

氧化硅纳米多孔材料表面的 水蒸气吸附动力学研究

张虎¹, 谷伟¹, 李增耀¹, 陶文铨¹, 胡子君²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 航天材料工艺研究所, 100076, 北京)

摘要: 采用称重法对氧化硅纳米多孔材料在温湿环境中的水蒸气吸附规律进行了实验研究. 在 25 ℃ 分别测定了不同孔隙率的材料在水蒸气相对蒸汽压为 0.3~0.9 范围内的吸附动力学曲线. 分别采用不同的多层吸附等温式对材料的吸附等温线进行拟合, 提出了一种双指数衰减动力学吸附模型方程, 并和准一/二级动力学吸附模型一起对实验结果进行了拟合. 结果表明: Redlich-Peterson、Fritz-Schlünder 吸附等温式和 BET 多层吸附模型的拟合相关系数较大; BET 多层吸附模型的拟合参数可给出单层饱和吸附量和吸附层数, 吸附等温线由单层到多层存在临界点, 具有明显的物理意义; 氧化硅纳米多孔材料对湿空气中水蒸气的动态吸附过程可由双指数衰减模型来描述, 与实验数据的相关系数在 0.99 以上, 在整个吸附过程中均与实验数据拟合良好.

关键词: 氧化硅纳米多孔材料; 吸附动力学; 吸附等温式; 双指数衰减模型

中图分类号: TB383; O647.32 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)03-0001-08

Experimental Study on Kinetics of Water-Vapor Sorption on Surface of Silica Nano-Porous Materials

ZHANG Hu¹, GU Wei¹, LI Zengyao¹, TAO Wenquan¹, HU Zijun²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Aerospace Institute of Materials and Processing Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: The thermal gravimetric method was adopted to measure the water-vapor sorption of silica nano-porous materials in the thermal and moisture environment. The water-vapor sorption kinetics was experimentally investigated at environmental temperature 25 ℃ and different relative pressure of vapor from 0.3 to 0.9. The sorption equilibrium data were fitted with different equations. An exponential decay-2 model was proposed based on the experimental data and was compared with the pseudo-first-order and the pseudo-second-order equations. The results show that the correlation coefficients of the Redlich-Peterson equation, the Fritz-Schlünder equation and the BET finite layer equation are higher than those of the other models; the BET model is more reasonable because it can present the monolayer saturation sorption capacity and the sorption layer number, and the sorption equilibrium curve of materials exists an inflection point from monolayer sorption to multilayer sorption. In addition, the kinetics of water-vapor sorption on the surface of silica nano-porous materials can be described by the decay-2 model with correlation coefficients above 0.99, and the decay-2 model fits well with the experimental values in the whole sorption process.

Keywords: silica nano-porous material; sorption kinetics; sorption equilibrium; exponential decay-2 model

气凝胶具有复杂的空间结构,在光学、热学、声学、催化等方面具有独特的性质,近年来得到了广泛的应用^[1]. 氧化硅纳米多孔材料与氧化硅气凝胶的空间结构很相似,具有较高的孔隙率和较大的比表面积,常作为隔热材料使用,而未改性的氧化硅纳米多孔材料内表面有大量的硅羟基,会在温湿环境下吸附空气中的水蒸气,从而影响材料长期使用的稳定性. 文献[2-3]采用称重法对氧化硅气凝胶-氯化钙复合干燥剂在不同温度、湿度下的水分传输和吸附进行了实验研究,并采用分形 BET 吸附等温模型进行了分析,得到了材料对比对吸附剂吸附容量和吸附速率的影响规律. Belal 等^[4]分别对微孔和介孔尺寸的氧化硅凝胶进行了水蒸气吸附动力学实验研究,发现微孔氧化硅凝胶具有更高的饱和吸附量,但吸附速率较低. Li 等^[5]对不同表面活性剂处理的氧化硅凝胶进行了温湿环境下的水蒸气吸附实验,获得了不同处理条件下吸附容量随温度、湿度的变化规律. Yang 等^[6]对活性炭上染料的吸附动力学进行了实验研究,提出了一种修正的准一级反应动力学模型,与其实验结果的拟合相关性最高.

目前对于氧化硅纳米多孔材料在不同相对湿度条件下的水蒸气吸附动力学和饱和吸附等温线的实验研究还较少,为了获得多孔材料的水蒸气动态吸附规律、吸附等温线以及吸附容量随相对湿度的变化规律,本文选择 5 种不同孔隙率的氧化硅纳米多孔材料,在 25 ℃ 及不同相对湿度环境下,采用称重法进行了水蒸气动态吸附实验,随后采用 Langmuir、Freundlich、Redlich-Peterson (R-P)、Fritz-Schlünder(F-S)和 BET 多层吸附等温式对氧化硅纳米多孔材料的水蒸气吸附等温线进行分析对比,获得了材料的水蒸气吸附等温线类型,验证了本文提出的双指数衰减动力学模型,并与准一级、准二级动力学模型一起对动态实验结果进行拟合对比,得到了适合氧化硅纳米多孔材料的吸附动力学模型.

1 吸附实验

1.1 实验仪器和过程

氧化硅纳米多孔材料的水蒸气吸附实验在常压下进行,温湿环境由泰斯特 HS800 型恒温恒湿箱提供,其温湿度波动分别为 ± 0.5 ℃ 和 $\pm 3\%$. 材料吸湿称量采用梅特勒 Al204 电子天平,测试精度为 1 mg.

在进行水蒸气等温动态吸附过程之前,必须将材料上的水分彻底排除. 实验中,将恒温恒湿箱设定

为 150 ℃,将材料放入箱内进行干燥处理,间隔一段时间后取出材料称量质量,当相邻几次称量结果不再减小(或持续发生微小波动)时,认为材料除湿完毕,测试误差为 0.01 g,干燥过程一般需要持续 30 h 以上. 材料经干燥处理后取出放入密封袋中,待恒温恒湿箱稳定到设定的温度、湿度后,再将材料称量后放入恒温恒湿箱进行等温动态吸附实验. 吸附过程中每隔一段时间将材料取出,称量后再放回箱中,并记录时间. 在吸附的开始阶段,吸附速率较高,测试间隔应较短(30 min),随着吸附的进行,测试间隔逐渐变长,当材料的质量不再增加后,即认为材料已吸附饱和.

1.2 测试材料与实验工况

5 种不同孔隙率材料的几何参数如表 1 所示,其中表观密度 $\rho_{\text{表}}$ 和孔隙率 ϕ_p 的定义如下

$$\rho_{\text{表}} = \frac{m_{\text{干}}}{V_{\text{宏观}}} \quad (1)$$

$$\phi_p = \frac{V_{\text{孔}}}{V_{\text{宏观}}} = \frac{V_{\text{孔}}}{V_{\text{骨架}} + V_{\text{孔}}} = 1 - \frac{V_{\text{骨架}}}{V_{\text{宏观}}} = 1 - \frac{m_{\text{干}} / \rho_{\text{骨架}}}{m_{\text{干}} / \rho_{\text{表}}} = 1 - \frac{\rho_{\text{表}}}{\rho_{\text{骨架}}} \quad (2)$$

式中: $m_{\text{干}}$ 为材料干燥后的质量; $V_{\text{宏观}}$ 为材料的宏观体积,包括孔隙部分体积 $V_{\text{孔}}$ 和骨架部分体积 $V_{\text{骨架}}$; $\rho_{\text{骨架}}$ 为构成氧化硅纳米多孔材料的骨架密度,本文材料的骨架密度为 2.2 g/cm³.

表 1 材料的几何参数

材料编号	几何尺寸/mm	$\rho_{\text{表}}/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\phi_p/\%$
1	151×151×20.5	0.379 5	77.7
2	150×150×9.5	0.429 2	74.8
3	151×151×9.4	0.414 3	75.6
4	151×151×20.8	0.364 8	78.5
5	149×149×9.2	0.140 3	91.7

由于氧化硅多孔材料吸附水蒸气后会严重影响其隔热和介电性能,而材料的水蒸气吸附主要发生在室温存储环境中,所以本文研究 25 ℃、相对湿度在 30%~90% 范围内的水蒸气动态吸附规律.

2 吸附理论

2.1 吸附等温线

文献[7]对各种吸附等温线及其应用范围作了详细的介绍. 目前应用最普遍的模型为 Fritz 等^[8]提出的多元吸附关联方程

$$q_i = \frac{k_{i0} C_i^{b_{i0}}}{c_i + \sum_{j=1}^n a_{ij} C_j^{b_{ij}}} \quad (3)$$

式中: q_i 、 C_i 分别为平衡时 i 元的固相和液相平衡浓度。对于只含有 i 成分的吸附系统, $C_j=0(j\neq i)$,式(3)简化为单一成分的吸附系统计算式

$$q=\frac{k_sC^{b_1}}{1+a_sC^{b_2}} \tag{4}$$

式中: C 为水蒸气浓度 (mg/L); k_s ((mg/g) · (mg/L)^{-b₁})、 a_s ((mg/L)^{-b₂})、 b_1 和 b_2 均为 Fritz-Schlünder 等温常数。

一些著名的吸附平衡等温式可由式(4)简化获得。

(1)Langmuir 吸附等温式

$$q=\frac{K_LC}{1+a_LC} \tag{5}$$

式中: K_L (L/g)、 a_L (L/mg) 为 Langmuir 等温常数。

(2)Freundlich 吸附等温式

$$q=K_FC^{n_F} \tag{6}$$

式中: K_F ((mg/g) · (L/mg)^{n_F})、 n_F 为 Freundlich 等温常数。

(3)Redlich-Peterson 吸附等温式

$$q=\frac{K_R C}{1+b_R C^\beta} \tag{7}$$

式中: K_R (L/g)、 b_R ((mg/L)^{-β}) 和 β 为 Redlich-Peterson 吸附等温常数。

(4)BET 多层吸附等温式

$$q=\frac{q_m c \phi [1-(n+1)\phi^n+n\phi^{n+1}]}{(1-\phi)[1+(c-1)\phi-c\phi^{n+1}]} \tag{8}$$

式中: q_m 为吸满一层时的饱和吸附量 (mg/g); c 为常数; n 为吸附层数; ϕ 为湿空气的相对湿度,对大气压力条件下的湿空气有

$$\phi=p/p_0\approx C/C_0 \tag{9}$$

其中 C 为水蒸气的浓度 (kg/m³), C_0 为饱和湿空气中水蒸气的浓度。

由式(8)、式(9)可将吸附等温式中的自变量相对湿度转换为水蒸气的浓度,这样可以方便地对上述几种不同的吸附等温式进行比较。

2.2 吸附动力学

2.2.1 准一/二级反应动力学模型 假设吸附是准化学反应过程,吸附速率可由一、二级反应方程描述,有

$$\frac{dq_t}{dt}=k_1(q_e-q_t) \tag{10}$$

$$\frac{dq_t}{dt}=k_2(q_e-q_t)^2 \tag{11}$$

初始条件为

$$t=0, \quad q_t=0$$

式中: q_e 、 q_t 分别为固相吸附平衡和 t 时刻的吸附量

(mg/g); k_1 、 k_2 为相应的速率常数。

式(10)、式(11)对应的解为:

一级

$$\ln(q_e-q_t)=\ln q_e-k_1t \tag{12}$$

二级

$$\frac{t}{q_t}=\frac{1}{k_2q_e^2}+\frac{t}{q_e} \tag{13}$$

研究表明,准二级模型与实验数据拟合良好,可广泛应用于吸附动力学研究^[9-12]。

2.2.2 双指数衰减模型 蒲敏^[13]通过硅钛气凝胶的水蒸气吸附实验,提出了一种单活性位吸附动力学方程

$$q_t=q_e+q_ee^{-t/b} \tag{14}$$

氧化硅纳米多孔材料的水蒸气吸附过程包含扩散和吸附 2 个环节. 本文结合式(14)及拟合过程,发现双指数衰减模型更适于拟合氧化硅纳米材料的水蒸气动态吸附过程,其形式如下

$$q_t=q_e+a_1e^{-t/b_1}+a_2e^{-t/b_2} \tag{15}$$

式中: a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 为拟合参数。

3 结果和讨论

3.1 等温饱和和吸附规律

分别采用 Langmuir、Freundlich、Redlich-Peterson、Fritz-Schlünder 和 BET 多层吸附等温式,对不同孔隙率的氧化硅纳米多孔材料在 25 ℃时的水蒸气饱和吸附等温线进行最小二乘拟合,结果如表 2 所示。

从表 2 中可以看出,Langmuir 吸附等温式的拟合参数 a_L 均小于 0,说明氧化硅纳米多孔材料的水蒸气吸附不是单层吸附,但采用小于 0 的参数拟合时,相关系数在 0.98~0.99 之间,5 种材料的拟合值与实验值的平均偏差范围为 5.8%~8.6%。用 Freundlich 吸附等温式对 5 种材料的实验数据进行拟合的相关系数均不足 0.98,拟合值与实验值的平均偏差范围为 9.9%~14.3%。因此,氧化硅纳米多孔材料的水蒸气吸附等温线不宜采用 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温式描述. Redlich-Peterson、Fritz-Schlünder 和 BET 多层吸附等温式的拟合相关系数均较大,拟合平均偏差范围分别为 1.7%~8.1%、1.1%~6.3%和 2.9%~7.7%,能较好地反映氧化硅纳米多孔材料的水蒸气吸附等温线. Fritz-Schlünder 吸附等温式由于有 4 个待定参数,所以拟合相关性最高,平均偏差最小. Redlich-Peterson 和 BET 三常数吸附等温式都有 3 个待定参数,但前者

表 2 不同吸附等温模型与吸附平衡实验所得数据的拟合参数

等温模型	参数	材料 1	材料 2	材料 3	材料 4	材料 5
Langmuir	a_L	-0.025	-0.027	-0.029	-0.031	-0.033
	K_L	2.09	2.02	2.26	2.04	6.03
	R^2	0.990	0.980	0.987	0.984	0.988
	平均偏差/%	6.7	7.4	7.9	8.6	5.8
Freundlich	K_F	0.86	0.63	0.61	0.43	0.72
	n_F	1.52	1.64	1.72	1.83	2.06
	R^2	0.973	0.965	0.960	0.953	0.973
	平均偏差/%	9.9	10.6	13.0	14.3	11.6
Redlich-Peterson	b_R	-6.75×10^{-7}	-4.77×10^{-8}	-1.41×10^{-6}	-3.35×10^{-7}	-2.15×10^{-3}
	K_R	2.95	3.03	3.45	3.32	7.94
	β	4.33	5.22	4.15	4.64	1.85
	R^2	0.999	0.984	0.998	0.999	0.987
	平均偏差/%	1.7	8.1	2.8	2.6	7.9
Fritz-Schlünder	a_s	-6.79×10^{-5}	-3.41×10^{-31}	-8.92×10^{-4}	-3.09×10^{-5}	-1.89×10^{-30}
	k_s	3.98	1.55	6.03	4.67	2.22
	b_1	0.85	1.29	0.71	0.83	1.63
	b_2	2.89	22.6	2.13	3.21	22.0
	R^2	1.000	0.989	0.999	0.999	0.990
	平均偏差/%	1.1	5.0	1.8	2.1	6.3
BET	q_m	18.3	19.6	21.1	19.8	72.1
	c	8.98	5.49	11.18	11.71	3.24
	n	11.44	11.28	13.94	15.50	13.32
	R^2	0.996	0.974	0.997	0.994	0.982
	平均偏差/%	3.1	6.6	2.9	3.6	7.7

是经验公式,拟合相关性略高,而后者给出了单层饱和吸附量和吸附层数,具有明显的物理意义.通过 BET 吸附等温模型与实验数据的拟合结果可以看出,5 种材料的吸附层数均在 11.28~15.50 范围内,这可能是由于纳米孔隙尺寸限制了吸附的进一步进行.此外,由于材料 5 的孔隙率显著大于其余 4 种材料,其单层饱和吸附量达到了 72.1 mg/g,是其余材料的 3~4 倍,说明其比表面积显著大于其余 4 种材料.由 BET 模型获得的单层饱和吸附量可以用来计算材料的比表面积,这也是氮吸附仪测试材料比表面积的工作原理.

根据表 2 中的拟合结果可知,氧化硅纳米多孔材料的水蒸气等温式不宜采用 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温式描述.为了进一步对比 Redlich-Peterson、Fritz-Schlünder 和 BET 多层吸附等温式对氧化硅纳米多孔材料水蒸气饱和吸附等温线的拟合效果,图 1 给出了 5 种材料采用 3 种吸附等温式对实验数据进行拟合的情况.

从图 1 中可以看出,5 种孔隙率材料的等温饱

和吸附量均随水蒸气浓度的增加而增加,增加的速度先是逐渐减小,随后迅速增大,存在临界转折点.采用 BET 多层吸附等温式很容易分析出,在临界点之前进行的是单层吸附,在临界点之后进行的是多层吸附.由于 BET 模型相比其他 2 种模型既具有较少的待定参数,各参数又具有明显的物理意义,因此在上述 5 种吸附等温式中,BET 多层吸附模型最适合用于描述氧化硅纳米多孔材料的水蒸气饱和吸附等温线.从图中还可以看出,由于材料 5 的孔隙率(91.7%)明显高于材料 1~材料 4 的孔隙率(74.8%~78.5%),在相同浓度下,其等温饱和吸附量显著高于其他 4 种材料,说明孔隙率越高,可参与吸附的空间和表面积就越大,材料的等温饱和吸附量也越大,而其余材料由于孔隙率比较接近,对应的饱和吸附量差别并不明显.

3.2 动态吸附规律

氧化硅纳米多孔材料的水蒸气吸附量随时间的变化曲线反映了吸附过程的快慢及吸附量的大小.利用准一级、准二级动力学模型和双指数衰减模型

对 5 种材料在不同相对湿度下的动态吸附实验数据进行最小二乘拟合,不同材料在不同相对湿度下的拟合相关系数 R^2 如图 2 所示.从图 2 中可以看出,虽然双指数衰减动力学模型和准二级动力学模型与

实验数据的拟合相关系数 R^2 明显优于准一级动力学模型,一般均在 0.99 以上,但是双指数衰减模型的拟合相关性优于准二级动力学模型.

表 3 中给出了部分动态吸附过程的不同动力学

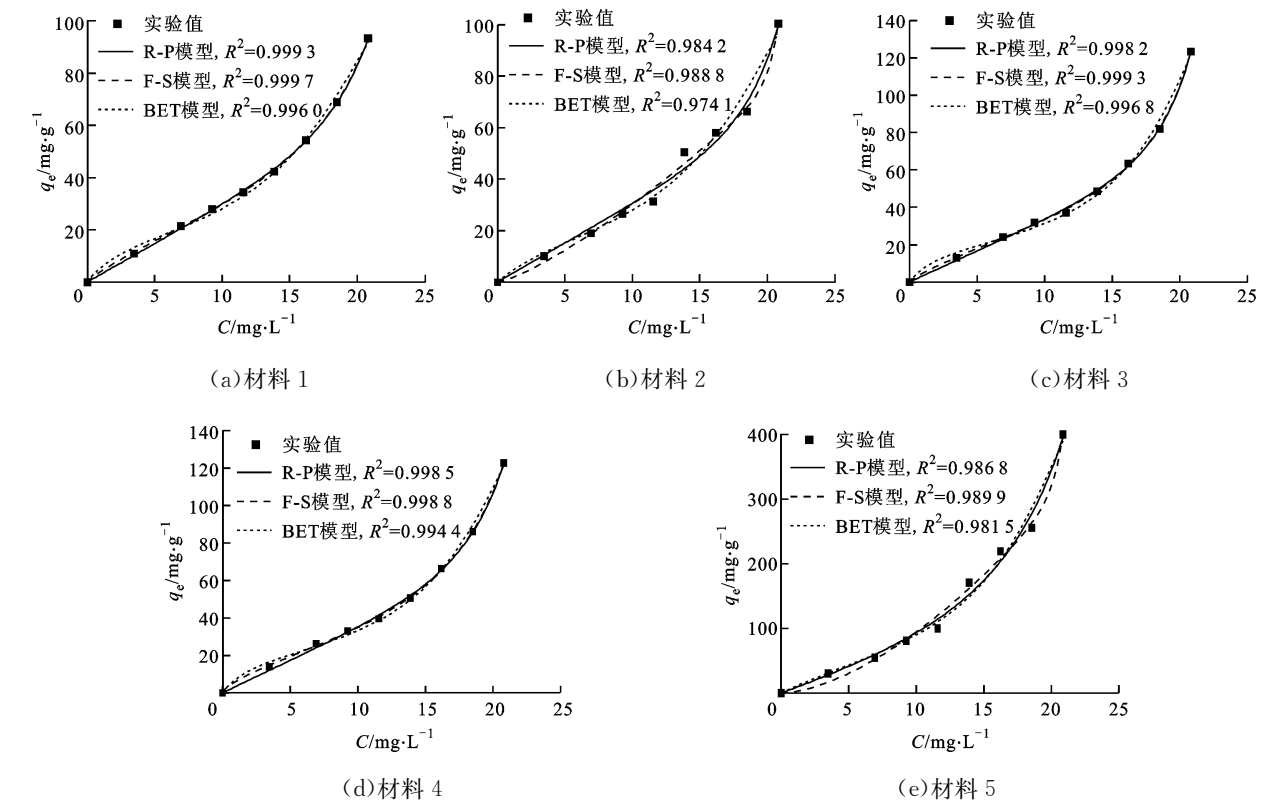


图 1 对 5 种材料采用不同吸附等温模型拟合的结果对比

表 3 动态吸附回归分析结果

材料	$\phi/\%$	准一级模型		准二级模型		双指数衰减模型				
		k_1/min^{-1}	R^2	k_2/min^{-1}	R^2	$a_1/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	b_1	$a_2/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	b_2	R^2
1	30	1.26×10^{-2}	0.987	9.83×10^{-4}	0.994	-5.55	15.46	-15.98	113.12	0.997
	60	8.37×10^{-3}	0.993	2.96×10^{-4}	0.997	-12.97	30.79	-29.31	179.15	1.000
	90	3.29×10^{-3}	0.961	4.99×10^{-5}	0.996	-35.17	69.06	-57.52	723.80	0.996
2	30	5.26×10^{-2}	0.983	8.75×10^{-3}	0.971	-9.48	18.99	-9.48	18.99	0.979
	60	2.76×10^{-2}	0.999	2.03×10^{-3}	0.996	-21.09	32.12	-29.15	49.30	1.000
	90	5.68×10^{-3}	0.985	9.27×10^{-5}	0.987	-27.60	24.98	-72.72	285.20	0.999
3	30	3.37×10^{-2}	0.992	2.87×10^{-3}	0.973	-13.08	29.68	-13.08	29.68	0.990
	60	2.16×10^{-2}	0.998	1.19×10^{-3}	0.995	-18.85	4.29	-31.58	65.03	0.997
	90	6.99×10^{-3}	0.970	9.37×10^{-5}	0.994	-61.17	42.41	-61.23	395.48	0.993
4	30	1.19×10^{-2}	0.984	8.18×10^{-4}	0.994	-6.61	16.61	-17.35	123.55	0.995
	60	8.10×10^{-3}	0.990	2.46×10^{-4}	0.998	-16.42	30.75	-32.25	199.30	1.000
	90	1.62×10^{-3}	0.924	2.20×10^{-5}	0.982	-54.10	248.86	-63.73	203.44	0.995
5	30	8.46×10^{-2}	0.979	1.83×10^{-2}	0.973	-27.53	11.82	-27.53	11.81	0.973
	60	2.69×10^{-2}	0.999	5.86×10^{-4}	0.994	-59.25	1.77	-111.05	47.14	0.998
	90	5.76×10^{-3}	0.981	2.52×10^{-5}	0.955	-51.88	0.82	-348.30	207.71	0.985

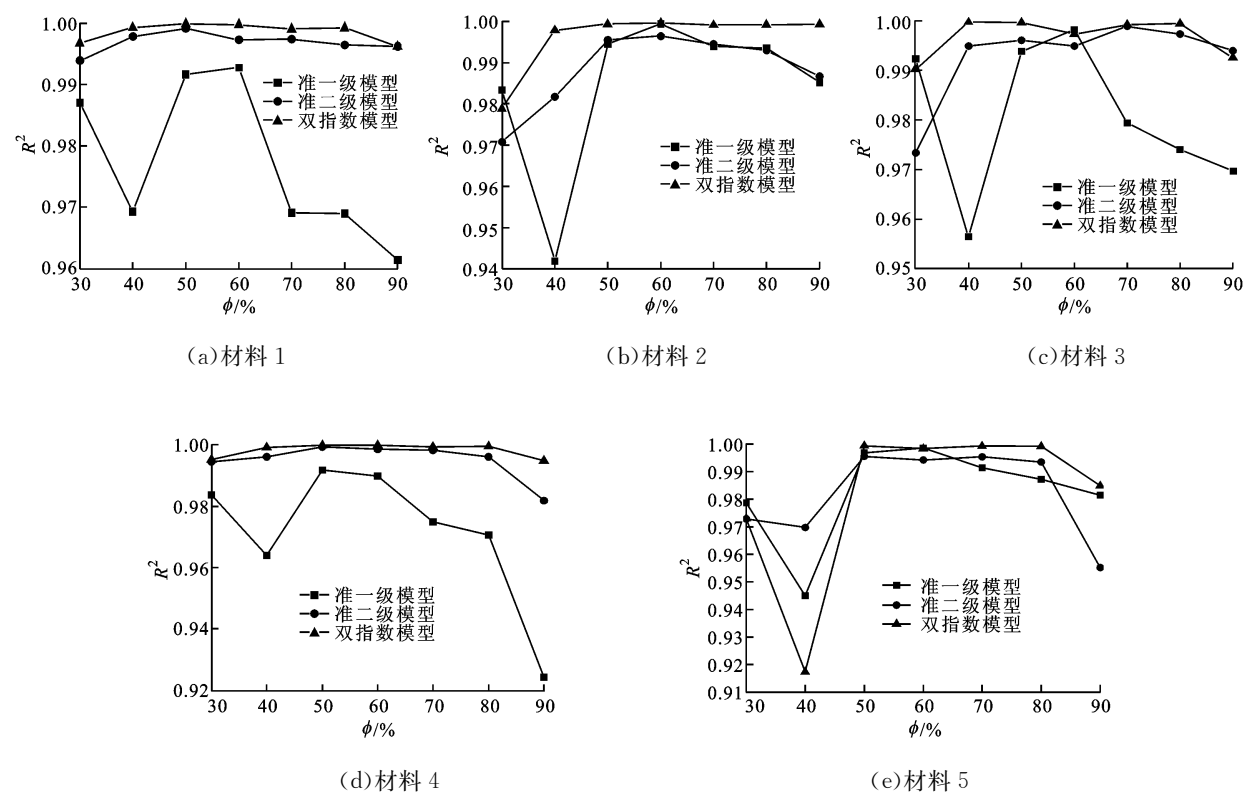


图 2 5 种材料的吸附动力学模型拟合相关系数对比

模型回归分析结果,从中可以看出,对于准一级、准二级动力学模型,速率常数随着相对湿度的增加而减小.双指数衰减模型属于经验公式性质,除饱和和吸附量外,其余参数需对实验数据进行最小二乘拟合后获得,大部分模型的指数和系数(绝对值)数据均随相对湿度的增加而增大.

虽然准二级动力学模型与实验数据的拟合相关系数也达到了 0.99 以上,但是在有些区域却与实验数据明显偏离.图 3 所示为材料 1 在相对湿度为 30%和 60%时 3 种吸附动力学模型的拟合对比情况,在图中箭头所指区域附近,准二级动力学模型与实验数据偏差较大,而双指数衰减模型却能很好地拟合.

为了进一步直观地反映双指数衰减模型与实验数据的拟合情况,对 5 种材料在相对湿度为 30%~90%条件下的吸附动态过程采用双指数衰减模型与实验数据进行拟合,拟合结果如图 4 所示.从图中可以看出,5 种材料在不同的相对湿度下,其动态吸附量均随时间先迅速增加,随后缓慢增加直至饱和.对于相同的材料,相对湿度越大则材料吸附达到饱和所需的时间越长,饱和吸附量越大.材料 5 由于孔隙率显著大于其他 4 种材料,其初始阶段吸附的速率要明显高于其他材料,饱和吸附量也显著大于其他

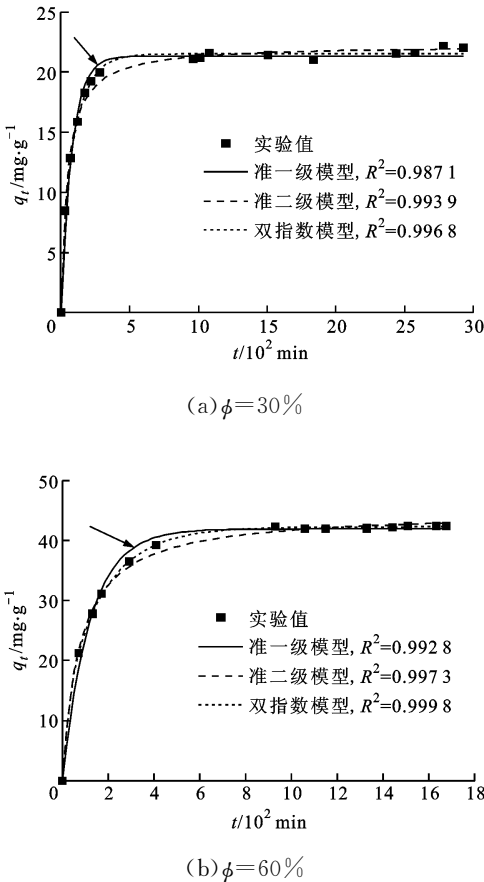


图 3 不同动态吸附模型的吸附动力学曲线对比

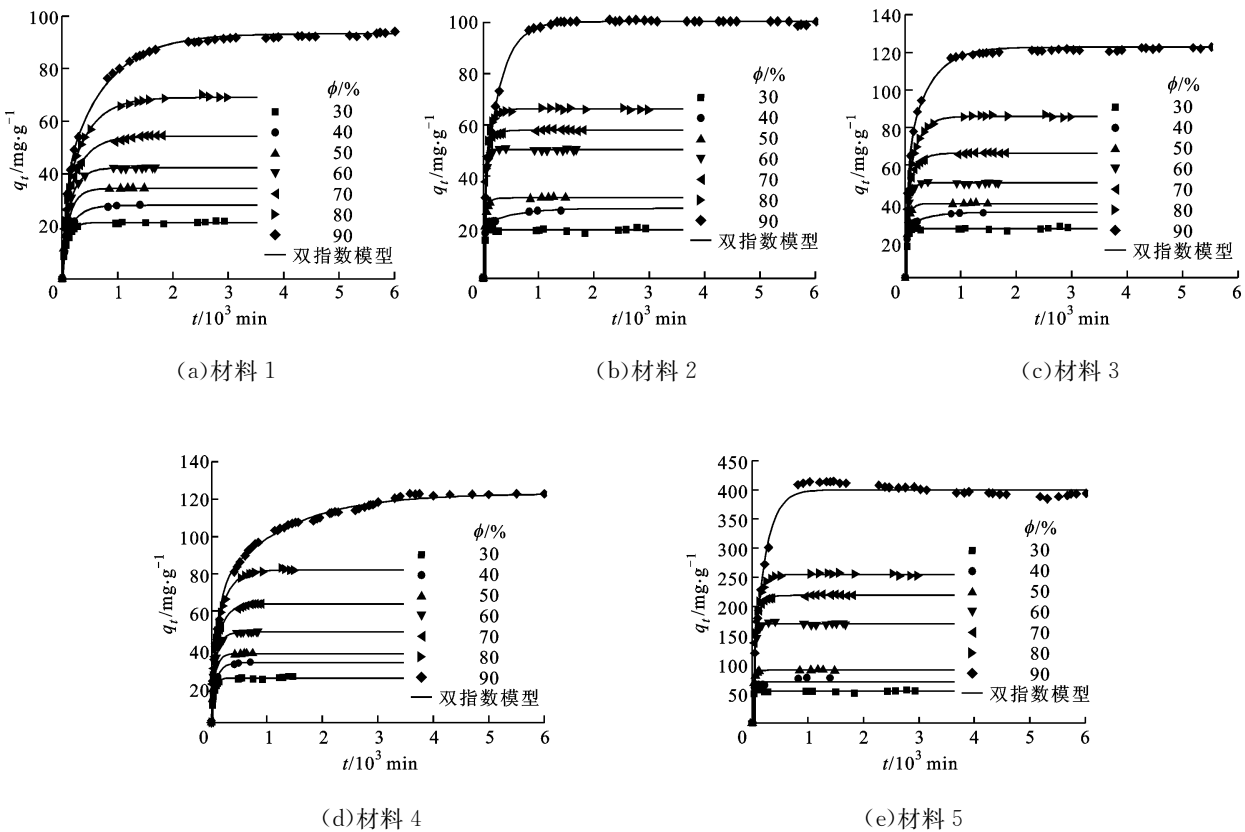


图 4 双指数衰减模型与实验数据拟合对比

材料,说明多孔材料的比表面积对吸附速率和吸附量的影响很大.通过图中双指数衰减模型和动态吸附实验的结果对比可以发现,双指数衰减模型能很好地拟合动态吸附实验数据.由于动态吸附达到吸附饱和的时间最长需要 1 周左右,因此可以通过只进行动态吸附初始阶段的实验,由双指数衰减模型进行拟合预测其饱和吸附量和达到吸附饱和所需的时间,从而节省实验时间.

图 5 给出了 5 种材料的等温饱和吸附量随相对湿度的变化规律,从中可以看出:5 种材料的饱和吸附量均随相对湿度的增加而迅速增加;在相同湿度下,由于材料 5 的孔隙率高于其余 4 种材料,故其饱

和吸附量明显高于其他材料,特别是在相对湿度为 90%的条件下,材料 5 的孔隙率最多仅比其余 4 种材料的大 23%,而其饱和吸附量却大于其余材料至少 3 倍,说明孔隙率对于氧化硅纳米多孔材料的吸附能力影响极大.由于材料 1~材料 4 的孔隙率比较接近,在相同的相对湿度下,4 种材料之间的饱和吸附量差别较小.

4 结 论

(1)氧化硅纳米多孔材料的水蒸气等温吸附过程可由 BET 多层吸附等温模型描述.该模型给出了单层饱和吸附量和吸附层数,前者可以用来估算材料的比表面积.

(2)氧化硅纳米多孔材料的水蒸气等温吸附存在由单层吸附到多层吸附的临界转折点.

(3)提出了一种适合氧化硅纳米多孔材料的水蒸气吸附动力学模型,形如 $q_t = q_e + a_1 e^{-t/b_1} + a_2 e^{-t/b_2}$,与准二级反应动力学模型相比,该模型在全部测试时间和范围内均能与氧化硅纳米多孔材料的水蒸气动态吸附实验数据拟合良好而不发生偏离.

(4)5 种不同孔隙率材料的等温饱和和吸附量随

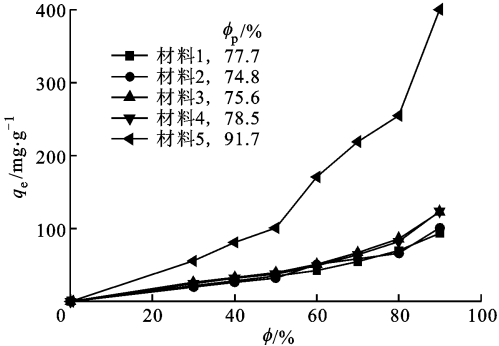


图 5 材料饱和吸附量随相对湿度的变化规律

相对湿度的增加而迅速增加,且受孔隙率的影响较大。

参考文献:

- [1] NICOLA H, ULRICH S. Aerogels-airy materials: chemistry, structure, and properties [J]. *Angew Chem: Int Ed*, 1998, 37(1/2): 22-45.
- [2] ZHANG X J, QIU L M. Moisture transport and adsorption on silica gel-calcium chloride composite adsorbents [J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(1): 320-326.
- [3] ZHANG X J, SUMATHY K, DAI Y J, et al. Parametric study on the silica gel-calcium chloride composite desiccant rotary wheel employing fractal BET adsorption isotherm [J]. *International Journal of Energy Research*, 2005, 29(1): 37-51.
- [4] BELAL D, YURI A. Experimental study on the kinetics of water vapor sorption on selective water sorbents, silica gel and alumina under typical operating conditions of sorption heat pumps [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46(2): 273-281.
- [5] LI Haibin, AI Minghua, LIU Baizhan, et al. Water vapor sorption on surfactant-templated porous silica xerogels [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2011, 143(1): 1-5.
- [6] YANG Xiaoyan, AL-DURI B. Kinetic modeling of liquid-phase adsorption of reactive dyes on activated carbon [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2005, 287(1): 25-34.
- [7] AL-DURI B. A review in equilibrium in single and multicomponent liquid adsorption systems [J]. *Reviews in Chemical Engineering*, 1995, 11(2): 101-144.
- [8] FRITZ W, SCHLÜNDER E U. Simultaneous adsorption equilibria of organic solutes in dilute aqueous solutions on activated carbon [J]. *Chemical Engineering Science*, 1974, 29(5): 1279-1282.
- [9] WU Fengchun, TSENG Ruling, JUANG Rueyshin. Kinetic modeling of liquid-phase adsorption of reactive dyes and metal ions on chitosan [J]. *Water Research*, 2001, 35(3): 613-618.
- [10] CHANG C Y, TSAI W T, ING C H, et al. Adsorption of polyethylene glycol (PEG) from aqueous solu-

tion onto hydrophobic zeolite [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003, 260(2): 273-279.

- [11] ÖZCAN A S, ERDEM B, ÖZCAN A. Adsorption of acid blue 193 from aqueous solutions onto Na-bentonite and DTMA-bentonite [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, 280(1): 44-54.
- [12] CHANG M Y, JUANG R S. Adsorption of tannic acid, humic acid, and dyes from water using the composite of chitosan and activated clay [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, 278(1): 18-25.
- [13] 蒲敏. 硅钛系氧化物气凝胶的纳米结构与量子尺寸效应研究[D]. 西安:西安交通大学, 1999: 26-30.

[本刊相关文献链接]

- 蚕丝蛋白/明胶多孔肝组织支架的制备及性能研究. 2011, 45(11): 121-126.
- 肝组织工程支架的仿生设计与有限元分析. 2011, 45(8): 108-112.
- 气体静压轴承用多孔 SiC 陶瓷的制备及静态性能. 2011, 45(3): 117-120.
- 改性羟基磷灰石/聚乳酸复合材料制备及其生物相容性评价. 2010, 44(12): 114-118.
- 高声压激励下多孔金属材料的吸声性能数值计算. 2010, 44(3): 58-62.
- 室温磁制冷活性蓄冷器多孔介质模型及其数值模拟. 2009, 43(3): 31-35.
- 通孔金属泡沫中的空气自然对流传热实验研究. 2009, 43(1): 1-4.
- 烧结金属纤维多孔材料的高温吸声性能. 2008, 42(11): 1327-1331.
- 丝网回热器中换热性能的优化. 2008, 42(9): 1070-1075.
- 化学液相沉积法制备碳/碳复合材料时的温度场研究. 2008, 42(3): 309-312.
- 烧结金属纤维材料的吸声模型研究. 2008, 42(3): 328-332.
- 多孔纳米 TiO₂ 薄膜的制备及其光催化脱除 NO 的研究. 2008, 42(1): 87-90.
- 声学多孔材料的孔结构优化. 2007, 41(11): 1251-1256.
- 多孔泡沫材料的声吸收特性. 2007, 41(9): 1003-1011.
- 基于多孔介质模型的刷式密封泄漏流动特性研究. 2007, 41(7): 768-771.

(编辑 葛赵青 荆树蓉)