

文章编号:2095-0411(2016)05-0046-08

有机氧化硅空心球的正己烷动态吸附研究

王红宁¹, 王 涛¹, 黄维秋², 钟 璟¹, 陈若愚¹

(1. 常州大学 石油化工学院, 江苏 常州 213164; 2. 江苏省油气储运技术重点实验室(常州大学), 江苏 常州 213016)

摘要:采用模板法合成有机氧化硅空心球(hollow organosiliceous sphere, HOS),以正己烷为吸附对象,考察了载气流速,正己烷浓度和湿度对 HOS 动态吸附的影响,并与商品化的活性炭(activated carbon, AC)进行对比。结果表明 HOS 有较好的动态吸附容量,吸附稳定性高,对正己烷的吸附选择性较高。同时利用 Logistic 模型的回归公式模型对 HOS 和 AC 动态吸附过程的拟合,拟合曲线与实验结果具有高度相似性,可以较为准确地预测 VOCs 动态吸附穿透曲线。

关键词:有机氧化硅空心球;正己烷;动态吸附;穿透曲线

中图分类号:X 701; O 613. 7

文献标志码:A

doi:10. 3969/j. issn. 2095-0411. 2016. 05. 008

Study on Hollow Organosiliceous Sphere for *n*-Hexane Dynamic Adsorption

WANG Hongning¹, WANG Tao¹, HUANG Weiqiu², ZHONG Jing¹, CHEN Ruoyu¹

(1. School of Petrochemical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transport Technology, Changzhou University, Changzhou 213016, China)

Abstract: Hollow organosiliceous sphere (HOS) was synthesized by the template method, the dynamic adsorption performances for *n*-hexane under different *n*-hexane concentration, the flow rate of carrier gas, and humidity were studied with activated carbon (AC) as reference. The experimental results show that HOS has higher *n*-hexane equilibrium adsorption capacity, stability, and higher selectivity for *n*-hexane as compared to AC. At the same time, the dynamic adsorption processes on HOS and AC could be simulated by Logistic model. Fitting curve of Logistic model had high similarity with the experimental results, which could be used in the prediction of breakthrough curves HOS and AC.

Key words: hollow organosiliceous sphere; *n*-hexane; dynamic adsorption; breakthrough curve

汽油及其他轻质油品在集输、炼制、储运、销售过程中不可避免地会挥发,其中的挥发性有机气体(Volatile organic compounds, VOCs)逸入大气,不仅浪费能源、影响安全生产和人体健康,而且降低油

品质量,甚至还能形成光化学烟雾,引起光化学污染^[1-3]。因此,对 VOCs 进行回收是必然选择。常见油气回收方法主要有冷凝法、吸收法、吸附法和膜分离法^[1,4],其中吸附法油气回收工艺应用最为广

收稿日期:2015-12-18。

基金项目:国家自然科学基金项目(21101017, 21571024);江苏省油气储运重点实验室开放课题(cy1201)。

作者简介:王红宁(1980—),女,河南周口人,副教授。通讯联系人:陈若愚(1966—),E-mail:cxdcry@163.com

泛。活性炭是比较常用的油气回收吸附剂^[5],但其吸水容量较高,且在油气吸附过程中的热效应明显,且活性炭孔径较小,易发生孔隙堵塞而导致吸附性能下降,严重影响使用寿命^[6]。因而,亟需疏水性好,吸附容量大,吸附性能稳定,解吸性能良好的吸附剂。

介孔氧化硅材料具有良好的机械稳定性,较大的比表面积,孔容和均一、可调的孔道结构,开放的孔结构,较大的孔隙率,特别是良好的解吸表现,可以作为潜在的 VOCs 吸附材料^[7]。在之前的工作中, MCM-41, MCM-48, SBA-15, KIT-6 和囊泡等^[8-20]作为吸附剂进行 VOCs 动态吸附研究,研究表明介孔氧化硅材料可以克服 AC 的不足,然而因为氧化硅表面有丰富的羟基,在水汽存在时和有机分子存在竞争吸附,从而导致 VOCs 吸附容量下降^[21-22]。因而,需要提高氧化硅材料的疏水性,从而提高其 VOCs 吸附容量。

本研究通过一步法合成有机氧化硅空心球(hollow organosiliceous sphere, HOS),然后选用油气含量中的含量较多的正己烷作为代表,通过 HOS 和 AC 动态实验研究正己烷浓度,载气流速和湿度对正己烷动态吸附的影响,采用 Logistic 模型对动态吸附平衡数据进行拟合分析。

1 实验

1.1 原料与仪器

F108 和 1,2-二乙氧基硅基乙烷(BTSE): Sigma-Aldrich 化学试剂公司;1,3,5-三甲苯(TMB)和二甲基二甲氧基硅烷(DMDMOS)(均为分析纯): Aladdin 化学试剂公司;正硅酸四乙酯(TEOS),浓盐酸,无水乙醇,氯化钠,氢氧化钠和正己烷(均为分析纯): 上海化学试剂公司;活性炭(AC): 福建鑫森炭业股份有限公司;汽油: 中国石化。

透射电子显微镜(JEM-2100),日本电子株式会社;低温恒温槽(DC-1006),上海比朗仪器有限公司;气相色谱仪(GC-950),上海海欣色谱仪器有限公司;动比表面积及孔隙度分析仪(TriStar Tristar II 3020),美国 Micromeritics;温度湿度仪: 广州乐享电子有限公司(8011)。

1.2 实验部分

1.2.1 HOS 的合成

HOS 的合成见文献^[18]。于 25℃ 水浴中,在 100mL 的夹套烧杯中加入 1.0g F108 和 1.0g TMB 和 30mL 2.0mol/L 盐酸,磁力搅拌 6h 后取 0.75g TEOS 和 0.43g BTSE 加入上述搅拌均匀的表面活性剂的溶液中,然后在相同温度下继续搅拌 6h,然后加入 0.5g DMDMOS,在 25℃ 恒定温度条件下持续搅拌 24h,在 100℃ 条件下水热 24h。产物在去离子水中透析至 pH 为中性,100℃ 烘干后,以无水乙醇为溶剂,在 80℃ 条件下回流萃取去除表面活性剂 F108。

1.2.2 样品表征

TEM 照片由日本 JEOL JEM2000 型高分辨透射电镜获得,加速电压为 200kV。样品在乙醇中超声分散 5min,用负载了碳膜的铜网挂取该混合物,干燥后用于观察。采用美国 Tristar II 3020 测样品的 N₂ 吸附-脱附曲线,并通过 BET(Brunauer-Emmett-Teller)方程计算样品的比表面积,采用 BJH(Barrett-Joyner-Halenda)模型根据等温线吸附分支计算样品的孔径分布^[23],采用 t-plot 法计算样品的微孔比表面积和孔容^[24]。样品 N₂ 吸附-脱附等温线于-196℃ 下测定,此前 110℃ 烘箱中脱气预处理 10h。

1.2.3 动态吸附实验

动态吸附实验中采用动态配气法^[9]产生高浓度正己烷气体,与另一路空气混合并流经缓冲瓶,通过调节两路气体的流量及温控水浴温度(25℃),形成质量浓度约为 0.40~0.50g/L 的正己烷气体,通过流量计控制流速(0.050L/min 和 0.135L/min),气体通过吸附柱进行吸附。吸附柱内径 0.8cm,高 10cm。入口和出口处的正己烷气体浓度通过气相色谱(GC)进行分析。色谱检测条件为火焰离子化检测器(FID),毛细管注样系统,柱温 100℃,检测器温度 150℃,辅助器温度 150℃。穿透点取出口浓度(C_A)为入口浓度(C_0)的 10%时,从气体流入吸附柱至此时的时间就是穿透时间,吸附平衡为以时间为横坐标,以 C_A/C_0 为纵坐标绘制曲线,即为穿透曲线。动态平衡吸附容量(q_e)是根据穿透曲线进行测定,计算公式如下

$$q_e = \frac{F_A \int (1 - \frac{C_A}{C_0}) dt}{m} \quad (1)$$

式中: q_e 表示吸附剂的动态平衡吸附容量(平衡即出口浓度稳定,且在 30min 内保持不变); F_A 表示吸附质气体流速, L/min; m 表示吸附质质量, g。动态吸附实验前,样品在 100℃ 真空条件下预处理过夜以去除吸附的水汽和小分子有机物。将动态吸附后的样品在 100℃ 条件下真空解吸 75min,待冷却至室温后,重复动态吸附过程,测定样品动态吸附稳定性。在一定相对湿度下的吸水容量是根据称重后的吸附总量减去相应的 q_e 得到的。

2 结果与讨论

2.1 HOS 的结构性质表征

图 1 为乙醇萃取后有机硅空心球(HOS)的 TEM 图,从图中可以看出有机硅空心球孔径均一,单分散较好。有机硅空心球的粒径约 25nm,壁厚大约 6nm,内径大约 13nm。

图 2 为 HOSs 和 AC 的 N_2 吸附-脱附等温线和孔径分布曲线。从图 2(a)可以看出, HOSs 样品的氮气吸附曲线有两个滞后环,说明是样品的介孔形式有两种类型,其中在相对压力 0.8 以前出现的第一

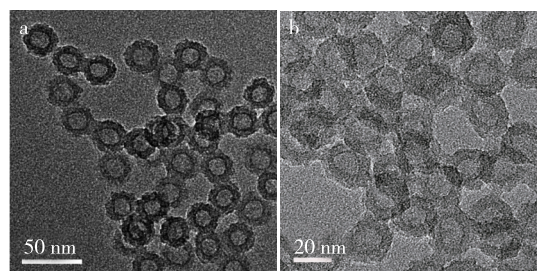


图 1 HOS 的 TEM 图

Fig.1 TEM images of HOS

个滞后环可归属于主要的有机硅内部中空结构,饱和压力附近出现的第二个滞后环种是由于粒子之间堆积形成的空隙造成的^[25]。AC 的 N_2 吸附量在相对较低压力下的迅速上升,表明了微孔的存在并发生了微孔填充吸附;随后吸附量随着相对压力的增大而缓慢增加,导致吸附平台并非呈水平状而是有一定的斜率,这主要是由于中孔和大孔的存在并在其表面发生多层吸附所致;当 p/p_0 接近 1 时,吸附等温线以相对较为固定的平缓的斜率上升,说明 AC 的孔径分布较为宽泛。HOS 和 AC 的比表面积、孔容等结构参数见表 1。

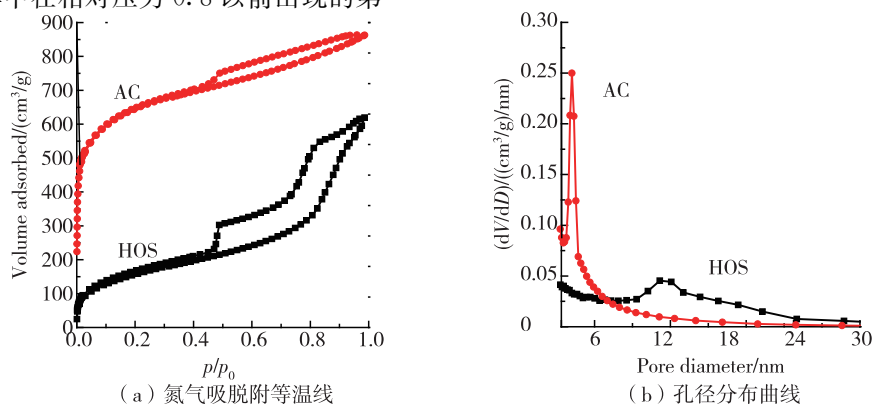


图 2 HOS 和 AC 的氮气吸附-脱附曲线

Fig.2 N_2 adsorption-desorption isotherms

表 1 HOS 和 AC 的结构参数

Table 1 Structural parameters of HOS and AC

样品类别	比表面积/ (m^2/g)	微孔表面积/ (m^2/g)	总孔容/ (cm^3/g)	微孔孔容/ (cm^3/g)
HOSs	572	138	0.92	0.06
AC	1451	973	1.03	0.48

2.2 正己烷动态吸附

动态吸附穿透曲线可以分为 3 个阶段,在第 1 阶段,吸附质被完全吸出口浓度几乎为 0,吸附曲线几乎为一条直线。在第 2 阶段吸附质浓度缓慢达

到穿透点,吸附时间的延长吸附质出口浓度显著增加,随着出口浓度接近进口浓度,吸附达到第 3 阶段。穿透时间,平衡吸附容量和稳定性是吸附剂吸附性能的 3 个重要指标。

2.2.1 正己烷初始浓度对动态吸附的影响

保持气体流速为 0.135L/min,不同的 *n*-hexane 初始浓度(0.40g/L 和 0.50g/L)条件下进行动态吸附实验,测得 HOS 和 AC 相应首次穿透曲线见图 3(a)。由图 3(a)和表 2 可知, HOS 和 AC 的首次动态吸附曲线可以看出,随着浓度增大传质推动力变大,同一时间进入的有机物分子就越多,吸附空位饱和

快,HOS 和 AC 的穿透时间变短,动态平衡吸附量增大。在类似的浓度条件下,HOS 有较长的穿透时间和较大的平衡吸附容量(是 AC 相同条件下稳定后平衡吸附容量的 2 倍多)(图 3(b)、图 3(c))。HOS 较大的正己烷平衡吸附容量与其介孔空心结构和组成有关,是两者协同做用的结果^[18]。从图 3(b)和图 3(c)可以看出,HOS 有较稳定的穿透时间和吸附性能,而

AC 的首次吸附后解吸时,解吸效率不高(约 75%) (图 3(d)),因而在第 2 次吸附时,穿透时间和平衡吸附容量都下降,说明吸附后解吸不彻底,活性炭有效微孔被填,有效表面结构受到破坏,再生不完全^[26]。直到第 3 次 AC 解吸率才能达到 100%,吸附性能保持稳定。

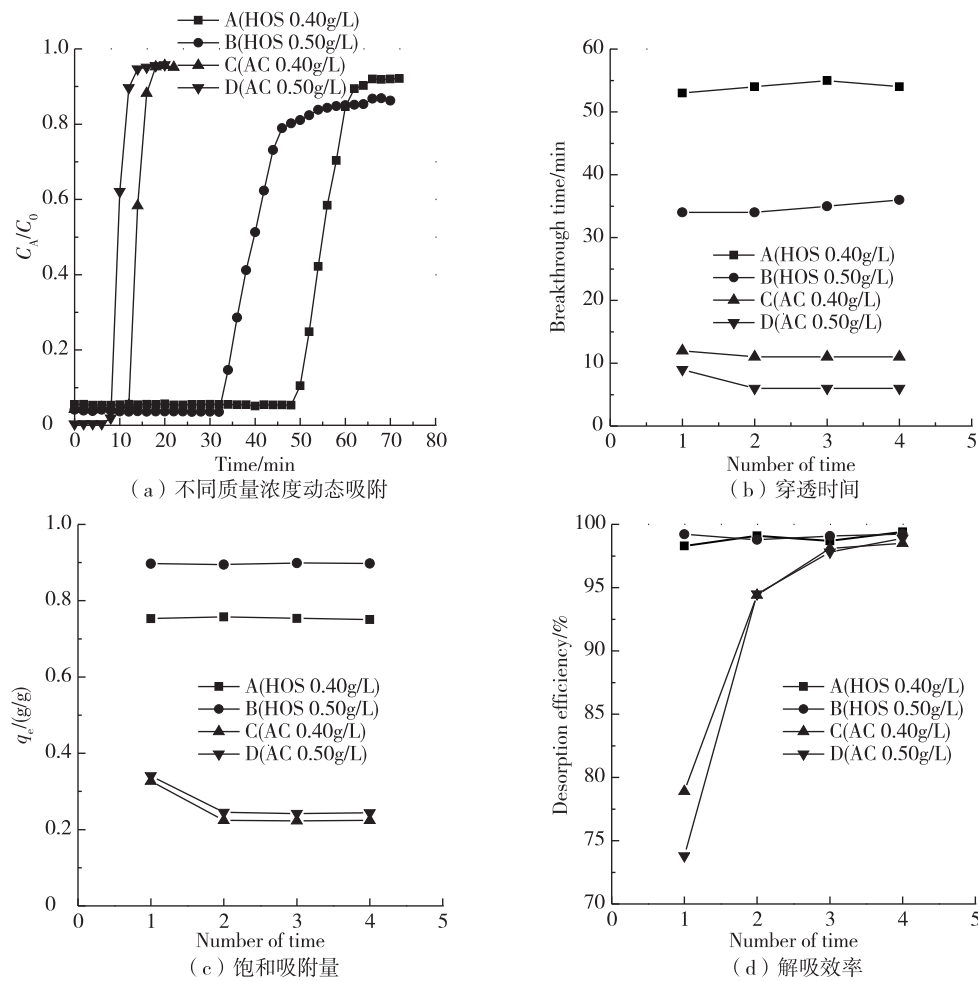


图 3 不同质量浓度条件下 HOS 和 AC 的正己烷动态吸附行为

Fig.3 The *n*-hexane dynamic adsorption performances of HOS and AC, respectively

表 2 HOS 和 AC 在不同条件下的正己烷第 1 次动态吸附参数

Table 2 Dynamic adsorption parameters of *n*-hexane on HOS and AC for the first time

样品	质量浓度/ (g/L)	流速/ (L/min)	相对湿度	穿透时间/ min	平衡时间/ min	平衡吸附 容量/(g/g)	解吸效率/ %	正己烷与水吸附 容量之比
HOS	0.40	0.135	RH 0	53	60	0.753	98.3	—
HOS	0.50	0.135	RH 0	34	49	0.897	99.21	—
HOS	0.50	0.050	RH 0	84	158	1.14	98.91	—
HOS	0.40	0.135	RH 45%	48	55	0.721	98.9	45.0
AC	0.40	0.135	RH 0	12	16	0.327	78.9	—
AC	0.50	0.135	RH 0	9	11	0.341	73.8	—
AC	0.50	0.050	RH 0	29	35	0.424	77.8	—
AC	0.50	0.135	RH 45%	10	14	0.307	77.9	6.02

2.2.2 载气流速对正己烷动态吸附的影响

保持相同进气浓度(0.50g/L),改变载气流速(0.135L/min和0.05L/min)时,HOS和AC相应的首次穿透曲线见图4(a)。结合图4(a)表2数据可知,气体流速增大穿透曲线变得相对陡峭,对提高吸附速度(降低穿透时间)有利,但流量增大,平衡吸附时间缩短,吸附量减小,降低平衡吸附容量。这可能是因为流速增大,吸附质在吸附柱内的停留时间缩短,与吸附剂接触不充分,使穿透时间变短,平衡

吸附量变小。HOS和AC在浓度为低流速(0.05L/min)条件下的首次平衡吸附容量分别为1.14g/g和0.424g/g,均是0.135L/min流速时对应平衡吸附容量的1.24倍。同样的,HOS在不同流速条件下保持较高的吸附稳定性,而AC直到第3次吸附后吸附性能才能稳定(图4(b)至图4(d)),另外,在0.05L/min条件下,HOS的平衡吸附容量是AC稳定后平衡吸附容量的3.65倍。

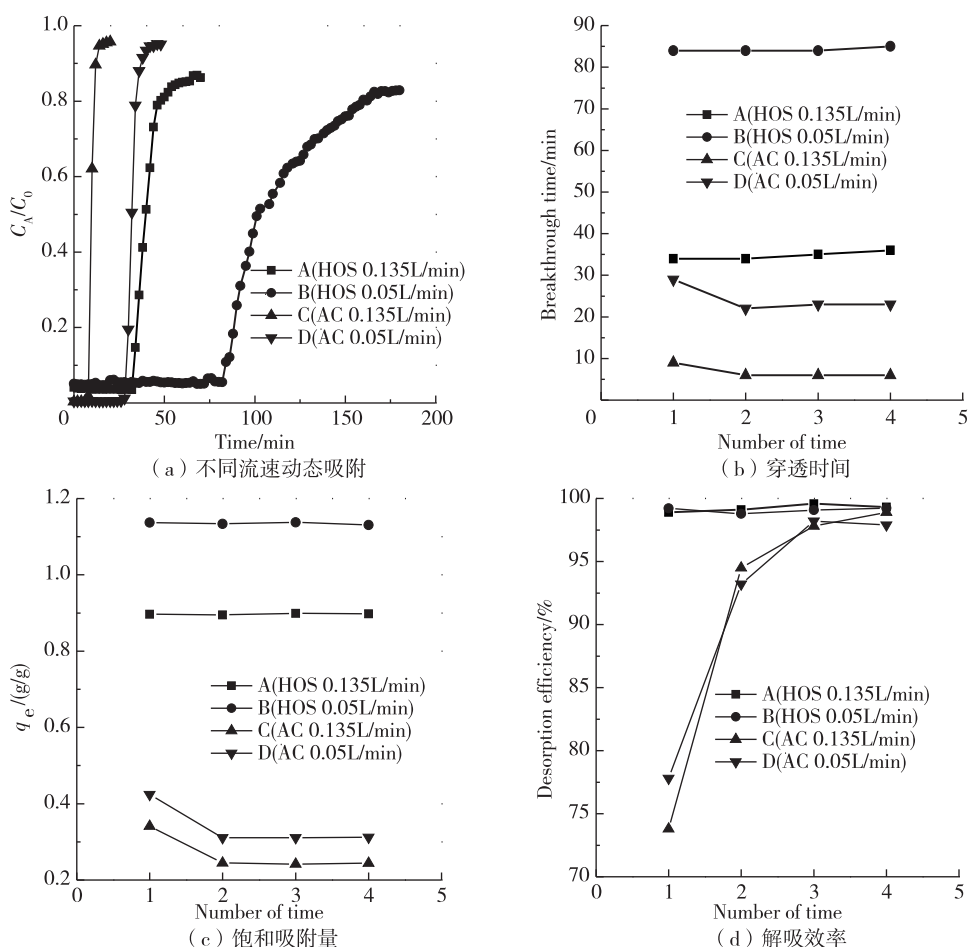


图4 不同流速条件下 HOS 和 AC 正己烷动态吸附行为

Fig.4 The *n*-hexane dynamic adsorption performances of HOS and AC

2.2.3 湿度对正己烷动态吸附的影响

在对 VOCs 的吸附过程中,水汽是一个重要的影响因素。相同质量浓度(0.50g/L),相同流速(0.135L/min),不同湿度(干空气和45%)条件下 HOS 和 AC 的动态吸附行为和吸附参数见图5和表2。结合图表数据可知,随着相对湿度的增大,HOS 和 AC 的穿透时间和平衡吸附时间均变短,正

己烷平衡吸附容量均变小,说明水分子对吸附过程产生了影响。HOSs 与 AC 在相对湿度 RH 45%条件下正己烷首次平衡吸附容量分别为0.721g/g和0.307g/g,与称重计算的水汽饱和吸附容量之比分别为45.0与6.02,说明AC在湿度条件下受水汽影响较大,同时可以得出,HOS 吸附容量影响受水汽较小,说明HOS在吸附过程中,水分子仅对正己

烷分子的扩散产生影响,对正己烷分子最终在 HOS 表面的附着没有太大的影响,说明 HOS 具有良好的疏水性,对正己烷有较高的选择性。HOS 和 AC

在水汽存在时的解吸行为和干空气作为载气的解吸行为类似,AC 在第 3 次吸附-解吸后,吸附性能保持稳定。

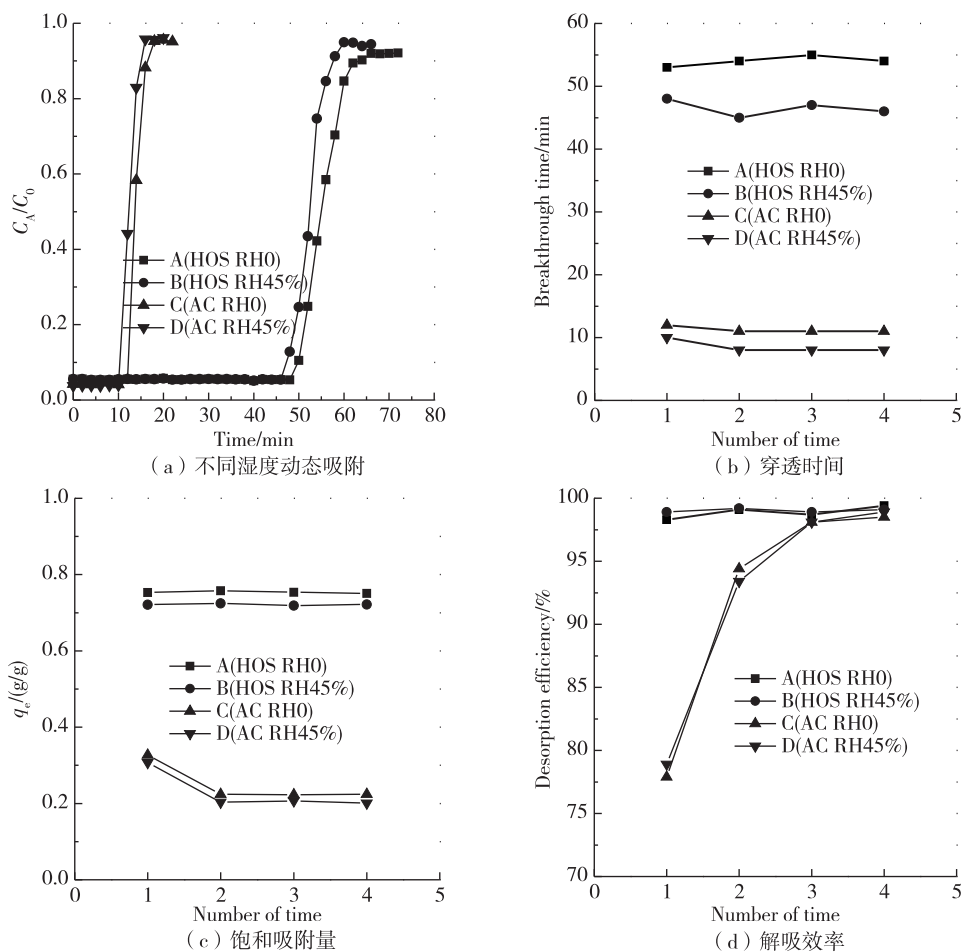


图 5 不同湿度(RH0 和 RH45%)条件下正己烷 HOS 和 AC 的动态吸附行为

Fig.5 The *n*-hexane dynamic adsorption performances of HOS

图 6 用 Origin 软件中 Logistic 模型,以不同浓度(相同流速下)HOS 和 AC 的正己烷第 1 次动态吸附为例,拟合出的穿透曲线,其中点为实验所得数据,实线为拟合所得曲线。式(2)和式(3)为该模型下的回归公式^[26]。任一时刻的正己烷的透出浓度可由该式算出。

$$C/C_0 = 0 \quad (t \leq t_B) \quad (2)$$

$$\frac{C}{C_0} = \frac{A_1 - A_2}{1 + (t/t_0)^p} + A_2 \quad (t > t_B) \quad (3)$$

式中, t_B 为透过时间(取进气浓度的 10%), C 为任一时刻吸附质的出口浓度,且 $0 \leq C \leq C_0$, C_0 为其吸附浓度(即进口浓度), t 为任一透出时间,且 $t_B < t \leq t_0$, t_0 为吸附饱和时间, R 为回归公式的线性相关系数。拟合参数见表 3。

从图 6 和表 3 可以看出,利用 Origin 软件的 Logistic 模型拟合出的吸附穿透曲线与实验结果具有高度相似性, R 均大于 0.99,说明 Logistic 模型拟合出的曲线具有较高的可信度,回归公式准确、可靠。该公式可用以计算该流量及进气浓度下 HOS 和 AC 正己烷动态吸附的相关吸附数据,对工业实际应用有指导意义。

3 结 论

1) 采用模板法合成了内径为 13nm 和壁厚为 6nm 的 HOS,考察了其在不同载气流速,正己烷浓度和湿度条件下正己烷吸附性能,并与商品化的 AC 进行对比。

2) 动态吸附结果表明 HOS 有较好的动态吸附

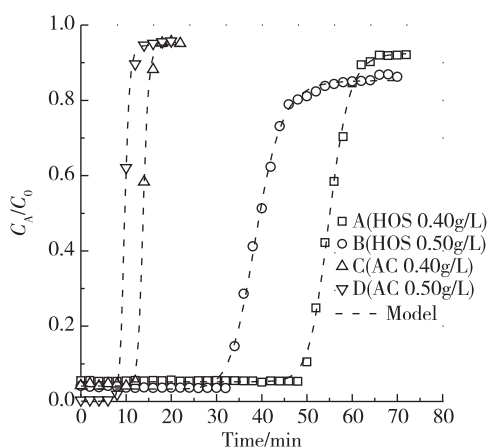


图6 不同质量浓度,相同流速条件下 HOS 和 AC 正己烷首次动态吸附实验及拟合曲线

Fig.6 The first *n*-hexane dynamic adsorption performances and Logistic model curves of HOS and AC, respectively, under the same flow rate

表3 HOS 和 AC 正己烷第 1 次动态吸附 Logistic 和 Yoon-Nelson 模拟曲线各参数值

Table 3 Parameters of Logistic and Yoon-Nelson model for HOS and AC first *n*-hexane dynamic adsorption

吸附剂	质量浓度/ (g/L)	Logistic 参数				
		A_1	A_2	T_0	P	R
HOS	0.40	0.052 42	0.925 0	54.95	24.28	0.998 9
HOS	0.50	0.032 83	0.853 1	38.77	13.37	0.998 4
AC	0.40	0.041 09	0.943 8	13.78	23.28	0.998 5
AC	0.50	0.005 406	0.946 4	9.653	17.63	0.999 1

容量,吸附稳定性高,疏水性强,对正己烷的吸附选择性较高。

3) Logistic 模型曲线与正己烷动态实验结果有较好的拟合度。

参考文献:

- [1]彭国庆. 浅谈石油储运工作中的环保问题及对策[J]. 石油化工环境保护, 1998, 21 (1): 51-56.
- [2]郝保良. 活性炭吸附法油气回收系统在石油库的应用[J]. 安全、健康和环境, 2004 (7): 14-15.
- [3]李巨峰,陈义龙,李斌莲,等. 油气回收技术发展现状及其在我国的应用前景[J]. 油气田环境保护, 2006, 16 (1): 1-3.
- [4]张宏,孙禾. 实施油气回收的必要性和技术方案的探讨[J]. 石油化工管理干部学院学报, 2002, 27 (2): 41-42.
- [5]冯孝庭. 吸附分离技术[M]. 北京: 化学工业出版社,

2000:108-110.

- [6]黄海凤,褚翔,卢哈锋,等. MCM-41 和 SBA-15 动态吸附 VOCs 特性和穿透模型[J]. 高等化学工程学报, 2011, 25 (2): 219-224.
- [7]WANG Q, LIU Y, YAN H. Mechanism of a self-templating synthesis of monodispersed hollow silica nanospheres with tunable size and shell thickness[J]. Chemical Communications, 2007 (23): 2339-2341.
- [8]DOU B, HU Q, LI J, et al. Adsorption performance of VOCs in ordered mesoporous silicas with different pore structures and surface chemistry [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186 (2/3): 1615-1624.
- [9]HU Q, LI J J, HAO Z P, et al. Dynamic adsorption of volatile organic compounds on organofunctionalized SBA-15 materials[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 149 (1/2/3): 281-288.
- [10]HUANG L, HUANG Q L, XIAO H N, et al. Effect of cationic template on the adsorption of aromatic compounds in MCM-41 [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2007, 98 (1/2/3): 330-338.
- [11]KOSUGE K, KUBO S, KIKUKAWA N, et al. Effect of pore structure in mesoporous silicas on VOC dynamic adsorption/desorption performance[J]. Langmuir, 2007, 23 (6): 3095-3102.
- [12]KUBO S, KOSUGE K. Salt-induced formation of uniform fiberlike SBA-15 mesoporous silica particles and application to toluene adsorption[J]. Langmuir, 2007, 23 (23): 11761-11768.
- [13]NEWALKAR B L, CHOUDARY N V, KUMAR P, et al. Exploring the potential of mesoporous silica, SBA-15, as an adsorbent for light hydrocarbon separation [J]. Chemistry of Materials, 2002, 14 (1): 304-309.
- [14]NEWALKAR B L, CHOUDARY N V, TURAGA U T, et al. Potential adsorbent for light hydrocarbon separation: Role of SBA-15 framework porosity [J]. Chemistry of Materials, 2003, 15 (7): 1474-1479.
- [15]QIN Y, WANG Y, WANG H, et al. Effect of morphology and pore structure of SBA-15 on toluene dynamic adsorption/desorption performance[C]//In 2013 International Symposium on Environmental Science and Technology. Dalian: Procedia Environmental Sciences, 2013: 366-371.
- [16]RUSSO P A, CARROTT M, CARROTT P J M. Adsorption of toluene, methylcyclohexane and neopentane on silica MCM-41[J]. Adsorption-Journal of the International Adsorption Society, 2008, 14 (2/3): 367-375.
- [17]WANG H, RONG X, HAN L, et al. Controlled synthesis of hexagonal mesostructure silica and macroporous

- ordered siliceous foams for VOCs adsorption[J]. Rsc Advances, 2015, 5 (8): 5695-5703.
- [18] WANG H, TANG M, HAN L, et al. Synthesis of hollow organosiliceous spheres for volatile organic compound removal[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2 (45): 19298-19307.
- [19] WANG H, TANG M, ZHANG K, et al. Functionalized hollow siliceous spheres for VOCs removal with high efficiency and stability[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 268: 115-123.
- [20] ZHANG W, QU Z, LI X, et al. Comparison of dynamic adsorption/desorption characteristics of toluene on different porous materials [J]. Journal of Environmental Sciences-China, 2012, 24 (3): 520-528.
- [21] MATSUMOTO A, MISRAN H, TSUTSUMI K. Adsorption characteristics of organosilica based mesoporous materials[J]. Langmuir, 2004, 20 (17): 7139-7145.
- [22] SERNA-GUERRERO R, SAYARI A. Applications of pore-expanded mesoporous silica. 7. Adsorption of volatile organic compounds[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41 (13): 4761-4766.
- [23] BARRETT E P, JOYNER L G, HALENDA P P. The Determination of Pore Volume and Area Distributions in Porous Substances .1. Computations from Nitrogen Isotherms[J]. Journal of the American Chemical Society, 1951, 73 (1): 373-380.
- [24] ZHU H Y, ZHAO X S, LU G Q, et al. Improved comparison plot method for pore structure characterization of MCM-41[J]. Langmuir, 1996, 12 (26): 6513-6517.
- [25] ZHU J, TANG J, ZHAO L, et al. Ultrasmall, Well-Dispersed, Hollow Siliceous Spheres with Enhanced Endocytosis Properties[J]. Small, 2010, 6 (2): 276-282.
- [26] 徐效梅, 黄维秋, 赵书华, 等. 活性炭吸附 VOC 穿透曲线的研究[J]. 能源环境保护, 2008, 22 (2): 41-42.

(责任编辑:殷丽莉)

【上接第 45 页】

- [12] 王琦, 骆仲决, 王树荣, 等. 生物质快速热裂解制取高品位液体燃料[J]. 浙江大学学报, 2010, 44 (5): 988-990, 1008.
- [13] 张爱华, 李洋, 肖志红, 等. 菜籽油裂解燃料离子液体催化酯化反应降酸工艺的研究[J]. 湖南林业科技, 2014, 10(5): 47-49, 57.

- [14] 蔺建民, 张永光, 刘金胜. 柴油机调和燃料油 BD(100): GB/T 20828—2015[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2015.
- [15] 杨国勋, 王飞. 轻柴油: GB 252—2000[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2007.

(责任编辑:殷丽莉)