

引用格式:陆金忠,裘华平,桂纯凯,等. 新型复合熔炼炉在含镍固废火法冶炼的应用[J]. 有色设备,2025,39(4):31-35.

LU Jinzhong, QIU Huaping, GUI Chunkai, et al. Application of a novel composite smelting furnace in pyrometallurgical processing of nickel-containing solid waste[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(4): 31-35.

新型复合熔炼炉在含镍固废火法冶炼的应用

陆金忠¹, 裘华平², 桂纯凯², 孙晓峰¹

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 广西飞南资源利用有限公司, 广西 象州 545801)

[摘要] 随着有色金属工业的发展,含镍固废的处理成为资源回收与环境保护的重要课题。传统火法冶炼工艺在处理含镍固废时存在效率低、金属回收率不高等问题。本研究旨在开发一种以新型复合熔炼炉为核心设备的冶炼工艺,用于高效处理含镍固废等二次资源,实现镍钨的稳定生产,并提高其中 Ni、Cu、Co 等有价值金属的回收率。通过工艺过程控制优化、渣型研究与探索以及排渣作业制度的调整,对熔炼过程进行了调试与优化。项目于 2025 年 2 月建成并投产,经过一系列试生产调试,已形成一套成熟且完整的工艺控制技术体系和作业模式,并取得了炉渣中镍含量平均降至 0.25% 左右的先进指标。新型复合熔炼炉的应用显著提升了含镍固废处理效率,实现了有价值金属的高效回收,推动了含镍二次资源处理技术的革新与升级。

[关键词] 含镍固废; 新型复合熔炼炉; 高效回收; 固废处理; 电镀污泥; 炉渣; 废旧电池

[中图分类号] X758; TF815

[文献标志码] A

[文章编号] 1003-8884(2025)04-0031-05

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.04.003

0 前言

实现碳达峰碳中和是我国实现可持续发展、高质量发展的内在要求。为此,能源结构将产生颠覆性重新构造,全球能源绿色低碳转型衍生出的动力电池、电化学储能等新能源产业,导致了新能源产业所需的矿产资源爆发式增长。其中,镍作为低碳清洁能源相关的关键金属^[1-2],其应用领域和需求将不断扩大,随着含镍资源的开发,其储量日益减少。因此,含镍二次资源的回收也越来越得到重视。

含镍二次资源是指含镍产品加工过程产生的边角料或废料、含镍产品(或废料)加工处理后产生的含镍污泥等含镍固废、含镍废催化剂以及含镍产品消费后产生含镍二次材料。含镍二次资源的综合回收,是缓解资源开发压力的有力抓手。同时,因金属镍价格

较高,二次资源的回收也具有潜在的经济价值。

1 含镍固废主要物料来源及特性

本文涉及的含镍固废主要包括以下 3 类:①电镀行业 and 不锈钢产品酸洗处理产生的污泥;②新能源材料生产过程产生的含镍浸出渣、废弃的含镍电池材料和含镍废旧电池材料^[3-5];③在有色金属冶炼过程中,杂质元素脱除时富集形成的含镍炉渣。

1.1 主要原料

新型复合熔炼炉处理的主要原料包括电镀污泥、镍基合金精炼炉生产高镍钨过程中产生的精炼渣、铜冶炼厂高镍原料粗铜吹炼渣以及高氧化镁铜镍混合精矿等物料。硫化剂的选择采用硫铁矿和石膏渣。主要的物料及典型的成分见表 1。

硫铁矿、石膏渣主要成分见表 2。

表 1 主要原料及成分

Table 1 Main raw materials and compositions

wt%

| 成分 | Ni | Cu | Fe | Co | S | SiO ₂ | CaO | MgO |
|----|-------|------|-------|------|-------|------------------|------|-------|
| 炉渣 | 0.24 | 0.28 | 24.5 | 0.15 | 1.05 | 28.2 | 10.3 | 6.87 |
| 污泥 | 12.56 | 3.03 | 8.68 | 0.59 | 6.88 | 7.89 | 8.45 | 3.83 |
| 精矿 | 2.77 | 2.07 | 27.41 | 0.12 | 18.99 | 20.67 | 5.33 | 15.54 |

[收稿日期] 2025-04-30

[第一作者] 陆金忠(1969—),男,甘肃永昌人,正高级工程师,主要从事重有色金属设计、咨询、生产相关工作。

表 2 硫化剂主要成分

Table 2 Main compositions of vulcanizer

| 成分 | Fe | S | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | CaO | MgO | wt% |
|-------|-------|-------|------------------|--------------------------------|-------|------|-----|
| 硫铁矿 1 | 30.98 | 32.45 | 17.83 | 1.92 | 4.47 | 0.73 | |
| 硫铁矿 2 | 37.12 | 35.96 | 10.99 | 1.78 | 1.06 | 0.43 | |
| 石膏 | — | 18.17 | — | — | 32.88 | 0.71 | |

1.2 成分及赋存状态

新型复合熔炼炉处理上述物料配料后典型的入炉物料平均成分见表 3。

通过加入固化剂至电镀废液中,镍离子形成不溶于水的氢氧化物沉淀或溶于氨及铵盐的水溶液中生成配合物等。

表 3 典型的配料入炉物料主要成分

Table 3 Main compositions of main components of typical ingredients into the furnace material

| 成分 | Ni | Cu | Fe | Co | S | SiO ₂ | CaO | MgO | wt% |
|----|------|------|-------|------|------|------------------|------|------|-----|
| 含量 | 6.89 | 2.73 | 26.81 | 0.46 | 8.25 | 14.96 | 2.95 | 5.72 | |

在冶炼过程中,产出的含 Ni 炉渣中的 Ni 元素主要是以 NiO、Ni₂(SiO₃)₃和少量的 Ni₃S₂为主。

废旧电池材料,经过处理后,其中的镍元素主要以 NiO 的形态存在。

2 含镍固废的火法冶炼方法

2.1 传统的火法冶炼处理方法及存在问题

传统的含镍污泥在进入火法冶炼系统前,需要经过干燥脱水。将干燥后污泥、炉渣、焦炭、脱硫石膏或石灰石、含硫物料、炉渣等物料加入鼓风机,产出含硫超过 25% 的镍硫或金属化镍硫。随后,镍硫通过吹炼工艺进一步处理,产出高镍硫。

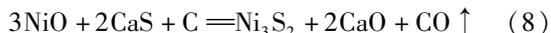
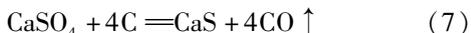
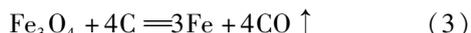
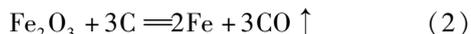
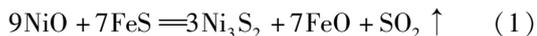
由于鼓风机烟气中 CO 超过 10 000 mg/m³,导致尾气的处理成本比较高,从而凸显了鼓风机在处理含镍固废方面的局限性。因此,多数固废处理企业开始转型或探索含镍固废处置的新技术与新工艺。

2.2 含镍固废的主要特性及火法冶炼工艺选择方向

含镍固废火法冶炼处理工艺的选择,应遵循以下原则:基于固废中有价金属的赋存状态、理化性能,通过状态的改变或性能的变化,实现安全可靠、低耗高效的分离,并确保工艺流程简洁高效,易于操作。

在火法冶炼过程中,针对含镍固废中镍元素的赋存状态和镍元素主要物质的理化特性,尽可能选择生产低熔点的 Ni₃S₂或介于 Ni₃S₂和金属 Ni 熔点

之间的金属化镍硫。一般选择共熔体熔点不超过 1 000 °C 或者含 S 不低于 10% 左右,以防止生产过程中在特殊情况下(如操作低温时)发生金属相析出引发的操作风险。本设计采用无烟煤作为还原剂和燃料、黄铁矿作为硫化剂和稀释剂。将含镍固废在冶炼过程中的主要形态 Fe₂O₃、NiO、CaSO₄等物质,通过还原、硫化形成金属化程度较高的镍硫。随后,通过加入适量的黄铁矿形成铁硫,以稀释金属相形成品位适宜的镍硫,其主要反应原理为式(1)~(9)。



因此,在选择含镍固废的处理工艺时,应遵循将镍的氧化物或金属通过还原和硫化的方法生产出低熔点的镍硫或金属化适度的镍硫的基本原则。这是冶炼工艺或炉型选择时要考虑的“核心”问题之一。

2.3 含镍固废火法冶炼新技术应用

目前含铜固废处理的新技术日趋成熟,已经投

入生产的新技术有富氧侧吹熔池熔炼工艺和富氧顶吹熔池熔炼工艺等。

中国恩菲工程技术有限公司和广西飞南资源利用有限公司合作开发了一种以新型的复合熔炼炉为核心设备的冶炼工艺,处理含镍固废生产镍铈,项目于2025年2月建成投产并取得较好技术指标。

3 新型复合熔炼炉的开发与应用

新型复合熔炼炉是借鉴合成式闪速炉的设计理念和构想,将侧吹富氧浸没燃烧熔池熔炼炉和炉渣电热贫化炉有机结合的新炉型,分为侧吹浸没燃烧熔炼区(简称“侧吹熔炼区”,也叫本床)和电热沉降区(也叫前床)。

1)侧吹熔炼区,由原来的25 m²,改造后为15 m²,设有天然气浸没燃烧枪(也可以使用煤粉)和富氧侧吹枪。主要是提供稳定的热力学条件、强动力学条件和高效的还原(硫化)气氛,使连续加入的含镍固废、还原剂、造渣剂等物料即时完成升温熔化、还原硫化、造渣造渣反应,并提供基本的镍铈与炉渣分离条件,完成镍铈和炉渣的粗分离。

2)电热沉降区,原设计变压器规格1 200 kVA,满足检修保温。改造后延长了电热区域,增加了1组电极,新增变压器规格为2 500 kVA。主要是通过电极补充热量、适当地调整温度和增加造渣剂和还原剂等,进一步降低炉渣黏度,维持较为平稳的沉降条件,设计一个基本的沉降距离(或炉渣在电热沉降区的停留时间),达到镍铈和炉渣充分分离,得到较低的炉渣含有价金属指标。

4 新型复合熔炼炉处理含镍固废生产实践

4.1 试生产出现的主要问题

1)因未配置炉渣中Fe₃O₄专门的检测分析仪器,工作人员对还原深度和判断标准把控不准确。

2)炉内连续多日直接产出了高镍铈,同时产出了含有价金属品位高的炉渣,炉渣含Ni达到1%甚至更高,全部炉渣需要二次回炉处理。

3)排渣夹带生料(未完全反应的入炉物料),渣中夹带镍铈颗粒等。

4)投产起初操作温度的控制,燃料和氧气的系数设置、熔池区域的还原度控制理念、硫化深度控制理念均出现了问题。一是温度控制在1 250℃左

右,热力学条件不够,部分物料没有参与反应;二是按照煤耗氧总体控制炉内气氛,还原的气氛不够,炉渣含镍最高到5%;镍铈品位接近高镍铈,即使还原到位炉渣含镍也比较高。

5)电热沉降区不同高度炉渣含镍量有明显差异,会出现排渣口的位置设置需要在条件具备时进行优化等设计问题。

4.2 工艺操作摸索及优化

通过试生产任务,摸索出了以下的操作条件和基本制度。

1)实际工艺控制过程,临时通过强磁铁对各个检测点炉渣取样,测试其磁性来调整还原深度,最终取得了满意的还原效果,在炉渣含Fe₃O₄低于2%时^[4](在其他厂化验验证),得到了较低的炉渣含Ni指标。

2)合理的配料制度、炉渣渣型和对应的温度区间。投产初期,污泥中的Fe、SiO₂、MgO、Al₂O₃等成分都相对稳定,自熔渣中含Fe约24%,含SiO₂约28%,含Al₂O₃约9%,操作温度在1 400℃左右时,炉渣含Ni仍然高于0.5%。通过软件对CaO在渣中的含量与炉渣熔点、黏度之间的关系进行研究后,将炉渣中的CaO组分适当提高,操作温度也参考理论测算温度进行控制。温度提高后,彻底排除了排渣夹带生料和镍铈的问题;热力学条件的改变,带来了块煤等物料的反应效率大幅度升高,炉内无块煤的堆积,还原深度到位;炉渣黏度、流动性等特性得到改善,炉渣中含Ni大幅度降低。

3)侧吹熔炼区的基本控制理念和还原深度的控制计算方案进行了改进;保证反应所需基本温度,根据渣型和探杆粘接实际情况,将操作温度提高到1 400℃以上,还原煤和燃料消耗氧气分开计算。

4)依据侧吹熔炼区渣型和温度的对应性判断标准,不固定操作温度,本床探渣杆进入炉内的时间为60 s,提出根据探渣杆粘接实际情况制订温度基本判断依据,粘接厚则提温。

5)电热沉降区的用电制度主要是根据渣型、电极打弧现象及时调整二次侧电压。靠近本床电极时多用电提温,靠近渣口电极时少用电,维持较为平静液面,使镍铈更好地分离。

6)排渣制度与炉渣在炉内沉降停留时间的关系。炉体设计考虑了液面的高低变化,通过间断排渣,使炉渣在炉内更多的停留时间,为沉降分离创造

条件。

4.3 主要生产技术指标

通过试生产过程中主要工艺边界条件的摸索,工艺控制模式的探索和优化,各项指标接近设计值。

在投产 20 d 后达到了预期的指标。

4.3.1 产出镍铈的主要成分

新型复合熔炼炉处理含镍固废产出的镍铈成分见表 4。

表 4 镍铈成分

Table 4 Compositions of nickel matte

wt%

| 成分 | Ni | Cu | Fe | Co | S | 备注 |
|-------|-------------|------------|-------|------|-------|-------|
| 设计值 | 28.0 ~ 30.0 | 5.0 ~ 20.0 | — | — | 25.0 | |
| 低镍铈 1 | 25.76 | 7.53 | 33.35 | 1.15 | 23.13 | |
| 低镍铈 2 | 35.36 | 6.23 | 28.87 | 1.22 | 21.57 | 适度金属化 |

由于原料成分比较复杂,根据镍在镍铈和炉渣的分配比为 100 左右(镍铈含镍除以 100 即为炉渣含镍指标),设计镍铈中的含镍不大于 30%,以保证炉渣含镍控制在 0.3% 以下,镍的回收率指标才能得到保证。

镍铈饱和状态的含硫为 26% ~ 27%。含硫低会产出镍铁合金等,造成镍铈熔点升高及排放困难,因此,生产中尽量控制镍铈含硫大于 24%,保证硫化较为充分,其他元素含量不做原则限制。从试生

产结果看,生产一定金属化程度(含镍超过 30%)含硫在 22% 左右镍铈,能顺利排放,为控制更低的炉渣含镍创造了条件。

4.3.2 产出的炉渣主要成分

新型复合熔炼炉处理含镍固废产出的炉渣主要成分见表 5。炉渣 1 操作温度 1 400 ~ 1 450 °C,炉渣 2 操作温度 1 380 ~ 1 420 °C。

由于含镍固废成分复杂,料批次多、量少,渣型不稳定,因此炉渣成分还包括其他有价金属含量。

表 5 典型的炉渣成分

Table 5 Compositions of typical furnace slag

wt%

| 成分 | Ni | Cu | Fe | Co | S | SiO ₂ | CaO | MgO | Al ₂ O ₃ |
|------|------|------|-------|------|------|------------------|-------|------|--------------------------------|
| 设计值 | 0.30 | 0.30 | — | 0.10 | 1.00 | — | — | — | — |
| 炉渣 1 | 0.25 | 0.29 | 24.71 | 0.11 | 1.09 | 28.14 | 12.26 | 5.33 | 9.00 |
| 炉渣 2 | 0.17 | 0.27 | 23.11 | 0.10 | 0.94 | 28.87 | 10.61 | 5.86 | 5.00 |

试生产过程中,发现 Al₂O₃ 对炉渣温度影响非常大,而且不利于镍铈的沉降。通过调整配料参数,将炉渣中的 Al₂O₃ 降低后,操作条件大为改善,炉渣含镍指标达到 0.2% 甚至更低,该指标为当前国内外较为先进的指标,国内外普遍超过 0.3%^[6],镍金属的回收率达到了 96%。

5 结语

本文在对含镍固废中各元素的物相特征、赋存状态或形成机理的基础上,并结合含镍物料在镍火法冶炼过程中 Ni₃S₂、NiO、Ni-Fe 合金等的理化性能,开发出以新型的复合熔炼炉为核心设备的冶炼工艺来处理含镍固废等二次资源,生产低镍铈,对

Ni 等有价金属进行高效回收,投产后取得了较好的效果和技术指标。

1) 原料适应性强。处理的原料较为复杂,包括污泥、炉渣、含镍精矿等。

2) 金属回收率高。炉渣含 Ni、Cu、Co 等有价金属较低,金属回收率持平甚至优于当前国内外硫化镍精矿冶炼弃渣指标。

3) 设计的炉型,可生产金属化程度较高、含 S 大于 20% 的镍铈,以期得到更好的金属回收率指标。

4) 新型复合熔炼炉能够适应 1 450 °C 甚至是更高的操作温度,可处理更复杂的物料。

未来还可以在以下方面进行优化和探索:

1) 本床和前床“双区”的工艺控制和配合方面进一步细化,主要是温度的控制、还原深度的控制等。

2) 在镍钨金属化程度控制和排放之间探索合适的镍钨含 S 指标,在维持炉底不冻结的前提下,寻求更低的炉渣含有价金属指标。

3) 合理的炉渣沉降时间和排放制度,排放中层渣是取得低渣含镍指标的一个方向,摸索有价金属在渣层的分布状况,为下一步优化改进打下基础。

[参考文献]

[1] 王珂,夏启繁. 产业链视角下中国关键金属镍贸易格局演化[J]. 世界地理研究,2024,33(3):40-55.

[2] 经文波,黄儒德,任佳龙. 利用含镍污泥和赤泥固废资源提取镍铁研究[J]. 中国有色冶金,2022,51(6):18-23.

[3] 吴展,胡琴. 镍二次资源回收利用的现状与展望[J]. 矿产与地质,2013,27(S1):59-62.

[4] 顾明杰,祁永峰,李智,等. 富氧侧吹熔池熔炼生产金属化镍阳极工艺研究[J]. 绿色矿冶,2023,39(5):9-14.

[5] 李晓蕊. 钴铜原料生产新能源材料固废资源化研究[J]. 有色矿冶,2022,38(4):46-49.

[6] 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.

Application of a novel composite smelting furnace in pyrometallurgical processing of nickel-containing solid waste

LU Jinzhong¹, QIU Huaping², GUI Chunkai², SUN Xiaofeng¹

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

2. Guangxi Feinan Resource Utilization Co., Ltd, Xiangzhou 545801, China)

Abstract: With the development of the non-ferrous metal industry, the treatment of nickel-containing solid waste has become an important issue for resource recycling and environmental protection. Traditional pyrometallurgical processes for treating nickel-containing solid waste suffer from low efficiency and poor metal recovery rates. The study aims to develop a novel composite smelting furnace for the efficient treatment of secondary resources such as nickel-containing solid waste and nickel-bearing slag, to achieve stable production of nickel matte, and to enhance the recovery rates of valuable metals such as Ni, Cu, and Co. Through optimization of process control, research on slag composition, and adjustment of slag discharge operations, the smelting process has been tested and optimized. The project was completed and put into production in February 2025. After a series of trial production adjustments, a mature and complete process control technology system and operational model have been established, achieving an advanced indicator of reducing the nickel content in slag to approximately 0.25% on average. The application of the novel composite smelting furnace has significantly improved the treatment efficiency of nickel-containing solid waste, realized efficient recovery of valuable metals, and promoted the innovation and upgrading of technologies for processing nickel secondary resources.

Keywords: nickel-containing solid waste; novel composite smelting furnace; efficient recovery; treatment of solid waste; electroplating sludge; furnace slag; waste batteries ▲