

低阶煤分质分级梯级利用技术

五彩湾煤微波脱钠提质研究

黄小河,张守玉,江锋浩

(上海理工大学 能源与动力工程学院,上海 200093)

摘要:为探究微波处理对五彩湾煤脱钠提质的影响,使用微波炉及电加热炉对五彩湾煤进行水洗脱钠后并对水洗后五彩湾煤进行微波和传统鼓风干燥试验,使用电感耦合等离子体原子发射光谱仪对原煤及水洗煤样进行Na含量分析。研究表明,五彩湾煤中钠元素主要以水溶性钠形式存在。煤样经200℃微波加热水洗及传统热风干燥后脱钠率可达到51.6%,相同条件下微波水洗脱钠率高于传统电加热水洗脱钠率。传统电加热水洗后煤样微波干燥的条件下,总脱钠率随微波功率增加而增加,200℃微波干燥条件下最佳停留时间为10 min。相同条件下微波干燥脱钠率较传统热风干燥脱钠率高。

关键词:微波;脱钠;五彩湾煤;水洗

中图分类号:TQ536

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2017)05-0001-06

Sodium removal from Wucaiwan coal by microwave treatment

HUANG Xiaohu,ZHANG Shouyu,JIANG Fenghao

(School of Energy and Power Engineering,University of Shanghai for Science and Technology,Shanghai 200093,China)

Abstract:In order to study the effect of microwave treatment on the sodium removal from the Wucaiwan coal,Wucaiwan coal was water-washed in laboratory microwave oven and high-pressure reactor,and the coal sample prepared by water-washing in high-pressure reactor was dried by microwave drying and traditional air drying method,respectively. The sodium content of the raw and treated coal samples was determined by an inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy. The results indicate that the sodium contained in Wucaiwan coal is mainly in the forms of water-soluble sodium. With the increase of temperature,the efficiency of sodium removal from the coal using microwave water-washing followed by traditional air drying increased and reached 51.6% at 200℃. Compared with the electric heating water washing method,the microwave treatment has the higher efficiency of sodium removal. The sodium content of the electric heating water-washed coal sample can be further decreased by the subsequent microwave drying. The best microwave drying time (at 200℃) for the sodium removal from the coal treated by the electric washing is 10 min. Compared with the hot air drying,a higher efficiency of sodium removal was obtained by the microwave drying after the electric heating water washing (200℃) in a short time.

Key words:microwave;sodium removal;Wucaiwan coal;washing

0 引 言

准东煤田位于新疆准格尔盆地东部,是我国乃至世界上最大的整装煤田,预计储量 3.900×10^{11} t,

已探明储量 2.136×10^{11} t^[1]。准东煤具有开采成本低、反应性好、灰分产率低(10%以下)、易燃尽等优点,是低污染的洁净原料^[2]。但准东煤中钠含量远高于其他地区动力用煤,在燃用准东煤过程中,钠易

收稿日期:2017-08-20;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.05.001

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2012BAA04B01);上海理工大学科技发展资助项目(16KJFZ094)

作者简介:黄小河(1994—),女,广西贵港人,博士研究生,从事高碱煤脱钠提质研究工作。E-mail:hxh_usst@163.com。通讯作者:张守玉,教授,E-mail:zhangsy-guo@163.com

引用格式:黄小河,张守玉,江锋浩.五彩湾煤微波脱钠提质研究[J].洁净煤技术,2017,23(5):1-6.

HUANG Xiaohu,ZHANG Shouyu,JIANG Fenghao. Sodium removal from Wucaiwan coal by microwave treatment[J]. Clean Coal Technology, 2017,23(5):1-6.

挥发至烟气中,而后冷凝在水冷壁上与烟气中其他物质反应,形成密实黏结沉淀层,导致锅炉出现严重的沾污结渣问题^[3-5]。因此,对准东煤进行脱钠提质以改善其燃用过程中出现的沾污结渣问题具有重要的现实意义与经济价值。

近年来,许多学者对准东煤脱钠提质进行了研究。张军等^[6]认为煤中钠的存在形式主要为有机钠与无机钠2种,其中无机钠主要以无机盐和水合离子形式存在,而有机钠除了以羧酸盐形式存在外,还以配位形式存在于煤中大分子结构的含氮或含氧官能团上。陈川等^[7]使用自制洗涤溶剂对准东煤进行脱钠提质发现孔隙结构越发达越有利于煤中钠的脱除。刘大海等^[8]通过对高钠煤采用自制洗涤溶剂进行脱钠提质发现水溶性钠的脱除与脱钠温度及洗涤溶液用量有关。在准东煤脱钠提质方面,学者们多采用电加热水洗技术。

对比传统加热方式,微波加热在加热过程中直接向被加热材料内部辐射微波电磁场,微波电磁场以每秒几亿次的速度进行周期变化地透入物料内部,与物料内部的极性分子相互作用。由于物料内部的原有分子无规律热运动及与相邻分子之间的作

用,分子的转动将受到干扰与限制发生“摩擦效应”,使其中一部分能量转化为分子热运动的动能,以热能的形式表现出来^[9-10]。因此,微波加热相较于传统加热方式,不需要外部热源,具有即时性、加热无惰性等优点,是一种新型加热技术^[11-12]。

由于微波独特的加热方式,利用微波对准东煤进行处理是准东煤脱钠提质的一种新型手段。本文通过对五彩湾煤进行微波加热与传统电加热水洗试验及对电加热水洗后的煤样进行微波干燥与传统热风干燥试验,考察微波加热水洗脱钠与传统加热水洗的区别,探讨微波加热水洗脱钠的影响因素,并考察微波干燥促进脱钠过程的可行性,为五彩湾煤微波脱钠处理提供理论依据。

1 试验材料和方法

1.1 试验样品制备

试验选取新疆五彩湾煤作为研究对象。将煤样置于鼓风干燥箱中,在105℃下恒温干燥24h至恒重,将干燥后的煤样破碎研磨并筛分至0.1mm以下,密封置于干燥皿中备用。试验煤种的工业分析、元素分析见表1,灰分分析见表2。

表1 试验用煤的工业分析及元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analyses of coal sample

工业分析				元素分析					%
M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	C_{ad}	H_{ad}	O_{ad}^*	N_{ad}	$S_{t,ad}$	
14.71	4.76	27.84	52.69	61.40	2.61	15.69	0.52	0.31	

注:*表示采用差减法测得。

表2 试验用煤的灰分分析

Table 2 Ash analysis of coal sample

灰分分析/%										DT/	ST/	FT/
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	℃	℃	℃
11.07	11.55	2.72	47.8	2.01	1.30	18.20	0.66	4.26	0.06	1 090	1 130	1 170

1.2 试验装置及流程

1.2.1 原煤萃取试验

取3份25g预处理后的煤样,分别向煤样中按煤液质量比1:30加入第1级萃取液(超纯水)并搅拌均匀,在60℃下恒温水浴2h,水浴过程中每10min搅拌1次。萃取后的煤样用超纯水冲洗后,在105℃干燥2h至恒重,重复萃取试验3次以保证萃取完全。取其中一份经第1级萃取后的煤样进行分析,剩余2份用0.1mol/L的醋酸铵溶液作为

第2级萃取液重复上述操作。醋酸铵萃取完全后一份用于分析,另一份用0.1mol/L的HCl溶液作为第3级萃取液重复上述操作。

1.2.2 微波加热水洗脱钠试验

使用青岛迈克威微波设备有限公司生产的MKC-MID型微波炉进行微波加热水洗脱钠试验。取5g煤样放入消解罐中,按煤液质量比1:2加入超纯水。将消解罐置于微波炉中,微波功率设定为800W,加热终温分别取60、80、100、160、180、

200 ℃。达到目标温度后恒温 10 min,冷却至室温,取出煤样,封存备用。

1.2.3 电加热水洗脱钠试验

使用上海远怀化工科技有限公司生产的 ACF-0.5 电加热炉进行电加热水洗脱钠试验。取 5 g 煤样放入高压反应釜中,分别按照煤液质量比 1:2、1:5 加入超纯水,加热终温取 200 ℃。达到目标温度后停留 3 h,冷却至室温后取出煤样,封存备用。

1.2.4 微波干燥试验

使用青岛迈克威微波设备有限公司生产的 MKC-MID 型微波炉进行微波干燥脱钠试验。取 3 g 经电加热水洗(终温 200 ℃、煤液质量比 1:2、恒温时间 3 h)后的湿煤样放入微波炉中,微波功率取 480、560、640、720、800 W,试验终温为 200 ℃,恒温 10 min。冷却至室温后取出煤样,封存备用。

取 3 g 经电加热水洗(终温 200 ℃、煤液质量比 1:2、恒温时间 3 h)后的湿煤样放入微波炉中,微波功率为 800 W,终温为 200 ℃。达到终温后分别恒温 5、10、15、20 min,冷却至室温,取出煤样,封存备用。

1.2.5 热风干燥试验

使用上海一恒科技有限公司生产的 DHG-9140A 型电热鼓风干燥箱对水洗后煤样进行热风干燥试验。取 3 g 电加热水洗(终温 200 ℃、煤液质量比 1:2、恒温时间 3 h)后的湿煤样放入刚玉瓷舟中,热风流量为 0.5 L/min。待干燥箱温度达到试验终温(200 ℃),将装有煤样的瓷舟放入干燥箱。恒温 3 h 后取出瓷舟,冷却至室温,封存备用。

1.3 试验分析方法

取 0.1 g 煤样,使用上海屹尧仪器科技发展有限公司生产的 TOPEX 微波消解仪用硝酸:氢氟酸(3:1)作为消解液对煤样进行消解,并对消解液使用美国 Teledyne Leeman Labs 公司生产的 Prodigy ICP-OES 电感耦合等离子体原子发射光谱仪测定消解液中钠含量。

2 试验结果与讨论

2.1 五彩湾煤中钠的存在形式

采用不同萃取液逐级萃取的方法可将钠在煤中的存在形式分为水溶性钠、醋酸铵溶钠、盐酸溶钠及不可溶钠 4 种。认为超纯水可萃取出煤中以 NaCl 晶体和水合离子形式存在的无机钠;醋酸铵溶液可

萃取出水溶液不可萃取出以羧酸盐形式存在的有机钠;稀盐酸可萃取出以配位形式存在于煤结构中含氮或含氧官能团上的有机钠;不可溶钠以硅铝酸盐形式存在^[13-15]。五彩湾煤中钠的存在形式如图 1 所示。

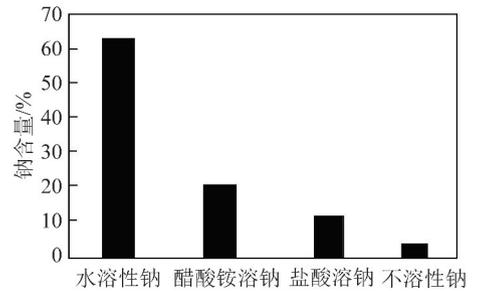


图 1 五彩湾煤中钠的存在形式

Fig. 1 Modes of occurrences of sodium in Wucaiwan coal

由图 1 可见,五彩湾煤中钠主要以水溶性钠形式存在,水溶性钠含量占煤中钠含量的 63%。醋酸铵溶钠含量较水溶钠含量少(21%)。盐酸溶钠含量为 12%,不溶性钠含量仅为 4%。

2.2 温度对五彩湾煤微波加热水洗脱钠的影响

图 2 为五彩湾煤不同温度下微波水洗后经 200 ℃热风干燥后脱钠效果。可见,微波加热水洗脱钠效果在较低温度(60~100 ℃)变化较小。60 ℃时脱钠率仅 30.2%,温度升高至 100 ℃时脱钠率仅增加 4.4%(为 34.6%)。因为低温水洗(60~100 ℃)对煤的结构无影响,其只脱除水溶性矿物质,所以该温度段脱钠率变化并不明显^[16]。

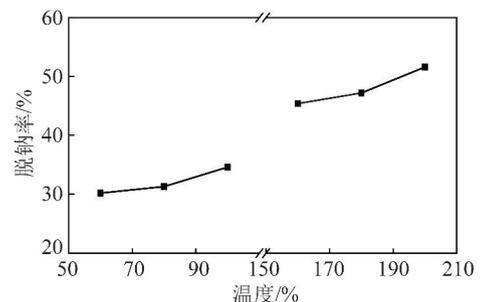


图 2 五彩湾煤不同温度下微波水洗后经 200 ℃热风干燥后的脱钠效果

Fig. 2 Effect of temperature on the sodium removal from the Wucaiwan coal by microwave water-washing followed by traditional air drying at 200 ℃

当温度为 160 ℃时,脱钠率为 45.4%。对比 100 ℃下的脱钠率,温度增加至 160 ℃,脱钠率增加 10.8%。而后随着温度增加,脱钠率继续增加,200 ℃时脱钠率达到 51.6%。一方面随着温度升

高,以羧酸盐和配位形式存在于煤中大分子结构中的含氮或含氧官能团上的有机钠易于脱除,使得洗涤溶液脱除有机钠能力增强;另一方面,在较高温度下,煤结构中以较弱键结合的侧链和部分含氧官能团可能分解析出 CO_2 等气体,煤结构中产生的气体将煤中的含钠洗涤溶液驱除出孔隙,增加脱钠率^[17-18]。

2.3 微波加热水洗脱钠与电加热水洗脱钠的对比

表3为五彩湾煤微波加热与电加热水洗后经200℃热风干燥后脱钠效果对比。以电加热水洗脱钠方式对五彩湾煤进行脱钠,在200℃、煤水比1:2的条件下,脱钠超过3h时脱钠率仅为32.3%。而同条件下使用微波加热,脱钠率达到51.6%仅需1.5h。由此可见,在相同温度及煤液质量比的条件下,微波加热水洗脱钠的效果好于电加热水洗脱钠。微波加热促使煤结构热运动加剧,煤的大分子结构变得疏松及较弱结合侧键断裂,使得内部孔隙裂纹扩展延伸,比表面积增大,有利于洗涤液的热运动,增加脱钠率^[19]。

表3 五彩湾煤微波加热与电加热水洗后经200℃热风干燥后脱钠效果对比

Table 3 Efficiency of sodium removal from Wucuiwan coal by microwave treatment and electric heating followed by traditional air drying at 200℃

脱钠方式	耗水量(以煤液质量比计)	耗时/h	脱钠效率/%
电加热水洗脱钠	1:2	>3	32.3
电加热水洗脱钠	1:5	>3	52.0
微波加热水洗脱钠	1:2	<1.5	51.6

从表3还可看出,以电加热水洗脱钠法处理五彩湾煤时,煤水比1:5、脱钠时间大于3h时脱钠率为52%。与微波加热水洗脱钠相比,在相同温度下,电加热水洗脱钠用水量多、耗时长,工程应用成本高于微波加热法。使用微波加热法可缩短脱钠时间,增加脱钠率。

2.4 微波干燥条件对微波干燥脱钠效果的影响

2.4.1 微波功率的影响

图3为五彩湾煤200℃电加热水洗条件下微波干燥脱钠过程中微波功率对总脱钠率的影响。可见,煤样经电加热水洗及微波干燥脱钠过程后,总脱钠率随微波功率增加而增加。微波功率为480W时脱钠率为32.9%,微波功率增加至800W,脱钠率

增加至44.1%。煤样经电加热水洗脱钠后,湿煤样中仍含有较多水溶性钠。水洗后煤样在微波作用下迅速升温,残留在煤表面及孔隙结构中的水溶性钠随着煤中水分的蒸发而被脱除。在微波加热过程中,随着微波功率的增加,水分子获得热量增加,热运动加剧,有利于水洗后煤样中钠的脱除^[20]。

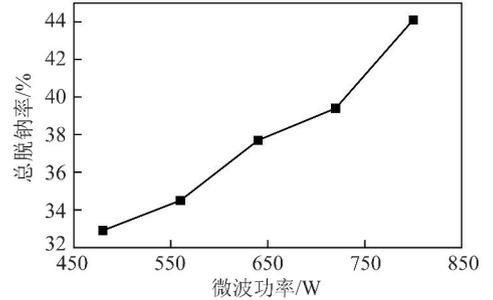


图3 五彩湾煤200℃电加热水洗条件下微波功率对总脱钠率的影响

Fig. 3 Effect of microwave power on the sodium removal from Wucuiwan coal (including the electric heating water washing and microwave drying) at 200℃

此外,随着微波功率增加,加热速率增大,煤样中形成高温高压条件,有利于部分以羧酸盐形式及配位形式结合在煤大分子结构中含氮或含氧官能团上的有机钠的脱除。即在微波功率增加的过程中,煤中一部分有机钠也被脱除。

2.4.2 恒温时间的影响

图4为五彩湾煤电加热水洗条件下微波干燥脱钠过程中干燥阶段停留时间对总脱钠率的影响。可见,微波干燥恒温时间在10min之内时,脱钠率随恒温时间延长而增加。恒温时间超过10min后,脱钠率趋于稳定,达到该温度下最大脱钠率。由此可得,微波干燥脱钠的最佳恒温时间为10min。

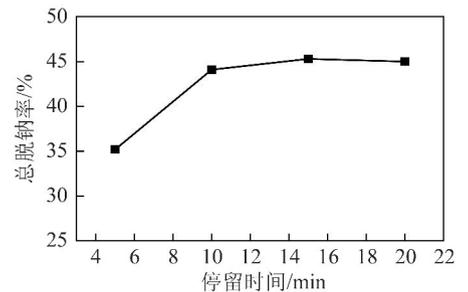


图4 五彩湾煤200℃电加热水洗条件下干燥阶段停留时间对总脱钠率的影响

Fig. 4 Effect of microwave drying soaking time on the sodium removal from the Wucuiwan coal (including the electric heating water washing and microwave drying) at 200℃

2.5 电加热水洗后五彩湾煤热风干燥与微波干燥脱钠效果对比

对五彩湾煤电加热水洗条件下2种干燥方式的总脱钠效果进行对比可知,电加热水洗后煤样热风干燥3h后总脱钠率为32.3%,而相同水洗条件后的煤样经微波干燥仅需10min总脱钠率达44.1%。由于微波干燥时,微波场中的煤样内部迅速升温产生大量蒸汽,有利于脱除煤中水溶性钠^[21]。而采用热风干燥时,煤样由表面向内部逐渐升温,该升温过程较微波干燥缓慢。因此,热风干燥脱钠率较之微波干燥低。

综上,采用微波干燥对水洗煤样进行后期处理相比传统热风干燥更有利于五彩湾煤的脱钠,同时使用微波干燥所需时间也较热风干燥短,采用微波干燥可缩短脱钠工艺流程所需时间。

3 结 论

1)五彩湾煤中钠的存在形式分为水溶性钠、醋酸铵溶钠、盐酸溶钠及不溶性钠4种,主要以水溶性钠形式存在。

2)微波水洗五彩湾煤脱钠率随温度增加而增加。温度为60℃时,微波水洗脱钠率为30.2%。温度升高至200℃时,微波水洗脱钠率增加至51.6%。

3)对比传统电加热,微波加热水洗脱钠可在较短时间内实现高脱钠率。采用微波水洗脱钠可缩短脱钠时间,减少工程应用成本。

4)在电加热水洗后微波干燥的条件下,总脱钠率随微波功率增加而增加,480W时总脱钠率为32.9%,800W时总脱钠率增加至44.1%。200℃时微波干燥的最佳恒温时间为10min,10min后脱钠率趋于稳定。

5)对比传统热风干燥,微波脱钠干燥耗时短,脱钠率高,采用微波脱钠可极大地缩短五彩湾煤脱钠工艺流程所需时间,增加脱钠率。

参考文献 (References):

[1] CHU Liangyin, PARK S H, TAKEO Yamaguchi A, et al. Preparation of micron-sized monodispersed thermoresponsive core shell microcapsules[J]. *Langmuir*, 2002, 18(5): 1856-1864.

[2] 张守玉, 陈川, 施大钟, 等. 高钠煤燃烧利用现状[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(5): 1-12.

ZHANG Shouyu, CHEN Chuan, SHI Dazhong, et al. Situation of combustion utilization of high sodium coal[J]. *Proceedings of*

the CSEE, 2013, 33(5): 1-12.

- [3] 陈川, 张守玉, 刘大海, 等. 新疆高钠煤中钠的赋存形态及其对燃烧过程的影响[J]. *燃料化学学报*, 2013, 41(7): 832-838.
- CHEN Chuan, ZHANG Shouyu, LIU Dahai, et al. Existence form of sodium in high sodium coals from Xinjiang and its effect on combustion process[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2013, 41(7): 832-838.
- [4] 白杨. 锅炉全烧准东煤沾污结渣特性分析[J]. *洁净煤技术*, 2017, 23(3): 118-123.
- BAI Yang. Analysis of slagging and fouling characteristics in a purely burning zhundong coal boiler[J]. *Clean Coal Technology*, 2017, 23(3): 118-123.
- [5] 史慧娟, 王锦生, 张秀昌, 等. 煤中钠的赋存形态与迁移规律对煤沾污性的影响[J]. *洁净煤技术*, 2016, 22(6): 66-70.
- SHI Huijuan, WANG Jinsheng, ZHANG Xiuchang, et al. Influence of sodium occurrence mode and migration on fouling characteristic of coals[J]. *Clean Coal Technology*, 2016, 22(6): 66-70.
- [6] 张军, 汉春利, 颜峥, 等. 煤中钠在燃烧初期行为的研究[J]. *燃料化学学报*, 2001, 29(1): 49-53.
- ZHANG Jun, HAN Chunli, YAN Zheng, et al. Experimental studies on the behaviour of sodium of coal in the initial stage of combustion[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2001, 29(1): 49-53.
- [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 on 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] 祝圣远, 王国恒. 微波干燥原理及其应用[J]. *工业炉*, 2003(3): 42-45.
- ZHU Shengyuan, WANG Guoheng. Principle and application of microwave drying[J]. *Industrial Furnace*, 2003(3): 42-45.
- [10] 张天琦, 崔献奎, 张兆镛. 微波加热原理、特性和技术优势[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2008, 25(7): 9-14.
- ZHANG Tianqi, CUI Xiangui, ZHANG Zhaotang. Principle, characteristics and technical superiority of microwave heating[J]. *Road Machinery & Construction Mechanization*, 2008, 25(7): 9-14.
- [11] 艾立群, 张彦龙, 朱伟姮, 等. 微波加热技术在冶金工业中的应用[J]. *冶金能源*, 2013(6): 42-44.
- AI Liqun, ZHANG Yanlong, ZHU Yiheng, et al. Application of the microwave heating technology in metallurgical industry[J]. *Energy for Metallurgical Industry*, 2013(6): 42-44.
- [12] 宋增凯, 陈菓, 彭金辉, 等. 微波加热技术在典型冶金工艺中

- 的应用研究进展[J]. 矿冶, 2014, 23(3): 57-63.
- SONG Zengkai, CHEN Guo, PENG Jinhui, et al. Research progress of application of microwave heating in typical metallurgical technology[J]. Mining & Metallurgy, 2014, 23(3): 57-63.
- [13] 卫小芳, 黄戒介, 房倚天, 等. 外加 NaCl 和 NaAc 褐煤在气化过程中钠的形态变迁规律研究[J]. 燃料化学学报, 2009, 37(1): 6-10.
- WEI Xiaofang, HUANG Jiejie, FANG Yitian, et al. Transformation of sodium during gasification of a lignite with addition of NaCl and NaAc[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2009, 37(1): 6-10.
- [14] 卫小芳, 刘铁峰, 黄戒介, 等. 高钠煤及其洗煤的气化反应研究[J]. 煤炭转化, 2008, 31(3): 10-13.
- WEI Xiaofang, LIU Tiefeng, HUANG Jiejie, et al. Study on the gasification reactivity of high-sodium coal and washed coals[J]. Coal Conversion, 2008, 31(3): 10-13.
- [15] BENSON S A, HOLM P L. Comparison of inorganic constituents in three low-rank coals[J]. Industrial & Engineering Chemistry Product Research & Development, 1985, 24(1): 145-149.
- [16] 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.
- [17] 赵卫东, 刘建忠, 周俊虎, 等. 低阶煤高温高压水热处理改性及其成浆特性[J]. 化工学报, 2009, 60(6): 1560-1567.
- ZHAO Weidong, LIU Jianzhong, ZHOU Junhu, et al. Hot water treatment of low rank coal in high temperature and high pressure reactor and its slurry ability[J]. CIESC Journal, 2009, 60(6): 1560-1567.
- [18] 刘红缨, 郜翔, 张明阳, 等. 水热法改性褐煤及含氧官能团与水相互作用的研究[J]. 燃料化学学报, 2014, 42(3): 284-289.
- LIU Hongying, GAO Xiang, ZHANG Mingyang, et al. Study on lignite modified by hydrothermal and the interaction between the oxygen containing functional groups and water[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2014, 42(3): 284-289.
- [19] 金涛, 张守玉, 施登宇, 等. 高钠煤调湿后微波脱钠处理实验研究[J]. 热能动力工程, 2016, 31(4): 95-99.
- JIN Tao, ZHANG Shouyu, SHI Dengyu, et al. Experimental study on the microwave treatment to remove sodium from high sodium coal after humidifying[J]. Journal of Energy for Thermal Energy and Power, 2016, 31(4): 95-99.
- [20] 赵希强, 宋占龙, 刘洪贞, 等. 农作物秸秆微波热解特性试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 210-214.
- ZHAO Xiqiang, SONG Zhanlong, LIU Hongzhen, et al. Experiment on microwave pyrolysis of crop straw bale[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10): 210-214.
- [21] 安可民. 微波干燥法在煤中水分快速测试的应用[J]. 煤质技术, 2007(3): 22-24.
- AN Kemin. The application of microwave drying in rapid moisture measurement of coal[J]. Coal Quality Technology, 2007(3): 22-24.