

粉末活性炭吸附水中苯的热力学研究

王兆之¹, 田家宇¹, 梁恒^{1,2}, 陈忠林¹, 林明利¹, 李圭白^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学, 城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090, zhaozhiwang_1985@yahoo. cn;
2. 城市水资源开发利用(北方)国家工程研究中心, 哈尔滨 150090)

摘要: 为研究粉末活性炭(PAC)对苯的吸附性能, 对比分析两种 PAC 的物理化学性质. 结果表明: 煤质炭微孔面积 $320 \text{ m}^2/\text{g}$ 远小于木质炭微孔面积 $563 \text{ m}^2/\text{g}$, 煤质炭表面基团比木质炭丰富. 使用 Dubinin 和 Sperlinsky(DS)公式对活性炭吸附水分子进行定性分析, 表明煤质炭易于吸附水分子, 木质炭更易于吸附苯; 研究两种炭对苯的吸附等温线, 比较 Langmuir、Freundlich、Sips、Toth 方程描述吸附等温线的准确性, 结果表明 Toth 方程相关性系数最接近 1, 更适合描述 PAC 吸附水中苯; 木质炭吉布斯自由能变 ($-\Delta G^0$)、吸附焓变 (ΔH^0)、吸附熵变 (ΔS^0) 均大于煤质炭的, 表明木质炭更易于吸附苯.

关键词: 苯; PAC; Sips 方程; Toth 方程

中图分类号: TU991

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)12-1892-06

Thermodynamic of the adsorption of benzene from water on activated carbon

WANG zhao-zhi¹, TIAN jia-yu¹, LIANG heng^{1,2}, CHEN zhong-lin¹, LIN ming-li¹, LI gui-bai^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resources and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, zhaozhiwang_1985@yahoo. cn; 2. National Engineering Research Center of Urban Water Resources, Harbin 150090, China)

Abstract: For better understanding the characteristics of adsorption of benzene on activated carbone, Analysis the physical and chemical characteristics of two kinds of carbon, the micro - surface area of coal carbon is $320 \text{ m}^2/\text{g}$, which is far less than that of woody carbon that is $563 \text{ m}^2/\text{g}$. The chemical groups on the surface of coal carbon is abundant than that on woody carbon. The qualitative analysis of the adsorption of water molecule on two kinds of carbon is conducted by Dubinin and Sperlinsky equation(DS), the results show that, the coal carbon is prone to adsorb water molecule while the woody carbon is tend to adsorb benzene; Using four isotherm equations (Langmuir、Freundlich、Sips、Toth) to simulate the experimental data, the results show that the relativity coefficient (R^2) of the Toth equation is more close to 1, and it best fits the adsorption of benzene from water; compare the parameters of thermodynamic of the adsorption of benzene on two kinds of carbons, the results indicate that differences of Gibbs free energy ($-\Delta G^0$), enthalpy (ΔH^0) and entropy (ΔS^0) of woody carbon are larger than that of coal carbon, which indicate that the woody carbon is more adaptable to adsorb benzene from water.

Key words: benzene; PAC; Sips equation; Toth equation

粉末活性炭(PAC)吸附是从水体中去除有机污

染物的有效方法. 目前, 国内外主要研究 PAC 吸附气态苯^[1], 以确定 PAC 孔径分布对吸附的影响^[2-4]. [文献 5-7]研究了 PAC 吸附易挥发有机物的情况, 而对 PAC 吸附水中苯的热力学研究较少.

本文分析了两种 PAC 物理化学性质, 比较了 Langmuir、Freundlich、Sips、Toth 方程描述吸附等温线的准确性, 从热力学角度探讨 PAC 对苯的吸附机理, 以期对使用 PAC 处理受苯污染的水源提供参考依据.

收稿日期: 2009-04-23.

基金项目: 国家“十一五”重大水专项(2009ZX07424-005-01);

中国博士后科学基金资助项目(20080430910);

哈尔滨市科技创新人才基金(2009RFQXS010).

作者简介: 王兆之(1985—), 男, 博士研究生;

陈忠林(1967—), 男, 教授, 博士生导师;

李圭白(1931—), 男, 博士生导师, 中国工程院院士.

1 实验

1.1 实验配水

实验用水采用去离子水 ($\rho(\text{TOC}) < 0.2 \text{ mg/L}$) 配制,苯(分析纯)溶于少量甲醇(色谱纯,DIKMA)中,然后用去离子水稀释至所需浓度,每次实验用水均为新鲜配制。

1.2 实验用炭

采用河南巩义先科供水材料有限公司提供的两种粉末活性炭(木质炭和煤质炭)。过孔径为 $74 \mu\text{m}$ 筛,使粒径分布大体一致,再用去离子水冲洗 3 遍,以去除杂质。将粉末活性炭放在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 的电热烘箱中 48 h,然后放置于干燥器中冷却至室温^[8]。

1.3 粉末活性炭孔径分布

粉末活性炭孔径特征采用 ASAP2020M 全自动比表面积及孔隙度分析仪在 77 K 温度下氮气吸附分析测定。ASAP2020M 自带软件提供了分析样品的 BET 表面积 (S_{BET})、微孔表面积 (S_{mic})、外表面积 (S_{ext})、总孔容积 (V_{tot})、微孔容积 (V_{mic})、平

均孔径 (D_{mean}) 和孔径分布 (PSD)。SBET 根据氮气的吸附等温线计算得出, V_{tot} 是在相对压力 p/p_0 为 0.973 时根据吸附在样品上氮气体积计算而得, S_{mic} 、 S_{ext} 和 V_{mic} 根据 $t - \text{plot}$ ^[9] 法计算得出, V_{mic} 、 D_{mean} 和 PSD 是由 BJH 吸附模型计算得到^[10]。

1.4 粉末活性炭化学性质

Boehm 滴定法测定表面基团^[11]。

1.5 吸附实验

准备 20 个体积为 100 mL 的瓶子,分两组,在瓶中投加 1 mg 至 10 mg 的苯,在含苯溶液中分别投加 5 mg 粉末活性炭,玻璃瓶用内衬四聚氟乙烯的胶塞盖上。放入气浴恒温摇床,震荡 7 d。吸附温度分别控制在 288, 298, 308 K, pH 为在 7.0。平衡质量浓度使用紫外分光光度计测定,吸附波长为 254 nm。每次吸附测量重复 3 次。粉末活性炭吸附量由最初液相质量浓度和平衡质量浓度决定:

$$q_e = (\rho_0 - \rho_e)V/m \quad (1)$$

ρ_0 和 ρ_e 分别为初始和平衡质量浓度, V 为溶液体积, m 为粉末活性炭的质量。

表 1 活性炭的孔结构特征

PAC 种类	$S_{\text{BET}}/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	$S_{\text{ext}}/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	$S_{\text{mic}}/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	$V_{\text{tot}}/(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$V_{\text{mic}}/(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$D_{\text{mean}}/\text{nm}$
木质炭	1 190	724	563	0.812	0.223	3.3
煤质炭	918	587	320	0.513	0.105	3.6

2 结果与讨论

2.1 PAC 的物理化学特性

PAC 的物理特征,尤其是孔径分布,是影响活性炭吸附性能的重要因素。根据国际理论和应用化学学会(IUPAC)的分类标准,活性炭孔径分为 4 种类型:大孔 ($> 50 \text{ nm}$),中孔 ($2 \sim 500 \text{ nm}$),二级微孔 ($0.8 \sim 2 \text{ nm}$),一级微孔 ($< 0.8 \text{ nm}$)^[12]。苯为非极性憎水的小分子有机物(相对分子质量为 72),因为 C—H 键长为 0.108 nm , C—C 键长为 0.14 nm ,此数值介于单双键长之间,由苯分子结构可计算出其半径 $< 2 \text{ nm}$,因此,粉末活性炭主要通过微孔对其进行物理吸附。木质炭和煤质炭的平均粒径相差不大(表 1),但是其微孔面积 ($S_{\text{mic}} = 563$) 和微孔容积 ($V_{\text{mic}} = 0.223$) 几乎接近煤质炭 ($S_{\text{mic}} = 320$, $V_{\text{mic}} = 0.105$) 微孔的 2 倍,因为微孔吸附对小分子苯起到主要吸附作用,其吸附性能远远优于煤质炭。

在苯分子通往微孔的过程中,PAC 的表面化学性质对其输送、排斥、吸附过程也是不容忽视的。一个高极性的表面易于吸附高极性物质,Gasser^[13] 的实验报道了木炭在对苯与乙酸的混合物吸附中,木炭更容易吸附乙酸,这是由于炭表面有

许多含氧基团,易于和极性物质形成很强的氢键。而苯在表面上的化学吸附主要是通过 π 电子与表面正电荷基团的连接 (π 键为缺电子基团提供电子)。在单纯水溶液中,与苯产生竞争性吸附的主要物质还是水分子。炭与水分子之间的弱色散力和强氢键是影响 PAC 吸附目标物的主要原因。炭表面的极性含氧基团主要有羧基、羰基、羟基等,而羧基是形成氢键的主要基团,它会对一些水分子形成强有力的吸附位点,吸附在上面的水分子会作为成核中心而继续吸附其他水分子,形成聚合物连接在羧基上,影响对苯的吸附。下式为 Dubinin 和 Sperpinsky (DS) 公式(表征活性炭吸附水分子的等温线)^[14]:

$$a = c(a_0 + a)kh.$$

a 为吸附量, a_0 为高能量亲水吸附中心(表面极性基团), h 为相对压差 (p/p_s , p 和 p_s 分别指平衡和饱和压力), c 为表征吸附和脱附动力的速率常数 ($k_{\text{ads}}/k_{\text{des}}$), k 表征吸附过程中失去的第二位点(即能够吸附水分子形成晶核的极性基团)。

将式(2)转化为 Langmuir 的形式:

$$a = a_0ckh/(1 + ckh) \quad (1)$$

a_0 与表面极性基团(主要是羧基)有正相关性,从表 2 可知,煤质炭羧基浓度为 $0.031 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,

木质炭为 $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 煤质炭的 $a_0 >$ 木质炭 a_0 , h 为常数, 在假定 ck 为常数(此常数与粉末活性炭的表面性质主要是极性基团有关), 从式(1)可知煤质炭的 $a >$ 木质炭的 a , 煤质炭对水分子的吸附大于木质炭, 即木质炭更易于吸附苯。

表2 粉末活性炭表面化学性质 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$

PAC 种类	羧基	内酯酸基	酚基	酸度	碱度
木质炭	0	0.029	0.177	0.206	0.523
煤质炭	0.031	0.054	0.313	0.398	0.463

2.2 吸附等温线

传统的 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温线广泛用于吸附气体或溶液中^[15], Langmuir 方程是基于单层吸附^[16], Freundlich 方程在低压和高压下描述的真实性不可靠; 国外使用 Sips 和 Toth 等温线描述吸附过程, Sips 方程在低压条件下描述的真实性不可靠, 而 Toth 方程满足低压和高压的局限性^[17], Artur 认为 Toth 方程最适合描述活性炭吸附水中有机物。

1) Langmuir 吸附等温线方程. 等温线方程为

$$q_e = q_m K_L \rho_e / (1 + K_L \rho_e). \quad (2)$$

q_e 为吸附量, q_m 为最大吸附量, K_L 为 Langmuir 常数, ρ_e 为平衡质量浓度。

2) Freundlich 等温线方程. 等温线方程为

$$q_e = A \rho_e^n. \quad (3)$$

A 和 n 为 Freundlich 常数。

3) Sips 方程. sips 方程也被称为 Langmuir - Freundlich 方程:

$$q_e = q_0 \frac{(d\rho_e)^{1/S}}{1 + (d\rho_e)^{1/S}}. \quad (4)$$

q_0, d 和 S 都是参数, S 表征粉末活性炭的异向性,

$$d = d_0 \exp[(\Delta H / (RT_0))(T_0 / T - 1)], \quad (5)$$

$$1/S = 1/S_0 + (\beta/T)(T - T_0).$$

将式(4)和(5)带入式(3), 得

$$q_e = q_0 \frac{\left(d_0 \exp\left(\frac{\Delta H}{RT_0}\left(\frac{T_0}{T} - 1\right)\right) \rho_e \right)^{1/S_0 + \frac{\beta}{T}(T - T_0)}}{1 + \left(d_0 \exp\left(\frac{\Delta H}{RT_0}\left(\frac{T_0}{T} - 1\right)\right) \rho_e \right)^{1/S_0 + \frac{\beta}{T}(T - T_0)}}. \quad (6)$$

表3 两种等温线(式(6)和(10))对木质炭在不同温度下的拟合参数

温度/K	Sips					R^2_{sips}	Toth					
	$q_0/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$d_0/$ ($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$)	S_0	$-\Delta H/$ ($\text{kJ} \cdot \text{mol}$)	β		R^2_{toth}	$q_0/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$b_0/$ ($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$)	t_0	$-\Delta H/$ ($\text{kJ} \cdot \text{mol}$)	α
288	235.8	0.037	1.605			0.972	266.7	0.2229	0.4517		0.974	
298				34.31	1.924	0.964				25.497	5.076	0.969
308						0.976						0.978

T_0 为标准温度, 这里 $T_0 = 298 \text{ K}$, d_0 和 S_0 为参数 d 和 S 分别在标准温度下的特定数值. ΔH 为吸附焓, β 为常数. $q_0, d_0, S_0, \Delta H$ 和 β 这5个常数通过实验数据获得。

4) Toth 等温线方程. 等温线方程为

$$q_e = q_0 b \rho_e / [1 + (b \rho_e)^t]^{1/t}. \quad (7)$$

b 和 t 是温度的函数:

$$b = b_0 \exp[\Delta H / (RT_0)(T_0 / T - 1)], \quad (8)$$

$$t = t_0 + \alpha(1 - T_0 / T). \quad (9)$$

$q_0, b_0, t_0, \Delta H$ 和 α 是通过实验数据求得的参数. $T_0 = 298 \text{ K}$ 作为标准温度。

将式(8)和(9)代入式(7)得

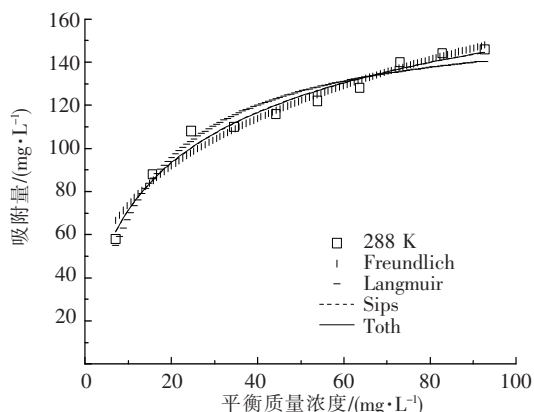
$$q_e = q_0 b_0 \exp\left(\frac{\Delta H}{RT_0}\left(\frac{T_0}{T} - 1\right)\right) \rho_e / \left\{ 1 + \left[b_0 \exp\left(\frac{\Delta H}{RT_0}\left(\frac{T_0}{T} - 1\right)\right) \rho_e \right]^{t_0 + \alpha\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)} \right\}^{\frac{1}{t_0 + \alpha\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)}}. \quad (10)$$

使用 Sips 和 Toth 等温线方程(式(6), (10))对木质炭吸附苯进行拟合(表3), 不同温度下 Sips 方程相关系数(0.972, 0.964, 0.976), Toth 方程相关系数(0.974, 0.969, 0.978); 使用式(4), (7)对相同数据进行拟合(见表4), 不同温度下 Sips 方程相关系数(0.970, 0.964, 0.973), Toth 方程相关系数(0.972, 0.969, 0.974), 可见, 使用式(6), (10)和式(2)~(4), (7)拟合后的相关系数非常接近, 而后者比前者拟合过程简单许多. 因此, 采用式(4), (7)对不同温度下的两种炭吸附苯进行拟合, 结果(表4和图1~3)表明, Toth 等温线的拟合效果最好, 与 Artur 的研究结果一致^[17], Sips 等温线其次, Langmuir 和 Freundlich 在不同情况下的拟合结果不尽相同, 总体上 Freundlich 等温线的拟合效果优于 Langmuir. 从4个等温方程的表征最大吸附量参数 q 值可知, 木质炭的吸附性能总体上优于煤质炭。

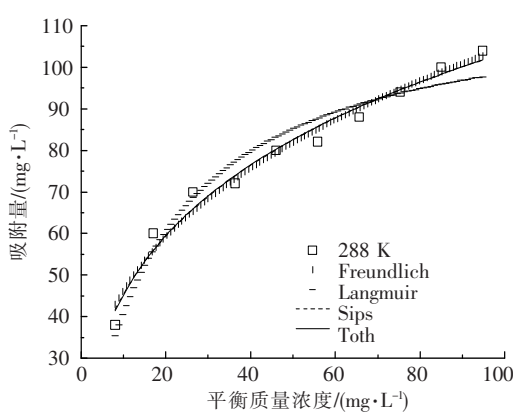
表 4 4 种等温线对两种炭在不同温度下的拟合参数

PAC 种类	T/K	Langmuir			Freundlich		
		$q_m / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$K_L / (\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$	R^2_{Langmuir}	$A / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$1/n$	$R^2_{\text{Freundlich}}$
木质炭	288	161.2	0.073 0	0.957	36.200	0.311	0.963
	298	177.4	0.081 9	0.957	43.300	0.296	0.960
	308	197.3	0.094 0	0.965	53.000	0.279	0.957
煤质炭	288	116.9	0.053 7	0.948	20.434	0.355	0.974
	298	127.9	0.061 5	0.957	33.020	0.283	0.970
	308	150.7	0.070 2	0.951	66.300	0.179	0.926

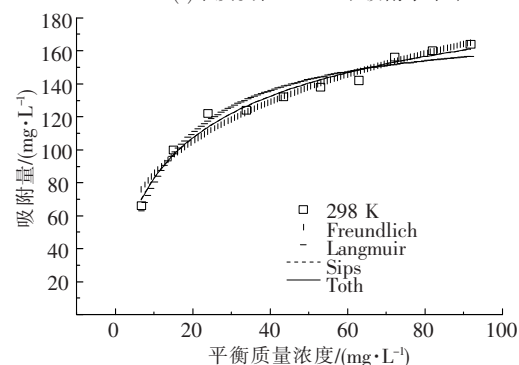
PAC 种类	T/K	Sips			Toth				
		$q_0 / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$d / (\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$	S	R^2_{sips}	$q_0 / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$b / (\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$	t	R^2_{toths}
木质炭	288	225.4	0.028	1.648	0.970	263.7	0.209	0.421	0.972
	298	235.8	0.037	1.605	0.964	266.7	0.223	0.452	0.969
	308	237.6	0.058	1.456	0.973	255.4	0.199	0.545	0.974
煤质炭	288	322.6	0.002	2.170	0.971	702.5	0.625	0.194	0.972
	298	185.4	0.028	1.802	0.974	218.2	0.371	0.376	0.976
	308	164.8	0.179	1.410	0.955	168.3	0.445	0.626	0.956



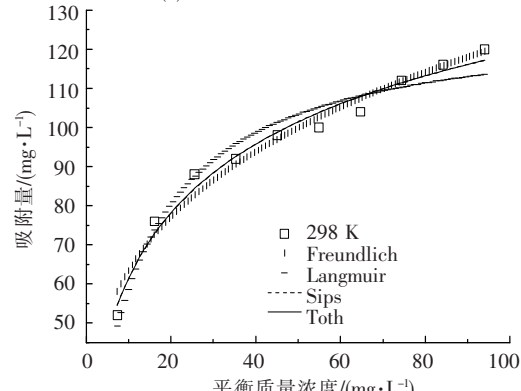
(a)木质炭在 288 K 下吸附水中苯



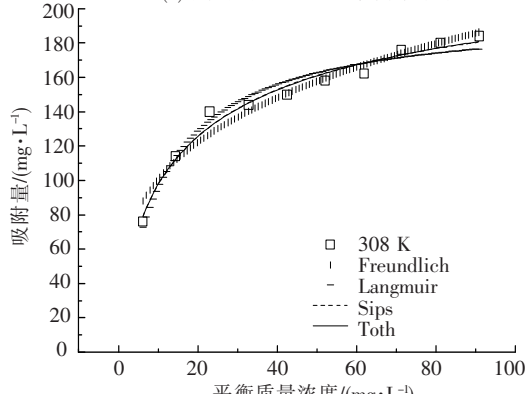
(d)煤质炭在 288 K 下吸附水中苯



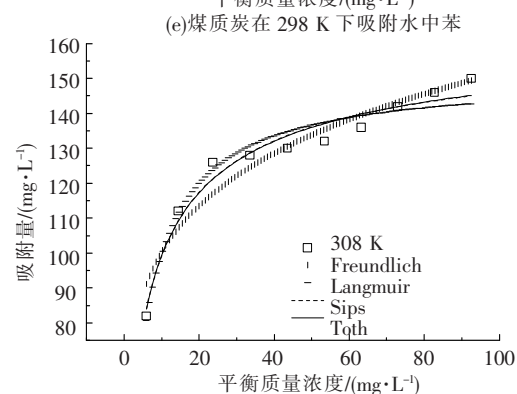
(b)木质炭在 298 K 下吸附水中苯



(e)煤质炭在 298 K 下吸附水中苯



(c)木质炭在 308 K 下吸附水中苯



(f)煤质炭在 308 K 下吸附水中苯

图 1 4 种等温线拟合不同温度下两种炭吸附苯

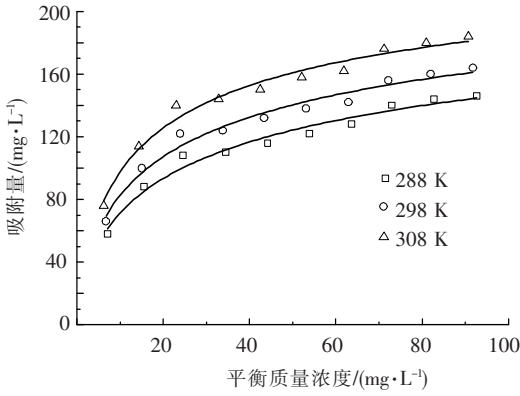


图 2 Toth 等温线拟合不同温度下木质炭吸附苯

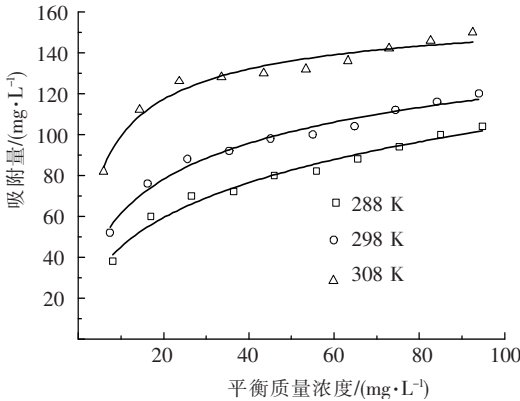


图 3 Toth 等温线拟合不同温度下煤质炭吸附苯

表 5 两种炭吸附热力学参数

PAC 种类	T/K	$K_d / (\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$-\Delta G^0 / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\Delta H^0 / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\Delta S^0 / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$
木质炭	288	8 169	21.704		
	298	9 850	22.903	12.827	119.9
	308	12 258	24.102		
煤质炭	288	4 691	20.411		
	298	5 890	21.550	12.380	113.86
	308	6 978	22.689		

注： ΔH^0 及 ΔS^0 为平均值。

由表 5 可知, 吸附自由能变 ΔG^0 为负值, 表明反应是一个自发过程, 而且木质炭的 $-\Delta G^0$ 大于煤质炭的 $-\Delta G^0$, 说明木质炭更易于吸附苯, 与上文提到的煤质炭由于表面化学基团丰富, 水分子对煤质炭吸附苯产生竞争是一致的。

$\Delta H^0 > 0$, 表明吸附是吸热过程, 与 Herman^[1] 的研究一致。Hulscher 和 Cornelissen^[19] 认为, 在吸附过程中通常有两种类型的力在起作用: 一种作用力与焓变有关(范德华力、氢键、配位基交换、偶极间力和化学吸附等); 另一种是与熵变有关的作用力, 在液相中主要指溶解在吸附质周围的高度规整的水化膜的消失而引起是混乱度的增加。煤质炭富含羧基, 因此易于和水形成氢键, 远大于苯吸附在炭上的偶极间力, 从而对苯的吸附焓小于木质炭对苯的吸附焓。

$\Delta S^0 > 0$, 理论上说明吸附不可逆, 实际中表

2.3 吸附热力学参数解析

平衡分配系数 K_d 决定苯在 PAC 上的吸附, 被定义为^[18]

$$K_d = \left(\frac{x}{y}\right) \times \left(\frac{v}{m}\right).$$

x 和 y 分别表示某物质被吸附的量和在溶液中的量, v 为溶液体积 (cm^3), m 为吸附剂质量 (g). 本文中, K_d 通过下式求得:

$$K_d = \frac{(\rho_0 - \rho_e)}{\rho_e \times v/m}.$$

ρ_0, ρ_e, v, m 的含义与上文相同。

应用吉布斯方程可计算温度对平衡分配系数 k_d 的影响:

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_d,$$

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0,$$

$$\ln K_b = \frac{\Delta S^0}{R} - \frac{\Delta H^0}{(RT)}.$$

K_d 为平衡分配系数 ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$), ΔS^0 为标准吸附熵变 ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$), ΔH^0 为标准吸附焓变 ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$), ΔG^0 为标准吸附自由能变 ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$).

明苯倾向于吸附在 PAC 上. 一般来说, 气体分子在固体上的吸附, 由杂乱无章的气态变成了在固体吸附剂表面相对整齐的排列, 熵变小于零. 但在复杂的溶液吸附体系中, 同时存在苯的吸附和水分子的解吸, 苯吸附在吸附剂上, 自由度减少, 是一个熵减小的过程, 而水分子的解吸是一个熵增过程, 苯分子体积大于水分子, 因此, 每一个苯分子的吸附伴随着数量更多的水分子的脱附, 结果脱附引起的熵增远大于苯吸附的熵减过程, 从而熵变为正. 由于煤质炭对水分子的吸附力较强, 难以脱附, 导致熵增过程小于木质炭脱附水的熵增过程, 因此熵变小于木质炭的熵变。

3 结 论

1) 木质炭微孔面积和体积远大于煤质炭的微孔面积和体积; 煤质炭表面化学基团丰富, 含有

大量羧基,易于和水分子产生氢键从而吸附水分子;木质炭更易于吸附苯。

2) 4 种等温线方程拟合结果显示:Toth 等温线拟合粉末活性炭吸附苯效果最好,Sips 其次,而 Langmuir 和 Freundlich 等温线拟合效果一般,Freundlich 等温线优于 Langmuir。

3) 木质炭吸附苯的吉布斯自由能变 ($-\Delta G^0$)、焓变 (ΔH^0)、熵变 (ΔS^0) 均大于煤质炭的,这与木质炭更易吸附苯一致。

参考文献:

- [1] HINDARSO H, ISMADJI S, WICAKSANA F, *et al.* Adsorption of benzene and toluene from aqueous solution onto granular activated carbon[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2001, 46: 788 - 791.
- [2] GAUDEN P A, TERZYK A P, WIERTNIA M S C. Benzene adsorption on carbonaceous materials: The influence of pore structure on the state of the adsorbate[J]. *Applied Surface Science*, 2006, 253: 2525 - 2539.
- [3] GOWOREK J, WIATKOWSKI A, BINIAK S. Characterization of modified active carbons by adsorption of pure water and benzene vapors and ternary liquid mixture Benzene + Diethyl Ketone + *n* - Heptane [J]. *Langmuir*, 1997, 13: 1225 - 1228.
- [4] MORENO - CASTILLA C, CARRASCO - MARIN F, LOPEZ - RAMON M V. Micropore structure of activated carbons prepared from a spanish subbituminous coal studied by CO₂, benzene, and cyclohexane adsorption [J]. *Langmuir*, 1995, 11: 247 - 252.
- [5] SHIH Y H, LI M S. Adsorption of selected volatile organic vapors on multiwall carbon nanotubes[J]. *Journal of Hazardous Material*, 2008, 154: 21 - 28.
- [6] BANSODE R R, LOSSO J N, MARSHALL W E. Adsorption of volatile organic compounds by pecan shell and almond shell - based granular activated carbons [J]. *Bioresource Technology*, 2003, 90: 175 - 184.
- [7] QIN Hua, JIN Jun li, ZHENG Pinghao. Dynamic adsorption of volatile organic compounds on organofunctionalized SBA - 15 materials [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 9(149): 281 - 288.
- [8] LCHIANG H, HUANG C P, CHIANG P C. The adsorption of benzene and methylethylketone on to activated carbon: thermodynamic aspects [J]. *Chemosphere*, 2002, 46: 143 - 152.
- [9] SING K S W, EVERETT D H, HAUL R A W, *et al.* Reporting physisorption data for gas/solid systems, with special reference to the determination of surface area and porosity [J]. *Pure and Applied Chemistry*, 1985, 57: 603 - 619.
- [10] JUANG R S, WU F C, TSENG R L. Mechanism of adsorption of dyes and phenols from water using activated carbons prepared from plum kernels [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2000, 227: 437 - 444.
- [11] WIBOWO N, SETYADHI L, WIBOWO D, *et al.* Adsorption of benzene and toluene from aqueous solutions onto activated carbon and its acid and heat treated forms: Influence of surface chemistry on adsorption [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 146: 237 - 242.
- [12] MCNAUGHT A D, WILKINSON A. *Compendium of Chemical Terminology* [M]. 2nd ed. Blackwell Science: Malden, MA, 1997.
- [13] TERZYK A P, RYCHLICKI G, WIERTNIA M S, *et al.* Effect of the carbon surface layer chemistry on benzene adsorption from the vapor phase and from dilute aqueous solutions [J]. *Langmuir*, 2005, 21: 12257 - 12267.
- [14] FURMANIAK S, GAUDEN P A, TERZYK A P, *et al.* Water adsorption on carbons: Critical review of the most popular analytical approaches [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2008, 137: 82 - 143.
- [15] 朱利中, 杨坤, 许高. 对硝基苯酚在沉积物上的吸附特征: 吸附等温线和吸附热力学 [J]. *环境科学学报*, 2001, 21(6): 674 - 678.
- [16] BESEDOV? E, BOBOK D. Single-component and binary adsorption equilibrium of 1, 2-dichloroethane and 1, 2-dichloropropane on activated carbon [J]. *Petroleum & Coal*, 2005, 47(2): 47 - 54.
- [17] TERZYK A P, CHATAS J, GAUDEN P A. Developing the solution analogue of the Toth adsorption isotherm equation [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003(266): 473 - 476.
- [18] KHAN S A, REHMAN R U, ALI KHAN M. Adsorption of Chromium (III), Chromium (VI) and Silver (I) on bentonite [J]. *Waste Management*, 1995, 15(4): 271 - 282.
- [19] 舒玉红, 贾晓珊. CTMAB - 膨润土从水中吸附氯苯类化合物的机理 - 吸附动力学与热力学 [J]. *环境科学学报*, 2005, 25(11): 1530 - 153.

(编辑 刘 彤)