萘在粘胶基活性炭纤维上的吸附

张天永^{1,2,*} 杨秋生¹ 史慧贤¹ 韩 聪¹ 刘 旭¹⁽¹⁾ 天津大学化工学院, 天津 300072; ⁽²⁾ 福建省光催化重点实验室——省部共建国家重点实验室培育基地, 福州大学, 福州 350002)

摘要: 研究了水溶液中萘在粘胶基活性炭纤维(VACF)吸附剂上的等温吸附. 用多种吸附方程(Langmuir、Freundlich、Dubinin-Radushkevitch (D-R)、Dubinin-Astolov (D-A)、Langmuir-Freundlich (L-F)、Redlich-Peterson (R-P))对吸附实验数据进行拟合, 考察了温度、pH 和负载铜离子对萘吸附的影响. 方程拟合结果表明微孔吸附容积填充理论对 VACF 吸附萘有较好的适用性, 优于单层吸附理论. 在 20–40 °C 之间, 萘的吸附是自发进行的, 30 °C 以上时, 萘的吸附量显著降低. 提出了新的机理来解释 pH 较低时吸附量显著上升的实验现象. 负载铜离子后 VACF 对萘吸附量降低.

关键词: 吸附; 活性炭纤维; 萘; 吸附方程; 铜离子

中图分类号: O647.3

Adsorption of Naphthalene on a Viscose-Based Activated Carbon Fiber

ZHANG Tian-Yong^{1,2,*} YANG Qiu-Sheng¹ SHI Hui-Xian¹ HAN Cong¹ LIU Xu¹⁽¹⁾School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China;⁽²⁾State Key Laboratory Breeding Base of Photocatalysis, Fuzhou University Fuzhou 350002, P. R. China)

Abstract: We studied the isothermal adsorption of naphthalene on a viscose-based activated carbon fiber (VACF) in aqueous solution. The adsorption experimental data were fitted to adsorption equations such as the Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevitch (D-R), Dubinin-Astolov (D-A), Langmuir-Freundlich (L-F), and Redlich-Peterson (R-P) equations. The effects of temperature, pH, and pre-loaded copper ions on the VACF on the adsorption of naphthalene were investigated. The fitting results show that the micropore volume filling theory fits better than the single-layer adsorption theory for naphthalene adsorption onto VACF. The adsorption of naphthalene occurs spontaneously between 20 and 40 °C. The adsorption capacity of VACF for naphthalene decreases significantly above 30 °C. A new mechanism is proposed to explain why the adsorption capacity increases significantly in lower pH aqueous solutions. The reduction of naphthalene takes place on the VACF with pre-loaded copper ions.

Key Words: Adsorption; Activated carbon fiber; Naphthalene; Adsorption equation; Copper ion

在制焦工业、石油开采和油气燃烧中产生了大量的废气, 它们大都含有较多的联苯、萘、菲等多环芳烃化合物, 最终大部分富集在水环境中. 这些多环芳烃有机物化学性质稳定, 是人类环境致癌化学物质中最大的一类. 目前这类物质的净化方法有生物降解、光降解、化学絮凝、高能离子束照射、臭氧氧

化、催化分解、活性炭净化处理等. 从去除效率、成本等方面考虑, 活性炭净化处理是较优的方法. 相比于普通活性炭, 活性炭纤维(ACF)具有微孔结构发达、比表面积和吸附容量大、大量微孔开口在纤维丝表面、孔径分布集中、对苯类化合物吸附力较强等特点, 现已广泛用于气体分离和废水处理等方面^[1]. 由

Received: June 30, 2009; Revised: December 2, 2009; Published on Web: December 29, 2009.

*Corresponding author. Email: tyzhang@tju.edu.cn; Tel: +86-22-27406610.

The project was supported by the State Key Laboratory Breeding Base of Photocatalysis, Fuzhou University, China (K-081027).

福建省光催化重点实验室——省部共建国家重点实验室(K-081027)资助项目

© Editorial office of Acta Physico-Chimica Sinica

于萘具有低毒性、结构简单、在环境中易存在,最适合作为多芳烃的模型化合物进行研究.同时本课题组在研究萘一步羟基化法制备萘酚反应中,利用ACF做为催化剂的载体,也需要阐明萘在ACF上吸附情况,进而分析反应可能的机理^[2].文献对ACF吸附离子和强极性有机物已有报道,ACF吸附离子如 CrO_4^{2-} 、 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Ag^+ 时,溶液的pH值对吸附量有显著影响^[3];吸附强极性有机物如亚甲蓝、敌草隆、氨基三唑时,影响因素主要有溶液pH、离子强度、ACF的表面性质等^[4-5].萘作为最简单的二元芳环的弱极性有机物,目前鲜见其在ACF上液相吸附的相关报道,且液相吸附中,由于存在吸附质、溶剂、吸附剂同种分子之间及异种分子之间的竞争吸附,所以比气相吸附更复杂^[6],人们对此类吸附的机理依然没有完全弄清楚.本文采用粘胶基活性炭纤维(VACF)为吸附剂,以萘为吸附质,研究了水溶液中不同温度、pH条件下吸附萘的等温曲线以及VACF吸附铜离子后对萘吸附的影响,分析了影响萘吸附的多种因素.

1 实验部分

1.1 原料与仪器

萘($\geq 99.5\%$),江苏南通柏盛化工有限公司;VACF,纤维直径15–20 μm ,孔径为1.5–2.0 nm,总比表面积1793 $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$,其中微孔为1762 $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$,鞍山森鑫活性炭厂.其它药品均为分析纯,含量大于99%,由天津市江天化工技术有限公司提供.

DF-1019型集热式恒温磁力搅拌器(河南爱博特科技发展有限公司);He λ ios γ型紫外可见分光光度计、NICOLET380型红外光谱仪(均为美国Thermo);SHB-III型循环水式真空泵(郑州长城科工贸有限公司);AR 1140分析天平(美国Ohaus);Autosorb-1型全自动比表面和孔径分布分析仪(美国Quantachrome)

1.2 VACF的预处理

将毡状的VACF剪成1 cm×2 cm,加入去离子水,搅拌,浸泡24 h.抽滤,离心,水洗3次.再加入0.5 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸溶液,浸泡24 h.再抽滤,离心,水洗至中性,无氯离子存在.放入烘箱中,120 $^{\circ}\text{C}$ 干燥6 h.

1.3 VACF表面性质分析

按照文献[7]方法,采用Boehm滴定方法测定表面含氧基团的数目及PZC(等电点).用红外光谱鉴别VACF表面存在的官能团,将干燥后的VACF研为细粉末,用KBr压片法测试红外光谱,累加次数

为20次.

1.4 吸附平衡时间测定

称取VACF约10 mg(精确至0.1 mg),加入到250 mL三角瓶中,准确加入250 mL的20.72 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 萘溶液,密封后,在30 $^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴中搅拌,保持转速为200 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$,分别经过1、1.5、2、4、8、10、15、20、25、30 h后取样,每次取样1 mL,稀释后测定其吸光度.并根据工作曲线方程(以219.5 nm作为测定波长,按郎伯-比尔定律得到工作曲线方程)计算其浓度,得到溶液浓度与时间的关系曲线.

1.5 等温吸附曲线的测定

1.5.1 不同温度下的等温吸附测定

在一系列250 mL三角瓶中分别加入一定质量的VACF和浓度为20.72 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的不同体积的萘水溶液,补加去离子水到250 mL,密封后,在不同温度(20、25、30、35、40 $^{\circ}\text{C}$)下于恒温水浴中搅拌24 h,保持转速为200 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$,过滤,将滤液稀释后,测定吸光度,计算滤液中萘的浓度.按下式计算吸附量: $q=V(C_0-C_e)/m$,式中, q 为吸附量($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$), V 为溶液体积(L), C_0 和 C_e 分别为吸附前和吸附平衡时萘的浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), m 为VACF的质量(g).

1.5.2 不同pH的萘水溶液吸附

在加入VACF前,先用0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH溶液或盐酸溶液调节萘溶液的pH为碱性或酸性,吸附平衡后,再测定溶液的pH.其余同1.5.1节.

1.5.3 VACF-Cu对萘的吸附

将VACF换成VACF-Cu,在30 $^{\circ}\text{C}$ 下按1.5.1节的方法吸附.VACF-Cu是将预处理后的6 g VACF浸泡在90 mL的0.40 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硝酸铜溶液中,室温下保持24 h,过滤后,洗至滤液中无铜离子为止.120 $^{\circ}\text{C}$ 干燥6 h,用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP)测定铜离子负载量为0.62 $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$,记为VACF-Cu.

2 结果与讨论

2.1 VACF的表征

活性炭纤维主要有粘胶基、聚丙烯腈基、酚醛基、沥青基四类.VACF主要由C、H、O三种元素组成,含有许多不同含氧的官能团结构,如羧基、羰基、内酯基、酚羟基、醌基等.不同强度的碱可以与相应强度的表面酸性基团反应,经Boehm滴定^[7]测得总酸为1.26 $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$,羧基为0.44 $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$,内酯酸为0.11 $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$,酚羟基为0.71 $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$,PZC为

5.76.

VACF 的表面含氧官能团较多, 红外光谱中峰形叠加严重. 图 1 中, 3440 cm^{-1} 为 VACF 最强吸收峰, 表示存在大量不同聚合程度的羟基, 这些物质可能是少量的吸附水分和醇酚的多聚物. 1645 cm^{-1} 为乱层石墨的类芳环结构峰和羧基的反对称伸缩振动峰. 1100 cm^{-1} 处为酚羟基的变角振动吸收峰和醚键的反对称吸收峰. 1150 cm^{-1} 为内酯基的反对称伸缩峰^[8-10]. 通过以上两种表征方法的相互补充及印证, 较清楚地了解 VACF 的表面官能团情况.

2.2 吸附平衡时间

以 219.5 nm 为检测波长, 测得不同浓度下萘的吸光度数据, 经过 Origin7.5 处理, 得到线性方程为 $C=2.2611A+0.1333$, 式中 A 为测得的萘溶液的吸光度数值, C 为萘溶液的浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 相关系数 $r=0.999$.

水溶液中有机物在 VACF 上吸附达到平衡的时间, 主要由浓度、温度、搅拌情况、溶解度、吸附剂性质等多种因素决定. 苯类物质的吸附动力学模型多为类二级^[11], 吸附质浓度越高, 吸附速度越快, 吸附质浓度随时间呈非线性变化, 但是初始吸附时呈现一定的线性关系(见图 2), 可能是吸附质浓度远远大于空白吸附位的原因. 从图 2 可知, 在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 情况下, 达到吸附平衡的时间为 15 h . 因此设定了 24 h 的足够时间来保证达到吸附平衡.

2.3 等温吸附方程

2.3.1 不同的拟合方程

等温吸附曲线常用来表征不同浓度下吸附的平衡状态, 同时也可以得到吸附剂孔结构, 吸附热效应等信息. 图 3 为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 不同浓度的萘溶液吸附 24 h 时, 所得到的萘的吸附等温线.

图 1 VACF 的红外光谱
Fig.1 Infrared spectrum of VACF

图 2 VACF 对萘吸附的浓度-时间关系
Fig.2 Concentration-time ($C-t$) in adsorption of naphthalene on VACF

参考了许多等温吸附方程的报道^[12], 采用 Origin 7.5 对实验数据(见图 3)按表 1 中的方程进行了拟合. 结果表明, 后三个方程(D-A、L-F、R-P)要优于前三个方程(Langmuir、Freundlich、D-R). Freundlich 方程是经验式, 主要用来拟合异质表面. 拟合结果较差, 也表明 VACF 表面的均质性相对较好, n 值较大也表示萘与 VACF 之间的吸附力较强. Langmuir 方程是基于单分子层吸附, 吸附质之间无作用力, 吸附剂表面均一的基础而建立的. 萘分子的大小为 0.7 nm ^[13], 面积约为 0.45 nm^2 , 按萘饱和吸附量 $763.8\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 计算, 达到吸附平衡时萘约占 VACF 总比表面积的 90%左右, 说明萘在 VACF 上吸附效果较佳. 这与 VACF 是非极性表面, 较小的孔径结构特点密切相关. 萘与 VACF 表面之间的色散力起主要作用^[14-15]. Langmuir 方程拟合结果表明萘在 VACF 的吸附接

图 3 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时萘在 VACF 上的等温吸附及其拟合曲线
Fig.3 Isotherm and fitting-curve in adsorption of naphthalene on VACF at $30\text{ }^{\circ}\text{C}$
D-R: Dubinin-Radushkevitch, D-A: Dubinin-Astalov, L-F: Langmuir-Freundlich, R-P: Redlich-Peterson

表 1 30 °C 时不同等温吸附方程的拟合结果
Table 1 Fitting results of different isotherm equations at 30 °C

	Isotherm equation	Parameters	R^2
Freundlich	$q_e = K_F C_e^{1/n}$	$K_F = 259.4 \text{ (mg} \cdot \text{g}^{-1})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})^{0.52}$, $1/n = 0.52$	0.934
Langmuir	$q_e = K_L q_m C_e / (1 + K_L C_e)$	$q_m = 763.8 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, $K_L = 0.51 \text{ L} \cdot \text{mg}^{-1}$	0.972
D-R	$q_e = q_m \exp\{-(RT/E) \ln(C_e/C_0)\}^2$	$q_m = 825.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, $E = 8.71 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	0.962
D-A	$q_e = q_m \exp\{-(RT/E) \ln(C_e/C_0)\}^4$	$q_m = 566.6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, $E = 9.98 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	0.990
L-F	$q_e = q_m (K_{LF} C_e)^m / [1 + (K_{LF} C_e)^m]$	$q_m = 551.4 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, $K_{LF} = 0.92 \text{ L} \cdot \text{mg}^{-1}$, $m = 1.68$	0.992
R-P	$q_e = K_R C_e / (1 + a C_e^\beta)$	$K_R = 275.4 \text{ L} \cdot \text{g}^{-1}$, $a = 0.086 \text{ L} \cdot \text{mg}^{-1}$, $\beta = 1.943$	0.991

近单层吸附,但是由于表面存在含氧官能团和萘溶液溶度较高,所以偏离理想状态略显偏大,导致拟合结果出现偏差.进一步研究发现 Langmuir 方程在结合了 Freundlich 方程特点后形成的 L-F 和 R-P 三参数方程,拟合结果均优良.

D-A 和 D-R 方程的理论基础是微孔吸附容积充填理论^[16].活性炭纤维是乱层石墨结构,孔径多在 2 nm 以下,具有极大的表面能,微孔与孔壁共同作用形成强大的分子场,提供了一个吸附态分子物理和化学变化的准高压体系,被吸附分子按吸附势大小逐步充填.萘的吸附主要在 2 nm 以下的孔中进行^[14,17],此种理论与 VACF 的结构特点较符合,拟合结果也较好.当用 Weibull 分布(D-A)取代 Gaussian 分布(D-R)来描述孔的分布特点,方程指数由 2 变为 4 时,D-A 方程对萘在 VACF 上的等温吸附曲线拟合效果更佳.

2.3.2 温度对萘吸附的影响

萘为芳烃类物质,性质稳定,环上没有被取代的极性基团,在非极性面上主要是物理吸附^[19].参照文献[20]的方法,得到活性炭吸附萘的标准吸附自由能 ΔG 的公式为 $\Delta G = -RT \ln(q_m K_L / Sd)$,其中 S 为 VACF 的比表面积, d 为吸附层厚度,取值为 0.6 nm.经计算,20–40 °C 之间萘的吸附自由能 ΔG 约为 $-32 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$,小于 0,说明吸附为自发进行.

表 2 列出了不同温度下萘在 VACF 上吸附拟合 Langmuir 方程.表 2 中的数据表明,20–30 °C 之间 VACF 的饱和吸附量变化不大,说明微孔吸附接

近饱和后,很难进行再吸附.色散力与温度变化无相关性,所以进一步证明了色散力为主要的吸附作用力^[21].但是随着温度的上升,萘在水中的溶解度增大,吸附的分子动能增加,同时官能团之间的静电作用也下降,水簇被破坏,水分子可以自由进入微孔中,导致平衡吸附量下降.温度 30、35、40 °C 时,平衡吸附量分别为 763.8 、 676.8 、 $404.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,变化显著,可能是 VACF 某类官能团集体作用的结果.这一点有待于进一步的研究分析.

2.3.3 pH 对萘吸附的影响

在水溶液中的吸附,由于存在大量的水分子,它与 VACF、吸附质之间存在不同的作用力,所以比氮气、烷烃之类的气体吸附情况更复杂.大量的实验和分子模拟研究表明:水分子在非极性孔中的存在方式,主要与温度、压力、吸附剂的表面官能团、pH 等有关^[22].单组份吸附质水在 VACF 上吸附时,水分子主要以水簇方式存在.水分子首先吸附在吸附剂的表面官能团上,然后以吸附的水分子为第二吸附位,再通过氢键方式吸附水分子,最终形成 5–10 个分子的水簇.另一方面,水分子形成水簇后,偶极矩降低,也有利于直接与非极性面接触^[23–25].吸附质同时存在水与萘时,萘与 VACF 非极性表面的作用力较强,替代了部分吸附的水分子,使孔径变窄,且水分子与吸附的萘分子之间的距离较水分子之间的大,二者都不利于水分子在孔中形成稳定三维结构的氢键和降低偶极矩,最终导致水分子在微孔内的吸附量减少^[26];在孔口附近的含氧官能团,主要以羧基

表 2 不同温度下萘在 VACF 上吸附拟合 Langmuir 方程
Table 2 Fitting-equation in adsorption of naphthalene on VACF at different temperatures

$T/^\circ\text{C}$	Fitting-equation	R^2	Naphthalene solubility in 1000 g water (mg)*	$\Delta G/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$
20	$q_e = 796.3 \times 0.93 C_e / (1 + 0.93 C_e)$	0.982	28.7	-32.7
25	$q_e = 775.5 \times 0.88 C_e / (1 + 0.88 C_e)$	0.974	33.7	-33.1
30	$q_e = 763.8 \times 0.51 C_e / (1 + 0.51 C_e)$	0.972	41.5	-32.2
35	$q_e = 676.8 \times 0.26 C_e / (1 + 0.26 C_e)$	0.967	47.5	-30.7
40	$q_e = 404.2 \times 1.31 C_e / (1 + 1.31 C_e)$	0.975	55.8	-34.1

* data from reference [18]

为初始吸附位点,形成水簇大分子,阻挡萘的吸附^[27].

pH 影响吸附质的溶解度、吸附质与吸附剂之间色散力和静电力^[28]. 静电力主要产生在吸附质和吸附剂发生解离的情况下. 色散力的机理主要有 π - π 色散机理、氢键机理、电子供受复合物机理^[29]. 不同性质的活性炭吸附苯或萘受 pH 影响不同, 有的随 pH 升高而降低^[30], 相反的情况也会存在^[31], 而且有的吸附量受 pH 影响不大^[32]. 在本实验条件下, 当 pH 为 12.67 和 5.61 时, 萘的吸附量差别不大, 而 pH 为 2.52 时吸附量显著上升(图 4).

pH 为 5.61 时, 萘的吸附面积占总 VACF 表面面积的 90%, 萘的竞争吸附能力要远大于水分子. 但是在 pH 偏离 PZC 较大时, 表面含氧基团形成的氢键受静电力作用影响较大^[33], pH 降低时, 一种作用是表面含氧基团结合的氢离子增多导致碳表面的电子密度下降, 萘与炭表面的色散力减弱, 导致吸附作用减弱, 另一种作用是氢离子具有强酸性, 吸附在炭表面上相关碱性基团处, 萘分子也具有一定的碱性^[30], 吸附的氢离子通过与萘环上的 π 键发生非典型的氢键作用, 在炭表面发生萘溶液的浓集作用^[34], 使萘分子易进入到微孔中进行填充, 在适当大小的微孔中通过萘环之间的 π - π 色散作用形成萘的二聚物或三聚物^[35], 使吸附量上升. 炭表面的含氧基团的种类、数量和位置决定了第一种作用的大小, 氢离子浓度与第二种作用密切相关, 吸附量的增加或减少取决于这两种作用的对比.

pH 为 12.67 时, 过量的氢氧根作用下, VACF 表面具有少量的负电荷, 水分子可能从二聚物形成五聚物^[36], 阻挡萘分子进入微孔中, 但作用很弱. 萘仍保持分子状态, 未发生解离, 静电斥力也较弱, 此

图 4 不同 pH 下萘的等温吸附

Fig.4 Isotherm adsorption of naphthalene on VACF at different pH values

图 5 萘在 VACF 和 VACF-Cu 上的等温吸附

Fig.5 Isotherm adsorption of naphthalene on VACF and VACF-Cu

时 π - π 色散力仍是吸附的主导因素. 萘在 VACF 上的吸附量变化不大.

2.3.4 负载铜离子对吸附的影响

铜离子具有一定的氧化性, 在催化氧化反应中应用广泛^[37]. 铜离子能够发生类 Fenton 反应, 对萘环进行催化羟基化反应. 在进行反应时, 先将金属离子吸附到活性炭上, 再对相关物质进行吸附, 最后再进行表面的催化反应, 所以吸附作用对催化有重要影响.

吸附金属离子后的活性炭与原炭对比, 常出现被吸附物的吸附量的增大或减少^[38]. 吸附铜离子后的 VACF-Cu, 与原 VACF 相比, 萘的吸附量降低(图 5). 这是由于吸附在 VACF 表面的铜离子, 在局部表面氧不能完全满足全部的配位数时, 会同时吸附水分子, 形成较大的水合离子簇, 一方面使 VACF 表面极性增加, 不利于非极性的萘吸附, 同时阻挡萘分子进入微孔. 这与在非极性溶剂中 Y 分子筛通过裸露的阳离子与萘环上 π 键作用形成稳定的二聚物是完全不同的^[34]. 从吸附曲线上看, VACF-Cu 的吸附曲线由原来的 VACF 的 I 型向 II 型转变, 也说明部分微孔被阻塞, 大孔百分比数量增加.

3 结 论

VACF 具有类分子筛样的微孔结构, 本文研究了其在水溶液中对萘的等温吸附. 通过对萘吸附曲线的拟合, 说明微孔吸附容积充填理论对 VACF 的适用性; 结果也说明 VACF 吸附水溶液中萘是自发进行的, 温度对吸附量的影响不具有线性关系, 溶液温度 30 °C 以上时, 吸附量显著降低. 重点分析了水对萘吸附的竞争影响, 同中性条件下萘的吸附相比,

酸性与碱性表现出明显不同的吸附量变化, 对酸性条件下吸附量显著增长提出了新的机理. 作为催化剂载体的 VACF, 预吸附铜离子后, 会导致萘的吸附量降低, VACF-Cu 的吸附曲线, 由原来的 VACF 的 I 型向 II 型转变. 通过对萘液相吸附的研究, 可以促进 ACF 在多环芳烃净化处理方面的应用, 同时对萘催化羟基化制备萘酚的机理研究方面有所贡献.

References

- 1 Pan, H. Y.; Li, Z.; Xia, Q. B.; Xi, H. X.; Li, J. *Journal of Functional Materials*, **2008**, *39*: 324 [潘红艳, 李 忠, 夏启斌, 奚红霞, 李 晶. 功能材料, **2008**, *39*: 324]
- 2 Zhang, T. Y.; Yang, Q. S.; Lu, Z.; Liu, X.; Wang, Z.; Li, X. X. *Chemical Industry and Engineering Progress*, **2009**, *28*: 55 [张永水, 杨秋生, 卢 洲, 刘 旭, 王 昭, 李晓旭. 化工进展, **2009**, *28*: 55]
- 3 Ko, Y. G.; Choi, U. S. *Separation and Purification Technology*, **2007**, *57*: 338
- 4 Fontecha-Cámara, M. A.; López-Ramón, M. V.; Álvarez-Merino, M. A.; Moreno-Castilla, C. *Langmuir*, **2007**, *23*: 1242
- 5 Pelekani, C.; Snoeyink, V. L. *Carbon*, **2000**, *38*: 1423
- 6 Qi, S. Y.; Hay, K. J.; Cal, M. P. *Advances in Environmental Research*, **2000**, *4*: 357
- 7 Boehm, H. P. *Carbon*, **1994**, *32*: 759
- 8 Salame, I. I.; Badosz, T. J. *J. Colloid Interf. Sci.*, **2001**, *240*: 252
- 9 Huang, Q.; Huang, Y. Q.; Pan, D. *Journal of Donghua University*, **2004**, *21*: 57
- 10 Ning, Y. C. Structural identification of organic compounds and organic spectroscopy. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2000: 322–370 [宁永成. 有机化合物结构鉴定与有机波谱学(第二版). 北京: 科学出版社, 2000: 322–370]
- 11 Srivastava, V. C.; Swamy, M. M.; Mall, I. D.; Prasad, B.; Mishra, I. M. *Colloids Surf. A*, **2006**, *272*: 89
- 12 Li, K.; Zheng, Z.; Huang, X.; Zhao, G.; Feng, J.; Zhang, J. *J. Hazard. Mater.*, **2009**, *166*: 213
- 13 Kao, J.; Allinger, N. L. *J. Am. Chem. Soc.*, **1977**, *99*: 975
- 14 Ahn, C. K.; Kim, Y. M.; Woo, S. H.; Park, J. M. *Chemosphere*, **2007**, *69*: 1681
- 15 Ania, C. O.; Cabal, B.; Pevida, C.; Arenillas, A.; Parra, J. B.; Rubiera, F.; Pis, J. J. *Water Res.*, **2007**, *41*: 333
- 16 Wu, J. F.; Strömqvist, M. E.; Claesson, O.; Fängmark, I. E.; Hammarström, L. G. *Carbon*, **2002**, *40*: 2587
- 17 Ania, C. O.; Cabal, B.; Pevida, C.; Arenillas, A.; Parra, J. B.; Rubiera, F.; Pis, J. J. *Appl. Surf. Sci.*, **2007**, *253*: 5741
- 18 Miller, D. J.; Hawthorne, S. B. *Anal. Chem.*, **1998**, *70*: 1618
- 19 Seredych, M. M.; Guńko, V. M.; Gierak, A. *Appl. Surf. Sci.*, **2005**, *242*: 154
- 20 Sun, M. L.; Cheng, R. M.; Xu, X. C.; Chen, Y. W.; Li, M. G. *Chemical Research and Application*, **2006**, *18*: 13 [孙明礼, 成荣明, 徐学诚, 陈奕卫, 李茂刚. 化学研究与应用, **2006**, *18*: 13]
- 21 García-Araya, J. F.; Beltrán, F. J.; Álvarez, P.; Masa, F. J. *Adsorption*, **2003**, *9*: 107
- 22 Qi, N.; LeVan, M. D. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2005**, *44*: 3733
- 23 Ohba, T.; Kanoh, H.; Kaneko, K. *J. Phys. Chem. B*, **2004**, *108*: 14964
- 24 Striolo, A.; Gubbins, K. E.; Chialvo, A. A.; Cummings, P. T. *Mol. Phys.*, **2004**, *102*: 243
- 25 Fletcher, A. J.; Uygur, Y.; Thomas, K. M. *J. Phys. Chem. C*, **2007**, *111*: 8349
- 26 Easton, E. B.; Machin, W. D. *J. Colloid Interf. Sci.*, **2000**, *231*: 204
- 27 Rablen, P. R.; Lockman, J. W.; Jorgensen, W. L. *J. Phys. Chem. A*, **1998**, *102*: 3782
- 28 Pastrana-Martínez, L. M.; López-Ramón, M. V.; Moreno-Castilla, C. *J. Colloid Interf. Sci.*, **2009**, *331*: 2
- 29 Villacañas, F.; Pereira, M. F. R.; Órfão, J. J. M.; Figueiredo, J. L. *J. Colloid Interf. Sci.*, **2006**, *293*: 128
- 30 Terzyk, A. P.; Cwiertnia, M. S.; Wisniewski, M.; Gauden, P. A.; Rychlicki, G.; Szymanski, G. S. *Appl. Surf. Sci.*, **2007**, *253*: 4006
- 31 Wibowo, N.; Setyadhi, L.; Wibowo, D.; Setiawan, J.; Ismadji, S. *J. Hazard. Mater.*, **2007**, *146*: 237
- 32 Zhu, X. D.; Liang, H. D. *Science Technology and Engineering*, **2007**, *7*: 2205 [朱仙弟, 梁华定. 科学技术与工程, **2007**, *7*: 2205]
- 33 Mignon, P.; Loverix, S.; Geerlings, P. *Chem. Phys. Lett.*, **2005**, *401*: 40
- 34 Thomas, K. J.; Sunoj, R. B.; Chandrasekhar, J.; Ramamurthy, V. *Langmuir*, **2000**, *16*: 4912
- 35 Tsuzuki, S.; Honda, K.; Uchimar, T.; Mikami, M. *J. Chem. Phys.*, **2004**, *120*: 647
- 36 Kim, J.; Suh, S. B.; Kim, K. S. *J. Chem. Phys.*, **1999**, *111*: 10077
- 37 Lu, C. Y.; Wey, M. Y.; Chen, L. I. *Appl. Catal. A*, **2007**, *325*: 163
- 38 Somy, A.; Mehrnia, M. R.; Amrei, H. D.; Ghanizadeh, A.; Safari, M. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, **2009**, *3*: 249