

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20170070

## 碳纳米管/SiO<sub>2</sub>气凝胶对水溶液中甲苯的吸附性能

张 潇, 彭瑜洲, 李朝宇, 赵 磊, 吕佳佳, 彭 啸, 吴 燕  
(天津科技大学化工与材料学院, 天津 300457)

**摘要:** 以正硅酸乙酯 (TEOS) 为原料、氧化碳纳米管 (CNTs-COOH) 为添加物, 采用溶胶-凝胶法, 经表面改性、高温还原制备碳纳米管/SiO<sub>2</sub> 气凝胶 (CS). 通过傅里叶变换红外光谱 (FTIR)、BET 等进行表征, 采用最佳比例的 CS 研究其对水溶液中甲苯的吸附性能. 结果表明: 掺杂 3% CNTs-COOH 的 CS (3% CS) 的松散堆密度为 170 kg/m<sup>3</sup>, 比表面积、平均孔径分别为 1 021 m<sup>2</sup>/g、15.39 nm, 对水溶液中甲苯的最大饱和吸附量为 203 mg/g, 且吸附过程符合 Langmuir 等温吸附模型.

**关键词:** 碳纳米管; 气凝胶; Langmuir 等温吸附; 甲苯水溶液

**中图分类号:** O647.31      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-6510(2018)03-0051-06

## Adsorption of Toluene from Aqueous Solutions with CNTs /SiO<sub>2</sub>

ZHANG Xiao, PENG Yuzhou, LI Chaoyu, ZHAO Lei, LÜ Jiajia, PENG Xiao, WU Yan  
(College of Chemical Engineering and Materials Science, Tianjin University of Science & Technology,  
Tianjin 300457, China)

**Abstract:** With tetraethoxysilane (TEOS) as the raw material, and the oxidized carbon nanotubes (CNT-COOH) as the additive, CNTs/SiO<sub>2</sub> aerogels (CS) were prepared with the sol-gel method, and then given surface modification and high temperature treatment. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and BET were used to characterize the as-synthesized aerogels, and adsorption experiments using optimized CS to adsorb toluene in aqueous solution were carried out. The results show that the bulk density of CS with 3% CNTs-COOH is 170 kg/m<sup>3</sup>, its specific surface area and average pore diameter are 1 021 m<sup>2</sup>/g and 15.39 nm, respectively, and the maximum saturated adsorption capacity of 3% CS for toluene in aqueous solution was 203 mg/g. The adsorption process was in accordance with the Langmuir isotherm model.

**Key words:** carbon nanotube; aerogel; Langmuir adsorption isotherm; toluene solution

芳香族有机化合物如苯、甲苯等在大多数化工生产中通常作为原材料或溶剂使用<sup>[1]</sup>. 由于其具有易燃、有毒、致癌或诱变作用, 在水中少量存在即可导致严重的环境问题<sup>[2-6]</sup>, 因此有效除去水体中的有机污染物是处理有害废水的重要任务之一<sup>[7-12]</sup>. 大量研究<sup>[13-18]</sup>表明: 多孔材料和拥有超疏水性的吸附剂有望解决此问题. 传统多孔材料如沸石<sup>[7]</sup>、木屑<sup>[19]</sup>、羊毛纤维<sup>[19-20]</sup>、活性炭<sup>[21-24]</sup>, 由于其多孔结构和高比表面积已被广泛应用于有机物处理. 但其两亲性、微孔分布过宽、比表面积小等缺点均导致吸附效率很低, 限制了其在有机污染物去除方面的应用.

SiO<sub>2</sub> 气凝胶是一种由纳米粒子组成的具有发达纳米孔道的空间三维网络结构材料<sup>[25]</sup>, 具有低密度 (3 ~ 500 kg/m<sup>3</sup>)、高比表面积 (500 ~ 1 200 m<sup>2</sup>/g)、高孔隙率 (>80%) 等特点<sup>[26-28]</sup>, 是较为理想的固体吸附剂. 但该材料也存在孔径分布不均匀等缺点<sup>[29-30]</sup>, 限制了其吸附性能的应用. 碳纳米管是以 sp<sup>2</sup> 杂化碳原子为主构成的一种类似于蜂巢的六角形网状结构的独特一维大分子纳米材料, 具有比表面积大和化学性质稳定<sup>[31-32]</sup>等优点, 对去除有机污染物有很大的潜力. 通过在 SiO<sub>2</sub> 气凝胶中掺杂碳纳米管形成的具有三维网状结构的气凝胶, 具有密度小、比表面积

收稿日期: 2017-03-22; 修回日期: 2017-06-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (21107080); 天津市大学生创新创业训练计划资助项目 (201610057143)

作者简介: 张 潇 (1993—), 女, 陕西渭南人, 硕士研究生; 通信作者: 吴 燕, 教授, wuyan@tust.edu.cn

大、孔隙率高及表面大量的  $\pi$  电子等优势,可以快速吸附水溶液中的甲苯. 本文采用溶胶-凝胶法,经表面改性、高温还原制备碳纳米管/二氧化硅气凝胶(CS),对其性能进行表征,并研究其对水溶液中不同浓度甲苯的吸附性能.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

碳纳米管,97%,深圳纳米技术有限公司;浓硫酸、浓硝酸、浓盐酸,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;正硅酸乙酯,分析纯,天津福晨化学试剂厂;无水乙醇,分析纯,天津江天化工技术有限公司;氨水,分析纯,天津化学试剂一厂;正己烷,分析纯,天津风船化学试剂科技有限公司;三甲基氯硅烷,分析纯,成都科龙化工试剂厂;甲苯,分析纯,天津市北辰骅跃化学试剂厂.

### 1.2 制备方法

#### 1.2.1 氧化碳纳米管的制备

取碳纳米管 1.0 g 加入 90 mL 浓  $H_2SO_4$  与 30 mL 浓  $HNO_3$  的混合酸溶液中,温度保持在  $25\text{ }^\circ\text{C}$  以下,超声处理 30 min;之后在水浴中强力搅拌 30 min,使原料充分混合. 在三口烧瓶中  $60\sim 65\text{ }^\circ\text{C}$  回流反应 4 h,冷却后抽滤水洗至中性,倒入 800 mL 蒸馏水中,5 000 r/min 离心静置,抽滤,滤饼在  $60\text{ }^\circ\text{C}$  真空干燥 24 h,得到氧化碳纳米管(CNTs-COOH).

#### 1.2.2 碳纳米管/二氧化硅气凝胶的制备

向 9 mL 乙醇中加入不同质量(1#, 0%; 2#, 1%; 3#, 3%; 4#, 5%; 5#, 7%; 6#, 9%)的氧化碳纳米管,混合超声分散 30 min;其后加入 1.5 mL 正硅酸乙酯和 5 mL 水,搅拌使其均匀混合;用 HCl 调节  $\text{pH} = 3\sim 4$ ,  $30\text{ }^\circ\text{C}$  恒温搅拌 30 min;升温至  $40\text{ }^\circ\text{C}$ ,用质量分数为 10% 的氨水乙醇溶液调节  $\text{pH} = 7$ ,待其形成凝胶后,加入适量无水乙醇老化 24 h;加入正己烷,溶剂置换 48 h;加入 20 mL 质量分数为 10% 的三甲基氯硅烷的正己烷溶液进行表面改性 72 h;之后在  $50\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $80\text{ }^\circ\text{C}$  分别干燥 2 h;在  $120\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $150\text{ }^\circ\text{C}$  分别干燥 1 h 得 CNTs-COOH/SiO<sub>2</sub> 气凝胶(COS);在氮气保护下,置于  $500\text{ }^\circ\text{C}$  管式炉中煅烧 3 h 即得碳纳米管/二氧化硅气凝胶(CS).

### 1.3 表征

#### 1.3.1 FTIR 光谱

采用德国布鲁克 TENSOR 27 型傅里叶变换红外

光谱仪测试 CNTs-COOH/SiO<sub>2</sub> 气凝胶、CS 的红外光谱,分析高温还原效果.

#### 1.3.2 密度

将 CS 研磨成粉末,通过质量与体积比计算其松散堆密度与振实堆密度.

#### 1.3.3 BET 测试

在美国康塔 AUTOSORB-IQ 型化学吸附仪上进行吸附实验,测定 CS 的比表面积、孔径分布、孔容,绘制 N<sub>2</sub> 吸附-脱附曲线.

### 1.4 对水溶液中甲苯的吸附性能

为了研究 CS 在不同条件下对甲苯的吸附效果,在 250 mL 锥形瓶中分别加入 0.05 g CS、0.05 g SiO<sub>2</sub> 气凝胶、0.05 g 活性炭(AC),再分别加入初始质量浓度为  $10\sim 100\text{ mg/L}$  的甲苯水溶液 100 mL,通过 HCl、NaOH 分别调节  $\text{pH}$  为 3、7、11,在 293 K 下搅拌,吸附 3 h 达到平衡,离心 20 min,取上层清液,通过上海美谱达 UV-1 800 型紫外可见分光光度计在 261 nm 处测定甲苯水溶液的吸光度随时间的变化. 根据甲苯标准曲线计算出其饱和吸附量.

$$q = \frac{(\rho_0 - \rho)V}{m} \quad (1)$$

式中:  $q$  为吸附量, mg/g;  $\rho_0$  为吸附前甲苯溶液的质量浓度, mg/L;  $\rho$  为吸附后甲苯溶液的质量浓度, mg/L;  $V$  为溶液体积, L;  $m$  为吸附剂质量, g.

## 2 结果与讨论

### 2.1 FTIR 光谱分析

CS 和 COS 的红外光谱图如图 1 所示.

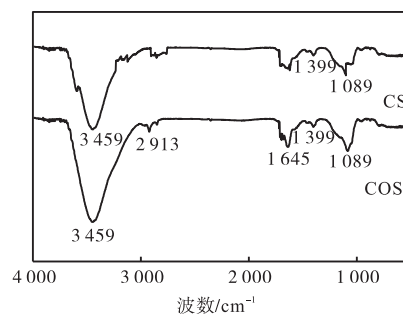


图 1 气凝胶的红外光谱图

Fig. 1 Infrared spectra of aerogel

由图 1 可以看出: COS 在  $1645$ 、 $3459\text{ cm}^{-1}$  的吸收峰分别是强酸氧化后引入的  $-\text{COOH}$ 、 $-\text{OH}$  的振动峰,在  $2913\text{ cm}^{-1}$  的吸收峰为羧基的  $\text{C}=\text{O}$  的振动峰;而经高温还原后,  $1645$ 、 $3459\text{ cm}^{-1}$  的吸收峰均

减弱,说明其中的含氧官能团减少; 1 399 cm<sup>-1</sup> 处的吸收峰对应于—CH<sub>3</sub> 和—CH<sub>2</sub>—的弯曲振动峰; 1 000 ~ 1 221 cm<sup>-1</sup>强烈的吸收峰对应于 Si—O—Si 的非对称伸缩振动峰. 由以上结论可知: COS 经高温还原为 CS, 其中含氧官能团的大为减少, 有利于其对甲苯的吸附.

### 2.2 堆密度测定结果

实验对样品的松散堆密度与振实堆密度进行了测定, 结果如图 2 所示. 由图 2 可以看出: 随着 CNTs-COOH 掺杂量的增加, CS 的堆密度逐渐增加, 但掺杂量为 1%、3%、5% 时, 堆密度增长幅度不大; 主要原因是 CNTs-COOH 掺杂量较少时, CNTs-COOH 能均匀分布于二氧化硅气凝胶中, 起桥联与支撑的作用, 掺杂 3% CNTs-COOH 的 CS 的松散堆密度为 170 kg/m<sup>3</sup>. 但当掺杂量增加到 7%、9% 时, 堆密度显著增加; 原因可能是在反应过程中会引起 CNTs-COOH 之间相互粘连, 部分孔结构被堵塞, 从而导致材料的堆密度逐渐增大.

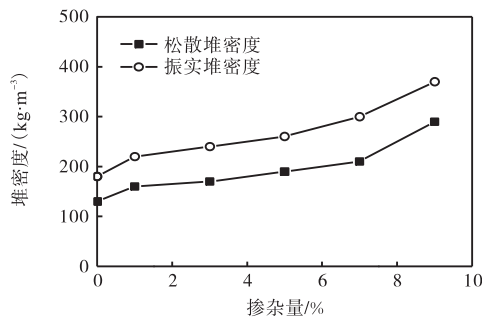


图 2 CS 的堆密度  
Fig. 2 Density of CS

### 2.3 BET 测试结果

CS 的比表面积、孔容、孔径数据见表 1.

表 1 CS 的比表面积、孔容、孔径

Tab. 1 Specific surface area, pore volume and pore size of CS

样品	掺杂量/%	比表面积/ (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	孔容/ (cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	孔径/ nm
1#	0	979	1.52	1.24
2#	1	995	3.01	9.94
3#	3	1 021	3.38	15.39
4#	5	1 005	2.80	9.01
5#	7	996	2.37	2.60
6#	9	941	1.79	1.23

由表 1 可以看出: 随着 CNTs-COOH 掺杂量的增加, CS 的比表面积、孔容、孔径均先增大后减小, 掺杂 3% CNTs-COOH 的 CS 效果最好. 这可能是因为

掺杂少量 CNTs-COOH 时其能均匀分布于二氧化硅气凝胶中, 起桥联、支撑作用形成三维网状结构; 而当 CNTs-COOH 加入量过多会使其在反应过程中相互粘连, 堵塞部分微孔孔道, 导致孔径变小. 掺杂 3% CNTs-COOH 的 CS 的孔径分布曲线如图 3 所示. 由图 3 可知: 掺杂 3% CNTs-COOH 的 CS 的孔径分布在 1 ~ 120 nm 范围内, 主要集中在 20 nm 以内, 其平均孔径为 15.39 nm, 是典型的介孔材料.

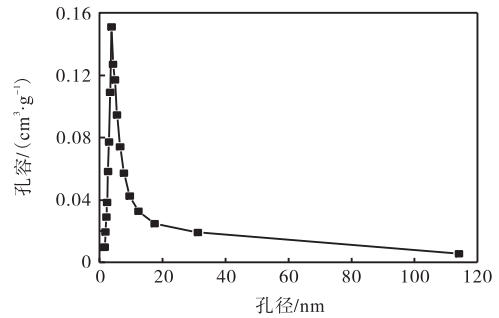


图 3 CS 的孔径分布曲线  
Fig. 3 Pore size distribution curves of CS

掺杂 3% CNTs-COOH 的 CS 的 N<sub>2</sub> 吸附-脱附曲线如图 4 所示. 根据 IUPAC 气体吸附等温线的分类标准<sup>[33]</sup>可知: SiO<sub>2</sub> 与 CS 的等温线均属于 IV 型, 说明气凝胶样品内的孔隙均为典型的介孔结构. 在吸附的初始阶段, 主要以单分子层吸附为主, 吸附量迅速增大, 但是 SiO<sub>2</sub> 气凝胶吸附量低于掺杂 3% CNTs-COOH 的 CS; 随着相对压力 ( $p/p_0$ ) 的增加, 二者均变成多层吸附, 吸附量缓慢增加; 当相对压力  $p/p_0 > 0.7$  时, 发生毛细管凝聚, 吸附量迅速增加, 即等温线上出现飞跃增长. 而掺杂 3% CNTs-COOH 的 CS 的表面吸附明显优于 SiO<sub>2</sub> 气凝胶.

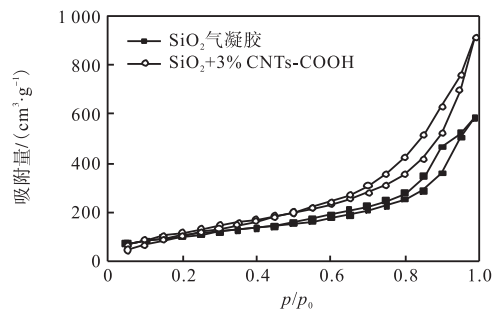


图 4 CS 的氮气吸附-脱附曲线  
Fig. 4 The nitrogen adsorption and desorption curve of CS

### 2.4 对水溶液中甲苯的吸附

综合以上测试结果等分析, 选取掺杂 3% CNTs-COOH 的 CS (3% CS) 进行甲苯吸附性能研究. 表 2

给出在 pH 3、293 K 条件下,不同吸附剂对水溶液中 100 mg/L 甲苯的饱和吸附量.由表 2 可以看出:3% CS 对水溶液中甲苯的吸附表现出良好的效果,最大饱和吸附量达 203 mg/g.

表 2 不同吸附剂对甲苯的饱和吸附量

Tab. 2 Saturated adsorption capacity of toluene with different adsorbents

吸附剂	饱和吸附量/ (mg·g <sup>-1</sup> )	比表面积/ (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	孔径/ nm	数据来源
3% CS	203	1 021	15.39	本文
SiO <sub>2</sub> 气凝胶	149	979	1.24	本文
AC	96	1 000	4	本文
单壁碳纳米管	81	247.6	0.88	文献[34]
多壁碳纳米管	71	310	0.25	文献[35]
活性炭纤维	85	483	1.2	文献[36]

本文通过 Langmuir 及 Freundlich 模型对水溶液中甲苯的吸附进行拟合.

$$q_e = q_{\max} \frac{k_L \rho_e}{1 + k_L \rho_e} \quad (2)$$

$$q_e = K_f \rho_e^{1/n} \quad (3)$$

式中:  $\rho_e$  为吸附达到平衡时甲苯水溶液的质量浓度, mg/L;  $q_{\max}$  是吸附剂的最大吸附量,  $q_{\max}$  与吸附位有关,理论上与温度是无关的,  $q_{\max}$  越大,表明吸附能力越强;  $k_L$  是吸附平衡常数;  $K_f$  表示吸附剂的吸附能力;  $n$  表示吸附强度.

不同 pH 条件下, AC、SiO<sub>2</sub> 气凝胶、3% CS 对水溶液中不同质量浓度甲苯的吸附等温曲线如图 5 所示.从图 5 中可以看出:与 AC 相比, SiO<sub>2</sub> 气凝胶、3% CS 在不同质量浓度的甲苯水溶液中都表现出较高的饱和吸附量.通过掺杂碳纳米管的方式可以使气凝胶的吸附性能进一步提高,3% CS 的饱和吸附量大约为 AC 饱和吸附量的 2 倍. CS 与有机物结合主要通过  $\pi$ - $\pi$  键、氢键和静电作用等方式实现<sup>[37-38]</sup>,而在整个 pH 范围内,甲苯都以分子形式存在,  $\pi$ - $\pi$  键为主要作用<sup>[39]</sup>;酸性条件下 CS 能在水中很好地分散,且其表面大量  $\pi$  电子、未饱和的化学键与甲苯之间强的  $\pi$ - $\pi$  作用使其具有良好的吸附性能.改性后的复合气凝胶其外表面具有很强的疏水性,减弱了水分子的竞争吸附能力<sup>[40]</sup>,相对增加了吸附甲苯的活性吸附位;另一方面掺杂碳纳米管到吸附剂的内表面,取代了孔道内的部分配位,堵塞部分微孔孔道,从而减小了甲苯分子在流动过程中的阻力,而且形成的三维空间网络结构使层与层之间的作用力减弱,从而有利于甲苯分子的进入及有效吸附.另外,碳纳米管表

面分布有缺陷、功能团以及团簇间的孔隙等吸附能量低的点,会造成有机物倾向于结合在这些特殊点上.综上所述,CS 吸附水溶液中甲苯的机理可能是:首先气凝胶表面疏水作用相对增加了甲苯分子的活性吸附位,在  $\pi$ - $\pi$  键作用下被气凝胶吸附在外表面,然后由于碳纳米管表面缺点等低能量位点的强有力吸附,表面积聚的大量甲苯分子进入 CS 的内部,最终将甲苯分子有效吸附.

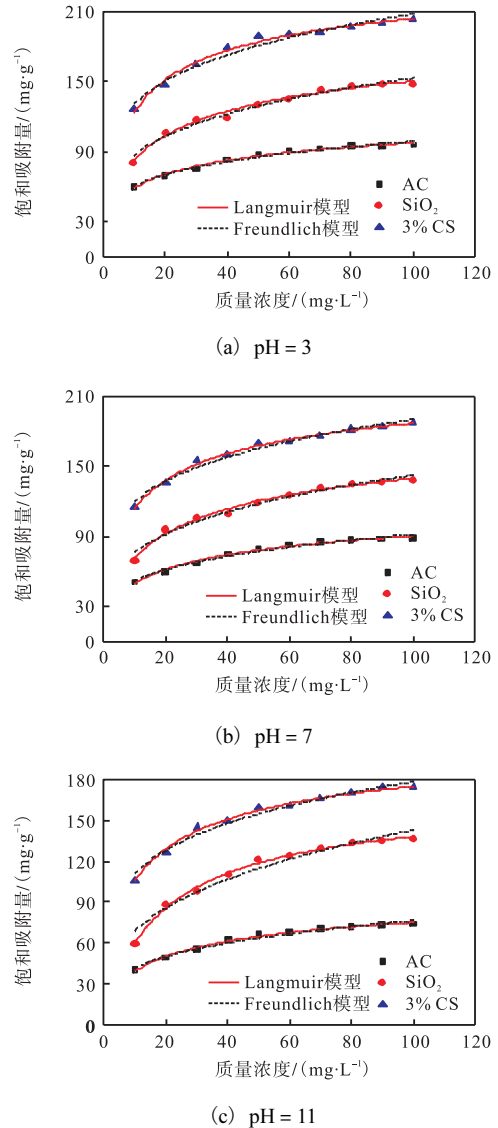


图 5 不同 pH 下不同样品的吸附等温线  
Fig. 5 Adsorption isotherms of different samples under different pH

表 3 和表 4 分别给出了由 Langmuir 与 Freundlich 方程拟合的吸附实验数据的参数.结果表明:Langmuir 与 Freundlich 方程均可以很好地描述实验数据.Langmuir 方程的相关系数均大于 0.98, Freundlich 方程的相关系数均大于 0.96.

表 3 Langmuir 方程参数

Tab. 3 Parameters of Langmuir equation

样品	$q_{\max}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$			$k_L/(\text{L}\cdot\text{mg}^{-1})$		
	pH = 3	pH = 7	pH = 11	pH = 3	pH = 7	pH = 11
AC	146.63	108.10	82.60	0.064	0.076	0.085
SiO <sub>2</sub>	247.37	200.81	159.51	0.058	0.062	0.089
3% CS	253.24	244.48	220.54	0.220	0.237	0.218

表 4 Freundlich 方程参数

Tab. 4 Parameters of Freundlich equation

样品	$1/n$			$K_f/(\text{L}\cdot\text{mg}^{-1})$		
	pH = 3	pH = 7	pH = 11	pH = 3	pH = 7	pH = 11
AC	0.21	0.25	0.26	37.29	29.35	22.65
SiO <sub>2</sub>	0.25	0.27	0.32	49.19	40.60	33.03
3% CS	0.20	0.20	0.21	82.30	75.28	69.31

### 3 结 论

(1) 以 TEOS 为原料, CNTs-COOH 为添加物, 采用溶胶-凝胶法制备 CS; 当 CNTs-COOH 掺杂量为 3% 时, CS 的松散堆密度为 170 kg/m<sup>3</sup>, 比表面积和平均孔径分别为 1 021 m<sup>2</sup>/g、15.39 nm, 其性能相比于纯 SiO<sub>2</sub> 气凝胶有了显著的提高。

(2) 酸性条件下 3% CS 对水溶液中甲苯有较高的饱和吸附量. 其最大饱和吸附量达 203 mg/g, 约为 AC 最大饱和吸附量的 2 倍。

#### 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(4): 788-791.
- [2] 施周, 杨文浩, 杨灵芳, 等. 等离子改性 CNT/TiO<sub>2</sub> 电极吸附去除水中苯酚的研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(9): 2664-2669.
- [3] 姜德彬, 余静, 叶芝祥, 等. 磁性纳米复合物对水中亚甲基蓝的吸附及其机理[J]. 中国环境科学, 2016, 36(6): 1763-1772.
- [4] 史兵方, 全海娟, 左卫元, 等. 麻疯树籽壳生物质炭的制备及其吸附水中 PAHs 性能研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(4): 1059-1066.
- [5] Redding A Z, Burns S E, Upson R T, et al. Organoclay sorption of benzene as a function of total organic carbon content[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2002, 250(1): 261-264.
- [6] Lillo-Ródenas M A, Cazorla-Amorós D, Linares-Solano A. Behaviour of activated carbons with different pore size

- distributions and surface oxygen groups for benzene and toluene adsorption at low concentrations[J]. Carbon, 2005, 43(8): 1758-1767.
- [7] Bi H, Xie X, Yin K, et al. Spongy graphene as a highly efficient and recyclable sorbent for oils and organic solvents[J]. Advanced Functional Materials, 2012, 22(21): 4421-4425.
  - [8] Choi S J, Kwon T H, Im H, et al. A polydimethylsiloxane(PDMS) sponge for the selective absorption of oil from water[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2011, 3(12): 4552-4556.
  - [9] Wu J, Wang N, Wang L, et al. Electrospun porous structure fibrous film with high oil adsorption capacity[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2012, 4(6): 3207-3212.
  - [10] Nishi Y, Iwashita N, Sawada Y, et al. Sorption kinetics of heavy oil into porous carbons[J]. Water Research, 2002, 36(20): 5029-5036.
  - [11] Zhao M Q, Huang J Q, Zhang Q, et al. Improvement of oil adsorption performance by a sponge-like natural vermiculite-carbon nanotube hybrid[J]. Applied Clay Science, 2011, 53(1): 1-7.
  - [12] Gui X, Li H, Wang K, et al. Recyclable carbon nanotube sponges for oil absorption[J]. Acta Materialia, 2011, 59(12): 4798-4804.
  - [13] Zhang J, Pu G, Severtson S J. Fabrication of zinc oxide/polydimethylsiloxane composite surfaces demonstrating oil-fouling-resistant superhydrophobicity[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2010, 2(10): 2880-2883.
  - [14] Wang C F, Lin S J. Robust superhydrophobic/superoleophilic sponge for effective continuous absorption and expulsion of oil pollutants from water[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2013, 5(18): 8861-8864.
  - [15] Zhu Q, Pan Q, Liu F. Facile removal and collection of oils from water surfaces through superhydrophobic and superoleophilic sponges[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2011, 115(35): 17464-17470.
  - [16] Li A, Sun H X, Tan D Z, et al. Superhydrophobic conjugated microporous polymers for separation and adsorption[J]. Energy & Environmental Science, 2011, 4(6): 2062-2065.
  - [17] Zha D A, Mei S L, Wang Z Y, et al. Superhydrophobic polyvinylidene fluoride/graphene porous materials[J]. Carbon, 2011, 49(15): 5166-5172.

- [18] 王倩,张璇,段华珍,等. 玉米芯废渣多孔碳的制备及其对液体苯的吸附[J]. 天津科技大学学报, 2016, 31(3): 43-47.
- [19] Annunciado T R, Sydenstricker T H D, Amico S C. Experimental investigation of various vegetable fibers as sorbent materials for oil spills[J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, 50(11): 1340-1346.
- [20] Bayat A, Aghamiri S F, Moheb A, et al. Oil spill cleanup from sea water by sorbent materials[J]. Chemical Engineering & Technology, 2005, 28(12): 1525-1528.
- [21] 金一中,徐灏,谢裕坛. 活性炭吸附苯、甲苯废气的研究[J]. 高校化学工程学报, 2004, 18(2): 258-263.
- [22] 张小璇,叶李艺,沙勇,等. 活性炭吸附法处理染料废水[J]. 厦门大学学报:自然科学版, 2005, 44(4): 542-545.
- [23] 许伟,刘军利,孙康. 活性炭吸附法在挥发性有机物治理中的应用研究进展[J]. 化工进展, 2016, 35(4): 1223-1229.
- [24] 杨娜,叶树强,周朝勇. 活性炭吸附在工业废水处理中的应用[J]. 企业技术开发月刊, 2016, 35(4): 49-50.
- [25] 雷尧飞,陈晓红,王美月,等. 碳纳米管掺杂对柔性气凝胶性能的影响[J]. 南京工业大学学报:自然科学版, 2016, 38(2): 33-36.
- [26] 王飞,刘朝辉,叶圣天,等. SiO<sub>2</sub>气凝胶保温隔热材料在建筑节能技术中的应用[J]. 表面技术, 2016(2): 144-150.
- [27] Liu J X, Shi F, Bai L N, et al. Synthesis of TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> aerogel via ambient pressure drying: Effects of sol pre-modification on the microstructure and pore characteristics[J]. Journal of Sol-gel Science and Technology, 2014, 69(1): 93-101.
- [28] Chen H, Sui X Y, Zhou C L, et al. Preparation and characterization of monolithic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> aerogel[J]. Journal of the Ceramic Society of Japan, 2016, 124(4): 442-447.
- [29] 陈姚, 鄞赵龙, 黄湘桦, 等. 纳米二氧化硅气凝胶隔热材料的研究进展[J]. 无机盐工业, 2010, 42(11): 4-6.
- [30] 高庆福,张长瑞,冯坚,等. 氧化硅气凝胶隔热复合材料研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2009, 27(2): 302-306.
- [31] Smart S K, Cassady A I, Lu G Q, et al. The biocompatibility of carbon nanotubes[J]. Carbon, 2006, 44(6): 1034-1047.
- [32] Mauter M S, Elimelech M. Environmental applications of carbon-based nanomaterials[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(16): 5843-5859.
- [33] Rouquerol J, Avnir D, Fairbridge C W, et al. Recommendations for the characterization of porous solids[J]. Pure and Applied Chemistry, 1994, 66(8): 1739-1758.
- [34] Chin C J M, Shih L C, Tsai H J, et al. Adsorption of o-xylene and p-xylene from water by SWCNTs[J]. Carbon, 2007, 45(6): 1254-1260.
- [35] Lu C, Su F, Hu S. Surface modification of carbon nanotubes for enhancing BTEX adsorption from aqueous solutions[J]. Applied Surface Science, 2008, 254(21): 7035-7041.
- [36] Mangun C L, Yue Z R, Economy J, et al. Adsorption of organic contaminants from water using tailored ACFs[J]. Chemistry of Materials, 2001, 13(7): 2356-2360.
- [37] Upadhyayula V K K, Deng S G, Mitchell M C, et al. Application of carbon nanotube technology for removal of contaminants in drinking water: A review[J]. Science of the Total Environment, 2009, 408(1): 1-13.
- [38] 南豆. 碳纳米管表面复合材料的制备及表面性能研究[D]. 北京:清华大学, 2013.
- [39] Villacañas F, Pereira M F R, Órfão J J M, et al. Adsorption of simple aromatic compounds on activated carbons[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2006, 293(1): 128-136.
- [40] Sun T, Zhuo Q, Liu X, et al. Hydrophobic silica aerogel reinforced with carbon nanotube for oils removal[J]. Journal of Porous Materials, 2014, 21(6): 967-973.

责任编辑:周建军