

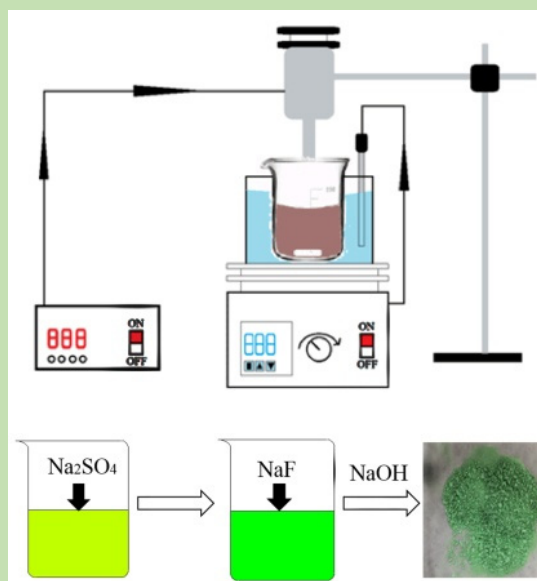
Impurity removal from leaching solution of laterite nickel ore and preparation of nickel hydroxide

Chaoqun NIE^{1,2}, Xubin WANG², Bo LI^{1,2*}, Yonggang WEI¹, Hua WANG²

1. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China
2. Engineering Research Center of Metallurgical Energy Conservation & Emission Reduction, Ministry of Education, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650000, China

Abstract: With sulphuric acid leaching solution of low-grade silicon–magnesium nickel laterite ore as raw material, iron was removed by jarosite precipitation, magnesium was removed using sodium fluoride, nickel was precipitated and neutralized from the leaching solution. The effects of different factors on the removal rates of iron and magnesium, and the loss rate and extraction rate of nickel were investigated. The results demonstrated that after oxidative pretreatment of the leaching solution by adding 4 mL/L hydrogen peroxide solution, the removal rate of iron reached 92.1%, the loss rate of nickel was 6.7%, and the main phase in the residue was jarosite $[\text{Na}_2\text{Fe}_6(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{12}]$ with Na_2SO_4 as sodium source for iron removal, solution pH controlled within 1.6~2.2 and reaction time of 1.5 h. After iron removal, magnesium ions in the filtrate were removed using sodium fluoride. Under the best conditions of stirring speed 300 r/min, solution pH 5.5~6.0 and addition of sodium fluoride 25 g/L, the removal rate of magnesium reached 90.9%, and the loss rate of nickel was 6.8%. After the removal of impurities, nickel in the purified solution was extracted by neutralization and hydrolysis with NaOH as precipitating agent. At room temperature, addition of 8 g/L NaOH, extraction rate of neutralized and precipitated nickel was 95.1%. Nickel hydroxide products with purity of 99.5%, with an overall recovery rate of nickel of 82.70%. The removal of impurity elements in the leachate and the extraction of valuable metal nickel are realized, which provides technical support for the efficient utilization of the silico–magnesium type laterite nickel ore.

Key words: silica–magnesium type laterite nickel ore; leaching solution; miscellaneous; neutralizing nickel



收稿: 2018-11-14, 修回: 2018-12-26, 网络发表: 2019-01-25, Received: 2018-11-14, Revised: 2018-12-26, Published online: 2019-01-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51764035); 云南省重点研发计划-国际科技合作专项基金资助项目(编号: 2018IA055)

作者简介: 聂超群(1994-), 男, 江西省高安市人, 硕士研究生, 有色金属冶金专业, E-mail: 1432174897@qq.com; 李博, 通讯联系人, Tel: 15987127468, E-mail: libokmust@163.com.

引用格式: 聂超群, 王旭滨, 李博, 等. 红土镍矿浸出液除杂制备氢氧化镍. 过程工程学报, 2019, 19(4): 721-727.

Nie C Q, Wang X B, Li B, et al. Impurity removal from leaching solution of laterite nickel ore and preparation of nickel hydroxide (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2019, 19(4): 721-727, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.218309.

红土镍矿浸出液除杂制备氢氧化镍

聂超群^{1,2}, 王旭滨², 李博^{1,2*}, 魏永刚¹, 王华²

1. 昆明理工大学省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南 昆明 650093

2. 昆明理工大学冶金节能减排教育部工程研究中心, 云南 昆明 650000

摘要: 以低品位硅镁型红土镍矿硫酸浸出液为原料, 用黄钠铁矾[Na₂Fe₆(SO₄)₄(OH)₁₂]除铁、NaF 除镁、中和沉镍, 考察了不同因素的影响。结果表明, 添加 4 mL/L 双氧水对浸出液氧化预处理、用 Na₂SO₄ 为除铁钠源、控制溶液 pH 为 1.6~2.2、反应时间 1.5 h 的条件下, 铁去除率达 92.1%, 镍损失率为 6.7%, 滤渣主相为 Na₂Fe₆(SO₄)₄(OH)₁₂; 除铁后滤液用 NaF 除去镁离子, 最优条件为搅拌速率 300 r/min、溶液 pH=5.5~6.0 及 NaF 用量 25 g/L, 镁去除率达 90.9%, 镍损失率为 6.8%; 除杂后净化液用中和水解法提镍, 在室温下添加 8 g/L NaOH 为沉镍剂, 中和沉镍提取率达 95.1%, 得到纯度 99.5%的 Ni(OH)₂ 产品, 镍的综合回收率为 82.70%。

关键词: 硅镁型红土镍矿; 浸出液; 除杂; 中和沉镍

中图分类号: TF815

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2019)04-0721-07

1 前言

随着硫化镍矿大量开发利用, 目前已不能满足生产需要。红土镍矿具有资源丰富、采矿成本低的特点, 其开发利用成为研究热点^[1]。红土镍矿一般采用常压硫酸浸出^[2]、加压硫酸浸出^[3,4]、硫酸焙烧-浸出^[5-7]等湿法处理, 但产生的硫酸盐溶液含大量铁和镁, 脱除杂质、获得高纯含镍产品是该工艺推广应用的关键。湿法处理红土镍矿浸出液中有价金属的高效提取对我国红土镍矿的经济开发和合理利用具有重大的现实意义。

近年来, 对红土镍矿采用常压酸浸、加压硫酸浸出、硫酸焙烧-浸出等湿法冶金方法提镍已有大量研究, 而对浸出液中杂质元素的脱除报道较少^[8-10]。孙常永等^[11]采用磷酸铁法对深海粘土硫酸浸出液除铁, 考察了磷酸用量、终点 pH、沉铁温度等因素的影响, 该方法具有反应快、易过滤等优点, 除铁率达 94.77%。王洪刚等^[12]用过氧化锌焙砂沉淀回收开路溶液中的锌, 镁留在溶液中, 镁去除率达 80%, 达到除镁目的。孙千鸿^[13]研究去除工业 NiSO₄ 中的铁、钙、镁等杂质, 添加双氧水和中和剂 NiCO₃ 净化铁杂质, 添加沉淀剂 NH₄F 和中和剂 NiCO₃ 去除钙镁杂质, 铁去除率约为 97%, 镁去除率达 90%。牟文宁等^[14]以红土镍矿酸浸废水为原料, 采用氧化-中和水解法沉淀铁, 用 Ca(OH)₂ 沉镍制备无机填料, 为红

土镍矿酸浸废水中有价金属的回收利用提供了依据。Patnaik 等^[15]采用酸浸法从废镍催化剂中回收制备纤维状 Ni(OH)₂, 在 90 °C 下用 1 mol/L 硫酸浸没废镍催化剂, 回收效果良好。周晓文等^[16]用黄钠铁矾 [Na₂Fe₆(SO₄)₄(OH)₁₂] 去除铁离子, 去除率达 99%, 用 NaF 去除镁离子, 去除率达 90%, 但镍损失率较高, 2 个阶段镍离子损失率分别为 15% 和 5%, 镍综合回收率较低。

本研究以硅镁型红土镍矿硫酸浸出液为研究对象, 用黄钠铁矾除铁, 除铁滤液用 NaF 除镁, 除杂后净化液用中和水解法提镍, 铁、镁去除率比传统方法高, 且镍损失率小, 实现了浸出液中杂质元素的脱除和有价金属镍的提取, 为硅镁型红土镍矿高效利用提供技术支持。

2 实验

2.1 实验原料

红土镍矿取自云南省元江县, 常压硫酸浸出后, 对浸出液进行化学成分分析, 结果如表 1 所示。铁离子、镁离子和少量的重金属离子(Cu, Zn, Al, Cr)是浸出液中主要的杂质离子, 这些杂质离子的存在会影响后续产品的质量, 所以应考虑除去溶液中的铁离子和镁离子, 其它金属离子量很少, 不会影响产品质量。

表 1 浸出液的化学成分

Table 1 Chemical composition of leaching solution

Metal ion	Ni	Fe	Co	Mg	Cu	Zn	Al	Cr
Content/(g/L)	1.56	15.37	0.047	28.85	0.0096	0.0067	0.0042	0.0027

2.2 实验方法

图1为红土镍矿浸出液除杂、沉镍工艺流程。将300

mL pH=1.2的浸出液置于烧杯中, 加入浓度30%的 H₂O₂ 搅拌, 静置10 min 待其充分反应后, 放入电热恒

温水浴锅中, 设定温度为90℃, 以190 r/min转速搅拌。85℃时加入少量黄钠铁矾晶种和无水硫酸钠, 溶液pH值会随黄钠铁矾不断析出而下降, 向溶液中滴加MgO乳液, 控制pH=1.6~2.0。至溶液pH值不再下降, 表明Fe³⁺已基本除去。除铁后对物料减压抽滤, 滤液存留, 定容至350 mL, 分析其成分。取除铁后的净化液250

mL, 置于500 mL烧杯中, 放入65℃的电热恒温水浴锅中, 调整搅拌速率为300 r/min, 控制溶液pH=5.5~6.0。温度达到60℃时, 加入NaF除镁, 反应结束后将净化液定容至300 mL, 分析其成分。以NaOH为沉淀剂, 加入净化液中沉镍, 实验结束后, 用双层滤纸定性中速减压抽滤, 分析滤液中镍含量, 滤饼干燥、称重。

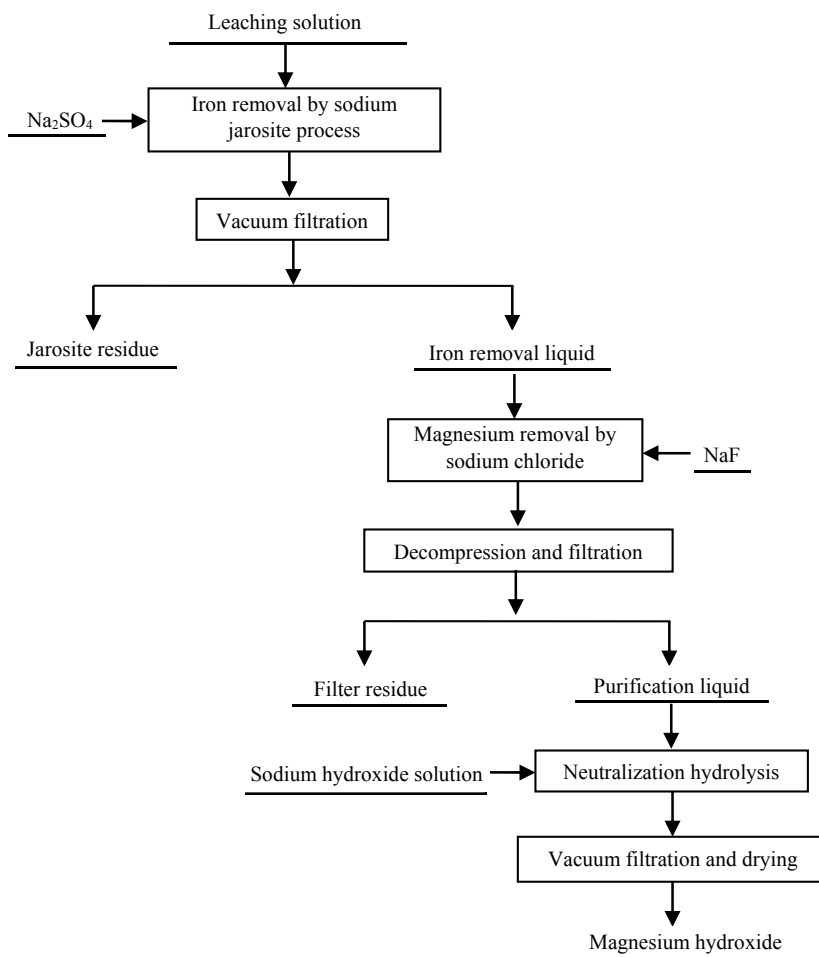


图1 红土镍矿浸出液除杂沉镍工艺流程

Fig.1 Flowsheet of removing impurities and precipitating nickel from leaching solution of laterite nickel ore

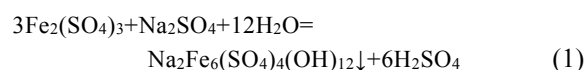
3 结果与讨论

3.1 黄钠铁矾除铁

针铁矿法、中和水解法和黄钠铁矾法是常用的除铁方法。针铁矿法除铁要求溶液中Fe³⁺浓度较低。先用中和剂调节pH值至3.0~4.5, 再加入氧化剂在较高温度下使Fe²⁺缓慢氧化, 形成FeOOH(羟基氧化铁)沉淀, 经固液分离去除。该方法的缺点是操作复杂、反应太慢, 不利于工业化生产。中和水解法是通过形成氢氧化物沉淀过滤除铁, 具体操作是调节溶液pH值使形成Fe(OH)₃胶体, 胶体不易过滤, 但易吸附溶液中的有价金属离子, 降低镍和钴回收率。黄钠铁矾法的优点是除铁速度快、

易形成颗粒大的铁矾渣、能过滤洗涤, 不会造成溶液中其它金属离子损失。黄钠铁矾渣高温热解水洗后可得到有价铁精矿, 是一种非常经济环保的处理残渣的方式。

红土镍矿硫酸浸出液以Na₂SO₄为钠源除铁, 发生如下主要反应^[16]:



黄钠铁矾法除铁的pH值应控制在约2.0, pH>2.3时Fe³⁺会发生水解反应^[17]。随反应进行, 溶液中不断有硫酸生成, 溶液pH值逐渐降低, 为维持pH在一定范围, 应添加中和剂中和产生的硫酸。综合考虑采用

轻质 MgO 为中和剂。从式(1)可看出,当钠源为 Na₂SO₄ 时需按[Na₂SO₄]/[Fe³⁺]=1:6 的比例加入。黄钠铁矾法除铁温度越高越好,应不低于 80℃,但在常压下溶液最高温度不能超过 100℃。反应过程中,溶液的 pH 值会逐渐降低,向溶液中缓慢滴加 MgO 乳液^[18]控制 pH 为 1.6~2.2,不能大于 2.5。当溶液 pH 值不再变化时,表明 Fe³⁺已基本被除去,结束反应。

3.1.1 温度的影响

搅拌转速 190 r/min 及 pH=1.6~2.2、反应时间 1.5 h 的条件下除铁后,滤液中 Fe 和 Ni 离子浓度见表 2。

表 2 除铁后滤液中 Fe 和 Ni 离子浓度
Table 2 Concentrations of Fe and Ni ions in filtrate after iron removal

Temperature/℃	80	85	90	95
Fe ion concentration/(g/L)	3.4	2.19	1.95	1.87
Ni ion concentration/(g/L)	1.1	1.04	1.08	1.06

除铁效果及镍损失率如图 2 所示,可以看出,用 Na₂SO₄ 作钠源除铁效果较好,且温度越高效果越好。pH 控制在 1.6~2.2 时镍损失率也大幅降低^[19]。为降低成本,取 90℃作为除铁反应的最佳温度。但 95℃时铁去除率为 83%,仍有 17%的铁未被除去,这是由于除三价铁外还有其它价态的铁离子存在。后续实验在去除铁前应先将溶液中的铁全部氧化成三价铁^[20]。

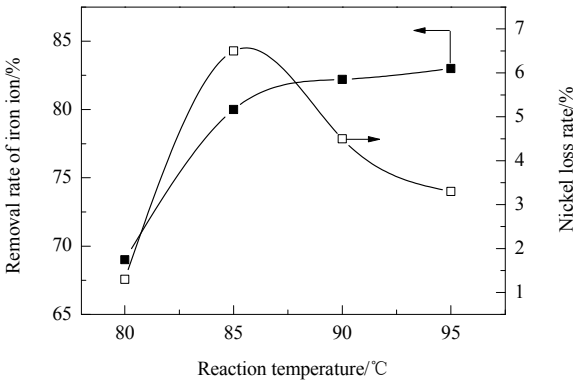


图 2 不同温度下的铁去除率及镍损失率
Fig.2 Removal rate of iron ion and nickel loss rate at different temperatures

3.1.2 双氧水用量的影响

在温度 90℃、搅拌转速 190 r/min 及 pH=1.6~2.0、反应时间 1.5 h 的条件下,加入 H₂O₂ 除铁后滤液 Fe 和 Ni 离子浓度如表 3 所示。

加入 H₂O₂ 处理后的除铁效果及镍损失率如图 3 所示。从图可看出,加入双氧水预处理后,用黄钠铁矾除铁效率提高,但 H₂O₂ 用量超过 4 mL/L 后,镍损

表 3 加入 H₂O₂ 预处理除铁后滤液 Fe 和 Ni 离子浓度
Table 3 Concentrations of ions of Fe and Ni in filtrate after removal iron with H₂O₂ pretreatment

Addition of H ₂ O ₂ /(mL/L)	1	2	3	4	5
Fe ion concentration/(g/L)	1.98	1.72	1.14	0.87	0.69
Ni ion concentration/(g/L)	1.09	1.05	1.02	1.04	0.94

失率变大, H₂O₂ 用量为 5 mL/L 时,虽然铁去除率高达 93.6%,镍损失率也达 14.8%。为保持较高除铁率同时减小镍损失,确定 H₂O₂ 用量为 4 mL/L。先加入 H₂O₂ 进行预处理,再加入黄钠铁矾除铁,铁去除率为 92.1%,镍损失率为 6.7%。

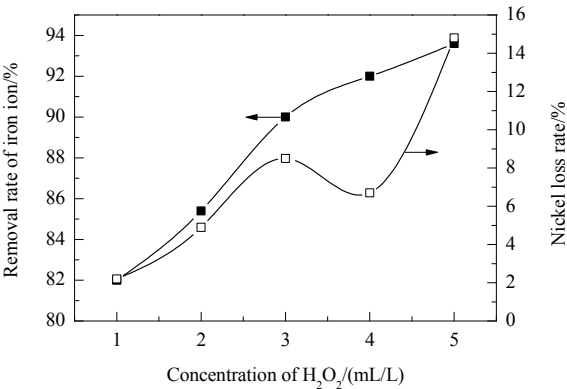


图 3 H₂O₂ 预处理后铁去除率和镍损失率
Fig.3 Removal rate of iron ion and nickel loss rate after pretreatment with H₂O₂

除铁滤液呈浅绿色,滤渣呈淡黄色。滤渣的 XRD 谱如图 4 所示,可知主相为黄钠铁矾。

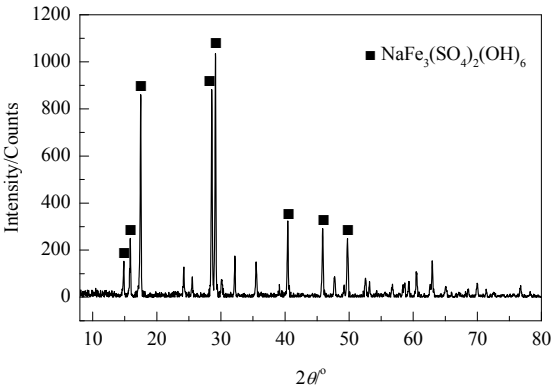


图 4 除铁滤渣的 X 射线衍射谱
Fig.4 XRD pattern of filter residue after removal iron

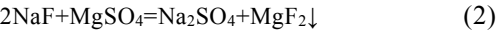
3.2 NaF 去除杂质镁

黄钠铁矾除铁后,滤液的化学成分如表 4 所示。

表 4 除铁后滤液的化学成分
Table 4 Chemical composition of filtrate after iron removal

Metal ion	Ni	Fe	Co	Mg
Content/(g/L)	1.46	1.21	0.032	27.64

镍氟化物和镁氟化物溶度积差异较大, 可用 NaF 净化浸出液除镁^[20]。用 NaF 在硫酸盐体系中能较好地分离镁离子和其它金属离子。NaF 与溶液中的镁离子发生化学反应, 生成难溶 MgF_2 沉淀物, 去除杂质元素镁。反应式如下:



3.2.1 溶液 pH 的影响

影响浸出液中镁离子去除的最主要因素是反应

体系的 pH 值。在温度 65℃、搅拌转速 300 r/min 及 NaF 浓度 20 g/L、反应时间 30 min 的条件下, pH 值对除镁效果的影响如图 5 所示。从图可以看出, 随溶液 pH 值升高, 净化液中的镁离子浓度逐渐降低, 镁去除率升高, 但 pH>6.0 后镁离子浓度降幅不明显, 表明继续提高 pH 值对镁离子去除率的影响不大, 而镍损失率却逐渐增大。综合考虑镁离子去除率和镍损失率, 应控制反应体系的 pH 值在 5.5~6.0。

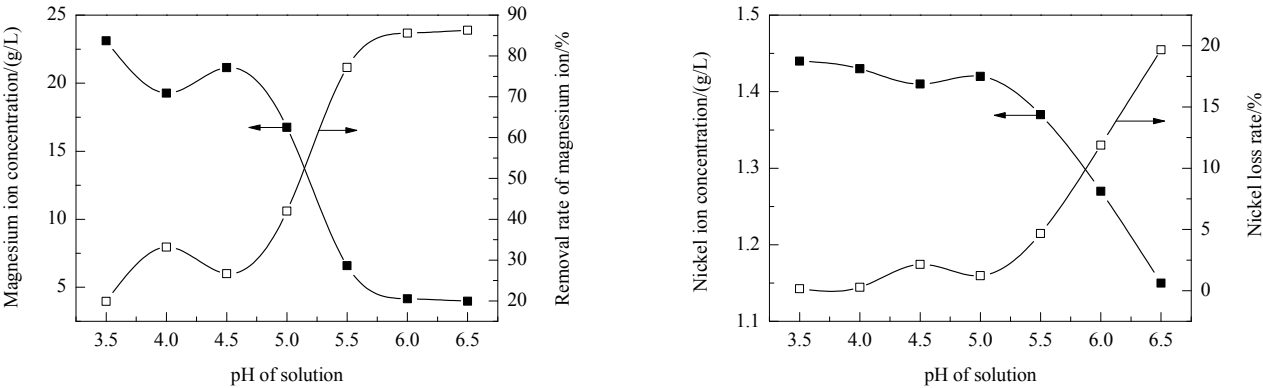


图 5 溶液体系 pH 对镁去除率和镍损失率的影响
Fig.5 Effects of pH of solution on removal rate of magnesium ion and nickel loss rate

3.2.2 NaF 用量的影响

NaF 是直接参与除杂的反应物质, 从化学平衡角度, 原料比会影响平衡转化率; 从化学动力学角度, 反应物表面积及浓度都会影响多相反应速率。NaF 用量过少杂质无法除净, 用量过多又会增加原料消耗, 造成浪费, 还会增加镁渣量, 加大镍损失^[21]。

在温度 65℃、搅拌转速 300 r/min、溶液 pH=5.5~6.0、反应时间 30 min 的条件下, NaF 用量对除镁效果的影响如图 6 所示。从图可看出, NaF 对溶液中镁离子去除有促进作用, 其用量高于 25 g/L 后镁离子去

除效果基本稳定, 表明该 NaF 用量能满足去除镁离子的要求。因此确定 NaF 用量为 25 g/L, 此时镁去除率达 90.9%。

3.3 净化液提镍

3.3.1 净化液成分分析

除铁镁后净化液的成分如表 5 所示, 可以看出, 净化液主要成分为镍、铁、镁。

表 5 净化液的化学成分
Table 5 Chemical composition of the purification liquid

Metal ion	Ni	Fe	Co	Mg
Content/(g/L)	1.36	1.18	0.026	2.93

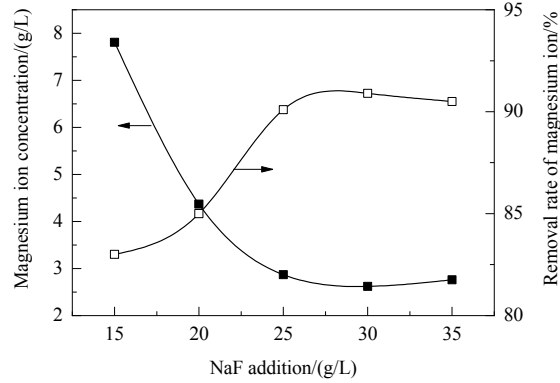


图 6 NaF 用量对镁去除率的影响
Fig.6 Effect of NaF addition on removal rate of magnesium ion

3.3.2 净化液提镍

室温(25℃)下滴加 NaOH 调节溶液 pH 至 7.5~8.9, NaOH 用量对镍提取率的影响如图 7 所示。可以看出, 随 NaOH 浓度增加, 产生的 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 沉淀越多, 镍提取率提高。但 NaOH 浓度大于 8 g/L 后对镍提取率影响不明显。确定 NaOH 溶液浓度为 8 g/L, 此时镍提取率达 94.8%。

NaOH 浓度 8 g/L、溶液 pH=7.5~8.9 条件下, 反应温度对镍提取率的影响如图 8 所示。从图可看出, 反应温度对镍提取影响不明显。从节能及沉镍效果考虑, 最佳反应温度确定为室温(25℃), 该温度下镍提取率达 95.1%。

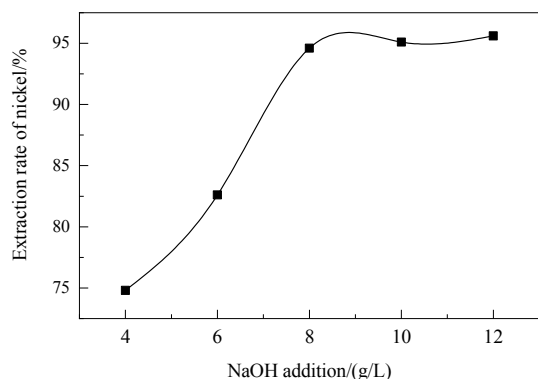


图 7 NaOH 用量对镍提取率的影响

Fig.7 Effect of NaOH addition on extraction rate of nickel

经以上反应所制 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 产品的 X 射线衍射谱如图 9 所示, 所有衍射峰均为 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 衍射峰, 纯度为 99.5%。

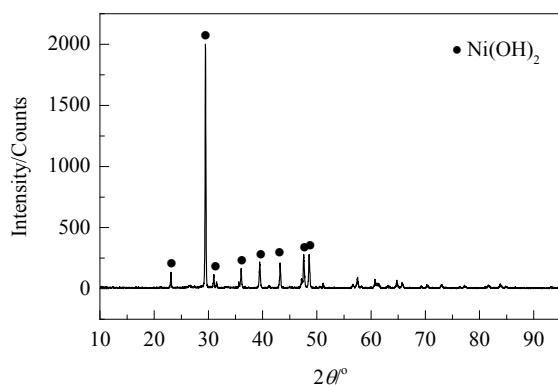


图 9 氢氧化镍产品的 X 射线衍射谱

Fig.9 XRD pattern of nickel hydroxide

4 结 论

用黄钠铁矾和 NaF 脱除硅镁型红土镍矿浸出液中的杂质离子 Fe 和 Mg, 除杂净化液采用加碱沉淀法制取 $\text{Ni}(\text{OH})_2$, 得出如下结论:

(1) 浸出液加入双氧水预处理, 以 Na_2SO_4 为钠源, 加入少量黄钠铁矾晶种, 控制溶液 $\text{pH}=1.6\sim 2.2$, 反应时间 1.5 h, 铁去除率可达 92.1%, 镍损失率为 6.7%。

(2) 除铁液加入 25 g/L NaF 除镁, 控制溶液 $\text{pH}=5.5\sim 6.0$, 镁去除率可达 90%以上, 镍损失率为 6.8%。

(3) 除杂净化液在室温(25℃)下添加 8 g/L NaOH 溶液为沉镍剂, 镍提取率可达 95.1%, 镍综合回收率为 82.70%。所得 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 产品纯度达 99.5%。

参考文献

[1] Laranjo R D, Anacleto N M. Direct smelting process for stainless

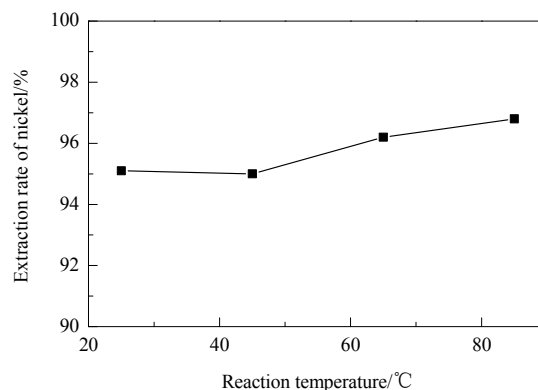


图 8 温度对镍提取率的影响

Fig.8 Effect of temperature on extraction rate of nickel

steel crude alloy recovery from mixed low-grade chromite, nickel laterite and manganese ores [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2018, 25(5): 515–523.

- [2] 卢超, 董竟成, 李博, 等. 硫酸钠作用下褐铁型红土矿选择性还原富集镍铁 [J]. 过程工程学报, 2017, 17(6): 1195–1202.
Lu C, Dong J C, Li B, et al. Selective reduction and enrichment of nickel and iron in limonitic laterite ore with the addition of sodium sulfate [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2017, 17(6): 1195–1202.
- [3] 马保中, 王成彦, 杨卜, 等. 硝酸加压浸出红土镍矿的中试研究 [J]. 过程工程学报, 2011, 11(4): 561–566.
Ma B Z, Wang C Y, Yang B, et al. Pilot plant study on pressure leaching of nickel laterite in nitric acid medium [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2011, 11(4): 561–566.
- [4] Liu K, Chen Q Y, Hu H P, et al. Pressure acid leaching of a Chinese laterite ore containing mainly maghemite and magnetite [J]. Hydrometallurgy, 2010, 104(1): 32–39.
- [5] Uliana D, Manuela M L, Kah H, et al. Process mineralogy of lateritic nickel ore [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2013, 33(A1): 17–23.
- [6] Guo X Y, Li D, Park K H, et al. Leaching behavior of metals from a limonitic nickel laterite using a sulfation–roasting–leaching process [J]. Hydrometallurgy, 2009, 99(3): 144–150.
- [7] 张培育, 郭强, 宋云霞, 等. 从红土镍矿镍铁渣中分离浸取镍铬工艺 [J]. 过程工程学报, 2013, 13(4): 608–614.
Zhang P Y, Guo Q, Song Y X, et al. Separation and recovery of Ni and Cr from ferronickel slag of nickel laterite [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2013, 13(4): 608–614.
- [8] Guo X Y, Shi W T, Li D, et al. Leaching behavior of metals from limonitic laterite ore by high pressure acid leaching [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(1): 191–195.
- [9] Li D, Park K H, Wu Z, et al. Response surface design for nickel recovery from laterite by sulfation–roasting–leaching process [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(S1): 92–96.
- [10] Sait K, Muammer K. Atmospheric pressure acid leaching of Caldag lateritic nickel ore [J]. International Journal of Mineral Processing, 2016, 150: 1–8.
- [11] 孙常永, 张魁芳, 曹洪杨, 等. 深海粘土硫酸浸出液中除铁试验 [J]. 有色金属, 2017, 3(10): 19–22.
Sun C Y, Zhang K F, Cao H Y, et al. Iron removal test in deep sea clay sulfuric acid leaching solution [J]. Nonferrous Metals, 2017, 3(10): 19–22.

- [12] 王洪刚, 刘三平, 王海北. 锌溶液除镁技术研究 [J]. 有色金属, 2017, 3(6): 7-9.
Wang H G, Liu S P, Wang H B. Study on magnesium removal technology of zinc solution [J]. *Nonferrous Metals*, 2017, 3(6): 7-9.
- [13] 孙千鸿. 工业硫酸镍除铁钙镁杂质实验研究 [J]. 无机盐工业, 2018, 50(4): 56-59.
Sun Q H. Experimental study on the removal of iron, calcium and magnesium impurities from industrial nickel sulfate [J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2018, 50(4): 56-59.
- [14] 牟文宁, 崔富晖, 黄志鹏, 等. 红土镍矿酸浸废水中铁镁分离与回收利用 [J]. 矿冶工程, 2017, 37(2): 79-83.
Mou W N, Cui F H, Huang Z P, et al. Separation and recycling of iron and magnesium in laterite nickel ore acid leaching wastewater [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2017, 37(2): 79-83.
- [15] Patnaik P, Biswal A, Tripathy B C. Synthesis and characterization of fibrous nickel hydroxide obtained from spent nickel catalyst [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23(10): 2977-2983.
- [16] 周晓文, 刘智林. 赣南某红土镍矿常压酸浸液中杂质离子的除去 [J]. 金属矿山, 2012, 41(9): 76-79.
Zhou X W, Liu Z L. Removing impurity ions from the constant-pressured acid leaching lixivium of a laterite nickel ore in south of Ganzhou [J]. *Metal Mine*, 2012, 41(9): 76-79.
- [17] Jennifer M C, Ataollah N, William S, et al. Acid leaching and rheological behaviour of a siliceous goethitic nickel laterite ore: influence of particle size and temperature [J]. *Minerals Engineering*, 2015, 77(15): 52-63.
- [18] 邵鸿媚, 申晓毅, 常龙娇, 等. 由红土镍矿硫酸焙烧熟料溶出液制备黄钾铁矾的研究 [J]. 人工晶体学报, 2015, 44(11): 3025-3028.
Shao H M, Shen X Y, Chang L J, et al. Preparation of jarosite from the dissolution of clinker from laterite nickel ore [J]. *Journal of Artificial Crystals*, 2015, 44(11): 3025-3028.
- [19] 张培育. 红土镍矿酸浸水解与镍铁渣镍铬提取工艺研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013: 6-9.
Zhang P Y. Study on acid leaching hydrolysis of laterite nickel ore and nickel chromium extraction process of nickel iron slag [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 6-9.
- [20] 周国旭. 磁选-酸浸回收红土镍矿中铁、镍、镁的试验研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016: 5-9.
Zhou G X. Experimental study on recovery of iron, nickel and magnesium from laterite nickel ore by magnetic separation-acid leaching [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016: 5-9.
- [21] Lu J, Liu S J, Shangguan J, et al. The effect of sodium sulphate on the hydrogen reduction process of nickel laterite ore [J]. *Minerals Engineering*, 2013, 49(13): 154-164.