

高镍电镀污泥中镍的分离与硫酸镍的制备研究^①

焦奥博^{1,2}, 刘牡丹^{1,2}, 吕先谨^{1,2}, 刘勇^{1,2}, 吕建芳^{1,2}, 冯嘉颖^{1,2}, 周吉奎^{1,2}

(1.广东省科学院资源利用与稀土开发研究所, 广东 广州 510650; 2.稀有金属分离与综合利用国家重点实验室, 广东 广州 510650)

摘要: 采用酸浸-氧化沉淀除杂-溶剂萃取深度除杂的方法有效分离与回收高镍电镀污泥中镍, 并制备高纯六水合硫酸镍。首先通过硫酸浸出污泥, 使污泥中绝大部分镍、铜、铁和铝进入浸出液; 然后往浸出液中加入过氧化氢氧化沉淀除铁, 适宜的终点 pH 值为 3; 再采用硫化钠除杂, 适宜的硫化钠过量系数为 1.2, 铁和铜沉淀率分别达到了 99.43% 和 98.13%; 调节沉淀后液 pH 值, 得到氢氧化镍沉淀后用硫酸溶解为硫酸镍溶液, 并用 P204 萃取剂深度除杂, Cu、Fe、Al 二级萃取率分别达到了 98.41%、99.99%、95.15%, Ni 萃取率仅 9.4%; 萃余液经过蒸发浓缩-冷却结晶制得纯度超过 99.95% 的六水合硫酸镍。

关键词: 电镀污泥; 镍; 酸浸; 溶剂萃取; 除杂; 硫酸镍; 除铁; 沉铜; 除铝

中图分类号: TF815; TF804.2

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.01.016

文章编号: 0253-6099(2025)01-0086-06

Separation of Nickel from High-Nickel Electroplating Sludge and Preparation of Nickel Sulfate

JIAO Aobo^{1,2}, LIU Mudan^{1,2}, LYU Xianjin^{1,2}, LIU Yong^{1,2}, LYU Jianfang^{1,2}, FENG Jiaying^{1,2}, ZHOU Jikui^{1,2}

(1. Institute of Resource Utilization and Rare Earth Development, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, Guangdong, China; 2. State Key Laboratory of Separation and Comprehensive Utilization of Rare Metals, Guangzhou 510650, Guangdong, China)

Abstract: A technique consisting of acid leaching, oxidative precipitation for impurity removal, and solvent extraction was adopted to effectively separate and recover nickel from high-nickel electroplating sludge, and then high-purity nickel sulfate hexahydrate was prepared. Firstly, the sludge was leached with sulfuric acid, and most of nickel, copper, iron and aluminum in the sludge were leached out in the leachate; then, hydrogen peroxide was added to the leachate for oxidation and precipitation to remove iron therein, and the suitable endpoint pH value was 3; after that, sodium sulfide with an appropriate excess coefficient of 1.2 was added to remove impurities therein, resulting in the precipitation rates of Fe and Cu reaching 99.43% and 98.13% respectively; by adjusting the pH value of the precipitated solution, nickel hydroxide was precipitated and then dissolved with sulfuric acid into nickel sulfate solution, which was extracted with P204 for deep removal of impurities. As a result, the secondary extraction rates of Cu, Fe and Al were up to 98.41%, 99.99% and 95.15% respectively, and the extraction rate of Ni was just 9.4%. The obtained raffinate was subjected to evaporation concentration, followed by cooling crystallization, and a nickel sulfate hexahydrate with purity exceeding 99.95% was finally prepared.

Key words: electroplating sludge; nickel; acid leaching; solvent extraction; impurity removal; nickel sulfate; iron removal; copper precipitation; aluminum removal

电镀及表面处理是我国一个基础性工业行业, 该行业会产生大量电镀废水^[1]。电镀废水中常存在铬、镍、铜等有毒重金属^[2-3], 随着电镀废水排入自然环境,

这些重金属会随着食物链进入人体, 引起人体慢性中毒^[4]。沉淀法处理电镀废水简单有效^[5-8], 但沉淀法处理电镀废水会产生电镀污泥, 全球每年产生的电镀

① 收稿日期: 2024-08-15

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC2904604); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2022A1515110853)

作者简介: 焦奥博(1996—), 男, 河南安阳人, 硕士, 主要研究方向为固体废弃物资源化处理。E-mail: 1320839605@qq.com

通信作者: 刘牡丹(1982—), 女, 湖南郴州人, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为资源综合利用与环境保护。E-mail: mudanhanyi@126.com

污泥在 100 万吨以上^[9]。电镀污泥重金属含量很高,被生态环境部列入《国家危险废物名录》^[10]中。利用技术手段降低或消除电镀污泥毒性并回收其中有价金属,不仅可以减少电镀污泥对人类和生态系统的危害,还能产生附加价值,促进资源的综合循环利用。

电镀污泥资源化处理方法^[11]有火法、湿法、微生物法等。其中火法包括焙烧、熔炼等,具有能耗高、金属回收能力低等缺点^[12]。微生物法^[13]由于细菌的适应性和稳定性等问题,尚限于实验室规模。湿法工艺包括酸浸法^[14]和氨浸法^[15],酸浸法使用范围广,原料廉价易得,是处理电镀污泥的常用方法。

溶剂萃取法^[16]是从溶液中分离回收金属的常用方法,具有操作简单、处理量大、便于连续操作、产品质量好等优点。P204 是一种有机磷酸萃取剂,在不同条件下可以有效分离溶液中的各种重金属^[17]。P204 在低镍萃取分离有着较多运用,而针对镍含量较高的原料应用研究较少。本文以硫酸浸出高镍污泥,然后经过沉淀除杂后得到粗氢氧化镍,再经硫酸溶解后利用 P204 萃取剂进一步除杂,得到的硫酸镍溶液经过蒸发浓缩-冷却结晶得到硫酸镍产品。该工艺实现了污泥中有价金属的有效分离,并制备了高附加值的硫酸镍产品,为高镍电镀污泥资源化利用提供新思路。

1 实验

1.1 实验原料

实验原料为淡绿色块状含镍污泥。将原料磨细后混匀、烘干后测得其中的主要金属元素含量如表 1 所示。由表 1 可知,污泥中 Ni 质量分数高达 29.55%,其他主要金属杂质有 Cu、Fe 和 Al。

表 1 含镍污泥主要金属元素含量(质量分数)

Table 1 Content of main metal elements in nickel-containing sludge			
			%
Ni	Cu	Fe	Al
29.55	1.51	4.14	3.29

实验用 98% 硫酸、30% 过氧化氢、氢氧化钠、氢氧化镍和硫化钠均为分析纯,P204 萃取剂和 260# 溶剂油稀释剂为工业级试剂。

1.2 工艺流程

高镍电镀污泥分离回收镍的工艺流程如图 1 所示。电镀污泥经硫酸浸出后得到浸出液;往浸出液中加入氢氧化钠调节 pH 值,以过氧化氢溶液中的二价铁,通过黄铜铁矾法沉铁;沉铁后液加入硫化钠沉淀铜。

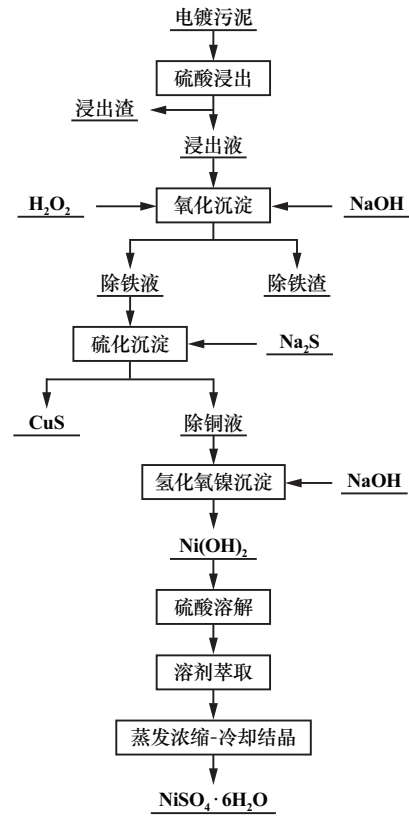
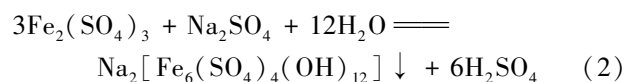
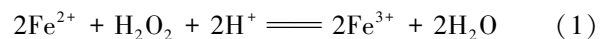


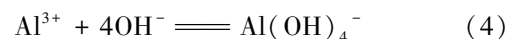
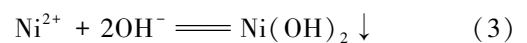
图 1 高镍电镀污泥分离回收镍工艺流程

Fig. 1 Process flow of separating and recovering nickel from high-nickel electroplating sludge

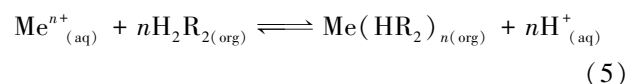
沉淀除铁过程发生的主要反应如下:



沉淀除杂后通过调节 pH 值将镍沉淀为粗氢氧化镍,铝则形成四羟基合铝酸根留在溶液中。此过程发生的主要反应为:



粗氢氧化镍经硫酸溶解后用 P204 萃取剂进一步深度去除铜、铁、铝等杂质,然后经蒸发浓缩-冷却结晶后得到硫酸镍晶体。萃取过程发生的主要反应为:



式中:Me 代表金属元素 (Fe、Cu、Al); H_2R_2 代表 P204 萃取剂。

1.3 分析与表征

采用比色法检测铝元素含量,采用原子吸收法检测其他金属元素含量。采用 X 射线衍射仪 (XRD) 对固体试样进行物相分析。

浸出过程各金属浸出率以渣计,计算公式为:

$$r_1 = \left(1 - \frac{m_s \times \omega_s}{m_m \times \omega_m} \right) \times 100\% \quad (6)$$

式中: r_1 为金属浸出率; m_s 为浸出渣质量,g; ω_s 为浸出渣中对应金属的质量分数; m_m 为原料质量,g; ω_m 为原料中对应金属的质量分数。

沉淀过程各金属的沉淀率以液计,计算公式为:

$$r_2 = \left(1 - \frac{c_2 \times V_2}{c_1 \times V_1} \right) \times 100\% \quad (7)$$

式中: r_2 为金属沉淀率; c_1 、 c_2 分别为沉淀前、后对应金属的浓度,mol/L; V_1 、 V_2 分别为沉淀前、后溶液体积,L。

萃取过程各金属的萃取率以水相计,计算公式为:

$$r_3 = \left(1 - \frac{c_4 \times V_4}{c_3 \times V_3} \right) \times 100\% \quad (8)$$

式中: r_3 为金属萃取率; c_3 、 c_4 分别为萃取前、后溶液中对应金属的浓度,mol/L; V_3 、 V_4 分别为萃取前、后溶液体积,L。

2 结果与讨论

2.1 污泥硫酸浸出

2.1.1 硫酸用量的影响

液固比 3:1、反应时间 2 h 条件下,硫酸用量对含镍污泥中 Ni、Cu、Fe、Al 浸出率的影响如图 2 所示。由图 2 可知,硫酸用量对各金属浸出率影响显著,Ni、Fe、Cu、Al 浸出率均随着硫酸用量增加而升高。硫酸用量 200 mL/kg 时,Ni、Fe、Cu、Al 基本完全浸出,此时浸出液 pH 值为 1.3。继续增加硫酸用量,浸出率变化不大。确定适宜的硫酸用量为 200 mL/kg。

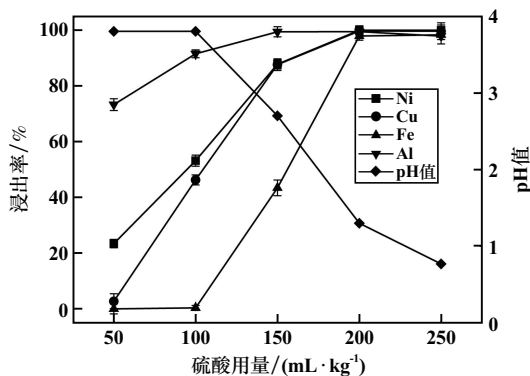


图 2 硫酸用量对 Ni、Cu、Fe、Al 浸出率的影响

Fig. 2 Influence of sulfuric acid dosage on leaching rates of Ni, Cu, Fe and Al

2.1.2 浸出液固比的影响

硫酸用量 200 mL/kg、浸出时间 2 h 条件下,考察了液固比对 Ni、Cu、Fe、Al 浸出率的影响,结果如图 3

所示。由图 3 可知,液固比对 Ni 和 Cu 浸出率影响较小,随着液固比增大,Ni 和 Cu 浸出率始终保持在较高水平。液固比增大,Al 浸出率略有上升,Fe 浸出率则呈现下降的趋势。增大液固比可以提高浸出液 pH 值,有利于 Fe 与 Ni 的分离,但同时也导致浸出液体积增加,后续处理量增加。因此,在保证浸出效果的前提下,液固比应尽量减小。适宜的污泥硫酸浸出液固比为 3:1。

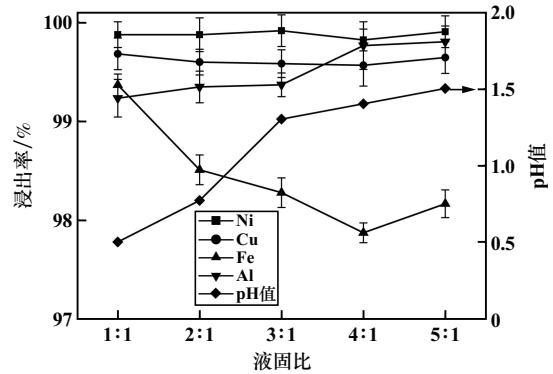


图 3 液固比对 Ni、Cu、Fe、Al 浸出率的影响

Fig. 3 Influence of liquid-solid ratio on leaching rates of Ni, Cu, Fe and Al

2.1.3 浸出时间的影响

硫酸用量 200 mL/kg、液固比 3:1 条件下,考察了浸出时间对 Ni、Cu、Fe、Al 浸出率的影响,结果如图 4 所示。由图 4 可知:不同浸出时间下 Ni、Cu、Fe 浸出率基本保持不变;Al 浸出率随着浸出时间增加先增加后保持不变,浸出时间大于 1 h 后,Al 浸出率趋于稳定。浸出时间较短可能会导致浸出渣与含 Ni 组分互相包裹,降低 Ni 浸出率。适宜的硫酸浸出时间为 1 h。

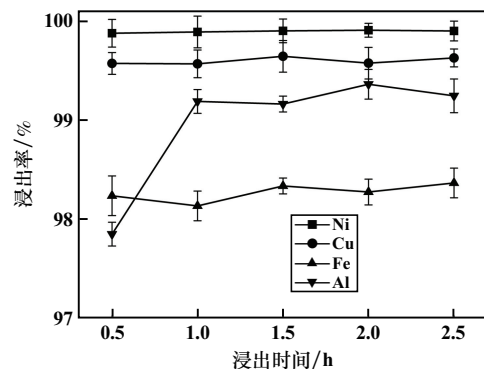


图 4 浸出时间对 Ni、Cu、Fe、Al 浸出率的影响

Fig. 4 Influence of leaching time on leaching rates of Ni, Cu, Fe and Al

2.1.4 浸出优化条件实验

在硫酸用量 200 mL/kg、液固比 3:1、浸出时间 1 h 的优化条件下,含镍污泥中 Ni、Cu、Fe、Al 浸出率分别

为 99.84%、99.39%、97.37%、99.60%，浸出渣 XRD 分析结果如图 5 所示。在优化条件下，Ni、Cu、Fe、Al 绝大部分浸出，浸出渣主要成分为 SiO_2 和钙铁铝石，少量铁和铝与污泥中的钙结合形成不溶物留在渣中。

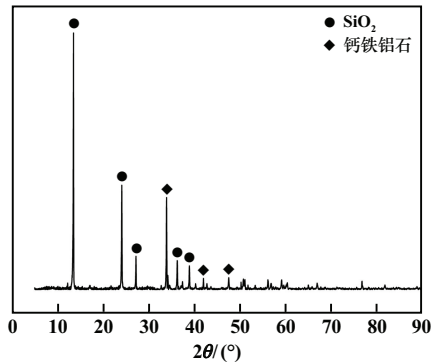


图 5 优化条件下硫酸浸出渣 XRD 图谱

Fig. 5 XRD pattern of sulfuric acid leaching residue under optimized condition

2.2 沉淀除杂

2.2.1 氧化沉淀除铁

以优化条件下硫酸浸出所得浸出液进行沉淀除杂试验。以过氧化氢溶液为氧化剂，通过氢氧化钠调节浸出液 pH 值，将铁以铁矾渣沉淀形式除去。在过氧化氢溶液过量系数 2.5、反应时间 0.5 h 条件下，考察了反应终点 pH 值对各金属沉淀率的影响，结果如图 6 所示。由图 6 可知，Fe 沉淀率随着沉淀终点 pH 值增加先增加后保持不变。浸出液中二价铁在氧化剂作用下转变为三价铁，终点 pH 值为 3 时，Fe 沉淀率为 96.03%，继续升高沉淀终点 pH 值，Fe 沉淀率稳定在 95% 左右。沉淀终点 pH 值较低时，Ni、Cu 和 Al 沉淀率均较低，沉淀终点 pH 值由 3 增至 4 时，Ni、Cu 和 Al 沉淀率均明显升高，原因是沉淀终点 pH 值增加，Al 离子形成氢氧化铝胶体并携带部分水分，这些水分难以通过过滤的形式

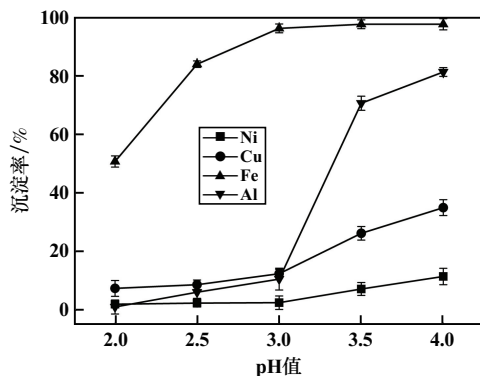


图 6 沉淀终点 pH 值对 Ni、Cu、Fe、Al 沉淀率的影响

Fig. 6 Influence of precipitation end point pH on precipitation rates of Ni, Cu, Fe and Al

完全分离，水分中溶解的 Ni 和 Cu 随着沉淀渣流失。为防止 Ni 进入沉淀损失，适宜的沉淀终点 pH 值为 3。

2.2.2 硫化沉淀除铜

利用硫化钠除去浸出液中的 Cu，在反应时间 1 h 条件下，考察了 Na_2S 过量系数对 Ni 和 Cu 沉淀率的影响，结果如图 7 所示。由图 7 可知，Cu 沉淀率随着 Na_2S 过量系数增加而增加， Na_2S 过量系数为 1.0 时， Na_2S 在反应过程中会生成硫化氢而损失，铜沉淀率较低。 Na_2S 过量系数提高至 1.2 时，Cu 沉淀率达到了 99.57%，继续增加 Na_2S 用量，Ni 沉淀率上升。适宜的 Na_2S 过量系数为 1.2。在该条件下，经过氧化沉淀除铁和硫化除铜，浸出液中 Ni、Cu、Fe、Al 质量浓度分别由 26.57、1.60、3.53、5.16 g/L 降至 24.82、0.03、0.02、1.97 g/L，Cu、Fe、Al 沉淀率分别为 98.13%、99.43%、61.82%，仅有 6.59% 的 Ni 进入沉淀。通过氧化沉淀除铁和硫化除铜可以有效分离浸出液中的 Fe、Cu 及部分 Al。

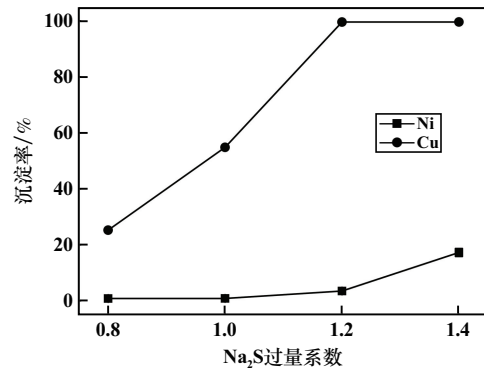


图 7 Na_2S 过量系数对 Ni 和 Cu 沉淀率的影响

Fig. 7 Influence of excess coefficient of Na_2S on precipitation rates of Ni and Cu

2.2.3 氢氧化镍沉淀

将沉淀除杂后浸出液 pH 值调至强碱性，以便在沉 Ni 的同时使 Al 溶于碱性溶液。反应时间 1 h 条件下，pH 值对 Ni 和 Al 沉淀率的影响如图 8 所示。由图 8 可知，随着 pH 值升高，Al 沉淀率降低，Ni 沉淀率呈现先增加后保持不变的趋势，pH 值升至 13 时，Ni 沉淀率达到 99.99%，Al 沉淀率仅 1.09%，Ni、Al 分离效果较好。氢氧化镍沉淀过程适宜的 pH 值为 13。此时沉淀的 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 水洗后 Ni、Cu、Fe、Al 金属质量分数分别为 48.00%、1.38%、0.17%、2.11%。

2.3 萃取深度除杂

$\text{Ni}(\text{OH})_2$ 用硫酸溶解后的溶液作为萃取的萃前液，其中 Ni、Cu、Fe、Al 金属质量浓度分别为 22.02、0.63、0.08、0.97 g/L。以 P204 为萃取剂、260# 溶剂油为稀释剂进行溶剂萃取。

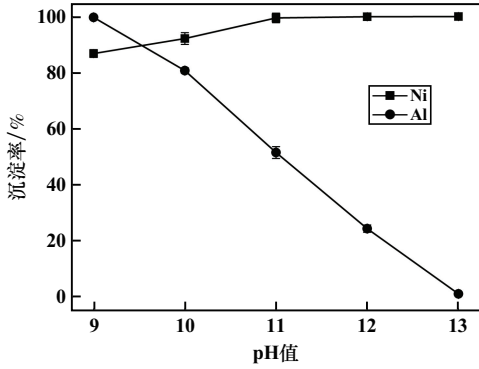


图8 pH值对Ni和Al沉淀率的影响

Fig.8 Influence of pH value on precipitation rates of Ni and Al

2.3.1 皂化率的影响

萃前液 pH 值为 4、萃取剂浓度(体积分数)30%、油水相比(O/A)2:1、萃取时间 5 min 条件下,皂化率对 Ni、Cu、Fe、Al 萃取率的影响如图 9 所示。由图 9 可知,随着萃取剂皂化率递增,Cu、Ni、Al 萃取率均呈现上升趋势,而 Fe 萃取率始终维持在 95%以上的高水平。不同皂化率条件下,Fe、Cu 有较好的萃取效果,但 Al 与 Ni 分离难度较大。因此,萃取前预先去除 Al 有助于提升后续产品的质量。皂化率 30%时,大部分 Fe 和 Cu 已成功进入有机相,仅有 19.64%的 Ni 进入有机相。适宜的皂化率为 30%。

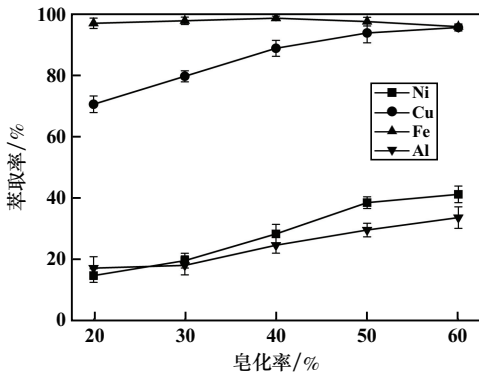


图9 皂化率对Ni、Cu、Fe、Al萃取率的影响

Fig.9 Influence of saponification rate on extraction rates of Ni, Cu, Fe and Al

2.3.2 萃前液 pH 值的影响

萃取剂体积分数 30%、皂化率 30%、油水相比(O/A)2:1、萃取时间 5 min 条件下,萃前液 pH 值对 Ni、Cu、Fe、Al 萃取率的影响如图 10 所示。由图 10 可知,pH 值 2.0 时,Fe 萃取率已达到极高水平,Cu、Ni、Al 萃取率相对较低;之后随着 pH 值增加,Fe 萃取率保持稳定,Cu、Ni、Al 萃取率持续上升。pH 值 3.5~4.0 时,Cu 萃取率显著提升至约 80%,Al 萃取率增加至约 40%,Ni

萃取率维持在 25%左右。此时,Ni 与杂质元素的分离效果较好。综合考虑各金属萃取率和分离效果,适宜的 pH 值范围为 3.5~4.0。

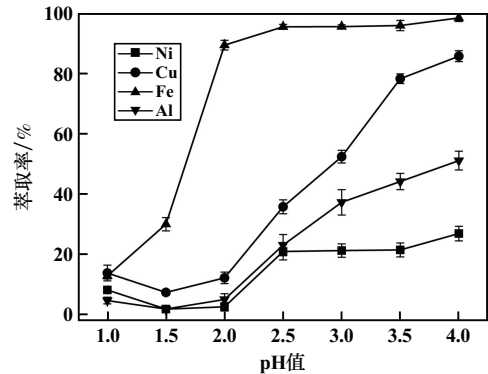


图10 萃前液 pH 值对 Ni、Cu、Fe、Al 萃取率的影响

Fig.10 Influence of pH value of pre-extraction solution on extraction rates of Ni, Cu, Fe and Al

2.3.3 萃取相比的影响

萃前液 pH 值 4、萃取剂体积分数 30%、皂化率 30%、萃取时间 5 min 条件下,O/A 相比对 Ni、Cu、Fe、Al 萃取率的影响如图 11 所示。由图 11 可知,各金属萃取率随着 O/A 相比增加呈现先增加后趋于稳定的趋势,相比 1/1 时,Fe 和 Cu 萃取率达到峰值,继续增加相比并不会显著提升这两种金属的萃取率。Al 萃取率在相比增加到 2/1 后基本保持不变。综合考虑萃取效果和工艺成本,适宜的 O/A 相比为 2/1。

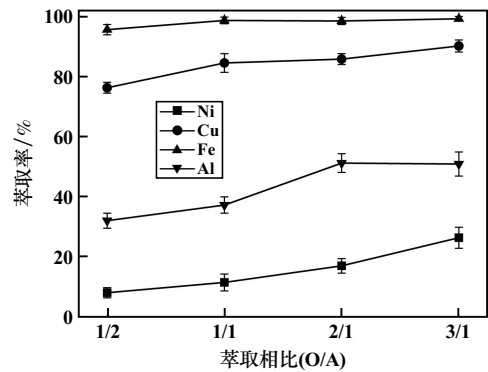


图11 O/A 相比对 Ni、Cu、Fe、Al 萃取率的影响

Fig.11 Influence of O/A ratio on extraction rates of Ni, Cu, Fe and Al

2.3.4 萃取优化条件实验

在 pH 值 4、皂化率 30%、萃取 O/A 相比 2/1 的优化条件下对萃前液进行二级摇瓶萃取,萃取后液 Ni、Cu、Fe、Al 金属质量浓度分别为 19.95 g/L、0.01 g/L、0.01 mg/L、0.047 g/L,Cu、Fe、Al 萃取率分别达到了 98.41%、99.99%、95.15%,Ni 萃取率仅 9.4%,实现了

Ni 与杂质金属的深度分离。

2.4 硫酸镍制备

经过萃取深度除杂后的硫酸镍溶液在除油后可通过蒸发浓缩、冷却结晶的方式制备硫酸镍。在 100 ℃ 的加热条件下将溶液蒸发浓缩 10 倍,冷却结晶后得到硫酸镍晶体,其中 Ni、Fe、Cu、Al 质量分数分别为 22.03%、0.001 9%、0.019%、0.023%。硫酸镍晶体 XRD 图谱如图 12 所示,图中仅见硫酸镍的峰,没有其他杂峰,结晶产品为纯的六水合硫酸镍。利用差减法计算得,硫酸镍晶体纯度大于 99.95%。

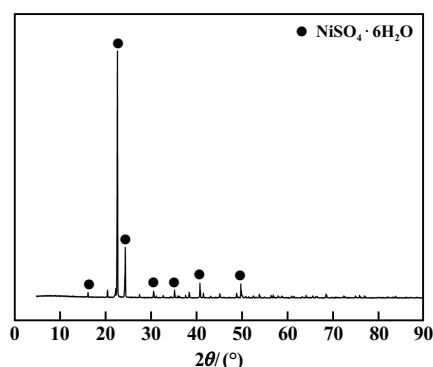


图 12 结晶硫酸镍 XRD 图谱

Fig. 12 XRD pattern of crystalline nickel sulfate

3 结论

1) 电镀污泥硫酸浸出的优化条件为:液固比 3:1、硫酸用量 200 mL/kg、浸出时间 1 h,此时 Ni、Cu、Fe、Al 浸出率分别为 99.84%、99.39%、97.37%、99.60%。

2) 沉淀除杂优化条件为:氧化沉淀除铁适宜的终点 pH 值为 3、硫化沉淀除铜硫化钠过量系数 1.2、氢氧化镍沉淀 pH 值 13。经过氧化沉淀和硫化沉淀,Cu、Fe 和 Al 沉淀率分别达到了 98.13%、99.43% 和 61.82%,有效分离浸出液中的 Fe、Cu 及部分 Al。

3) P204 萃取深度除杂的优化条件为:pH 值 4、皂化率 30%、萃取 O/A 相比 2/1,此条件下二级萃取后 Cu、Fe、Al 萃取率分别达到了 98.41%、99.99%、95.15%,实现了 Ni 与杂质金属的深度分离。除杂后液经过蒸发浓缩-冷却结晶,得到纯度大于 99.95%的六水合硫酸镍。

参考文献 (References):

[1] 郭澄. 电镀废水治理和回用技术研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2024,5(2):5-7.
GUO Cheng. Research on treatment and reuse technology of electroplating wastewater[J]. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2024,5(2):5-7.

[2] LUO Z J, HONG Y X, QU L L, et al. Decomplexation of copper

complexes from synthetic and real electroplating wastewater by alkaline-thermal synergistic activation of persulfate and stabilization of generated sludge by Fe₃O₄ coating[J]. Chemical Engineering Journal, 2024,484:149323.

- [3] LIU G B, WEI C H, LIU T, et al. Electroplating wastewater treatment and resource recovery via a hybrid process of stepwise alkalization, Fenton, and chlorination[J]. Separation and Purification Technology, 2024,339:126658.
- [4] 周婷婷,刘子熙. 含重金属电镀废水的治理对策探析[J]. 皮革制作与环保科技, 2023,4(21):25-27.
ZHOU Tingting, LIU Zixi. Study on treatment of electroplating wastewater containing heavy metals[J]. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2023,4(21):25-27.
- [5] 郭小义. 沉淀/吸附法在电镀废水重金属处理中的应用[J]. 化工设计通讯, 2022,48(9):47-48.
GUO Xiaoyi. Application of precipitation/adsorption method in heavy metal treatment of electroplating wastewater[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2022,48(9):47-48.
- [6] 梁智聪. 电镀废水处理技术研究进展[J]. 山东化工, 2021,50(22):77-79.
LIANG Zhicong. Treatment and research progress of electroplating wastewater[J]. Shandong Chemical Industry, 2021,50(22):77-79.
- [7] Verma B, Balomajumder C. Hexavalent chromium reduction from real electroplating wastewater by chemical precipitation[J]. Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia, 2020,34(1):67-74.
- [8] LIU Y, DING W W, ZHANG Y Z, et al. A comparative study of nickel(II) removal from electroplating wastewater by pre-precipitation combined with Fenton-precipitation or Fenton-like-precipitation[J]. Desalination and Water Treatment, 2020,182:220-224.
- [9] LU H W, YU S. Spatio-temporal variational characteristics analysis of heavy metals pollution in water of the typical northern rivers, China[J]. Journal of Hydrology, 2018,559:787-793.
- [10] 国家危险废物名录(2021年版)[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2021(4):18-46.
National List of Hazardous Wastes(2021)[J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2021(4):18-46.
- [11] 朱佳天,赖夏鹏,孙盼,等. 电镀污泥资源化治理技术现状及发展趋势[J]. 环境科学与技术, 2023,46(增刊1):184-191.
ZHU Jiatian, LAI Xiapeng, SUN Pan, et al. The status and development trend of electroplating sludge resource treatment technology[J]. Environmental Science & Technology, 2023,46(S1):184-191.
- [12] 王琛. 富氧侧吹熔池熔炼-氧气流吹连续处理含铜电镀污泥与含铜物料工艺路线[J]. 绿色矿冶, 2023,39(6):27-32.
WANG Chen. The comprehensive utilization process of copper-containing electroplating sludge and copper-containing materials by oxygen-enriched side-blown submerged combustionsmelting and oxygen bottom blown continuously converting[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2023,39(6):27-32.
- [13] 周华赞,陆璠. 电镀污泥中的有价金属生物淋滤资源化回收技术[J]. 广东化工, 2023,50(4):135-136.
ZHOU Huayun, LU Fan. Recycling technology of valuable metals from electroplating sludge by bioleaching process[J]. Guangdong Chemical Industry, 2023,50(4):135-136.

(下转第 102 页)

- [9] 任相宇,刘少葵,刘勇奇,等.磷酸铁前驱体制备方法研究进展[J].矿冶工程,2022,42(3):92-95.
REN Xiangyu, LIU Shaokui, LIU Yongqi, et al. Technical progress in preparation of iron phosphate precursor[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(3):92-95.
- [10] 施春红,张喜玲,杨春雪.磷酸盐分步沉淀不锈钢酸洗污泥浸出液铬铁镍[J].化工进展,2021,40(11):6378-6384.
SHI Chunhong, ZHANG Xiling, YANG Chunxue, et al. Selective separation of Cr-Fe-Ni by phosphate precipitation from stainless steel pickling sludge leaching solution[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021,40(11):6378-6384.
- [11] 肖超,曾理,李义兵,等.磷酸盐沉淀法除铁过程热力学分析[J].中国有色金属学报,2018,28(3):637-643.
XIAO Chao, ZENG Li, LI Yibing, et al. Thermodynamic analysis on removing iron by phosphate precipitation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018,28(3):637-643.
- [12] 湛金,李鹏.用磷酸盐从硫化镍矿石浸出液中除铁试验研究[J].湿法冶金,2022,41(4):355-358.
ZHAN Jin, LI Peng. Removal of ferric from nickel sulfide ore leachate using phosphate[J]. Hydrometallurgy of China, 2022,41(4):355-358.
- [13] 胡美世.镍钴铁粉浸出-净化-沉淀制备磷酸铁和氢氧化镍钴研究[D].长沙:中南大学,2024.
HU Meishi. Preparation of FePO_4 and mixed hydroxide of nickel and cobalt from Ni-Co-Fe powder by leaching-purification-precipitation [D]. Changsha: Central South University, 2024.
- [14] HG/T 4701—2021.电池用磷酸铁[S].
HG/T 4701—2021. Iron Phosphate for Battery[S].
- 引用本文:胡美世,陈靖,罗骏,等.富镍钴铁浸出液除杂及磷酸铁制备研究[J].矿冶工程,2025,45(1):97-102.
HU Meishi, CHEN Jing, LUO Jun, et al. Purification of nickel-cobalt-iron rich leachate and preparation of iron phosphate[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(1):97-102.

(上接第91页)

- [14] ZHENG J Y, ZHENG Z Q, LI L, et al. Acid-leaching mechanism of electroplating sludge: based on a comprehensive analysis of heavy-metal occurrence and the dynamic evolution of coexisting mineral phases[J]. Environmental science and pollution research international, 2023,30(53):113600-113608.
- [15] SALHI. Recovery of nickel and copper from metal finishing hydroxide sludges by ammoniacal leaching[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2010,119(3):147-152.
- [16] 宋强,童雄,谢贤,等.溶剂萃取法分离提取镍和钴的研究现状及展望[J].中国有色金属学报,2023,33(6):1957-1971.
SONG Qiang, TONG Xiong, XIE Xian, et al. Research status and prospect of separation and extraction of nickel and cobalt by solvent extraction[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023,33(6):1957-1971.
- [17] 马玉翔,李玲,王海瑜,等.皂化 P204、P507 对电镀含镍废水中镍离子萃取性能探究[J].山东化工,2023,52(24):27-28.
MA Yuxiang, LI Ling, WANG Haiyu, et al. Study on nickel extraction properties from electroplating wastewater by saponified P204 and P507[J]. Shandong Chemical Industry, 2023,52(24):27-28.
- 引用本文:焦奥博,刘牡丹,吕先谨,等.高镍电镀污泥中镍的分离与硫酸镍的制备研究[J].矿冶工程,2025,45(1):86-91.
JIAO Aobo, LIU Mudan, LYU Xianjin, et al. Separation of nickel from high-nickel electroplating sludge and preparation of nickel sulfate [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(1):86-91.

(上接第96页)

- [10] GUO W, WU J, LIU X, et al. Raman and X-ray photoelectron spectroscopy study on the influence of La_2O_3 on the melt structure of SiO_2 -CaO- Al_2O_3 -MgO[J]. Ceramics International, 2022,48(18):25933-25939.
- [11] MCMILLAN P. A Raman spectroscopic study of glasses in the system CaO-MgO- SiO_2 [J]. American Mineralogist, 1984,69:645-659.
- [12] MYSEN B O, FRANTZ J D. Raman spectroscopy of silicate melts at magmatic temperatures: Na_2O - SiO_2 , K_2O - SiO_2 and Li_2O - SiO_2 binary compositions in the temperature range 25~1475 °C [J]. Chemical Geology, 1992,96:321-332.
- [13] MYSEN B O, FRANTZ J D. Structure of silicate melts at high temperature: In-situ measurements in the system BaO- SiO_2 to 1669 °C [J]. American Mineralogist, 1993,78:699-709.
- [14] LI Q, YANG S, ZHANG Y, et al. Effects of MgO, Na_2O , and B_2O_3 on the viscosity and structure of Cr_2O_3 -bearing CaO- SiO_2 - Al_2O_3 slags[J]. ISIJ International, 2017,57(4):689-696.
- [15] 李倩倩,吴婷,杨文,等.碱度对精炼渣理化性能及磷元素迁移的影响[J].炼钢,2022,38(3):20-25.
LI Qianqian, WU Ting, YANG Wen, et al. Effect of basicity on physicochemical properties and phosphorus migration of refined slag [J]. Steelmaking, 2022,38(3):20-25.
- [16] FAN L, LIU C, JIANG M. Viscosity and its correlation to the ionic structure of CaO- Al_2O_3 - B_2O_3 slags with various La_2O_3 additions[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2022,53(2):1295-1307.
- [17] WANG Z, SOHN I. Influence of the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ mass ratio and gas composition on the viscous behavior and structure of Cr-containing stainless steel slags[J]. Ceramics International, 2020,46:903-912.
- 引用本文:赵付恒,辛文彬,邓永春,等.二元碱度对 CaO- SiO_2 - Al_2O_3 - CeO_2 - La_2O_3 渣系黏度和熔渣结构的影响[J].矿冶工程,2025,45(1):92-96.
ZHAO Fuheng, XIN Wenbin, DENG Yongchun, et al. Effect of binary basicity on viscosity and structure of CaO- SiO_2 - Al_2O_3 - CeO_2 - La_2O_3 slag [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(1):92-96.