

# 低水分澳煤燃尽特性较差关键因素研究

宋玉彩

(浙江浙能富兴燃料有限公司, 浙江 杭州 310052)

**摘要:**近年来我国燃煤电厂大量进口澳煤,根据煤质特性,澳煤可分为高水分澳煤和低水分澳煤,其中高水分澳煤的煤质指标和燃烧特性与我国神混类煤基本相似,低水分澳煤的煤质指标与我国优混类煤基本相似,但电厂燃用低水分澳煤时存在飞灰含碳量高、锅炉效率下降等问题。为探求低水分澳煤燃尽特性差的关键原因及其判别方法,为低水分澳煤的合理利用或燃煤锅炉优化调整提供指导依据,选取 2 个典型的澳煤煤样和典型的优混煤煤样,采用煤质指标分析、可磨性分析、热分析、孔隙率分析和马尔文粒径分析等方法,对比研究澳煤与优混煤的煤质指标、燃烧特性、孔隙率和粒径分布等差异。研究表明,澳煤的基本煤质指标与国内同类优混差异不大,但氧含量低,说明澳煤的煤化程度高于优混煤;澳煤可磨性系数随氧含量的降低而减小,即随澳煤煤化程度的加深,可磨性变差,因此可通过可磨性系数或氧含量来初步判断澳煤的燃尽特性。采用热分析的燃尽指数  $C_{700}$  判断煤的燃尽特性更符合实际应用情况。相同制粉条件下,澳煤的煤粉细度大,粗颗粒煤粉更多,是其难燃尽的根本原因。

**关键词:**低水分澳煤;燃尽特性;哈氏可磨指数;孔隙率;粒径分布

中图分类号:TK16 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2019)05-0101-05

## Study on key factors of poor burnout characteristic of low-moisture Australian coal

SONG Yucai

(Zhejiang Zheneng Fuxing Fuel Co., Ltd., Hangzhou 310052, China)

**Abstract:** In recent years, a large amount of Australian coal has been imported to coal-fired power plants in China, which can be classified by high-moisture Australian coal and low-moisture Australian coal according to the coal characteristics. The coal quality index and combustion characteristic of high-moisture Australian coal is similar to that of the Shenhun coal in China, while the characteristic of low-moisture Australian coal is similar to that of the Youhun coal in China. It is usually found that the carbon content of fly ash increases and the boiler efficiency decreases when the low-moisture Australian coal is used in coal-fired boilers. In order to explore the key reasons for the poor burnout characteristics of low-moisture Australian coal and their discrimination methods, and provide guidance for the reasonable use of low-moisture Australian coal and the optimization of combustion adjustment, the low-moisture Australian coal and Youhun coal were sampled for research. By means of coal quality index analysis, grindability analysis, thermal analysis, porosity analysis and Malvine particle size analysis, the differences of coal quality index, combustion characteristics, porosity and particle size distribution between Australian coal and premium coal blends were studied. The results show that the coal characteristics are similar between the two coal samples, but the oxygen content of low-moisture Australian coal is lower than that of Youhun coal, which indicates that the coalification level of Australian coal is higher than that of Youhun coal. The Hardgrove grind ability index (HGI) or the oxygen content can be used to determine the burnout characteristics of Australian coal since the HGI decreases when the oxygen content increases. Besides, the defined burnout index  $C_{700}$  of thermal analysis is effective to describe the practical combustion characteristics too. The larger pulverized coal size under the same milling conditions is determined to be the main reason why the low-moisture Australian coal is hard to burn out.

**Key words:** low-moisture Australian coal; burnout characteristic; HGI; porosity; size distribution

收稿日期:2018-12-06;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.18120602

作者简介:宋玉彩(1974—),女,河南临颖人,工程师,硕士,从事电力煤炭技术研究。E-mail:sydcg@sina.com

引用格式:宋玉彩.低水分澳煤燃尽特性较差关键因素研究[J].洁净煤技术,2019,25(4):101-105.

SONG Yucai. Study on key factors of poor burnout characteristic of low-moisture Australian coal[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(4): 101-105.



移动阅读

## 0 引言

工业上判别煤燃烧特性的煤质指标为干燥无灰基挥发分。岑可法等<sup>[1]</sup>指出,挥发分对煤的燃烧特性至关重要,挥发分析出过程增大了煤粒内部空隙及表面积,且挥发分燃烧过程释放出大量热能,有利于提高焦炭的燃烧速率。空气干燥基水分对燃烧具有双重因素影响;灰分在燃烧过程中吸热,灰分过高增加了传热传质阻力,影响煤的燃尽。刘明锐<sup>[2]</sup>通过工业模拟试验发现,挥发分、灰分对煤的燃尽特性影响较大。另外,煤粉细度<sup>[3-4]</sup>、孔隙率<sup>[5-6]</sup>、可磨性系数<sup>[7]</sup>、煤化程度<sup>[8]</sup>等均为重要影响因素。

澳大利亚大陆地质年代古老,矿藏富集带分布广阔,地质条件易于开发,煤、天然气等能源资源储量丰富。澳洲煤炭产量和出口量均居世界前列,包括高品质的烟煤和低品质的褐煤,其中烟煤主要产自昆士兰州和新南威尔士州,用于出口;褐煤主要产自于维多利亚州和澳洲南部,含有较高水分,主要用于本土发电。向轶等<sup>[9-10]</sup>利用热重分析法研究了印尼褐煤、澳洲煤和俄罗斯煤的着火燃烧特性,并利用TG-DTG法确定了3种煤的着火温度、燃尽温度和燃烧特性,并分析煤种、升温速率和煤粉粒径对煤粉燃烧特性和反应动力学的影响。Vuthaluru等<sup>[11]</sup>研究了水分以及煤的混合方式对澳洲烟煤哈氏可磨指数的影响。根据澳煤 $M_{ad}$ 的差异,可分为高水分澳煤和低水分澳煤,高水分澳煤的内水一般在6%以上,灰熔融温度较低,煤质与我国神混煤或蒙混煤相当,燃烧特性基本相似<sup>[12-13]</sup>;低水分澳煤的煤质和灰熔点与我国优混类煤相当,实际燃用过程中的着火特性较接近,但燃尽性能较差<sup>[14-17]</sup>,存在燃烧过程长、燃尽性差、飞灰含碳量增加、减温水量增加、锅炉排烟温度偏高等问题,给电厂掺烧的安全性和经济性带来较大影响。因此,仅用挥发分、空气干燥基水分、灰分等煤质指标判断低水澳煤的燃烧特性具有较大的局限性<sup>[18-20]</sup>。

本文利用热分析对不同煤种的燃烧特性进行试验研究,结合煤质、煤粉孔隙率、煤粉粒径分布等分析,研究影响动力煤燃烧特性的关键因素,获得低水澳煤难以燃尽的关键原因,以期对低水分澳煤的合理利用或燃煤锅炉优化调整提供指导。

## 1 试验仪器及方法

### 1.1 热重分析

采用NETZSCH STA 449C型热重分析仪,试验

样品质量10 mg,升温范围50~1 000 ℃,升温速率15 ℃/min,反应气氛为空气。试验步骤为:① 仪器预热与稳定。试验前依次打开主电源、热重分析仪、计算机和恒温水浴,稳定30 min。② 热重分析仪质量校准和温度标定。③ 基线标定。将未放置任何样品的坩埚放在热电偶端点处的载样台,盖上加热炉体,打开进气阀,进气速率为100 L/min。满足试验条件后启动升温程序,开始试验。④ 称取试样10 mg,在坩埚中均匀分布,放置到载样台,盖上加热炉体,满足试验要求后启动升温程序,升温速率为15 ℃/min,试验结束后即得到样品的TG曲线。⑤ 待仪器恢复到室温后,依次关闭恒温水浴、计算机和热重分析仪,结束试验。

### 1.2 孔隙率分析

孔隙率分析采用Quantachrome AWTOSOB物理化学吸附仪。试验步骤为:① 样品准备。选择样品管类型后,根据样品比表面积大小确定样品质量,对于煤粉样品,质量在1 g以上。② 脱气。设置脱气温度和升温程序,处理4 h左右,可认为脱气完全。③ 样品分析。完成样品脱气操作后进行样品分析站试验,设置测量参数后,进行样品比表面积和孔径测试。④ 数据处理。通过系统自带软件得到比表面积大小、孔径分布数据,输出测试报告。

### 1.3 粒径分析

粒径分布采用Malvern MASTER SIZE R2000激光粒度仪。激光粒度仪的样品制备方法包括湿法和干法2种,考虑煤粉颗粒含水分易团聚的特性,采用全自动湿法进样平台对样品进行分散。样品制备完成后,启动手动程序,在测试开始前进行光路和激光强度校正,收集散射光强度及分布,将光强信号转化为颗粒粒径分布,软件输出粒径分布曲线后试验结束。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 基本煤质特性

将2种实际燃尽性较差的澳煤与工业分析及热值与之相近的国内典型煤种的基本煤质指标进行对比,结果见表1。澳煤与优混煤的工业分析指标差异不大,澳煤灰分略高;C、H含量差异不大,氧和氮含量差异明显,澳煤的氧含量低于优混煤,N含量高于优混煤。煤中O含量和氧形态直接影响煤的性质,煤中有机氧含量随煤化度的增高而减少。可见澳煤的煤化程度高于国内同类煤种。

表1 煤样煤质指标

Table 1 Coal quality index of coal sample

煤种	工业分析/%					$Q_{\text{net,ar}}$ $/(MJ \cdot kg^{-1})$	元素分析/%				
	$M_t$	$M_{\text{ad}}$	$A_{\text{ad}}$	$V_{\text{daf}}$	$FC_{\text{ad}}$		$C_{\text{ad}}$	$H_{\text{ad}}$	$N_{\text{ad}}$	$St_{\text{ad}}$	$O_{\text{ad}}$
澳煤1	9.40	2.83	21.96	36.35	47.87	22.88	63.43	3.87	1.42	0.53	5.96
澳煤2	10.20	3.21	20.40	38.03	47.34	22.80	63.22	4.01	1.40	0.62	7.14
优混煤	9.70	2.24	19.64	36.89	49.31	22.85	63.96	3.97	1.04	0.94	8.22

## 2.2 澳煤哈氏可磨指数与氧含量的关系

图1为不同批次澳煤氧含量( $O_{\text{ad}}$ )与哈氏可磨指数(HGI)的关系。可以看出,澳煤HGI与氧含量基本呈线性关系,随着澳煤氧含量的减少,澳煤的哈氏可磨指数(HGI)呈下降趋势,说明随着澳煤的煤化程度加深,其可磨性变差。

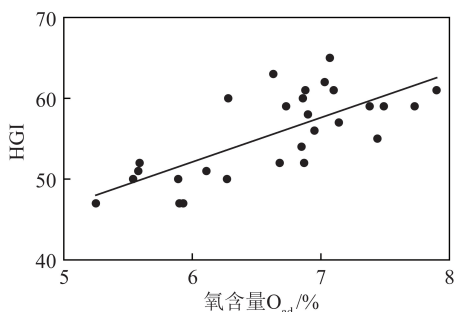


图1 澳煤HGI与氧含量的关系

Fig.1 Relationship between HGI and oxygen content of Australian coal

## 2.3 燃烧特性与煤质的关系

图2为澳煤和国内优混煤、神混煤的TG曲线。总体上看,澳煤的燃烧过程与优混煤相近,因此根据工业分析将低水分澳煤归类于国内的优混类煤,具有一定的可靠性。从燃烧总体过程来看,较难看出澳煤的燃尽性较差。

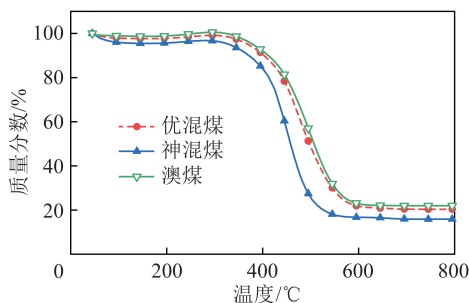


图2 煤样的TG曲线

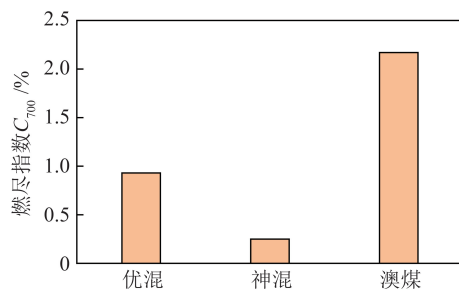
Fig.2 TG curves of coal samples

## 2.4 燃尽指数 $C_{700}$

为了分析实际燃用低水分澳煤时灰渣含碳量偏高的原因,定义一种新的燃尽特性分析方法。从图2可以看出,煤粉升温至1000℃过程中,300~700℃

着火、燃烧并基本燃尽,之后热重曲线基本平稳但仍缓慢失重,一般为煤中难燃部分缓慢燃烧,也可能是极少数可分解的矿物质分解。因此,定义热分析曲线中700℃和1000℃时的质量差为未燃碳质量,未燃碳占700℃时的质量分数为燃尽指数 $C_{700}$ 。

试验煤样的燃尽指数 $C_{700}$ 如图3所示。可以看出,神混煤、优混煤、澳煤的 $C_{700}$ 分别约为0.25%、1%和2%。若采用 $C_{700}$ 判断煤种的燃尽特性,则神混煤的燃尽特性最好,优混煤次之,澳煤最差,这与电站锅炉的实际燃用结果吻合。

图3 不同煤种的燃尽指数  $C_{700}$ Fig.3 Burnout index  $C_{700}$  of the different types of coal

## 2.5 煤粉孔隙结构

煤的孔径分布与其煤化程度关系密切,褐煤的孔隙分布较均匀;长焰煤阶段微孔数量增多,而大孔、中孔数量减少;中等煤化程度的烟煤,微孔居多;高变质煤(如瘦煤、无烟煤),微孔占比较大。

煤粉的微孔是燃烧过程中 $O_2$ 及燃烧产物传质的关键结构,一般认为比表面积、总孔隙体积越大,其燃烧过程中的传质能力越强,燃烧越容易。表2为煤样孔隙率结构参数。可以看出,澳煤2具有更好的燃烧、燃尽特性,但实际上澳煤2的燃烧不理想,说明通过煤粉孔隙结构来判断燃烧特性不具有实际意义。

煤粉燃烧过程中,水分、挥发分先析出,使孔隙结构发生变化,固定碳燃烧是燃尽特性的关键。为进一步判断孔隙结构对煤燃烧特性的影响,对煤样的煤焦孔隙结构进行分析(表3)。煤焦样品的制作根据GB/T 212—2008<sup>[21]</sup>中挥发分分析方法,煤粉

表2 试验煤样的孔隙结构参数

Table 2 Pore structure parameters of test coal sample

煤种	比表面积/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	总孔隙体积/ ( $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ )	平均孔径/ $10^{-10}\text{m}$
澳煤1	3.217	0.012 35	153.6
澳煤2	8.853	0.023 99	108.4
优混煤	3.570	0.017 35	194.4

脱除挥发分后,剩余部分即为煤焦样。根据表3,优混煤煤焦的比表面积仅为  $12.9 \text{ m}^2/\text{g}$ ,而2种澳煤煤焦的比表面积均在  $40 \text{ m}^2/\text{g}$  以上,优混煤煤焦的总孔隙体积也低于澳煤,这与实际应用中低水分澳煤燃尽特性相对较差不一致。因此,通过孔隙结构来分析电力煤的燃烧特性不具有显著的分辨率。

表3 试验煤种煤焦的孔隙结构参数

Table 3 Pore structure parameters of coal char

煤种	比表面积 / $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	总孔隙体积 / $(\text{mL} \cdot \text{g}^{-1})$	平均孔径 / $10^{-10} \text{ m}$
澳煤1	43.81	0.030 60	13.97
澳煤2	43.00	0.039 39	18.32
优混煤	12.93	0.014 35	22.20

## 2.6 煤粉粒径分布

煤粉细度是影响燃烧时间的重要指标,煤粉颗

表4 磨煤机运行参数

Table 4 Operating parameters of cola mills

煤种	给煤量/ ( $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ )	磨煤机 电流/A	一次风量/ ( $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ )	冷风门 开度/%	热风门 开度/%	磨煤机出口 温度/ $^{\circ}\text{C}$	一次风压/ kPa	折向挡板 开度/%
优混	59	47.6	103.5	0	100	75.2	6.7	50
澳煤1	59	55.0	98.5	0	55.5	68.6	7.3	50

对2个工况下的优混煤和澳煤通过马尔文粒度仪进行粒径分布测量,结果如图5所示。实际电站锅炉燃用不同煤种时,磨煤机一般不作调整,如本次试验中磨煤机的静态分离器(折向挡板)开度保持在50%不变,这会导致不同煤种的粒径分布存在较大差异。

由图5中测量结果可见,相比于优混煤,澳煤样品的粒径分布曲线明显更靠右,即澳煤样品中大颗粒更多。根据粒径分布曲线结合积分计算得到煤粉细度  $R_{90}$  和  $R_{200}$ : 优混煤样品的  $R_{90} = 4.78\%$ ,  $R_{200} = 0.58\%$ ,澳煤样品的  $R_{90} = 13.64\%$ ,  $R_{200} = 3.19\%$ 。粒径  $200 \mu\text{m}$  以上时,优混煤样品中已基本没有该尺寸颗粒,而澳煤样品中尚有该尺寸颗粒分布,这些大尺寸煤粉颗粒在实际燃烧过程中对煤粉燃尽效果影响较大,可能造成燃烧拖后,飞灰含碳量高等现象。在同

粒粒径越大,燃烧时间越长。

为分析不同煤种在磨制同一细度时的粒径分布,用小型钢球磨煤机将原煤样磨至  $R_{90} = 20\%$ ,并用马尔文粒径分析仪进行测试,结果如图4所示。煤粉样的总体粒径分布基本相近,优混煤的大粒径颗粒占比更大,无法表征澳煤存在实际燃尽率较差的原因。由于实验室煤粉制样方法与电厂实际磨煤过程存在一定差异,采用某电厂 ZMG113G 型号中速辊式磨煤机,在未作煤粉细度调整的条件下,对2个煤种进行煤粉采样,分析煤粉样的粒径分布,试验时磨煤机参数见表4,可以发现,相同给煤量( $59 \text{ t/h}$ )情况下,磨制澳煤时磨煤电流比磨制优混煤时高  $7.4 \text{ A}$ ,说明相比于优混煤,磨制澳煤需耗费更多能量。

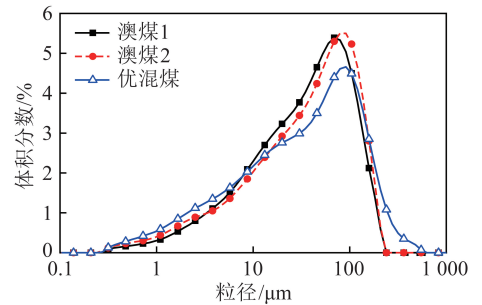


图4 球磨机磨制煤粉的粒径分布

Fig.4 Particle size distributions of pulverized coal grinded by experimental ball mill

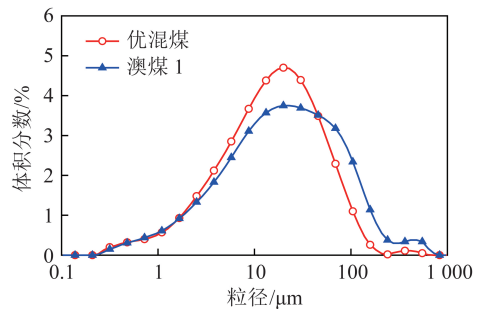


图5 电厂磨煤机磨制煤粉的粒径分布

Fig.5 Particle size distributions of pulverized coal grinded by coal mill in power plant

样磨制条件下,磨制澳煤时磨煤机电流更高,煤粉细度更大,大颗粒煤粉更多,这可能是澳煤难燃尽的根本原因。

### 3 结 论

1) 澳煤的基本煤质指标与国内同类优混差异不大,但氧含量低,说明澳煤的煤化程度高于国内优混煤。

2) 澳煤可磨性系数随氧含量的降低而减小,即随澳煤煤化程度的加深,可磨性变差,因此可通过可磨性系数或氧含量来初步判断澳煤的燃尽特性。

3) 采用热分析的燃尽指数  $C_{700}$  判断煤的燃尽特性更贴近实际应用情况。

4) 相同制粉条件下,澳煤的煤粉细度大,粗颗粒煤粉更多,是其难燃尽的根本原因。

### 参考文献 (References):

[1] 岑可法,姚强,骆仲泱,等.高等燃烧学[M].杭州:浙江大学出版社,2002.

[2] 刘明锐.动力煤煤质与燃烧特性关系的基础研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2010.

[3] 白少林,李宗绪,张建生,等.提高大型低挥发分煤锅炉运行经济性研究[J].中国电力,2006,39(9):79-83.

BAI Saolin, LI Zongxu, ZHANG Jiansheng, et al. Feasibility study on the operating economy of large low-volatile coal-fired boilers [J]. Electric Power, 2006, 39(9): 79-83.

[4] 姜秀民,李巨斌,邱健荣.煤粉颗粒粒度对煤质分析特性与燃烧特性的影响[J].煤炭学报,1999,24(6):643-647.

JIANG Xiumin, LI Jubin, QIU Jianrong. The influence of particle size on compositions analyzing and combustion characteristics of pulverized coal [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(6): 643-647.

[5] 陈鸿,孙学信,韩才元,等.煤粉孔隙结构对燃烧过程的影响[J].化工学报,1994,45(3):327-333.

CHEN Hong, SUN Xuexin, HAN Caiyuan, et al. Effects of porous structure on coal particle reactivity of combustion [J]. CIESC Journal, 1994, 45(3): 327-333.

[6] 张占涛,王黎,张睿,等.煤的孔隙结构与反应性关系的研究进展[J].煤炭转化,2005,28(4):62-68.

ZHANG Zhantao, WANG Li, ZHANG Rui, et al. Research development correlation between pore structure and reactivity of coal [J]. Coal Conversion, 2005, 28(4): 62-68.

[7] 钟德惠,丘纪华.可磨性对混煤燃烧特性的影响[J].电站系统工程,2003,19(2):13-14.

ZHONG Dehui, QIU Jihua. Impact of grinding behavior of blended coals on pulverized fuel combustion character [J]. Power System Engineering, 2003, 19(2): 13-14.

[8] 赵虹,郑敏,周永刚.不同煤化程度煤的可磨性指数变化和破碎特性[J].能源工程,2006(6):29-31.

ZHAO Hong, ZHENG Min, ZHOU Yonggang. Experimental investigation in the grinding behavior and the comminuting character of coals of different rank [J]. Energy Engineering, 2006(6): 29-31.

[9] 向轶,裘立春,洪道文,等.几种国外煤炭燃烧特性的热重实验研究[J].煤炭技术,2015,34(9):302-305.

XIANG Yi, QIU Lichun, HONG Daowen, et al. Thermogravimetric experiment research on combustion characteristics of several kinds of foreign coal [J]. Coal Technology, 2015, 34(9): 302-305.

[10] 向轶,赵卫东,裘立春,等.印尼褐煤和山西烟煤燃烧的热重实验及反应动力学分析[J].热力发电,2015,44(11):14-19.

XIANG Yi, ZHAO Weidong, QIU Lichun, et al. Thermogravimetric experiments and reaction kinetics analysis on combustion of Indonesia lignite and Shanxi bituminous coal [J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(11): 14-19.

[11] VUTHALURU H B, BROOKE R J, ZHANG D K, et al. Effects of moisture and coal blending on hardgrove grindability index of Western Australian coal [J]. Fuel Processing Technology, 2003, 81(1):67-76.

[12] 章勤.澳煤的燃烧特性及其在 600 MW 机组上的应用研究[J].热力发电,2010,39(10):65-68.

ZHANG Qin. Study on burning behavior of Australian coal and its application onto 600 MW units [J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(10): 65-68.

[13] 华晓宇,王睿坤,裘立春,等.基于 ASME 和 GB 两种标准的混煤掺烧锅炉反平衡效率及其不确定度计算[J].热力发电,2016,45(3):34-40.

HUA Xiaoyu, WANG Ruikun, QIU Lichun, et al. Anti-balancing efficiency and its uncertainty analysis of boiler burning mixed coal according to ASME and GB standard [J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(3): 34-40.

[14] 李沙,葛伟.600 MW 机组锅炉掺烧澳煤飞灰含碳量高分析与调整[J].电站系统工程,2016,32(6):73-74.

LI Sha, GE Wei. Analysis and adjustment of high unburned carbon in flue dust for 600 MW unit boilers after blending Australian coal [J]. Power System Engineering, 2016, 32(6): 73-74.

[15] 李彦猛,吴剑波.1 030 MW 超超临界锅炉煤种掺烧适应性试验研究[J].浙江电力,2016(4):46-49.

LI Yanmeng, WU Jianbo. Experimental study on adaptability of blended coal combustion for 1 030 MW ultra-supercritical boiler [J]. Zhejiang Electric Power, 2016(4): 46-49.

[16] 陈立明.1 025 t/h 锅炉燃用印尼煤等进口煤种飞灰可燃物偏大原因分析[C]//浙江省科学技术协会会议论文集.杭州:[s.n.],2012.

[17] 章良利,李敏,赵敏,等.对冲燃烧锅炉低氮燃烧器改造后煤种适应性试验研究[J].浙江电力,2016(11):37-41.

ZHANG Liangli, LI Min, ZHAO Min, et al. Experimental research on coal applicability after low- $\text{NO}_x$  burner retrofit of opposed firing boiler [J]. Zhejiang Electric Power, 2016(11): 37-41.

[18] 陈鹏.中国煤炭性质分类和利用[M].北京:化学工业出版社,2001.

[19] 谢克昌.煤的结构与反应性[M].北京:科学出版社,2002.

[20] 何云华.水对煤燃烧特性的影响[J].煤炭加工与综合利用,2002(2):29-33.

[21] 中国国家标准化管理委员会.煤的工业分析方法:GB/T 212—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.