

文章编号: 0253-2409(2015)10-1176-06

高岭土对准东煤结渣特性及矿物质演变的影响

张利孟¹, 董信光¹, 刘科¹, 谭厚章^{2,*}, 王学斌², 魏博²

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250002

2. 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: 采用热分析和 X 射线衍射物相分析相结合的方法, 对添加高岭土前后的准东煤灰矿物质组分随温度的演变规律进行了研究, 分析了高岭土对准东煤结渣特性的影响。结果表明, 准东煤中原始矿物质以方解石、硬石膏、石英为主, 高温下主要是镁硅钙石和硅酸二钙; 掺混高岭土后准东煤灰熔融温度呈现先下降后上升趋势。掺混比例为 3% 时, 准东煤灰以钙黄长石、铁橄榄石、镁硅钙石为主, 三者易形成低温共融物, 导致此比例下灰熔融温度大幅降低; 添加比例超过 6% 后, 灰中矿物质由易形成低温共融的钙黄长石向高熔点的钙长石转变, ST 温度快速上升至 1380 °C; 结渣指标计算结果表明, 高岭土在原煤中掺混比例达到 6% 时, 能够有效缓解准东煤结渣。

关键词: 准东煤; 灰熔融; 高岭土; 结渣特性指标

中图分类号: TK227.2 文献标识码: A

Effect of kaolin on ash slagging and mineral conversion of Zhundong coal

ZHANG Li-meng¹, DONG Xin-guang¹, LIU Ke¹, TAN Hou-zhang^{2,*}, WANG Xue-bin², WEI Bo²

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Ji'nan 250002, China

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

Abstract: The XRD and TGA were used to study the ash slagging and mineral conversion of Zhundong coal (ZDC) by adding different amounts of kaolin. The results show that the original minerals in Zhundong coal mainly include calcite, anhydrite and quartz, and merwinite and dicalciumsilicate are produced at high temperature. With the increase in the blending ratios of kaolin, the ash fusion temperature decreases at first, but increases later. After adding 3% kaolin into ZDC, gehlenite, fayalite, and merwinite are the main minerals produced at high temperature, which resulting in a low temperature eutectic. When the blending ratio is above 6%, anorthite becomes the main mineral that have a high melting point, causing a great increase of ash fusion temperature to above 1380 °C. The slagging index calculation shows that the kaolin can relieve the slagging degree of ZDC obviously when the blending ratio is above 6%.

Key words: Zhundong coal; ash fusion; kaolin; slagging index

准东是新疆煤炭资源储量最富集的区域, 预测储量可达 3.9×10^{11} t^[1-2]。准东煤具有强结焦性和强玷污性的特点, 近期的研究表明, 这些特点与准东煤灰物相组分有密切关系^[3-6]。较多研究表明, 高岭土能够有效控制煤及生物质燃料燃烧过程中碱金属释放、PM_{2.5} 形成^[7-10], 而针对其对准东煤结渣特性影响的研究报道还相对较少。付子文等^[11]和范建勇等^[12]研究了成灰温度对准东煤灰熔融特性的影响, 发现在不同成灰温度下煤灰内金属氧化物的逃逸, 会导致不同成灰温度下煤灰熔融温度的差别。马岩等^[13]通过实验发现, 随着准东煤灰中的 SiO₂/Al₂O₃ 的降低, 会使煤灰熔点逐步升高; 王云刚等^[14]通过实验发现, SiO₂ 能明显提升其变形温度而造成其余特征温度明显下降, Al₂O₃ 对灰熔融温

度始终有提升作用。

实验采用热分析和 X 射线衍射分析深入研究了高岭土对准东煤灰熔融温度的影响规律及影响机理, 探究能够明显改善准东煤灰熔融温度的掺混比例; 同时结合常用的煤灰结渣指标和 XRF 分析, 预测掺混高岭土后准东煤灰的结渣趋势, 为准东煤动力配煤缓解结焦提供参考。

1 实验部分

1.1 煤质分析及灰化实验

研究对象为新疆准东五彩湾矿区煤种, 其工业分析及灰成分分析见表 1。该矿区煤种具有准东地区煤种的普遍特性, 即富含碱金属和碱土金属氧化物, 虽然该煤种灰样的软化温度 ST 高达 1360 °C,

Received: 2015-03-27; Revised: 2015-06-19.

* Corresponding author: E-mail: Tanhz@mail.xjtu.edu.cn.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51376147, 51306142).

国家自然科学基金(51376147, 51306142)资助项目

但在电站锅炉应用中,仍存在严重的结渣和积灰现象。

表 1 准东煤工业分析及灰成分分析

Table 1 Proximate analysis and chemical compositions of ash samples for Zhundong coal

Proximate analysis $w/\%$				Chemical compositions of coal ash $w/\%$										ST $t/^\circ\text{C}$
M_t	A_{ad}	V_{ar}	FC_{ad}	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	SiO_2	SO_3	K_2O	Na_2O		
29	5.12	29.47	63.75	8.01	7.36	24.54	6.96	0.99	14.3	32.8	0.4	4.65	1 360	

灰样制备方法采用梯度制灰的方式。制样步骤借鉴煤工业分析方法《GB/T 212—2008》中的缓慢灰化法进行:即常温下以 60 min 达到 500 °C 后停留 30 min,然后以 10 °C/min 的升温速率达到目标温度,并在目标温度下恒温 1 h 后,取出灰样进行分析。按实验需求制备 500、600、815、1 000、1 150 和 1 250 °C 温度下的准东煤纯灰样和掺混一定比例高岭土样品的灰样,高岭土在原煤中掺混比例为 3%、6%、9%。掺混方法为将一定比例高岭土和准东煤原煤,一同放入高速球磨机中,在磨制过程中充分混合,煤粉粒径为 100 μm 以下。

1.2 分析方法

试验采用日本理学 D/max2400 型 X 射线衍射仪(XRD)对实验中的灰样进行分析,其射线源采用 Cu K α 射线,管电压 40 kV,管电流 100 mA,扫描速率 10 ($^\circ$)/min,10 $^\circ$ ~80 $^\circ$ 扫描,利用 Jade 5.0 软件对衍射结果进行处理。此外,采用的 HR-4A 微机灰熔点测定仪测定煤灰样品熔融特性,采用 NETZSCH STA-409PC 型热天平进行热分析实验,采用德国 BrukerS4-Pioneer 型 X 射线荧光光谱仪(XRF)测定灰样中元素种类及含量。

2 结果与讨论

2.1 成灰温度对准东煤灰物相组分的影响

对不同成灰温度的灰样进行热分析,能够较为直观的观察出灰成分物相发生变化的温度区间。在热分析仪上将不同温度下制成的灰样进行 N₂ 气氛下的煅烧实验,结果见图 1。

由图 1 可知,500 °C 成灰灰样的 TG 曲线在 600 °C 左右时出现明显失重,说明灰样在此温度有物质分解并析出。四个成灰温度的灰样均在 1 200 °C 左右出现明显失重,这是由于灰样内物质在高温下分解造成的。

为进一步确定煤燃烧过程中灰样在 600、1 200 °C 分解析出的物质组分,采用 XRD 对 500、600、815、1 000 及 1 150 °C 下的灰样进行组分分析。结果见图 2。

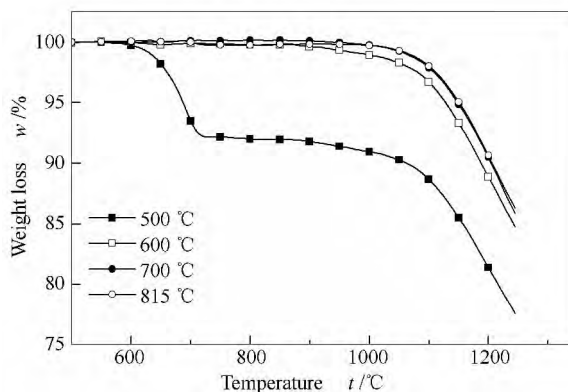
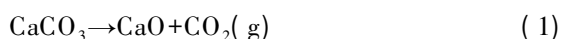


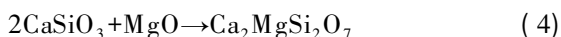
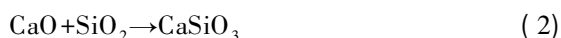
图 1 不同温度下制取灰样的 TG 曲线

Figure 1 TG profiles of samples in different ashing temperatures

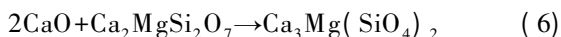
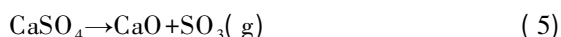
由图 2 可知,准东煤灰样在各温度下的主要成分均是硬石膏(CaSO₄)和一定量的石英(SiO₂)。对比各温度下灰样中成分变化可以看到,在 500 °C 时灰样中存在一定量的方解石(CaCO₃),而在 600 °C 后基本消失,产生了 CaO 物相的衍射峰,这是因为方解石在 600 °C 以后发生了分解反应:



随着温度的升高,灰样内的 MgO 和 CaO 与灰样中的 SiO₂ 发生反应生成镁黄长石(Ca₂MgSi₂O₇),且 CaO 与 SiO₂ 单独反应生成硅酸钙盐。反应如下:



当温度达到 1 000 °C 时,有少量硬石膏(CaSO₄)分解成 CaO,导致硅酸二钙(Ca₂SiO₄)及镁黄长石(Ca₂MgSi₂O₇)的生成量增大;在 1 150 °C 时,XRD 衍射谱图上主要以镁硅钙石(Ca₃Mg(SiO₄)₂)为主,这是因为 CaSO₄ 分解量增加,CaO 与镁黄长石(Ca₂MgSi₂O₇)进一步反应生成镁硅钙石(熔点达 1 300 °C 以上),从而导致准东煤灰熔点达到 1 300 °C 以上。此过程中主要发生反应如下:



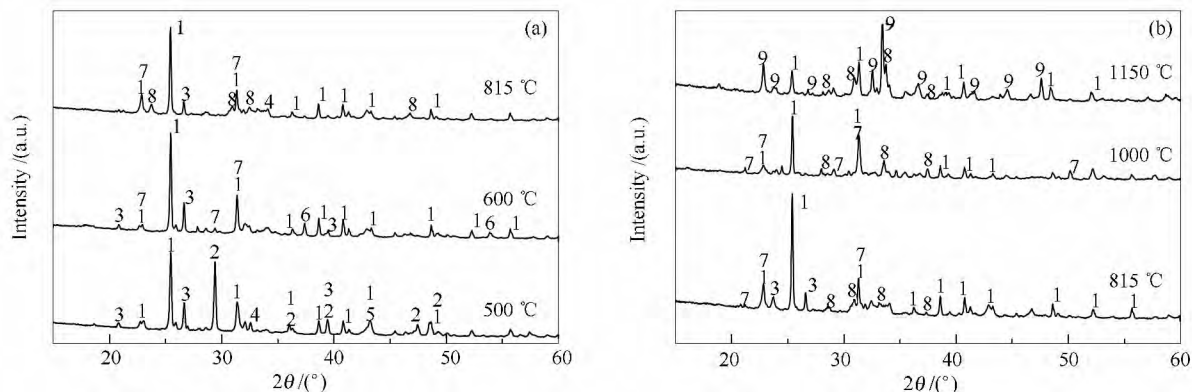


图 2 不同成灰温度准东煤纯灰样 XRD 谱图

Figure 2 XRD patterns of samples in different ashing temperatures

1: anhydrite, CaSO_4 ; 2: calcite, CaCO_3 ; 3: quartz, SiO_2 ; 4: hematite, Fe_2O_3 ; 5: magnesium oxide, MgO ; 6: calcium oxide, CaO ; 7: akermanite, $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$; 8: dicalcium silicate, Ca_2SiO_4 ; 9: merwinite, $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$

2.2 高岭土对准东煤灰物相组分的影响

高岭土具有熔点较高的优点,常被作为耐熔剂用以改善低熔点煤种的灰熔融温度。图 3 为掺混不同比例高岭土后,准东煤灰熔融温度的变化。

由图 3 可知,随着高岭土掺混比例增加,灰样熔融特征温度均呈现先下降后上升的趋势。说明高岭土掺混比例较小的情况下,能够降低煤灰熔融特征温度。当高岭土的添加比例达到 6% 时,灰样的 ST 温度高于原煤灰样的 ST 温度值,说明此比例下高岭土起到改善灰熔融温度的作用。添加比例上升至 9% 时灰样的熔融温度上升较小,说明对灰熔融温度的改善效果增加较小。

为研究添加高岭土对灰内组分的影响,采用热分析仪研究添加高岭土后灰内组分发生变化的温度区间,具体见图 4。由图 4 可知,掺混高岭土后的灰样失重点明显提前,这说明高岭土对灰内组分产生较大影响。

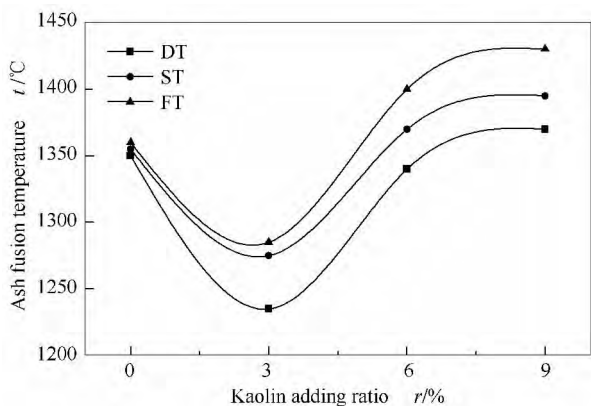


图 3 高岭土对准东煤灰熔融温度的影响

Figure 3 Effect of kaolin adding ratio on ash fusion temperature

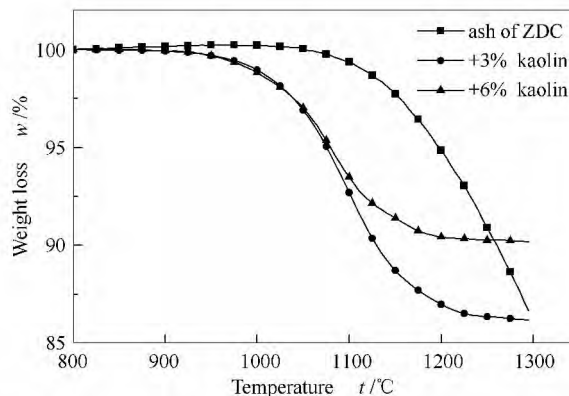


图 4 掺混高岭土前后灰样的 TG 曲线

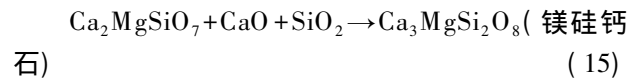
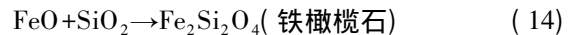
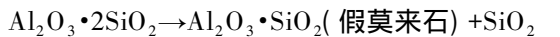
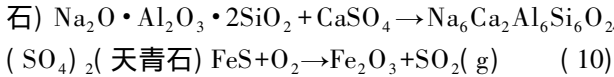
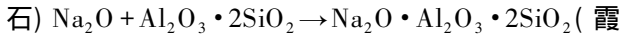
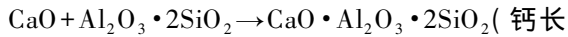
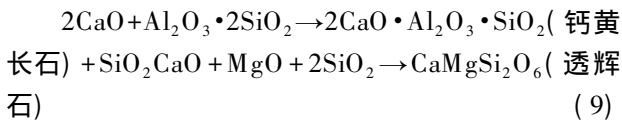
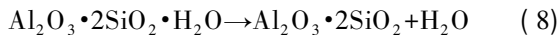
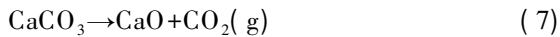
Figure 4 TG profiles of samples in different kaolin adding ratio

结合 XRD 研究添加不同比例高岭土后不同成灰温度灰样的物相变化情况,具体见图 5。

由图 5(a) 可知,在 815 °C 时,添加 3% 高岭土后灰样内的主要成分为硬石膏、钙铝黄长石、石英以及高岭土分解生成的假莫来石,且由于高岭土是一种硅铝酸盐,出现了钠与其反应生成的霞石,灰样内的 Fe 主要以赤铁矿和辉石形式存在。随着温度升高,添加不同比例高岭土的灰样开始发生不同的物相组分变化:在 1 000 °C 下,添加 3% 高岭土的灰样内出现了天青石、钙长石、以及透辉石等物质,当温度达到 1 150 °C 时灰样内物质以钙铝黄长石、镁硅钙石、及低熔点的铁橄榄石为主。

此外,与纯灰样相比,此时灰样内的硬石膏已经完全分解,S 元素主要以硫酸盐复合物的天青石形式存在,这说明高岭土能够有效促使硬石膏分解,从而导致图 4 中掺混高岭土灰样失重点明显提前。基于以上分析,推测添加 3% 高岭土后,灰样内主要发生的反应如下:

1 000 °C 前灰样内主要发生如下反应:



上述反应中钙铝黄长石和镁硅钙石易与灰内的辉石、铁橄榄石等物质形成低温共融物质,这与李帆等^[15]和刘志等^[16]研究配煤灰熔融特性时得到的结论一致。结合李帆等^[15]采用三元相图对低温共融现象的解释,分析认为,准东煤掺混 3% 高岭土后灰样内的各物相组分比例正好位于低温共融区域,最终导致添加 3% 高岭土灰样熔融温度降低。

当温度达到 1 000 °C 以上时,发生反应如下:

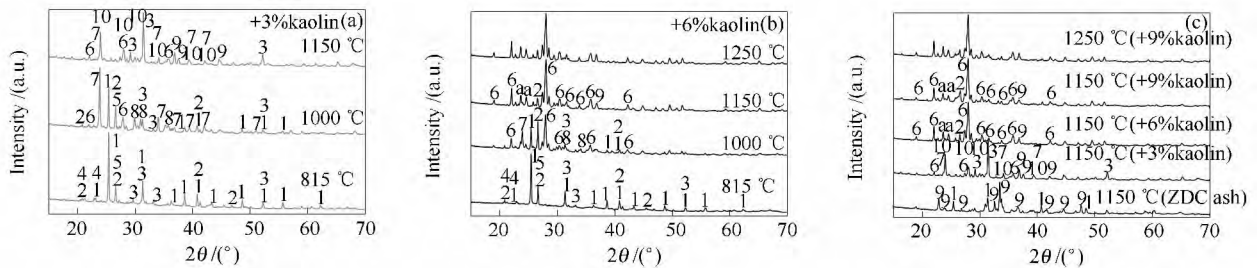


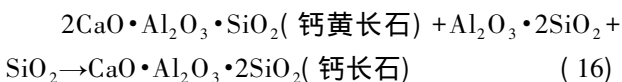
图 5 掺混高岭土后灰样 XRD 谱图

Figure 5 XRD patterns of ash samples with different kaolin blending ratios at different temperatures

- 1: anhydrite, CaSO_4 ; 2: mullite, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$; 3: gehlenite, $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$; 4: nepheline, NaAlSiO_4 ; 5: quartz, SiO_2 ; 6: anorthite, $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$; 7: celestite, $\text{Na}_6\text{Ca}_2\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}(\text{SO}_4)_2$; 8: diopside, $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$; 9: merwinite, $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$; 10: fayalite, Fe_2SiO_4 ; a: oligoclase, $(\text{Ca,Na})(\text{AlSi})_4\text{O}_8$

由图 5 (b) 可知,相比于添加 3% 高岭土的灰样,添加比例为 6% 的灰样在 1 000 °C 前以钙长石、假莫来石为主;在 1 150 °C 时灰样内主要物质几乎只有钙长石一种物质;此外,对比 6% 比例下灰样在 1 150 °C 和 1 250 °C 的 XRD 衍射谱图可以发现,两者谱图几乎重合,说明在此温度区间灰样内组分不再发生变化。钙长石熔融温度为 1 553 °C,但是在有杂质存在的情况下会降低其熔融温度,导致添加 6% 高岭土的灰样在 1 380 °C 左右的软化。

基于以上 XRD 分析,推测掺混 6% 高岭土后灰样内发生的反应与 3% 工况下的不同之处在于,高岭土比例增加后能够促使灰样内钙黄长石向钙长石转变,发生反应如下:



由图 5 (c) 可知,添加 3% 比例高岭土后,灰样中物相组分相比于准东煤纯灰样发生明显变化,高岭土掺混比例为 3% 与 6% 时,物相组分也存在明显不同。而 6% 和 9% 两种比例下灰样内物相的 XRD 结

果只在衍射强度上有稍微差别。对比 9% 添加比例灰样在 1 150 °C 和 1 250 °C 的衍射图谱可以发现两者结果相同,与 6% 比例下灰样呈现的结果一致。这说明两种比例下灰熔融特征温度相差较小的原因只是灰样内钙长石含量的差别引起。

2.3 高岭土对准东煤结渣判定指数的影响

在一系列的结渣指标中,灰熔点指标是人们最容易接受的评判标准,研究所采用的五彩湾煤 ST 高于 1 300 °C,按照灰熔点评判标准是属于不易结渣煤种,与现实不符,这说明灰熔点指标预测准东煤质结渣特性存在较大偏差,有必要参考其他指标预测高岭土对准东煤结渣特性的影响。表 2 为掺混高岭土后灰样的 XRF 分析结果。

为方便采用煤灰结渣特性的各种指标,将各元素转化为氧化物(Cl 转化为当量氧),并作归一化处理,处理结果见表 3。根据归一化处理后得到的掺混添加剂后灰内氧化物含量,结合常用煤灰结渣指标^[17]可计算得到高岭土对各种煤灰结渣指标的影响趋势,计算结果见表 4。

表2 灰样的XRF分析
Table 2 Results of XRF analysis

Element	Content <i>w</i> /%											Ashing rate
	Cl	Ti	K	Fe	Si	Na	Al	Mg	S	Ca	O	
815℃	0.11	0.5	0.3	5.56	6.7	3.77	3.8	4.2	11	17.5	45.1	4.53
+3%kaolin	0.05	0.41	0.28	3.42	14.2	2.69	11.8	2.61	7.2	11.3	46.5	7.04
+6%kaolin	0.04	0.38	0.27	2.45	17.41	2.14	15.5	1.82	4.83	7.45	48	9.93
+9%kaolin	0.03	0.35	0.25	1.89	19.22	1.82	17.7	1.43	4.04	6.53	47.4	12.79
Kaolin	0.02	0.18	0.18	0.24	24.8	0.03	24.1	0.03	0.02	0.16	50.6	99.39

表3 灰样氧化物归一化处理
Table 3 Summary on oxides contents after normalization

Oxide	Content <i>w</i> /%									
	TiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	CaO	
Ash sample	0.99	0.4	8.01	14.3	4.65	7.36	6.96	32.8	24.5	
+3%kaolin	0.68	0.34	4.89	30.4	3.63	22.3	4.35	18	15.8	
+6%kaolin	0.63	0.33	3.5	37.3	2.88	29.3	3.03	12.1	10.4	
+9%kaolin	0.58	0.3	2.7	41.2	2.45	33.4	2.38	10.1	9.14	

表4 高岭土对准东煤结渣指标的影响
Table 4 Effects of kaolin on fusion characteristic index of ZDC

Slagging index	ZDC ash		+3% kaolin		+6% kaolin		+9% kaolin		Slagging trend
	result	level	result	level	result	level	result	level	
ST	1 360	slight	1 275	medium	1 380	slight	1 420	slight	—
B/A	1.97	serious	0.54	serious	0.30	medium	0.23	slight	↓
G	26.6	serious	54.84	serious	68.74	medium	74.33	slight	↓
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	1.94	medium	1.37	slight	1.27	slight	1.23	slight	↓
Rs	1.2	medium	0.32	slight	0.17	slight	0.12	slight	↓
Fe ₂ O ₃ /CaO	0.33	medium	0.31	medium	0.34	medium	0.30	slight	↓
Rz	4.5	serious	2.23	serious	1.39	slight	1.10	slight	↓
Sc	0.97	serious	0.61	serious	0.34	slight	0.26	slight	↓

由表4可知,随着高岭土添加比例的增加,煤灰结渣特性指标均呈现逐渐缓解的趋势,但在添加3%时,灰样仍处于易结渣的阶段;添加比例超过6%之后,多数准确度超过60%的判定指数显示灰样只有轻微结渣。因此,在准东煤利用过程中可选取高岭土,或者灰样内富含高岭石的煤质参考此比例进行掺烧。

3 结论

准东煤灰中原始矿物质以硬石膏、镁黄长石、硅

酸钙为主,高温下生成大量镁硅钙石,从而使准东煤ST温度高于1300℃;掺混3%高岭土后,准东煤灰中主要以钙黄长石、铁橄榄石、镁硅钙石为主,此类物质易形成低温共融物,导致灰样ST温度降低至1275℃;添加比例超过6%后,灰中矿物质由易形成低温共融的钙黄长石向高熔点的钙长石转变,从而导致灰样ST快速上升至1380℃;结渣指标计算结果表明,高岭土掺混比例达到6%时,能有效缓解准东煤结渣。

参考文献

- [1] 严陆光,夏训成,吕绍勤. 大力推进新疆大规模综合能源基地的发展[J]. 电工电能新技术, 2011, 30(1): 1-7.
(YAN Lu-guang, XIA Xun-cheng, LÜ Shao-qin. Great promotion of development of large scale integrative energy base in Xinjiang [J]. Adv Technol Elect Eng Energy, 2011, 30(1): 1-7.)
- [2] 宋汉疆. 新疆准东煤田煤炭综合利用问题探讨[J]. 西部探矿工程, 2008, (9): 149-151.
(SONG Han-jiang. Study of comprehensive utilization problem of Xinjiang Zhundong coal [J]. West China Expor Eng, 2008, (9): 149-151.)
- [3] 刘大海,张守玉,涂圣康,金涛,施登宇,裴育峰. 五彩湾煤中钠在热解过程中的形态变迁[J]. 燃料化学学报, 2014, 42(10): 1190-

1196.
(LIU Da-hai , ZHANG Shou-yu , TU Sheng-kang , JIN Tao , SHI Deng-yu , PEI Yu-feng. Transformation of sodium during Wucuiwan coal pyrolysis [J]. J Fuel Chem Technol , 2014 , 42(10) : 1190-1196.)
- [4] 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 Ming-gang. Influence of high-sodium coal upon slagging , contamination , and corrosion on the heating surface of boilers [J]. Therm Power Gen , 2008 , 37(9) : 35-39.)
- [5] 杨忠灿, 刘家利, 何红光. 新疆准东煤特性及其锅炉选型[J]. 热力发电, 2010, 39(8) : 38-40.
(YANG Zhong-can , LIU Jia-li , HE Hong-guang. Study on properties of Zhundong coal in Xinjiang region and type selection for boilers burning this coal sort [J]. Therm Power Gen , 2010 , 39(8) : 38-40.)
- [6] 刘敬, 王智化, 项飞鹏, 黄镇宇, 刘建忠, 周俊虎, 岑可法. 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 Zhi-hua , XIANG Fei-peng , HUANG Zhen-yu , LIU Jian-zhong , ZHOU Jun-hu , CEN Ke-fa. Modes of occurrence and transformation of alkali metals in Zhundong coal during combustion [J]. J Fuel Chem Technol , 2014 , 42(3) : 316-322.)
- [7] TAKUWA T , NARUSE I. Emission control of sodium compounds and their formation mechanisms during coal combustion [J]. Proc Combust Inst , 2007 , 31(2) : 2863-2870.
- [8] KOSMINSKI A , ROSS D , AGNEW J B. Reactions between sodium and kaolin during gasification of a low-rank coal [J]. Fuel Process Technol , 2006 , 87(12) : 1051-1062.
- [9] 马永静. 矿物学角度研究添加剂对煤灰熔融性的作用及其机理[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
(MA Yong-jing. Study the effect of additives on the fusibility of coal ash and its mechanism from a mineralogical point of view [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology , 2012.)
- [10] 芦涛, 张雷, 张晔, 丰芸, 李含旭. 煤灰中矿物质组成对煤灰熔融温度的影响[J]. 燃料化学学报, 2010, 38(1) : 23-28.
(LU Tao , ZHANG Lei , ZHANG Ye , FENG Yun , LI Han-xu. Effect of mineral composition on coal ash fusion temperature [J]. J Fuel Chem Technol , 2010 , 38(1) : 23-28.)
- [11] 付子文, 王长安, 车得福, 翁青松. 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.
(FU Zi-wen , WANG Chang-an , CHE De-fu , WENG Qing-song. Experimental study on the effect of ashing temperature on physicochemical properties of Zhundong coal ashes [J]. J Eng Thermophys , 2014 , 35(3) : 609-613.)
- [12] 范建勇, 周永刚, 李培, 孔艳丽, 王炳辉, 赵虹. 准东煤灰熔融温度表征结渣特性的试验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(9) : 478-482.
(FAN Jian-yong , ZHOU Yong-gang , LI Pei , KONG Yan-li , WANG Bing-hui , ZHAO Hong. Research on Zhundong Coal's ash melting temperature characterizing its slagging characteristics [J]. J China Coal Soc , 2013 , 38(9) : 478-482.)
- [13] 马岩, 黄镇宇, 唐慧儒, 王智化, 周俊虎, 岑可法. 准东煤灰化过程中的矿物演变及矿物添加剂对其灰熔融特性的影响[J]. 燃料化学学报, 2014, 42(1) : 20-25.
(MA Yan , HUANG Zhen-yu , TANG Hui-ru , WANG Zhi-hua , ZHOU Jun-hu , CEN Ke-fa. Mineral conversion of Zhundong coal during ashing process and the effect of mineral additives on its ash fusion characteristics [J]. J Fuel Chem Technol , 2014 , 42(1) : 20-25.)
- [14] 王云刚, 赵钦新, 马海东, 姜薇薇. 准东煤灰熔融特性试验研究[J]. 动力工程学报, 2013, 33(11) : 841-846.
(WANG Yun-gang , ZHAO Qin-xin , MA Hai-dong , JIANG Wei-wei. Experimental study on ash fusion characteristics of Zhundong coal [J]. J Chin Soc Power Eng , 2013 , 33(11) : 841-846.)
- [15] 李帆, 邱建荣, 郑楚光. 混煤煤灰中矿物行为对煤灰熔融特性的影响[J]. 华中理工大学学报, 1997, 25(9) : 41-43.
(LI Fan , QIU Jian-rong , ZHENG Chu-guang. The Influence of the Behavior of Minerals in Blended Coal Ash on Ash Fusion Characteristics [J]. J HuaZhong Univ Sci Technol , 1997 , 25(9) : 41-43.)
- [16] 刘志. 配煤煤灰内矿物质转变过程与熔融特性规律研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2006.
(LIU Zhi. The study on minerals transition process and fusing regularity of blending coal-ashes [D]. Zhejiang: Zhejiang University , 2006.)
- [17] 李永兴, 陈春元. 动力用煤结渣特性综合判别指数的研究[J]. 热力发电, 1994, (3) : 36-39.
(LI Yong-xing , CHEN Chun-yuan. Research of slagging index of coal [J]. Therm Power Gen , 1994 , (3) : 36-39.)