

引用格式:张众,赵晨晨,郑锦松,等. HPAL 技术在红土镍矿中的应用[J]. 有色设备,2025,39(6):24-34.

ZHANG Zhong, ZHAO Chenchen, ZHENG Jinsong, et al. Application of HPAL technology in laterite nickel ore[J]. Non-ferrous Metallurgical Equipment,2025,39(6):24-34.

HPAL 技术在红土镍矿中的应用

张 众, 赵晨晨, 郑锦松, 曹 刚, 孟熙祥*

(瑞木镍钴管理(中冶)有限公司, 北京 100000)

[摘 要] 随着全球新能源汽车的发展,三元锂电池用镍钴资源需求的增加,低品位红土镍矿成为了重要的镍钴资源之一。红土镍矿中的镍钴主要以金属氧化物形式存在,其金属镍品位相对较低。高压酸浸(HPAL)技术通过高温、高压及浓硫酸条件下处理矿石,能高效浸出镍、钴离子,并使其以硫酸盐形式进入溶液,进而通过中和、沉淀等工序实现金属的富集与提纯。本文分析红土镍矿资源与矿石特性,概述红土镍矿的冶炼技术(HPAL、中温酸浸/氨浸、回转窑-电炉(RKEF)和回转窑直接还原-磁选(R/S)),分析了 HPAL 冶炼技术的工艺原理、技术优势以及应用前景,重点分析了中和除铁铝影响因素。HPAL 技术不仅提高了镍钴的回收率,还能够降低冶炼过程中产生的废气废水排放,为低品位的红土镍矿的富集提炼提供了新的思路。

[关键词] HPAL 冶炼技术; 红土镍矿; 湿法冶金; 镍提取; 三元锂电池; 新能源

[中图分类号] TF815 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)06-0024-11

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.06.003

0 引言

红土镍矿作为一种重要的镍钴资源,具有储量大、分布广泛的特点^[1-3]。然而,红土镍矿通常含镍量较低且伴随有较多的杂质(如铁、铝、镍、硅、钴、铬等),给传统的冶炼方法带来了挑战。高压酸浸法(HPAL, High-Pressure Acid Leaching)^[4-7]作为常用的红土镍矿处理技术,虽然能够高效提取镍钴,但存在投资高、生产操作难度大、设备腐蚀性强等缺点。传统的冶炼方法,如电炉冶炼以及氢还原,面临处理过程中高温、高能耗的问题^[8-10]。因此,如何在保证提取效率的同时降低能耗和环境污染成为镍冶炼领域的一个重要研究方向。

HPAL 技术用于红土镍矿中镍钴金属的富集提炼^[11]。红土镍矿中的金属氧化物在高温、高压反应条件下与浓硫酸反应,镍钴氧化物及部分杂质转化为硫酸盐,根据不同沉淀物的溶解平衡常数调节 pH 值实现杂质分离。HPAL 技术是一种连续的、清洁

的生产工艺^[12-14],工艺控制相对成熟,可以实现低品位红土镍矿的富集提炼制得 MHP 产品。氢氧化镍钴($\text{Co/Ni}(\text{OH})_2$)是一种重要的镍钴中间产品,广泛应用于多个领域,包括电池、催化剂、金属镍、防腐涂层、水处理、催化剂载体以及一些化学反应中的中间体等的制备。本文通过对 HPAL 技术在红土镍矿生产中的原理和工艺流程进行梳理分析,明晰生产工艺控制原理和工艺参数调控。

1 红土镍矿冶炼技术的发展现状

1.1 资源与矿石特性

红土镍矿主要分布于热带和亚热带的赤道地区,其中印尼、菲律宾、新喀里多尼亚、澳大利亚、巴布亚新几内亚、巴西和古巴是资源最为集中的国家和地区^[15]。全球红土镍矿资源量约占镍总资源量的 60%~70%,资源量庞大,易于露天开采,但品位通常较低(0.8%~2.5% Ni),是目前镍供应的主要来源。红土镍矿从上至下分为褐铁矿层、过渡带以及硅酸盐矿

[收稿日期] 2025-08-12

[基金项目] 国家重点研发计划(2021YFC2902502-04)。

[第一作者] 张众(1995—),男,甘肃靖远人,工程师,硕士,主要从事有色金属冶炼工艺研究工作。

[通信作者] 孟熙祥(1994—),男,四川广元人,工程师,硕士,主要从事红土镍矿化验分析检测工作。

层,其中,褐铁矿层(Limonite)富含铁(40%~50%)、镍含量偏低(0.8%~1.5%),钴富集程度高,二氧化硅含量最低,多用于湿法 HPAL 工艺提取镍钴(表1)^[16];过渡带的铁、镁、硅、镍、钴含量适中,是褐铁矿层与硅酸盐层的过渡,该范围内矿石不均一性强,是混矿与工艺边界层,对酸耗、沉降和过滤稳定性影响明显;硅酸盐矿层中含镁、硅高,铁和钴含量较

低,镍含量相对较高(1.5%~3%),适合回转窑还原-电炉熔炼(RKEF)火法制备镍铁合金^[17]。红土镍矿中伴生元素复杂,含有铁、铝、镁、硅、钴、铬等杂质元素,其中钴具有较高回收价值,在湿法提炼技术中钴和镍作为有价元素富集在 MHP 产品中。红土镍矿冶炼适应性差异大,不同层位的矿石在火法、湿法中的适应性不同,因此常常需要分层开采、分质利用。

表 1 红土镍矿的类型、组分及处理工艺^[16]Table 1 Types, fractions and treatment processes of nickel laterites^[16]

%

矿层名称	元素含量或品位					提炼工艺
	Ni	Co	SiO ₂	Fe	MgO	
红色褐铁矿	<0.8	<0.1	1~5	>50	<0.5	湿法工艺
黄色褐铁矿	0.8~1.5	0.1~0.2	3~10	40~50	0.5~5	湿法工艺
过渡层	1.2~1.8	0.02~0.1	10~25	25~40	5~15	湿法、火法工艺
硅酸盐层	1.4~3.0	0.02~0.1	35~50	30~50	15~35	火法工艺

1.2 主要冶炼路线

红土镍矿冶炼技术主要包括火法和湿法两大类。

1.2.1 火法处理工艺

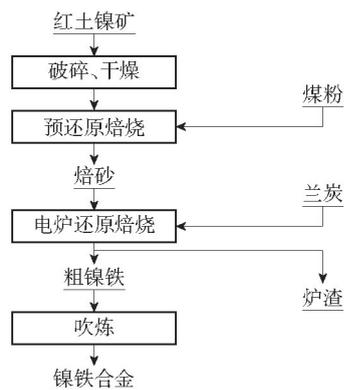
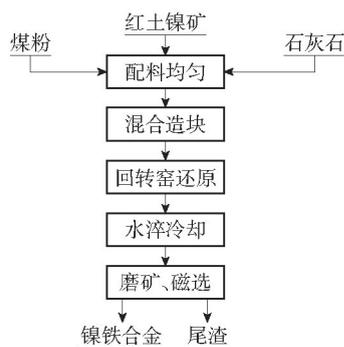
红土镍矿的火法处理方式主要是指通过高温冶炼工艺提取镍金属或生成镍铁合金。常见的火法工艺有以下几类。

1) 回转窑还原-电炉熔炼法(Rotary Kiln Reduction-Electric Furnace Smelting, RKEF)。先将红土镍矿在回转窑中进行干燥、预热和部分还原,再送入电炉中熔炼,生成含镍铁合金(即镍铁)^[18]。该工艺成熟,设备可靠,适用于高镁低铁型红土镍矿,但是能耗较高,对电力资源依赖大,主要应用在印尼红土镍矿火法提炼项目,是目前红土镍矿火法提炼最成熟、应用最广工艺。相比湿法提炼技术,火法工艺更适合高镁低铁矿石,但能耗和二氧化碳排放相对较高。RKEF 工艺流程如图 1 所示^[19]。

2) 回转窑直接还原-磁选工艺,又称“大江山法”。该工艺是一种典型的红土镍矿火法冶炼技术,如图 2 所示^[20]。该工艺首先将红土镍矿进行干燥与破碎预处理,然后按比例加入煤粉和石灰等还原剂与造渣剂,充分混合后制成球团或压块;高温条件下物料在回转窑中还原焙烧,生成海绵状的镍铁合金;经水淬冷却后,产物再经过磨矿与磁选分离,最终获得镍铁精粉及尾渣^[21-22]。

3) 高炉熔炼镍铁工艺。该工艺是在传统高炉炼铁技术的基础上,结合我国红土镍矿资源特性所

形成的一种改进型火法冶炼路线。该方法主要针对褐铁矿型红土镍矿,通常利用钢铁企业闲置的烧结机

图 1 RKEF 工艺流程^[19]Fig. 1 RKEF process flow^[19]图 2 回转窑直接还原-磁选工艺流程^[20]Fig. 2 Rotary kiln direct reduction-magnetic separation process flow^[20]

与高炉设备进行生产,具有投资较小、操作成熟及生产效率较高等优势。其整体工艺过程与常规炼铁流程相似,即红土镍矿经干燥、破碎处理后,在烧结机中进行抽风烧结,生成烧结矿后送入高炉进行还原熔炼,从而获得含镍生铁产品(图 3)^[23]。由于褐铁型红土镍矿含有较高比例的游离水和结晶水,为避免影响烧结矿的质量,通常在烧结前掺加一定量的生石灰。生石灰的吸湿性与放热作用能够有效促进矿料脱水,提高烧结过程的稳定性与最终矿块的机械强度^[24-26]。

1.2.2 湿法处理工艺

湿法冶炼以高压酸浸(HPAL)、中温酸浸及氨浸法为主,其中 HPAL 技术应用最广。在高温高压浓酸条件下,镍钴化合物有效溶解,同时尽量减少 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 等杂质浸出。浸出液经中和除铁铝和沉镍钴工序,实现镍钴富集并转化为氢氧化镍和氢氧化钴中间体。中温酸浸/氨浸适用于低杂质矿石,操作温和但回收率不足 80%^[20],应用有限。随着 HPAL 工艺的优化,通过调整浸出压力、温度、酸浓度及反应时间,并改善中和渣浆沉降及固液分离效果,浸出效率和杂质控制水平明显提升,保证了产品质量与产量。

1.2.3 小结

红土镍矿受形成环境、风化程度及母岩成分影响,通常呈现褐铁矿层、过渡层及蛇纹岩层等垂向分

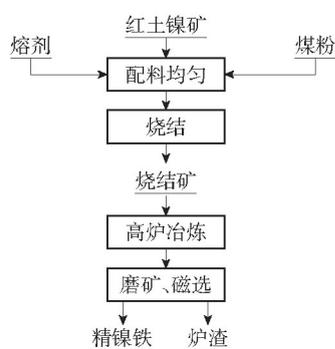


图 3 高炉熔炼镍铁工艺流程

Fig. 3 Blast furnace smelting process for ferronickel production

带结构。不同矿层在矿物组成、化学性质及镍的赋存状态上差异显著,褐铁矿层富含氧化铁矿物,而蛇纹岩层以镁硅酸盐为主。这些理化性质差异直接决定了适用的冶炼工艺^[27-29]。针对不同类型红土镍矿,国内外已形成多种提炼技术体系,主要包括高压酸浸(HPAL)、中温酸浸/氨浸、回转窑-电炉(RKEF)及回转窑直接还原-磁选(R/S)等工艺。各工艺在能耗、回收率及环境影响方面各具优势,呈现出因地选技的发展趋势。表 2 汇总了主要红土镍矿提炼技术发展现状,表 3 对比了几种主要红土镍矿提炼方法之间的优劣势,为资源高效利用与技术选型提供参考。

表 2 红土镍矿冶炼技术发展现状

Table 2 Development status of laterite nickel ore smelting technologies

技术路线	应用地区	主要工艺指标	典型回收率	技术成熟度
HPAL(高压酸浸)	菲律宾、澳大利亚、印尼、巴布亚新几内亚	浸出温度:250~255℃ 浸出压力:4~6 MPa 硫酸浓度:25%~35%	Ni:90%~95% Co:85%~90%	商业化成熟
中温酸浸/氨浸	中国部分矿山	浸出温度:80~120℃ 酸性或弱碱性	Ni:60%~75% Co:50%~65%	起步阶段
回转窑-电炉(RKEF)	印尼	温度:1300~1600℃ 还原剂:焦炭/碳素	Ni:85%~90% Co:80%~85%	工业化成熟,能耗高
回转窑直接还原-磁选	中国为主、部分资源国开展试验或示范	还原温度:1000~1200℃, 还原剂用量8%~15%	镍:80%~92% 铁:70%~90%	工业试验阶段

1.3 HPAL 提炼技术应用现状

高压酸浸(High Pressure Acid Leaching, HPAL)工艺作为红土镍矿高效提取镍钴的冶炼技术,近年来在全球范围内取得了显著发展。HPAL 工艺已在

澳大利亚、菲律宾、印尼及巴布亚新几内亚等主要产区实现商业化生产,经过长期运行,工艺参数不断优化。瑞木镍钴管理(中冶)有限公司通过技术提升、工艺优化、设备升级等措施实现了杂质控制水平和

表 3 湿法/火法冶炼工艺优缺点比较

Table 3 Comparison of advantages and disadvantages of wet and fire processes

分类	工艺类型	优点	缺点
湿法提炼	还原焙烧-氨浸工艺	试剂循环利用,镍钴均可回收	钴回收率低,适应性差,浸出率低
	高压酸浸工艺	镍钴浸出率高,浸出成本低于氨浸法	设备要求高,高压釜及排料管线易结垢
	常压酸浸工艺	能耗及成本低,易控制	镍钴浸出率低,渣液难分离
火法提炼	RKEF 工艺	工艺成熟,生产效率及回收率高	能耗高,钴无法有效回收
	高炉工艺	处理量大,生产效率较高	原料适应性差,产品镍含低
	还原焙烧-磁选工艺	能耗和生产成本较低,污染可控	操作难度大,磁选参数难以控制

产品稳定性显著提升,杂质元素含量呈现稳步降低的趋势,MHP 产品镍含量能够稳定保持在 40% 以上的高水平,同时镍、钴回收率提高(镍回收率能够稳定达到 90% 左右的水平)。国内部分大型冶炼企业也在加速 HPAL 技术的引进与自主优化,通过本地化调整工艺参数、改进浸出-沉淀-中和环节,提高资源利用效率,并在高固含浆体处理、高效除铁铝和多元金属回收等方向开展技术二次开发,力求形成具有自主知识产权的技术体系。未来,HPAL 工艺发展趋势将趋向精细化控制、绿色高效以及国际经验借鉴相结合,以实现红土镍矿的高效利用和工业化应用的可持续发展。

2 HPAL 冶炼技术的原理与工艺流程

高压酸浸技术的核心原理是在酸性溶液、高温和高压的条件下,促进矿石中有价值的金属离子溶解。通常,采用的酸性溶液包括硫酸、盐酸、硝酸等,而矿石则可以是含有铜、镍、钴、铝等金属的矿物。红土镍矿的高压酸浸过程通常在压力为 5 ~ 6 MPa、温度为 250 °C 左右的环境中进行,以加速反应速率,并有效提高金属离子的溶解效率和浸出率。高压酸浸工艺流程如图 4 所示。

2.1 矿浆浓密

供应矿浆的主要元素成分,见表 4。

生产中初始供应矿浆的浓度相对较低(仅约 20%),通过浓密机浓密固液分离,提升初始供应矿浆浓度,以保证生产中足够的进料干矿量。在矿浆浓密过程中,采用深锥膏体浓密机进行矿浆浓密,通过浓密机给料泵将初始供应矿浆打入溜槽,按照生产要求矿浆浓度在溜槽中加入与泵入矿浆相匹配的絮凝剂,在溜槽中充分混合的矿浆和絮凝剂进入导

料桶中缓慢浓密沉降于浓密机底部。浓密后的矿浆经浓密机底流泵输送至下一工序。为保证浓密机进出料平衡,可通过质量守恒计算进出矿浆量,假设进入浓密机初始矿浆浓度为 C_1 ,密度为 ρ_1 、进料体积 V_1 、浓密后矿浆浓度为 C_2 ,密度为 ρ_2 ,则出料体积 V_2 的计算见式(1)。

$$V_2 = (\rho_1 \times V_1 \times C_1) / (\rho_2 \times C_2) \quad (1)$$

2.2 矿浆预热

矿浆预热是 HPAL 冶炼技术的第二道工序,经浓密机处理后的矿浆达到了生产负荷要求浓度,对浓密后的矿浆进行三级逐步预热,使其温度达到 200 °C 左右,矿浆预热的主要参数见表 5。

矿浆在高压浸出的过程中最佳反应温度 250 °C 左右。矿浆预热目的主要在于 2 个方面:①可利用闪蒸降压排出的热蒸汽,完成蒸汽热量回收;②通过高压蒸汽加热快速达到最佳反应温度,以保证金属镍钴离子高效浸出。矿浆预热通过高压闪蒸返回的热蒸汽逐步预热矿浆,在一级预热后矿浆的温度可达到 95 °C,二级预热后矿浆温度可以达到 155 °C,三级高温预热后矿浆浓度可以达到 195 °C。经过三级预热后的矿浆温度达到了投入高压釜的温度。

2.3 高压浸出

预热后的矿浆在高压釜中,通入浓硫酸和高压蒸汽介质,在 253 °C 的反应温度和 5 MPa 左右的反应压力下进行高压浸出反应,通过酸碱反应将金属氧化物中的金属浸出以硫酸盐的形式存在。以下是高压釜中主要化学反应。

1) 镍在高压釜中的主要反应有:



红土镍矿中的镍以金属氧化物形式存在,在高压釜中镍金属氧化物与浓硫酸发生反应,将红土镍

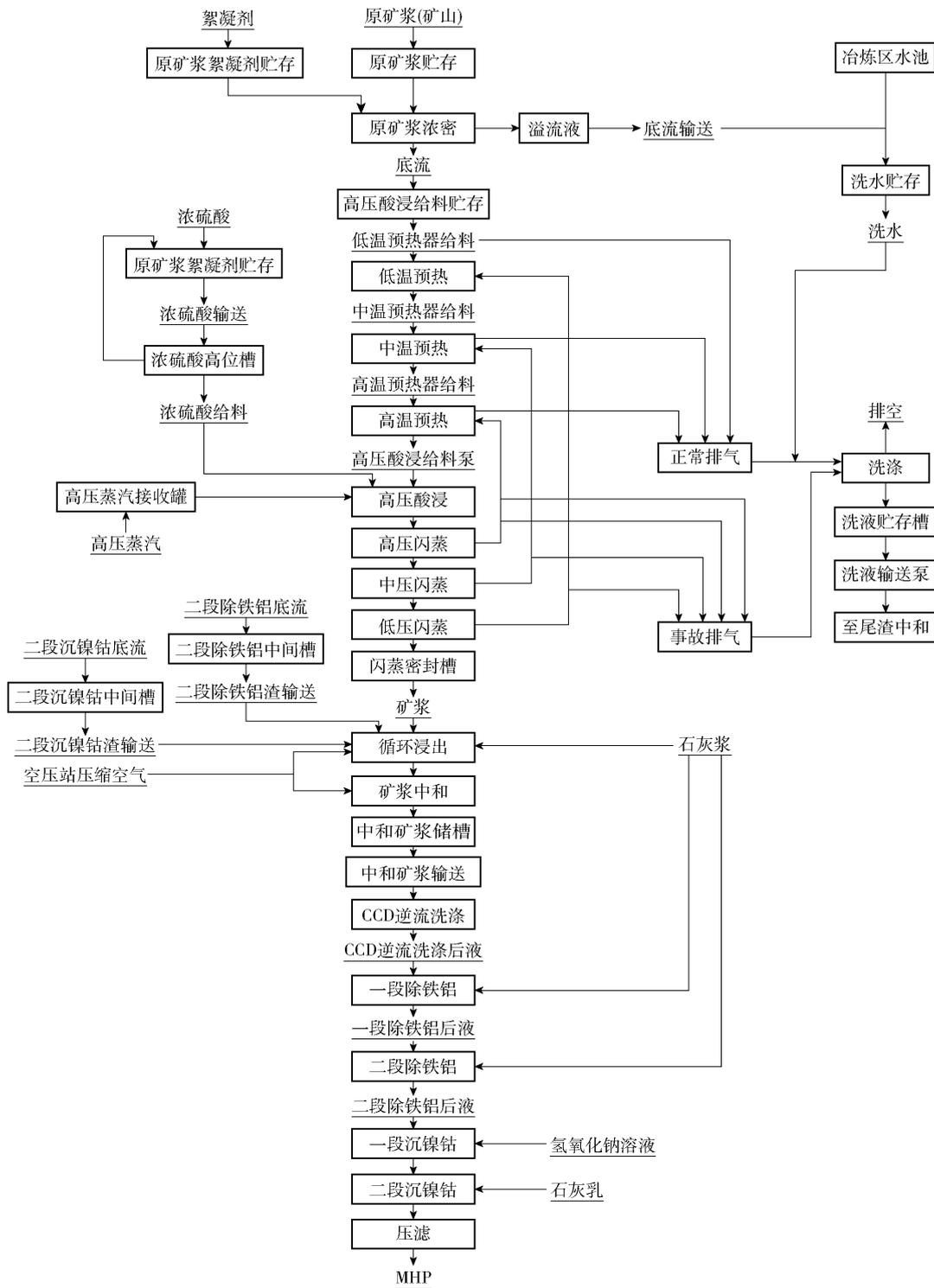


图4 高压酸浸工艺流程

Fig. 4 High-pressure acid leaching (HPAL) process flow

矿中的镍浸出以硫酸盐的形式存在。

2) 钴在高压釜中的主要反应有:



3) 铁在高压釜中的主要反应有:

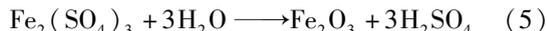
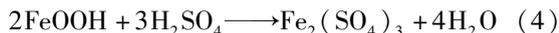


表 4 初始矿浆主要元素组成

Table 4 Major element composition of initial ore slurry

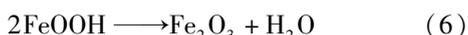
元素	Ni	Co	Cr	Mg	Al	Zn	Mn	Cu	Fe	Si
含量	1.038	0.117	0.52	2.25	1.58	0.04	0.653	0.009	41.9	7.15

表 5 矿浆预热主要参数

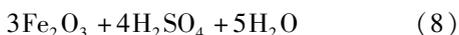
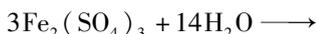
Table 5 Key parameters of ore slurry preheating

参数	预热器 压力/kPa	预热器 温度/℃	预热后矿 浆温度/℃	预热时 间/min
低温预热器	120	105	95	6
中温预热器	675	165	155	4
高温预热器	1950	215	195	4

总反应:

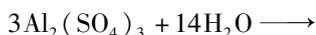
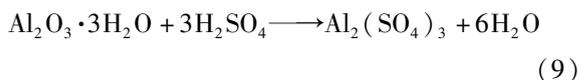


部分浸出的 Fe^{3+} 可形成草黄铁矾,草黄铁矾在高压条件下继续转化成赤铁矿:

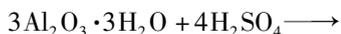


铁元素作为红土镍矿中的主要元素,占据着矿浆成分的主要部分,在矿浆化验数据中,铁元素占比基本能达到 40% 左右,在高压釜中铁氧化物以及以针铁矿形式存在的铁与硫酸反应生成硫酸铁,但是绝大部分反应浸出的铁离子会在高温下水解,水解产生硫酸,因此高品位的铁中只有少部分的铁离子以及亚铁离子进入浸出液中。

4) 铝的浸出化学反应:



总反应:



在原始矿浆中,铝元素含量通常可达约 2%。在高压酸浸过程中,铝矿物与浓硫酸发生分解反应,使氧化物中的铝离子以硫酸盐的形式进入溶液。然而,由于高压釜内处于高温条件,部分已浸出的铝离子会发生水解反应并释放硫酸。未发生水解的铝离

子将随浸出液进入后续工序,这部分杂质离子在高压釜反应过程中难以有效抑制其浸出,只能在后续的中和除杂过程中去除。

2.4 闪蒸降压

矿浆在高压釜中经过高压强酸反应后,镍钴离子以及少部分杂质离子以硫酸盐的形式存在于浸出液中。高压釜反应后的浸出液压力较高,因此生产中采用闪蒸降压的方式将浸出液压力降低至常压。而闪蒸排出的热蒸汽对应供给预热器预热,从而完成热蒸汽的回收。闪蒸过程和矿浆预热均为三级逐级进行。高压闪蒸后排出的蒸汽压力达到了 2000 kPa,温度达到了 210℃ 左右,这部分蒸汽用于高温预热器矿浆加热,高压闪蒸排出的矿浆进入中压闪蒸槽;中压闪蒸槽排出的热蒸汽压力为 675 kPa,温度达到了 165℃ 左右,这部分蒸汽用于中温预热器矿浆加热,中压闪蒸的矿浆排入进入低压闪蒸槽;低压闪蒸槽排出的蒸汽压力为 125 kPa,温度约为 105℃,用于低温预热器矿浆加热,低压闪蒸槽的矿浆排放至闪蒸密闭槽,用于下一阶段循环浸出。

2.5 尾气洗涤

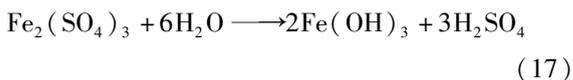
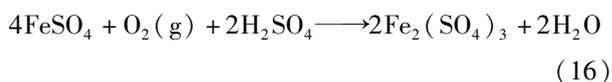
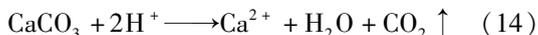
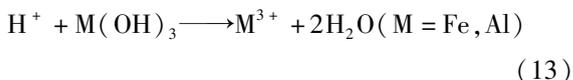
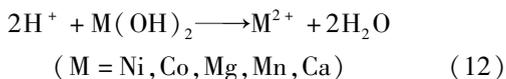
尾气洗涤塔是一种文丘里式的气体洗涤设备,利用废气自身的能量(压力、流速)用洗水将其携带的杂质颗粒与气体分离。文丘里结构较简单,由收缩段、喉管、脱离段等 3 部分组成。从高压釜和预热器排出的气体在正常排气缓冲罐中合并后进入收缩段后,由于面积减小气体流速增加,洗水分三点呈切线方向进入文丘里的喉管或收缩段入口,废气高速通过喉管,剪切沿着内壁流入的洗水,使洗水分散成小水滴。废气在喉管处与小水滴充分接触混合,将废气中的颗粒物分散到水滴中形成细水雾,达到洗涤废气之目的。

2.6 循环浸出

循环浸出作为高压酸浸的最后一道工序,其在生产中有着关键作用。在高压酸浸过程中,由于高压浸出后矿浆中含有较高浓度的残酸,这部分残酸随着闪蒸降压工序进入循环浸出工序。闪蒸后的浸

出矿浆含有 30 ~ 40 g/L 的残酸,在循环浸出及矿浆中和工序加入二段除铁铝底流和二段沉镍钴底流渣浆,利用闪蒸后矿浆中的残酸把中和工序中的金属氢氧化物进行循环浸出反应,以回收有价金属镍钴成分,同时在矿浆中和槽内通入压缩空气,将溶液中的 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} ,形成水解沉淀进入渣中脱除。

循环浸出及矿浆中和的化学反应:



2.7 CCD 逆流洗涤

CCD 逆流洗涤采用 7 级逆流洗涤装置,循环浸出的物料作为 CCD 逆流洗涤处理的原料,从 CCD1 浓密机加入,其底流依次进入 CCD2 ~ CCD7, 洗水采用酸化处理后的中和沉镍钴浓密机二段溢流,洗水从 CCD7 加入,CCD6-CCD1 浓密机的溢流作为洗水对浸出渣完成逆流洗涤过程。为防止在逆流洗涤过程中铁铝杂质离子沉淀而影响洗涤效率,洗水的 pH 值一般要求在 1.5 ~ 2.0, 洗涤比(洗水与浓密机底流中固体质量比)为 2.5:1。

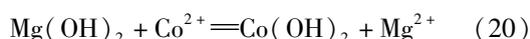
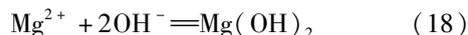
2.8 中和除铁铝

中和除铁铝工序采用一个系统配置,两段反应工序,其中一段除铁铝工序采用 7 台反应槽,二段采用 4 段反应槽。中和除铁铝是整个生产工艺中唯一的除杂工序,因此中和除铁铝的除杂效率至关重要。除杂效率是保证产品杂质元素低含量的重要环节,中和除铁铝工序主要根据不同沉淀物的溶度积常数,通过添加石灰石浆调节溶液 pH 值来除去杂质铁铝。

2.9 中和沉镍钴

中和沉镍钴采用两段反应工序,一个系统配置。一段沉镍钴工序采用 7 个反应槽装置,二段采用 4 个反应槽串联反应装置。中和除铁铝后的溶液作为中和沉镍钴的原料,首先进入一段沉镍钴工序的

镍钴离子与转晶槽中转晶后的新碱氢氧化镁进行反应,生成最终产品 MHP,经过浓密分离,浓密机底流部分返晶种用于镍钴离子沉淀,部分底流送去压滤系统包装形成最终产品。相比于直接加入氢氧化钠调节 pH 值沉淀镍钴离子,转碱工艺可有效降低最终产品中水分和杂质镁含量。



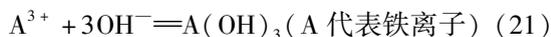
3 中和除铁铝影响因素分析

高压酸浸(HPAL)工艺是一种以湿法提炼方式将红土镍矿中的镍、钴等有价金属离子以硫酸盐形式浸出的先进技术。在该工艺流程中,高压酸浸阶段实现了第一步浸出液的制备,而中和除铁铝工序则作为承上启下的关键环节,承担着承接高压酸浸浸出液并向沉镍钴工序输送高质量除杂后液的重要任务。该工序不仅需要应对因高压酸浸过程中杂质离子浓度波动所带来的挑战,还需确保向后续沉镍钴工序提供稳定且纯净的除铁铝后液。因此,中和除铁铝工序在整个 HPAL 提炼体系中具有至关重要的地位。基于此,本文对中和除铁铝过程的主要影响因素进行了系统分析与探讨。

3.1 一段除铁铝 pH 值控制

作为除铁铝的首要工序,大部分的铁铝会在该段工序被除去,该工序的除杂原理主要根据沉淀的溶解平衡常数来计算除铁效率对应下的 pH 值。由于只有温度影响沉淀物的溶度积常数,在生产过程中逆流洗涤之后的溶液温度相对比较稳定,且较小范围波动的温度对溶度积常数影响较小,因此在计算一段除铁铝 pH 值时忽略温度的影响。只有精确化的 pH 值控制才能保证足够的除铁效率^[30]。

初始浸出液中铁离子浓度: $a/56$ mol/L。铁离子沉淀反应:



当除去铁离子效率 η 时平衡态下 OH^- 浓度 $C(\text{OH}^-)$:

$$C(\text{OH}^-)_{\text{Fe}} = \sqrt[3]{\frac{m}{(1-\eta) \left(\frac{a}{56}\right)}} \quad (22)$$

对应该除铁效率下溶液的 pH_1 :

$$\text{pH}_1 = -\lg \sqrt[3]{\frac{k_w}{m(1-\eta)\left(\frac{a}{56}\right)}} \quad (23)$$

式中: a 代表 CCD1 洗涤液中的铁元素含量 (g/L); m 代表氢氧化铁在浸出液对应温度下的溶度积常数; η 代表除杂效率。

一段除铁铝的 pH 值的精确控制可参考式 (23)。

3.2 二段除铁铝 pH 值控制

二段除铁铝工序反应结束后, 国际标准一般默认溶液中的离子浓度为 1×10^{-6} 时代表离子完全沉淀, 国内标准默认离子浓度为 1×10^{-5} 代表离子完全沉淀, 则二段除铁铝溶液终点 pH 值控制如下:

以国际标准, 铁离子完全沉淀时,

$$\text{pH}_2 = -\lg \sqrt[3]{\frac{k_w}{m \cdot 10^{-6}}} \quad (24)$$

以国内标准, 铁离子完全沉淀时,

$$\text{pH}_2 = -\lg \sqrt[3]{\frac{k_w}{m \cdot 10^{-5}}} \quad (25)$$

铁离子生产控制浓度沉淀时,

$$\text{pH}_2 = -\lg \sqrt[3]{\frac{k_w}{m \cdot c}} \quad (26)$$

式中: c 为目前生产实际要求除铁铝后溶液中的铁离子浓度。

除铁尾端 pH 值控制, 必须经过严格的 pH 值计算和控制, 来确保二段除铁后液铁离子含量满足生产要求。

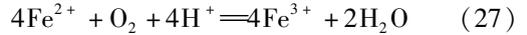
3.3 CCD1 溢流三价铁含量

CCD1 溢流三价铁含量会影响一段除铁铝处理浸出液中的铁浓度, 从公式 (23) 可以看出, CCD1 三价铁含量的波动会直接影响一段除铁铝 pH 值控制。在 CCD1 溢流量保持不变的情况下, CCD1 溢流中三价铁含量发生变化会对一段除铁铝 pH 值控制产生较大影响, 因此操作人员应积极结合化验室实时报表数据查验是否对 pH 值进行调整, 参照公式 (23) 调整。

3.4 CCD1 二价铁含量

由于氢氧化铁的溶度积常数相较于氢氧化亚铁

差异较大, 亚铁离子初始沉淀 pH 值为 7.55 (以浓度为 0.45 g/L 计算), CCD1 二价铁含量并不会直接影响除铁铝工序的 pH 值控制。在一段除铁工序通入压缩风, 一方面压缩风可增加浸出液和石灰石浆的接触面积, 另一方面最重要的作用是压缩风中氧气可以氧化二价铁离子, 在除铁工序中, 只有二价铁离子被氧化成三价铁离子才能被除去 (式 (27)), 因此, CCD1 二价铁含量的监测也是保证产品含铁的关键因素之一。



3.5 除铁铝工序鼓风量以及鼓风含氧量

除铁铝工序鼓风量以及鼓风含氧量与 CCD1 二价铁含量是密不可分的, 只有足够的鼓风量以及鼓风中足够的含氧量才能确保 CCD1 中的二价铁被完全转化为三价铁离子, 生产中理论鼓风量 (V) 计算见式 (28)。

$$V = \frac{m}{\rho \times D} = \frac{n \times M}{\rho \times D} = \frac{n(\text{Fe}) \times M}{4 \times \rho \times D} = \frac{C \times V_{\text{浸}} \times M}{4 \times \rho \times D} \quad (28)$$

式中: ρ 代表鼓风的密度; D 代表鼓风中氧气含量; C 为浸出液中亚铁离子浓度; M 为氧气相对分子质量; 4 为亚铁离子与氧气反应计量数; $V_{\text{浸}}$ 为浸出液体积。

生产中鼓风量应高于理论计算量, 结合亚铁离子氧化效率调整, 且保证鼓风的压力以及反应槽的搅拌运行状态, 保障足够的氧气与浸出液接触面积。

3.6 二段除铁铝浓密机溢流固含量

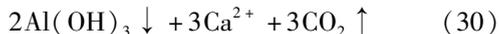
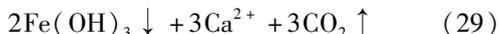
二段除铁铝浓密机是浓密分离二段除铁铝工序沉淀的装置, 其浓密效果至关重要。若前期除铁铝工序保障了足够的除铁效率, 而在二段浓密机没有做好浓密固液分离, 使得二段浓密机溢流含固量较高, 溢流进入沉镍钴工序, 直接将杂质带入沉镍钴工序, 从而导致产品中铁含量过高。因此, 生产实际中一定确保浓密机足够的浓密效果并杜绝浓密机出现跑浑现象。

3.7 石灰石浆密度和有效浓度

石灰石浆是调节除铁铝工序浸出液的碱性中和剂, 其物理性能直接影响除铁铝工序石灰石浆加入量的精确控制和除铁效率, 因此生产中尽可能保障稳定的石灰石浆密度。

杂质离子水解与石灰石浆的中和反应方程式见式 (29) ~ (30)。





石灰石浆的加入体积的计算见式(31)。

$$V_{1(\text{石灰石浆})} = \frac{m}{\rho} = \frac{n(\text{CaCO}_3) \times 100}{\rho \times D} \quad (31)$$

式中: D 代表石灰石浆的有效浓度;100 为碳酸钙相对分子质量。

根据铁铝离子和石灰石浆水解产物的反应式,石灰石浆的有效成分 CaCO_3 是与铁离子水解反应的主导物质。石灰石浆的有效浓度会直接影响铁离子的去除效果,从公式(31)可以看出石灰石浆的密度和有效浓度与石灰石浆的体积成反比例关系,同等质量石灰石浆的加入情况下,石灰石浆的密度越小,所需加入石灰石浆的体积越大,反之石灰石浆的密度越大,加入石灰石浆的体积越小,同理石灰石浆有效浓度越小,所需加入石灰石浆的体积越大,反之石灰石浆的有效浓度越大,所需加入石灰石浆的体积越小。

3.8 石灰石浆粒度

石灰石浆粒度也会直接影响石灰石浆中的主要成分碳酸钙与铁铝离子水解产物的反应^[31-32]。如果石灰石浆粒度过大,导致存在较多的大颗粒物,将会降低碳酸钙与氢离子的反应效率以及延长反应时间。碳酸钙与氢离子的反应属于液固反应,较大的颗粒使得比表面积变小,延长了氢离子在碳酸钙表面的界面层的扩散时间,内层的碳酸钙没有充足的时间与扩散进入的氢离子反应,因此,会直接导致氢离子和碳酸钙反应效率不足,进而导致除铁效率不高以及石灰石消耗量更大。在生产中反应时间不能无限延长,石灰石浆生产过程中尽可能保证较小的粒级分布,缩短氢离子在固相介质层的扩散时间,从而提高反应效率,降低产品中的含铁量。

4 结论

4.1 HPAL 冶炼技术的优点

4.1.1 有价金属离子富集

相比红土镍矿火法提炼工艺存在镍钴回收率较低(镍钴回收率不足 85%,且钴难以回收)的弊端,HPAL 湿法提炼技术具有显著优势,其在高压强酸条件下不仅实现了镍钴的高效浸出和回收,还能溶解红土镍矿中的稀有金属,例如钕。钕作为战略金

属,在部分红土镍矿中存在,通过高压浸出可进入浸出液,并在除杂及沉淀过程中逐步富集于镍钴产品中,为钕的高质量提炼提供了原料保障。

4.1.2 环境污染程度低

HPAL 冶炼技术通过浓硫酸与金属氧化物反应生成盐溶液,整个过程污染程度低,实现了清洁冶炼。相比传统火法提炼工艺操作温度(1 000 ℃ 以上),HPAL 工艺操作温度较低(约 250 ℃),能耗和碳排放显著降低,有助于减少温室气体排放。HPAL 技术不仅优化了冶炼能耗结构,也提升了冶炼过程的环境友好性,为绿色冶金工艺的发展提供了重要技术支撑。

4.1.3 提高镍钴回收率

HPAL 技术能够充分溶解矿石中的镍钴元素,后续的中和除铁铝和中和沉镍钴过程,采用调节 pH 值来沉降溶度积常数不同的金属氢氧化物,从而提高了镍钴的回收率和纯度。在低品位红土镍矿提炼技术中,高压酸浸技术可以稳定保持镍钴浸出率达到 95% 且整个系统镍回收率达到 90% 以上,这使得该技术能够处理低品位的红土镍矿,并且获得更高的经济效益。

4.2 HPAL 冶炼技术的缺点

4.2.1 设备要求高

高压酸浸技术需要在约 250 ℃、5.3 MPa 的高温高压环境下进行,因此对设备的耐腐蚀性、耐高温性等要求较高,设备投资和维护成本较高。

4.2.2 酸性溶液的制备

在高压酸浸过程中,需要制备辅助材料浓硫酸。浓硫酸的制备过程中,应加强生产工艺控制和尾气排放监测,以防止空气污染。同时,需要做好设备的腐蚀防护工作,以降低维修难度并保障安全运行。

4.2.3 对原料要求严格

矿石的组成和性质对高压酸浸效果具有显著影响。杂质元素含量的变化会大幅度影响生产中的工艺参数调整,因此需要对矿石进行精确分析并实施适当的预处理。

5 展望

1) 随着资源的逐渐匮乏和开采难度的增加,高压酸浸技术在矿物提取中的应用前景将越来越广阔。尤其是在低品位矿石和复杂矿物的处理方面,高压酸浸能够提供火法提炼无法比拟的优势。然

而,仍然需要解决一些技术难题,包括如何降低设备的成本、提高反应效率、减少酸性废水的产生等问题。

2)随着绿色矿业理念的普及,进一步优化高压酸浸过程以降低环境影响、提升资源利用效率,已成为该技术未来发展的重要方向。

3)随着 HPAL 技术在工业化的推广,高品位低杂质优质矿源逐渐呈现下降趋势。在未来的生产中,随着供矿质量下降以及原辅材料价格的波动,应积极寻求强化选择性浸出有价金属离子以及抑制杂质离子的浸出率的方法,以保证在中和除杂工序中更少的原辅材料消耗。

4)随着智能冶炼、智能工厂以及自动化控制水平在工厂中的推广,HPAL 技术也应积极引入并强化智能化自控和监测系统。通过对冶炼过程重要节点的工艺指标进行智能化调控,可有效保证生产过程的连续性和可控性。

5)通过创新的工艺流程,HPAL 技术不仅提高了镍钴的回收率,还能够降低冶炼过程中产生的废气废水排放。其优越性为低品位的红土镍矿的富集提炼提供了新的思路。未来,随着技术的不断完善,HPAL 冶炼技术有望成为镍冶炼领域的重要发展方向。

[参考文献]

[1] 熊雪良,杨智,张丽芬,等. 镁质红土镍矿生产镍铁的工艺研究[J]. 矿冶工程, 2013, 33(增1):98-101.

[2] 李小明,白涛涛,赵俊学,等. 红土镍矿冶炼工艺研究现状及进展[J]. 材料导报, 2014, 28(5):112-116.

[3] 李启厚,王娟,刘志宏. 世界红土镍矿资源开发及其湿法冶金技术的进展[J]. 矿产保护与利用, 2009(6):42-46.

[4] 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.

[5] 李丹. Ramu 红土镍矿矿浆的生产实践[J]. 金属矿山, 2019(12):26-33.

[6] 王永志,陆雷,刘燕,等. 红土镍矿力学性能的研究[J]. 中国有色冶金, 2010,39(2):74-76.

[7] 王玲,鲁安怀,宋晓良,等. 硫酸盐结晶法分离富集红土型镍矿酸溶浸出液中镍的实验研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2011,30(6):975-980.

[8] 余鹤雷,王闯,高起鹏,等. 某红土镍矿焙烧渣磁选工艺研究[J]. 有色矿冶,2024,40(5):23-26.

[9] 陈学刚,祁永峰. 红土镍矿侧吹还原造熔渣试验研究[J]. 绿色矿冶,2023,39(1):33-39.

[10] 王亚运,刘志国,康金星,等. 某红土镍矿选矿除铬试验

研究[J]. 中国矿山工程,2024,53(2):89-92.

[11] 田庆华,王青鹭,董波,等. 以改性腐殖土型红土镍矿中和褐铁型红土镍矿高压浸出液[J]. 中国有色金属学报,2023,33(12):4254-4264.

[12] 冯建伟. 红土镍矿选矿工艺与设备的现状及展望[J]. 中国有色冶金, 2013, 42(5):1-6.

[13] 施洋,高压酸浸法从镍红土矿中回收镍钴[J]. 有色金属(冶炼部分), 2013(1):4-7.

[14] 刘诚. 低品位红土镍矿镍钴沉淀技术发展概述[J]. 中国有色冶金,2023,52(6):1-15.

[15] 王蓓琳,高利坤,饶兵,等. 红土镍矿处理工艺研究进展[J]. 化工矿物与加工,2025,54(2):59-69.

[16] 刘大星. 从镍红土矿中回收镍、钴技术的进展[J]. 有色金属(冶炼部分),2002(3):6-10.

[17] 罗文波,江爱敏,洪开发,等. 红土镍矿常压还原浸出试验研究[J]. 矿冶工程,2022,42(5):124-127.

[18] 侯俊京,贾彦忠,梁德兰,等. 红土镍矿回转窑-电炉熔炼生产镍铁的工艺研究[J]. 中国有色冶金,2014,43(3):70-73.

[19] 武兵强,齐渊洪,周和敏,等. 红土镍矿火法冶炼工艺现状及进展[J]. 矿产综合利用,2020(3):78-83,93.

[20] 余建文,郭壹泽,王家奇,等. 红土镍矿开发利用研究现状与前景展望[J]. 矿冶工程,2025,45(3):142-150,162.

[21] 杨超. 低品质红土镍矿选择性还原-磁选制备镍铁合金[J]. 矿冶工程,2021,41(2):99-101,105.

[22] 肖仁栋,陈靖,胡美世,等. NaFeS₂ 强化褐铁矿型红土镍矿固态还原富集镍钴的研究[J]. 矿冶工程,2024,44(1):100-104.

[23] 朱德庆,田宏宇,潘建,等. 低品位红土镍矿综合利用现状及进展[J]. 钢铁研究学报,2020,32(5):351-362.

[24] 董训祥,秦潞. 红土镍矿高炉工艺技术及发展趋势[J]. 炼铁,2017,36(3):60-62.

[25] 张邦胜,蒋开喜,王海北,等. 我国红土镍矿火法冶炼进展[J]. 有色冶金设计与研究,2012,33(5):16-19.

[26] 赵顶,马保中,王成彦,等. 褐铁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.

[27] 罗姣. 红土镍矿湿法冶金工艺研究进展分析[J]. 科技创新导报,2017,14(29):94,98.

[28] 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.

[29] 冉启胜,朱淑桢. 浅谈红土型镍矿地质特征及分布规律[J]. 矿业工程,2011,9(2):6-8.

[30] 张众,伊力亚斯·艾合买提江,赵晨晨,等. 中和除铁铝工艺 pH 值控制原理分析[J]. 有色设备,2025,39(3):91-98.

- [31] 陈柯臻,张文杰,李俊,等. 红土镍矿冶炼工艺研究现状及展望[J]. 稀有金属,2025,49(3):432-447.
- [32] 郑晓青,郭佳文,陈进中,等. 硫酸亚铁通氧加压浸出红

土镍矿试验研究[J]. 湿法冶金,2025,44(2):180-188.

Application of HPAL technology in laterite nickel ore

ZHANG Zhong, ZHAO Chenchen, ZHENG Jinsong, CAO Gang, MENG Xixiang*
(Ramu Nico Management (MCC) Co., Ltd., Beijing 100000, China)

Abstract: With the development of new energy vehicles in the world, the demand for nickel and cobalt resources for ternary lithium-ion batteries has increased, and low-grade laterite nickel ore has become one of the important nickel and cobalt resources. The nickel and cobalt in the laterite nickel ore are mainly in the form of metal oxides, and the metal nickel grade is relatively low. High pressure acid leaching (HPAL) technology processes laterite nickel ores under high temperature, high pressure, and concentrated sulfuric acid conditions, efficiently leaching nickel and cobalt ions and allowing them to enter the solution in the form of sulfates, thereby achieving metal enrichment and purification through neutralization, precipitation, and other processes. The paper analyzes the resources and characteristics of laterite nickel ore, outlines the smelting technologies of laterite nickel ore (HPAL, medium temperature acid leaching/ammonia leaching, rotary kiln electric furnace (RKEF), and rotary kiln direct reduction-magnetic separation (R/S)), analyzes the process principle, technical advantages, and application prospects of HPAL smelting technology, and focuses on analyzing the influencing factors of iron and aluminum neutralization. HPAL technology not only improves the recovery rate of nickel and cobalt, but also reduces the emission of waste gas and wastewater during the smelting process, providing new ideas for the enrichment and extraction of low-grade laterite nickel ore.

Keywords: HPAL smelting technology; laterite nickel ore; hydrometallurgy; nickel extraction; ternary lithium-ion battery; new energy

