

## 蔗渣活性炭二次活化制备及其吸附 CO<sub>2</sub> 性能研究

魏建文, 林志峰, 何泽瑜, 和凯凯, 耿琳琳, 廖 雷

(桂林理工大学 广西矿冶与环境科学实验中心, 桂林 541004)

**摘 要:** 以蔗渣为原料, 以 ZnCl<sub>2</sub> 为活化剂制备出活性炭 AC, 并用 KOH 对活性炭 AC 进行二次活化制备活性炭 KAC。用热重法测定材料的 CO<sub>2</sub> 吸附脱附性能, 傅里叶红外光谱、氮气物理吸附-脱附和扫描电镜对样品进行表征。结果表明: KAC 具有优异的 CO<sub>2</sub> 吸附性能, 在 60℃ 下其对 CO<sub>2</sub> 吸附量可达 3.45 mmol/g, 而 AC 的 CO<sub>2</sub> 吸附量仅有 1.79 mmol/g。KAC 的 CO<sub>2</sub> 吸附能力明显优于 AC。循环吸附脱附的结果表明, 经过 5 次吸附-脱附, 材料的吸附量无显著变化, 表明材料具有良好的再生性能。傅里叶红外分析结果表明两种活性炭材料的特征峰基本一致, 活性炭表面官能团中羟基和羧基可以使活性炭表面的极性增大。氮气物理吸附-脱附和扫描电镜结果表明材料都具有发达的孔径结构, 但 KAC 的孔径结构比 AC 更发达, 因此其对 CO<sub>2</sub> 的吸附能力也更强。

**关 键 词:** 蔗渣; 活性炭; 二次活化; 二氧化碳; 吸附

中图分类号: TQ174 文献标识码: A

## Bagasse Activated Carbon Reactivation Promotes Adsorption of CO<sub>2</sub>

WEI Jian-Wen, LIN Zhi-Feng, HE Ze-Yu, HE Kai-Kai, GENG Lin-Lin, LIAO Lei

(Guangxi Scientific Experiment Center of Mining, Metallurgy and Environment, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Activated carbon (AC) was prepared from bagasse using ZnCl<sub>2</sub> as the activator. The new type of activated carbon (KAC) was prepared from AC using KOH as the second activator. CO<sub>2</sub> adsorption/desorption properties were determined by thermal gravimetric analysis method (TGA). The activated carbon materials were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), N<sub>2</sub> adsorption-desorption and scanning electron microscope (SEM). The results showed that CO<sub>2</sub> adsorption quantities of KAC and AC were 3.45 mmol/g and 1.79 mmol/g, respectively at 60℃. KAC has a better adsorption capacity than AC. The CO<sub>2</sub> adsorption capacity after five adsorption/desorption cycles showed no obvious changes, display the materials good regeneration performance. The results of FTIR spectra showed that the characteristic peaks of the two activated carbon materials were almost the same. The polarity of the activated carbon surface increased with the increase of hydroxyl and carboxyl groups on activated carbons. N<sub>2</sub> adsorption-desorption spectra and SEM images demonstrated that all the two kinds of materials had abundant pores, and KAC had much more pores which resulted in better adsorption capacity.

**Key words:** bagasse; activated carbon; reactivation; carbon dioxide; adsorption

收稿日期: 2016-05-03; 收到修改稿日期: 2016-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(51566003); 广西自然科学基金(2015GXNSFAA139231); 广西环境污染控制理论与技术重点实验室基金(Gui Ke Neng0901z003); 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目

National Natural Science Foundation of China (51566003); Natural Science Foundation of Guangxi (2015GXNSFAA 139231); Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology (Gui Ke Neng0901z003); High Level Innovation Team and Outstanding Scholar Program in Guangxi

作者简介: 魏建文(1975-), 男, 博士, 副教授. E-mail: jianwen988@126.com

通讯作者: 耿琳琳, 教师. E-mail: 739821747@qq.com

近十多年来, 在涉及地球环境保护的诸多问题之中, 温室效应受关注度较高。温室气体的最主要成分是二氧化碳。目前, CO<sub>2</sub> 富集方法主要有四种: 低温蒸馏法、膜净化法、液氨吸收法和多孔固体吸附法, 其中吸附法以其较低的成本而受到重视<sup>[1]</sup>。在众多多孔固体中, 活性炭因具有巨大的比表面积、高度发达的孔隙结构以及优良的吸附性能, 已被广泛应用于气体净化与回收、污水处理、化工、医药、食品材料及国防等领域<sup>[2]</sup>。活性炭的比表面积和孔径分布等结构特征受制备条件的影响较大, 其中原材料的选择对活性炭的制备尤其重要。原材料可以是化石燃料, 如煤、石油等, 也可以是木质材料, 如木头、果壳等, 甚至是一些碳含量较高的生活垃圾, 如轮胎、破旧衣服等<sup>[3-6]</sup>。目前, 以化石燃料及其副产物为原材料制备活性炭, 并对 CO<sub>2</sub> 的吸附性能进行研究较多<sup>[4,7-9]</sup>。Shen 等<sup>[10]</sup>以沥青为原材料制备的活性炭球在 30℃、1×10<sup>5</sup> Pa 下对 CO<sub>2</sub> 的吸附量较小, 仅有 1.9 mmol/g。由于化石燃料属于不可再生资源, 而生物质是可再生资源, 利用农作物废料作为制备活性炭的原材料, 不仅生产成本低, 而且可以做到废物利用。Plaza 等<sup>[11]</sup>用橄榄核制备的活性炭在 25℃、1×10<sup>5</sup> Pa 下对 CO<sub>2</sub> 吸附量为 2.4 mmol/g。Sevilla 等<sup>[12]</sup>以锯末制备的活性炭在 25℃、0.1 MPa 下对 CO<sub>2</sub> 的吸附量可以达到 4.8 mmol/g。上述研究的活性炭在常温及 0.1 MPa CO<sub>2</sub> 分压下吸附性能较好, 但活性炭吸附 CO<sub>2</sub> 属于物理吸附, 受吸附条件, 如温度、分压(浓度)的影响较大。在脱硫后烟气条件, 如 60~80℃、CO<sub>2</sub> 浓度为 15%条件下, 吸附性能会下降较大。

蔗渣作为制糖工业的副产品, 具有碳素含量高、成本低和量大等特点, 可以用来制作活性炭吸附材料。目前, 蔗渣活性炭在处理垃圾渗滤液和水中重金属吸附方面已有较多研究<sup>[13-15]</sup>, 但该材料在 CO<sub>2</sub> 吸附方面的研究还鲜有报道。

本工作以广西丰富的制糖蔗渣为原料, ZnCl<sub>2</sub> 为活化剂制备一般活性炭, 即 AC; 以 KOH 为二次活化剂对 AC 进行二次活化, 得到二次改性活性炭, 即 KAC。然后进行结构表征, 研究活化过程对 CO<sub>2</sub> 吸附性能的作用, 并考虑 60℃, 15vol%CO<sub>2</sub> 条件对材料性能的影响, 为工业应用提供科学依据。

## 1 实验方法

### 1.1 试剂

盐酸, ZnCl<sub>2</sub>, 氢氧化钾, 纯度均为 AR。实验用

气体为 CO<sub>2</sub>(纯度 99.999%)和 N<sub>2</sub>(纯度 99.999%)的混合气体, 其中 CO<sub>2</sub> 的体积分数为 15%。

### 1.2 仪器

SDTQ600 型同步热重分析仪(美国 TA 公司); S-4800 型扫描电镜(日本 Hitachi 公司); NOVA2000e 全自动型比表面分析仪(美国 Quantachrome 公司); Thermo Nexus 470 型傅里叶变换红外光谱分析仪(美国 Nicolet 公司); RS120/751/11 型真空马弗炉(德国纳博热公司)。

### 1.3 活性炭的制备

将制糖厂的蔗渣用超纯水清洗煮沸 5 min 后烘干, 然后将其切成约 4 cm 长, 用 2 mol/L 的 ZnCl<sub>2</sub> 溶液浸泡 24 h。在 105℃下烘干 12 h, 装入封口袋中备用。

将装有上述处理过的蔗渣瓷方舟置于真空马弗炉里, 并向马弗炉内通入 N<sub>2</sub>, 以 3℃/min 的升温速率将炉内温度升到 500℃, 并保持 1 h。然后材料随炉冷却至室温, 取出材料后用 10%的盐酸清洗一定时间, 再用超纯水洗至中性, 烘干, 研磨后装入封口袋中备用。制备的活性炭记作 AC。

将制备的 AC 与 KOH 以 4:1 的比例在红外灯下研磨均匀后, 立即放入马弗炉中并通入 N<sub>2</sub>, 以 3℃/min 的速率升温至 800℃, 并保持 1 h。待炉内温度冷却至室温, 取出活性炭材料, 用 10%的盐酸清洗, 再用超纯水洗至中性, 烘干后装袋备用。制备的活性炭记作 KAC。

### 1.4 材料的吸附与脱附性能

#### 1.4.1 TGA 法测定吸附性能

选用 DSC-TGA 法测定 AC 和 KAC 的二氧化碳吸附性能。测定之前先对 AC 和 KAC 进行预处理, 即将一定量的 AC 或 KAC 在氮气氛围中以 10℃/min 的速率加热到 120℃并使其恒重(再生), 然后降温至 60℃, 通入二氧化碳和氮气的混合气体, 直至 AC 和 KAC 的质量不再发生明显变化。根据样品质量变化及样品在 120℃下达到恒重时的质量计算样品的吸附性能。

分析仪器采用美国 TA 公司的 SDTQ600 型同步热重分析仪, 其天平灵敏度为 0.1 μg。采用拟一级动力学和拟二级动力学模型对活性炭吸附 CO<sub>2</sub> 动力学进行拟合研究。

#### 1.4.2 材料脱附性能测定

吸附饱和的 AC 和 KAC 在氮气氛围中以 10℃/min 的速率加热到 100℃下进行脱附, 使 AC 和 KAC 至恒重, 然后在 60℃下进行吸附, 计算吸附量, 如此循环 5 次探讨其循环再生性能。

## 1.5 材料的表征

采用美国 Nicolet 公司的 Thermo Nexus 470 型傅里叶变换红外光谱仪的 KBr 压片法对样品官能团种类进行分析。采用美国 Quantachrome 公司的 NOVA2000e 全自动型比表面分析仪在  $-196^{\circ}\text{C}$ 、液氮气氛下进行氮气吸附脱附实验测定样品的孔结构。采用日本 Hitachi 公司生产的 S-4800 型扫描电镜观察样品表面和孔隙结构, 加速电压为 5.0 kV, 工作距离为 6.0 mm。

## 2 结果与讨论

### 2.1 活性炭的吸附性能

图 1 是 AC 和 KAC 的质量随测试时间的变化结果, 从图中可以看出, 在 0~10 min 内, AC 处于氮气氛围中, 其质量有所减少, 这是材料经加热后水分和  $\text{CO}_2$  被去除造成的。在 10 min 时, 切换通入 15vol%  $\text{CO}_2$  混合气体, 在 10~60 min 内, AC 的质量由 1.43 mg 增加到 1.54 mg, 基本达到饱和。在 60~85 min 内, AC 质量仅仅增加了 0.01 mg, 说明 AC 吸附  $\text{CO}_2$  的平衡时间大约需要 40 min。经过计算, AC 的吸附量为 1.79 mmol/g。

从图 1 还可以看出, 0~10 min 为 KAC 的干燥时间, KAC 中的水分和  $\text{CO}_2$  被除去, 在 10 min 时, 通入混合气体, 进行  $\text{CO}_2$  的吸附过程。10~70 min 内, KAC 质量迅速由原来的 1.42 mg 增加到 1.62 mg。70~80 min 内, KAC 质量基本没有变化, 仅增加了 0.01 mg。经过计算, KAC 的吸附量为 3.45 mmol/g。

综合对比发现, KAC 和 AC 对  $\text{CO}_2$  的吸附过程都能在 60 min 内完成, 经过 KOH 二次改性后的活性炭有更大的  $\text{CO}_2$  吸附量, 这是由于 KOH 活化使活性炭的孔结构更加丰富, 孔容增大。

在相同条件下 ( $60^{\circ}\text{C}$  和常压) 对  $\text{CO}_2$  吸附性能有不少研究报道。如 Xu 等<sup>[16]</sup>以蒸汽活化制备椰壳活性炭, 其  $\text{CO}_2$  吸附量接近 2 mmol/g; Lin 等<sup>[17]</sup>以 KOH-TEPA 对椰壳活性炭进行复合改性, 得到样品的  $\text{CO}_2$  吸附量为 0.554 mmol/g; 本文作者<sup>[18-19]</sup>也曾以 2-氨基乙基-3-氨基丙基-三甲氧基硅烷对介孔分子筛 SBA-16 进行表面修饰, 得到样品的  $\text{CO}_2$  吸附量为 0.727 mmol/g; Su 等<sup>[20]</sup>将四乙烯五胺浸渍到 Y 型沸石分子筛孔道中, 得到样品的  $\text{CO}_2$  吸附量为 2.56 mmol/g; Liu 等<sup>[21]</sup>以 TEPA 改性 KIT-6 型介孔二氧化硅, 其  $\text{CO}_2$  吸附量为 2.58 mmol/g。本工作以  $\text{ZnCl}_2$ -KOH 二次活化法所得材料性能远优于以上材料, 且具有来源广泛、成本低的特点, 因此具有一定应用前景。

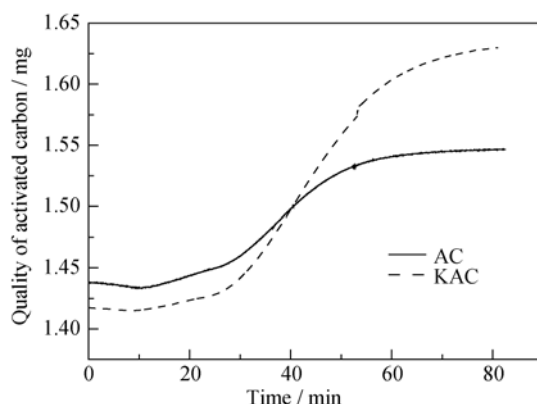


图 1 AC 和 KAC 质量随测试时间的变化

Fig. 1 AC and KAC mass changes with testing time

### 2.2 活性炭对 $\text{CO}_2$ 的吸附动力学探讨

吸附反应的动力学分析是阐述吸附现象的一种主要手段。为了探讨蔗渣活性炭的吸附性能, 利用两个动力学模型对活性炭吸附  $\text{CO}_2$  的动力学过程进行拟合。

拟一级动力学模型表达式为:

$$q_t = q_e (1 - e^{-k_1 t}) \quad (1)$$

拟二级动力学模型表达式为:

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t} \quad (2)$$

其中,  $q_t$  和  $q_e$  分别为活性炭对  $\text{CO}_2$  的  $t$  时刻的吸附容量和吸附饱和时的吸附容量 (mmol/g),  $k_1$  和  $k_2$  分别为拟一级和拟二级速率常数, 单位分别为 ( $\text{min}^{-1}$ ) 和 ( $\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ )。

用 TGA 法测定 AC 和 KAC 在  $60^{\circ}\text{C}$  下吸附动力学方程曲线。图 2 和图 3 分别为活性炭吸附  $\text{CO}_2$  拟一级和拟二级动力学结果。

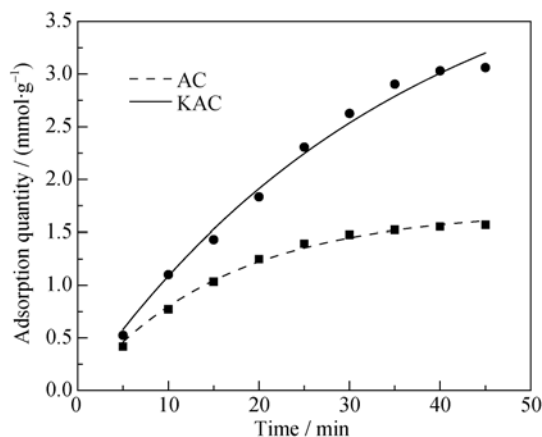


图 2 活性炭吸附  $\text{CO}_2$  的拟一级动力学方程曲线

Fig. 2 Pseudo-first-order kinetic equation curves of  $\text{CO}_2$  absorption for the activated carbons

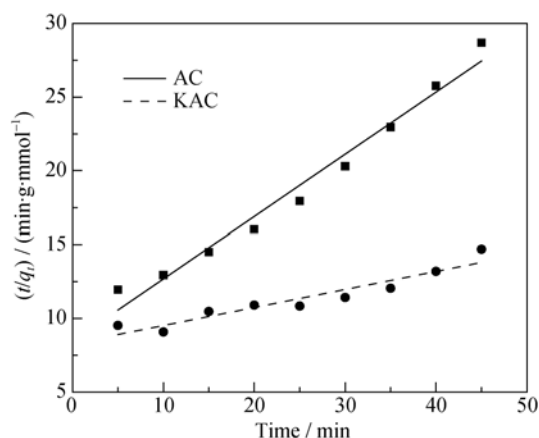
图 3 活性炭吸附 CO<sub>2</sub> 拟二级动力学方程曲线

Fig. 3 Pseudo-second-order kinetic equation curves of CO<sub>2</sub> absorption for the activated carbons

根据图 2 和图 3 活性炭对 CO<sub>2</sub> 的吸附数据, 拟合出动力学参数如表 1 所示。从图 2 和图 3 可以看出, 对于 AC 和 KAC, 均具有良好的拟一级动力学拟合效果。结合表 1 可以看出, 它们的拟合度都比拟二级动力学方程高, AC 的相关系数  $R^2$  为 0.994, 而 KAC 为 0.989。并且拟一级动力学方程拟合得到的吸附量和实验测得的吸附量接近。因此, 拟一级动力学模型能够更好地描述活性炭对 CO<sub>2</sub> 的吸附过程。

### 2.3 活性炭的循环吸附性能

图 4 是 AC 和 KAC 在 60℃ 下 5 次循环吸附结果, 从图中可以看出, 在 5 次循环吸附过程中, AC 和 KAC 的吸附量都没有发生太大的变化, 变化范围仅在 0.09 mmol/g 左右。说明 AC 和 KAC 对 CO<sub>2</sub> 的吸附都具有良好的吸附稳定性, 但 KAC 对 CO<sub>2</sub> 的吸附量远远大于 AC 对 CO<sub>2</sub> 的吸附量。

图 5 是脱附 CO<sub>2</sub> 后, 活性炭质量在 5 次循环过程中的变化结果, 从图中可以看出, 在 5 次循环吸附脱附过程中, AC 和 KAC 质量基本保持不变, AC 质量最大波动为 1.5%, 而 KAC 质量最大波动为 1.6%。这也说明 AC 和 KAC 都具有良好的循环吸附稳定性。

表 1 活性炭吸附 CO<sub>2</sub> 的动力学参数Table 1 Kinetics parameters of adsorption of CO<sub>2</sub> on activated carbons

Models	Parameters	AC	KAC
Pseudo-first-order	$q_e/(\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1})$	1.70	3.48
	$k_1/(\text{min}^{-1})$	0.06	0.02
	$R^2$	0.994	0.989
Pseudo-second-order	$q_e/(\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1})$	2.37	8.17
	$k_2/(\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1})$	0.020	0.001
	$R^2$	0.973	0.892

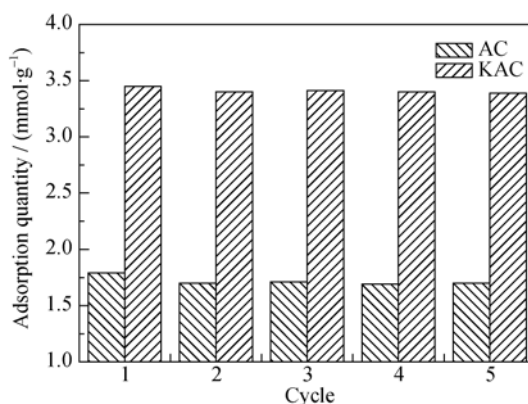
图 4 活性炭对 CO<sub>2</sub> 的循环吸附

Fig. 4 Cyclic adsorption of CO<sub>2</sub> by activated carbons

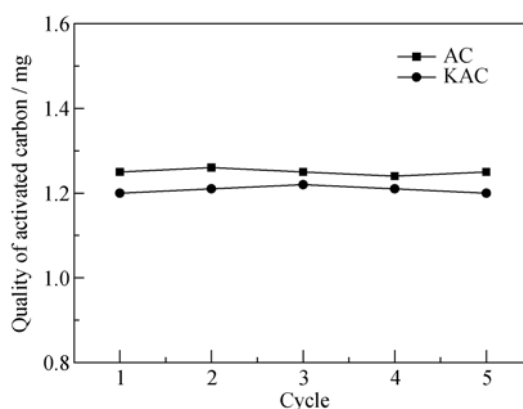
图 5 脱附 CO<sub>2</sub> 后, 活性炭质量随循环次数的变化

Fig. 5 Mass changes of CO<sub>2</sub> desorbed activated carbons mass with cycle time

在 5 次循环吸附脱附过程中, 两种吸附剂对 CO<sub>2</sub> 的吸附量变化均不明显, 都小于 2%; 吸附剂质量变化波动也不明显, 都不超过 1.6%。因此, 在 60℃ 下吸附, 100℃ 下脱附条件下, 吸附材料具有良好的循环吸附稳定性。较低的脱附再生温度也表明材料对 CO<sub>2</sub> 的吸附是以物理吸附为主, 这与 Gao 等<sup>[22]</sup>的研究结果一致。

### 2.4 傅里叶红外分析结果

图 6 是 AC 和 KAC 的红外分析结果。由图 6 可以看出, AC 和 KAC 的红外光谱特征峰基本一致。在波数为 1150 cm<sup>-1</sup> 左右的峰对应 C-O 伸缩振动特征峰<sup>[23]</sup>; 1400 cm<sup>-1</sup> 附近的波峰对应 O-H 的弯曲振动特征峰; 1600 cm<sup>-1</sup> 附近的峰对应 C=O 伸缩振动特征峰; 3500 cm<sup>-1</sup> 附近的波峰对应 O-H 伸缩振动特征峰。这些特征峰的存在表明 AC 和 KAC 表面的官能团中都含有羟基和羧基。而 Li 等<sup>[24]</sup>和 Zhang 等<sup>[25]</sup>的研究结果表明, 羟基和羧基可以使活性炭表面的极性增大, 使其易于吸附极性物质。尽管 CO<sub>2</sub> 是非极性物质, 但因存在四极矩而使其具有一定极性,

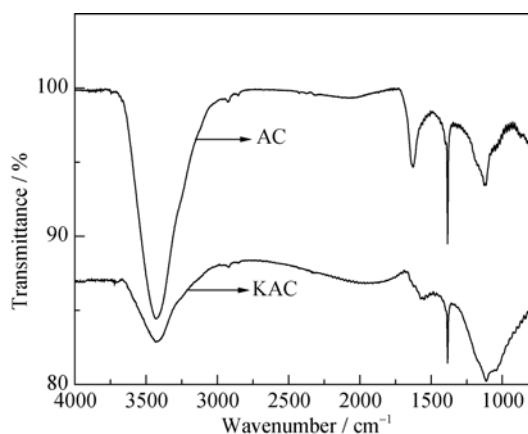


图 6 活性炭的红外光谱图

Fig. 6 Infrared spectra of activated carbons

进而影响活性炭对  $\text{CO}_2$  的吸附能力。从图 6 还可以看出  $1600\text{ cm}^{-1}$  附近存在羰基峰, 而羰基的存在不利于材料的  $\text{CO}_2$  脱附<sup>[23]</sup>。KAC 中羰基峰明显弱于 AC, 表明 KAC 比 AC 更易实现脱附。

## 2.5 活性炭比表面积及孔径的测定

图 7 是活性炭在  $-196^\circ\text{C}$  下对  $\text{N}_2$  的吸附等温线。由 IUPAC 的分类标准可知, 两种材料对  $\text{N}_2$  的吸附等温线都属于 I 类等温线, 在低比压区, 吸附量发生明显突越, 在相对压力  $>0.2$  之后吸附量增加缓慢, 吸附基本上达到饱和状态, 吸附等温线与脱附曲线几乎重合, 说明材料含有大量的微孔。而微孔对  $\text{CO}_2$  的吸附量影响较大,  $\text{CO}_2$  吸附主要发生在微孔中, 且以物理吸附为主<sup>[16,26]</sup>。KAC 对  $\text{N}_2$  的吸附量远大于 AC, 说明 KAC 的孔容远大于 AC。通过氮气吸附-脱附等温线脱附分支数据 BJH 法计算出 BET 比表面积、孔体积和孔径如表 2 所示。由表 2 可以看出, KAC 的比表面积是 AC 的两倍多, 远远大于 AC, 相应的孔径和孔容也大于 AC, 这与 KAC 对  $\text{CO}_2$  的吸附量远大于 AC 的实验结果一致。

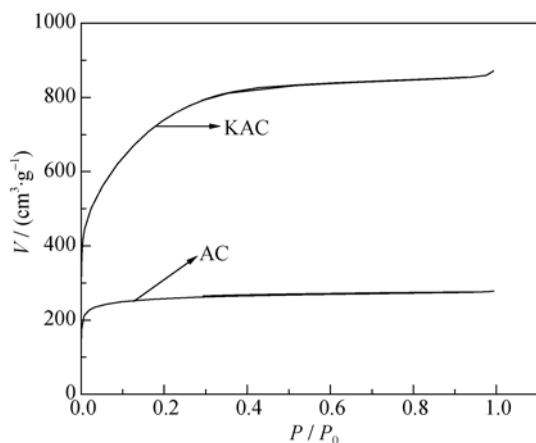
图 7 AC 和 KAC 对  $\text{N}_2$  的等温吸附曲线Fig. 7 Isothermal adsorption of  $\text{N}_2$  by AC and KAC

表 2 样品的孔结构参数

Table 2 Pore structure parameters of samples

Samples	$S_{\text{BET}}/(\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1})$	$V_{\text{total}}/(\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1})$	$D_{\text{BET}}/\text{nm}$
AC	991	0.43	1.72
KAC	2170	1.33	2.48

图 8 和图 9 分别是 AC 和 KAC 的孔径分布曲线, 其中两幅图中的大图为中孔孔径分布曲线, 插图为微孔孔径分布曲线。AC 和 KAC 的平均孔径主要都分布在  $1\sim 2\text{ nm}$ , 以微孔为主, 孔体积分别为  $0.43$  和  $1.33\text{ cm}^3/\text{g}$ , 并存在少量中孔。类似的研究表明, 一定量的中孔结构更有利于  $\text{CO}_2$  的吸附<sup>[27]</sup>。

## 2.6 活性炭的微观形貌

图 10 是活性炭不同放大倍率的 SEM 照片, 由图 10(a)可以看出, 经过  $\text{ZnCl}_2$  活化得到的材料在 AC 截面上分布着几到几十微米大小的孔道, 这是由蔗渣内部的有机质经过高温挥发后形成的。正是由于这些微孔的存在才使得  $\text{KOH}$  能够进入活性炭材料的内部, 对活性炭材料实现进一步活化。活化

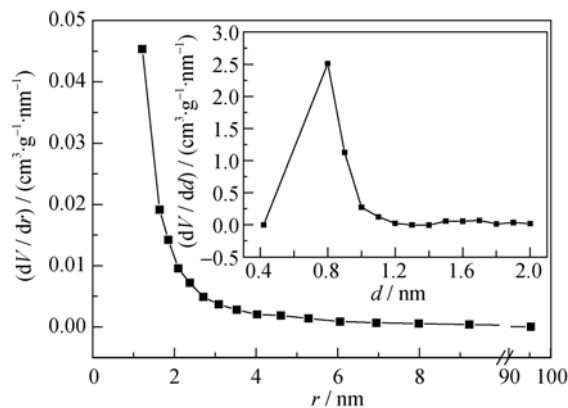


图 8 AC 的中孔和微孔孔径分布曲线

Fig. 8 Pore size distribution curves of mesopore and micropore of AC

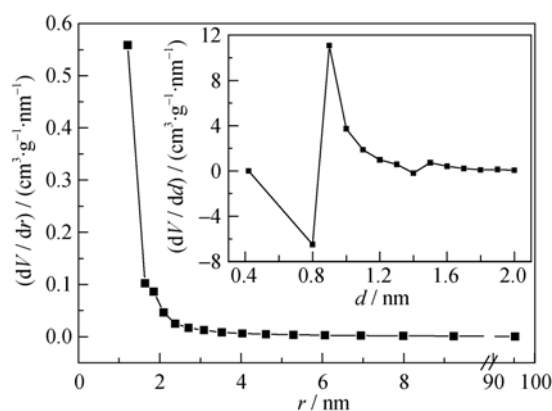


图 9 KAC 的中孔和微孔孔径分布曲线

Fig. 9 Pore size distribution curves of mesopore and micropore of KAC

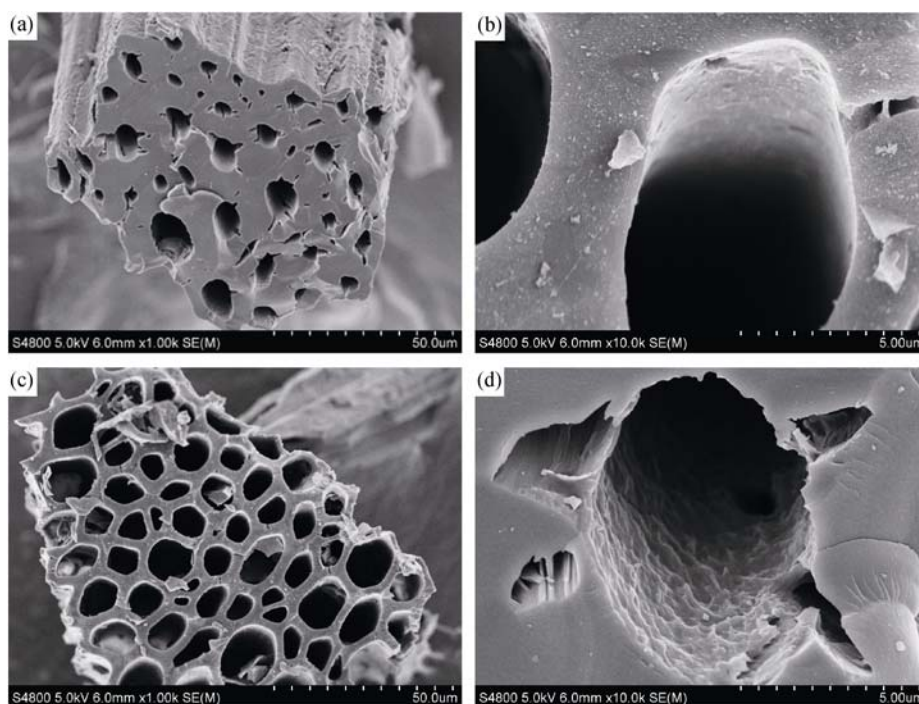


图 10 活性炭的 SEM 照片  
Fig. 10 SEM images of activated carbons  
(a) AC; (b) AC; (c) KAC; (d) KAC

后的材料表面形貌图如图 10(c)所示, 经过 KOH 活化后的材料, 即 KAC 表面紧密分布着均一的孔径, 约为几微米的孔, 这些孔对  $\text{CO}_2$  向内部扩散有利, 提高了传质速率。由图 10(b)和(d)对比可以看出, AC 的孔表面比 KAC 的孔表面更光滑, 而 KAC 在孔道内有很多波浪形的突起, 这是由 KOH 化学活化腐蚀造成的。KOH 腐蚀形成的微孔明显多于 AC 的微孔, 而微孔孔容的大小是决定活性炭对  $\text{CO}_2$  吸附性能好坏的关键因素<sup>[23]</sup>。

### 3 结论

1)以制糖蔗渣为原料,  $\text{ZnCl}_2$  为活化剂制备成一般活性炭即 AC; 以 KOH 作为二次活化剂对 AC 进行二次活化得到 KOH 改性过的活性炭即 KAC。KAC 和 AC 对  $\text{CO}_2$  的吸附都能在 60 min 内完成, KAC 和 AC 对  $\text{CO}_2$  的吸附量分别为 3.45 和 1.79 mmol/g。经过 KOH 二次活化的 KAC 的吸附量远远大于 AC;

2)经过二次活化的蔗渣活性炭对  $\text{CO}_2$  的吸附速率方程均符合拟一级动力学模型;

3)经过 5 次循环吸附, KAC 和 AC 对  $\text{CO}_2$  的吸附量均无明显变化, 材料具有良好的循环吸附稳定性;

4)与 AC 相比, KAC 表面上的孔分布更加均匀、密集, 具有更大的比表面积、平均孔径和孔体积, 这

是造成 KAC 对  $\text{CO}_2$  的吸附量远远大于 AC 的主要原因。

### 参考文献:

- [1] CHOI S, DRESE J H, JONES C W. Adsorbent materials for carbon dioxide capture from large anthropogenic point sources. *ChemSusChem*, 2009, **2**(9): 796–854.
- [2] ZHANG S J, FENG H M, WANG J P, *et al.* Structure evolution and optimization in the fabrication of PVA-based activated carbon fibers. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2008, **321**(1): 96–102.
- [3] OLIVARES-MARIN M, MAROTO-VALER M M. Preparation of a highly microporous carbon from acarpet material and its application as  $\text{CO}_2$  sorbent. *Fuel Processing Technology*, 2011, **92**(3): 322–329.
- [4] MAROTO-VALER M M, TANG Z, ZHANG Y Z.  $\text{CO}_2$  capture by activated and impregnated anthracites. *Fuel Processing Technology*, 2005, **86**(14): 1487–1502.
- [5] DRAGE T C, BLACKMAN J M, PEVIDA C, *et al.* Evaluation of activated carbon adsorbents for  $\text{CO}_2$  capture in gasification. *Energy Fuels*, 2009, **23**(5): 2790–2796.
- [6] DANTAS T L P, AMORIM S M, LUNA F M T, *et al.* Adsorption of carbon dioxide onto activated carbon and nitrogen-enriched activated carbon: surface changes, equilibrium, and modeling of fixed-bed adsorption. *Separation Science and Technology*, 2010, **45**(1): 73–84.

- [7] WAHBY A, RAMOS-FERNANDEZ J M, MARTINEZ-ESCANDELL M, *et al.* High-surface-area carbon molecular sieves for selective CO<sub>2</sub> adsorption. *ChemSusChem*, 2010, **3**(8): 974–981.
- [8] ALCANIZ-MONGE J, MARCO-LOZAR J P, LILLO-RODENAS M A. CO<sub>2</sub> separation by carbon molecular sieve monoliths prepared from nitrated coal tar pitch. *Fuel and Energy Abstracts*, 2011, **92**(5): 915–919.
- [9] HU X, RADOSZ M, CYCHOSZ K A, *et al.* CO<sub>2</sub>-filling capacity and selectivity of carbon nanopores: synthesis, texture, and pore-size distribution from quenched-solid density functional theory (QSDFT). *Environmental Science Technology*, 2011, **45**(16): 7068–7074.
- [10] SHEN C Z, GRANDE C A, LI P, *et al.* Adsorption equilibria and kinetics of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> on activated carbon beads. *Chemical Engineering Journal*, 2010, **160**(2): 398–407.
- [11] PLAZA M G, PEVIDA C, ARIAS B, *et al.* Development of low-cost biomass-based adsorbents for postcombustion CO<sub>2</sub> capture. *Fuel*, 2009, **88**(12): 2442–2447.
- [12] SEVILLA M, FUERTES A B. Sustainable porous carbons with a superior performance for CO<sub>2</sub> capture. *Energy and Environmental Science*, 2011, **4**(5): 1765–1771.
- [13] FOO K Y, LEE L K, HAMEED B H. Preparation of activated carbon from sugarcane bagasse by microwave assisted activation for the remediation of semi-aerobic landfill leachate. *Bioresource Technology*, 2013, **134**(2): 166–172.
- [14] TAO H C, ZHANG H R, LI J B, *et al.* Biomass based activated carbon obtained from sludge and sugarcane bagasse for removing lead ion from wastewater. *Bioresource Technology*, 2015, **192**: 611–617.
- [15] ANOOP K K, SREEJALEKSHMI K G, BAIJU R S. Nickel(II) adsorption onto biomass based activated carbon obtained from sugarcane bagasse pith. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(22): 10239–10247.
- [16] XU D, ZHANG J, LI G, *et al.* Adsorption equilibrium and kinetics of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O on activated carbon. *Journal of Inorganic Materials*, 2012, **27**(2): 139–145.
- [17] LIN X Y, ZHANG H Y, LIU Y M, *et al.* Study of the multiple modification of coconut activated carbon and its adsorption properties of CO<sub>2</sub> in simulated flue gas. *Journal of Function Materials*, 2015, **46**(17): 17017–17021.
- [18] WEI J W, SHI J J, PAN H, *et al.* Thermal and hydrothermal stability of amino-functionalized SBA-16 and promotion of hydrophobicity by silylation. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2009, **117**(3): 596–602.
- [19] WEI J W, SHI J J, PAN H, *et al.* Adsorption of carbon dioxide on organically functionalized SBA-16. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2008, **116**(1): 394–399.
- [20] SU F S, LU C, KUO S C, *et al.* Adsorption of CO<sub>2</sub> on amine-functionalized Y-type zeolites. *Energy and Fuels*, 2010, **24**(2): 1441–1448.
- [21] LIU Y M, YE Q, SHEN M, *et al.* Carbon dioxide capture by functionalized solid amine sorbents with simulated flue gas conditions. *Environmental Science and Technology*, 2011, **45**(13): 5710–5716.
- [22] GAO F, WANG Y, LI C M, *et al.* Surface modification of activated carbon for CO<sub>2</sub> adsorption. *New Carbon Materials*, 2014, **29**(2): 96–101.
- [23] JIAN X K, LIU S C. Effect of adsorption and desorption CO<sub>2</sub> on micro-structures of activated carbon. *Journal of China Coal Society*, 2013, **38**(2): 326–330.
- [24] LI T, LUO S Z, WU Y Y, *et al.* Study of the modifying of activated carbon and its adsorption properties of CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> mixture. *Journal of China Coal Society*, 2011, **36**(12): 2012–2017.
- [25] ZHANG D F, LU W, WANG P P, *et al.* Effect of wet oxidized modification on oxygen-containing functional groups of activated carbon fibers. *Journal of China Coal Society*, 2008, **33**(4): 439–443.
- [26] XIE F, WANG Y L, ZHAN L, *et al.* Adsorption/desorption performance of CO<sub>2</sub> on pitch-based spherical activated carbons. *Journal of Inorganic Materials*, 2011, **26**(2): 149–154.
- [27] YANG H, GONG M C, CHEN Y Q. Effect of pore size distribution on adsorption capacities of activated carbons for CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, 2011, **27**(6): 1053–1058.