

文章编号: 1003-9015(2011)02-0219-06

## MCM-41 和 SBA-15 动态吸附 VOCs 特性和穿透模型

黄海凤<sup>1</sup>, 褚翔<sup>1</sup>, 卢晗锋<sup>2</sup>, 张波<sup>2</sup>, 李瑛<sup>2</sup>, 陈银飞<sup>2</sup>

(1. 浙江工业大学 生物与环境工程学院, 浙江 杭州 310014;

2. 浙江工业大学 化材学院 绿色化学合成技术国家重点实验室培育基地, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 采用模板剂法制备了具有规整孔道的 MCM-41 和 SBA-15 介孔分子筛, 考察了两种介孔分子筛动态吸附甲苯、邻二甲苯、均三甲苯的特性。结果表明, MCM-41 平均孔径小, 孔壁叠加作用力强, 更适合吸附中、低浓度的 VOCs, 对芳烃类 VOCs 为典型的 I 型吸附等温线; SBA-15 具有微孔和介孔共存的特点, 平均孔径大, 对大分子和高浓度的 VOCs 具有更好的吸附能力, 同时也可有效地吸附低浓度 VOCs, 对芳烃类 VOCs 为典型的 IV 型吸附等温线。通过 Yoon-Nelson 模型对 MCM-41 和 SBA-15 动态吸附过程的拟合, 得出的吸附模型参数可以较为准确地预测 VOCs 在介孔分子筛上的吸附穿透曲线。

**关键词:** MCM-41; SBA-15; VOCs; 动态吸附; Yoon-Nelson 模型

中图分类号: X511; TQ028.15

文献标识码: A

## Dynamic Adsorption Performances and Breakthrough Curve Model of Some Aromatic VOCs on MCM-41 and SBA-15

HUANG Hai-feng<sup>1</sup>, CHU Xiang<sup>1</sup>, LU Han-feng<sup>2</sup>, ZHANG Bo<sup>2</sup>, LI Ying<sup>2</sup>, CHEN Yin-fei<sup>2</sup>

(1. College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. State Key Laboratory Breeding Base of Green Chemistry-Synthesis Technology, College of Chemical Engineering and Materials Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** The mesoporous molecular sieves of MCM-41 and SBA-15 with ordered pore structure were synthesized by the template method, and their dynamic adsorption performances for some VOCs, such as toluene, *o*-xylene and mesitylene, were studied. The results show that the MCM-41 is prior to adsorb the VOCs with medium and low concentrations, because the attractive forces from pore walls of MCM-41 is enhanced by its small pore diameter. The adsorption characteristics of VOCs on MCM-41 could be attributed to the typical type I isotherm from IUPAC. The SBA-15 involves both mesopores and micropores, and is more appropriate for the adsorption of VOCs with higher concentrations and macromolecules. Furthermore, SBA-15 is also suitable for the adsorption of VOCs with low concentrations. The adsorption isotherms of VOCs on SBA-15 are that of typical type IV. The dynamic adsorption processes on MCM-41 and SBA-15 could be simulated by Yoon-Nelson model. The breakthrough curves of VOCs adsorption on these mesoporous molecular sieves could be predicted by using this model and its related parameters accurately.

**Key words:** MCM-41; SBA-15; VOCs; dynamic adsorption; Yoon-Nelson model

### 1 前言

石油化工、橡胶、油漆等行业中挥发性有机化合物(VOCs)的排放会对自然环境造成严重破坏。目前 VOCs 处理方法多采用吸附, 吸收<sup>[1]</sup>, 催化燃烧<sup>[2]</sup>, 生物净化<sup>[3]</sup>等, 其中吸附技术因操作简单、运行费用

收稿日期: 2010-02-26; 修订日期: 2010-07-02。

基金项目: 浙江省科技厅重大专项资助(2007C13042); 浙江省自然科学基金(Y5090202)。

作者简介: 黄海凤(1954-), 女, 浙江诸暨人, 浙江工业大学教授, 学士。通讯联系人: 陈银飞, E-mail: yfchen@zjut.edu.cn

低、处理效率高等优点而被广泛采用<sup>[4,5]</sup>。目前常用的吸附剂有活性炭和沸石分子筛<sup>[6,7]</sup>，但活性炭易燃、易爆，在 VOCs 吸附过程中存在较大的安全隐患；其次受孔容、孔径影响，活性炭和沸石分子筛对一些大分子 VOCs 吸附能力较差<sup>[8]</sup>，并且其孔道尺寸小于 2 nm，吸附的 VOCs 很难脱附<sup>[9]</sup>，在再生过程中有机物易在孔道内发生结焦和积炭，从而造成孔道堵塞和吸附剂失效。

全硅介孔分子筛具有大孔径、高疏水性和表面惰性等优点<sup>[10,11]</sup>被应用于催化、生物及纳米材料等领域<sup>[12-14]</sup>。介孔分子筛高效的吸附速率、良好的脱附性能和高的吸附容量可以很好地弥补活性炭和沸石分子筛的不足。MCM-41 和 SBA-15 是介孔分子筛的典型代表，本研究采用模板剂法制备了 MCM-41 和 SBA-15，通过 BET、XRD、SEM 等手段对其织构形貌特征进行了表征，系统地考察了两类介孔分子筛对一些芳烃类 VOCs(甲苯、邻二甲苯、均三甲苯)的吸附性能，并尝试对吸附实验数据用 Yoon-Nelson 吸附模型进行参数拟合，以便为工程应用提供理论依据。

## 2 实验

### 2.1 介孔分子筛合成

#### 2.1.1 MCM-41合成

MCM-41采用碱性条件下水热合成<sup>[15,16]</sup>。将 4 g 十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)、0.76 g NaOH 溶于 100 mL去离子水中，30℃下搅拌 10 min 后，逐滴加入 14.4 mL 正硅酸乙酯(TEOS)，继续搅拌 2 h 后移入聚四氟乙烯内衬的晶化釜，110℃晶化 24 h 后，冷却、抽滤、洗涤、烘干，以 2℃·min<sup>-1</sup>的速率升至550℃，在该温度下焙烧 5 h 去除模板剂，得到 MCM-41。

#### 2.1.2 SBA-15 合成

SBA-15 的制备见文献[17]。将 6 g 三嵌段共聚物 P123 溶于 225 mL 1.6 mol·L<sup>-1</sup>的盐酸溶液中,搅拌至溶解，将溶液转入 40℃水浴中，600 r·min<sup>-1</sup>下搅拌 10 min 后逐滴加入 13.8 mL 正硅酸乙酯(TEOS)，滴定完成后，继续搅拌 24 h，移入聚四氟乙烯内衬的晶化釜，100℃晶化 24 h 后，冷却、抽滤、洗涤、烘干，以 2℃·min<sup>-1</sup>的速率升至 500℃，在该温度下焙烧 5 h 去除模板剂，得到 SBA-15。

### 2.2 介孔分子筛表征

#### 2.2.1 XRD 表征

XRD 测试采用瑞士 ARL 公司 SCINTAG XTRA 高分辨多晶 X 射线衍射仪，Ni 滤波，Cu 靶，Ka 辐射源，管电压 40 kV，管电流 50 mA，扫描范围 0.5~10°，步幅 0.04°。

#### 2.2.2 比表面积、孔结构测定

介孔分子筛的比表面积和孔容在 Micromeritics ASAP2020C 型吸附仪上测定，吸附测定之前，样品于 250℃下脱附 2 h 以上。样品的比表面积采用 BET 法计算；孔径分布的测定采用 BJH 法并以吸脱附等温线的脱附支为基准。

### 2.3 动态吸附 VOCs 测试

VOCs 的动态吸附装置由 VOCs 发生器、气体流量控制系统、吸附床等组成。粉末状分子筛经压片，筛分后成型为 20~30 目的颗粒状样品；取 1 g 分子筛样品装入吸附床层，在 150℃下用空气脱附 2 h，除去分子筛中的水汽和少量有机物；最后分 2 路空气为载气，一路进 VOCs 发生器，一路为稀释气，通过调节两路气的流量和 VOCs 发生器的温度，来控制 VOCs 浓度。VOCs 浓度采用 GC7890 色谱在线分析，吸附量通过吸附曲线积分计算得出。

## 3 结果与讨论

### 3.1 介孔分子筛结构性质表征

图1为 MCM-41 和 SBA-15 小角 XRD 谱图。由图可知，所合成的 MCM-41 在 2θ 为 2° 处有一强衍射峰，对应着材料的 100 特征峰。SBA-15 在小角度范围出现了三个衍射峰，分别对应着材料的100，110，200 三个特征峰<sup>[18]</sup>。上述特征峰的出现表明所合成的材料是具有规整有序二维六方相结构的介孔材

料。

表1给出了介孔分子筛的结构参数。两种介孔分子筛都有大比表面积, MCM-41比表面积为  $720 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ , SBA-15比表面积为  $1126 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。MCM-41的孔容为  $0.9 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ , 小于 SBA-15 的  $1.4 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ 。介孔分子筛的孔容要远大于活性炭<sup>[19]</sup>和沸石分子筛<sup>[20]</sup>, 这说明介孔分子筛的潜在吸附能力巨大。两种分子筛的孔径不同, MCM-41的平均孔径为  $3 \text{ nm}$ , SBA-15 的平均孔径为  $6 \text{ nm}$ , 都大于活性炭和沸石分子筛<sup>[9]</sup>。从孔径分布看, SBA-15 除有大部分中孔外, 还存在部分微孔, 有研究表明 SBA-15 的微孔存在于介孔壁表面<sup>[21]</sup>。

### 3.2 介孔分子筛穿透吸附特性

在吸附过程中, 出口气体浓度达到入口气体浓度的 5%时设为穿透点, 达到 100%时被认为吸附饱和。从开始吸附到穿透点之间的时间为穿透时间, 从开始吸附到吸附饱和之间的时间为饱和时间, 穿透时间内的吸附量计为穿透吸附量。

由表 2 可知, 分子筛在对甲苯、邻二甲苯、均三甲苯的吸附过程中, 吸附性能在不断提高, 这一方面是由于 VOCs 的分子量在不断增加, 分子量越大, 吸附性能越好<sup>[22]</sup>; 另一方面分子筛的吸附过程是一个 VOCs 在分子筛上的凝结过程, 随着沸点的不断提高, VOCs 在分子筛上的凝结也更加容易; 同时 VOCs 的分子尺寸在增大, 分子筛的孔壁叠加作用力更强, 使得穿透时间, 穿透吸附量在增大。

表 2 介孔分子筛对不同 VOCs 的穿透吸附特性

Samples	VOCs	Breakthrough	Saturation	Adsorption	Adsorption	Breakthrough
		time	time	amount per surface area	amount per volume	adsorption
		/ min	/ min	/ $10^{-4} \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$	/ $\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$	amount / $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$
MCM-41	Toluene	35	85	0.597	0.048	0.028
	<i>O</i> -Xylene	70	182	2.125	0.170	0.091
	Mesitylene	241	490	6.807	0.544	0.327
SBA-15	Toluene	57	100	0.729	0.059	0.067
	<i>O</i> -Xylene	116	198	1.253	0.101	0.108
	Mesitylene	151	241	1.937	0.156	0.183

Notes: GHSV=30000 mL·(h·g)<sup>-1</sup>;  $T=30^\circ\text{C}$ ;  $C_0=3000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$

由图 2 可知, 对均三甲苯的吸附, SBA-15 的吸附曲线更陡, 显示出更快的吸附速率。这是因为 SBA-15 孔径更大, 在有序的介孔壁上附有微孔, 这些结构上的差异使 SBA-15 的传质阻力要小于 MCM-41, 从穿透点到吸附饱和之间的时间要短于 MCM-41, 吸附速率更快。

### 3.3 介孔分子筛的动态 VOCs 吸附等温线

图 3~图 5 分别为两种分子筛对甲苯、邻二甲苯、均三甲苯的动态吸附等温线。由图 3 可知, 随甲苯浓度升高, 两条曲线出现了交点, 表明两种分子筛对甲苯吸附具有各自适合的浓度范围。在小于  $10 \text{ 000 mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、大于  $100 \text{ 000 mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, SBA-15 吸附量更大, 在两个浓度之间, MCM-41 吸附量更大。MCM-41 的吸附量随浓度升高迅速增加, 达

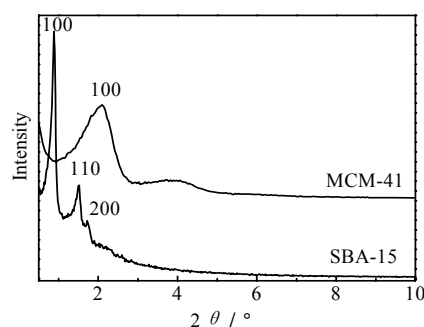


图 1 MCM-41 和 SBA-15 的 XRD 图

Fig.1 XRD patterns of MCM-41 and SBA-15

表 1 介孔分子筛的结构性质

Sample	$S_{\text{BET}}$ / $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	$S_{\text{micro}}$ / $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	$S_{\text{external}}$ / $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	$V_{\text{pore}}$ / $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$	$V_{\text{micro}}$ / $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$	$D_{\text{pore}}$ / nm
MCM-41	720	0	720	0.9	0	3.0
SBA-15	1126	231	895	1.4	0.1	6.0

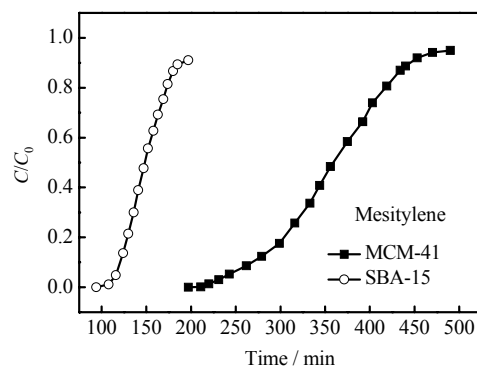


图 2 介孔分子筛在均三甲苯下的吸附穿透曲线

Fig.2 Breakthrough curves of mesitylene on mesoporous molecular sieves

GHSV: 30000 mL·(h·g)<sup>-1</sup>;  $T: 30^\circ\text{C}$

到一定浓度后, 吸附量稳定。由表 1 可知, MCM-41 的平均孔径、孔容均小于 SBA-15, 平均孔径越小, 孔壁叠加作用力越强, 吸附越容易<sup>[23]</sup>。对低浓度甲苯的吸附, 平均孔径较大的 SBA-15 吸附量反而要高于 MCM-41, 这是因为 SBA-15 在介孔孔壁上存在微孔结构, 微孔对低浓度甲苯显示出了良好的吸附性能, 使吸附量超过不具备微孔结构的 MCM-41。由于微孔数量有限, 随浓度升高, 介孔吸附开始占据主导, 这时平均孔径小的 MCM-41 吸附量迅速增加, 超过 SBA-15, 但受孔容限制, MCM-41 的吸附容量小于 SBA-15。图 4 和图 5 中对邻二甲苯和均三甲苯的吸附曲线趋势与图 3 基本一致, 不同的是在低浓度下, SBA-15 的吸附量并没有高于 MCM-41。这是因为邻二甲苯、均三甲苯的分子尺寸大于甲苯, 使平均孔径小的 MCM-41 孔壁叠加效应明显加强, 吸附量迅速提高, 在低浓度下的吸附量和具有微孔结构的 SBA-15 的吸附量基本一致。根据 IUPAC 的分类, 图 3~图 5 中 MCM-41 的吸附等温线为 I 型, 而 SBA-15 的吸附等温线为 IV 型, 这是因为 MCM-41 平均孔径接近微孔, 同时吸附质为分子尺寸较大的芳烃类 VOCs, VOCs 与孔壁作用力较强, 使得在较低浓度下, 吸附就易发生并快速达到吸附容量。而 SBA-15 的平均孔径为 6 nm, 使得在较低浓度下只能发生单分子层吸附, 只有在较高浓度下才会发生毛细凝聚现象, 使吸附量大幅提升。

从图 3~图 5 中的吸附量可以看出, 随 VOCs 分子尺寸的增大, 两种分子筛的吸附量均在增加, 且达到吸附容量的浓度在下降, 这是因为随分子尺寸的增大, 吸附过程中孔壁叠加作用力得到加强, 使得吸附更容易, 这表明介孔分子筛适合吸附大分子 VOCs。

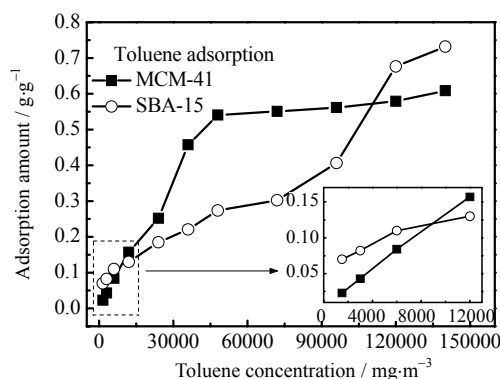


图 3 介孔分子筛动态吸附甲苯的等温线  
Fig. 3 Isotherms of toluene dynamic adsorption on mesoporous molecular sieves  
GHSV: 30000 mL·(h·g)<sup>-1</sup>; T: 30°C

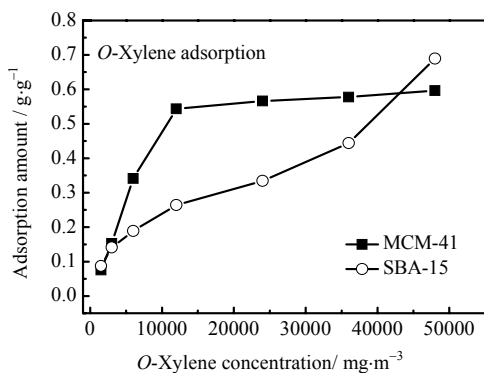


图 4 介孔分子筛动态吸附邻二甲苯的等温线  
Fig. 4 Isotherms of o-xylene dynamic adsorption on mesoporous molecular sieves  
GHSV: 30000 mL·(h·g)<sup>-1</sup>; T: 30°C

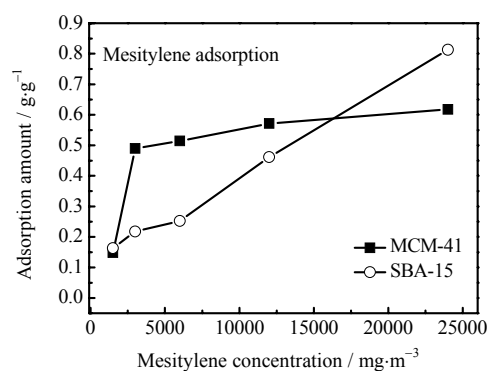


图 5 介孔分子筛动态吸附均三甲苯的等温线  
Fig. 5 Isotherms of mesitylene dynamic adsorption on mesoporous molecular sieves  
GHSV: 30000 mL·(h·g)<sup>-1</sup>; T: 30°C

### 3.4 动态吸附的穿透模型

为了更好地掌握出口气体浓度与时间的关系, 对穿透曲线的预测显得十分必要<sup>[24]</sup>。本文运用 Yoon 和 Nelson 提出的理论吸附模型, 对实验数据进行吸附拟合。

$$t = \tau + \frac{1}{k'} \ln\left(\frac{C}{C_0 - C}\right) \quad (1)$$

如果理论模型和实验数据能准确地拟合, 那么  $\ln\left(\frac{C}{C_0 - C}\right)$  与吸附时间  $t$  之间的趋势线应该是一条直线, 根据直线与坐标轴的交点和直线斜率便可以得到  $\tau$  和  $k'$ , 进一步理论计算得到出口气体浓度与吸

附时间的关系。

表 3 MCM-41 吸附不同浓度下 VOCs 的 Yoon-Nelson 模型计算值和实验值比较(GHSV:30000 mL·(h·g)<sup>-1</sup>; T:30℃)

VOCs	Concentration / mg·m <sup>-3</sup>	$\tau$ / min		$t_1 (C/C_0 = 0.1)$ / min		$t_2 (C/C_0 = 0.9)$ / min	
		Experimental	Calculated	Experimental	Calculated	Experimental	Calculated
Toluene	1 500	62	66	47	50	82	82
	3 000	51	54	38	39	68	68
	6 000	39	44	28	31	55	56
<i>o</i> -Xylene	1 500	135	138	97	96	183	181
	3 000	118	120	79	81	157	160
	6 000	89	92	63	64	118	120
Mesitylene	1 500	441	451	328	360	558	541
	3 000	360	365	265	292	445	437
	6 000	226	222	197	194	248	250

表 4 SBA-15 吸附不同浓度下 VOCs 的 Yoon-Nelson 模型计算值和实验值比较(GHSV:30000 mL·(h·g)<sup>-1</sup>; T:30℃)

VOCs	Concentration / mg·m <sup>-3</sup>	$\tau$ / min		$t_1 (C/C_0 = 0.1)$ / min		$t_2 (C/C_0 = 0.9)$ / min	
		Experimental	Calculated	Experimental	Calculated	Experimental	Calculated
Toluene	1 500	102	104	85	87	124	122
	3 000	78	81	67	68	91	94
	6 000	59	61	46	48	75	74
<i>o</i> -Xylene	1 500	222	230	179	185	281	275
	3 000	149	153	121	124	185	182
	6 000	83	84	62	63	104	105
Mesitylene	1 500	359	357	321	323	392	391
	3 000	186	185	163	161	210	209
	6 000	138	146	115	118	176	175

表 3 和表 4 分别对 MCM-41 和 SBA-15 吸附 1/2 穿透时间  $\tau$ , 1/10 穿透时间  $t_1 (C/C_0 = 0.1)$  和 9/10 穿透时间  $t_2 (C/C_0 = 0.9)$  的实验值与理论值进行了比较。从表中可以看出, 实验值和理论值的相关性较好, 数据误差基本控制在 10% 以内, 说明 Yoon-Nelson 吸附模型对介孔分子筛 MCM-41 和 SBA-15 的吸附情况能进行较好地拟合。误差超过 10% 的共有 3 次, 占总数的 5.6%。

表 5 得出了分子筛在不同浓度下的  $k'$  值, 由  $R^2$  可知, 理论模型与试验数据吻合度较高, 根据两种分子筛在不同浓度下的  $k'$  和  $\tau$  值, 可以由公式(1)计算得出不同浓度条件下, 时间和出口气体浓度的关系, 进一步得到穿透曲线, 为实际的工程应用提供理论依据。

## 4 结 论

(1) MCM-41 平均孔径小, 更适合吸附中、低浓度 VOCs, 对芳烃类 VOCs 吸附等温线为 I 型; SBA-15 平均孔径大且具有微孔, 对大分子和高浓度 VOCs 具有更好的吸附能力, 同时也可有效地吸附低浓度 VOCs, 对芳烃类 VOCs 吸附等温线为 IV 型。

(2) SBA-15 平均孔径更大, 介孔壁上附有微孔, 因此传质阻力小, 吸附有机物速率更快。受孔容影响, SBA-15 对芳烃类 VOCs 的吸附容量要高于 MCM-41。

(3) Yoon-Nelson 吸附模型对两种介孔分子筛吸附 VOCs 能进行较好地拟合; 使用本文得出的  $k'$  和  $\tau$  值可以较为准确地预测出不同浓度 VOCs 在介孔分子筛上的吸附穿透曲线。

### 符号说明:

$C$	— 吸附 $t$ 分钟后出口 VOCs 气体浓度, mg·m <sup>-3</sup>	$T$	— 吸附床层温度, °C
$C_0$	— 进口 VOCs 气体浓度, mg·m <sup>-3</sup>	$t$	— 吸附时间, min
$F$	— 气体总流速, mL·min <sup>-1</sup>	$t_s$	— 吸附平衡时间, min
GSHV	— 空速, mL·(h·g) <sup>-1</sup>	$W$	— 吸附剂的填装量, g

- $k'$  — 拟合参数  $\tau$  — 穿透 1/2 所需要时间, min  
 $q$  — 单位质量吸附剂的平衡吸附量,  $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

## 参考文献:

- [1] CEN Chao-ping(岑超平), CHEN Ding-sheng(陈定盛), LAN Ru-hui(蓝如辉), *et al.* Experimental study on treatment of waste gas containing toluene by absorption(吸收法脱除甲苯废气的实验研究) [J]. **Environment Engineering**(环境工程), 2007, 25(6): 40-42.
- [2] LU Han-feng(卢晗锋), HUANG Hai-feng(黄海凤), LIU Hua-yan(刘华彦), *et al.* Catalytic combustion performance of Au doping  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$  perovskites(Au改性 $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ 催化剂的催化燃烧性能) [J]. **J Chem Ind and Eng (China)**(化工学报), 2008, 59(4): 892-897.
- [3] Kim H, Jaffe P. Spatial distribution and physiological state of bacteria in a sand column experiment during the biodegradation of toluene [J]. **Water Research**, 2007, 41(10): 2089-2100.
- [4] Nikolajsen K, Kiwi-Minsker L, Renken A. Structured fixed-bed adsorber based on zeolite/sintered metal fibre for low concentration VOC removal [J]. **Chemical Engineering Research and Design**, 2006, 84(7): 562-568.
- [5] JIN Yi-zhong(金一中), XU Hao(徐灏), XIE Yu-tan(谢裕坛). Adsorption of benzene and toluene vapour on activated carbon(活性炭吸附苯、甲苯废气的研究) [J]. **J Chem Eng of Chinese Univ**(高校化学工程学报), 2004, 18(2): 258-263.
- [6] Wu C Y, Chung T W, Yang T C K, *et al.* Dynamic determination of the concentration of volatile alcohols in a fixed bed of zeolite 13X by FT-IR [J]. **Journal of Hazardous Materials**, 2006, 137(2): 893-898.
- [7] Kim K J, Kang C S, You Y J, *et al.* Adsorption-desorption characteristics of VOCs over impregnated activated carbons [J]. **Catalysis Today**, 2006, 111(3/4): 223-228.
- [8] Zhao X S, Ma Q, Lu G Q. VOC removal: comparison of MCM-41 with hydrophobic zeolites and activated carbon [J]. **Energy & Fuels**, 1998, 12(6): 1051-1054.
- [9] ZHOU Chun-he(周春何), LU Han-feng(卢晗锋), ZENG Li(曾立), *et al.* Relative performance of zeolites and activated carbon in gaseous phase adsorption and desorption of toluene(沸石分子筛和活性炭吸附/脱附甲苯性能对比) [J]. **Environmental Pollution and Control**(环境污染与防治), 2009, 31(4): 38-41.
- [10] Yuan Z Y, Zhou W Z. A novel morphology of mesoporous molecular sieve MCM-41 [J]. **Chemical Physics Letters**, 2001, 333(6): 427-431.
- [11] WANG De-ju(王德举), LIU Zhong-neng(刘仲能), LI Xue-li(李学礼), *et al.* Mesoporous zeolite materials(介孔沸石材料) [J]. **Progress in Chemistry**(化学进展), 2008, 20(5): 637-643.
- [12] MA Jing-hong(马静红), PAN Da-hai(潘大海), LI Rui-feng(李瑞丰), *et al.* Support effects on methane two-step homologation over Pt/MCM-41 catalysts(MCM-41负载铂催化剂在甲烷同系聚合中的载体效应) [J]. **J Chem Eng of Chinese Univ**(高校化学工程学报), 2007, 21(3): 417-422.
- [13] XU Jian(徐坚), YANG Li-ming(杨立明), WANG Yu-jun(王玉军), *et al.* Improvement of lipase immobilization by surface modification of SBA-15 mesoporous silica(介孔分子筛SBA-15的表面改性对脂肪酶固定化的强化作用) [J]. **J Chem Ind and Eng (China)**(化工学报), 2006, 57(10): 2407-2410.
- [14] Wang X Q, Wang M, Jin H X. Preparation of carbon nanotubes at the surface of Fe/SBA-15 mesoporous molecular sieve [J]. **Applied Surface Science**, 2005, 243(1-4): 151-157.
- [15] LIU Lei(刘雷), ZHANG Guo-yong(张高勇), DONG Jin-xiang(董晋湘). Effects of different templating agent on the struction of silica MCM-41 mesoporous molecular sieves(模板剂对全硅MCM-41介孔分子筛结构的影响) [J]. **Acta Physico-Chimica Sinica**(物理化学学报), 2004, 20(1): 65-69.
- [16] ZHANG Bo(张波), SHEN Lian(慎炼), ZHOU Chun-hui(周春晖), *et al.* Synthesis of silica mesoporous molecular sieve MCM-41(全硅MCM-41中孔分子筛的合成) [J]. **J Chem Eng of Chinese Univ**(高校化学工程学报), 2001, 15(1): 29-34.
- [17] Qin H, Jin J L, Zheng P H, *et al.* Dynamic adsorption of volatile organic compounds on organofunctionalized SBA-15 materials [J]. **Chemical Engineering Journal**, 2009, 149(1): 281-288.
- [18] XU Ru-ren(徐如人), PANG Wen-qin(庞文琴). **Chemistry-Zeolites and Porous Materials**(分子筛与多孔材料化学) [M]. Beijing(北京): Science Press(科学出版社), 2004.
- [19] LI Yu-xue(李玉雪), ZHANG Yong-chun(张永春). Removal of trace amount of benzene from  $\text{CO}_2$  by adsorption with modified activated carbon(改性活性炭脱除二氧化碳中的微量苯) [J]. **J Chem Ind and Eng (China)**(化工学报), 2009, 60(6): 1494-1499.
- [20] Urbano D, Jose A V, Avelino C. Synthesis and characterization of hybrid organozeolites with high organic content [J]. **Microporous and Mesoporous Materials**, 2006, 93(1-3): 180-189.
- [21] Kruk M, Jaroniec M, Ryoo R, *et al.* Characterization of the porous structure of SBA-15[J]. **Chem Mater**, 2000, 12(7): 1961-1968.
- [22] WANG Kun(王琨), JIANG An-xi(姜安玺), XU Jiang-xing(徐江兴). A study on the adsorption of volatile organic compounds in indoor air by activated carbon(活性炭吸附室内空气中挥发性有机化合物)[J]. **Environmental Pollution and Control**(环境污染与防治), 1999, 21 (2): 14 -16.
- [23] 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.
- [24] SUN Xiao-feng(孙晓峰), GAO Nai-yun(高乃云), XU Bin(徐斌), *et al.* Breakthrough characteristics of dimethyl phthalate in granular activated carbon(邻苯二甲酸二甲酯在颗粒活性炭中的穿透特性) [J]. **Environmental Science**(环境科学), 2007, 28(8): 1738-1745.