

# 红土镍矿高压酸浸小型试验与研究

贾露萍, 吴迪, 刘楠才, 肖贵龙

(瑞木镍钴管理(中冶)有限公司, 巴布亚新几内亚马当省)

**[摘要]** 本小型试验采用高压酸浸技术处理典型的近赤道低品位湿型红土镍矿, 研究镍、钴、铝、铁浸出率与温度、酸矿比、搅拌转速、浸出时间、入釜矿浆浓度之间的关系, 然后应用技术经济分析的手段对筛选后的试验结果再进一步分析, 探索出红土镍矿高压酸浸最佳工艺条件。

**[关键词]** 红土镍矿; 高压酸浸; 镍; 钴

**[中图分类号]** TF815 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 1003-8884(2022)01-0018-04

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2022.01.005

## 0 引言

世界镍资源储量很丰富, 截止 2020 年陆地镍资源(平均品位 0.5% 以上)为 3 亿吨以上, 其中硫化镍矿占比 40%, 剩下 60% 为红土镍矿<sup>[1]</sup>。随着地球上高品位硫化镍矿的日趋枯竭和红土镍矿生产的成本下降趋势, 红土镍矿生产占镍矿生产的比例近年来正在迅速提高。

红土镍矿的冶炼工艺有火法和湿法之分, 典型的火法工艺有还原硫化熔炼镍钨工艺、回转窑-矿热炉镍铁工艺、还原焙烧磁选工艺, 典型的湿法工艺有还原焙烧-铵浸-氢还原镍粉镍块工艺<sup>[2]</sup>、高压酸浸工艺。高压酸浸工艺以其对低镍-高铁-低镁型红土镍矿适应性好、镍钴回收率高、生产成本较低、环境友好的优点已成为当今主流的红土镍矿湿法冶炼工艺<sup>[3]</sup>。

本试验采用高压酸浸技术处理典型的近赤道低品位湿型红土镍矿, 首先开展单一因素(温度、酸矿比、搅拌速度、浸出时间、入釜浓度)对镍、钴、镁、铝浸出率影响的试验, 对试验结果初步进行分析选取较佳的工艺条件, 然后开展温度和酸矿比对浸出率

影响的正交试验, 再对试验结果进行经济分析得出最佳工艺条件。由于镁铝是高压酸浸工艺中主要的耗酸元素<sup>[4]</sup>, 同时铝是高压釜结垢的主要元素之一<sup>[5]</sup>, 因此探索高压酸浸最佳工艺条件的原则是在获得较低的镁铝浸出率(铝的浸出率宜控制 20% 以下)、能源消耗、硫酸消耗的同时追求较高的镍钴浸出率。

## 1 试验

### 1.1 原料

试验原料为典型的近赤道低品位湿型红土镍矿, 取自经洗矿、选矿、除铬后的红土矿浆, 再经烘干、破碎、粉碎等制样方法处理后, 其典型化学成分值如表 1 所示、粒度分布如表 2 所示。

表 1 红土镍矿典型化学成分(wt%)

Ni	Co	Mg	Al	Fe	Mn
1.168	0.105	2.31	2.30	40.18	0.73

表 2 红土镍矿粒度分布表

粒度	单位	数值
D100	μm	150
D95	μm	100

### 1.2 试验设备

2LParr 高压釜及控制器、干燥箱、鄂式破碎机、真空泵、全密封式化验制样粉碎机、电子称、ICP 等。

### 1.3 试验试剂

Z98% 分析纯浓硫酸。

**[收稿日期]** 2021-09-19

**[作者简介]** 贾露萍(1984—), 男, 江西萍乡人, 大学本科, 冶金高级工程师, 主要从事镍钴湿法冶炼工作, 现任瑞木镍钴管理(中冶)有限公司冶炼厂厂长、党总支书记。

**[引用格式]** 贾露萍, 吴迪, 刘楠才, 等. 红土镍矿高压酸浸小型试验与研究[J]. 有色设备, 2022, 36(1): 18-21.

## 1.4 试验方法

将 200 g 红土矿、试验要求量的水和浓硫酸加入高压釜,浆化后密封,启动搅拌并升温,至指定温度后恒温,完成要求的反应时间后降温至 50 ℃,停止冷却与搅拌,高压釜泄压、矿浆出釜、真空抽滤、滤饼洗涤 3 次,同时对高压釜内壁和搅拌进行洗涤,洗后液进行抽滤洗涤。洗水均采用 pH ≈ 1 的酸性洗水,对所得滤饼烘干与滤后液分别进行计量称重和 ICP 分析化学元素,以滤饼渣相分析结果计算浸出率,以液相分析结果作为计算参考。由于恒温阶段温度最大波动为 5 ℃,故温度最小的试验单位为 5 ℃。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 温度对浸出率的影响

反应条件:酸矿比 250 kg/t<sub>干矿</sub>,浸出时间 1 h,搅拌转速 120 r/min,入釜矿浆浓度 25%,反应温度(℃)分别为:180、200、220、230、240 ℃、250、255、260、270。

试验结果如图 1 所示,从图中可以看出,镍的浸出率随着温度的上升而增高,在 250 ℃ 及以上温度区间获得较高的镍浸出率;钴的浸出率始终高于镍的浸出率,且随着温度的上升而增高,在 230 ℃ 及以上温度区间增高幅度很小;镁在 240 ℃ 以下时浸出率高于镍的浸出率,镁的浸出率随温度的升高而增大;铝的浸出率在 180 ℃ 以上区间随温度的升高而降低,250 ℃ 及以上温度区间,铝的浸出率低于 20%。

从试验过程看,240 ℃ 及以上温度的试验出釜矿浆为红色,判断此温度下浸出的 Fe<sup>3+</sup> 水解生成了 FeO,而低于 240 ℃ 出釜矿浆皆呈现与原矿浆相同的黄色,判断部分铁虽有被浸出生成硫酸盐,但没有水解过程。

综合考虑,温度处于 250 ~ 270 ℃ 区间时,镍钴浸出率较高,镁铝的浸出率较低,考虑到蒸汽能耗因素,浸出温度选择 250 ~ 270 ℃ 区间为宜。

### 2.2 酸矿比对浸出率的影响

反应条件:温度 250 ℃,浸出时间 1 h,搅拌转速 120 r/min,入釜矿浆浓度 25%,酸矿比(kg/t<sub>干矿</sub>)分别为:230、240、250、260、270、280、290、300、310、320。

试验所得的浸出率如图 2 所示,从图中可以看

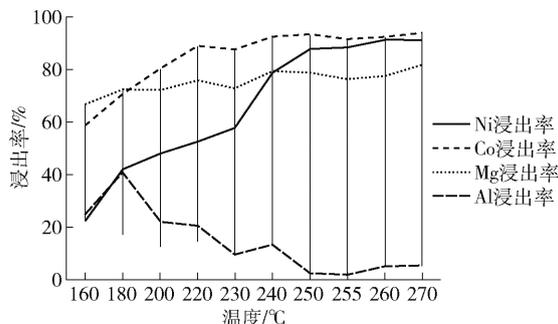


图 1 温度对浸出率的影响

出,低于 280 kg/t<sub>干矿</sub> 酸矿比条件下,钴的浸出率高于镍的浸出率;镍和钴的浸出率都随着酸矿比的增加而增高,270 kg/t<sub>干矿</sub> 时,镍和钴的浸出率接近或达到 95%;随着酸矿比的增加,镁的浸出率略微增高,而金属铝的浸出率则显著增高,300 kg/t<sub>干矿</sub> 时,铝的浸出率超过 20%。

综合考虑,酸矿比为 270 ~ 280 kg/t<sub>干矿</sub> 时,镍和钴的浸出率达到 95% 以上,镁的浸出率 80% ~ 82%,铝的浸出率小于 20%。

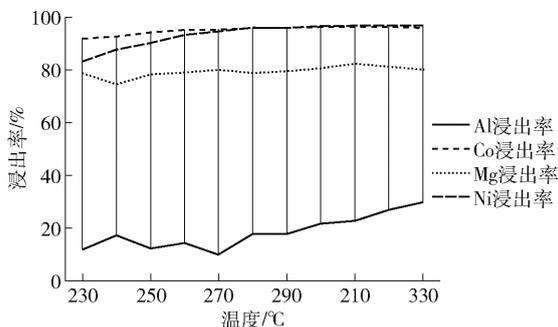


图 2 酸矿比对浸出率的影响

### 2.3 浸出时间对浸出率的影响

反应条件:反应温度为 255 ℃,酸矿比 280 kg/t<sub>干矿</sub>,搅拌转速 120 r/min,入釜矿浆浓度 25%,反应时间(min)分别为:30、40、50、60、70、80、90、100、120。

试验所得的浸出率如图 3 所示,从图中可以看出,镍、钴、镁的浸出率对于浸出时间均不太敏感;镍和钴的浸出率随反应时间延长而略微增高,50 min 反应时间以后,镍和钴的浸出率均为 95% 以上,随反应时间的延长增高的幅度不大;镁的浸出率随反应时间的延长呈现缓慢增高的趋势,反应 50 min 以后,镁浸出率基本保持稳定;铝的浸出率随反应时间延长呈下降趋势,50 min 以后,铝的浸出率降至 20% 以下。

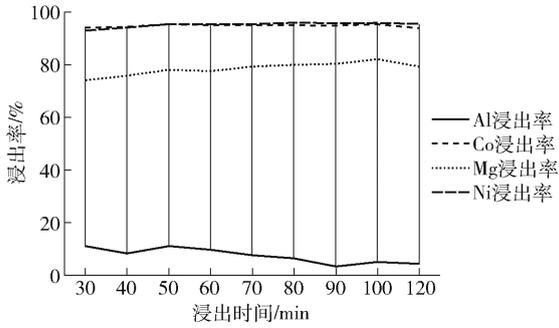


图3 浸出时间对浸出率的影响

综合考虑,反应时间 50 min 时,时间较短,镍钴浸出率较高,镁铝浸出率和能耗较低。

### 2.4 入釜矿浆浓度对浸出率的影响

反应条件:反应温度为 255 ℃,酸矿比 280 kg/t<sub>干矿</sub>,反应时间 60 min,搅拌速度为 120 r/min,入釜矿浆浓度(%)分别为:24、25、26、27、28、29、30。

所得结果如图 4 所示,从图中可以看出,镍、钴、镁、铝的浸出率对矿浆浓度的变化均不敏感;镍浸出率随着入釜矿浆浓度的增大而略微增高,钴的浸出率则基本保持不变,镁的浸出率随着浓度的增加而略微增高,铝的浸出率总体低于 20%,浓度大于大于 27% 以后,随浓度的增加而略微增高。

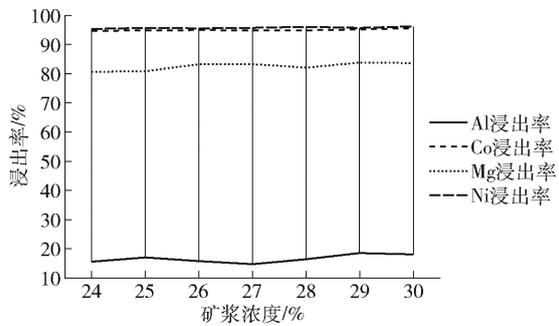


图4 矿浆浓度对浸出率的影响

综合考虑,25% 浓度时,镍的浸出率为 95.43%、钴的浸出率为 95.10%、镁的浸出率 80%、铝的浸出率 12%,总体技术指标较好。

### 2.5 搅拌速度对浸出率的影响

反应条件:反应温度为 250 ℃,酸矿比 255 kg/t<sub>干矿</sub>,反应时间 60 min,入釜矿浆浓度 25%,搅拌速度(r/min)分别为:240、200、160、120、100、80。

试验所得结果如图 5 所示,从图中可以看出,120 r/min 时,镍和钴的浸出率最高;镁的浸出率开始时随着搅拌速度的提升而下降,至 160 r/min 时镁

的浸出率达到最低,然后随着搅拌速度的提升而略微提升;铝的浸出率开始时随着搅拌速度的提升而下降,至 120 r/min 时降至最低的 14.7%,然后随着搅拌速度的提升而显著提升。

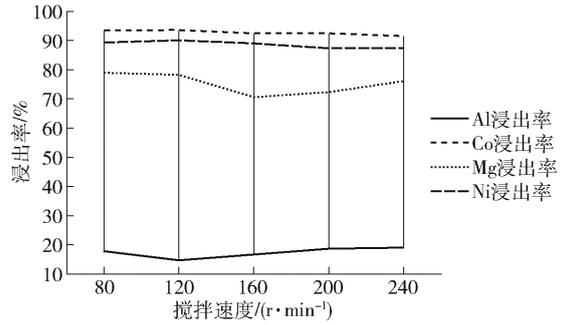


图5 搅拌速度对浸出率的影响

综合考虑,转速为 120 r/min 时,镍钴浸出率较高,镁铝浸出率和能耗较低。

### 2.6 正交试验

根据上述试验结果开展关于温度(250 ℃、255 ℃、260 ℃)和酸矿比(260 kg/t<sub>干矿</sub>、270 kg/t<sub>干矿</sub>、280 kg/t<sub>干矿</sub>)对浸出率影响的正交试验,其它试验条件为:

搅拌速度 120 r/min,浸出时间 50 min,浓度 25%。铝的浸出率均在 15% 以下,镁浸出率均在 82% 以下,钴的浸出率基本稳定,镍的浸出率波动较大(如表 1 所示)。从表 3 的试验结果看,温度越高,酸矿比越高,镍浸出率越高。

表3 温度与酸矿比正交试验的镍浸出率结果

酸矿比/ kg/t <sub>干矿</sub>	温度/℃		
	250	255	260
260	87.91	92.22	93.64
270	93.46	95.11	95.16
280	94.5	95.21	95.5

### 2.7 技术经济分析

对表 3 的结果进行技术经济分析比较,分析方法:浸出率的变化产生的效益折算成金属镍价值变化  $\Delta V_1$ ; 剩余温度变化的成本以重油产蒸汽的形式最终折算成重油价值变化  $\Delta V_2$ ; 酸矿比变化的成本以硫酸制酸的形式最终折算成硫酸价值差异  $\Delta V_3$ 。比较多产出镍的价值与多投入的成本(能耗和酸耗)之间的经济效益,即比较多产出的镍价值  $\Delta V_1$

与多投入的重油消耗价值  $\Delta V_2$  + 多投入的硫酸价值  $\Delta V_3$  的关系,若  $\Delta V_1 > \Delta V_2 + \Delta V_3$ ,则经济上可行,若  $\Delta V_1 < \Delta V_2 + \Delta V_3$ ,则经济上不划算,依此对表 3 中 9 个样的结果两两进行比较,最终得出最佳工艺条件。本试验高压釜为电间接加热(未配备能量计量),实际生产一般为蒸汽直接加热,为了便于分析计算,假定本试验采用 270 °C 蒸汽直接加热,加热后蒸汽转化为浸出温度下的冷凝水。

计算基本参数:

试验样的原矿重量  $m_{\text{矿}} = 0.2 \text{ kg}$

样品重量浓度  $W_1 = 25\%$

原矿镍品位  $G_1 = 1.168\%$

水比热容  $C_{\text{水}} = 4.2 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$

红土矿比热容  $C_{\text{矿}} = 364 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$

180#重油热值  $Q_1 = 42.7 \text{ MJ}/\text{kg}$

180#重油价格  $P_1 = 670 \text{ \$}/\text{t}$

产蒸汽的重油单耗  $U_1 = 65.5 \text{ kg}/\text{t}_{\text{蒸汽}}$

250 °C 蒸汽液体焓  $H_1 = 1.08 \text{ MJ}/\text{kg}$

255 °C 蒸汽液体焓  $H_2 = 1.11 \text{ MJ}/\text{kg}$

260 °C 蒸汽液体焓  $H_3 = 1.13 \text{ MJ}/\text{kg}$

270 °C 蒸汽焓  $H_4 = 2.76 \text{ MJ}/\text{kg}$

热损失系数  $\omega = 10\%$

镍价格  $P_2 = 19\,000 \text{ \$}/\text{t}$

硫酸价格  $P_3 = 70 \text{ \$}/\text{t}$

以 250 °C、260 kg/t<sub>干矿</sub> 条件(以下称为样 1)和 255 °C、260 kg/t<sub>干矿</sub> 条件(以下称为样 2)为例进行技术经济分析比较。样 1 所得浸出率为 87.91%,样 2 所得浸出率为 92.22%。因酸矿比相同,酸耗变化  $\Delta V_3$  为零,所以只需比较  $\Delta V_1$  和  $\Delta V_2$  值的大小。样

2 比样 1 多浸出金属镍的价值  $\Delta V_1 =$  样品原料中含的镍  $\times$  浸出率变化  $\times$  镍价格  $= G_1 \times (L_2 - L_1) \times P_2 = 1.89 \times 10^{-3} \text{ \$}$ 。样 2 比样 1 增加重油消耗价值  $\Delta V_2 =$  (红土干矿所需热量 + 矿浆中水所需热量)  $\times (1 + \omega) / (255 \text{ °C 蒸汽液体焓 } H_2 - 250 \text{ °C 蒸汽液体焓 } H_1) /$  蒸汽重油单耗  $\times$  重油价格  $= ((C_{\text{矿}} \cdot m_{\text{矿}} \cdot \Delta T + C_{\text{水}} \cdot m_{\text{水}} \cdot \Delta T) \times (1 + \omega) / (H_2 - H_1) / U_1 \times P_1 = 4.86 \times 10^{-6} \text{ \$}$ 。由以上结果可知,  $\Delta V_1 (= 1.89 \times 10^{-3}) > \Delta V_2 (= 4.42 \times 10^{-6}) + \Delta V_3 (= 0)$ ,即样 2 比样 1 虽多投入  $4.86 \times 10^{-6} \text{ \$}$  的重油成本但多浸出价值  $1.89 \times 10^{-3} \text{ \$}$  的金属镍,所以样 2 工艺条件比样 1 更经济。

再次以样 1 和 250 °C、270 kg/t<sub>干矿</sub> 条件(以下称为样 3)为例,进行技术经济分析比较。样 1 所得浸出率为 87.91%,样 3 所得浸出率为 93.46%。因温度相同,能耗变化  $\Delta V_2$  为零,所以只需计算比较  $\Delta V_1$  和  $\Delta V_3$  值的变化。样 3 比样 1 多浸出的金属镍价值  $\Delta V_1 =$  样品原料中含的镍  $\times$  浸出率变化  $\times$  镍价格  $= m_{\text{矿}} \times G_1 \times (L_2 - L_1) \times P_2 = 2.45 \times 10^{-3} \text{ \$}$ 。样 3 比样 1 增加硫酸消耗价值  $\Delta V_3 =$  红土矿干矿  $\times$  酸矿比变化  $\times$  硫酸价格  $= m_{\text{矿}} \times \Delta m_{\text{酸}} \times P = 1.40 \times 10^{-4} \text{ \$}$ 。由以上结果可知,  $\Delta V_1 (= 2.45 \times 10^{-3}) > \Delta V_2 (= 0) + \Delta V_3 (= 1.40 \times 10^{-4})$ ,样 3 比样 1 虽多投入  $1.40 \times 10^{-4} \text{ \$}$  的硫酸成本但多浸出价值  $2.45 \times 10^{-3} \text{ \$}$  的金属镍,所以样 3 工艺条件比样 1 更经济。

以此类推,对表 3 中任意两样的进行比较,结果如表 4 所示,最终得出,样 9 (260 °C, 280 kg/t<sub>干矿</sub>) 时,经济效益最佳。

表 4 技术经济分析结果

样 1	250 °C	260 kg/t <sub>干矿</sub>	<	样 2	255 °C	260 kg/t <sub>干矿</sub>	<	样 4	260 °C	260 kg/t <sub>干矿</sub>
	$\wedge$				$\wedge$				$\wedge$	
样 3	250 °C	270 kg/t <sub>干矿</sub>	<	样 5	255 °C	270 kg/t <sub>干矿</sub>	<	样 6	260 °C	270 kg/t <sub>干矿</sub>
	$\wedge$				$\vee$				$\wedge$	
样 7	250 °C	280 kg/t <sub>干矿</sub>	<	样 8	255 °C	280 kg/t <sub>干矿</sub>	<	样 9	260 °C	280 kg/t <sub>干矿</sub>

### 3 结论

根据以上的试验结果,得出以下结论:

(1)各因素对镍浸出率影响的优先级为:温度  $>$  酸矿比  $>$  浸出时间  $>$  搅拌速度  $>$  矿浆浓度。

(2)钴相对于镍更容易被浸出。

(3)铝的浸出率对浸出的温度和酸矿比较为敏感。

(4)在本文假定的市场条件下,该红土矿在 260 °C、(下转第 27 页)

## Research on Efficiency of Ventilation Waste Heat Recovery in an Alpine Mine

ZHANG Hai-sheng, YANG Chao-yi, GE Qi-fa, YIN Ji-gui, CAO Liang, HE Wen-bin

**Abstract:** Under the current “carbon peak and carbon neutrality” policy in China, mine waste heat recovery and reuse is one of the pathways for mines to transform to green and low carbon mines. Based on this background, in view of the current situation of ventilation in an alpine mine, this paper designs a ventilation waste heat recovery scheme to solve its shaft collar antifreeze issue in cold seasons, and analyzes the waste heat recovery effect by acquiring 6-month operating data of the system. The results show that the overall operation status of each waste heat recovery unit is relatively stable, and the effect of waste heat recovery is remarkable. Compared with the electric heating scheme, it greatly reduces the energy consumption and the operating costs, and has a huge potential for application promotion.

**Key words:** alpine mine; mine ventilation; waste heat recovery; shaft collar antifreeze; carbon peak and carbon neutrality development ▲

(上接第 21 页)

280 kg/t<sub>干矿</sub>、搅拌速度 120 r/min、浸出时间 50 min、浓度 25% 高压酸浸条件下能获得最佳经济效益。

试验为间断性操作、间接方式电加热、升温前已加酸和搅拌、降温时矿浆仍在高压釜内,与工业生产的连续加酸闪蒸、直接蒸汽加热等工艺条件有所不同,故试验结果与生产实际可能存在一定偏差。

[参考文献]

[1] USSG. Mineral Commodity Summaries 2021 [R]. USSG, 2021:113.

[2] 彭容秋. 镍冶金(第一版)[M]. 长沙:中南大学出版社, 2005.

[3] 刘瑶,丛自范,王德全. 对低品位镍红土矿常压浸出的初步探讨[J]. 有色矿业,2007,23(5):28.

[4] 方兆衍. 湿法冶金技术丛书浸出[M]. 北京:冶金工业出版社,2007.

[5] 贾露萍. 瑞木红土镍矿高压釜结垢及预防[J]. 有色设备,2018(6):88.

## Bench-scale HPAL Test and Research on Nickel Laterite Ore

JIA Lu-ping, WU Di, LIU Nan-cai, XIAO Gui-long

**Abstract:** This bench-scale test employs high-pressure acid leaching technology to treat typical near-equatorial low-grade wet nickel laterite ore, and studies the relationship between the Ni, Co, Al and Fe leaching rates and the temperature, acid-to-ore ratio, agitator revolution speed, leaching time and slurry feed concentration in the autoclave, and then, by means of technical and economic analysis, it further analyzes the screened test results, whereby discovering the optimum process conditions for high pressure acid leaching of the nickel laterite.

**Key words:** nickel laterite; HPAL; nickel; cobalt ▲