

“双碳”目标下镍资源的综合利用发展趋势

张振芳, 陈秀法, 李仰春, 高爱红, 王杨刚, 何学洲, 王秋舒

(中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037)

摘要: 人类面临气候变化的挑战日益严重,“暖战”已在全球范围内打响。我国“双碳”目标提出后,各行业部门纷纷研究制定各自的减排方案。金属矿产行业作为国民经济的重要基础产业,在绿色低碳转型中的挑战和机遇并存。本文重点研究了动力电池重要金属之一的镍,在能源清洁化和动力电池高镍化双重驱动下的综合应用前景。现阶段主要用于不锈钢生产的镍将在绿色低碳转型中逐渐减少,电池级硫酸镍的消费量将快速增长。随着硫化镍矿资源日渐贫乏,红土型镍矿已成为镍的主要来源。目前红土型镍矿主要通过回转窑-电炉等火法冶炼工艺生产镍铁和不锈钢,随着电池级硫酸镍的需求增加,高压酸浸镍湿法冶炼中间品和镍铁转产高冰镍制备硫酸镍或将成为未来红土型镍矿综合利用的发展趋势。

关键词: 碳中和; 能源清洁化; 镍资源; 高压酸浸; 高冰镍; 综合利用

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.02.006

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2022)02-0031-09

1 碳达峰碳中和研究进展

全球气候变化是21世纪人类共同面临的重大挑战,随着全球变暖和极端气候频发,低碳经济已成为世界发展的潮流。国外侧重于分析碳减排政策的实施效果、方法和途径,国内的研究则集中在我国发展低碳经济的必要性和条件的论述以及相关经验的介绍等^[1]。

2020年“双碳”目标提出后,国内关于“双碳”目标提出的背景及与中国绿色低碳转型和高质量发展的关系的论述明显增加^[2-4]。此外,也有学者对“双碳”目标达成的时间节点和技术路径等进行了研究。余碧莹等利用能源技术经济模型研究得出全国CO₂排放有望于2025年实现达峰且峰值约108亿t,到2060年与能源相关的CO₂排放量仍将存在3亿~31亿t,主要来自电力、钢铁、化工、交通等行业,需要森林、海洋、碳汇技术来吸收^[5]。鲁博文等^[6]梳理了目前碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization, and Storage, 简称CCUS)技术的研究进展,并分析了CCUS技术助力我国碳中和的前景。王灿等^[7]认为我国现有的

节能减排技术可以在一定程度上支撑应对气候变化目标的实现,同时提出了未来技术清单。

2021年,《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》和《国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知》出台后,能源电力、钢铁、交通、建筑等高耗能、高排放产业纷纷研究制定各自的减排方案,有关这些行业的碳减排潜力分析以及减排方法和路径的研究显著增加。邹才能等研究提出碳替代、碳减排、碳封存、碳循环是实现碳中和的4种主要途径,其中,通过风电、光伏、水电等清洁能源替代传统煤电,助力电力部门实现低碳排放,将成为碳中和的中坚力量。“绿氢”作为清洁能源的后备军将助力工业与交通等领域进一步降低碳排放,节能减排、地质封存等技术将最终实现化石能源碳中和。通过构建中国新的“三小一大”能源结构,推动实现中国能源独立^[8]。王文等^[9]通过分析美国、荷兰等国家和湖南碳减排的经验教训提出渐进式“弃煤”的主张,同时建议通过启动碳税、电力产业链(上游风电和光伏等

收稿日期: 2022-01-19

基金项目: 地质调查项目(DD20211404, DD20190455)

作者简介: 张振芳(1972-),女,博士,从事矿产资源综合利用趋势跟踪分析研究。

清洁能源、中游特高压输电线路、下游新能源汽车)协同发展等措施实现“双碳”目标。张时聪等^[10]通过构建建筑部门碳排放预测模型表明在基准情景下,我国建筑运行与相关基础设施碳排放将于 2040 年左右达峰,峰值为 31.1 亿 t CO₂,通过大力推行建筑节能、建筑光伏一体化、清洁取暖等措施,建筑部门碳达峰时间可提前至 2030 年,峰值为 27 亿~28 亿 t CO₂,到 2060 年建筑领域将剩余 6 亿~8 亿 t CO₂ 需要完成碳中和。苍大强等^[11]通过分析对比国内外钢铁行业的节能减排方案,提出钢铁行业应对“双碳”目标可采取多能互补与储能相结合的理念,包括钢铁二次能源与可再生能源的互补、钢铁不同高低品位能源的互补、储能系统的创新应用等。

上述研究主要集中在“双碳”目标提出的背景及与中国绿色低碳转型和高质量发展的关系以及能源、电力、钢铁、交通、建筑等高耗能领域实现碳中和的方法路径和时间节点,对在“双碳”目标下具体某一金属矿产综合应用发展趋势的研究缺乏,本文将重点分析镍在绿色低碳经济转型中的综合应用前景。

2 双碳目标下金属矿产行业的挑战与机遇

金属矿产行业作为国民经济的重要基础产业,既是落实碳减排的重要领域,也是实现碳达峰、碳中和目标的重要责任主体。矿业作为传统的高耗能、高排放产业通过降低资源开发的能源消耗强度、提高矿产资源综合利用率、推广绿色矿山建设等多种措施减少矿业活动的直接碳排放,促进矿业绿色低碳发展。我国矿业碳排放主要源自开发过程的电力和煤炭消耗,近年来随着电力消耗占比增加,矿业整体碳排放强度年均下降超过 6%^[12]。然而,由于高碳工艺流程仍占中国金属矿产行业的主导,因此钢铁行业年碳排放量约占全国碳排放总量的 15%,有色金属行业约占全国碳排放总量的 5%^[13]。

“双碳”、“双控”目标实施后,金属矿产行业将面临越来越严格的碳管控和能耗管控,既有的节能减排技术难以满足更高的能耗和环保标准,需要进一步升级工艺流程和研发革命性技术,由此带来的成本增加将促使钢铁、电解铝等落后产

能加速出清。目前,氢冶金工艺等绿色技术尚处于研发阶段,短期内实现既有冶金流程替代与优化仍面临较大困难,因此矿业碳减排压力仍然存在^[14]。

同时,清洁能源、新能源汽车、5G 通讯、智慧交通等新型产业的发展将积极拉动金属需求。据世界银行《矿产品促气候行动:清洁能源转型的矿产消费强度》报告,与清洁能源产业密切相关的矿产品的需求量将大幅增加。据该报告预测,2050 年石墨、锂、钴在清洁能源产业的需求量将增加至 2018 年产量的近 5 倍,镍在清洁能源产业的需求量将与 2018 年的产量基本持平(表 1)。然而,由于石墨、锂、钴在清洁能源产业中,主要用于动力电池领域,应用场景相对单一,因此需求量将极大地受技术选择的影响,而镍、铝、铜、钢铁等则广泛应用于动力电池、风能、太阳能、光伏、地热能等多个清洁能源技术,故需求量的增加相对稳定,技术替代的影响相对较小,这为金属矿业行业的发展带来新的机遇。本文将重点分析在“双碳”目标下镍资源的综合利用前景。

3 镍资源综合利用现状和前景分析

3.1 镍资源分布及勘查开发

镍是一种天然存在的金属元素,广泛分布于地壳和地核中,在地球上的丰度排名第五。镍主要应用于钢铁、合金、电镀、电池等领域。世界镍矿资源主要有红土型镍矿和硫化物型镍矿两种,其中以红土型镍矿为主,约占总量的 60%,大多数矿床分布在赤道南北纬 22°范围内,集中产出在环太平洋地区的热带和亚热带国家。硫化物型镍矿约占 40%,主要分布在加拿大、俄罗斯、澳大利亚、南非、中国等国家。据美国标普数据库不完全统计^[16],全球储量资源量大于等于 10 万 t 的大型、超大型镍矿 240 个,以红土型镍矿为主。其中亚太地区 73 个居首位,储量资源量占比 40%,其次是欧洲和澳大利亚(图 1)。

镍矿的勘查投入随镍价的波动而周期性波动。据美国标普的不完全统计^[16],过去 15 年全球镍矿勘查投入的热点地区主要在澳大利亚、加拿大和俄罗斯,三个国家吸引了全球一半以上的镍矿勘查投入。其次是印尼、巴西和美国,约占全球镍矿勘查投入的 4%~7%(表 2)。过去 30 年

表1 能源技术领域矿产品需求量预测^[15]
Table 1 Mineral demand forecast in energy technology field

矿产品	2018年产量/ 千t	预测2050年在能源技术领域的 年需求量/千t	预测2050年在能源技术领域的年需求量 占2018年产量的百分比/%
石墨	930	4590	494
锂	85	415	488
钴	140	644	460
镍	2300	2268	99
铝	60000	5583	9
铟	0.75	1.73	231
钒	73	138	189
银	27	15	56
钨	23	8.4	37
铅	4400	781	18
钼	300	33	11
铜	21000	1378	7
锰	18000	694	4
铁	1200000	7584	1
铬	36000	366	1

数据来源：世界银行，引自《矿产品促气候行动：清洁能源转型的矿产消费强度》报告

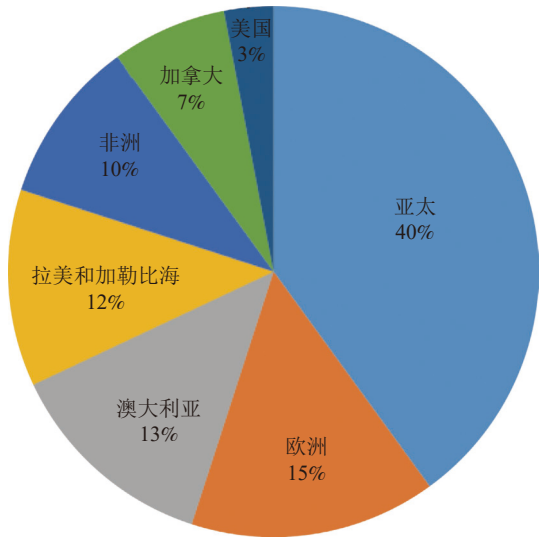


图1 全球镍矿资源分布及占比
Fig.1 Distribution of nickel resources and its share in the world

中，全球主要的新发现镍矿以红土型镍矿为主，40个红土型镍矿新增镍资源7832万t，10个岩浆型镍矿新增资源仅1810万t。

据世界金属统计局数据，2018年，全球矿山镍产量241.44万t，主要生产国有印度尼西亚、菲律宾、新喀里多尼亚、俄罗斯、加拿大、澳大利亚和中国（表3）^[17]。前三者主要开发红土型镍矿，后者以硫化物镍矿为主。21世纪以来，全球

新增的硫化镍矿产能仅约20万t，且增加的产能多为大型低品位矿，硫化镍矿产量在全球镍矿产量中占比不到30%^[18]。近十年来矿山镍产量总体呈倒“V”型结构，变化主要源自印尼和菲律宾，俄罗斯、澳大利亚、加拿大、中国等传统硫化镍矿生产国的产量基本保持稳定。2009年印尼颁布镍矿出口禁令，叠加中国大规模基础设施建设的强劲需求，印尼的镍矿产量由2009年的19万t迅猛提升至2012年的62万t，位居全球首位。随后，受2014年1月生效的印尼镍矿出口禁令影响，2013年全球镍矿产量达到255万t的峰值，较2009年增加了89%。之后，全球矿山镍的产量因印尼“拉抽屉”式的政策变动而波动，印尼减少的产量主要由菲律宾补充。

3.2 镍资源供需及消费结构分析

全球精炼镍产量与矿山镍产量呈现相似的变化趋势，但精炼镍的主产国与矿山镍明显不同。矿山镍主要由印尼、菲律宾、俄罗斯、澳大利亚、加拿大等供应，而精炼镍主要由中国、俄罗斯、日本、加拿大、澳大利亚、挪威等供应（表4）。中国精炼镍产量是全球精炼镍产量变化的自变量，近十年来中国产量的占比维持在20%~36%之间。而中国、俄罗斯和日本精炼镍产量前三位国家的占比在2014年之前超过50%。2014年

表 2 过去十五年全球主要的镍矿勘查投入及分布/百万美元
Table 2 Distribution and trends of nickel mineral exploration budget in last 15 years

年份	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
澳大利亚	197	348.4	173.1	157.7	203.2	224.3	166.6	138.6	125.9	37	58.1	101.2	107.4	123.2	144.9
加拿大	229.8	329.6	148.4	183.2	249.6	210.2	82.7	68.7	45.3	26.5	63.3	56.7	86.5	89.4	109.2
俄罗斯	68	62.5	32.5	15.3	48.1	56.8	56.7	52.5	23.5	25.8	22.1	23.1	55	40.5	51
拉丁美洲	143.4	186.6	90.9	87.3	77	78.1	56.5	36.6	39.9	35.8	25.8	28	32	28.1	30.2
亚太地区	90	188.1	130.1	100	116.3	108.2	84.3	53.4	45.9	48.3	21	25.6	17.8	16.6	21.2
美国	20.5	24.7	19.6	40.7	8.5	8.3	20.4	20.9	23.9	26.3	15.9	18.7	14.5	4.3	13
非洲	60.4	82.3	53.7	33.6	62.8	57.8	47.9	40.5	9.9	9.2	5.7	7.2	9.1	5	5.1
其他	61.3	60.6	35.8	53.5	74.2	80.6	81.9	58.9	51.3	29.3	32.4	37.3	29.3	26.8	48.3

数据来源：美国标普数据库

表 3 主要矿山镍生产国及产量/t
Table 3 The main countries of mine nickel and its production

年份	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
俄罗斯	262000	274000	270000	268700	264000	264000	261000	221387	206892	206622
中国	84788	79756	89792	93300	93200	101100	101400	100200	94381	98963
印度尼西亚	190641	216460	226907	622.218	811481	145548	128605	172713	358019	647674
菲律宾	139744	184330	319353	317621	313050	443909	466754	315506	389377	424915
加拿大	135037	160063	219025	211701	227743	228867	234519	235034	211166	179990
澳大利亚	165782	168477	215014	282066	292620	266181	225227	203136	178853	170312
新喀里多尼亚	97921	132116	128113	131693	164406	175174	193199	204207	215382	216225
全球合计	134579	1519907	1803909	2302357	2553658	2094421	2132050	1916890	2155301	2414394

数据来源：世界金属统计局

表 4 主要精炼镍生产国及产量/t
Table 4 The main countries of refined nickel and its production

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
挪威	88577	92185	92427	91687	91000	90500	91200	92700	86500	90800
俄罗斯	245000	262500	266000	254000	242000	239436	231916	192095	159896	149325
中国	268920	314315	469744	590872	710657	537137	453197	436973	620982	747919
印度尼西亚	12550	18688	19690	18373	22849	21603	47430	95132	188440	276402
日本	143513	166076	156883	169556	177810	177782	192789	195565	187046	186736
加拿大	116909	105413	142445	146850	152728	149486	149717	158299	163200	146225
澳大利亚	131210	101595	110213	125634	141252	137762	152978	120520	108500	113500
新喀里多尼亚	38229	39802	40513	45383	48371	62049	77530	95983	104094	107914
全球	1356087	1436332	1663600	1838081	1984467	1836038	1837883	1828072	2076677	2268363

数据来源：世界金属统计局

之后，由于印尼原矿出口限制和冶炼能力提升，印尼精炼镍产量从 2014 年的 2 万 t 增加到 2018 年的 28 万 t，成为仅次于中国的全球第二大精炼镍生产国，极大地改变了全球精炼镍供应格局，成为另一个影响全球精炼镍产量的变量。

2009 年以来，全球精炼镍的消费量稳步增长，消费主体是亚洲、欧洲和美洲。其中，中国

不仅是精炼镍的主要生产国，也是主要的消费国。中国精炼镍的产量全球占比维持在 20%-36% 之间，消费量全球占比维持在 45% 左右，均位居全球首位，其次是日本、美国和韩国，全球精炼镍的供需比较一致，全球矿山镍的供需分离。

现阶段镍主要应用于不锈钢、有色金属合

金、电镀和电池等领域,2019年的占比分别是70%、16%、8%和5%^[19]。但在新能源汽车产量增长与动力电池三元材料高镍化发展趋势的双重推动下,2015年以来全球硫酸镍需求量平均增速达到28.58%,成为另一个极具增长潜力的镍消费部门^[20]。Benchmark Minerals Intelligence预测电池级硫酸镍的消费量将迎来爆发式增长,到2030年,动力电池对镍的需求量将从2020年的13.9万t飙升到140万t,增加超过10倍,将占镍总需求的30%。世界银行预测,随着镍在电池、储能、地热、光伏、风电等清洁能源领域的需求快速增加,2050年清洁能源用镍将增加至227万t。

中国作为全球最大的原生镍生产国和消费国,目前原生镍主要用于不锈钢生产。据万得统计2014年起中国不锈钢产量的全球占比均在50%以上。然而,随着“双碳”目标推动的清洁能源转型和产业结构调整,镍的消费结构将由不锈钢为主导的“一元结构”转变为以不锈钢和电池为主导的“二元结构”。安泰科统计2020年中国不锈钢行业镍消费量111.1万t,占比82.4%,电池领域9.7万t,占比7.2%。中国汽车工业协会统计2020中国新能源汽车市场渗透率仅5.4%,按照2020年10月发布的《节能与新能源汽车技术路线图2.0》,到2035年这一数据将达到50%,这将根本性改变中国未来镍的消费结构。2020年中国原生镍产量74.4万t,同比回落10.4%。原生镍消费总量134.8万t,同比增长6.0%^[21],中国镍资源的供不应求已使2020年的对外依存度提升至85%,且90%以上的进口源自印尼和菲律宾两国,供应集中度高,印尼镍矿政策的频繁变动给中国镍资源的持续稳定供应带来一定风险。

3.3 镍资源综合利用现状和成本

镍资源的综合利用按矿物的种类可分为氧化镍矿处理和硫化镍矿处理等。氧化镍矿的镍常以类质同象形式嵌布在脉石矿物中,粒度较细,与其他矿物共生,难以通过一般的物理选矿方法富集,多直接进行冶炼^[22]。硫化镍矿的镍主要以游离硫化镍形态存在,易选冶,镍含量小于3%的硫化镍矿石直接冶炼不经济,通常采用选矿方法选出含镍4%~7%以上的铜镍混合精矿,或者进一步分选出镍精矿,再将此种混合精矿或镍精矿进行冶炼提取金属镍。

目前国内外的冶炼工艺流程大致可分为湿法、火法和火-湿联合法3类。其中湿法冶炼包括高压酸浸简称HPAL、常压酸浸、生物浸出等;火法冶炼包含回转窑-矿热炉简称RKEF还原熔炼、还原焙烧-磁选、还原硫化熔炼等;火-湿联合法主要为还原焙烧-氨浸Caron法^[22-24]。

按照矿石的化学成分,氧化镍矿可分为褐铁矿型和硅镁镍矿型两大类,褐铁矿型氧化镍矿位于红土型镍矿床的上部,镍品位小于1.6%,镁含量低,铁、钴含量高,宜采用湿法冶炼工艺处理,目前主流为HPAL,可以同时回收钴。硅镁镍矿也称残积矿,位于红土型镍矿床的下部,镍品位大于1.6%,铁、钴含量低,镁含量高而酸耗高,且难以通过PH值进行除杂,宜采用火法冶炼工艺,目前主流为RKEF,而处于中间过渡层的矿石两种冶炼工艺都可以使用,依据镍品位择优选择^[25]。

氧化镍矿的火法冶炼主要用于生产镍铁,但有少量项目用来生产高冰镍。镍铁主要用来生产不锈钢,高冰镍可通过加压酸浸生产电池级硫酸镍或精炼为金属镍。湿法冶炼始于20世纪50年代,目前发展至第三代工艺,主要用于生产电解镍和硫酸镍。湿法冶炼产出的镍中间品主要包含混合硫化镍钴和氢氧化镍钴,前者经进一步精炼得到纯镍,后者是生产电池级硫酸镍的主要原料。

氧化镍矿的两种冶炼工艺相比,火法冶炼工艺成熟,流程短、生产规模大,投建周期1~2年,前期单t投资额约1万美元,尾矿处理较简单。缺点是能耗高导致生产成本较高,约为1.3万美元/t,而且无法回收红土镍矿中的钴,适用于钴含量小于0.05%的硅镁镍矿。湿法冶炼因无需高温反应而能耗低,且因适用于低品位的表层褐铁矿型红土镍矿而更易开采,原料丰富,单t生产成本约1万美元。缺点是工艺复杂、流程长、对技术和设备要求高,尾矿处理复杂,投建周期需3年左右,前期单t投资额约2万美元。

硫化镍矿的选矿工艺主要有阶段磨选、磁浮联合、泥砂分选和分离浮选等^[26],选矿后的精矿经火法冶炼或湿法冶炼制成高冰镍或电解镍。2007年以前硫化镍矿是全球供给的主要来源,不锈钢生产所需的镍主要以电解镍为原料。然而,

随着硫化镍矿资源日趋贫乏, 21 世纪以来新开硫化镍矿项目的品位下降了 40% 以上, 矿石回收率下降了 15%, 开发成本日益上升^[17]。不锈钢对电解镍的需求与日俱增导致供不应求, 镍价高企。在此背景下, 中国恩菲工程技术有限公司突破行业技术壁垒, 成功开发了 RKEF 冶炼工艺, 使丰富的红土型镍矿得以大规模开发利用, 逐渐成为下游产业的主要原料供应。青山集团继续突破, 首次把不锈钢生产与 RKEF 工艺紧密结合直接生产不锈钢, 大大降低了对镍资源品位的要求, 也将炼钢成本节约 20% 以上, t 钢能耗节约 50% 以上, 在突破资源制约的同时极大地节能减排, 促使红土型镍矿成为全球供给的主要来源。

3.4 镍资源综合利用前景分析

在碳中和的引导下, 全球的“脱碳”意识不断增强, 镍资源的综合利用必将寻求更加低碳的生产方式。同时, 镍资源的消费结构也将发生显著变化, 在清洁能源领域的应用大幅增加。能源清洁化应用、工艺流程改进等将是未来镍资源综合利的发展方向。

在“双碳”目标下, 电池级硫酸镍将成为能源清洁化过程中镍的主要消费领域之一。生产硫酸镍的主要原料有高冰镍、镍湿法中间品、镍豆、镍粉和废镍等。目前, 国际主流硫酸镍备制工艺是通过硫化镍矿冶炼高冰镍和红土镍矿湿法冶炼中间品两种方法(图 3)^[20]。

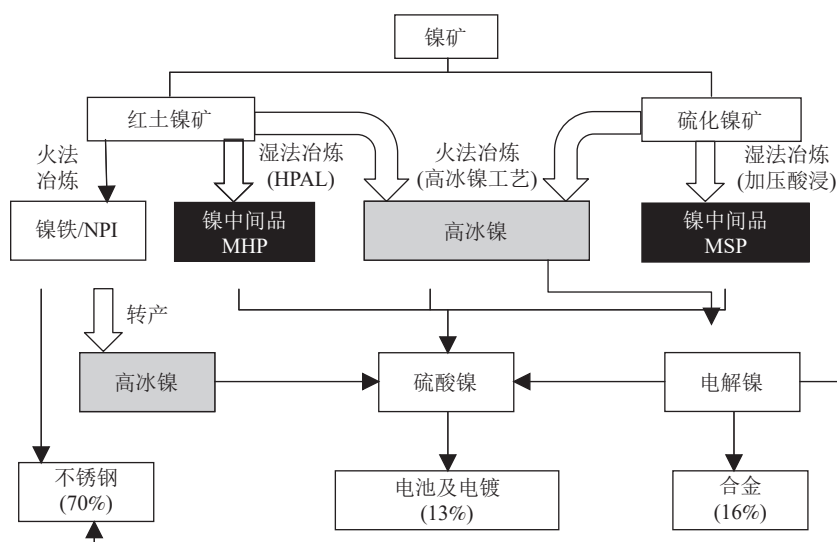


图 3 镍矿制备硫酸镍的主要工艺流程

Fig.3 Schematic diagram of main technological process of nickel sulphate preparation from nickel ore

硫化镍矿火法冶炼高冰镍的工艺主要为电炉熔炼、闪速熔炼等至低冰镍, 再转吹至高冰镍, 国内的吉林吉恩镍业股份有限公司和金川集团股份有限公司采用以硫化镍矿冶炼高冰镍为原料生产硫酸镍。面临硫化镍矿后续资源供应制约, 已有少量项目采用红土镍矿生产高冰镍, 冶炼方式

有三种(图 4)^[27], 一种是直接生产工艺, 在红土镍矿冶炼时直接加入兰炭、硫磺、黄铁矿进行还原硫化, 生产低冰镍, 之后再转吹生成高冰镍; 另一种是先用 RKEF 工艺生产出镍铁, 送入转炉进行一次硫化得低冰镍, 再进行二次转炉吹炼到高冰镍; 还有一种是富氧侧吹的高冰镍工艺, 红

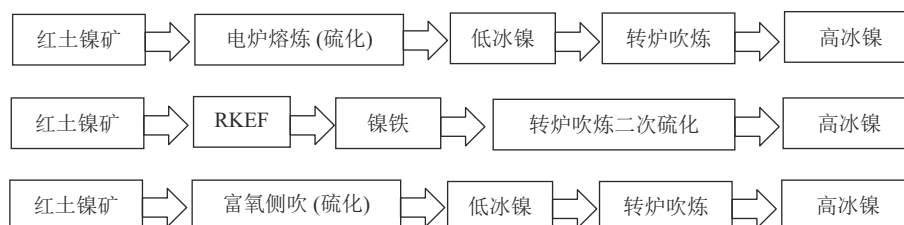


图 4 红土镍矿-高冰镍的三种主流工艺

Fig.4 Laterite nickel ore - three main processes of high nickel matte

土镍矿经侧吹炉熔化还原得镍铁或低冰镍，再经转炉吹炼到高冰镍，高冰镍通过加压酸浸生产电池级硫酸镍。

红土镍矿-高冰镍的三种工艺各有特点，KREF 镍铁-高冰镍工艺可以将不锈钢产业与清洁能源产业打通，实现红土镍矿到不锈钢和清洁能源的自由切换，企业可根据硫酸镍的价格灵活转产。当硫酸镍和镍铁的供需发生变化时，二者的价差扩大到 17000 元/t 后，能够覆盖镍铁-高冰镍-硫酸镍的成本，企业便可转产高冰镍。富氧侧吹工艺因对原料和还原剂的质量要求低于 RKEF 工艺，且减少了预还原流程，用侧吹炉代替电炉，因此投资成本和生产成本相对较低，且因能耗较低而更加低碳环保。这两种火法工艺在红土镍矿生产高冰镍的综合利用中发展潜力较大。

红土镍矿湿法冶炼生产硫酸镍的主要工艺为 HPLA，该工艺最早工业化应用于 20 世纪 50 年代古巴的 Moa 红土型镍矿。主要流程为将红土镍矿破碎磨细制浆，在 240~270℃、4~5 MPa 的高温高压环境下，以稀硫酸为浸出液，通过调整溶液 pH 值等工艺参数，促使红土镍矿中的镍、钴选择性进入浸出液，铁、铝、硅等进入渣中^[2]。浸出液经除杂后还原中和沉淀，加碱得氢氧化镍钴（Mixed Hydroxide Precipitate，简称 MHP）中间品，用作电池级硫酸镍原料，加硫化氢得混合硫化镍钴（Mixed Sulphide Precipitate，简称 MSP）中间品，进一步精炼得纯镍和钴（图 3）。

HPAL 冶炼工艺流程长、反应条件苛刻，闭环流程设计导致容错率低、启停成本大，且需要随着矿石成分变化随时调整反应参数，对设计和运营的综合能力要求高。HPAL 工艺经过多年发展在设计上取得较大改进，目前全流程镍、钴的回收率达 90% 以上^[22]。随着大型高压反应釜制造工艺逐步成熟，装备水平提高，高压反应釜和闪蒸阀等关键设备的国产化使 HPAL 工艺优势愈发明显。第三代 HPAL 的投资成本、建设周期、爬坡周期均有大幅改善。目前全球应用第三代 HPAL 技术已经成功达产的有中国中冶巴布亚新几内亚瑞木、日本住友金属菲律宾 CoralBay 和 Taganito 三个项目。截至 2020 年底，全球 HPAL 产能约为 35.6 万 t，2026 全球 HPAL 项目产能合计有望达到 72.2 万 t。HPAL 工艺将是未来红土镍

矿综合利用的主要发展方向。

在绿色低碳经济转型的大背景下，火法冶炼因其高能耗而使环境成本增加。尤其在未使用清洁能源的情况下，高能耗导致的高排放将是政府和企业重点关注的问题，如印尼已考虑禁止新建或关停部分镍铁火法冶炼厂，鼓励企业改造升级为不锈钢冶炼厂或硫酸镍湿法冶炼厂；特斯拉 CEO 考察印尼的镍后认为是“脏镍”而放弃电池级硫酸镍的订购。未来随着高品位镍资源的减少以及碳排放等方面的限制，湿法 HPAL 工艺在镍矿原料成本与能耗成本的优势将凸显。基于成本优势，湿法冶炼中间品有望成为电池级硫酸镍的重要原料供给。而红土镍矿-镍铁-高冰镍的火法产线将成为不锈钢-清洁能源两条产业链间的转换桥梁，可根据阶段性供需灵活调节不同镍产品之间的价差，作为硫酸镍原料的重要补充来源。

4 结论

（1）“双碳”目标提出后，能源电力、钢铁、交通、建筑等高耗能、高排放产业纷纷研究制定各自的减排方案。金属矿产行业作为国民经济的重要基础产业，既是落实碳减排的重要领域，也是实现碳达峰、碳中和目标的重要责任主体。在此情景下，金属矿产行业将面临越来越严格的碳管控和能耗管控，同时，清洁能源、新能源汽车等新型产业的发展将积极拉动金属需求，金属矿产行业在绿色低碳转型中的挑战和机遇并存。

（2）镍作为动力电池的重要金属之一，在能源清洁化和动力电池高镍化的双重驱动下，镍资源的综合利用将发生显著变化。现阶段镍主要用于不锈钢（70%）、有色金属合金（16%）等领域，但在新能源汽车产量增长与动力电池三元材料高镍化发展趋势的双重推动下，2015 年以来全球硫酸镍需求量平均增速达到 28.58%，预测到 2030 年，动力电池对镍的需求量将从 2020 年的 13.9 万 t 飙升到 140 万 t，增加超过 10 倍，将占镍总需求的 30%。而且，随着镍在电池、储能、地热、光伏、风电等多个清洁能源领域的需求快速增加，预测 2050 年清洁能源用镍将增加至 227 万 t。

（3）随着硫化镍矿资源日渐贫乏，红土型镍矿已成为镍的主要来源。过去 30 年中，全球主要的新发现镍矿以红土型镍矿为主，40 个红土型镍

矿新增镍资源 7832 万 t, 10 个岩浆型镍矿新增资源仅 1810 万 t。目前红土型镍矿主要通过 KREF 等火法冶炼工艺生产镍铁和不锈钢, 随着电池级硫酸镍的需求增加, 高压酸浸镍湿法冶炼中间品制备硫酸镍和镍铁转产高冰镍制备硫酸镍将成为红土型镍矿综合利用的发展趋势。

参考文献:

- [1] 王文举. 中国碳排放总量确定、指标分配、实现路径机制设计综合研究 [M]. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2018: 1-454.
- WANG W J. A comprehensive study on the determination of China's total carbon emissions, the allocation of targets, and the mechanism design of implementation paths [M]. Beijing: Capital University of Economics and Business Press, 2018: 1-454.
- [2] 白永秀, 鲁能, 李双媛. 双碳目标提出的背景、挑战、机遇及实现路径[J]. 中国经济评论, 2021(5):10-13.
- BAI Y X, LU N, LI S Y. The background, challenge, opportunity and realization path of the goal of carbon peaking and carbon neutrality[J]. China Economic Review, 2021(5):10-13.
- [3] 张中祥. “双碳”目标下中国绿色低碳转型和高质量发展[J]. 中国经济报告, 2021(4):165-167.
- ZHANG Z X. China and the world under the targets of carbon peak and carbon neutralization —green low-carbon transformation, green finance, carbon market and carbon border adjustment mechanism[J]. China Policy Review, 2021(4):165-167.
- [4] 乔晓楠, 彭李政. 碳达峰、碳中和与中国经济绿色低碳发展[J]. 中国特色社会主义研究, 2021(04):43-56.
- QIAO X N, PENG L Z. Carbon peak, carbon neutrality and green and low-carbon development of China's economy[J]. Studies on Socialism with Chinese Characteristics, 2021(04):43-56.
- [5] 余碧莹, 赵光普, 安润颖, 等. 碳中和目标下中国碳排放路径研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2021, 23(2):17-24.
- YU B Y, ZHAO G P, AN R Y, et al. Research on China's CO₂ emission pathway under carbon neutral target[J]. Journal of Beijing Institute of Technology(Social Sciences Edition), 2021, 23(2):17-24.
- [6] 鲁博文, 张立麒, 徐勇庆, 等. 碳捕集、利用与封存(CCUS)技术助力碳中和实现 [J]. 工业安全与环保, 2021, 47(S1): 30-34.
- LU B W, ZHANG L Q, XU Y Q, et al. Carbon capture, utilization and storage(CCUS)technology helps to the realization of carbon neutralization. [J] Industrial Safety and Environmental Protection, 2021, 47(S1): 30-34.
- [7] 王灿, 孙若水, 张九天. 中国实现碳中和的支撑技术与路径[J]. China Economist, 2021, 16(5):32-70.
- WANG C, SUN R S, ZHANG J T. Supportive technologies and roadmap for China's carbon neutrality[J]. China Economist, 2021, 16(5):32-70.
- [8] 邹才能, 熊波, 薛华庆, 等. 新能源在碳中和中的地位与作用[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2):411-420.
- ZOU C N, XIONG B, XUE H Q, et al. The role of new energy in carbon neutral[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2):411-420.
- [9] 王文, 赵越. 欧美碳减排经验教训及对中国的借鉴意义[J]. 新经济导刊, 2021(2):28-35.
- WANG W, ZHAO Y. Experience and lessons of carbon emission reduction in Europe and America and its significance for China[J]. New Economy Weekly, 2021(2):28-35.
- [10] 张时聪, 王珂, 杨芯岩, 等. 建筑部门碳达峰碳中和排放控制目标研究[J]. 建筑科学, 2021, 37(8):189-198.
- ZHANG S C, WANG K, YANG X Y, et al. Research on emission goal of carbon peak and carbon neutral in building sector[J]. Building Science, 2021, 37(8):189-198.
- [11] 苍大强. 钢铁工业“碳达峰”“碳中和”及低碳技术的误区及现实路径[J]. 中国冶金, 2021, 31(9):3-8.
- CANG D Q. Misunderstandings and realistic path of carbon peak carbon neutrality and low carbon technologies in iron and steel industry[J]. China Metallurgy, 2021, 31(9):3-8.
- [12] 强海洋, 高兵, 郭冬艳, 等. 碳中和背景下矿业可持续发展路径选择[J]. 中国国土资源经济, 2021, 34(04):4-11.
- QIANG H Y, GAO B, GUO D Y, et al. Options for sustainable development of mining industry under the background of carbon neutrality[J]. Natural Resource Economics of China, 2021, 34(04):4-11.
- [13] 马静玉, 程东波. 碳中和愿景下金属矿产行业的挑战与机遇[J]. 科技导报, 2021, 39(19):48-55.
- MA J Y, CHENG D B. Challenges and opportunities of metallic mineral industry under the vision of carbon neutrality[J]. Science & Technology Review, 2021, 39(19):48-55.
- [14] 张福明, 程相锋, 银光宇, 等. 国内外低碳绿色炼铁技术的发展[J]. 炼铁, 2021, 40(5):1-8.
- ZHANG F M, CHENG X F, YIN G Y, et al. Development of low-carbon green ironmaking technology at home and abroad[J]. Ironmaking, 2021, 40(5):1-8.
- [15] The World Bank. Minerals for climate action: the mineral intensity of the clean energy transition[DB/OL]. [2020-05].
- [16] S&P Global Market Intelligence. Commodities [DB/OL]. [2021-07-18]. <https://platform.mi.spglobal.com>
- [17] World Bureau of Metal Statistics. [DB/OL]. <https://world-bureau.co.uk/>
- [18] crugroup. CRU 阐述: 硫化镍缘何失宠 [DB/OL]. [2021-03]. <https://www.crugroup.com/knowledge-and-insights/>

[insights/2021/cru%E9%98%90%E8%BF%B0-%E7%A1%AB%E5%8C%96%E9%95%8D%E7%BC%98%E4%BD%95%E5%A4%B1%E5%AE%A0/](#)

[19] 邢佳韵, 张晓鹤, 陈其慎, 等. “二元消费”影响下的镍供需形势分析[J]. *地球学报*, 2021, 42(2):251-257.

XING J Y, ZHANG X H, CHEN Q S, et al. An analysis of nickel supply and demand situation under the influence of “dual consumption” [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2021, 42(2):251-257.

[20] 张邦胜, 刘贵清, 刘昱辰, 等. 2020年硫酸镍市场分析[J]. *中国资源综合利用*, 2021, 39(1):86-91.

ZHANG B S, LIU G Q, LIU Y C, et al. Analysis of nickel sulfate market in 2020[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2021, 39(1):86-91.

[21] 安泰科. 镍产业现状、展望及经营对策.

Antaike. Current situation, prospects and management countermeasures of nickel industry. [DB/OL]. extension: // oemmdcbldboiebfnladdacbfmadadm/<http://www.shfe.com.cn/upload/20210702/1625217935899.pdf>

[22] 张本曰, 刘丹, 郭锐, 等. 含镍蛇纹石的综合利用现状[J]. *矿产综合利用*, 2020(4):13-20.

ZHANG B Y, LIU D, GUO R, et al. Comprehensive utilization status of nickel-containing serpentine[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(4):13-20.

[23] 王帅, 姜颖, 郑富强, 等. 红土镍矿火法冶炼技术现状与研究进展[J]. *中国冶金*, 2021, 31(10):1-7.

WANG S, JIANG Y, ZHENG F Q, et al. Development of pyrometallurgical technology of laterite nickel ore[J]. *China Metallurgy*, 2021, 31(10):1-7.

[24] 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.

WU B Q, QI Y H, ZHOU H M, et al. Status and progress in pyrometallurgy processes of a laterite nickel ore[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(3):78-83+93.

[25] 郭远生, 罗玉福, 等. 中国和东南亚红土型镍矿地质与勘查[M]. 北京: 地质出版社, 2013: 1-310.

GUO Y S, LUO Y F, et al. Geology and exploration of laterite nickel deposits in China and Southeast Asia[M]. Beijing: Geological publishing house, 2013: 1-310.

[26] 李长玖, 陈玉明, 黄旭日, 等. 镍矿的处理工艺现状及进展[J]. *矿产综合利用*, 2012(6):8-11.

LI C J, CHEN Y M, HUANG X R, et al. The Present situation and development of nickel ore processing technology[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2012(6):8-11.

[27] 高冰镍工艺、成本拆分及后市如何演变 [EB/OL]. [2022-01-05]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/453669030>

Multipurpose Utilization Trend of Nickel Mineral Resources under the Goal of Carbon Peaking and Carbon Neutrality

Zhang Zhenfang, Chen Xiufa, Li Yangchun, Gao Aihong, Wang Yanggang, He Xuezhou, Wang Qiushu
(Development and Research Center of China Geological Survey, Beijing, China)

Abstract: The challenge of climate change is becoming more and more serious, and the "warm war" has been launched around the world. After China's "dual carbon" target was put forward, various sectors have studied and developed their own emission reduction plans. As an important basic industry of national economy, metal mineral industry faces both challenges and opportunities in green and low-carbon transformation. This paper focuses on nickel, one of the most important metals in power battery, and its comprehensive application prospect under the dual drive of clean energy and high nickelization of power battery. At present, nickel mainly used in stainless steel production will gradually decrease in the green and low-carbon transition, and the consumption of battery grade nickel sulfate will increase rapidly. Laterite type nickel ore has become the main source of nickel as nickel sulfide ore resources become scarce. At present, laterite nickel ore is mainly produced by KREF and other pyrosmelting processes to produce nickel-iron and stainless steel. With the increasing demand for battery grade nickel sulfate, high pressure acid leaching nickel wet smelting of intermediate products and converting nickel-iron to high matte nickel to produce nickel sulfate may become the development trend of comprehensive utilization of laterite nickel ore in the future.

Keywords: Carbon neutrality; Clean energy; Nickel mineral resource; High pressure acid leaching; High Ni matte; Multipurpose utilization