

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.04.020

# 活性氧化铝对 As ( III ) 和 As ( V ) 的吸附性能研究

孙丽凤

(青岛理工大学 计算机工程学院, 山东青岛 266033)

**摘要:**采用静态吸附试验方法,研究了活性氧化铝对 As(III)和 As(V)的吸附特性和机制。结果表明,活性氧化铝对 As(III)和 As(V)的吸附特性一致:室温条件下,吸附平衡时间约为 24 h,动力学符合拟一级动力学模型,Boyd 动力学模型说明液膜扩散是吸附反应速率的控制因素;与 Freundlich 等温线模型相比,Langmuir 模型能够很好地描述吸附行为,说明以单分子层吸附为主;经过 Dubinin-Radushkevich 模型计算出的平均吸附自由能小于  $8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,表明吸附为物理过程;热力学参数表明吸附为自发、吸热、熵增加的过程,在吸附过程中,固-液界面的无序度增加。

**关键词:**砷;活性氧化铝;动力学;等温线;热力学

**中图分类号:**X523 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)04-0121-06

## Adsorption Behavior of As ( III ) and As ( V ) by Activated Aluminum

Sun Lifeng

(Computer Engineering Institute, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, Shandong, P. R. China)

**Abstract:** Batch experiments were carried out in order to investigate the adsorption behavior of As ( III ) and As ( V ) affected by activated aluminum. The results show that the adsorption characteristics of As ( III ) and As ( V ) are consistent: 24-hour is enough to obtain equilibrium; The kinetic data correlates well with the pseudo-first-order model; the film diffusion is the rate-limiting step approved by Boyd kinetic model; Compared with the Freundlich model, Langmuir isotherm model offers a better explanation for the adsorption of arsenic onto activated aluminum, indicating the adsorption is mainly monolayer; The obtained mean adsorption energy values calculated from Dubinin-Radushkevich model are lower than  $8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ , suggesting the adsorption process is physical; The thermodynamic parameters point out that the adsorption is a spontaneous, endothermic process, and the randomness increase at the solid-liquid interface after adsorption.

**Key words:** arsenic; activated aluminum; kinetics; isotherm; thermodynamics

砷在全球范围内分布广泛,在自然界中丰度排名第 20 位<sup>[1]</sup>。砷在水体中以无机砷和有机砷两种形态存在,由于生物转化与甲基化作用,有机砷在水体中的含量极低。无机砷主要以三价亚砷酸盐(As(III))和五价砷酸盐(As(V))形式存在,As(III)在还原性环境中所占比重大,As(V)在氧化环境中比重较大<sup>[2]</sup>。虽然有关部门对砷及其砷化合物的生产

进行了限制,但是,砷制剂仍然广泛应用于冶金、农业、林业、陶瓷业等。水体中砷的污染来源有:岩石的风化作用、尾矿、工业废水的排放、肥料和杀虫剂在农业中的应用、冶金、化石燃料的燃烧等<sup>[3]</sup>。

无机砷(As(III)和 As(V))由于其致癌性以及其它毒理学效应,对环境、人类和动物健康具有潜在威胁,长期饮用含砷水会引起皮肤、肺、膀胱等器官

收稿日期:2012-12-18

基金项目:山东省省环保厅项目(SDHBPJ-ZB-09)

作者简介:孙丽凤(1962-),女,副教授,主要从事水处理计算与模拟研究,(E-mail)slf66033@126.com。

的病变<sup>[4]</sup>。国际上对砷的饮用水标准规定亦日趋严格,世界卫生组织、中国等国家已将饮用水中砷的标准值从  $50 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  下降到  $10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[5]</sup>,因此水体中砷的去除已成为当前研究热点。

目前,水体中常用的除砷方法有吸附、混凝沉淀、离子交换、反渗透、萃取和生物法等。其中,吸附法因其操作简单、无二次污染、去除率高、成本低等优点而得到广泛应用<sup>[6]</sup>。常用的吸附剂主要有活性炭、氧化铁、二氧化钛、粘土、沸石和一些生物吸附剂等。与其他吸附剂相比,活性氧化铝有成本低、对有机和无机污染物的亲和力大、易再生、重复利用率高等优点<sup>[7]</sup>。张玉琴<sup>[8]</sup>研究了活性氧化铝对水中微量砷的去除能力,但未对吸附机理进行探讨;Singh等<sup>[9]</sup>采用氧化铝除砷的试验中发现,吸附机理主要是内扩散和表面吸附,动力学符合一级动力学,但未探讨吸附反应的限速步骤。

为深入地了解活性氧化铝对砷的吸附规律,试验选用活性氧化铝为吸附材料,对活性氧化铝吸附 As(III)和 As(V)的动力学、等温线和热力学进行了探讨,并以此为基础采用 Boyd 动力学模型分析了活性氧化铝吸附 As(III)和 As(V)的反应机制和限速步骤。

## 1 试验部分

### 1.1 材料与试剂

活性氧化铝选自天津市泓源科技化工有限公司,其性能参数为:粒径  $3 \sim 5 \text{ mm}$ ;孔容  $0.4 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ ;堆积比重  $0.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;比表面积  $300 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。

砷标准溶液(国家标准物质中心)  $1 \text{ mg} \cdot \mu\text{L}^{-1}$ :用于标准溶液的配制。

$1\ 000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  As(III)储备液:准确称取  $1.734\ 0 \text{ g}$   $\text{NaAsO}_2$ (分析纯)与  $1\ 000 \text{ mL}$  容量瓶中,用去离子水定容,  $4\ ^\circ\text{C}$  条件下保存。

$1\ 000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  As(V)储备液:准确称取  $5.660\ 5 \text{ g}$   $\text{Na}_3\text{AsO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (分析纯)与  $1\ 000 \text{ mL}$  容量瓶中,用去离子水定容,  $4\ ^\circ\text{C}$  条件下保存。

### 1.2 活性氧化铝对 As(III)和 As(V)的吸附试验

1)活性氧化铝对 As(III)和 As(V)的吸附动力学试验

活性氧化铝对 As(III)的动力学试验:分别称取  $0.5 \text{ g}$  活性氧化铝于一系列  $250 \text{ mL}$  具塞锥形瓶中,然后加入  $100 \text{ mL}$  浓度为  $1.128 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 As(III)溶液,置于振荡器中连续振荡  $96 \text{ h}$ (室温条件),转速  $130 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,分别在吸附进行  $10 \text{ min}$ 、 $0.5 \text{ h}$ 、 $1 \text{ h}$ 、 $5 \text{ h}$ 、 $9 \text{ h}$ 、 $24 \text{ h}$ 、 $48 \text{ h}$  和  $96 \text{ h}$  后取样,测定上清液中砷的浓度。

活性氧化铝对 As(V)的动力学试验:各称取  $0.5 \text{ g}$  活性氧化铝于一系列  $250 \text{ mL}$  具塞锥形瓶中,然后加入  $100 \text{ mL}$  浓度为  $1.848 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 As(V)溶液,置于振荡器中连续振荡  $96 \text{ h}$ (室温条件),转速为  $130 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,分别在吸附进行  $10 \text{ min}$ 、 $0.5 \text{ h}$ 、 $1 \text{ h}$ 、 $5 \text{ h}$ 、 $9 \text{ h}$ 、 $24 \text{ h}$ 、 $48 \text{ h}$  和  $96 \text{ h}$  后取样,测定上清液中砷的浓度。

2)活性氧化铝对 As(III)和 As(V)的吸附等温线试验

活性氧化铝对 As(III)的等温线试验:分别在  $6$ 、 $15$ 、 $28\ ^\circ\text{C}$  条件下,于一系列  $250 \text{ mL}$  具塞锥形瓶中各称取活性氧化铝  $0.5 \text{ g}$ ,分别加入  $100 \text{ mL}$  浓度为  $0.44$ 、 $3.91$ 、 $18.60$ 、 $62.45$ 、 $70.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 As(III)溶液,恒温连续振荡,达到吸附平衡时间后测定上清液中砷的浓度。

活性氧化铝对 As(V)的等温线试验:分别在  $6$ 、 $15$ 、 $28\ ^\circ\text{C}$  条件下,于一系列  $250 \text{ mL}$  具塞锥形瓶中各称取活性氧化铝  $0.5 \text{ g}$ ,分别加入  $100 \text{ mL}$  浓度为  $1.85$ 、 $17.68$ 、 $33.76$ 、 $66.88$ 、 $84.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 As(V)溶液,恒温连续振荡,达到吸附平衡时间后测定上清液中砷的浓度。

### 1.3 分析方法

采用 AFS-930 原子荧光光度计(北京吉天仪器有限公司)测定反应前后砷的浓度。吸附反应的吸附容量  $q$  根据式(1)计算。

$$q = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \quad (1)$$

式中: $q$  为吸附容量,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $C_0$ 、 $C_t$  分别为吸附前后砷的浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $V$  为溶液体积,  $\text{L}$ ;  $m$  为活性氧化铝的质量,  $\text{g}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 活性氧化铝对 As(III)和 As(V)的吸附动力学研究

活性氧化铝对 As(III)和 As(V)的吸附量随着时间的变化曲线如图 1 所示。从图 1 可以看出,在吸附开始阶段,活性氧化铝对 As(III)和 As(V)的吸附量随时间急剧增大,在吸附的中后期吸附量变化缓慢并趋于稳定,  $24 \text{ h}$  后基本达到平衡,因此将  $24 \text{ h}$  定为吸附平衡时间进行后续试验。

为了解活性氧化铝吸附 As(III)和 As(V)的动力学特性,采用常用的伪一级动力学模型和伪二级动力学模型对图 1 中的数据进行分析<sup>[10]</sup>。这两种模型的线性表达式如式(2)和(3)所示。

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2)$$

$$t/q_t = 1/k_2 q_e^2 + t/q_e \quad (3)$$

式中: $t$  为吸附进行的时间,  $\text{h}$ ;  $q_e$  和  $q_t$  分别为平衡吸

附量和吸附进行  $t$  时刻的吸附容量,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $k_1$  为伪一级吸附速率常数,  $\text{h}^{-1}$ ;  $k_2$  为伪二级吸附速率常数,  $\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

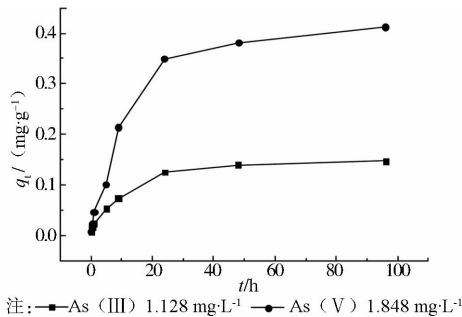


图1 活性氧化铝对As(III)和As(V)的吸附量随时间的变化曲线

从图2看出,与伪二级动力学相比,伪一级动力学能够更好地描述活性氧化铝对As(III)和As(V)的吸附行为( $R^2$ 均为0.998),并且由此模型得出的活性氧化铝对As(III)和As(V)平衡吸附容量(0.138、0.406  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )与实际值(0.138、0.412  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )相符,吸附速率常数分别为-0.076、-0.078  $\text{h}^{-1}$ 。同时也表明活性氧化铝吸附As(III)和As(V)的吸附速率由颗粒内扩散或液膜扩散或两者共同控制<sup>[11]</sup>。

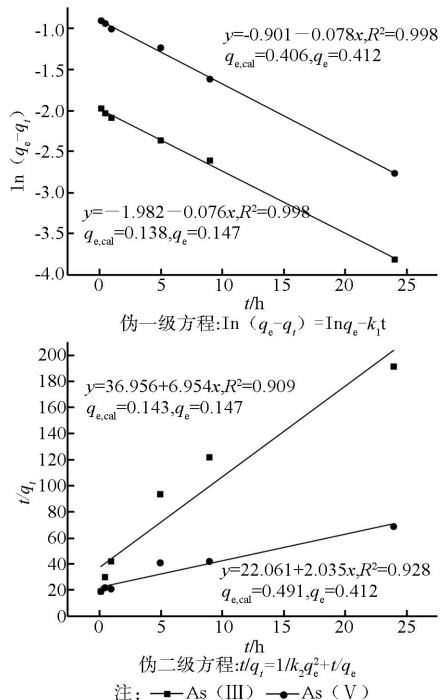


图2 活性氧化铝吸附As(III)和As(V)的动力学拟合曲线

吸附过程通常由外扩散、内扩散和表面扩散3部分组成,最慢的一步为吸附反应的限速步骤。但是伪一级和伪二级动力学模型并不能够说明吸附反应的控制机制,因此采用颗粒内扩散模型描述吸附过程中可能涉及的扩散机理<sup>[12]</sup>。其表达式为

$$q_t = k_{id}t^{0.5} + C \quad (4)$$

式中:  $q_t$  为反应进行  $t$  (h) 时刻的吸附容量,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $k_{id}$  为颗粒内扩散常数,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-0.5}$ ;  $C$  为常数,与扩散层厚度有关,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $B_t$  是  $(q_t/q_e)$  的函数;  $q_e$  为平衡吸附容量,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

Milmile等<sup>[13]</sup>认为若  $q_t$  和  $t^{0.5}$  有良好的线性关系且通过原点,则颗粒内扩散是吸附过程的限速步骤。从图2可知,As(III)和As(V)的  $q_t$  与  $t^{0.5}$  线性关系很好( $R^2$ 分别为0.999和0.991),截距接近零(分别为-0.0302、-0.0023),说明颗粒内扩散是控制吸附过程的重要步骤,但不是限速步骤。

为确定活性氧化铝吸附As(III)和As(V)的限速步骤,采用Boyd动力学模型拟合动力学数据,其方程表达式如下:

$$B_t = -0.4977 - \ln(1 - q_t/q_e) \quad (5)$$

式中:  $q_t$  为反应进行  $t$  (h) 时的吸附容量,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $q_e$  为平衡吸附容量,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $B_t$  是  $(q_t/q_e)$  的函数。

Tang等<sup>[14]</sup>认为若  $B_t$  和  $t$  线性关系良好且通过原点,则颗粒内扩散是吸附反应的控制步骤,否则,吸附过程的限速步骤是液膜扩散。Boyd动力学模型对数据的拟合结果如图2所示,活性氧化铝吸附As(III)和As(V)的  $B_t$  与  $t$  线性关系虽好( $R^2$ 均为0.998),但是没有通过原点(截距分别为-0.4307、-0.4830),因此液膜扩散是吸附过程的限速步骤。

## 2.2 活性氧化铝对As(III)和As(V)的吸附等温曲线

在6、15、28  $^{\circ}\text{C}$  条件下活性氧化铝吸附As(III)和As(V)的等温线如图3所示。

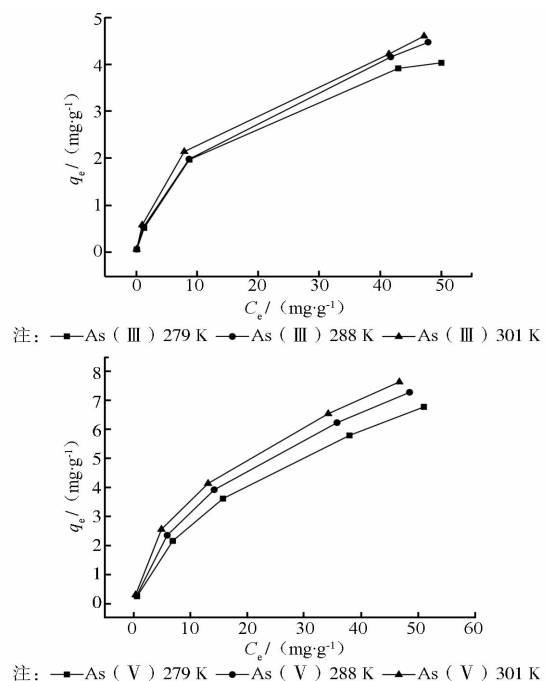


图3 不同温度下活性氧化铝对As(III)和As(V)吸附等温线

从图 3 可以看出, 试验温度下, 活性氧化铝对 As(III) 和 As(V) 的吸附等温线均属于 I 型等温线, 以单分子层吸附为主。

采用 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温线模型对图 3 中的数据拟合分析。其线性表达式如式(6)、(7)所示:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_{\max}} + \frac{1}{q_{\max}K_L} \quad (6)$$

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

式中:  $C_e$  为平衡浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $q_e$  为平衡吸附容量,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $q_{\max}$  为最大吸附容量,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $K_L$  为 Langmuir 吸附常数,  $\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$ ;  $K_F$  为 Freundlich 吸附系数,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})^{-1/n}$ ;  $n$  为吸附强度。拟合结果见图 4 和表 1。

为确定活性氧化铝对 As(III) 和 As(V) 的吸附过程(物理或化学过程), 采用 Dubinin-Radushkevich (D-R) 模型拟合对图 3 中的数据, D-R 模型的线性表达式如式(8)。

$$\ln q_e = \ln q_{\max} - k\varepsilon^2 \quad (8)$$

$$\varepsilon = RT \ln(1 + 1/C_e) \quad (9)$$

$$E = \frac{-1}{\sqrt{2k}} \quad (10)$$

式中:  $q_e$  为平衡吸附容量,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $q_{\max}$  为最大吸附容量,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $C_e$  为平衡浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $k$  是与平均吸附自由能有关的常数,  $\text{mol}^2 \cdot \text{J}^{-2}$ ;  $\varepsilon$  为吸附势,  $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $R$  为理想气体常数,  $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $T$  为绝对温度,  $\text{K}$ ;  $E$  为平均吸附自由能,  $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。拟合结果见图 4 和表 1。

从图 4 和表 1 可知, Langmuir 比 Freundlich 等温线模型更适于描述不同温度下活性氧化铝对 As(III) 和 As(V) 的吸附, 说明 As(III) 和 As(V) 在活

性氧化铝上的吸附以单分子层吸附为主<sup>[15]</sup>, 另外, Langmuir 吸附常数  $K_L$  随温度升高而增大, 说明吸附为吸热过程, 提高温度有利于活性氧化铝对 As(III) 和 As(V) 的吸附。

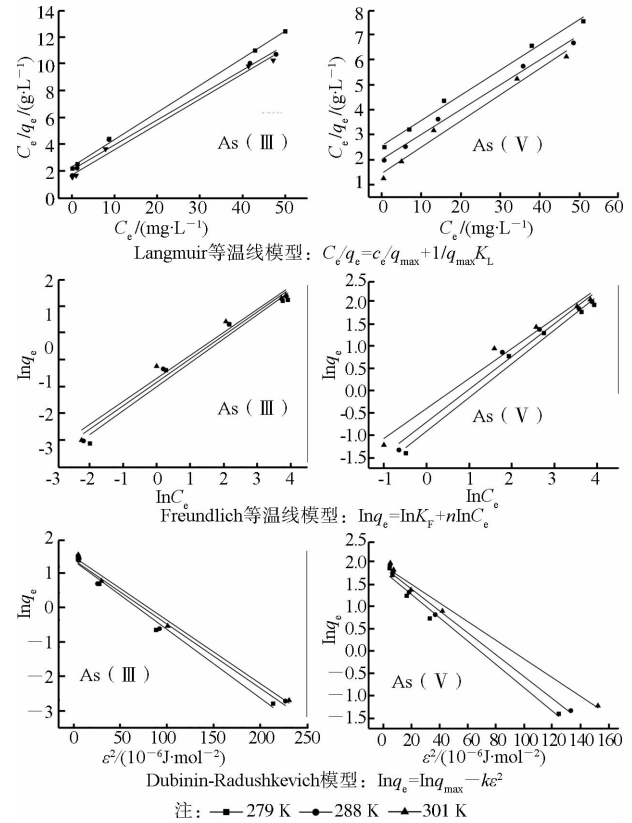


图 4 不同温度下活性氧化铝吸附 As(III) 和 As(V) 的等温线拟合曲线

在 Freundlich 等温线方程中,  $n$  值均大于 1, 说明吸附为优惠吸附<sup>[16]</sup>。由 D-R 公式得到的  $E$  值在  $5.02 \sim 5.22 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  范围内, 均小于  $8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 说明活性氧化铝对 As(III) 和 As(V) 吸附均为物理过程<sup>[17]</sup>。

表 1 Langmuir、Freundlich 和 D-R 模型对活性氧化铝吸附 As(III) 和 As(V) 的拟合参数

砷	温度/ K	Langmuir 等温线模型:			Freundlich 等温线模型:			Dubinin-Radushkevich 模型:				
		$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_{\max}} + \frac{1}{q_{\max}K_L}$	$q_{\max} / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$K_L / (\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$	$R^2$	$\ln q_e = \ln K_F + 1/n \ln C_e$	$K_F / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})^{-1/n})$	$n$	$R^2$	$\ln q_e = \ln q_{\max} - k\varepsilon^2$	$q_{\max} / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$k / 10^{-8} (\text{mol}^2 \cdot \text{J}^{-2})$
As(III)	279	4.97	0.085	0.998	0.320	1.43	0.968	3.85	1.99	-5.02	0.987	
	288	5.40	0.087	0.987	0.364	1.46	0.979	4.00	1.86	-5.18	0.979	
	301	5.33	0.107	0.991	0.408	1.49	0.963	4.33	1.84	-5.22	0.991	
As(V)	279	9.92	0.039	0.991	0.404	1.33	0.981	6.33	2.65	-5.21	0.981	
	288	10.07	0.049	0.991	0.495	1.37	0.975	6.93	2.49	-5.08	0.986	
	301	9.55	0.072	0.979	0.670	1.50	0.974	7.17	2.12	-5.04	0.986	

### 2.3 吸附的热力学分析

热力学分析能够进一步了解活性氧化铝对 As(III) 和 As(V) 的吸附机制, 吸附反应的吉普斯自由能变的计算式为

$$\Delta G = -RT \ln \frac{1000q_e}{C_e} \quad (11)$$

吸附焓变、吸附熵变的计算公式如式(12)。

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (12)$$

式中:  $\Delta G$  为吉普斯自由能变,  $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $R$  为理想气体常数,  $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $T$  为绝对温度,  $\text{K}$ ;  $q_e$  为平衡吸附容量,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $C_e$  为平衡浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $\Delta H$  为吸附焓变,  $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $\Delta S$  为吸附熵变,  $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。以温度  $T$  为横坐标, 式(11) 计算得出的  $\Delta G$  为纵坐标作图(图 5), 根据  $\Delta G-T$  的截距和斜率求  $\Delta H$  和  $\Delta S$  值(表 2)。

表 2 活性氧化铝吸附 As(III) 和 As(V) 的热力学参数

种	$C_0/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\Delta G/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$			$\Delta H/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\Delta S/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$R^2$
		279 K	288 K	301 K			
As(III)	0.44	-14.16	-15.25	-16.13	10.30	88.06	0.943
	3.91	-13.85	-14.59	-15.93	12.79	95.3	0.992
	18.60	-12.57	-13.00	-14.02	6.17	66.94	0.969
	62.45	-10.46	-11.01	-11.57	3.36	49.67	0.979
	70.12	-10.18	-10.86	-11.46	5.73	57.25	0.959
As(V)	1.85	-13.90	-14.92	-16.74	22.43	130.02	0.993
	17.68	-13.32	-14.33	-15.66	16.11	105.57	0.999
	33.76	-12.61	-13.46	-14.40	9.85	80.67	0.989
	66.88	-11.66	-12.36	-13.15	7.00	67.00	0.991
	84.85	-11.34	-12.00	-12.75	6.44	63.86	0.992

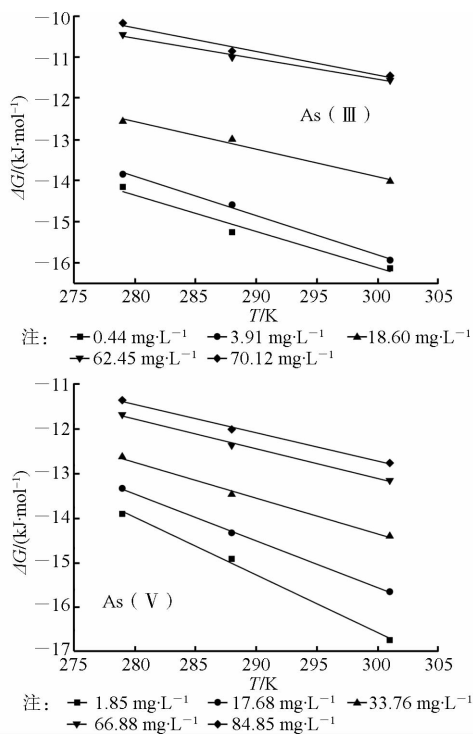


图 5 不同初始浓度下的热力学方程拟合曲线:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

从表 2 中数据可知, 活性氧化铝吸附 As(III) 和 As(V) 的  $\Delta G < 0$ , 说明吸附是自发的过程, 并且都

在  $-20 \sim 0 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  范围内, 说明吸附过程以物理吸附为主<sup>[18]</sup>。  $\Delta H > 0$ , 表明吸附为吸热过程, 升高温度有利于吸附反应的进行。

熵反映体系内部物质的有序性,  $\Delta S > 0$ , 说明活性氧化铝对 As(III) 和 As(V) 的吸附是一个熵增加的过程, 吸附反应的推动力是熵, 吸附过程中固-液界面的混乱度增加。

### 3 结论

吸附研究表明, 活性氧化铝对 As(III) 和 As(V) 的吸附规律是一致的:

1) 吸附平衡时间为 24 h, 符合伪一级反应动力学, 液膜扩散是吸附过程的限速步骤。

2) Langmuir 等温线模型能够很好地描述吸附行为, 主要为单分子层吸附; Freundlich 吸附强度  $n$  大于 1, 吸附是优惠吸附; 由 D-R 方程计算出的平均吸附自由能值小于  $8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 吸附为物理过程。

3) 热力学分析结果说明, 活性氧化铝对 As(III) 和 As(V) 的吸附是自发、吸热、熵增加的过程, 熵是吸附反应的推动力。

参考文献:

[1] Mohan D, Pittman C U. Arsenic removal from water/

- wastewater using adsorbents — A critical review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 142(1/2): 1-53.
- [2] Litter M I, Morgada M E, Bundschuh J. Possible treatments for arsenic removal in Latin American waters for human consumption [J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5): 1105-1118.
- [3] Ranjan D, Talat M, Hasan S H. Biosorption of Arsenic from aqueous solution using agricultural residue 'rice polish' [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 166(2/3): 1050-1059.
- [4] Li Y, Wang J, Luan Z, et al. Arsenic removal from aqueous solution using ferrous based red mud sludge [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 177(1/2/3): 131-137.
- [5] Zheng Y M, Yu L, Chen J P. Removal of methylated arsenic using a nanostructured zirconia-based sorbent: process performance and adsorption chemistry [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2012, 367(1): 362-369.
- [6] 许效天, 霍林, 左叶颖, 等. 铝改性粉煤灰漂珠吸附水溶液中砷的性能研究 [J]. *中国环境科学*, 2011, 31(8): 1300-1305.  
Xu X T, Huo L, Zuo Y Y, et al. Performance research on arsenic adsorption from aqueous solution by aluminum-modified fly ash cenospheres [J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(8): 1300-1305.
- [7] Kim Y, Kim C, Choi I, et al. Arsenic removal using mesoporous alumina prepared via a templating method [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(3): 924-931.
- [8] 张玉琴. 活性氧化铝去除地下水中微量砷的试验 [J]. *环境监控与预警*, 2010, 2(3): 50-52.  
Zhang Y Q. Study on removal of trace arsenic in groundwater by activated alumina [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2010, 2(3): 50-52.
- [9] Singh T S, Pant K K. Equilibrium, kinetics and thermodynamic studies for adsorption of As(III) on activated alumina [J]. *Separation and Purification Technology*, 2004, 36(2): 139-147.
- [10] Méndez-Díaz J D, Prados-Joya G, Rivera-Utrilla J, et al. Kinetic study of the adsorption of nitroimidazole antibiotics on activated carbons in aqueous phase [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2010, 345(2): 481-490.
- [11] 刘总堂, 孙玉凤, 施卫忠, 等. 乙酰苯胺修饰的吸附树脂对苯酚和对氯苯酚的吸附研究 [J]. *离子交换与吸附*, 2012, 28(4): 306-313.  
Liu Z T, Sun Y F, Shi W Z, et al. Study on the adsorption of phenol and p-chlorophenol with the adsorption resin modified by acetylaniline [J]. *Ion Exchange and Adsorption*, 2012, 28(4): 306-313.
- [12] Ma J, Yu F, Zhou L, et al. Enhanced adsorptive removal of methyl orange and methylene blue from aqueous solution by alkali-activated multiwalled carbon nanotubes [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2012, 4(11): 5749-5760.
- [13] Milmile S N, Pande J V, Karmakar S, et al. Equilibrium isotherm and kinetic modeling of the adsorption of nitrates by anion exchange Indian NSSR resin [J]. *Desalination*, 2011, 276(1/2/3): 38-44.
- [14] Tang B, Lin Y W, Yu P, et al. Study of aniline/caprolactam mixture adsorption from aqueous solution onto granular activated carbon: Kinetics and equilibrium [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 187(1): 69-78.
- [15] 张双圣, 刘汉湖, 张双全, 等. 污泥吸附剂的制备及其对含  $Pb^{2+}$  模拟废水的吸附特性研究 [J]. *环境科学学报*, 2011, 31(7): 1403-1412.  
Zhang S S, Liu H H, Zhang S Q, et al. Lead adsorption properties of a sludge adsorbent prepared from sludge and coal [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(7): 1403-1412.
- [16] Toor M, Jin B. Adsorption characteristics, isotherm, kinetics and diffusion of modified natural bentonite for removing diazo dye [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 187(1): 79-88.
- [17] Maji S K, Pal A, Pal T. Arsenic removal from real-life groundwater by adsorption on laterite soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 151(2/3): 811-820.
- [18] 曹晓燕, 景建宁, 杨佳朋, 等. 表面活性剂对 DDT 在胶州湾沉积物上吸附行为的影响 [J]. *环境科学*, 2011, 32(11): 3327-3334.  
Cao X Y, Jing J N, Yang J P, et al. Effect of surfactant on sorption behaviors of DDT on Jiaozhou Bay sediment [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(11): 3327-3334.

(编辑 王秀玲)