

201×7 阴离子交换树脂对低浓度铂的吸附性能

赵德鹏, 杨瑞四, 邹安琴, 王世雄, 郭 洪, 杨项军*

(云南大学 化学科学与工程学院, 昆明 650091)

摘 要: 研究了用 201×7 强碱性阴离子交换树脂对氯化浸出液中低浓度铂的吸附性能, 考察了树脂用量、吸附时间、pH 值、反应温度等因素对树脂吸附铂的影响。实验结果表明, pH=1.0 时树脂的吸附效果最佳, 静态饱和吸附容量可达到 190 mg Pt/g 干树脂, 铂在 201×7 树脂上的吸附是吸热反应, 温度升高有利于铂的吸附, 吸附反应焓变 $\Delta H=36.72$ kJ/mol, 熵变为 $\Delta S=0.190$ kJ/(mol·K)。对 201×7 树脂吸附铂的吸附等温模型及动力学进行了分析, 结果表明, 吸附平衡过程符合 Langmuir 等温式, 且为优惠吸附; 铂的吸附过程符合准二级动力学方程, 准二级常数为 $k_2=1.58\times 10^{-4}$ g/(mg·min)。用 2.4 mol/L 的高氯酸可将载铂树脂中的铂洗脱, 洗脱率为 83%。

关键词: 物理化学; 阴离子交换树脂; 铂; 吸附; 动力学; 热力学

中图分类号: TF804.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2014)02-0043-07

Adsorption of Low Concentration Platinum from Chloride Leaching Solution with 201×7 Ion-exchange Resin

ZHAO Depeng, YANG Ruisi, ZOU Anqin, WANG Shixiong, GUO Hong, YANG Xiangjun*

(School of Chemical Science and Technology, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: The adsorption behaviors of PtCl_6^{2-} from chloride leaching solutions with 201×7 ion-exchange resin were investigated. The influences of various factors on the adsorption of PtCl_6^{2-} were studied, including resin dosage, contact time, initial pH of the solution, reaction temperature and solution flow rate. The results showed that maximum adsorption capacity was 190.0 mg Pt/g resin at pH 1.0. The adsorption of PtCl_6^{2-} on 201×7 resin fitted the Langmuir isotherm better than the Freundlich isotherm. The thermodynamic parameters of ΔS and ΔH were 0.190 kJ/(mol·K) and 36.72 kJ/mol, respectively. It indicated that this adsorption process was endothermic in nature. The kinetic data of adsorption fitted well to the pseudo-second-order model, and the kinetic parameters k_2 was 1.58×10^{-4} g/(mg·min). The Pt loaded on the resin could be effectively eluted with 2.4 mol/L perchloric acid solution, and the elution percentage was 83%.

Key words: physical chemistry; anion-exchange resin; platinum; adsorption; kinetics; thermodynamics

我国铂族金属矿产资源储量稀少, 全国已探明的金属储量为 350 t 左右, 仅占世界总储量的 0.4%, 其中 60% 以上存储在硫化铜镍矿中, 属伴生资源。甘肃金川硫化铜镍矿中伴有铂族金属, 但金川铂族金属年产量仅约 2 t, 只能满足国内总需求的 3%^[1]。因此, 难处理低品位铂族金属矿石已逐渐引起人们

的重视。云南金宝山矿是我国仅次于金川的铂族金属资源^[2-3], 探明的 Pt+Pd 金属储量为 45.246 t, 但金宝山原生铂矿中铂族金属品位偏低(Pt+Pd 平均品位仅 1.4555 g/t), 铜、镍等有价值共生贱金属含量也较低(Cu 为 0.103%, Ni 为 0.193%), 而且铂族矿物种类繁多, 嵌布粒度极细, 连生嵌布关系复杂, 属

收稿日期: 2013-10-16

基金项目: 国家“973”计划项目 (2014CB643406)、国家自然科学基金-云南联合基金(U0937601)、国家 863 基金(2011AA03A405)。

第一作者: 赵德鹏, 男, 硕士研究生, 研究方向: 有色金属冶金。E-mail: gnft@ynu.edu.cn

*通讯作者: 杨项军, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 有色金属冶金。E-mail: yxjun@ynu.edu.cn

典型的贫、杂、难多金属共生硫化矿，综合回收难度较大。

本课题组经过多年的研究^[4-6]，逐步形成了浮选精矿→加压氧化酸浸→常压氯化全湿法提取金宝山铂族金属的新型工艺，该工艺高效、清洁、流程短，优于传统的火法工艺。研究中发现，云南金宝山低品位原生铂钯硫化矿浮选精矿经加压氧化酸浸预处理后的氯化浸出液中铂族金属含量极低(10^{-6} 级)，且贱金属含量多，从溶液中提取铂族金属具有一定的困难。氯化铵沉淀法和锌粉置换法是提取铂族金属的传统方法，但均存在步骤冗长、效率低、周期长、贵金属直收率低等缺点，且在铂族金属浓度极低的条件下，2种方法均难以奏效。当铂族金属浓度较高(达 g/L 级)、贱金属含量较低时，溶剂萃取法是铂族金属精炼分离的优良方法，但在铂族金属浓度极低的情况下，势必需在大相比条件下进行萃取操作，因此萃取剂用量大、效率低、萃取过程中有机相损失大的问题尤为突出。

在酸性条件下，氯离子和铂能够形成稳定的配阴离子 $[\text{PtCl}_6]^{2-}$ ，而大部分贱金属与氯配合能力很弱，在溶液中呈阳离子状态存在，因此铂能与碱性阴离子树脂进行交换，从而达到和贱金属离子分离的目的^[7]。阴离子交换树脂法不使用有机溶剂，对铂族金属选择性强，即使呈氯配阴离子状态的微量铂族金属亦能被有效地吸附提取，而且 pH 适用范围广。201×7 强碱性阴离子交换树脂是以苯乙烯和二乙烯苯共聚物为基体的季铵型阴离子交换树脂，具有碱性强、机械强度好、耐热性能高等优点。因此，本文选用国产 201×7 阴离子交换树脂对金宝山加压酸浸预处理矿的常压氯化溶液中低浓度铂进行了分离，系统研究了其吸附性能，并取得了较满意的结果，对工业生产具有一定的参考价值。

1 实验

1.1 实验材料及仪器

1.1.1 试剂

201×7 树脂由天津南开和成科技有限公司提供。使用前先用 5% 的 HCl 溶液浸泡树脂 8 h，用去离子水洗至中性后，再用 2% NaOH 溶液浸泡 8 h，最后用去离子水洗至中性备用。

金宝山加压酸浸预处理矿的常压氯化溶液，pH 为 0.23，组成如表 1 所示；浓度为 1.0 g/L 的铂标准溶液；高氯酸，分析纯。

表1 含铂氯化液组成

Tab.1 Typical composition of the chloride leaching solution

成分	Pt	Pd	Fe	Cu	Ni	Co
含量/(mg/L)	4.5	6.2	14.6	2.3	1.6	0.3

1.1.2 仪器

梅特勒(FE20 型)精密酸度计；国华 CHA-S 控温调速振荡器；日立 Z2000 原子吸收分光光度计(火焰和石墨炉)；动态吸附采用的是内径为 10 mm，高度为 1.0 m 玻璃柱。

1.2 实验方法

1.2.1 静态吸附实验

将一定量处理过的 201×7 树脂与一定体积的含铂溶液于锥形瓶中振荡一定时间后，用原子吸收分光光度计测定吸残液中铂的浓度。

固液分配系数^[8] K_D 和吸附率 E 的计算公式：

$$K_D = \frac{C_0 - C_e}{C_e} \times \frac{V}{m} \quad (1)$$

$$E\% = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中： C_0 —溶液中金属离子的起始浓度，mg/L； C_e —溶液中金属离子的平衡浓度，mg/L； V —溶液的体积，mL； m —树脂的重量，g。

1.2.2 动态吸附实验

称取 1.0 g 处理过的 201×7 树脂装于 $\Phi 10$ mm 的玻璃柱中(湿法装柱)，用 100 mg/L 的铂溶液以 2.0 mL/min 流速过柱，每 100 mL 收集一次并用原子吸收分光光度计测定收集液中铂的含量。

1.2.3 载铂树脂的洗脱

采用静态方法，用 2.4 mol/L 高氯酸溶液来洗脱载铂树脂上的铂，用原子吸收分光光度计测定洗脱液中铂的含量。

2 结果与讨论

2.1 静态吸附

2.1.1 201×7 树脂用量对铂吸附率的影响

分别称取不同量的 201×7 树脂于装有 100 mL 含铂氯化液的锥形瓶中振荡 8 h 后，分析溶液中铂的残留量，图 1 给出了树脂量对铂吸附率的影响。由图 1 可以看出，随着树脂用量的增加，铂吸附率也随之增加，当树脂量达到 0.5 g 时，铂的吸附率即可达到 96%，但当树脂用量从 0.5 g 增加至 1.0 g 时，铂吸附率(E)提高较小。因此，在后续实验中选择树脂量与氯化液体积之比为 1 g : 200 mL。

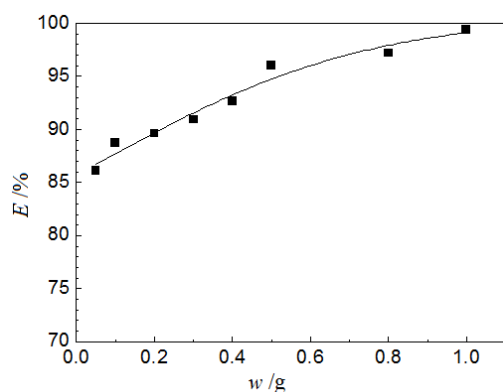


图1 201×7 树脂用量对铂吸附率的影响

Fig.1 Effect of 201×7 resin quantity on the adsorption of Pt

2.1.2 吸附时间对铂吸附率的影响

取 0.5 g 树脂于 100 mL 含铂氯化液中, 考察了吸附时间对铂吸附率的影响, 结果如图 2 所示。

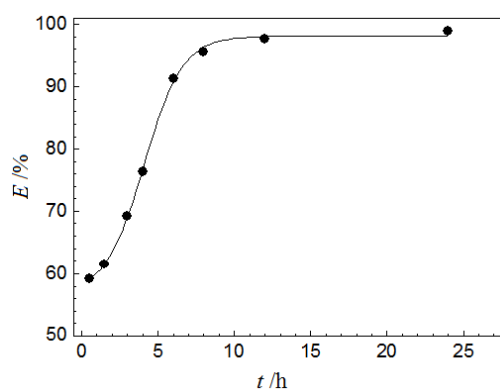


图2 吸附时间对铂吸附率的影响

Fig.2 Effect of reaction time on the adsorption of Pt

由图 2 可以看出, 随着树脂与氯化液接触时间的增加, 铂的吸附率逐渐增加。但当吸附时间达到 12 h 时, 再增加树脂与铂溶液的接触时间, 树脂对铂的吸附趋于平衡, 此时 97.55% 以上的铂可被树脂吸附。

2.1.3 pH 值对铂吸附率的影响

分别称取 0.5 g 树脂于 100 mL 含铂氯化液中, 用氢氧化钠溶液调节 pH 值在 1.0~4.0 内变化, 考察 pH 值对铂吸附率的影响, 结果如图 3 所示。由图 3 可以看出, pH 值为 1.0 时树脂对铂的吸附率最大, 达到 98%, 随着 pH 值的增加, 树脂对铂的吸附率略有降低。下降的原因与 201×7 阴离子交换树脂吸附铂的机理有关, 随着 pH 值的增加, $[\text{PtCl}_6]^{2-}$ 稳定性降低^[9], 阴离子含量减少, 因此树脂对铂的吸附

率降低。但从图中可以看出, 当 pH 值为 0.5 时, 树脂对铂的吸附率亦略有下降, 其原因可能是由于氯离子与 $[\text{PtCl}_6]^{2-}$ 构成竞争吸附造成的。

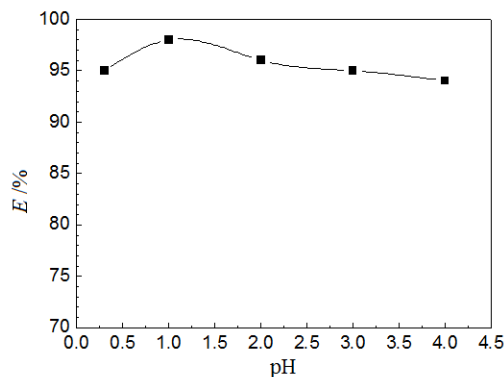
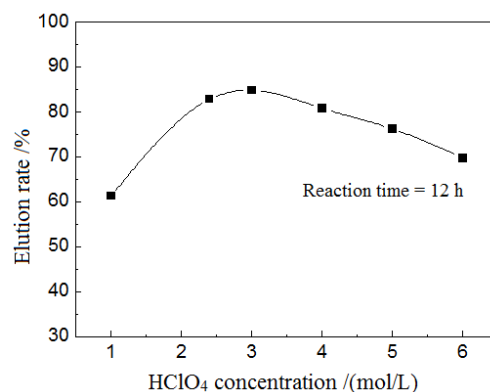


图3 pH 值对铂吸附率的影响

Fig.3 Effect of pH on the adsorption of Pt

2.1.4 HClO₄ 洗脱树脂中的铂

理论上讲, ClO_4^- 离子可与阴离子树脂中的 $[\text{PtCl}_6]^{2-}$ 离子发生交换反应, 因而可用 HClO_4 溶液对载铂 201×7 树脂进行洗脱。图 4 给出了 HClO_4 浓度对铂洗脱率的影响。

图4 HClO₄ 浓度对铂洗脱率的影响Fig.4 Effect of HClO₄ concentration on the elution of Pt

从图 4 可以看出, HClO_4 浓度在 1.0~6.0 mol/L 范围内时, 铂的洗脱率随着 HClO_4 浓度的增大而增加。当 HClO_4 浓度为 3.0 mol/L 时铂的吸附率达到最大, 85% 的铂可被洗脱; 当 HClO_4 浓度大于 3.0 mol/L 后, 铂的洗脱率反而有所下降。综合考虑, 选择洗脱剂 HClO_4 的浓度为 2.4 mol/L 较为合理, Pt 的洗脱率可达到 83%。

图 5 给出了洗脱时间对铂洗脱率的影响。

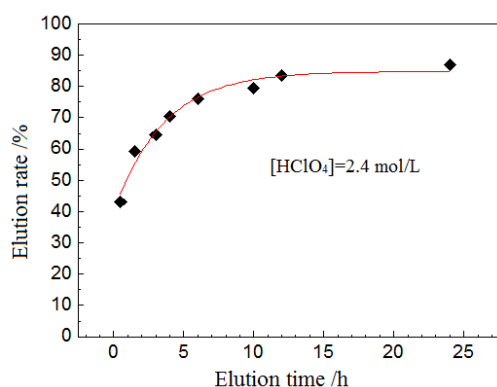


图 5 洗脱时间对铂洗脱率的影响

Fig.5 Effect of reaction time on the elution of Pt

由图 5 可以看出洗脱时间为 12 h 时, Pt 的洗脱率可达到 83%, 再增加洗脱时间, 铂洗脱率变化不明显。

2.2 动态吸附

2.2.1 流速对铂吸附率的影响

按动态法, 将 100 mL 金宝山氯化溶液分别以 0.5~10.0 mL/min 的流速通过装有 1.0 g 阴离子交换树脂的柱子, 收集过柱后的残液, 测定残液中铂的浓度。流速对铂吸附率的影响如图 6 所示。

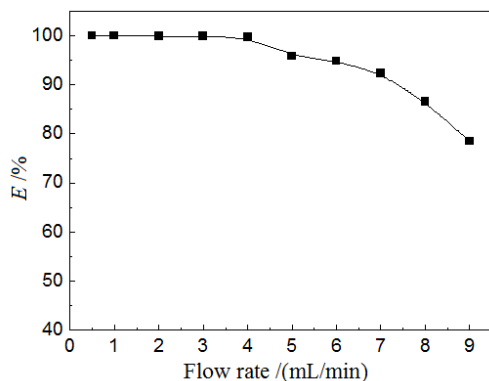


图 6 过柱流速对 Pt 吸附率的影响

Fig.6 Effect of flow rate on the adsorption of Pt

从图 6 可以看出, 随着过柱流速增加, 201×7 阴离子交换树脂对铂的吸附率有所下降。但当流速在 0.5~4.0 mL/min 时, 流速对铂吸附率影响很小, 吸附率均大于 99%, 所以过柱流速控制在 4.0 mL/min 以下较为合适。

2.2.2 201×7 树脂动态饱和吸附容量的测定

称取 2.0 g 201×7 阴离子交换树脂装于 Φ10 mm 的玻璃柱中, 将氯化浸出液以 2.0 mL/min 的流速过

柱, 每 100 mL 收集一次, 测定收集溶液的浓度, 所得结果如图 7 曲线 a 所示。可以看出, 即使过柱体积达到 3500 mL, 树脂对铂的吸附率仍然大于 95%, 说明树脂对铂有很高的动态吸附效率。由于实际氯化液中铂含量很低, 不易测出树脂对铂的动态吸附容量, 因此我们还用 200 mg/L 的纯铂标准溶液进行了相似的实验, 结果如图 7 曲线 b 所示, 可以看出, 当过柱溶液体积达到 2000 mL 时, 树脂对铂的吸附率降低至 32.5%, 此时树脂上吸附的铂量已接近 169 mg/g (Pt / g 干树脂), 可知 201×7 树脂对铂具有较高的吸附容量。

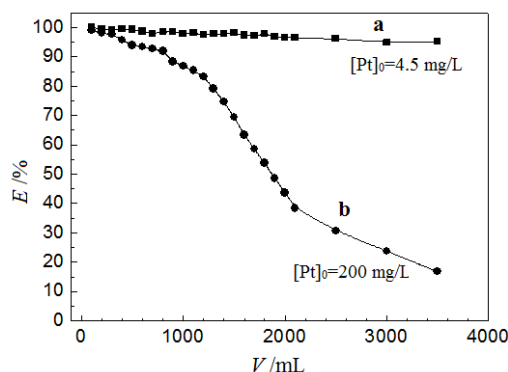


图 7 过柱体积对 Pt 吸附率的影响

Fig.7 Effect of volumes on the adsorption of Pt

2.3 201×7 树脂吸附铂的动力学和热力学分析

2.3.1 等温吸附曲线

Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型是常见的吸附等温模型^[10-11], Langmuir 模型如方程式(3), Freundlich 模型如方程式(4)所示:

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{C_e}{Q_m} + \frac{1}{Q_m K_L} \quad (3)$$

$$\lg Q_e = \frac{1}{n} \lg C_e + \lg K_F \quad (4)$$

式中: C_e 为平衡浓度, mg/L; Q_e 为吸附平衡后树脂的吸附量, mg/g; 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; n 、 K_F 为 Freundlich 常数, n 值为吸附强度的系数, K_F 值体现了吸附剂的活性。

分别将 0.05 g 201×7 阴离子交换树脂与 50 mL 不同浓度的纯 $[PtCl_6]^{2-}$ 溶液于 25℃ 振荡反应 3 h 后, 测定铂的平衡浓度, 计算树脂的平衡吸附量 Q_e 。用式(3)和(4)对等温度下铂的吸附平衡数据进行拟合, 结果见图 8, 模型参数和相关系数列于表 2。

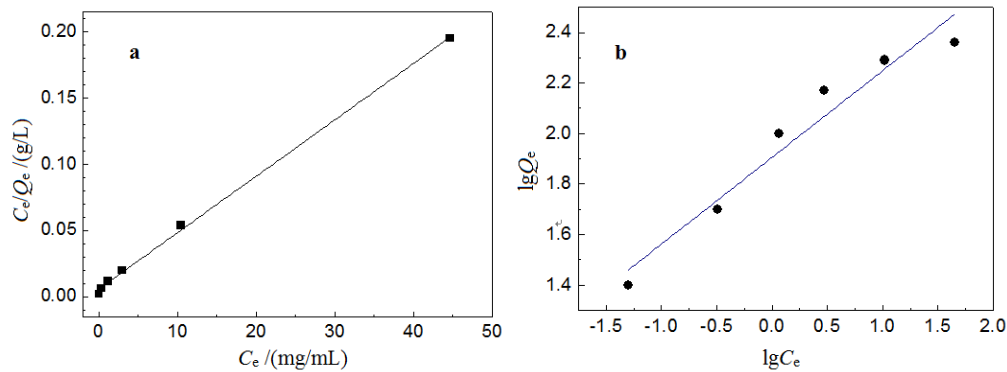


图8 201×7阴离子交换树脂对铂吸附的Langmuir (a)和Freundlich (b)等温模型拟合结果

Fig.8 Langmuir (a) and Freundlich(b) isotherm adsorption curves of Pt at 25°C

表 2 201×7 树脂吸附铂的 Langmuir 及 Freundlich 等温方程拟合参数和相关系数(25℃)

Tab.2 Langmuir and Freundlich isotherm constants and correlation coefficient for adsorption of Pt on 201×7 resin at 25°C

Langmuir model			Freundlich model		
Q_m /(mg/g)	K_L /(L/mg)	R^2	K_F /(mg/g)	n	R^2
235.294	0.728988	0.99855	80.5137	2.9172	0.93727

由表 2 可见，Freundlich 等温吸附模型拟合并不理想，回归相关系数远远小于 Langmuir 模型，说明 201×7 阴离子交换树脂对铂的吸附属于单分子层吸附，吸附过程遵循 Langmuir 吸附等温方程，且回归所得到的参数 Q_m 和 K_L 可信度较高，表明 Pt 较易被树脂吸附，属于优惠吸附^[12]。

2.3.2 201×7 阴离子交换树脂吸附铂动力学

准确称取 201×7 阴离子交换树脂 0.02 g 于 200 mL 锥形瓶中，加入 100 mL 浓度为 500 mg/L 的 $[PtCl_6]^{2-}$ 溶液，室温下振荡反应，间隔一定时间取样分析，计算树脂的吸附量 Q_t 。图 9 给出了振荡时间对 201×7 阴离子交换树脂吸附铂的影响曲线。

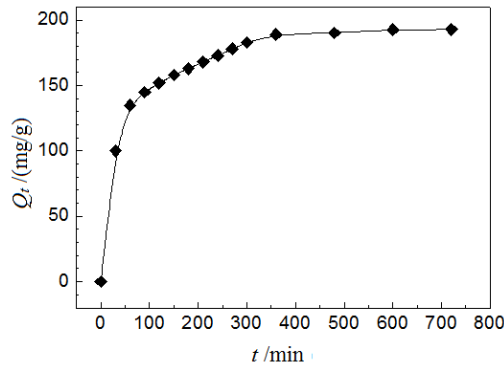


图9 201×7阴离子交换树脂吸附铂的速率曲线

Fig.9 Adsorption rate curve of Pt on 201×7 resin

从图 9 可以看出，随着树脂与铂溶液接触时间的延长，铂的吸附量逐渐增加，吸附 360 min 后，树脂对铂的吸附趋于平衡，其平衡吸附量可达到 190 mg Pt/g 干树脂。

一般情况下，可以选用准一级反应动力学模型(式 5)或准二级反应动力学模型(式 6)对铂在 201×7 树脂上的吸附动力学进行讨论^[13-14]。

准一级动力学模型：

$$\ln(1 - Q_t / Q_e) = -k_1 t \quad (5)$$

准二级动力学模型：

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{Q_e} t + \frac{1}{k_2 Q_e^2} \quad (6)$$

式中： k_1 为准一级速率常数，1/min； k_2 为准二级速率常数，g/(mg·min)； Q_t 为 t 时刻的吸附量，mg/g； Q_e 为平衡吸附量，mg/g。

用式(5)和式(6)对所测数据进行了拟合，相关系数列于表 3，拟合曲线见图 10。

表 3 25℃下铂的吸附速率常数及相关系数

Tab.3 Adsorption kinetic parameters for adsorption of Pt

on 201×7 resin			
k_1 /(1/min)	R^2	k_2 /(g/mg·min)	R^2
0.94707	0.93462	1.58×10^{-4}	0.97251

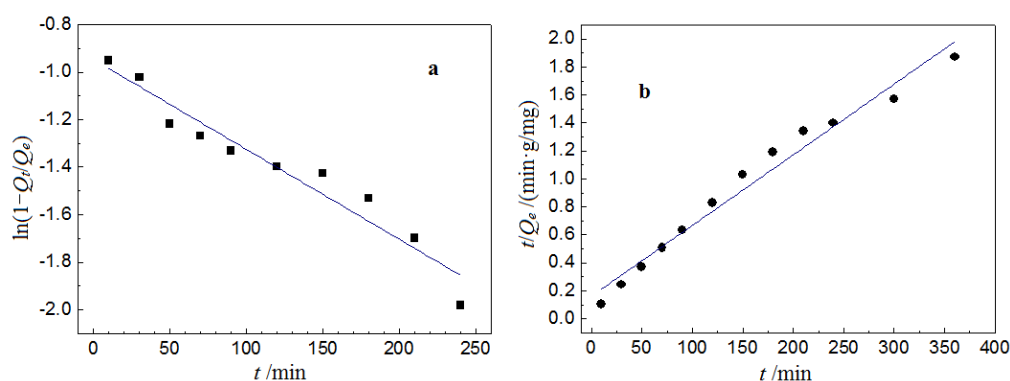


图10 201×7树脂吸附铂的准一级动力学(a)和准二级动力学(b)拟合结果

Fig.10 Pseudo-first-order (a) and pseudo-second-order (b) adsorption kinetics fitting for adsorption of Pt on 201×7 resin

由图 10 和表 3 可以看出, 201×7 阴离子交换树脂吸附铂的动力学数据更符合拟二级反应动力学模型, 拟二级常数为 $k_2=1.58 \times 10^{-4} \text{ g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$ 。

2.3.3 温度对 201×7 树脂吸附 Pt 的影响及热力学参数测定

准确称取 6 份 201×7 阴离子交换树脂加入到 50 mL 浓度为 500 mg/L 的铂溶液中, 分别在 298.15~333.15 K 的条件下振荡 6 h 后, 测定不同温度下铂的平衡浓度, 计算树脂的固液分配系数 K_D 。树脂吸附铂的标准焓变 ΔH 及标准熵变 ΔS 可由 Van't Hoff 方程式(7)计算^[15-16], 各温度下的吉布斯自由能变 ΔG 可由式(8)计算。

$$\lg K_D = -\frac{\Delta H}{2.303RT} + \frac{\Delta S}{2.303R} \quad (7)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (8)$$

式中: R 为理想气体常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为温度, K 。以 $\lg K_D$ 对 $1/T$ 作图, 结果如图 11 所示。对

实验各点进行线性回归后得到一条直线, 根据斜率和截距的值以及式(8)可计算得 201×7 阴离子交换树脂吸附铂的热力学参数, 列于表 4。

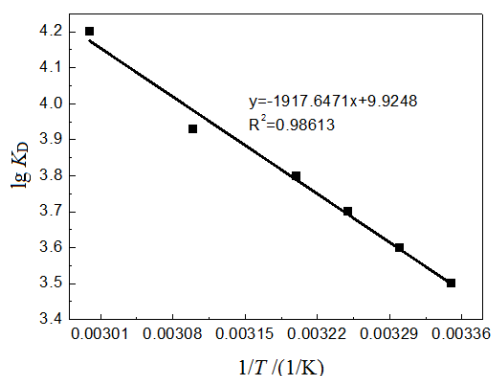


图 11 温度对 Pt 吸附分配比的影响

Fig.11 Effect of reaction temperature on the distribution of Pt

表 4 201×7 阴离子交换树脂吸附铂的热力学参数

Tab.4 Thermodynamic parameters for adsorption of Pt on 201×7 resin

ΔH $/(\text{kJ}/\text{mol})$	ΔS $/(\text{kJ}/\text{mol} \cdot \text{K})$	$\Delta G /(\text{kJ}/\text{mol})$					
		$T=298.15\text{K}$	$T=303.15\text{K}$	$T=308.15\text{K}$	$T=313.15\text{K}$	$T=323.15\text{K}$	$T=333.15\text{K}$
36.72	0.190	-19.94	-20.89	-21.84	-22.79	-24.69	-26.59

由表 4 可以看出, 201×7 阴离子交换树脂吸附铂的焓变值 ΔH 为 $36.72 \text{ kJ}/\text{mol}$, 焓变为正值, 表明树脂吸附铂的过程为吸热反应, 适当升高温度将有利于铂的吸附。各温度下的吉布斯自由能变的值均为负值, 验证了 201×7 阴离子交换树脂吸附 PtCl_6^{2-} 的过程是自发进行的。

3 结论

(1) 强碱性 201×7 阴离子交换树脂对金宝山氯化浸出液中低浓度铂具有良好的吸附性能, 静态饱和和吸附容量可达到 $190 \text{ mg Pt}/\text{g}$ 干树脂。动态条件

下,流速在 0.5~4.0 mL/min 范围时,树脂对铂的吸附率可达到 99%以上,动态饱和吸附容量可达到 169 mg Pt /g 干树脂。用 2.4 mol/L 高氯酸能将载铂树脂上 83%的铂洗脱下来。

(2) 201×7 树脂吸附 $[\text{PtCl}_6]^{2-}$ 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。吸附动力学研究表明, $[\text{PtCl}_6]^{2-}$ 的吸附过程可用准二级动力学方程描述。

(3) 201×7 阴离子交换树脂吸附 $[\text{PtCl}_6]^{2-}$ 的反应是吸热过程,适当增加温度有利于吸附反应的进行。在 25℃时,吸附过程的焓变 $\Delta H=36.72 \text{ kJ/mol}$,熵变 $\Delta S=0.190 \text{ kJ/mol}\cdot\text{K}$, $\Delta G=-19.94 \text{ kJ/mol}$ 。

参考文献:

- [1] 陈景, 黄昆, 陈奕然. 金宝山铂钯浮选精矿几种处理工艺的讨论[J]. 稀有金属, 2006, 30(3): 401-405.
Chen J, Huang K, Chen Y. Several techniques for handling flotation sulfide concentrates of Jinbaoshan platinum mine[J]. Rare Metals, 2006, 30(3): 401-405.
- [2] 刘时杰, 杨茂才, 汪云华, 等. 云南金宝山铂钯矿资源综合利用工艺研究[J]. 贵金属, 2012, 33(4): 1-8.
Liu S, Yang M, Wang Y, et al. A new process engineering for comprehensive exploitation of the Jinbaoshan Pt-Pd ore resources[J]. Precious Metals, 2012, 33(4): 1-8.
- [3] 黄昆, 陈景, 陈奕然, 等. 加压氰化全湿法处理低品位铂钯浮选精矿工艺研究[J]. 稀有金属, 2006, 30(3): 369-375.
Huang K, Chen J, Chen Y, et al. Hydrometallurgical pressure cyanide leaching process for treating low-grade Pt-Pd flotation concentrates[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30(3): 369-375.
- [4] Huang K, Li Q W, Chen J. Recovery of copper, nickel and cobalt from acidic pressure leaching solutions of low-grade sulfide flotation concentrates[J]. Minerals Engineering, 2007, 20: 722-728.
- [5] Chen J, Huang K. A new technique for extraction of platinum group metals by pressure cyanidation[J]. Hydrometallurgy, 2006, 82: 164-171.
- [6] 陈景, 黄琨, 陈奕然. 铂族金属硫化矿提取铂钯和贱金属的方法: 中国, ZL2004100401018[P]. 2004-06-26
Chen Jing, Huang Kun, Chen Yiran. A method for recovery of platinum, palladium and base metals from sulfide ore: China, ZL 2004100401018[P]. 2004-6-26.
- [7] Marinho R S, Silva C N, Afonso J C, et al. Recovery of platinum, tin and indium from spent catalysts in chloride medium using strong basic anion exchange resins[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192(3): 1155-1160.
- [8] Jung M W, Ahn K H, Lee Y, et al. Adsorption characteristics of phenol and chlorophenols on granular activated carbons (GAC)[J]. Microchemical Journal, 2001, 70(2): 123-131.
- [9] 余建民. 贵金属化合物及配合物合成手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 184-186.
Yu Jianmin. Handbook of Precious Metal Compounds and Complexes Synthesis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 184-186.
- [10] Abdel-Aziz H M, Hanafi H A, Abozahra S F, et al. Preparation of poly(acrylamide-maleic acid) resin by template polymerization and its use for adsorption of Co(II) and Ni(II)[J]. International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials, 2010, 60(1): 89-101.
- [11] Liu Y, Xiao D, Li H. Kinetics and thermodynamics of lead(II) adsorption on vermiculite[J]. Separation Science and Technology, 2007, 42(1): 185-202.
- [12] 张启伟, 王桂仙. 巯基树脂对金(III)的吸附性能及其机理[J]. 贵金属, 2011, 32(2): 37-40.
Zhang Q, Wang G. Studies on the adsorption behavior and mechanism of thiourea resin for Au(III)[J]. Precious Metals, 2011, 32(2): 37-40.
- [13] Wołowicz A, Hubicki Z. Palladium(II) complexes adsorption from the chloride solutions with macrocomponent addition using strongly basic anion exchange resins, type 1[J]. Hydrometallurgy, 2009, 98(3): 206-212.
- [14] Wang F, Wang L, Li J, et al. Adsorption behavior and mechanism of cadmium on strong-acid cation exchange resin[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(3): 740-744.
- [15] Gode F, Pehlivan E. Removal of Cr(VI) from aqueous solution by two Lewatit-anion exchange resins[J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 119(1): 175-182.
- [16] Gode F, Pehlivan E. Removal of chromium(III) from aqueous solutions using Lewatit S 100: the effect of pH, time, metal concentration and temperature[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 136(2): 330-337.