

001×14.5 强酸性树脂对铬(III)的吸附性能

杨金杯¹, 韩淑萃², 余美琼¹, 邱挺³

- (1. 福建师范大学福清分校 生物与化学工程系, 福州 350300;
2. 福州大学 至诚学院, 福州 350002;
3. 福州大学 化学化工学院, 福州 350108)

摘 要: 采用离子交换树脂法吸附铬(III), 通过树脂选型确定强酸性阳离子交换树脂 001×14.5 对铬(III)吸附容量最大, 用所选的 001×14.5 树脂研究铬(III)的吸附性能。静态吸附实验表明: 转速大于 120 r/min 时, 对树脂吸附的影响可忽略, 即外扩散基本消除, pH=7.0 时, 吸附最佳, 铬(III)吸附率随树脂用量的增加而增大; 001×14.5 树脂吸附铬(III)的过程符合 Langmuir 等温曲线, 且为优惠吸附; 吸附过程符合拟二级动力学方程, 吸附过程的表观活化能 $E_a=23.4$ kJ/mol, 颗粒内扩散为吸附速率的主要控制步骤; 用 1 mol/L 的硫酸对吸附后的饱和树脂进行脱附再生, 脱附率可达 99%。

关键词: 离子交换树脂; 铬(III); 吸附; 热力学; 动力学

中图分类号: TQ028.3; O614.611

文献标志码: A

Adsorption behavior of 001×14.5 strong acidic resin for Cr(III)

YANG Jin-bei¹, HAN Shu-cui², YU Mei-qiong¹, QIU Ting³

- (1. Department of Biological and Chemical Engineering, Fuqing Branch of Fujian Normal University, Fuzhou 350300, China;
2. Zhicheng College, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China;
3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Using ion exchange resin to adsorb Cr(III), 001×14.5 strong acidic cation ion exchange resin shows the best capacity through the resin selection experiment. The adsorption properties of selected 001×14.5 resin for Cr(III) were studied, and the effects of various parameters, including stirring speed, resin dosage and solution pH were studied by static experiments. The results indicate that the effect of external diffusion is eliminated when the stirring speed is over 120 r/min, the better pH value is 7, the percent removal of Cr(III) increases with the resin dosage consumption increasing. The adsorption behavior of 001×14.5 for Cr(III) obeys the Langmuir isotherm, which is favourable adsorption. The adsorption of Cr(III) on this resin follows pseudo-second-order kinetic model, the apparent activation energy is 23.4 kJ/mol, the kinetics experiments show that the particle diffusion is the main limiting rate step. The saturated resin can be regenerated by 1 mol/L sulfuric acid, and the desorption rate reaches 99%.

Key words: ion exchange resin; Cr(III); adsorption; thermodynamics; kinetics

铬(III)是人体必需的微量元素之一, 可增强体内胆固醇的排泄、能辅助胰岛素利用葡萄糖, 同时对动

植物的生长有重要的作用^[1]。但铬(III)是一种重金属, 在体内有蓄积作用, 含量较高的铬(III)会对皮肤、呼

吸系统、消化系统及肝脏等都有损害作用。《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)将铬列为第一类污染物,其允许排放浓度 $\leq 1.5 \text{ mg/L}$ 。环境污染中的铬(III)主要来自制革、电镀、染料、颜料和有机合成等企业的污水排放,处理重金属污染常用的方法有化学沉淀法、溶剂萃取法、膜分离法和离子交换法等^[2-8]。

离子交换吸附法是一种被广泛应用的分离提取方法,所用树脂无毒、可反复再生使用,设备简单、易于自动化,生产过程产生的三废少,而且收率高,已成为化学工业废水治理的研究课题之一^[9-12]。为此,本文作者通过树脂筛选,选用 001×14.5 强酸性阳离子交换树脂系统地研究对铬(III)的吸附性能,通过静态实验测定振荡器转速、温度、pH 值和树脂用量对离子交换过程的影响,研究铬(III)在树脂上的吸附热力学和动力学行为,并确定反应级数、表观活化能、速度控制步骤,同时对树脂的再生进行实验,为离子交换法脱除废水中铬(III)的应用提供依据,有望应用于环境保护等领域。

1 实验

1.1 仪器与试剂

SHZ-22 水浴恒温振荡器(江苏省太仓市华美生化仪器厂生产);7200 型可见分光光度计(上海尤尼柯仪器有限公司生产);电子天平,粒度为 0.1 mg(北京赛多利斯仪器系统有限公司生产);精密水银玻璃温度计(分度 0.1 °C)。

硫酸、硝酸、丙酮、过硫酸铵、氯化铬、二苯碳酰二肼等试剂均为分析纯(国药集团化学试剂有限公司生产);离子交换树脂:D418(安徽三星树脂科技有限公司生产),001×14.5、D401、D001CC、D072、D061(南开大学化工厂生产),A-36(上海罗门哈斯化工有限公司生产,全称 Amberlyst-36WET)、KRS13(河北凯瑞化工有限公司生产)。

1.2 实验方法

1.2.1 树脂的预处理

将树脂用去离子水浸泡 24 h,充分溶胀后洗至水澄清无泡沫;用 4%(质量分数)盐酸溶液浸泡 24 h,排除酸液,用去离子水洗至中性;再用 2%(质量分数)NaOH 溶液浸泡 24 h,排除碱液,用去离子水洗至中性;最后用 4%(质量分数)HCl 溶液浸泡 24 h,排除酸液,用去离子水洗至中性(以上溶液的用量均为树脂

体积的 2~3 倍);将处理后的树脂浸泡于去离子水中,密封贮藏,待用。

1.2.2 静态吸附实验

准确称取一定质量预处理后的树脂置于 250 mL 锥形瓶中,加入不同浓度铬(III)溶液。在恒定的温度及振荡器转速下置于水浴恒温振荡器中振荡,间隔一定时间取样分析其浓度,并计算即时吸附量 q_t ,直至吸附达平衡,由下式计算即时吸附量 q_t 、平衡吸附量 q_e 和吸附率 x :

$$q_t = \sum_{j=1}^t \frac{(c_{t-1} - c_t) \times V_t}{m} \quad (1)$$

$$x = (c_0 - c_e) / c_0 \times 100\% \quad (2)$$

式中: q_t 为 t 时刻的树脂吸附量,mg/g; V_t 为 t 时刻的溶液体积, L; c_{t-1} 和 c_t 分别为 t 时间前一时刻和 t 时刻的铬(III)浓度, mg/L; m 为树脂质量, g; x 为铬(III)的吸附率, %; c_0 为铬(III)的起始浓度, mg/L; c_e 为铬(III)的平衡浓度, mg/L。

1.2.3 树脂脱附实验

将吸附饱和的树脂分出水相,用去离子水洗 2~3 次,在锥形瓶中加入一定量的脱附液,在恒定的温度及转速下置于水浴恒温振荡器中振荡,间隔一定时间取样分析其浓度,直至脱附达到平衡,计算脱附率。

1.3 分析方法

由于三价铬溶液浓度较低,不容易测定其浓度,目前较常用的方法是先将三价铬用过硫酸铵氧化为六价,在硫酸和磷酸体系下加入显色剂二苯碳酰二肼,后用分光光度计测定浓度^[13-14]。

2 结果与讨论

2.1 树脂的筛选

取各种预处理后的树脂 0.1 g 于 250 mL 锥形瓶中,加入 100 mg/L 的铬(III)溶液 100 mL,恒定温度 25 °C,转速为 120 r/min 条件下于恒温水浴振荡器内振荡 5 h,此时树脂已吸附饱和。分别取样分析,考察不同树脂的吸附能力,结果如表 1 所列。从表 1 可以看出,7 种树脂对铬(III)的平衡吸附量由大到小的顺序依次为 001×14.5、D001CC、D061、A-36、D072、KRS13、D418 和 D401。可见,001×14.5 树脂对铬(III)的平衡吸附量最大即吸附性能最好,因此,选用 001×14.5 强酸性阳离子交换树脂进行后续实验研究。

表 1 不同树脂平衡吸附量的比较

Resin type	D061	A-35	D001CC	KRS13	D401	D418	D072	001×14.5
$q_e/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	41.78	41.32	43.84	37.90	15.30	16.44	39.73	44.98

2.2 静态吸附条件

2.2.1 转速对吸附的影响

实验条件: 001×14.5 树脂 0.1 g, 浓度 100 mg/L 的铬(III)溶液 100 mL, 恒定温度 25.0 ℃, 恒温水浴振荡器转速分别为 60、120、180 r/min。间隔一定时间取样, 直到吸附达到平衡, 并计算树脂的吸附量 q_t , 其实验结果如图 1 所示。

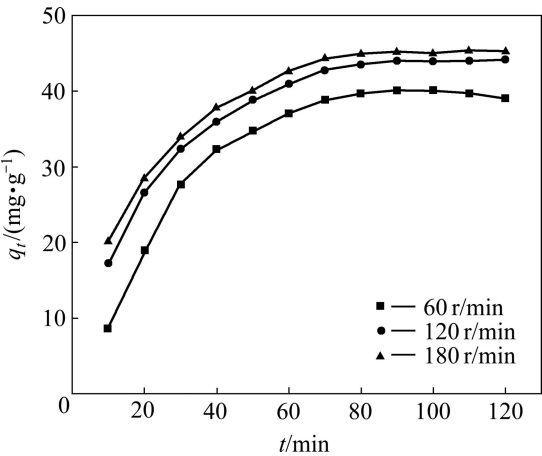


图 1 振荡器的转速对树脂吸附的影响
Fig. 1 Influence of stirring speed of oscillator on adsorption of resin

从图 1 可以看出, 反应初期, 铬(III)吸附速率随转速的增加而增大, 当转速达到 120 r/min 时, 转速对树脂吸附的影响可以忽略, 即外扩散基本消除。故后续实验均在转速为 120 r/min 下进行。

2.2.2 溶液 pH 值对吸附的影响

实验条件: 001×14.5 树脂 0.1 g, 恒定转速 120 r/min, 恒定温度 25 ℃, 浓度 100 mg/L 的铬(III)溶液 100 mL, 改变溶液的 pH 值进行实验, 直到吸附达到平衡, 计算树脂的平衡吸附量 q_e , 实验结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 001×14.5 树脂对铬(III)的吸附率随着 pH 值的增大而增加, 但 pH>7 时, 由于铬(III)会形成沉淀, 因此在中性条件下, 001×14.5 树脂对铬(III)的吸附最佳, 后续实验均在 pH=7 的条件下进行。

2.2.3 树脂用量对吸附的影响

实验条件: 浓度 100 mg/L 的铬(III)溶液 100 mL, 恒定转速 120 r/min, 恒定温度 25 ℃, 001×14.5 树脂分别称取 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 g 进行实验。间隔一定时间取样, 直到吸附达到平衡, 并计算树脂的平衡吸附率, 其实验结果如图 3 所示。

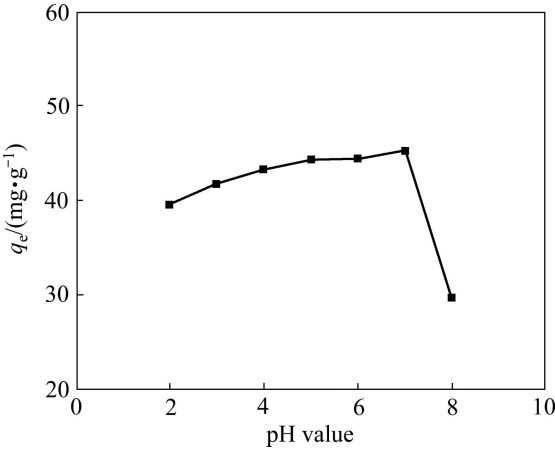


图 2 pH 值对树脂吸附的影响
Fig. 2 Influence of pH value on adsorption of resin

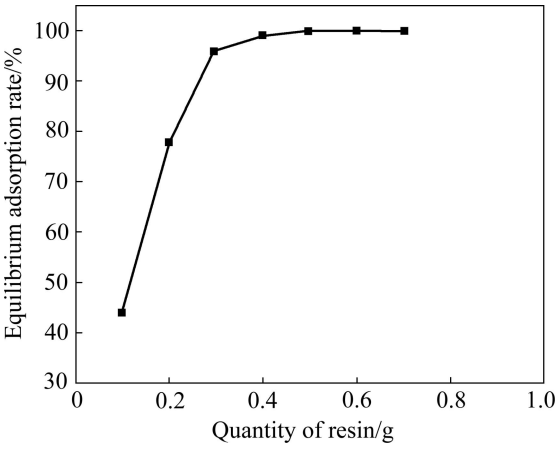


图 3 树脂用量对平衡吸附率的影响
Fig. 3 Influence of quantity of resin on equilibrium adsorption rate

从图 3 可以看出, 树脂的平衡吸附率随着树脂用量的增加而增大。结果表明, 对于 100 mL 浓度为 100 mg/L 的铬(III)溶液, 完全吸附铬(III)的最小树脂用量为 0.5 g, 即静态树脂饱和和吸附容量为 32 mg/g。从图中也可看出, 当树脂用量大于最佳树脂用量时, 随树脂用量的增加, 平衡吸附率几乎不变^[15]。对于给定初始金属离子浓度的溶液, 平衡时金属离子浓度明显地随着树脂用量的增加而减小, 这是因为对于给定初始浓度的溶液, 增加树脂用量可以提供更大的吸附表面积或吸附位^[16]。

2.3 铬(III)的等温吸附曲线

准确称取经预处理后的 001×14.5 树脂 0.1 g 于

250 mL 锥形瓶中, 分别加入浓度为 100 mg/L 的铬(III)溶液 75、125、175、225、275 mL, 在转速 120 r/min、温度 25 ℃条件下于恒温水浴振荡器内振荡至吸附平衡, 测定平衡浓度, 计算树脂的平衡吸附量 q_e 。分别用 Langmuir 方程(如式 3 所示)及 Freundlich 方程(如式 4 所示)对等温度下的吸附平衡数据进行拟合, 结果如表 2 所示。

$$\frac{c_e}{q_e} = \frac{c_e}{q_m} + \frac{1}{q_m K_L}$$

(3)

$$\lg q_e = \frac{1}{n} c_e + \lg K_F$$

(4)

式中: c_e 为吸附平衡时铬(III)浓度, mg/L; q_m 为完全单分子层饱和吸附量, mg/g; K_L 为 Langmuir 等温方程常数, 代表树脂的相对吸附能力, L/mg; K_F 、 n 为等温吸附特征常数。由表 2 可见, Langmuir 方程式的回归相关系数要大于 Freundlich 方程式的回归相关系数, 证明 001×14.5 树脂吸附铬(III)过程遵循 Langmuir 吸附等温方程, 且回归所得到的参数 q_m 和 K_L 是较可信的, Langmuir 吸附等温曲线如图 4 所示。这表明树脂对 铬(III)的吸附主要为单分子层吸附, 在实验浓度范围内, Langmuir 等温方程常数 $K_L > 0$, 说明该吸附是优惠吸附^[17]。

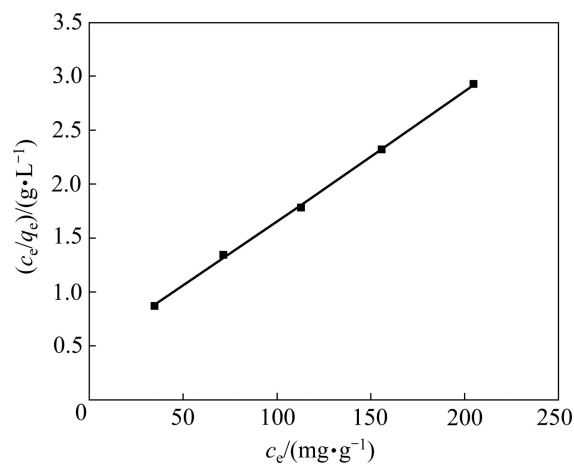


图 4 25 ℃时铬(III)的 Langmuir 等温吸附曲线
Fig. 4 Langmuir isotherm adsorption curve of Cr(III) at 25 ℃

表 2 等温吸附模型拟合参数

Table 2 Correlated parameters of isotherm adsorption model

Adsorption equation	Expression	R^2	$K_L/(L \cdot mg^{-1})$	$q_m/(mg \cdot g^{-1})$
Langmuir	$c_e/q_e=0.012\ 0\ c_e+0.452\ 6$	0.999 2	0.026 5	83.3
Freundlich	$\lg q_e=3.032\ 3\lg c_e-7.713\ 2$	0.972 8		

2.4 铬(III)的吸附动力学

2.4.1 反应级数的确定

准确称取 001×14.5 树脂 0.1 g 于 250 mL 锥形瓶中, 加入浓度为 100 mg/L 的铬(III)溶液 100 mL, 在转速 120 r/min, 恒温水浴振荡器温度分别为 25、35、45 ℃的条件下。间隔一定时间取样, 直到吸附达到平衡, 计算树脂的吸附量 q_t 。通常情况下, 吸附过程可以用拟一级反应动力学模型(如式 5 所示)或拟二级反应动力学模型(如式 6 所示)来描述^[18]。

$$\ln(1 - q_t / q_e) = -k_1 t$$

(5)

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

(6)

式中: k_1 为拟一级速率常数, min⁻¹; k_2 为拟二级速率常数, g/(mg·min)⁻¹。

分别采用拟一级动力学模型和拟二级动力学模型对测得的动力学数据进行拟合, 拟合曲线如图 5 和 6 所示, 相关参数如表 3 所示。

由图 5、6 和表 3 可以看出, 001×14.5 树脂吸附铬(III)的动力学数据更符合拟二级动力学模型。表 3 中拟二级动力学模型的相关系数 R^2 均大于 0.993 3, 进一步说明拟二级动力学模型能很好地描述实验条件下铬(III)在 001×14.5 树脂上的吸附过程。 k_2 随着温度

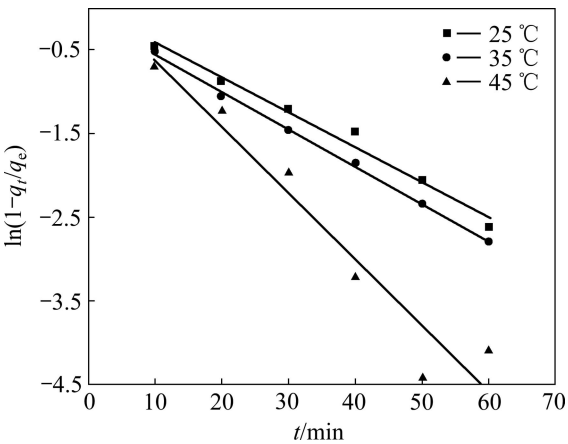


图 5 铬(III)吸附的拟一级动力学模型
Fig. 5 Pseudo-first-order kinetic models for adsorption of Cr(III)

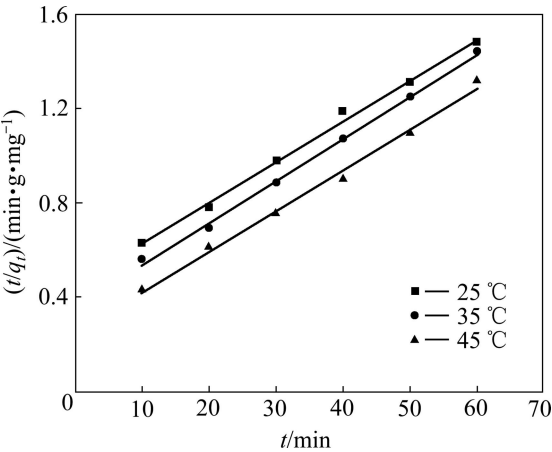


图 6 铬(III)吸附的拟二级动力学模型

Fig. 6 Pseudo-second-order kinetic model for adsorption of Cr(III)

表 3 不同温度下铬(III)的吸附速率常数及相关系数

Table 3 Adsorption kinetics parameters for absorption of Cr(III) at various temperatures

Temperature/ °C	Pseudo-first-order kinetic model		Pseudo-second-order kinetic model	
	k_1/min^{-1}	R^2	$k_2/(\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1})$	R^2
25	0.041 8	0.981 9	6.59×10^{-4}	0.995 7
35	0.044 6	0.998 1	8.99×10^{-4}	0.997 5
45	0.079 4	0.934 0	1.19×10^{-3}	0.993 3

的升高而增大,这是因为随着温度的升高,铬(III)的扩散速率加快,从而使吸附速率常数增大。

以 $\ln k_2$ 对 $1/T$ 作图,如图 7 所示。从图 7 中可以看出, $\ln k_2$ 对 $1/T$ 呈较好的线性关系,斜率为 $-2\,809.9$,

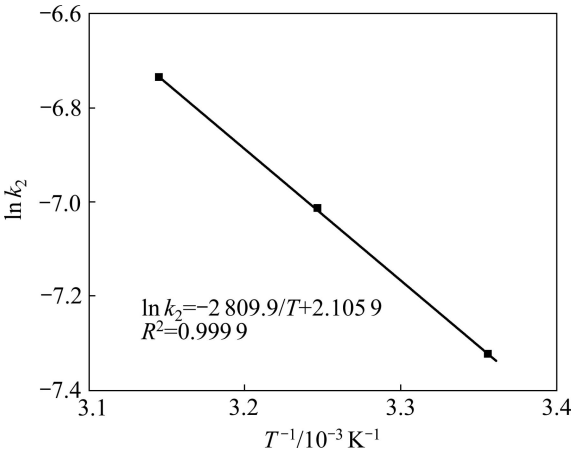


图 7 铬(III)的吸附表观活化能的测定

Fig.7 Determination of adsorption apparent activation energy of Cr(III)

截距为 2.105 9, 相关系数 $R^2=0.999\,9$ 。根据阿累尼乌斯方程 $k_2 = A\exp[-E/(RT)]$ 可求得 001×14.5 树脂吸附铬(III)的表观活化能 $E_a=23.4\,\text{kJ/mol}$ 。

2.4.2 吸附速率控制步骤的确定

离子交换树脂从液体中吸附物质的速率通常受到液膜扩散、颗粒内扩散和化学反应 3 个步骤的影响。由于化学反应较快,不会成为吸附速率的控制步骤,因此,本体系的速率控制步骤可能是液膜扩散或颗粒内扩散,也可能是两者共同控制^[19]。当吸附速率为液膜扩散控制时(模型如式(7)所示), F 与 t 呈直线关系;当吸附速率为颗粒内扩散控制时(模型如式(8)所示), $[3-3(1-F)^{2/3}-2F]$ 与 t 呈直线关系。将动力学部分实验数据分别以 F 对 t 、 $[3-3(1-F)^{2/3}-2F]$ 对 t 进行直线拟合,结果如图 8 和 9 所示。

$$F = -k_3t \tag{7}$$

$$[3-3(1-F)^{2/3}-2F] = k_4t \tag{8}$$

式中: $F=q_t/q_e$ 为离子交换率; t 为时间, min; k_3 为液膜扩散速率常数, min^{-1} ; k_4 为颗粒内扩散速率常数, min^{-1} 。

由图 8 和 9 可以看出,各温度下 $F-t$ 不呈线性关系,说明液膜扩散并非 001×14.5 树脂吸附铬(III)过程的控制步骤。各温度下 $[3-3(1-F)^{2/3}-2F]-t$ 均呈良好的线性关系,相关系数 R^2 在 0.99 左右,表明铬(III)离子交换过程的速率控制步骤为颗粒内扩散控制。温度升高,离子的扩散速率和离子反应速率均提高,从而加快整个过程的交换速率。

2.5 树脂再生实验

001×14.5 树脂是强酸性阳离子交换树脂,其功能基团是磺酸基($-\text{SO}_3\text{H}$),选用 1 mol/L 的硫酸在

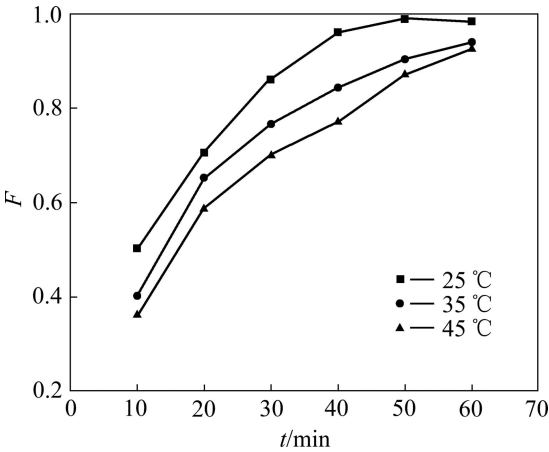


图 8 液膜扩散拟合曲线

Fig.8 Correlated curves of liquid film diffusion

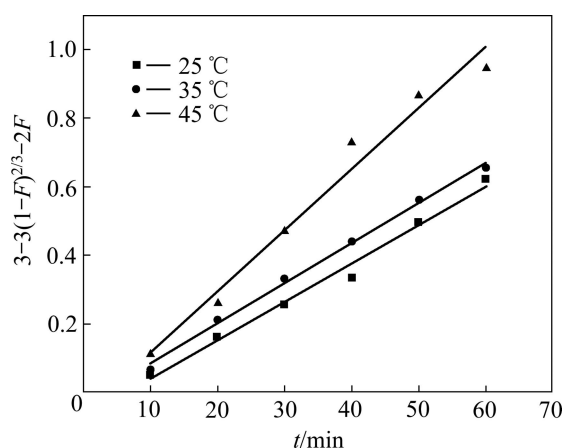


图9 颗粒内扩散拟合曲线

Fig.9 Correlated curves of intraparticle diffusion of particles

25 °C 的温度下对其进行脱附再生实验。实验结果表明, 树脂的脱附率可以达到 99%。因此, 可选用硫酸对已吸附饱和的 001×14.5 树脂进行脱附, 并可实现对铬(III)的富集和回收。

3 结论

1) 在所选的 001×14.5、D001CC、D061、A-36、D072、KRS13、D418 和 D401 离子交换树脂中, 001×14.5 树脂对铬(III)的吸附容量最大, 可作为铬(III)回收的分离介质。

2) 静态吸附实验表明, 当转速大于 120 r/min 时, 转速对树脂吸附的影响可忽略, 即外扩散基本消除; pH=7.0 时吸附最佳, 铬(III)吸附率随树脂用量的增加而增大。脱附实验表明, 用 1 mol/L 的硫酸对饱和树脂进行脱附再生, 脱附率达到 99%。

3) 001×14.5 树脂吸附铬(III)的过程符合 Langmuir 等温曲线, 且吸附主要为单分子层的优惠吸附。

4) 吸附动力学研究表明, 铬(III)在 001×14.5 树脂上的吸附符合拟二级动力学方程, 吸附过程的表现活化能 $E_a=23.4$ kJ/mol, 吸附过程由颗粒内扩散控制。

REFERENCES

[1] 范建凤, 宋美蓉. 腐植酸及其树脂对水中三价铬吸附性能的研究[J]. 电镀与精饰, 2010, 32(2): 4-7.
FAN Jian-feng, SONG Mei-rong. Study on the adsorption properties of humic acid and its resin for Cr(III)[J]. Plating and

Finishing, 2010, 32(2): 4-7.

- [2] 裴东波, 卢志强, 仇沛崧, 元学梅, 薛军, 王琳. 还原沉淀法处理含铬废水[J]. 城市环境与城市生态, 2006, 19(2): 25-26.
PEI Dong-bo, LU Zhi-qiang, KANG Pei-song, QI Xue-mei, XUE Jun, WANG Lin. Treatment of dichromate-containing wastewater with deoxidization & deposition method[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2006, 19(2): 25-26.
- [3] WIONCZYK B, APOSTOLUK W. Solvent extraction of Cr(III) from alkaline media with quaternary ammonium compounds[J]. Hydrometallurgy, 2004, 72(3/4): 195-203.
- [4] 梁志冉, 涂勇, 田爱军, 白永刚. 离子交换树脂及其在废水处理中的应用[J]. 污染防治技术, 2006, 19(3): 34-36.
LIANG Zhi-ran, TU Yong, TIAN Ai-jun, BAI Yong-gang. Ion-exchange resin and its application to wastewater treatment[J]. Pollution Control Technology, 2006, 19(3): 34-36.
- [5] TAYEB R, ZAGHBANI A, TINGRY S, SETA P, DHAHBI M. Carrier-mediated transport of Cr(III) across Lasalocid A-NPOE supported liquid membrane[J]. Desalination, 2007, 204(1/3): 234-240.
- [6] 范娟, 詹怀宇. 木素磺酸盐树脂对六价铬的吸附实验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2009, 36(10): 59-62.
FAN Juan, ZHAN Huai-yu. Adsorption of hexavalent chromium on lignosulphonates resin[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(10): 59-62.
- [7] JIAN Hua-chen, GUO Ping-li, QING Lin-liu, JIAN Cong-ni, WEN Bing-nu, JIN Mei-lin. Cr(III) ionic imprinted polyvinyl alcohol/sodium alginate (PVA/SA) porous composite membranes for selective adsorption of Cr(III) ions[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 165(2): 465-473.
- [8] FETHIYE G, EROL P. Sorption of Cr(III) onto chelating b-DAEG-sporopollenin and CEP-sporopollenin resins[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(4): 904-911.
- [9] JUANG Ruey-shin, LIN Su-hsia, WANG Tsung-yuan. Removal of metal ions from the complexed solutions in fixed bed using a strong-acid ion exchange resin[J]. Chemosphere, 2003, 53(10): 1221-1228.
- [10] RENGARAJ S, YEON K H, KANG S Y, LEE J U, KIM K W, MOON S H. Studies on adsorptive removal of Co(II), Cr(III) and Ni(II) by IRN77 cation-exchange resin[J]. Journal of Hazardous Materials, 2002, 92(2): 185-198.
- [11] IBRAHIM N, YAVUZ S, MUSTAFA S, MEHMET D. Speciation of Cr(III) and Cr(VI) in environmental samples by solid phase extraction on Amborsorb 563 resin[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 136(3): 579-584.
- [12] HASSANIEN M M, KENAWY I M, EI-MENSHAWY A M, EI-ASMY A A. A novel method for speciation of Cr(III) and Cr(VI) and individual determination using Duolite C20 modified with active hydrazone[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008,

- 158(1): 170–176.
- [13] 郭崇武, 王吉民. 镀铬溶液中六价铬和三价铬的快速测定[J]. 电镀与精饰, 2006, 28(4): 50–52.
- GUO Chong-wu, WANG Ji-min. Quick determination of hexavalent chromium & trivalent chromium in chromium electroplating bath[J]. Plating and Finishing, 2006, 28(4): 50–52.
- [14] 张 慧. 分光光度法测定铬的改进[J]. 宁波大学学报: 理工版, 2002, 15(2): 42–44.
- ZHANG Hui. Improvement on the spectrophotometric method to determine chromium[J]. Journal of Ningbo University: Natural Science & Engineering Edition, 2002, 15(2): 42–44.
- [15] NAMASIVAYAM C, RANGANATHAN K. Removal of Cd(II) from wastewater by adsorption on “waste” Fe(III)/Cr(III) hydroxide[J]. Water Research, 1995, 29(7): 1737–1744.
- [16] HO Y S, JOHN W D A, FORSTER C F. Batch nickel removal from aqueous solution by Sphagnum moss peat[J]. Water Research, 1995, 29(5): 1327–1332.
- [17] 孟冠华, 刘宝河, 郑 俊, 李爱民. 水杨酸修饰聚苯乙烯对 Pb²⁺和 Cu²⁺的吸附[J]. 应用化学, 2009, 26(2): 219–223.
- MENG Guan-hua, LIU Bao-he, ZHENG Jun, LI Ai-min. Adsorption properties of salicylic acid modified polystyrene toward lead(II) and copper(II) ions[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2009, 26(2): 219–223.
- [18] REDDAD Z, GERENTE C, ANDRES Y. Adsorption of several metal ions onto a low-cost biosorbent: Kinetic and equilibrium studies[J]. Environmental Science and Technology, 2002, 36(9): 2067–2073.
- [19] 北川浩, 铃木谦一郎. 吸附的基础与设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 1983: 51–55.
- KITAGAWA H, SUZUKI M I. Adsorption of foundation and design[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1983: 51–53.
- (编辑 李艳红)