

燃煤过程中卤族元素-溴的析出行为及治理研究

汪 伟^{1,2}, 祁 云^{1,2}, 齐庆杰^{1,2}

(1. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室 (辽宁工程技术大学), 辽宁 葫芦岛 125000)

摘要:为了解决煤中痕量卤素-溴的燃烧产物排放造成的污染,通过固定床管式炉煤燃烧试验,研究了燃煤过程中添加钙基质(CaO)作为固溴剂对溴化物析出的影响。结果表明:钙基质(CaO)能够有效地降低燃煤过程中溴化物的排放量;采用预混与喷射相结合的方式向锅炉中添加固溴剂能够最大限度的吸收燃煤过程中析出的溴化物,减少溴化物的排放量。此外,钙基固溴剂的脱溴效率还受燃烧温度、停留时间、钙基固溴剂(CaO)的添加量、燃烧气氛等因素的影响,燃煤过程中控制合理的钙基质与溴化物的反应条件有利于提高钙基质的脱溴效率。

关键词:卤族元素;溴;煤燃烧;析出;CaO

中图分类号:TQ534 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2017)04-0071-06

Separation behavior and Governance Research of halogen-bromine in coal combustion process

Wang Wei^{1,2}, Qi Yun^{1,2}, Qi Qingjie^{1,2}

(1. College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Key Laboratory of Mine Thermodynamic disasters and Control of Ministry of Education (Liaoning Technical University), Huludao 125000, China)

Abstract: In order to solve emissions pollution problem of the trace halogen-bromine in coal combustion product, through fixed bed tube furnace coal combustion experiment, studied the impact on the precipitation of bromide while adding calcium matrix (CaO) as a solid bromide in the process of coal combustion. Results indicate that calcium substrate (CaO) can effectively reduce the amount of bromide, and it can absorb bromide to the maximum and reduce the emissions of bromide while the combination of pre-mixing and injection is used to add the strengthened bromide to the boiler in the process of coal combustion. In addition, the debromination efficiency of calcium bromide fixing agent is influenced by combustion temperature, retention time, quantity of calcium base solid bromide (CaO), and combustion atmosphere. The influence of such factors as the reasonable control of calcium in the process of coal matrix and the reaction conditions of bromide is helpful to improve the efficiency of calcium matrix debromination.

Key words: halogen; bromine; coal combustion; separation; CaO

0 引 言

煤是人类生存和发展必不可少的以燃烧为主要利用方式的一次能源,但煤又是一种能够导致大气和水土等众多污染问题的“不清洁”燃料。我国每年有占全国年产煤量85%左右的原煤用于直接燃

烧,火力发电厂的煤炭年消耗量占我国煤炭年产量的60%左右,因此依赖燃煤获取能源是我国环境污染的根源^[1-2]。此外,煤的组分复杂,除了含有C、S、N等元素外,还含有种类众多的痕量元素,齐庆杰等^[1]研究表明,煤中痕量元素F、Cl、Br等卤族元素的燃烧产物中溴化物对人类自身健康和大气环

收稿日期:2017-05-24;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.04.011

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274113);辽宁省教育厅科学研究一般资助项目(L2015221,L201212)

作者简介:汪 伟(1991—),男,河北唐山人,硕士研究生,研究方向为安全技术及工程矿井火灾防治理论与技术。E-mail:1376501162@qq.com。

通讯作者:祁云,主要研究方向为安全技术及工程矿井火灾防治理论与技术。E-mail:1185847870@qq.com

引用格式:汪伟,祁云,齐庆杰.燃煤过程中卤族元素-溴的析出行为及治理研究[J].洁净煤技术,2017,23(4):71-76.

Wang Wei, Qi Yun, Qi Qingjie. Separation behavior and Governance Research of halogen-bromine in coal combustion process[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(4): 71-76.

境的影响较为严重^[3]。煤中痕量卤族元素(F、Cl、Br等)燃烧产物的排放量可达 $100 \times 10^{-6} \sim 1\,200 \times 10^{-6}$,会对臭氧层产生严重破坏,Br的化合物被排放到大气中对臭氧层的破坏能力比Cl的化合物高45~70倍,加速温室效应。目前,我国对煤中痕量F、Cl元素的研究较深入,而对含量更低的Br研究相对浅显。高运川等^[4]通过小型管式炉模拟不同煤种的燃烧过程,发现在一定范围内痕量溴的析出行为随燃烧温度升高。高勤芬^[5]提出了燃煤过程中添加CaCO₃能够起到抑制溴化物逸散的作用。齐庆杰等^[6]研究表明,添加钙基质不仅能够起到固氟的作用,也能够抑制燃煤溴化物的释放,还研究了温度、燃烧气氛等对钙基质固溴作用的影响,发现了钙基质固溴作用与温度、燃烧气氛的变化有关。

Swaine D J等^[7]研究表明煤中痕量元素大都为生物体所必须含有的元素,只有在燃烧等作用下才会形成对环境与生物体造成伤害的有毒物质。Vassilev S V^[8], Ratafia-Brown J A^[9]等研究发现煤中赋存的痕量溴燃烧后完全逸散到空气中。Anthony E J等^[10]研究表明,燃煤过程中添加生石灰对痕量溴具有捕集作用,但没有考虑到生石灰高温分解对捕集作用的影响。本文在添加生石灰固溴的基础上,通过管式炉模拟燃烧实验,结合燃煤烟气排放特点,研究燃烧气氛、添加剂种类等对溴化物的析出行为的影响,为燃煤溴化物治理最佳固溴条件的选择提供依据。

1 燃煤中溴化物排放的危害

我国煤炭中Br的含量为0.26~68.8 μg/g,平均含量约为9 μg/g,研究表明,煤中痕量溴燃烧时主要以Br、HBr和Br₂等形式析出^[8],有25%~98%的溴以HBr形式被直接排放到空气中。HBr是一种相对密度为空气的2.71倍、易溶于水的无色辛辣刺激性气体,具有较强的腐蚀性、酸性(HBr>HCl>HF)。燃煤排放到大气中的溴化物与水蒸气、粉尘等发生物理化学反应^[11],随雨雪降落后易附着在动植物表面,不仅会严重伤害其自身,还能通过食物链的富集作用危害人类,人一次性摄入 5×10^{-6} 的溴化物就会导致中毒。即使低浓度接触溴化物也有引起皮肤、粘膜的刺激或灼伤、消化功能障碍、中枢神经系统功能紊乱、智力退化等症的危险^[3],燃煤析出的溴在环境中的循环过程,如图1所示。

燃煤烟气排放的溴化物对臭氧层的破坏能力比

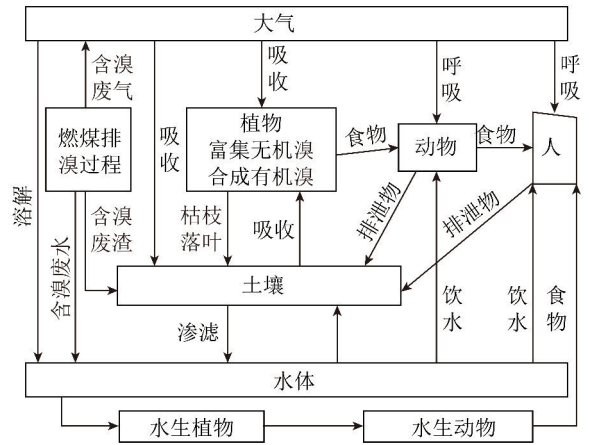
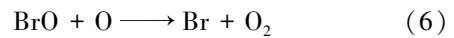
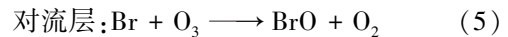
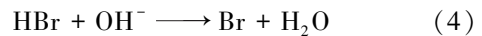
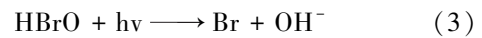
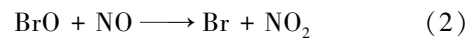
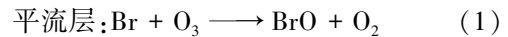


图1 溴化物在环境中的循环过程

Fig. 1 Cyclic process of bromide in the environment

氯化物高出45~70倍,能够导致严重的温室效应。燃烧排放的溴和其他卤族元素一样会稳定存在并反复与臭氧产生化学反应,破坏臭氧层。燃煤排放到空气中的无机溴化物受到光照后会光解为溴原子,溴原子在平流层中与O₃发生化学反应,被氧化成BrO。溴原子不断被消耗,但又通过BrO、HBrO光解进行补充,对臭氧层产生持续性破坏^[12],溴与臭氧的反应机理为



2 燃煤过程中钙基固溴剂脱溴技术

2.1 固溴剂脱溴机理

煤炭燃烧过程被认为是大气溴污染的主要途径,随着人们环保意识的增强,燃煤过程产生的溴化物污染的危害问题已备受关注。近年来,新环境保护法律法规的相继出台,煤中富含的痕量溴已被列入“有害大气污染物”之中,燃煤溴污染的治理势在必行^[13]。

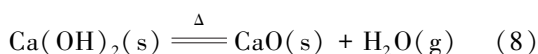
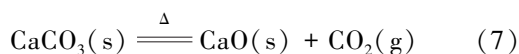
目前,国内外治理燃煤溴污染问题主要采用干法、湿法2种烟气除溴技术。该工艺过程是采用碱液淋洗或喷洒碱性吸附剂等方法脱除燃煤产生的HBr(g)。湿法除溴是基于 $\text{Ca}^{2+} + 2\text{Br}^- \rightleftharpoons \text{CaBr}_2$,产物CaBr₂极易溶于水;干法除溴则是基于碱性吸附剂对HBr(g)的物理吸附和固溴反应 $\text{MO}(s) + 2\text{HBr}(g) \rightleftharpoons \text{MBr}_2(s) + \text{H}_2\text{O}(g)$ 固定烟气中的HBr^[14]。

因为 HBr 的溶解、吸附过程是动态可逆的,所以除溴废水^[15-16]中仍含有大量的 HBr,因此,上述技术存在造成水源和土壤二次污染的问题。

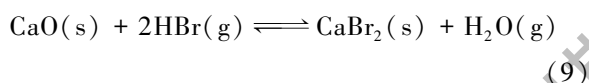
基于齐庆杰等^[6]在钙基固氟的研究,分析钙基固溴的可行性,发现 CaO 对煤中溴的析出也具有较好的抑制作用。从理论角度,向煤中预混固溴剂或向燃烧室内喷入粉末状固溴剂的燃烧脱溴技术简单易行,不产生二次污染,具极大的发展潜力。

钙基固溴剂的固溴效率是评价其固溴能力的重要指标^[17]。在燃煤过程中预混或向燃烧室内喷入粉末状的石灰石作为固溴剂,经高温加热分解成 CaO 与煤中的溴发生化学反应,从而达到固溴目的^[18]。主要反应方程式为

石灰石加热分解:



CaO 固溴反应:



2.2 燃煤过程中钙基脱溴实验方法

固定床管式炉燃烧试验台是测定燃煤过程中溴析出与钙基固溴能力的多功能实验台^[19]。该实验台由配气装置、燃烧装置和吸收装置3部分组成。配气装置由供气瓶和配气室2部分构成,为实验提供不同的燃烧气氛;燃烧装置的燃烧器为高温定碳炉(SK2-2.5-13TS型),加热元件为硅碳管,燃烧管为较耐高温的透明石英(700 mm×φ18 mm),由智能温控仪(SKY型)自动控制燃煤过程的温度,温度可根据需求设定;吸收装置则由用硅胶管作连接管的依次串联的多孔玻璃吸收瓶、流量计和抽气泵依次串联构成,如图2所示。

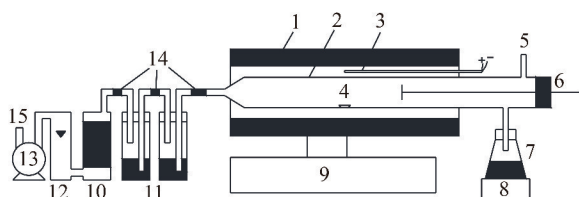


图2 溴化物(g)吸收实验系统装置

Fig. 2 Bromide (g) absorption experimental system device

钙基固溴实验原理:将煤样分为2份:一份煤样

不预混钙基固溴剂直接均布于77 mm的燃烧舟内,置于高温段(距进样端90 mm处)加热,用于测定煤样中溴的含量;另一份煤样掺入适量的钙基固溴剂后置于燃烧舟中,置于高温段同一位置加热,用于测定钙基固溴剂的固溴能力^[20]。

钙基固溴实验过程:将煤样(0.400 g, 0.037 mm)均分为2组(一组直接加热,另一组与适量钙基固溴剂预混),在规定条件下燃烧(1 100 ℃),通过控制阀调节空气钢瓶和氧气钢瓶的供气量,取出带推棒的橡皮塞,将燃烧舟放入石英反应管,塞紧橡皮塞^[21]。为了使煤样不发生爆燃,先在低温区(300 ℃)对煤样预热,然后分3段将燃烧舟推送至恒温区,并在恒温区停滞15 min。待反应结束后立即取出燃烧舟,并向管内通入水蒸气冲洗吸附在管壁上的反应产物,最后把串联的NaHCO₃-Na₂CO₃多孔吸收瓶的吸收液与冷凝管里的水蒸气冷凝液混合定容^[22],测定各组实验所得溶液中溴的含量。

2.3 钙基固溴剂脱溴效率的表达式

燃煤过程中溴除了以HBr(g)逸散到烟气中,还有一部分存在于锅炉煤渣中,针对煤燃烧后溴的不同存在形态,CaO均具有吸附作用,其吸附效率为

$$\xi_F = (F - F_{g2})/F \times 100\% \quad (10)$$

$$\eta = (F_{g1} - F_{g2})/F_{g1} \times 100\% \quad (11)$$

$$\xi_0 = (F - F_{g1})/F \times 100\% \quad (12)$$

$$X = F_{g1}/F \times 100\% \quad (13)$$

式中, ξ_F 为固溴率,%; η_F 为脱溴率,%; ξ_0 为自身固溴率; X 为溴析出率; F_{g1} 为不添加固溴剂时溴的析出含量, $\mu\text{g/g}$; F_{g2} 为添加固溴剂(CaO)后溴的析出含量, $\mu\text{g/g}$; F 为煤中溴的含量, $\mu\text{g/g}$ 。

以上评价指标之间存在以下关系:

$$\xi = \xi_0 + \eta(1 - \xi_0) \quad (14)$$

$$\xi_0 + X = 1 \quad (15)$$

燃煤固溴技术中,单一煤种的钙基固溴剂添加量既可以按钙溴摩尔比 $\alpha(\text{Ca}/\text{Br})$ 计算,也可以按钙硫物质的量比 (Ca/S) 计算^[23]。钙基固溴剂添加量相同时, (Ca/Br) 与 (Ca/S) 的关系为

$$\alpha(\text{Ca}/\text{Br}) = (M_{\text{S}}F_{\text{ad}})/(M_{\text{S}}F_{\text{ad}}) \times \alpha(\text{Ca}/\text{S}) \quad (16)$$

式中, M 、 M_{S} 分别为溴和硫的原子质量; F_{ad} 、 S_{ad} 分别为煤中溴和硫的含量。

3 钙基固溴剂的脱溴效率

钙基固溴剂能够起到很好的固溴作用^[24],但是

在模拟固定床的管式炉含溴煤样燃烧实验中发现其固溴效率受燃烧温度、停留时间、钙基固溴剂(CaO)的添加量、燃烧气氛等因素的影响。

3.1 钙基固溴剂(CaO)的脱溴效果

在燃烧温度为800℃、停留时间为30 min、Ca/S摩尔比为1:1、饱和空气气氛下,不同固溴剂(CaO、CaCO₃、Ca(OH)₂、MgO、MgCO₃)的脱溴效率变化,如图3所示。

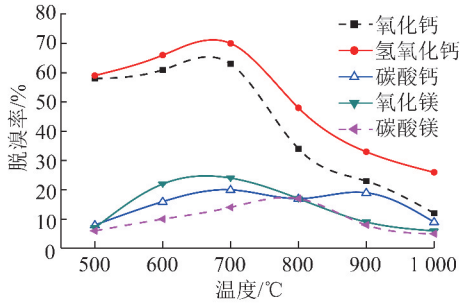


图3 不同固溴剂脱溴效率随温度变化

Fig. 3 Change curves of solid-bromide efficiency with temperature

从图3可以看出,CaO、CaCO₃、Ca(OH)₂、MgO、MgCO₃四条曲线的脱溴效率开始都随温度升高而增大,脱溴效率达到最大值后又随着温度的增加而迅速下降。700℃时,Ca(OH)₂脱溴效率最高,其次是CaO、MgO、CaCO₃、MgCO₃,其中CaCO₃的脱溴效率随温度升高而增大,在700℃时到达最大值,然后温度升高固溴效率下降,在800℃时到达谷底,但随后脱溴率又随温度升高而增大,在900℃时脱溴率再次达到高峰,温度继续升高脱溴率又开始下降,这表明CaCO₃在900℃左右分解,分解物CaO对HBr的吸收使脱溴效率增加。MgCO₃的脱溴效率随温度升高而增加,温度超过800℃后脱溴率随温度升高逐渐降低。这是因为MgCO₃在800℃以前分解,分解物MgO使反应前期的脱溴效率增加。综上,温度在600~800℃时,CaO、Ca(OH)₂的脱溴效率在40%~75%,最大可达73.64%,脱溴能力强。而MgO、CaCO₃、MgCO₃的固溴效率均低于30%,脱溴能力弱,但其中CaCO₃仍比镁基质固溴剂的脱溴效率高^[25],钙基固溴剂比其他类型固溴剂的脱溴效果好。

3.2 温度对钙基固溴剂(CaO)脱溴效果的影响

停留时间为30 min、Ca/S摩尔比为1:1、气氛为饱和空气时,钙基固溴剂(CaO)的脱溴效率随温度变化的关系,如图4所示。

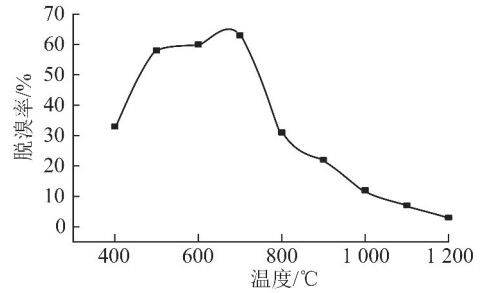


图4 CaO的脱溴效率随温度变化

Fig. 4 Change curves of CaO debromine efficiency with temperature

由图4可以看出,CaO的脱溴效率随温度升高而增大,温度达到700℃时固溴效率为65%左右,由于溴化物的高温稳定性差,温度继续增高脱溴效率急剧下降,温度大于1200℃时脱溴效率接近0,而链条炉燃烧温度常被控制在1200℃左右,采用预混固溴剂固溴效果不明显,应采用预混和喷射固溴剂相结合以获得较好的脱溴效果^[23]。

3.3 停留时间对脱溴效果的影响

燃烧温度为800℃、Ca/S为1:1、饱和空气气氛下CaO的脱溴率随停留时间变化如图5所示。

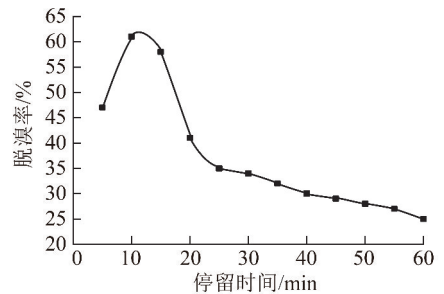


图5 CaO的脱溴效率随停留时间变化

Fig. 5 Change curves of CaO debromine efficiency with time

由图5可以看出:固定床管式炉试验中,停留时间为5~20 min时CaO的脱溴率较高。随着停留时间的增加,脱溴效率急剧下降,然而工业链炉的停留时间在40~60 min时,CaO的脱溴率低于30%,无法达到较高的脱溴目的。因此为了提高固溴剂(CaO)在工业链炉中的脱溴效率应适合采用预混和喷洒固溴剂相结合的两段式燃烧脱溴,不宜单独采用预混燃烧脱溴^[23]。

3.4 CaO的添加量对脱溴效果的影响

停留时间为30 min、饱和空气气氛下,CaO对含溴煤样的脱溴率与Ca/Br变化的关系如图6所示。

由图6可以看出:煤样中增大Ca/Br摩尔比会导致CaO脱溴能力的增加,表明工业链炉中可以采

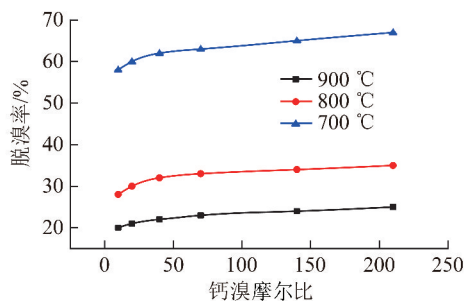


图6 不同温度下钙溴摩尔比变化对CaO脱溴效率的影响
Fig. 6 Efficiency of bromine efficiency on the ratio of calcium bromine at different temperatures

用增加脱溴剂(CaO)添加量增大脱溴效果。Ca/Br摩尔比低于70时,脱溴效率随着Ca/Br摩尔比的增加而增大,但Ca/Br摩尔比高于70时,固溴剂的脱溴效率随Ca/Br摩尔比变化较平缓,继续添加脱溴剂对脱溴效果影响并不明显^[23],所以考虑到经济实用性,Ca/Br不宜太大。

3.5 燃烧气氛对脱溴效果的影响

停留时间为30 min、Ca/S为1:1、不同燃烧气氛条件下CaO脱溴效率与温度关系如图7所示。

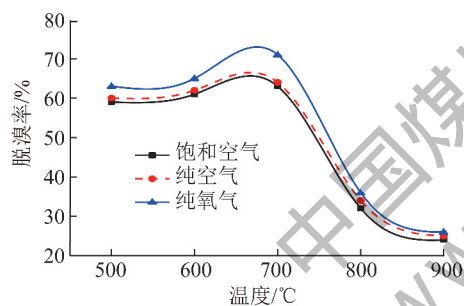


图7 不同气氛CaO的脱溴效率随温度变化

Fig. 7 Change curves of CaO debromine efficiency with temperature at different combustion atmosphere

同一温度下,在纯氧气气氛中的CaO脱溴效果要高于纯空气气氛中的脱溴效果,说明燃烧气氛的氧化能力影响着脱溴剂正向的脱溴反应^[26]。而在饱和空气中的脱溴效果最差,这是因为水蒸气的存在促使脱溴反应朝逆反应方向进行,增加了脱溴产物CaBr₂的分解。考虑到工业实际生产时的经济性,应在纯空气气氛下进行。

4 结 论

1) 固定床煤燃烧试验中加入的钙基质对燃烧产物HBr(g)具有吸附作用,在实验条件下最高吸收率为75%左右。其中CaO在燃烧温度700~900℃,停留时间5~20 min,燃烧气氛为饱和空气的条

件下脱溴效率最佳。

2) 在高温区,CaO的脱溴效率较低的主要原因是脱溴产物CaBr₂的高温稳定性太差。因此,在工业链条炉中或煤粉炉中可采用预混与尾部喷洒脱溴剂的两段式燃烧脱溴方式,降低反应空间温度和减少脱溴产物停留时间,从而提高脱溴效果。

3) 考虑到温度、停留时间对脱溴产物(CaBr₂)的影响,根据不同燃烧条件选择钙基脱溴剂时应考虑CaBr₂的稳定性。

4) 钙基脱溴剂具有脱溴率高、易于取材、价格低廉的特点,适合在工业生产中广泛应用。

参考文献(References):

- [1] 齐庆杰. 煤中氟赋存形态、燃烧转化与污染控制的基础和实验研究[D]. 杭州:浙江大学,2002.
- [2] 齐庆杰,祁云. 低浓度瓦斯燃料电池发电技术研究[J]. 洁净煤技术,2017,23(2):114-118.
Qi Qingjie, Qi Yun. Study on the low concentration gas fuel cell power generation technology[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(2):114-118.
- [3] 杨硕. 煤中气态溴化物在燃烧过程中转化规律与现象的基础研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2012.
- [4] 高运川,吴晓伟,孙明星,等. 煤燃烧过程中痕量元素溴和碘的释放行为[J]. 华东理工大学学报,2010(4):482-487.
Gao Yunchuan, Wu Xiaowei, Sun Mingxing, et al. Behavior of trace elements bromine and iodine during coal combustion process[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2010(4):482-487.
- [5] 高勤芬. 煤及煤燃烧中痕量元素砷、溴、碘的分布研究[D]. 上海:上海师范大学,2008.
- [6] 齐庆杰,刘建忠,周俊虎,等. 燃煤过程中CaO及钙基固氟剂对氟析出的控制[J]. 化工学报,2003,54(2):226-231.
Qi Qingjie, Liu Jianzhong, Zhou Junhu, et al. Fluoride emission control by blending and injecting CaO and calcium-based sorbents during coal combustion[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2003, 54(2):226-231.
- [7] Swaine D J, Goodarzi F. Environmental aspects of trace elements in coal[M]. New York: Springer Publishing Company, 1995: 1-312.
- [8] Vassilev S V, Eskenazy G M, Vassileva C G. Contents, modes of occurrence and behaviour of chlorine and bromine in combustion wastes from coal-fired power stations[J]. Fuel, 2000, 79:923-937.
- [9] Ratafia-Brown J A. Overview of trace elements partitioning in flames and furnaces of utility coal-fired boilers[J]. Fuel Process. Technol, 1994, 39(2):139-157.
- [10] Anthony E J, Bulewice E M, Preto F. The effect of halogens on FBC systems[J]. Fluidized Bed Combustion, 1993, 19(2):145-185.

- [11] Tian H, Cheng K, Wang Y, et al. Temporal and spatial variation characteristics of atmospheric emissions of Cd, Cr, and Pb from coal in China[J]. Atmospheric Environment, 2012, 50(4): 157-163.
- [12] 黄声和. 燃煤过程中煤中溴析出机理及固溴研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2013.
- [13] 罗春广, 马熙华. 燃煤砷污染及控制技术研究现状[J]. 内蒙古环境科学, 2008, 20(1): 60-63.
Luo Chunguang, Ma Xihua. Study situation on arsenic pollution and control technique during coal burning[J]. InnerMongolian Environmental Sciences, 2008, 20(1): 60-63.
- [14] 王宏伟, 齐庆杰, 王继仁, 等. 煤燃烧过程中 CaO-HF 固氟反应动力学机理[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 161-165.
Wang Hongwei, Qi Qingjie, Wang Jiren, et al. Kinetic mechanics of thereaction between CaO and HF during coal combustion[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 161-165.
- [15] Pasi Vainikka, Sonja Enestam, Jaani Silvennoinen, et al. Bromine as an ash forming element in a fluidised bed boiler combusting solid recovered[J]. Fuel, 2011, 32(11): 1-12.
- [16] Barontini F, Cozzani V. Formation of hydrogen bromide and organo brominated compounds in the thermal degradation of electronic boards[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2006, 77: 41-55.
- [17] Zhuang Y, Chen C, Timpe R, et al. Investigations on bromine corrosion associated with mercury control technologies in coal flue gas[J]. Fuel, 2009, 88: 1692-1697.
- [18] 管仁贵, 李文, 陈皓侃, 等. 煤燃烧时形态硫的析出及钙基添加剂的作用[J]. 化工学报, 2003, 54(6): 813-818.
Guan Rengui, Li Wen, Chen Haokan, et al. Evolution of sulfur forms and sulfur retention effects of calcium-based additives during coal combustion[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2003, 54(6): 813-818.
- [19] 李琦. 燃煤过程中氯化氢控制机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [20] 陈锦凤. 燃煤钙基固砷剂的影响因素研究[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(7): 59-61.
Chen Jinfeng. Study on the influence factors of calcium-based arsenic capture sorbent in coal combustion[J]. 2009, 31(7): 59-61.
- [21] 徐美娜, 曾宪菊, 刘亚丹. 浅探电量法测氢的影响因素[J]. 煤质技术, 2015(S1): 45-46.
Xu Meina, Zeng Xianju, Liu Yadan. Discussion on influencing factors of coulometry method for hydrogen determination[J]. Coal Quality Technology, 2015(S1): 45-46.
- [22] 周新华, 刘丹, 齐庆杰, 等. 高温水解-溴离子选择电极测定煤中溴的影响因素实验研究[J]. 地球与环境, 2017(2): 236-241.
Zhou Xinhua, Liu Dan, Qi Qingjie, et al. Influencing factors on determination of bromine in coal by using pyrohydrolysis and ino selective electrode[J]. Earth and Environment, 2017(2): 236-241.
- [23] 蒋旭光, 李琦, 李香排, 等. 燃煤过程中钙基及镁基吸收剂对 HCl 的吸收作用实验研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(6): 626-630.
Jiang Xuguang, Li Qi, Li Xiangpai, et al. Chloride of emission control by calcium-based and magnesium-based sorbents during coal combustion[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(6): 626-630.
- [24] 杨守生. 含溴材料热解过程溴化氢释放特性[J]. 消防科学技术, 2012, 31(9): 977-980.
Yang Shousheng. Hydrogen bromide escaping rules in the pyroge-nation process of brominated flame retardants[J]. Fire Science and Technology, 2012, 31(9): 977-980.
- [25] 蒋旭光, 李香排, 叶涌, 等. 木屑在固定床焚烧中 HCl 的控制研究[J]. 热能动力工程, 2004, 19(5): 487-490.
Jiang Xuguang, Li Xiangpai, Chi Yong, et al. Research on the Control of HCl during the Incineration of Sawdust in a Fixed Bed [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2004, 19(5): 487-490.
- [26] 谢辛, 李英杰. 钙基吸收剂脱除 HCl 的研究进展[J]. 化工进展, 2013, 32(8): 1921-1928.
Xie Xin, Li Yingjie. Research progress in HCl removal using ca-based sorbents[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, 32(8): 1921-1928.

(上接第 70 页)

- [12] 宋力, 刘雪, 王景霞, 等. 氮肥硫酸铁铵和硫酸亚铁铵的热分析研究[J]. 上海化工, 2011, 36(10): 14-16.
Song Li, Liu Xue, Wang Jingxia, et al. Thermal analysis of ammonium ferric sulfate and ammonium ferric sulfate [J]. Shanghai Chemical Industry, 2011, 36(10): 14-16.
- [13] 王鲁元, 程星星, 王志强, 等. 低温催化脱硝技术的研究进展[J]. 化工进展, 2016, 35(7): 2222-2235.
Wang Luyuan, Chen Xingxing, Wang Zhiqiang, et al. Research progress of low temperature catalytic denitration technology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(7): 2222-2235.
- [14] 余岳溪, 廖永进, 束航, 等. SO₂ 与 H₂O 对商用钒钨钼脱硝催化剂毒化作用综述[J]. 中国电力, 2016, 49(12): 168-173.
Yu Yuexi, Liao Yongjin, Shu Hang, et al. A review on the SO₂ and H₂O toxication of commercial vanadium tungstenite catalyst [J]. Electric Power, 2016, 49(12): 168-173.
- [15] 杨志忠, 艾生炳. SO₂/SO₃ 对选择性催化还原烟气脱硝的影响研究[J]. 电力科技与环保, 2014, 30(6): 31-33.
Yang Zhizhong, Ai Shengbing. Influence of SO₂/SO₃ on Selective Catalytic Reduction flue gas denitratization [J]. Electric Power Environmental Protection, 2014, 30(6): 31-33.