

改性活性炭吸附气态汞的试验研究

罗锦英¹, 罗津晶¹, 黄华伟¹, 陈进生²

(1. 近海海洋环境科学国家重点实验室(厦门大学), 福建省 厦门市 361005;

2. 中国科学院城市环境研究所, 福建省 厦门市 361003)

Experimental Study on Modified Activated Carbons for Elemental Mercury Adsorption

LUO Jin-ying¹, LUO Jin-jing¹, HUANG Hua-wei¹, CHEN Jin-sheng²

(1. State Key Laboratory of Marine Environmental Science (Xiamen University), Xiamen 361005, Fujian Province, China;

2. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361003, Fujian Province, China)

ABSTRACT: A laboratory-scale packed-bed reactor system was used to evaluate the capability of mesoporous molecular sieve(SBA-15), coal-based activated carbon(BPL), activated carbons containing different content of moisture, phenol-modified and carboxyl-modified activated carbons for mercury adsorption. The results show that compared to the mesopore structure, micropore structure on the surface of activated carbons is in favor of capturing mercury from carrier gas. The mercury adsorption capacity of carboxyl-modified activated carbons increases significantly compared to that of original carbons. And the best result obtained at the modification ratio of 28.89 mg carboxyl groups /g activated carbon. While the capacity of phenol-modified activated carbons for mercury adsorption decreases remarkably. When reaches saturation, the mercury adsorption capacity of original activated carbons is 306.55 $\mu\text{g/g}$, while the highest capacity of phenol-loaded activated carbons is 133.1 $\mu\text{g/g}$, and there is a positive relation between the amounts of phenol or carboxyl and mercury adsorption. It suggests that the phenol groups may have no effect on mercury adsorption, while the carboxyl groups are beneficial to the mercury adsorption. The presence of moisture on the surface of activated carbons can enhance their mercury adsorption capacities, and when the moisture content is 14.49%, the adsorption capacity reaches the best result.

KEY WORDS: elemental mercury; activated carbon; phenol group; carboxyl group; adsorption

摘要: 在小型固定床实验台上对中孔分子筛(SBA-15)、煤

基活性炭(BPL)、不同含水量活性炭、苯酚和苯甲酸改性活性炭进行气态汞的吸附实验。结果表明:相对于中孔而言,微孔更有利于气态汞的吸附。负载羧基样品对气态汞的吸附能力与原始活性炭相比有很大提高。当羧基负载量为28.89 mg 羧基/g 活性炭时,样品对气态汞的吸附性能达到最佳;经酚羟基改性样品,其对气态汞的吸附能力显著降低,当达到吸附饱和时,原始活性炭的吸附量为306.55 $\mu\text{g/g}$,而酚羟基改性样品最大吸附容量为133.1 $\mu\text{g/g}$,且负载量与气态汞吸附量呈负相关,由此推测酚羟基对气态汞的吸附没有促进作用,而羧基有利于气态汞的吸附。活性炭表面存在适量水分有利于气态汞的吸附,当样品表面含水率为14.49%时,样品的吸附性能达到最佳。

关键词: 气态汞; 活性炭; 酚羟基; 羧基; 吸附

0 引言

大气环境中汞的来源有天然排放(例如火山活动、矿藏释放等)和人为活动2大类,其中以人为排放为主。在人为活动中,燃煤排放的汞占很大比例^[1]。王起超等提出我国煤平均汞含量为0.22 mg/kg^[2],黄文辉等提出全国多数煤平均汞含量为0.15 mg/kg^[3]。尽管煤中汞含量不高,但由于煤的产量大、消耗量大,因此燃煤排放到大气中的汞含量不容忽视。另外排放到大气中的汞,会通过干、湿沉降污染水体,经过生物甲基化反应后,转化为剧毒的甲基汞,在鱼类和其他生物体内富集,最终通过食物链进入人体,对人类造成极大危害。因此,目前燃煤汞排放污染问题受到越来越多的重视^[4-7]。

在燃煤烟气中,汞主要以单质汞(Hg^0)、二价汞(Hg^{2+})和颗粒态汞($\text{Hg}(\text{p})$)3种形式存在。单质汞易挥发,难溶于水,在大气中平均停留时间长达半年至2年^[8],是烟气汞中最难控制的一种形态。目前,

基金项目: 国家自然科学基金项目(20707018); 福建省科技重点项目(2008I0024); 福建省青年人才项目(2006F3118)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (20707018).

对于气态汞的治理研究中,活性炭吸附法是较为成熟且效果较好的一种方法^[9]。

活性炭具有复杂的孔结构,表面含有多种官能团,这些物理化学性质对活性炭的吸附性能有很大的影响^[10-14]。Li 等通过空气氧化法(693 K)来改变样品表面含氧官能团的种类和含量,采用 Boehm 滴定法和程序升温脱附法(temperature programmed desorption, TPD)研究改性前后样品表面官能团的变化,发现经过空气氧化后,样品表面含有更多的酚羟基和具有较高的 $V(\text{CO})/V(\text{CO}_2)$ 。对改性前后样品进行气态汞吸附实验发现,活性炭表面酚羟基含量越少, $V(\text{CO})/V(\text{CO}_2)$ 越低,对气态汞吸附能力越强,由此推测酚羟基对气态汞的吸附起抑制作用^[11]。Skodras 等人通过高温热解和 CO_2 活化法制备富含微孔结构的活性炭,对其进行气态汞吸附实验,发现富含微孔结构的活性炭对气态汞具有较好的吸附性能^[14]。Tessmer 等^[15]及 Dandekar 等^[16]研究发现:在 250~600 °C 高温惰性氛围中对活性炭进行加热,可去除其表面含有的羧基和内酯基;在 500~1 000 °C 可去除活性炭表面含有的酚羟基和羰基。在 1 000 °C 高温惰性氛围中恒温一定时间,可去除活性炭表面所有酸性含氧官能团。

本文基于以上理论研究,采用高温热处理(1 000 °C)方法去除活性炭表面的酸性含氧官能团,通过化学浸渍法制备富含酚羟基和羧基的活性炭,考察常温下活性炭表面物理化学性质对气态汞吸附的影响。

1 实验部分

1.1 样品制备

1.1.1 高温热处理样品的制备

本实验所用活性炭是由 Calgon 公司提供的 BPL 样品。

将预处理后的样品置于石英管中,通 N_2 以 10 °C/min 的速率加热至 1 000 °C,并恒温 2 h。在 N_2 流中缓慢冷却至室温,于真空手套箱中保存。该样品记为 BPL-1000。

1.1.2 改性活性炭的制备

实验采用化学浸渍法制备富含酚羟基和羧基的活性炭样品。其改性步骤如下:称取一定量的 BPL-1000,将其浸泡于苯酚或苯甲酸溶液中,常温,150 r/min 下振荡 24 h,过滤后滤液和初始溶液的浓度采用 Genesys 10UV 紫外可见分光光度计测定。在 110 °C 下干燥至恒重,置于干燥器中备用。

1.1.3 不同含水量活性炭的制备

在活性炭原样表面均匀的喷洒适量水分,以制备不同含水率的活性炭样品。活性炭表面含水率以加湿前后样品的相对重量差来表示。本文将 BPL 的含水量假定为 0,其他样品的含水量均是指在 BPL 基础上增加的水分含量。

1.2 吸附装置

如图 1 所示,实验室所用固定吸附床反应装置主要由模拟气态汞发生器、吸附柱、汞测试装置,以及尾气处理单元等部分组成。本实验以汞渗透管作为汞蒸气发生源,置于 U 型管中。在 U 型管进口处放置若干尺寸均一的玻璃珠,以增加气体停留时间,便于汞蒸气的扩散。高纯氮作为汞蒸气的载气及平衡气体,二者的混合气构成实验模拟烟气。实验所需汞浓度由水浴温度和气体流量调节,本实验中气体流量设为 1 L/min。实验过程中初始汞浓度控制在 53~58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 范围。吸附柱由石英吸附管、活性炭样品、石英砂及滤膜组成,尾气处理单元由一个小型活性炭吸附柱组成。图中虚框部分均在通风橱中操作。

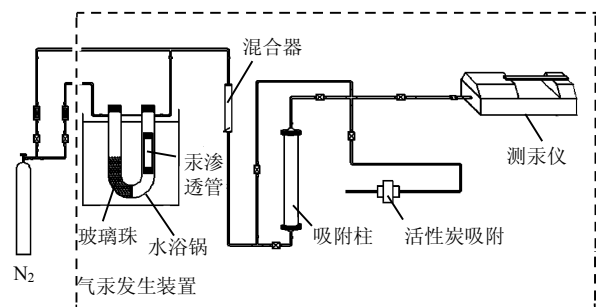


图 1 模拟烟气汞吸附实验台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the bench-scale packed-bed reactor system

1.3 实验方法

称取 10 mg 活性炭与约 2 g 的石英砂充分混合后置于吸附柱中,模拟烟气通过混合器混合均匀,在通过石英吸附柱前,先经过 JEROME431-X 测汞仪测定初始汞浓度 C_0 ,当汞浓度稳定后,关闭流向测汞仪的通路,将混合气转入吸附柱中进行吸附实验。

本实验以每克样品吸附的气态汞量作为活性炭吸附性能的一个评价指标。

某时刻 t 单位吸附量(μg 汞/g 吸附剂)的计算:从吸附开始到 t 时刻为止,吸附剂吸附汞的总量,可用式(1)表示:

$$\omega_{\text{Hg}(i+1)} = \frac{(C_0 - \frac{C_{i+1} + C_i}{2})(t_{i+1} - t_i)Q}{m} + \omega_{\text{Hg}i} \quad (1)$$

式中： $\omega_{Hg(i+1)}$ 为 t_{i+1} 时刻的汞吸附量， $\mu\text{g/g}$ ； ω_{Hgi} 为 t_i 时刻的汞吸附量， $\mu\text{g/g}$ ； C_0 为初始汞浓度(进吸附柱前)， mg/m^3 ； C_{i+1} 为 t_{i+1} 时刻吸附柱出口汞浓度， mg/m^3 ； C_i 为 t_i 时刻吸附柱出口汞浓度， mg/m^3 ； Q 为载气(N_2)流量， L/min ； m 为装载的活性炭质量， g 。

2 结果与讨论

2.1 改性样品

实验制备了不同含量的酚羟基和羧基样品，如表 1 所示。各样品的负载量以每克活性炭上负载的酚羟基或羧基含量表示， mg/g 。对于酚羟基样品，本实验制备了 13.91、34.26、65.38 mg/g 共 3 种负载量样品。对于羧基样品，有 2.50、8.16、14.18、28.89、38.65、67.31 mg/g 共 6 种样品。为了考察活性炭表面水分对气态汞吸附的影响，制备了含水率分别为 8.47%、14.49%、22.26%、52.51% 共 4 种样品，如表 2 所示。各样品的物理性质如表 3 所示。

表 1 每克活性炭上负载的酚羟基或羧基量
Tab. 1 Amounts of phenol or carboxyl groups on the activated carbons

试剂	每克样品吸附的苯酚或苯甲酸量/(mg/g)	每克样品负载酚羟基或羧基量/(mg/g)	样品名称
苯酚	76.94	13.91	酚 100:1
	189.44	34.26	酚 200:1
	361.50	65.38	酚 400:1
苯甲酸	6.78	2.50	羧基 10:1
	22.12	8.16	羧基 30:1
	38.44	14.18	羧基 50:1
	78.34	28.89	羧基 100:1
	104.79	38.65	羧基 200:1
	182.48	67.31	羧基 300:1

表 2 不同含水量的活性炭样品
Tab. 2 Different moisture on the activated carbons

含水率/%	8.47	14.49	22.26	52.51
命名	BPL-w1	BPL-w2	BPL-w3	BPL-w4

表 3 各样品的物理性质
Tab. 3 Physical properties of different samples

样品	BET 比表面积/(m^2/g)	微孔体积/(cm^3/g)	平均孔径/nm
BPL	870	0.417	0.68
BPL-1000	1 139	0.490	0.63
酚 100:1	705	0.307	0.74
酚 200:1	334	0.142	0.80
酚 400:1	239	0.110	0.88
羧基 10:1	950	0.405	0.69
羧基 100:1	600	0.250	0.74
SBA-15	711	0.781	5.29

2.2 孔径对气态汞吸附的影响

SBA-15 是一种具有与活性炭类似的二维六方结构中孔硅基分子筛，它不含对气态汞吸附有影响的酸性含氧官能团。本文选取 SBA-15 中孔分子筛与 BPL-1000 微孔活性炭作为研究对象，以考察孔径对气态汞吸附的影响。

气态汞的浓度为 54~57 $\mu\text{g/m}^3$ ，模拟烟气流量为 1 L/min ，各样品用量为 10 mg ，吸附温度为 27 $^\circ\text{C}$ ，得到的吸附动力学曲线如图 2 所示。

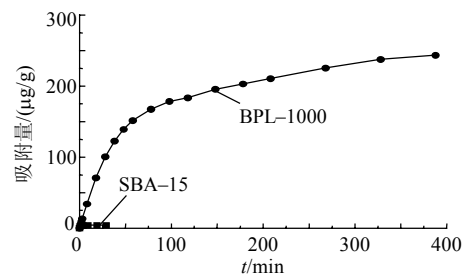


图 2 BPL-1000 和 SBA-15 分子筛的吸附动力学曲线
Fig. 2 Adsorption curves for BPL-1000 and SBA-15 samples

由图 2 可知，SBA-15 中孔分子筛的吸附量为 4.35 $\mu\text{g/g}$ ，而 BPL-1000 的吸附量为 243.5 $\mu\text{g/g}$ ，后者远大于前者。BPL-1000 样品经过 1000 $^\circ\text{C}$ 高温处理后，其表面酸性含氧官能团全部去除；而 SBA-15 是成分较单一的硅基分子筛，因此在吸附气态汞过程中，二者仅仅是物理吸附起作用。由表 3 可知，BPL-1000 和 SBA-15 这 2 种样品主要区别在于孔径，BPL-1000 属于微孔结构，而 SBA-15 是中孔结构。由实验结果可知，相对于中孔而言，微孔更有利于气态汞的吸附。

2.3 高温热处理对样品吸附气态汞的影响

气态汞的浓度为 54 $\mu\text{g/m}^3$ ，模拟烟气的流量为 1 L/min ，活性炭用量为 10 mg ，吸附温度为 27 $^\circ\text{C}$ ，得到的吸附动力学曲线如图 3、4 所示。

由图 3、4 可知，在吸附的最初 1 h 内，BPL-1000 的吸附量比 BPL 的吸附量大，随着吸附的进行，

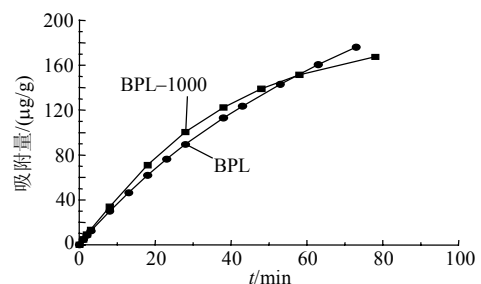


图 3 前 1h BPL 和 BPL-1000 的吸附动力学曲线
Fig. 3 Adsorption curves for BPL and BPL-1000 activated carbons at first one hour

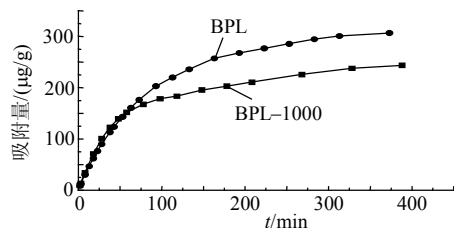


图4 BPL和BPL-1000的吸附动力学曲线
Fig. 4 Adsorption curves for BPL and BPL-1000 activated carbons

BPL在气态汞吸附中的优势逐渐显现,当吸附床达到饱和时,BPL的吸附量为 $306.55\ \mu\text{g/g}$,而BPL-1000的吸附量为 $243.5\ \mu\text{g/g}$ 。分析其原因可能是:在常温下,活性炭对气态汞的吸附既有物理作用也有化学作用^[17]。在吸附过程的开始阶段,活性炭表面具有较多的“空位”,因而气态汞会优先吸附于这些活性位点,加之物理吸附的活化能低于化学吸附的活化能^[18],导致在吸附过程的开始阶段,物理吸附的竞争优势大于化学吸附。由2.2节及Skodras等^[14]的研究发现,相对中孔而言,微孔更有利于活性炭对气态汞的吸附,因此本实验采用微孔容积作为活性炭吸附性能的一个指标。由表3可知:BPL样品的微孔容积为 $0.417\ \text{cm}^3/\text{g}$,而高温脱附后BPL-1000样品的微孔容积为 $0.490\ \text{cm}^3/\text{g}$,后者大于前者,因而在吸附的初始阶段,BPL-1000的物理吸附能力优于BPL。随着吸附过程的进行,BPL的吸附能力高于BPL-1000,这可能是由于随着吸附过程的进行,越来越多的气态汞吸附于活性炭孔洞中,导致物理吸附能力逐渐变弱,而活性炭表面含氧官能团的作用逐渐体现,因此当达到吸附饱和时,BPL的吸附能力大于BPL-1000的吸附能力。

2.4 酚羟基对气态汞吸附的影响

气态汞的浓度为 $53\sim 57\ \mu\text{g}/\text{m}^3$,模拟烟气流量为 $1\ \text{L}/\text{min}$,活性炭类型为:BPL-1000和负载酚羟基样品,各样品用量为 $10\ \text{mg}$,吸附温度为 $27\ ^\circ\text{C}$,得到的吸附动力学曲线如图5所示。

由图5可知,与负载酚羟基样品相比,BPL-1000

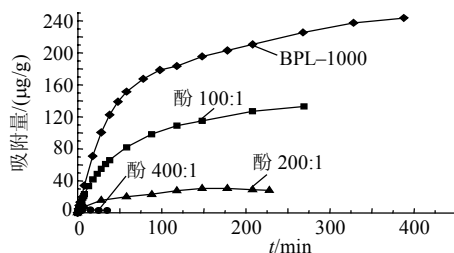


图5 酚羟基对气态汞吸附的影响
Fig. 5 Effect of phenol groups on the adsorption of mercury

对气态汞的吸附性能最优。随着酚羟基负载量的增多,活性炭对气态汞的吸附能力显著下降。分析原因可能是:在常温下,活性炭对气态汞的吸附是物理作用和化学作用的结果^[17]。经过高温热处理后,BPL-1000的微孔容积增大,为 $0.490\ \text{cm}^3/\text{g}$ 。而随着酚羟基负载量的增多,活性炭微孔容积不断下降,从物理吸附角度来说,导致活性炭的吸附量随着负载量的增大而减少。由图5和表3可知,负载酚羟基样品对气态汞吸附量的减少与样品微孔容积的下降不是线性关系,这进一步显示了在常温下,活性炭对气态汞的吸附除物理作用外,还存在化学作用。由本实验结果可知,负载的酚羟基对气态汞的吸附没有促进作用。

2.5 羧基对气态汞吸附的影响

气态汞的浓度为 $53\sim 56\ \mu\text{g}/\text{m}^3$,模拟烟气流量为 $1\ \text{L}/\text{min}$,活性炭类型为BPL-1000和负载羧基样品,各样品用量为 $10\ \text{mg}$,吸附温度为 $27\ ^\circ\text{C}$,得到的吸附动力学曲线如图6所示。

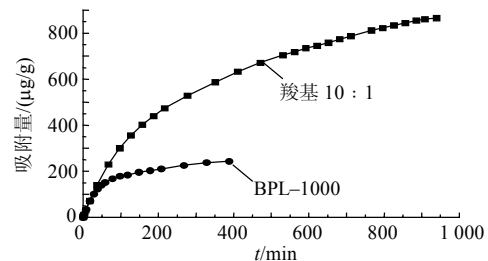


图6 BPL-1000和羧基10:1吸附动力学曲线
Fig. 6 Adsorption curves for BPL-1000 and carboxyl-10:1 activated carbons

由图6可知,在达到吸附饱和时,羧基10:1的吸附量为 $865.3\ \mu\text{g/g}$,而BPL-1000的吸附量为 $243.5\ \mu\text{g/g}$,前者的吸附量明显大于后者。由表3可知,二者的微孔体积相差不大,分别是 $0.405\ \text{cm}^3/\text{g}$ 和 $0.490\ \text{cm}^3/\text{g}$,但羧基10:1样品的吸附性能却明显优于BPL-1000,由此推测羧基对气态汞吸附起促进作用。

本实验进一步研究了羧基负载量对气态汞吸附的影响。在 $510\ \text{min}$ 吸附时间内,不同羧基负载量对应的气态汞吸附量曲线如图7所示。由图7可知,随着羧基负载量的增多,活性炭的吸附能力不断提高。当羧基负载量为 $28.89\ \text{mg}/\text{g}$ 时,活性炭的吸附能力达到最大,随着羧基负载量的继续增大,活性炭吸附能力逐渐下降。分析其原因可能是:1)羧基是个极性官能团,而 Hg^0 也是极性官能团^[18],根据“相似相溶”原则,它的存在可为气态汞的吸附提供活性位点;2)Dunham等^[19]通过气态汞脱附

实验发现, 吸附在活性炭表面的气态汞脱附时是以氧化态形式存在, 由此推测在气态汞吸附的过程中, 活性炭表面发生了氧化还原反应, 另外羧基是一种可被还原的官能团, 因此, 在一定范围内, 随着羧基负载量的增大, 能够与气态汞发生氧化还原反应的活性位点增多, 提高了其对气态汞的吸附能力。当羧基负载量超过 28.89 mg/g 时, 继续增大负载量, 活性炭吸附性能下降, 分析其原因可能是: 随着羧基负载量的增多, 活性炭外表面负载的羧基逐渐增加, 而这部分羧基阻碍了负载到孔径内部的羧基与气态汞的结合, 导致测试样品对气态汞的有效活性位点减少, 活性炭吸附性能降低。

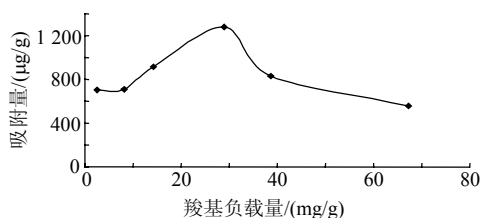


图 7 羧基负载量对气态汞吸附的影响

Fig. 7 Effect of the amounts of carboxyl groups on the adsorption of mercury

2.6 水分对气态汞吸附的影响

气态汞的浓度为 56~57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 模拟烟气流量为 1 L/min, 活性炭类型为 BPL 及不同含水率 BPL 样品, 各样品用量为 10 mg, 吸附温度为 27 $^{\circ}\text{C}$, 得到的吸附动力学曲线如图 8 所示。

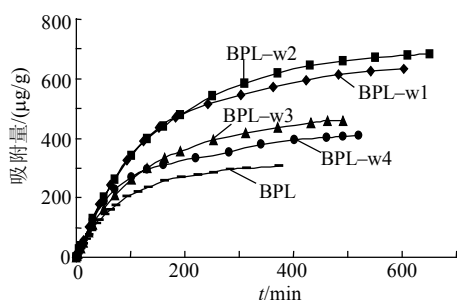


图 8 不同含水率样品的吸附动力学曲线

Fig. 8 Adsorption curves for activated carbons which contain different moisture

在考察水分对气态汞吸附的影响时, 将 BPL 的含水量假定为 0, 其他样品的含水量均是指在 BPL 基础上增加的水分含量。由图 8 可知, 含水样品的吸附性能均高于 BPL 样品, 分析其原因可能是活性炭表面吸附的水分与其表面含氧官能团形成氢键^[20], 为样品表面的氧化还原反应提供了更多的活性位点, 因而含水样品的吸附性能优于不含水样品的吸附性能。

由图 9 可知, 随着水分含量的增加, 活性炭对气态汞的吸附能力增强, 当含水率为 14.49% 时, 吸附性能达到最好。随后含水量继续增加, 活性炭的吸附性能有所下降。分析原因可能是: 少量水分以氢键方式存在于活性炭表面, 它可以加强活性炭表面的活性, 进而增强活性炭对气态汞的吸附能力。当达到最佳吸附点后, 再继续增大含水量, 活性炭对气态汞的吸附能力不断下降, 这主要是由于活性炭表面吸附过多水分, 会使活性炭表面的部分官能团, 如羧酐、内酯基等发生水解^[20], 而这些酸性官能团在气态汞吸附中具有重要的作用, 因而导致活性炭吸附性能降低。

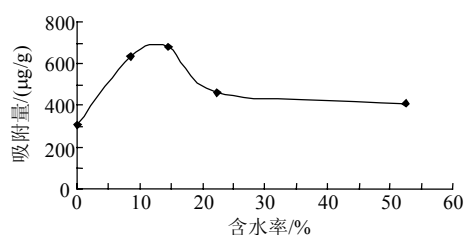


图 9 水分对气态汞吸附的影响

Fig. 9 Effect of moisture on the adsorption of mercury

3 结论

1) 孔径对气态汞吸附影响实验证明: 相对于中孔而言, 微孔更有利于气态汞的吸附。

2) 在常温下, 活性炭对气态汞的吸附是物理和化学作用的结果。在吸附过程的最初阶段, 物理吸附比化学吸附更具竞争力。

3) 负载酚羟基样品对气态汞吸附实验表明: 与高温脱附样品相比, 负载酚羟基样品对气态汞的吸附能力降低, 且随酚羟基负载量的增大, 其吸附性能降低, 由此推测酚羟基对气态汞的吸附没有促进作用。

4) 负载羧基样品对气态汞吸附实验表明: 与高温脱附样品相比, 负载羧基样品对气态汞的吸附能力显著提高, 由此推测羧基有利于气态汞的吸附。当羧基负载量为 28.89 mg/g 活性炭时, 活性炭的吸附性能达到最佳。

5) 活性炭表面存在适量水分有利于气态汞的吸附。在本实验中, 当活性炭表面含水率为 14.49% 时, 吸附性能达到最佳。

参考文献

- [1] 王军辉. 活性炭吸附脱除燃煤烟气中汞的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [2] 王起超, 马如龙. 煤及其灰渣中的汞[J]. 中国环境科学, 1997,

- 17(1): 76-79.
Wang Qichao, Ma Rulong. The mercury in coal and its cinder [J]. China Environmental Science, 1997, 17(1): 76-79(in Chinese).
- [3] 黄文辉, 杨宜春. 中国煤中的汞[J]. 中国煤田地质, 2002(14): 37-40.
Huang Wenhui, Yang Yichun. Mercury in coal of China[J]. Coal Geology of China, 2002(14): 37-40(in Chinese).
- [4] 任建莉, 周劲松, 骆仲泱, 等. 汞吸附过程的试验研究和数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 1-6.
Ren Jianli, Zhou Jinsong, Luo Zhongyang, et al. Fixed-bed experiments and mathematical modeling for adsorption of mercury vapor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 1-6(in Chinese).
- [5] 熊银伍, 杜铭华, 朱书全, 等. 煤基吸附剂脱除烟气中气态汞的研究现状[J]. 洁净煤技术, 2007, 13(1): 36-39.
Xiong Yinwu, Du Minghua, Zhu Shuquan, et al. Research actuality of removing gaseous hydrargyrum from flue gas with coal-sorbent [J]. Clean Coal Technology, 2007, 13(1): 36-39(in Chinese).
- [6] 高洪亮, 周劲松, 骆仲泱, 等. 改性活性炭对模拟燃煤烟气中汞吸附的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(8): 26-30.
Gao Hongliang, Zhou Jinsong, Luo Zhongyang, et al. Experimental study on Hg vapor adsorption of modified activated carbons in simulated flue gas[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(8): 26-30(in Chinese).
- [7] Mei Z J, Shen Z M, Yuan T, et al. Removal of vapor-phase elemental mercury by N-doped CuCoO₄ loaded on activated carbon[J]. Fuel Processing Technology, 2007, 88(6): 623-629.
- [8] 王建英, 贺克雕, 马丽萍. 燃煤烟气中单质汞的净化脱除[J]. 能源环境保护, 2007, 21(3): 5-7.
Wang Jianying, He Kediao, Ma Liping. Removal of elemental mercury from coal combustion flue gas[J]. Energy Environmental Protection, 2007, 21(3): 5-7(in Chinese).
- [9] O'Dowd W J, Hargis R A, Granite E J, et al. Recent advances in mercury removal technology at the national energy technology laboratory[J]. Fuel Processing Technology, 2004, 85(6): 533-548.
- [10] Uranowski L J, Tessmer C H, Vidic R D. Effects of metals and surface functional groups on adsorptive properties of GAC[C]. Innovative Technologies for Site Remediation and Hazardous Waste Management, Pittsburgh, PA, 1995.
- [11] Li Y H, 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.
- [12] 李毅鹏. 活性炭的表面化学与表面改性[J]. 西北煤炭, 2004, 2(4): 9-10.
Li Yipeng. Surface chemistry and modification of activated carbon [J]. Northwest Coal, 2004, 2(4): 9-10(in Chinese).
- [13] Villacanas F, Pereira M F R, Orfao J J M, et al. Adsorption of simple aromatic compounds on activated carbons[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2006, 293(1): 128-136.
- [14] Skodras G, Diamantopoulou I, Sakellariopoulos G P. Role of activated carbon structural properties and surface chemistry in mercury adsorption[J]. Desalination, 2007, 210(1): 281-286.
- [15] Tessmer C H, Vidic R D, Uranowski L J. Impact of oxygen-containing surface functional groups on activated carbon adsorption of phenols [J]. Environmental Science and Technology, 1997, 31(7): 1872-1878.
- [16] Dandekar A, Baker R T K, Vannice M A. Characterization of activated carbon, graphitized carbon fibers and synthetic diamond powder using TPD and DRIFTS[J]. Carbon, 1998, 36(12): 1821-1831.
- [17] Chang R, Offen G. Mercury emission control technologies: an EPRI synopsis[J]. Power Engineering, 1995, 99(11): 51-57.
- [18] Kwon S, Borguet E, Vidic R D. Impact of surface heterogeneity on mercury uptake by carbonaceous sorbents under UHV and atmospheric pressure[J]. Environmental Science Technology, 2002, 36(9): 4162-4169.
- [19] Dunham G E, Miller S J, Chang R, et al. Mercury capture by an activated carbon in a fixed-bed bench-scale system[J]. Environmental Progress, 1998, 17(3): 203-208.
- [20] Li Y H, Lee C W, Gullett B K. The effect of activated carbon surface moisture on low temperature mercury adsorption[J]. Carbon, 2002, 40(1): 65-72.



罗锦英

收稿日期: 2009-04-13。

作者简介:

罗锦英(1983—), 女, 硕士研究生, 主要从事燃煤烟气中汞的脱除等方面的研究, luojinying1104@163.com;

罗津晶(1972—), 女, 博士, 副教授, 主要从事大气污染治理相关领域的研究;

黄华伟(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事燃煤烟气中汞的脱除等方面的研究;

陈进生(1970—), 男, 博士, 副研究员, 从事环境污染治理与环境化学分析的研究。

(编辑 张媛媛)