

# 准东煤掺混焦炭燃烧特性研究

魏 博<sup>1</sup>, 文 彪<sup>2</sup>, 谭厚章<sup>3</sup>, 王 昭<sup>3</sup>, 赵亚涛<sup>1</sup>, 李广林<sup>1</sup>

(1.新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2.新疆宜化化工有限公司, 新疆 昌吉 831700;

3.西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710049)

**[摘 要]** 目前, 新疆准东地区煤化工产业发展较快但产业链并不完善, 导致煤化工过程剩余的大量焦炭不能得到有效的综合利用。本文采用热重分析研究了粒径对准东煤、焦炭的燃烧特性及焦炭掺入准东煤后混合煤样的燃烧特性影响。结果表明: 混合煤样着火特性与准东煤基本一致, 但其燃尽点随着掺混比例增加向后推移; 混合煤样的着火温度比各粒径下的焦炭颗粒提前近 100 °C 左右; 当焦炭颗粒粒径大于 150 μm 时, 混合煤样的燃烧特性随着掺烧比例增加线性变差。建议焦炭颗粒与准东煤掺烧时, 焦炭粒径应尽可能小, 且在实际应用中应在下区燃烧器中掺配, 以降低火焰中心的高度, 增加焦炭的燃烧时间。

**[关 键 词]** 准东煤; 焦炭; 掺混; 燃烧特性; 热重分析; 粒径

**[中图分类号]** TK224 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1002-3364(2017)06-0051-05

**[DOI 编号]** 10.3969/j.issn.1002-3364.2017.06.051

## Co-combustion characteristics of Zhundong coal mixed with coke powder

WEI Bo<sup>1</sup>, WEN Biao<sup>2</sup>, TAN Houzhang<sup>3</sup>, WANG Zhao<sup>3</sup>, ZHAO Yatao<sup>1</sup>, LI Guanglin<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumchi 830000, China;

2. Xinjiang Yihua Chemical Industry Co., Ltd., Changji 831700, China;

3. MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The coke produced by coal conversion chemical process contained high calorific value, however, the coke was treated as solid waste for the lack of downstream industry in Zhundong area. Blending the coke into Zhundong coal during combustion process will recovery a lot of energy. Nevertheless, the combustion characteristics of coal mixed with coke is still ambiguous. In this paper, the combustion characteristics of Zhundong coal and coke with different particle size ranges, and that of the Zhundong coal blended with coke with different particle sizes and proportions were experimentally studied by thermogravimetric analyzer. The results indicated that, the ignition temperatures of Zhundong coal unchanged after the coke powder was co-fired. On the contrary, the burnout temperature of the mixed coal sample became higher than that of the pure Zhundong coal. The ignition temperature of the mixed sample is about 100 °C lower than that of the coke particles. When the particle size of coke was larger than 150 μm, the combustion characteristics of the mixed coal sample worsened dramatically, it changed linearly with the increasing blending ratio. It suggests that, during the combustion process in full-scale boiler, the particle size of the coke should be reduced. Furthermore, the coke powder should be sent into the furnace via the lower layer burners, to reduce the height of flame core and prolong the combustion time of the coke powder.

**Key words:** Zhundong coal, coke, blending, combustion characteristics, thermogravimetric analysis, particle size

准东煤储量巨大, 是我国未来重点发展的主要能源基地之一<sup>[1-2]</sup>。准东煤易于开采, 目前使用均以露天煤为主, 其价格低廉, 且具有挥发分高、灰分

低、着火点较低等特点, 是良好的动力用煤<sup>[3-4]</sup>。然而准东煤碱金属质量分数较高, 灰中 Na<sub>2</sub>O 质量分数通常大于 4%, 远高于由碱金属评定的严重结渣

收稿日期: 2016-10-07

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2016D01C059)

Supported by: Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2016D01C059)

第一作者简介: 魏博(1985—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为煤的清洁高效利用, weiboxju@163.com。

通讯作者简介: 谭厚章(1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为煤粉洁净燃烧、生物质、燃烧与结焦模拟、大型火电厂锅炉与关键辅机节能技术等, Tanhz@mail.xjtu.edu.cn。

的指标(灰中  $\text{Na}_2\text{O}$  质量分数大于 2% 即达到严重结渣范畴)<sup>[5]</sup>。为了能够燃用价格较低的准东煤来降低燃料成本,目前准东地区各单位均采用掺烧低碱金属煤或高岭土的方式来缓解结焦,并获得了较好的效果<sup>[6-7]</sup>。Wang 等人<sup>[8]</sup>指出在准东煤中掺入高岭土,使混合煤样灰中  $\text{Na}_2\text{O}$  质量分数降低至 2% 以下时,通过强化吹灰即可保证锅炉长时间安全运行。

煤化工也是准东煤的一种重要的利用方式,而煤的化工过程将产生大量的焦炭颗粒。由于准东地区工业结构单一,这些焦炭颗粒很难得到下游产业利用。目前,这些焦炭只能作为固体废弃物进行处理,增加了企业的负担。焦炭颗粒含有大量热量,如果这些焦炭颗粒能够送入锅炉进行燃烧,将回收大量的热量。焦炭粉水分和挥发分质量分数很低,掺烧时对准东煤的燃烧特性影响仍不明确。

表 1 准东煤与焦炭样品的工业分析与元素分析  
Table 1 The proximate and ultimate analysis of Zhundong coal and coke

煤种	工业分析 w/%				元素分析 w/%					$Q_{\text{net,ar}}/(\text{MJ kg}^{-1})$
	$M_{\text{ad}}$	$A_{\text{ad}}$	$V_{\text{daf}}$	$\text{FC}_{\text{d}}$	$\text{C}_{\text{d}}$	$\text{H}_{\text{d}}$	$\text{O}_{\text{d}}$	$\text{N}_{\text{d}}$	$\text{S}_{\text{t,ad}}$	
准东煤	10.92	5.50	33.65	62.70	71.32	3.09	8.19	0.54	0.44	22.62
焦炭	1.18	17.54	0.31	88.35	82.12	0.17	6.88	0.82	0.57	33.18

从表 1 可见:准东煤挥发分质量分数较高,达到 33.65%;灰分质量分数较低,仅为 5.55%;全硫质量分数仅为 0.44%,属于低硫煤,但发热量较高,达到了 22.62 MJ/kg;焦炭的水分与挥发分质量分数很低,意味着焦炭在燃烧时着火和燃尽都比较困难;但焦炭颗粒的低位发热量为 33.18 MJ/kg,远高于准东煤,有较高的热量回收价值。2 种样品的灰

本文采用热重分析仪对不同粒径的准东原煤和作为化工废料的焦炭颗粒进行分析,分别获得两者的燃烧特性,并将焦炭颗粒按不同比例掺入准东煤中,进行热重分析,研究准东煤掺混焦炭的燃烧特性,为锅炉运行提供参考。

## 1 实验对象及方法

### 1.1 燃料特性

实验所用准东煤与焦炭样品由新疆宜化化工有限公司提供,其中准东煤样品为该公司自备电厂所用燃料,焦炭产自该公司的煤化工过程。新疆维吾尔自治区产品质量监督检验研究院对 2 种样品分别进行了检测。2 种样品的工业分析、元素分析及发热量见表 1。

成分依据 GB/T 1574—2007 进行测定,分析结果见表 2。由表 2 可见:准东煤灰中  $\text{Na}_2\text{O}$  的质量分数较高,达到 4.03%;而焦炭颗粒中  $\text{Na}_2\text{O}$  质量分数达到 4.95%。这说明在煤化工的过程中,处理温度较低,仅有少量 Na 被气化,但由于水分与挥发分大量释放,造成了灰中  $\text{Na}_2\text{O}$  质量分数反而高于准东煤。

表 2 准东煤与焦炭的灰成分分析  
Table 2 The chemical element analysis for Zhundong coal and coke ash

煤种	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{SiO}_2$	$\text{SO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$
准东煤	4.86	8.55	28.94	7.38	22.70	5.59	0.24	4.03
焦炭	5.69	9.65	7.29	2.98	29.69	10.50	0.75	4.95

### 1.2 实验方法

热重分析法(TGA)是在程序温度控制下测量物质质量和温度关系的一种技术<sup>[9]</sup>。在煤燃烧领域,控制气氛可获得煤燃烧过程中试样失重与温度之间的关系。常采用空气气氛对煤和其他燃料进行热重分析来获得燃烧特性<sup>[10-12]</sup>。本文先将准东煤与焦炭干燥后采用钢球磨煤机进行磨制,再将磨制好的煤粉采用振筛机进行筛分,将准东煤与焦炭分为

0~63  $\mu\text{m}$ 、>63~105  $\mu\text{m}$ 、>105~150  $\mu\text{m}$ 、>150~200  $\mu\text{m}$  及 0~200  $\mu\text{m}$  5 个粒径区间,并开展热重分析试验。

在掺混时先将不同粒径下焦炭粉按 10% 比例掺入 0~200  $\mu\text{m}$  粒径范围的准东煤中,获得准东煤掺混不同粒径下焦炭粉的燃烧特性,并以此结果为依据,选取典型粒径范围按不同比例掺入准东煤中开展热重分析试验,获得准东煤掺混不同比例焦炭粉的燃烧特性。

本文采用德国耐驰 NETZSCH 生产的 STA-409PC 型热天平, 分析所用样品均经 105 °C 烘干 2 h, 实验条件: 样品质量约 10 mg, 升温速率为 20 °C/min, 空气气氛加热, 终温为 1 000 °C。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 准东煤燃烧特性分析

不同粒径准东煤的热重实验结果如图 1 所示。由 TG 曲线可见, 4 种不同粒径的准东煤失重过程可分为两个阶段, 即吸附水释放阶段(80~150 °C)和煤粉颗粒着火燃烧阶段(380~500 °C)。由图 1 可见: 不同粒径下的准东煤煤粉颗粒吸附水释放过程基本一致, 失重曲线基本吻合; 但在煤粉颗粒着火燃烧阶段, 煤粉粒径小于 100 μm 时, 随着煤粉粒径增大, 最大失重峰逐渐向右偏移; 而当煤粉粒径大于 100 μm 时, 煤粉燃烧过程的失重曲线基本一致。不同粒径的煤粉颗粒的着火点无明显变化, 最终剩余的固体残留物质量分数约为 8%。

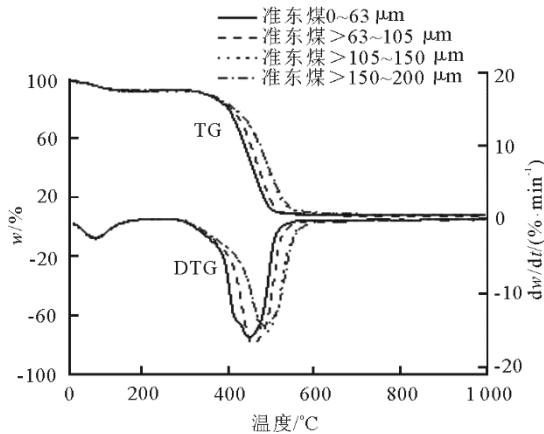


图 1 不同粒径准东煤的热重实验结果  
Fig.1 The TG and DTG curves of Zhundong coal with different particle sizes

### 2.2 焦炭颗粒燃烧特性

不同粒径焦炭颗粒的热重实验结果如图 2 所示。由图 2 可见, 与准东煤不同, 4 种不同粒径的焦炭失重过程仅存在焦炭颗粒的燃烧阶段。这是由于在前期的化工过程中煤粉受热, 水分已被烘干, 因此没有吸附水释放过程。另外, 不同粒径下焦炭的着火点基本相同, 均在 550 °C 左右。但粒径对于焦炭颗粒燃烧特性的影响存在差异: 粒径为 0~63 μm 范围内的焦炭最大失重峰峰值位于 640 °C 左右, 并在 800 °C 左右燃烧结束; 粒径大于 63 μm 以上的焦炭失重峰值位于 800 °C 左右, 并在 900 °C

左右燃烧结束。另一方面, 粒径为 0~63 μm 范围内的焦炭颗粒燃烧后的固相残留物质量分数为 22% 左右, 而粒径在 63 μm 以上的焦炭颗粒固相残留物质量分数均为 13% 左右。这说明, 小粒径的焦炭出现了明显的着火提前现象, 其着火燃烧特性更好, 但其中灰分质量分数较高。

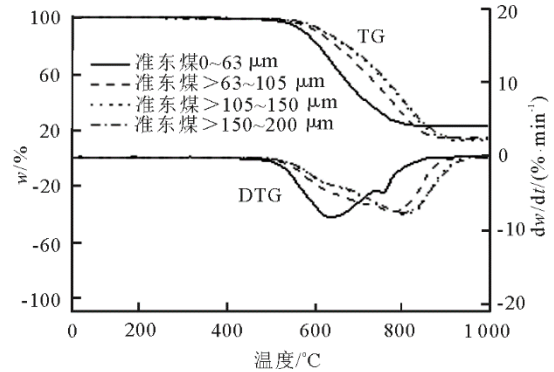


图 2 不同粒径焦炭的 TG 与 DTG 曲线  
Fig.2 The TG and DTG curves of coke with different particle sizes

### 2.3 准东煤掺混焦炭燃烧特性

将 4 种不同粒径焦炭颗粒掺混至 0~200 μm 的准东煤煤粉样品中, 按焦炭颗粒质量分数为 10% 开展掺烧热重实验, 结果如图 3 所示。

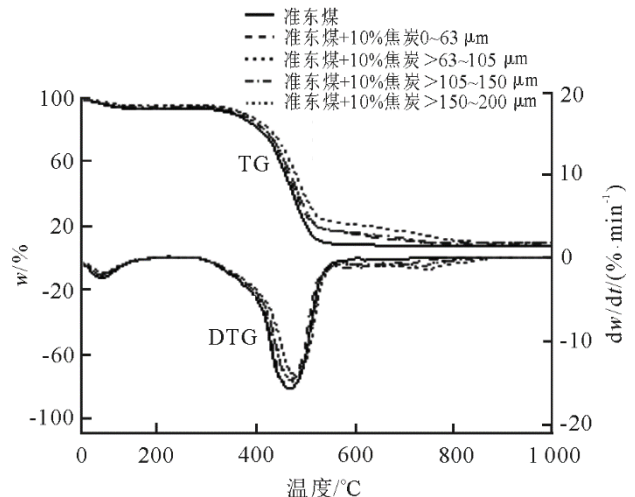


图 3 准东煤掺混不同粒径焦炭的 TG 与 DTG 曲线  
Fig.3 The TG and DTG curves of Zhundong coal blending coke with different particle sizes

由图 3 可见, 在准东煤中掺混焦炭后, 混合煤样的 TG 曲线在 500 °C 左右出现了 1 个拐点, 在拐点之前失重速率较高, 主要是准东煤的燃烧, 而拐点后失重速率降低。参考准东煤与各粒径范围下焦炭的 TG 曲线, 可判定拐点以后的失重主要是焦炭颗粒的燃烧, 但拐点所在位置小于焦炭的着火温

度。在掺入焦炭粒径小于 150  $\mu\text{m}$  时, 混合煤样的燃烧特性开始恶化, 但失重曲线基本一致, 在 780  $^{\circ}\text{C}$  左右燃烧结束。当焦炭粒径大于 150  $\mu\text{m}$  时, 混合煤样的燃烧特性明显更加恶化, 燃烧结束的温度也达到了 850  $^{\circ}\text{C}$  左右。

选取中间粒径的焦炭(63~105  $\mu\text{m}$ ), 分别按质量分数为 5%、10%、15% 和 20% 掺入准东煤中开展掺烧热重实验, 结果如图 4 所示。从图 4 可见: 在准东煤中掺入不同比例的焦炭后, 混合煤样的 TG 曲线也都在 500  $^{\circ}\text{C}$  左右出现拐点; 混合煤样的着火点与燃尽点基本相同, 其中着火点与准东煤相比没有变化, 但燃尽点在 800  $^{\circ}\text{C}$  左右, 远高于准东煤的燃尽点; 混合煤样在着火前与燃尽后阶段的 TG 曲线与准东煤的 TG 曲线基本吻合; 在燃烧阶段, 随着掺烧比例升高, 混合煤样的燃烧特性呈线性逐渐恶化的趋势。

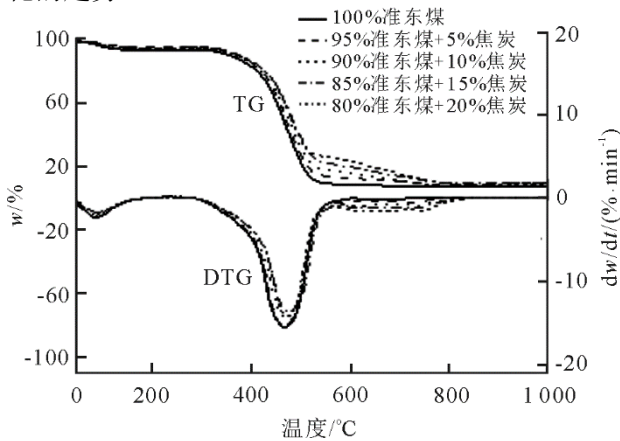


图 4 准东煤(0~200  $\mu\text{m}$ )掺烧不同比例焦炭(63~105  $\mu\text{m}$ )的 TG 与 DTG 曲线

Fig.4 The TG and DTG curves of Zhundong coal (0-200  $\mu\text{m}$ ) blending coke(63-105  $\mu\text{m}$ ) with different proportions

## 2.4 结果讨论

从上述实验结果可见, 准东煤由于挥发分较高, 煤粉颗粒的着火燃烧阶段在 380~500  $^{\circ}\text{C}$  之间, 而焦炭颗粒挥发分质量分数较低, 着火燃烧阶段在 550~900  $^{\circ}\text{C}$  之间。当将焦炭掺入准东煤后, 失重曲线在 500  $^{\circ}\text{C}$  左右出现拐点, 拐点前为准东煤的燃烧过程, 而拐点后为焦炭的燃烧过程。拐点前后曲线圆滑, 说明在准东煤燃烧后期焦炭也开始燃烧。拐点所处的 500  $^{\circ}\text{C}$  小于纯焦炭的着火点 550  $^{\circ}\text{C}$ , 说明准东煤的燃烧过程释放的热量加速了焦炭颗粒的着火, 因此使混合煤样中焦炭颗粒的燃尽点降低了 100  $^{\circ}\text{C}$ , 提前至 800  $^{\circ}\text{C}$  左右。

当准东煤中掺入粒径小于 150  $\mu\text{m}$  的焦炭时, 混合煤样的 TG 曲线基本一致, 但与纯准东煤相比燃烧特性明显恶化。当准东煤中掺入焦炭粒径大于 150  $\mu\text{m}$  后, 燃烧特性恶化更加严重。在掺混不同比例焦炭时, TG 曲线呈线性变化。

TG 与 DTG 曲线只能定性地说明燃料的燃烧特性, 但通过曲线的变化趋势, 可以定性地获得指导锅炉燃烧调整及运行的结论。掺混焦炭后, 混合煤样的发热量升高, 碱金属质量分数降低, 有利于治理锅炉由于碱金属引起的结渣问题。

另外, 对于高碱金属的准东煤来说, 在掺入焦炭后仍需维持火焰中心的高度, 否则屏式过热器处烟气温度一旦上升, 会造成屏式过热器结渣<sup>[13]</sup>。在制粉阶段, 由于焦炭颗粒硬度较大, 需将焦炭颗粒磨制成更细小的颗粒后再与原煤掺混, 若将焦炭颗粒与准东煤混在一起后送入磨煤机, 很难将焦炭颗粒磨得更细<sup>[14]</sup>。虽然在准东煤中掺入小于 150  $\mu\text{m}$  的焦炭颗粒显示的 TG 曲线基本一致, 但热重分析采用的固定床的方式与实际煤粉燃烧仍存在较大差别。当掺入焦炭的混合煤粉送入炉膛, 原煤粉将与焦炭迅速分离。当粗颗粒的焦炭送入锅炉必将引起锅炉火焰中心上移, 并造成未燃尽碳质量分数升高<sup>[15]</sup>。在锅炉运行时, 需将焦炭颗粒送入下区燃烧器, 来降低火焰中心高度, 并延长焦炭颗粒在锅炉内的运动时间。

## 3 结 论

1) 随着粒径增大, 准东煤的 TG 曲线呈现出整体右移的趋势, 但燃烧结束后各粒径下准东煤的固相残留物质量分数也相同; 随着粒径的增大, 焦炭颗粒的 TG 曲线也呈现出右移的趋势, 但燃烧结束后粒径小于 63  $\mu\text{m}$  的焦炭颗粒固相残留物远高于其他 3 种粒径下的焦炭颗粒。

2) 在准东煤中掺烧焦炭后, TG 曲线出现拐点, 拐点前主要是准东煤的燃烧, 而拐点后主要是焦炭的燃烧; 掺烧可降低焦炭颗粒的着火温度和燃尽温度。

3) 在准东煤中掺烧的焦炭颗粒需单独磨制, 且粒径应尽可能小。在锅炉运行时, 焦炭颗粒宜从下区燃烧器送入, 且可通过调整燃烧器向下摆动来降低火焰中心高度, 提高焦炭颗粒的燃烧时间, 从而降低未燃尽碳质量分数。

## [参考文献]

- [1] ZHOU J, ZHUANG X, ALASTUEY A, et al. Geochemistry and mineralogy of coal in the recently explored Zhundong large coal field in the Junggar basin, Xinjiang province, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 82(1/2): 51-67.
- [2] YUAN Y, LI S, YAO Q. Dynamic behavior of sodium release from pulverized coal combustion by phase-selective laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(2): 2339-2346.
- [3] XU J, YU D, FAN B, et al. Characterization of ash particles from co-combustion with a Zhundong coal for understanding ash deposition behavior[J]. Energy & Fuels, 2013, 28(1): 678-684.
- [4] ZHOU H, ZHOU B, LI L, et al. Experimental measurement of the effective thermal conductivity of ash deposit for high sodium coal (Zhundong coal) in a 300 kW test furnace[J]. Energy & Fuels, 2013, 27(11): 7008-7022.
- [5] 于强, 张健强. 燃用高钠煤对锅炉受热面的影响[J]. 锅炉制造, 2012, 4(1): 4-6.  
YU Qiang, ZHANG Jianqiang. Effect of burning high-sodium coal on boiler heating surface[J]. Boiler Manufacturing, 2012, 4(1): 4-6.
- [6] XU L, LIU J, KANG Y, et al. Safely burning high alkali coal with kaolin additive in a pulverized fuel boiler[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(9): 5640-5648.
- [7] WEI B, WANG X, TAN H, et al. Effect of silicon-aluminum additives on ash fusion and ash mineral conversion of Xinjiang high-sodium coal[J]. Fuel, 2016, 181: 1224-1229.
- [8] WANG X, XU Z, WEI B, et al. The ash deposition mechanism in boilers burning Zhundong coal with high contents of sodium and calcium: a study from ash evaporating to condensing[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 80: 150-159.
- [9] 聂其红, 孙绍增, 李争起, 等. 褐煤混煤燃烧特性的热重分析法研究[J]. 燃烧科学与技术, 2001, 7(1): 72-76.  
NIE Qihong, SUN Shaozeng, LI Zhengqi, et al. Thermogravimetric analysis on the combustion characteristics of brown coal blends[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2001, 7(1): 72-76.
- [10] 陈祎, 段佳, 林鹏, 等. 氧量对典型生物质燃烧特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(2): 43-48.  
CHEN Yi, DUAN Jia, LIN Peng, et al. Effect of oxygen concentration on combustion characteristics of typical biomass materials[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(2): 43-48.
- [11] 李梅, 吕硕, 焦向炜. 内在矿物质对煤焦燃烧特性影响的实验研究[J]. 煤炭转化, 2009, 32(2): 33-36.  
LI Mei, LV Shuo, JIAO Xiangwei. Experimental study on influence of included minerals on the char combustion characteristics[J]. Coal Conversion, 2009, 32(2): 33-36.
- [12] 鲜晓红, 杜云贵, 张光辉. TG-DTG/DTA 研究混煤的燃烧特性[J]. 煤炭转化, 2011, 34(3): 67-70.  
XIAN Xiaohong, DU Yungui, ZHANG Guanghui. Combustion characteristics of coal blending by TG-DTG/DTA[J]. Coal Conversion, 2011, 34(3): 67-70.
- [13] 谭厚章, 魏博, 王学斌, 等. 高碱煤燃烧过程中屏式过热器分层结渣机理研究[J]. 中国电力, 2016, 49(8): 167-171.  
TAN Houzhang, WEI Bo, WANG Xuebin, et al. Mechanism investigation of layered slagging at platen superheater during high alkali coal combustion[J]. Electric Power, 2016, 49(8): 167-171.
- [14] 鄢晓忠, 叶兆青, 纪括, 等. 2 070 t/h 超临界对冲火焰锅炉飞灰含碳量偏高原因分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2014, 11(1): 68-74.  
YAN Xiaozhong, YE Zhaoqing, JI Kuo, et al. A cause analysis on high carbon content in fly ash of 2 070 t/h supercritical hedge flame boiler[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2014, 11(1): 68-74.
- [15] 刘彦丰, 刘宏卫. 煤粉粒度对锅炉燃烧影响的数值模拟[J]. 电站系统工程, 2009, 25(6): 11-13.  
LIU Yanfeng, LIU Hongwei. Numerical simulation of influence of pulverized coal particle size on boiler combustion[J]. Power System Engineering, 2009, 25(6): 11-13.

(责任编辑 马昕红)