第52卷 第8期 西安交通大学学报 Vol. 52 No. 8
2018年8月 JOURNAL OF XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY Aug. 2018

DOI：10.7652/xjtuxb201808021

灰化方式和温度对新疆高碱煤灰理化特性的影响

赵磊，王长安，朱晨钊，袁茂博，韩涛，车得福
（西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室，710049，西安）

摘要：为研究灰化方式和温度对新疆高碱煤灰理化特性的影响，对新疆准东煤分别利用等离子低温灰化方式和传统缓慢制灰方式制灰，使用X射线荧光光谱仪、电子扫描显微镜与能谱分析、X射线衍射仪等手段分析研究了灰样的微观形貌、组分和灰中矿物质的演变规律。实验结果表明：灰化方式不同时灰中元素含量和矿物质种类有较大差异，等离子低温灰中矿物质种类较多，不同煤种低温灰中钠的赋存形态存在差异；灰化温度升高，钠和氯元素相对含量减少，释放速率主要与钠和氯赋存的矿物质种类有关；随温度升高灰中矿物质主要变化是 $CaCO_3$ 的分解和 $CaSO_4$ 的生成，天池灰中 Na_2SO_4 特征峰在815 ℃消失，一部分钠以硫酸盐的形式释放到烟气中，而另一部分生成新的含钠组分；对于准东煤这种高碱金属燃料，现有国标缓慢灰化法制灰会造成灰中碱金属的大量释放及矿物质种类发生变化。为确保碱金属测量的准确性，建议在采取常规制灰方式的同时采用等离子低温灰化方法进行对比研究。

关键词：准东煤；低温灰；碱金属；矿物质
中图分类号：TK16 **文献标志码**：A **文章编号**：0253-987X(2018)08-0139-07

Effects of Ashing Method and Temperature on the Ash Physicochemical Properties of High-Alkali Coals in Xinjiang

ZHAO Lei, WANG Chang'an, ZHU Chenzhao, YUAN Maobo, HAN Tao, CHE Defu
(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Effects of ashing method and temperature on the ash physicochemical properties of the high-alkali coal in Xinjiang are investigated using the plasma low temperature ashing method and the traditional slow ashing method. X-ray fluorescence spectroscopy, scanning electron microscopy and X-ray diffractometer are used to analyze the micromorphology, composition and evolution of the minerals in the ashes. Results show that the elements content and mineral species in the ashes are quite different for different ashing methods. The ash from the plasma low-temperature ashing process has more mineral species, and the existence of sodium is different in different coal ashes. When the ashing temperature increases, the contents of sodium and chlorine decrease and their releasing rate is mainly related to the mineral species in ash. The main changes of minerals in ashes are the decomposition of $CaCO_3$ and the formation of $CaSO_4$ as the temperature increases. Part of the sodium component is released into the flue gas in the form of sulfate at 815 ℃, while the rest of the sodium is formed into new sodium-containing components. The slowing ashing method in the existing national standard would lead to a large release of alkali

收稿日期：2018-01-23。 作者简介：赵磊(1991—)，男，硕士生；王长安(通信作者)，男，副教授。 基金项目：国家重点研发计划资助项目(2017YFB0602003)；国家自然科学基金资助项目(51506163)。
网络出版时间：2018-06-22 网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180622.1721.010.html

万方数据

metals and transformation of mineral varieties for Zhundong coal with high alkali metal materials of. For ensuring the accuracy of measurement of alkali metals, it is suggested that the plasma low temperature ashing method could be used for comparative study while using the conventional ashing method.

Keywords: Zhundong coal; low temperature ash; alkali metal; minerals

新疆准东煤田是我国乃至世界上最大的整装煤田，煤炭资源储量达3 900亿吨，占全国煤炭总储量的7.2%[1-2]。近年来国家加大力度推行疆电外送战略，因此合理利用新疆准东煤炭资源发电显得极为重要。准东煤具有开发成本低、燃烧反应好且易燃尽等优点，具有广阔的应用前景，然而准东煤在燃烧使用过程中易出现锅炉受热面结渣、积灰和沾污，进而出现炉内堵塞、爆管等现象，严重制约着准东煤的有效利用[3-4]。灰中矿物质组分是导致受热面积灰、结渣和腐蚀等问题的关键因素。传统灰化方式是在较高温度下进行制灰，在此条件下制得灰中的无机物和碱金属组分已有部分挥发或发生了相互转化，很难反映出煤中矿物质原始的理化特性，难以准确分析受热面积灰和结渣的机理[5]。目前国内外许多学者采用不同的制灰方式和制灰温度，对灰样进行了大量的取样和分析，研究了煤灰中碱金属和矿物质的变化规律，以此来表征燃用准东煤时的积灰结渣机理[6-7]。杨燕梅等研究得出煤中硅、铝等元素在灰化过程中基本不释放的结论，并提出为保证煤中碱金属元素测量的准确性，灰化终温低于500 ℃[8]；付子文等研究表明对于高钠准东煤成灰温度为655 ℃时测得的灰理化特性更加接近煤灰真实特性[9]；Qi等在不同温度下进行了结渣机理的研究，得出硅酸盐是由Na_2SO_4分解产物和SiO_2反应生成，再与其他矿物质结合形成共晶体，导致结渣；Zhou等研究了准东煤的灰渣烧结特性，得出碱金属和钙在烧结过程中起着重要的作用[10]；Wei等在沉降管式炉进行准东煤燃烧，发现在1 000 ℃左右高碱煤中钠、钙和铁是导致结渣的主要因素，熔融灰分可能形成一层薄膜，进而捕获其他高熔点的颗粒[11]。

应当高度重视高碱燃料中钙、铁、钠和硫等在燃烧利用中引发的积灰结渣问题[12]，以上大多数研究只是关注了中高温下灰中碱金属组成和矿物质转变，但是在中高温灰化过程中已有部分碱金属逃逸或是灰中矿物质发生相互作用，而低温灰化可在较低的温度下使燃料的有机质被氧化，矿物质基本保持原有的形态。现有研究对准东煤在低温或低温向中温燃烧过程中煤灰的微观形貌、矿物质演变规律的研究相对较少，且尚未对比传统煤制灰温度和生物质标准制灰温度对煤灰理化特性的影响。本文选取了小于200 ℃、575 ℃、655 ℃和815 ℃4个灰化温度，分别对天池煤和五彩湾煤通过等离子低温灰化方式制灰、美国生物质标准制灰和我国煤制灰标准制灰，利用X射线荧光光谱仪、扫描电子显微镜和X射线衍射仪对样品的理化特性进行了详细的研究，探究灰化方式和温度变化对灰中化学元素组成、灰样微观形貌和矿物质种类的变化规律，这将为解释高碱金属煤积灰沾污提供理论依据。

1 灰化方式与分析方法

1.1 灰化方式

选用天池煤(TC)和五彩湾煤(WCW)两种典型的新疆准东煤，将其研磨、筛分至粒径小于200 μm并放置于干燥箱中，在105 ℃下干燥至质量恒定。4种不同的灰化方式和灰化温度如下：

(1)等离子体低温制灰，温度小于200 ℃(记为PA)。实验采用的制灰装备是YAMATO PR310等离子灰化仪。等离子低温灰化仪具有灰化温度低，灰中矿物质基本保持原生态等优点，能够准确、直接地研究灰中易分解和易挥发的矿物质。由于灰化温度低，灰分含量、非晶相矿物质含量较高，因此可以通过X射线衍射仪更准确地测定矿物质物相。

(2)马弗炉制灰，灰化温度为575 ℃(记为LA)。生物质的基本性质与煤有着很大的差异，这意味着不能依据制取煤灰的方式来制取生物质灰，美国材料与试验协会(ASTM)针对生物质的性质制定了专门的分析方法，该方法更加符合实际应用过程。按照ASTM E1755-01(Reapproved 2015)中所采用的灰分标准测定方法其样品灼烧终温为575 ℃左右，因此实验中选取煤样灰化温度为575 ℃。

(3)马弗炉制灰，灰化温度为655 ℃(记为MA)。付子文等研究了成灰温度对准东煤理化特性的影响，得出对于高钠含量的准东煤，建议灰化温度为655 ℃比较适合准东煤的结论[9]。

(4)马弗炉制灰，灰化温度为815 ℃(记为HA)。根据我国煤制灰标准(GB/T 212—2008)选取灰化

万方数据

温度为 815 ℃，加热前将样品平铺在瓷舟内，炉温升至 500 ℃时维持 30 min，继续升温至 815 ℃，维持恒温 1 h 后将瓷舟取出，在室温下冷却。

上述制得煤灰均进行多次重复实验，将灰样研磨至小于 200μm，以便后续研究分析。

1.2 分析方法

采用德国制造的 S4PIONEER 型 X 射线荧光光谱仪(XRF)对灰样进行灰成分分析；采用日本日立 SU3500 钨丝灯扫描电镜与能谱分析(SEM-EDS)对灰样的微观形貌和表面元素组成进行测试；采用 Bruker AXS 公司生产的 D8 ADVANCE X 射线衍射仪(XRD)测定灰中矿物质物相的分布。

2 结果与讨论

2.1 灰样的组分分析

灰中矿物质的赋存状态、含量对灰熔融行为有较大影响，表 1 是天池煤灰和五彩湾煤灰的灰成分分析，其表现出高钙、高硫特性，酸性氧化物(SiO_2、Al_2O_3、TiO_2)的质量分数(w)远低于碱性氧化物(Fe_2O_3、CaO、MgO、Na_2O、K_2O)，因此煤灰的熔融温度较低且更易发生积灰结渣现象。Liu 等通过建立 SiO_2、Al_2O_3、CaO、Fe_2O_3、K_2O 灰合成系统并测量了 34 种合成灰的熔融温度，得出了灰熔融温度随 Fe_2O_3 含量和硅铝比的升高而降低的结论[13]。当硅铝比在 0.5～2.0 之间时，煤样的灰熔点随着硅铝比的降低而升高的结论，计算两种煤灰在不同温度的硅铝比，天池煤灰的硅铝比在 0.5～0.6 之间，五彩湾煤灰的硅铝比在 0.9～1.0 之间，因此推测天池煤灰更易发生低温熔融现象。CaO 具有较高的熔点，但属于碱性氧化物，是形成低温共熔体的重要组成部分。低温灰化仪制得灰中碱金属 Ca 占有很大比例。采用不同的制灰方式，其灰中各元素的质量分数有差异。由表 1 知，两种准东煤在低温灰化仪制得灰中 CaO 的质量分数远高于马弗炉缓慢灰化制灰，分别高出了约 10 个和 7 个百分点，因此等离子低温灰化法可以保证更多的 Ca 元素留在灰中；SO_3 和 Fe_2O_3 的质量分数都远低于后者，天池煤灰中的 Fe_2O_3 的质量分数高于五彩湾煤灰，因此天池煤在燃烧过程中更易发生低温熔融现象。SO_3 的质量分数随灰化温度升高呈现上升的趋势，这是因为煤灰中的硫酸盐主要是 Na_2SO_4 和 $CaSO_4$，这两种硫酸盐都具有较高的分解温度。随温度升高天池煤灰中的 Na_2O 的质量分数稍减少，这主要是因为天池煤灰中的 Na 元素主要以 Na_2SO_4 的形式存在，随温度升高，少量 Na_2SO_4 被烟气携带走。温度升高几种酸性氧化物的质量分数略有提高，Na_2O 和 Cl 的质量分数减少，尤其是五彩湾煤灰中碱金属 Na 的质量分数大幅降低；五彩湾煤灰中绝大多数氧化物呈现增加的趋势，而天池煤灰中 SO_3、Al_2O_3、SiO_2 和 Fe_2O_3 等有一定增幅，CaO 和 MgO 的变化趋势正好相反，这与煤灰本身的特性和有机物在灰中挥发快慢有关。成灰温度为 575 ℃时 Na_2O 的质量分数最高，这对于研究准东煤成灰过程中 Na 迁移特性及形态变化很有意义。

2.2 灰样的表面元素组成和微观形貌分析

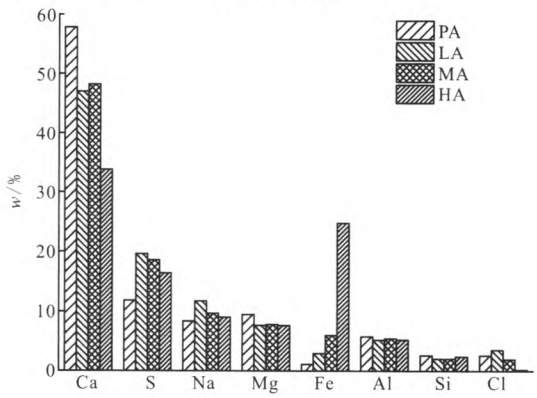
图 1 给出了通过 SEM-EDS 分析得到的灰表面元素的质量分数对比，两种煤灰中碱金属 Na 的质量分数在 575 ℃时最高，等离子低温灰的质量分数略低于 575 ℃煤灰，五彩湾煤灰的 Na 的质量分数随温度升高释放很快，天池煤灰中的 Na 的质量分数变化较小，主要是和 Na 在煤灰中的赋存形态有关。等离子低温灰化方式制得两种煤灰中的碱土金属 Ca 的质量分数超过 50%，同 XRF 分析结果一致，高于马弗炉制灰；815 ℃的天池煤灰 Ca 元素有大幅度的减少，这是由于 Fe 的质量分数有了大幅增加。随温度升高，Ca 的质量分数整体上没有太大的变

表 1　天池和五彩湾烟煤灰的化学成分分析

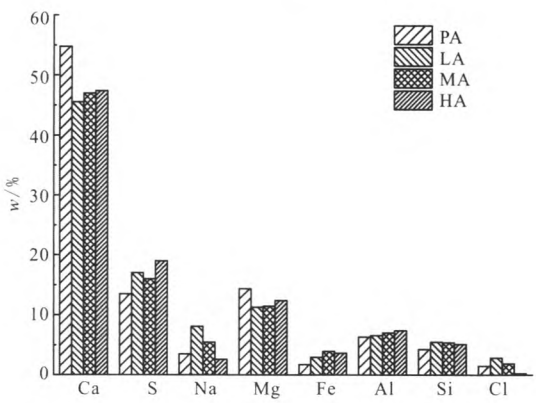
灰样	w/%											
	CaO	SO_3	MgO	Na_2O	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	Cl	BaO	TiO_2	MnO	K_2O
TC-PA	40.0	20.0	8.21	8.13	7.12	4.33	1.97	1.65	0.75	0.45	0.40	0.18
TC-LA	29.9	26.9	10.7	9.32	5.48	2.75	5.16	2.03	0.39	0.38	0.33	0.12
TC-MA	32.2	28.3	7.05	8.78	6.48	3.22	5.26	1.29	0.42	0.42	0.30	0.17
TC-HA	29.4	31.1	8.18	7.41	7.41	4.27	7.13	0.20	1.05	0.42	0.32	0.34
WCW-PA	36.4	19.7	12.8	3.84	9.6	9.04	1.61	0.95	0.10	0.40	0.10	0.14
WCW-LA	28.0	22.5	8.98	6.08	7.58	7.81	4.29	1.75	0.20	0.46	0.07	0.29
WCW-MA	29.5	23.0	10.0	4.23	8.51	7.68	4.29	1.22	0.18	0.44	0.09	2.01
WCW-HA	30.7	27.1	11.1	2.42	8.63	8.26	4.42	0.08	0.31	0.47	0.11	2.38

万方数据

化。与 655 ℃相比，815 ℃天池煤灰中的 Fe 的质量分数增幅为 40.13%，煤中的 Fe 不仅参与煤灰中的共熔体反应，更重要的是煤中含铁矿物质在炉内的中间产物均具有低熔点的特征，因此无论以何种形式存在均可能引起结渣初始层的形成，天池煤灰表面 Fe 元素的质量分数增加了 3 倍多，因此 815 ℃时绝大多数含 Fe 组分主要附着在灰表面且更容易生成熔融物[14]。不同温度下，两种煤灰中 S 的质量分数为 10%～20%，说明灰中有较多的硫酸盐或硫化物组分，两种煤低温灰化仪制得灰中的 S 的质量分数低于马弗炉制灰，这是因为低温下灰样中还有更多的碳酸盐生成。采用不同的灰化方式或不同的制灰温度，Al 和 Si 的质量分数几乎无明显的变化，这是由于这两种元素在成灰过程中很难被气化释放，基本不会以气相形式释放。等离子低温灰中 Cl 的质量分数低于 575 ℃煤灰，但随温度升高，Cl 的质量分数减少，在 815 ℃时已完全释放。



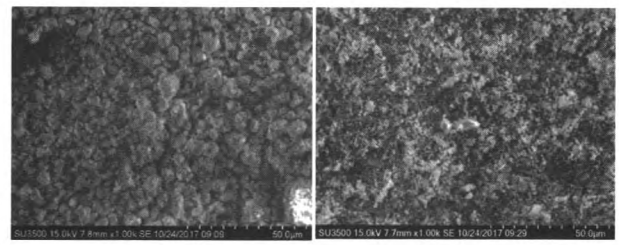
(a)天池煤灰



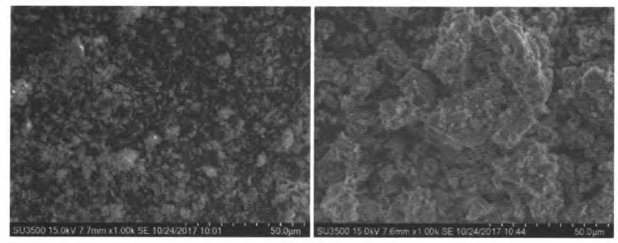
(b)五彩湾煤灰

图 1 两种准东煤灰表面元素的质量分数

天池煤和五彩湾煤在等离子灰化仪和马弗炉中制得灰样的微观形貌如图 2、图 3 所示，灰化方式和温度不同，煤灰的微观形貌也存在较大的差异。图 2 中天池煤等离子低温仪制得灰样主要是由较大颗粒灰和微小颗粒灰构成，颗粒之间有明显的分界，煤灰颗粒略大且较为光滑，这是因为灰化温度很低，灰样基本保持了原有的矿物质。575 ℃时部分颗粒灰独立地散落在灰样中，部分较大的颗粒灰上，吸附了许多更微小的无定形颗粒灰，由图 2b 可以看出，灰样主要是纤维状灰且灰表面粗糙；灰化温度为 655 ℃时，灰样中大小不一的颗粒灰之间有明显的分界和分层，与 575 ℃相比，颗粒灰也更光滑，主要是因为该温度还未达到煤灰的熔融温度，温度升高时灰中的部分矿物质发生了分解和有机质在加热过程中释放到烟气中，而 815 ℃的灰样已经出现了部分熔融，灰样中可以发现明显纹路的块状灰及夹在块状灰之间的小颗粒灰，天池煤灰在 815 ℃发生熔融，推断是由于 Fe 的质量分数过高的缘故，Fe 的质量分

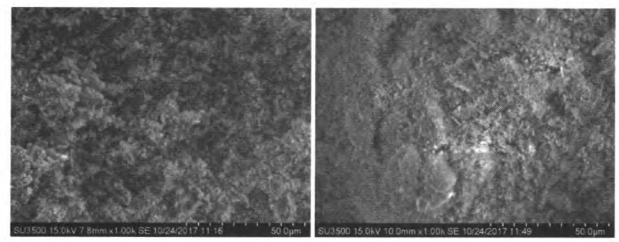


(a)PA (b)LA

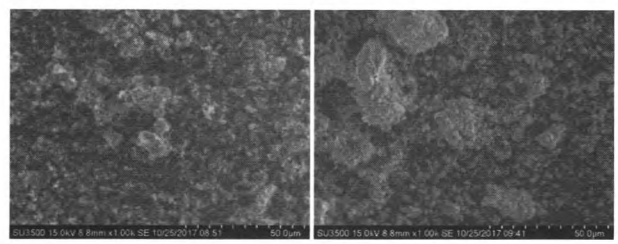


(c)MA (d)HA

图 2 不同制灰方式下天池煤灰的微观形貌



(a)PA (b)LA



(c)MA (d)HA

图 3 不同制灰方式下五彩湾煤灰的微观形貌

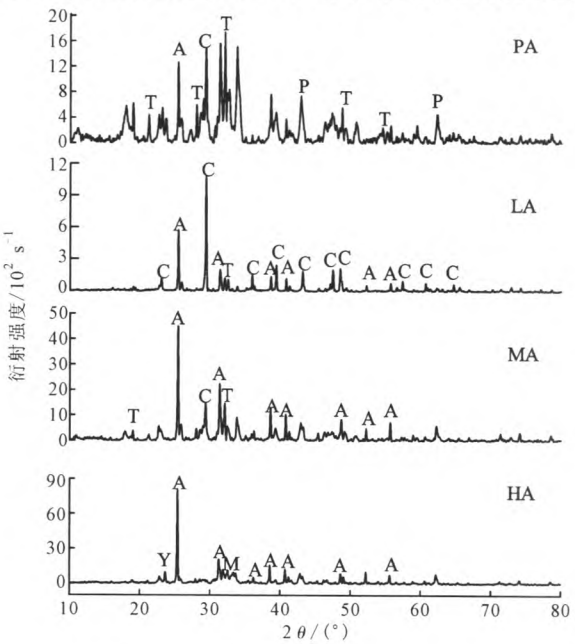
万方数据

数高会降低煤灰的熔融温度。图 3 中五彩湾煤灰主要是由微小颗粒灰、较大的球形灰及无定型块状灰构成。等离子低温灰化法制得五彩湾煤灰的颗粒较小、表面粗糙，部分较大颗粒灰上吸附了纤维状灰。灰化温度为 575 ℃时灰样主要是粉末状、少量无定形块状灰和针枝状灰；655 ℃和 815 ℃灰样以微小颗粒状灰和较大的块状灰为主，随温度升高，细小灰颗粒变大且块状灰的体积增大、数量增多，高温下灰样显得更为紧凑、团聚加重且部分灰发生了熔融。等离子体低温灰化过程中矿物质之间几乎不发生反应，灰中矿物质主要是方解石和硫酸盐等。随着灰化温度的升高，灰中部分矿物质如碳酸盐和硫酸盐等发生分解，矿物质之间相互作用形成如钙长石和莫来石等，在马弗炉中发生烧结结块[7,15]。

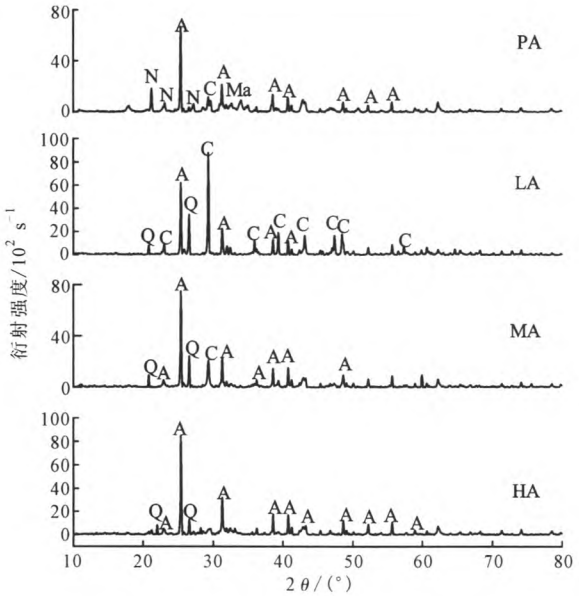
2.3　灰样的矿物质成分分析

天池煤灰和五彩湾煤灰在不同温度下的灰成分分析如图 4 所示，2θ 为 X 射线衍射仪的测量角度。灰中的矿物质在高温时容易发生熔融，按熔融种类可分为耐熔矿物质（主要为偏高岭石、莫来石等）和助熔矿物质（主要为石膏、长石类矿物质、霞石、赤铁矿和碱性氧化物等）两大类，前者在熔融过程中会起到骨架作用，后者会发生低温共熔反应，从而降低灰熔融温度且增加灰渣黏性，形成结渣[16]。

由图 4 灰样 XRD 谱图知，低温灰化的反应温度低于 200 ℃，对煤中的矿物质组分几乎没有影响，等离子低温灰中的矿物质种类较多，不同煤种灰样中的矿物质也存在差异。天池煤灰中的矿物质主要包括硫酸钠（Na_2SO_4）、方镁石（MgO）、方解石（$CaCO_3$）和石膏（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$）等，而五彩湾灰中的矿物质主要为石膏、霞石（$NaAlSiO_4$）、方解石和菱镁矿（$MgCO_3$）等，天池煤灰谱图中有较多的 Na_2SO_4 特征峰，五彩湾煤灰谱图中有较多的石膏特征峰。天池煤灰中的 Na 主要是以水溶性 Na_2SO_4 的形式存在，五彩湾灰中的 Na 则主要以霞石的形式存在。灰化温度为 575 ℃时，两种煤灰 XRD 谱图主要是以大量的 $CaCO_3$ 和 $CaSO_4$ 特征峰为主，天池煤灰中的方镁石特征峰消失，Na_2SO_4 特征峰数量大幅减少，五彩湾煤灰中的霞石特征峰消失，出现了石英的特征峰。由前述分析知 575 ℃时两种煤灰的碱金属 Na 的质量分数最高，因此在该温度下 Na 以其他形式存在于灰样中，说明采用马弗炉国标法制灰改变了碱金属本来的赋存形态。灰化温度为 655 ℃时，两种煤灰中的 $CaCO_3$ 特征峰数量和强度大幅度减少，出现了大量 $CaSO_4$ 特征峰，这是由于方解石发生分解反应生成 CaO，和灰中的硫化物反应生成了 $CaSO_4$。与 655 ℃相比，灰化温度为 815 ℃时两种灰中 $CaCO_3$ 的特征峰消失，主要矿物质是 $CaSO_4$；天池煤灰中 Na_2SO_4 特征峰消失，未检测到其他含 Na 矿物质；天池煤灰中出现了硫铝酸钙（$Ca_4Al_6O_{12}SO_4$）和镁硅钙石（$Ca_3Mg(SiO_4)_2$）的特征峰，说明天池煤灰在此温度形成少量低温共熔物，引发黏结现象。五彩湾烟煤在温度



(a)天池煤灰



(b)五彩湾煤灰

A：$CaSO_4$；T：Na_2SO_4；C：$CaCO_3$；Y：$Ca_4Al_6O_{12}SO_4$；P：MgO；M：$Ca_3Mg(SiO_4)_2$；Q：SiO_2；N：$NaAlSiO_4$；Ma：$MgCO_3$

图 4　天池煤灰和五彩湾煤灰的 XRD 分析谱图

万方数据

从575℃升至815℃的过程中，灰中矿物质主要发生 $CaCO_3$ 的分解和 $CaSO_4$ 的生成反应。

等离子低温灰化法和采用马弗炉缓慢灰化法制得灰样的矿物质成分有较大差异。等离子低温制得天池煤灰和五彩湾煤灰中 Na 分别以硫酸盐和霞石的形式存在，而马弗炉传统缓慢灰化法制得灰中这两种矿物质消失或大幅度减少，说明矿物质形态发生了明显变化。温度由575℃升高至815℃的过程中，灰中矿物质变化主要是 $CaCO_3$ 分解向 $CaSO_4$ 的转变；815℃时天池煤灰中 Na_2SO_4 特征峰消失，开始出现低温熔融物，但由前述分析知天池煤灰中 Na_2O 的质量分数只有略微减少，到达该温度时，小部分钠组分以硫酸盐的形式释放到烟气中，而另一部分与灰中其他组分反应生成新的含钠组分。

3 结 论

通过对天池和五彩湾煤在不同灰化方法和温度下制得的灰样进行理化特性分析和研究，主要得出了如下结论：

(1)等离子低温灰化方式和传统缓慢灰化法制灰相比，所得灰中元素的质量分数和矿物质种类有较大差异。等离子低温灰中矿物质种类较多，天池煤灰中 Na 以硫酸盐形式存在，五彩湾煤灰中 Na 以硅铝酸盐形式存在，因此不同煤种低温灰中 Na 的赋存形态存在差异。

(2)灰化温度升高，Na 和 Cl 元素的质量分数减少，释放速率主要和其赋存的矿物质种类有关；随温度升高 S 的质量分数升高，灰中矿物质主要出现 $CaCO_3$ 的分解和 $CaSO_4$ 的生成。815℃时，$CaCO_3$ 特征峰消失，天池灰中 Na_2SO_4 特征峰在815℃消失且出现了硫铝酸钙的特征峰。

(3)对于准东煤这种高碱金属燃料，现有国标缓慢灰化法制灰会造成灰中碱金属大量释放及矿物质种类发生变化，等离子低温灰化法能基本完整保留煤中原有矿物质，但不能使煤中有机质完全被氧化。为确保碱金属的质量分数测量的准确性，建议在采取常规制灰方式的同时采用等离子低温灰化法进行对比研究。

参考文献：

[1] SI Junping, LIU Xiongwei, XU Minghou, et al. Effect of kaolin additive on PM2.5 reduction during pulverized coal combustion: importance of sodium and its occurrence in coal [J]. Applied Energy, 2014, 114 (2): 434-444.

[2] LI Jing, ZHUANG Xinguo, QUEROL X, et al. Environmental geochemistry of the feed coals and their combustion by-products from two coal-fired power plants in Xinjiang Province, Northwest China [J]. Fuel, 2012, 95(95): 446-456.

[3] SONG Guoliang, QI Xiaobin, SONG Weijian, et al. Slagging characteristics of Zhundong coal during circulating fluidized bed gasification [J]. Energy and Fuels, 2016, 30(5): 3967-3974.

[4] 林宗虎. 中国燃煤锅炉节能减排技术近况及展望 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(12): 1-5.
LIN Zonghu. Recent situation and prospect of technologies for energy saving and emission reduction of coal-fired boilers in China [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(12): 1-5.

[5] 李君杰, 熊彪, 张泰, 等. 准东煤灰沉积特性的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2017, 38(8): 1790-1794.
LI Junjie, XIONG Biao, ZHANG Tai, et al. Experimental study on ash deposition characteristics of Zhundong coal [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(8): 1790-1794.

[6] WANG Chang'an, FU Ziwen, WENG Qingsong, et al. Effect of ashing temperature on physical-chemical features of high-sodium ashes of Zhundong coals [J]. Energy Sources: Part A Recovery, Utilization and Environmental Effects, 2017, 39(8): 747-753.

[7] JING Nijie, ZHU Mingming, SHEN Guoqing, et al. Effect of ash preparation method on the sintering characteristics of ashes from combustion of coal and biomass blends [J]. Fuel, 2016, 186: 830-837.

[8] 杨燕梅, 杨欣华, 刘青, 等. 灰化温度对准东煤灰组分分析的影响 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(10): 2441-2447.
YANG Yanmei, YANG Xinhua, LIU Qing, et al. Effect of ashing temperature on analysis of Zhundong coal ash [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41 (10): 2441-2447.

[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.
FU Ziwen, WANG Chang'an, CHE Defu, et al. Experimental study on the effect of ashing temperature on physicochemical of Zhundong coal ashes [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(3): 609-613.

[10] ZHOU Hao, MA Weichen. An experimental study on the effects of adding biomass ashes on ash sintering be-

万方数据

havior of Zhundong coal [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 126: 689-701.

[11] WEI Bo, TAN Houzhang, WANG Xuebin, et al. Investigation on ash deposition characteristics during Zhundong coal combustion [J]. Journal of the Energy Institute, 2018, 91(1): 33-42.

[12] WANG Chang'an, ZHU Xin, LIU Xuan, et al. Correlations of chemical properties of high-alkali solid fuels: a comparative study between Zhundong coal and biomass [J]. Fuel, 2018, 211: 629-637.

[13] LIU Bo, HE Qihui, JIANG Zihao, et al. Relationship between coal ash composition and ash fusion temperatures [J]. Fuel, 2013, 105(105): 293-300.

[14] ZHONG Qiang, YANG Yongbin, JIANG Tao, et al. Effect of coal ash on ring behavior of iron-ore pellet powder in kiln [J]. Powder Technology, 2018, 323: 195-202.

[15] LI Jianbo, ZHU Mingming, ZHANG Zhezi, et al. Effect of coal blending and ashing temperature on ash sintering and fusion characteristics during combustion of Zhundong lignite [J]. Fuel, 2017, 195: 131-142.

[16] 周永刚，范建勇，李培，等. 高碱金属准东煤灰熔融过程的矿物质衍变 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(8): 1559-1564.
ZHOU Yonggang, FAN Jianyong, LI Pei, et al. Mineral transmutation of high alkali Zhundong coal in ash melting process [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(8): 1559-1564.

(编辑　武红江)

(上接第 66 页)

[14] LECUN Y, BOTTOU L, BENGIO Y, et al. Gradient-based learning applied to document recognition [J]. Proceedings of the IEEE, 2001, 86(11): 2278-2324.

[15] KINGMA D P, BA J. Adam: a method for stochastic optimization [EB/OL]. (2015-07-23) [2017-11-12]. http://arxiv.org/pdf/1412.6980v8.pdf.

[16] SRIVASTAVA N, HINTON G, KRIZHEVSKY A, et al. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting [J]. Journal of Machine Learning Research, 2014, 15(1): 1929-1958.

[17] ANGUITA D, GHIO A, ONETO L, et al. Human activity recognition on smartphones using a multiclass hardware-friendly support vector machine [C]// Proceedings of the 4th International Conference on Ambient Assisted Living and Home Care. Berlin, Germany: Springer, 2012: 216-223.

[18] ABADI M, AGARWAL A, BARHAM P, et al. TensorFlow: large-scale machine learning on heterogeneous distributed systems [EB/OL]. (2016-03-14) [2017-11-21]. http://arxiv.org/pdf/1603.04467v1.pdf.

[19] KWAPISZ J R, WEISS G M, MOORE S A. Activity recognition using cell phone accelerometers [J]. ACM SIGKDD Explorations Newsletter, 2011, 12(2): 74-82.

(编辑　武红江)

(上接第 79 页)

[13] OLIVA A, TORRALBA A. Building the gist of a scene: the role of global image features in recognition [J]. Progress in Brain Research, 2006, 155: 23-36.

[14] FELZENSZWALB P F, HUTTENLOCHER D P. Efficient graph-based image segmentation [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 59(2): 167-181.

[15] MALISIEWICZ T, EFROS A A. Recognition by association via learning per-exemplar distances [C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1-8.

[16] GRIDCHYN I, KOLMOGOROV V. Potts model, par-ametric maxflow and K-Submodular functions [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 2320-2327.

[17] 谭论正，夏利民，夏胜平. 基于多级 Sigmoid 神经网络的城市交通场景理解 [J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(4): 132-137.
TAN Lunzheng, XIA Limin, XIA Shengping. Urban traffic scene understanding based on multi-level sigmoidal neural network [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(4): 132-137.

[18] LADICKÝ L, RUSSELL C, KOHLI P, et al. Associative hierarchical random fields [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 36(6): 1056-1077.

(编辑　武红江)

万方数据