

# 前处理方法对准东煤中钠含量测定的影响

董倩<sup>1,2</sup>, 张海霞<sup>1</sup>, 朱治平<sup>1</sup>

(1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**为研究前处理方法对准东煤中钠含量测定的影响,以新疆准东木垒煤和五彩湾煤为原料,对比分析了逐级萃取、直接消解、815℃高温灰化、575℃低温灰化4种前处理方法对煤中钠含量测定的影响。结果表明:2种煤样中水溶性钠均占各自总钠含量的70%以上,硅酸盐形式的钠元素均不足5%。4种前处理方法测定2种准东煤中钠含量的大小顺序均为:逐级萃取>575℃低温灰化>直接消解>815℃高温灰化;煤样逐级萃取过程中并无钠损失,钠含量测定结果准确,但操作步骤多、耗时长;2种煤直接消解的钠元素含量为煤样逐级萃取的75%以上;815℃高温灰化时钠元素含量均不足煤样逐级萃取的60%;575℃低温灰化钠元素含量均在煤样逐级萃取的85%以上。因此575℃低温灰化是一种简单、快捷、较准确获得准东煤中钠含量的前处理方法。

**关键词:**准东煤;前处理;钠含量;逐级萃取;消解;灰化

中图分类号:TQ534;TD849

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2015)02-0081-04

## Influence of pretreatment on Na content analysis of Zhundong coal

DONG Qian<sup>1,2</sup>, ZHANG Haixia<sup>1</sup>, ZHU Zhiping<sup>1</sup>

(1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to improve accuracy of Na content measurement, two Zhundong coal containing high Na were used as research objects. Four pretreatment methods which were stepwise extraction (Method 1), direct digestion (Method 2), 815℃ high temperature ashing (Method 3), 575℃ low temperature ashing (Method 4) were investigated to find out their influence on Na content measurement. The results showed that, the sodium contents in Zhundong coal samples were very high, water-soluble Na accounted for more than 70%, the Na in the form of silicate accounted for less than 5%. The measurement results from high to low were Method 1, Method 4, Method 2, Method 3. There were no Na loss by Method 1 and the measurement results were accurate, while the experimental procedure was cumbersome and time-consuming. The content of Na gotten by Method 2, 3, 4 accounted for more than 75%, less than 60% and more than 85% of the Na gotten by Method 1. So treated by Method 4, the measurement of Na content became more accurate and rapid.

**Key words:** Zhundong coal; pretreatment; Na content; stepwise extraction; digestion; ashing

## 0 引言

新疆准东地区煤炭资源丰富,预测储量达 $3.9 \times 10^{11}$  t,目前累计探明储量达 $2.136 \times 10^{11}$  t,煤田成煤面积达1.4万平方公里,是我国乃至世界上最大的整装煤田<sup>[1]</sup>。准东煤灰分低、燃点低、燃烬率高,是

优良的动力用煤和煤化工原料<sup>[2]</sup>。然而,准东煤中碱金属钠含量较高,远超国内其他煤种,电厂燃用准东煤时出现了锅炉燃烧器、换热面沾污现象,影响电站锅炉的安全、稳定运行。准东煤中钠含量高是导致准东煤热利用过程中结渣、沾污、积灰问题的关键因素<sup>[3]</sup>。煤样前处理方法对准东煤中钠含量的检

收稿日期:2015-02-15;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2015.02.018

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21306193);中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDA07030100)

作者简介:董倩(1988—),女,河南新乡人,硕士研究生,从事准东煤气化反应研究。E-mail:dongqianasd@126.com。通讯作者:张海霞,E-mail:zhanghaixia@iet.cn

引用格式:董倩,张海霞,朱治平.前处理方法对准东煤中钠含量测定的影响[J].洁净煤技术,2015,21(2):81-84,88.

DONG Qian, ZHANG Haixia, ZHU Zhiping. Influence of pretreatment on Na content analysis of Zhundong coal[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2): 81-84, 88.

测具有重要影响。在热利用过程中,煤中钠极易挥发,如仍按照 GB/T 1574—2007《煤灰成分分析方法》在 815 ℃ 条件下缓慢灰化制灰,必然会使准东煤中钠含量较实际值产生偏差,因此,有必要对准东煤中钠元素检测的前处理方法进行系统研究。煤中钠可分为有机钠和无机钠,也可分为水溶性钠、醋酸铵溶钠、稀盐酸溶钠和不溶性钠。煤样逐级萃取是确定钠元素赋存形态和含量的有效方法<sup>[4]</sup>。汉春利等<sup>[5]</sup>采用水、NH<sub>4</sub>Ac、HCl、HNO<sub>3</sub> 逐级萃取煤样,认为煤中钠主要以 4 种形式存在。单独的钠离子(水溶),存在于羧酸盐中或以配位形式出现在煤结构氮氧官能团中的钠(醋酸铵溶),以非晶体结构连接在黏土表面的钠(盐酸溶),以硅铝酸盐形式存在的钠(不溶)。Quyn 等<sup>[6]</sup>认为无机钠主要以水溶离子形式存在;卫小芳等<sup>[7]</sup>认为水溶性钠主要以 NaCl 形式存在;Benson 等<sup>[8]</sup>认为有机钠主要以配位形式存在于含氧和含氮官能团上,不溶性钠主要是钠的硅铝酸盐。煤中钠元素存在形式的多样性以及煤自身结构的复杂性和不均匀性导致煤样前处理方法较多<sup>[9-11]</sup>。除了逐级萃取法,煤中钠元素测定的前处理方法还包括高温灰化法、低温灰化法以及直接消解法。高温灰化法以 GB/T 1574—2007 为依据,将煤样在 815 ℃ 条件下缓慢灰化,所得灰样经酸分解后用火焰光度计或原子吸收分光光度计(AAS)测定钠元素含量,也可根据 MT/T 1014—2006《煤灰中主要及微量元素的测定方法:电感耦合等离子体原子发射光谱法》测定煤灰中钠元素含量;低温灰化法以 ASTM E1755-01(2007)《Standard test method for ash in biomass》为依据,将煤样在 575 ℃ 条件下缓慢灰化,所得灰样用酸分解后再测定钠元素含量。付子文等<sup>[9]</sup>对比了灰化温度对准东煤中钠元素测定

的影响,结果表明 815 ℃ 高温灰化法导致钠的测定结果偏低,575 ℃ 灰化时煤中钠基本保持了其在煤中的形态;Zevenhoven 等<sup>[10]</sup>、杨明等<sup>[11]</sup>、陈川等<sup>[12]</sup>采用水、乙酸铵、HCl、HNO<sub>3</sub> 等逐级萃取煤中不同赋存形态的钠,逐级萃取准东煤中钠含量明显高于高温灰化样品中钠含量。刘晶等<sup>[13]</sup>、王瑋等<sup>[14]</sup>使用不同酸成分直接微波消解煤样,研究表明使用 HNO<sub>3</sub>-HF 消解钠元素回收率较高,但数据波动较大。上述研究表明,煤样前处理方法对钠元素含量的检测具有重要影响,然而大多数研究只对某 1 种或 2 种前处理方法进行探讨,尚缺少系统研究。笔者以 2 种新疆准东高钠煤为研究对象,对比分析了逐级萃取、煤样直接消解、煤样 815 ℃ 高温灰化和煤样 575 ℃ 低温灰化 4 种前处理方式对准东煤中钠元素含量测定的影响,以期获得准确测定准东煤中钠元素含量的前处理方法,实现准东煤的清洁利用。

## 1 试验条件

### 1.1 试验煤样

试验采用的 2 种准东煤样分别产自新疆准东木垒煤矿(ML)和新疆准东五彩湾煤矿(WCW)。煤样经破碎、筛分后,选用粒径为 0.18~0.355 mm 煤样。试验前将煤样研磨至 0.2 mm 以下,将煤样置于鼓风干燥箱中在 105 ℃ 下干燥 24 h,取出后置于密封瓶中备用。

煤样工业分析和元素分析见表 1,灰成分分析(GB/T 1574—2007)见表 2。由表 1、表 2 可知,2 种准东煤灰分较低;灰成分中 Na<sub>2</sub>O 含量较高,其中 ML 煤灰成分中 Na<sub>2</sub>O 高达 7.86%,WCW 煤灰成分中 Na<sub>2</sub>O 为 3.92%;2 种煤灰成分中 K<sub>2</sub>O 含量较低,均不足 1%。

表 1 原煤工业分析和元素分析

煤样	工业分析/%				元素分析/%				
	$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{daf}$	$FC_{ad}$	$w(C_{ad})$	$w(H_{ad})$	$w(O_{ad})$	$w(S_{ad})$	$w(N_{ad})$
ML	14.32	8.18	33.23	51.73	61.64	3.03	11.39	1.00	0.62
WCW	15.64	5.03	42.93	45.27	57.92	2.65	26.23	0.47	0.82

表 2 原煤灰成分分析

煤样	$w(SiO_2)$	$w(Al_2O_3)$	$w(Fe_2O_3)$	$w(CaO)$	$w(MgO)$	$w(TiO_2)$	$w(SO_3)$	$w(P_2O_5)$	$w(K_2O)$	$w(Na_2O)$
ML	23.28	9.26	18.26	10.95	2.72	0.54	18.58	0.54	0.86	7.86
WCW	17.24	11.90	5.76	28.74	5.34	0.60	19.58	0.05	0.38	3.92

## 1.2 试验试剂、仪器及方法

试验用超纯水由 Millipore 公司生产的 Simplicity 超纯水仪制备。采用分析纯醋酸铵和超纯水配置 1 mol/mL  $\text{NH}_4\text{Ac}$  溶液。 $\text{HCl}$  (37%)、 $\text{HNO}_3$  (70%)、 $\text{HF}$  (40%)、 $\text{HClO}_4$  (70%) 均为分析纯,并使用超纯水配置 1 mol/mL  $\text{HCl}$  溶液。钠标准液由钢铁研究总院提供,质量浓度为 100  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。

煤样逐级萃取试验在恒温磁力搅拌器上进行。样品消解采用 MARS 微波消解仪。煤样高温灰化及低温灰化采用 SRJX-4-13 型马弗炉。

试验采用 Varian710-OES 型电感耦合等离子体发射光谱仪测定钠元素。测量时先进行待测溶液半定量分析,再使用标准液标定仪器并形成标准曲线,最后稀释待测量溶液并进行定量分析。

煤样燃烧试验采用 STA449F3 型热重分析仪进行。热重燃烧程序为:将 10 mg 左右煤样放入热重分析仪的炉体内,在 21 mL/min  $\text{O}_2$  和 79 mL/min  $\text{N}_2$  的混合气氛中从室温以 10  $^\circ\text{C}/\text{min}$  的升温速率升温到 1000  $^\circ\text{C}$ 。

## 1.3 前处理方式

### 1.3.1 煤样逐级萃取

①称取(2.000±0.0010)g 煤样放入三角锥形瓶中,加入 150 mL 超纯水,放入转子后用封口膜密封锥形瓶,在 20  $^\circ\text{C}$  条件下搅拌 12 h,使用溶剂过滤器过滤煤水混合物,洗涤滤渣,使用超纯水将滤液定容到 500 mL。②将上一步得到的超纯水滤渣全部转移到 1 mol/L 的 150 mL  $\text{NH}_4\text{Ac}$  溶液中萃取 12 h 并过滤、洗涤,使用 1 mol/L  $\text{NH}_4\text{Ac}$  溶液定容过滤溶液到 250 mL。③将上一步得到的  $\text{NH}_4\text{Ac}$  滤渣全部转移到 1 mol/L 的 150 mL  $\text{HCl}$  溶液萃取 12 h 并过滤、洗涤,使用 1 mol/L  $\text{HCl}$  定容过滤溶液到 250 mL。④将上一步得到的  $\text{HCl}$  滤渣烘干,采用  $\text{HNO}_3$  和  $\text{HF}$  (体积比为 1:3) 按照煤样直接消解的程序消解。

### 1.3.2 煤样直接消解

称取(0.2000±0.0010)g 煤样放入改性聚四氟乙烯(TFM)消解罐中,加入 2 mL  $\text{HNO}_3$ +6 mL  $\text{HF}$  密封消解。消解加热程序为:5 min 升温到 120  $^\circ\text{C}$ ,恒温保持 3 min,再经 3 min 升温到 150  $^\circ\text{C}$  并恒温 3 min,再经 3 min 升温到 180  $^\circ\text{C}$  并恒温 10 min。消解完毕待消解罐冷却后,加入 1 mL  $\text{HClO}_4$  置于电热板上缓慢加热,蒸至白烟基本冒尽,冷却后用超纯水定容至 100 mL。

### 1.3.3 煤样高温灰化、低温灰化

煤样的高温灰化和低温灰化分别选取 815 和 575  $^\circ\text{C}$  作为灰化温度,中间停留温度分别为 500 和 300  $^\circ\text{C}$ 。试验时,称取(1.0000±0.0010)g 煤样放入灰皿中,灰皿在马弗炉中以 10  $^\circ\text{C}/\text{min}$  速度分别升到 500  $^\circ\text{C}$  (高温灰化)和 300  $^\circ\text{C}$  (低温灰化),恒温停留 30 min 后再以 10  $^\circ\text{C}/\text{min}$  速度分别升温到 815 和 575  $^\circ\text{C}$ ,恒温停留 1 h,冷却到室温后封装放入干燥皿中保存。称取(0.1000±0.0010)g 灰样放入 TFM 消解罐中,按照煤样直接消解的程序消解灰样。

## 2 结果与讨论

### 2.1 钠的赋存形态

煤样逐级萃取是确定钠元素存在形式和含量的有效方法。采用超纯水、 $\text{NH}_4\text{Ac}$ 、 $\text{HCl}$ 、 $\text{HNO}_3$ - $\text{HF}$  混合液逐级萃取了 ML 煤和 WCW 煤。ML 煤和 WCW 煤中总钠含量均较高,分别为 9.79 和 4.49 mg/g。2 种准东煤中不同赋存形态的钠含量占煤中总钠含量的比例如图 1 所示。由图 1 可知,ML 煤和 WCW 煤中的钠元素主要以水溶性钠形式存在,分别占各自总钠含量的 86.82% 和 71.27%。新疆准东地区的煤全部为侏罗纪煤,在侏罗纪时期,该地区由于地质运动形成的凹陷盆地中含有大量苏铁、银杏和松柏等裸子植物,因海水倒灌、雨水沉积作用形成内陆湖泊,最终形成湿地深林聚煤地,该煤系的煤灰中碱金属钠含量较高,特别是水溶性钠含量高<sup>[15]</sup>。ML 煤中醋酸铵溶钠、盐酸溶钠以及硅酸盐钠比例较低,WCW 煤中醋酸铵溶钠、盐酸溶钠占总钠比例略大于 10%。2 种煤样中以硅铝酸盐形式存在的钠元素含量较低,均不足总钠含量的 5%。

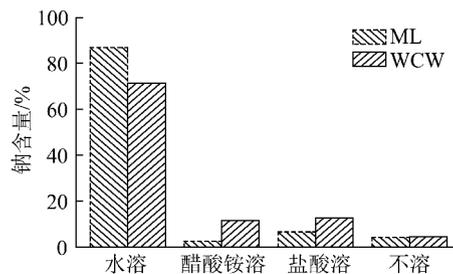


图 1 准东煤中钠含量占煤中总钠含量的比例

### 2.2 煤样直接消解

对 2 种煤样直接消解,ML 煤和 WCW 煤中钠元素含量分别为 8.40 和 3.40 mg/g,分别为煤样逐级萃取试验中煤中总钠元素含量的 85.80% 和 75.72%。由于煤自身结构与组分的不均匀,直接消

解时取样量少,容易引入误差。再者,消解温度和消解用酸影响元素回收率。王琿等<sup>[14]</sup>研究表明直接消解煤样时元素测量数据波动较大。

## 2.3 煤样高温灰化、低温灰化

### 2.3.1 煤样燃烧特性

使用TG-DTG法确定煤样着火温度,过DTG曲线的峰值点作垂线与TG曲线交于一点,过这个交点作TG曲线的切线,该切线与失重开始的平行线相交一点,交点的温度为着火温度,WCW煤样着火温度的确定如图2所示。由图2可知,WCW煤样的着火温度为380.0℃,用同样的方法确定ML煤样的着火温度为386.5℃,低于煤样灰化温度(575和815℃)。因此,试验所选灰化温度可以保证2种准东煤样品的完全灰化。

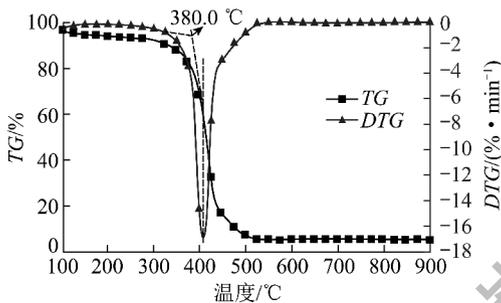


图2 TG-DTG法确定WCW煤的着火温度

### 2.3.2 煤样灰化特性

ML煤和WCW煤高温灰化、低温灰化煤样中钠元素含量见表3。由表3可知,ML煤815℃高温灰化煤中钠元素含量仅为5.57 mg/g,与逐级萃取相比煤中钠元素损失55.27%。对于WCW煤,815℃高温灰化煤中钠元素含量仅为1.74 mg/g,与逐级萃取相比煤中钠元素损失69.27%。575℃低温灰化,ML煤和WCW煤中钠元素含量为9.31和3.81 mg/g,为煤样逐级萃取钠元素总含量的95.10%和85.23%。结果表明,2种煤样575℃低温灰化测定煤中钠元素含量均高于815℃高温灰化煤中钠含量,主要是由于高温灰化条件下煤样中的钠元素挥发到气相中。

表3 高温灰化和低温灰化煤样中钠含量

煤样	钠含量/(mg·g <sup>-1</sup> )	
	815℃高温灰化	575℃低温灰化
ML	5.57	9.31
WCW	1.74	3.81

## 2.4 前处理方法对比

逐级萃取法是测定煤中钠元素赋存形态的有效

方法,所得钠含量显著高于其他前处理方法,在逐级萃取过程中并无钠损失,钠含量测定结果准确<sup>[12]</sup>。以逐级萃取所得钠元素含量为基准,不同前处理方法所得钠元素含量占逐级萃取钠含量的比例如图3所示。由图3可知,2种煤样钠元素含量均为:逐级萃取>575℃低温灰化>煤样直接消解>815℃高温灰化。2种煤样815℃高温灰化时钠元素含量均不足煤样逐级萃取的60%,2种煤样575℃低温灰化钠元素含量均在煤样逐级萃取的85%以上。煤中钠元素在受热过程中会有部分挥发,致使煤灰化时钠元素减少且煤中水溶性钠比例减少,不溶性钠增加,煤灰更难消解<sup>[7]</sup>,且消解效果与煤种以及消解温度和消解用酸有关<sup>[14]</sup>。

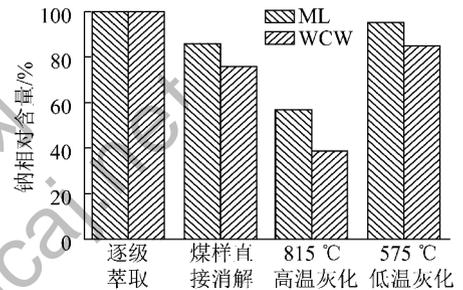


图3 不同前处理方法所得煤中钠相对含量

## 3 结论

1) 2种煤样中钠含量较高,且水溶性钠含量比例大,均在70%以上,硅酸盐形式的钠元素含量均不足钠元素总含量5%。

2) 前处理方法对准东煤中钠含量检测具有重要影响,采用4种前处理方法所得2种煤样中钠元素含量的大小顺序均为:逐级萃取>575℃低温灰化>煤样直接消解>815℃高温灰化。

3) 准东煤中钠含量检测的前处理方法中,逐级萃取法所得钠含量最高,但操作步骤多,耗时长。煤样按照ASTM E1755-01(2007)575℃低温灰化时,操作简单快捷,2种准东煤中钠含量均在逐级萃取钠含量的85%以上,结果较为理想。低温灰化法可作为新疆准东高钠煤中钠含量检测的前处理方法。

### 参考文献:

- [1] 严陆光,周风起,黄常纲. 新疆煤炭在全国能源发展中的地位[J]. 电工电能新技术,2009,28(1):1-10.
- [2] 王忠萍. 新疆洁净煤技术现状和前景[J]. 洁净煤技术,2009,15(4):9-13.

(下转第88页)

栓时,气流速度偏高则会形成长料栓,气流速度偏低则形成短料栓,并且由于内管产生的脉冲力不同,气流速度逐渐降低,料栓长度则变短,到一定程度就会转变成流态化的物料流动状态,为了用较低的空气压力将浓相料栓送走,就要求缩短料栓长度。

在研究栓流式浓相输送技术时,可假设由于管道太长,管中流态化的连续流动物料在遇阻后将停滞。此时,在外管内腔上部设置1根内管,内管朝下的一面开有若干小孔,输送管中的部分气流将进入内管流动,长料栓被气流分割成流态化短料栓<sup>[14]</sup>。不断重复此过程,使剩余的连续流态化物料不断被分割,料栓的长度不断变短,到一定程度形成流态化的物料流,从而实现物料在长距离管道中的浓相输送。根据浓相输送的工作原理,推动2段或若干段短料栓所需消耗的总压力比移动1段长料栓(等长于2段或若干段短料栓之和)要小<sup>[15]</sup>。

## 4 结 语

粉粒状物料的输送越来越多地采用气力输送系统,气力输送形式、设备配置以及输送参数的选取,对于节省能耗、避免环境污染、提高输送能力、减少运行费用都有很大的影响。研究表明负压气力输送、稀相正压气力输送、浓相正压气力输送各有不同的适用范围。就煤粉输送而言,煤粉活性高、易自燃,宜采用密相正压输送。目前,气力输送系统的设计主要依据试验和经验数据,加强基础理论研究将是未来工艺完善的必然方向。

### 参考文献:

- [1] 曹宪周,鲁选民. 气力输送技术的发展及其在粮食行业中的应用[J]. 粮食与饲料工业,2011,33(6):14-18.
- [2] 罗驹华,张颖. 气力输送设备综述[J]. 盐城工学院学报,2000,5(3):37-40.
- [3] 楼建勇,林江. 气力输送系统的研究现状及发展趋势[J]. 轻工机械,2008,15(3):4-7.
- [4] 石炎福,王永安. 化工纺织百科气力输送[EB/OL]. (2011-06-11)[2014-12-04]. <http://8.80008.cn/80>.
- [5] 李成林. 全吸式干湿两用扫路车关键技术研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2012:19-20.
- [6] 马克毅,付书红. 氧化铝浓相输送技术[J]. 昆明理工大学学报:理工版,2003,15(5):28-31.
- [7] 吴保华,王玉玲,徐君飞,等. 负压气力输送在干混砂浆生产中的应用[J]. 工业安全与环保,2012,37(10):11-13.
- [8] 杨理,李伟众,孙靖,等. 筹建大型自备电厂工艺与设备的选择分析[J]. 粉煤灰,2013,24(6):10-14,18.

- [9] 王伟. 大型自备电厂项目的工艺与设备选择[J]. 化肥设计,2013,51(4):24-27.
- [10] 王军,李勇,张俊岭,等. 密相气力输送物料流动状态分析及供料装置的选用[J]. 水泥工程,2007,27(2):47-50.
- [11] 张英建. 智能控制在浓相输送系统上的应用[D]. 兰州:兰州理工大学,2007:6-8.
- [12] 田翔. 氧化铝浓相输送过程的两相流建模及参数测量问题的研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2007:3-7.
- [13] 王西能. 密相气力输送工艺在PVC粉体输送上的应用优势[J]. 聚氯乙烯,2010,31(10):9-11.
- [14] 赵丽琴,孟庆敏,周云,等. 粉体密相气力输送研究综述[J]. 锅炉技术,2011,41(5):1-5.
- [15] 梁财,陈晓平,蒲文灏,等. 高压浓相粉煤气力输送特性研究[J]. 中国电机工程学报,2007,43(5):31-35.

(上接第84页)

- [3] 杨忠灿,刘家利,姚伟. 准东煤灰沾污指标研究[J]. 洁净煤技术,2013,19(2):81-84.
- [4] 张军,汉春利,刘坤磊,等. 煤中碱金属及其在燃烧中的行为[J]. 热能动力工程,1999,14(2):7-9,79.
- [5] 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.
- [6] Quyn D M, Wu H, Li C Z. Volatilisation and catalytic effects of alkali and alkaline earth metallic species during the pyrolysis and gasification of Victorian brown coal. Part I: volatilisation of Na and Cl from a set of NaCl-loaded samples [J]. Fuel, 2002, 81(2): 143-149.
- [7] 卫小芳,刘铁峰,黄戒介,等. 澳大利亚高盐煤中钠在热解过程中的形态变迁[J]. 燃料化学学报,2010,38(2):144-148.
- [8] Bensen S A, Holm P L. Comparison of inorganic constituents in three low-rank coals [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1985, 24(1): 145-149.
- [9] 付子文,王长安,车得福,等. 成灰温度对准东煤灰理化特性影响的实验研究[J]. 工程热物理学报,2014,35(3):609-613.
- [10] Zevenhoven M, Yrjas P, Skrifvars B J, et al. Characterization of ash-forming matter in various solid fuels by selective leaching and its implications for fluidized-bed combustion [J]. Energy and Fuels, 2012, 26(10): 6366-6386.
- [11] 杨明,陈明华,谷红伟,等. 高钠煤中钠的赋存形态与控制技术[J]. 洁净煤技术,2014,20(5):82-85.
- [12] 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.
- [13] 刘晶,郑楚光,贾小红,等. 微波消解和电感耦合等离子体发射光谱法同时测定煤灰中的14种元素[J]. 分析化学,2003,31(11):1360-1363.
- [14] 王琿,宋蕾,姚强,等. ICP-OES/ICP-MS测定煤中多种元素的微波消解方法研究[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(6):1662-1665.
- [15] 范建勇. 准东煤结渣特性及其配煤灰熔融性试验研究[D]. 杭州:浙江大学,2014:3-4.