending with different semi-coke ratios

项目	榆林银河煤		17%比例兰炭		33%比例兰炭	
负荷/MW	110		110		110	
给煤量/(t·h ⁻¹)	49.3		48.3		45.6	
运行磨	ABD		ABC		ACD	
主蒸汽压力/MPa	12.9		13.4		13.4	
主蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	388		395		396	
主蒸汽温度(左/右)/°C	532	532	529	531	539	532
过热器一级减温水量(左/右)/(t·h ⁻¹)	6.3	2.2	2.7	0	0	0
过热器一级减温水开度(左/右)/%	27.4	9.9	5.7	0	0	0
过热器二级减温水量(左/右)/(t·h ⁻¹)	5.7	4.1	2.2	2.1	4.2	3.7
过热器二级减温水开度(左/右)/%	43.3	73.6	2.5	32.8	25.6	56.1
再热器入口压力(左/右)/MPa	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
再热器出口汽温(左/右)/°C	533	527	528	522	519	518
再热器出口压力(左/右)/MPa	2.3	2.3	2.2	2.3	2.4	2.3
再热器减温水量(左/右)/(t·h ⁻¹)	0	4.3	0	2.2	0	3.7
再热器减温水开度(左/右)/%	0	30.6	0	10.3	0	25.6

3.2.2 炉膛温度和结渣

不同兰炭比例下炉温测试结果如图2所示,由图2可以看出,随着兰炭掺烧比例的升高,炉温整体水平出现下降趋势,炉膛出口烟温变化幅度不大,火焰峰值温度和炉膛出口烟温均未出现大幅升高。

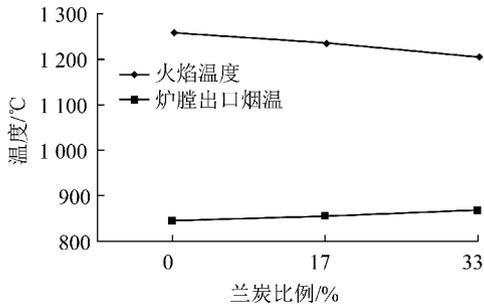


图2 不同兰炭比例下炉温测试结果

Fig. 2 Furnace temperature results in different semi-coke ratios

掺烧33%比例兰炭时,由于炉温水平下降,燃烧器区域结渣减轻,喷口及其周围水冷壁结渣脆性增加而变得容易清除,水冷壁光管被焦层大面积覆盖的情况大幅减轻,锅炉所结渣块大多为黏结强度

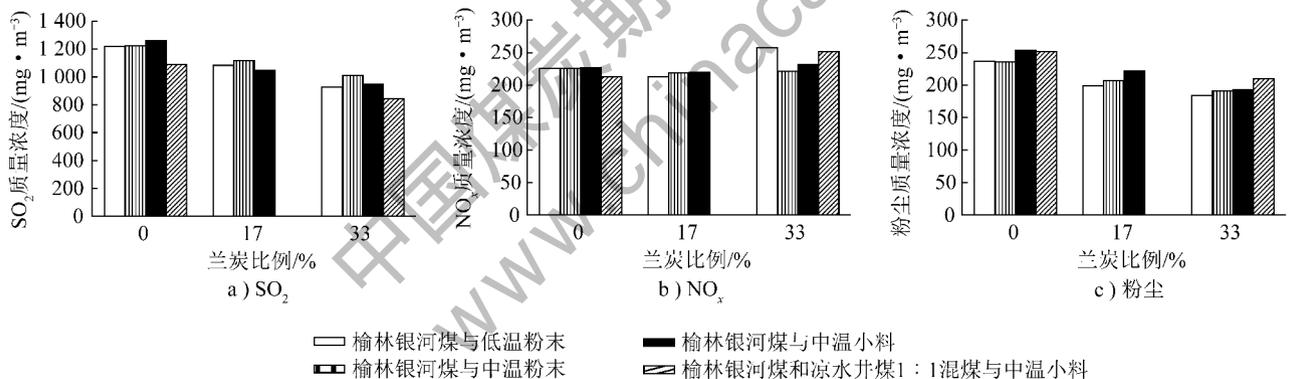


图3 不同兰炭比例下SO₂、NO_x和粉尘排放浓度

Fig. 3 SO₂, NO_x and dust emission concentration in different semi-coke ratios

3.2.4 锅炉效率

不同兰炭比例对锅炉效率的影响如图4所示。由图4可知,掺烧兰炭比例提高后,锅炉飞灰含碳量呈逐渐升高趋势,在兰炭掺烧比例低于17%时,飞灰含碳量升幅较为平缓,当兰炭比例为17%~33%时,飞灰含碳量升幅增加,达到6.8%;锅炉效率总体上呈下降趋势,在排烟温度基本不变的情况下,其变化规律与飞灰含碳量值正好相反,在掺烧33%兰炭时的锅炉效率较燃用榆林银河煤低0.40%。

在当前磨煤机状况下,由于掺烧兰炭磨的B、C磨煤粉细度均处于偏粗状态,并且该煤粉细度通过

较低的多孔性疏松渣,渣块附着在管壁上的一面为未熔融的黏聚状渣,稍有扰动就易松动脱落,对典型渣样的分析结果显示渣块结渣指标、渣强度以及渣硬度均较低。总的来看,掺烧兰炭时在炉膛内没有发现影响生产的严重结渣现象,高负荷运行工况下渣量略有增加,锅炉灰渣系统基本能够适应。

3.2.3 污染物排放特性

不同兰炭比例下SO₂浓度、NO_x排放浓度和粉尘排放浓度如图3所示。由图3可知,锅炉掺烧一定比例兰炭后,SO₂和粉尘排放浓度呈下降趋势、NO_x排放浓度(锅炉未配脱硝装置)有所增加。具体来看,以榆林银河煤掺烧33%比例低温粉末为例,锅炉排放NO_x质量浓度由227 mg/m³增加至252 mg/m³;SO₂质量浓度由1228 mg/m³下降至933 mg/m³,下降约20%;除尘器出口的粉尘质量浓度由236 mg/m³下降至185 mg/m³,下降约20%。说明锅炉环保指标得到较大改善,脱硫系统运行费用将会下降。当锅炉燃用其他煤种时也可以得到类似规律。

分离器挡板、风量和加载压力已无法调整,认为煤粉细度偏粗是造成飞灰含碳量偏高的主要原因之一。飞灰含碳量偏高,一是会使飞灰品质下降,造成飞灰销售困难;二是可能造成电除尘器处二次燃烧;三是对于采用湿法脱硫的电厂来说,容易造成石膏品质下降。因此,对于该煤粉锅炉来说,由于存在煤粉细度过粗和影响锅炉设备运行安全的问题,其所能适应的兰炭最大掺烧比例为33%。而对于其他磨煤机出力裕量大、细度可调和一次风机出力大的烟煤锅炉和容量较大、容积热负荷较小的烟煤锅炉及设计燃用贫煤、无烟煤的锅炉来说,飞灰含碳量可有所下降,兰炭掺烧比例仍有进一步提高的空间。

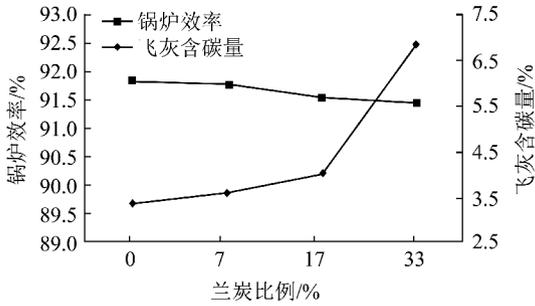


图4 不同兰炭比例对锅炉效率的影响

Fig. 4 Effect of semi-coke ratio on boiler efficiency

3.3 锅炉运行性能

1) 氧含量对锅炉效率的影响。氧含量是锅炉运行的重要参数,锅炉根据煤种的不同确定合适的运行氧含量,既可以保证煤粉燃尽,又可以降低厂用电耗和厂用电率,因此锅炉的排烟热损失 q_2 和固体未完全燃烧热损失 q_4 最小时对应的氧含量即为锅炉的最佳运行氧含量。变运行氧含量试验如图5所示。由图5可知,锅炉在掺烧33%兰炭后,100 MW对应的最佳运行氧含量为3.2%,锅炉在该氧含量曲线下运行,经济性处于较高状态。

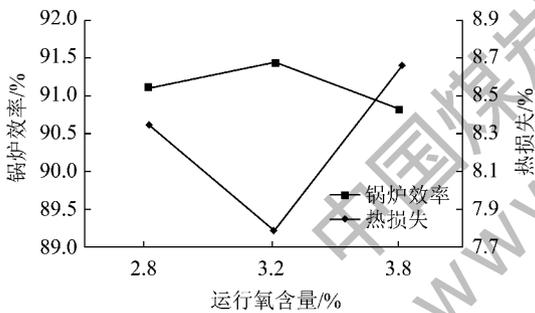


图5 变运行氧量试验

Fig. 5 Variable oxygen test

2) 掺烧方式对锅炉效率的影响。兰炭掺烧比例为33%时,分别进行单磨全烧、2台磨各掺烧50%、3台磨均掺烧33%种方式的兰炭掺烧试验,变掺烧方式试验如图6所示。由图6可知,与单磨全烧兰炭相比,2台磨各掺烧50%、3台磨掺烧33%时锅炉效率分别升高0.42%、0.75%。表明预混掺烧兰炭方式效果较好。此外,预混掺烧可以实现磨煤机、燃烧器的平稳过渡,不使单一设备因所用煤种与设计煤种偏离较多而产生过多的不适应,还可以起到适当推迟煤粉气流着火距离、减轻喷口及其周围水冷壁结焦的作用。

3) 二次风配风方式对锅炉效率的影响。对挥发分低的兰炭来说,为保证其稳定着火和良好燃尽,

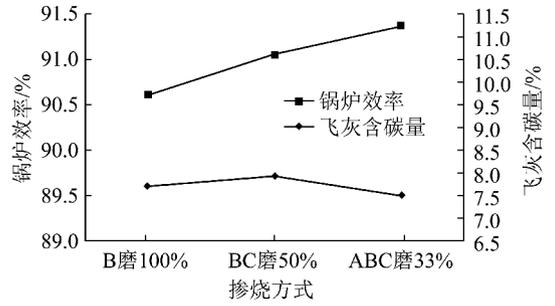


图6 变掺烧方式试验

Fig. 6 Variable blending mode test

需推迟二次风与一次风的混合,即采用掺烧磨的辅助风减小开度的方法,试验过程中在兰炭掺烧比例为33%时进行了均等、正塔、缩腰3种配风方式的对比试验。变二次风配风方式试验结果如图7所示。由图7可知,缩腰、倒塔、均等3种配风方式下的飞灰含碳量分别为7.7%、7.9%、7.1%,锅炉效率分别为91.21%、91.04%、90.98%,说明锅炉的飞灰含碳量变化不大,以缩腰配风时的锅炉效率最高。考虑到采用缩腰方式有利于降低炉底渣碳含量和减轻低灰熔融性煤的锅炉结焦,锅炉在高比例掺烧兰炭时可优先采用缩腰配风方式。

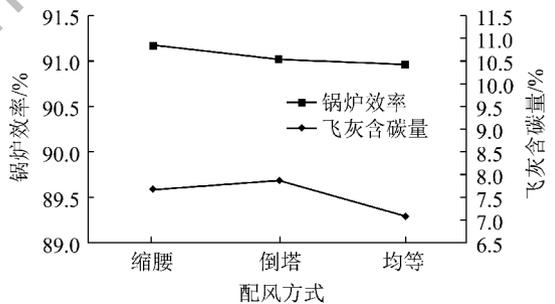


图7 变二次风配风方式试验

Fig. 7 Variable second air distribution mode test

4 结 论

1) 电站煤粉锅炉燃用兰炭在技术上是可行的,以掺烧机组锅炉为例,可以安全稳定燃用33%比例的兰炭。

2) 电站锅炉燃用兰炭具有减轻炉内结渣、大幅降低烟气污染物生成量、对低热值煤具有较好替代作用等优势。

3) 针对兰炭可能造成的磨煤机出力降低问题,建议采用“利用制粉系统研磨出力余量大比例掺烧兰炭”的预混掺烧兰炭掺烧方式。

4) 在不过多降低磨煤机研磨出力、锅炉燃烧效

率的前提下,通过调整锅炉主要运行参数的办法,建议采用“预混+防磨+燃烧调整”的燃用兰炭原则以保证燃烧经济性和机组运行稳定。

参考文献 (References) :

- [1] 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.
- [2] 杜刚, 杨双平. 高炉喷吹用煤的配煤及使用兰炭的试验[J]. 钢铁钒钛, 2013, 34(1): 64-68.
Du Gang, Yang Shuangping. An investigation into coal blending and the addition of semi-coke[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2013, 34(1): 64-68.
- [3] 李硕, 朱子宗, 徐军, 等. 兰炭改性剂配煤炼焦优化[J]. 钢铁, 2012, 47(8): 17-21.
Li Shuo, Zhu Zizong, Xu Jun, et al. Optimization and modification of semi-coke blending for convention coke-making[J]. Iron and Steel, 2012, 47(8): 17-21.
- [4] 董洁吉, 李华, 尹传举, 等. 烧结矿/兰炭混装还原试验研究[J]. 武汉科技大学学报, 2014, 37(1): 5-9.
Dong Jieji, Li Hua, Yin Chuanju, et al. Experimental study on semi-coke charging with sinter in blast furnace condition[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2014, 37(1): 5-9.
- [5] 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.
- [6] 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.

- [7] 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.
- [8] 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 blur-coke as fuel for pulverized coal boiler[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(2): 84-88.
- [9] 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 blur-coke and typical coal[J]. Coal Quality Technology, 2015(6): 56-59.
- [10] 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): 74-83.
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): 74-83.
- [11] 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, 15(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, 15(11): 75-81.

(上接第 79 页)

- [12] 郭平利. 煤制甲醇项目蒸汽系统管网的设计[J]. 化工设计, 2012(4): 22-23, 45.
Guo Pingli. steam system piping design of coal-to-methanol project[J]. Chemical Engineering Design, 2012(4): 22-23, 45.
- [13] 王建辉. 煤制甲醇装置蒸汽系统的优化与改进[J]. 大氮肥, 2015, 38(5): 161-164.
Wang Jianhui. Optimization and improvement of coal to methanol plant steam system[J]. Large Scale Nitrogenous Fertilizer Industry, 2015, 38(5): 161-164.
- [14] 杨国锋, 陈峰. 煤化工项目全厂蒸汽平衡的经验总结[J]. 广州化工, 2013, 41(1): 153-155.
Yang Guofeng, Chen Feng. Experience summary of entire plant

steam balance in coal chemical project[J]. Guangzhou Chemical Industry and Technology, 2013, 41(1): 153-155.

- [15] 杨银仁. 大型煤化工装置全厂蒸汽系统和凝结水系统的优化[J]. 大氮肥, 2015, 38(3): 161-164.
Yang Yinren. Plantwide steam system and condensate system optimization in large scale coal chemical industry plant[J]. Large Scale Nitrogenous Fertilizer Industry, 2015, 38(3): 161-164.
- [16] 舒歌平. 煤炭液化技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2003: 89.
- [17] 林泉. 发展煤化工所面临的 CO₂ 排放问题及其对策[J]. 化学工业, 2007, 25(7): 17-20, 28.
Lin Quan. CO₂ Emission Issue in developing coal chemical industry and preliminary discussion on the emission reduction methods[J]. Chemical Industry, 2007, 25(7): 17-20, 28.