

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2024.06.008

离子交换法从硫酸亚铁溶液中分离镍实验研究

雷军鹏, 金鑫, 王紫燕

(成都盛威兴科新材料研究院合伙企业(有限合伙), 成都 610000)

摘要:针对高铁低镍硫酸亚铁溶液中镍铁分离困难的生产实际,采用离子交换技术对硫酸亚铁溶液中的镍铁分离进行了研究。通过条件实验考察了树脂装填量、吸附前液pH值、吸附时间、镍离子浓度等对镍铁分离效果的影响。结果表明,CH-90树脂对含镍硫酸亚铁溶液中的镍有明显的优先选择性,树脂对镍的工作交换容量为15 mg/g。经过离子交换树脂处理,溶液中的铁镍摩尔比由处理前的17:1最高可以提高到93:1,镍去除率达到87%,处理后溶液含镍小于0.3 g/L,具有良好的分离效果。吸附等温线和吸附动力学分析研究发现,CH-90树脂吸附遵循Langmuir方程和准二级动力学方程,吸附过程主要是离子交换控制。

关键词:离子交换法;除镍;硫酸亚铁溶液

中图分类号:TF815

文献标志码:A

文章编号:2095-1744(2024)06-0062-06

Experimental Study on Nickel Removal in Ferrous Sulphate Solution by Ion Exchange Method

LEI Junpeng, JIN Xin, WANG Ziyan

(Chengdu Shengweixingke New Materials Research Institute Partnership Business(Limited Partnership), Chengdu 610000, China)

Abstract: Based on the problem of nickel remove from ferrous sulphate solution with low nickel content, it was investigated by ion exchange process in this paper. Different factors, including resin filling capacity, pH, time, initial nickel content and so on, were investigated to explore the performance of nickel remove from ferrous sulphate solution by designed experiments. The results indicate that priority selectivity for nickel is presented in ferrous sulphate solution after resin adsorption and the operating capacity of CH-90 resin for nickel is 15 mg/g. After resin adsorption, Fe/Ni molar ratio is increased from 17:1 to 93:1 and removal rate on nickel reached 87%. Additionally, nickel content is reduced to 0.3 g/L. In other words, nickel is removed effectually from ferrous sulphate solution. The adsorption isotherms and adsorption kinetics were evaluated by changing the initial content and adsorption reaction time. It was found that the resin was in line with the Langmuir adsorption isotherm, and met the quasi-second-order kinetic equation. Furthermore, adsorption process was mainly controlled by ion exchange.

Key words: ion exchange; nickel removal; ferrous sulphate solution

在湿法冶炼过程中,经常需要将溶液中的杂质去除,铁作为常见的杂质元素,在硫酸镍溶液体系中除铁方法多种多样,常见的有黄钠铁矾法、针铁矿沉淀法、氢氧化铁沉淀法、溶剂萃取法、离子交换树脂法等^[1-5]。然而,有时在铁元素占据大份额的情况

下,将大部分铁去除是不经济的,这时就需要逆向除杂,在铁的盐溶液中去镍钴等金属元素。通常采用化学沉淀法从铁的硫酸盐溶液中除镍,废水中采用离子交换法除镍也已实现大规模工业化应用^[6-8],采用离子交换技术从高铁低镍硫酸盐溶液中除镍鲜

收稿日期:2024-01-24

作者简介:雷军鹏(1975—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为镍钴冶金、材料。

引用格式:雷军鹏,金鑫,王紫燕.离子交换法从硫酸亚铁溶液中分离镍实验研究[J].有色金属工程,2024,14(6):62-67.

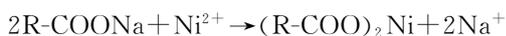
LEI Junpeng, JIN Xin, WANG Ziyan. Experimental Study on Nickel Removal in Ferrous Sulphate Solution by Ion Exchange Method[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(6): 62-67.

有报道。在铁高镍低的硫酸盐溶液体系中,诸如红土镍矿高压酸浸溶液、钢厂酸洗废液、含镍不锈钢浸出液等溶液,除镍就成为一个现实存在的问题。针对以上问题,本文开展了离子交换法从硫酸亚铁溶液中分离镍的研究,期望能实现硫酸亚铁溶液中的镍的有效分离。

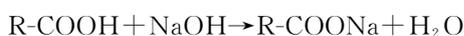
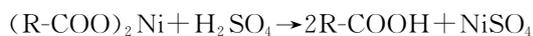
1 实验

实验采用科海思(北京)科技有限公司 CH-90 树脂,该树脂是加载有螯合的亚氨基二乙酸官能团的弱酸性大孔阳离子交换树脂,对多价的金属离子呈复数的配位作用形成稳定的螯合结合,因而对二价及以上的金属离子有非常高的选择吸附性,主要用于水溶液或非水溶液中去去除二价及以上的金属阳离子。它可以从广泛的 pH 值范围内选择性提取重金属阳离子,它对部分金属离子选择顺序如下: $\text{Cu}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^{+}$ [9]。其交换作用是:

离子交换:



再生:



螯合树脂吸附原理基于螯合作用,螯合树脂的功能基团上的原子与金属离子发生配位反应,产生配位共价键,形成结构稳定的螯合物,通过诱导、捕获、吸附、固定等步骤,实现对特定目标离子的吸附。螯合树脂的吸附选择性主要取决于符合“软和硬酸碱原理”的配位原子和金属离子的性质[10]。CH-90 树脂主要通过其螯合的亚氨基二乙酸官能团进行离子交换,吸附选择性主要依赖树脂在溶液中对不同离子的亲和力差异。采用竞争吸附法对树脂的选择性进行了测量,具体做法:配制 pH 为 3 的硫酸亚铁和硫酸镍溶液 200 mL,含镍 0.2 mol/L,含铁 0.2 mol/L。加入树脂 10 mL(湿密度 0.75 g/cm³),放入 300 mL 烧杯中,搅拌速率 150 r/min,室温下吸附 120 min,过滤,得到吸附后液和负载树脂,吸附后液测镍和铁的含量。负载树脂先用 100 mL 去离子水洗涤后,再用 50 mL、200 g/L 硫酸溶液进行反洗,得到反洗液,反洗液测镍和铁的含量。分别按吸附后液和反洗液的镍、铁含量计算,树脂吸附的镍铁摩尔比都约为 6:1,CH-90 树脂对镍有明显的选择性。

实验目标溶液主要为印尼某公司所产镍铁的硫

酸浸出液,典型成分如表 1 所示。实验方式分静态吸附和动态吸附,除时间条件实验同时做了静态吸附和动态吸附外,树脂装填量、处理前液 pH、镍离子浓度等条件实验均采用静态吸附。

化学元素分析采用北京东西分析仪器有限公司 AA-7050 型原子吸收分光光度计分析,pH 值采用上海仪电科学仪器科技有限公司雷磁 PHS-3C 型 pH 计测试。

表 1 含镍硫酸亚铁溶液主要成分

Elements	Fe	Ni	Na	H ⁺
Contents	35-40	2-3	5-10	0.05-2

2 结果及讨论

2.1 树脂装填量对镍铁分离的影响

为了考察树脂装填量的影响,保持铁离子浓度、镍离子浓度、pH、吸附时间、温度室温不变,配制 5 份 pH 3.0、含镍 2.5 g/L、铁 40 g/L 的硫酸盐溶液 300 mL。在 500 mL 烧杯中先加入配制好的溶液,再分别加入树脂 20、40、60、80、100 mL,搅拌速率 150 r/min,吸附 120 min,过滤,得到吸附后液和负载树脂,测吸附后液铁和镍含量。负载树脂先用 100 mL 去离子水洗涤后,再用 50 mL、200 g/L 硫酸溶液进行反洗,得到反洗液,测反洗液铁和镍含量。从图 1 可以看出,随树脂装填量的增加,铁离子和镍离子含量均呈现下降趋势,表明树脂对铁离子和镍离子均有一定量的吸附。在吸附前液中,铁镍摩尔比为 17:1,吸附后液中随树脂装填量的增加铁镍摩尔比分别为 26:1、32:1、55:1、68:1、

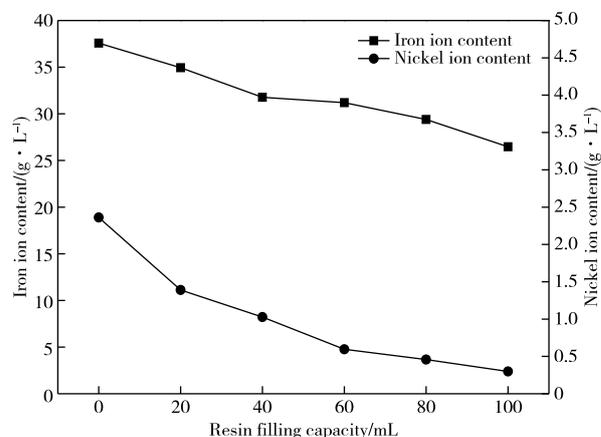


图 1 树脂装填量对吸附后液中铁离子和镍离子含量的影响

Fig. 1 Effects of resin filling capacity on the content of iron and nickel ions in the adsorbed solution

93 : 1, 吸附后液铁镍摩尔比大于吸附前液且随树脂装填量增加有增大趋势, 表明树脂对镍的吸附具有优先选择性。此外, 树脂对镍的工作交换容量(mg/g)分别为19、13、12、10、8, 随树脂装填量的增加工作交换容量呈下降趋势。吸附后的树脂酸反洗液中铁镍摩尔比分别为2.85 : 1、3.58 : 1、3.80 : 1、4.47 : 1、5.61 : 1, 可见树脂装填量比较少时, 对于相同的处理前液, 树脂吸附的镍铁比最低, 树脂对镍的吸附优先选择性更强。

2.2 吸附前液 pH 对镍铁分离效果的影响

为了考察吸附前液 pH 的影响, 保持树脂装填量、铁离子浓度、镍离子浓度、吸附时间、温度室温不变, 配制 5 份 pH 分别为 0.5、1.0、3.0、4.5、5.0 的含镍 2.5 g/L、铁 40 g/L 的硫酸盐溶液, 实验流程和考察树脂装填量时一样, 实验结果见图 2。从图 2 可以看出, 随吸附前液 pH 的上升, 溶液中铁离子和镍离子浓度不同程度下降, 但 pH 大于 4.5 后, 铁离子下降速率突然加快, 而溶液中的镍离子反而出现上升的趋势。pH 大于 4.5 后, 溶液中的少量三价铁离子水解生成氢氧化铁, 造成了溶液铁含量的突然下降。此外, 由于产生的氢氧化铁包裹在树脂表面, 在一定程度上影响了树脂的吸附, 说明 pH 上升有利于降低溶液中的镍含量但不宜过高。吸附树脂酸洗后, 得到的硫酸盐溶液中铁镍摩尔比分别为 15.71 : 1、4.17 : 1、3.51 : 1、2.87 : 1、6.16 : 1, 说明提高 pH 有利于镍铁分离但不宜过高。

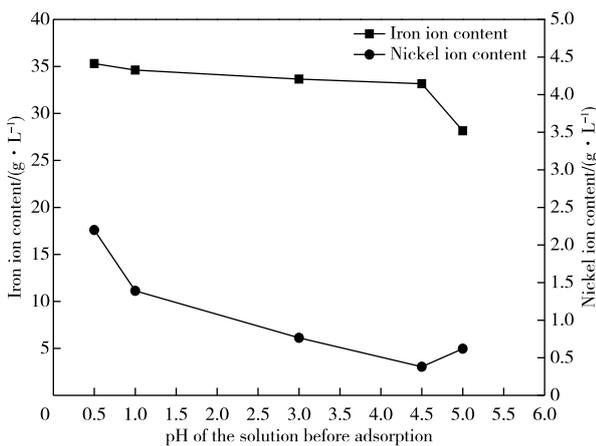


图 2 吸附前液 pH 对吸附后液中铁离子和镍离子含量的影响

Fig. 2 Effects of pH values on the content of iron and nickel ions in the adsorbed solution

2.3 吸附时间对树脂吸附容量的影响

为了对比, 保持树脂装填量、铁离子浓度、镍离子浓度、pH、温度室温不变, 同时采用静态吸附和动

态吸附考察吸附时间的影响。静态吸附: 配制 pH 3.0、含镍 2.5 g/L、铁 40 g/L 的硫酸盐溶液 300 mL。在 500 mL 烧杯中先加入配制好的溶液, 加入树脂 60 mL, 室温, 搅拌速率 150 r/min, 在 10、20、30、60、90、120、150、180 min 时分别静置 20 s, 取上清液 5 mL 溶液测镍和铁。动态吸附: 配制 8 份 pH 3.0、含镍 2.5 g/L、铁 40 g/L 的硫酸盐溶液 300 mL, 将树脂 60 mL 装入树脂柱, 分别在 10、20、30、60、90、120、150、180 min 内加完, 取吸附后液测镍和铁。

吸附容量随着吸附时间的变化结果见图 3, 其中纵坐标 q_t 为时间 t 时的吸附量, mg/g。随吸附时间的延长, 吸附后液中铁离子和镍离子的吸附容量逐渐增加, 在 60 min 后基本不变, 表明树脂吸附基本趋于饱和状态。180 min 时静态吸附铁吸附容量为 65.2 mg/g, 镍为 15 mg/g, 动态吸附铁吸附容量为 42.4 mg/g, 镍为 11.6 mg/g。树脂的吸附量随着树脂与溶液接触时间的延长而增大。吸附初期, 树脂上的活性点位较多, 吸附速率较快, 后期吸附速率逐渐缓慢, 在 120 min 内树脂基本可以达到吸附平衡。静态吸附的吸附容量在相同时间段均比动态吸附的吸附容量略高, 这可能与静态吸附状况下所有树脂一次性投入溶液, 而树脂柱是自上而下逐渐滴加有关。

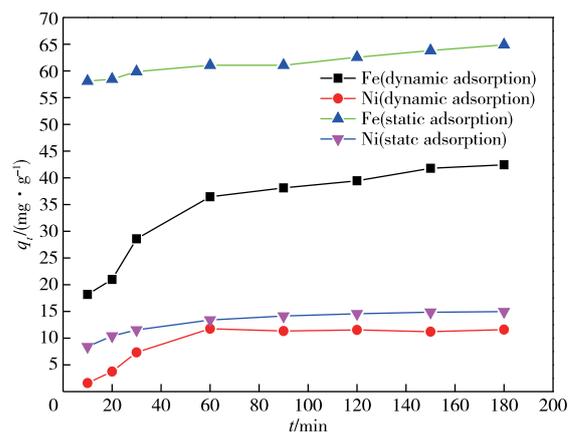


图 3 吸附时间对树脂吸附容量的影响

Fig. 3 Effects of adsorption time on the adsorption capacity of the resin

2.4 镍离子浓度对镍铁分离的影响

考察镍离子浓度时, 保持树脂装填量、铁离子浓度、pH、吸附时间、温度室温不变, 配制 6 份 pH 3.0、铁 40 g/L 的硫酸盐溶液, 每份 300 mL, 初始含镍 C_0 (g/L) 分别为 0.5、1.5、2.5、3.5、4.5、5.5、6.5, 实验流程和考察树脂装填量时一样。图 4 为树

脂镍平衡吸附容量随镍离子浓度的变化,其中 Q_e 为平衡时树脂交换容量,mg/g。平衡镍吸附容量 Q_e 随初始含镍 C_0 增大而增大,增大趋势逐渐变缓。此外,在两种离子存在竞争的溶液体系中,尽管镍离子相对于铁离子具有优先选择性,高浓度铁离子的浓度对镍离子饱和交换浓度影响较大,由于铁离子的影响,树脂对镍的工作交换容量增加的趋势逐渐变缓。镍离子浓度提高有利于降低水与镍离子之间的传质阻力,所以镍离子平衡浓度增加有利于树脂平衡吸附容量的增加。

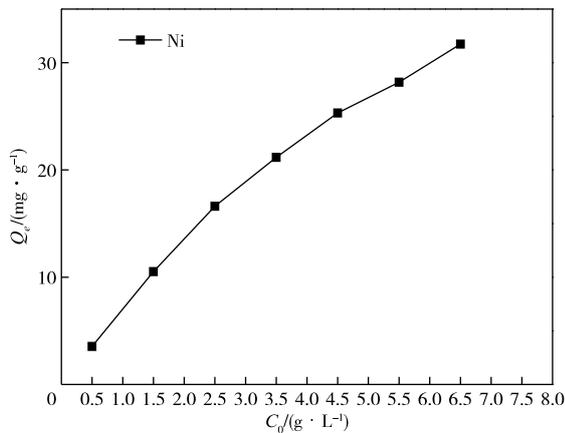


图 4 树脂镍平衡吸附容量随镍离子浓度的变化

Fig. 4 Changes of the equilibrium adsorption capacity with nickel ion content

2.5 吸附动力学

为了进一步研究树脂的吸附动力学,采用图 3 数据,用动力学方程拟合方法对树脂在该体系下的动力学过程做了进一步的探讨。

准一级动力学方程如式(1):

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

准二级动力学方程如式(2):

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

式中, q_t 为时间 t 时的吸附量,mg/g; q_e 为平衡吸附量,mg/g; k_1 为拟一级速率吸附常数,1/min, k_2 为拟二级速率吸附常数,g/(mg·min)。

图 5 和表 2 分别给出了树脂的准二级动力学曲线和吸附动力学参数。如表 2 所示,与准一级动力学模型相比,准二级动力学模型中决定系数 R^2 更大。此外,准一级动力学模型计算的 Fe^{2+} 、 Ni^{2+} 平衡吸附量 $q_{e,cal}$ 分别为 10.28、8.72 mg/g,而准二级动力学模型计算得到的 Fe^{2+} 、 Ni^{2+} 平衡吸附量 $q_{e,cal}$ 分别为 60.42、15.81 mg/g,2.3 中静态实验获得的 Fe^{2+} 、 Ni^{2+} 平衡吸附量 $q_{e,exp}$ 分别为 65.2、15 mg/g,

准二级动力学模型计算值更接近实验值。可见,在高铁硫酸盐体系下的树脂吸附符合准二级动力学方程。准二级吸附动力学假定吸附速率由吸附剂表面未被占有的吸附空位数的平方值决定,吸附剂和吸附质之间通过电子转移和电子共用实现吸附过程,受化学吸附机理控制。总体来说,实验结果更符合准二级动力学方程,表明树脂吸附过程是离子交换过程^[11]。

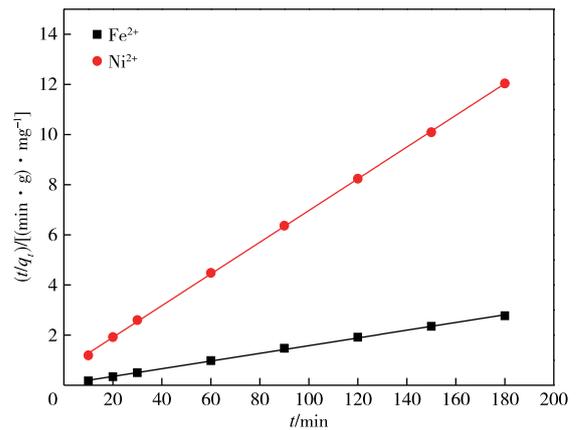


图 5 CH-90 树脂对 Fe^{2+} 、 Ni^{2+} 吸附的拟二级动力学曲线
Fig. 5 Quasi-quadratic kinetic fitting curve for adsorption of Fe^{2+} and Ni^{2+} on the CH-90 resin

表 2 树脂对 Fe^{2+} 、 Ni^{2+} 吸附动力学参数

Table 2 Adsorption kinetics parameters for the adsorption of Fe^{2+} and Ni^{2+} on the resin

Equation	Parameters	Value	
		Fe^{2+}	Ni^{2+}
First-order kinetic	$q_{e,cal} / (mg \cdot g^{-1})$	10.28	8.72
	$k_1 / (min^{-1})$	0.015	0.028
	R^2	0.812 6	0.988 5
Quasi-quadratic kinetic	$q / (mg \cdot g^{-1})$	60.42	15.81
	$k_2 / [g \cdot (mg \cdot min)^{-1}]$	5.15×10^{-3}	6.88×10^{-3}
	R^2	0.998 7	0.999 8

2.6 吸附等温线

等温条件下的 C-Q 图经常被用来表征离子交换平衡规律,常用理论模型有 Freundlich 和 Langmuir 吸附平衡模型。为了进一步探索树脂吸附的热力学过程,根据图 4 的实验数据,本文采用 Freundlich 和 Langmuir 吸附等温方程进行线性拟合, Freundlich 和 Langmuir 吸附等温线拟合方程分别见式(3)、(4)。

$$\lg Q_e = \frac{\lg C_e}{n} + \lg K \quad (3)$$

式中, n 为 Freundlich 特征常数, g/L; K 为 Freundlich 吸附系数, g/L; Q_e 为平衡时树脂交换容

量, mg/g; C_e 为平衡时离子浓度, g/L。

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{bQ_m} + \frac{C_e}{Q_m} \quad (4)$$

式中, b 为 Langmuir 平衡常数; Q_m 为理论饱和吸附量, mg/g; Q_e 为平衡时树脂交换容量, mg/g; C_e 为平衡时离子浓度, g/L。

由公式(3)、(4)可以拟合出树脂的两种吸附等温线方程, 结果见图 6、图 7, 根据拟合曲线可以得到相关参数见表 3。一般来讲, 特征常数 n 在 2~10 之间时, 容易发生吸附反应, $n < 0.5$ 时, 很难发生吸附反应。由拟合结果可见, 树脂对镍的吸附介于容易吸附和较难吸附之间。由图 6、图 7 和表 3 可知, DH-90 树脂拟合曲线的 Langmuir 吸附等温线决定系数 R^2 比 Freundlich 吸附等温线决定系数大, 可见, 树脂吸附更符合 Langmuir 吸附等温方程。Langmuir 吸附理论为单分子层吸附理论, 它假设吸附剂表面上有一定数量的均匀分布的活性位点, 每个位点只能吸附一个被吸附物质的分子, 并且不受

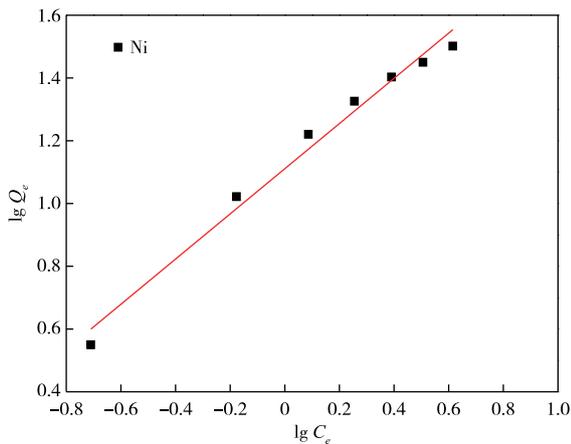


图 6 Freundlich 吸附等温拟合曲线

Fig. 6 Freundlich isotherm model fitting curve

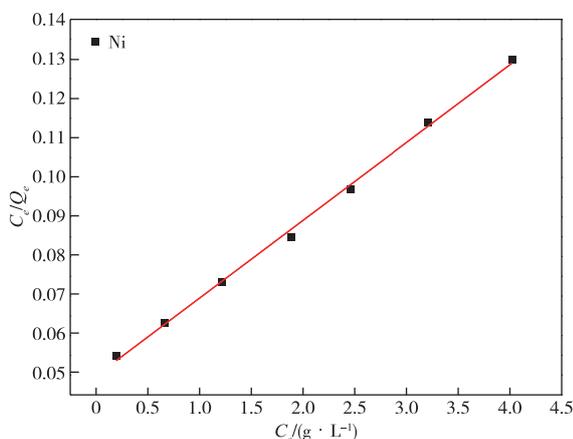


图 7 Langmuir 吸附等温拟合曲线

Fig. 7 Langmuir isotherm model fitting curve

邻近位点的影响。离子交换树脂是在溶液体系中实现对金属离子的吸附, 吸附效果与树脂比表面积呈正相关关系, 符合 Langmuir 吸附理论描述的工作原理。

表 3 Freundlich 和 Langmuir 吸附等温方程相关拟合参数
Table 3 Fitting parameters of Freundlich and Langmuir adsorption isotherms

Freundlich equation parameters			Langmuir equation parameters		
$1/n$	$\lg K$	R^2	b	$Q_m/(mg \cdot g^{-1})$	R^2
0.72	1.11	0.980 7	0.05	50.79	0.997 6

2.7 二次吸附对镍铁分离效果的影响

由于镍价值高、铁价值低, 为了使吸附酸洗液中的镍铁比进一步下降, 便于后续除铁处理, 使用 2.1 中不同树脂装载量 40 mL 反洗液 (pH 为 1.0~1.5) 作为吸附前液, 另单独配制 1 份 40 mL 铁镍摩尔比 3.15 : 1 的硫酸盐溶液作为补充, 使待吸附液中铁镍摩尔比分别为 5.61 : 1、4.47 : 1、3.80 : 1、3.58 : 1、3.15 : 1、2.85 : 1 (镍离子含量 (g/L) 分别为 6.74、8.46、9.56、10.57、12.01、13.27)。在 100 mL 烧杯中先加入待吸附溶液, 分别加入树脂 8 mL, 搅拌速率 150 r/min, 室温下吸附 120 min, 过滤, 得到吸附后液和负载树脂, 吸附后液测铁和镍含量。负载树脂先用 15 mL 去离子水洗涤后, 再用 10 mL、200 g/L 硫酸溶液进行反洗, 得到二次反洗液, 测镍和铁的含量。吸附前液、吸附后液和二次吸附酸洗液中铁镍摩尔比的结果如图 8 所示。由图 8 可知, 随镍含量的增加, 与吸附前相比, 二次吸附后液中的镍铁比明显增加, 表明即使在镍含量比较高的情况下, 树脂对镍依然有明显的优先选择性。此外, 吸附酸洗液中的铁镍摩尔比在 1.02 : 1~1.48 : 1 之间, 相比吸附前液中 2.85 : 1~5.61 : 1, 吸附酸

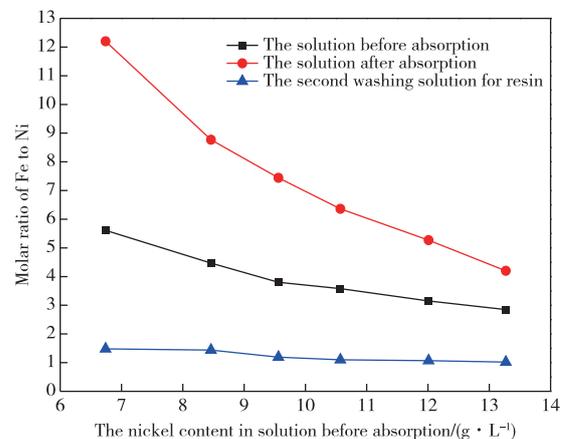


图 8 二次吸附对镍铁分离的影响

Fig. 8 Effects of the second absorption on nickel remove

洗液中铁含量大幅度降低,为后续除铁创造了条件。可以粗略地认为,在这种溶液体系中,在铁离子数量是镍离子数量3倍的情况下,树脂吸附的镍离子和铁离子数量大致相当,树脂对溶液中镍仍然具有选择性,但不如2.1中一次吸附效果明显,这可能和溶液pH偏低有关。

3 结论

通过实验,可以看出树脂对镍铁溶液中镍的分离有明显的效果,结论如下:

1)CH-90树脂对含镍硫酸亚铁溶液中镍的吸附有明显的优先选择性,树脂对镍的工作交换容量为15 mg/g。

2)在树脂装载量60 mL、吸附时间60 min,吸附pH不高于4.5的情况下,吸附后液中的镍含量可以降低到1 g/L以下,镍去除率大于80%。

3)经过两次树脂吸附,吸附酸洗液中的铁镍摩尔比接近1:1,相比前液铁镍摩尔比17:1明显降低,为后续除铁创造了良好的条件。但二次吸附吸附效果不如一次吸附明显,这可能和溶液pH偏低有关。

4)CH-90树脂吸附更加符合Langmuir方程和二级动力学方程,说明树脂吸附过程为受离子交换控制的单分子层定点吸附。

参考文献:

- [1] 袁文龙,王碧侠,赵瑛,等.用钛白副产硫酸亚铁合成磷酸铁前驱体[J].有色金属工程,2023,13(7):61-68.
YUAN Wenlong, WANG Bixia, ZHAO Ying, et al. Synthesis of iron phosphate precursor from by-product ferrous sulfate of titanium dioxide [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(7): 61-68.
- [2] 骆昌运.针铁矿除铁工艺在丹霞冶炼厂的应用实践[J].有色金属工程,2011,1(1):44-46.
LUO Changyun. Application of goethite deironization process in danxia smelter [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2011, 1(1): 44-46.
- [3] 林才顺.从湿法硫酸镍中去除锰、铁的新工艺研究[J].湿法冶金,2002,21(3):139-142.
LIN Caishun. Removing of manganese and iron from nickel sulfate hydrometallurgy [J]. Hydrometallurgy of China, 2002, 21(3): 139-142.
- [4] 徐靖宸,肖超,罗进爱,等. P507 从废旧三元电池浸出液中萃取分离镍、钴、锰的研究 [J]. 有色金属工程, 2021, 11(9): 69-74.

- XU Jingchen, XIAO Chao, LUO Jin'ai, et al. Study on P507 extraction and separation of nickel, cobalt and manganese from the leachate of waste ternary battery [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(9): 69-74.
- [5] 明键伟,卢苏军,宛顺磊,等.红土镍矿浸出液中钴、锰、铁的协同萃取[J].有色金属工程,2020,10(2):41-45.
MING Jianwei, LU Sujun, WAN Shunlei, et al. Cooperative extraction of cobalt, manganese and iron from laterite nickel ore [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(2): 41-45.
- [6] 李雅,张盈,王美娇,等.离子交换树脂除废水中Ni技术研究[J].有色金属(冶炼部分),2021(10):121-125.
LI Ya, ZHANG Ying, WANG Meijiao, et al. Study on removal of Ni in waste water by ion exchange resin [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(10): 121-125.
- [7] 杜琦,张玥,余翰名,等.几种离子交换树脂对电镀废水中Ni²⁺的吸附性能评价[J].应用化工,2020,49:1386-1390.
DU Qi, ZHANG Yue, YU Hanming, et al. Evaluation of adsorption of nickel onto several cation-exchange resins in plating wastewater [J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49: 1386-1390.
- [8] 史学伟,吴艳阳,徐首红,等.CH-90交换树脂对废水中Co²⁺、Mn²⁺离子的去除[J].石油化工高等学校学报,2017,30:1-5.
SHI Xuewei, WU Yanyang, XU Shouhong, et al. Removal of Co²⁺ and Mn²⁺ from waste water with CH-90 exchange resin [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2017, 30: 1-5.
- [9] 科海思(北京)科技有限公司.科海思除铜镍螯合树脂CH-90NA产品文件[EB/OL].[2024-02-20].<https://www.cohesion.cc/>.
COHESION (Beijing) Technology Co. LTD. COHESION nickel and copper chelating resin product documentation [EB/OL]. [2024-02-20]. <https://www.cohesion.cc/>.
- [10] 罗凡,董滨,毕研斌,等.螯合树脂吸附金属阳离子的应用及其研究进展[J].水处理技术,2011,37(1):23-27.
LUO Fan, DONG Bin, BI Yanbin, et al. Adsorption of metal cation by chelating resin [J]. Technology of Water Treatment, 2011, 37(1): 23-27.
- [11] NOMNGONGO P N, NGILA J C, MSAGATI T A M, et al. Kinetics and equilibrium studies for the removal of cobalt, manganese, and silver in ethanol using dowex 50W-x8 cation exchange resin [J]. Separation Science and Technology, 2014, 49(12): 1848-1859.