

煤炭洁净燃烧

煤中钠的赋存形态与迁移规律对煤沾污性的影响

史慧娟^{1,2} 王锦生^{1,2} 张秀昌^{1,2} 岳鹏飞^{1,2} 冉燊铭^{1,2} 周 棋^{1,2}

(1. 清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室 四川 成都 611731; 2. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司 四川 自贡 643001)

摘 要: 为了研究高钠煤作为电站锅炉燃料时对受热面的沾污性, 采用一步浸取和低温制灰相结合的方式, 研究了新疆地区几种常见动力煤中钠的总量、赋存形态以及不同温度下的迁移特性, 结合中试热态试验的沾污结果, 分析了上述因素与煤沾污性之间的关系。结果表明, 煤的沾污性与煤中活性 Na_2O 含量有关; 当煤中总 Na_2O 含量、煤中水溶态钠含量和燃烧时煤中钠挥发比越高, 灰分越低时, 煤中活性 Na_2O 越大, 煤的沾污性越强。

关键词: 总钠含量; 赋存形态; 迁移规律; 沾污特性

中图分类号: TQ534

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2016)06-0066-05

Influence of sodium occurrence mode and migration on fouling characteristic of coals

SHI Huijuan^{1,2}, WANG Jinsheng^{1,2}, ZHANG Xiuchang^{1,2}, YUE Pengfei^{1,2}, RAN Shenming^{1,2}, ZHOU Qi^{1,2}

(1. Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611731, China;

2. Dongfang Electric Group Dongfang Boiler Co., Ltd., Zigong 643001, China)

Abstract: To study the fouling characteristic of high sodium coal when it was used in utility boilers, the total sodium content, occurrence mode and migration of several common steam coals in Xinjiang were studied by one-step-extraction and low-temperature ashing methods. Combining with the fouling results in the pilot plant, the relationships between the above factors and the fouling characteristic were obtained. The results showed that the fouling characteristic had obvious relationship with active sodium content in coal. Furthermore, the active sodium content which caused the serious fouling was higher with the higher total sodium, water-solution sodium and sodium lost ratio with combustion and the lower ash.

Key words: total sodium content; occurrence mode; migration; fouling characteristics

0 引 言

新疆煤资源丰富, 累计探明储量为 $2.136 \times 10^{11} \text{ t}^{[1]}$, 且具有易开采、易着火、易燃烬、中高热值的优点, 是用作电站燃料的理想原料。但在实际应用中, 发现此类煤在作为电站锅炉燃料时易造成受热面沾污^[2]、结渣^[3], 影响锅炉设备的正常运行。在 2011 年就发现某电厂锅炉在燃用新疆五彩湾煤的运行过程中出现锅炉炉膛内仅有少量焦块, 而锅炉尾部、分

离器出口、中心筒出口后的受热面存在沾污的情况。张守玉等^[4]、卫小芳等^[5]、赵冰等^[6]认为煤中钠的赋存形态及其迁移特性是沾污的重要影响因素。为解决沾污问题, 研究新疆煤中总 Na_2O 含量、钠赋存形态^[7]及钠燃烧迁移规律^[8]与煤沾污性之间的关系成为必要。

高钠煤中的钠主要以 4 种形态存在^[9-10]: ① 水溶态钠, 可溶于水的钠盐; ② 羧酸盐形态结合的有机钠, 可溶于稀醋酸铵溶液; ③ 以配位形式存在的有机

收稿日期: 2016-07-16; 责任编辑: 孙淑君 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2016.06.013

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2015BAA04B02)

作者简介: 史慧娟(1984—), 女, 山西大同人, 工程师, 硕士, 从事煤质分析及煤清洁燃烧方面的研究。E-mail: shijuan111@163.com

引用格式: 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.

态元素钠,可溶于稀盐酸溶液;④不溶态元素钠。不同形态钠化合物具有不同的熔点、沸点、分解温度、气化热、气化温度,因而具有不同的挥发特性和迁移规律,进而对沾污产生不同程度的影响。本文在恒温水浴摇床提供恒温及摇动的条件下,采用一步浸取法研究煤中钠赋存形态;并通过一步浸取法与低温制灰相结合的方法测试煤中总 Na_2O 含量;在不同温度制灰,通过研究制灰温度对煤中钠的挥发比的影响研究煤中钠燃烧迁移规律;在煤粉燃烧中试试验台试烧确定煤的沾污性,并分析煤中总 Na_2O 含量、钠赋存形态、钠迁移规律、灰分与煤沾污性的关系。

1 试 验

1.1 试验样品分析

选用沙尔湖煤、五彩湾煤、同泰煤、国能准东煤、黑山煤为研究对象。煤样室温干燥,筛分至粒径小于 0.071 mm ,对煤样进行分析,结果见表1。煤样依照国标方法制灰,灰成分结果见表2。由表2可知,所用煤种除黑山煤外均为高钠煤。对5种煤样的热重曲线分析知,煤样在 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 时已基本燃烧,因此选择此温度为最低制灰温度,以确保灰中钠测试的准确性。

表1 煤的工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of coals

样品	工业分析/%				元素分析/%					$Q_{\text{net ad}} / (\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	$w(\text{C}_{\text{ad}})$	$w(\text{H}_{\text{ad}})$	$w(\text{N}_{\text{ad}})$	$w(\text{S}_{\text{ad}})$	$w(\text{O}_{\text{ad}})$	
沙尔湖	15.00	10.43	28.45	46.12	53.67	2.94	0.52	0.43	17.01	18.78
五彩湾	13.59	6.43	24.64	55.34	60.72	2.81	0.52	0.56	15.37	21.55
同泰	11.83	16.25	29.35	42.57	56.13	3.44	0.81	0.65	10.89	20.62
国能准东	6.73	38.25	20.33	34.69	40.57	2.38	0.24	0.31	11.52	14.22
黑山	4.62	19.19	31.10	45.09	57.48	3.47	0.58	1.36	13.30	21.48

表2 煤的灰成分分析

Table 2 Ash analysis of coals

样品	灰成分(质量分数)/%										
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	TiO_2	K_2O	Na_2O	P_2O_5	MnO_2
沙尔湖	36.48	16.55	5.88	29.45	2.69	3.20	0.84	0.39	4.44	0	0.08
五彩湾	35.62	7.62	8.75	30.15	6.67	5.97	0.30	0.52	3.82	0.36	0.21
同泰	39.88	12.11	13.96	18.19	1.98	8.26	0.50	1.72	2.97	0.14	0.29
国能准东	52.95	14.47	5.21	16.31	1.99	3.82	0.73	1.58	2.69	0.10	0.15
黑山	37.09	11.14	9.29	32.99	5.34	2.52	0.33	0.79	0.22	0.01	0.27

1.2 煤中钠赋存形态及测定方法

准确称取不同煤样各3份,放入250 mL锥形瓶中,按煤液质量比1:40加入浸取液,浸取液分别选用超纯水、 0.25 mol/L 醋酸铵溶液、 0.25 mol/L 盐酸溶液,用封口膜密封锥形瓶口,置于 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 的恒温水浴摇床中,振荡频率设为 2 Hz ,恒温振荡 24 h ,使用装有水系滤膜的溶剂过滤器在抽真空的条件下分离煤液混合物,洗涤滤渣3次,收集滤渣于 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱干燥,滤液定容。超纯水、醋酸铵溶液、盐酸溶液浸取后换算为单位质量煤中钠含量分别记为 m_1 , m_2 , m_3 ,则水溶态钠、羧酸盐形态结合的有机钠、以配位形式存在的有机态元素钠分别为 m_1 , $m_2 - m_1$, $m_3 - m_2$ 。

收集盐酸浸取后经干燥的滤渣,低温制灰,称取灰样,使用 Anton Paar 公司生产微波消解仪对灰样进行消解。消解液定容。

采用美国 PE 公司生产的电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)分析滤液和消解液。分析得出煤中总 Na_2O 含量和煤中不同形态钠含量。

1.3 煤中钠迁移规律研究

原煤分别在 600 、 700 、 815 、 $920\text{ }^\circ\text{C}$ 马弗炉燃烧制灰,同时测试不同制灰温度下的灰分 A_{ad} 。称取灰样 0.1 g ,微波消解,测试消解液中钠含量,分析得出不同燃烧温度时煤中钠的迁移规律。

马弗炉升温程序设置方法为室温下放入煤样, 30 min 升温到 $500\text{ }^\circ\text{C}$,恒温 30 min ,继续升温到煤样

燃烧温度,恒温 2 h。

2 结果与讨论

2.1 煤中钠赋存形态

采用不同浸取液对原煤进行一步浸取,浸取液不同时,单位质量煤中钠含量见表 3。盐酸浸取后滤渣干燥,600 °C 制灰,灰样消解并测试计算得出单位质量沙尔湖、五彩湾、同泰、国能准东、黑山煤中不溶态钠含量以 Na_2O 计依次为 0.010%、0.031%、0.084%、0.680%、0.025%。煤中总 Na_2O 含量如下:沙尔湖为 0.907%,五彩湾为 0.391%,同泰为 0.538%,国能准东为 1.118%,黑山为 0.051%。由此可见,不同煤中总 Na_2O 含量不同,国能准东煤中总 Na_2O 最高;其余 4 种煤中总 Na_2O 含量均小于 1%,沙尔湖煤较高,五彩湾煤中总 Na_2O 含量低于同泰煤,而黑山煤中总 Na_2O 含量很低。

表 3 不同浸取液中钠含量

Table 3 Sodium content with different solutions

浸取液	钠含量/(mg·kg ⁻¹)				
	沙尔湖	五彩湾	同泰	国能准东	黑山
超纯水	6 495.0	2 306.4	379.9	2 558.9	44.0
醋酸铵	6 591.1	2 591.7	3 376.6	3 044.6	193.8
盐酸	6 653.8	2 578.3	3 391.5	3 170.9	194.0

由表 3 中数据计算得出煤中钠赋存形态结果见表 4。

表 4 煤中钠赋存形态

Table 4 Sodium occurrence mode in different coals

项目	不同赋存形态钠占总钠的比例/%				
	沙尔湖	五彩湾	同泰	国能准东	黑山
水溶态钠	96.52	79.51	79.67	30.85	11.62
羧酸盐形态结合的有机钠	1.43	9.84	4.93	5.86	39.61
以配位形式存在的钠	0.93	0	0.37	1.52	0.05
不溶态钠	1.12	10.65	15.03	61.77	48.72

由表 4 可知,沙尔湖、五彩湾、同泰煤中钠主要为水溶态钠,占总钠的 70% 以上。其中,沙尔湖煤中钠几乎全部为水溶态,占总含量的 96.52%;五彩湾煤与同泰煤中水溶态钠含量相近,约占总量的 79%;以羧酸盐形态结合的有机钠、以配位形式存在的有机态元素钠、不溶态钠的钠含量均很低;五彩湾煤和同泰煤中钠的具有相似的赋存形态。国能准

东、黑山煤中钠主要为不溶态钠,以配位形式存在的有机态元素钠含量均很低,不同点在于前者具有更高的水溶态钠,后者羧酸盐形态结合的有机钠含量更高。

2.2 煤中钠燃烧迁移规律

由于不同赋存形态钠由不同钠的化合物组成,并且不同钠化合物具有不同的熔点、沸点、分解温度、气化热、气化温度等物理性质,因而不同赋存形态钠在不同燃烧温度下可能具有不同的挥发特性,从而具有不同的迁移规律。

沙尔湖、五彩湾、同泰、国能准东、黑山煤样分别在 600、700、815、920 °C 制灰,灰中 Na_2O 含量、灰分结果见表 5。由表 5 可知,不同煤种随着燃烧温度升高,灰中钠含量变化具有不同的规律。随着制灰温度升高,沙尔湖煤单位质量灰中钠含量依次降低;五彩湾煤单位质量灰中钠含量呈现先减小后不变的趋势;同泰煤、国能准东煤单位质量灰中钠含量依次增加;黑山煤单位质量灰中钠含量基本保持不变。

表 5 不同制灰温度下灰中的 Na_2O 及灰分

Table 5 The Na_2O content in ash and ash in different temperatures

样品	项目	600 °C	700 °C	815 °C	920 °C
沙尔湖	Na_2O 含量/%	6.47	5.09	4.44	3.68
	A_{ad} /%	11.24	10.72	10.43	10.30
五彩湾	Na_2O 含量/%	4.50	3.89	3.82	3.86
	A_{ad} /%	6.64	6.50	6.43	6.38
同泰	Na_2O 含量/%	2.93	2.93	2.97	3.12
	A_{ad} /%	16.89	16.28	16.25	16.27
国能准东	Na_2O 含量/%	2.50	2.57	2.69	2.70
	A_{ad} /%	38.86	38.49	38.25	38.25
黑山	Na_2O 含量/%	0.19	0.20	0.22	0.20
	A_{ad} /%	20.22	19.43	19.19	19.00

为了进一步确定不同煤种钠迁移规律,定义不同燃烧温度下煤中 Na_2O 的挥发比 W_{hb} ,计算方法见公式(1)。

$$W_{hb} = 100 - A_{ad} \times n_a / n_c \quad (1)$$

式中 A_{ad} 为对应制灰温度下的灰分; n_a 为灰中 Na_2O 含量; n_c 为煤中的 Na_2O 含量。

不同煤种钠挥发比随燃烧温度变化如图 1 所示。由图 1 知,随着温度升高,沙尔湖煤中钠挥发比逐渐增加;五彩湾煤中钠挥发比先增加后不变,在 815 °C 达到最大;同泰煤中钠挥发比先增加后减小,

并在 700 °C 达到最大; 国能准东煤中钠挥发比逐渐减小; 黑山煤中钠挥发比呈现波动状态。可见不同制灰温度下, 同一煤中 Na_2O 迁移规律各不相同。在 600 °C 时, Na_2O 挥发比依次以五彩湾煤、黑山煤、沙尔湖煤、国能准东煤、同泰煤的顺序递减; 在 700 °C 和 920 °C 时, Na_2O 挥发比依次以沙尔湖煤、五彩湾煤、黑山煤、国能准东煤、同泰煤的顺序递减; 在 815 °C 时, Na_2O 挥发比依次以沙尔湖煤、五彩湾煤、黑山煤、同泰煤、国能准东煤的顺序递减。同时除 600 °C 外, 其他温度下沙尔湖煤中钠的挥发比显著高于其他煤种。由此可知相同制灰温度下, 不同煤中 Na_2O 迁移规律存在差异。

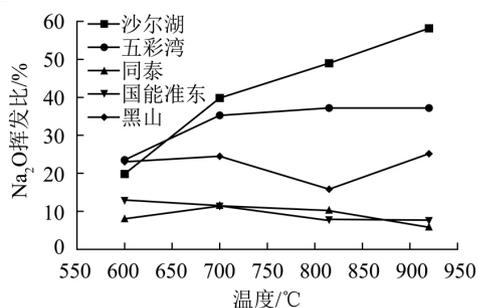


图1 不同温度下 Na_2O 的挥发比

Fig. 1 The lost ratio of Na_2O in different temperatures

此外, 沙尔湖煤中水溶态钠含量高达 96%, 在 600 °C 的最低挥发比远大于煤中非水溶态钠含量的总和, 在 920 °C 最大挥发比远小于煤中水溶态钠含量, 可知煤中钠以水溶态钠的挥发为主。

由煤中钠赋存形态与不同温度下迁移规律知沙尔湖煤、五彩湾煤、同泰煤、国能准东煤中钠均以水溶态钠的挥发为主。当达到最大挥发比时, 煤中水溶态钠未完全挥发, 依次占水溶态钠的 60%、47%、14%、42%。黑山煤中钠不仅有水溶态钠的挥发, 还存在羧酸盐形态结合的有机钠的挥发。由于水溶态钠的挥发是引起设备沾污的主要原因^[7-8], 可见不同煤种具有不同的沾污性。

2.3 沾污性确定

沙尔湖煤、五彩湾煤、同泰煤、国能准东煤、黑山煤在煤粉燃烧中试验台试烧判定煤样的沾污性, 烟气温为 800 °C, 测试管中通入空气冷却保持壁温为 550 °C, 通过测试燃烧过程中测试管上有效换热系数 FI 的变化确定不同煤的沾污性。定义 FI 为试验过程中测试管换热系数与清洁测试管换热系数的比值, FI 越低, 测试管表面发生的沾污越严重。不同煤种 FI 随燃烧时间变化关系如图 2 所示。由

图 2 可见, 随燃烧时间的延长, 试验煤种 FI 呈现逐渐下降趋势。其中, 沙尔湖煤下降最快; 五彩湾煤次之; 同泰煤下降缓慢; 国能准东煤与黑山煤仅略有降低趋势。将 FI 为 0.9 作为沾污发生与否的界限, 对比知试验煤种沙尔湖煤沾污性最强, 五彩湾煤中等沾污, 同泰煤较弱沾污, 国能准东煤和黑山煤不发生沾污。

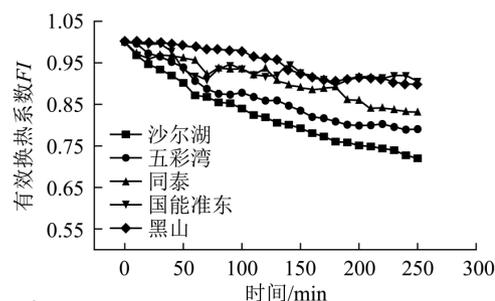


图2 有效换热系数 FI 随时间变化关系

Fig. 2 The relationship between FI and the test time

2.4 沾污原因分析

沙尔湖煤中总 Na_2O 含量为 0.907%, 水溶态钠占 96.52%, 灰分为 10.43%, 且在 815 °C 燃烧时钠的挥发比高达 48.99%, 煤的强沾污性是由于在低灰分、高钠含量时, 煤中钠在燃烧过程中形成高熔点、难挥发的含钠硅铝酸盐残留于灰中的比例降低, 最终造成钠化合物挥发, 挥发出的钠化合物在遇到温度较低受热面时发生冷凝而导致沾污。

五彩湾煤中总 Na_2O 含量为 0.391%, 水溶态钠占 79.51%, 灰分为 6.43%, 在 815 °C 燃烧时钠的挥发比达到 37.20%。由于煤中钠含量远小于沙尔湖煤, 虽然其灰分低于沙尔湖煤, 但 815 °C 挥发出的量较沙尔湖煤低, 且沾污性也弱于沙尔湖煤。可见沾污性的强弱与钠的挥发量有关, 燃烧过程中钠的挥发量越大, 煤的沾污性越强。

同泰煤中总 Na_2O 含量为 0.538%, 水溶态钠占 79.67%, 灰分为 16.25%, 在 815 °C 燃烧时钠的挥发比仅为 10.19%。虽然同泰煤中钠含量比五彩湾煤高, 且两者水溶态钠含量相近, 但同泰煤的沾污性较弱, 可能与同泰煤灰分较高有关, 高灰分可在一定程度上抑制煤中钠的挥发, 从而降低煤的沾污性。燃烧时煤中钠的挥发比较低证实这一点。

国能准东煤中总 Na_2O 含量为 1.118%, 水溶态钠仅为 32.88%, 灰分高达 38.25%, 在 815 °C 制灰的挥发比仅为 7.91%, 该煤在作电站锅炉燃料时不会引起受热面沾污, 证实水溶态钠的挥发是引起沾污

的原因之一,高灰分能抑制煤中钠的挥发。

黑山煤中总 Na_2O 仅为 0.051%, 含量很低, 虽然其煤中钠挥发比达到 15% 以上, 但不会引起设备沾污。

通常, 认为沾污不仅与煤中总 Na_2O 含量有关, 更重要的是活性氧化钠 (Na_2O_h) 含量, 煤在燃烧过程中, Na_2O_h 易于发生挥发引起设备沾污的发生^[11-12] 并提出了采用 $B/A \times w(\text{Na}_2\text{O}_h)$ 判定煤的沾污性^[13]。综合上述研究, 煤的沾污性与煤中钠的含量、赋存形态、燃烧时钠挥发比、灰分密切相关。由此可见, Na_2O_h 含量与煤中钠的含量、赋存形态、燃烧时钠挥发比、灰分有关, 且煤中总 Na_2O 含量、水溶态钠含量、燃烧时煤中钠挥发比越高, 灰分越低, 煤中 Na_2O_h 越大, 煤的沾污性越强。

3 结 语

1) 通过一步浸取法研究新疆高钠煤中钠赋存形态, 由一步浸取与低温制灰相结合的方法准确测试煤中总 Na_2O 含量, 此方法具有测试准确, 操作方便快捷的优点。

2) 由煤中钠迁移规律知, 在 600 °C 的低温燃烧时, 煤中钠就会发生挥发, 且不同煤种具有不同的钠迁移规律。由煤中钠赋存形态和迁移规律得出煤中钠的挥发以水溶态钠为主, 当煤中水溶态钠含量高于 30% 在煤中钠的挥发比达到最大时, 水溶态钠并未完全挥发。

3) 煤中活性 Na_2O 的含量与煤中总 Na_2O 含量、赋存形态、燃烧时钠挥发比、灰分有关, 且煤中总 Na_2O 含量、水溶态钠含量、燃烧时煤中钠挥发比越高, 灰分越低, 煤中活性 Na_2O 越大, 煤的沾污性越强。

参考文献 (References):

- [1] 杨明, 陈明华, 谷红伟. 逐级提取法研究新疆高钠煤中碱金属赋存形态[J]. 煤质技术, 2014(6): 7-11.
Yang Ming, Cheng Minghua, Gu Hongwei. Study on the occurrence of alkali metals in high sodium Xinjiang coal by sequential chemical extraction[J]. Coal Quality Technology, 2014(6): 7-11.
- [2] 董明钢. 高钠煤对锅炉受热面结渣、沾污和腐蚀的影响及预防措施[J]. 热力发电, 2008, 37(9): 35-39.
Dong Minggang. Influence of high-sodium coal upon slagging, contamination, and corrosion on the heating surface of boilers[J]. Thermal Power Generation, 2008, 37(9): 35-39.
- [3] 郭涛, 曹林涛, 黄中, 等. 准东高钠煤燃烧利用技术研究[J]. 煤炭技术, 2015, 34(1): 331-333.
Guo Tao, Cao Lintao, Huang Zhong, et al. Research on using technology in Zhundong high sodium coal combustion[J]. Coal Technology, 2015, 34(1): 331-333.
- [4] 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 Chinese Society for Electrical Engineering, 2013, 33(5): 1-12.
- [5] 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.
Wei Xiaofang, Liu Tiefeng, Huang Jiejie, et al. Transformation of Na in an Australian high-sodium coal during pyrolysis[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2010, 38(2): 144-148.
- [6] 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): 1416-1421.
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): 1416-1421.
- [7] 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.
Yang Ming, Chen Minghua, Gu Hongwei, et al. Speciation and control technologies of sodium in high-sodium coal[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(5): 82-85.
- [8] 刘敬, 王智化, 项飞鹏, 等. 准东煤中碱金属的赋存形式及其在燃烧过程中的迁移规律实验研究[J]. 燃料化学学报, 2014, 42(3): 316-322.
Liu Jing, Wang Zhihua, Xiang Feipeng, et al. Modes of occurrence and transformation of alkali metals in Zhundong coal during combustion[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2014, 42(3): 316-322.
- [9] 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.
- [10] Li Gengda, Li Shuiqing, Huang Qian, et al. Fine particulate formation and ash deposition during pulverized coal combustion of high-sodium lignite in a down-fired furnace[J]. Fuel, 2015, 143: 430-437.
- [11] 万茜, 韩滨兰. 采用重力筛分和弱酸溶碱技术对煤结渣积灰特性的研究[J]. 电站系统工程, 2012, 28(2): 17-18.
Wan Xi, Han Binlan. Research of coal slagging characteristics by gravity screening and weak acid[J]. Power System Engineering, 2012, 28(2): 17-18.
- [12] 邵梅娟, 何惠娟. 用比重分级法来评价煤灰结渣和沾污特性[J]. 锅炉技术, 1991(5): 9-16.
Shao Meijuan, He Huijuan. With the proportion of grading method to evaluate the ash slagging and fouling characteristics[J]. Boiler Technology, 1991(5): 9-16.
- [13] 哈尔滨普华煤燃烧技术开发中心. 大型煤粉锅炉燃烧设备性能设计方法[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002.