

改性活性炭对镉的吸附研究

黄 鑫,高乃云,张巧丽

(同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室,上海 200092)

摘要: 研究镉在表面氧化改性的颗粒活性炭上的吸附行为. 考察离子强度、pH 值、温度和镉初始浓度对吸附的影响,并进行相应的动力学与热力学计算. 结果表明,实验范围内,活性炭对镉的吸附在 $\text{pH} = 2 \sim 7$ 范围内与 pH 值呈正相关,增加离子强度对吸附有一定的阻碍作用;吸附动态曲线符合二级动力学模型;活性炭与镉之间的标准吸附热约为 $-25.29 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$,整个温度范围内吸附是自发的放热过程.

关键词: 改性活性炭;热力学;镉;动力学;吸附;内分泌干扰物

中图分类号: TU 991

文献标识码: A

文章编号: 0253-374X(2008)04-0508-06

Research on Cadmium Adsorption by Modified Granular Activated Carbon

HUANG Xin, GAO Naiyun, ZHANG Qiaoli

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Cadmium adsorption behaviour of modified granular activated carbon was investigated. Experiments were conducted to study the effect of parameters, such as ionic strength, pH, equilibrium time and initial cadmium concentration. The adsorption capacity of modified granular activated carbon enlarged with an increase in pH, and reduced with an increase in ionic strength. The adsorption process followed pseudo-second order rate model. Thermodynamic calculation was employed based on adsorption isotherms at different temperatures. The average change of standard adsorption heat ΔH was $-25.29 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. Negative ΔH and ΔG values indicate the adsorption process for cadmium onto the studied activated carbon is exothermic and spontaneous.

Key words: modified activated carbon; thermodynamics; cadmium; kinetics; adsorption; endocrine disrupting chemicals

2005 年,广东省北江和湖南省湘江相继出现了有关饮用水源遭受镉污染的报道. 镉(Cd)是典型的环境重金属污染物,容易迁移进入人的食物链而危害人类的健康^[1]. 世界自然基金会的《环境中具有生殖和内分泌干扰作用的化学物质清单》将其

和铅、汞一起列为仅有的 3 种金属类内分泌干扰物. 美国环保局和日本环境厅也分别将镉列为疑似内分泌干扰物^[2]. 饮用水水源中镉的长期低浓度效应不可忽视.

吸附工艺处理效果稳定,价格相对较低,尤其适

收稿日期: 2006-08-24

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划资助项目(2002AA601130)

作者简介: 黄 鑫(1980—),男,博士生,主要研究方向为给水处理理论与技术, E-mail: huangxin_china@163.com;

高乃云(1950—),女,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为水处理理论与技术, E-mail: gaonaiyun@sina.com

用于大流量低浓度污染物质的去除. 目前已有大量文献报道了不同吸附剂对镉的去除^[3-5],但大多采用生物材料与废弃物,其化学稳定性尚待检验,应用中也多以废水处理中金属离子的回收为研究目的. 本文将某商品颗粒活性炭表面氧化改性,显著提高了它对水中镉的吸附性能. 通过对相关影响因素的考察及吸附热力学和动力学研究,对该改性颗粒活性炭与镉的作用机理作初步探讨.

1 实验部分

1.1 活性炭材料的准备

实验选用某破碎颗粒活性炭(碘值为 1 046 mg·g⁻¹,亚甲蓝值为 198 mg·g⁻¹,强度为 93.5%),实验表明该炭对镉基本无吸附作用. 颗粒活性炭使用前预处理以去除表面杂质,并通过化学氧化进行表面改性,具体方法参见文献[6]:筛分活性炭 60~80 目,在三氯甲烷中浸泡 4 h,120℃下烘箱(101AS-2,上海浦东荣丰科学仪器公司)中烘干. 用经水稀释的浓硝酸(体积比 1:1)浸泡并在沸腾温度下加热回流 1 h,置水漂洗至中性,120℃下干燥 8 h. 马弗炉中 300℃加热 1 h,冷却,密封封存待用. 实验中所用试剂均为化学纯.

1.2 实验方法

称量 0.15 g 活性炭置于 250 ml 碘量瓶中,向瓶中加入 100 ml Cd²⁺浓度为 4.5 μmol·L⁻¹的去离子水溶液,再加入 10 ml 浓度为 1 mol·L⁻¹的 KNO₃ 作为离子支持(此时离子强度 $I = 0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$). 原液 pH 值约为 6.0. 分别选取 20, 25, 35, 42 (±0.5) 4 个温度,在恒温摇床(HYG-A,江苏太仓实验设备厂)以 160 r·min⁻¹的摇速持续振荡 3~4 d,直至吸附平衡后取出部分溶液,过滤,测定镉浓度,并计算相应吸附量. 不加活性炭的空白试验表明碘量瓶对镉的吸附作用可以忽略不计. 镉的浓度用等离子发射光谱法进行测定(Optima 2 100 DV, PE 公司),测定波长 λ 为 228.8 nm,线性范围为 5 μg·L⁻¹~50 mg·L⁻¹.

1.3 数据计算

吸附动力学曲线分别用一级动力学方程、二级动力学方程和粒子内扩散模型(intraparticle diffusion model)进行拟合^[7-8].

$$\log(q_t - q_e) = \log q_e - k_1 t / 2.303$$

$$t / q_t = 1 / v_0 + t / q_e, v_0 = k_2 q_e^2$$

$$q_t = k_d t^{1/2}$$

式中: q_t , q_e 分别为 t 时刻与平衡时吸附容量, μmol·g⁻¹; k_1 为系数, min⁻¹; t 为时间, min; v_0 为初始吸附速率, μmol·g⁻¹·min⁻¹; k_2 为系数, g·μmol⁻¹·min⁻¹, k_d 为系数, μmol·g⁻¹·min^{-1/2}.

吸附等温线采用 Langmuir 和 Freundlich 等温式,分别为

$$c_e / q_e = 1 / (q_m b) + c_e / q_m$$

$$\lg q_e = (1/n) \lg c_e + \lg K_f$$

式中: c_e 为平衡时剩余浓度; q_m 为单分子层饱和吸附量, μmol·L⁻¹; b 为系数, L·μmol⁻¹; n 为系数; K_f 为系数, μmol·g⁻¹.

根据 Van't Hoff 方程进行吸附热力学计算^[7]

$$\Delta G = -RT \ln K_d$$

$$\ln K_d = \Delta H / (-RT) + \Delta S / R$$

式中: ΔG 为吸附的标准自由能改变量, kJ·mol⁻¹; R 为气体摩尔常数; T 为绝对温度, K; K_d 为吸附热力学平衡常数; ΔH 为标准吸附热, kJ·mol⁻¹; ΔS 为吸附的标准熵变值, J·mol⁻¹·K⁻¹.

2 结果与讨论

2.1 pH 值对活性炭吸附镉的影响

图 1 中 2 条虚线分别表示理想溶液中 Cd²⁺ 和 Cd(OH)⁺ 这 2 种物质与总镉的数量比例随 pH 值的变化^[3]. 随 pH 值增大, Cd(OH)⁺ 比例逐渐增多, 溶质的平均电荷密度减小. 提高 pH 值也使得活性炭表面的负电性增大. 活性炭与镉之间静电引力的变化主要看这 2 种变化哪一种占主导. 图 1 中去除率在 pH=2~7 范围内随 pH 值增大而增大; 在 pH=4~6 范围内的变化很快, 曲线陡峭. pH=4 及 pH=6 对应的去除率分别约为 19.8% 和 80%. 表面氧化的作用主要是增加活性炭表面含氧官能团的数量. 有研究认为活性炭表面羧基的水解常数 pK_a = 3~6, 增大 pH 值可促进羧基的水解, 提高表面电负性, 增大镉与活性炭之间的静电引力, 强化活性炭的表面官能团与镉的络合作用.

2.2 离子强度对吸附的影响

考察离子强度对活性炭吸附镉的影响. KNO₃ 离子强度 I 分别为 0.001, 0.010, 0.100 mol·L⁻¹ 时(图 2), 随 KNO₃ 浓度的增加, 活性炭的吸附作用逐渐减弱. 镉初始浓度为 4.5 μmol·L⁻¹, Freundlich 公式拟合 25~30 种离子强度下的吸附曲线为

$$\log q_t = 1.1569 + 1.413 \log c_e, R^2 = 0.9964$$

$$\log q_t = 1.1587 + 1.652 \log c_e, R^2 = 0.9971$$

$$\log q_t = 1.5751 + 5.857 \log c_e, R^2 = 0.7718$$

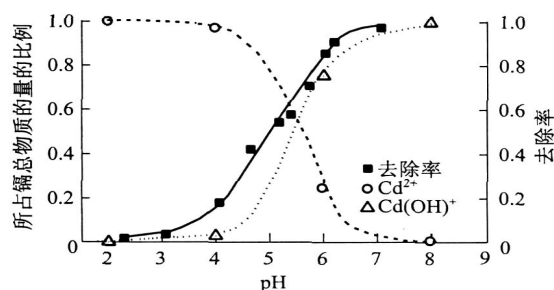


图1 pH对活性炭吸附镉的影响
 $T = 298 \text{ K}, \rho(\text{活性炭}) = 0.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}, c_0 = 4.5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$
 $(c_0 \text{ 为镉初始浓度}), I = 0.001 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

图1 Sorption efficiency of cadmium on modified granular activated carbon at different pH values

其中, R^2 为回归常数. 在 $I = 0.001, 0.010 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 2种溶液中, 活性炭吸附性能相差不大, 且都可以用 Freundlich 公式拟合, 线性良好. $I = 0.100 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时吸附性能急剧下降. 离子强度对于活性炭吸附镉有一定的阻碍作用. Youssef A M 等人在活性炭吸附镉的试验中添加氯化钠, 也得到类似结果^[9].

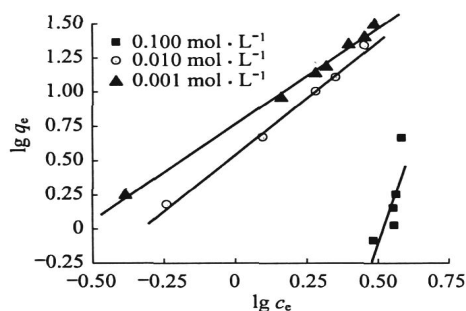


图2 离子强度对活性炭吸附镉的影响
 $T = 298 \text{ K}, \rho(\text{活性炭}) = 0.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1},$
 $c_0 = 4.5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}, \text{pH} = 6.0$

图2 Effect of ionic strength on removal of cadmium

2.3 时间对吸附的影响

在活性炭质量浓度为 $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $c_0 = 55 \sim 60 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{pH} = 6.0$ 的条件下, 4个温度的吸附在 1 500 min (约 1 d) 左右基本可以达到平衡 (如图3). 前 10 h 的吸附量占平衡吸附量的比率约为 30%. 吸附过程较为缓慢. 推测在吸附初期, 孔内扩散作用控制反应速率.

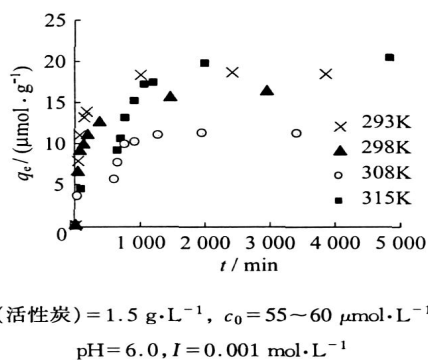


图3 不同温度下活性炭对镉的吸附动力学曲线

Fig.3 Effect of sorption time on removal of cadmium at different temperatures

图4显示粒子内扩散模型对吸附动态曲线的拟合情况. 由图可见, 在 0 ~ 225 min 范围内, 温度为 293 K 和 298 K 的对应曲线呈线性; 而 308 K 和 315 K 2个温度下对应曲线的线性范围更宽, 约为 0 ~ 600 min. 随着吸附达到一定时间, 粒子内扩散模型不再适用于镉的吸附过程. 这可能由于随吸附量的增加, 空间位阻作用与炭表面的静电斥力作用增强, 使得孔内扩散阻力增加所致.

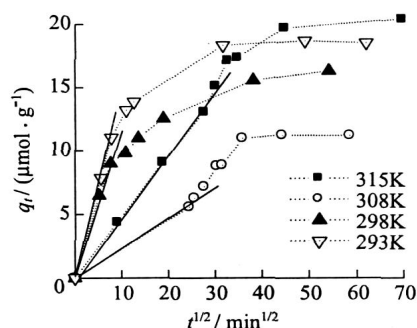


图4 镉在活性炭上吸附的粒子内扩散模型拟合

Fig.4 Intraparticle diffusion plots for cadmium adsorption on modified GAC

3种模型的拟合情况见表1. k_d 是基于最初的线性范围计算出的值. 从相关系数上看, 一级反应方程的拟合效果不如二级反应方程. 有文献指出, 由于一级反应需要估算平衡吸附容量 q_e 值, 对于吸附较慢的过程不能准确计算, 常常只适用于吸附的初期^[8]. 二级反应方程可较好地反应进行拟合, 相关系数在 0.97 以上, 计算出的平衡吸附容量与试验所得相吻合. 说明活性炭吸附镉的过程主要受化学作用所控制, 而不受物质传输步骤控制^[7-8].

表 1 动力学模型拟合参数

Tab. 1 First-order, second-order and intraparticle diffusion rate constants

T/ K	一级反应方程拟合		二级反应方程拟合			内扩散模型拟合	
	$k_1/(10^{-3} \text{ min}^{-1})$	R^2	$q_e/(\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1})$	$v_0/(\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$	R^2	$k_d/(\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1/2})$	R^2
293	2.46	0.906	18.83	0.044 0	0.999	1.421	0.989
298	1.53	0.985	16.67	0.028 9	0.999	1.186	0.983
308	1.16	0.915	12.79	0.021 2	0.974	0.237	0.995
315	1.46	0.984	22.68	0.047 9	0.994	0.481	0.999

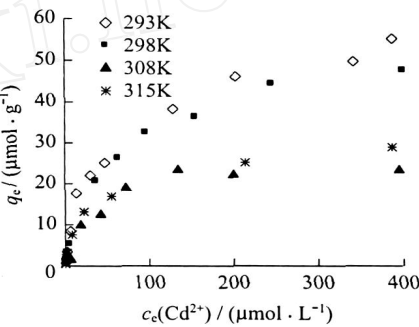
注:内扩散模型只对线性部分进行拟合.

图 3 以及表 1 的计算都显示,温度从 273 K 升高至 315 K 时,平衡吸附容量先降低再升高. 在 308 K 时达到最低值 $12.79 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,315 K 时达到最高值 $22.68 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$. 二级动力学方程的 v_0 ,一级动力学方程的 k_1 和粒子内扩散模型中的 k_d 都有相似的趋势,即随温度的升高先降低再升高. 这反映活性炭吸附镉的多种机理并存. 推测在以物理吸附为主导的阶段,提高温度使平衡吸附容量降低. 当温度达到 308 K 左右时,静电力与离子交换作用等物理吸附作用减弱,温度进一步提高后化学反应增强并占主导,使得吸附速度与容量都增大.

2.4 吸附等温线

如图 5 所示,同一温度下活性炭的吸附容量随初始浓度的提高而提高,到一定程度后达到饱和吸附量. 当浓度较低时,4 条曲线相隔较近. 当浓度大于 $50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,在 293 ~ 315 K 的温度范围内,活性炭对镉的吸附容量先下降后上升,在 308 K 左

右达到谷底,然后上升. 该趋势与吸附动力学曲线类似(见图 3). 将曲线用经典的 Langmuir 和 Freundlich 模型进行拟合,结果见表 2.



$\rho(\text{活性炭}) = 1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{pH} = 6.0$,
 $I = 0.010 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

图 5 活性炭对镉的吸附等温线
Fig. 5 Cadmium adsorption isotherms of modified granular activated carbon

表 2 Freundlich 与 Langmuir 方程的拟合参数

Tab. 2 Freundlich equation and Langmuir equation constant

T/ K	Freundlich 方程拟合			Langmuir 方程拟合		
	$1/n$	$K_f/(\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1})$	R^2	$q_m/(\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1})$	$b/(\text{L} \cdot \mu\text{mol}^{-1})$	R^2
293	0.568	2.396	0.938	51.02	0.031 86	0.967
298	0.622	1.647	0.975	42.92	0.035 53	0.962
308	0.506	1.689	0.947	24.51	0.054 15	0.998
315	0.604	1.432	0.949	31.06	0.055 46	0.996

计算结果表明,实验温度范围内 $1/n$ 的值介于 0.1 ~ 1.0 之间,说明该条件下吸附比较容易进行^[10]. Langmuir 方程拟合效果好于 Freundlich 方程,计算出的平衡吸附容量与实际情况相近. 但从表 2 可见 b 值的变化是随温度升高而升高,没有体现出随温度升高先降后升的复杂变化. 同样 K_f 与 n 也不能很好地反映整个吸附过程. 由于 Langmuir 与 Freundlich 方程是由理想的气态吸附推导而得到,与实际水溶液中的吸附不尽相同. 水合镉离子在水

溶液中存在不同形式,不同形式的镉与活性炭表面官能团有不同的作用机理. 可能由于离子交换、静电引力与表面反应等作用力共存,各种力在温度变化时此消彼长,显现出复杂的表征,同时活性炭表面吸附位不均一,因而很难用简单的宏观吸附模型来描述整个吸附情况.

2.5 吸附热力学

吸附热力学的研究有助理解吸附本质. 用 Van t Hoff 方程的关键是平衡吸附常数 K_d 的确定,文献

中有多种计算方法. 本文根据文献[7, 9-10], 分别用 Langmuir 与 Freundlich 方程拟合参数计算 K_d , 同时依据吸附等温线令 $K_d = q_e / c_e$, 3 种计算方法的结果列于表 3. 对应的 Van 't Hoff 方程拟合情况见图 6, 对应的 $\ln K_d - 1/T$ 图的线性相关系数分别为 $R^2 = 0.935$, $K_d = K_f^n$; $R^2 = 0.806$, $K_d = 1/n$; $R^2 = 0.968$, $K_d = q_e / c_e$. 如前所述吸附趋势随温度上升呈现先降后升的现象. 但由于数据较少, 故未将 308 K, 315 K 对应的等温线单独计算, 而是统一计算整个 293 ~ 315 K 范围内的吸附过程. 虽然线性关系不是很好, 但可在一定程度上提供信息作参考. 比较表 3 数据, 3 种方法计算结果较为一致之处是: 标准吸附热 ΔH 比较接近, 为 $(-25.29 \pm 3.34) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$; 标准吸附熵变 ΔS 都为负值. ΔH 为负值, 说明整个温度范围内吸附过程放热. 吸附质从溶液中聚集到固体表面是无序到有序的熵减过程, 但同时也会将固体表面的水分子释放到溶液中去, 该过程是熵增的. 系统熵的变化是这 2 种情况的加和. 活性炭表面

基团与镉间有多种力存在, 离子交换作用只占小部分. 这可能是吸附的熵减作用占主导的主要原因. Von Open B 等人测定了各种作用力引起的吸附热的范围为: 范德华力 $4 \sim 10 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 疏水键力约为 $5 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 氢键力 $2 \sim 40 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 配位基交换约为 $40 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 偶极间作用力 $2 \sim 29 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 化学键力大于 $60 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ [11]. 实验中吸附热的计算值为 $25.29 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 可以判断改性活性炭与溶液中镉的作用是氢键力和偶极作用力占主导. 图 4 中吸附易受离子强度影响说明作用力为非强键力(配位基交换与化合键力), 也侧面支持了上述观点. 此外, 根据 Freundlich 和 Langmuir 方程参数计算得到的 ΔG 在所有温度范围内均为负值, 说明活性炭吸附镉是自发的过程, 与实际情况一致. 按照 $K_d = q_e / c_e$ 计算得到的 ΔG 与前二者相差较大, 并且 Van 't Hoff 方程线性拟合系数只有 0.806 左右. 说明用该方法并不能很好地反映本实验中的吸附过程.

表 3 活性炭吸附镉的热力学函数
Tab. 3 Thermodynamic parameters of the cadmium adsorption on modified granular activated carbon at different temperatures

K_d 计算方法	T/K	K_d	$\Delta G/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\Delta S/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\Delta H/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$
$K_d = K_f^{1/10}$	293	4.66	-3.54	-80.71	-27.19
	298	3.01	-3.14		
	308	2.82	-2.33		
	315	1.81	-1.77		
$K_d = 1/b^{[9]}$	293	31.39	-8.39	-44.52	-21.44
	298	28.15	-8.17		
	308	18.47	-7.73		
	315	18.03	-7.41		
$K_d = q_e/c_e^{[7]}$	293	0.142	4.86	-109.6	-27.25
	298	0.119	5.41		
	308	0.059	6.51		
	315	0.075	7.21		

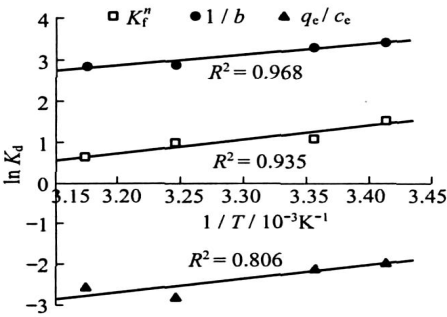


图 6 Van 't Hoff 方程拟合活性炭对镉的吸附
Fig. 6 Van 't Hoff plot for the cadmium adsorption on activated carbon

3 结论

- (1) 表面氧化改性活性炭除镉效果良好. 增大 pH 值可显著提高去除率, 离子强度对吸附过程有一定的阻碍作用.
- (2) 二级动力学方程可很好地描述吸附动态曲线. 孔内扩散模型与一级动力学方程均只适用于吸附初期.
- (3) 热力学计算表明标准吸附热约为 $-25.29 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 整个温度范围内吸附是自发的放热过程. 活性炭吸附镉存在多种机理, 既有离子交换、表面络

合等物理吸附,又有化学反应.随温度变化各种力的大小也发生变化.

参考文献:

- [1] 夏汉平.土壤-植物系统中的镉研究进展[J].应用与环境生物学报,1997,3(3):289.
XIA Hanping. Studies on cadmium in soil-plant stem [J]. Chinese Journal of Applied Environmental Biology, 1997, 3 (3):289.
- [2] 任仁,黄俊.哪些物质属于内分泌干扰物(EDCs)[J].安全与环境工程,2004,11(3):7.
REN Ren, HUANG Jun. An introduction to endocrine disrupters (EDCs) [J]. Safety and Environment Engineering, 2004, 11(3):7.
- [3] Shin Eun Woo, Rowell Roger M. Cadmium ion sorption onto lignocellulosic biosorbent modified by sulfonation: the origin of sorption capacity improvement [J]. Chemosphere, 2005, 60 (8):1054.
- [4] Choy Keith K H, McKay Gordon. Sorption of cadmium, copper, and zinc ions onto bone char using Crank diffusion model [J]. Chemosphere, 2005, 60(8):1141.
- [5] Abou-Mesalam M M. Sorption kinetics of copper, zinc, cadmium and nickel ions on synthesized silico-antimonate ion exchanger[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2003, 225(3):85.
- [6] 白树林,赵桂英,付希贤.改性活性炭对水溶液中Cr()吸附的研究[J].化学研究与应用,2001,13(6):270.
- BAI Shulin, ZHAO Guiying, FU Xixian. Improvement of adsorption of Cr() from aqueous solution by activated carbon [J]. Chemical Research and Application, 2001, 13(6):270.
- [7] Ho Y S, McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes[J]. Process Biochemistry, 1999, 34:451.
- [8] 丁世敏,封享华,汪玉庭,等.交联壳聚糖多孔微球对染料的吸附平衡及吸附动力学分析[J].分析科学学报,2005,21(2):127.
DING Shimin, FENG Xianghua, WANG Yuting, et al. Equilibrium and kinetic analysis of adsorption for dyestuff by crosslinked chitosan porous microbeads[J]. Journal of Analytical Science, 2005, 21(2):127.
- [9] 沈学优,卢瑛莹,朱利中.对硝基苯酚在水/有机膨润土界面的吸附行为[J].中国环境科学,2003,23(4):367.
SHEN Xueyou, LU Yingying, ZHU Lizhong. Sorption behavior of p-nitrophenol on the boundary of water and organobentonite—the thermodynamic character and mechanism[J]. Journal of China Environmental Science, 2003, 23(4):367.
- [10] 张增强,张一平.几个吸附等温模型热力学参数的计算方法[J].西北农业大学学报,1998,26(2):94.
ZHANG Zengqiang, ZHANG Yiping. Method of calculating the thermodynamic parameters from some isothermal absorption models[J]. Acta of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 1998, 26(2):94.
- [11] Von Open B, Kordel W, Klein W. Sorption of nonpolar and polar compounds to soils: Processes, measurement and experience with the applicability of the modified OECD-guideline[J]. Chemosphere, 1991, 22:285.

·下期文章摘要预报·

SiC/ AI 双面焊的残余应力分析

程 军,陈 英

运用有限元软件 ANSYS 对 SiC/ AI 的双面焊过程进行了数值分析.采用高斯圆柱热源模型模拟激光焊源,利用 APDL 编写循环程序现热源的移动,得到 SiC/ AI 双面焊过程的温度场分布和冷却后的残余力场.从平行焊接方向陶瓷侧靠近焊缝处的横向和纵向残余应力分布曲线可见:第一道焊表面(正面)的纵向残余应力在其边缘端均为压应力,并迅速向内转变为拉应力;而第二道焊表面(反面)的纵向残余应力却正好相反,其边缘端均为拉应力,并迅速向内转变为压应力.而横向残余应力均为压应力,最大值分布在两侧.在焊缝两侧,横向与纵向残余应力均发生跳跃变化.