

# 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

李 丹<sup>1,2</sup>

(1. 中国冶金科工集团公司, 北京 100028;  
2. 瑞木镍钴管理(中冶)有限公司, 北京 100028)

**摘要:** 阐述了还原焙烧—常压氨浸、高压酸浸(HPAL)湿法冶金技术处理低品位褐铁矿型红土镍矿的工艺特点、工业应用现状及研究进展,总结了三代 HPAL 技术的发展状况,介绍了镍钴沉淀富集技术及应用,分析了 H<sub>2</sub>S 沉淀、MgO 沉淀、直接 NaOH 沉淀工艺的优点与不足,探讨了 NaOH 转碱转晶种新沉淀工艺的成效,并对红土镍矿湿法冶金工艺的发展前景进行了展望。

**关键词:** 红土镍矿;湿法工艺;还原焙烧—氨浸;HPAL;NaOH 转碱转晶种沉淀;尾渣;研究进展;展望

**中图分类号:** TF803.21;TF815 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2617(2024)04-0345-12

**DOI:** 10.13355/j.cnki.sfyj.2024.04.001

金属镍的力学性能较优,具有优良的延展性、可塑性和可加工性,同时化学稳定性较高,作为提升材料强度、韧性、耐腐蚀性等性能的关键强化元素,已广泛应用于航空航天、石油化工、化学电源、电镀、不锈钢生产等领域。尤其是近些年,镍在提高锂电池三元材料能量密度方面逐渐表现出独特的性能,是新能源汽车动力锂电池三元材料前驱体关键组成部分;而随着新能源汽车的快速发展,三元电池逐步高镍化的趋势使得镍需求日益增加<sup>[1-4]</sup>。

目前,提取镍的原生资源主要分布于陆基硫化镍矿和氧化镍矿中,硫化镍矿和氧化镍矿分别约占 40%和 60%<sup>[5]</sup>。随着高品位硫化镍矿的大量开发,资源日渐枯竭,对占镍储量 60%的氧化镍矿进行高效开发利用,以满足不断增加的镍需求具有战略意义<sup>[6-8]</sup>。氧化镍矿含铁多,外观上呈红色,因此又名红土镍矿,处理工艺可分为火法冶金和湿法冶金两类。本文在分析红土镍矿矿物特性的基础上,对比了火法工艺和湿法工艺提取镍钴的特点,系统阐述了湿法工艺提取镍钴的工业应用现状和研究进展,总结了三代高压酸浸

(HPAL)技术的发展现状,对比分析了浸出后各镍钴富集沉淀工艺的优缺点,指出了湿法工艺处理红土镍矿面临的问题,并对未来发展趋势进行了展望,以期充分开发利用红土镍矿资源提供借鉴和参考。

## 1 红土镍矿的矿物特性及提取工艺

红土镍矿是由含镍橄榄石矿床经长期风化、淋浸、侵蚀、富集而形成的,是由铁、硅、镁、铝等含水氧化物组成的红色黏土状矿石,主要由褐铁矿层、过渡层和腐殖土层组成,分别位于矿床的上部、中部、下部。褐铁矿高铁低镍低镁,过渡层铁镍硅镁都相对较高,腐殖土低铁高镍高硅高镁。

红土镍矿的矿物组成复杂,矿相中的镍元素并非以单质形式存在,而是以类质同象取代相应金属的形式分散赋存与矿相之中,通过传统物理选矿的方式无法富集矿石中的镍,因此,开发红土镍矿项目的核心在于冶金工艺<sup>[9]</sup>。冶金工艺的选择主要取决于红土镍矿的矿石类型、工艺路线的可靠性,以及金属价格和能源价格等市场因素。火法工艺和湿法工艺处理红土镍矿的特点对比见表 1。

收稿日期:2024-04-07

作者简介:李丹(1981—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为矿物技术分析综合利用。

表 1 红土镍矿工业化处理工艺对比

提取工艺	镍回收率	钴回收率	适用红土镍矿类型	产品结构	碳排放量*/(tCO <sub>2</sub> ·t <sup>-1</sup> 镍)	
火法	约 90%	—	高镍高硅高镁低铁型	镍铁、镍铈	74.6	
湿法	常压氨浸	70%~80%	40%~60%	低镍高镁型	氧化镍	—
	高压酸浸	90%~95%	90%~95%	低镍低镁高铁型	硫化镍钴、氢氧化镍钴	20.5

\*. 折合硫酸镍电池产品的 t 镍。

火法工艺适合处理高镍(>1.8%)高硅高镁低铁的腐殖土型红土镍矿,湿法工艺则适合处理低镍高铁的褐铁矿型红土镍矿;在碳排放方面,生产电池用硫酸镍产品的 t 镍碳排放量为 74.6 tCO<sub>2</sub>,而湿法工艺的 t 镍碳排放量仅为 20.5 tCO<sub>2</sub>,为火法的 27.4%<sup>[10]</sup>,碳排放量相对较低,工艺耗能低,更加清洁环保;在回收率方面,湿法工艺在回收镍的同时,可同步回收钴,

镍钴回收率可达 90%以上<sup>[9,11-13]</sup>,能使红土镍矿资源得到有效利用。红土镍矿资源储量丰富,但 70%为低品位褐铁矿型,典型的配矿后红土镍矿的主要化学组成见表 2。可以看出,矿石中镍含量较低,属于低品位褐铁矿型红土镍矿,矿石中含有三元电池正极材料所需镍、钴、锰元素,通过湿法工艺提取镍、钴,可实现资源的高效利用。

表 2 褐铁矿型红土镍矿的主要化学组成

												%
Ni	Co	Al	Fe	Mg	Mn	Cr	SiO <sub>2</sub>	S	C	Ca	K	
1.07	0.1	2.3	43	2.5	0.72	2.0	12.5	0.14	0.22	0.05	0.024	

## 2 红土镍矿的湿法提取工艺

湿法提取工艺是通过化学浸出红土镍矿,使得固态矿石中的有价金属浸出转移至液相中,再通过溶剂萃取、化学沉淀、结晶等手段实现有价金属的提取。湿法工艺按浸出压力可分为常压浸出和高压浸出。工业上对红土镍矿进行常压处理采用的是还原焙烧—常压氨浸工艺,进行加压处理采用的是高压酸浸(HPAL)工艺。

### 2.1 还原焙烧—常压氨浸工艺及应用研究

#### 2.1.1 还原焙烧—常压氨浸工艺流程

还原焙烧—常压氨浸工艺流程,又被称为 Caron 流程<sup>[14-16]</sup>,是最早的红土镍矿湿法处理工艺,在古巴尼加罗项目中首次得到工业应用。该法适用于处理高氧化镁型红土镍矿,工艺流程如图 1 所示。该工艺是将红土镍矿干燥、破碎、筛分后,在高温下进行还原焙烧,目的是改善红土镍矿矿物结构,以实现镍钴浸出。在还原焙烧过程中,镍、钴以金属态形式存在,铁大部分转化为 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>,少量以 FeO 或 Fe 形式存在;焙砂在氧气气氛中用 NH<sub>3</sub> 和 CO<sub>2</sub> 浸出,其中的镍、钴分别生成镍氨配合物和钴氨配合物而被浸出。反应方程式<sup>[17-18]</sup>如下:

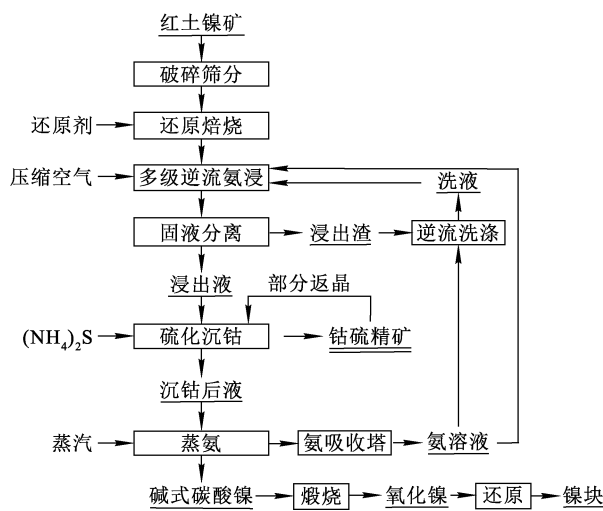
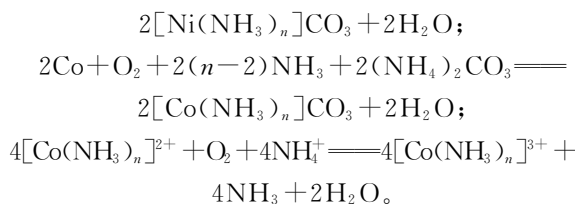
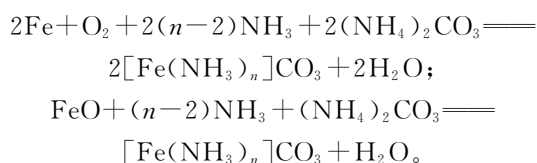
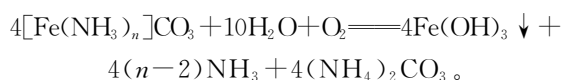


图 1 还原焙烧—氨浸工艺流程<sup>[7]</sup>

少量 Fe 和 FeO 转化为铁氨配合物,也被浸出。反应方程式如下:



$[\text{Fe}(\text{NH}_3)_n]^{2+}$  不稳定,反应过程中会进一步被氧化为  $[\text{Fe}(\text{NH}_3)_n]^{3+}$ ,并水解生成为  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  沉淀,从浸出液中分离。综合反应方程式如下:



氨浸过程对镍和钴具有选择性浸出作用,可实现钴、镍与铁的有效分离。浸出液经过硫化沉淀回收钴,沉淀后液进一步蒸氨后得到碱式碳酸镍,经煅烧生成氧化镍产品,进一步还原可得金属镍粉产品。根据生产需要,可选择产品是氧化镍或镍粉。

### 2.1.2 还原焙烧—氨浸工艺的优缺点及工业应用

还原焙烧—氨浸工艺处理红土镍矿的工业化应用始于 20 世纪 40 年代。其主要优点是浸出过程中,镁不被浸出,适用于处理 MgO 含量大于 10% 的高镁矿石,浸出试剂可回收循环利用,消耗量小,成本低。缺点是焙烧过程还原气氛控制困难,还原程度偏弱会严重影响氨浸工艺中的镍钴浸出率,还原程度过强则会造成焙砂中的铁和氧化亚铁含量快速升高;此外,氨浸过程中  $[\text{Fe}(\text{NH}_3)_n]^{2+}$

会水解生成  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  沉淀,造成固液分离困难,且  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  还会吸附浸出液中有价离子,从而降低有价金属元素回收率。还原焙烧—氨浸工艺的镍回收率通常为 70%~80%,钴回收率为 40%~60%,该工艺适用的红土镍矿类型为含镍 1% 左右、镍赋存状态不很复杂的红土镍矿<sup>[18]</sup>。巴西镍企业(Niquelândia)采用 Caron 流程从原矿中提取镍,镍回收率仅为 70%~75%<sup>[19]</sup>,资源回收率不高、适用红土镍矿局限性等问题极大地限制了该工艺的发展及应用,因此未受到广泛关注。目前,全球仅有少数几个 20 世纪 70 年代建设的冶炼厂仍采用该法处理红土镍矿(见表 3)<sup>[20]</sup>,而目前新建镍矿项目几乎都未采用该工艺。但随着技术发展,有研究人员在 Caron 工艺基础上进行了改进试验研究。如李小波等<sup>[21-22]</sup>采用烟煤还原焙烧—氨浸工艺从褐铁矿型红土镍矿中综合提取镍、钴和铁,以 8% 烟煤为还原剂,在焙烧温度 800 °C、焙烧时间 60 min 条件下,镍、钴浸出率分别达 88% 和 50%,并得到含铁 59% 的浸出渣,实现了镍、钴的选择性浸出,并实现了与铁的分选;此外,还有研究人员提出了加硫还原焙烧—氨浸<sup>[23]</sup>、还原焙烧—酸浸<sup>[24]</sup>、硫酸化焙烧—水浸<sup>[25-26]</sup>、氯化焙烧—水浸、氧化焙烧—酸浸等工艺,但这些方法目前尚未在工业应用方面取得明显进展。

表 3 采用还原焙烧—常压氨浸工艺处理红土镍矿的项目情况<sup>[20]</sup>

国家	项目名称	原料及主要成分	产品种类	生产能力/(t·a <sup>-1</sup> )
印度	Sukinda Plant	红土镍矿: Ni 0.4%~1.2%, Co 0.04%~0.10%, Fe 30%~58%	金属镍粉 金属钴粉	4 800 200
菲律宾	诺诺克镍厂	红土镍矿: Ni 1.23%, Co 0.1%, Fe 37%	镍粉镍块	31 000
澳大利亚	雅布鲁精炼厂	红土镍矿: Ni 1.57%, Co 0.1%, Fe 30%	烧结 NiO	30 000
阿尔巴尼亚	爱尔巴桑镍冶炼厂	红土镍矿: Ni 0.9%, Co 0.06%, Fe 45%, SiO <sub>2</sub> < 10%, MgO < 3%, CaO < 3%	镍块	5 000
斯洛伐克	谢列德厂	红土镍矿: Ni 0.9%, Co 0.16%, Fe 50%, SiO <sub>2</sub> 1%~10%, MgO 1%~4%, CaO < 3%	电解镍 电解钴	3 000 100
巴西	圣保罗精炼厂	氧化镍矿: Ni 1.65%	电解镍 电解钴	10 000 300
古巴	尼卡罗冶炼厂	高镁质硅酸镍矿: Ni+Co < 1.3%, Fe 12%, SiO <sub>2</sub> 35%, MgO 29%	烧结 NiO	18 000
	切格瓦纳镍冶炼厂	高镁质硅酸镍矿: Ni+Co < 1.3%, Fe 12%, SiO <sub>2</sub> 35%, MgO 29%	烧结 NiO	23 000
中国	青海元石山镍冶炼厂	镍铁氧化矿: Ni 0.9%, Co 0.06%, Fe 32%, SiO <sub>2</sub> < 18%, MgO < 5%	精制硫酸镍	3 000

## 2.2 高压酸浸(HPAL)工艺及工业应用

高压酸浸(HPAL)工艺主要用于处理高铁低镍低镁的褐铁型红土镍矿,具有能耗低、碳排放量少、镍钴回收率高(>90%)等优点<sup>[9,11-13]</sup>,是国内外从褐铁型红土镍矿中提取镍钴的主要方法。

### 2.2.1 HPAL 工艺流程及特点

典型的红土镍矿 HPAL 工艺流程如图 2 所示,一般包括矿浆制备、高压酸浸、矿浆中和、CCD 逆流洗涤、浸出液中中和除杂、镍钴沉淀等流程。

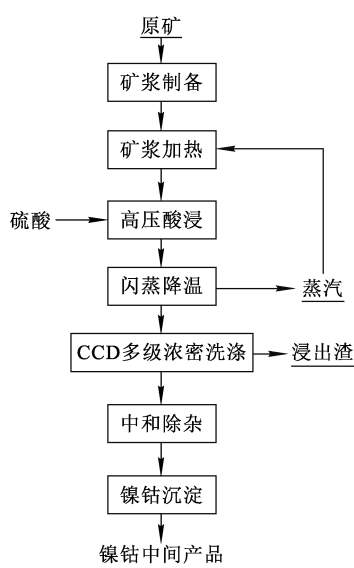
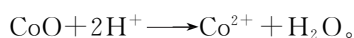
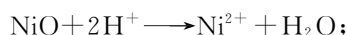


图 2 红土镍矿的 HPAL 工艺流程

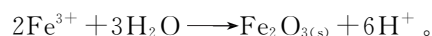
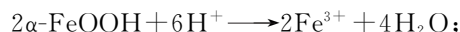
该工艺是先将红土镍矿原矿进行洗矿除石,选铬除铬后制备粒度为 4~200 μm 的矿浆<sup>[11]</sup>,然后在高温高压条件下加入硫酸处理矿浆,通过将原矿中镍钴等有价金属浸出,同时使绝大部分铁、部分铝等杂质通过转型反应进入渣中,实现镍钴的选择性浸出。酸浸后经矿浆中和、CCD 逆流洗涤、中和除杂等工序得到净化液。

高压酸浸可形成一个复杂的多相反应体系,使含镍、钴有价金属的主要矿物成分完全分解,进而使镍、钴以离子形式进入浸出液中。反应如下:

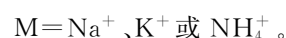
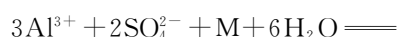
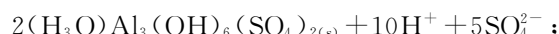
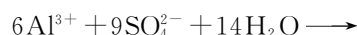


从红土镍矿的元素组成(表 2)看出,其中含量较高的 Fe、Al、Mg、Mn 等杂质元素也能一同被浸出,造成酸耗增加。但在高温条件下,浸出的 Fe<sup>3+</sup> 会发生强烈水解,形成赤铁矿沉淀,并释放

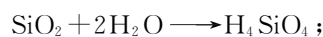
出等当量的酸。反应如下:



Fe<sup>2+</sup> 在一定条件下也能被氧化为 Fe<sup>3+</sup>,而 Fe<sup>3+</sup> 会发生水解,因此在浸出过程中,针铁矿的分解基本不消耗酸;此外,大部分 Al<sup>3+</sup> 也会水解形成草明矾或明矾沉淀并释放酸。反应如下:



在高压条件下酸浸, SiO<sub>2</sub> 能水解形成硅酸,但溶解的硅酸会聚合沉淀:



同时,大部分铁、铝、硅进入渣相,镍、钴、镁、锰则进入浸出液,得到选择性浸出。高温高压是 HPAL 技术的核心:高温可使化学反应充分进行,从而提高镍、钴浸出率,且由于铁离子水解沉淀为吸热反应,也只有在高温条件下才能从富含镍钴的浸出液中充分沉淀,并释放出酸;高压环境能抑制水的沸点,使矿浆在恒定高温条件下不沸腾,确保化学反应正常进行。在 245~270 °C、4~5 MPa 的高温高压环境下,预热矿浆与硫酸发生化学反应,镍、钴被选择性浸出,浸出率一般在 95% 以上<sup>[6,27-30]</sup>,而铁、铝、硅则进入渣相,并释放酸,反应过程中不消耗硫酸,使用酸成本降低。但该工艺在工业生产中也存在以下问题<sup>[16,18]</sup>:1) 对处理红土镍矿的镁含量有一定要求,由于镁是工艺中的主要耗酸成分,高压浸出的耗酸量很大程度上由矿石中镁含量决定,用 HPAL 工艺处理含铁高、含硅镁较低的褐铁矿类型矿石时,一般要求矿石配矿后的氧化镁质量分数低于 5%,才能确保工艺的经济性;2) 高压酸浸过程中,浸出液中的铁、铝等成分沉降结垢,堵塞管道,需定时清理维修,高压釜排料管线最短运行 26 d 需停车约 50 h 清理结垢,高压釜(含排料管)的结垢问题成为了生产瓶颈<sup>[29]</sup>;3) HPAL 工艺需在高温、高压、高酸条件下运行,对材料和装备要求较高,对工艺和设备的操作维护水平要求也较高。针对这些问题,李丹<sup>[2]</sup>总结了巴布亚新几内亚 Ramu 矿山红土镍矿矿浆生产实践经验,通过打通矿浆生产中

出现的瓶颈问题,加强配矿优化矿浆品质,实现了供给冶炼的矿浆满足湿法工艺的要求;皮关华<sup>[31]</sup>对结垢物的物相的分析结果表明,结垢物主要为赤铁矿、铝矾和硫酸铝的水合物,此外,还发现酸度、温度、压力,以及搅拌时的矿浆流速是影响高压釜结垢的主要因素;贾露萍<sup>[29]</sup>在生产实践中通过控制酸矿比,将镍浸出率从 97% 降至 95%,并通过优化工艺、改进设备、减少系统开停次数、提高系统连续稳定运行能力,使得高压釜的年结垢速率从 80 mm/a 降至 40 mm/a,高压釜停车清理周期延长到一年左右,排料管线清理周期从 40 d 延长至半年,成效显著;汪锡顺<sup>[32]</sup>通过对高压釜搅拌器机械密封的故障形式进行分析,查找故障原因,提出了实际生产中应采取的措施,使搅拌器机械密封使用寿命达到预期效果,保障了高压酸浸系统的平稳运行。

### 2.2.2 HPAL 技术发展现状

相较火法工艺,HPAL 技术具有能耗低、碳排放量少、有价金属综合利用率高等特点,成为了国外处理高铁低镍低镁型红土镍矿的主要技术。20 世纪 50 年代以来,HPAL 技术在红土镍矿项目开发应用上经历了三代发展历程。

#### 2.2.2.1 第一代 HPAL 技术

第一代 HPAL 技术最早应用于古巴 Moa 项目,该项目是世界上第一家以立式无机械搅拌高压浸出釜为特征,采用 HPAL 技术处理红土镍矿的项目。该项目采用的工艺流程为 HPAL—CCD 分离洗涤—中和—高温硫化沉淀镍钴,项目设计规模为年处理 200 万 t 矿石,年产含镍 2.2 万 t、钴 2 000 t 的混合硫化镍钴。矿浆预热采用 2 台 1.22 m×5.2 m 预热器加热,预热后矿浆温度为 76.5 °C,通过由石油泵改装后的四联高压隔膜泵将矿浆给料至多台多级尺寸为  $\phi 3.05\text{ m}\times 15.8\text{ m}$  立式蒸汽高压釜中,浸出温度为 246 °C,浸出压力为 3.8 MPa。Moa 项目工艺流程简单,镍钴回收率较高,但受设备和技术条件限制,在资源的循环利用方面考虑较少,且装置运行一段时间后会出严重的结垢现象,需频繁清理,甚至停机检修。

#### 2.2.2.2 第二代 HPAL 技术

采用第二代 HPAL 技术的项目包括西澳的 Bulong、Cawse 及 Murrin Murrin。该技术借鉴

了黄金、铀、锌等冶炼领域应用成熟的加压氧浸技术(POX),将钢钛复合板材料应用到了高压釜中,并将第一代技术中采用的立式无机械搅拌高压浸出釜升级为卧式多隔室机械搅拌釜。矿浆预热采用多级(2~4 级)预热器加热,预热后矿浆温度为 165 °C 以上,矿浆通过 GEHO 或 WIRTH 隔膜泵给料到  $\phi 4.6\text{ m}\times 30\text{ m}$  的 6 隔室高压釜,根据矿石中镁含量变化,控制酸矿比为 375~518 kg/t,高压酸浸条件为温度 250~255 °C,压力 4.1~4.5 MPa,停留时间 1.3~1.7 h,酸浸后的游离酸质量浓度约为 35 g/L<sup>[33]</sup>。由于采用了卧式多隔室机械搅拌釜,相比第一代的立式高压浸出釜,内径由 3.05 m 增至 4.6~4.9 m,长度由 15.8 m 增至 28.6~33.4 m,使得高压釜容积有效增加,产能提升。3 个项目体现了当时工业化大规模处理红土镍矿的尖端技术,但也存在材料选择、设备选型不当,以及主工艺与配套设施不协调等问题,导致生产不稳定,造成生产指标低于设计指标,工业化应用未达到预期效果。

#### 2.2.2.3 第三代 HPAL 技术

针对第二代 HPAL 技术运行中出现的设备、管道、阀门损坏,装置作业率较低,维修成本过高,生产不稳定等问题,第三代 HPAL 技术对关键设备进行了改进,并通过优化工艺过程及参数,完善工艺控制系统、优化选择设备材料,来提高工业生产稳定性和有价金属回收率,降低生产运行成本。对此,已有相关报道,贾露萍等<sup>[30]</sup>针对红土镍矿进行的高压酸浸小型试验研究结果表明:在温度 260 °C、酸矿比 280 kg/t、搅拌速度 120 r/min、浸出时间 50 min、酸浓度 25% 的高压酸浸条件下,镍、钴浸出率均达 95% 以上,且经济效益最佳;影响镍浸出率的因素排序为温度>酸矿比>浸出时间>搅拌速度>矿浆浓度。皮关华等<sup>[28]</sup>总结了巴布亚新几内亚 Ramu 项目高压酸浸生产实践经验,在控制反应温度 245~255 °C、压力 4 100~4 800 kPa、停留时间 45~60 min 的同时,根据原矿成分及时调整酸矿比,镍、钴浸出率可达 95% 左右,工艺成本较低,浸出效果较好。

三代 HPAL 技术特点及应用项目情况见表 4。

表 4 三代 HPAL 技术特点及应用项目情况

HPAL 技术	高压浸出釜特点	浸出温度/℃	浸出压力/MPa	工业应用项目
第一代	φ3.05 m×15.8 m 立式无机械搅拌高压浸出釜	246	4.1	古巴 Moa
第二代	φ4.6 m×30 m 的 6 隔室卧式高压釜防爆复合钛板	250~255	4.1~4.5	西澳 Bulong、Cawse、Murrin Murrin
第三代	巴布亚新几内亚 Ramu 项目采用 φ5.1 m×39.2 m 的 7 隔室卧式高压釜,釜体材料采用(118+8)mm 钢衬钛(Gr. 17)复合板	245~270	4~5	巴布亚新几内亚 Ramu, 菲律宾 Coral Bay、Taganito, 马达加斯加 Ambatovy, 印尼力勤 OBI、华越、青美邦、华飞

Ramu 项目是第三代 HPAL 技术的典型代表,项目成功达产达标并超产,标志着 HPAL 湿法工艺技术逐渐进入成熟期。Ramu 项目的卧式反应釜采用 7 隔室,封头为半球形封头、釜体材料采用(118+8)mm 钢衬钛复合板材料,高压釜尺寸为 φ5.1 m×39.2 m,是当时世界上最大规格的反应釜。该项目从 2007 年开始进行工业

试验,2012 年正式投产,2017 年成功达产,产能利用率远超同期的其他项目,连续多年满产甚至超产,为我国镍行业其他企业在印尼大力发展湿法冶炼项目提供了借鉴经验,之后有一大批 HAPL 技术项目相继开启。2021 年以来,印尼已投产和规划中的项目情况见表 5<sup>[34]</sup>。

表 5 印尼高压酸浸项目情况

项目名称	镍设计产能/(万 t·a <sup>-1</sup> )	投产时间	地点
印尼力勤 OBI 岛一期、二期 HPAL 项目	5.5	2021 年 5 月 19 日	OBI 岛
印尼华越镍钴项目	6	2021 年 12 月 1 日	Morowali 工业园
印尼青美邦项目一期	3	2022 年 9 月 26 日	Morowali 工业园
印尼华飞镍钴项目	12	2023 年 6 月 20 日	WedaBay 工业园
印尼力勤 OBI 岛三期 HPAL 项目	6	规划建设	OBI 岛
印尼华宇镍钴项目	12	规划建设	WedaBay 工业园
青山集团印尼瑞隆项目	12	规划建设	WedaBay 工业园
青山集团印尼晨曦项目	12	规划建设	Morowali 工业园

印尼已投产的红土镍矿湿法项目都以第三代 HPAL 工艺为主,主要是在 250~270 ℃、4~5 MPa 的高温高压工艺条件下,采用硫酸处理低品位红土镍矿。第三代使用的高压釜体积比第二代更大,能处理更大容量的红土镍矿。印尼力勤 OBI 项目的反应釜直径达 5.57 m,长度达 41.47 m,总质量为 850 t,容积较第二代大大增加。Ramu 项目和力勤 OBI 一期项目的高压釜均由日本森松提供,而印尼华越镍钴湿法冶炼项目则由南京宝色集团生产制造,一定程度上打破了设备壁垒,推进了核心湿法设备国产化的进程。增大单一高压釜容积以提高产能仍是

高压釜的研究发展方向,而增加筒体直径和长度是增大单一高压釜容积的有效途径。由于高压釜需在高温高压条件下运行,受其厚度增加等因素限制,所用直径已接近允许的极限值,因此只能从长度方面加以改进。高压釜由若干筒节焊接而成,通过增加筒节数量可增大单一高压釜容积,增加原矿处理能力,进而提高项目经济效益。

### 2.3 镍钴沉淀工艺及工业应用

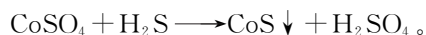
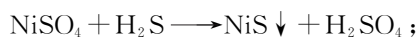
采用第一代 HPAL 技术的古巴 Moa 项目、采用第二代 HPAL 技术的西澳 Murrin Murrin 项目、采用第三代 HPAL 技术的巴布亚新几内亚

Ramu 等项目,均已证明 HPAL 技术能经济、有效地处理低镍低镁高铁的红土镍矿,实现镍钴等有价值金属的高效浸出。而有价金属浸出后的沉淀富集工序也是整体工艺的关键环节之一,将含镍钴浸出液进行硫化沉淀或中和沉淀,可得到镍、钴含量富集的中间产品,该中间产品经过深度加工纯化后,可用于生产电解镍或硫酸镍。根据产品选择的方案不同,生产工艺流程也不同,从而会影响项目投资和运行。

### 2.3.1 HPAL-硫化沉淀工艺及工业应用

#### 2.3.1.1 HPAL-硫化沉淀工艺特点

硫化沉淀工艺对镍钴具有高度的专一性,通常选择硫化氢、过硫化氢、硫氢化钠、硫化钠、硫化钾、硫化铵、硫化镁、硫化锌等硫化剂中的一种或几种作为沉淀剂。相较而言,硫化氢对浸出液中的镍钴沉淀效果最好。硫化氢会优先与浸出液中的镍、钴离子发生反应,生成硫化物沉淀,几乎不与浸出液中的锰、镁、铝、硅等杂质离子反应,因此产物中的杂质含量很低。发生的化学反应如下:



硫化氢沉淀工艺能分离非硫化矿浸出液中的镍、钴,获得纯度较高的镍钴硫化物,实现镍钴有价值金属的富集。该工艺对 pH 控制要求较高,pH 过低,硫化反应速度慢,pH 过高,溶液中其他杂质元素则会发生共沉淀,达不到分离提纯的目的;此外,对温度的控制也有一定要求,因为温度的选择会影响硫化反应速率,进而影响镍钴沉淀速率。工业生产中采用硫化氢沉淀工艺时,在 pH 为 1.0~3.0、温度 $\geq 80^\circ\text{C}$ 、沉淀时间 $\leq 2\text{ h}$ 条件下,镍钴沉淀率 $\geq 98\%$ 。

#### 2.3.1.2 HPAL—硫化沉淀工艺的工业应用

根据选择温度的不同,可将硫化物沉淀工艺分为高温硫化沉淀(HMSP)、中温硫化沉淀(MMSP)和低温硫化沉淀(LMSP)。世界主要硫化沉淀工艺项目情况见表 6。

古巴 Moa 项目作为世界上第一代 HPAL 技术的代表,是最早使用硫化氢法沉淀镍钴的项目,采用 HMSP 工艺,能耗较大。该项目于 1959 年开始投产,通过一系列技术改进后产量稳步上升,目前镍金属年产量稳定在 30 000 t,钴金属年产量在 1 700~3 800 t。

表 6 世界主要硫化沉淀工艺项目情况

项目名称	镍设计产能/ ( $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ )	钴设计产能/ ( $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ )	硫化沉淀 工艺
古巴 Moa	35 000	3 600	HMSP
西澳 Murrin Murrin	40 000	2 500	MMSP
菲律宾 coral Bay(一期)	10 000	750	LMSP
菲律宾 Taganito	30 000	2 640	LMSP
马达加斯加 Ambatovy	60 000	5 000	HMSP

西澳 Murrin Murrin 是第二代 HPAL 技术应用项目的代表,设计规模年产 40 000 t 镍、2 500 t 钴。采用 MMSP 工艺,温度为 $95^\circ\text{C}$ ,硫化氢分压为 105 kPa,pH $< 2.5$ ,反应时间为 20 min,在该条件下沉淀所得硫化物产品中含镍 55%、钴 4.5%。

菲律宾 coral Bay 作为第三代 HPAL 技术应用项目的代表,设计规模为年产 10 000 t 镍、750 t 钴的混合硫化镍钴,通过改造升级,目前镍金属年产量可达 2.4 万 t。菲律宾 Taganito 项目是在 coral Bay 项目基础上开发的新项目,整体工艺流程与 coral Bay 相同,都属于 LMSP 工艺,能耗较低,在温度 $80^\circ\text{C}$ 、硫化氢分压约 150 kPa 条件下,镍钴回收率高达 99%。菲律宾这 2 个项目与古巴 Moa、西澳 Murrin Murrin 项目所采用沉淀工艺的区别是在硫化沉淀前增加除锌工序,目的是提高硫化沉淀产物纯度。

马达加斯加 Ambatovy 项目采用 5 套高压酸浸装置,设计规模为年产 60 000 t 镍块、5 000 t 钴块,在温度 $105^\circ\text{C}$ 、压力 371 kPa(其中硫化氢分压 200 kPa)、沉淀时间 40 min 条件下,镍钴回收率为 99%。

硫化氢法沉镍钴工艺具有镍钴选择性好、产品纯度高、适用 pH 较低等优点,浸出液在酸性条件下即可回收镍钴,镍钴沉淀率可达 99%以上,已被早期湿法冶金项目(见表 6)采用;但与其他沉淀技术不同,硫化沉淀技术一般要求建设配套的制氢厂、硫化氢气体厂,与硫化氢制备、储存相关的设施的投资和运行成本相对较高,操作过程中的硫化氢溶于水形成弱酸,会对金属材料产生氢脆破坏造成腐蚀,导致运行成本也相对较高;此外,由于硫化氢毒害性较强,属于重大风险源头,对项目管理、人员素质要求很高,因此,在后期新建项目中一般应用较少。

### 2.3.2 HPAL—氢氧化沉淀工艺及工业应用

#### 2.3.2.1 HPAL—氧化镁沉淀工艺及工业应用

氧化镁沉淀工艺是以氧化镁作沉淀剂,通过调节浸出液酸度沉淀富集镍钴。当 pH 达到  $Me^{2+}$  ( $Ni^{2+}$ 、 $Co^{2+}$ ) 水解沉淀的 pH 时,  $Me^{2+}$  开始发生水解;继续添加氧化镁,氧化镁则与浸出液中  $H^+$  发生反应,使得水解向沉淀正反应方向进行。其工艺流程如图 3 所示。沉淀反应如下:

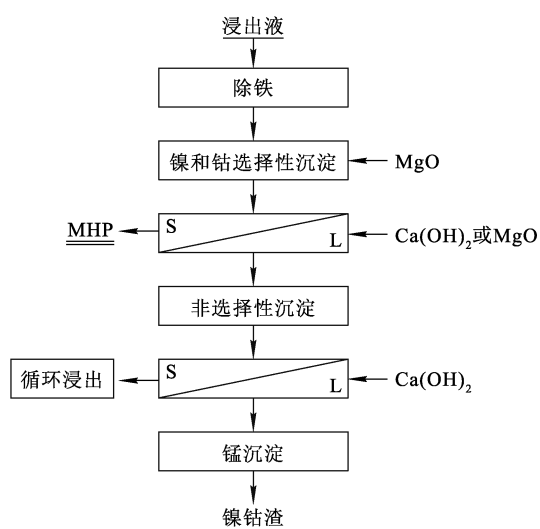
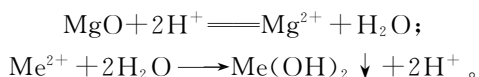


图 3 氧化镁沉淀镍钴工艺流程

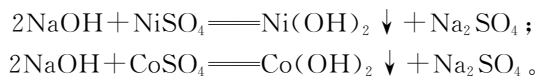
澳大利亚 Ravenstrophe 项目采用 HPAL—氧化镁沉淀工艺两步沉淀镍钴:第一步为镍钴的选择性沉淀,将溶液 pH 调至 4.5~6.0 范围内,加入新配制浆料保持氧化镁的高活性;第二步控制氧化镁用量 3~6 g/L、反应时间 3~5 h、反应温度 30~90 °C,试运行所得氢氧化镍钴产品成分为水 40%~42%、Ni 40%、Co 1.4%,Ni 回收率为 94.5%,Co 回收率大于 98%<sup>[35]</sup>。

氧化镁沉淀工艺具有安全性较高等优点;但在实际应用中存在活性氧化镁因放置时间过长而失活,导致后续生产过程中生成的中间产品 MHP 沉淀工序异常,造成产品中含镁量高、质量不合格情况。因此该工艺在后期新建项目应用较少。

#### 2.3.2.2 HPAL—氢氧化钠直接沉淀工艺及工业应用

氢氧化钠直接沉淀工艺是直接以氢氧化钠作为

沉淀剂沉淀浸出液中的镍、钴。反应方程式如下:



该法通常是向除铁铝后液中加入 5%~10% 氢氧化钠溶液,并控制沉淀温度 60 °C、沉淀时间约 4 h,通过两段沉淀方式回收镍、钴。第一段控制 pH 在 7.5~7.8 范围内,严控镁、锰等杂质进入中间产品 MHP,保证产品质量,使镍钴沉淀率达 80%~90%;第二段控制 pH 在 7.8~8.0 范围内,二段沉淀浆料浓密后返回晶种及循环浸出。

氢氧化钠沉淀镍钴工艺简单,安全可靠,但中间产品 MHP 颗粒小,沉降性能差。在 Ramu 项目投产的早期阶段,采用该法所得 MHP 在浓密机内沉降缓慢,即使加入絮凝剂过量,所得底流浓度也很低,矿料颗粒小且含水量大,造成后续的浓密机处理速度和产品压滤机过滤速度慢,压滤后滤饼含水率高,系统产能最低仅为 30%,严重制约生产。氢氧化钠直接沉淀工艺技术参数见表 7。

表 7 氢氧化钠直接沉淀工艺技术参数

技术参数	实际值	设计值
镍钴沉淀平均进料流量/( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	570	2 000
产品浓密机絮凝剂用量/( $g \cdot t^{-1}$ )	>1 000	120
产品压滤机作业周期/min	>40	18
MHP 产品平均含水率/%	74	68

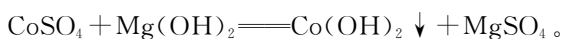
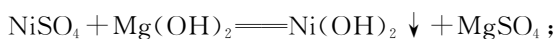
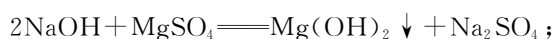
采用该法得到的 MHP 产品含水率高达 74%,镍含量仅为 35%,还含有大量硫酸镁等可溶性盐,杂质含量较高,且由于沉淀过程中有价金属离子损失较大,造成镍钴回收率仅为 70%左右,经济效益较差。目前,国际上几乎没有采用该法沉淀镍钴的项目。

#### 2.3.2.3 HPAL—氢氧化钠转碱转晶种沉淀工艺及工业应用

氢氧化钠直接沉淀工艺的技术瓶颈主要是氢氧化钠溶液直接加入镍钴沉淀体系后,氢氧根立刻全部电离,沉淀过程中镍钴离子迅速形成沉淀颗粒<sup>[35-36]</sup>,而这些沉淀颗粒为均相成核的产物,因没有时间长大,导致外观细小,水合度高,异常蓬松,致密性较差,并由此引发一系列生产问题。要解决氢氧化钠电离的高反应速率造成沉淀体系的过饱和度及沉淀颗粒只能快速形成不能长大的

问题,必须寻找能控制释放氢氧根离子速度的沉淀剂。

$Mg(OH)_2$  属于碱,能全部电离出氢氧根离子,但由于其溶解度低,电离出的氢氧根离子会受到控制;而红土镍矿中含镁,在高压浸出时,镁会随镍钴一同浸出,镁开始沉淀的 pH 约为 9.3,大于镍钴沉淀完全时的 pH(约 8.5),所以镁离子会一直存在于溶液中。基于上述原理,中国恩菲工程技术有限公司(ENFI)对镁离子加以利用,开发了转碱技术,将氢氧化钠加入到镍钴沉淀底流中,使得体系中镁离子转化成氢氧化镁,发生液相转碱反应,成功地将氢氧化钠沉淀剂转化为氢氧化镁沉淀剂。反应方程式如下<sup>[36]</sup>:



在此基础上,将含氢氧化镁的沉淀结晶浆料和待沉淀的除铁铝后液通过对流的方式同时加入到反应槽中,可降低镍钴沉淀时的过饱和度,阻止均相成核。

该转碱工艺通过将瞬时完全电离出氢氧根离子的氢氧化钠液碱转化成电离速度受控的氢氧化镁的难溶碱,实现氢氧化物沉淀剂的活性控制,降低镍钴沉淀时的过饱和度,为沉淀颗粒生长长大

创造了必要条件。同时,转碱过程中,镍钴沉淀底流和碱接触,使得用作晶种的沉淀表面覆盖的碱式硫酸镁等物质分解暴露出晶体生长面,起到晶种表面活化的转晶种作用,通过活性后的 MHP 晶种发挥晶种模板的作用,促进氢氧化镍钴沉淀颗粒生长长大,最终得到大颗粒的沉淀。

瑞木镍钴管理(中冶)有限公司(简称瑞木)在 ENFI 指导下,已成功地将氢氧化钠转碱转晶种新沉淀工艺应用到镍钴项目中。该项目进行转碱转晶种技术改造后,达产率迅速提高,经济效益明显,所得氢氧化镍钴产品质量较好,镍含量较高,镁杂质含量较低,含水率较低。ENFI 在瑞木转碱转晶种的实践基础上,开发出了有自主知识产权的碱基活化控制技术(AACP),并成功应用到力勤 OBI 项目、华越项目。中国以 Ramu 项目为基础,积累了海外矿业开发的成功经验,随后以宁波力勤、华友钴业、格林美为代表的中资企业也相继在印尼进行新一代 HPAL 项目的开发,其中力勤 OBI 项目已顺利投产,力勤资源 HPAL 项目一期、二期生产线均于投产后 2 个月内成功达产,标志着基于 Ramu 项目的 HPAL 工艺更加成熟和完善。

### 2.3.3 不同沉淀工艺对比

不同沉淀工艺的技术指标对比情况见表 8。

表 8 不同沉淀工艺的技术指标对比情况

沉淀工艺	产品指标		项目指标	
	$w(\text{水})/\%$	$w(\text{镍})/\%$	整体作业率/ $\%$	项目达产率/ $\%$
$H_2S$	<25	>50	—	80
MgO	约 50	40~50	90	80
直接 NaOH	>70	<35	—	35
NaOH 转碱转晶种及 AACP	<50	>40	>92	110

硫化沉淀工艺具有产品纯度高优点,但工艺复杂,安全隐患多,运行成本高,造成工艺达产率不高;氧化镁沉淀工艺具有安全性较高等优点,但也存在氧化镁活性难以保持,工艺达产率不高等问题;氢氧化钠直接沉淀法工艺简单,但产品质量、达产率等关键指标不能满足设计要求;NaOH 转碱转晶种工艺达产率高,产品质量较好,经济效益明显,在此基础上开发的氢氧化物碱基活化控制技术(AACP)可根据企业的实际情况,选择不同的氢氧化物沉淀剂组合,

并可获得  $w(\text{镍}) > 40\%$ 、 $w(\text{镁}) < 1\%$ 、含水率 < 50% 的 MHP 产品,能降低生产成本,技术前景较好<sup>[35]</sup>。

此外,从硫化工艺和氢氧化工艺的中间产品来看,MSP 后续会电解加工为电镍和电钴,而 MHP 仅通过“酸溶—除杂—萃取”工序即可获得硫酸镍溶液,成本更低。MHP 中间产品能将产业上游冶炼和下游精炼工序相链接,形成“低品位红土镍矿 HPAL—AACP 富集 MHP—精炼制取硫酸镍—制备电池”工艺路线,工艺流

程短,效率高,可制得高质量的 MHP 产品,能为动力电池供应端提供优质的原料,应用前景看好。

### 3 红土镍矿处理工艺对比

红土镍矿处理工艺对比情况见表 9。

表 9 红土镍矿中处理工艺对比情况

工艺	优点	缺点	环境危害	回收率
火法	处理量大、流程短	耗能高、碳排放强度高,环境污染重	废气、粉尘、废渣	镍:约 90%
还原焙烧—常压氨浸	浸出剂可循环回收利用	镍钴回收率低	废水、废渣	镍:70%~80% 钴:40%~60%
高压酸浸—H <sub>2</sub> S 沉淀	回收率高、产品纯度高、pH 低	配套设施多,投资大,H <sub>2</sub> S 为风险源,运营风险大	废水、废渣	94%~98%
湿法 高压酸浸—MgO 沉淀	安全性高,回收率高	MgO 消耗大,MgO 容易失活,影响产品质量	废水、废渣	94%~98%
高压酸浸—直接 NaOH 沉淀	工艺简单,安全性高	有价金属离子流失严重,回收率低	废水、废渣	约 70%
高压酸浸—转碱转晶种沉淀	回收率高、生产效率高,产品质量好	转碱转晶种过程中使用的氢氧化钠沉淀剂,价格较贵,成本较高	废水、废渣	约 90%

典型的火法工艺简便、效率高,处理矿石量大、易实现工业化应用;但能耗高、碳排放强度高,在节能减排的背景下,发展受限。湿法工艺将成为处理红土镍矿的首选技术,采用高压酸浸—转碱转晶种沉淀工艺,金属回收率高,生产效率高,产品质量好。

### 4 存在的问题及分析

1)HPAL-氢氧化钠液碱转碱转晶种沉淀工艺的沉淀剂成本较高。低品位褐铁矿型红土镍矿采用高压酸浸—转碱转晶种沉淀的湿法冶金工艺,具有回收率高、生产效率高、产品质量好等优势。但目前采用的氢氧化钠转碱转晶种沉淀工艺使用的氢氧化钠液碱一般要外购,成本较高,如能通过就地开采利用石灰石矿制备石灰乳,并用其全部或部分替代氢氧化钠液碱作为氢氧化镍钴的共沉淀剂,则有可能降低镍钴沉淀工艺的试剂成本,提高经济效益。

2)尾矿处理难题有待进一步解决。经过多年发展,HPAL 工艺已成为处理低品位红土镍矿的成熟可靠且具有成本竞争力的工艺技术。但每生产 1 t 金属产品,产生的矿渣量高达 200 t,由此产生的尾矿量也较大,渣中铁含量较高(30%以上),同时还含有 5% 硫<sup>[27]</sup>,需要进一步处理。目前,针对该类尾矿的处理主要有尾矿坝堆积、地下压滤回填和深海填埋 3 种方法。其中,尾矿坝堆积法

成本低,是有色矿山常见的尾矿处理方式,但在降雨较大的地区易发生泥石流,存在垮坝危险;地下压滤回填法安全环保,是目前主要的研究发展方向,但也存在投入成本高、后期需长期维护等问题;深海填埋法成本较低,适用于位于近海的项目,瑞木是国内外目前唯一使用深海填埋的 HPAL 项目。将尾矿排放到水下 300 m 的深水区域长期监测结果表明,目前没有对海洋产生影响,但深海填埋法今后是否会对海洋环境造成危害仍存在争议,限制条件较多。由于 3 种处理方式都存在安全隐患,故仍有待进一步开发可行的尾渣处理技术。

### 5 结语及展望

火法冶金可处理高硅高镁高镍型的红土镍矿,具有工艺成熟、流程短、效率高、处理量大等优点;但高温熔炼过程中,能耗较大,碳排放强度高,环境污染严重;同时,钴会进入废渣,造成钴回收率低。而湿法冶金具有能耗低、碳排放强度小、环境污染小、在回收镍的同时能同步回收钴等优势,正逐渐成为处理红土镍矿的优选技术。其中,还原焙烧—常压氨浸工艺的浸出剂可循环使用,耗量少,但有价金属回收率较低,镍一般为 70%~80%,钴为 40%~60%,限制了其应用;HPAL 技术的镍钴浸出率较高(约 95%),该技术历经三代发展,材料性能不断提高,大型高压反应釜制造技术和操作

工艺也不断完善,技术优势愈发明显,未来仍是红土镍矿湿法冶金工业开发应用的主要方向。

湿法工艺的后一个工序是沉淀富集镍钴,通过从浸出液中高效沉淀富集镍钴,得到镍钴的中间产品,也是整体工艺的关键环节之一。硫化氢法沉镍钴工艺具有对镍钴选择性好、产品纯度高优点,但所需配套设施较多,投资较大,且硫化氢毒害性较强,属于重大风险源头,对项目管理、人员素质要求很高;氧化镁沉淀工艺安全性较高,但存在沉淀剂成本高、活性氧化镁易失活而影响生产等问题;氢氧化钠直接沉淀工艺简单、安全可靠,但中间产品颗粒小,沉降性能差,达产率低,回收率不理想,严重制约了生产;氢氧化钠转碱转晶种沉淀工艺生产出的氢氧化镍钴产品质量较好,镍含量高,镁杂质含量低,含水率低,经济效益明显,已在工业生产中得到推广应用。在 HPAL 工艺中采用转碱转晶种沉淀富集镍钴,具有回收率高、生产效率高、产品质量好等优势,生产的 MHP 混合镍钴产品中镍质量分数  $>40\%$ , 镁质量分数  $<1\%$ , 含水率  $<50\%$ , 是动力电池用硫酸镍优质的原料之一;所得 MHP 中间产品能将产业上游冶炼和下游精炼工序链接起来,使得“低品位红土镍矿 HPAL—AACP 富集 MHP—精炼制取硫酸镍—制备电池”工艺一体化衔接,有望成为电池用硫酸镍的主流工艺。

目前,HPAL 工艺仍存在尾渣处理难题,尾渣中仍含有多种有价金属,特别是将其中高含量金属铁进行提炼回收利用,从根本上变害为利是当前面临的难题,有待进一步解决。

#### 参考文献:

- [1] MYUNG S T, MAGLIA F, PARK K J, et al. Nickel-rich layered cathode materials for automotive lithium-ion batteries: achievements and perspectives[J]. ACS Energy Letters, 2017, 2(1):196-223.
- [2] 李丹. Ramu 红土镍矿矿浆的生产实践[J]. 金属矿山, 2019(12):26-33.
- [3] 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.
- [4] 张振芳, 陈秀法, 李仰春, 等. “双碳”目标下镍资源的综合利用发展趋势[J]. 矿产综合利用, 2022(2):31-39.
- [5] ILYAS S, SRIVASTAVA R R, KIM H, et al. Extraction of nickel and cobalt from a laterite ore using the carbothermic reduction roasting-ammoniacal leaching process[J]. Separation and Purification Technology, 2020. DOI: 10. 1016/j. seppur. 2019. 115971.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 田庆华, 李中臣, 王亲猛, 等. 红土镍矿资源现状及冶炼技术研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(9):2975-2997.
- [9] 傅建国, 刘诚. 红土镍矿高压酸浸工艺现状及关键技术[J]. 中国有色冶金, 2013, 42(2):6-13.
- [10] 吴琦, 马文军. 碳中和背景下电池镍行业发展趋势及应对措施[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(5):7-11.
- [11] 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.
- [12] 武兵强, 齐渊洪, 周和敏, 等. 红土镍矿湿法冶金工艺现状及前景分析[J]. 中国冶金, 2019, 29(11):1-5.
- [13] 邢姜, 冷红光, 韩百岁, 等. 红土镍矿湿法冶金工艺现状及研究进展[J]. 有色矿冶, 2021, 37(5):26-32.
- [14] CARON M H. Fundamental and practical factors in ammonia leaching of nickel and cobalt ores[J]. Transactions AIME, 1950, 188:67.
- [15] 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.
- [16] 李建华, 程威, 肖志海. 红土镍矿处理工艺综述[J]. 湿法冶金, 2004, 23(4):191-194.
- [17] 李栋, 郭学益. 低品位镍红土矿湿法冶金提取基础理论及工艺研究[M]. 北京:冶金工业出版社, 2015.
- [18] 蒋继波, 王吉坤. 红土镍矿湿法冶金工艺研究进展[J]. 湿法冶金, 2009, 28(1):3-11.
- [19] MANO E S, CANER L, PETIT S, et al. Ni-smectitic ore behaviour during the caron process[J]. Hydrometallurgy, 2019, 186:200-209.
- [20] 王成彦, 尹飞, 陈永强, 等. 国内外红土镍矿处理技术及进展[C]//中国有色金属学会冶金物理化学学术委员会. 2008 年全国湿法冶金学术会议论文集. 北京:科学出版社, 2008:14-21.
- [21] 李小波, 轩轸, 杨琦. 菲律宾褐铁矿型红土镍矿还原焙烧砂氨浸试验研究[J]. 湿法冶金, 2014, 33(2):108-111.
- [22] 李小波, 轩轸. 菲律宾褐铁矿型红土镍矿还原焙烧试验研究[J]. 湿法冶金, 2016, 35(3):205-208.
- [23] CHEN J, JAK E, HAYES P C. Investigation of the reduction roasting of saprolite ores in the Caron process: effect of sulphur addition[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2021, 130(2):170-179.
- [24] 邱沙, 谢建平, 车小奎. 红土镍矿还原焙烧—酸浸试验研究[J]. 矿冶, 2016, 25(6):40-44.
- [25] 张云芳, 李金辉, 高岩, 等. 红土镍矿的硫酸铵焙烧过程[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(1):155-161.
- [26] RIBEIRO P P M, DOS SANTOS I D, NEUMANN R, et al. Roasting and leaching behavior of nickel laterite ore[J]. Metallurgical and Materials Transactions: B, 2021, 52(3):1739-1754.

- [27] 李丹. 褐铁矿型红土镍矿硫酸高压浸出的研究[J]. 矿冶, 2015, 24(6): 66-71.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 皮关华. 关于高压釜结垢原理分析及控制措施[J]. 有色设备, 2018(6): 64-68.
- [32] 汪锡顺. 红土镍矿湿法酸浸高压釜搅拌机封故障浅析[J]. 冶金设备, 2018(1): 61-64.
- [33] 苏平. 西澳大利亚三个镍红土矿项目的工程化比较[J]. 中国有色冶金, 2010, 39(2): 1-8.
- [34] 刘希泉, 张志, 贾露萍, 等. 红土镍矿高压酸浸技术优化研究[J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(2): 92-97.
- [35] 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.
- [36] 孙宁磊, 李少龙, 王魁珽, 等. 红土镍矿湿法冶金镍钴沉淀新工艺[J]. 中国有色冶金, 2017, 46(2): 26-28.

## Research Progress and Application Prospect of Hydrometallurgy for Low Grade Laterite Nickle Ore

LI Dan<sup>1,2</sup>

(1. *China Metallurgical Group Corporation, Beijing 100028, China;*

*2. Ramu Nico Management (MCC) Limited, Beijing 100028, China)*

**Abstract:** The characteristics, industrial application status and research progress of hydrometallurgy for low grade laterite nickle ore by reduction roasting—normal pressure ammonia leaching and high-pressure acid leaching (HPAL), as well as the development of three generations of HPAL technology are summarized. The nickle-cobalt precipitation and enrichment technology and the application are introduced. The processes advantages and disadvantages of the H<sub>2</sub>S precipitation, MgO precipitation, direct NaOH precipitation are analyzed. The effectiveness of new precipitation process with alkali conversion and crystal seed activation has been explored. The development prospect of laterite nickel hydrometallurgical process is also prospected.

**Key words:** laterite nickle ore; hydrometallurgy; reduction roasting—ammonia leaching; HPAL; precipitation with NaOH alkali conversion and crystal seed activation; tailings; research progress; prospect