

文章编号:0253-9993(2010)09-1548-05

# 工艺参数对活性焦烟气中联合脱硫 脱汞性能的交互影响

张 斌,侯文慧,范朋慧,杨 蒙,杨宏旻

(南京师范大学 动力工程学院,江苏 南京 210042)

**摘 要:**在固定床吸附反应器上,考察了温度、SO<sub>2</sub>浓度、NO浓度、O<sub>2</sub>浓度等工艺参数对活性焦联合脱硫脱汞性能的影响。结果表明:温度在130~190℃内,温度降低有利于活性焦联合脱硫脱汞;随着SO<sub>2</sub>浓度提高,活性焦对SO<sub>2</sub>吸附量呈增大趋势;基准工况(BL)+1 500 mL/m<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>体系下,活性焦对单质汞(Hg<sup>0</sup>)单位吸附量比在BL中下降33%,SO<sub>2</sub>与单质汞在活性焦表面存在竞争吸附,SO<sub>2</sub>对活性焦对单质汞吸附能力有明显的抑制作用;NO与O<sub>2</sub>生成具有氧化性的NO<sub>2</sub>和O原子,增强了单质汞的氧化,BL+400 mL/m<sup>3</sup> NO体系中活性焦的单质汞单位吸附量比在BL中升高24%;BL+SO<sub>2</sub>+NO体系中,活性焦的单质汞吸附能力比在BL中下降3.8%。

**关键词:**活性焦;脱硫;脱汞;工艺参数;联合净化

**中图分类号:**TQ546.5 **文献标志码:**A

## Interactive effect of operation parameters on the combined removal of SO<sub>2</sub> and mercury in flue gas using activated coke

ZHANG Bin, HOU Wen-hui, FAN Peng-hui, YANG Meng, YANG Hong-min

(School of Power Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** A series of studies on the characteristic of the combined removal of SO<sub>2</sub> and mercury in simulated flue gas were conducted with a laboratory-scale fixed-bed reactor and the interactive effect of operation parameters, such as temperature, the concentration of SO<sub>2</sub>, NO and O<sub>2</sub> on the removal capacities of SO<sub>2</sub> and Hg<sup>0</sup> using activated coke was investigated. The experiment results indicate that the adsorption performance of SO<sub>2</sub> and Hg<sup>0</sup> with activated coke is influenced by temperature obviously and the lower temperature is in favor of the removal process with activated coke in the range of 130~190℃. With the increasing of the concentration of SO<sub>2</sub>, the adsorptive capacity has a tendency of increasing. Compared with the baseline condition, the average adsorptive capacity of Hg<sup>0</sup> decreases about 33% under the conditions of Baseline(BL)+1 500 mL/m<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>. There is competitive adsorption between SO<sub>2</sub> and Hg<sup>0</sup> on the surface of activated coke and the appearance of SO<sub>2</sub> suppresses the Hg<sup>0</sup> removal. The NO will react with O<sub>2</sub> and generate NO<sub>2</sub>, O atom with oxidizability which result in about 24% increasing of average adsorptive capacity of Hg<sup>0</sup> with 400 mL/m<sup>3</sup> NO additive in baseline condition. In the BL+SO<sub>2</sub>+NO gas condition, the adsorptive capacity of Hg<sup>0</sup> decreases 3.8% compared with baseline condition. The competition between SO<sub>2</sub> and NO causes a little decrease in Hg<sup>0</sup> capture capacity of the sorbent.

**Key words:** activated coke; desulfurization; de-mercury; operation parameters; combined purification

燃煤产生的污染物中不仅有酸性气体SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>, 还有易挥发的重金属,如Hg、As、Se等。由于汞具有

收稿日期:2010-03-30 责任编辑:许书阁

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2006CB200302);国家自然科学基金资助项目(50976049)

作者简介:张 斌(1986—),男,江苏徐州人,硕士研究生。联系人:杨宏旻(1972—),男,江苏南京人,教授,博士。E-mail: yanghongmin@nynu.edu.cn

低熔点、高饱和蒸气压及难溶于水等特点,日益引起人们的重视。国内外现有的烟气净化设施中,脱硫、脱硝和脱汞往往采用在多个独立系统中分级处理,极少有一体化脱除设备,不仅占地面积大,而且投资和运行费用高。干法烟气净化工艺具有投资少、工艺流程简单、不产生二次污染等特点<sup>[1]</sup>,有着广阔的发展前景,其中利用活性焦吸附净化烟气具有代表性。日本和德国于20世纪80年代开发出了活性焦脱硫、除尘一体化装置,获得了较高的SO<sub>2</sub>脱除效率<sup>[2]</sup>。我国煤炭科学研究总院北京煤化工研究分院在“863”计划的支持下开发出活性焦烟气脱硫技术,已完成1 000 m<sup>3</sup>/h中试装置的试验研究<sup>[3]</sup>。在机理研究方面,熊银伍等<sup>[4]</sup>通过对活性焦进行表面改性,发现可极大提高活性焦的脱汞能力;朱惠峰等<sup>[5]</sup>在固定床反应器上研究了热再生对活性焦烟气脱硫的影响,发现活性焦SO<sub>2</sub>吸附量及表面特性与再生次数有密切关系;Qingya Liu等<sup>[6-7]</sup>以活性半焦为材料,研究了表面理化特性和运行条件等因素对其脱硫性能的影响;Jianjun Li等<sup>[8]</sup>利用燃煤电厂烟气作活化剂研究了脱硫活性焦制备的影响因素。由于活性焦脱硫及同时脱硫脱硝技术只在国外比较成熟,国内在这方面的研究主要是针对活性焦脱硫,很少有同时脱硫脱硝脱汞的报道。本文利用太西活性焦,通过模拟多组分烟气,在固定床反应器上,考察温度、SO<sub>2</sub>浓度、NO浓度、O<sub>2</sub>浓度等工艺参数对活性焦脱硫脱汞性能的影响。

## 1 实 验

### 1.1 实验试样

实验试样为煤炭科学研究总院自制的太西活性焦,实验时,先将样品破碎并用30和80目筛筛选。试样的常规检测结果见表1。

表1 太西活性焦常规特性参数  
Table 1 Conventional characteristics of Taixi activated coke

堆重/ (g·L <sup>-1</sup> )	强度/ N	碘值/ (mg·g <sup>-1</sup> )	硫容/ %	比表面积/ (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	灰分/ %
767	682	497	10.5	317	5.0

### 1.2 实验系统

实验在如图1所示的小型固定床催化吸附反应器上进行。模拟烟气由N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、NO+N<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>等气体按实验条件进行配比,实验所用气体均用质量

流量控制器(北京汇博隆公司S49型)精确控制。反应器采用高硼硅玻璃加工,加热装置为GWG-1/1400型可开启式高温温控加热炉,温度误差范围±1℃。采用德图仪器公司生产的Testo360在线式烟气分析仪,可实现NO、SO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>等组分浓度的实时测量。汞分析采用德国Mercury Instruments公司的VM3000在线汞浓度分析仪,该分析仪基于原子吸收光谱检测方法,精度可以达到0.1 μg/m<sup>3</sup>。

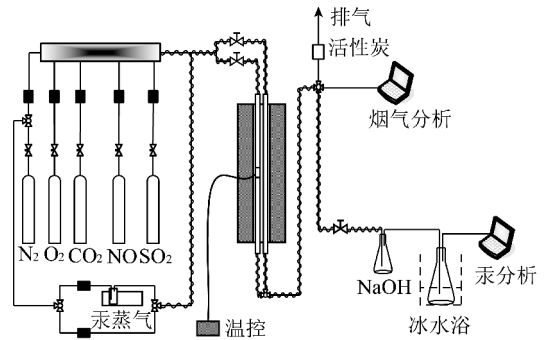


图1 活性焦联合脱硫脱汞的小型实验台

Fig. 1 The experiment setup of SO<sub>2</sub> and Hg removal

实验所用的气体:SO<sub>2</sub>体积比为400~1 500 mL/m<sup>3</sup>;NO体积比为0~400 mL/m<sup>3</sup>;O<sub>2</sub>体积比为0~12%;CO<sub>2</sub>体积比为10%;N<sub>2</sub>作为平衡气体。汞发生装置采取恒温水浴加热方式,在40℃和恒定载气(纯N<sub>2</sub>)下可以获得稳定的汞蒸气,所有实验管路均使用特氟隆管并伴加热带。实验前先入O<sub>2</sub>(6%)、CO<sub>2</sub>(10%)及平衡N<sub>2</sub>,这3种气体为基本气体(BL)。模拟烟气总流量控制在500 mL/min。吸附剂放置于内径为4 mm的高硼硅玻璃反应器中,底部垫置石英棉以防止活性焦颗粒吹落。80 mg活性焦在玻璃管中平均高度为10 mm。由于SO<sub>2</sub>会影响VM3000的检测能力,所以将尾部气体先通过10% NaOH溶液和冷凝除湿器,再进入VM3000。

实验中SO<sub>2</sub>和Hg<sup>0</sup>的单位吸附量定义为

$$q = [Q \int_0^t (C_i - C_o) dt] / m \quad (1)$$

式中, $q$ 为单位吸附量,SO<sub>2</sub>为mg/g活性焦,Hg<sup>0</sup>为μg/g活性焦; $C_i$ 为入口浓度, $C_o$ 为出口浓度,SO<sub>2</sub>浓度单位mg/m<sup>3</sup>,Hg<sup>0</sup>浓度单位μg/m<sup>3</sup>;  $Q$ 为气体总流量,mL/min;  $m$ 为吸附剂质量,g。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 工艺参数对活性焦脱硫性能的影响

#### 2.1.1 温度对活性焦脱硫性能的影响

由于烟气温度对活性焦的吸附能力有较大影响,实验首先考察了温度对活性焦脱硫性能的影响。实

验条件:SO<sub>2</sub>为800 mL/m<sup>3</sup>;Hg<sup>0</sup>入口浓度80 μg/m<sup>3</sup>;活性焦80 mg;BL+SO<sub>2</sub>气氛。由图2可以看出,随着温度的降低,活性焦对SO<sub>2</sub>的单位吸附量呈上升趋势,且随着时间的推移,吸附量均趋向于平衡,190℃时活性焦饱和单位吸附量为9.22 mg/g,130℃下饱和单位吸附量为11.36 mg/g,上升了25%,这表明随着温度的降低,活性焦的脱硫活性升高,这也符合吸附的一般规律<sup>[9]</sup>:



温度升高,反应向脱附方向进行,在温度较低的状况下,吸附处于主导地位;温度升高后,脱附速度增加,使活性焦对SO<sub>2</sub>的吸附量降低。

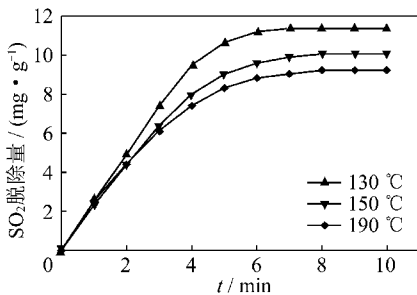


图2 温度对活性焦脱硫SO<sub>2</sub>的影响

Fig. 2 Effect of adsorption temperature on the desulfurization performance

### 2.1.2 SO<sub>2</sub>浓度对活性焦脱硫性能的影响

实验条件:温度130℃;Hg<sup>0</sup>入口浓度80 μg/m<sup>3</sup>;活性焦80 mg;BL+SO<sub>2</sub>气氛。由图3可见,随着SO<sub>2</sub>浓度的升高,活性焦对SO<sub>2</sub>的单位吸附量呈上升趋势。反应10 min时,SO<sub>2</sub>浓度为400 mL/m<sup>3</sup>下活性焦的单位吸附量为10.4 mg/g;浓度为1 200 mL/m<sup>3</sup>体系中活性焦的单位吸附量为14.82 mg/g,这表明烟气中SO<sub>2</sub>浓度越高,其被活性焦吸附的推动力越大,从气相向活性焦表面扩散的速度越快,使活性焦对SO<sub>2</sub>吸附量增加。

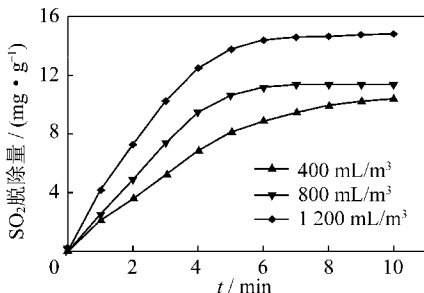


图3 SO<sub>2</sub>浓度对活性焦脱硫SO<sub>2</sub>的影响

Fig. 3 Effect of SO<sub>2</sub> concentration on the desulfurization performance

### 2.1.3 O<sub>2</sub>浓度对活性焦脱硫性能的影响

实验条件:温度130℃;SO<sub>2</sub>为800 mL/m<sup>3</sup>;Hg<sup>0</sup>入口浓度80 μg/m<sup>3</sup>;活性焦80 mg;BL+SO<sub>2</sub>气氛。由图4可见,活性焦对SO<sub>2</sub>单位吸附量随着O<sub>2</sub>浓度的增加而增加,当O<sub>2</sub>不存在时,活性焦10 min时单位吸附量为9.46 mg/g,O<sub>2</sub>浓度为6%时,单位吸附量升高至11.36 mg/g,上升了21%,但当O<sub>2</sub>浓度达到12%时,活性焦对SO<sub>2</sub>单位吸附量又明显下降,这表明O<sub>2</sub>能促进活性焦对SO<sub>2</sub>的脱除,但并非越高越好,浓度过高又会产生抑制作用,这可能是由于O<sub>2</sub>浓度过高时,活性焦对O<sub>2</sub>的吸附占据了大量的吸附位,从而导致SO<sub>2</sub>吸附量减少<sup>[9]</sup>。

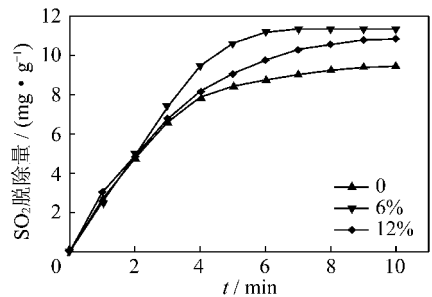


图4 O<sub>2</sub>浓度对活性焦脱硫SO<sub>2</sub>的影响

Fig. 4 Effect of O<sub>2</sub> concentration on the desulfurization performance

## 2.2 工艺参数对活性焦脱硫性能的影响

### 2.2.1 温度对活性焦吸附单质汞性能的影响

实验条件:SO<sub>2</sub>为800 mL/m<sup>3</sup>;Hg<sup>0</sup>入口浓度80 μg/m<sup>3</sup>;活性焦40 mg;BL+SO<sub>2</sub>气氛。图5为温度对活性焦吸附单质汞性能影响,可以看到,随着温度的升高,活性焦对单质汞单位吸附量呈明显下降趋势,且温度越高,下降幅度越大,60 min、150℃时单位吸附量比130℃下降了12%,而190℃时下降了28%。这是由于活性焦对单质汞的吸附主要为物理吸附,化学吸附较弱。活性焦的这种表现也可由物理吸附的机理解释。温度较高时,活性焦表面吸附Hg<sup>0</sup>的活性区域发生减损和钝化<sup>[10]</sup>,直接导致Hg<sup>0</sup>的吸附活性位减少,而且物理吸附具有可逆性<sup>[11]</sup>,在Hg<sup>0</sup>吸附和脱附的动态平衡中,较高的温度对于脱附更加有利,所以在较高的温度下,吸附量呈下降趋势。

### 2.2.2 BL+SO<sub>2</sub>体系下SO<sub>2</sub>浓度对活性焦吸附单质汞性能的影响

实验条件:温度130℃;Hg<sup>0</sup>入口浓度80 μg/m<sup>3</sup>;活性焦40 mg;BL+SO<sub>2</sub>气氛。图6为不同SO<sub>2</sub>浓度对活性焦吸附单质汞性能的影响,可见,随着SO<sub>2</sub>浓度的升高,活性焦对Hg<sup>0</sup>单位吸附量下降,60 min时BL下单位吸附量31.45 μg/g,而BL+1 500 mL/m<sup>3</sup>SO<sub>2</sub>体系下的单位吸附量为21.08 μg/g,相比下降了

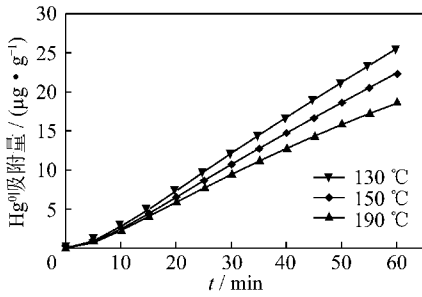
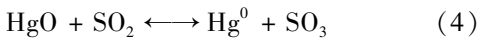
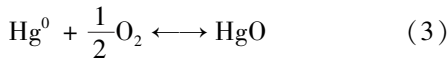


图5 温度对活性焦吸附单质汞性能的影响  
Fig.5 Effect of adsorption temperature on elemental mercury removal performance

33%。这是由于SO<sub>2</sub>分子与Hg<sup>0</sup>在活性焦表面竞争吸附活性位,SO<sub>2</sub>分子的极性较Hg<sup>0</sup>强<sup>[12]</sup>,导致活性焦优先吸附SO<sub>2</sub>。在有O<sub>2</sub>存在条件下Hg<sup>0</sup>与SO<sub>2</sub>还会发生如下反应<sup>[13]</sup>:



活性焦对HgO吸附能力有限,根据反应(4),SO<sub>2</sub>还能将HgO还原为Hg<sup>0</sup>,抑制Hg<sup>0</sup>的氧化。高洪亮等<sup>[14]</sup>利用活性炭在固定床实验台吸附汞也发现SO<sub>2</sub>的存在会缩短汞穿透时间,导致活性炭的吸附能力下降。

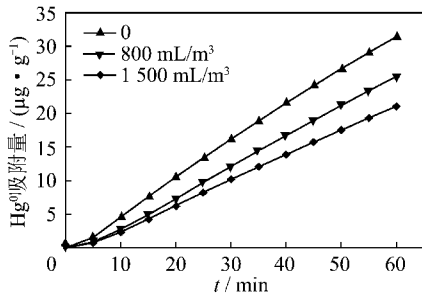
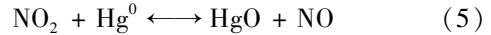


图6 SO<sub>2</sub>浓度对活性焦吸附单质汞性能的影响  
Fig.6 Effect of SO<sub>2</sub> concentration on elemental mercury removal performance

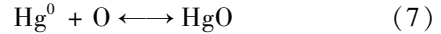
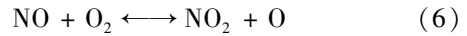
### 2.2.3 BL+NO体系下NO浓度对活性焦吸附单质汞性能的影响

实验条件:温度130 °C;Hg<sup>0</sup>入口浓度80 μg/m<sup>3</sup>;活性焦40 mg;BL+NO气氛。图7为不同NO浓度对活性焦单质汞吸附性能的影响,可见,随着NO浓度的升高,活性焦的Hg<sup>0</sup>单位吸附量呈上升趋势,60 min时BL+200 mL/m<sup>3</sup>NO体系中单位吸附量达到了35.43 μg/g,BL+400 mL/m<sup>3</sup>NO单位吸附量达到39.06 μg/g,相比在BL中升高了24%。可见NO促进了活性焦对Hg<sup>0</sup>的吸附,与SO<sub>2</sub>存在时的状况不同。此处现象的主要原因是,NO与O<sub>2</sub>接触极易生成NO<sub>2</sub>,NO<sub>2</sub>是一种强氧化剂,通过反应(5)将Hg<sup>0</sup>氧化

成HgO<sup>[15]</sup>:



另外,NO氧化成为NO<sub>2</sub>生成的O原子还可增加Hg<sup>0</sup>的氧化<sup>[16]</sup>:



随着NO浓度增加,反应(6)和反应(7)向右进行,增强Hg<sup>0</sup>的氧化,促进活性焦对Hg<sup>0</sup>的化学吸附。

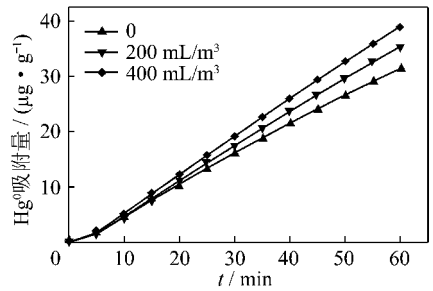


图7 NO浓度对活性焦吸附单质汞性能的影响  
Fig.7 Effect of NO concentration on elemental mercury removal performance

### 2.2.4 BL+NO+SO<sub>2</sub>体系NO与SO<sub>2</sub>共同对活性焦吸附单质汞性能的影响

实验条件:温度130 °C;Hg<sup>0</sup>入口浓度80 μg/m<sup>3</sup>;活性焦40 mg;BL+SO<sub>2</sub>+NO气氛。图8为NO与SO<sub>2</sub>共同存在对活性焦的单质汞吸附性能影响。活性焦的Hg<sup>0</sup>吸附能力在两者共存时稍有下降,60 min时NO与SO<sub>2</sub>共存活性焦单位汞吸附量为30.2 μg/g,比在BL中下降了3.8%,造成这种现象的原因主要是SO<sub>2</sub>和NO在活性焦表面与Hg<sup>0</sup>竞争吸附活性位,SO<sub>2</sub>和NO极性较Hg<sup>0</sup>强,会占用活性焦表面的部分吸附活性位,抑制活性焦对Hg<sup>0</sup>的吸附。Miller等<sup>[17]</sup>利用活性炭脱汞过程中也发现了类似的实验现象,并且在出口检测到氧化态的汞。

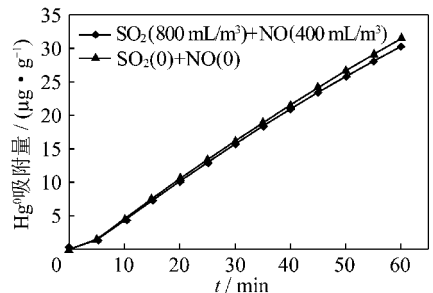


图8 NO-SO<sub>2</sub>共存对活性焦吸附单质汞性能的影响  
Fig.8 Effect of NO and SO<sub>2</sub> on elemental mercury removal performance

## 3 结 论

(1) 温度对活性焦脱硫脱汞性能影响较大,在

130 ~ 190 °C 内, 温度越低越有利于活性焦对 SO<sub>2</sub> 及单质汞(Hg<sup>0</sup>) 的脱除。

(2) SO<sub>2</sub> 浓度升高, 活性焦对 SO<sub>2</sub> 吸附量呈增大趋势; 脱硫过程中 O<sub>2</sub> 浓度存在最佳值, 约 6% 的 O<sub>2</sub> 浓度最有利活性焦脱硫。

(3) SO<sub>2</sub> 与 Hg<sup>0</sup> 在活性焦表面存在竞争吸附, SO<sub>2</sub> 分子极性较强, 优先吸附在焦表面, 而且 SO<sub>2</sub> 能还原汞的氧化物 HgO, 抑制活性焦对单质汞(Hg<sup>0</sup>) 的吸附。

(4) NO 与 O<sub>2</sub> 能生成具有氧化性的 NO<sub>2</sub> 和 O 原子, 两者均可氧化 Hg<sup>0</sup> 为 HgO, 促进活性焦对 Hg<sup>0</sup> 的化学吸附, 随着 NO 浓度升高, 活性焦对单质汞单位吸附量升高。

(5) SO<sub>2</sub> 和 NO 极性较 Hg<sup>0</sup> 强, 两者共存抑制活性焦对 Hg<sup>0</sup> 的吸附。

#### 参考文献:

- [1] 梁大明. 活性焦干法烟气脱硫技术[J]. 煤质技术, 2008(6): 48-51.  
Liang Daming. Dry-process flue gas desulfurization technology with activated coke[J]. Coal Quality Technology, 2008(6): 48-51.
- [2] 陶贺, 金保升, 朴桂林, 等. 活性焦烟气脱硫脱硝的静态实验和工艺参数选择[J]. 东南大学学报, 2009, 39(3): 635-640.  
Tao He, Jin Baosheng, Piao Guilin, et al. Static experiment and technology parameter study of flue gas desulphuration and denitrification by active coke[J]. Journal of Southeast University, 2009, 39(3): 635-640.
- [3] 李兰廷, 吴涛, 梁大明, 等. 活性焦脱硫脱硝脱汞一体化技术[J]. 煤质技术, 2009(3): 46-49.  
Li Lanting, Wu Tao, Liang Daming, et al. A summary of combined desulfurization, denitration and de-mercury technology using activated coke[J]. Coal Quality Technology, 2009(3): 46-49.
- [4] 熊银伍, 杜铭华, 步学鹏, 等. 改性活性焦脱除烟气中汞的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(35): 17-22.  
Xiong Yinwu, Du Minghua, Bu Xuepeng, et al. Experimental research of removing mercury from flue gas by modified activated coke[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(35): 17-22.
- [5] 朱惠峰, 钟秦. 热再生对活性焦烟气脱硫的影响[J]. 煤炭学报, 2009, 34(9): 1 258-1 262.  
Zhu Huifeng, Zhong Qin. Effect of thermal regeneration of active coke on flue gas desulphurization[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1 258-1 262.
- [6] Liu Qingya, Li Chunhu, Li Yanxu. SO<sub>2</sub> removal from flue gas by activated semi-cokes: the preparation of catalysts and determination of operating conditions[J]. Carbon, 2003, 41(12): 2 217-2 223.
- [7] Liu Qingya, Li Chunhu, Li Yanxu. SO<sub>2</sub> removal from flue gas by activated semi-cokes: effects of physical structures and chemical properties on SO<sub>2</sub> removal activity[J]. Carbon, 2003, 41(12): 2 225-2 230.
- [8] Li Jianjun, Noriyuki Kobayashi, Hu Yongqi. The activated coke preparation for SO<sub>2</sub> adsorption by using flue gas from coal power plant[J]. Chemical Engineering and Processing, 2008, 47(1): 118-127.
- [9] 李文华, 刘昌见, 王志忠. 用褐煤半焦脱除烟气中 SO<sub>2</sub> 的研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(3): 321-326.  
Li Wenhua, Liu Changjian, Wang Zhizhong. Removal of SO<sub>2</sub> in flue gas using semi-coke from lignite[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(3): 321-326.
- [10] 杨宏旻, 张斌, 侯文慧, 等. 负载 CuO/Cl 活性炭的气态汞脱除特性[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(6): 814-818.  
Yang Hongmin, Zhang Bin, Hou Wenhui, et al. Removal characteristics of vapour-phase elemental mercury through active carbon-supported CuO/Cl[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41(6): 814-818.
- [11] Olson E S, Miller S J, Sharma R K, et al. Catalytic effects of carbon sorbents for mercury capture[J]. Journal of Hazardous Materials, 2000, 74: 61-79.
- [12] Wang Yunjun, Duan Yufeng, Yang Ligu, et al. Experimental study on mercury transformation and removal in coal-fired boiler flue gases[J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90: 643-651.
- [13] Azhar Uddin, Toru Yamada, Ryota Ochiai, et al. Role of SO<sub>2</sub> for elemental mercury removal from coal combustion flue gas by activated carbon[J]. Energy & Fuels, 2008, 22(4): 2 284-2 289.
- [14] 高洪亮, 周劲松, 骆仲决, 等. 燃煤烟气中汞在活性炭上的吸附特性[J]. 煤炭科学技术, 2006, 24(5): 49-52.  
Gao Hongliang, Zhou Jinsong, Luo Zhongyang, et al. Mercury adsorption characteristics of activated carbon in coal-fired flue gas[J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(5): 49-52.
- [15] 高洪亮, 周劲松, 骆仲决, 等. NO 对燃煤烟气中汞形态分布影响的实验研究[J]. 工程热物理论, 2004, 25(6): 1 057-1 060.  
Gao Hongliang, Zhou Jinsong, Luo Zhongyang, et al. Effect of NO on the speciation of mercury in coal-fired flue gases[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(6): 1 057-1 060.
- [16] Zhou Jinsong, Luo Zhongyang, Hu Changxing, et al. Factors impacting gaseous mercury speciation in postcombustion[J]. Energy & Fuels, 2007, 21: 491-495.
- [17] Stanley J Miller, Grant E Dunham, Edwin S Olson, et al. Flue gas effect on carbon-based mercury sorbent[J]. Fuel Processing Technology, 2000, 65-66: 343-363.