

# 高钠煤中水溶形态钠对热解的影响

赵冰,王嘉瑞,陈凡敏,李小江

(华电电力科学研究院,浙江 杭州 310030)

**摘要:**为研究新疆准东高钠煤中钠的脱除及水溶性钠对热解过程的影响,采用水洗处理脱除煤中40%钠盐后,在热重分析仪和沉降炉内进行不同加热速率的热解试验,通过热重分析仪、电感耦合等离子体发射光谱仪、气相色谱等仪器表征了热解半焦、气体和焦油的产物分配规律和特性。结果表明,在慢速和快速热解条件下,水洗过程均未对热解过程产生影响,水洗前后热解产物分配情况与气体组成基本一致。水洗脱钠工艺与低温热解提质工艺耦合后,脱除了部分煤(焦)中的钠,与原煤焦相比,水洗后的半焦燃烧特性指数提高约30%。

**关键词:**高钠煤;水洗;脱钠;热解提质

中图分类号:TQ536

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2016)03-0055-06

## Influence of water-soluble sodium on high sodium coal pyrolysis

ZHAO Bing, WANG Jiarui, CHEN Fanmin, LI Xiaojiang

(Huadian Electric Power Research Institute, Hangzhou 310030, China)

**Abstract:** To remove sodium in Xinjiang Zhundong high-sodium coal and study the effects of water-soluble sodium on pyrolysis, series of pyrolysis experiments were carried out in thermogravimetric analyzer and drop tube furnace after washing treatment which could remove about 40% sodium. The distribution and characteristics of char, gas, and tar were inspected through thermogravimetric analyzer, inductively coupled plasma emission spectrometer, gas chromatography, etc. The results showed that washing process had little impact on pyrolysis process under the condition of slow and fast heat rate pyrolysis. The coupling of washing and low-temperature pyrolysis could remove sodium effectively. Compared with the raw coal tar, the combustion performance index of char was increased by 30%.

**Key words:** high sodium coal; washing treatment; sodium remove; pyrolysis upgrading

## 0 引 言

新疆准东煤田位于我国新疆维吾尔自治区准东地区,蕴藏着3 900亿t煤炭资源,能够缓解我国煤炭资源短缺的问题。五彩湾煤是准东煤的典型代表。煤质属次烟煤,无论用作发电或煤化工,都是低污染的洁净原料。但由于煤中钠含量高,导致燃用高钠煤的锅炉均面临沾污、结渣、积灰和腐蚀等问题,严重影响锅炉的正常运行<sup>[1-2]</sup>。煤中钠根据存在形式可以分为无机钠和有机钠<sup>[3]</sup>。采用分级萃取方式可将不同形态的钠进行分离,常用水、

醋酸铵、稀盐酸作分级萃取液<sup>[4-6]</sup>。水可溶解可溶性钠盐和水合离子形式存在的无机钠。醋酸铵在水溶的基础上还可溶解以羧酸盐形式存在的有机钠,盐酸在水溶和醋酸铵溶的基础上还可溶解以配位形式出现在煤结构中含氮或氧官能团上的有机钠。酸不溶则一般均以硅铝酸钠为主。针对准东煤中钠含量高的特点,众多学者开展了广泛研究。陈川等<sup>[7]</sup>考察了不同试验条件下煤中钠的脱除效果。刘大海等<sup>[8]</sup>对准东煤中钠进行分级萃取,并考察不同形态钠脱除的主要影响因素。翁青松等<sup>[9]</sup>利用热重分析仪研究了准东煤碱金属赋

收稿日期:2015-11-09;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2016.03.012

基金项目:国家国际科技合作专项资助项目(2013DFG61490);浙江省钱江人才资助项目(2013R10080)

作者简介:赵冰(1988—),男,湖北钟祥人,助理工程师,硕士,从事煤炭燃烧发电过程等研究工作。E-mail:bing-zhao@chder.com。通讯作者:王嘉瑞,高级工程师,博士,从事煤炭提质和燃烧发电相关研究应用工作。E-mail:jiarui-wang@chder.com

引用格式:赵冰,王嘉瑞,陈凡敏,等.高钠煤中水溶形态钠对热解的影响[J].洁净煤技术,2016,22(3):55-60.

ZHAO Bing, WANG Jiarui, CHEN Fanmin, et al. Influence of water-soluble sodium on high sodium coal pyrolysis [J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(3): 55-60.

存形态以及不同萃取处理方式对其燃烧特性的影响。但准东煤采用预处理脱钠工艺对实际工业中煤的燃烧利用产生的影响鲜有报道,本文在前期对五彩煤高钠煤研究的基础上<sup>[10]</sup>,利用沉降炉模拟实际工业锅炉中快速升温条件,并与慢速升温条件做比较,重点研究了水溶形态钠对热解过程的影响,为水洗脱钠工艺对后续煤炭加工利用产

生的影响做初步评估。

## 1 试验

### 1.1 试验物料

选用粒度 100 ~ 200  $\mu\text{m}$  五彩湾(WCW)原煤为试验样品,其工业分析和元素分析见表 1,煤样 500  $^{\circ}\text{C}$  灰化的灰成分分析见表 2。

表 1 原煤的工业分析与元素分析

Table 1 The proximate and elemental analysis of raw coal

工业分析/%			元素分析/%					发热量/
$M_d$	$FC_d$	$A_d$	$w(C_d)$	$w(H_d)$	$w(N_d)$	$w(S_d)$	$w(O_d)$	( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
30.93	64.98	4.09	75.72	3.63	0.52	0.46	15.58	20.00

表 2 原煤灰成分分析

Table 2 Ash content analysis of raw coal

质量分数/%								
$P_2O_5$	$Fe_2O_3$	MgO	CaO	$TiO_2$	$Al_2O_3$	$Na_2O$	$K_2O$	$SiO_2$
0.09	7.43	5.01	18.66	0.45	9.35	5.49	1.02	25.86

### 1.2 水洗处理

称取约 5 g 干燥煤样,按照水煤质量比 5 : 1,加入纯水,于设定温度搅拌水洗约 2 h,抽滤,收集滤纸上煤样并干燥,滤液定容于 250 mL 容量瓶中,处理后的煤样在 105  $^{\circ}\text{C}$  左右烘干,冷却后装袋,放于干燥器内保存。

### 1.3 慢速热解试验

为研究慢速升温条件下,煤中钠对煤热解的影响,利用热重分析 TGA 对水洗前后不同钠含量的煤样进行了热解试验,条件为:3 ~ 5 mg 样品在惰性气氛下从室温以 20  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升至 110  $^{\circ}\text{C}$ ,恒温 30 min 干燥样品,后继续以 20  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升温速率升至 1 000  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.4 快速热解试验

取干燥原煤和水洗后干燥原煤分别在沉降炉内进行快速热解试验,炉温为 600  $^{\circ}\text{C}$ ,进料时间为 50 min,载气流量为 2 L/min,进料速率为 2 g/min。

沉降床反应器结构如图 1 所示。沉降床反应器主要由 4 部分组成:立式加热炉、进料器、产物收集系统和供气系统。样品从装置顶部通过螺旋进样器加入管式沉降反应器,在下落过程中被加热热解,热解后的样品落入带有水冷夹套的半焦收集器,热解反应停止;高温气体通过支管随载气进入循环水冷

焦油收集装置,收集大部分焦油,支管中装有滤片,减少固体物料混入焦油收集系统;经过一次焦油收集的热解气体进入干冰冷却的焦油收集器,对焦油进行二次吸收和收集,吸收溶剂为甲醇和氯仿的混合物(质量比为 1 : 4),最后经过气体净化和干燥装置后,收集于气袋内,进行气体组分检测。

### 1.5 分析仪器与方法

采用 Pyris 1 热重分析仪在空气气氛下对样品进行燃烧特性分析,样品质量为 3 ~ 5 mg,反应气流量为 20 mL/min,升温速率 20 K/min,温度 30 ~ 1 150  $^{\circ}\text{C}$ 。为了预防煤样灰化过程中钠的挥发,试验借鉴文献[11]的方法,在低温 500  $^{\circ}\text{C}$  对煤样进行灰化处理。灰化方法为取 1 g 左右煤样平铺在定制的刚玉坩埚(80 mm $\times$ 55 mm)上,在马弗炉中 500  $^{\circ}\text{C}$  恒温 2 h,煤样能够完全氧化的同时避免剧烈燃烧。采用安东帕 8XF100 型消解仪消解样品,取 500  $^{\circ}\text{C}$  灰化样品(20 $\pm$ 5)mg,加入 5 mL  $\text{HNO}_3$  和 1 mL LHF,1 200 W 功率下运行 30 min,后加入 15 mL 4% 的硼酸溶液进行络合。采用 Optima 8000 电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-OES)对消解溶液进行灰成分分析,等离子气流量为 10 L/min,雾化气流量为 0.7 L/min,辅助气流量为 0.2 L/min,径向观测。

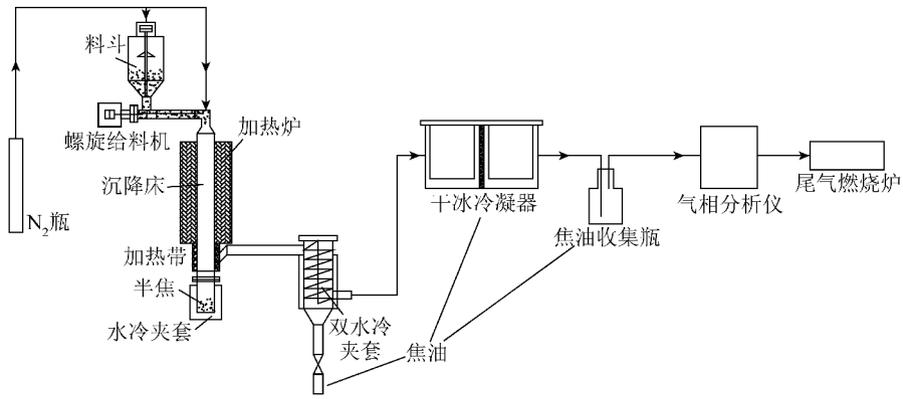


图1 沉降床热解装置流程示意

Fig 1 Schematic diagram of drop tube furnace

## 2 结果与讨论

### 2.1 水洗脱钠效果分析

不同温度条件水洗后煤灰样品中  $\text{Na}_2\text{O}$  测试结果见表3。由表3可知,水洗2 h后煤灰成分中  $\text{Na}_2\text{O}$  含量降低约40%,且随水洗温度升高,钠的脱除率略有增加。研究表明,钠脱除量随水洗时间的增加而增加,水洗温度越高,脱除量受水洗时间的影响越显著<sup>[10,12]</sup>。因此,实际工业应用此方法脱钠时,可通过提高温度和延长时间改善钠的脱除效果。

表3 不同温度水洗煤煤灰中钠含量

Table 3 Sodium content in water-washing coal samples treated at different temperature

水洗温度/°C	$\text{Na}_2\text{O}$ 含量/%
原煤	5.49
30	3.41
40	3.27
50	3.35

### 2.2 水洗对慢速热解的影响

水洗煤热解 TG 和 DTG 曲线如图2所示。由图2可以看出,热解主要集中在 300 ~ 800 °C,与原煤相比,水洗煤样热解曲线略有差异,水洗煤热解半焦产率略有减少,挥发分开始释放温度略有降低。为更清楚地分析讨论,将 TG 曲线微分为 DTG 曲线,引入热解特征参数来评价热解特性,具体有:① 挥发分初析温度  $T_s$ , °C; 通过 TG-DTG 法确定煤的挥发分初析温度,即在 DTGA 曲线上,过峰值点作垂线与 TGA 曲线交于一点,过该点做 TGA 曲线切线,该切线于失重开始时平行线的交点所对应的温度定义为挥发分初析温度,是衡量煤质挥发分析出难易的一

个重要因素;② 挥发分最大释放速度峰值  $(dw/dt)_{\max}$ , %/min;③  $(dw/dt)_{\max}$  对应的温度为  $T_{\max}$ , °C;④  $\Delta T_{1/2}$  为  $(dw/dt)/(dw/dt)_{\max} = 1/2$  时对应的温度区间,即半峰宽, °C;⑤ 定义热解特性指数  $D$ <sup>[13]</sup> 为

$$D = \frac{(dw/dt)_{\max}}{T_{\max} T_s \Delta T_{1/2}} \quad (1)$$

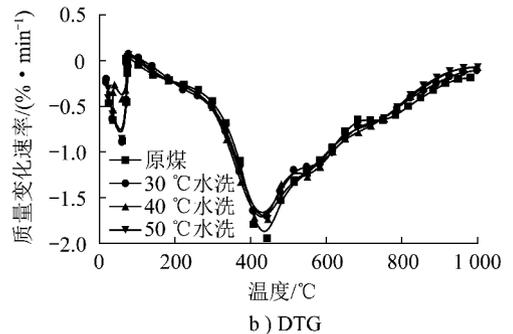
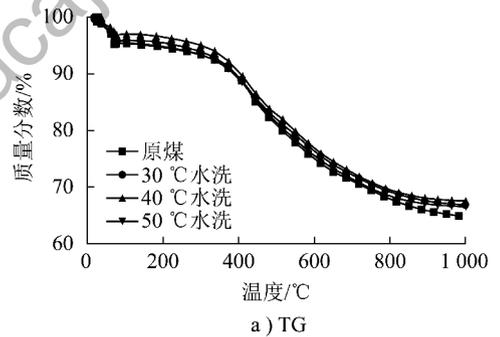


图2 水洗煤热解 TG 和 DTG 曲线

Fig. 2 The pyrolysis TG and DTG curves of water-washing coal samples

热解特性参数见表4。由 DTG 曲线可看出在低温段 200 ~ 400 °C 水洗后煤样质量损失速率减小,而高温段 400 ~ 700 °C 质量损失速率几乎没有变化。熊杰等<sup>[14]</sup>研究表明,最大质量损失速率随钠含量的增加而减小,所以钠的脱除有利于挥发分的快速析

出,最大质量损失温度  $T_{\max}$  几乎没有变化。 $T_{\max}$  代表了整个煤大分子结构的平均稳定程度,水洗后  $T_{\max}$  基本不变说明水洗没有使煤大分子结构发生变

化。热解特性指数  $D$  综合评价水洗对煤热解特性的影响。水洗后  $D$  整体小幅度减小,说明水洗不利于煤热解过程的进行,但总体来说影响不大。

表4 热解特性参数

Table 4 Pyrolysis parameters of samples

样品	$T_s/^\circ\text{C}$	$(dw/dt)_{\max}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	$T_{\max}/^\circ\text{C}$	$\Delta T_{1/2}/^\circ\text{C}$	$D/(10^8\% \cdot \text{min}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-3})$
原煤	340.36	1.90	430.7	250.9	5.17
30 °C 水洗	329.08	1.93	432.4	310.7	4.36
40 °C 水洗	311.24	1.92	430.6	311.2	4.60
50 °C 水洗	336.81	1.91	431.8	292.0	4.50

## 2.3 水洗对快速热解过程影响

### 2.3.1 热解产物分配规律

五彩湾煤水洗前后热解气相、液相和固相产物分配情况见表5。由表5可知,五彩湾煤热解产物主要为半焦和气体,焦油产率较低。经过水洗后热解产物分配情况变化很小,水洗过程对五彩湾在沉降炉内快速热解产物分配规律影响微小。

表5 热解产物分配情况

Table 5 Pyrolysis products distribution

样品	半焦产率/%	焦油产率(含水、细粉)/%	气体产率/%
原煤	69.95	4.13	25.92
水洗煤	69.33	4.46	26.21

注:半焦产率通过灰示踪法计算得到,焦油产率通过差减反应前后收集装置质量确定,气体产率通过差减半焦和焦油产率得到。

### 2.3.2 气体产物成分分析

五彩湾煤水洗前后热解气体产物组成如图3所示。由图3可知,五彩湾煤水洗前后沉降炉内热解气体产物组分含量几乎无变化。

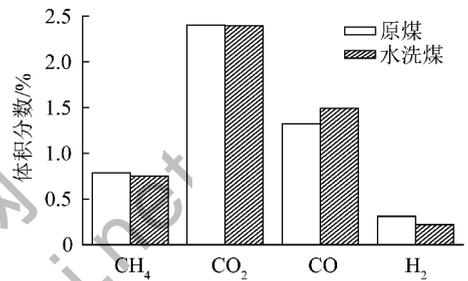


图3 水洗对热解气体产物组成的影响

Fig. 3 The influence of washing treatment on pyrolysis gas composition

### 2.3.3 煤(焦)质特性分析

原煤焦和水洗煤焦的工业分析和元素分析见表6。对比表1、表6可知,随热解挥发分的脱除,煤中灰分和固定碳增加,半焦发热量提高。另外由于煤中含氧官能团小分子在热解过程断裂以挥发分释放出来,剩下结构更为紧凑的芳香环碳主体,使得焦中C/H比明显增大,随热解温度升高,半焦中氧含量明显降低。

表6 原煤焦和水洗煤焦的工业分析和元素分析

Table 6 The proximate and elemental analysis of chars pyrolyzed from raw coal and water-washing coal

样品	工业分析/%				元素分析/%					$Q_{gr,ad}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
	$M_{ad}$	$A_d$	$V_d$	$FC_d$	$w(C_d)$	$w(H_d)$	$w(N_d)$	$w(O_d)$	$w(S_{t,d})$	
原煤焦	0.98	8.48	22.08	69.44	77.66	3.00	0.91	9.38	0.57	28.93
水洗煤焦	1.06	8.22	23.12	68.67	78.15	3.07	0.90	9.18	0.49	28.98

由表6可知,水洗过程由于预先脱除了少量灰分,使得对应热解半焦的灰分略有降低,其他煤质特性参数都非常接近,说明水洗过程只是脱除了水溶性矿物质,对煤的结构基团没有影响<sup>[15]</sup>,未影响到煤的热解过程。

### 2.3.4 燃烧特性分析

原煤、水洗煤和其对应沉降炉热解半焦的燃烧特性曲线如图4所示。由图4可知,4个样品的燃烧TG曲线差异主要在燃点和最大燃烧速率上。为了清晰全面地表征样品的燃烧特性,将TG曲线微

分为 DTG 曲线。原煤和水洗煤热解后半焦的燃烧特性曲线均移向高温区,最大燃烧速率与原煤相比均有不同程度的降低。

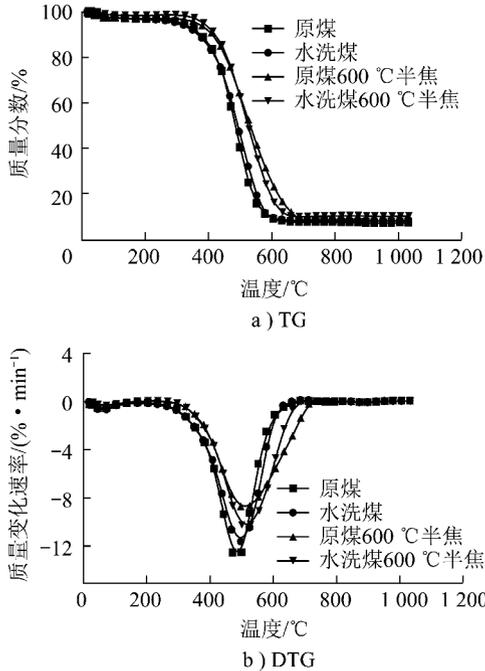


图4 样品燃烧 TG 和 DTG 曲线

Fig. 4 The combustion TG and DTG curves of samples

引入燃点温度  $T_i$ 、燃尽温度  $T_h$ 、平均燃烧速率  $V_{mean}$ 、最大燃烧速率  $V_{max}$ 、最大燃烧速率点对应温度  $T_x$  和燃烧特性指数  $S$  来表征<sup>[16]</sup>。计算公式如下

$$S = \frac{V_{max} V_{mean}}{T_i^2 T_h} \quad (2)$$

表8 煤(焦)灰成分分析

Table 8 Ash content analysis of coal and char

样品	质量分数/%								
	Na <sub>2</sub> O	MgO	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>
原煤	5.49	5.01	1.02	18.66	7.43	9.35	25.86	0.09	0.45
水洗煤	2.64	5.62	1.04	21.18	8.12	10.13	28.27	0.10	0.50
原煤焦	5.32	4.58	1.16	16.63	8.42	9.71	27.89	0.10	0.45
水洗煤焦	2.49	4.66	1.19	17.19	8.18	10.18	31.81	0.10	0.46

### 3 结 论

1) 在热重分析仪内慢速热解和沉降炉内快速热解条件下,水洗没有使煤大分子结构发生变化,水洗过程均未对热解过程产生较大影响,水洗前后热解产物分配情况和气体组成基本一致。

2) 五彩湾煤中水溶形态钠可通过水洗处理加

煤和半焦的燃烧特性参数见表7。沉降炉内热解后,半焦挥发分脱除,燃点、最大燃烧速率温度和燃尽温度均移向高温区,最大燃烧速率减小。燃烧特性指数  $S$  值减小,说明燃烧特性变差。另外,水洗原煤的燃烧特性略差于原煤,但对应的水洗煤热解半焦燃烧特性明显优于原煤热解半焦。水洗脱除部分水溶形态钠后,相比原煤焦, $S$  值增加约 30%,燃烧特性变好。这说明对于热解焦样,水溶形态钠的存在不利于燃烧。

表7 燃烧特性参数

Table 7 The combustion characteristic parameters of samples

样品	$T_i$ / °C	$T_h$ / °C	$T_x$ / °C	$V_{max}$ / %	$S$ / $10^7$
原煤	410.9	652.1	486.6	13.6	5.51
水洗煤	410.5	650.9	493.9	12.0	5.15
原煤焦	415.3	711.3	503.7	8.9	3.39
水洗煤焦	428.7	678.2	517.5	10.6	4.37

#### 2.3.5 半焦炭成分分析

原煤、水洗煤和对应热解半焦的灰成分分析见表8。原煤经过水洗后,部分可溶性盐被洗去脱除,灰中钠含量明显降低,其他元素相对含量升高。原煤和水洗煤经历热解后半焦炭成分中钠均有少部分脱除,但脱除效果不理想。

以脱除,水溶形态钠的存在对燃烧不利。水洗脱除部分水溶形态钠后,相比原煤焦, $S$  值增加约 30%,燃烧特性更好。

3) 水洗脱钠工艺与低温热解提质工艺耦合后,不仅达到了热解产物分级利用的目的,而且由于热解前脱除了煤中部分钠,得到的半焦中钠含量比原煤大幅降低,可有效缓解煤种在电厂锅炉燃烧出现

的结渣和积灰问题,保证锅炉长期安全运行。

### 参考文献(References):

- [1] 杨忠灿,刘家利,何红光. 新疆准东煤特性研究及其锅炉选型[J]. 热力发电,2010,39(8):38-40.  
Yang Zhongcan, Liu Jiali, He Hongguang. Study on properties of Zhundong coal in Xinjiang region and type-selection for boilers burning this coal sort [J]. Thermal Power Generation, 2010, 39 (8):38-40.
- [2] 常家星,杨忠灿. 能够保证锅炉安全运行的准东煤灰沾污指标研究[J]. 锅炉技术,2013,44(6):17-20.  
Chang Jiaying, Yang Zhongcan. Study on Zhundong coal's ash fouling indicator to ensure safe operation of boilers [J]. Boiler Technology, 2013, 44 (6):17-20.
- [3] 汉春利,张军,刘坤磊,等. 煤中钠存在形式的研究[J]. 燃料化学学报,1999,27(6):575-578.  
Han Chunli, Zhang Jun, Liu Kunlei, et al. Modes of occurrence of sodium in coals [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 1999, 27 (6):575-578.
- [4] 刘小伟,徐明厚,姚洪,等. 煤中钠元素赋存形态对亚微米颗粒物形成的影响研究[J]. 工程热物理学报,2009,30(9):1589-1592.  
Liu Xiaowei, Xu Minghou, Yao Hong, et al. Study of occurrence mode of sodium effect on the submicron ash particle formation during coal combustion [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30 (9):1589-1592.
- [5] Shevkopyas V N, Saranchuk V I. The impregnation effect on low and middle rank coals structure reorganization and their behavior during pyrolysis [J]. Fuel, 2000, 79 (5):557-565.
- [6] Li Chunzhu. Some recent advances in the understanding of the pyrolysis and gasification behaviour of Victorian brown coal [J]. Fuel, 2007, 86 (12/13):1664-1683.
- [7] 陈川,张守玉,施大钟,等. 准东煤脱钠提质研究[J]. 煤炭转化,2013,36(4):14-18.  
Chen Chuan, Zhang Shouyu, Shi Dazhong, et al. Study of sodium removal for Zhundong coal upgrading [J]. Coal Conversion, 2013, 36 (4):14-18.
- [8] 刘大海,张守玉,陈川,等. 新疆高钠煤脱钠提质过程中钠存在形式[J]. 煤炭学报,2014,39(12):2519-2524.  
Liu Dahai, Zhang Shouyu, Chen Chuan, et al. Existence form of sodium in the high sodium coals from Xinjiang during its sodium removal process [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39 (12):2519-2524.
- [9] 翁青松,王长安,车得福,等. 准东煤碱金属赋存形态及对燃烧特性的影响[J]. 燃烧科学与技术,2014,20(30):216-221.  
Weng Qingsong, Wang Chang'an, Che Defu, et al. Alkali metal occurrence mode and its influence on combustion characteristics in Zhundong coals [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2014, 20 (30):216-221.
- [10] 赵冰,王嘉瑞,陈凡敏,等. 高钠煤水热脱钠处理及其对燃烧特性的影响[J]. 燃料化学学报,2014,42(12):1416-1422.  
Zhao Bing, Wang Jiarui, Chen Fanmin, et al. Hydrothermal treatment to remove sodium from high sodium coal and its influence on combustion characteristics [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2014, 42 (12):1416-1422.
- [11] Li C Z, Sathe C, Kershaw J R, et al. Fates and roles of alkali and alkaline earth metals during the pyrolysis of a Victorian brown coal [J]. Fuel, 2000, 79 (3/4):427-438.
- [12] 邓磊,张涛,刘银河,等. 水洗对生物质燃料特性及燃烧特性的影响[J]. 工程热物理学报,2010,31(7):1239-1242.  
Deng Lei, Zhang Tao, Liu Yinhe, et al. Effect of washing on fuel properties and combustion characteristics of biomass [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31 (7):1239-1242.
- [13] 付子文,王长安,翁青松,等. 水洗对准东煤煤质特性影响的实验研究[J]. 西安交通大学学报,2014,48(3):54-60.  
Fu Ziwen, Wang Chang'an, Weng Qingsong, et al. Experimental investigation for effect of water washing on Zhundong coal properties [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48 (3):54-60.
- [14] 熊杰,周志杰,许慎启,等. 碱金属对煤热解和气化反应速率的影响[J]. 化工学报,2011,62(1):192-198.  
Xiong Jie, Zhou Zhijie, Xu Shenqi, et al. Effect of alkali metal on rate of coal pyrolysis and gasification [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2011, 62 (1):192-198.
- [15] 王贤华,陈汉平,王静,等. 无机矿物质盐对生物质热解特性的影响[J]. 燃料化学学报,2008,36(6):679-683.  
Wang Xianhua, Chen Hanping, Wang Jing, et al. Influence of mineral matters on biomass pyrolysis characteristics [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2008, 36 (6):679-683.
- [16] 贺业光,杨天华,孙洋,等. 钾对秸秆混煤燃烧特性影响的研究[J]. 燃料化学学报,2011,39(7):507-512.  
He Yeguang, Yang Tianhua, Sun Yang, et al. Influence of potassium on co-combustion characteristic of coal and straw [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2011, 39 (7):507-512.