

硫酸亚铁通氧加压浸出红土镍矿试验研究

郑晓青^{1,2,3}, 郭佳文^{1,2,3,4}, 陈进中^{1,2,3}, 张伟光^{1,2,3},
曹雪娇^{1,2,3}, 冯吉福⁴, 李义兵^{1,2,3}, 李中林^{1,2,3}

1. 桂林理工大学 材料科学与工程学院, 广西 桂林 541004;
2. 桂林理工大学 有色金属及材料加工新技术教育部重点实验室, 广西 桂林 541004;
3. 桂林理工大学 有色金属矿产勘查与资源高效利用省部共建协同创新中心, 广西 桂林 541004;
4. 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 广西 桂林 541004)

摘要:以印度尼西亚某高铁低品位红土镍矿为研究对象,采用硫酸亚铁作浸出剂浸出其中的主要有价金属,分析了浸出条件对浸出的影响,并对浸出渣中铁品位变化进行研究。结果表明:在氧分压 0.4 MPa、硫酸亚铁用量 280 kg/t、液固体积质量比 3/1、搅拌速度 300 r/min、原矿粒度 140~200 μm 、温度 240 $^{\circ}\text{C}$ 条件下反应 45 min,镍和钴浸出率分别达 98.2%、98.1%;浸出渣中铁品位平均可提高至 55.8%,较原矿品位提高约 10%;在通氧加压浸出过程中,硫酸亚铁可氧化分解出硫酸和赤铁矿,有利于进一步提高浸出渣铁品位。

关键词:红土镍矿;氧气;加压浸出;硫酸亚铁;镍

中图分类号:TF803.21;TF815

文献标识码:A

文章编号:1009-2617(2025)02-0180-09

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2025.02.006

镍因具有高强度、高韧性、耐热性及耐腐蚀性等优势,在不锈钢制造与新能源领域占据重要地位,是国家发展战略中不可或缺的关键材料。根据美国地质调查局(USGS)2021年统计数据,全球已探明陆地镍储量中,含镍量超过 0.5%的总量达 3 亿 t,其中硫化镍矿与红土镍矿占比分别为 40%和 60%。随着镍基电池需求激增,国际市场对原镍的需求也持续攀升^[1-3],预计至 2040 年,全球镍需求量将显著增长,增幅可能达 41%^[2]。这一明显增长趋势,加之高品质镍矿石的日益稀缺,推进了全球采矿业对未开发镍矿床的加速勘探^[4-6]。在此背景下,高效开发低品位镍矿资源显得尤为重要。“十四五”规划期间,我国将新能源汽车与绿色环保产业列为重点发展领域,镍作为生产新能源汽车动力电池的关键金属,其重要性

日益凸显^[7-9]。但由于国内高品质硫化镍矿石供应持续萎缩,我国对硫化镍矿开发尚未取得突破性进展,同时受国际技术垄断的影响,导致我国镍资源高度依赖进口^[10-11],且以低品位红土镍矿进口为主^[12-13]。因此,加快技术创新,实现低品位红土镍矿的高效、经济开发利用,对于缓解国内镍供需紧张、促进新能源产业可持续发展具有重大意义。

当前,对低品位红土镍矿的研究主要聚焦于加压浸出工艺,常用浸出剂包括硫酸^[14-15]、盐酸^[16-17]及硝酸^[18-19]。但这些酸浸方法存在诸多弊端,如硫酸浸出法渣铁含量不达标、含硫量高易导致资源化利用困难及环境污染^[20-21];盐酸与硝酸浸出法都存在经济效益低、运输储存不便、安全风险高,以及长期使用高压釜会出现内壁结垢、管

收稿日期:2024-07-17

基金项目:国家自然科学基金-青年科学基金项目(52204358);广西自然科学基金项目(2023GXNSFBA026140);广西科技重大专项(桂科 AA23023033);广西科技基地和人才专项项目(桂科 AD22035105);中色基金项目(2022-2-KJJH01)。

第一作者简介:郑晓青(2000—),女,硕士研究生,主要研究方向为湿法冶金。

通信作者简介:陈进中(1968—),男,博士,教授级高级工程师,主要研究方向为有色金属冶金。E-mail:2017099@glut.edu.cn。

道堵塞、传热效率低^[22-23]等问题。鉴于此,探索并开发高效、安全、易操作的固体盐类浸出剂逐渐成为研究热点。硫酸亚铁作为潜在的新型浸出剂,具有运输储存便捷、操作安全、设备要求低等优势,且能有效解决红土镍矿加压浸出中铁含量不足的问题,使浸出渣中铁含量达到钢铁厂炼铁原料要求,实现红土镍矿里高含量铁的高值化利用。因此,试验采用硫酸亚铁浸出印度尼西亚某高铁低品位红土镍矿,研究了各浸出因素对主要金属元素浸出的影响,并讨论了浸出渣中铁品位的变化。

1 试验部分

1.1 试验原料、试剂及设备

试验用高铁低品位红土镍矿取自印度尼西亚,呈黄褐色及红褐色。原矿经干燥、破碎、混合均匀后,通过 X 射线荧光光谱分析其主要化学元素含量,通过原子吸收光谱法测定含量偏低的金属元素,通过滴定法测定含量偏高元素。原矿的化学成分分析结果见表 1。对 110 °C 下干燥 24 h 后的试验矿物进行物相分析,结果如图 1 所示。

表 1 原矿的化学成分分析结果
Table 1 Results of chemical composition analysis of raw ore

Fe	Al	Cr	Si	Mg	Ni	Mn	Co	Ca
44.97	3.08	2.19	1.34	1.02	0.83	0.69	0.07	0.06

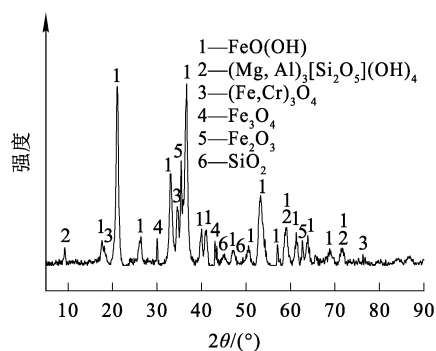


图 1 矿样的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of ore sample

由表 1 可知,试验用原矿中铁含量较高,为 44.97%;镍和钴含量较低,分别为 0.83% 和 0.07%。由图 1 看出,原矿中主要成分有针铁矿、蛇纹石、铬铁矿、磁铁矿、赤铁矿,还有少量石英;未检测到单

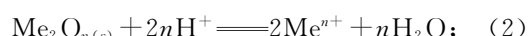
独的含镍矿物,可能是原矿中镍含量较低所致;FeO(OH)的衍射峰强度最大,其次是(Mg, Al)₃[Si₂O₅](OH)₄、(Fe, Cr)₃O₄,说明针铁矿是原矿的主要矿物组成,其次是蛇纹石、铬铁矿。

主要试剂:七水合硫酸亚铁(西陇科学股份有限公司),AR;纯水。

主要设备:GSH-1 型磁力驱动高压釜(威海市行雨化工试验器械有限公司);DHLT-9076A 型鼓风干燥箱(上海精宏试验设备有限公司);ZSX Primus IV 型 X 射线荧光光谱仪(日本理学公司);Z-2000 型原子吸收光谱仪(日本日立公司);D/max-2600 型 X 射线衍射仪(日本理学公司);725-ICP-OES 型电感耦合等离子体发射光谱仪(安捷伦科技有限公司);DISCV-IV-24 型超纯水机(成都艾柯水处理设备有限公司)。

1.2 试验方法及原理

硫酸亚铁通氧加压浸出试验在高压釜内进行。称取 200 g 原料和一定量硫酸亚铁,加入纯水,密封釜体并进行加热,达到设定温度后通入一定分压的氧气并开始记录反应时间。反应结束后,停止加热并关闭氧气阀,对冷却后的矿浆进行液固分离并保留浸出液。浸出渣用蒸馏水冲洗过滤后,在 110 °C 下烘干、称重,然后用王水溶解并稀释定容得待测液。测定待测液中镍、钴和铁含量,从而确定目标元素浸出率。硫酸亚铁通氧加压浸出过程中发生的主要化学反应^[24]如下(Me 代表 Ni、Co、Fe 等):



利用电感耦合等离子体发射光谱仪测定待测液中镍、钴浓度测定,根据式(4)计算镍、钴浸出率 η_B :

$$\eta_B = \frac{m_B - m_{B1}}{m_B} \times 100\%。 \quad (4)$$

式中: η_B —金属浸出率,%; m_{B1} —待测液中金属质量,g; m_B —原矿中金属质量,g。

利用浸出渣中铁质量及浸出渣质量,并依据式(5)计算得出铁品位 w :

$$w = \frac{m_a}{m_b} \times 100\%。 \quad (5)$$

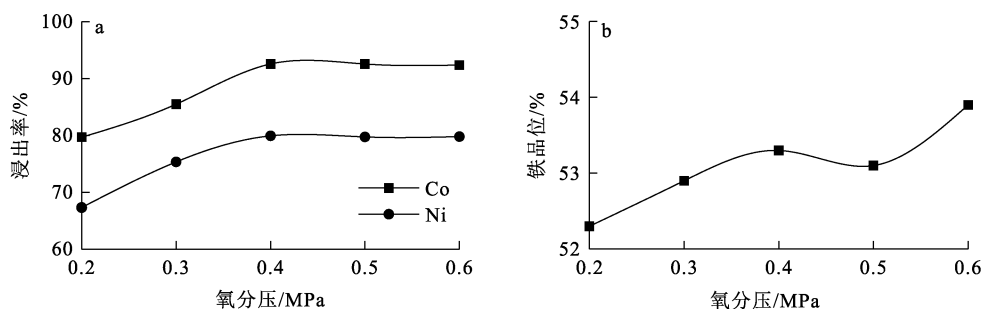
式中: w —铁品位,%; m_a —浸出渣中铁质量,g; m_b —浸出渣质量,g。

2 试验结果与讨论

2.1 氧分压对浸出率及浸出渣铁品位的影响

在硫酸亚铁用量 240 kg/t、反应温度 230 °C、

液固体积质量比 3/1、搅拌速度 400 r/min、浸出时间 60 min、矿物粒度 140~200 μm 条件下,氧分压对浸出的影响如图 2 所示。



a—镍、钴浸出率;b—浸出渣铁品位。

图 2 氧分压对浸出的影响

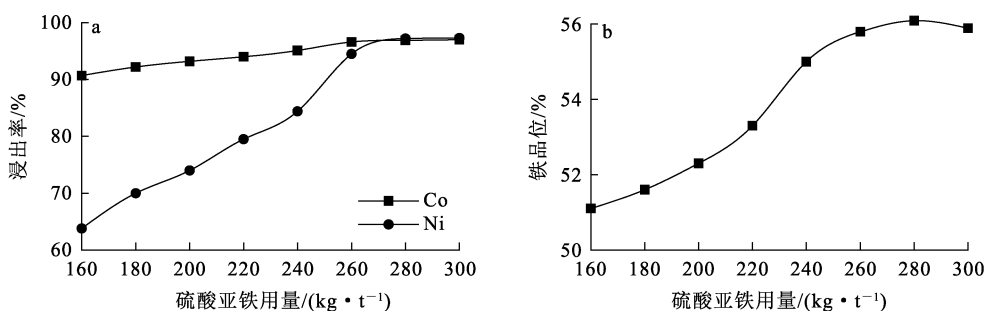
Fig. 2 Effect of oxygen partial pressure on leaching

由图 2(a)可知:随氧分压增大,镍和钴浸出率不断升高;氧分压增至 0.4 MPa 后,继续增加氧分压,二者浸出率变化均不大。这是由于加压浸出反应过程中,溶解氧是主要的氧化剂,氧分压升高,单位体积内溶解氧增多,氧气与硫酸亚铁的接触概率增大,能更好地氧化分解生成硫酸,促进反应向正向进行。由图 2(b)可知,随氧分压增大,浸出渣铁品位有所增加。综合考虑,选定适宜

的氧分压为 0.4 MPa,此条件下,镍、钴浸出率为 79.9%、92.6%,浸出渣铁品位为 53.3%。

2.2 硫酸亚铁用量对浸出率及浸出渣铁品位的影响

在氧分压 0.4 MPa、反应温度 230 °C、液固体积质量比 3/1、搅拌速度 400 r/min、浸出时间 60 min、矿物粒度 140~200 μm 条件下,硫酸亚铁用量对浸出的影响如图 3 所示。



a—镍、钴浸出率;b—浸出渣铁品位。

图 3 硫酸亚铁用量对浸出的影响

Fig. 3 Effect of ferrous sulfate dosage on leaching

由图 3(a)可知:硫酸亚铁用量增大可促进镍和钴浸出率提升,但用量超过 280 kg/t 后,镍和钴浸出率变化不明显。这是由于随硫酸亚铁用量增加,氧

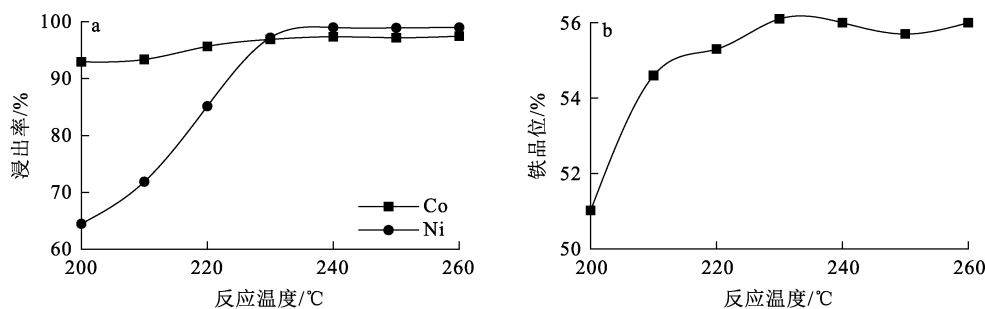
化分解所得硫酸增加,矿物与浸出剂接触概率增大,浸出反应更完全。由图 3(b)可知,随硫酸亚铁用量增大,浸出渣铁品位有所提高。综合考虑,选定适宜

的硫酸亚铁用量为 280 kg/t,此条件下,镍、钴浸出率分别为 97.2%、96.9%,浸出渣铁品位为 56.1%。

2.3 反应温度对浸出率及浸出渣铁品位的影响

在氧分压 0.4 MPa、硫酸亚铁用量 280 kg/t、

液固体积质量比 3 : 1、搅拌速度 400 r/min、矿物粒度 140~200 μm 条件下反应 60 min,反应温度对浸出的影响如图 4 所示。



a—镍、钴浸出率;b—浸出渣铁品位。

图 4 反应温度对浸出的影响

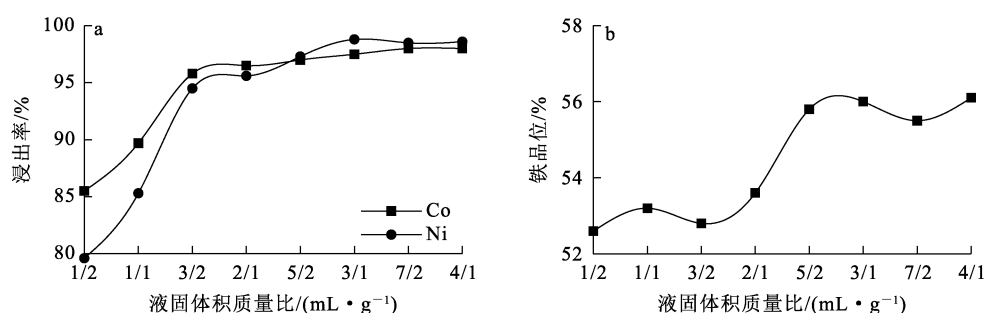
Fig. 4 Effect of reaction temperature on leaching

由图 4(a)可知:反应温度在 200 ~ 240 $^{\circ}\text{C}$ 范围内,镍、钴浸出率随反应温度升高呈明显升高趋势,这是因为随反应温度升高,矿物在浸出剂里的反应活性加大,分子运动速度加快,有效碰撞次数增加,使得反应速率加快反应温度;反应温度超过 240 $^{\circ}\text{C}$ 后,镍、钴浸出率变化均不明显。由图 4(b)可知,随温度升高,浸出渣铁品位提高。综合考虑,选定适宜的反应温度为 240 $^{\circ}\text{C}$,

此条件下,镍、钴浸出率分别为 98.8%、97.5%,浸出渣铁品位为 56.0%。

2.4 液固体积质量比对浸出率及浸出渣铁品位的影响

在氧分压 0.4 MPa、硫酸亚铁用量 280 kg/t、反应温度 240 $^{\circ}\text{C}$ 、搅拌速度 400 r/min、反应时间 60 min、矿物粒度 140~200 μm 条件下,液固体积质量比对浸出的影响如图 5 所示。



a—镍、钴浸出率;b—浸出渣铁品位。

图 5 液固体积质量比对浸出的影响

Fig. 5 Effect of liquid volume to solid mass ratio on leaching

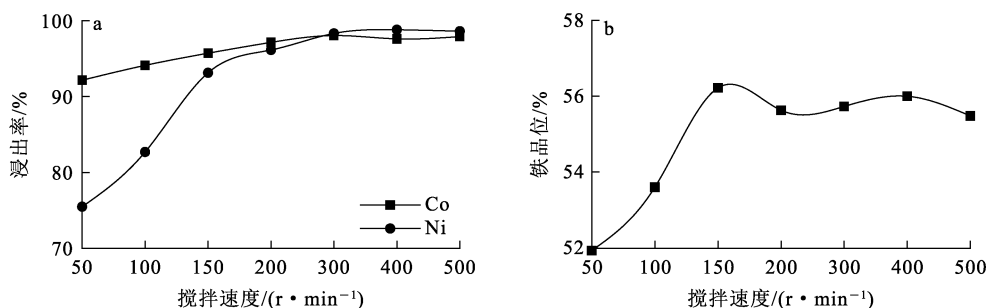
由图 5(a)看出:液固体积质量比从 1/2 增至 3/1,镍、钴浸出率明显升高;液固体积质量比继续增大,镍、钴浸出率变化很小。液固体积质量比较小时,体系传质与传热过程会受阻,如果液

固体积质量比过小则会引发体系内固体颗粒的聚集,减缓离子外扩散速度,并缩减浸出剂与矿物之间的接触面积,造成操作难度增大;液固体积质量比过大不仅会造成后续过滤等工序困

难,也会使操作成本增加。由图 5(b)可知,随液固体积质量比增大,浸出渣铁品位有所提高。综合考虑,选定适宜定液固体积质量比为 3/1,此条件下,镍、钴浸出率分别为 98.8%、97.5%,浸出渣铁品位为 56.0%。

2.5 搅拌速度对浸出率及浸出渣铁品位的影响

在氧分压 0.4 MPa、硫酸亚铁用量 280 kg/t、液固体积质量比 3/1、矿物粒度 140~200 μm、温度 240 °C、反应时间 60 min 条件下,搅拌速度对浸出的影响如图 6 所示。



a—镍、钴浸出率;b—浸出渣铁品位。

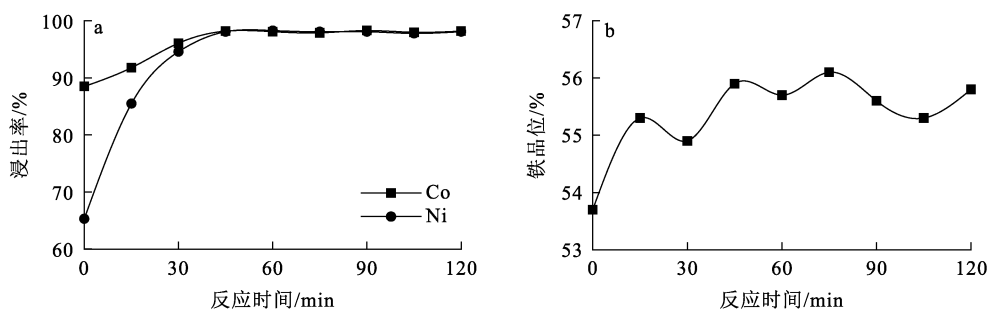
图 6 搅拌速度对浸出的影响
Fig. 6 Effect of stirring speed on leaching

由图 6(a)可知:镍和钴浸出率随搅拌速度增大而显著升高;当搅拌速度增至 300 r/min 后,镍和钴浸出率升幅较小。这是因为低搅拌速度条件下因搅拌强度不足,矿浆中颗粒沉积,影响浸出效果;而搅拌速度过大时,因镍和钴浸出已基本完成,对浸出影响较小。由图 6(b)可知,随搅拌速度增大,浸出渣铁品位有所提高。考虑到搅拌速度过高会增加能耗,提高成本,因

此选定适宜的搅拌速度为 300 r/min,此条件下,镍和钴浸出率分别为 98.4%、98.3%,浸出渣铁品位为 55.7%。

2.6 反应时间对浸出率及浸出渣铁品位的影响

在氧分压 0.4 MPa、硫酸亚铁用量 280 kg/t、液固体积质量比 3/1、矿物粒度 140~200 μm、反应温度 240 °C、搅拌速度 300 r/min 条件下,反应时间对浸出的影响如图 7 所示。



a—镍、钴浸出率;b—浸出渣铁品位。

图 7 反应时间对浸出的影响
Fig. 7 Effect of reaction time on leaching

由图 7(a)可知:在反应初期阶段,随反应时间延长,镍和钴浸出率呈明显升高趋势;浸出进行至

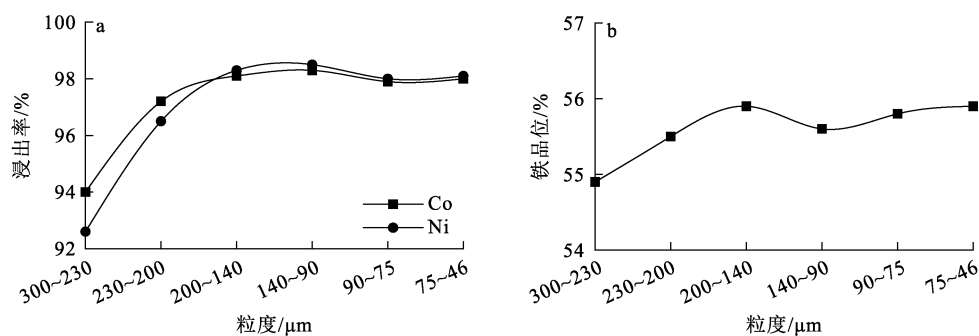
45 min 时,镍和钴浸出率分别达 98.1%、98.2%;之后继续浸出,2 种金属浸出率升幅不明显。这是由

于随反应时间延长,矿物与浸出剂接触更加充分,使反应体系传质更均匀,有利于矿物中有价金属的浸出;而浸出反应达到平衡时,继续延长反应时间,对提高浸出效果没有明显作用,还会增加成本。由图7(b)可知,随反应时间延长,浸出渣铁品位略有提高,这是高价态钴、镍难以被浸出,反应结束后会继续留在浸出渣中导致。综合考虑,选定适宜的反

应时间为 45 min,此条件下,镍、钴浸出率分别为 98.4%、98.3%,浸出渣铁品位为 55.9%。

2.7 原矿粒度对浸出率及浸出渣铁品位的影响

在硫酸亚铁用量 280 kg/t、反应温度 240 °C、液固体积质量比 3/1、搅拌速度为 300 r/min、反应时间 45 min 条件下,原矿粒度对浸出的影响如图 8 所示。



a—镍、钴浸出率;b—浸出渣铁品位。

图 8 原矿粒度对浸出的影响

Fig. 8 Effect of raw ore particle size on leaching

由图 8(a)可知:镍钴浸出率随原料粒度减小呈升高趋势;当粒度减小至 140~200 μm 时,进一步减小原矿粒度,镍和钴浸出率逐渐趋于稳定。这是由于矿物粒度越细,比表面积越大,矿物与浸出剂接触越充分,反应活性也越大,有利于有价金属的浸出;但粒度过小可能会造成反应过程中物料发生团聚现象,此外还会加大磨矿处理成本,增大后续液固分离难度。由图 8(b)可知,随原矿粒度减小,浸出渣铁品位变化很小。综合考虑,选定适宜的原矿粒度为 140~200 μm,此条件下,镍、钴浸出率分别为 98.4%、98.3%,浸出渣铁品位为 55.9%。

2.8 平行优化试验

根据上述单因素条件试验确定最优浸出条件为:氧分压 0.4 MPa,硫酸亚铁用量 280 kg/t,反应温度 240 °C,液固体积质量比 3/1,搅拌速度为 300 r/min,反应时间 45 min,原矿粒度 140~200 μm。在该条件下进行 3 组平行优化试验,结果见表 2。可知,镍、钴平均浸出率分别为 98.2%、98.1%;浸出渣铁平均品位为 55.8%,说明在硫酸亚铁加压浸出体系中,镍和钴浸出效果较好。

表 2 最佳条件下的平行优化试验结果

Table 2 Parallel optimization test results under optimal conditions

试验编号	浸出率/%		浸出渣中铁品位/%
	Ni	Co	
1	98.4	98.3	55.9
2	98.2	98.0	56.1
3	98.1	98.2	55.6
均值	98.2	98.1	55.8
标准差	0.15	0.15	0.25

2.9 浸出渣的 XRD 表征

最优工艺条件下的浸出渣的 XRD 图谱如图 9 所示。可以看出:浸出渣中矿相主体为赤铁矿;赤铁矿的衍射峰非常尖锐,尖峰强度也较高,表明晶型较完善,这主要是在加压酸浸工艺中,硫酸中的 H⁺与存在于红土镍矿中的部分金属氧化物反应,导致金属转化为相应的离子形态,进而迁移至浸出液中,随后浸出液中的三价铁离子于高温环境下经水解沉淀反应,最终以赤铁矿的形式沉淀析出,进入浸出渣中;渣中还存在少许没有浸出完

全的蛇纹石,以及些许杂质有价金属元素的硅酸盐;此外,还存在少许无定形物,推断可能是少许无定形的石英。

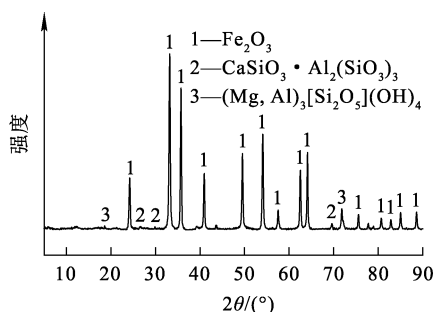


图 9 浸出渣的 XRD 图谱

Fig. 9 XRD pattern of leaching residue

3 结论

1) 针对印度尼西亚某高铁低品位红土镍矿,采用硫酸亚铁通氧加压浸出技术,在氧分压 0.4 MPa、硫酸亚铁用量 280 kg/t、液固体积质量比 3/1、搅拌速度 300 r/min、原矿粒度 140~200 μm、温度 240 °C 最优条件下反应 45 min,镍和钴浸出率分别可达 98.2%、98.1%。针对相同的高铁低品位红土镍矿物料,分别采用硫酸亚铁通氧加压浸出和硫酸加压浸出 2 种工艺进行处理,前者的反应温度比后者下降 10 °C,浸出时间减少 15 min,硫酸亚铁通氧加压浸出法对于高铁低品位红土镍矿的处理适应性更好。

2) 硫酸亚铁在通氧加压浸出过程中,氧化分解生成硫酸和赤铁矿,有利于进一步提高浸出渣铁品位。在最佳浸出工艺条件下,浸出渣铁品位平均可提高至 55.8%,较原矿品位提高约 10%,能满足炼铁原料对铁品位(不低于 55%)的要求。后续可通过浸出渣脱硫处理,满足炼铁原料对硫含量的要求,从而实现浸出渣的资源化利用。

参考文献:

[1] FARROKHPAY S, FILIPPOV L, FORNASIERO D. Pre-concentration of nickel in laterite ores using physical separation methods[J]. Minerals Engineering, 2019, 141. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.105892.
 [2] 丁郁. 欧盟对动力电池用镍资源产业链的研判及启示[J]. 中国物价, 2021(7): 72-74.
 DING Fang. Research and judgment by the EU on nickel

resource in the industry chain of power battery and its enlightenment[J]. China Price, 2021(7): 72-74.
 [3] 李成伟, 柴文帅, 张邦胜. 全球镍资源供应现状简析[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(7): 99-101.
 LI Chengwei, CHAI Wenshuai, ZHANG Bangsheng. Brief analysis of global nickel resource supply status[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(7): 99-101.
 [4] 饶富, 马恩, 郑晓洪, 等. 硫化镍矿中镍提取技术研究进展[J]. 化工学报, 2021, 72(1): 495-507.
 RAO Fu, MA En, ZHENG Xiaohong, et al. Research advances on nickel extraction technology from nickel sulfide ore[J]. CIESC Journal, 2021, 72(1): 495-507.
 [5] 徐爱东, 陈瑞瑞, 李烁, 等. 镍钴行业发展形势分析及建议[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(6): 9-15.
 XU Aidong, CHEN Ruirui, LI Shuo, et al. Analysis and suggestions on the development of nickel-cobalt industry[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(6): 9-15.
 [6] 黄亚伟, 汤林彬, 王鹤鸣, 等. 能源转型背景下的中国镍动态物质流分析[J]. 科技导报, 2022, 40(21): 110-119.
 HUANG Yawei, TANG Linbin, WANG Heming, et al. Dynamic material flow analysis of nickel in China under the background of energy transformation[J]. Science & Technology Review, 2022, 40(21): 110-119.
 [7] 杨俊峰, 潘寻. “十四五”中国锂动力电池产业关键资源供需分析[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(6): 37-41.
 YANG Junfeng, PAN Xun. Analysis on supply and demand of key resources of lithium power battery industry in China during the 14th five-year plan period[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(6): 37-41.
 [8] 张念. 双循环格局下我国镍资源国际化策略研究[J]. 中国有色金属, 2021(23): 40-42.
 ZHANG Nian. Research on the internationalization strategy of nickel resources in China under the dual circulation pattern[J]. China Nonferrous Metals, 2021(23): 40-42.
 [9] 金一丹. 新能源汽车“带货”镍需求量大增[N]. 中国证券报, 2022-04-21(6).
 [10] 潘建, 田宏宇, 朱德庆, 等. 镍矿资源供需分析及红土镍矿开发利用现状: 2019 年镍产业发展高峰论坛暨 APOL 年会[C]//亚洲与太平洋地区红土镍矿合作组织(APOL). 2019 年镍产业发展高峰论坛暨 APOL 年会会刊. [出版者不详]: [出版者不详], 2019: 10.
 [11] PICKLES C A, ANTHONY W. Thermodynamic modelling of the reduction of a saprolitic laterite ore by methane[J]. Minerals Engineering, 2018, 120: 47-59.
 [12] PICKLES C A, FORSTER J, ELLIOTT R. Thermodynamic analysis of the carbothermic reduction roasting of a nickeliferous limonitic laterite ore[J]. Minerals Engineering, 2014, 65: 33-40.
 [13] 邵鹏, 王雅楠. 镍及其制品贸易格局演变及中国贸易网络分析[J]. 中国矿业, 2022, 31(3): 1-9.
 SHAO Peng, WANG Yanan. Evolution of nickel and arti-

- cles thereof trade pattern and analysis of China's trade network[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(3): 1-9.
- [14] 郭佳文, 陈进中, 冯吉福. 高铁低品位红土镍矿酸浸工艺研究[J]. 湿法冶金, 2024, 43(1): 20-28.
GUO Jiawen, CHEN Jinzhong, FENG Jifu. Acid leaching process of laterite nickel ore with high iron content and low grade[J]. Hydrometallurgy of China, 2024, 43(1): 20-28.
- [15] 李丹. 低品位褐铁矿型红土镍矿湿法工艺研究进展及应用前景展望[J]. 湿法冶金, 2024, 43(4): 345-356.
LI Dan. Research progress and application prospect of hydrometallurgy for low grade laterite nickel ore [J]. Hydrometallurgy of China, 2024, 43(4): 345-356.
- [16] 符芳铭, 胡启阳, 李新海, 等. 稀盐酸溶液还原浸出红土镍矿的研究[J]. 矿冶工程, 2009, 29(4): 74-76.
FU Fangming, HU Qiyang, LI Xinhai, et al. Reduction leaching of lateritic nickel by dilute hydrochloric acid solution [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2009, 29(4): 74-76.
- [17] 郭学益, 吴展, 李栋, 等. 红土镍矿常压盐酸浸出工艺及其动力学研究[J]. 矿冶工程, 2011, 31(4): 69-72.
GUO Xueyi, WU Zhan, LI Dong, et al. Atmospheric leaching of nickel laterite by hydrochloride acid and its kinetics [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2011, 31(4): 69-72.
- [18] 王成彦, 曹志河, 马保中, 等. 红土镍矿硝酸加压浸出工艺[J]. 过程工程学报, 2019, 19(增刊 1): 51-57.
WANG Chengyan, CAO Zhihe, MA Baozhong, et al. Nitric acid pressure leaching of laterite ores [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2019, 19(Sup. 1): 51-57.
- [19] 赵顶, 马保中, 王成彦, 等. 褐铁矿型红土镍矿湿法工艺研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(2): 401-414.
ZHAO Ding, MA Baozhong, WANG Chengyan, et al. Research progress of limonitic laterite hydrometallurgy [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2023, 54(2): 401-414.
- [20] WHITTINGTON I B, MUIR D. Pressure acid leaching of nickel laterites: a review [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2000, 21(6): 527-599.
- [21] 党晓娥, 谭金滔, 卢苏君, 等. 低品位褐铁矿型红土镍矿资源化利用与新技术研发现状[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(4): 12-20.
DANG Xiao'e, TAN Jintao, LU Sujun, et al. Resource utilization and new technology development of low grade limonite laterite nickel ore [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022(4): 12-20.
- [22] 王寨寨, 李博, 魏永刚. 红土镍矿处理工艺研究现状[J]. 矿产综合利用, 2022(5): 95-101.
WANG Zhaizhai, LI Bo, WEI Yonggang. Research status of laterite nickel ore processing technology [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(5): 95-101.
- [23] 贾露萍. 瑞木红土镍矿高压釜结垢研究和预防[J]. 有色设备, 2018(6): 86-91.
JIA Luping. Study and prevention of autoclave scaling of ramu nickel laterite ore [J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2018(6): 86-91.
- [24] 皮关华, 孔凡祥, 贾露萍, 等. 瑞木红土镍矿高压酸浸的生产实践[J]. 中国有色冶金, 2015, 44(6): 11-14.
PI Guanhua, KONG Fanxiang, JIA Luping, et al. Practice of the HPAL Ramu laterite nickel [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2015, 44(6): 11-14.

Pressure Leaching of Laterite Nickel Ore by Ferrous Sulfate Oxygen Pressure Leaching

ZHENG Xiaoqing^{1,2,3}, GUO Jiawen^{1,2,3,4}, CHEN Jinzhong^{1,2,3}, ZHANG Weiguang^{1,2,3},

CAO Xuejiao^{1,2,3}, FENG Jifu⁴, LI Yibing^{1,2,3}, LI Zhonglin^{1,2,3}

(1. College of Materials Science and Engineering, Guilin University of Technology,

Guilin 541004, China;

2. Key Laboratory of New Technology for Nonferrous Metals and Materials Processing,

Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

3. Collaborative Innovation Center for Exploration of Nonferrous Metal Deposits and Efficient

Utilization of Resources, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

4. China Nonferrous Guilin Institute of Mineral Geology Co., Ltd., Guilin 541004, China)

Abstract: Aiming at a high iron and low grade laterite nickel ore in Indonesia, the effects of leaching conditions on the leaching of main valuable metals in the raw ore were analyzed, and the change of iron grade in the leaching residue was studied using ferrous sulfate as leaching agent. The results show that under the conditions of oxygen partial pressure of 0.4 MPa, dosage of ferrous sulfate of 280 kg/t, liquid volume to solid mass ratio of 3/1, stirring speed of 300 r/min, raw ore size of 140 ~ 200 μm and

temperature of 240 °C for 45 min, the leaching rates of nickel and cobalt can reach 98.2% and 98.1%, respectively. The iron average grade of leaching slag can be increased to 55.8%, which is about 10% higher than that of raw ore. In the process of pressure leaching by oxygen, ferrous sulfate can be oxidized and decomposed into sulfuric acid and hematite, which is conducive to further improve the iron grade of the leaching residue.

Key words: laterite nickel ore; oxygen; pressure leaching; ferrous sulfate; nickel

欢迎订阅 2025 年《铀矿冶》

《铀矿冶》创刊于 1982 年,季刊,中国核学会铀矿冶学会主办,为中国科技核心期刊和原子能技术类的核心期刊。《铀矿冶》是以应用技术为主、兼顾基础理论的综合性科技刊物,主要刊登放射性金属、贵金属、稀土、稀有金属和有色金属等矿石的采矿、选矿、冶金及有关矿山地质、物理探矿、矿山测量、安全防护、分析检测、设备仪表、有机材料、环境保护、自动控制、计算机应用、技术经济分析等方面的科技成果、先进技术、综合述评、工作简报和动态等,可供从事矿冶生产、科研、设计、教学的科技、管理人员及化学、化工、地质等相关专业人员参阅。

《铀矿冶》为中国科技论文统计源和中文核心期刊,《中国期刊全文数据库》《中文科技期刊数据库》《中国核心期刊(遴选)数据库》《中国学术期刊综合评价数据库》《中国学术期刊检索与评价数据库》收录期刊,《万方数据——数字化期刊群》全文上网期刊,美国《Chemical Abstracts》来源期刊。

《铀矿冶》为大 16 开,2025 年每期 10.00 元,全年 40.00 元,自办发行。欲订者可与编辑部联系。

通信地址:北京市通州区九棵树 145 号《铀矿冶》编辑部

邮政编码:101149

开户银行:工行北京九棵树支行

开户名:核工业北京化工冶金研究院

账号:0200 0498 0900 8800 221(请注明汇款用途)

联系电话:010-51674124

电子信箱:youkuangye@126.com

联系人:吕志新

投稿网址:https://ykyi.cbpt.cnki.net

