

综述

镍精炼工艺比较及发展方向

钟清慎 贺秀珍

(金川集团铜业有限公司, 甘肃 金昌 737100)

[摘要] 本文比较分析了国内外镍冶炼企业采用的各种镍精炼工艺的技术特点, 简要总结了金川镍精炼技术发展概况, 取得突破的重大关键技术和金川镍精炼工艺存在的关键技术难题。结果表明: 由传统硫化镍可溶阳极电解精炼工艺向硫酸浸出萃取分离电积精炼法或浓缩结晶法、氯化浸出萃取净化电积精炼法和羰基精炼法发展是镍精炼技术改进的主流方向。其中, 羰基精炼法具有选择性最高、工艺流程最短、最容易实现自动化、环境最友好, 节能降耗显著, 关键技术均已突破的优点, 是大型镍精炼企业镍精炼工艺改进的最优先方向。

[关键词] 镍精炼工艺; 硫化镍; 氧化镍; 可溶阳极电解精炼法; 硫酸浸出电积精炼法; 硫酸浸出萃取净化结晶法; 氯化浸出电积精炼法; 羰基精炼法; 高压氢还原法; 技术改进

[中图分类号] TF815 [文献标志码] A [文章编号] 1008-5122(2021)03-0004-07

DOI: 10.19610/j.cnki.cn11-4011/tf.2021.03.002

Comparison and Development Direction of Nickel Refining Process

ZHONG Qing-shen, HE Xiu-zhen

Abstract: This paper compared and analyzed the technical characteristics of various nickel refining processes adopted by domestic and foreign nickel smelting enterprises, and briefly summarized the development of Jinchuan nickel refining technology and the major key technologies that had made breakthroughs and the key technical problems existing in Jinchuan nickel refining process. The results showed that the transformation from traditional nickel sulfide soluble anode electrolytic refining process to sulfuric acid leaching extraction separation electrowinning method or concentrated crystallization method, chlorination leaching extraction purification electrowinning method and carbonyl refining method was the mainstream direction of nickel refining technology improvement. Among them, the carbonyl refining method which had the advantages of the highest selectivity, the shortest process flow, the easiest to realize automation, the most environmental feature, significant energy saving and consumption reduction, and the key technologies had been broken through, was the most priority direction of nickel refining process improvement in large nickel refining enterprises.

Key words: nickel refining process; nickel sulfide; nickel oxide; soluble anode electrolytic refining

[收稿日期] 2021-01-25

[基金项目] 金川集团“十一五”至“十三五”重大科技攻关项目

[作者简介] 钟清慎(1965—)男,江西吉安人,高级工程师,硕士,主要从事稀贵金属及镍钴铜冶金研究。

[通讯作者] 贺秀珍(1967—),女,内蒙古丰镇人,高级工程师,主要从事稀贵金属及镍钴冶金研究。

[引用格式] 钟清慎,贺秀珍. 镍精炼工艺比较及发展方向[J]. 有色冶金节能,2021,37(3):4-10.

method; sulfuric acid leaching electrowinning refining method; sulfuric acid leaching extraction purification crystallization method; chlorination leaching electrowinning method; carbonyl refining method; high pressure hydrogen reduction method; technological innovation

0 前言

镍是重要的战略金属,其产量在有色金属中位居第5位,仅次于铝、铜、铅、锌。中国镍消费量占世界总量的比例超过50%。镍的消费领域主要是炼钢行业(不锈钢和合金钢),其镍消费占比超过69%,其次是电镀领域(6%)、电池领域(4%)、铸造及合金(高温合金、有色金属合金等)领域(5%)以及其他领域(如粉末冶金零件、催化剂等)。随着世界制造业高质量发展目标的推进和战略性新兴产业的发展,以及低成本氧化镍矿冶金技术的快速进步,新世纪以来,以红土镍矿为原料的镍铁合金或含镍铁水等低成本产品快速替代了传统硫化镍矿冶炼生产的电解镍等大宗产品。传统硫化镍矿冶金产业转型升级、提质增效任务艰巨。传统电解镍以及硫酸镍等大宗产品面临产能过剩、产品价格下降的压力,生产过程环境保护要求也更加严格^[1-5]。

由于闪速熔炼、氧气顶吹熔炼以及侧吹熔池熔炼等强化冶金技术的应用,硫化镍矿火法粗炼技术取得重要进展。相比镍的火法冶炼,镍精炼工艺技术更加复杂,多元素深度分离极度困难,难以普遍采用大型高效湿法冶金设备,因此镍精炼技术的发展相对缓慢^[1,6-9]。

因此,在新形势下,迫切要求对镍精炼工艺进行重大创新,综合应用当代冶金技术最新成果,统筹优化镍精炼工艺和产品结构,以镍精炼和镍材料产品制备一体化为主要途径,缩短镍精炼和镍材料制备工艺流程,节能降耗、降低生产成本,实现镍产业高质量发展目标。

1 当代冶金的发展趋势与特点

当代冶金的发展趋势与显著特点是:粗炼工艺和提取冶金工艺大量采用强化冶金技术,更加重视短流程绿色冶金技术和元素高效分离技术的应用,冶金学科向材料冶金以及冶金材料一体化方向发展,冶金过程直接制备各类功能材料或结构材料,以实现节能降耗、生产成本降低和产品多元

化的目标^[1,10-16]。

例如,钢铁冶金采用超大型高炉炼铁、炉外喷吹脱硫、大型转炉吹炼脱除碳、磷、硅;氧化镍矿采用RKEF工艺和烧结-高炉还原熔炼工艺生产镍铁合金,再采用炉外精炼、微合金化技术和连铸连轧技术,大幅缩短工艺流程,实现了不锈钢材料和合金钢材料的低成本规模化绿色制备。

氧化镍矿采用高温高压强化酸浸出镍钴技术、高效沉淀分离镍钴技术,溶剂萃取和离子交换高效分离杂质和相似元素技术,将镍盐、钴盐、锰盐等高效合成三元电池前驱体材料,实现了新能源材料的低成本规模化绿色制备。

镍和铁的气化冶金利用一氧化碳气体与金属镍和铁的羰基化合成反应,高选择性地生成羰基镍和羰基铁,再通过控制不同的蒸馏提纯、热分解条件,得到系列羰基镍粉、系列羰基铁粉或镍铁粉、高纯镍丸或镍铁丸等产品。羰基法工艺生产的羰基镍或羰基铁粉末具有优异的特殊物理化学性能,在镍-氢电池、合金钢、粉末冶金、超微过滤器、催化剂、隐身材料、电感材料、催化材料及电子信息等领域获得了广泛的应用;同时,以这些形状各异、性能奇特的羰基镍、铁产品为高端原料,可以开发出许多性能优异的高新技术产品,它们在电子、化工、能源以及国防等领域都有着广泛的应用前景和极大的市场需求^[13-16]。

2 当代镍冶金方法

世界镍资源主要有四类:氧化镍矿(红土镍矿)、硫化镍矿、海底含镍锰结核矿和含镍二次资源。陆基镍资源主要来源于红土镍矿(资源量1.26亿t,平均镍品位1.28%,镍金属占比72.6%)和硫化镍矿(资源量1.05亿t,平均镍品位0.58%,镍金属占比27.4%)。

镍矿石和镍浮选精矿具有品位低、成分复杂、伴生有价金属元素多、脉石和高熔点组分含量高特点,属于难冶炼物料。因此,镍冶金工艺方法具有多样化的特点^[1,6]。各种方法的流程及产品见表1。

表 1 当代镍冶金方法

矿物类型	粗炼方法	分离与精炼方法及其主要产品
	鼓风机熔炼→转炉吹炼	高镍硫→缓冷选矿分离→熔铸→可溶阳极电解精炼→电解镍板
	回转窑焙烧→电炉熔炼→转炉吹炼	硫化镍精矿或高镍硫→氯化浸出→溶剂萃取分离→不溶阳极电积精炼→电积镍板
	闪速炉熔炼→转炉吹炼	金属化高镍硫(或硫化镍精矿)→常压加压选择性浸出→黑镍除钴→(或萃取分离)→不溶阳极电积精炼→电积镍板
硫化镍矿	氧气顶吹熔炼→转炉吹炼	高镍硫(或硫化镍精矿)→常压加压选择性浸出→(或萃取分离)→浓缩结晶→硫酸镍、硫酸钴
	侧吹熔池熔炼→转炉吹炼	氧化镍焙砂→常压浸出→溶剂萃取分离→高压氢还原→镍粉镍块
	回转窑焙烧	氧化镍焙砂→常压氨浸→高压氢还原→镍粉镍块
	沸腾炉焙烧	氧化镍焙砂→常压氢还原→硫化氢活化→常压或低压羰基化精炼→(精馏)→热分解→羰基镍粉及镍丸
	卡尔多炉熔炼→水碎	水碎镍合金→中压或高压羰基法精炼→精馏→热分解→羰基镍粉及镍丸和镍铁丸
	高压氨浸	高压氢还原→镍粉或镍块
	高压酸浸	硫化氢或氢氧化物沉淀法分离→硫化镍钴或氢氧化镍钴
氧化镍矿	烧结→高炉还原熔炼	熔分→低品位镍铁合金
	回转窑直接还原	金属化球团→选矿分离→镍铁粉
	回转窑干燥→电炉还原熔炼(RKEF工艺)	熔分→高品位镍铁合金

3 国内外主要镍精炼技术及其特点

3.1 主要镍精炼技术

镍精炼是以硫化镍矿或红土镍矿粗炼得到的高镍硫、粗镍金属、镍合金、氧化镍、氢氧化镍或硫化镍等高品质含镍物料为原料,采用浸出或羰基化、化学沉淀净化除杂(或溶剂萃取分离、离子交换技术、精馏)、电解精炼、浓缩结晶、金属还原或沉积、热分解等工艺步骤,得到纯金属镍板或镍盐、镍粉、镍块(或丸、珠)等产品的工艺过程。镍精炼技术复杂、工艺流程长,随着镍精炼工艺流程以及精炼原料的品质不同,材料及试剂消耗、水电汽能耗、金属回收

率或直收率、成本相差较大,但是镍精炼成本一般要高于镍粗炼成本^[1]。

镍精炼技术经历了漫长的发展过程,最初的镍精炼技术采用化学沉淀法净化镍溶液,然后采用氢气还原或电积方法还原金属镍。为了提高镍的纯度,降低镍精炼成本,扩大镍精炼生产规模,提高镍精炼的技术经济指标,节能降耗,开发多种性能的纯镍产品,先后开发了硫化镍可溶阳极电解精炼法、粗镍可溶阳极电解精炼法、氯化浸出电积精炼法、硫酸浸出电积精炼法、羰基精炼法等镍精炼技术。世界主要镍精炼工艺方法进展及典型厂家见表 2,主要镍精炼技术的冶金原理及其选择性见表 3。

表 2 国内外主要的镍精炼方法、原料、产品及典型厂家

镍精炼方法	原料	产品	典型厂家
硫化镍可溶阳极电解精炼法	硫化镍阳极板	电解镍板	金川集团镍冶炼厂、加拿大因柯公司汤普逊镍精炼厂、四川镍钴公司成都电冶厂
粗镍可溶阳极电解精炼法	粗镍金属阳极板	电解镍板	俄罗斯诺里尔斯克、北方镍业公司芒彻哥尔斯克、南方镍业公司奥尔斯克
氯化浸出电积精炼法	高镍硫或硫化镍精矿	电积镍板	加拿大鹰桥公司镍精炼厂、法国镍公司桑多维尔镍精炼厂、日本住友公司新居滨镍精炼厂
硫酸浸出电积精炼法	高镍硫、金属化高冰镍、硫化镍精矿、氢氧化镍钴	电积镍板或硫酸镍	芬兰奥托昆普公司哈贾法尔塔镍精炼厂、津巴布韦宾都拉镍精炼厂、新疆鑫鑫矿业公司阜康冶炼厂、吉林镍业公司、金川集团、青山控股集团、广西银亿公司
羰基精炼法	水碎镍合金、海绵金属镍粒	镍丸、镍铁丸、镍粉、镍铁粉、包覆粉	加拿大国际镍公司铜崖镍精炼厂、克莱达奇镍精炼厂、布瓦兹精炼厂、俄罗斯诺列思克、金川集团、吉林镍业公司

表3 主要镍精炼技术的冶金原理及其选择性

镍精炼方法	涉及的主要冶金原理	选择性
硫化镍可溶阳极电解精炼法	电位-pH图,电极电位,溶度积,电化学溶解与还原,化学沉淀法净化溶液	液固反应,试剂种类最多,化学反应的选择性较差,需要较纯净的电解液
粗镍可溶阳极电解精炼法	电位-pH图,电极电位,溶度积,电化学溶解与还原,化学沉淀法净化溶液	液固反应,试剂种类很多,化学反应的选择性较差,需要较纯净的电解液
氯化浸出电积精炼法	电位-pH图,电极电位,溶度积,电化学溶解与还原,化学沉淀法与溶剂萃取和离子交换技术联合净化溶液	气液固反应,试剂种类较多,化学反应的选择性较差,需要较纯净的电解液
硫酸浸出电积精炼法	电位-pH图,电极电位,溶度积,电化学溶解与还原,化学沉淀法与溶剂萃取和离子交换技术联合净化溶液	气液固反应,试剂种类较多,化学反应的选择性较差,需要较纯净的电解液
羰基精炼法	金属镍、铁、钴与一氧化碳的羰基化合成,与羰基物的热分解可逆反应	气固反应,试剂种类最少,化学反应的选择性最高,可以实现定向合成与热分解,净化过程最简单

3.2 镍精炼工艺的优缺点

3.2.1 硫化镍可溶阳极电解精炼法

硫化镍可溶阳极电解精炼法具有如下优点:1)工艺简单成熟,设备、设施的设计制造加工较为容易;2)产品质量稳定,品级率较高;3)容易形成规模化优势,可以通过规模扩大降低加工成本;4)硫以单质硫形式开路^[1,9-12,17-20]。

硫化镍可溶阳极电解精炼法的缺点如下:1)工艺流程长,金属直收率较低,产品单一,生产成本和投资较高;2)阳极液净化成本高,需要配套庞大的铁、铜、钴三段净化和造液脱铜系统,容易造成镍离子贫化;3)需要庞大的熔铸备料系统;4)自动化程度低,劳动定员多,劳动强度大,人工成本较高;5)产生大量各种中间返料(残极、综合铁渣、铁矾渣、铜渣、氯浸渣、海绵铜、钴渣等),其中铁矾渣、铜渣、海绵铜等处理难度大;6)水、电、汽和材料试剂消耗量大;7)产生大量需要处理的高盐废水和含氯废气;8)作业环境较差。

3.2.2 粗镍可溶阳极电解精炼法

粗镍可溶阳极电解精炼法具有如下优点:1)工艺简单成熟,设备、设施的设计制造加工较为容易;2)容易形成规模化生产,投资较低;3)电解直收率相对硫化镍可溶阳极电解精炼工艺高,产品质量稳定,品级率较高;4)净化系统相对硫化镍可溶阳极电解精炼有所简化,返渣比则大为减少。

粗镍可溶阳极电解精炼法的缺点如下:1)工艺流程仍然长,金属直收率仍较低,产品单一,生产成本仍较高;2)金属镍阳极制备相对复杂,需要配套庞大的金属镍阳极制备系统;3)自动化程度低,劳

动定员多,劳动强度大,人工成本较高;4)残极率高,阳极液净化的各种中间返料仍然较多;5)水、电、汽和材料试剂消耗量大;6)作业环境较差;7)容易产生阳极钝化。

3.2.3 氯化浸出电积精炼法

氯化浸出电积精炼法具有如下优点:1)工艺流程较短,金属直收率较高,产品质量稳定,品级率较高,氯气全部回用后生产成本较低;2)常压浸出自热进行,蒸汽消耗较低,氯化镍电解液镍离子浓度高,电阻率和粘度均低于硫酸镍溶液,电解电耗成本较低;3)采用溶剂萃取净化电解液,净化系统简化,返渣少,溶液净化成本相对较低;4)自动化程度高,劳动定员较少,人工成本较低;5)备料简单,硫以单质硫形式开路。

氯化浸出电积精炼法的缺点如下:1)投资成本高,工艺复杂,产品单一,氯气不能回用导致生产成本高昂;2)氯气回收难度大,氯气回收利用技术设备复杂,需要配套庞大的氯气分离、压缩、存储、输送系统和含氯废气治理系统;3)设备防腐难度大,材质难以解决,防腐蚀费用高;4)溶剂萃取和离子交换技术净化溶液工艺复杂,镍与铜、钴、铁、铅、锌等元素离子深度分离技术要求较高;5)萃取剂消耗量大,溶液需要除有机物;6)作业环境较差,废气治理成本较高;7)浸出渣脱硫及后处理难度大,产出难处理的氯化铁等除杂溶液和废水。

3.2.4 硫酸浸出电积精炼法

硫酸浸出电积精炼法具有如下优点:1)工艺简单成熟,设备、设施的设计制造加工较为容易;2)工艺流程简短,金属直收率较高;3)产品相比可溶阳

极电解精炼工艺多,包括电积镍板和硫酸镍;4) 电解直收率相对高;5) 净化系统大为简化,返渣很少;6) 浸出净化工序自动化程度相对较高,劳动定员少,人工成本较低;7) 水、电、汽和材料试剂消耗量比硫化镍可溶阳极电解精炼法大为减少。

硫酸浸出电积精炼法具有如下缺点:1) 高压浸出投资较高,生产成本仍较高,产品质量不太稳定,镍板外观相对较差,品级率较低;2) 金属化高冰镍制备相对复杂,转炉渣提钴工艺复杂,钴回收率低;3) 电积工序自动化程度低,劳动定员多,劳动强度大,人工成本较高;4) 镍离子浓度较低,电解液循环量比氯化精炼法高,镍与钴、铜、铅、锌分离难度大;5) 浸出渣处理难度大;6) 电积槽酸雾大、作业环境较差;7) 容易产生酸不平衡,非金属化高镍硫原料加剧酸不平衡性,需要用碱中和不平衡的酸。

3.2.5 羰基精炼法

羰基精炼法具有如下优点:1) 工艺流程最短,占地面积最小,金属直收率较高,产品质量稳定,品级率较高;2) 产品最容易多元化,实现了冶金及粉体材料制备的一体化;3) 自动化水平高,容易实现全过程自动控制和远程监控,劳动定员少,人工成本低;4) 过程以气固反应为主,定向合成,选择性极高,精馏净化系统非常简单,基本无返渣;5) 劳动强度低,作业环境较好;6) 试剂材料消耗最少。

羰基精炼法具有如下缺点:1) 技术设备最复杂,设备、设施、自动化仪表的可靠性要求高,装备投资较高,产品生产成本高;2) 对原料粒度、活性、孔隙度要求很高,水碎金属镍或海绵镍高活性原料制备相对复杂,需要配套庞大的羰基金属镍原料制备系统;3) 一氧化碳、羰基镍和羰基铁气体、液体属于剧毒易燃易爆物品,对安全环保的管控水平要求很高。

4 金川镍精炼工艺技术进展及关键技术难题

金川集团对镍精炼工艺技术持续进行了系统广泛的研究开发,先后与国内外相关科研院所和大专院校联合开发了硫化镍可溶阳极电解精炼法、硫酸浸出电积精炼法、硫酸浸出萃取净化结晶精炼法、氯化浸出电积精炼法、羰基精炼法以及高压氢还原法等镍精炼技术,其中硫化镍可溶阳极电解精炼法、硫

酸浸出电积精炼法、羰基精炼法建设了万吨级以上规模的生产线,使金川集团成为世界上研究开发镍精炼技术最全面的镍冶炼企业,代表了中国镍精炼技术发展的最高水平。

金川镍精炼技术发展及取得突破的重大关键技术、各镍精炼工艺技术存在的关键技术难题^[7-10,20-25]如下:

4.1 硫化镍可溶阳极电解精炼法

在硫化镍可溶阳极电解精炼法方面,以硫化镍阳极板为原料,建立 100 kt/a 电解镍板生产线。1960 年,建设金川一期 10 kt/a 镍精炼生产线;1988—1995 年,建设金川二期 20 kt/a 镍精炼生产线;2009—2012 年,建设 60 kt/a 镍精炼生产线。取得突破的关键技术包括周期长、高 pH 值、高电流密度的电解技术,大流量三段连续净化电解液技术,电解造液脱铜技术。尚需解决的关键技术难题包括电解镍加工成本高,金属直收率低,劳动生产率低;三段净化和造液脱铜材料试剂电能消耗高;工艺设备优化改进及装备自动化;中间渣减量化及低成本处理;作业环境治理;废水减量化及回用处理。

4.2 硫酸浸出萃取分离电积精炼法

在硫酸浸出萃取分离电积精炼法方面,以高镍硫、金属化高冰镍、硫化镍精矿为原料,建立 30 kt/a 电积镍板生产线。这是国家“六五”、“七五”、“八五”科研攻关项目,2003 年,开发 3 500 t/a 试验线;2005 年,建设 30 kt/a 常压加压浸出电积生产线。取得突破的关键技术包括常压加压选择性浸出技术、全界面萃取分离镍钴技术、硫酸体系不溶阳极电积镍技术。尚需解决的关键技术难题包括电积镍加工成本高,电积镍物理外观质量欠佳;酸不平衡;作业环境治理。

4.3 硫酸浸出萃取净化浓缩结晶法

在硫酸浸出萃取净化浓缩结晶法方面,以硫化镍精矿、氢氧化镍钴、粗硫酸镍为原料,在 1990—2015 年建设 80 kt/a 硫酸镍生产线。取得突破的关键技术包括 P204 萃取除杂—P507 萃取分离镍钴技术、浓缩结晶技术。尚需解决的关键技术难题包括硫酸镍加工成本高,硫酸镍质量不能满足高端需求;作业环境治理。

4.4 硫酸浸出浓缩结晶法

在硫酸浸出浓缩结晶法方面,以羰基镍丸为原

料,2019年建立35 kt/a 高端结晶硫酸镍生产线。取得突破的技术包括镍丸高效酸溶解技术、浓缩结晶技术。尚需解决的关键技术难题为原料成本高,需要进口含硫镍丸。

4.5 羰基精炼法

在羰基精炼法方面,以水碎镍合金为原料,2003年开发500 t/a 高压羰基法精炼镍试验线,2008—2019年建设10 kt/a 羰基镍生产线。取得突破的技术包括水碎铜镍合金颗粒制备技术、CO 气体净化技术、中压连续碳化合成技术及其配套装备、连续精馏分离镍铁技术、镍粉连续热分解技术、镍丸长周期连续生长技术及其配套装备。尚需解决的关键技术难题包括规模偏小、羰基镍加工成本高;高活性、高品位羰基镍原料低成本制备;镍丸、含硫镍丸、镍铁丸、镍粉、镍铁粉低成本制备。

4.6 氯化浸出电积精炼法和氯化浸出萃取净化电积精炼法

氯化浸出电积精炼法以高镍硫或硫化镍精矿为原料。依托国家“七五”、“八五”、“九五”科研攻关项目,1991年,该方法用于镍电解净化铜渣氯气浸出项目,2005年,用于4 kt/a 不溶阳极电积钴精炼项目。取得突破的技术包括氯气浸出技术、氯化体系不溶阳极电积镍技术。氯化浸出萃取净化电积精炼法尚需解决的关键技术难题包括氯化电积槽;氯气分离回收干燥存储;氯气浸出高效回用;浸出液低成本高效净化;强腐蚀介质的高效防腐技术;作业环境废气治理;废水治理。

4.7 高压氢还原法

高压氢还原法以硫酸镍溶液为原料,依托国家“六五”、“七五”、“八五”科研攻关项目,建立2 kt/a 镍粉、镍块生产线,1988年投产,1989年停产,后拆除。取得突破的技术包括水电解制氢气技术、高温高压氢气还原镍粉技术。

4.8 硝酸浸出热分解萃取净化精炼法

在硝酸浸出热分解萃取净化精炼法方面,以低镍硫为原料进行半工业试验,这是金川集团“十三五”重大科技攻关专项。取得突破的技术包括硝酸浸出低镍硫、硝酸铁热分解除铁、镍铜钴硝酸盐喷雾热分解、萃取分离镍钴铜及深度除杂技术、硝酸再生技术、镍钴铜电积技术。尚需解决的关键技术难题包括低镍硫硝酸浸出、硝酸铁高效热分解除铁,镍铜钴硝酸盐喷雾热分解;萃取分离镍钴铜及深度除杂

技术;氮氧化物高效回收及硝酸再生技术;镍钴铜电积技术;浸出液低成本高效净化;强腐蚀介质的高效防腐技术;作业环境废气治理,高效热分解成套装备技术;废水治理。

5 结束语

综上所述,镍精炼工艺技术取得了重要进展,各主要镍精炼工艺技术均有优缺点。尽管各主要镍精炼工艺升级改造均存在亟待解决的关键技术难题,但是可以得出以下结论:

1)从传统可溶阳极电解精炼法向硫酸浸出萃取分离电积精炼法或浓缩结晶法、氯化浸出萃取净化电积精炼法和羰基精炼法三大方向发展是镍精炼技术发展的主流方向和趋势^[8-10,24-25]。羰基精炼法由于选择性最高、工艺流程最短、最容易实现自动化、环境最友好,节能降耗显著,实现了冶金材料制备一体化、能够直接生产性能各异的镍粉和镍铁粉、包覆粉、镍丸、含硫镍丸、镍铁丸等镍产品以及高端镍盐产品,关键技术均已突破,是大型镍精炼企业镍精炼工艺改进的最优先方向。

2)传统镍精炼工艺改进的最佳选择是在继续完善羰基法精炼镍技术的基础上,应用中低压羰基法精炼镍技术逐步替代传统镍精炼工艺,实现镍精炼产业转型升级和高质量发展目标,实现镍冶金材料低成本一体化制备和节能降耗,镍产品多样化和高端化。

[参考文献]

- [1] 何焕华,蔡乔方.中国镍钴冶金[M].北京:冶金工业出版社,2009.
- [2] 何焕华.世界镍工业现状及发展趋势[J].有色冶炼,2001,30(6):1-3.
- [3] 贾露萍.镍的现状与展望[J].有色设备,2018,33(6):17-20.
- [4] 潘建,田宏宇,朱德庆,等.镍矿资源供需分析及红土镍矿开发利用现状[C]//2019年镍产业发展高峰论坛暨 APOL 年会会刊:22-31.
- [5] 余良晖.国内外镍资源供需格局分析[J].矿产保护与利用,2019,39(1):155-162.
- [6] 马琼.铜镍硫化矿冶金过程的铜镍分离与精炼方法探究[J].甘肃冶金,2012,34(2):40-43.
- [7] 帅国权.金川有色金属公司镍冶金技术进步及发展趋势[J].有色冶炼,1999,28(S1):10-11.

- [8] 帅国权,顾凌霄. 论用氯化冶金技术改造镍精炼工艺的必要性[J]. 有色冶炼,1998,27(9):38-39.
- [9] 黄振华. 浅谈金川高冰镍传统精炼工艺技改方案和镍产品结构调整[J]. 矿冶,2000,9(4):56-61.
- [10] 张广立. 金川镍精炼改造方案综述[J]. 有色冶炼,2002(5):9-11.
- [11] L. G. Wiseman,王永慧. 国际镍公司铜崖镍精炼厂[J]. 有色冶炼,1992,(2):6-14.
- [12] 柳学全,方建锋,黄乃红,等. 国内外羰基镍技术进展及市场展望[J]. 粉末冶金工业,2003,13(3):10-13.
- [13] 屈子梅,侯开太. 我国羰基镍粉末工业的发展[J]. 四川冶金,1995(4):62-66.
- [14] 屈子梅. 我国羰基镍工业的技术进步[J]. 粉末冶金工业,2003,13(1):15-20.
- [15] 屈子梅. 羰基法生产纳米镍粉[J]. 粉末冶金工业,2003,13(5):16-19.
- [16] 孟庆伟. 氢氧化镍制备羰基镍粉技术及工业化应用[D]. 长春:长春工业大学,2016.
- [17] 黄振华,陈廷扬,詹慧芳. 阜康冶炼厂高冰镍精炼工艺的研究与生产实践[J]. 新疆有色金属,1997(3):25-32.
- [18] 陈廷扬. 阜康冶炼厂镍钴提取工艺及生产实践[J]. 有色冶炼,1999,28(4):1-8.
- [19] 黄振华,林江顺,王忠,等. 对我国电镍生产工艺的分析与改进研究[J]. 有色金属(冶炼部分),2013(6):1-5.
- [20] 滕荣厚,赵宝生. 羰基法精炼镍及安全环保[M]. 北京:冶金工业出版社,2017.
- [21] 赵祥麟. 氯化精炼工艺在金川湿法冶金中的应用前景[J]. 有色冶炼,1999,28(S1):106-108.
- [22] 李尚勇,李继斌. 金川镍电解液存在问题的探讨[J]. 有色冶炼,1999,28(S1):109-110.
- [23] 冯德茂,陈胜利,李娟. 金川有色金属公司镍电解精炼最新进展[J]. 有色冶炼,1999,28(S1):32-33.
- [24] 滕荣厚. 我国羰基法精炼镍技术的发展方向[J]. 中国有色冶金,2006,35(3):17-23.
- [25] 滕荣厚,柳学全,黄乃红,等. 根据我国镍资源特点选择优化羰基法精炼镍工艺[J]. 粉末冶金工业,2006,6(3):30-38.

(上接第3页)

4 结束语

在碳中和的终极场景下,对于要逐步从“基荷电源”走向“调峰电源”的煤电而言,采用更加清洁的技术和更加清洁的燃煤规则,走出一条健康的“去”路,是通往实现“双碳”目标的重要选择。

[参考文献]

[1] 中国电力企业联合会. 2020—2021 年度全国电力供需

形势分析预测报告[R/OL]. [2021-02-02]. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-293198>.

[2] 国际环保组织绿色和平. 独家解读 | 2020 年煤电核准热潮不可在“十四五”期间重演[EB/OL]. [2021-03-30]. <https://weibo.com/ttarticle/p/show?id=2309404620364503449953>.

[3] 马维辉. “只要是烧煤的都必须关停”! 郑州“火电围城”治理阵痛[N/OL]. 华夏时报,2019-06-20. <http://finance.sina.com.cn/roll/2019-06-20/doc-ihytcerk-8148135.shtml>.