

污泥与煤混烧中飞灰对汞的吸附特性

吴成军, 段钰锋, 赵长遂

(洁净煤发电及燃烧技术教育部重点实验室(东南大学), 江苏省南京市 210096)

Adsorption Characterization of Mercury by Fly Ashes During Co-combustion of Sludge and Coal

WU Cheng-jun, DUAN Yu-feng, ZHAO Chang-sui

(Key Laboratory of Clean Coal Power Generation and Combustion Technology(Southeast University), Ministry of Education,
Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: In order to understand the performance of fly ashes on mercury adsorption, the surface area and pore distribution of four fly ash samples was studied by using the nitrogen adsorption isotherms. Their fractal dimensions were also calculated by a method based on Frenkel-Halsey-Hill (FHH) model. Chemical compositions of fly ash samples were also determined. The results indicate that there is a positive correlation between unburned carbon content and mercury content in fly ash samples. The bigger the specific surface area of fly ash particles and thus the more mercury adsorbed. Wider pore distribution is beneficial to mercury adsorption and micropores play a more significant role in mercury adsorption. The fractal dimensions of fly ash samples are between 2.1 and 2.6, and they can reflect the characterization of the physical adsorbability of fly ashes. The components of flue gas and chemical compositions of fly ash may have some catalytic oxidation effect on mercury adsorption.

KEY WORDS: co-combustion; fly ash; mercury adsorption; pore structure; fractal dimension; ash composition; catalytic oxidation

摘要: 为了解飞灰对汞的吸附特性, 用氮气吸附等温线分析了4个飞灰样品的比表面积和孔隙分布; 应用基于(Frenkel-Halsey-Hill, FHH)模型的方法计算了它们的分形维数, 分析了飞灰样品的化学组分对汞吸附的影响。结果表明, 飞灰残碳量与汞含量呈正相关关系。飞灰颗粒比表面积增大, 飞灰的汞吸附趋于增加。孔分布越宽越有利于汞的吸附, 其中微孔在汞吸附过程中发挥更为重要的作用。飞灰样品的分形维数处于2.1~2.6之间, 且分形维数能较好地反映飞灰对汞

的物理吸附性能。烟气成分与飞灰化学组成可能对汞存在一定的催化氧化作用。

关键词: 混烧; 飞灰; 汞吸附; 孔隙结构; 分形维数; 灰组分; 催化氧化

0 引言

焚烧以其处理彻底性、减量率可达95%左右, 有机物被完全氧化分解, 致病菌等微生物被杀死等技术优势越来越广泛地被应用于污泥处理^[1]。当然, 焚烧法也存在一些不足, 如污泥焚烧过程中会产生二次污染物, 包括有害气体、有害废渣等, 其中汞是主要污染物之一。

汞作为一种非常重要的全球性的污染物而倍受关注, 即使是在浓度非常低的情况下, 也能对人类和动植物产生相当大的毒害作用。近年来, 国内外学者对汞的吸附脱除做了大量的研究, 取得了一系列成果。研究表明^[2-4], 钙基类物质如Ca(OH)₂, 对HgCl₂的吸附效率可达到85%, 碱性吸附剂如CaO同样也可以在100℃时高效地吸附HgCl₂, 在140℃时对HgCl₂的吸附效率降低, 且在这两个温度下对单质汞的吸附效率都很低。也有学者研究得出^[5], 将飞灰再注入后通过布袋除尘器除尘, 在135~160℃附近, 汞脱除率在13%~80%之间。目前普遍认为飞灰能吸附烟气中的汞^[6-7]。孔隙结构与化学组成是飞灰物理化学特性的主要表征, 直接影响飞灰对汞的吸附。因此, 对飞灰物理化学特性的研究有助于了解飞灰吸附汞的机理。本文主要探讨了飞灰颗粒的孔比表面积及其分布、孔隙分布、分形维数以及化学组分对汞吸附的影响。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973项目)(2006CB-200300)。

The National Basic Research Program (973 Program)(2006CB200300).

1 样品采集

混烧污泥与煤的循环流化床试验台如图1所示。整个装置由循环流化床焚烧炉本体、启动燃烧室、送引风系统、污泥加料系统、加煤系统、高温旋风分离器、返料装置、尾部烟道、测量、取样和运行操作控制系统等几部分组成。

循环流化床焚烧系统布置有相应的烟气、飞灰和底渣的取样点，飞灰取样与烟气采样同步。试验中共取了4个飞灰样品，分别编号为S1、S2、S3和S4。所取飞灰样品对应的工况参数见表1。

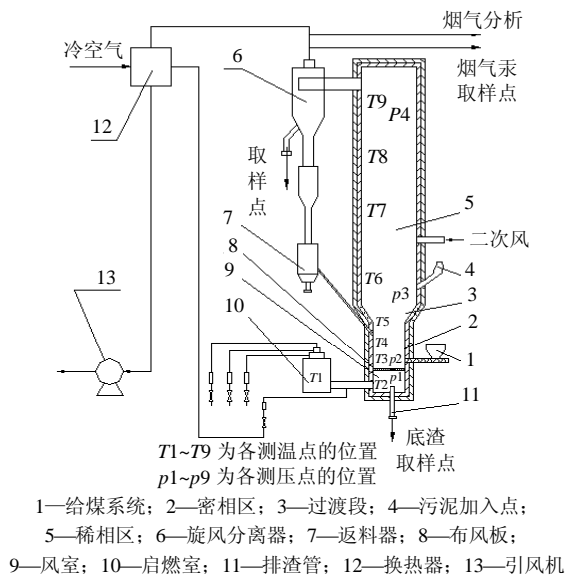


图1 循环流化床焚烧炉系统

Fig. 1 Incineration system of the circulating fluidized bed

表1 污泥与煤循环流化床混烧的运行参数

Tab. 1 Operating parameters of co-combustion of sludge and coal in circulating fluidized bed

样品	污泥与煤质量 掺混比	过量空气 系数	二次风 率/%	[Ca]/[S]
S1	10:90	1.3	20	2.5
S2	20:80	1.3	20	2.5
S3	30:70	1.3	20	2.5
S4	40:60	1.3	20	2.5

2 测试方法

飞灰样品中汞含量采用北京瑞利分析仪器公司生产的AF-630原子荧光光谱仪测定。

飞灰样品的比表面积和孔结构参数是在美国Micromeritics ASAP2020比表面和孔隙度自动分析仪上测定，该仪器在液氮饱和温度77.4 K下，以氮(99.99%)为吸附质，在相对压力 p/p_0 (p , p_0 分别为氮低温吸附的平衡压力及饱和压力)0.01~0.995，进行等温吸附和脱附的测量，获得吸附、脱附等温线。

通过对吸附等温线形态的分析可以获得飞灰样品孔隙结构的信息。由多点BET方法计算样品的比表面积，由BJH模型计算孔比表面积及其分布、孔比容积及其分布。同时运用吸附、脱附等温线，基于FHH模型方法计算出飞灰样品的分形维数。

采用X射线荧光光谱分析仪(XRF)分析了飞灰样品的化学组分。

3 结果与分析

3.1 飞灰样品汞含量和碳含量

图2给出了飞灰样品汞含量和碳含量的关系。由图可知，飞灰样品的汞含量与碳含量呈正相关关系，且有着相同的变化程度和趋势。通常认为较高的飞灰碳含量有助于汞的吸附，原因是较大含量的残碳提供了更大孔比表面积和更丰富的孔隙结构，增强了飞灰对汞的物理吸附；此外，较高含量的残碳提供更广阔的反应活性区域，促进了飞灰对汞的化学吸附，即残碳表面的含氧、含氮等官能团催化氧化烟气中元素汞，进而将汞吸附于飞灰颗粒表面^[8-10]。

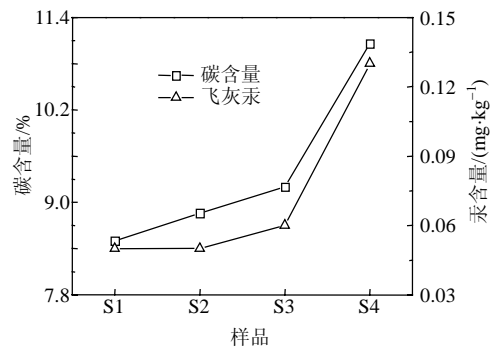


图2 汞含量与碳含量的关系

Fig. 2 Mercury content vs. unburned carbon content

3.2 N₂吸附-脱附等温线

N₂在飞灰样品上吸附-脱附等温线如图3所示。各飞灰样品的吸附等温线形状虽然在形态上稍有差别，但都呈反S型，基于Brunauer's的分类，4条曲线都属于II型吸附等温线^[11]。曲线的前半段上升缓慢，并呈向上凸的形状，表明吸附由单分子层向多分子层过渡；曲线后半段等温线急剧上升，一直到接近饱和和蒸汽压也未呈现出吸附饱和现象，说明飞灰样品中含有一定量的中孔和大孔，由毛细凝聚而发生中、大孔容积充填。

此外，4个飞灰样品的吸附-脱附等温线都在 $p/p_0 > 0.45$ 时呈现较大的分离，根据DeBoer^[12]的分析，所有飞灰样品的吸附-脱附等温线的滞后环都可视为B型，表明孔隙结构接近平行板狭缝。脱附

时压力只有与狭缝宽度相应的弯月液面有效半径相符合，77 K下的液态N₂分子才可从狭缝中逸出。对于此种孔隙当相对压力接近 1 时发生毛细管凝结，并使所有的孔迅速充满，吸附量急剧增加。

N₂吸附体积变化顺序为：飞灰样品S4的吸附体积远远高于其他样品，样品S3的吸附体积次之，然后依次为样品S2和S1。4个样品的吸附量各不相同，说明飞灰样品结构有较大差异。一般而言，在某一相对压力 p/p_0 时吸附/脱附等温线分离程度越大，意味着与此对应的孔的含量越多，滞洄环越宽则孔结构中含有较多的二次孔，表明其孔分布越宽。飞灰样品S4的吸附-脱附等温线在低相对压力下有较大程度的分离，可见样品S4的微孔含量最高，孔分布最宽，空隙结构最发达。样品S3的吸附等温线滞洄环较S2和S1宽，低相对压力下分离程度较S2和S1大，所以S3对应的孔隙结构较样品S2和S1复杂，孔径分布较S2和S1宽。

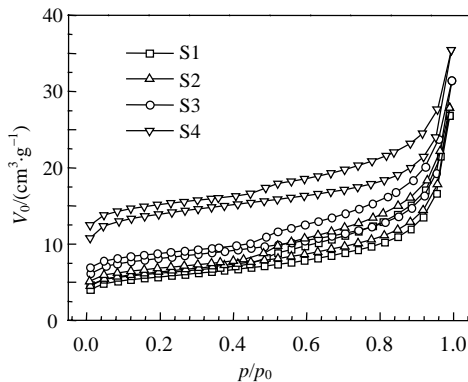


图 3 飞灰样品对N₂的吸附-脱附等温线
Fig. 3 Nitrogen adsorption-desorption isotherms of fly ash samples

3.3 孔比表面积及其分布

4个飞灰样品的微分和累积孔比表面积分布曲线分别见图4和图5。通常情况下，通过脱附曲线确定孔比表面积分布更加接近实际情况。因此，图4和图5中的孔比表面积分布曲线是以脱附过程应用BJH法计算出的微分和累积孔比表面积分布。

4个飞灰样品的微分孔比表面积分布曲线大体相似。从图4中可以看出，曲线的起始部分上翘，尖峰越高对应孔的比表面积增加就越多，此时对应的是小于2 nm微孔的贡献；飞灰样品S1、S2和S3的孔比表面积在3.5~4.5 nm范围内出现最值，且对应的值是逐渐增大的，这说明此范围内的中孔对孔比表面积的贡献较其他孔径更大一些，也说明了飞灰样品S1、S2和S3中3.5~4.5 nm范围内的中孔比例依次增大。飞灰样品S4孔比表面积的最值出

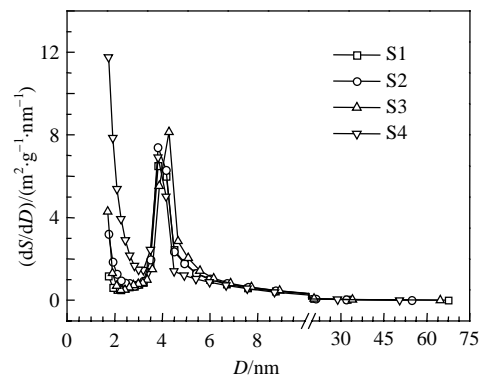


图 4 飞灰的微分孔比表面积分布曲线(脱附过程)
Fig. 4 Pore specific surface area distribution curves of fly ash samples (desorption)

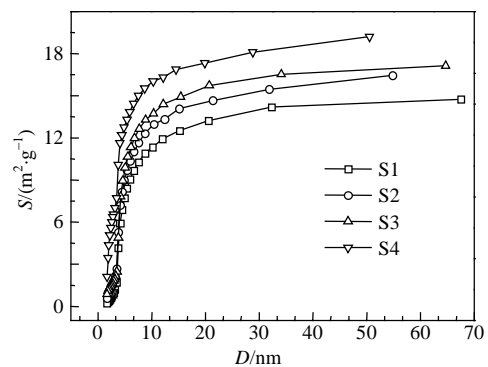


图 5 飞灰的累积孔比表面积分布曲线(脱附过程)
Fig. 5 Cumulative pore specific surface area distribution curves of fly ash samples (desorption)

现在孔径小于 2 nm 的范围内且远大于其他样品最大值，表明样品S4含有较大量的微孔。由图5可清楚看出，飞灰样品S1、S2、S3和S4的孔比表面积依次增大。

从样品S1到样品S4，微孔的比表面积逐渐增加，即微孔的比例逐渐增大。孔比表面积逐渐增加，孔分布变得较宽，与飞灰样品中汞含量呈正相关。这说明较大的孔比表面积、较宽的孔径分布以及较多数量的微孔对汞吸附呈正面影响。

3.4 孔隙分布

4种飞灰样品的微分孔隙分布(pore-size distribution, PSD)曲线见图6。同样，图6中的PSD曲线也是脱附过程应用BJH法计算出来的微分孔隙分布。

由图6可以看出，飞灰样品的微分孔隙分布曲线与孔比表面积分布曲线有着相似的特点，从样品S1到样品S4，孔比容有增加的趋势，但与孔比表面积分布曲线相比，4个飞灰样品的比孔容都在3.5~4.5 nm范围内出最值。飞灰样品的微分孔隙分布曲线同样出现2个尖峰，第1尖峰微孔，第2尖峰的出现表明3.5~4.5 nm范围内中孔有进一步的扩

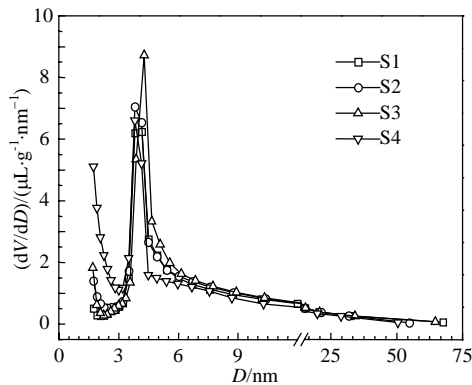


图6 飞灰样品的孔分布曲线(脱附过程)

Fig. 6 Pore size distribution curves of fly ash samples(desorption)

展,且尖峰的高度表明对应孔径的出现表明飞灰样品中含有一定量小于2 nm的在样品中所占的份额。比较4个飞灰样品,可以发现小于2 nm的微孔在样品S1、S2、S3和S4中所占的份额依次增大,

表2 飞灰样品的汞含量、比表面积、孔体积和平均孔径

Tab. 2 Mercury content, specific surface areas, specific pore volumes, average pore diameters for fly ash samples

样品	汞含量/ (mg·kg ⁻¹)	BET比表面 积/(m ² ·g ⁻¹)	BJH累积吸附 体积/(cm ³ ·g ⁻¹)	BJH累积脱附 体积/(cm ³ ·g ⁻¹)	BET平均 孔径/nm	BJH吸附 平均孔径/nm	BJH脱附平均 孔径/nm
S1	0.05	18.7623	0.03911	0.038831	8.84858	11.7161	10.5372
S2	0.05	20.7684	0.040143	0.041512	8.29389	11.2945	10.3810
S3	0.06	26.1623	0.043146	0.042684	7.42817	11.2536	9.6905
S4	0.13	44.0041	0.041991	0.040192	4.98038	8.8977	8.3769

3.5 飞灰样品的分形特性

分形几何的研究有助于了解飞灰的骨架结构及由其所构成孔隙的自相似性。利用氮气吸附法,能够直接得到飞灰孔网络结构的表面分形维数 D_s 。 D_s 可由FHH方程^[13-14]获得,即在多层吸附区域,吸附相对压力 p_0/p 与吸附体积 V 符合FHH方程

$$\frac{V}{V_m} \propto [\ln(\frac{p_0}{p})]^S \quad (1)$$

式中: V 为平衡压力为 p 时所吸附气体的体积; V_m 为完全单分子层吸附气体的体积; S 为与 D_s 有关的指数,其值与吸附阶段有关。在多层吸附早期,吸附剂与气体间的吸附作用主要受范德华力作用时($S < 1/3$), $S = (D_s - 3)/3$;当吸附剂表面达到高度覆盖,吸附作用主要由吸附剂与气体界面的液-气表面张力控制,即受毛细凝聚作用控制时($S > 1/3$), $S = D_s - 3$ 。对FHH方程两边取对数,由双对数曲线的斜率可算得 S 。

图7为本文样品依据FHH方程得到的吸附体积 V 对 $\ln(p_0/p)$ 的双对数实验点及所作的表面分维直线拟合图。拟合直线的斜率即为FHH方程中的 S ,根据 S 所在范围可得到样品的表面分形维数 D_s 。拟合

3.5~4.5 nm范围内的中孔在样品S1、S2和S3中所占份额逐渐增大,但在样品S4中所占份额低于样品S2和S3,与样品S1相当。飞灰样品S4中汞含量远高于其他3个样品,说明微孔吸附汞的能力明显强于中孔。

由表2可知,飞灰样品的BET比表面积为18.7623~44.0041 m²·g⁻¹,累积脱附孔体积为0.038831~0.042684 cm³·g⁻¹,BJH脱附平均孔径为8.3769~10.5372 nm,BET平均孔径为4.98038~8.84858 nm,处于中孔范围。

由图6及表2中数据可以看出,从样品S1到样品S4,孔径有所减小,孔容积逐渐增大,孔径分布逐渐变宽,微孔份额增加,与飞灰样品中汞的含量呈正相关。这说明较大的比孔容积和较宽的孔分布对汞吸附呈正面影响,且样品中微孔在汞吸附过程中发挥更为重要的作用。

得到的分形维数 D_s 及拟合相关系数 R^2 列于表3。

由图7可知,4个飞灰样品的 $\ln V$ 与 $\ln(\ln(p_0/p))$ 在等温线的全范围内有良好的线性关系。从表3给出的拟合数据看,所有样品的直线拟合相关度很高,所得分形维数 D_s 值在2.1~2.6之间,因而都具有表面分形特性。图8示出了飞灰分形维数与飞灰汞含量之间的关系。

由图8可以看出,飞灰中汞的含量与飞灰颗粒表面分形维数存在较明显的正相关关系,即飞灰颗

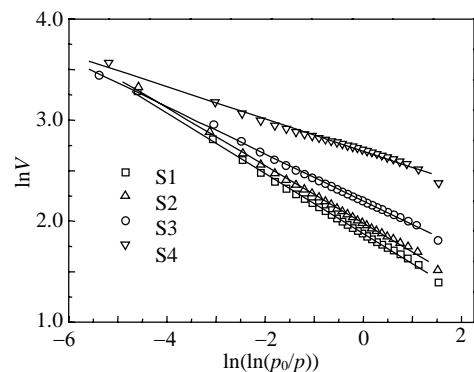


图7 飞灰样品的表面分维拟合图(吸附过程)

Fig. 7 Surface fractal dimension fitting plots of fly ash samples(adsorption)

表 3 飞灰孔表面分形维数
Tab. 3 Pore surface fractal dimensions of fly ashes

样品	FHH 理论(吸附)		FHH 理论(脱附)	
	D_s	R^2	D_s	R^2
S1	2.104 59	0.998 36	2.099 07	0.997 04
S2	2.141 64	0.998 33	2.158 8	0.996 07
S3	2.298 9	0.998 19	2.237 91	0.998 2
S4	2.520 09	0.989 43	2.520 99	0.999 23

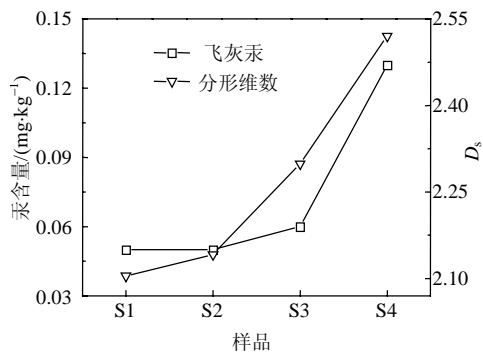


图 8 汞含量与飞灰孔样品表面分形维数的关系
Fig. 8 Pore surface fractal dimension vs. mercury content in fly ashes

粒表面分形维数越大, 飞灰吸附汞的量越多。表面分形维数作为飞灰的重要结构表征参量之一, 综合反映了飞灰表面的形貌。样品的表面分形维数越大, 说明飞灰样品的结构越复杂且样品表面在该尺度下的空间填充能力越强, 也就越有利于汞的吸附。由此可知, 飞灰颗粒表面分形维数可较好地反映飞灰对汞的物理吸附性能。

3.6 飞灰的化学组分和燃料硫含量

飞灰对汞的吸附包括物理吸附和化学吸附, 且 2 种吸附过程是同时进行的。众多研究表明, 飞灰的化学组成对汞的吸附有较大的影响。Hassett D J 等^[15]研究指出, MgO 、 Fe_2O_3 和 MnO 作为催化剂, 在一定温度和碳参与情况下对汞氧化有明显的催化作用。Dunham G E 等^[16]研究表明, 飞灰中磁铁矿的含量越大, 烟气中氧化态汞的份额越高。飞灰中碱性物质可吸收烟气中的酸性气体, 如 HCl 、 SO_2 等^[17-18], 进而影响烟气中汞的形态分布和飞灰中的汞含量。

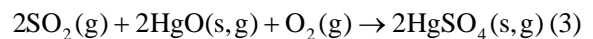
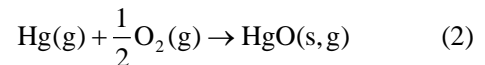
本文对飞灰样品进行了XRF分析, 得到了如表 4 所示的金属氧化物分布规律。可见, 飞灰中主要成分是 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 CaO 等。由表中数据可以看出, 飞灰样品中 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 MgO 的含量与飞灰汞含量存在一定的正相关关系。原因可能是烟气中元素汞扩散至飞灰颗粒表面时, 飞灰中 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 MgO 催化氧化单质汞, 进而将汞吸附于飞灰颗粒表面, 导致飞灰中的汞含量有所增加。

表 4 飞灰样品的化学组成和燃料硫含量
Tab. 4 Summary of fly ash composition and S content

项目	S1	S2	S3	S4
$w(\text{SiO}_2)/\%$	55.63	55.41	53.83	53.78
$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$	7.77	7.81	7.96	8.16
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	24.7	24.52	24.8	25.92
$w(\text{CaO})/\%$	5.52	5.4	7.09	4.59
$w(\text{MgO})/\%$	1.45	1.21	1.17	2.61
$w(\text{TiO}_2)/\%$	0.5	0.45	0.54	0.6
$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	1.69	1.37	1.37	1.66
$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$	0.88	0.75	0.88	0.78
$w(\text{SO}_3)/\%$	0.99	1.13	1.36	1.15
$w(\text{S})/\%$	0.58	0.69	0.81	0.93
$w(\text{Hg})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	0.05	0.05	0.06	0.13

由于试验燃用的污泥与煤中氯含量相当低而硫含量较高, 所以本文同时考虑了燃料硫含量对汞吸附的影响。燃料硫含量见表 4。燃料硫含量增大, 相应烟气中 SO_2 的浓度有所增加, 与飞灰样品汞含量呈正相关关系, 表明本次试验条件下, 烟气中 SO_2 促进汞吸附于飞灰颗粒表面。原因分析如下:

当烟气中元素汞与飞灰颗粒表面接触时, 颗粒表面的化学成分可充当催化剂, 烟气气氛下将单质汞催化氧化成二价汞, 在 $100\sim 150^\circ\text{C}$ 之间可能发生如下化学反应^[19-20]:



热力学计算表明^[19-21], HgSO_4 稳定性大于 HgO , 一旦生成后, 则较难分解; 同时, 相较其他汞化合物, HgSO_4 更易凝结于飞灰颗粒表面, 从而导致飞灰中汞的含量有所增加。

因此, 飞灰对汞的吸附效果是一个多因素影响的综合结果, 不仅要考虑孔隙结构的物理吸附的影响, 更重要的是烟气成分和飞灰化学组成(如 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 MgO 等)的催化氧化共同作用下的化学吸附的效果。

4 结论

(1) 飞灰颗粒比表面积越大, 飞灰的汞吸附趋于增加。孔分布越宽越有利于汞的吸附, 其中微孔在汞吸附过程中发挥更为重要的作用。

(2) 本文试验条件下, 飞灰样品的分形维数处于 2.1~2.6 之间。飞灰的分形维数能较好地反映飞灰对汞的物理吸附性能。

(3) 飞灰可能是潜在的脱汞吸附剂。飞灰中未燃尽碳含量越多, 飞灰对汞的吸附效果越好。

(4) 本文试验条件下, 烟气成分(如 O_2 , SO_2)

和飞灰化学组分(如 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 MgO)共同的催化氧化作用促进烟气汞向飞灰中转化。

参考文献

- [1] Werther J, Ogada T. Sewage sludge combustion[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1999, 25(1): 55-116.
- [2] Ghorishi S B, Snger C F, Sedman C B. Preparation and evaluation of modified lime and silica-lime sorbents for mercury vapor emission control [C]. EPRI-DOE-EPA Combined Utility Air Pollution Control Symposium, Atlanta Georgia, USA, 1999.
- [3] Stouffer M R, Rosenhover W A, Burke F P. Investigation of flue gas mercury measurement and control for coal-fired sources [C]. The 89th Annual Air & Waste Management association Meeting, Nashville, USA, 1996.
- [4] 郭欣, 郑楚光, 吕乃霞. 簇模型 $\text{CaO}(001)$ 面上吸附汞与氯化汞的密度泛函理论研究[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(13): 101-104. Guo Xin, Zheng Chuguang, Lü Naixia. A density functional theory study of the adsorption of Hg and HgCl_2 on A $\text{CaO}(001)$ surface[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(13): 101-104(in Chinese).
- [5] Butz J, Albiston J. Use of fly ash fractions from western coals for mercury removal from flue gas streams[C]. *Proceedings of the Air Quality II: Mercury, Trace elements, and Particulate Matter Conference*, McLean, USA, 2000.
- [6] Rubel A, Andrews R, Gonzalez R, et al. Adsorption of Hg and NO_x on coal by-products[J]. *Fuel*, 2005, 84(8): 911-966.
- [7] 朱珍锦, 薛来, 谈仪, 等. 负荷改变对煤粉锅炉燃烧产物中汞的分布特征影响的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2001, 21(7): 87-90. Zhu Zhenjin, Xue Lai, Tan Yi, et al. Studies on characteristics of mercury distribution in combustion products at various loads of A P. C. -fired utility boiler[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(7): 87-90(in Chinese).
- [8] Yan R, Liang D T, Tsen L, et al. Bench-scale experimental evaluation of carbon performance on mercury vapour adsorption [J]. *Fuel*, 2004, 83(17): 2401-2409.
- [9] Skodras G, Diamantopoulou I, Zabaniotou A, et al. Enhanced mercury adsorption in activated carbons from biomass materials and waste tires[J]. *Fuel Processing Technology*, 2007, 88(8): 749-758.
- [10] Li Y L, Lee C W, Gullett B K. Importance of activated carbon's oxygen surface functional groups on elemental mercury adsorption [J]. *Fuel*, 2003, 82(4): 451-457.
- [11] Gregg S J, Sing K S W. Adsorption, surface area and porosity [M]. London: Academic Press, 1982.
- [12] Debore J H. The structure and properties of porous materials [M]. London: Butterworth, 1958.
- [13] Jarzebski A B, Lorenc J, Aristov Y I. Porous texture characteristics of a homologous series of base-catalyzed silica aerogels [J]. *J Non-Cryst Solids*, 1995, 190(3): 198-205.
- [14] Cerofolini G F, Meda L. A theory of multilayer adsorption on rough surfaces in terms of clustering and melting BET piles[J]. *Surface Science*, 1998, 416(3): 403-422.
- [15] Hassett D J, Eylands K E. Mercury capture on coal combustion fly ash [J]. *Fuel*, 1999, 78(2): 243-248.
- [16] Dunham G E, DeWall R A, Senior C L. Fixed-bed studies of the interactions between mercury and coal combustion fly ash[J]. *Fuel Processing Technology*, 2003, 82(2): 197-213.
- [17] Chen L, Duan Y F, Zhuo Y Q, et al. Mercury transformation across particulate control devices in six power plants of china: The co-effect of chlorine and ash composition [J]. *Fuel*, 2007, 86(4): 603-610.
- [18] Chen L, Zhuo Y Q, Zhao X L, et al. Thermodynamic comprehension of the effect of basic ash compositions on gaseous mercury transformation[J]. *Energy & Fuels*, 2007, 21(2): 501-505.
- [19] 高洪亮, 周劲松, 骆仲泱, 等. SO_2 对模拟燃煤烟气中汞形态分布影响的实验研究[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(2): 204-208. Gao Hongliang, Zhou Jinsong, Luo Zhongyang, et al. Effect of sulfur dioxide on the speciation of mercury in flue gases[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(2): 204-208 (in Chinese).
- [20] Pavlish J H, Sondreal E A, Mann M D, et al. Status review of mercury control options for coal-fired power plants[J]. *Fuel Process Technol*, 2003, 82(2): 89-165.
- [21] 刘迎晖, 徐杰英, 郑楚光, 等. 燃煤烟气中汞形态分布及热力学模型预报[J]. *华中科技大学学报*, 2001, 29(8): 90-92. Liu Yinghui, Xu Jieying, Zheng Chuguang, et al. Mercury speciation in coal-fired flue gases and its thermal dynamics model prediction [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2001, 29(8): 90-92 (in Chinese).

收稿日期: 2007-09-18。

作者简介:

吴成军(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向是燃煤大气污染控制, ship19841218@163.com;

段钰锋(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向是洁净煤发电和大气污染控制。

(责任编辑 王庆霞)