

红土镍矿开发利用研究现状与前景展望^①

余建文^{1,2,3}, 郭壹泽^{1,2}, 王家奇^{1,2}, 韩跃新^{1,2,3}, 李艳军^{1,2,3}, 高鹏^{1,2,3}

(1.东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳110819; 2.难采选铁矿资源高效开发利用技术国家地方联合工程研究中心, 辽宁沈阳110819; 3.东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁沈阳110819)

摘要: 概述了镍资源概况, 梳理了红土镍矿的资源特征, 总结了传统湿法工艺(高压酸浸、常压酸浸、还原焙烧-氨浸、硫酸化焙烧-水浸等)和火法工艺(回转窑预还原-电炉熔炼、高炉熔炼镍铁、回转窑直接还原-磁选等)的技术特征与应用情况, 特别介绍了悬浮焙烧预还原-电炉熔炼新工艺, 并对红土镍矿的高效开发与清洁提取技术进行了展望。

关键词: 红土镍矿; 湿法提取; 火法冶炼; 酸浸; 还原焙烧; 悬浮焙烧; 电炉熔炼; 研究进展

中图分类号: TD95

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.03.024

文章编号: 0253-6099(2025)03-0142-09

Development Status and Prospects of Lateritic Nickel Ore

YU Jianwen^{1,2,3}, GUO Yize^{1,2}, WANG Jiaqi^{1,2}, HAN Yuexin^{1,2,3}, LI Yanjun^{1,2,3}, GAO Peng^{1,2,3}

(1.School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 2.National-Local Joint Engineering Research Center of High-Efficient Exploitation Technology for Refractory Iron Ore Resources, Shenyang 110819, Liaoning, China; 3.State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: Based on an introduction of nickel resource and characteristics of lateritic nickel ore, the technical features and application of traditional hydrometallurgical processes (such as high-pressure acid leaching (HPAL), reduction roasting-ammonia leaching) and pyrometallurgical processes (such as rotary kiln electric furnace (RKEF), blast furnace smelting process for ferronickel production, and rotary kiln direct reduction-magnetic separation) are summarized. A new process of suspension roasting pre-reduction electric furnace (SRPEF) is specially introduced. Finally, the prospects for efficient exploitation and clean extraction technologies for lateritic nickel ore are discussed.

Key words: lateritic nickel ore; hydrometallurgical extraction; pyrometallurgy; suspension roasting; electric furnace smelting; research progress

镍是一种重要的战略性矿产资源,主要用于生产不锈钢、合金、三元动力电池等^[1]。我国是镍消费大国,但镍资源量却严重不足。陆基镍资源主要分为硫化镍矿和红土镍矿。相较于红土镍矿,硫化镍矿中的有用矿物更易于提取,开发利用较早,但可开采利用的硫化镍矿资源量不断减少^[2]。随着不锈钢和新能源产业的快速发展,镍需求量显著增加,开发红土镍矿成为必然选择^[3]。本文探讨了红土镍矿的资源特点,分析了未来镍金属市场的供应和需求态势,总结了红土

镍矿处理工艺的发展现状。同时,对红土镍矿提取新技术悬浮焙烧预还原-电炉熔炼(suspension roasting pre-reduction electrical furnace, SRPEF)工艺的未来发展进行了展望,旨在为红土镍矿的高效低碳利用提供参考。

1 镍矿资源概况

镍在地球上是一种较为丰富的元素,在地球中的含量仅次于硅、氧、铁和镁,陆地镍资源主要包括硫化

① 收稿日期: 2025-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(52104246, 52130406); 中央高校基本科研业务费项目(N23011026); 辽宁省自然科学基金(2023-MS-086); 矿产资源绿色开发与生态修复协同创新中心开放基金(HLCX-2024-01)

作者简介: 余建文(1988—),男,江西上饶人,博士,副教授,主要研究方向为矿产资源选冶联合高效利用。E-mail: yujianwen@mail.neu.edu.cn
通信作者: 郭壹泽(2001—),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要研究方向为红土镍矿高效低碳利用。E-mail: 572328524@qq.com

镍矿和红土镍矿。

全球陆地镍资源分布情况和储量^[4]如表1所示。数据表明,红土镍矿储量丰富,其中镍金属量约1.61亿t,占镍金属总量的72.6%,已成为提取镍的主要原料。

表1 全球陆地镍资源分布情况与储量

Table1 Distribution and reserves of global terrestrial nickel resources

矿石类型	资源/Mt	镍品位/%	含镍量/Mt	占比/%
硫化镍矿	10 500	0.58	60.90	27.40
红土镍矿	12 600	1.28	161.30	72.60
合计	23 100	0.97	222.20	100.00

红土镍矿是一种多矿物聚合物,由含镍橄榄石基岩经过长期风化、淋滤和蚀变而成,同时还伴生有铁、钴、镁、铝和铬等有价值金属^[5],主要集中在赤道地区的热带、亚热带国家和地区^[6]。

根据国际镍研究组织(INSG)统计^[7],2024年我国的原生镍消费总量约213.47万t,占全球原生镍消费总量(约334.6万t)的63.8%。其中,不锈钢行业是主要的消费领域,占比74.5%;电池行业镍消费量显著增长,占比17.8%。从消费结构分析,不锈钢行业与电池行业共同构成了镍的主要消费市场。尤其是近年来高镍三元电池的使用增加,对镍需求有明显拉动作用。INSG公布的2019—2024年全球原生镍产量与消费量数据^[8]如图1所示。全球原生镍产量从2019年的238.2万t增长至2024年的351.6万t,预计2025年将达到364.9万t,这表明镍的全球供应在逐步增加。镍金属市场在未来几年将继续呈现供应增长和需求增加的趋势,但总体供需平衡,市场预计将保持适度的盈余状态。

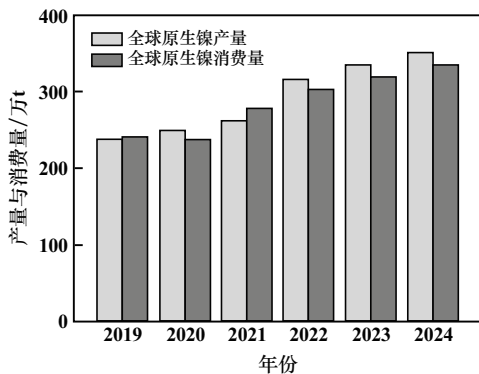


图1 2019—2024年全球原生镍产量与消费量

Fig.1 Global primary nickel production and consumption from 2019 to 2024

2 红土镍矿资源特征与分类

根据红土镍矿中镁含量的高低可将矿石分为三大类,依次为褐铁型红土镍矿(MgO品位不高于5%)、过渡型红土镍矿(MgO品位5%~15%)及硅镁型红土镍矿(MgO品位大于15%)。红土镍矿床层分布剖面^[9]如图2所示。

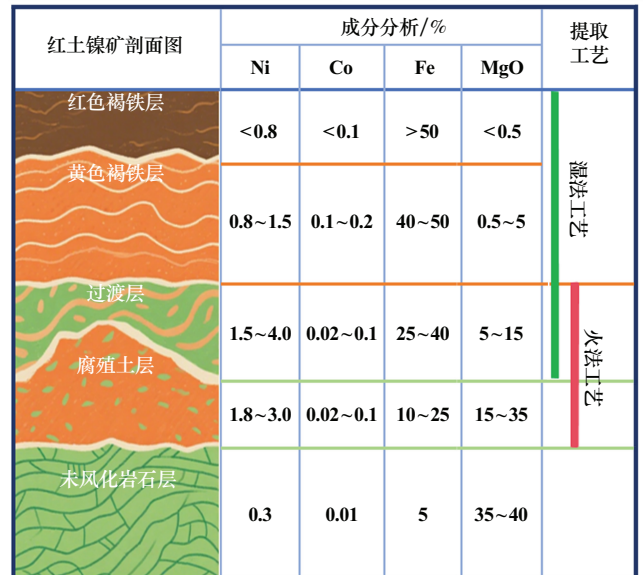


图2 红土镍矿床层分布剖面图

Fig.2 Distribution profile of lateritic nickel ore deposits

褐铁型红土镍矿位于矿床上部,其特点是铁、钴含量高,镍、镁含量低,镍主要以晶格取代或化学吸附形式存在于针铁矿中,宜采用湿法工艺处理;过渡型红土镍矿位于矿床中部,介于褐铁型与硅镁型的过渡层,铁、钴含量较高,镍、镁含量适中,镍主要存在于绿脱石和硬锰矿中,宜采用湿法工艺或火法冶炼工艺处理;硅镁型红土镍矿位于矿床最下部,其镁和镍含量相较于其他两种类型更高,铁含量相对更低,镍主要以吸附态或类质同象形态存在于镁或铁硅酸盐中,宜采用火法冶炼工艺处理。

当前,红土镍矿湿法工艺主要为高压酸浸、常压酸浸、还原焙烧-氨浸、硫酸化焙烧-水浸等工艺;火法工艺中,回转窑预还原-电炉熔炼技术较成熟,紧随其后的是高炉熔炼镍铁法、回转窑还原-磁选工艺。此外,悬浮焙烧预还原-电炉熔炼新工艺的成功研发进一步丰富了火法处理技术的范畴。

红土镍矿中存在吸附水、结晶水和结构水,含水量较高,在进行火法冶炼前,必须先对红土镍矿进行干燥处理^[10]。不同类型红土镍矿加热干燥脱羟基过程见表2。

表2 红土镍矿加热干燥脱羟基过程

Table 2 Dehydroxylation of lateritic nickel ore by heating and drying

类型	主要物相	加热干燥脱羟基过程	过程产物
褐铁型	针铁矿	$\alpha\text{-FeOOH} \longrightarrow \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [11]	Fe_2O_3 、 MgSiO_3 和 Mg_2SiO_4
硅镁型	蛇纹石	$(\text{Mg, Fe, Ni})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \longrightarrow (\text{Mg, Fe, Ni})\text{SiO}_3 + (\text{Mg, Fe, Ni})_2\text{SiO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ [12] $2(\text{Mg, Fe, Ni})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \longrightarrow 3(\text{Mg, Fe, Ni})_2\text{SiO}_4 + \text{SiO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$ [13]	橄榄石相和辉石相 橄榄石相和游离二氧化硅

3 红土镍矿湿法提取工艺

3.1 高压酸浸法

高压酸浸 (high-pressure acid leaching, HPAL) 法 [14] 自 20 世纪 50 年代问世以来, 已经成为处理褐铁型红土镍矿的主流工艺。在 250~270 °C、4~5 MPa 的高温高压条件下进行酸浸反应, 矿石中的镍和钴与硫酸反应形成可溶解的金属硫酸盐进入溶液, 随后通过逆流浓密洗涤, 溢流进行预中和等工序, 使杂质元素 (铁、铝) 水解并沉降于渣中, 浸出液通过进一步中和沉淀, 得到镍和钴含量较高的中间产品。HPAL 工艺流程 [15] 如图 3 所示, 该工艺可实现镍、钴的选择性浸出, 且浸出率高于 90%。

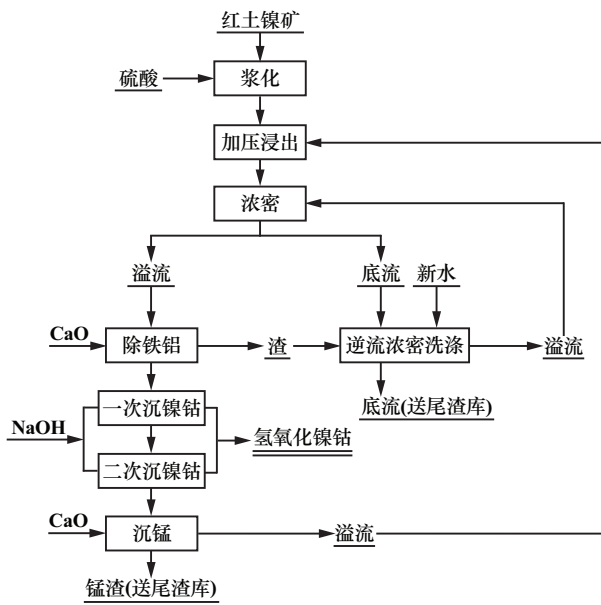
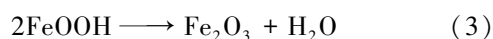


图3 HPAL 工艺流程

Fig. 3 HPAL process flow

高压酸浸过程中发生的主要化学反应 [16] 有:



文献 [17] 对印尼 La-paopao 地区红土镍矿 (Ni 品位 1.42%、Fe 品位 40.15%) 进行了硫酸加压浸出研究, 在硫酸用量 330 kg/t、浸出温度 255 °C、浸出时间

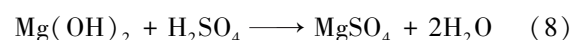
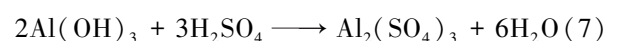
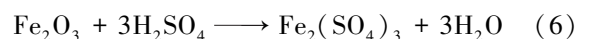
45 min、矿浆液固比 2:1 条件下, 镍浸出率超过 96%, 钴浸出率超过 97%, 铁浸出率仅 1%。然而, 该工艺对反应条件和设备的要求高, 投资成本大, 水合硫酸铝等物质容易导致设备结垢, 需要定期维护高压釜, 从而影响作业率。此外, 浸出渣中含有较高的铁和硫, 目前只能通过深海填埋或建库堆存处理, 造成环境污染和铁资源的浪费。

HPAL 工艺常用的酸为硫酸, 但也有研究者尝试使用其他酸进行替代。例如, 文献 [18] 提出硝酸加压浸出 (NAPL) 新工艺, 采用硝酸代替传统硫酸作为浸出介质, 通过加压浸出的方式, 在初始硝酸酸度 330 kg/t、液固比 1.5~1.7 mL/g、浸出温度 190 °C、浸出时间 60 min 条件下, 成功从 Ni 品位 0.88%、Co 品位 0.07% 的褐铁型红土镍矿中提取了镍、钴和镁, 其中镍、钴和镁的浸出率分别大于 85%、80%、60%, 铁浸出率不足 1%, 并联合产硫酸钙晶须, 实现了镍、钴、钙的综合回收及硝酸的耦合再生。

3.2 常压酸浸工艺

由于高压酸浸对设备要求高, 研究人员开发了常压酸浸 (atmospheric pressure acid leaching, AL) 工艺。该工艺无需高压反应釜, 投资成本低, 操作条件易于控制。常压酸浸的主要流程是将红土镍矿破碎、筛分并磨矿制浆, 随后将矿浆与浸出剂 (硫酸、盐酸、硝酸等) 按一定比例混合后进行常压浸出, 其优点是工艺简单、能耗低, 对环境的污染相对较小, 主要缺陷是镍和钴浸出率低, 浸出液中杂质含量高且浸出速度较慢。常见 AL 工艺流程见图 4。

常压酸浸过程中发生的主要化学反应有:



文献 [19] 以硫酸为浸出剂, 在常压下浸出处理 Ni 品位 1.71%、 Fe_2O_3 品位 84.07% 的红土镍矿, 在硫酸浓度 24%、浸出温度 90 °C、液固比 5 mL/g、搅拌速

度 400 r/min、浸出时间 2 h 条件下,镍、铁浸出率分别为 72.7%、87.9%。文献[20]利用硫酸在常压下浸出低品位红土镍矿(Ni 品位 0.83%、Fe₂O₃ 品位 14.77%),在硫酸浓度 210 g/L、浸出温度 90 ℃、液固比 5:1、搅拌速度 300 r/min、浸出时间 6 h 条件下,获得了镍、铁浸出率分别为 93.6%、75.4%的技术指标。总体而言,红土镍矿常压酸浸工艺的大规模推广应用还面临一些挑战,如提高镍和钴浸出率、减少杂质含量、提高浸出速度等。

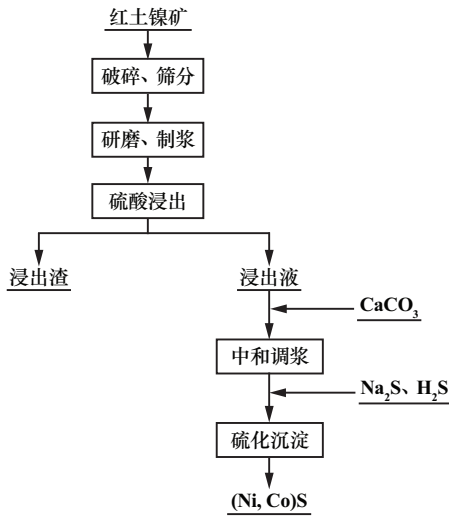
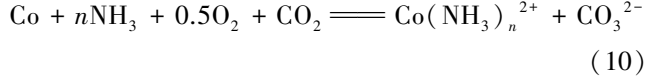
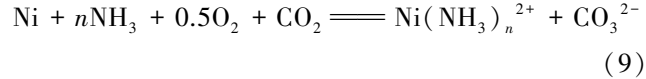


图4 AL 工艺流程
Fig.4 AL process flow

3.3 还原焙烧-氨浸工艺

还原焙烧-氨浸工艺是由 Caron 教授提出的,故又称为 Caron 法^[21]。还原焙烧-氨浸工艺的主要流程包括:对红土镍矿破碎、筛分后进行还原焙烧,在还原焙烧阶段,将镍和钴还原为金属态,并使大部分铁还原为 Fe₃O₄。随后进行多级逆流氨浸,浸出液通过硫化沉淀处理,钴进入沉淀,再进行蒸氨处理获得碱式碳酸镍,并最终通过煅烧生成氧化镍产品;浸出渣则通过磁选获得铁精矿,实现镍、钴、铁的综合回收利用,具体工艺流程^[15]如图 5 所示。

氨浸过程中主要金属元素发生的反应有:



文献[22]针对菲律宾某褐铁矿型红土镍矿(Ni 品位 1.07%、Fe 品位 47.82%)进行镍、钴的提取,加入烟煤作还原剂,在 800 ℃下焙烧 1 h,再用碱性氨碳溶液浸出焙烧矿,镍、钴浸出率分别达到 88.27%、50.91%。

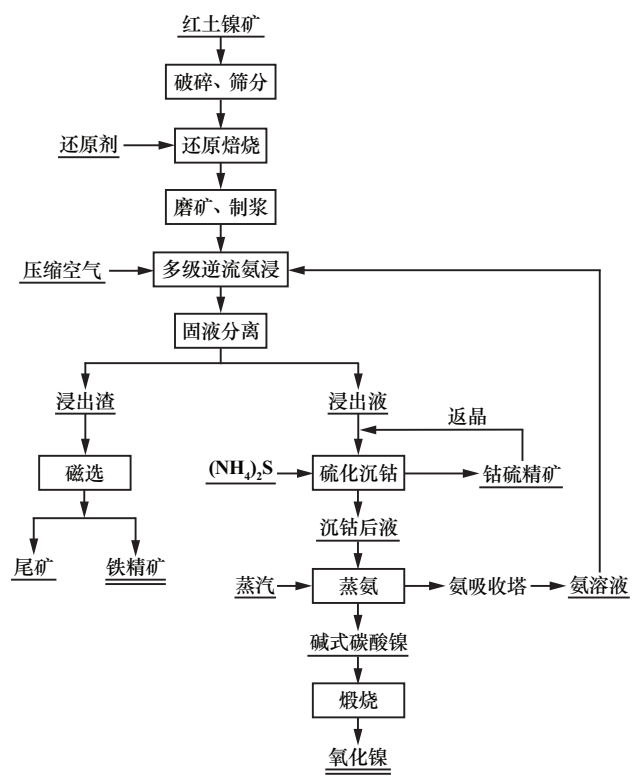


图5 Caron 工艺流程
Fig.5 Caron process flow

还原焙烧-氨浸是最早应用于处理褐铁矿型红土镍矿的湿法工艺,优点是工艺成熟,试剂氨可循环回收利用、消耗量小。然而,传统还原焙烧多采用回转窑作为反应装备,煤粉作为还原剂,焙烧温度高(700~850 ℃)、还原气氛控制困难,矿石中铁氧化物易发生过还原形成浮氏体或金属铁,氨浸过程形成有强吸附能力的 Fe(OH)₃ 胶体,造成镍、钴浸出率低,严重制约了该工艺的发展和应。近年来,随着低温(500~600 ℃)悬浮磁化焙烧技术的出现与不断发展^[23-25],未来有望将悬浮磁化焙烧技术与氨浸工艺进行有机结合与嫁接,实现褐铁矿型红土镍矿还原过程的精准调控,可显著降低焙烧能耗并同步提高镍钴浸出率。

3.4 硫酸化焙烧-水浸工艺

硫酸化焙烧-水浸工艺^[26]是将红土镍矿置于 SO₂ 和 O₂ 气氛下,或将红土镍矿与浓硫酸或硫酸铵按特定比例混合熟化焙烧,其目的是使红土镍矿中的镍、钴等目标元素在高温下转化为可溶性硫酸盐进入水相溶液中,铁、硅等元素则富集在浸出渣中,实现镍、钴等有价金属的选择性提取分离,具体工艺流程如图 6 所示。

硫酸化焙烧过程中镍元素发生的反应有:



或:



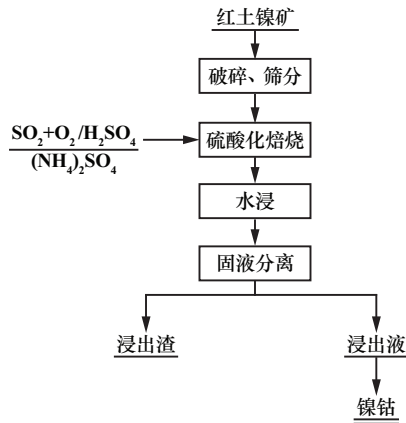


图6 硫酸化焙烧-水浸工艺流程

Fig.6 Sulfation-roasting-leaching process flow

在反应式(11)中,反应过程包括 SO_2 被氧化为 SO_3 , 然后 SO_3 与 NiO 反应生成 NiSO_4 。

文献[27]针对云南低品位红土镍矿(Ni品位1.15%、Fe品位14.06%)进行硫酸铵焙烧提取研究,在焙烧温度400℃、焙烧时间90min、矿料与硫酸铵质量比4:3条件下,获得了镍、钴、锰浸出率分别为90.80%、85.41%、86.74%的技术指标,而铁浸出率仅9.98%,达到了镍、钴、锰等有价金属选择性提取的效果。文献[28]提出了一种低温 NH_4HSO_4 焙烧-水浸工艺,用于从金川镍精矿(Ni品位9.6%、Co品位0.2%)中同时提取镍和钴,在镍精矿粒度80~96 μm 、 NH_4HSO_4 与精矿质量比8:1、焙烧时间180min、焙烧温度400℃条件下,镍和钴浸出率分别达到了95.7%和96.8%,实现了镍、钴的高效浸出。然而,硫酸化焙烧过程对设备腐蚀性强,环境污染严重,目前暂无工业应用案例。

4 红土镍矿火法提取工艺

4.1 回转窑还原-电炉熔炼

20世纪50年代,回转窑还原-电炉熔炼(rotary klin electric furnace, RKEF)工艺在新喀里多尼亚安博厂诞生,是当前国内外大规模镍铁冶炼的首选工艺^[29]。主要流程包括通过干燥窑去除红土镍矿中的游离水,随后混入碳质还原剂送入回转窑中进行高温预还原焙烧,得到的焙砂送至矿热炉(炉内温度通常保持在1500~1600℃)进行电弧还原熔炼获得镍铁合金。RKEF工艺流程^[30]如图7所示。

红土镍矿中的氧化物在高温下与还原剂(碳或一氧化碳)反应,生成金属镍和钴,典型的化学反应方程式为:

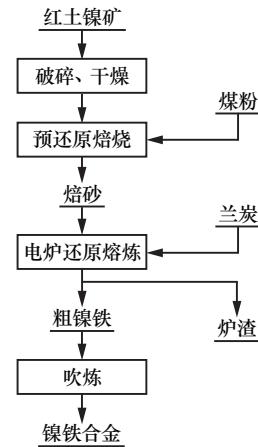
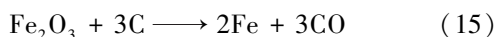
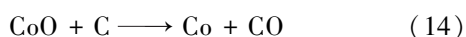
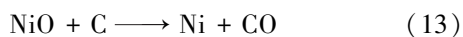


图7 RKEF工艺流程

Fig.7 RKEF Process Flow

文献[31]研究了回转窑预还原中煤配比以及电炉熔炼时配碳量和温度对镍、铁回收的影响,以高镍低铁(Ni品位2.65%、Fe品位18.49%)红土镍矿为实验原料,70%无烟煤+30%烟煤为还原剂,在1550℃下电炉熔炼,可获得镍品位23.13%、镍和铁回收率分别为95.21%和91.97%的镍铁。文献[32]采用高硅镁红土镍矿(Ni/Fe质量比0.14)研究了焦煤及石灰石熔剂对熔炼过程的影响,在焦煤和熔剂各配比11%的条件下,经1550℃电炉熔炼可获得镍品位22.82%、镍回收率97.6%的镍铁,实现镍的高效回收。

RKEF工艺所用技术设备成熟可靠,适合处理硅镁型红土镍矿,易于大型化工业生产^[33]。但该工艺生产流程长、冶炼能耗大,需两步高温,生产1t镍铁电耗高达4000~4200kWh;同时存在渣量大(生产1t镍铁排渣量高达4~5t)且利用率小于10%,环境污染隐患大,尤其是矿石中的钴无法得到利用。近年来,中南大学姜涛院士团队针对RKEF法工艺存在的弱点,创新性开发了以控制FeO为中心、调节四元碱度为主要手段的渣系优化调控^[34],并利用炉渣制备镁橄榄石型复相耐火材料等新技术,有效解决了现有电炉工艺能耗高、渣利用率低的问题,未来推广应用前景广阔。

4.2 高炉熔炼镍铁法

高炉熔炼镍铁法是我国在借鉴传统高炉炼铁成熟工艺基础上自主研发的一种处理褐铁矿型红土镍矿的方法,一般直接采用被炼铁厂闲置淘汰的烧结机和高炉进行镍铁生产,具有较高的生产效率。该工艺流程与传统高炉炼铁流程基本一致,即红土镍矿经过干燥和破碎后,通过烧结机进行抽风烧结,成品烧结成矿后,进入高炉进行冶炼,产出含镍生铁。其工艺流程^[4]如图8所示。此外,由于褐铁矿型红土镍矿游离水

和结晶水含量高,烧结前通常需要加入生石灰,利用生石灰的吸湿性和放热达到脱水的目的,否则将影响烧结矿质量^[35]。

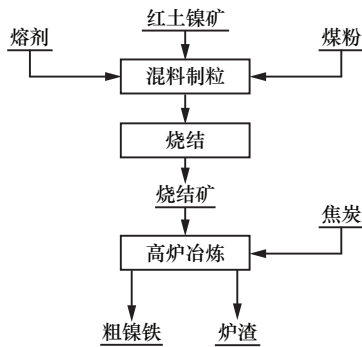


图8 高炉熔炼镍铁工艺流程

Fig.8 Blast furnace smelting process for ferronickel production

文献[36]以褐铁矿型红土镍矿(Ni品位0.86%、Fe品位45.09%)为原料,在熔炼温度1600℃、焦炭用量20%、炉渣二元碱度1.0时,制备了高纯度镍铬不锈钢母液,铁、铬和镍回收率分别达到95%、90%和98%以上。文献[37]对红土镍矿的烧结工艺进行了优化研究,在碱度1.6、无烟煤配比7.2%、水分18.5%、无烟煤粒级1~5mm、偏析布料的优化参数下,获得了优质的烧结矿,为后续高炉熔炼操作创造了便利条件。

高炉熔炼镍铁法因其工艺成熟、流程短、市场准入门槛低以及对已废弃小型高炉的再利用潜力,展现了一定的经济性和实用性,尤其在初期投资方面相对较低^[36]。然而,这一工艺也存在一些显著的缺点,例如焦炭消耗量大、能耗高、镍铁产品质量差以及环境污染严重。目前,随着国家环保政策的落实以及新技术的不断涌现和应用,传统的小高炉冶炼镍铁厂绝大多数已停产,高炉熔炼镍铁工艺正逐渐被更高效、环保的新工艺所取代。

4.3 回转窑还原-磁选工艺

4.3.1 回转窑直接还原-磁选工艺

回转窑直接还原-磁选工艺又称大江山法,该工艺是将红土镍矿干燥破碎处理后与一定比例的煤粉、石灰均匀混合并造球或压块,随后在回转窑中进行高温还原焙烧,生成海绵状镍铁合金,通过水淬处理后进行磨矿、磁选,从而得到镍铁粉和尾渣,其工艺流程如图9所示。

文献[38]以TFe品位21.70%、Ni品位1.92%的红土镍矿为原料,将经冷压造块后的红土镍矿原料送入回转窑,焙砂经水淬、破碎、磨矿后进行磁选,在还原温度1150℃、磨矿时间3min、磁场强度150mT条件下获得了Ni品位7.26%、Fe品位85.15%的镍铁合金,

其中镍和铁回收率分别达到了96.06%和89.23%。

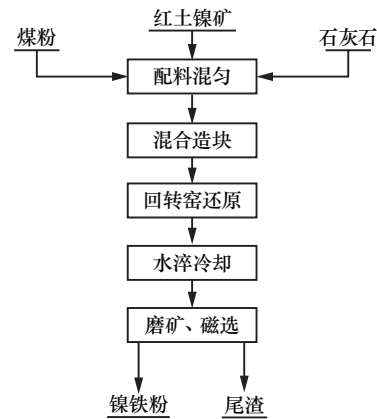


图9 回转窑直接还原-磁选工艺流程

Fig.9 Rotary kiln direct reduction-magnetic separation process flow

与电炉熔炼相比,回转窑工艺具有相对较低的生产成本。然而,在工业应用中,为了保证镍铁颗粒的聚集与长大(便于磁选回收),回转窑半熔融还原焙烧温度处于1150~1250℃的较高范围内,窑内结圈严重,降低了设备作业率并增加了耐火材料的消耗。

针对上述问题,许多学者探索了在回转窑焙烧过程中使用添加剂来促进镍铁颗粒的聚集长大与磁选回收,从而尽可能地降低焙烧温度和窑内结圈的现象。文献[39]以NaFeS₂为添加剂,研究了添加剂用量对褐铁矿型红土镍矿(Ni品位1.13%、Co品位0.14%、Fe品位42.53%)固态还原-磁选富集镍、钴效果及还原行为机理,发现添加NaFeS₂可降低红土镍矿的软熔特性温度,促进Ni-Co-Fe合金颗粒的聚集长大;在NaFeS₂添加量10%、还原温度1100℃及时间60min条件下,经磨矿-磁选可获得Ni、Co、Fe品位分别为7.89%、0.66%、74.01%,Ni、Co、Fe回收率分别为97.13%、86.78%、35.81%的镍钴铁粉,进一步通过常压硫酸浸出、净化除杂可生产电池级硫酸镍和硫酸钴产品。

4.3.2 选择性固态还原-磁选工艺

针对我国红土镍矿90%以上采用RKEF工艺生产镍铁存在生产流程长、冶炼能耗大的问题,中南大学姜涛院士团队发明了红土镍矿选择性固态还原-磁选直接制备镍铁新工艺^[40],该工艺通过建立还原/硫化耦合的镍/铁选择性还原技术,解决了镍、铁还原选择性差的问题,实现了镍铁的低温短流程生产。在Fe₂O₃被还原成FeO时加入硫化剂,从而将部分铁转化为FeS,控制铁的金属化还原,实现镍/铁选择性还原。红土镍矿还原/硫化耦合作用原理如图10所示。镍、铁金属化比值随着铁硫化率增加而增大。利用还原过程中生成的FeS,在Fe-FeS相区的固相线之上形成微区

液相,促进镍、铁的扩散和颗粒的聚集与长大。通过含硫添加剂与温度协同调控,在温度 1 000~1 050 ℃、硫酸钠用量 10%~15% 条件下,镍金属化率超过 92%,镍/铁金属化比值提高到 1.6~2.5,镍铁颗粒平均尺寸较无硫化剂时增大了 7 倍,成功解决了镍、铁还原选择性差和镍铁分选难的问题。

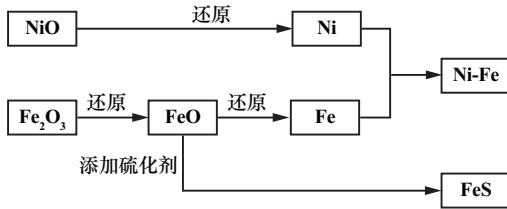


图 10 红土镍矿还原/硫化耦合作用原理

Fig. 10 Schematic diagram of coupling principle of reduction/sulfation of lateritic nickel ore

此外,通过选择性固态还原-磁选工艺处理红土镍矿,获得的镍钴铁精粉可以进一步采用磷酸常压浸出法制备磷酸铁和三元电池材料。该工艺的优点为:通过固态还原-磁选脱除镁、铝、硅等脉石组分,显著减少酸浸物料量,降低酸耗量;合金粉化学成分纯度高、杂质含量低,简化后续除杂和净化步骤;合金粉末粒度细、溶出性能好,在常压下即可快速浸出。该工艺展现出了良好的应用前景,但由于还原过程需要添加含硫添加剂,应特别注意 S、Na 等元素的迁移转化行为,防止发生环境污染和碱金属腐蚀炉衬等。

4.4 悬浮焙烧预还原-电炉熔炼新工艺

针对传统 RKEF 冶炼工艺的不足,东北大学韩跃新教授团队创新性地提出了悬浮焙烧预还原-电炉熔炼(SRPEF)新技术,它是一种针对红土镍矿处理的新型冶炼技术。该技术主要流程如下:首先,将矿石粉碎至-1 mm 后送入悬浮焙烧炉,矿粉经过旋风预热器 P01 预热后,进入悬浮焙烧主炉 H01;在负压环境下,物料在 800~900 ℃ 的向上热风作用下被提升,从而快速脱除原料中的自由水和结晶水;加热后的矿粉在旋风分离器 H02 中实现固气分离,并在重力作用下与新加入的煤粉一起进入反应器 R01;反应器 R01 内温度保持在 850~1 050 ℃,采用空气作为流化气体,在这一过程中,红土镍矿中的镍氧化物被还原为金属态,部分铁氧化物还原成金属铁。悬浮焙烧过程中,矿石颗粒与热气流充分接触,实现了快速均匀地加热和脱水,减少了热能的浪费。焙烧后的预还原产品经热压造块后送入矿热电炉进行熔炼,生产出镍铁合金。同时,R01 或矿热电炉中产生的热气被回收并用于燃烧;旋风分离器 H02 分离出的热气用于预热新加入的物料。热

气的循环利用不仅提高了热能利用效率,其超低排放设计有效减少了温室气体和有害气体的排放,符合严格的环保标准,降低了对环境的影响。SRPEF 工艺采用的悬浮焙烧炉在生产过程中不会产生结圈现象,故 SRPEF 预还原过程温度可达 850 ℃ 以上,相比 RKEF 工艺可节省熔炼过程电耗 20% 以上,具体工艺流程如图 11 所示。

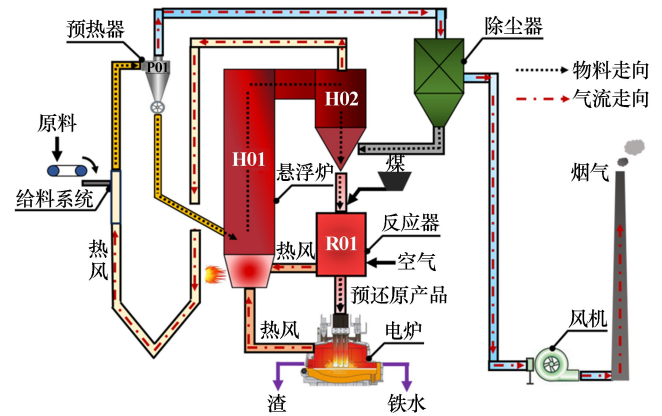


图 11 SRPEF 工艺流程

Fig. 11 SRPEF process flow

该团队先后针对国内外多地红土镍矿进行了 SRPEF 半工业试验^[41-42],1[#]样品(Ni 品位 1.02%、Fe 品位 7.66%)和 2[#]样品(Ni 品位 1.19%、Fe 品位 7.88%)经悬浮焙烧预还原-电炉熔炼后,可分别获得 Ni 品位 14.28%、TFe 品位 79.89% 和 Ni 品位 13.84%、TFe 品位 76.77% 的粗镍铁合金,其中 Ni 回收率均在 91% 以上。

SRPEF 工艺尽管在提高热能利用效率和减少排放方面具有显著优势,但仍存在一些不足与亟待解决的问题。

1) 对物料粒度的严格要求:SRPEF 工艺中的悬浮焙烧系统要求物料粒度为-1 mm。若采用湿式磨矿制备入炉物料,不仅会导致过磨,浪费能耗,还需设置额外的过滤车间,增加设备和维护成本。

2) 缺乏工业化应用经验:相较于传统红土镍矿冶炼工艺,SRPEF 技术在工业化应用方面积累的经验少。相关的大型化智能装备尚需开发,以扩大其应用范围,实现更优的生产效果。

5 结语与展望

随着不锈钢和新能源产业的快速发展,镍需求量显著增加,开发利用红土镍矿成为必然的选择。通过优化提取工艺,解决红土镍矿处理中的环境和能耗问题,满足快速增长的镍需求,特别是在新能源汽车领域,将有助于推动镍消费模式的转变和新能源产业的可持续发展。未来的研究应集中在高效提取技术的完

善和新工艺的开发,以实现红土镍矿的高效开发和清洁提取。基于上述分析,明确未来红土镍矿冶炼技术的重点发展方向,提出如下展望:

1) 高压酸浸法是目前处理褐铁型红土镍矿的主流工艺,可实现镍、钴的选择性提取与高效回收,但尾渣排放量大且伴生的铁资源未得到回收利用,造成严重环境污染与铁资源浪费,含铁尾渣的无害化处置与资源化利用将是今后的研究重点;

2) 还原焙烧-氨浸是最早应用于处理褐铁型红土镍矿的成熟湿法工艺,可综合回收镍、钴和铁。但传统还原焙烧多采用回转窑作为反应装备,存在焙烧温度高(700~850℃)、还原气氛控制困难和镍钴浸出率低的问题,严重制约了该工艺的发展和运用。随着低温(500~600℃)悬浮磁化焙烧技术的出现与发展,未来有望将悬浮磁化焙烧技术与氨浸工艺进行有机嫁接,实现褐铁型红土镍矿还原过程的精准调控,将显著降低焙烧能耗并同步提高镍钴浸出率;

3) 与传统红土镍矿回转窑预还原-电炉熔炼工艺相比,选择性固态还原-磁选制备镍铁和悬浮焙烧预还原-电炉熔炼新技术在经济效益和环境友好性等方面具有明显优势,为冶金行业的可持续发展和高效利用红土镍矿资源提供了重要技术保障,未来应进一步加强关键核心技术研发、工业化应用推广验证等研究,推动镍资源高效提取和新能源产业的可持续发展。

参考文献(References):

[1] 董波,田庆华,许志鹏,等. 新能源战略金属镍钴锂资源清洁提取研究进展[J]. 材料导报, 2023,37(22):127-141.
DONG Bo, TIAN Qinghua, XU Zhipeng, et al. Advances in clean extraction of nickel, cobalt and lithium to produce strategic metals for new energy industry[J]. Materials Reports, 2023,37(22):127-141.

[2] MUDD G M. Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites[J]. Ore Geology Reviews, 2010,38(1/2):9-26.

[3] CIFTCI H, ATIK S, GURBUZ F. Biocatalytic and chemical leaching of a low-grade nickel laterite ore[J]. Metallurgical Research & Technology, 2018,115(3):305.

[4] 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.
ZHU Deqing, TIAN Hongyu, PAN Jian, et al. Comprehensive utilization status and progress of low-grade laterite nickel ore[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020,32(5):351-362.

[5] AL-KHIRBASH S A. Mineralogical characterization of low-grade nickel laterites from the North Oman Mountains: Using mineral liberation analyses-scanning electron microscopy-based automated quantitative mineralogy[J]. Ore Geology Reviews, 2020,120:103429.

[6] 徐庆新. 红土矿的过去与未来[J]. 中国有色冶金, 2005(6):1-8.
XU Qingxin. The past and the future of nickel laterites[J]. China

Nonferrous Metallurgy, 2005(6):1-8.

[7] RICARDO FERREIRA. The world nickel market in 2024: Slowly diminishing surplus [EB/OL]. Stainless Steel World. (2024-12-02) [2025-02-25]. <https://stainless-steel-world.net/the-world-nickel-market-in-2024-slowly-diminishing-surplus/>.

[8] RICARDO FERREIRA. The world nickel market in 2024 and 2025: Back-to-back surpluses [EB/OL]. Stainless Steel World. (2025-02-24) [2025-02-25]. <https://stainless-steel-world.net/the-world-nickel-market-in-2024-and-2025-back-to-back-surpluses/>.

[9] 刘召波,王玮玮,付云枫,等. 红土镍矿提钪工业化研究进展[J]. 绿色矿冶, 2024,40(1):27-33.
LIU Zhaobo, WANG Weiwei, FU Yunfeng, et al. Research progress on industrialization of extracting scandium from laterite nickel ore[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024,40(1):27-33.

[10] 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.
TIAN Qinghua, LI Zhongchen, WANG Qimeng, et al. Present situation of laterite nickel ore resources and research progress of smelting technology [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023,33(9):2975-2997.

[11] PINTOWANTORO S, ABDUL F. Selective reduction of laterite nickel ore[J]. Materials Transactions, 2019,60(11):2245-2254.

[12] ELLIOTT R, PICKLES C A, FORSTER J. Thermodynamics of the reduction roasting of nickeliferous laterite ores[J]. Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, 2016,4(6):320-346.

[13] RHAMDHANI M A, HAYES P C, JAK E. Nickel laterite part 2: Thermodynamic analysis of phase transformations occurring during reduction roasting [J]. Mineral Processing & Extractive Metallurgy, 2009,118(3):146-155.

[14] WHITTINGTON B I, MUIR D. Pressure acid leaching of nickel laterites: A review [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2000,21(6):527-599.

[15] 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.
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.

[16] 石文堂. 低品位镍红土矿硫酸浸出及浸出渣综合利用理论与工艺研究[D]. 长沙:中南大学, 2011.
SHI Wentang. Fundamental and technological study on sulfuric acid leaching of low-grade nickel laterite and comprehensive utilization of leaching residue [D]. Changsha: Central South University, 2011.

[17] 雷蒙恩,马保中,陈永强,等. 印尼某红土矿硫酸加压浸出矿物组成变化研究[J]. 稀有金属, 2021,45(1):77-84.
LEI Meng'en, MA Baozhong, CHEN Yongqiang, et al. Mineral components transformation of a laterite from Indonesia by sulfuric acid pressure leaching [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021,45(1):77-84.

[18] 和飞. 褐铁型红土镍矿硝酸浸出机理及动力学研究[D]. 北京:北京科技大学, 2023.
HE Fei. Study on mechanism and kinetics of nitric acid leaching limo-

- nitic laterite ore[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
- [19] 王盼盼. 常压硫酸浸出红土镍矿提取镍的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
WANG Panpan. Study on extracting nickel from laterite nickel ore by atmospheric sulfuric acid leaching[D]. Nanning: Guangxi University, 2020.
- [20] 司金凤, 李丙亮. 基于常压酸浸的低品位红土镍矿综合利用研究[J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(9): 5-8.
SI Jinfeng, LI Bingliang. Study on comprehensive utilization of low-grade laterite nickel ore based on atmospheric acid leaching[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2023, 41(9): 5-8.
- [21] CARON M H. Fundamental and practical factors in ammonia leaching of nickel and cobalt ores[J]. JOM, 1950, 2: 67-90.
- [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.
LI Xiaobo, XUAN Lu. Experimental study on reduction roasting of limonitic laterite-nickel ore[J]. Hydrometallurgy of China, 2016, 35(3): 205-208.
- [23] 余建文, 韩跃新, 李艳军, 等. 复杂难选弱磁性铁矿石磁化焙烧技术研究现状与发展前景[J]. 河北冶金, 2018(10): 1-6.
YU Jianwen, HAN Yuexin, LI Yanjun, et al. Recent advances and development prospect of magnetization roasting of refractory weak magnetic iron ores[J]. Hebei Metallurgy, 2018(10): 1-6.
- [24] 韩跃新, 李艳军, 高鹏, 等. 复杂难选铁矿石悬浮磁化焙烧-高效分选技术[J]. 钢铁研究学报, 2019, 31(2): 89-94.
HAN Yuexin, LI Yanjun, GAO Peng, et al. Innovative and efficient beneficiation technology of refractory iron ores based on suspended magnetization roasting[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2019, 31(2): 89-94.
- [25] 李艳军, 余建文, 韩跃新, 等. 难选铁矿石流态化磁化焙烧研究新进展[J]. 金属矿山, 2019(2): 2-9.
LI Yanjun, YU Jianwen, HAN Yuexin, et al. Recent progress in magnetic reduction roasting of refractory iron ore via fluidized bed[J]. Metal Mine, 2019(2): 2-9.
- [26] 朱宇平. 红土镍矿湿法冶金工艺综述及进展[J]. 世界有色金属, 2020(18): 5-7.
ZHU Yuping. Review and development of hydrometallurgical process for laterite nickel ore[J]. World Nonferrous Metals, 2020(18): 5-7.
- [27] 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.
ZHANG Yunfang, LI Jinhui, GAO Yan, et al. Ammonium sulfate roasting process of laterite nickel ore[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(1): 155-161.
- [28] DU S M, MU W N, LI L Y, et al. Simultaneous extraction of metals from nickel concentrate via NH_4HSO_4 roasting-water leaching process and transformation of mineral phase[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2024, 34(3): 1003-1015.
- [29] QUINTERO-CORONEL D A, GUILLIN-ESTRADA W D, ECHEVERRI-ROMAN J L, et al. Large- and particle-scale energy assessment of reduction roasting of nickel laterite ore for ferronickel production via the rotary kiln-electric furnace process[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2022, 32: 101331.
- [30] 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.
WU Bingqiang, QI Yuanhong, ZHOU Hemin, et al. Status and progress in pyrometallurgy processes of a laterite nickel ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(3): 78-83.
- [31] 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.
HOU Junjing, JIA Yanzhong, LIANG Delan, et al. Study on nickel laterite Ni-Fe reduction in rotary kiln-electric furnace[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2014, 43(3): 70-73.
- [32] 刘志宏, 杨慧兰, 李启厚, 等. 红土镍矿电炉熔炼提取镍铁合金的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2010(2): 2-5.
LIU Zhihong, YANG Huilan, LI Qihou, et al. Study on the process of extraction ferronickel from laterite by electric smelting[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2010(2): 2-5.
- [33] 刘安治, 李韩璞. 红土镍矿冶炼工艺分析[J]. 现代冶金, 2013, 41(1): 1-4.
LIU Anzhi, LI Hanpu. Analysis of nickel laterite ore smelting processes[J]. Modern Metallurgy, 2013, 41(1): 1-4.
- [34] 李光辉, 姜涛, 罗骏, 等. 红土镍矿冶炼镍铁新技术: 原理与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2018.
LI Guanghui, JIANG Tao, LUO Jun, et al. New technologies for making ferronickel from laterite ores[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2018.
- [35] 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.
DONG Xunxiang, QIN Cen. Blast furnace process technology and development trends for nickel laterite ore[J]. Ironmaking, 2017, 36(3): 60-62.
- [36] 薛钰霄. 基于烧结-高炉法冶炼耐热不锈钢母液工艺及机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
XUE Yuxiao. Research on smelting process and mechanism of heat-resisting stainless steel master alloy based on the sintering-blast furnace method[D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [37] 胡梦杰. 红土镍矿烧结工艺优化及混匀制粒强化研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2023.
HU Mengjie. Optimization of nickel laterite sintering process and the enhancement of granulation by blending[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2023.
- [38] 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.
YANG Chao. Preparation of ferronickel alloy with low-grade nickel laterite by selective reduction and magnetic separation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(2): 99-101.
- [39] 肖仁栋, 陈靖, 胡美世, 等. NaFeS_2 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.
XIAO Rendong, CHEN Jing, HU Meishi, et al. Enrichment of nickel and cobalt by solid-state reduction of limonite-type nickel laterite ore enhanced by NaFeS_2 [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(1): 100-104.

- FAN Wulue. Leaching tin from waste circuit boards with hydrochloric acid and ferric chloride system enhanced by ball milling[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(5):97-99.
- [17] 吴展,陈志友,李伟,等. 高效萃取剂 AD100 萃取 Cu(II) 的动力学[J]. 有色金属(冶炼部分), 2013(11):7-9.
- WU Zhan, CHEN Zhiyou, LI Wei, et al. Kinetics of Cu(II) extracted by AD100[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2013(11):7-9.
- [18] 段琪昱,张承龙,王瑞雪,等. 废旧手机线路板上芯片无损拆解过程研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(5):112-120.
- DUAN Qiyu, ZHANG Chenglong, WANG Ruixue, et al. Research on nondestructive disassembly process of chips on printed circuit boards of waste mobile phones[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2021(5):112-120.
- 引用本文:柳林,王威,刘红召,等. 萃取法从废旧线路板酸浸液中回收铜的试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):158-162.
- LIU Lin, WANG Wei, LIU Hongzhao, et al. Experimental study on recovering copper from acid Leachate of waste circuit boards by solvent extraction[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):158-162.

(上接第 150 页)

- [40] 姜涛,李光辉,胡志清,等. 红土镍矿冶炼镍铁及冶炼渣增值利用关键技术与应用[Z]. 长沙:中南大学, 2019.
- JIANG Tao, LI Guanghui, HU Zhiqing, et al. Key technologies and applications for smelting ferronickel and value-added utilization of smelting slag from laterite nickel ore[Z]. Changsha: Central South University, 2019.
- [41] 李艳军,王明星,韩跃新,等. 一种红土镍矿悬浮焙烧-熔炼的综合利用方法: CN116004975A[P]. 2023-04-25.
- LI Yanjun, WANG Mingxing, HAN Yuexin, et al. A comprehensive utilization method for laterite nickel ore involving suspension roasting pre-reduction electric furnace smelting: CN116004975A[P]. 2023-04-25.
- [42] 李艳军,王明星,孙雪松. 一种红土镍矿悬浮焙烧-熔炼的综合利用系统: CN116004976A[P]. 2023-04-25.
- LI Yanjun, WANG Mingxing, SUN Xuesong. A comprehensive utilization system for laterite nickel ore involving suspension roasting pre-reduction electric furnace smelting: CN116004976A[P]. 2023-04-25.
- 引用本文: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.
- YU Jianwen, GUO Yize, WANG Jiaqi, et al. Development status and prospects of lateritic nickel ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):142-150.

(上接第 157 页)

- [5] 袁韵茹,张凌燕,邱杨率,等. 莫桑比克大鳞片石墨化学提纯试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2017,36(8):2600-2606.
- YUAN Yunru, ZHANG Lingyan, QIU Yangshuai, et al. Experimental study on chemical purification of flake graphite in Mozambique[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017,36(8):2600-2606.
- [6] 肖骁,龙渊,刘瑜,等. 石墨浮选精矿碱酸法制备高纯石墨[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):145-149.
- XIAO Xiao, LONG Yuan, LIU Yu, et al. Preparation of high-purity graphite with flotation concentrate using improved alkali-acid method[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(6):145-149.
- [7] 孟留洋. 钾长石微波碱浸工艺及其反应动力学研究[D]. 包头:内蒙古科技大学, 2019.
- MENG Liuyang. Research on the alkaline leaching process and kinetics of potassium feldspar under microwave irradiation[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2019.
- [8] 国家市场监督管理总局. 鳞片石墨:GB/T 3518—2023[S]. 北京:中国标准出版社, 2023.
- State Administration for Market Regulation. Flake graphite: GB/T 3518—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [9] 谭旭升. 碱酸法提纯石墨及除硅动力学研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2015.
- TAN Xusheng. Experimental research on the alkali-acid method purification of graphite and kinetics of desilication[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.
- 引用本文:张文学,邱杨率,张凌燕. 碱酸法提纯球形石墨试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):151-157.
- ZHANG Wenxue, QIU Yangshuai, ZHANG Lingyan, et al. Purification of spherical graphite by alkali-acid method[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):151-157.