

准东煤燃烧过程中碱金属迁移规律

高继录¹, 盛增庆², 陈晓利¹, 郭万贵³, 陈永辉¹, 石亮³, 庞开宇¹

(1. 中电投东北能源科技有限公司, 辽宁 沈阳 110179; 2. 国家电投集团新疆能源化工有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830063;

3. 中电投新疆能源化工集团五彩湾发电有限责任公司, 新疆 昌吉 831700)

摘要: 由于准东矿区地域宽阔, 不同地区的准东煤性质存在一定差异。为了探求某准东煤的结渣沾污机理, 在卧式管式炉及一维沉降炉中进行不同工况的准东煤燃烧试验, 并通过电感耦合等离子体发射光谱仪对煤灰中碱及碱土金属含量进行表征, 研究了准东煤在不同反应环境中碱及碱土金属的迁移和沉积规律。结果表明: 随燃烧温度的升高, 煤样中钠金属逃逸量升高, 当温度超过 1 100 °C 时, 钠金属逃逸量为 2 760 μg/g, 超过 85%。不同温度下煤灰中相同种类的其他氧化物含量较接近, CaO 与 MgO 在灰中占比较大。O₂ 体积分数对钠逃逸量的影响不明显, 对相同种类氧化物占比影响较小, 最大相差仅为 0.52%。在沉降炉试验中, 随温度的升高, 沉积灰灰样颜色由浅变深, 灰沉积逐渐加重并难以清除, 表明温度升高对结渣有促进作用。温度超过 1 000 °C 时, Na 挥发基本完成, 含量稳定在 11% 左右。高温下, 灰沉积管表面产生氧化皮脱落现象。在过量空气系数较大时, 沉积灰灰样中的团聚烧结物较其他 2 种气氛少, 但减弱幅度较小。炉膛中的煤粉燃烧均匀性随煤粉细度的增大而变差, 导致部分煤粉剧烈燃烧使炉膛内局部温度偏高, 灰沉积加重。此外, 灰中的大颗粒数量也随粒径的增大而增多, 黏结在结渣棒上的大颗粒增多。

关键词: 准东煤; 碱金属; 迁移规律; 管式炉; 一维沉降炉; 沉积规律

中图分类号: TQ534; TM611

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2019)04-0100-06

Migration law of alkali metals during Zhundong coal combustion

GAO Jilu¹, SHENG Zengqing², CHEN Xiaoli¹, GUO Wangui³, CHEN Yonghui¹, SHI Liang³, PANG Kaiyu¹

(1. CPI northeast Energy Technology Co., Ltd., Shenyang 110179, China; 2. State Electric Investment Group Xinjiang Energy and Chemical Co., Ltd.,

Urumqi 830063, China; 3. CPI Xinjiang Energy Chemical Group Wucuiwan Power Generation Co., Ltd., Changji 831700, China)

Abstract: Due to the wide range of Zhundong mining area, the properties of Zhundong coal are different in different areas. In order to explore the slagging mechanism of Zhundong coal, the combustion tests of Zhundong coal under different conditions were carried out in a horizontal tube furnace and one-dimensional drop furnace, and the alkali and alkali earth metals (AAEM) contents of Zhundong coal were measured by ICP-OES. The migration and deposition of AAEM in different reaction environments of Zhundong coal were investigated. The results show that with the increase of temperature, the amount of escaping sodium metal from coal samples increases and when the temperature exceeds 1 000 °C, that comes to 2 760 μg/g, over 85%. The contents of the other same oxides of the same kind in coal ash are close at different temperatures, the proportion of CaO and MgO in ash account for a lot. The O₂ fraction has little effect on sodium metal escape and the proportion of the same oxides, and the biggest difference is only 0.52%. The result of experiments of drop furnace shows that the color of ash deposit changing from light to deep and the deposition of gray gradually increases and ash deposit is difficult to be removed, which indicates that the increase of temperature promotes slagging. When the temperature exceeds 1 000 °C, the volatilization of sodium metal finishes and the content of Na in ash remains at about 11%. What's more, at high temperature, oxide scales on ash deposit tubes fall off. When the excess air coefficient is large, the agglomeration in ash deposition is less than that in the other two atmospheres, but the difference is not obvious. The uniformity of pulverized coal becomes worse with the increase of pulverized coal fineness during combustion, resulting in the severe combustion in some location in the furnace, and that makes the local temperature higher than other conditions and aggravates the ash deposition. In addition, the number of large particles in ash increases with the increase of particle size, and the number

收稿日期: 2018-07-05; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.18070503

基金项目: 国家电投集团科技项目(2015-227-XJN-KJ-X)

作者简介: 高继录(1980—), 男, 辽宁沈阳人, 高级工程师, 从事电站锅炉节能环保技术研究工作。E-mail: gaojilu@126.com

引用格式: 高继录, 盛增庆, 陈晓利, 等. 准东煤燃烧过程中碱金属迁移规律[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(4): 100-105.

GAO Jilu, SHENG Zengqing, CHEN Xiaoli, et al. Migration law of alkali metals during Zhundong coal combustion[J].

Clean Coal Technology, 2019, 25(4): 100-105.



移动阅读

of large particles adhering to slagging rods increases.

Key words: Zhudong coal; alkali metal; migration law; tube furnace; one-dimensional drop furnace; deposition law

0 引言

新疆准东矿区煤炭资源丰富,单位面积含煤量大,矿区内含煤地层为侏罗系西山窑组。在规划矿区范围内总资源量为 58 678.55 Mt^[1]。准东煤属于特低灰分、特低硫、高热值、低变质程度的优质天然洁净煤,有害物质硫、磷、砷、氟、氯含量少,属于特低或低的范围,无论是发电还是做煤化工的原料,均为低污染、低排放的洁净原料,可有效节约废物处理的费用^[2]。但在准东煤的实际使用过程中,易产生沾污、结渣等问题,不利于锅炉的安全和经济运行,因此在实际应用中只能部分掺烧使用,限制了准东煤大规模开发应用。对准东煤进行全面系统的研究,对于解决准东煤的结渣、沾污问题,揭示其机理具有重要意义。

陈新蔚等^[3]利用 X-射线衍射仪和扫描电镜对准东煤进行分析,得出准东煤是低污染、低排放的洁净燃料。樊斌等^[4]在沉降炉中进行准东煤的燃烧试验,利用计算机控制扫描电镜技术研究了煤中矿物质的转化行为。孟建强^[5]采用多反应控制段携带流反应器,研究了空气分级燃烧条件下炉膛温度与主燃区过量空气系数对准东煤结渣及燃尽特性的影响。范建勇等^[6]利用微波消解法对准东原煤和按 GB/T 212—2008 制得的灰进行分析,得到其金属元素含量。翁青松等^[7]研究了准东煤碱金属赋存

形态以及不同萃取处理方式对其燃烧特性的影响。刘敬等^[8]采用三步化学提取试验分析了新疆煤碱金属赋存特性,对水溶的阴离子进行离子色谱分析,分别检测了不同温度、不同停留时间下准东煤灰的碱金属含量。刘炎泉等^[9]采用萃取法测量了准东煤中不同赋存形式的碱金属含量,并研究了高碱准东煤燃烧过程中碱金属在气、固两相中的分布。王智化等^[10]研究了准东煤中碱金属的赋存形态,并将煤样置于惰性气体氛围的管式炉中,研究了热解条件下碱金属随温度的迁移规律,结果表明,准东煤中的钠主要以水溶钠形式存在,钾以有机钾和不溶钾为主。准东煤的全面研究可为锅炉的设计、选型以及运行提供依据^[11],对于减轻或抑制煤灰结渣沾污、保障锅炉安全运行、节能减排具有重要意义。

准东矿区地域范围广阔,各类准东煤性质不尽相同,目前国内外对碱金属迁移研究尚未完善^[12-14]。本文针对某地区准东煤,分别利用管式炉和一维沉降炉研究不同工况下碱金属的迁移规律和沉积规律,为准东煤的结渣、沾污机理研究提供依据。

1 试验

1.1 煤样特性

将准东矿区煤样 45 ℃ 干燥 8 h,研磨、筛分 ($R_{90} = 30\%$) 后进行测试,取 3 组平行试验平均值。其工业分析、元素分析测试结果见表 1。

表 1 煤/煤灰工业分析和元素分析

Table 1 Ultimate and proximate analysis of coal and ash

工业分析/%				元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/$	灰成分分析/%						
M_{ar}	A_{ar}	V_{ar}	FC_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}	($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Na_2O	K_2O	CaO	Fe_2O_3	MgO	Al_2O_3	SiO_2
25.01	3.34	17.22	54.43	61.06	2.89	6.97	0.45	0.28	20 167.07	7.41	0.24	28.92	3.04	16.77	5.25	8.41

按照 GB/T 1574—2007 标准,对准东矿区煤的标准制灰进行消解后采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)进行定量分析。标准制灰在马弗炉中完成,将称量好的准东矿区煤样装入瓷舟内,放入马弗炉中,以 10 ℃/min 的升温速率从常温升至 500 ℃,保温 30 min,再以 10 ℃/min 升至 815 ℃,保持 2 h 后,放入干燥皿中冷却。准东煤标准灰灰成分测试结果见表 1。

由表 1 可知,该煤样 $V_{\text{ar}} = 17.22\%$,属于中高挥发分煤, $M_{\text{ar}} = 25.01\%$,属于高全水分煤。根

据 GB/T 15224 可知,试验用煤的灰分产率为 3.34%,属于特低灰煤,硫含量仅 0.28%,属于特低硫煤,发热量达 20 167.07 kJ/kg,属于高热值褐煤,是优良的动力煤。

1.2 试验仪器及方法

煤在燃烧过程中,碱金属以气态的形式挥发至烟气中。在一定温度和压力下,烟气中气态碱金属与煤中固相或液相碱金属以及其他反应物质存在化学平衡和相平衡。因此,在确保一定采样温度和压力后,将全部烟气排出后,煤灰中碱金属总量为该采

样温度和压力下碱金属逃逸后的剩余总量。为充分研究准东煤中碱金属的迁移规律,本文在特制卧式管式炉中进行碱金属迁移规律试验,并在一维沉降炉中进行碱金属沉积规律试验。

1.2.1 卧式管式炉中碱金属迁移特性试验

本文搭建了一套包含温控、配气输送和密封收集功能的燃烧反应炉,如图1所示。试验系统由配气部分、炉体部分以及采样部分组成。配气部分主要用于模拟烟气环境,按煤量折算以一定比例配入 N_2 和 O_2 ,气体流量由气瓶后管道气体流量计控制。炉体采用套双管设计,外管为 $\phi 100\text{ mm}\times 1\ 100\text{ mm}$ 刚玉管,外侧有电阻丝加热,内管为 $\phi 36\text{ mm}\times 1\ 200\text{ mm}$ 的石英管,两端均有效密封。尾部连接三级吸收装置,确保进入气相的碱金属被完全收集。

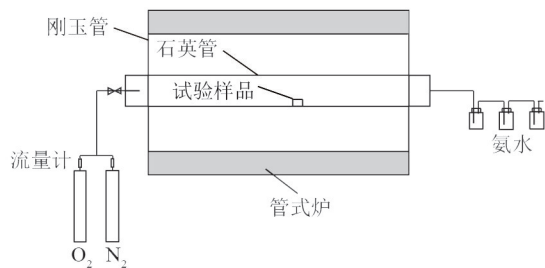


图1 燃烧卧式管式炉示意

Fig. 1 Sketch diagram of horizontal tube furnace

取一定煤样放入预先加热到一定温度的反应炉中,通过配气在预定的氛围中燃烧。燃烧时间以样品煤达到完全燃烧为原则,燃烧过程中的所有烟气收集后进行检测。试验完成后将煤灰收集、消解,测量煤灰中剩余的碱金属含量。

1.2.2 沉降炉中碱金属沉积试验

在两段加热式一维沉降炉试验台上模拟燃烧工况,通过观察结渣棒上的结渣状况,判断试验煤种在燃烧过程中的结渣倾向,并研究温度、过量空气系数、煤粉细度等对结渣特性的影响。

试验系统主要包括沉降炉主体、给煤机、空压机及进气系统、温控箱及加热系统、灰沉积管、排烟系统,如图2所示。燃烧所需空气由空压机经流量计及送风管路从炉膛顶部送入,煤粉由给煤机从炉膛顶部送入。煤粉和空气送入炉膛后在下降过程中混合,达到着火温度后燃烧。燃烧后的灰渣落在沉积灰收集装置中,烟气随排烟系统排出。

为模拟锅炉受热面灰沉积的实际情况,沉积灰收集装置采用水冷式灰沉积管,其结构如图3所示。灰沉积管选用T91钢材,壁厚约5 mm,通过套管的通水量控制灰沉积管壁温,模拟锅炉受热面温度。在不同工况下模拟燃烧,稳定燃烧6 h后取出结渣

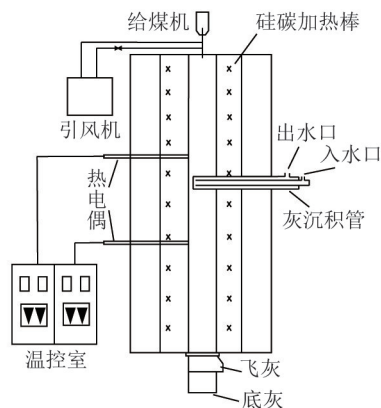


图2 沉降炉试验系统简图

Fig. 2 Sketch diagram of one-dimensional drop furnace



图3 沉积灰收集装置结构

Fig. 3 Diagram of ash deposit device

棒,对收集的灰样进行消解,采用电感耦合等离子体发射光谱仪对消解的灰样以及收集的产物进行定量分析,研究不同工况下煤样碱金属沉积规律。

2 试验结果与分析

2.1 管式炉中碱金属迁移特性

2.1.1 温度的影响

图4(a)为不同燃烧温度下煤灰中各氧化物含量,CaO与MgO在灰中的占比较大。除了金属Na,不同温度下相同种类的氧化物含量较接近,相差在1%以内。图4(b)为不同温度下碱金属Na的逃逸量,可以看出,温度对Na挥发的影响显著。随燃烧温度升高,煤中Na的挥发量升高。900℃时,Na的逃逸量为862 μg/g;1 000℃时,Na的逃逸量为1 549 μg/g;高于1 000℃后,Na的逃逸量激增,1 100℃时达2 760 μg/g,超过Na总量的85%。

煤中Na主要有2种存在形式:①无机钠,如氯化钠晶体和水合离子等;②有机钠,以酸盐形式存在的钠和以配位形式存在于含氮或含氧官能团上的钠等^[13]。刘敬等^[8]指出,由于准东煤的高含水量,在煤颗粒燃烧过程中,水溶钠被带至颗粒表面并以NaCl形式释放,主要是水溶性Na向盐酸溶性Na

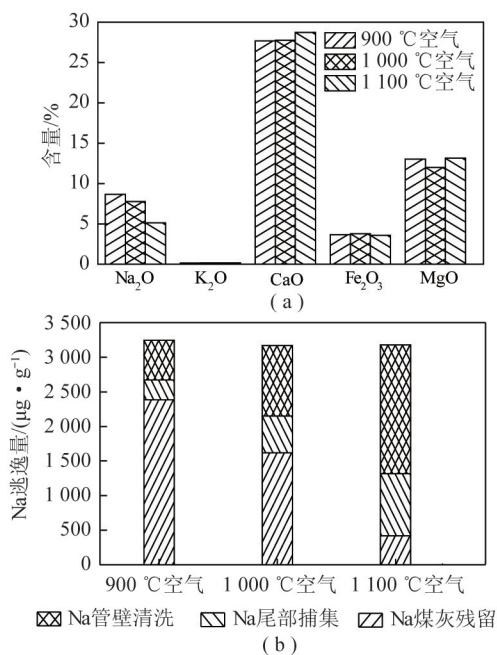


图4 不同燃烧温度下煤灰中各氧化物含量及碱金属Na逃逸量

Fig. 4 Content of ash content and escaping Na under different temperatures in tube furnace

转化,由固相转为气相的NaCl及熔融态 Na_2O 。煤中的Na主要是以水合离子形式存在的无机钠,因此随温度升高,Na的逃逸率上升。Zhang等^[15]认为,最后留在灰中的主要是以硅酸铝盐形式存在的不可溶性钠。

2.1.2 燃烧气氛的影响

图5(a)为不同燃烧气氛下煤灰中各氧化物含量,可以看出,1100 °C时,不同气氛下相同种类氧化物占比差别较小,最大相差仅为0.52%。不同燃烧气氛下碱金属Na的逃逸量如图5(b)所示,可以看出,3种气氛下碱金属Na的逃逸量相近,1100 °C时,气氛中 O_2 含量对碱金属钠的逃逸量影响较小。因此,煤样中Na的挥发主要与温度有关,与燃

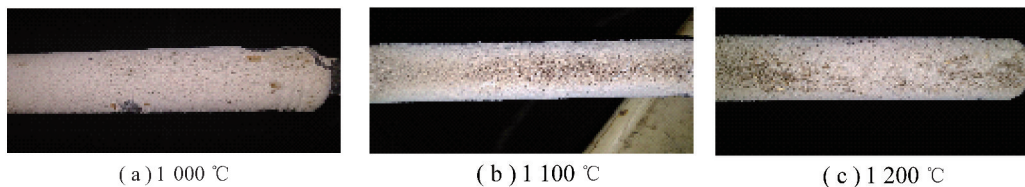


图6 不同温度下的灰样($R_{90}=30\%$, $\alpha=1.2$)

Fig. 6 Ash deposit under different temperatures($R_{90}=30\%$, $\alpha=1.2$)

图7为不同燃烧温度下的灰成分。可知,灰中存在大量的Ca、Na、Fe、Mg元素。Na元素含量随烟气温度的升高而降低,这是因为烟气温度越高,钠的挥发率越高,导致高温时积灰中的Na元素含量较少^[7]。挥发的Na主要是水溶钠,其主要在温度低

烧气氛中的 O_2 含量无显著关系。

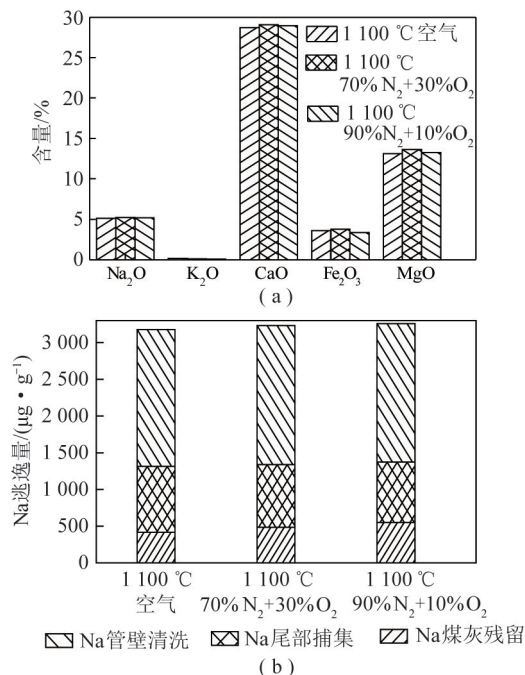


图5 不同燃烧气氛下煤灰中各氧化物含量和碱金属Na逃逸量

Fig. 5 Oxide content and alkali metal Na escape amount in coal ash under different atmosphere in tube furnace

2.2 沉降炉中碱金属沉积规律

2.2.1 不同温度下碱金属沉积规律

在煤粉粒径 $R_{90}=30\%$ 、过量空气系数 $\alpha=1.2$ 的条件下,研究燃烧温度分别为1000、1100、1200 °C的碱金属沉积规律,灰样实物如图6所示,可以看出,随温度的升高,沉积灰灰样颜色由浅变深。1000 °C时,沉积灰灰样的颜色较浅、形态较薄、较疏松,仅有小部分颜色较深,经震荡较易清除(图6(a))。但随温度升高,沉积灰灰样上出现大面积棕褐色烧结物,呈大块颗粒状,且有团聚现象,震荡时较难清除(图6(b)、(c))。

于1000 °C时释放,温度超过1000 °C后,Na挥发基本完成,灰中Na含量稳定在11%左右^[12]。Ca、Mg元素主要存在于较大的颗粒中,被初始层捕捉后使沉积层增厚。Fe元素含量较高,推测可能是由于高温下灰沉积管表面产生氧化皮脱落造成的。

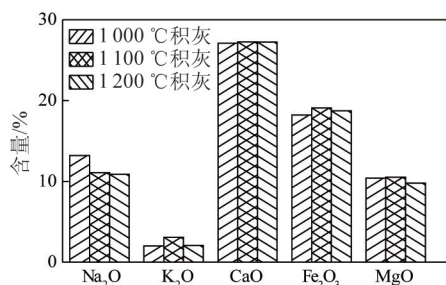


图7 不同温度下灰的组成

Fig. 7 Ash deposit content under different temperatures

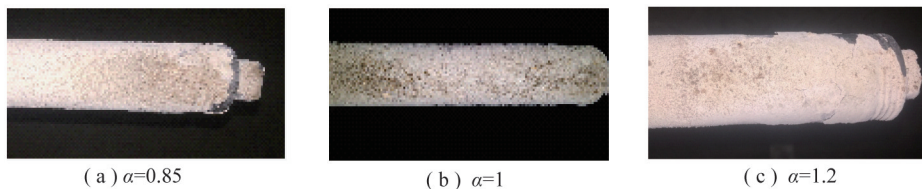
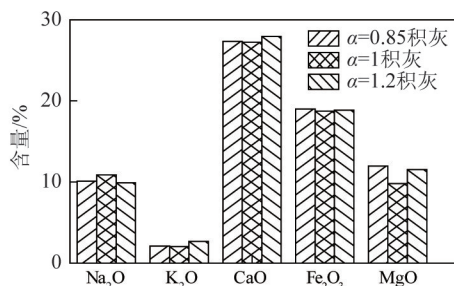
图8 不同过量空气系数下的灰样($R_{90}=30\%$ 、 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$)Fig. 8 Ash deposit under different air ratios($R_{90}=30\%$ 、 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$)

图9 不同过量空气系数下灰的组成

Fig. 9 Composition of ash deposit under different air ratios

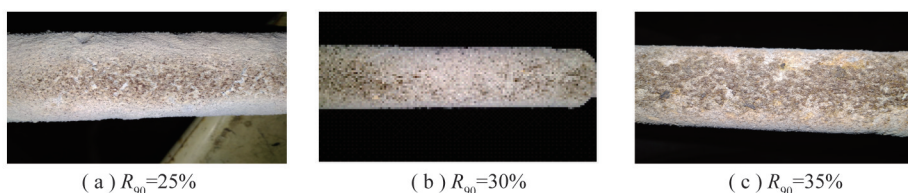
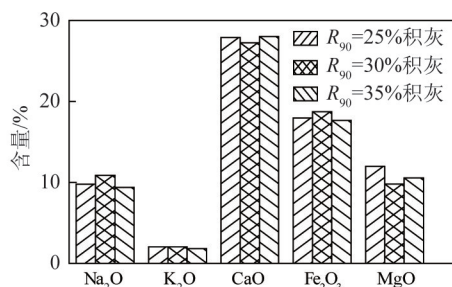
图10 不同煤粉细度下灰样实物($\alpha=1$ 、 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$)Fig. 10 Ash deposit under different fineness in drop furnace($\alpha=1$ 、 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$)

图11 不同煤粉细度下灰中各成分含量

Fig. 11 Content of various components in ash under different fineness of pulverized coal

2.2.2 不同过量空气系数下碱金属沉积规律

不同过量空气系数下收集的灰样如图8所示,可以看到,在过量空气系数较大时,沉积灰灰样中的棕褐色团聚烧结物较其他2种气氛少。随过量空气系数增大,灰沉积有所好转,但减弱幅度较小,说明氧化性气氛对于抑制结渣的作用不大。灰中各成分含量如图9所示。灰中主要元素仍为Ca、Na、Fe、Mg,其含量随气氛的变化并不明显,沉积灰中Fe元素的富集说明灰沉积管发生氧化皮脱落现象。

2.2.3 不同煤粉细度下碱金属沉积规律

不同煤粉粒径下的灰样如图10所示。各粒径沉积灰的沉积状况较相似,但 $R_{90}=35\%$ 时,其沉积灰棕褐色烧结物多于另2个粒径。这可能是因为单位给煤量一定时,随煤粉变粗,燃烧均匀性变差,导致部分煤粉剧烈燃烧使炉膛内局部温度偏高,灰沉积加重。随 R_{90} 增大,煤中大颗粒增多,灰中的大颗粒也增加,使黏结在结渣棒上的大颗粒增多。不同煤粉细度下灰中各成分含量如图11所示,灰中主要元素为Ca、Na、Fe、Mg,其含量随粒径的变化不明显。

3 结 论

1) 随燃烧温度的升高,煤样中钠金属逃逸量升高,温度高于 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 时,钠的挥发量激增, $1\ 100\ ^\circ\text{C}$ 时,钠的逃逸量为 $2\ 760\ \mu\text{g/g}$ 。温度对钠逃逸率的影响较明显,温度越高,逃逸率越大。 O_2 的体积分数对钠逃逸率影响不明显。

2) 随燃烧温度的升高,灰沉积逐渐加重。灰中碱金属Na含量随温度的升高而降低,Ca、Mg、Fe元素含量随温度的变化不明显。氧化性气氛对抑制结渣有一定作用,但作用不大,灰成分含量随气氛的变

化不明显。

3) 随煤粉细度增大,炉膛中的煤粉燃烧均匀性变差,导致部分煤粉剧烈燃烧使炉膛内局部温度偏高,灰沉积加重。另外,灰中的大颗粒数量也随粒径增大而增多,黏结在结渣棒上的大颗粒增多,灰中主要元素含量随气氛变化不明显。

参考文献 (References):

- [1] 张宇航. 新疆准东煤田东部矿区西山窑组沉积特征及煤层煤相分析[D]. 武汉:中国地质大学(武汉),2011.
- [2] 刘威,张忠孝,乌晓江,等. 高碱煤燃烧特性试验研究[J]. 电站系统工程,2014,30(2):20-22.
LIU Wei, ZHANG Zhongxiao, WU Xiaojiang, et al. Experimental study of high-alkali coal on combustion characteristic [J]. Power System Engineering, 2014, 30(2): 20-22.
- [3] 陈新蔚,庄新国,周继兵,等. 准东煤田煤质特征及分布规律[J]. 新疆地质,2013,31(1):89-93.
CHEN Xinwei, ZHUANG Xinguo, ZHOU Jibing, et al. Coal quality and its distribution of the Eastern Junggar coalfield in Junggar Basin, Xinjiang [J]. Xinjiang Geology, 2013, 31(1): 89-93.
- [4] 樊斌,于敦喜,曾宪鹏,等. 准东煤燃烧中矿物质转化行为的CCSEM研究[J]. 化工学报,2016,5(5):2117-2123.
FAN Bin, YU Dunxi, ZENG Xianpeng, et al. Mineral transformation during Zhundong coal combustion by CCSEM [J]. CIESC Journal, 2016, 5(5): 2117-2123.
- [5] 孟建强. 准东煤燃烧及结渣特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [6] 范建勇,周永刚,李培,等. 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(2):478-482.
FAN Jianyong, ZHOU Yonggang, LI Pei, et al. Research on Zhundong coal's ash melting temperature characterizing its slagging characteristics [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(2): 478-482.
- [7] 翁青松,王长安,车得福,等. 准东煤碱金属赋存形态及对燃烧特性的影响[J]. 燃烧科学与技术,2014,20(3):216-221.
WENG Qingsong, WANG Chang'an, CHE Defu, et al. Alkali metal occurrence mode and its influence on combustion characteristics in Zhundong coals [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2014, 20(3): 216-221.
- [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] 刘炎泉,程乐鸣,季杰强,等. 准东煤燃烧碱金属析出气、固相分布特性[J]. 燃料化学学报,2016,44(3):314-320.
LIU Yanquan, CHENG Leming, JI Jieqiang, et al. Distribution characteristics of alkali emission between gas and solid phase during Zhundong coal combustion [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2016, 44(3): 314-320.
- [10] 王智化,李谦,刘敬,等. 准东煤中碱金属的赋存形态及其在热解过程中的迁移规律[J]. 中国电机工程学报,2014,34(S1):130-135.
WANG Zhihua, LI Qian, LIU Jing, et al. Occurrence of alkali metals in Zhundong coal and its migration during pyrolysis process [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(S1): 130-135.
- [11] 杨志灿,刘家利,何红光. 新疆准东煤特性研究及其锅炉选型[J]. 热力发电,2010,39(8):38-40.
YANG Zhongcan, LIU Jiali, HE Hongguang. Study on properties of Zhundong coal in Xinjiang region and type-selection for boilers burning this coal sort [J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(8): 38-40.
- [12] 陈鸿伟,张志远,何骏鹏,等. 弱还原性气氛中碱金属盐对煤灰沾污特性的影响[J]. 动力工程学报,2017,37(2):98-104.
CHEN Hongwei, ZHANG Zhiyuan, HE Junpeng, et al. Effects of alkali salts on the fouling properties of coal ash in weak reducing atmosphere [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2017, 37(2): 98-104.
- [13] 姚宇翔,金晶,钟程鹏,等. 准东煤中钠的赋存形态及挥发特性[J]. 煤炭转化,2016,39(1):1-5.
YAO Yuxiang, JIN Jing, ZHONG Chengpeng, et al. Occurrence mode and volatilization characteristic of sodium in Zhundong Coal [J]. Coal Conversion, 2016, 39(1): 1-5.
- [14] 邵世康,朱书全,李宇琦. 中国动力煤应用现状及碳捕集与封存展望[J]. 洁净煤技术,2014,10(5):66-69.
TAI Shikang, ZHU Shuquan, LI Yuqi. Steam coal utilization and carbon capture and storage in China [J]. Clean Coal Technology, 2014, 10(5): 66-69.
- [15] ZHANG J, HAN C L, YAN Z, et al. The varying characterization of alkali metals (Na, K) from coal during the initial stage of coal combustion [J]. Energy & Fuels, 2001, 15(4): 2957-2960.