

煤炭加工与环保

## 不同电场飞灰对汞的吸附特性及富集规律研究

顾永正<sup>1</sup> 张永生<sup>1</sup> 张振森<sup>1</sup> 徐 鸿<sup>1</sup> 潘伟平<sup>1,2</sup>

(1. 华北电力大学 能源环境科学与工程研究所 北京 102206; 2. 西肯塔基大学 燃烧科学与环境技术研究所 美国 肯塔基 42101)

**摘 要:** 为了实现廉价飞灰基汞吸附剂的开发,分析了某燃煤电厂静电除尘器不同电场飞灰汞含量,并在固定床上开展了汞吸附性能评价试验。结果表明:不同电场飞灰对汞富集能力先增加再减小,富集过程更可能是以氧化态汞的形式富集在飞灰表面。电场1的飞灰中未燃尽碳含量高,与汞的接触机会多,表现出较强的汞吸附能力;其他电场飞灰汞吸附性能和物化特性未呈线性关系,吸附过程受多个因素影响。Lagergren 准一级动力学模型更适合预测电场飞灰汞吸附过程,颗粒外气膜扩散影响较大。另外,通过平衡吸附量占有率考察飞灰在烟道中对汞的富集及其进一步脱汞的潜力,得到电场1的飞灰最适合作为吸附剂脱除烟气中的汞。

**关键词:** 燃煤飞灰; 电场; 汞富集; 吸附能力

中图分类号: TQ534.9

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2016)03-0163-06

## Study on mercury adsorption features and enrichment law of fly ash with different electric fields

Gu Yongzheng<sup>1</sup>, Zhang Yongsheng<sup>1</sup>, Zhang Zhensen<sup>1</sup>, Xu Hong<sup>1</sup>, Pan Weiping<sup>1,2</sup>

(1. Research Institute of Energy Environment Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Institute of Combustion Science and Environmental Technology, Western Kentucky University Kentucky 42101, USA)

**Abstract:** In order to realize the development of a low cost fly ash based mercury adsorbent, the paper analyzed the mercury contents of the fly ash with different electric fields in an electrostatic precipitator of a coal-fired power plant and an evaluation experiment of the mercury adsorption performances was conducted on the fixed bed. The results showed that the mercury enrichment capacity of the fly ash with different electric fields would be firstly increased and then reduced and during the enrichment process, the mercury would possibly be enriched on the surface of the fly ash with an oxidation state mercury mode. The content of the not combusted carbon in the fly ash of No.1 electric field was high and the fly ash would have many contact chances with mercury and would show a high adsorption capacity of mercury. The mercury adsorption performances and physicochemical features of the fly ash in other electric fields would not be in a linear relationship and the adsorption process would be affected by several factors. Lagergren pseudo-first order dynamics model would be more suitable to predict the mercury adsorption process of the fly ash in the electric field and the external gas film diffuse influence of the fly ash particles were high. In addition, an occupied rate of the balanced adsorption volume was applied to investigate the mercury enrichment and the further mercury removal potential of the fly ash in the flue. And the fly ash obtained in No.1 electric field would be the most suitable to be adsorbent to remove mercury from flue gas.

**Key words:** coal-fired fly ash; electric field; mercury enrichment; adsorption capacity

收稿日期: 2015-08-12; 责任编辑: 赵 瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.03.031

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA065404); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(13ZD04); 高等学校学科创新引智计划资助项目(B12034)

作者简介: 顾永正(1991—),男,江苏盐城人,博士研究生。Tel: 18810537121 E-mail: gu Yongzheng321@126.com

引用格式: 顾永正,张永生,张振森,等.不同电场飞灰对汞的吸附特性及富集规律研究[J].煤炭科学技术,2016,44(3):163-168.

Gu Yongzheng, Zhang Yongsheng, Zhang Zhensen et al. Study on mercury adsorption features and enrichment law of fly ash with different electric fields[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 163-168.

## 0 引言

2011年7月新发布的GB 13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》<sup>[1]</sup>,增设了大气汞污染物排放限值,规定汞及其化合物含量不超过 $30\text{ }\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 。当前燃煤电厂现有的污染物控制设备(APCDs)对汞的协同控制在某些条件下不能满足要求,为此需要在烟风系统中增设专门的汞污染控制系统。现阶段国外采用的脱汞技术主要是利用吸附剂喷射脱汞,其中活性炭喷射法(ACI)是目前最为集中且最为成熟的一种方法<sup>[2]</sup>,但是昂贵的成本和飞灰的后续利用限制了此技术的发展。燃煤飞灰对汞具有优良的捕获效应<sup>[3-5]</sup>,可利用电厂本身的飞灰作为吸附剂脱除汞污染,其主要优点是价格低廉并且对飞灰后续使用没有影响。

飞灰属于多孔材料,主要物相为无定形相,原子排列不规则、无序,孔隙结构丰富,具有一定活性。飞灰对汞的吸附主要是在表面活性点位上进行的<sup>[6]</sup>,未燃尽碳的组成、反应活性、比表面积决定了飞灰作为汞吸附剂的脱汞效率<sup>[7-8]</sup>。除此之外,飞灰对汞的吸附过程中起促进作用的还包括具有催化氧化作用的金属氧化物,如 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CuO}$ 和 $\text{MnO}_2$ 等<sup>[9]</sup>。不同煤种燃烧所产生的飞灰中未燃尽碳物化特性也存在很大差异,Goodarzi等<sup>[10]</sup>指出褐煤和烟煤燃烧得到的未燃尽碳具有较大的比表面积和较强的活性。即使在同一个燃煤电厂,煤燃烧过程不同导致飞灰形成的机制存在差异,不同粒径的飞灰具有不同的孔隙结构和未燃尽碳含量等,也会表现出不同的汞吸附性能<sup>[6,11]</sup>。我国燃煤电厂主要采用ESP和FF除尘设备,其中ESP市场占有率大,一般有4~5个电场,不同电场飞灰的粒径存在差异,而针对ESP不同电场飞灰的汞吸附性能的文献鲜有报道。

基于上述背景,笔者针对某1000 MW机组容量的燃煤电厂,研究不同电场飞灰的汞吸附性能及其在烟道中对汞的富集能力,考察飞灰物理化学特性对汞吸附性能的影响,从动力学角度讨论了飞灰与汞的作用机制,旨在确定适合作为改性飞灰原料的电场飞灰,为飞灰吸附剂喷射脱汞工艺提供技术指导。

## 1 试验方法

### 1.1 飞灰样品的采集

对某1000 MW机组容量燃煤电厂的静电除尘

器(ESP)5个电场飞灰进行研究。ESP各电场飞灰样品在用于气力输送的仓泵中取出,取样过程中停止压缩空气充压工作,不同电场的取样工作需要保证同时性。试验所用燃煤电厂煤样的元素分析、工业分析和汞含量见表1。

表1 煤样元素分析、工业分析和汞含量  
Table 1 Ultimate proximate analysis and mercury content of coal sample

工业分析/%					元素分析/%				汞含量/
$FC_{ar}$	$V_{daf}$	$A_{ar}$	$M_{ar}$	$C_d$	$w(H)_d$	$w(O)_d$	$w(N)_d$	$w(S)_d$	( $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )
45.8	35.74	17.68	11.05	59.75	4.24	14.62	0.97	0.54	108.3

### 1.2 吸附评价装置

通过小型固定床考察飞灰的吸附特性,试验系统如图1所示,主要由汞源发生器、固定床反应器、恒温炉和基于原子荧光法的PSA汞在线监测仪CEMs组成。固定床反应器内径为50 mm,材质为聚四氟乙烯,称取2 g飞灰样品平铺在滤膜上,在其上方覆盖15 g大粒径石英砂。

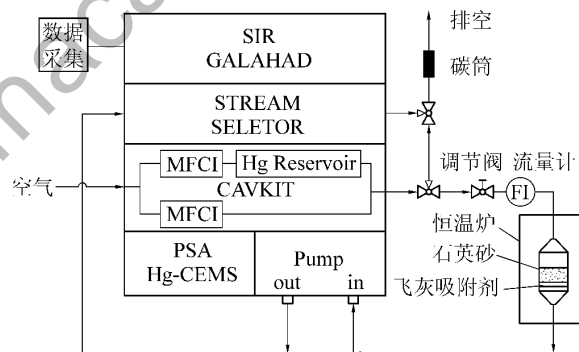


图1 固定床动态吸附试验系统

Fig. 1 Fixed-bed dynamic adsorption test system

针对不同电场飞灰汞吸附性能的研究试验工况为:吸附温度 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,入口气体流量 $6\text{ L}/\text{min}$ ,入口汞浓度 $10\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。试验开始前将上述飞灰换成相同数量的石英砂,进行系统平衡测试,以出口检测到的汞浓度作为本次试验的入口汞浓度,入口汞浓度为 $10\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,出口可检测到的汞浓度为 $9.6\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

### 1.3 试验数据处理

在固定床动态吸附过程中,某时刻 $t$ 飞灰吸附剂对汞的吸附速率 $dq_t/dt$ 和吸附量 $q_t$ 可通过穿透曲线来估算,这2个物理量为整个床层的平均值。

$$\frac{dq_t}{dt} = \frac{C_{in} - C_{out}}{m} Q \quad (1)$$

$$q_t = \int_0^t \frac{C_{in} - C_{out}}{m} Q dt \quad (2)$$

式中:  $C_{in}$  和  $C_{out}$  分别为固定床反应器入口和出口的汞浓度;  $m$  为飞灰吸附剂的装填量;  $Q$  为气体入口流量。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 飞灰汞富集因子分析

利用 Lumex RA-915+ 对煤样和灰样中汞的浓度进行测量, 其中煤样中汞的浓度为 108.3 ng/g。飞灰在烟道中本身对汞具有一定的吸附和富集能力, 笔者利用富集因子  $I_{Hg}$  评价 ESP 收集的飞灰在烟风系统中对气态汞的捕获能力<sup>[12-13]</sup>。

$$I_{Hg} = \frac{C_{if}}{C_{ic}} = \frac{A_{ad}}{100} \quad (3)$$

式中:  $C_{if}$  和  $C_{ic}$  分别为飞灰和煤样中汞的浓度;  $A_{ad}$  为煤样中空气干燥基灰分。

通过式 (3) 计算得到 5 个电场飞灰中汞的富集因子, 如图 2 所示, 各个电场飞灰中汞的富集因子都大于 1, 这表明汞在飞灰中有富集趋势。电场 1 到电场 4 飞灰中汞的富集因子逐渐增加, 电场 4 飞灰中汞的富集因子可达到 4.57, 电场 5 汞富集因子出现下降, 与电场 3 基本一致。煤中的汞在锅炉高温环境下释放为气态元素汞, 在烟气携带流动作用下与飞灰接触并在其表面发生一定程度的吸附。汞表面张力很高, 与飞灰或碳基吸附剂的接触角很大, 很难在吸附剂表面发生毛细凝聚; 与此同时一般吸附剂都属于极性材料, 而汞是典型的非极性单原子气体, 根据相似相溶原理可知飞灰对汞的范德华力较小, 即使吸附剂表面孔隙结构丰富, 汞原子也很难以物理吸附态的形式固定在颗粒孔内。由此认为汞在电场飞灰中发生富集有 2 种: ①随着烟气温度的降低, 氧化态汞的状态由气态变为固态, 再以氧化态汞的形式吸附在飞灰颗粒的表面; ②飞灰表面存在一定量活性点位, 在相互作用过程中促进  $Hg^0$  在其表面发生氧化吸附。下面结合未燃尽碳含量、粒径以及比表面积等可能的影响因素分析不同电场飞灰中汞富集因子的变化规律。

基于马尔文激光粒度仪 Mastersizer 2000, 对 5 个电场飞灰粒径进行测量, 如图 3 所示, 电场 1 的飞灰粒径 0.2~289.1  $\mu m$ , 电场 2 的飞灰粒径 0.2~182.4  $\mu m$ , 电场 3 的飞灰粒径 0.2~10.5  $\mu m$ , 电场 4 的飞灰粒径 0.2~6.6  $\mu m$ , 电场 5 的飞灰粒径 0.2~

3.8  $\mu m$ 。结合图 2 各个电场飞灰的体积平均粒径呈递减趋势, 符合大颗粒易在 ESP 前面的电场沉降的一般规律。从图 2 还可知, 前 2 个电场飞灰的比表面积小于后 3 个电场, 这说明粒径越小, 越可能具有更大的比表面积, 对于电场 2—电场 4, 飞灰对汞的富集因子和比表面积存在正相关性。电场 5 飞灰具有最大的比表面积以及最长的停留时间, 可是并没有表现出最好的汞吸附量。吸附过程中, 吸附质与吸附剂之间发生物理吸附的速率很快, 汞原子在飞灰表面微孔内的吸附以及介孔中的毛细凝聚速率也很快, 飞灰的物理特性很大程度上决定其物理吸附能力, 而电场 5 飞灰未符合此规律, 因此研究结果表明: 不同电场飞灰颗粒粒径、比表面积与汞富集能力的相关性不大, 可能飞灰在烟道中对汞富集过程还与未燃尽碳含量、岩相组分以及表面活性组分等密切相关<sup>[14-15]</sup>。

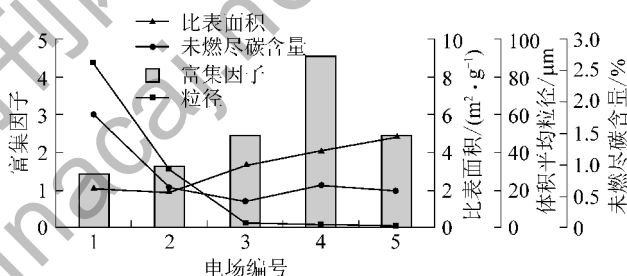


图 2 ESP 不同电场飞灰中汞的富集因子和物性参数

Fig. 2 Mercury enrichment factor and physical parameters of fly ash under different electric fields in the ESP

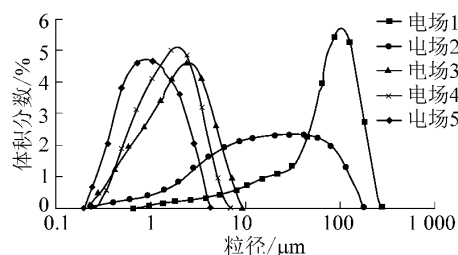


图 3 ESP 不同电场飞灰粒径分布

Fig. 3 Size distributions of fly ash under different electric fields in the ESP

针对飞灰对汞的富集和未燃尽碳含量不同关系的研究, 大部分研究者认为汞主要富集在电场 1 中, 王立刚等<sup>[16]</sup>研究表明在烟风系统中, 飞灰对汞的富集和未燃尽碳含量具有正相关性。然而杨立国等<sup>[17]</sup>的研究也发现某些煤粉炉燃煤电厂电场 1 的飞灰未燃尽碳含量高, 却表现出较弱的汞富集能力, 认为这可能是由于电场 1 的飞灰中未燃尽碳反应活性低造成的。这与本文得到的现象相符合, 可能是

因为烟气中的汞形成过程很复杂,存在不同的形态,对于未燃尽碳表面的活性基团,只与某些形态的汞具有很好的亲和力,这有待深入研究。

对于此试验现象,分别从烟道中飞灰与汞的作用过程和飞灰表面活性点位2个方面进行分析:

①该电厂ESP为5级静电除尘器,流速一般为1 m/s左右,停留时间约20 s,总体上电场飞灰中汞的富集因子和停留时间具有一定正相关性,在此猜测停留时间可能是一个重要因素,需通过汞吸附性能评价试验进行验证;②飞灰对汞的富集主要集中在表面活性点位,未燃尽碳表面含氧、含氮等官能团和一些无机金属氧化物对烟气中的元素汞起到催化氧化作用<sup>[18]</sup>,与此同时不同的活性点位可以捕获烟气中不同的氧化态汞,电场飞灰对汞富集能力的不同可能是由于表面活性点位活性和数量的差异造成的。

## 2.2 不同电场飞灰汞吸附性能试验分析

通过固定床试验评价不同电场飞灰汞吸附性能,得到飞灰对 $\text{Hg}^0$ 的吸附量随时间变化的曲线如图4所示,由图4可知,电场1飞灰的吸附性能远优于其他4个电场,在150 min时仍未达到平衡,其原因可能是电场1飞灰具有更多的空活性点位。电场2和电场4的飞灰样品对汞的吸附性能非常接近,在100 min时吸附已经趋于平衡。电场3飞灰在前100 min的吸附量低于电场2和电场4的样品,但是随着时间的推移,其达到吸附饱和的时间较长,具有更高的平衡吸附量。电场5飞灰在整个试验过程中对 $\text{Hg}^0$ 基本不吸附,而汞的富集因子为2.43,认为细颗粒表面的活性点位在烟道和ESP中可能已经被汞、 $\text{SO}_2$ 和 $\text{SO}_3$ 等物质占据,取出的电场5飞灰表面空活性位数量相对较少。

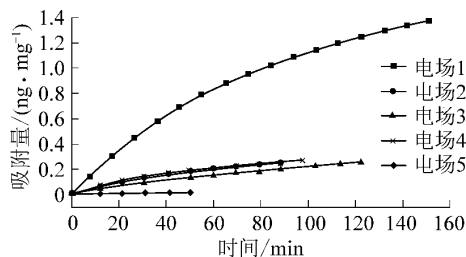


图4 不同电场飞灰对汞的吸附量随时间变化趋势

Fig. 4 Change tendency of mercury adsorption capacity of fly ash under different electric fields with time

比较粒径、未燃尽碳含量、比表面积等因素与飞灰平衡吸附量之间的关系,电场1和电场2飞灰粒径较大且比表面积较小,表现出较为优越的吸附性

能,飞灰对汞的吸附和比表面积未表现出正相关性,这可能是由于存在其他影响因素主导飞灰对汞的吸附。杨祥花等<sup>[19]</sup>研究也发现飞灰对汞的吸附与飞灰表面其他元素的物化特性有关系。对于5种飞灰试样而言,未燃尽碳含量可能是影响汞吸附的重要因素,电场1飞灰未燃尽碳含量为1.8 m<sup>3</sup>/g,约为其他4个电场飞灰样品的3倍,其对汞的吸附性能也最为优越,这说明未燃尽碳颗粒数量的增加可提高气相中汞原子与飞灰表面具有氧化性能的活性点位之间的接触机会,进而表现出最强的汞吸附性能。但是电场2—电场5飞灰中未燃尽碳含量相当,吸附性能上却存在差异,这说明未燃尽碳含量不是唯一的影响因素,在整个吸附过程中可能是由多个因素共同作用的,如飞灰表面的物理特性和化学活性等。Dunham等<sup>[11]</sup>研究了16种不同飞灰对汞的吸附,发现飞灰对汞的氧化吸附既与比表面积有关,还与比表面积的利用率有关。同时,还有学者得到不同的结论,Zhao等<sup>[6]</sup>在相同工况下对飞灰汞脱除性能进行研究,发现粗颗粒飞灰脱汞性能明显优于细颗粒,这可能是由于粗颗粒飞灰中未燃尽碳含量更高引起的,这与本文得到的结论较为一致。

由前述研究可知,电场4飞灰中汞富集因子虽然最大,但是其对汞的吸附能力却很有限,为此定义在固定床吸附试验工况下得到的平衡吸附量和飞灰本身汞的富集量之和为飞灰对汞的饱和吸附量,平衡吸附量占有率为平衡吸附量与饱和吸附量的比例,用于评价各个电场飞灰的实际吸附能力和进一步吸附烟气中汞的潜力。

不同电场飞灰对汞的饱和吸附量及平衡吸附量占有率的关系如图5所示,对于4个电场飞灰表现出不同的汞吸附能力,电场1飞灰平衡吸附量最大,可达到1.88 ng/mg,是其他4个电场飞灰平衡吸附量的4倍以上。由图5可知,除了电场1飞灰平衡吸附量占有率可达到69.35%,其他4个电场飞灰平衡吸附量占饱和吸附量的比例都不超过25%,这说明电场2—电场5的飞灰在烟风系统对汞的吸附已趋于饱和,与汞原子亲近的活性点位可能已经被烟气中的气态汞或其他气体占据。对比饱和吸附量可发现电场1飞灰与电场4飞灰很接近,优于其他3个电场的飞灰,这说明该电厂不同电场飞灰表面的活性组分的活性和含量不相同,并且活性点位数量有限。

比较烟道和固定床中飞灰与汞的作用过程,相

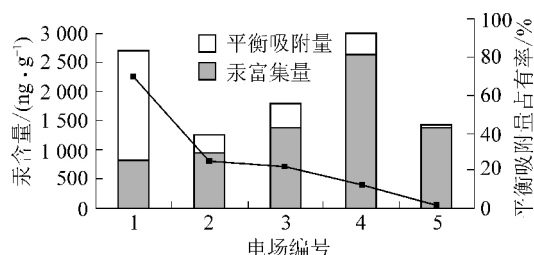


图 5 不同电场飞灰对汞的饱和吸附量及平衡吸附量占有率

Fig. 5 Mercury saturated adsorption and share of equilibrium adsorption capacity of fly ashes under different electric fields

对来说烟气中汞/灰比是大于固定床试验条件下的, 而固定床试验过程可发现各个电场飞灰达到平衡吸附量需很长时间, 远大于烟气在 ESP 中的停留时间, 因此电场飞灰中的汞很有可能是在进入 ESP 前已被不同粒径的飞灰或者未燃尽碳捕获。第 2.1 节提到的停留时间对飞灰中汞的富集影响不大, 烟道中气固之间的接触时间很短 (<1 min), 只有极少部分的元素汞被飞灰氧化吸附, 富集在电场飞灰中的汞可能是在烟风系统高温阶段发生了均相反应而形成的氧化态汞, 降温过程中状态发生了改变并被飞灰所吸附, 未燃尽碳对不同形态的汞可能具有不同的吸附能力。与此同时, 如果飞灰在烟道或者 ESP 中对汞的富集量较大, 那么剩余的空活性位将减少, 可能表现出较弱的吸附性能。无论是烟道中汞的富集还是试验中对汞的吸附, 都存在多种影响因素, 具体包括: 未燃尽碳含量、未燃尽碳的活性、孔隙结构以及活性点位数量等。

电场 1 飞灰表现出最优越的吸附性能, 适合作为飞灰吸附剂喷射脱汞工艺现场改性飞灰的原料。为了更清楚地认识飞灰与汞的作用过程, 以下将通过吸附动力学知识对二者作用机制进行描述。

### 2.3 吸附动力学分析

固定床吸附性能评价试验表明, 电场 5 飞灰在试验过程中对汞基本不吸附, 因此本部分只针对前 4 个电场的飞灰进行研究。目前常用于描述汞吸附的动力学模型为 Lagergren 准一级和准二级吸附动力学模型, 经过线性化处理可得 Lagergren 准一级动力学方程线性表达式如下, 主要是用于描述吸附速率受外扩散步骤控制。

$$\lg(q_e - q_t) = \lg q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (4)$$

其中  $k_1$  为 Lagergren 准一级吸附速率常数。

Lagergren 准二级动力学方程线性表达式如下, 主要是用于描述吸附速率受化学吸附机理的控制。

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (5)$$

其中:  $k_2$  为准二级吸附速率常数;  $q_e$  为平衡吸附量;  $k_2 q_e^2$  为初始吸附速率。

基于固定床试验数据, 进行线性回归, 得到线性化拟合后的动力学模型如图 6 所示, 总体来说 Lagergren 准一级动力学模型对几个电场飞灰汞吸附过程具有很好的预测效果, 表明飞灰对汞的吸附过程受颗粒外气膜扩散影响较大。根据拟合直线得到动力学参数, 见表 2, 由表 2 可知, 各个电场飞灰样品的吸附数据用 2 种动力学方程线性拟合都具有较好的相关性, 其中准一级动力学方程计算得到的平衡吸附量与试验得到的平衡吸附量更加接近。

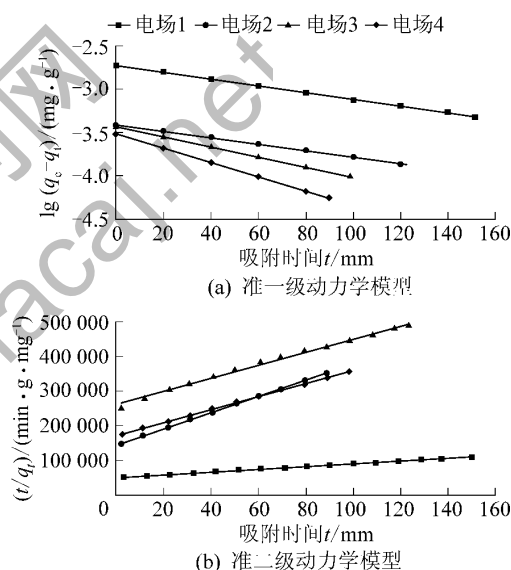


图 6 吸附动力学模型

Fig. 6 Adsorption kinetic models

表 2 不同电场飞灰汞吸附动力学拟合结果

Table 2 Fitting results of mercury adsorption kinetics of fly ash under different electric fields

电 场 号	Lagergren 准一级 动力学模型参数				Lagergren 准二级 动力学模型参数		
	$k_1$	$q_e$	$R^2$		$k_2$	$q_e$	$R^2$
1	1.88	0.852	1.794	0.997 6	3.710	2.397	0.999 8
2	0.31	1.888	0.303	0.999 3	38.858	0.425	0.999 3
3	0.39	0.852	0.384	0.999 6	13.754	0.530	0.992 0
4	0.38	1.359	0.370	0.999 6	20.172	0.537	0.999 2

注:  $q_e$ 、 $k_1$ 、 $k_2$  的单位分别为  $\text{ng}/\text{mg}$ 、 $10^{-2} \text{min}^{-1}$ 、 $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$ ;  $R^2$  为相关系数。

文献 [20] 曾指出吸附更符合准二级吸附动力学方程时, 化学吸附在整个吸附过程中占主导作用。

本文中不同电场的飞灰对  $\text{Hg}^0$  的吸附用准二级吸附动力学方程拟合也具有较高的拟合度,因此5个电场的飞灰样品对  $\text{Hg}^0$  的吸附机理属于物理吸附和化学吸附共同作用的过程。

### 3 结 论

1) 前4个电场飞灰中汞的富集因子逐渐增加,电场5出现下降,汞富集能力和飞灰物化特性未呈线性关系,可能是由飞灰表面活性点位的数量和活性的差异造成。

2) 电场1飞灰中含有最多的未燃尽碳,同时表现出最强的汞吸附性能,这说明固定床吸附过程中残碳颗粒数量的增加,可增加汞在飞灰表面活性点位上的接触机会;其他几个电场飞灰表现出来的吸附性能和物化特性之间未呈线性关系,说明在整个吸附过程可能是由多个因素共同作用的。

3) 电场1飞灰平衡吸附量占有率可达69.35%,其他4个电场占有率都不超过25%,说明电场1飞灰进一步吸附烟气中  $\text{Hg}^0$  的潜力最大。

4) 吸附动力学模型线性回归结果说明,各个电场飞灰吸附汞的过程由物理吸附和化学吸附共同作用,整个过程中颗粒外气膜扩散存在一定影响。

#### 参考文献(References):

- [1] GB 13223—2011, 火电厂大气污染物排放标准[S].
- [2] Sjöström S, Durham M, Bustard C J *et al.* Activated carbon injection for mercury control: overview[J]. *Fuel* 2010, 89(6): 1320–1322.
- [3] Zhang Y S, Duan W, Liu Z *et al.* Effects of modified fly ash on mercury adsorption ability in an entrained-flow reactor[J]. *Fuel*, 2014, 128: 274–280.
- [4] 赵毅, 薛方明, 董丽彦, 等. 燃煤锅炉烟气脱汞技术研究进展[J]. *热力发电*, 2013, 42(1): 9–14.  
Zhao Yi, Xue Fangming, Dong Liyan *et al.* Flue gas mercury removal technology for coal-fired boiler[J]. *Thermal Power Generation*, 2013, 42(1): 9–14.
- [5] Blissett R S, Rowson N A. A review of the multi-component utilisation of coal fly ash[J]. *Fuel* 2012, 97(10): 1–23.
- [6] Zhao Y C, Zhang J Y, Liu J *et al.* Study on mechanism of mercury oxidation by fly ash from coal combustion[J]. *Chinese Science Bulletin* 2010, 55(2): 163–167.
- [7] López-Antón M A, Abad-Valle P, Díaz-Somoano M *et al.* The influence of carbon particle type in fly ashes on mercury adsorption[J]. *Fuel* 2009, 88: 1194–1200.
- [8] Hower J C, Senior C L, Suuberg E M *et al.* Mercury capture by native fly ash carbons in coal-fired power plants[J]. *Progress in Energy and Combustion Science* 2010, 36(4): 510–529.
- [9] Yamaguchi A, Akiho H, Ito S. Mercury oxidation by copper oxides in combustion flue gases[J]. *Powder Technology*, 2008, 180(1/2): 222–226.
- [10] Goodarzi F, Hower J C. Classification of carbon in Canadian fly ashes and their implications in the capture of mercury[J]. *Fuel*, 2008, 87(10/11): 1949–1957.
- [11] 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.
- [12] 杨立国, 段钰峰, 王运军. 锅炉容量对汞富集规律的影响[J]. *动力工程学报* 2008, 28(2): 302–307.  
Yang Liguó, Duan Yufeng, Wang Yunjun. Influence of boiler capacities on enrichment law of mercury[J]. *Journal of Power Engineering* 2008, 28(2): 302–307.
- [13] 韩军, 徐明厚, 程俊峰, 等. 燃煤锅炉中痕量元素排放因子的研究[J]. *工程热物理学报* 2002, 23(6): 770–772.  
Han Jun, Xu Minghou, Cheng Junfeng *et al.* Study of trace element emission factor in coal-fired boilers[J]. *Journal of Engineering Thermophysics* 2002, 23(6): 770–772.
- [14] 郑楚光, 张军营, 赵永椿, 等. 煤燃烧汞的排放及控制[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [15] Zhao Y C, Zhang J Y, Liu J *et al.* Experimental study on fly ash capture mercury in flue gas[J]. *Science China Technological Sciences* 2010, 53(4): 976–983.
- [16] 王立刚, 彭苏萍, 陈昌和. 燃煤飞灰对锅炉烟道气中  $\text{HgO}$  的吸附特性[J]. *环境科学* 2003, 24(6): 59–62.  
Wang Ligang, Peng Suping, Cheng Changhe. The experimental study to  $\text{HgO}$  adsorption of fly ash in flue gas[J]. *Environmental Science* 2003, 24(6): 59–62.
- [17] 杨立国, 段钰峰, 范晓旭. 汞在燃煤固态产物中的富集规律及其影响因素[J]. *燃烧科学与技术* 2010, 16(6): 485–490.  
Yang Liguó, Duan Yufeng, Fan Xiaoxu. Enrichment characteristics of mercury in solid products of coal-fired power plants and influencing factors[J]. *Journal of Combustion Science and Technology* 2010, 16(6): 485–490.
- [18] Maroto-Valer M M, Zhang Y Z, Granite E J *et al.* Effect of porous structure and surface functionality on the mercury capacity of a fly ash carbon and its activated sample[J]. *Fuel* 2005, 84(1): 105–108.
- [19] 杨祥花, 段钰峰, 江贻满, 等. 燃煤锅炉烟气和飞灰中汞形态分布研究[J]. *煤炭科学技术* 2007, 35(12): 55–58.  
Yang Xianghua, Duan Yufeng, Jiang Yiman *et al.* Research on mercury form distribution in flue gas and fly ash of coal-fired boiler[J]. *Coal Science and Technology* 2007, 35(12): 55–58.
- [20] Skodras G, Diamantopoulou I, Pantoleonos G *et al.* Kinetic studies of elemental mercury adsorption in activated carbon fixed bed reactor[J]. *Journal of Hazardous Materials* 2008, 158(1): 1–13.