

## Nitric acid pressure leaching of laterite ores

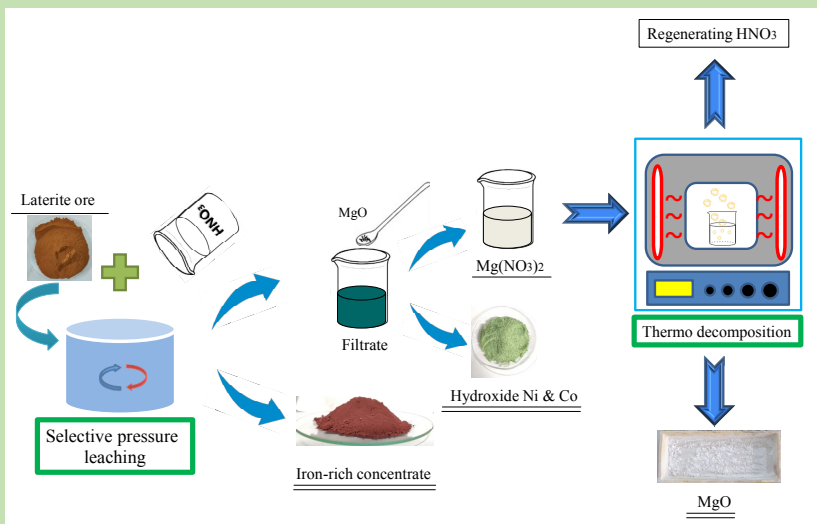
Chengyan WANG, Zhihe CAO, Baozhong MA\*, Yongqiang CHEN

School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

**Abstract:** The treatment of laterite ore by pressure leaching using nitric acid medium was studied. The nitric acid pressure leaching of nickel laterite was feasible based on series experiments for valuable components of initial concentration of nitric acid, leaching temperature, leaching duration, and liquid to solid ratio of the process. More than 85% Ni and Co, 80% Mg, over 60% Al and less than 1% Fe were extracted, and iron slag including 55% Fe was produced followed by optimal conditions of

leaching temperature of 190°C, leaching duration of 60 min, initial concentration of nitric acid of 330 kg/t and liquid to solid ratio ranged from 1.5:1 to 1.7:1 mL/g. Then Fe, Al and Ni, Co in the leaching solution were separated and enriched further, by the step of replenishing MgO. When the temperature was 85°C and the pH was around 3.0, 95% Fe was removed. Then with controlled pH among 4.0~4.3, more than 99% Al was removed and more than 90% Sc was in the slag with Al which contained nearly 1 000 g/t Sc. With increased pH among 7.5~8.0, Ni and Co were precipitated completely to produce hydroxide Ni, Co slag including 24.8% Ni and 2.3% Co. The residual  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$  solution was first evaporated and then thermal decomposed at 500°C to obtain MgO. The nitrogen oxide gas generated by thermal decomposition was recovered to regenerate  $\text{HNO}_3$ . The efficiency of recycled  $\text{HNO}_3$  was more than 92% in the atmospheric pressure.

**Key words:** nickel laterite; nitric acid; pressure leaching; valuable components; comprehensive utilization



收稿: 2019-02-22, 修回: 2019-04-29, 网络发表: 2019-05-24, Received: 2019-02-22, Revised: 2019-04-29, Published online: 2019-05-24  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51674026; U1802253); 国家重点研发计划资助项目(编号: 2018YFC1900304); 北京市自然科学基金资助项目(编号: 2182040)  
作者简介: 王成彦(1968-), 男, 河南省南阳市人, 博士, 教授, 有色金属冶金专业, E-mail: chywang@yeah.net; 马保中, 通讯联系人, E-mail: mabaozhong@ustb.edu.cn.

**引用格式:** 王成彦, 曹志河, 马保中, 等. 红土镍矿硝酸加压浸出工艺. 过程工程学报, 2019, 19(增刊 1): 51-57.

Wang C Y, Cao Z H, Ma B Z, et al. Nitric acid pressure leaching of laterite ores (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2019, 19(S1): 51-57, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219136.

# 红土镍矿硝酸加压浸出工艺

王成彦, 曹志河, 马保中\*, 陈永强

北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083

**摘 要:** 采用硝酸介质加压浸出处理红土镍矿, 考察了初始硝酸浓度、浸出温度、保温时间和液固比对有价值组分浸出率的影响, 确定了该工艺的可行性。得到优化工艺条件为初始硝酸浓度 330 kg/t, 浸出温度 190℃, 保温时间 60 min, 液固比 1.5:1~1.7:1 mL/g。最优工艺条件下, 镍、钴的浸出率均大于 85%, 镁浸出率为 80%, 铝的浸出率大于 60%, 铁的浸出率低于 1%, 产出了含铁 55%的富铁渣。对浸出液采用氧化镁梯级沉淀的方法, 控制温度 85℃、pH≈3.0, 可除掉 95%的铁; 控制 pH=4.0~4.3, 可除掉 99%以上的铝, 原矿中约 90%以上的钕随铝进入渣相, 得到含钕近 1000 g/t 的铝钕富集物; 调节 pH=7.5~8.0, 溶液中的镍钴沉淀完全, 得到含镍 24.8%和含钴 2.3%的氢氧化镍钴渣, 实现了镍、钴与铁、铝高效分离和富集。梯级沉淀后的硝酸镁溶液蒸发结晶, 在 500℃下煅烧, 得到轻质氧化镁; 回收热分解产生的氮氧化物气体再生硝酸, 常压再生率达 92%以上, 实现了红土镍矿中有价组分的高效分离和浸出介质的循环利用。

**关键词:** 红土镍矿; 硝酸; 加压浸出; 有价值组分; 综合利用

**中图分类号:** TF815      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-606X(2019)S1-0051-07

## 1 前言

镍、钴作为重要战略金属, 主要被作为合金元素用于生产不锈钢、高温合金钢、高性能特种合金; 镍基电镀材料用于制造飞机、火箭、坦克潜艇、雷达和原子能反应堆部件及锂离子电池的正极材料等<sup>[1-4]</sup>。近年来, 我国不锈钢市场需求旺盛, 三元锂离子电池发展迅速, 刺激了镍、钴的需求。但硫化镍矿资源的不断减少, 而红土镍矿伴生钴, 从红土镍矿中高效、经济提取镍和钴已成为研究焦点。

红土镍矿处理工艺主要分为火法和湿法。火法主要适用于处理硫化镍矿和含镍品位较高的红土镍矿; 湿法适合处理褐铁型红土镍矿等含镍较低的矿物, 湿法具有能耗小、成本低和污染小及可同时回收钴等优势<sup>[3-6]</sup>。目前, 湿法处理红土镍矿的主流工艺为硫酸加压浸出, 自 1998 年以来, 澳大利亚必和必拓公司(BHPB)、巴西国有矿业公司(CVRD)、加拿大鹰桥公司(Falconbridge)、中国中冶集团等几家大公司都进行了硫酸加压浸出的技术开发, 不断完善和发展<sup>[7-9]</sup>, 但硫酸加压工艺存在几个弊端: (1) 浸出在约 250℃的高温 and 4~6 MPa 的高压下进行, 对设备要求较高, 投资较大; (2) 处理红土镍矿时, 硫酸消耗量大, 经济性差; (3) 浸出渣含硫量高, 难以综合利用, 需配套尾矿处理系统; (4) 硫酸钙/铝矾盐/铁矾盐导致的结垢严重, 需定期对高压釜除垢; (5) 技术难度较大, 运营费用和生产成本较高<sup>[8,10-12]</sup>。

红土镍矿为重要的镍矿资源, 同时共伴生钴、铬、铁、钕、铝和镁等有价值金属, 本工作对硝酸加压浸出处理褐铁型红土镍矿的工艺参数进行研究, 总结了该技术

的主要优点。

## 2 实验

### 2.1 材料与试剂

实验用红土镍矿的成分见表 1, XRD 谱见图 1。

表 1 褐铁型红土镍矿成分表					
Table 1 Composition of limonitic laterite ore					
Element	Ni	Fe	Co	Al	Mg
Content/%	0.88	43.42	0.070	2.86	2.03
Element	Mn	Cr	Ca	SiO <sub>2</sub>	Sc/(g/t)
Content/%	0.49	1.81	0.09	8.93	80

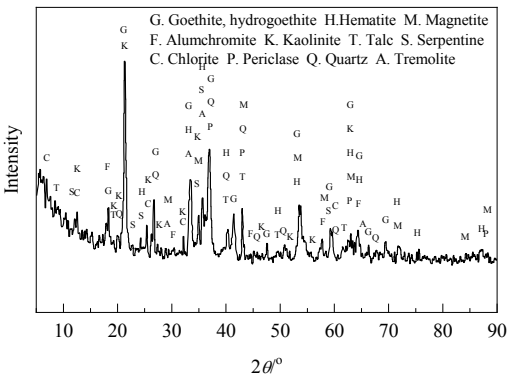


图 1 代表性红土镍矿的 XRD 谱  
Fig.1 XRD pattern of representative laterite ore

从表 1 及图 1 可看出, 实验样品由针铁矿、水针铁矿、赤铁矿、硅质类矿物和粘土类物质组成, 为典型的褐铁型红土镍矿, 其中铁品位较高, 而镍、钴品位相对较低, 矿中含有一定量的钕。针铁矿、赤铁矿和磁铁矿是矿石中最主要的组成矿物, 且都含 Ni; 其它矿物含量

少且不含 Ni。

实验中矿物经简单粗磨，粒度小于 74 μm，浓硝酸 (HNO<sub>3</sub>)浓度为 65%~68%，轻质氧化镁(MgO)纯度为 98%。

**2.2 实验方法**

将红土镍矿和一定浓度的硝酸按一定液固比混合，置于 1 L 不锈钢加压釜(钛胆)中，启动搅拌，先升温至 80℃预浸 1 h，再升至设定温度，记录加压釜内压力并开始计时。以去离子水作冷却水控制加压釜内温度。达到反应所需时间后，将釜内矿浆冷却至小于 70℃后开始泄压，卸釜，取出钛胆，将矿浆用轻质氧化镁调节 pH 到一定值除去大部分游离酸和铁后过滤，得到浸出液和富铁渣。

浸出液添加轻质氧化镁调节 pH 值进行梯级沉淀，使其中的铁/铝、镍、钴等以氢氧化物形式逐步进入渣相，得到富钪铝渣和镍钴氢氧化物。提纯后溶液为 Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 溶液，在一定温度下热分解得到轻质氧化镁，用水吸收产生的氮氧化物气体再生硝酸。图 2 为硝酸加压浸出工艺流程图。

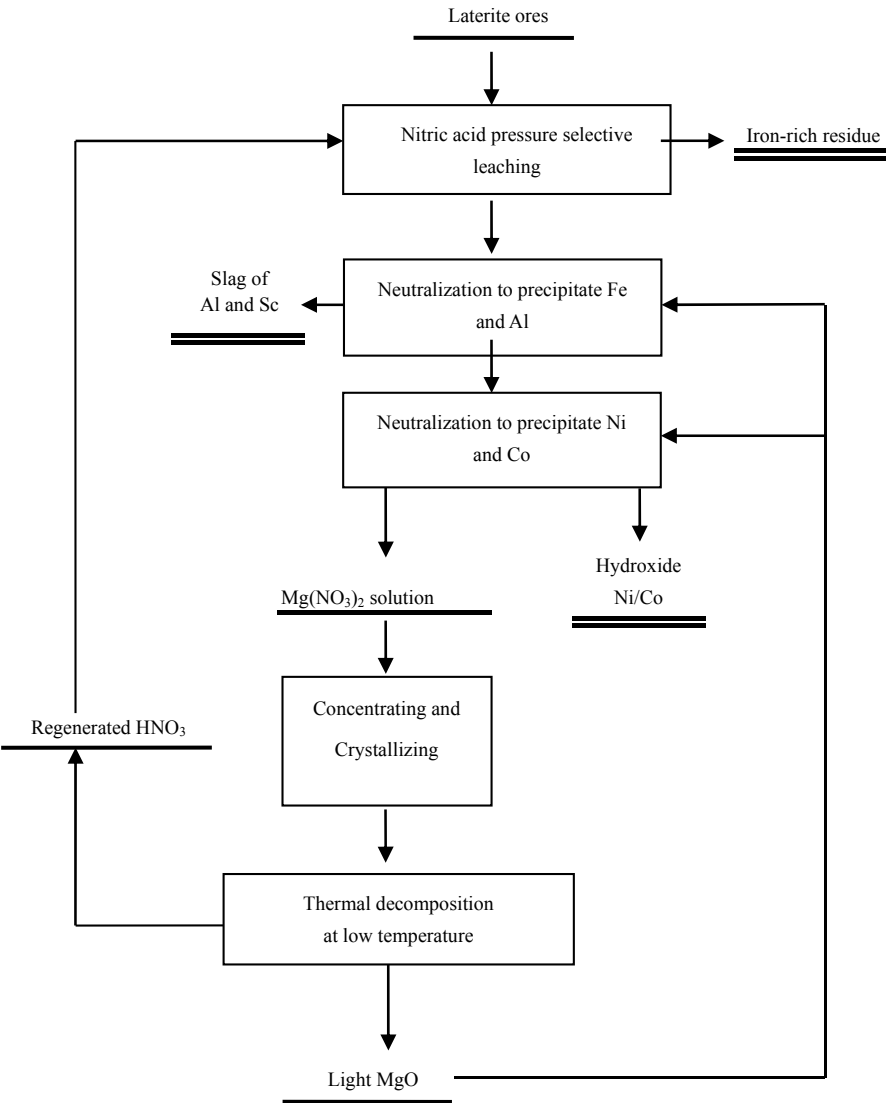


图 2 红土镍矿硝酸加压浸出工艺流程图

Fig.2 Flow chart of nitric acid pressure leaching process for laterite ores

3 结果与讨论

3.1 硝酸加压浸出

为实现红土镍矿中有价组元的选择性浸出，考察了初始硝酸浓度、浸出温度、保温时间和液固比对有价金

属浸出率的影响。

**3.1.1 初始硝酸浓度的影响**

浸出过程中硝酸可破坏矿物的结构，使矿物颗粒的内层暴露且不易钝化，能加速矿物溶解，初始硝酸的浓度直接影响浸出效果<sup>[13-16]</sup>。控制初始硝酸浓度可使红土

镍矿中的有价金属尽可能多地浸出, 并将杂质 Fe 抑制在渣中。

浸出温度 185℃、保温时间 90 min、液固比 1.5:1 mL/g 的条件下, 初始硝酸浓度对镍钴等有价组元浸出率的影响见图 3。由图可知, 硝酸初始浓度低于 300 kg/t 时, 随初始浓度增加, 矿中各组分的浸出率均增加, 其中 Ni, Co 浸出率在硝酸初始浓度达 330 kg/t 后基本不变, 维持在约 83%; Al 和 Mg 的浸出率在硝酸初始浓度达 330 kg/t 后基本不再增加, Al 浸出率约为 60%, Mg 浸出率为 72.8%; Fe 浸出率随硝酸浓度增加而增大, 但浸出率均低于 2%。红土镍矿加压浸出的最佳初始酸浓度为 330 kg/t。

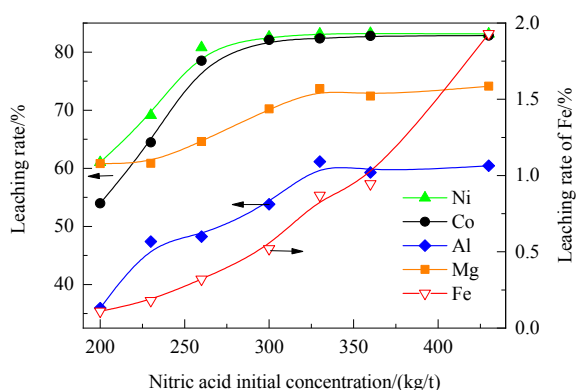


图3 初始硝酸浓度对浸出率的影响

Fig.3 Effect of nitric acid initial concentration on leaching rate

### 3.1.2 浸出温度的影响

初始硝酸浓度 330 kg/t、保温时间 90 min、液固比 1.5:1 mL/g 的条件下, 浸出温度对镍、钴等有价组元浸出率的影响见图 4。由图可看出, 温度对红土镍矿中 Ni, Co 的浸出率有明显影响, Ni, Co 浸出率均随温度升高而增大, 直到 190℃时增大趋势才减缓。考虑到压力釜中温度升高时压力也会增大, 将会增加对高压设备的要求, 因此宜选用 190℃作为反应温度, 可在硝酸消耗较低和时间较短的条件下实现 80%以上的镍、钴浸出率。

### 3.1.3 保温时间的影响

初始硝酸浓度 330 kg/t、浸出温度 190℃、液固比 1.5:1 mL/g 的条件下, 保温时间对镍、钴等有价组元浸出率的影响见图 5。由图可知, 随保温时间延长, 红土镍矿中 Ni 和 Co 的浸出率均增大, 保温时间 60 min 后, Ni 和 Co 的浸出率基本不变, Ni 浸出率为 81%, Co 浸出率为 79%; Al 和 Mg 的浸出率随保温时间延长而增加, 保温时间达到 60 min 后, Al, Mg 的浸出率分别保持在约 60%和 78%; Fe 浸出率随保温时间增加逐步降低, 浸出率保持在约 0.7%。浸出过程中, 部分 Fe 先

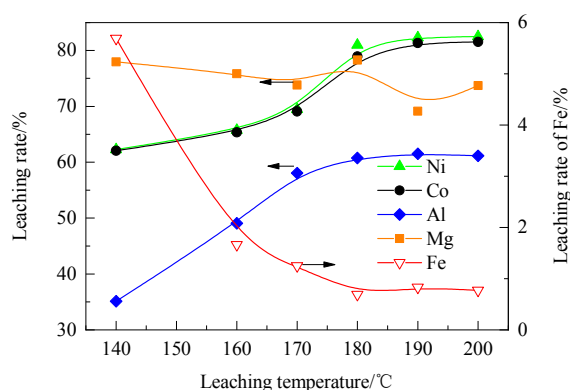


图4 浸出温度对浸出率的影响

Fig.4 Effect of leaching temperature on leaching rate

变成  $\text{Fe}^{2+}$ , 后被氧化成  $\text{Fe}^{3+}$ , 再水解生成赤铁矿沉淀。随浸出时间增长,  $\text{Fe}^{3+}$  在高温下水解沉淀越完全, 且浸出过程中少量生成的  $\text{Al}^{3+}$  吸附在沉淀表面阻碍了赤铁矿沉淀的重新溶解, 使溶液中 Fe 浓度变低。综合以上因素, 保温时间取 60 min 较合适。

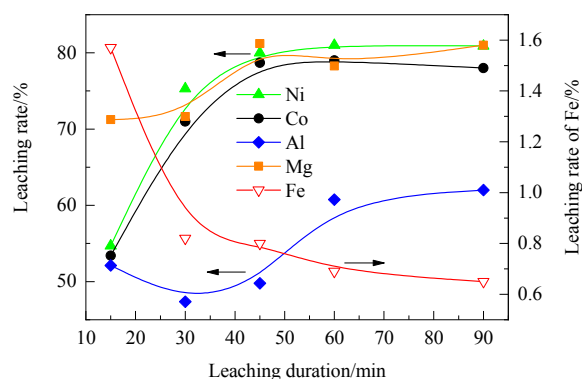


图5 保温时间对浸出率的影响

Fig.5 Effect of leaching duration on leaching rate

### 3.1.4 液固比

初始硝酸浓度 330 kg/t、浸出温度 190℃、保温时间

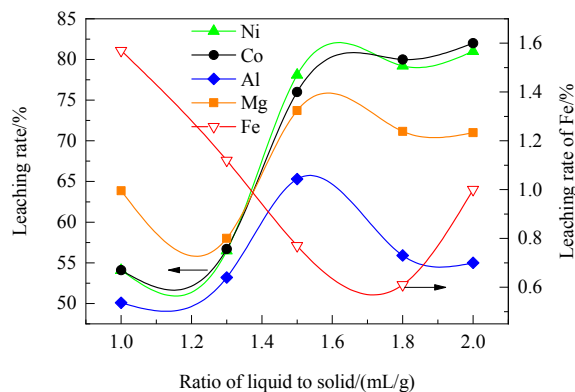


图6 液固比对浸出率的影响

Fig.6 Effect of ratio of liquid to solid on leaching rate

60 min 的条件下, 考察液固比对镍、钴等有价值组元浸出率的影响, 结果见图 6。由图可知, 浸出率随液固比增大而增大, 这是由于增大液固比使矿浆粘度减小, 改善了扩散条件。Ni、Co、Al 和 Mg 的浸出率均随液固比增大先逐渐升高到一定值后又开始不同程度降低。为减小矿浆粘度, 加压浸出的最优液固比为 1.5:1~1.7:1 mL/g。

综上可得出褐铁型红土镍矿硝酸加压浸出的最优工艺为初始硝酸浓度 330 kg/t、浸出温度 190℃、保温时间 60 min 和液固比 1.5:1~1.7:1 mL/g。最优工艺条件下, 红土镍矿中各有价值组元的浸出结果见表 2。

表 2 最优条件下有价值组元浸出率  
Table 2 Leaching rates of valuable components under optimal conditions

Element	Ni	Co	Fe	Al	Mg	Sc
Leaching rate/%	85.4	86.2	0.78	62.3	81.2	92.0

3.2 氧化镁梯级沉淀

为考察各金属离子在溶液中梯级分离的最优 pH 值, 以多次加压浸出的混合液为研究对象, 进行梯级沉淀实验, 混合液各成分见表 3。溶液中 Fe 含量相对较低, 由于硝酸具有强氧化性, 加压浸出后, 溶液中 Fe<sup>2+</sup> 含量很低(0.037 g/L), 只占总铁含量的 1.5%。

表 3 浸出混合溶液的组成

Table 3 Composition of the mixed leaching solution

Element	Ni	Co	Fe	Al	Mg	Sc	Fe <sup>2+</sup>
Concentration/(g/L)	5.02	0.40	2.41	11.81	11.11	0.049	0.037

表 4 不同工序产品的化学成分

Table 4 Chemical compositions of the products of the different processes

Composition/%	Ni	Co	Fe	Mg	Al	Cr	SiO <sub>2</sub>	Sc/(g/t)	Others <sup>1)</sup>
Iron-rich slag	0.22	0.011	55.01	1.32	1.56	1.90	11.27	8	29.459
Enrichment of Al and Sc	0.09	0.003	0.49	1.98	25.14	0.58	2.66	968	69.237
Hydroxide of Ni and Co	24.80	2.30	1.02	2.28	1.48	—	2.7	—	65.6
Light MgO	0.002	—	0.001	58.20	0.002	—	2.01	—	39.915

Note: 1) Mainly oxygen and water of crystallization.

pH=4.0~4.3 时中和沉淀铝, 99%以上的铝被除去; 洗涤铝渣, 可以得到富钪铝渣, 其成分见表 4。

3.2.2 镍钴沉淀分离

除铁铝后溶液继续添加 MgO 调节溶液 pH, 使 Ni 和 Co 沉淀, 生产相应的产品。

水解沉淀除铁实验中, 当反应终点 pH=6.5 时, 95% 以上的 Ni 和大部分的 Co 损失。中和沉淀镍钴时调节 pH=7.5~8.0, 可实现 99%以上的 Ni 和 Co 沉淀, 得到氢氧化镍钴渣, 镍钴的最终回收率分别为 79.5%和 80.2%, 沉淀成分见表 4。

3.3 氧化镁和硝酸的再生

3.2.1 铁铝沉淀分离

通常条件下, 水解沉淀除铁的温度应控制在 80℃ 以上, pH 值控制在 3.0~5.0 之间<sup>[13,15]</sup>。85℃下添加中和剂 MgO 调节溶液 pH 值进行实验, 选择水解沉铁的合适 pH, 实验结果见图 7。

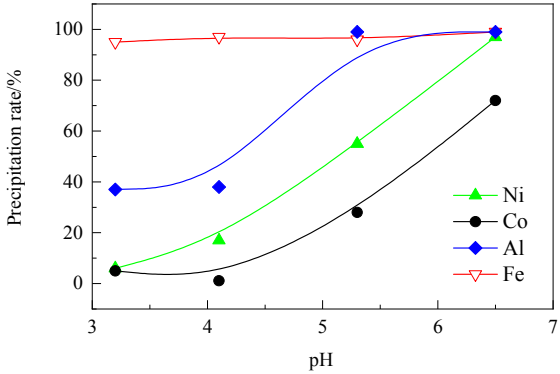


图 7 pH 值对沉淀率的影响

Fig.7 Effect of pH on precipitation rate

溶液 pH≈3.0 时, 虽然除铁率较低(95%), 但 Ni 和 Co 绝大部分留在溶液中; 溶液 pH≈6.0 时, 铁几乎完全沉淀, 但 Ni、Co 也被沉淀, 造成 Ni、Co 损失。加入 MgO 粉末调节浸出溶液终点 pH≈3.0 时效果较好。

结合浸出工艺, 将浸出液沉淀步骤改为浸出矿浆直接沉铁, 即将浸出矿浆取出用轻质氧化镁调节 pH≈3.0, 中和掉浸出液中的游离酸和铁后再进行液固分离, 可减少一次液固分离工序。液固分离得到的富铁渣化学成分见表 4。

体, 组成为氮氧化物 41.6vol%, 氧气 12.2vol%, 水 46.2vol%; 实验室用水常压吸收该气体产出一定浓度的硝酸, 两级吸收率为 94.29%, 酸再生率可达 92%以上, 浓度达约 180 g/L, 尾气用 1 mol/L NaOH 溶液吸收。借鉴当前硝酸生产主体工艺进行加压吸收, 硝酸再生率可达 98%以上。

### 3.4 技术特点

以硝酸代替传统加压浸出工艺中的硫酸作为浸出介质, 对红土镍矿进行加压浸出, 主要特点为: (1) 浸出温度低于 200 °C, 浸出条件温和, 设备可实现国产化, 投资成本低, 操作安全系数高; (2) 硝酸作为浸出介质, 避免了加压釜结疤问题, 提高了生产效率; (3) 有价值组元铁在浸出渣中富集, 产出含铁 55%以上的富铁渣, 且不含硫, 可直接销售给钢铁企业; (4) 浸出液分步处理实现了镍、钴与铝、铁的分离、富集, 同时有价值金属钪富集(超过 12 倍); (5) 95%以上的硝酸和氧化镁可再生、循环使用, 大幅降低了生产成本; (6) 实现了红土镍矿中多种有价值组分的高效综合利用。

## 4 结 论

采用硝酸加压浸出工艺对红土镍矿中有价值组元综合回收及浸出液后续处理进行了实验研究, 得到如下结论:

(1) 红土镍矿硝酸加压浸出工艺的最佳条件为初始硝酸酸度 330 kg/t、浸出温度 190 °C、保温时间 60 min、液固比 1.5:1~1.7:1 mL/g。最优条件下, 镍和钴的浸出率大于 85%, 镁浸出率大于 80%, 铝浸出率大于 60%, 铁浸出率不足 1%。

(2) 控制浸出后矿浆温度在 85 °C, 用 MgO 调节溶液 pH=3.0, 可除掉浸出液中 95%的铁和游离酸, 产出含铁大于 55%的富铁渣; pH=4.0~4.3 时, 除去 99%以上的铝, 得到含钪近 1000 g/t 的铝钪富集物。调节 pH=7.5~8.0, 溶液中的镍钴沉淀完全, 产出含镍 24.8%、含钴 2.3%的氢氧化镍钴渣。所得硝酸溶液经蒸发结晶后在 500 °C煅烧热分解, 得到轻质氧化镁, 用水常压吸收分解产生的氮氧化物气体, 硝酸的再生率在 92%以上, 产出浓度约 180 g/L 的硝酸。

(3) 采用硝酸加压浸出新工艺处理红土镍矿, 实现镍钴高效提取的同时也实现了浸出剂硝酸再生, 比传统硫酸加压浸出工艺有明显的竞争力。

### 参考文献

- [1] 王成彦, 尹飞, 陈永强, 等. 国内外红土镍矿处理技术及进展 [J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(1): 1-8.  
Wang C Y, Yin F, Chen Y Q, et al. Treatment technology and progress of laterite nickel ore at home and abroad [J]. The Chinese Journal of
- Nonferrous Metals, 2008, 18(1): 1-8.
- [2] Gleeson S A, Butt C R M, Elias M. Nickel Laterites: a review [J]. SEG Newsletter, 2003, 54(3): 11-18.
- [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 study on the pressure leaching of laterite nickel ore by nitric acid [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2011, 11(4): 561-566.
- [4] Georgiou D. Kinetics of nickel dissolution during sulphuric acid pressure leaching of a limonitic laterite [D]. Toronto: University of Toronto, 1995: 10-19.
- [5] Georgiou D, Papangelakis V G. Sulphuric acid pressure leaching of a limonitic laterite: chemistry and kinetics [J]. Hydrometallurgy, 1998, 49(1): 23-46.
- [6] Rubisov D H, Papangelakis V G. Sulphuric acid pressure leaching of laterites-speciation and prediction of metal solubilities "at temperature" [J]. Hydrometallurgy, 2000, 58(1): 13-26.
- [7] 常龙娇, 刘佳因, 刘连利, 等. 红土镍矿制备黄钠铁矾的研究 [J]. 矿冶, 2018, 27(3): 56-59.  
Chang L J, Liu J N, Liu L L, et al. Study on preparation of yellow sodium iron oxide from laterite nickel ore [J]. Mining and Metallurgy, 2018, 27(3): 56-59.
- [8] 肖振民. 世界红土型镍矿开发和高压酸浸技术应用 [J]. 中国矿业, 2002, 11(1): 56-59.  
Xiao Z M. Status of exploitation of laterite type nickel ore and application of high pressure acid leaching technology in the world [J]. China Mining Magazine, 2002, 11(1): 56-59.
- [9] 王玲, 鲁安怀, 王宁. 某蛇纹石型红土镍矿常压硫酸溶解浸出实验研究 [J]. 岩石矿物学杂志, 2015, 34(6): 860-864.  
Wang L, Lu A H, Wang N. Experimental study on the dissolution and leaching of a serpentine type laterite nickel ore by atmospheric pressure sulfuric acid [J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2015, 34(6): 860-864.
- [10] Johnson J A, Cashmore B C, Hockridge R J. Optimisation of nickel extraction from laterite ores by high pressure acid leaching with addition of sodium sulphate [J]. Minerals Engineering, 2005, 18(13/14): 1297-1303.
- [11] 黄振华, 刘三平. 缅甸莫弄塘镍矿常压硫酸浸出制取氢氧化镍、钴工艺的研究 [R]. 北京: 北京矿冶研究总院, 2008.  
Huang Z H, Liu S P. Study on preparation of nickel hydroxide and cobalt from atmospheric sulfuric acid leaching of mochoitang nickel in Myanmar [R]. Beijing: Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy, 2008.
- [12] 张永禄, 王成彦, 徐志峰. 低品位碱预处理红土镍矿加压浸出过程 [J]. 过程工程学报, 2010, 10(2): 263-269.  
Zhang Y L, Wang C Y, Xu Z F. Pressure leaching process of low-grade alkali pretreatment of laterite nickel ore [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2010, 10(2): 263-269.
- [13] 杨永强. 高镁红土镍矿非常规介质温和提取基础研究 [D]. 北京: 北京矿冶研究总院, 2008: 13-17, 89.  
Yang Y Q. Basic research on mild extraction of unconventional medium in high-magnesium laterite nickel ore [D]. Beijing: Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy, 2008: 13-17, 89.
- [14] 马保中, 杨玮娇, 王成彦, 等. 红土镍矿湿法浸出工艺的进展 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2013, (7): 1-8.  
Ma B Z, Yang W J, Wang C Y, et al. Progress in wet leaching process of laterite nickel ore [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy),

2013, (7): 1-8.

[15] Ma B Z, Yang W J, Yang B, et al. Pilot-scale plant study on the innovative nitric acid pressure leaching technology for laterite ores [J]. Hydrometallurgy, 2015, 155: 88-94.

[16] 杨永强, 王成彦, 汤集刚, 等. 云南元江高镁红土矿物组成及浸出热力学分析 [J]. 有色金属, 2008, (3): 84-87.

Yang Y Q, Wang C Y, Tang J G, et al. Mineral composition and leaching thermodynamic analysis of high-magnesium laterite ore in Yunnan Yuanjiang [J]. Nonferrous Metals, 2008, (3): 84-87.