

文章编号:0253-9993(2012)10-1737-06

# SO<sub>2</sub> 在活性炭表面的吸附平衡和吸附动力学

李 兵,蒋海涛,张立强,王志强,马春元

(山东大学 燃煤污染物减排国家工程实验室,山东 济南 250061)

**摘要:**基于固定床反应器研究烟气中 SO<sub>2</sub> 在活性炭表面的吸附平衡和吸附动力学。结果表明:活性炭吸附 SO<sub>2</sub> 在初始阶段呈现较快的吸附速率,该阶段和表面吸附有关;随着吸附的进行,表面活性位逐渐被占据,吸附速率下降,粒内扩散起主要作用;在接近吸附饱和阶段,SO<sub>2</sub> 吸附量增加缓慢,SO<sub>2</sub> 吸附与 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的脱附有关。与 2 mm 活性炭相比,0.075 mm 活性炭呈现较快的 SO<sub>2</sub> 吸附速率和较高的吸附量;随着 SO<sub>2</sub> 体积分数的增加,SO<sub>2</sub> 初始吸附速率和平衡吸附量增加。SO<sub>2</sub> 在活性炭上的动态吸附符合 Bangham 吸附动力学模型。用 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温线模型拟合吸附数据,发现 Freundlich 模型能够很好地预测 SO<sub>2</sub> 在活性炭表面的吸附平衡。

**关键词:**SO<sub>2</sub>; 活性炭; 吸附平衡; 吸附动力学

**中图分类号:**X701.3;TQ424.1 **文献标志码:**A

## Adsorption equilibrium and kinetics of SO<sub>2</sub> on activated carbon

LI Bing,JIANG Hai-tao,ZHANG Li-qiang,WANG Zhi-qiang,MA Chun-yuan

(National Engineering Laboratory for Coal-Fired Pollutants Emission Reduction,Shandong University,Jinan 250061,China)

**Abstract:**The adsorption equilibrium and kinetics of the flue gas SO<sub>2</sub> removal on activated carbon were investigated based on a fixed bed reactor. The results show that there is a rapid SO<sub>2</sub> adsorption rate on activated carbon in the initial stage, which is determined by the surface adsorption, after that the adsorption rate drops sharply due to the effect of intraparticle diffusion, and then the adsorption rate drops slowly and the amount of SO<sub>2</sub> adsorbed increases slowly until the adsorption equilibrium, which is determined by the desorption rate of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. The SO<sub>2</sub> adsorption rate and the amount of SO<sub>2</sub> adsorbed increases with decreasing the particle size of activated carbon and increasing SO<sub>2</sub> inlet concentration. The Bangham kinetic model can be used to predict the kinetics of SO<sub>2</sub> adsorption on activated carbon of different particle size under different SO<sub>2</sub> inlet concentration. Compared with Langmuir adsorption isotherm model, Freundlich adsorption isotherm model presents better fitted results for SO<sub>2</sub> adsorption equilibrium on activated carbon of different particle size.

**Key words:**SO<sub>2</sub>; activated carbon; adsorption equilibrium; adsorption kinetics

燃煤电站锅炉烟气排放出大量 SO<sub>2</sub>, 造成酸雨等全球性大气公害, 为控制 SO<sub>2</sub> 的排放, 烟气脱硫技术已在国内外得到广泛应用, 在各种烟气脱硫技术中, 活性炭吸附脱硫既能减排 SO<sub>2</sub>, 又能回收硫资源, 具有广阔的应用前景<sup>[1-6]</sup>。国内外学者对这一脱硫工艺进行了研究, 得到公认的反应过程为: 在烟气条件

下, 由于水蒸气和 O<sub>2</sub> 的存在, 烟气中的 SO<sub>2</sub> 被活性炭吸附并催化氧化为硫酸储存在活性炭的孔隙中<sup>[1-6]</sup>。活性炭吸附系统的吸附平衡和吸附动力学数据是选择合适的吸附剂、设计吸附过程、分析吸附系统经济性的基础。在描述活性炭吸附脱除烟气中 SO<sub>2</sub> 时, 活性炭和 SO<sub>2</sub> 的接触时间是有限的, 研究吸附系统的非

收稿日期:2011-12-19 责任编辑:张晓宁

基金项目:山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目(BS2009HZ021);山东省科学技术发展计划资助项目(2009GG2GC06003);山东大学自主创新基金资助项目(2011JC002)

作者简介:李 兵(1983—),男,山东聊城人,博士研究生。Tel:0531-88399371,E-mail:libing831125@mail.sdu.edu.cn。通讯作者:马春元(1961—),教授,博士生导师。Tel:0531-88399369,E-mail:sdetechym@163.com

平衡状态以及吸附随时间的变化对设计和操作吸附系统非常重要,即研究活性炭吸附  $\text{SO}_2$  的动力学十分必要<sup>[7-13]</sup>。

本文研究烟气中  $\text{SO}_2$  在活性炭表面的吸附平衡和吸附动力学,为工业吸附过程的设计提供基础数据。以两种粒径的活性炭为对象,研究  $\text{SO}_2$  在活性炭上的动态吸附,考察活性炭粒径、 $\text{SO}_2$  体积分数对  $\text{SO}_2$  在活性炭表面的吸附平衡和吸附动力学的影响。

## 1 实 验

### 1.1 实验材料

将椰壳颗粒活性炭研磨破碎、筛分,选择平均粒径分别为 2.000 mm 和 0.075 mm 的活性炭,用蒸馏水洗涤,洗去表面杂质,然后在 105 °C 的恒温干燥箱中干燥 24 h,除去活性炭中的水分。活性炭的孔隙结构性质通过  $\text{N}_2$  吸附等温线表征。在 Micromeritics ASAP2020 仪器上测量  $\text{N}_2$  吸附等温线(-196 °C),通过 BET 方法计算活性炭的比表面积  $A_{\text{BET}}$ ;通过相对压力为 0.98 处的吸附量计算总孔容积  $V$ ;按照  $t\text{-plot}$  方法计算活性炭的微孔表面积和微孔容积;平均孔径按照  $4V/A_{\text{BET}}$  计算。

### 1.2 $\text{SO}_2$ 吸附实验

在恒温固定床反应器上进行活性炭吸附  $\text{SO}_2$  实验,实验系统如图 1 所示。反应器由圆柱形玻璃制成,内径 15 mm,高 500 mm,多孔玻璃板布置在距反应器底部 250 mm 处用于支撑活性炭;反应器外部为具有程序控温的功能的电加热装置,实现反应温度的精确控制。国内外学者发现活性炭的脱硫效果不受烟气中  $\text{CO}_2$  的影响<sup>[3-5]</sup>,因此本实验中由  $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  组成模拟烟气, $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{SO}_2/\text{N}_2$  的流量均由质量流量计(SevenstarCS200)精确控制, $\text{H}_2\text{O}$  由  $\text{N}_2$

冲击恒温水浴进行携带,气体混合均匀后进入反应器,从混合器到反应器入口管路保温,保证  $\text{H}_2\text{O}$  以气体形式存在。将 0.5 g 干燥后的活性炭置入反应器内进行  $\text{SO}_2$  的吸附实验。模拟烟气中  $\text{SO}_2$  体积分数为 0.02% ~ 0.30%, $\text{H}_2\text{O}$  体积分数 8%, $\text{O}_2$  体积分数 6%, $\text{N}_2$  为平衡气,反应气体流量为 400 mL/min,反应温度 65 °C。反应器出口气体中  $\text{SO}_2$  的体积分数经 FT-IR 烟气分析仪(Gasmet Dx4000)在线测量,通过  $\text{SO}_2$  的穿透曲线计算活性炭吸附  $\text{SO}_2$  的量,以每克活性炭吸附的  $\text{SO}_2$ (mg)表示。

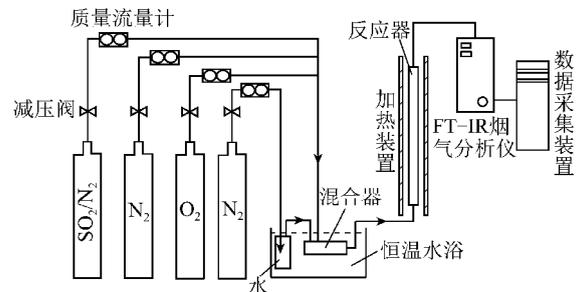


图 1 实验系统

Fig. 1 Experimental system

## 2 结果与讨论

### 2.1 活性炭的性质表征

两种粒径活性炭的孔隙结构参数见表 1,活性炭具有较大的比表面积和发达的微孔结构,微孔容积占总孔容积的比例较大。2.000 mm 的活性炭粒径较大,内扩散阻力严重, $\text{N}_2$  分子未能扩散到活性炭内部某些微孔中,使 2.000 mm 活性炭的比表面积、微孔容积、总孔容积比 0.075 mm 的活性炭略低。 $\text{SO}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  分子的动力学直径分别为 0.411, 0.346, 0.264 nm,均小于活性炭的平均孔径, $\text{SO}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  分子能够扩散到活性炭的微孔中。

表 1 活性炭的孔隙结构参数

Table 1 Pore structure parameters of activated carbon

活性炭粒径/mm	比表面积/( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	微孔表面积/( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	微孔容积/( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	总孔容积/( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	平均孔径/nm
2.000	605.008	514.780	0.271	0.326	2.154
0.075	624.297	541.084	0.285	0.328	2.101

### 2.2 活性炭粒径对 $\text{SO}_2$ 吸附过程的影响

图 2 为两种粒径活性炭吸附  $\text{SO}_2$  随时间的变化过程,在吸附的初始阶段, $\text{SO}_2$  吸附量增加较快,呈现较快的吸附速率;随着吸附的进行,活性炭的吸附速率急剧下降,达到一定的吸附时间后下降幅度开始变缓, $\text{SO}_2$  吸附量增加缓慢,直至达到  $\text{SO}_2$  吸附平衡。

$\text{SO}_2$  在活性炭表面的吸附过程包括气膜扩散、孔内扩散和表面吸附,只有当吸附质分子从气相扩散到活性炭微孔表面时,吸附反应才会发生,吸附速率由其中最慢的一步控制,通常气膜扩散的速率较大,吸附过程不由气膜扩散控制<sup>[13]</sup>。采用粒内扩散模型和 Bangham 吸附动力学模型对实验数据进行分析。粒

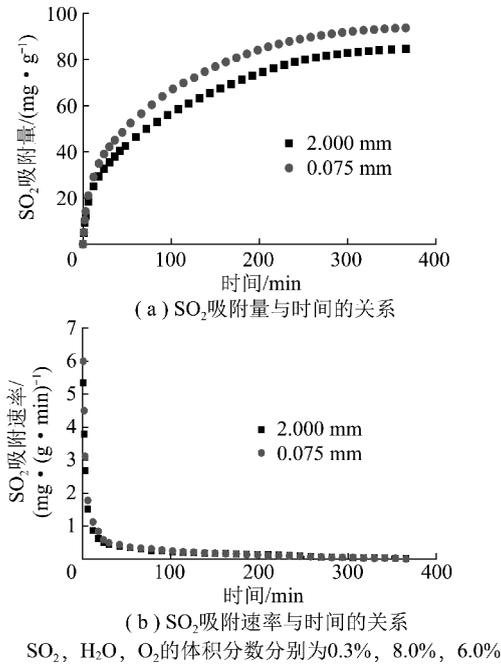


图 2 活性炭粒径对 SO<sub>2</sub> 吸附过程的影响

Fig. 2 Effects of particle sizes of activated carbon on SO<sub>2</sub> adsorption

内扩散模型<sup>[9-10,13-15]</sup>如下:

$$q_t = k_{id}t^{0.5} + C \quad (1)$$

其中,  $q_t$  为  $t$  时刻活性炭对 SO<sub>2</sub> 的吸附量, mg/g;  $k_{id}$  为粒内扩散速率常数, mg/(g · min<sup>0.5</sup>);  $C$  为常数, mg/g。如果  $q_t \sim t^{0.5}$  呈线性相关, 说明 SO<sub>2</sub> 在活性炭上的吸附为粒内扩散过程控制。

图 3 为  $q_t \sim t^{0.5}$  的关系, 二者在整个吸附过程中不符合直线关联, 而是呈分段线性关系, 说明在不同的吸附阶段存在不同的反应机制控制吸附过程<sup>[14-15]</sup>。在初始阶段, 快速的吸附速率是由于在活性炭表面附近微孔发生吸附, 活性炭表面附近空的活性位多, SO<sub>2</sub> 首先在活性炭上进行很快的物理吸附, 然后发生催化氧化反应; 随着反应的进行, 一些表面活性位被 SO<sub>2</sub> 占据, 一些活性位被生成的 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 所覆盖, SO<sub>2</sub> 需要扩散到活性炭内部微孔中的活性位上

发生吸附, 粒内扩散在该阶段起主要作用, 因此吸附速率快速下降; 达到一定的吸附时间后活性位基本上被占据, 部分 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 从活性位上脱附, 空出活性位继续吸附氧化 SO<sub>2</sub>, 该阶段吸附速率与 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的脱附速率有关<sup>[2]</sup>, 吸附速率缓慢, 逐渐降低直至达到吸附平衡。

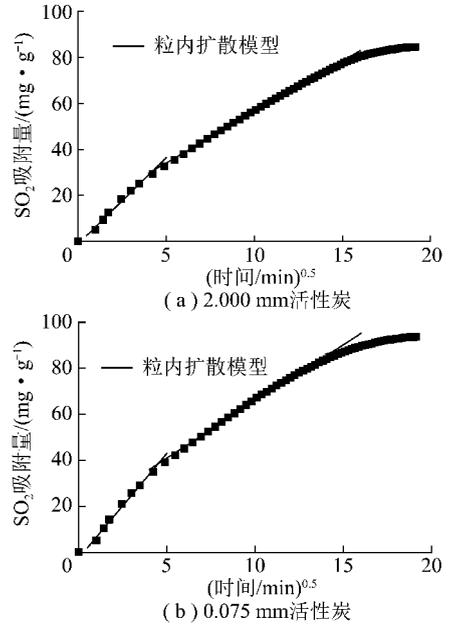


图 3 粒内扩散模型

Fig. 3 Intraparticle diffusion model

由图 2 可知, 不同粒径的活性炭吸附 SO<sub>2</sub> 的趋势类似, 但是呈现不同的吸附速率, 最终 SO<sub>2</sub> 的平衡吸附量也不相同, 0.075 mm 活性炭比 2.000 mm 活性炭呈现更高的 SO<sub>2</sub> 吸附速率和平衡吸附量。随着粒径的减少, 单位质量活性炭的外表面积增加, 相应的表面活性位数量增加; 同时, 由于大粒径活性炭内扩散路径长, 内扩散阻力大, SO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O 分子未能扩散到活性炭内部某些活性位上, 造成活性位失效, 内表面利用率较低<sup>[14-16]</sup>。表 2 为 SO<sub>2</sub> 吸附过程中粒内扩散控制阶段的模型拟合参数, 可以看出, 0.075 mm 活性炭比 2.000 mm 活性炭具有更大的粒内扩散速率常数。

表 2 粒内扩散模型拟合相关参数

Table 2 Parameters of intraparticle diffusion model fitting

SO <sub>2</sub> 体积 分数/%	2.000 mm 活性炭			SO <sub>2</sub> 体积 分数/%	0.075 mm 活性炭		
	$k_{id}/(\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min}^{0.5})^{-1})$	$C/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$R^2$		$k_{id}/(\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min}^{0.5})^{-1})$	$C/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$R^2$
0.021	1.881	-0.599	0.998 2	0.021	2.519	-1.701	0.997 4
0.054	2.703	4.249	0.992 6	0.056	3.169	3.702	0.994 8
0.111	3.057	3.821	0.993 7	0.111	3.249	10.659	0.984 4
0.200	3.749	10.373	0.995 4	0.200	4.118	12.164	0.996 8
0.300	4.439	11.882	0.999 3	0.300	4.925	16.335	0.995 6

### 2.3 SO<sub>2</sub> 体积分数对 SO<sub>2</sub> 吸附过程的影响

图4,5为SO<sub>2</sub>体积分数对活性炭吸附SO<sub>2</sub>的影响。从图4(a),5(a)可知,随着SO<sub>2</sub>体积分数的增加,SO<sub>2</sub>吸附量逐渐增加。当SO<sub>2</sub>体积分数从

0.021%增加到0.300%时,对于2.000 mm活性炭,SO<sub>2</sub>平衡吸附量从32.742 mg/g增加到84.628 mg/g;对于0.075 mm活性炭,SO<sub>2</sub>平衡吸附量从41.205 mg/g增加到93.578 mg/g。

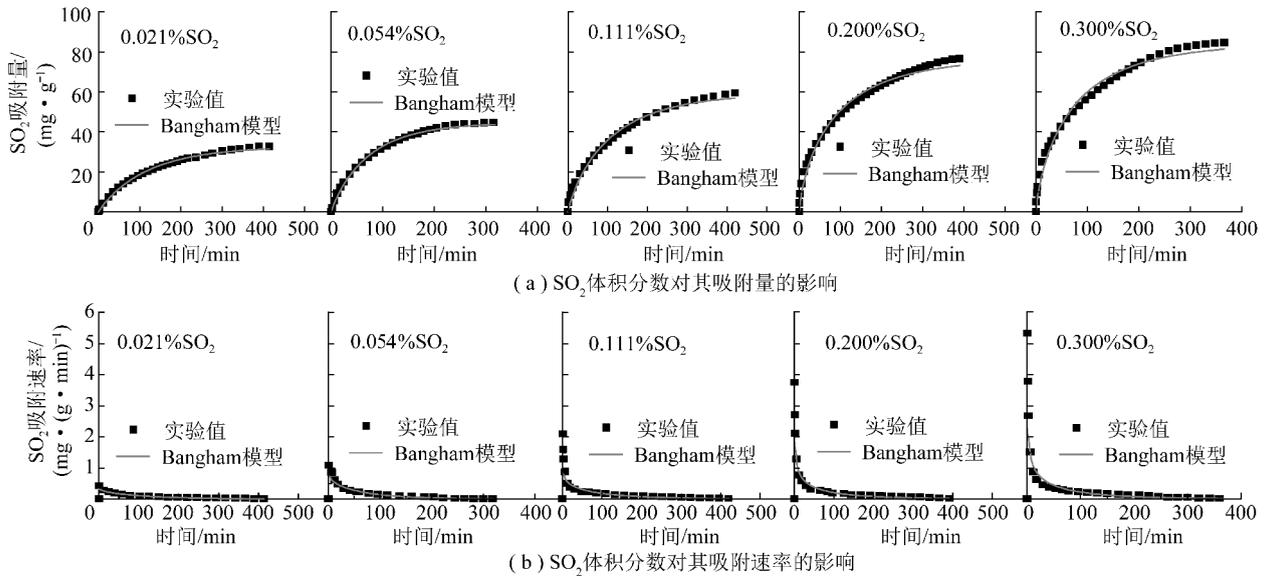


图4 SO<sub>2</sub>体积分数对2.000 mm活性炭动态吸附SO<sub>2</sub>的影响

Fig. 4 Effect of SO<sub>2</sub> concentration on SO<sub>2</sub> adsorption of 2.000 mm activated carbon

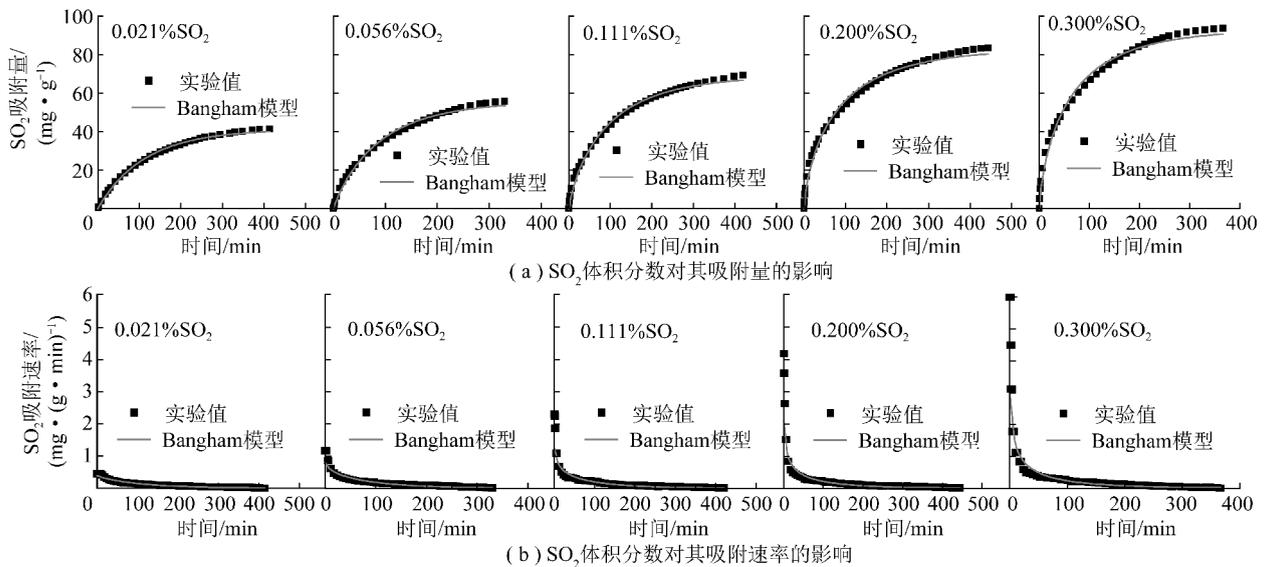


图5 SO<sub>2</sub>体积分数对0.075 mm活性炭动态吸附SO<sub>2</sub>的影响

Fig. 5 Effect of SO<sub>2</sub> concentration on SO<sub>2</sub> adsorption of 0.075 mm activated carbon

从图4(b),5(b)可知,随着SO<sub>2</sub>体积分数的增加,SO<sub>2</sub>初始吸附速率增加较多,后期趋于相同。从表2可知,粒内扩散速率常数随着SO<sub>2</sub>体积分数的增加而增加。SO<sub>2</sub>体积分数增加,气相和活性炭表面SO<sub>2</sub>的浓度差增大,增加了吸附的驱动力以克服从气相到活性炭表面的传质阻力,从而增加了活性炭对SO<sub>2</sub>的初始吸附速率和平衡吸附量<sup>[17-18]</sup>。

Bangham吸附动力学模型<sup>[9-10,16]</sup>的积分和微分

表达式为

$$q_t = q_e(1 - e^{-kt^n}) \quad (2)$$

$$\frac{dq_t}{dt} = knq_e t^{n-1} e^{-kt^n} \quad (3)$$

式中, $q_e$ 为SO<sub>2</sub>的平衡吸附量,mg/g; $k$ 为常数, $\text{min}^{-n}$ ; $n$ 为常数。

Bangham吸附动力学模型对SO<sub>2</sub>在活性炭上的吸附随时间变化的拟合曲线如图4,5所示,表3为拟

合的相关参数,可以看出,Bangham 模型的计算值和实验值吻合良好,相关性系数 R<sup>2</sup> 值较高,说明 SO<sub>2</sub> 在

活性炭上的动态吸附过程可以用 Bangham 模型较好地描述。

表 3 Bangham 模型拟合的相关参数  
Table 3 Parameters of Bangham model fitting

SO <sub>2</sub> 体积 分数/%	2.000 mm 活性炭				SO <sub>2</sub> 体积 分数/%	0.075 mm 活性炭			
	q <sub>e</sub> /(mg · g <sup>-1</sup> )	k/min <sup>-n</sup>	n	R <sup>2</sup>		q <sub>e</sub> /(mg · g <sup>-1</sup> )	k/min <sup>-n</sup>	n	R <sup>2</sup>
0.021	32.742	0.010 7	0.949	0.994 2	0.021	41.205	0.009 9	0.975	0.996 5
0.054	44.657	0.019 1	0.920	0.995 4	0.056	55.684	0.016 6	0.910	0.992 6
0.111	59.443	0.018 1	0.854	0.990 8	0.111	69.263	0.025 0	0.809	0.993 6
0.200	77.312	0.034 9	0.743	0.988 4	0.200	83.602	0.040 4	0.720	0.990 2
0.300	84.628	0.039 3	0.748	0.983 4	0.300	93.578	0.048 3	0.724	0.988 6

2.4 SO<sub>2</sub> 在活性炭上的吸附平衡

气体在活性炭表面的吸附平衡通常用 Langmuir 吸附等温线模型和 Freundlich 吸附等温线模型描述。

Langmuir 吸附等温线模型假设吸附发生在均匀表面的单分子层定位吸附,忽略被吸附分子之间的横向相互作用,方程<sup>[19]</sup>如下:

$$q_e = \frac{q_m K C_e}{1 + K C_e} \quad (4)$$

其中,q<sub>m</sub> 为 SO<sub>2</sub> 在活性炭上的单分子层最大吸附量,mg/g;K 为与吸附剂和吸附质之间的亲和力有关的 Langmuir 吸附常数,L/mmol;C<sub>e</sub> 为 SO<sub>2</sub> 的吸附平衡浓度,mmol/L。通过转化,将式(4)线性化为

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad (5)$$

Freundlich 吸附等温线模型假设吸附热在非均匀表面随着表面覆盖度的增大呈对数规律降低,方程<sup>[19]</sup>如下:

$$q_e = K_F C_e^{1/a} \quad (6)$$

其中,K<sub>F</sub> 为与温度、吸附剂有关的吸附常数,mg · L<sup>1/a</sup>/(g · mmol<sup>1/a</sup>);a 为与温度、吸附强度有关的无因次常数。对式(6)线性化得

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{a} \ln C_e \quad (7)$$

利用上述 2 个吸附等温线模型的线性形式对 SO<sub>2</sub> 在两种粒径活性炭上的吸附平衡数据进行拟合(图 6),相关参数见表 4。可以看出,Freundlich 吸附等温线模型拟合的结果优于 Langmuir 吸附等温线模型,利用 Freundlich 吸附等温线模型能够较好地预测 SO<sub>2</sub> 在活性炭表面的吸附平衡,说明活性炭表面性质的非均匀性,且 a 大于 1,说明 SO<sub>2</sub> 易于被活性炭吸附;0.075 mm 活性炭比 2.000 mm 活性炭具有更强的亲和力,因为 0.075 mm 活性炭具有更高的 a 值。

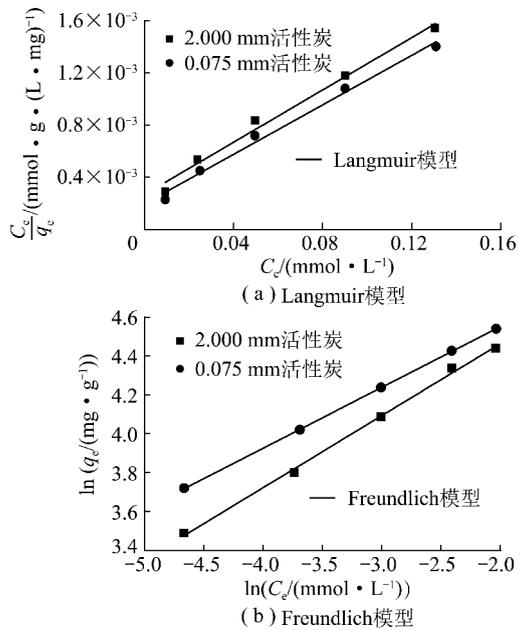


图 6 SO<sub>2</sub> 在活性炭表面的吸附平衡数据拟合  
Fig. 6 Linear fitting of adsorption equilibrium of SO<sub>2</sub> on activated carbon

3 结 论

(1) 活性炭吸附 SO<sub>2</sub> 在初始阶段呈现较快的吸附速率,该阶段 SO<sub>2</sub> 吸附速率和表面吸附有关;随着吸附的进行,表面活性位逐渐被占据,SO<sub>2</sub> 需要扩散到活性炭内部微孔中的活性位上发生吸附,活性炭的吸附速率急剧下降,粒内扩散起着主要作用;在接近吸附饱和阶段,SO<sub>2</sub> 吸附量增加缓慢直至吸附平衡,该阶段与 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的脱附有关。

(2) 与 2.000 mm 活性炭相比,0.075 mm 活性炭呈现较快的 SO<sub>2</sub> 吸附速率和较高的平衡吸附量;随着 SO<sub>2</sub> 体积分数的增加,SO<sub>2</sub> 初始吸附速率和平衡吸附量逐渐增加。

表4 吸附等温线模型拟合的相关参数

Table 4 Parameters of linear fitting of adsorption equilibrium

活性炭	Langmuir 等温线方程			Freundlich 等温线方程		
	$q_m / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$K / (\text{L} \cdot \text{mmol}^{-1})$	$R^2$	$K_F (\text{mg} \cdot \text{L}^{1/a} \cdot (\text{g} \cdot \text{mmol}^{1/a})^{-1})$	$a$	$R^2$
2.000 mm	99.900	37.386	0.983 5	181.702	2.702	0.996 9
0.075 mm	105.597	48.251	0.987 7	176.892	3.201	0.999 9

(3) Bangham 吸附动力学模型可以较好地预测  $\text{SO}_2$  在活性炭上的动态吸附过程。用 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温线模型拟合吸附数据,发现 Freundlich 吸附等温线模型能够较好地预测  $\text{SO}_2$  在活性炭表面的吸附平衡,说明活性炭表面的非均匀性。

### 参考文献:

- 李兰廷. 活性焦干法联合脱硫脱硝的正交实验[J]. 煤炭学报, 2009, 34(10): 1400-1404.  
Li Lanting. Orthogonal test on combined desulphurization and denitrification by activated char[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(10): 1400-1404.
- 步学朋, 徐振刚, 李文华, 等. 活性焦性质对脱除  $\text{SO}_2$  性能的影响研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(5): 834-839.  
Bu Xuepeng, Xu Zhengang, Li Wenhua, et al. The effects of activated coke properties on  $\text{SO}_2$  removal[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(5): 834-839.
- 李兰廷. 活性焦脱硫脱硝的机理研究——烟气组成的影响[J]. 煤炭学报, 2010, 35(S1): 185-189.  
Li Lanting. Mechanism of removal of  $\text{SO}_2$  and NO on activated coke; effect of component of flue gas on activated coke[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(S1): 185-189.
- Isao Mochida, Yozo Korai, Masuaki Shirahama, et al. Removal of  $\text{SO}_x$  and  $\text{NO}_x$  over activated carbon fibers[J]. Carbon, 2000, 38(2): 227-239.
- 朱惠峰, 钟 秦. 热再生对活性焦烟气脱硫的影响[J]. 煤炭学报, 2009, 34(9): 1258-1262.  
Zhu Huifeng, Zhong Qin. Effect of thermal regeneration of active coke on flue gas desulphurization[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1258-1262.
- 熊银伍, 徐振刚, 梁大明, 等. 烟气联合脱硫脱硝活性焦再生实验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(6): 1004-1010.  
Xiong Yinwu, Xu Zhengang, Liang Daming, et al. Experimental study on regeneration of activated char after combined removal of  $\text{SO}_2$  and NO in flue gas[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(6): 1004-1010.
- 刘 义. 活性炭法烟气脱硫机理和应用研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.  
Liu Yi. Mechanism and application of activated carbon desulfurization from flue gas[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2003.
- Plazinski W, Rudzinski W, Plazinska, A. Theoretical models of sorption kinetics including a surface reaction mechanism; a review[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2009, 152(1-2): 2-13.
- Rudzinski W, Plazinski W. Kinetics of dyes adsorption at the solid-solution interfaces; a theoretical description based on the two-step kinetic model[J]. Environment Science and Technology, 2008, 42(7): 2470-2475.
- Choi J W, Choi N C, Lee S J, et al. Novel three-stage kinetic model for aqueous benzene adsorption on activated carbon[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2007, 314(2): 367-372.
- Karatepe N, Orbak I, Yavuz R, et al. Sulfur dioxide adsorption by activated carbons having different textural and chemical properties[J]. Fuel, 2008, 87(15-16): 3207-3215.
- 高继贤, 王铁锋, 王光润, 等. 不同烟气水蒸气体积分数时 ZL50 活性炭吸附  $\text{SO}_2$  的动力学[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(3): 434-437.  
Gao Jixian, Wang Tiefeng, Wang Guangrun, et al. Kinetics of  $\text{SO}_2$  adsorption by ZL50 activated carbon for various water vapor volume fractions[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2010, 50(3): 434-437.
- 尹艳山, 张 军, 盛昌栋. NO 在活性炭表面的吸附平衡和动力学研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(35): 49-54.  
Yin Yanshan, Zhang Jun, Sheng Changdong. Adsorption equilibrium and kinetics of NO removal on activated carbons[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(35): 49-54.
- Kebbedy L J, Vijaya J J, Sekaran G, et al. Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies on the adsorption of m-cresol onto micro-and mesoporous carbon[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 149(1): 134-143.
- Senthilkumaar S, Varadarajan P R, Porkodi K, et al. Adsorption of methylene blue onto jute fiber carbon: kinetics and equilibrium studies[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 284(1): 78-82.
- 刘 义. 固定床活性炭脱硫动态传质过程分析[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2007, 10(3): 65-68.  
Liu Yi. Dynamic mass transfer process of activated carbon desulfurization on fixed bed[J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2007, 10(3): 65-68.
- Aravindhana R, Rao J R, Nair B U. Removal of basic yellow dye from aqueous solution by sorption on green alga *Caulerpa scalpelliformis*[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 142: 68-76.
- Ghouthi M A, Khraisheh M A M, Ahmad M N M, et al. Adsorption behavior of methylene blue onto Jordanian diatomite; a kinetic study[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 165(1-3): 589-598.
- 章燕豪. 吸附作用[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1989: 95-100.