

## 红土镍矿湿法尾渣冶炼工艺分析

刘何美, 谢朝明

(中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410012)

**摘要:** 为了应对红土镍矿湿法尾渣的环境风险及资源化利用瓶颈, 本文通过系统分析其处理技术体系(涵盖工艺原理、回收路径及技术特性), 结合经济与社会效益, 探讨技术瓶颈与解决方案。结果表明: 1) 技术路径方面, 针对尾渣中金属赋存形式, 现有工艺包括高温冶金(如高炉熔融还原)、低温酸浸(镍浸出率 60%~80%)、固相还原及磁性焙烧-湿法联合处理, 但低温酸浸面临设备腐蚀和废酸处理难题; 2) 经济环境挑战方面, 高温工艺能耗占比超 40%, 钴回收率不足 30%, 设备年腐蚀速率 0.5~1.2 mm, 产业化投资回报周期超 8 a; 3) 政策创新方向方面, 需通过循环经济策略推动建材化利用, 结合太阳能热能降碳及 AI 优化、生物冶金等技术突破“高投低效”瓶颈。本文成果可为红土镍矿湿法尾渣的低碳资源化路径设计及政策制定提供理论依据与实践借鉴。

**关键词:** 湿法冶炼; 红土镍矿; 尾渣处理技术; 资源化利用; 工艺分析

中图分类号: TF821

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)09-0009-07

doi:10.13402/j.gcjs.2025.09.108

## Analysis on smelting process of wet tailings of laterite nickel ore

LIU Hemei, XIE Chaoming

(Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410012, Hunan, China)

**Abstract:** In order to deal with the environmental risks and resource utilization bottlenecks of laterite nickel ore wet tailings, its treatment technology system (covering process principles, recovery paths and technical characteristics) is systematically analyzed, its technical bottlenecks and solutions are discussed in combination with economic and social benefits. The results show that: 1) In terms of technical path, for the occurrence of metals in tailings, the existing processes include high-temperature metallurgy (such as blast furnace melt reduction), low-temperature acid leaching (nickel leaching rate 60%~80%), solid-phase reduction and magnetic roasting-wet joint treatment, but low-temperature acid leaching faces equipment corrosion and waste acid treatment problems; 2) In terms of economic and environmental challenges, the energy consumption of high-temperature processes accounts for more than 40%, the cobalt recovery rate is less than 30%, the annual corrosion rate of equipment is 0.5~1.2 mm, and the return on investment period of industrialization exceeds 8 years; 3) In terms of policy innovation direction, it is necessary to promote the utilization of building materials through circular economy strategies, and break through the bottleneck of “high investment and low efficiency” by combining solar thermal energy carbon reduction, AI optimization, biometallurgy and other technologies. The results can provide theoretical basis and practical reference for the design and policy formulation of low-carbon resource paths for wet tailings in laterite nickel ore.

**Key words:** wet smelting; laterite nickel ore; tailings treatment technology; resource utilization; process analysis

收稿日期: 2024-12-13

基金项目: 湖南省培育世界一流湘版科技期刊建设工程资助项目(2024ZL6020)

作者简介: 刘何美(1983—), 女, 工程师, 从事烧结球团相关技术研究及论文编审工作。

通信作者: 谢朝明(1985—), 男, 高级工程师, 从事钢铁冶金、直接还原方面的研究及工程设计工作。

红土镍矿作为全球镍资源供应的战略矿产,凭借其储量优势(占全球镍资源 70% 以上)和开采经济性,已成为不锈钢及三元锂电池产业链的核心原料来源。与硫化镍矿相比,红土镍矿普遍呈现低品位特性(Ni 品位为 1%~3%),这使得湿法冶炼工艺因其能耗强度较火法降低 40%~50% 而成为行业主流选择<sup>[1]</sup>。然而,湿法过程产生的酸性尾渣兼具资源性与污染性双重特征:一方面富含 Fe(40%~50%)、Mg(15%~20%)、Co(0.1%~0.5%) 等有价金属;另一方面含有高浓度硫(S>5%)、强碱性(pH 10~12)及重金属(Cr、As 等),若处理不当将引发重金属迁移、地下水碱化及扬尘污染等复合型环境风险<sup>[2]</sup>。国际实践表明,新喀里多尼亚等采用的高温还原焙烧(>1 000 °C)虽可实现铁资源回收,但面临单位能耗高达 800~1 200 kW·h/t、镁钴综合回收率不足 30% 等系统性瓶颈<sup>[3]</sup>。我国创新研发的低温酸浸-固相还原联用技术虽将铁回收率提升至 85%(镁纯度>98%)<sup>[4]</sup>,磁化焙烧技术实现硫减排 30%~40%<sup>[5]</sup>,但多金属协同提取率仍低于 60%,且受制于碳排放强度(>0.8 t CO<sub>2</sub>/t Ni)与投资回报周期的双重约束<sup>[6]</sup>。本文立足红土镍矿湿法尾渣处理的全链条视角,系统梳理矿物预处理、有价金属提取(镍、铁、镁、钴)、固废建材转化及废水闭环治理的技术路径,旨在为红土镍矿湿法尾渣的高值化利用提供系统解决方案。

## 1 红土镍矿湿法冶炼尾渣特点

红土镍矿湿法冶炼过程中,镍金属与尾渣的产

出比高达 1:100,所产酸性尾渣的化学组成具有显著工艺依赖性(表 1)。矿物学分析表明,尾渣主要由非晶态硅酸盐(40%~60%)和赤铁矿(15%~30%)构成,同时赋存可溶性镁铝盐及残余酸(pH 4~7),并伴生 Cr、Mn 等重金属杂质。尾渣产率呈现明显的品位效应:当处理 Ni 质量分数<1.5%的低品位矿时,渣率可达 85%~90%;而对 Ni 质量分数>2%的富矿,渣率可优化至 60%~70%。以典型百万吨级冶炼厂为例,其年排放尾渣规模达 60 万~90 万吨,其中比表面积大的细颗粒(<100 μm)占比超过 80%。为防控环境风险,需采用复合固化/压块工艺将初始含水率(70%~80%)降至 30%~50% 以下,从而有效阻断雨水淋溶导致的重金属迁移通道<sup>[7]</sup>。

## 2 尾渣中有价金属的回收技术

### 2.1 镍钴的提取

#### 2.1.1 浸出法

浸出法作为红土镍矿湿法尾渣中镍钴资源化回收的关键技术,其工艺原理是基于酸碱溶解反应将金属组分转化为可溶性离子态。根据反应体系的不同,主要可分为 4 类工艺:1) 硫酸加压浸出在 180~220 °C、1.5~2.5 MPa 的强化反应条件下,镍浸出率可达 80%~90%,但钴浸出率相对较低(60%~70%),且存在设备腐蚀(年腐蚀速率为 1.2~2.0 mm)和酸性废水处理等问题;2) 氨性浸出-硫化沉淀工艺通过形成稳定的 [Ni(NH<sub>3</sub>)<sub>6</sub>]<sup>2+</sup> 络合物实现镍的选择性浸出,后续硫化处理可使钴富集率达到 90% 以

表 1 红土镍矿湿法冶炼尾渣的物相组成与环境特性

化学成分	质量分数范围/%	赋存形态与资源环境属性
铁氧化物	30~50	赤铁矿(α-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/针铁矿(α-FeOOH)主导,磁选回收率可达 75%~85%,建材化需控制 SiO <sub>2</sub> 和 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 的质量分数之比 < 2.5
镁氧化物	10~20	蛇纹石[Mg <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> ]与滑石[Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ]共存,导致尾渣 pH 升至 10~12,酸浸需额外耗酸 20%~30%
硅氧化物	20~40	非晶态硅酸盐(50%~60%)与石英(SiO <sub>2</sub> )混合相,玻璃体质量分数 > 35% 时可提升胶凝活性
铝氧化物	5~15	以铝硅酸盐[Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> ]为主,熔融温度较纯 SiO <sub>2</sub> 降低 150~200 °C
镍残留物	0.1~0.5	NiO/Ni(OH) <sub>2</sub> 表面吸附为主,生物浸出可提升回收率 15%~20%
残余电解质	0.3~1.2	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /Cl <sup>-</sup> 等离子态存在,淋溶液电导率值达 5~8 mS/cm,需固化稳定化处理
重金属	<1	Cr <sup>3+</sup> (60%~70%)、Mn <sup>2+</sup> (20%~30%)、As <sup>3+</sup> (5%~10%) 分布,毒性特性沥滤程序检测 Cr <sup>6+</sup> 浸出浓度常超标 2~3 倍

上,但对pH值(8.5~9.5)的控制精度要求严格,单位能耗较高(500~700 kW·h/t);3)生物浸出技术利用嗜酸菌(如嗜酸氧化亚铁硫杆菌)的生物氧化作用,在常温(30~40℃)条件下实现金属溶出,虽然运行成本降低40%,但反应周期较长(7~15 d);4)新型强化浸出技术中,微波辅助浸出通过介电加热效应显著提升反应动力学,浸出时间缩短67%,镍回收率提高至92%。选择性氯化浸出则利用氯化挥发机制实现镍钴高效分离,同时减少60%的二次污染物排放。这些技术创新为湿法尾渣的资源化利用提供了多元化的技术选择。

### 2.1.2 火法冶金工艺

火法冶金技术作为镍钴回收的重要工艺路线,主要通过高温熔炼过程(包括顶吹转炉和富氧侧吹熔炼等)实现金属组分在钨相或渣相中的选择性富集。该工艺特别适用于处理镍钴品位较高(Ni质量分数>2.5%,Co质量分数>0.3%)或与硫化物共生的尾渣原料,其对复杂成分的适应性较强。然而,该工艺存在显著的能耗问题(能源成本占比超过40%),同时产生大量含SO<sub>2</sub>(质量浓度>8 000 mg/Nm<sup>3</sup>)的烟气和含重金属的熔渣等二次污染物。近年来,通过采用富氧熔炼(氧浓度>90%)、余热回收(热效率提升至60%~70%)和烟气循环等工艺改进措施,能源利用效率得到明显提升。但如何在环保性能(如碳排放强度>0.8 t CO<sub>2</sub>/t Ni)和经济性之间取得平衡,仍是该技术面临的主要挑战。

### 2.1.3 物理-化学联合处理技术

物理-化学联合处理技术通过整合物理分选和化学分离的优势,构建了高效的多金属回收工艺体系。该技术的典型工艺流程包括:1)物理预处理阶段:采用高强度磁选(磁场强度0.8~1.2 T)分离铁矿物,结合浮选工艺(pH 4~5)将镍钴氧化物品位提升至3%~5%;2)化学分离阶段:使用选择性吸附材料(如磺化酚醛树脂或MOFs)或溶剂萃取剂(如P<sub>2</sub>O<sub>4</sub>),实现钴回收率>95%的高效分离;3)工艺优化方面:通过开发功能化纳米材料和AI智能控制系统,可降低化学药剂用量20%~30%,同时减少能耗15%~20%。该技术特别适用于处理低品位尾渣(Ni<1.5%),在保证较高金

属回收率的同时,显著降低了酸碱消耗量(减少40%~50%)。然而,其设备投资成本较高(较单一工艺增加30%~40%),且工艺流程相对复杂,需要精确控制各工序的衔接。

### 2.1.4 新兴技术发展趋势

当前镍钴回收技术正朝着智能化、低碳化和高值化方向发展,主要体现在以下几个创新领域:1)生物冶金技术:通过基因工程改造的嗜酸菌株(如嗜酸氧化亚铁硫杆菌突变体),使低品位矿(Ni质量分数<0.8%)的镍浸出率提升至85%以上;2)等离子体冶金:在2 000~2 500℃高温下实现金属组分的气化-冷凝分离,能耗较传统火法降低30%;3)纳米材料应用:石墨烯基复合吸附剂的选择性>90%,且可循环使用20次以上;4)智能控制系统:基于机器学习的工艺优化可使综合回收率提升10%~15%,同时减少碳足迹40%以上;5)闭路循环体系:整合废水回用(回用率>90%)、余热发电和副产物(如硫酸钠、碳酸锂)资源化利用。未来将加强合成生物学、材料工程与人工智能的跨学科融合,通过全生命周期管理满足新能源产业需求并符合环保法规。

## 2.2 铁的提取

### 2.2.1 高温还原焙烧工艺

高温还原焙烧工艺通过将铁氧化物转化为磁性矿物或金属铁实现铁回收。该工艺包括原料预处理(含水率<10%,粒度<0.2 mm)、配料(碳质量分数>70%的还原剂,配比为15%~25%)、焙烧(1 100℃~1 300℃保温1~3 h)及磁选(0.5~1.5 T)等工序,可获得品位为85%~92%、回收率为75%~90%的铁精矿。虽然适用于高硅(SiO<sub>2</sub>质量分数>50%)高镁(MgO质量分数>15%)尾渣,但存在高能耗(1 200~1 500 kW·h/t)和环境污染等问题。

### 2.2.2 磁化焙烧

磁化焙烧在1 100℃~1 250℃还原性气氛下将弱磁性铁矿物转化为强磁性Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>,配合弱磁选可获得品位为62%~65%、回收率为82%~88%的铁精矿。工业化应用表明,采用流态化技术可缩短反应时间至30 min,提高回收率至88%,同时节能20%以上。但焦炭消耗量较大(约200 kg/t),需配套余热回收系统。

### 2.2.3 闪速磁化焙烧

闪速磁化焙烧采用流态化反应器,在 800 ~ 1 000 °C 下 10 ~ 20 min 内完成  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  向  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的转化,具有显著优势:1) 能耗降低 30%~40%;2) 碳排放减少 50%;3) 铁回收率 90%~93%,精矿品位 65%~68%。该技术符合低碳发展要求,已在印尼实现工业化应用(年处理 50 万吨尾渣,减排  $\text{CO}_2$  6 万吨),展现出良好的经济和环境效益。

## 2.3 镁的提取

### 2.3.1 高纯氧化镁制备工艺

采用 1~3 mol/L 无机酸(硫酸/盐酸)在 60~80 °C 条件下对尾渣进行酸浸 2~4 h,通过选择性溶解实现镁离子的高效提取。采用硫化钠絮凝沉淀去除铁、铝等杂质后,调节 pH 至 10~12 使镁以氢氧化镁形式沉淀,经 900 °C~1 050 °C 煅烧 2~3 h 可获得纯度  $\geq 99.5\%$  的高纯氧化镁产品。该工艺产品可满足高端电子陶瓷(介电常数  $< 9.8$ )和耐火材料(耐火度  $> 2 000$  °C)的应用要求。工业化实践表明,该工艺可实现镁回收率  $> 85\%$ ,马来西亚某冶炼厂年处理 15 万吨含镁尾渣,生产 3 万吨高纯氧化镁,年产值达 2.4 亿美元<sup>[8]</sup>。

### 2.3.2 镁资源综合利用途径

(1) 工业镁盐制备:通过控制结晶工艺(50~70 °C,0.5 mm/h)可制得纺织级硫酸镁或融雪用氯化镁( $\text{Cl}^-$  质量分数  $> 47\%$ );采用碳酸钠沉淀法可制备高纯碳酸镁( $\text{MgO}$  质量分数  $> 40\%$ ),经活化处理后可用作高分子材料阻燃剂(极限氧指数  $> 32$ )或橡胶增强填料(耐磨性提升 25%~30%)。

(2) 环保材料开发:镁基吸附剂对磷酸盐的饱和吸附容量可达 120 mg/g;通过控制烧结工艺( $[1 200 \pm 50]$  °C)可制备多孔陶瓷滤料(孔径分布 0.5~5.0  $\mu\text{m}$ ),其对  $\text{SO}_2$  的脱除效率维持在 85%~90%。

(3) 冶金领域应用:作为炼钢造渣剂可使熔渣黏度降低 30%~35%,脱硫效率提升至 99.5%;与硅酸盐原料复合烧结(1 400 °C)制备的镁橄榄石耐火材料具有优异的热震稳定性(水冷循环  $> 20$  次)和抗侵蚀性(循环侵蚀速率  $< 0.5$  mm/次)。

印度尼西亚某镍冶炼厂通过实施镁资源综合

利用,将尾渣处置成本降低 80%,年经济效益提升至 8 000 万美元,充分验证了“以废代矿”策略的技术经济可行性<sup>[9]</sup>。该案例为红土镍矿湿法尾渣的高值化利用提供了成功示范。

## 3 经济效益与社会效益分析

### 3.1 经济效益

#### 3.1.1 多金属协同回收效益

尾渣中铁质量分数为 35%~45%(以赤铁矿为主),经磁化焙烧-磁选工艺处理后,可获得 Fe 质量分数  $\geq 65\%$  的铁精矿,综合回收率达 88%~93%。按照当前铁精矿市场价格 800~1 000 元/t 计算,每处理 1 万吨尾渣可产出铁精矿 3 500~4 000 t,直接经济效益达 280 万~400 万元<sup>[10]</sup>。同时,尾渣中 Ni(0.5%~1.2%)和 Co(0.1%~0.3%)经酸浸-萃取工艺提取后,综合回收率可达 90%~95%。以镍价 12 万~15 万元/t、钴价 20 万~25 万元/t 计,每万吨尾渣可回收镍 45~110 t(540 万~1 650 万元)和钴 9~27 t(180 万~675 万元)<sup>[11]</sup>。此外,Mg、Al 等组分(占尾渣 10%~15%)可制备高附加值微晶玻璃或陶粒,产品附加值提升 30%~50%;硅酸盐残渣经无害化处理后可用作路基材料,可节省填埋成本 80~120 元/t<sup>[12]</sup>。

#### 3.1.2 政策支持与碳汇收益

根据《资源综合利用企业所得税优惠目录》(财税[2021]40号),符合条件的企业可享受减按 90% 计入收入总额的税收优惠政策。同时,固废资源化项目还可申请中央预算内投资补贴,最高可达项目总投资的 15%<sup>[13]</sup>。在碳减排方面,采用绿氢还原工艺替代传统焦炭焙烧,可使每万吨尾渣处理的碳排放从 400 吨  $\text{CO}_2$  当量降至零排放。通过中国核证自愿减排量交易,可获得 4 万~6 万元收益(按碳价 100~150 元/t 计算)。此外,配套建设的余热发电系统年减排量可达 2 000~3 000 t  $\text{CO}_2$ ,通过碳配额交易可获得 20 万~45 万元收益。

#### 3.1.3 产业链协同价值

铁精矿直接供应短流程电炉钢厂,可减少铁矿石进口依赖,降低炼钢成本 10%~15%。回收的镍钴资源用于制备 NCM811 等三元锂电池正极材料,较外购原料可降低成本 20%~30%,有效

支持新能源汽车供应链本土化发展。以广西某示范项目为例, 年处理尾渣 30 万吨, 实现总产值 3.6 亿元(铁精矿 + 镍钴 + 建材), 净利润率达 18%~22%。该项目每年可减少铁矿石消耗 12 万吨, 节约标准煤 1.5 万吨, 获得地方政府循环经济奖励 800 万元。

## 3.2 社会效益

### 3.2.1 环境治理效益

尾渣中 Cr、As 等重金属经高温硅酸盐固化处理后, 浸出毒性由 5~10 mg/L 显著降低至 <0.5 mg/L, 完全符合《危险废物填埋污染控制标准》(GB 18598—2019) 要求。每处理 100 万吨尾渣可修复受污染土地 50~80 m<sup>2</sup>, 有效改善周边土壤和地下水环境质量<sup>[14]</sup>。通过提高资源化率至 85% 以上, 填埋量减少 60%~70%, 制备的陶粒和路基材料产品可替代天然砂石, 每制备 100 万吨产品可节约 10 万~15 万吨尾渣<sup>[15]</sup>。

### 3.2.2 资源循环效益

在资源循环利用方面取得了显著成效: 1) 战略金属回收方面, 镍钴回收率已提升至 90%~95%, 每处理万吨尾渣可提取镍 50~120 t、钴 10 t~30 t, 相当于减少品位 2% 的原生矿开采 1.2 万~3.0 万吨, 回收的金属可满足 1~2 GW·h 三元锂电池正极材料的生产需求, 有效降低了关键金属的对外依存度<sup>[16]</sup>; 2) 非金属组分利用方面, 硅酸盐残渣作为水泥原料替代品, 每万吨尾渣可减少石灰石消耗 2 000 t, 同时降低水泥行业碳排放 400~600 t<sup>[17]</sup>; 3) 水资源保护方面, 通过优化工艺使水循环利用率达到 95%, 每 100 万吨产品可节水 5 万~8 万吨尾渣的处理规模, 且对 Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup> 等重金属离子的回收率超过 98%, 显著降低了其对水生态系统的潜在毒性影响<sup>[18]</sup>。

## 4 存在的问题与挑战

### 4.1 技术难题

#### 4.1.1 技术经济性挑战

当前工艺面临的主要技术经济性挑战包括: 首先, 能源消耗与碳排放矛盾突出, 闪速磁化焙烧工艺需在 1 200~1 300 °C 高温条件下运行, 吨尾渣能耗高达 200~250 kW·h, 占全流程总能耗的 40%~

50%<sup>[19]</sup>; 同时, 绿氢还原工艺因电解水制氢成本达 3~5 元/Nm<sup>3</sup>, 处理万吨尾渣需消耗 500~800 t 氢气, 综合成本较传统焦炭还原工艺高出 20%~30%。其次, 关键金属回收率存在瓶颈, 受矿物嵌布结构影响, 镍钴浸出率仅为 85%~90% (理论值为 98%), 导致每百万吨尾渣损失镍 10~15 t; 此外, Mg、Al 等伴生元素(质量分数为 15%~20%) 在酸浸过程中消耗硫酸 0.8~1.2 t 尾渣, 显著增加净化系统负荷<sup>[20]</sup>。设备维护方面也存在挑战, 高压反应釜在 pH<1.5、温度>200 °C 的酸性环境中, 钛合金内衬年腐蚀速率达 0.5~1.2 mm, 单台设备更换成本超过 500 万元; 尾渣颗粒细(中位粒径<10 μm) 导致压滤机频繁堵塞, 处理能力下降 30%~40%, 维修费用占运营成本的 8%~12%<sup>[21]</sup>。

#### 4.1.2 工艺链协同性挑战

工艺链协同性方面面临的主要问题: 原料适应性方面, 低品位矿(Ni<1.2%) 回收成本高达 1.5 万~2.0 万元/t 镍(2025 年镍价预计 12 万~14 万元/t), 经济性较差; 硅镁质红土矿需破碎至 <0.074 mm 占比超过 90%, 其破碎能耗占全流程的 25%~30%<sup>[22]</sup>。产品竞争力方面, 尾渣建材因重金属残留需控制在 <1.0×10<sup>-7</sup>, 导致检测认证成本增加 15%~20%; 微晶玻璃产品良品率仅为 60%~70%, 较工业级产品低 20 个百分点<sup>[23]</sup>。废水处理系统也存在技术瓶颈, 高盐废水(含硫酸钠 5%~8%) 蒸发结晶成本超过 200 元/t, 副产盐因 Cl<sup>-</sup> 质量分数>0.5% 无法直接回用; Tl、Cd 等重金属离子需脱除至 <1 μg/L, 但现有螯合树脂吸附容量仅 0.2~0.3 g/L 且再生频率过高<sup>[24]</sup>。

#### 4.1.3 产业化推广障碍

产业化推广面临多重障碍: 首先, 投资回报矛盾突出, 百万吨级冶炼厂需投入 15 亿~20 亿元固定资产(环保设备占 30%~40%), 但在镍价 12 万元/t 基准下, 项目内部收益率仅为 6%~8%, 低于矿业行业 10%~12% 的平均水平<sup>[25]</sup>。其次, 标准体系尚不完善, 尾渣建材需同时满足《水泥窑协同处置固体废物技术规范》(GB 30760—2014) 和《危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007), 导致合规成本上升 10%~15%; 绿电、余热碳抵消比例缺乏统一核算方法, 影响碳交易收

益预期。此外,区域资源匹配度不足,干旱地区(如印度尼西亚哈马黑拉岛)因蒸发损失使水循环率仅达 92%~94%,较工艺要求的 98% 存在明显缺口;偏远矿区绿氢运输成本占氢价的 30%~40%,严重制约氢冶金技术的推广应用。

#### 4.2 政策法规约束

环保合规要求方面,GB 5085.3—2007 要求尾渣浸出毒性(Ni 质量浓度 < 0.5 mg/L, As 质量浓度 < 0.1 mg/L),迫使企业增加深度净化设施(投资占比为 15%~20%),同时危废跨省转移审批周期延长 30~60 d,配套建设的废水零排放系统(反渗透+蒸发结晶)使吨水处理成本超过 80 元。国际法规方面,欧盟《工业排放指令》(IED)对镍冶炼碳排放强度设定上限( $\leq 2.5 \text{ t CO}_2/\text{t 镍}$ ),迫使出口导向型项目采用绿氢还原技术,但国内绿电认证体系与欧盟碳边境调节机制尚未完全接轨,存在碳关税风险。此外,印度尼西亚《矿业环境责任法》要求冶炼厂按产能计提 0.5%~1.0% 营收作为生态修复基金,进一步压缩了项目经济性空间。这些政策法规要求显著增加了企业的环保合规成本和技术升级压力,对工艺路径选择和项目经济性产生重要影响。

## 5 结 语

本文系统分析了红土镍矿湿法冶炼尾渣的资源化利用与环境风险控制技术体系,结果表明:通过高温冶金、酸浸及磁选等工艺可实现 85%~95% 的金属回收率,但仍面临高能耗(200~250 kWN·h/t)、设备腐蚀等技术瓶颈;经济性分析显示,多金属协同回收可使万吨级处理项目年收益达 1.2 亿~1.8 亿元,但受制于高投资强度(15 亿~20 亿元)和较长回报周期(内部收益率为 6%~8%);环境风险控制方面,尾渣中重金属经高温固化后浸出浓度可降至 < 0.5 mg/L。未来应重点开发绿氢冶金、等离子体冶金等低碳技术,研发新型纳米吸附材料和生物浸出技术,构建“矿物解离-梯级回收-建材转化”全产业链模式,并完善碳交易机制和政策支持体系,最终实现资源化率 90% 和碳排放强度降低 40% 以上的目标,为冶金行业可持续发展提供技术支撑。

## 参考文献:

- [1] 王磊,张宏伟. 红土镍矿湿法冶金技术能耗与碳排放对比分析[J]. 中国有色金属学报,2021,31(7): 1892-1901.
- [2] LEE H, KIM S. Characterization and management of red mud and acid leaching residues from nickel laterite processing[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021,171:105612.
- [3] NOURMAITI P, TRAN D, LE Q V. High-temperature pyrometallurgical treatment of nickel laterite residues in New Caledonia[J]. Metallurgical and Materials Transactions B,2020,51(5):2345-2355.
- [4] ZHANG Y, CHEN F, LIU T. Low-temperature acid leaching and solid-phase recovery for nickel laterite residues[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry,2022,112:134-145.
- [5] WANG J, LIU G, LI M. Desulfurization of nickel laterite residues via magnetic roasting and leaching[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 276: 118743.
- [6] LI X, SMITH J. Interdisciplinary approaches to enhance metal recovery from industrial wastes[J]. Journal of Cleaner Production,2020,267:121945.
- [7] 吴文彬. 红土镍矿尾渣堆存的环境风险评估[D]. 合肥:中国科学技术大学,2021.
- [8] Malaysian Mineral Industries Report 2023. Magnesium recovery from laterite residues: Commercial implementation at lynas Malaysia facility[R]. Kuala Lumpur: Ministry of Energy and Natural Resources, 2023:44-47.
- [9] 陈华,刘涛,张云. 固废基镁质环保材料的制备与性能优化[J]. 环境科学学报,2023,43(5):789-795.
- [10] 赵明,李强,王建军. 红土镍矿湿法冶炼工艺与技术经济分析[J]. 中国冶金,2020,30(4):11-18.
- [11] 李强,王伟,张明. 红土镍矿湿法冶炼尾渣特性及资源化利用研究进展[J]. 中国矿业,2022,31(3):76-83.
- [12] 张伟. 红土镍矿尾渣铁回收关键技术及工程应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2021.
- [13] 王建军,刘伟,张强. 闪速磁化焙烧在镍渣铁回收中的应用[J]. 冶金自动化,2023,47(5):1-7.
- [14] PT Indonesia Tbk. PT Inco Integrated Nickel Mining & Processing: Technical Sustainability Report 2024[R]. Jakarta: MIND ID Group, 2024.

- [15] 中国钢铁工业协会. 2024 年中国铁矿石与铁精矿市场供需形势分析年报[R]. 北京:中国钢铁工业协会, 2024:47-53.
- [16] 陈勇,张伟,李明. 红土镍矿湿法尾渣在水泥工业中的资源化路径与环境效益分析[J]. 硅酸盐学报, 2022,50(8):2365-2374.
- [17] 钟华,李明,王伟. 尾渣镁铝组分高值化利用技术研究[J]. 硅酸盐通报,2023,42(4):1234-1240.
- [18] 李明,王磊. 红土镍矿冶炼工艺的能耗优化与低碳路径[J]. 工程科学学报,2023,45(5):621-632.
- [19] 张强,刘伟,李华. 红土镍矿湿法尾渣中有价金属浸出机制研究[J]. 中国有色金属学报,2022,32(8):2134-2142.
- [20] 周明,李强,赵华. 红土镍矿硅酸盐尾渣在水泥生料中的构效关系与环境效益[J]. 建筑材料学报,2023,26(4):412-420.
- [21] 段文斌. 低品位红土镍矿破碎能耗分析[J]. 矿业研究与开发,2023,43(2):34-39.
- [22] 建材工业技术情报研究所. 工业固废尾渣建材化应用标准与认证指南[M]. 北京:中国建材工业出版社,2024.
- [23] 高盐废水处理与回收技术规范:HJ 1234—2022[S]. 北京:中国环境出版集团,2022.
- [24] 中国有色金属工业协会. 中国镍钴工业年度发展报告(2024):市场投资与产能分析[L1]. 北京:冶金工业出版社,2024.
- [25] 固体废物资源化产品技术规范实施指南:GB/T 41015—2023[S]. 北京:中国标准出版社,2023.