

引用格式:陆金忠,金鑫.侧吹一步炼镍技术为镍火法冶炼厂带来的机遇[J].有色设备,2025,39(1):50-54.

LU Jinzhong, JIN Xin. Opportunities brought by side-blown one-step nickel smelting technology to nickel pyrometallurgical plants[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(1): 50-54.

# 侧吹一步炼镍技术为镍火法冶炼厂带来的机遇

陆金忠<sup>1</sup>, 金鑫<sup>2</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 盛屯矿业集团股份有限公司, 福建 厦门 361000)

**[摘要]** 随着盛屯矿业在国内贵州福泉一步炼镍系统(NDS)的建成和投产,炉渣高效贫化成为重点关注的热点。在镍火法冶炼领域,有效解决炉渣贫化问题以保障金属回收率,是衡量镍冶炼工艺先进性的核心指标之一。盛屯矿业在贵州的项目初期确定采用侧吹一步炼镍工艺时,研发与当前冶炼条件相匹配的渣贫化装置及工艺控制技术。项目投产后,尽管熔炼处理的原料与设计预期存在显著偏差,如硫化镍精矿、含镍杂料、含硫低于10%的低硫镍合金等,仍产出含镍铜总量大于50%~60%的中高镍硫,冶炼炉渣通过新渣贫化装置处理后,炉渣含镍仍能够控制在0.2%以下,实现了显著的炉渣贫化效果。此次炉渣贫化装置的突破性进展,将为世界镍火法冶炼缩短工艺流程、增强系统原料的适应性、提高金属回收率等方面带来重大突破和机遇。

**[关键词]** 镍火法冶炼;侧吹一步炼镍;渣贫化新装置;短流程;低能耗;金属回收率

**[中图分类号]** TF815 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)01-0050-05

**DOI:**10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.01.006

## 0 前言

盛屯矿业在贵州福泉地区建设的镍精矿火冶炼系统已于2024年6月投产,该系统设计年处理22万t含镍原料,产品为高镍硫和二次中镍硫,年产镍金属量约为2万t。本系统采用了中国恩菲工程技术有限公司的专利技术——“一步炼镍系统及一步炼镍方法”以及“一步炼镍装置”。在工艺流程中,硫化镍精矿经精确配料后加入富氧侧吹炉进行熔炼,直接产出高镍硫;随后,熔炼过程中产生的渣经过新型高效渣贫化炉进行贫化处理,最终产出含Ni量低于0.2%的弃渣。

新型炉渣贫化技术的应用,为镍火法冶炼技术提升带来了重大机遇。

## 1 国内外镍火法冶炼厂现状

### 1.1 冶炼厂生产概述

#### 1.1.1 国内现状

国内硫化镍矿主要分布在甘肃金川、新疆富蕴

和哈密、青海夏日哈木、吉林磐石、云南金平、四川丹巴等地。然而,随着开采与利用,部分地区的硫化镍矿资源已呈现出枯竭态势,例如吉林磐石、云南金平以及四川丹巴等地。

现存的镍冶炼厂有金川集团、吉恩镍业、富蕴喀拉通克、中和镍业(前身为成都电冶厂)。部分冶炼厂如哈密的众鑫冶炼厂、云南金平冶炼厂以及金川的电炉炼镍系统,由于多种因素影响,已相继关停。盛屯能源金属化学(贵州)有限公司新能源材料项目已完成建设并投产。广西格派新能源电池材料一体化项目正处于待建或暂缓阶段,该项目规划分为两期实施,其中一期设计年产能为2万t,远期规划年产能将达到4万t。

金川集团目前有3套硫化铜镍精矿生产高镍硫的火法冶炼系统。①镍闪速熔炼系统于1992年投产,采用闪速炉与渣贫化电炉合二为一的合成式闪速炉熔炼技术,直接生产弃渣。低镍硫P-S转炉吹炼产出高镍硫,转炉渣电炉贫化处理。设计规模为年处理35万t铜镍混合精矿,产出高镍硫含镍量

**[收稿日期]** 2024-10-16

**[第一作者]** 陆金忠(1969—),男,甘肃永昌人,正高级工程师,主要从事重贵有色金属设计、咨询、生产相关工作,现任中国恩菲工程技术有限公司冶金化工事业部总工程师。

22 万 t/a, 镍硫含镍 28%, 炉渣含镍 0.25%, 反应塔区域和贫化区均涉及加入还原剂的设施, 系统设计符合基本原理, 投产前期迅速实现达产达标。1998 年首次冷修后, 通过改进精矿喷嘴及配套系统, 冶炼能力和强度大幅度提升, 精矿处理量超过了 80 万 t/a, 高镍硫含镍量提升至 6 万 t/a, 对炉渣贫化进行了多方位优化提升, 炉渣含镍指标上升至 0.4% ~ 0.5%。②富氧顶吹镍熔炼系统于 2008 年投产, 采用了富氧顶吹浸没镍熔炼系统(JAE 技术), 炉渣进入沉降电炉贫化生产弃渣。低镍硫吹炼及吹炼渣贫化与闪速熔炼系统相同, 系统历经投产、达产、优化提升改造, 均具备了年产 6 万 t 金属镍含量高镍硫的产能。然而, 熔炼弃渣含镍指标在 0.4% ~ 0.5%。③2024 年新投产的、处理高 MgO 硫化镍矿原料的侧吹熔炼系统, 其采用了熔炼、还原和贫化合成的一体炉型, 受镍火法冶炼过程中金属在镍硫和炉渣中的分配系数影响, 投产后炉渣含有价金属指标也未达到预期的效果。

吉恩镍业于 2009 年引进并实施了与金川集团 2008 年投产相同的富氧顶吹浸没镍熔炼系统, 目前受到原料结构的制约, 镍火法冶炼系统也在寻找升级或替代方案, 生产期间熔炼炉渣含镍在 0.3% ~ 0.35% 的范围内。

新疆有色集团所属的喀拉通克冶炼厂, 其富氧侧吹熔炼系统处理含镍原料, 由于原料含镍品位相对较低, 镍硫含镍品位 16% 左右, 同时炉渣含镍低于 0.2%。对于总体回收率而言, 该系统处于中等水平。

盛屯矿业集团在四川成都(原成都电冶厂)投入运行了 1 台侧吹熔炼炉, 用于处理含镍原料。该熔炼炉已经生产超过 3 年, 炉渣含镍指标在 0.4% 以上。

### 1.1.2 国外现状

在国际镍冶炼领域, 镍冶炼厂主要有澳大利亚的卡尔古利、俄罗斯的诺里尔斯克、博茨瓦纳的 BCL(暂已关闭)以及加拿大国际镍公司铜崖冶炼厂的 INCO 闪速熔炼, 吹炼采用了 P-S 转炉, 炉渣贫化几乎都采用了电炉贫化技术。

芬兰哈贾伐尔塔厂在 1995 年对传统奥托昆普传统闪速熔炼工艺进行了创新性改进, 开发了 DON 工艺。该工艺显著特点在于采用了闪速炉直接生产镍硫, 从而淘汰了 P-S 转炉。在炉渣贫化方面, 该

厂采用了特殊设计的电炉生产含硫 7% ~ 8% 的金属化镍硫, 炉渣含镍指标在 0.3% 以上。

## 1.2 现有工艺主要问题分析

综合国内外镍火法冶炼系统的现状, 其主要的理念是基于熔炼采用鼓风机、电炉、瓦纽科夫炉生产低品位镍硫的基础上发展起来的。该工艺具有显著特征: ①工艺自身产出镍硫品位较低; ②冶炼气氛以还原性气氛为主。因此, 镍等有价金属在炉渣中的损失占比较低, 金属回收率相应较高, 炉渣贫化技术与当时的冶炼技术相匹配, 形成了较为稳定的工艺体系。

随着闪速熔炼、熔池熔炼等强化冶炼技术引入硫化镍矿的火法冶炼, 处理量大幅提升、镍硫品位升高、处理原料含 MgO 升高, 均导致了镍火法冶炼炉渣中有价金属损失占比上升。这一变化使得炉渣贫化在镍火法冶炼系统中的问题愈发凸显, 炉渣贫化技术的研究与强化冶炼技术的同步发展产生了阶段性的脱节。因此, 需要炉渣贫化新技术和新装置, 以配合硫化镍矿的强化冶炼, 确保金属回收率指标的稳定。

目前, 硫化镍精矿的冶炼采用熔炼—P-S 转炉吹炼、转炉渣电炉贫化的传统工艺。相较于铅、铜冶炼工艺和技术的发展, 明显处于滞后状态。特别是在环保指标、能耗指标及碳排放要求日益严格的形势下, 镍火法冶炼工艺技术的升级显得更加突出和迫切。

## 2 镍火法冶炼新技术的尝试及探索

### 2.1 熔炼区域增加侧吹搅动

为进一步提升强化冶炼程度, 本研究在熔池区域增加侧吹喷枪, 用于喷吹煤粉等燃料或富氧空气, 显著提高了熔炼强度。例如, 在闪速熔炼炉的沉淀池增设侧吹枪, 以增强炉渣的还原效果; 在富氧顶吹浸没熔池熔炼过程中增加侧枪, 用来提高冶炼强度、提高氧气利用率及燃料的利用效率等。实践结果表明, 这些技术改进在提高金属回收率、降低能源消耗方面均取得了一些成效。

### 2.2 贫化电炉增加搅动装置

国内某镍冶炼厂熔池熔炼炉渣贫化配套的沉降电炉炉顶增设了天然气燃烧的浸没喷枪, 插入炉渣层进行搅动, 改善动力学条件。然而, 在实际应用中, 该技术改进面临多项挑战: ①由于受制于生产产

能大,试验装置受到局限;②贫化电炉宽度 4 500 mm 以上,宽度太大导致侧吹喷枪难以搅动和覆盖整个炉渣流经通道;③炉膛高度不超过 1 500 mm,熔体喷溅洗刷炉顶或粘结炉顶;④熔体搅动对电极的正常工作产生不利影响;⑤炉渣中  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  含量达到 6% ~ 8%,需要 3 t/h 左右的还原剂。由于上述因素的综合影响,上述试验未能取得突破性进展或达到预期效果。

随后,又进行了进一步的改进设计,在侧墙上增加了天然气燃烧搅动喷枪。然而,仍存在以下问题:①炉子宽度过大,导致喷枪无法彻底搅动;②还原剂仍不能有效加入和利用;③在各种工况下,喷枪的维护考虑不周全。

### 2.3 镍冶炼炉渣选矿方案

受铜冶炼炉渣选矿技术的启发,有研究人员尝试将选矿方式应用于镍冶炼炉渣的处理。具体操作为:将镍冶炼炉渣排入渣包进行缓冷,以备后续选矿试验。然而,对缓冷后的炉渣进行物相分析后发现,与铜冶炼炉渣显著不同,炉渣中的镍有 60% 以上是  $\text{NiO}$  或者是被  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  包裹的  $\text{Ni}_3\text{S}_2$ ,总量占比达到了 80% 以上,选矿的方法难以实现有效分离。

从镍冶炼的基本原理出发,可以明确镍在火法冶炼过程中,镍与铁的化学性质近似,在冶炼除铁造渣的过程中容易被氧化。此外,镍硫品位越高,炉渣中氧势就越高,镍被氧化损失就越多。因此,镍渣贫化主要在于还原。而电炉贫化过程熔体的搅动,是基于炉内电磁场和温差形成的熔体流动或搅动条件,缺乏强的动力学条件。

### 2.4 底吹炉技术在镍冶炼行业应用

底吹炉技术在镍冶炼行业应用包括 3 个方面。①在合金硫化硫化方面,采用底吹熔炼炉对浸出渣和二次合金进行硫化和吹炼,替代传统的转炉周期操作,不仅有效解决了环保问题,还显著降低了能耗,开启了底吹炉吹炼镍硫的先河。②采用底吹炉底吹枪浸没燃烧技术,用于熔化高镍硫冷料。③将侧吹炉熔炼技术引入二次镍精矿熔化浇铸阳极板,替代了反射炉处理二次镍精矿。

## 3 硫化镍精矿侧吹一步炼镍系统的诞生

### 3.1 技术背景

镍冶炼炉渣强化贫化技术的提出,源自于中国恩菲提出的硫化镍精矿采用侧吹炉熔炼直接产出高

镍硫,简称一步炼镍(NDS)技术,是一种镍精矿一步冶炼至高镍硫的英文(Nickle Direct Smelting)简写<sup>[1-2]</sup>。中国恩菲已取得了“一步炼镍系统及一步炼镍方法”和“一步炼镍装置”的发明专利。该技术的核心是强化冶炼条件下,通过熔炼直接生产高镍硫,炉渣强化贫化产出弃渣。

一步炼镍(NDS)技术可概括为:将硫化镍精矿、石英、无烟煤等物料通过配料后,加入富氧侧吹炉进行熔炼;产生的高镍硫流入保温炉进行保温或直接粒化,产出的熔炼渣进入新型贫化炉贫化;在渣贫化炉中,配入干燥后的硫化剂、石英和块煤,对熔炼渣进行还原、补硫、二次造渣和澄清分离;最终,产出的贫化低镍硫返回熔炼或单独吹炼回收 Co,含 Ni 低于 0.2% 的贫化渣粒化为弃渣。其中,炉渣贫化是一步炼镍技术的核心所在。

### 3.2 新型强化贫化装置研究

借鉴顶吹、底吹、侧吹等熔池熔炼/冶炼技术,在渣相或硫相形成强烈的熔体流动动力学条件,在瞬间完成传质传热过程。该技术突破传统静态贫化工艺的局限,渣贫化炉重点解决炉渣的动态高效还原、硫化和沉降分离,提高金属回收率,并对渣贫化技术进行创新和突破<sup>[1]</sup>。课题组对镍冶炼炉渣贫化也提出了“两段一体”的新型炉渣贫化装置,具体包括以下几个方面。

1) 贫化段:采用侧吹燃料喷枪对熔体形成强烈的搅动,不仅提供反应所需的温度和能量补偿,还确保了反应所需的动力学条件和热力学条件,为炉渣贫化提供动力学和热力学条件,加入适量的还原剂、硫化剂和熔剂进行还原,加入补硫剂二次造渣调整渣型。

2) 沉降段:通过电极补热,创造或维持较为平静的液面,为炉渣中被还原或硫化后的金属(或硫化物)有效沉降分离创造条件。在试验阶段,炉渣渣含 Ni 可降至 0.12%。

相较于传统渣贫化工艺,新的镍冶炼渣贫化工艺的关键在于贫化段增加侧吹还原手段,用来强化反应动力学条件,从而提高了反应效率和还原剂的利用率。

### 3.3 渣贫化炉装置设计要点

基于强制贫化的核心设计理念,新型渣贫化炉设贫化区与沉降区,各区设计要点如下。

#### 3.3.1 贫化区

1) 设天然气枪、煤粉枪、硫磺枪、富氧空气搅动

喷枪,喷枪为通用结构,可以实现在线切换和插拔功能。基本通道功能一致,通过插入某种枪就可实现相应功能,不使用时可以用风眼栓封堵。

2)受熔体剧烈冲刷侵蚀的影响,该区域设计为全水冷结构。控制合适的风眼高度及上部炉膛气相区高度,防止炉底冻结或熔体喷溅制约贫化区工况。通常,风眼/喷枪距离炉底高度不大于1 000 mm,上部气相区净空大于3 000 mm。

3)贫化区长度依据喷枪布置数量进行确定,宽度的设计则综合考虑喷枪的供气压力和流量,以满足基本的搅动和供热需求。

4)与沉降区之间设水冷隔墙,为沉降区创造良好的沉降环境。

5)沉降区设置事故处理排渣口,确保安全应急需求。

6)其他的主要包括加料口、二次风口、排烟口等布置,根据工艺配置进行重点考虑。

### 3.3.2 沉降区

1)根据计算结果合理选择变压器功率,并根据渣型选择电气制度(电压等级)。

2)合理控制镍钼层和渣层及气相空间高度,镍钼层不宜过高,以防止渗漏和冻结。

3)选择合适的电极直径,并控制电极间间距、电极与隔墙的距离、电极与渣口的距离、电极与侧墙之间的距离。

4)合理设计镍钼排放口的数量、大小、位置、高度、结构等。

5)合理确定炉渣排放口的高度、大小、数量及位置等。

6)设计合理的弹性炉体钢骨架结构、水冷结构、耐火材料配置和砖型等。

7)合理的加料口、观察孔的设置等。

以上设计要点旨在确保渣贫化炉的高效、稳定运行,实现渣贫化过程的优化与提升。

## 4 盛屯矿业一步炼镍项目应用

盛屯一步炼镍项目设计年处理22.5万t镍原料,为确保工艺的精确控制与优化,对主要设计原料、高镍钼及贫化炉渣的成分进行了系统分析。主要设计原料主要成分见表1,高镍钼主要成分见表2,贫化炉渣主要成分见表3。以下各表数据为后续工艺设计、参数调整及效率评估提供了数据支撑。

表1 原料主要成分

元素	Ni	Cu	Fe	Co	MgO	S
含量	10.83	3.50	30.70	0.31	12.00	24.80

表2 高镍钼主要成分

元素	Ni	Cu	Fe	Co	S
含量	54.65	17.00	3.15	0.60	23.40

表3 贫化炉渣主要成分

元素	Ni	Cu	Co
含量	0.25	0.22	0.16

盛屯矿业一步炼镍项目自投产后,实际熔炼处理的原料构成较为复杂,包括硫化镍精矿、高镍20%左右的硫酸镍杂料、含硫低于5%~10%的印尼低硫镍铁合金。产出含镍和铜量大于60%~75%的中高镍钼,冶炼炉渣通过新开发的渣贫化炉处理后,炉渣含镍仍能够控制在0.2%以下,取得了较好的炉渣贫化效果。这一成果不仅验证了整体设计理念的合理性,尤其是炉渣贫化装置的整体设计理念、设计参数选择等方面的正确性。

为提升资源利用率,渣贫化炉可以尝试生产金属化镍钼,以进一步降低炉渣中的有价金属含量。渣贫化炉在设计阶段已充分考虑此项措施,预计炉渣含镍有望降低至0.15%。

## 5 结语与展望

盛屯一步炼镍项目投产后所取得的显著成果,以及未来可期待的指标,不仅实现了短流程炼镍,更在金属回收率方面达到了优异水平。同时,为国内外镍火法冶炼行业带来了机遇与挑战。具体而言,该技术带来了以下显著优势:①对于含镍硫化矿而言,由于新型渣贫化炉保障了金属回收率,使得火法熔炼工艺可以直接生产湿法流程所需要的镍钼,而无需再进行镍钼的吹炼,显著缩短了工艺流程。②在造钼过程中,通过促使铁元素氧化并进入渣相,渣中氧化铁含量的增加有效稀释了渣中MgO含量,进而降低了冶炼温度,节约了能耗。③一步炼镍炉渣

贫化技术本质是炉渣中有价金属的还原和硫化,而镍氧化物的冶炼机理与炉渣贫化机理相同,因此,该技术也为镍红土矿的侧吹熔炼提供了有力的技术支持。

1)通过新型炉渣贫化技术的应用,国内外已生产的镍冶炼工厂可采用盛屯矿业的一步炼镍技术,对现有老厂及老工艺进行流程再造。实现短流程、连续炼镍生产,进而达到与盛屯矿业“一步炼镍”相似的绿色冶炼工厂。对于新建的镍冶炼工厂,建议采用进一步优化和升级的“一步炼镍技术”,该技术将为企业带来更显著的价值。

2)新型炉渣贫化技术的应用,不仅提升了冶炼效率,还拓展了工厂的原料结构,可协同处理含镍钴的污泥、合金等原料。

3)通过改进和升级后,可用于红土矿的还原和硫化。这为红土矿的高效利用提供了新的技术路径,有望推动镍冶炼行业的进一步发展。

#### [参考文献]

- [1] 陆金忠,吴玲,李晓霞.侧吹一步炼镍生产高镍硫的理念与思考[J].世界有色金属,2022(6):5-7.  
[2] 陈学刚,祁永峰.红土镍矿侧吹还原造硫熔炼试验研究[J].绿色矿冶,2023,39(1):33-39.

## Opportunities brought by side-blown one-step nickel smelting technology to nickel pyrometallurgical plants

LU Jinzhong<sup>1</sup>, JIN Xin<sup>2</sup>

(1. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China;

2. Shengtun Mining Group Co., Ltd., Xiamen 361000, China)

**Abstract:** With the completion and commissioning of Shengtun Mining's One-Step Nickel Smelting System (NDS) in Fuquan, Guizhou Province, China, the efficient slag dephosphorization has become a key focus of attention. In the field of nickel pyrometallurgy, effectively addressing slag beneficiation to ensure metal recovery rates is one of the core indicators of the advancement of nickel smelting technology. During the initial phase of Shengtun Mining's project in Guizhou, when the side-blown one-step nickel smelting process was determined, efforts were dedicated to the research and development of slag beneficiation devices and process control technologies that matched the current smelting conditions. After the project's commissioning, despite significant deviations in the smelting raw materials from the design expectations, such as nickel sulfide concentrate, nickel-containing miscellaneous materials, and low-sulfur nickel alloys with sulfur content below 10%, the production of medium-high nickel matte with a total nickel and copper content greater than 50% ~ 60% was still achieved. The smelting slag, after treatment by the new slag beneficiation device, maintained a nickel content below 0.2%, realizing a significant slag beneficiation effect. This breakthrough in slag beneficiation devices will bring major breakthroughs and opportunities to the global nickel pyrometallurgy industry in terms of shortening the process flow, enhancing the adaptability of system raw materials, and improving metal recovery rates.

**Keywords:** nickel pyrometallurgy; side-blown one-step nickel smelting; new slag beneficiation device; short process flow; low energy consumption; metal recovery rate

