

CO₂ 和 H₂O 在活性炭上的吸附平衡和吸附动力学研究

徐冬^{1,2}, 张军², 李刚², XIAO Penny², WEBLEY Paul², 翟玉春¹

(1. 东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110004; 2. Monash 大学 化工系, 澳大利亚 墨尔本 3800)

摘要: 活性炭是应用在变压吸附分离 CO₂ 工艺中的常用吸附剂, 而工业废气中一般都含有一定量的饱和水蒸气. 通过吸附等温线和穿透曲线分别研究了单/双组份的 CO₂ 和 H₂O 在活性炭上的吸附平衡和吸附动力学. 结果表明, 活性炭对二氧化碳具有较高的吸附量, 并具有较好的 CO₂/N₂ 吸附选择性. 由于吸水官能团的存在, 活性炭在较高分压下表现出较大的水蒸气吸附量. 不过由于吸附机理不同, 水蒸气在活性炭上的吸附几乎不会影响活性炭对 CO₂ 的吸附. 动力学研究表明, CO₂ 在活性炭上的吸附速率远大于 H₂O 的吸附速率.

关键词: 二氧化碳; 水蒸气; 吸附; 等温线; 穿透曲线

中图分类号: TQ174

文献标识码: A

Adsorption Equilibrium and Kinetics of CO₂ and H₂O on Activated Carbon

XU Dong^{1,2}, ZHANG Jun², LI Gang², XIAO Penny², WEBLEY Paul², ZHAI Yu-Chun¹

(1. School of Material and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Department of Chemical Engineering, Monash University, Melbourne 3800, Australia)

Abstract: Activated carbon is well applied in pressure swing adsorption process for CO₂ capture. The real flue gas contains saturated water vapor as well. In this study, single and binary components adsorption equilibrium and kinetics of H₂O/CO₂ were studied according to their adsorption isotherms and breakthrough curves. Results showed that activated carbon could adsorb high amount of CO₂ and low amount of N₂, that showed a good CO₂/N₂ selectivity. As activated carbon contains the functional groups, the activated carbon can adsorb large amount water at high water partial pressure. However, because of different CO₂ adsorption mechanism, water adsorption has almost no impact on CO₂ adsorption on activated carbon. The kinetics study showed that CO₂ adsorption velocity on activated carbon is much faster than that of H₂O.

Key words: carbon dioxide; water vapor; adsorption; isotherm; breakthrough

工业的快速发展使得能源消耗剧增, 过量二氧化碳气体排放所引发的温室效应已经成为严重的世界问题^[1-2]. 如何减缓二氧化碳的排放量已经引起人们极大的关注, 成为研究工作的重点^[3-4].

在所有分离 CO₂ 的方法中, 吸附工艺具有能耗低、吸附剂使用周期长、工艺流程简单、自动化程度高、环境效益好, 无污染产生等优点^[5-7]. 活性炭

和沸石是最常用的用来变压或者变温吸附捕集 CO₂ 的吸附剂^[8-10]. 虽然 13X 沸石在干燥进气条件下对二氧化碳具有更高的吸附能力^[11], 但 13X 沸石具有超强的亲水性, 水分子紧紧地吸附在微孔内部并且很难被解吸, 甚至会凝结在吸附塔内^[12-13]. 而实际从工厂(燃煤热电厂)排出的废气中仍含有一部分饱和水蒸气在室温条件下不能除去^[14]. 二氧化碳之

收稿日期: 2011-01-13; 收到修改稿日期: 2011-03-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51074205)

National Natural Science Foundation of China (51074205); Corporate Research Centre for Greenhouse Gas Technology Foundation in Australia

作者简介: 徐冬(1982-), 男, 博士研究生. E-mail: e3e4sun@gmail.com

通讯作者: 翟玉春, 教授. E-mail: zhaiyc@smm.neu.edu.cn; WEBLEY Paul, 教授. E-mail: paul.webley@monash.edu

前通过增加干燥塔等设备除去电厂废气中的饱和水蒸气,会增加操作成本,降低变压吸附技术的优越性^[8].而碳质材料是公认的疏水性材料,活性炭又是最通用的可以吸附分离 CO₂ 的吸附剂.由于活性炭表面带有吸水官能团,所以活性炭在一定压力下仍可吸附一定量的水分.

在工业实践中,气体分离和净化所面临的对象都是混合物,如果只研究单组份物质的吸附平衡,可能与实际生产中多组分的平衡曲线相差较大^[15].所以研究多组分气体的吸附平衡,对于吸附工艺的设计和应用是非常重要的.另外,由于目前测量多组分平衡(H₂O/CO₂)的实验操作比较繁琐和困难,直接由实验测定的气体混合物吸附平衡的数据比较少^[5].故本工作通过吸附等温曲线和吸附穿透曲线不但研究了单组份(CO₂ 和水蒸气)气体,而且研究了双组分气体同时存在时在活性炭上的吸附平衡和吸附动力学.

1 实验部分

1.1 吸附剂性质

试验所用的活性炭是由澳大利亚 Activated Carbon Technologies Pty Ltd 提供的工业产品.样品是不规格颗粒状,粒径在 2~5 mm 范围内.样品的物理性质详见表 1.活性炭的扫描电镜照片(SEM)见图 1.样品表面可见很多的孔结构,并且是不光滑的.

表 1 活性炭的物理性质
Table 1 Physical properties of activated carbon

Property	Activated carbon
Original material	Coconut shell
Shape	Granular
Activated method	Steam
BET surface/(m ² ·g ⁻¹)	921.7
Total pore volume/(cm ³ ·g ⁻¹)	0.37
Nominal pore size/nm	0.73

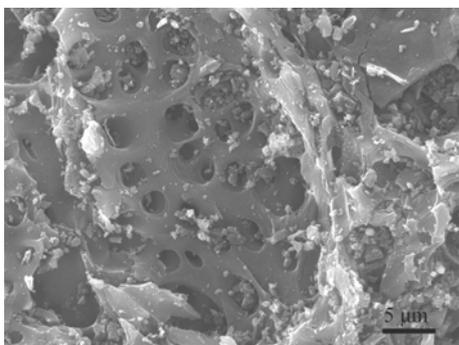


图 1 活性炭的 SEM 照片

Fig. 1 SEM image of activated carbon

1.2 等温吸附曲线测定及模拟

吸附剂的比表面积、孔体积和孔径大小通过吸附测试仪 ASAP 2010 (Micromeritics, USA)在液氮温度(77 K)下测定.测试前,样品在 350℃真空条件下活化 12 h,这样可以除去样品内的水蒸气和其它杂质.用 BET 法来计算样品在 P/P_0 为 0.05~0.25 时的比表面积 S_{BET} .用密度泛函理论模型来计算样品的孔分布.同时,CO₂ 和 N₂ 在不同温度下的吸附等温曲线也通过 ASAP-2010 来测定.吸附温度范围为 20~60℃,吸附压力为 0~120 kPa.

由于水蒸气在低于饱和蒸汽压下会凝结成液态水,并且水蒸气的浓度也比较难控制,所以很难像测定 CO₂ 和 N₂ 那样直接利用仪器测试水蒸气在活性炭上的等温吸附曲线.因此,本课题组利用重量法原理安装了一个自制的双组份气体(H₂O/CO₂)等温曲线测试装置(Binary Isothermal Adsorption Unit, BIAU),见图 2.该装置主要由恒温水槽(控制吸附发生的温度)、吸附柱(装载吸附剂样品)、水柱(通过气体后可以产生水蒸气)、水蒸气浓度测试仪(Vaisala HUMICAPHMT330, Finland)和压力传感器五大部分组成.工作时四个部件全部放入恒温水槽中,可通过调节水温测定不同温度下水蒸气的吸附量,进而计算水蒸气的等温吸附曲线.

该装置也可以测定单组份水蒸气在吸附剂上的等温吸附曲线.单组份水蒸气等温线的测试原理是使惰性气体通过水柱后带出水蒸气,此时只有水蒸

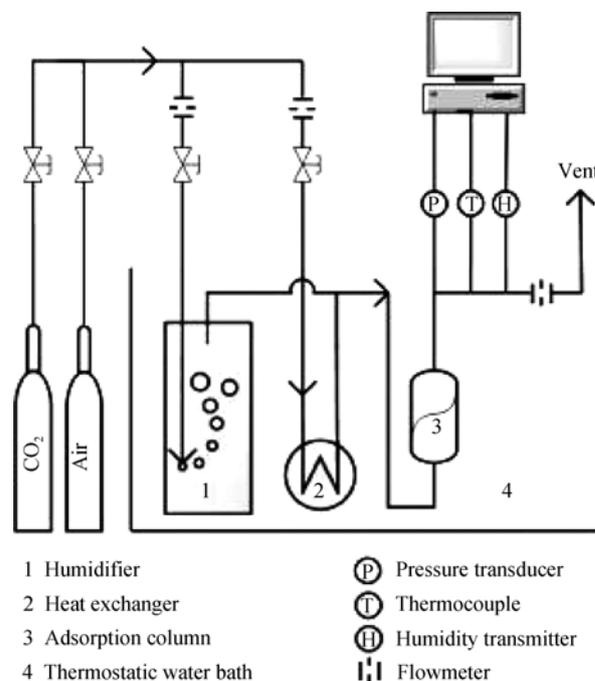


图 2 H₂O/CO₂ 单双组分等温曲线装置图

Fig. 2 Schematic diagram of the H₂O/CO₂ single & binary isothermal adsorption unit

气会被活性炭吸附, 最后通过称量在相应水蒸气饱和和蒸汽压下完全穿透吸附柱的质量增加来计算水蒸气的吸附量。

而双组份等温曲线的测定需同时依据重量法和体积法来分别计算水蒸气和 CO₂ 的吸附量。该试验测双组份等温曲线时需干燥的纯二氧化碳气体代替单组份试验中的惰性气体。

CO₂ 和 N₂ 在活性炭上的吸附等温线可以通过单分子层朗格缪尔(Sing Site Langmuir)方程来模拟^[5],

$$N = \frac{MBP}{1 + BP} \quad (1)$$

$$B = B_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (2)$$

这里 P 是气体压力, B 、 B_0 是吸附常数, Q 为吸附热, R 是气体常数, T 是温度, M 代表最大单分子层吸附量。

不同温度下水蒸气在活性炭上的等温吸附曲线可以通过 Qi-Hay-Rood (QHR)^[16]模型来模拟,

$$q = \frac{\rho V_0}{1 + \exp\left[k\left(\frac{P_{1/2}}{P^0} - \frac{P}{P^0}\right)\right]} \quad (3)$$

这里 q 表示水蒸气的吸附量, ρ 表示吸附水的密度, V_0 表示吸附剂的孔体积, T 表示吸附温度。

$$\frac{P_{1/2}}{P^0} = a + bT \quad (4)$$

$$k = A \exp(-Q/RT) \quad (5)$$

$$\frac{P}{P^0} = \text{relative humidity} \rightarrow r \quad (6)$$

把方程(4), (5), (6)带入方程(3)即可得到:

$$q = \frac{\rho V_0}{1 + \exp[A \exp(-Q/RT)(a + bT - r)]} \quad (7)$$

这里当 $T <$ 水的沸点时 $\rho = 1$ 。假设活性炭的密度是 1 g/mL, 此时 $V_0 = 0.355$ 。

1.3 穿透曲线的测定

测定穿透曲线的实验装置见图 3。吸附床有效高度为 1000 mm、内壁直径为 76 mm、壁厚为 5 mm 的不锈钢管。整个吸附装置外面包裹着丁腈橡胶, 用来隔热。在吸附床中, 装有等距离的 7 个热电偶来监测实验过程中不同时间下的温度变化, 从进气口(底部)到出气口(顶部)分别定义为 T1-T。另外, 热电偶可以通过吸附热变化来追踪二氧化碳在床中的移动位置, 同时最重要的是可以通过水被吸附时产生的“冷点”变化来显示床中水蒸气的移动。进气口和尾气口处分别装有压力传感器(S902, accuracy < 1%

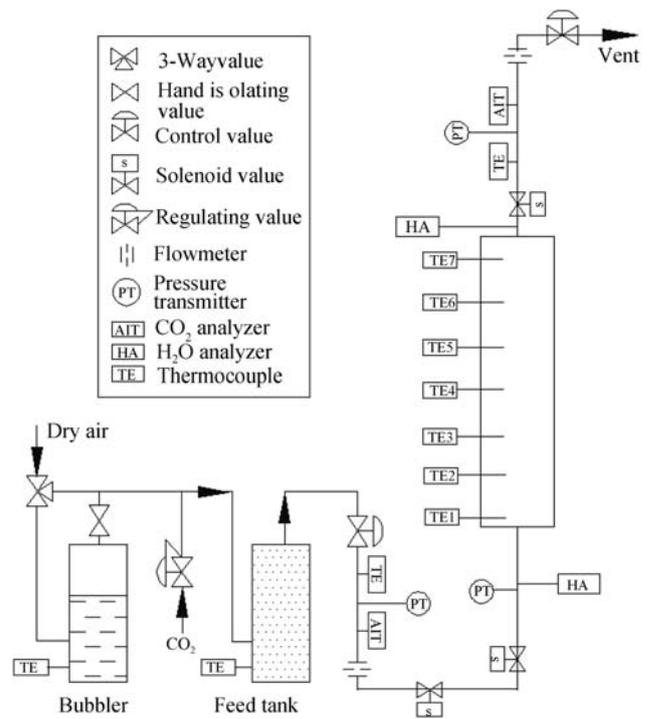


图 3 穿透曲线装置图
Fig. 3 Diagram for breakthrough experiments

of reading, MKS)、流量计(EJA115, YokoGawa, Japan)、控制阀(Type 3510, SAMSON)和二氧化碳含量分析仪(Ir1507, intrinsic error < 0.1% CO₂, Servomex), 具体位置见图 3。实验过程由 GeniDAQ® 软件通过计算机来操作。为模拟工业废气的组成, 本实验所用干燥气体利用纯 CO₂ 气体与干燥空气组成。当干燥混合气体通过装有蒸馏水的水柱内时, 相应温度下的水蒸气随气泡被带出。而水蒸气的含量通过调节水柱的温度来控制, 水蒸气相对湿度由湿度仪(HMT330, ±0.05% full scale, VAISALA, Finland)来测定。混合气体先停留在进气罐, 通过调节进气罐的温度来改变进气温度。本实验取两种不同的进气速率, 分别为 50 和 100 L/min (LPM)。为接近电厂废气中的实际含量, 调节进气中 CO₂ 含量为 12%, 水蒸气浓度为 8%。

2 结果与讨论

2.1 活性炭的性质分析

样品的孔径分布见图 4, 可见该椰壳活性炭内部主要的孔径分布在 0.7 nm 左右, 另外还有一小部分孔径分布在 1.2 nm 左右, 都是微孔结构。而气体分子的直径也一般都在 1 nm 以下, 比如 CO₂ 的分子直径为 0.33 nm, 这些气体主要被吸附在吸附剂的微孔结构内。这种小分子的物理吸附基本由微孔的

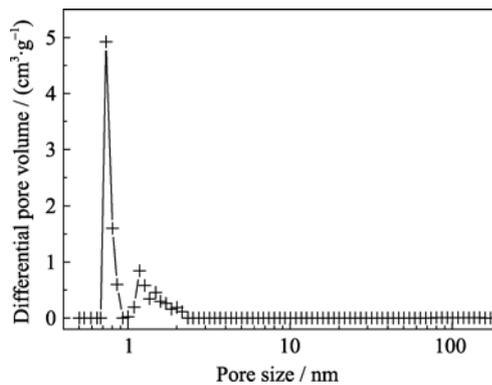


图 4 利用 DFT 模型从 N_2 吸附曲线上计算的活性炭的孔径分布

Fig. 4 Pore size distribution of activated carbon calculated from nitrogen and adsorption isotherms using DFT model

比表面积决定, 一般来说比表面积越大, 吸附量越多. 物理吸附本质上是靠范德华力, 由分子之间的弱相互作用力实现的. 因此从此活性炭的比表面积 (BET $921.7 \text{ m}^2/\text{g}$) 和孔径分布分析(微孔为主)可知, 本实验所选用的椰壳活性炭是变压吸附分离 CO_2 的理想材料.

石墨类材料的表面一般是憎水性的, 但是本研究中水蒸气在活性炭表面会被大量吸附. 这是由于在商业活性炭生产过程中不可避免地会使活性炭表面带有一些特定的官能团, 而这些官能团会与水分子产生准化学吸附作用. 一旦水分子被吸附到那些官能团表面, 这些水分子就会充当为二等基团, 通过羟基作用来吸附更多的水蒸气分子. 由于活性炭颗粒孔径的有限性, 吸附的水分子越多, 这种二等基团的产生就会越少^[17-18]. 所以含有大量水蒸气的废气通过吸附床时, 不能够被羟基作用吸附的水蒸气就会穿透吸附床. 干燥活性炭(Dry-AC)、吸附 CO_2 后的样品(AC- CO_2)以及吸附水蒸气后的样品(AC- H_2O)的红外光谱见图 5. 对照文献[19]可知, 在 $3400\sim 3300 \text{ cm}^{-1}$ 及 1630 cm^{-1} 波峰范围内, 红外光谱中对应的官能团为水中的羟基(-OH), 而波峰 $1398\sim 1370 \text{ cm}^{-1}$ 范围内对应的官能团为甲基(- CH_3)和羧基(-COO)官能团, 在 $1090\sim 1020 \text{ cm}^{-1}$ 范围内对应的官能团为 Si-O 基. 而本实验所用的干燥活性炭及吸附 CO_2 和 H_2O 后的活性炭的红外分析波峰正对应着以上官能团, 所以该活性炭必然会对水有一定的吸附性.

2.2 单组份气体的等温吸附曲线

2.2.1 CO_2 和 N_2 的单组份吸附曲线

单组份 CO_2 和 N_2 在活性炭上的等温曲线(图 6)略呈线性. 实验测定曲线与模拟曲线基本吻合, 说

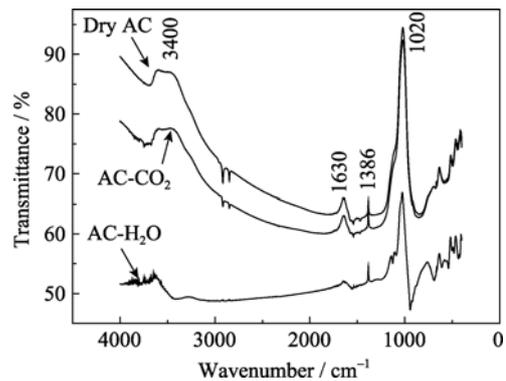


图 5 不同条件下的活性炭的红外光谱图

Fig. 5 IR analyses of activated carbon in different conditions

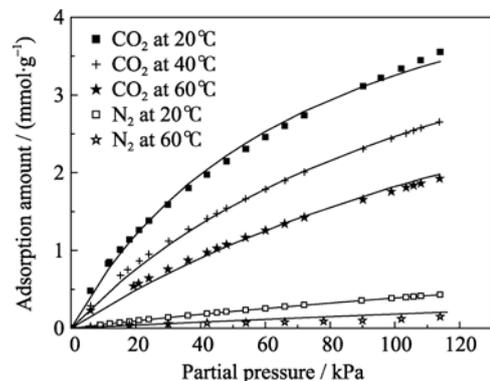


图 6 CO_2 和 N_2 在活性炭上的等温曲线

Fig. 6 Adsorption isotherms of CO_2 and N_2 onto activated carbon

Dots are experimental results and lines represent model fitting by single site Langmuir equation

明单分子层朗格缪尔方程可以很好地模拟 CO_2 在活性炭上吸附. 图 6 显示了活性炭对 CO_2 具有较大的吸附量而对 N_2 具有较小的吸附量. 与 13X 沸石的等温线(第 I 类曲线)相比, 活性炭在分离 CO_2 上的优势是因为低压段 CO_2 的吸附量较低, 这样利用变压吸附工艺在低压条件下(5~10 kPa)被吸附的 CO_2 可以很容易解吸出来, 而且解吸压力可以比在 13X 上的略高. 这两种优势都可以节省设备的能耗. 因为当真空压力 < 5 kPa 时, 每当压力减小 1 kPa, 变压吸附装置系统就会消耗很多能量. 一般来说, 应用 13X 沸石作为吸附剂, 真空压力应降至 2~3 kPa 左右. 但如果应用活性炭作为吸附剂, 真空解吸压力可以在 5~6 kPa 范围内, 这样活性炭就显出更大的优势.

另外, 吸附曲线还显示出 N_2 在活性炭上的吸附量比在 13X 沸石的大. 这说明活性炭对 CO_2 和 N_2 的吸附选择性不是很好.

2.2.2 H_2O 的单组份吸附曲线

不同温度下水蒸气在活性炭上的等温线呈典型的第 V 类曲线, 如图 7 所示. 这种 S 型的等温曲线的特点是高压下对水蒸气有很高的吸附量, 而低压

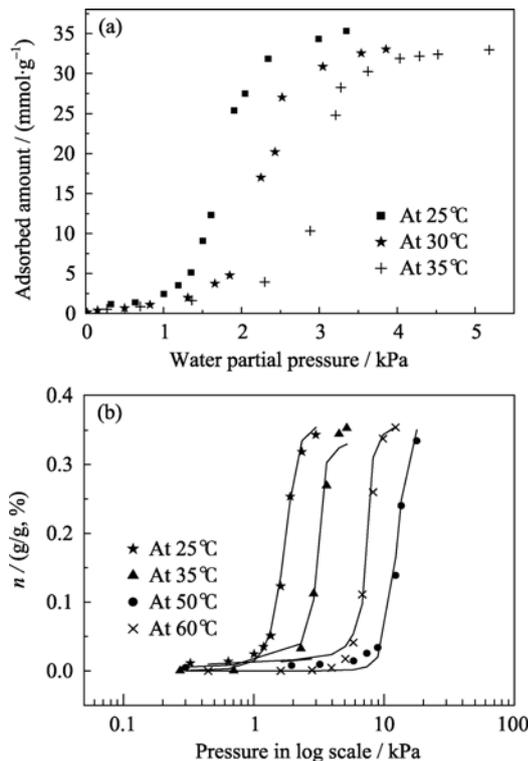


图7 水蒸气在活性炭上的等温曲线(a)25, 30和35℃上的实验值, (b)25, 35, 50和60℃上的实验和模拟值

Fig. 7 Adsorption isotherms of water vapor onto activated carbon at (a) 25, 30 and 35°C of experimental data, (b) 25, 35, 50 and 60°C with model fitting data

Dots are experimental results and lines represent model fitting

下却对水的吸附量很低. 这种曲线的优点就是应用在真空变压吸附中, 可以很容易地实现对水的分离, 也就是说即使吸附在活性炭的孔径内, 水蒸气也会很容易从真空泵解吸出来, 不会影响活性炭对 CO₂ 的吸附及循环操作. 另外, 该曲线也说明了普通的工业活性炭并不是完全的疏水性材料, 在一定条件下它仍然具有很高的吸水性. 水在活性炭表面的吸附主要通过形成独特的三维水分子簇和网状结构, 而这些结构的形成依靠着水分子与活性炭上可取代的活化位置协同作用来完成^[20]. 图 7(b)还显示, 实验测得的等温曲线可以很好地通过 QHR 模型来模拟. 在较高温度下(60℃), 活性炭对水蒸气的吸附量仍然较高.

2.3 双组份气体的等温曲线

H₂O 和 CO₂ 的单、双组份等温吸附曲线见图 8. 对比可知, 不管是水蒸气还是二氧化碳, 双组份的等温吸附曲线几乎与单组份的等温曲线是重合的, 这说明虽然活性炭具有吸水性, 但是水的存在并不影响活性炭对 CO₂ 的吸附, 或者说它们之间几乎没有互相影响. 这是因为活性炭把 CO₂ 吸附进微孔结构内, 而对 H₂O 的吸附不一定局限在微孔内. 如上

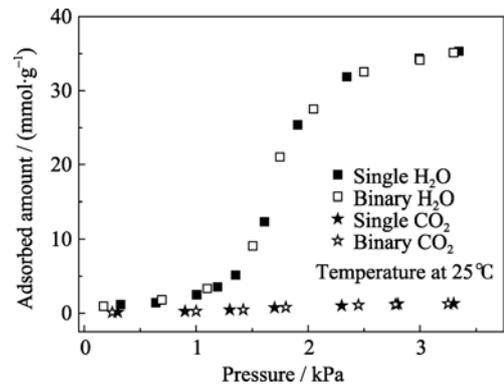


图8 单、双组份 H₂O/CO₂ 气体在活性炭上的等温吸附曲线
Fig. 8 Single and binary adsorption isotherms of water vapor and CO₂ onto activated carbon

所述, 活性炭吸水机理主要在于其表面上官能团的作用, 而官能团的存在不一定在微孔内, 因此 CO₂ 和 H₂O 两者之间的吸附是相对独立的. 这也是应用活性炭作为吸附剂分离高湿工业废气中 CO₂ 的最大优点.

2.4 单/双组份气体的穿透曲线

实验取两种不同的进气速率(分别为 50 和 100 L/min)来观察不同进气速度下的 H₂O 和 CO₂ 在活性炭上的吸附速度. 在活性炭吸附床上单/双组份气体的穿透曲线见图 9. 显然, 当进气速率为 100 L/min 时, 由于较快的进气速度, 单组份的穿透曲线和双组份的穿透曲线没有太大差别, 这表明了水蒸气在活性炭上是比较弱的吸附质气体. CO₂ 穿透吸附床的时间为 45 s, 而 H₂O 穿过吸附床的时间为 180 s, 这是由于活性炭类材料是依靠动力学分离的原理来分离一组气体的^[21]. 像 CO₂ 这样吸附速率快的气体就可以先占据吸附剂材料内的孔径, 这就使得吸附速度较慢的水蒸气对 CO₂ 的影响不大. CO₂ 在活性炭上的双组份穿透曲线上也具有不太明显的回升(roll-up)现象. 这是因为在吸附的过程中, 二氧化碳首先吸附在吸附剂表面, 然后吸附速率较慢的 H₂O 又被吸附. H₂O 吸附也会产生大量的吸附热, 而吸附热释放出来后会随着气流方向往前推移. 所以先前吸附的一部分二氧化碳就会由于升温的作用而发生解吸. 解吸下来的 CO₂ 浓缩后浓度必然大于最初进气的 CO₂ 浓度值, 所以在双组份 CO₂ 的穿透曲线上出现回升现象.

当进气速率在 50 L/min 时, 双组份的穿透曲线稍陡于单组份的曲线. 同时, 由于两种气体的竞争, 导致双组份的穿透曲线早于单组份的曲线.

2.5 双组份气体在吸附床内的温度变化

通过追踪吸附床内各个点的温度变化来获得双

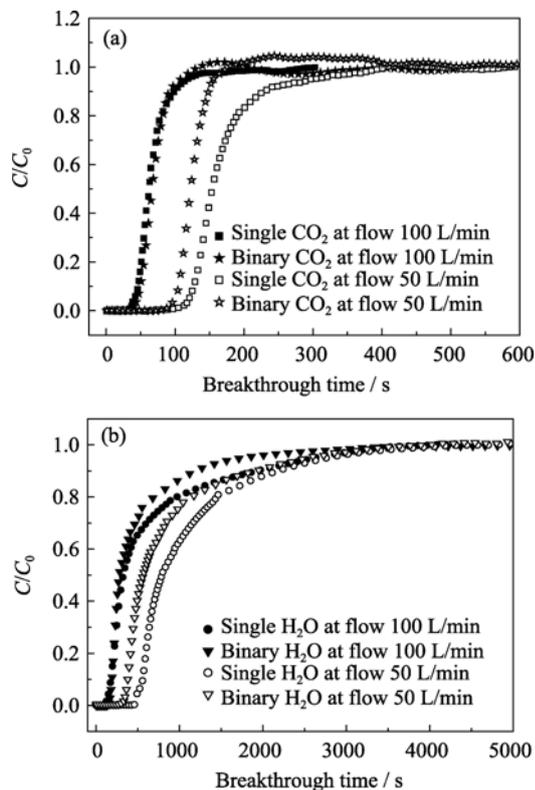


图 9 单组份/双组份在活性炭变压吸附床上(a) CO_2 , (b) H_2O 的穿透曲线

Fig. 9 Both single and binary breakthrough curves for (a) CO_2 and (b) H_2O at the bed

组份气体穿透点的变化, 如图 10 所示. 图 10(a)和(b)在温度变化趋势上的差别不大. 因为进气速度较小, 图 10 (b)的温度变化趋势更明显. 从 T3 到 T7, 吸附床上有两次显然的温度变化, 这是由 CO_2 的第一次吸附和 H_2O 的第二次吸附引起的. CO_2 的吸附速率较快, 很难在 T1、T2 处观察到两次温度变化, 仅有的一次是由水蒸气的吸附引起的. 在吸附床内由 CO_2 和 H_2O 分别的吸附热释放引起的温度差分别是 $4.5\sim 6.0^\circ\text{C}$ 和 $2.0\sim 3.5^\circ\text{C}$. 由此可知, 在活性炭吸附床内的强吸附质气体为 CO_2 , 而不是 H_2O , 这与 13X 沸石吸附床内的结果是相反的. 所以水蒸气在活性炭的吸附将不会或者很少影响到 CO_2 的吸附.

3 结论

通过孔径分布和红外光谱分析可知, 工业椰壳活性炭主要具有微孔结构, 并且因其表面含有多种官能团, 可以吸附一定量的水蒸气. 对等温吸附曲线的研究表明, 该活性炭具有较高的 CO_2 吸收能力, 是一种应用在变压吸附分离 CO_2 的良好吸附剂. 并且通过双组份吸附曲线和穿透曲线研究表明水蒸气的存在不会影响活性炭对 CO_2 的吸附. 当两种气体

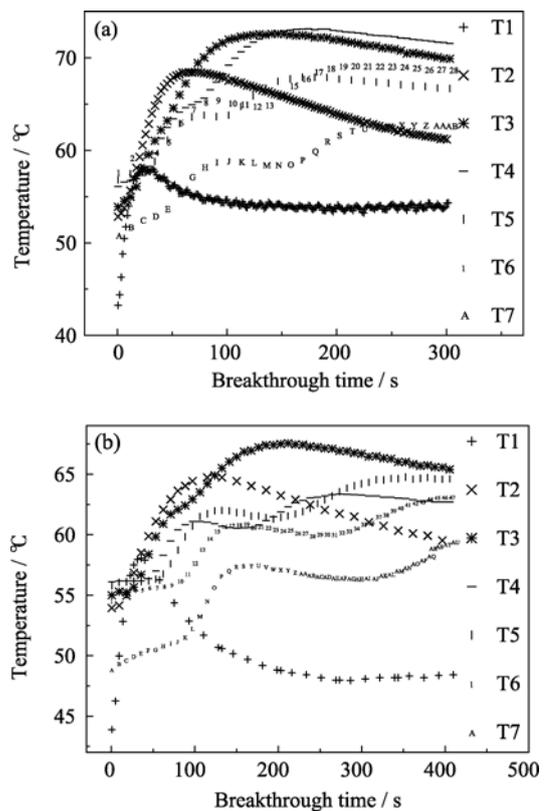


图 10 (a) 100 L/min 进气和(b) 50 L/min 进气双组份穿透曲线实验中温度变化

Fig. 10 Temperature swing profiles in binary breakthrough experiments at flow of (a) 100 L/min and (b) 50 L/min

同时通过时, CO_2 在活性炭上的吸附速度远大于 H_2O 的吸附速度.

参考文献:

- [1] 费维扬, 艾宁, 陈健. 温室气体的捕集和分离—分离技术面临的挑战与机遇. 化工进展, 2005, **24**(1):1-4.
- [2] Jose D F, Timothy F, Sean P, et al. Advances in CO_2 capture technology—The U.S. department of energy's carbon sequestration program. *Journal of Greenhouse Gas Control*, 2008, **2**(1): 9-20.
- [3] 李天成, 冯霞, 李鑫钢. 二氧化碳处理技术现状及其发展趋势. 化学工业与工程, 2002, **19**(2):190-197.
- [4] Xu X, Wang D. Reducing greenhouse gas emissions from energy consumption activities by the iron and steel industry in East China. *Energy Sources*, 1999, **21**(6): 541-546.
- [5] Yang R T. Gas Separation by Adsorption Processes. Michigan: Imperial Collage Press, 1997: 237-247.
- [6] Takamura Y S, Narita J, Aoki S. Evaluation of dual-bed pressure swing adsorption for CO_2 recovery from boiler exhaust gas. *Separation and Purification Technology*, 2001, **24**(3): 519-522.
- [7] Daeho K, Ranjani S, Lorenz T B. Optimization of pressure swing adsorption and fractionated vacuum pressure swing adsorption

- processes for CO₂ capture. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2005, **44**(21): 8084–8094.
- [8] Zhang J, Xiao P, Li G, *et al.* Effect of flue gas impurities on CO₂ capture performance from flue gas at coal-fired power stations by vacuum swing adsorption. *Energy Procedia*, 2009, **1**(1): 1115–1122.
- [9] Chue K T, Kim J N, Yoo Y J, *et al.* Comparison of activated carbon and zeolite 13X for CO₂ recovery from flue gas by pressure swing adsorption. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1995, **34**(2): 591–598.
- [10] Xiao P, Zhang J, Webley P, *et al.* Capture of CO₂ from flue gas streams with zeolite 13X by vacuum-pressure swing adsorption. *Adsorption*, 2008, **14**(4/5): 575–582.
- [11] Harlick P J, Tezel F H. An experimental adsorbent screening study for CO₂ removal from N₂. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2004, **76**(1/2/3): 71–79.
- [12] Li G, Xiao P, Webley P, *et al.* Capture of CO₂ from high humidity flue gas by vacuum swing adsorption with zeolite 13X. *Adsorption*, 2008, **14**(2/3): 415–422.
- [13] Li G, Xiao P, Webley P, *et al.* Competition of CO₂/H₂O in adsorption based CO₂ capture. *Energy Procedia*, 2009, **1**(1): 1123–1130.
- [14] Ahn H, Lee C. Effects of capillary condensation on adsorption and thermal desorption dynamics of water in zeolite 13X and layered beds. *Chemical Engineering Science*, 2004, **59**(13): 2727–2743.
- [15] 李明, 周理, 吴琴. 多组分气体吸附平衡理论研究进展. 化学进展, 2002, **14**(2): 93–98.
- [16] Qi S, Hay K J, Rood J M, *et al.* Equilibrium and heat of adsorption for water vapor and activated carbon. *Journal of Environmental Engineering*, 2000, **126**(3): 267–271.
- [17] Rutherford S W. Modeling water adsorption in carbon micropores: study of water in carbon molecular sieves. *Langmuir*, 2006, **22**(2): 702–708.
- [18] Müller E A, Rull L F, Vega L F, *et al.* Adsorption of water on activated carbons: a molecular simulation study. *J. Phys. Chem.*, 1996, **100**(4): 1189–1196.
- [19] Murdock J N, Wetzel D L. FT-IR microspectroscopy enhances biological and ecological analysis of algae. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2009, **44**(4): 335–361.
- [20] McCallum C L, Bandosz T J, McGrothe S C, *et al.* A molecular model for adsorption of water on activated carbon: comparison of simulation and experiment. *Langmuir*, 1999, **15**(2): 533–544.
- [21] CHEN Zhan-Ying, WANG Xu-Hui, WANG Ya-Long, *et al.* Dynamic adsorption and desorption properties of xenon on activated carbon fiber. *Journal of Inorganic Materials*, 2006, **21**(1): 81–86.