

# 红土镍矿火法冶炼制备高镍硫工艺及关键设备研发方向展望

许欣

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

**[摘要]** 近年来在全球新能源汽车市场持续高速增长叠加动力电池高镍化趋势的双重影响下,高镍硫作为电池级硫酸镍的重要原料备受关注。本文介绍了两种主流的红土镍矿火法冶炼制备高镍硫工艺,分析了目前选用的冶金炉窑存在的问题,并提出了解决方案。中国恩菲工程技术有限公司以底吹熔池熔炼及侧吹浸没燃烧熔池熔炼这两项拥有自主知识产权的专利技术为基础,结合多年的生产实践经验,开发设计了针对由镍铁制备镍硫的复合硫化吹炼炉及由硫化焙砂制备镍硫的侧吹还原炉,本文详细介绍了两种炉型的结构特点和应用优势。

**[关键词]** 红土镍矿; 火法冶炼; 高镍硫; 复合硫化吹炼炉; 侧吹还原炉

**[中图分类号]** TF815 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2022)05-0028-05

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2022.05.007

## 1 行业背景

随着全球能源形势日趋紧张,世界各国政府出台各种扶持鼓励使用清洁能源政策,大力推动新能源汽车发展,我国在出台各项新能源汽车购置优惠政策的同时,颁布了一系列更加严格的碳排放标准。《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》提出,到2025年,我国新能源汽车新车销量占全部新车销售总量的20%左右。欧洲各国相继制定了相关规划,法国、德国计划在2030年逐步淘汰燃油版汽车,英国计划到2040年禁止销售燃油版汽车。

新能源汽车以电动汽车为主,新能源汽车需求的高速增长带动了电池的爆发性发展。汽车动力电池以磷酸铁锂电池(LFP)、镍钴锰三元锂电池(NCM)、镍钴铝三元锂电池(NCA)为主<sup>[1-2]</sup>,目前市场上应用较多的为生产成本更低、安全性能更稳定的磷酸铁锂电池,但高镍化三元锂电池以其高能量密度优势成为未来发展的主要方向<sup>[3-4]</sup>。

作为制备三元电池重要原料来源之一的硫酸镍在全球新能源汽车行业的蓬勃发展叠加三元电池高镍化趋势下,需求大幅上涨。彭博新能源财经(BNEF)预计2040年全球电动乘用车销量将达5600万辆,由此预测将拉动1484万t硫酸镍需求。对应不断扩大的需求,硫酸镍供给端不能满足未来的需求<sup>[5]</sup>,2020年全球硫酸镍产能88万t,上海有色金属网(SMM)数据,2020年中国硫酸镍产量64万t。

硫酸镍的制备因镍原材料种类的不同而不同,传统的硫酸镍生产工艺主要是通过硫化镍矿火法冶炼生产高镍硫再采用湿法工艺生产硫酸镍<sup>[6]</sup>。经过长期开采后,近年来硫化镍矿的资源储量、开采条件、矿石品位等方面都逐渐变差,硫化镍矿产量呈下降趋势,与此相对的是红土镍矿供应大幅提升。据美国地质调查局(USGS)数据,2020年全球镍储量为9400万t,其中红土镍矿占60%,硫化镍矿占40%。因此,近年来以红土镍矿为原料通过火法冶炼制备高镍硫进而制成硫酸镍<sup>[7-8]</sup>,或以湿法冶炼工艺制备镍的中间品进而制成硫酸镍,成为解决硫化镍矿供给不足的方向<sup>[9]</sup>。

在如此大环境的综合影响下,近年来中国恩菲针对不同原料及具体项目需求,火法冶炼工艺与湿法冶炼工艺并用,开发出了数条不同的围绕电池级硫酸镍制备的工艺路线。在诸多不同的工艺路线

**[收稿日期]** 2022-06-05

**[作者简介]** 许欣(1983—),女,河北唐山人,高级工程师,硕士,主要从事有色冶金炉窑研发设计工作。

**[引用格式]** 许欣.红土镍矿火法冶炼制备高镍硫工艺及关键设备研发方向[J].有色设备,2022,36(4):28-32.

中,高镍锆是十分重要的中间产品,可以通过高镍锆完成电解镍、镍铁、硫酸镍之间的转换,有利于根据市场需求灵活调整。本文重点介绍针对红土镍矿采用火法冶炼工艺制备高镍锆段。

## 2 现有技术路线及设备选择

### 2.1 镍铁制备高镍锆

红土镍矿制备镍铁工艺(RKEF)已相对成熟<sup>[10-11]</sup>,并已取得了广泛的生产应用,但目前由镍铁制备高镍锆工艺的相关研究较少,工业化实践仅见法国埃赫曼镍业的新喀里多尼亚SLN冶炼厂有相关报道,其采用的主工艺路线:前序RKEF工段→镍铁→转炉硫化→转炉吹炼→高镍锆。

硫化作业和吹炼作业分别在两台PS转炉中完成,镍铁合金和石英石等熔剂从硫化转炉炉口加入,熔剂的加入能够降低硫化过程中的熔炼温度,同时使部分铁进行氧化造渣。液态硫磺从炉体侧部的硫化喷嘴鼓入,大部分的镍、钴以及小部分铁与硫磺发生硫化反应,生成金属化中镍锆。空气从炉体侧部风口鼓入,约70%~85%的铁与鼓入的空气发生氧化反应,并与石英石造渣生成硫化转炉渣。硫化产出的中镍锆经包子倒运加入吹炼转炉,同时从炉口加入冷料、石英石熔剂等,空气从炉体侧部风口鼓入,中镍锆中超过90%的铁与鼓入的空气发生氧化反应,并与石英石造渣生成吹炼转炉渣。由于吹炼程度较深,少量镍和钴也被氧化进入到渣中,需要进一步回收。大部分的镍和钴保留在锆相中产出高镍锆。

这种分段式作业模式及PS转炉本身的结构特点使该技术存在以下缺点:

(1)硫化转炉上,液体硫磺通过转炉风口送入,这就造成送入硫磺位置与转炉送风位置高度一样,硫磺送入位置过高,单体硫易于从熔池中快速逸散,硫有效利用率降低。

(2)所有加料、出渣、排镍锆、出烟均由PS转炉炉口完成,炉体需要频繁转动,送风时率不高,作业率低、炉口寿命不长。

(3)侧吹风需经炉身上风箱再被送入侧吹风口,风口压力不高,容易堵塞,需要人工或者借助捅风眼机对风口进行清理,劳动强度大。

(4)硫化和吹炼在两台PS转炉内分开完成,包子的倒运过程增加了热量损失,同时造成低浓度

SO<sub>2</sub>的低空逸散,车间里环保条件难以保证。熔体倒运过程中也存在安全隐患。

(5)转炉炉口漏风大,烟气含SO<sub>2</sub>浓度低,烟气处理成本高。

(6)将硫化和吹炼过程放在两台转炉中,占地面积大、设备成本高、厂房建设投资大。

### 2.2 镍矿制备高镍锆

印尼是世界红土镍矿资源大国,2014年印尼政府禁止出口原矿,各国公司在当地建厂进行红土镍矿的冶炼。印尼淡水河谷冶炼厂采用类似RKEF工艺由红土镍矿制备高镍锆,其采用的主工艺流程:红土镍矿→干燥窑干燥→回转窑预还原硫化→电炉还原→转炉吹炼→高镍锆。

采用回转窑对红土镍湿矿进行干燥,在干燥回转窑中配加高硫燃料,初步硫化,所得干燥镍矿进入预还原回转窑,在预还原回转窑中继续以高硫物料作为燃料,并将液体硫磺喷在回转窑的焙砂出口处的中间仓,红土镍矿在低温焙烧处理过程中,发生有价金属的还原硫化反应,将镍氧化物、铁氧化物转化为金属硫化物。回转窑得到的热焙砂送入电炉进行还原冶炼,硫化焙砂中残留的还原剂和硫化剂将部分镍和铁还原硫化成金属硫化物,同时也有部分镍和铁被直接还原成金属相,最终完成渣-锆分离,产出低镍锆,再进入转炉吹炼,造渣去铁得到高镍锆。该流程类似RKEF工艺,但其在回转窑中加入的硫化剂使电炉的产品为低镍锆,而不是镍铁。

该工艺路线中关键设备为电炉,其用能形式使该技术存在以下缺点:

(1)电炉通过电极将电能转化为热能为熔池供热,该供热方式使热量主要集中在电极区域,容易出现熔池热量分布不均的情况。在实际生产过程中,也存在炉体四壁及炉底出现较厚冻结的情况,带来排放困难、实际炉床面积变小等问题。

(2)电炉整个熔池较平静,靠电流给熔池带来的搅动作业较小,熔池动力学条件差,还原剂易浮于熔池表面,还原效果不尽理想。

(3)在东南亚国家,矿区普遍存在缺电的情况,高昂的电费更是企业运营面临的一个难题。因此,开发一种新的冶炼设备,以煤或天然气代替电,在矿区具有非常广阔的市场前景和实际应用价值。

### 3 新技术路线及关键设备研发

#### 3.1 复合作业硫化吹炼炉

中国恩菲开发设计了复合作业硫化吹炼炉,由镍铁周期作业制备高镍锬。复合作业硫化吹炼炉内作业周期分为硫化期和吹炼期,镍铁与石英石、焦炭等配料后经加料口加入炉内,镍铁与喷入熔体的液体硫磺进行硫化反应,同时鼓入空气,使部分铁氧化脱除,与加入的石英石造渣,焦炭燃烧维持硫化过程热平衡,硫化期产出的硫化渣分阶段经放渣口排出。硫化期结束后,向熔体内鼓入空气,使铁进一步氧化脱除,与加入的石英石造渣,吹炼完成后吹炼渣留在炉内进入下一周期硫化期作业,高镍锬经镍锬口打眼放出。

该工艺中用一台复合作业硫化吹炼炉取代两台PS转炉,可减少设备成本、维护成本,降低整个厂房占地及投资。同时将SLN冶炼厂必须在两台PS转炉中发生的反应集中在一台炉子内完成,取消了中间包子倒运环节,不再有包子倒运存在的环境、安全和显热浪费问题。

复合作业硫化吹炼炉主体炉型为卧式回转炉,主要由硫磺喷枪、侧吹风口、出烟口、下料口、镍锬放出口、放渣口、燃烧器、传动装置等部件组成,具有以下结构特点:

(1) 硫磺送入位置与风口送入位置存在高差。硫磺喷枪位于炉体底部,送入角度正对炉体中心。侧吹风口位于炉体侧部,送入位置较硫磺送入位置高,风口水平布置。如此设计可将硫磺在更靠近底部的位置直接送入金属层,可以更好地搅动熔体,优化液体硫磺在熔体内的分布,延长硫磺在金属层内滞留时间长,使硫化反应更加充分,提高硫利用率;同时送硫磺与送风位置高差的存在,使得硫化反应可先于吹炼反应发生。特别是在开炉初期或者进入下一炉期时留底料不足的情况下,熔池内金属层不高,此时可转动炉体,侧吹风口转出液面不送风,先经过底部硫磺枪将液体硫磺送入熔池,镍锬的生成可以大大降低镍铁熔池熔点,再将侧吹风口转入熔池送风,避免熔池在高熔点下被鼓入的大量空气直接将熔池吹凉、冻结的情况发生。

(2) 在不转动炉体的情况下,镍铁可从顶部下料口加入,渣可以从放渣口溢流连续排出,高镍锬可从镍锬放出口打眼放出,烟气可从出烟口持续排出。

这一系列的操作均不用转动炉体,达到连续下料、连续送风、连续出料的目的,更大程度上实现连续作业,工艺风更稳定,密封条件更好,环保条件得以改善。

(3) 侧吹风不是由风箱经侧吹风口送入,而是由每个独立的金属软管经侧吹风口送入,单个风口送风压力提高,可实现风口的自清洁,取消捅风眼机。

(4) 出烟口本身较PS转炉炉口要小,且出烟口上部与烟罩连接紧密,不再需要频繁转炉,密封性能大大提升,漏风小,烟气量小,烟气含SO<sub>2</sub>浓度高,可降低烟气处理系统成本。

在某厂工业化试验中试用该炉型,试验初期采用周期作业,镍铁与石英石、焦炭等配料后经下料口加入炉内。液体硫磺经炉身底部硫磺喷枪送入熔池中,硫化期反应风通过炉身侧部风口鼓入熔池中,镍铁与喷入熔池的液体硫磺进行硫化反应,生成中品味镍锬,不排出,留底进入吹炼期。侧吹风口鼓入的空气使部分铁氧化脱除,与加入的石英石造渣,产出硫化渣,硫化期产出的硫化渣分阶段由放渣口排入进入贫化电炉,进一步贫化。硫化期结束后,硫磺喷枪停止送硫磺,切换为通过热蒸汽;侧吹风口继续向熔体内鼓入空气,吹炼期继续送风吹炼,使铁进一步氧化脱除,与加入的石英石造渣,吹炼完成后吹炼渣留在炉内进入下一周期硫化期作业,通过镍锬放出口排出高镍锬产品。硫化期和吹炼期产出的烟气经出烟口排出,经喷雾冷却、电收尘后送脱硫,喷雾冷却烟尘返回复合作业硫化吹炼炉。

试验过程中,复合作业硫化吹炼炉内采用了先硫化再吹炼的周期作业,同时也在摸索连续作业的可能,生产过程中间不一定生成中品味镍锬,而是边硫化、边吹炼、溢流放渣的连续作业,直到直接排放高镍锬。

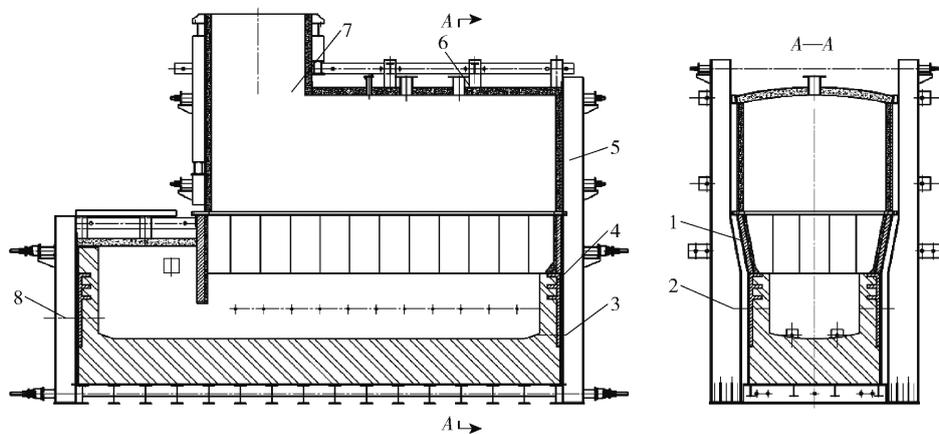
#### 3.2 侧吹还原炉

中国恩菲将侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术(SSC)引入红土矿制备高镍锬工艺中,用侧吹还原炉替代电炉<sup>[12]</sup>,根据项目所在地资源情况,采用粉煤或者天然气作为燃料,解决用电问题。将预还原回转窑产出的焙砂加入侧吹还原炉中,物料及还原剂在熔池中快速完成传质、传热,生成低镍锬及熔炼渣,低镍锬从排放口放出送转炉吹炼,进一步除铁,得到产品高镍锬。

侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术是由中国恩菲开发的具有自主知识产权的一种强化熔池熔炼技术<sup>[13]</sup>,该技术最初是利用侧吹炉替代鼓风机还原液态高铅渣和处理锌浸渣,目前已发展成为先进成熟的熔池熔炼技术,在铅、锑、锡、铜等金属氧化物料处理、危险固体废物无害化处理等领域推进应用。在红土镍矿制备高镍钨工艺流程中,恩菲研究院采用侧吹浸

没燃烧技术进行了试验室试验及扩大试验,对硫化剂、渣型、制备镍钨的反应条件等进行了机理研究,对渣型选择、冶炼时间、有价金属硫化率、硫的利用率等关键工艺参数进行了摸索。

侧吹还原炉主要有侧吹喷枪、骨架、出烟口、焙砂加入口、镍钨放出口、放渣口、水套、炉壳等部件组成,结构形式如图1所示。



1. 炉壳 2. 侧吹喷枪 3. 镍钨放出口 4. 水套 5. 骨架 6. 焙砂加入口 7. 出烟口 8. 放渣口

图1 侧吹还原炉结构图

侧吹还原炉用能方式与电炉存在着本质的不同,可从根本上解决电炉难以应对矿区电力供应缺乏的问题,同时降低生产成本,另外相较电炉,侧吹还原炉仍有以下优点:

(1)反应动力学条件更强。侧吹还原炉的核心部件为侧吹喷枪,其布置位置在炉身两侧,直接插入熔池。喷枪向熔池高速喷入富氧空气和燃料(天然气或粉煤),为熔池带来激烈的搅动,硫化焙砂及还原剂能在熔体内迅速完成反应。

(2)热力学条件更优。燃料通过喷枪直接鼓入熔池,在熔池内燃烧,向熔池直接供热,热利用率更高。在熔池搅动作用下,熔池内温度场更加均匀,不会出现类似电炉内电极区局部高温,炉体四壁却存在冻结的情况。

(3)炉内气氛更易控。除了调整加入还原剂的量,还可调整鼓入熔池富氧风的富氧浓度,进而更加灵活的控制炉内还原气氛。

以上两种炉型不是互相替代的关系,而分别针对不同的高镍钨制备工艺路线进行的研发。复合作业硫化吹炼炉可用于现有RKEF工艺路线后,用已有的镍铁产品生产高镍钨,该炉型本身投资低,其运行不影响现有生产线,生产企业可根据镍铁及高镍

钨市场的波动,灵活调整最终产品。复合作业硫化吹炼炉对投资较小的改造项目,有显著的优势。侧吹还原炉的开发则主要解决印尼新建的红土镍矿制备高镍钨项目中突出的电炉电耗问题,侧吹还原炉较传统电炉更好的动力学条件,更低的电耗,可为未来高镍钨制备项目提供新的设备选型思路。

## 4 技术展望

近年来政府对新能源汽车购置的优惠政策在逐渐减退,但碳排放的要求在逐步提升,为在激烈的市场竞争中立足,必然要向技术要利润。未来技术的发展在追求安全、高效的前提下,要更重视环保和成本。

复合作业硫化吹炼炉较PS转炉有明显优越的环保性能,有利于未来在市场应用中推广,与其配套的液体硫磺的喷吹技术尚需进一步完善,延长使用寿命,进一步提升作业率。侧吹还原炉虽然能解决电炉的电耗问题,但因熔池搅动激烈,不利于渣-钨分离。中国恩菲在侧吹浸没燃烧基础上,提出射流熔炼-电热深度还原(Blowing Reduction Electric Furnace,简称“BREF”)技术,集合了SSC和电炉技术的优势,既能高效的完成熔池内的反应又能保证渣-

铕的沉降分离,有广阔的市场应用前景。

[参考文献]

- [1] 任海. 中国新能源汽车用锂电池产业现状及发展趋势[J]. 当代化工研究, 2021(6):14-15.
- [2] 陈文博, 颜健, 孟凌杰, 等. 电动汽车动力锂电池火灾危险性的研究进展[J]. 电源技术, 2021, 45(2):270-273.
- [3] 张剑桥, 刘帅, 赵甜梦. 锂电池高镍三元材料的研究进展分析[J]. 江西化工, 2020(4):87-88.
- [4] 刘兴江. 中国锂电池技术与产业发展 20 年[J]. 电源技术, 2018, 42(12):1769-1773.
- [5] 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.
- [6] 王亚秦, 付海阔. 工业硫酸镍生产技术进展[J]. 化工进展, 2015, 34(8):3085-3104.
- [7] 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.
- [8] 长江有色网. 华友、盛屯及青山红土镍矿冶炼高冰镍技术及前景简析链接: <https://alu.ccmn.cn/news/ZX003/202103/8525e26a54e74336a53a0a000fe03195.html>
- [9] 任鑫, 陈其慎, 邢佳韵, 等. 2021—2035 年全球硫酸镍供需形势分析[J]. 中国矿业, 2021, 30(9):1-7.
- [10] 赵景富. 镍红土矿火法冶金工艺现状及展望[J]. 中国有色冶金, 2017, 46(1):26-29.
- [11] 马明生. 红土镍矿火法冶炼工艺现状[J]. 中国有色冶金, 2013, 42(5):57-60.
- [12] 陈学刚. 侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术的现状与持续发展[J]. 中国有色冶金, 2017, 46(1):5-10.
- [13] 陈学刚. 侧吹浸没燃烧熔炼技术(SSC)在红土镍矿领域的应用及展望[J]. 中国有色冶金, 2018, 47(6):1-7.

## Research and Development Direction of High Nickel Matte Process and Key Equipment for Pyrometallurgical Preparation of Laterite Nickel Ore

XU Xin

**Abstract:** In recent years, under the dual influence of the continuous high growth of the global new energy vehicle market and the trend of high nickel for power batteries, high nickel matte has attracted much attention as an important raw material for battery-grade nickel sulfate. In this paper, two mainstream pyro smelting processes of laterite nickel ore for the preparation of high nickel matte are introduced, the problems of the currently selected metallurgical kilns are analyzed, and solutions are proposed. Based on the two patented technologies of Bottom-Blowing Smelting Process and Side-Submerged Combustion Smelting Process with independent intellectual property rights, China ENFI Engineering & Technology Co., Ltd. has developed and designed the compound sulfide blowing furnace for the preparation of nickel matte from ferron and the side-blowing reduction furnace for the preparation of nickel matte from sulfide roasted sand. The structural features and application advantages of the two furnace types are introduced in detail in this paper.

**Key words:** laterite nickel ore; pyrometallurgical smelting; high nickel matte; compound sulfide blowing furnace; side-blowing reduction furnace

