文章编号:1004-0609(2010)09-1849-06

偏钛酸型锂吸附剂的合成及吸附性能

张丽芬,陈白珍,石西昌,马立文,陈 亚

(中南大学 冶金科学与工程学院,长沙 410083)

摘 要:以TiO₂和Li₂CO₃为原料,采用固相法合成偏钛酸型锂吸附剂前躯体Li₂TiO₃,将该前躯体经过盐酸洗脱 锂,得到偏钛酸型锂吸附剂H₂TiO₃,其中锂的抽出率达到98.86%,钛几乎不溶损。对TiO₂、Li₂TiO₃、H₂TiO₃以 及H₂TiO₃吸附锂后的样品进行XRD和SEM表征。研究偏钛酸型锂吸附剂H₂TiO₃对锂离子的吸附性能,并用伪 一级动力学方程和伪二级动力学方程对吸附过程进行拟合,计算相应的速率常数。结果表明:H₂TiO₃对锂离子具 有较大的吸附能力,在LiOH溶液中对锂离子的吸附容量为39.8 mg/g;吸附过程符合伪二级动力学方程,表明吸 附过程主要为化学吸附,吸附平衡数据符合Langmuir等温吸附方程。 关键词:锂吸附剂;Li₂TiO₃;吸附动力学;伪二级动力学 中图分类号:O614.111 文献标志码:A

Synthesis and adsorption property of H₂TiO₃ type adsorbent

ZHANG Li-fen, CHEN Bai-zhen, SHI Xi-chang, MA Li-wen, CHEN Ya

(School of Metallurgical Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: H_2TiO_3 type adsorbent was obtained by acid-modifying adsorbent precursor Li_2TiO_3 , which was synthesized by a simple solid-phase reaction between Li_2CO_3 and TiO_2 . The extraction rate of Li^+ from Li_2TiO_3 is 98.86%, and while almost no Ti^{4+} is extracted. TiO_2 , Li_2TiO_3 , H_2TiO_3 and products of H_2TiO_3 adsorbing Li^+ were characterized by XRD and SEM. The lithium adsorption properties were investigated by adsorption kinetics and adsorption isotherm. The kinetic data were studied by the pseudo-first-order and pseudo-second-order kinetic models. The rate constants of adsorption for these kinetic models were calculated. The results indicate that H_2TiO_3 type adsorbent shows superior adsorptive capacity of Li^+ , with the value of 39.8 mg/g in LiOH solution. The adsorption process obeys pseudo-second-order rate equation, and the process can be seen as chemical adsorption. The equilibrium data can be described well by the Langmuir isotherm

Key words : lithium adsorbent ; Li₂TiO₃ ; adsorption kinetics; pseudo-second-order kinetics

人们对锂产品的需求不断增加,仅靠提取固态锂 矿石中的锂已不能满足人类对锂的需求,因此对液态 锂的提取具有重要意义。含锂溶液主要为海水、盐湖 卤水等,它们的主要特点是含锂量低。传统的沉淀法、 溶剂萃取法和盐析法^[1-2]等,不适合对含锂量低的海 水、盐湖卤水进行锂的提取,而制备适合的离子筛通 过吸附法吸附锂是一种有发展前景的方法。对于锂离 子筛目前主要集中研究锰系锂离子筛^[3-5],但是锰系锂 离子筛存在锰溶损大,循环次数少等不足,而钛系锂 离子筛具有溶损少、结构稳定等优点。董殿权等^[6]应 用溶胶-凝胶法合成出 Li₄Ti₅O₁₂,并对其进行酸洗脱 锂得到离子筛,锂的抽出率为 81.5%,钛离子的抽出 率在 4.2%以下,对锂离子的吸附容量达到 42.30 mg/g; 钟辉^[7-8]以混晶型二氧化钛(其中锐钛型二氧化钛占

基金项目:国家科技支撑计划"十一五"重大项目(2008BAB35B04)

收稿日期:2009-10-16;修订日期:2009-12-08

通信作者:石西昌,副教授,博士;电话:0731-88877352;E-mail:xichang.shi@gmail.com

83.1%)为原料用固相法合成 Li₂TiO₃,经过酸洗得到锂 离子筛,其饱和吸附容量为 28.76 mg/g,而且对高钙 镁、低锂含量的气田卤水中的锂具有特殊的分离效果。 目前,关于偏钛酸型锂吸附剂以及其对 Li⁺吸附过程的 动力学和吸附模型的研究比较少。本文作者采用混晶 型二氧化钛,用固相法合成 Li₂TiO₃,并对其进行酸浸, 洗脱锂离子得到锂吸附剂,利用 XRD、SEM 对样品 的晶体结构和表面形貌进行表征,对锂吸附剂的吸附 性能进行研究。

1 实验

 1.1 锂吸附剂前躯体 Li₂TiO₃ 及锂吸附剂 H₂TiO₃ 的 合成

将 TiO₂(98%,国药集团化学试剂有限公司)和 Li₂CO₃(97%,天津市光复精细化工研究所)按不同的配 比(*n*(Li₂CO₃):*n*(TiO₂)=1.00,1.02,1.05,1.08)、以无 水乙醇作为介质将其混合均匀,置于 85 烘箱中烘 干,在 850 下焙烧 24 h,得到偏钛酸型锂吸附剂前 躯体 Li₂TiO₃。

将锂吸附剂前躯体 Li₂TiO₃ 放入 0.1 mol/L 的盐酸 中,置于恒温磁力搅拌器中在 60 下搅拌,直到 Li₂TiO₃中的锂离子抽出达到平衡,过滤、洗涤、烘干 得到偏钛酸型锂吸附剂 H₂TiO₃。

1.2 吸附性能

分别称取一系列的 0.5 g 锂吸附剂 H₂TiO₃ 放入带 塞子的玻璃瓶中,在瓶中分别加入 50 mL 694 mg/L 的 LiOH 溶液,将玻璃瓶密封置于震荡器中恒温震荡, 在不同的时间间隔取样用原子吸收法测定吸附后溶液 中锂离子的浓度,运用式(1)计算锂吸附剂对锂离子的 吸附容量:

$$q = (\rho_0 - \rho) V / m \tag{1}$$

式中: *q* 为每克锂吸附剂吸附 Li⁺的量; ρ₀ 为 Li⁺的起 始浓度; ρ为不同时间的 Li⁺的浓度; *V* 为溶液的体积; *m* 为吸附剂的质量。

分别称取一系列 0.1 g 的吸附剂放入带塞子的玻 璃瓶中,在瓶中分别加入 50 mL 不同浓度的 LiCl 溶液 中, pH=10.1(用体积比为 1:4 的 0.1 mol/L NH4Cl 和 0.1 mol/L NH3·H2O 的缓冲溶液调节),将玻璃瓶密封置于 震荡器中恒温震荡直到吸附平衡,研究吸附动力学 性质。

1.3 产品的分析与表征

采用 X 射线衍射仪(Rigaku D•max 2550 型,日本 生产)对 TiO₂、Li₂TiO₃、H₂TiO₃以及 H₂TiO₃吸附锂后 的样品进行 X 射线衍射分析,工作参数如下:Cu K_a 靶(λ =0.154 056 nm),扫描电压 40 kV,电流 100 mA, 步宽 0.02°,扫描速度 2 (°)/min,扫描范围 10°~85°。 用扫描电子显微镜(JSM=6360lv 型,日本生产)观察 Li₂TiO₃、H₂TiO₃以及 H₂TiO₃吸附锂后样品的形貌。

采用原子吸收法(TAS-990 F 型,北京普析通用仪 器有限责任公司生产)测定溶液中锂离子的含量;以二 安替比林甲烷作为显色剂用分光光度法(WFJ-7200 型,尤尼柯(上海)仪器有限公司生产)测定溶液中钛离 子的含量。

2 结果与讨论

2.1 锂吸附剂前躯体 Li₂TiO₃

图 1 所示为 TiO₂ 和 Li₂CO₃ 与 TiO₂ 按不同配比合 成的 Li₂TiO₃ 的 XRD 谱。从图 1(a)可以看出, TiO₂ 中 包含锐钛相(晶格常数: a=b=0.378 52 nm, c=0.951 39 nm(JCPDS 21 — 1272)) 和 金 红 石 相 (晶格常数: a=b=0.459 33 nm, c=0.295 92 nm(JCPDS 21—1276)) 两种晶相,且金红石相的衍射峰强于锐钛相的。二氧 化钛中金红石相 TiO₂ 的含量(x)可采用式(2)计算^[9]:

$$x = 1/(1 + 0.8I_{\rm A}/I_{\rm R})$$
(2)



图 1 TiO₂和 Li₂CO₃与 TiO₂按不同配比合成的 Li₂TiO₃的 XRD 谱

Fig.1 XRD patterns of TiO₂ and Li₂TiO₃ synthesized with different molar ratios of Li₂CO₃ to TiO₂: (a) TiO₂; (b) $n(\text{Li}_2\text{CO}_3):n(\text{TiO}_2)=1.00$; (c) $n(\text{Li}_2\text{CO}_3):n(\text{TiO}_2)=1.02$; (d) $n(\text{Li}_2\text{CO}_3):n(\text{TiO}_2)=1.05$; (e) $n(\text{Li}_2\text{CO}_3):n(\text{TiO}_2)=1.08$

式中: I_A 为锐钛相 TiO₂的最强衍射峰的积分强度,出现在 $2\theta=25.24^{\circ}$ 处; I_R 为金红石相 TiO₂的最强衍射峰的积分强度,出现在 $2\theta=27.36^{\circ}$ 处。根据或(1)计算得到金红石相 TiO₂的含量为 64.19%;锐钛相 TiO₂的含量为 35.81%。

从图 1 可以看出;采用 4 种不同配比都可以得到 纯相的 Li₂TiO₃;随着锂过量的增大,相应角度的衍射 峰强度增加,选择配比 *n*(Li₂CO₃):*n*(TiO₂)=1.00 时合成 得到的 Li₂TiO₃作为锂吸附剂的前躯体。

2.2 锂吸附剂 H₂TiO₃

锂吸附剂前躯体 Li₂TiO₃ 经过盐酸洗脱锂离子得 到锂吸附剂 H₂TiO₃。图 2 所示为锂的抽出率与抽取时 间的变化曲线。由图 2 可以看出,Li₂TiO₃ 经过酸洗 1 d 的抽出率达到 83.64%,之后随时间的延长抽出率缓慢 增加,到第 4 d 锂抽出率达到 98.86%,而钛的溶损率 小于 0.1%。

图 3 所示为 Li₂TiO₃、H₂TiO₃以及 H₂TiO₃吸附 Li⁺ 后的 XRD 谱,其中曲线(a)所示为纯相的单斜晶相 Li₂TiO₃的 XRD 谱(晶格常数:*a*=0.506 9 nm,*b*=0.879 9 nm,*c*=0.975 9 nm(JCPDS 33—831));曲线(b)所示为



图 2 锂的抽出率与抽取时间的变化曲线

Fig.2 Variation of Li^+ exchange rate with reaction time

Li₂TiO₃经过盐酸洗脱 Li⁺后得到的 H₂TiO₃的 XRD 谱。从图 3(b)可以看出衍射峰相对酸洗前向右偏移, 强度明显减弱,而且出现衍射峰宽化,可能是 Li₂TiO₃ 进行酸洗脱锂时,发生了氢离子(半径约为 0.001 2 nm) 和锂原子(半径约为 0.076 nm)的交换,从而造成晶胞 缩小。从图 3(b)还可以看出部分衍射峰消失,(002)晶 面衍射峰最强,可能是经过酸洗后择优取向加强,在 *c* 轴方向生长较快。图 3 中曲线(c)所示为 H₂TiO₃ 吸附 Li⁺后的 XRD 谱,可以看出吸附后与吸附前(见曲线(b)) 的谱相像,说明吸附后结构没有发生明显变化。

图 4 所示为 Li₂TiO₃、 H₂TiO₃、H₂TiO₃ 吸附 Li⁺ 后的 SEM 像。由图 4(a)可以看出用固相法合成得到的 Li₂TiO₃颗粒比较均匀 近似圆形 粒径大小为 1~2 μm。 从图 4(b)可以看出 ,Li₂TiO₃ 经过酸洗脱锂得到 H₂TiO₃ 后颗粒变小,而且出现了不规则的微裂纹,这可能是 经过酸洗脱锂时发生氢离子和锂离子的交换,晶胞缩 小。从图 4(c)可以看出,吸附锂后颗粒比吸附前大, 而且出现不规则的多边形以及层状结构,说明在吸附 过程中 H₂TiO₃颗粒在某个方向生长较快,造成层状结 构明显,此结果与图 3(b)、(c)所示的 XRD 谱分析一致。



图 3 Li₂TiO₃, H₂TiO₃ 以及 H₂TiO₃ 吸附 Li⁺后的 XRD 谱 **Fig.3** XRD patterns of Li₂TiO₃ (a), H₂TiO₃ (b) and products (c) of H₂TiO₃ after adsorbing Li⁺



- 图 4 Li₂TiO₃, H₂TiO₃以及 H₂TiO₃吸附 Li⁺后的 SEM 像
- Fig.4 SEM images of Li₂TiO₃(a) ; H₂TiO₃(b) and products (c) of H₂TiO₃ after adsorbing Li⁺

1852

2.3 吸附性能

2.3.1 饱和吸附容量

图 5 所示为锂吸附剂 H₂TiO₃ 在浓度为 694 mg/L 的 LiOH 溶液(曲线(a))和浓度为 282.5 mg/L(曲线(b)) 与 87.5 mg/L(曲线(c))的 LiCl 溶液中吸附容量随时间 的变化图。由图 5 可知,无论是在 LiOH 溶液还是在 LiCl 溶液中,吸附容量随时间的延长而不断增加,在 第 1 d 吸附容量增加比较快,随后随时间的延长吸附 容量缓慢增大,到第 8 d 吸附基本达到平衡,吸附容 量分别为 39.8、30.9、28.63 mg/g。这是因为吸附剂的 吸附中心为具有酸式离解能力的—OH 基团,吸附剂 S—OH 与 Li⁺按等当量交换^[10–11]其反应式为

$$S \longrightarrow OH^+ Li^+ \longrightarrow S \longrightarrow OLi^+ H^+$$
(3)

因此,吸附剂在中性或碱性溶液中对锂离子具有 较强吸附能力。当溶液中锂离子不断被吸附,释放出 质子,溶液中的 OH⁻被不断消耗,随着时间的延长吸 附容量缓慢增加,直到吸附平衡。所以,吸附剂在 LiOH 溶液中的吸附容量高于在 LiCl 溶液的。





2.3.2 吸附动力学

盐湖卤水中的锂一般以 LiCl 形式存在,因此,对 吸附剂在不同浓度的 LiCl 溶液中的吸附动力学进行 研究。关于吸附剂对金属离子的吸附动力学研究已有 不少报道,目前,伪一级动力学式(4)模型和伪二级动 力学式(5)模型被广泛应用^[12-14]来研究吸附机理,确定 吸附过程的速率常数。

$$\lg(q_{\rm e} - q_{\rm t}) = \lg q_{\rm e} - \frac{k_{\rm ad}}{2.303}t$$
(4)

$$\frac{t}{q_{t}} = \frac{1}{kq_{e}^{2}} + \frac{1}{q_{e}}t$$
(5)

式中:q_e和 q_t分别为在吸附平衡和吸附时间为 t 时的 吸附剂对 Li⁺的吸附容量; k_{ad}和 k 分别为伪一级动力 学模型和伪二级动力学模型的吸附速率常数。

用伪一级动力学方程和伪二级动力学方程对图 5 中曲线(b)和(c)进行线性拟合 结果如图 6 和表 1 所示。 由图 6 和表 1 可以看出,用伪二级动力学方程拟合的 线性相关系数比用伪一级动力学方程拟合的大,达到 0.999。所以,可以认为吸附剂在 LiCl 溶液中的吸附 动力学符合伪二级动力学模型。根据伪二级动力学方 程,求出 2 种浓度下的速率常数分别为 0.005 74 和 0.005 1 g/(mg·h);平衡吸附容量分别为 29.32 和 31.63 mg/g,此吸附容量与图 5 所示的实验得到的吸附容量 28.63 和 30.9 mg/g 相近。这进一步说明吸附剂在 LiCl 溶液中的吸附符合伪二级动力学方程,表明吸附过程 主要为化学吸附^[15]。



图 6 不同 Li⁺ 浓度下吸附剂 H₂TiO₃吸附锂的伪一级动力学 和伪二级动力学曲线

Fig.**6** Pseudo-first-order (a) and pseudo-second-order (b) kinetic plots for Li^+ adsorption of H_2TiO_3 in solutions with different Li^+ concentrations

张丽芬,等:偏钛酸型锂吸附剂的合成及吸附性能

表 1 不同 Li⁺ 浓度下吸附剂 H₂TiO₃ 吸附 Li⁺的动力学参数

$ ho_{{ m L}i^+}$ /	$q_{\rm e}({\rm exp})/$	Pseudo-first-order			Pseudo-second-order		
$(mg \cdot L^{-1})$	$(mg \cdot g^{-1})$	k _{ad} /h	$q_{\rm e}/({\rm mg}\cdot{\rm g}^{-1})$	R	$k/(g \cdot mg^{-1} \cdot h^{-1})$	$q_{\rm e}/({\rm mg}\cdot{\rm g}^{-1})$	R
87.5	28.63	0.019 88	11.89	0.921 7	0.005 74	29.32	0.999 7
282.5	30.90	0.019 74	13.35	0.947 7	0.005 10	31.63	0.999 2

Table 1 Kinetic parameters for Li⁺ adsorption of H₂TiO₃ in solutions with different concentrations

2.3.3 吸附等温线

锂吸附剂对 Li⁺的吸附可以通过 Langmuir 吸附等 温方程和 Freundlich 吸附等温方程拟合^[16]:

$$\frac{\rho_{\rm e}}{q_{\rm e}} = \frac{1}{q_{\rm m}} \rho_e + \frac{1}{K_{\rm L} q_{\rm m}} \tag{6}$$

$$\lg q_{\rm e} = \frac{1}{n} \lg \rho_{\rm e} + \lg K_{\rm F} \tag{7}$$

式中: ρ_e 是吸附平衡后溶液中 Li⁺的浓度; q_e 是平衡 吸附容量; q_m 是最大吸附容量; K_L 为 Langmuir 实验 常数;n和 K_F 是与吸附容量和吸附速率有关的 Freundlich 常数。

分别用 Langmuir 吸附等温方程和 Freundlich 吸附 等温方程对吸附剂在不同浓度的 LiCl 溶液中平衡时 的平衡浓度和吸附容量进行拟合,结果如图 7 和表 2



图 7 Langmuir 和 Freundlich 等温线

Fig.7 Langmuir(a) and Freundlich(b) isotherms

表 2 吸附剂 H₂TiO₃吸附 Li⁺的等温吸附模型及参数

Table 2 Type and parameters of isothermal adsorption for Li^+ adsorption of H_2TiO_3

	Langmuir		Freundlich			
$q_{\rm m}/$ (mg·g ⁻¹)	$K_{\rm L}/$ (L·mg ⁻¹)	R	п	$K_{\rm F}$ / (L·g ⁻¹)	R	
37.01	0.153 33	0.998 4	25.322 9	28.535 1	0.881 4	

所示。从图 7 和表 2 可以看出:用 Langmuir 吸附等 温方程进行拟合的线性关系比 Freundlich 拟合的好, 线性相关系数达到 0.998 4。说明吸附剂对锂离子的吸 附为单层吸附,最大吸附容量为 37.01 mg/g。

3 结论

 以 TiO₂ (金红石相 TiO₂ 含量为 64.19%; 锐钛 相 TiO₂ 的含量为 35.81%)与 Li₂TiO₃ 为原料,采用固相 法可以合成单一晶相 Li₂TiO₃,经过盐酸洗脱 Li⁺,可 以得到锂吸附剂 H₂TiO₃,其中锂的抽出率达到 98.86%,钛的溶损小于 0.1%。

2)吸附实验证明锂吸附剂 H₂TiO₃ 对锂离子具有 较大的吸附能力,在 694 mg/L 的 LiOH 溶液中的平衡 吸附容量达到 39.8 mg/g。

3) 通过对吸附动力学的研究得出锂吸附剂 H₂TiO₃对LiCl溶液中Li⁺的吸附过程符合伪二级动力 学方程,表明吸附过程主要为化学吸附;在87.5 mg/L 和282.5 mg/L的LiCl溶液中平衡吸附容量分别为 29.32和31.63 mg/g;吸附速率常数分别为 0.005 74 和0.005 10 g/(mg·h)。

4) 通过对吸附等温方程的研究得出锂吸附剂 H₂TiO₃ 对 LiCl 溶液中 Li⁺的吸附过程符合 Langmuir 等温吸附,表明吸附过程为单层吸附,最大吸附容量 为 37.01 mg/g。

REFERENCES

[1] 陈 婷, 闫书一, 康自华. 我国盐湖卤水提锂的研究进展[J].
 盐业与化工, 2006, 36(2): 19-21.

- [2] 黄维农,孙之南,王学魁,乜贞,卜令忠. 盐湖提锂研究和 工业化进展[J]. 现代化工,2008,28(2):14-19.
 HUANG Wei-nong, SUN Zhi-nan, WANG Xue-kui, NIE Zhen, BU Ling-zhong. Progress in industrialization for lithium extraction from salt lake[J]. Modern Chemical Industry, 2008, 28(2): 14-19.
- [3] WANG Lu, MENG Chang-gong, MA Wei. Study on Li⁺ uptake by lithium ion-sieve via the pH technique[J]. Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2009, 334(1): 34–39.
- [4] ZHANG Qin-hui, SUN Shu-ying, LI Shao-peng, JIANG Hao, YU Jian-guo. Adsorption of lithium ions on novel nanocrystal MnO₂[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(18): 4869–4874.
- [5] WANG Lu, MA Wei, LIU Ru, LI Hai-yan, MENG Chang-gong. Correlation between Li⁺ adsorption capacity and the preparation conditions of spinel lithium manganese precursor[J]. Solid State Ionics, 2006, 177(17): 1421–1428.
- [6] 董殿权,张凤宝,张国亮,刘亦凡.Li4TisO12的合成及对Li+的 离子交换动力学[J].物理化学学报,2007,23(6):950-954.
 DONG Dian-quan, ZHANG Feng-bao, ZHANG Guo-liang, LIU Yi-fan. Synthesis of Li4TisO12 and its exchange kinetics with Li+[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2007, 23(6):950-954.
- [7] 钟辉. 偏钛酸型锂交换体制备、机理及其从液态锂矿提锂研究[D]. 成都:成都理工大学材料与化学化工学院,2004: 53-54.
 ZHONG Hui. Research on the preparation and mechanism of the

 H_2TiO_3 -type lithium exchanger and its application to the extraction of Li⁺ from the brine[D]. Chengdu: College of Materials and Chemistry and Chemical Engineering, Chengdu University of Technology, 2004: 53–54.

[8] 钟 辉. 偏钛酸型锂离子交换剂的交换性质及从气田卤水中 提锂[J]. 应用化学, 2000, 17(3): 307-309.

ZHONG Hui. Property of H2TiO3 type ion-exchangers and

extraction of lithium from brine of natural gas wells[J]. Applied Chemistry, 2000, 17(3): 307–309.

- [9] ZHANG Qing-hong, GAO Lian, GUO Jing-kun. Effects of calcination on the photocatalytic properties of namosized Tio₂ powers prepared by TiCl₄ hydrolysis[L]. Applied Catalysis B: Environmental, 2000, 26: 207–215.
- [10] 闫树旺, 钟辉, 周永兴. 二氧化钛吸附剂的研制及从卤水中 提锂[J]. 离子交换与吸附, 1992, 8(3): 222-228.
 YAN Shu-wang, ZHONG Hui, ZHOU Yong-xing. Study on ionic sieve of titanium oxide and lithium recovery from brines[J]. Ion Exchange and Adsorption, 1992, 8(3): 222-228.
- [11] 钟 辉, 殷辉安. 偏钛酸型离子交换剂表面性质与选择吸附性研究[J]. 离子交换与吸附, 2003, 19(1): 55-60.
 ZHONG Hui, YIN Hui-an. Study on the properties of the surface and absorb of Li⁺ ion-exchange of H₂TiO₃ type[J]. Ion Exchange and Adsorption, 2003, 19(1): 55-60.
- [12] ZHOU Li-min, WANG Yi-ping, LIU Zhi-rong, HUANG Qun-wu. Characteristics of equilibrium, kinetics studies for adsorption of Hg(II), Cu(II), and Ni(II) ions by thiourea-modified magnetic chitosan microspheres[J]. Hazardous Materials, 2009, 161(2): 995–1002.
- [13] BENHAMMOU A, YAACOUBI A, NIBOU L, TANOUTI B. Adsorption of metal ions onto Moroccan stevensite: Kinetic and isotherm studies[J]. Colloid and Interface Science, 2005, 282(2): 320–326.
- [14] BARKAT M, NIBOU D, CHEGROUCHE S, MELLAH A. Kinetics and thermodynamics studies of chromium(VI) ions adsorption onto activated carbon from aqueous solutions[J]. Chemical Engineering and Processing, 2009, 48(1): 38–47.
- [15] NAIYA T K, BHATTACHARYA A K, DAS S K. Removal of Cd(II) from aqueous solutions using clarified sludge[J]. Colloid and Interface Science, 2008, 325(1): 48–56.
- [16] WANG Lu, MENG Chang-gong, HAN Mei, MA Wei. Lithium uptake in fixed-pH solution by ion sieves[J]. Colloid and Interface Science, 2008, 325(1): 31–40.

(编辑 杨华)