

燃煤过程中水蒸气对砷释放特性的影响

王贺飞,王春波,邹 潺,岳 爽,郭 辉

(华北电力大学 能源动力与机械工程学院,河北 保定 071003)

摘要:为了研究水蒸气对煤燃烧过程中砷释放特性的影响,在 800 ~ 1 300 °C 下对庆华煤进行燃烧试验,并结合 XRD 分析了水蒸气对砷释放的作用机理。气氛中有水蒸气时,可以明显加快煤的失重;相同温度下,气氛中存在水蒸气时,煤中砷的逃逸有一定的增加,随着水蒸气浓度的增加,逃逸率增加趋势放缓;随着温度的增加,水蒸气对砷的逃逸率的提升效果减弱。在水蒸气气氛下灰的矿物质组成结构发生变化,石膏等硫酸盐增多,主要是水蒸气促进了石膏的形成,缩减了高活性 CaO 的停留时间,抑制了 CaO 对砷的捕捉,造成砷吸附率降低,逃逸率增加。

关键词:水蒸气;砷;释放;煤燃烧

中图分类号:X50

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2017)04-0053-05

Effect of steam on arsenic volatile characteristics during coal combustion

Wang Hefei, Wang Chunbo, Zou Chan, Yue Shuang, Guo Hui

(Department of Energy Power & Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The combustion experiments of Qinghua coal were conducted on a customized isothermal thermogravimetric to study the effect of water on release characteristics of arsenic. Besides, XRD analysis was also used to make a further research on the mechanism of the effect of steam on release characteristics of arsenic. Results show that the presence of steam can accelerate the combustion rate of coal. At a certain temperature, the volatilization ratio of arsenic in steam atmosphere is larger than that without steam, and with the increase of steam concentration, the increase of arsenic volatilization ratio slow down. With the increase of temperature, volatilization ratio of arsenic increased gradually, but the positive effect of steam on volatilization ratio of arsenic begins to weaken. Compared with air atmosphere, mineral compositions in ash changed under the steam atmosphere, such as gypsum and other sulfate. It is mainly because the steam promoted the formation of gypsum and inhibited the formation of arsenate via avoiding the reaction between CaO and arsenic, resulting in the increase of arsenic volatilization ratio.

Key words: steam; arsenic; volatilization; coal combustion

0 引 言

燃煤发电是我国利用一次能源发电的主要方式,其产量占全国一次能源总量的 75% 左右^[1]。火力发电占主导的情况在可预见的几十年还将持续稳定不变。但是,由于煤炭消耗量巨大,其产生的微量和痕量元素污染问题近几年也引起人们的重视。这些痕量元素主要有 Hg、Pb、F、Cl、As、Se 等^[2]。其中砷(As)污染对人类、环境有着不可忽视的影响。砷

是有毒的类重金属,具有重金属的性质^[3],主要以三价砷和五价砷的形式存在,三价砷的毒性比五价砷高 50 倍^[4]。砷是一种有毒致癌元素^[5],砷中毒可影响人的肠胃系统、循环系统、肝、肾、神经系统和心脏等多种脏器及皮肤。

煤燃烧过程中对砷挥发有显著影响的因素有温度、煤质、燃烧气氛等。Sun Jingxin 等^[6]通过燃烧试验发现砷的挥发率随温度升高而不断增加;Clarke^[7]指出,温度是影响煤中砷释放最主要的原

收稿日期:2017-06-18;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.04.008

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0600701)

作者简介:王贺飞(1993—),男,河北保定人,硕士研究生,从事洁净煤燃烧研究工作。E-mail:591317559@qq.com

引用格式:王贺飞,王春波,邹潺,等.燃煤过程中水蒸气对砷释放特性的影响[J].洁净煤技术,2017,23(4):53-57,62.

Wang Hefei, Wang Chunbo, Zou Chan, et al. Effect of steam on arsenic volatile characteristics during coal combustion[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(4): 53-57, 62.

因;Low等^[8]使用富氧沉降炉结合XANES分析,得到 $27\text{O}_2/73\text{CO}_2$ 气氛下砷的挥发率略大于空气;Miller等^[9]研究了 SO_2 气氛对生物质燃烧中砷的释放特性的影响,研究表明 SO_2 对砷的释放有一定的抑制作用。许多学者的研究成果表明燃烧气氛对砷的排放特性有很大影响。

有研究说明了水分对煤的燃烧特性有重要影响^[10],且Gil等^[11]利用热分析技术研究了富氧气氛下水蒸气对煤粉着火的影响,发现相较于无水蒸气气氛,加入10%水蒸气可使煤粉着火温度降低,燃尽时刻提前;李超等^[12]利用自制的恒温热重测量试验台研究了水蒸气对煤燃烧特性的影响,结果表明在 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 下,加入20%水蒸气后,反应瞬时碳颗粒无法完全参与燃烧,剩余部分碳与水蒸气发生气化反应,加速了焦炭颗粒的失重,使燃烧失重速率增

大,燃尽时刻提前。研究砷在不同气氛下的释放规律已经受到越来越多的关注,而水分对煤燃烧过程中砷的释放特性的影响鲜见报道。

相关的研究已经深入各个燃烧领域^[13],许多学者在砷的赋存形态、挥发特性和机理上作了大量的工作^[14]。本文在总结前人工作的基础上研究水分对砷的挥发特性的影响,并通过XRD分析从机理上研究了水蒸气对砷释放特性的作用机制。

1 试验

1.1 试验样品选取

选取庆华煤作为研究煤种,其煤中砷含量为 $4.73\text{ }\mu\text{g/g}$,接近中国煤中砷含量的平均值 $4\text{ }\mu\text{g/g}$,煤的粒径为 $80\sim 120$ 目。庆华煤的工业分析与元素分析见表1。

表1 庆华煤的工业分析与元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of Qinghua coal

元素分析/%					工业分析/%				煤中砷含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
C_{ad}	H_{ad}	O_{ad}	N_{ad}	S_{ad}	M_{ad}	V_{ad}	A_{ad}	FC_{ad}	
57.11	3.39	5.37	0.96	0.76	1.32	19.43	29.09	50.16	4.73

1.2 试验燃烧设备及方法

试验燃烧设备为恒温管式炉,该燃烧系统由刚玉棒、温控器、热电偶、保温材料等组成,恒温管式炉的直径为 50 mm ,恒温区长度 120 mm 。试验系统如图1所示。

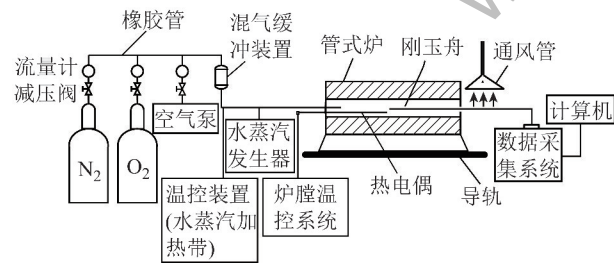


图1 恒温热重试验系统

Fig. 1 Constant temperature thermogravimetric experiment system

首先,设定试验温度,待温度恒定后通入气氛,通入的气体总量为 2.67 L/min ,已有试验证明,本试验系统中该流量可以消除外扩散的影响^[15]。在试验温度下通入气氛 30 min 后,称取 0.50 g 的煤样铺平放入长约 100 mm 、内深 9 mm 的刚玉舟内,推入炉中燃烧。待燃烧完全后将样品取出冷却保存,待

下一步消解测量。每次试验重复3次以上,将煤灰称量计算剩余质量分数,与工业分析对比无异后方可保存待测。试验选取温度为 $800\sim 1300\text{ }^\circ\text{C}$ (800 、 900 、 1000 、 1100 、 1200 、 $1300\text{ }^\circ\text{C}$),水蒸气浓度为 $0\sim 30\%$ ($21\text{O}_2/79\text{N}_2$ 、 $10\text{H}_2\text{O}/21\text{O}_2/69\text{N}_2$ 、 $20\text{H}_2\text{O}/21\text{O}_2/59\text{N}_2$ 、 $30\text{H}_2\text{O}/21\text{O}_2/49\text{N}_2$)。

1.3 样品分析方法

精确称量 0.1 g 样品后放入聚四氟乙烯罐中,加入 4 mL HNO_3 和 1 mL HF ,在常温下进行预消解^[16]。预消解 12 h 后加入 $1\text{ mL H}_2\text{O}_2$,然后将聚四氟乙烯罐放入不锈钢外套中密封,放入烘箱中在 $160\text{ }^\circ\text{C}$ 进行消解,消解时间为 8 h 。消解结束后,将聚四氟乙烯罐放入赶酸仪进行赶酸,温度设定为 $120\text{ }^\circ\text{C}$,时间为 2 h ,赶酸后加入一定量的 HCl 使待测溶液盐酸浓度为 10% 。为了保证试验的精确性,每个样品做平行试验,并做空白样对比,试验所用试剂均为优级纯。

样品消解后采用北京吉天仪器有限公司AFS-8220原子荧光光谱仪测量砷含量,在测量前制备砷标液和载流体,对标液进行测量,标准曲线精度达到 0.9995 以上后进行样品测量。为了减少误差,每个

样品重复测量3次,测量误差小于10%则认为有效,取3次测量的平均值作为样品的砷含量值。每隔5个样品测量一个已知浓度的标液,测量误差在±10%则认为测量仪器稳定。

1.4 试验结果表征方法

为了描述煤燃烧反应的快慢与砷的释放特性,本文定义了2个参数:可失重余额和砷逃逸率。可失重余额为煤可失重组分剩余部分的质量与煤可失重组分总质量的比值^[17];砷逃逸率为煤燃烧过程中挥发的砷质量与原煤中砷总质量的比值。

t 时刻可失重余额 k_t 为

$$k_t = \frac{M_t - M_\infty}{M_0 - M_\infty} \times 100\% \quad (1)$$

式中, M_0 为原煤质量; M_t 为 t 时刻质量; M_∞ 为燃尽时刻质量。

砷的残余比例 w 为

$$w = \frac{A_{ash}n}{A_{coal}} \quad (2)$$

式中, A_{coal} 为原煤中砷含量,μg/g; A_{ash} 为灰中砷含量,μg/g; n 为煤剩余质量分数。

砷的逃逸率 y 为

$$y = (1 - w) \times 100\% \quad (3)$$

2 结果与讨论

2.1 煤的恒温热重分析

2.1.1 温度的影响

煤在水蒸气气氛下(10H₂O/21O₂/69N₂)不同温度燃烧的热重曲线如图2所示。煤的燃尽时间与剩余质量分数随温度的变化见表2。

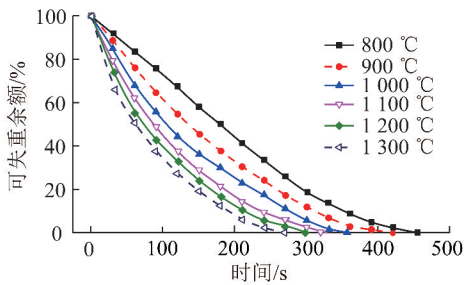


图2 10% H₂O 气氛下不同温度的热重曲线

Fig. 2 Thermogravimetric curves of different temperatures at 10% H₂O atmosphere

由图2可知,在水蒸气气氛下,庆华煤的热重曲线随温度升高而左移,燃尽时间提前。由表2可以看出,随温度升高,燃尽时间逐渐缩短,剩余质量分

数略微降低,900 °C下煤粉燃尽时间比800 °C下缩短60 s;而1300 °C燃尽时间比1200 °C只缩短30 s。说明随着温度的升高,燃尽时间的差别减小^[18]。由图2可以看出,在800~1000 °C阶段主要是前期(0~150 s)变化比较明显,而在1100~1300 °C阶段主要是中后期(150~300 s)变化,这是因为在800~1000 °C时随着温度的升高,挥发分的燃烧变化剧烈,而在1100~1300 °C时随着温度升高,水蒸气对挥发分燃烧的影响减弱。

表2 10% H₂O 气氛下煤的燃尽时间与剩余质量分数
Table 2 Burnout time and remaining mass percentage of coal at 10% H₂O atmosphere

参数	温度/°C					
	800	900	1000	1100	1200	1300
燃尽时间/s	454	394	345	314	283	259
剩余质量分数/%	29.71	29.48	28.85	28.46	28.15	28.06

2.1.2 水蒸气浓度的影响

在1000 °C下选取了无水蒸气(21O₂/79N₂)与水蒸气气氛(10H₂O/21O₂/69N₂、20H₂O/21O₂/59N₂、30H₂O/21O₂/49N₂)进行热重试验,研究了水蒸气对燃烧反应动力学的影响。结果如图3所示。

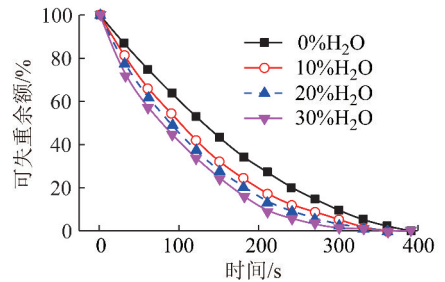


图3 1000 °C下不同气氛的热重曲线

Fig. 3 Thermogravimetric curves of different atmosphere at 1000 °C temperatures

由图3可知,燃烧反应中随水蒸气的加入,热重曲线左移,说明其加入水蒸气后燃烧速率加快,燃尽时刻提前。这是由于反应瞬时,碳颗粒无法完全参与燃烧,水蒸气与部分煤焦发生气化反应,气化反应有较高的产气率,扩大了焦炭孔隙率^[17],加速了燃烧反应。随着水蒸气浓度的提高,热重曲线继续左移,但变化程度不大,说明水蒸气浓度对燃烧的影响程度随浓度增加而减弱。

2.2 煤燃烧过程中砷的挥发特性

为了研究不同气氛下砷的释放特性,选取6个

温度,水蒸气气氛为0%、10%、20%、30%进行燃烧试验,试验结果如图4所示。

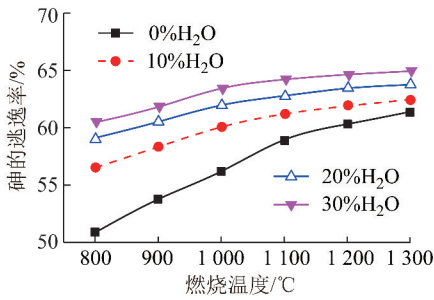


图4 不同温度下水蒸气对砷的逃逸率的影响

Fig. 4 Effect of steam at different temperatures on the escape rate of arsenic

由图4可知,燃烧过程加入水蒸气后砷的逃逸率明显增加。在800℃时,砷的逃逸率变化较大,随着温度的升高,砷的逃逸率的提升保持稳定。结合图2可知,在低温段(800~1000℃)水蒸气对煤燃烧的提升主要是对挥发分燃烧阶段的提升,而在高温时(1100~1300℃)水蒸气气氛对挥发分燃烧的提升效果随温度升高而减弱。煤中砷的挥发主要是在挥发分燃烧阶段,水蒸气的加入使得低温段(800~1000℃)时挥发分燃烧速率提升明显,增加了煤的孔隙率^[19-21],从而促进了砷的挥发,所以在低温时水蒸气对砷的逃逸率影响比较大。

随着水蒸气浓度的提升,砷的逃逸率变化不大,这与图3所示结果一致,水蒸气对砷释放特性的影响程度随着水蒸气浓度的提升而减弱。

2.3 XRD分析

砷在燃烧过程中形成蒸气相^[22],然后与相近的活性阳离子粘附,钙基阳离子是灰中常见的活性点,已有学者研究表明砷在迁移过程中易形成钙砷酸盐^[23]。Mahuli等^[24]在研究吸附砷的吸附剂过程中,提出了在400~600℃和800~1000℃中用Ca(OH)₂相对于Al₂O₃、SiO₂和Fe₂O₃吸附砷的效率更高。

为了进一步研究水蒸气气氛对煤燃烧过程中矿物质的组合演化以及对砷挥发特性的影响,试验制备了1000℃不同气氛(21O₂/79N₂、10H₂O/21O₂/69N₂、20H₂O/21O₂/59N₂、30H₂O/21O₂/49N₂)下的灰样并进行了XRD扫描。如图5所示。

由图5可见,庆华煤灰主要的矿物质为石英,莫来石、方解石和石膏,在燃烧气氛中加入水蒸气可以明显改变灰中矿物质的物相。表现为石英增加,方

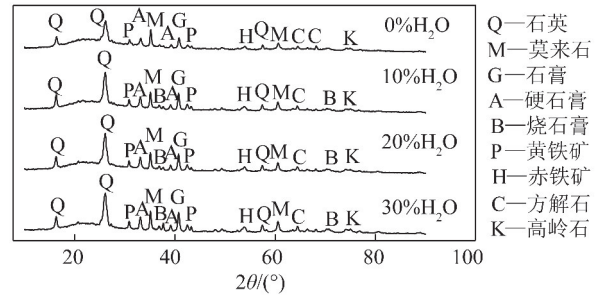


图5 不同气氛下煤灰的XRD衍射图谱

Fig. 5 XRD of coal ash at different atmospheres

解石减少,石膏大幅增加、硬石膏略有增加、出现了烧石膏,黄铁矿和赤铁矿略有增加,其他矿物质变化并不明显。并且随着水蒸气浓度的提升,只有石膏强度增加,其他矿物质随水蒸气浓度变化并不明显。由于煤中所含矿物质种类繁多,按本文研究所需把所有矿物质分为石英类、含钙碳酸盐类、含钙硫酸盐类、铁矿类,见表3。

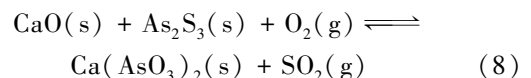
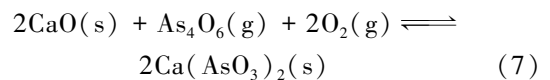
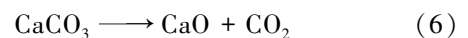
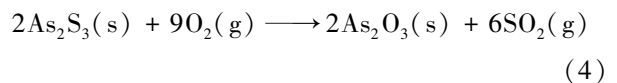
表3 主要矿物质分类

Table 3 Classification of major minerals

矿物质类别	主要成分	主要矿物质
石英类	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	石英、莫来石、高岭石
含钙碳酸盐	CaCO ₃	方解石
含钙硫酸盐	CaSO ₄	石膏、烧石膏、硬石膏
铁矿类	含铁矿物质	黄铁矿、赤铁矿

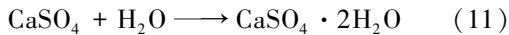
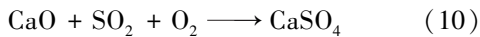
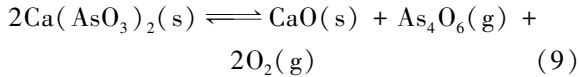
已有学者研究砷的挥发与石英类矿物质和含铁矿物质并无明显关联,而砷元素与钙元素的相关性在各个温度下都很高^[25]。对比庆华煤在1000℃时不同气氛下的XRD图谱可知,在水蒸气气氛下,石膏明显增加,同时熟石膏和硬石膏的略有增加,说明水蒸气促进了含钙硫酸盐的生成。

已有试验证明石灰石与硫化砷在不同温度下均生成了砷酸钙^[25],反应方程式为



CaO是砷吸附的活性位^[25],可与气态氧化砷反应生成砷酸盐,实现对砷的捕捉。当加入水蒸气时,

灰中石膏类矿物质含量增加,同时砷逃逸率增加,分析是因为水蒸气促进了 SO_2 向 CaSO_4 转化,消耗了 CaCO_3 分解产生的 CaO 。这时 SO_2 与 As_2O_3 形成竞争机制,促进反应(7)向左进行,抑制了 As_4O_6 向砷酸钙转化,增加了 As_4O_6 的逃逸,推测在水蒸气气氛下的反应为



XRD 图谱并未发现石灰 (CaO),方解石 (CaCO_3) 减少,这是由于 CaCO_3 分解生成的 CaO 具有很高的活性,水蒸气气氛的加入促进了 SO_2 形成 CaSO_4 ,减少了 CaO 的停留时间,抑制了砷酸盐的形成,导致砷的逃逸率增加。

3 结 论

1) 水蒸气气氛可以明显加快煤的失重,在 $800 \sim 1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 内主要是影响挥发分挥发燃烧阶段,随着温度的提升,水蒸气对挥发分燃烧的促进作用减弱。

2) 在燃烧气氛中加入水蒸气会增加砷的逃逸,在 $800 \sim 1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 水蒸气气氛对砷逃逸率影响较大,在 $1\,100 \sim 1\,300\text{ }^\circ\text{C}$ 对砷逃逸率影响趋于稳定。

3) 加入水蒸气气氛可以使煤中灰的石膏等含 CaSO_4 矿物质含量增加,减少高活性 CaO 的停留时间,抑制砷酸钙的形成,使砷的逃逸率增加。

参考文献 (References):

- [1] 龚本根. 高砷煤砷释放特性及矿物转化的研究 [D]. 武汉:华中科技大学,2012.
G Bengen. The study on the arsenic release characteristics and the transformation of minerals in high arsenic Coal [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2012.
- [2] P A E. Locating and estimating air emissions from sources of arsenic and arsenic compounds [R]. 1998.
- [3] 官崎州,沈逸帆,陈铁爻. 酸雨情况下高砷煤中砷的淋滤特征 [J]. 洁净煤技术,2013,19(2):102-105.
Guan Qizhou, Shen Yifan, Chen Tiejiao. Arsenic leaching law of high-arsenic coal under acid rain condition [J]. Clean Coal Technology,2013,19(2):102-105.
- [4] Shah P, Strezov V, Prince K, et al. Speciation of As, Cr, Se and Hg under coal fired power station conditions [J]. Fuel,2008,87(10/11):1859-1869.
- [5] Jiao F, Ninomiya Y, Zhang L, et al. Effect of coal blending on the

leaching characteristics of arsenic in fly ash from fluidized bed coal combustion [J]. Fuel Processing Technology,2013,106(2):769-775.

- [6] Sun Jingxin, Jervis A R E. Trace elements in coal and their distribution characteristics during coal combustion [J]. Science in China Ser A,1987,30(3):288-297.
- [7] Clarke L B. The fate of trace elements during coal combustion and gasification; an overview [J]. Fuel,1993,72(6):731-736.
- [8] Low F, Zhang L. Arsenic emissions and speciation in the oxy-fuel fly ash collected from lab-scale drop-tube furnace [J]. Proceedings of the Combustion Institute,2013,34(2):2877-2884.
- [9] Miller B, And D R D, Kandiyoti R. The Influence of Injected HCl and SO_2 on the behavior of trace elements during wood-bark combustion [J]. Energy Fuels,2003,17(5):1382-1391.
- [10] 王鹏,徐春霞. 典型高灰熔融性煤焦水蒸气气化特性研究 [J]. 洁净煤技术,2016,22(3):34-39.
Wang Peng, Xu Chunxia. Influence of steam on gasification characteristics of typical highash fusion coal char [J]. Clean Coal Technology,2016,22(3):34-39.
- [11] Gil M V, Riaza J, Alvarez L, et al. A study of oxy-coal combustion with steam addition and biomass blending by thermogravimetric analysis [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2012,109(1):49-55.
- [12] 李超,冯涛,王春波. 煤中水分对其燃烧特性影响研究 [J]. 电力科学与工程,2013(10):70-73.
Li Chao, Feng Tao, Wang Chunbo. Effects of water vapor on the combustion characteristics of coal [J]. Electric Power Science and Engineering,2013(10):70-73.
- [13] 徐春霞,徐振刚,步学朋. 煤焦与 CO_2 及水蒸气气化特性研究进展 [J]. 洁净煤技术,2007,13(6):49-52.
Xu Chunxia, Xu Zhengang, Bu Xuepeng. Research progress of char and CO_2 and steam gasification characteristics [J]. Clean Coal Technology,2007,13(6):49-52.
- [14] 刘慧敏,王春波,黄星智. 富氧燃烧方式下煤中砷的挥发行为 [J]. 化工学报,2015,66(12):5079-5087.
Liu Huimin, Wang Chunbo, Huang Xingzhi. Volatilization of arsenic in coal during oxy-fuel combustion [J]. CIESC Journal, 2015,66(12):5079-5087.
- [15] Wang C, Xing Z, Jia L, et al. Sintering of limestone in calcination/carbonation cycles [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,2014,53(42):16235-16244.
- [16] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Analytical Chemistry,1979,51(7):844-851.
- [17] 王春波,李超,雷鸣. 水蒸气对煤焦恒温下燃烧特性的影响 [J]. 中国电机工程学报,2013,33(32):8-13.
Wang Chunbo, Li Chao, Lei Ming. Effects of water vapor on the isothermal combustion characteristics of coal char [J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(32):8-13.

- 略[J]. 神华科技, 2015(5):62-66.
- Zhao Rui, Liu Yi, Li Yanbing, et al. Review on the SO₃ detection method and removal strategy in coal-fired power plants[J]. Northwest Coal, 2015(5):62-66.
- [8] 刘洋, 范振兴, 李紫龙. 燃煤电厂烟气中 SO₃ 的测试分析[J]. 中国资源综合利用, 2016, 34(4):49-51.
- Liu Yang, Fan Zhenxing, Li Zilong. The detection and analysis of SO₃ content in coal-fired flue gas[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2016, 34(4):49-51.
- [9] EPA Method 8, Determination of sulfuric acid mist and sulfur dioxide emissions from stationary sources[S].
- [10] Jaworowski R J, Mack S S. Evaluation of methods for measurement of SO₃/H₂SO₄ in flue gas[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1979, 29(1):43-46.
- [11] 肖雨亭, 贾曼, 徐莉, 等. 烟气中三氧化硫及硫酸雾滴的分析方法[J]. 环境科技, 2012, 25(5):43-48.
- Xiao Yuting, Jia Man, Xu Li, et al. The analytic method of sulfur trioxide and sulfuric acid mist in flue gas[J]. Environmental Science and Technology, 2012, 25(5):43-48.
- [12] 华卉. 燃煤烟气中 SO₃ 的生成及存在形态[J]. 山东化工, 2016, 45(3):138-139.
- Hua Hui. Formation and speciation of SO₃ from coal-fired power plants[J]. Shandong Chemical Industry, 2016, 45(3):138-139.
- [13] Srivastava R K, Miller C A, Erickson C, et al. Emissions of sulfur trioxide from coal-fired power plants[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2004, 54(6):750.
- [14] Levy E K. Modeling of SO₃ formation process in coal-fired boilers[J]. Power, 2007, 25(1):58-59.
- [15] Peterson J, Jones A. SO₃ mitigation guide[R]. California, USA: Electric Power Research Institute, 1994:1-194.
- [16] 帅伟, 李立, 崔志敏, 等. 基于实测的超低排放燃煤电厂主要大气污染物排放特征与减排效益分析[J]. 中国电力, 2015, 48(11):131-137.
- Shuai Wei, Li Li, Cui Zhimin, et al. Analysis of primary air pollutant emission characteristics and reduction efficiency for ultra-low emission coal-fired power plants based on actual measurement[J]. Electric Power, 2015, 48(11):131-137.
- [17] 陈瑶姬, 孟炜, 胡达清. 燃煤电厂烟气超低排放技术对三氧化硫脱除影响的研究[J]. 上海节能, 2015(12):657-660.
- Chen Yaoji, Meng Wei, Hu Daqing. Research on coal-fired power plant flue gas ultra low emission technology influence on sulfur trioxide removal[J]. Shanghai Energy Conservation, 2015(12):657-660.
- [18] 滕农, 张运宇, 魏晗, 等. 石灰石/石膏湿法FGD装置除尘效率和SO₃脱除率探讨[J]. 电力科技与环保, 2008, 24(4):27-28.
- Teng Nong, Zhang Yunyu, Wei Han, et al. Discussion on ash removal efficiency and sulfur trioxide removal efficiency of WFGD system[J]. Electric Power Environmental Protection, 2008, 24(4):27-28.
- [19] 兰新生, 苏长华, 周易谦. 石灰石/石膏湿法脱硫系统净烟气中SO₃(硫酸雾)来源的讨论[J]. 电力科技与环保, 2006, 22(6):34-36.
- Lan Xinsheng, Su Changhua, Zhou Yiqian. Discussion on the source of Sulfur trioxide (sulfuric acid mist) in flue gas streams after WFGD system[J]. Electric Power Environmental Protection, 2006, 22(6):34-36.
- [20] 王宏亮, 薛建明, 许月阳, 等. 燃煤电站锅炉烟气中SO₃的生成及控制[J]. 电力科技与环保, 2014, 30(5):17-20.
- Wang Hongliang, Xue Jianming, Xu Yueyang, et al. Formation and control of SO₃ from coal-fired power plants[J]. Electric Power Environmental Protection, 2014, 30(5):17-20.
- [22] Seames W S. An initial study of the fine fragmentation fly ash particle mode generated during pulverized coal combustion[J]. Fuel Processing Technology, 2003, 81(2):109-125.
- [23] Seames W S, Wendt J O L. Partitioning of arsenic, selenium, and cadmium during the combustion of Pittsburgh and Illinois #6 coals in a self-sustained combustor[J]. Fuel Processing Technology, 2000, 63(2/3):179-196.
- [24] Mahuli S, Agnihotri R, Chauk S, et al. Mechanism of arsenic sorption by hydrated lime[J]. Environ. Sci. Technol., 1997, 31(11):3226-3231.
- [25] 赵永椿. 煤燃烧矿物组合演化及其与重金属相互作用机制的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- Zhao Yongchun. Partition mechanism and interaction of minerals and trace elements during coal combustion[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.

(上接第57页)

- [18] Liu H, Wang C, Sun X, et al. Volatilization of arsenic in coal during isothermal oxy-fuel combustion[J]. 2015, 66(12):5079-5087.
- [19] Vostrikov A A, Dubov D Y, And S A P, et al. Combustion of coal particles in H₂O/O₂ supercritical fluid[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(13):4710-4716.
- [20] Jasieńko-Hałał M, Kędzior K. Comparison of molecular sieve properties in microporous chars from low-rank bituminous coal activated by steam and carbon dioxide[J]. Carbon, 2005, 43(5):944-953.
- [21] Martín-Gullón I, Ansio M, Font R, et al. Steam-activated carbons from a bituminous coal in a continuous multistage fluidized bed pilot plant[J]. Carbon, 1996, 34(12):1515-1520.