

# 铜镍电镀污泥硫化熔炼中冰镍的热力学及工艺研究<sup>①</sup>

周兆安<sup>1,2</sup>, 刘小文<sup>1,2</sup>, 李俊<sup>1,2</sup>, 毛谕章<sup>1,2</sup>, 李加兴<sup>1,2</sup>

(1.广东飞南资源利用股份有限公司, 广东 肇庆 526233; 2.广东省工业固废含铜污泥资源综合利用工程技术研究中心, 广东 肇庆 526233)

**摘要:** 通过 HSC Chemistry 热力学分析方法揭示了铜镍电镀污泥还原硫化熔炼冰镍过程主要金属的物相变化规律, 分析了还原硫化熔炼中冰镍的可选优化工艺条件。热力学理论计算结果表明: 电镀污泥中铜、镍品位分别为 3.0%、3.5% 时, 采用硫酸钙作为硫化剂, 熔炼气氛  $V_{CO}/(V_{CO}+V_{CO_2})$  体积分数比为 60%~75%, 实际硫用量与理论用量比为 1.6~2.0, 在 1 300 °C 下进行还原熔炼, 有望获得铁含量(质量分数)小于 20% 的中冰镍, 预期区域内渣中铜、镍含量(质量分数)分别低于 0.20%、0.43%, 铜和镍回收率分别可达 95% 和 90% 以上, 铬在渣中的固定率超过 99.9%。生产样本统计结果显示, 铜镍铬的分布行为与热力学分析结果基本一致, 证明基于热力学分析建立的数学模型具有良好的可靠性, 对生产具有一定指导意义。

**关键词:** 铜镍; 电镀污泥; 硫化熔炼; 中冰镍; 热力学分析; 危险废弃物利用

中图分类号: X705

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.02.025

文章编号: 0253-6099(2025)02-0141-06

## Thermodynamic Analysis and Processing Technology for Producing Medium-Grade Nickel Matte by Sulfidation Smelting of Copper-Nickel Electroplating Sludge

ZHOU Zhaoan<sup>1,2</sup>, LIU Xiaowen<sup>1,2</sup>, LI Jun<sup>1,2</sup>, MAO Anzhang<sup>1,2</sup>, LI Jiaying<sup>1,2</sup>

(1. Guangdong Feinan Resources Recycling Co., Ltd., Zhaoqing 526233, Guangdong, China; 2. Engineering Technology Research Center for Comprehensive Utilization of Copper-Bearing Industrial Solid Waste Sludge in Guangdong Province, Zhaoqing 526233, Guangdong, China)

**Abstract:** A thermodynamic analysis based on HSC Chemistry software reveals the phase evolution of main metals in the production of nickel matte by sulfidation smelting of copper-nickel electroplating sludge, and the optimal process conditions for obtaining medium-grade nickel matte by sulfidation smelting were also analyzed. Theoretical calculation shows that the electroplating sludge with grades of Cu and Ni at 3.0% and 3.5% respectively is smelted at a temperature of 1 300 °C, with calcium sulfate as a sulfurizing reagent under a smelting atmosphere with  $V_{CO}/(V_{CO}+V_{CO_2})$  in a volume ratio of 60%–75%, and the actual usage of sulfur 1.6–2.0 times the theoretical value. It is expected that medium-grade nickel matte with Fe content less than 20% can be obtained, and the contents of Cu and Ni in the slag with S ratio in the preferred range can be less than 0.20% and 0.43% respectively. It is shown that recovery rates of Cu and Ni exceed 95% and 90% respectively, and the fixation rate of Cr in the slag is over 99.9%. According to the statistical results of production samples, the distribution behavior of Cu, Ni and Cr is basically consistent with the thermodynamic analysis results. This proves that the established mathematical model has good reliability and is of certain guiding significance for production.

**Key words:** copper and nickel; electroplating sludge; sulfidation smelting; medium-grade nickel matte; thermodynamic analysis; hazardous waste utilization

铜镍电镀污泥中含有大量重金属(Ni、Cu、Cr、Fe、Zn、Pb、Cd等), 且重金属化学性质不稳定, 容易造成

二次污染, 属于危险废弃物(HW17)<sup>[1-2]</sup>, 但其也极具回收价值。目前, 铜镍电镀污泥资源化处理工艺主要

① 收稿日期: 2024-09-30

作者简介: 周兆安(1987—), 男, 浙江平阳人, 硕士, 高级工程师, 主要从事有色金属二次资源综合利用研究工作。E-mail: zza127@163.com

包括火法工艺和湿法工艺。火法工艺主要包括铜镍污泥熔炼法<sup>[3-4]</sup>、矿化-选矿法<sup>[5-6]</sup>、焙烧-浸出法<sup>[2,7]</sup>等;湿法工艺主要包括酸浸法<sup>[8-10]</sup>和氨浸法<sup>[11]</sup>。铜镍电镀污泥还原硫化熔炼低冰镍是一种新工艺<sup>[3]</sup>,该工艺借鉴铜镍氧化矿冶炼技术和设备,其产品与冰镍冶炼行业产品具有共同特点,即产出的铜镍品位一般较低(铜镍品位合计 35%~40%),含铁较高(35%~40%<sup>[12-13]</sup>),产品在后续吹炼过程中需要脱除大量的铁,不仅造成作业强度高、造渣量大,而且吹炼渣带走的铜镍量较多,影响吹炼过程铜镍直收率;吹炼渣需要返回还原熔炼系统回收铜镍,进一步增加了综合回收成本。针对这些问题,本文开发了一种兼顾铜镍回收率和冰镍品位的中冰镍熔炼工艺。

## 1 实验原料及实验方法

### 1.1 实验原料

实验用铜镍电镀污泥来自珠三角地区电镀行业处理含铜、镍等重金属电镀废水过程中产生的固体废弃物,主要成分是铜和镍的氢氧化物、氧化物及少量的碳酸盐等,还含有铬、锌、铅等其他重金属杂质,其中铜、镍品位 2%~5%,铬品位 1%~2%。

### 1.2 实验方法

铜镍污泥还原硫化熔炼冰镍过程一般采用炭基还原剂,以硫酸钙或硫铁矿为硫化剂,选用 CaO-FeO<sub>x</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 渣系在 1 250~1 350 °C 下进行高温还原熔炼,熔炼产物主要为炉渣、低冰镍和烟尘灰。整个还原硫化过程和产物情况主要由熔炼温度、熔炼气氛  $F$  值 ( $F = \frac{V_{CO}}{V_{CO}+V_{CO_2}} \times 100\%$ , 体积分数比) 和硫化剂用量决定<sup>[3]</sup>。基于铜镍电镀污泥熔炼配料组成,设定热力学计算的熔炼原料组成及预配渣型,采用 HSC Chemistry 软件的 Equilibrium Compositions 模块数据库模拟计算铜镍污泥还原熔炼过程<sup>[3]</sup>。利用 HSC Chemistry 9 设置 2 个变量,计算在一定温度下随着硫化剂用量和熔炼气氛变化的多相反应平衡时物质的组成及分布情况。再结合铜镍污泥还原熔炼生产试验数据,验证热力学计算筛选的反应条件,以检验热力学计算结果的准确性。

## 2 铜镍污泥还原硫化熔炼冰镍理论分析

### 2.1 硫化熔炼过程热力学计算

根据生产配料,铜和镍入炉质量分数分别为 3.0% 和 3.5%;以石膏为硫化剂,预配渣型组成(质量比)为:Fe:SiO<sub>2</sub>:CaO:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=(12~20):30:28:(5~10),维持总钙量不变,硫化剂硫酸钙为变量;以 1.000 kmol

Cu 为基准设定热力学计算模拟参数,详见表 1。

表 1 模拟计算参数设定值

CuO	NiO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	ΣCaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	S <sub>理论</sub>
1.000	1.263	7.228	10.093	10.093	1.246	0.160	0.402~2.684	1.342

注: S<sub>理论</sub> 为满足铜、镍完全硫化成 Cu<sub>2</sub>S 和 Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> 所需的理论 S 量; ΣCaO 是 CaO 与 CaSO<sub>4</sub> 的总物质的量,为一定值。

基于表 1 数据,硫化剂用量( $S_{实际}/S_{理论}$ ,指硫实际用量与理论用量的物质的量比)通过改变 CaSO<sub>4</sub> 和 CaO 的量来实现;熔炼气氛  $F$  值通过改变 CO 和 CO<sub>2</sub> 的比例来实现。最终利用软件计算得到反应平衡时产物的组成,再进行数据处理,并绘制相关指标的等高线图。为了方便计算分析,除特殊说明外作如下假设<sup>[3]</sup>: ① 在计算产物组成时假设合金相、铈相和渣相之间互不相溶;② 忽略铜镍在烟尘中的损失;③ 预估渣铜、渣镍品位和铜镍金属回收率时仅将其所有的氧化物形态算入渣中,忽略其他损失。

#### 2.1.1 Cu 在不同硫化剂用量和熔炼气氛下的平衡组成及热力学分析

基于表 1 参数,设定温度为 1 300 °C,通过改变参数进行多相反应平衡模拟计算,得出不同硫化剂用量( $S_{实际}/S_{理论}$ )和熔炼气氛  $F$  值下反应平衡时铜物相分布情况,结果如图 1 所示。

由图 1 可以看出,氧化态铜含量(质量分数,下同)主要受  $F$  值的影响,随着  $F$  值增大,还原性气氛增强,氧化态铜比例逐渐降低;硫化态铜、金属和合金态铜则主要受硫化剂用量和  $F$  值的协同调控,尤其是当还原性气氛足够时( $F \geq 30\%$ ),随着  $S_{实际}/S_{理论}$  增大,硫化态铜含量逐渐增多,而金属和合金态铜含量逐渐降低,表现为还原硫化反应强于还原反应;而当  $S_{实际}/S_{理论}$  较大时,随着  $F$  值提高,硫化态铜、金属和合金态铜也会呈现波动变化。

在实际还原硫化生产过程中,尤其是鼓风炉还原熔炼时,当焦比和鼓风强度一定时,增加高价硫酸盐类硫化剂用量,会降低体系的还原性气氛,从而影响金属在产品中的分配。

#### 2.1.2 Ni 在不同硫化剂用量和熔炼气氛下的平衡组成及热力学分析

基于表 1 参数,设定温度 1 300 °C,通过改变参数进行多相反应平衡模拟计算,得出不同硫化剂用量和熔炼气氛  $F$  值下反应平衡时镍物相分布情况,结果如图 2 所示。

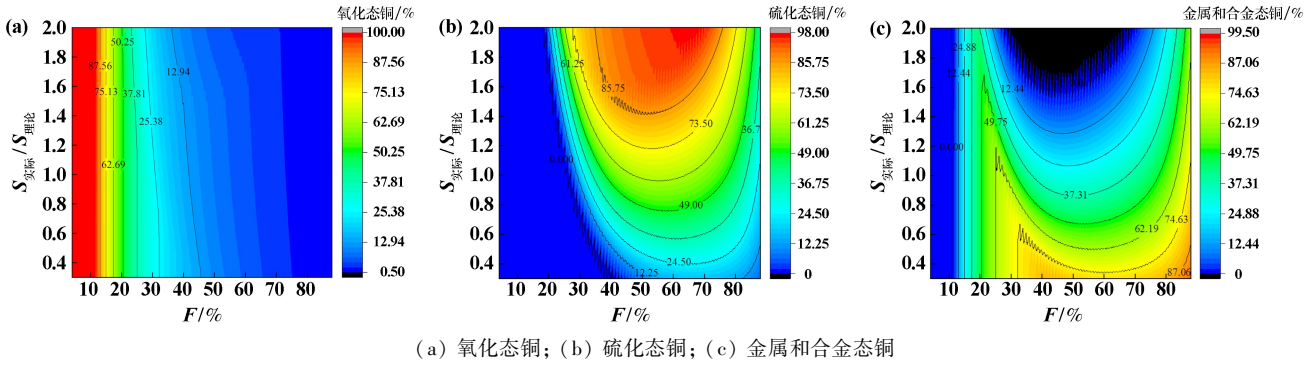


图 1 不同硫化剂用量和熔炼气氛  $F$  值下反应平衡时铜物相分布情况

Fig. 1 Phase distribution of copper at reaction equilibrium with different sulfurization agent dosage under different smelting atmospheres

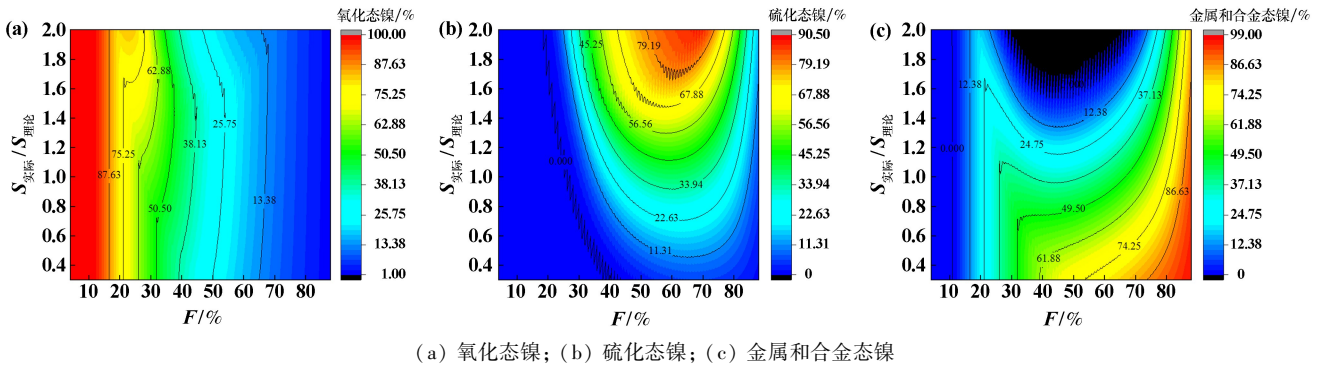


图 2 不同硫化剂用量和熔炼气氛  $F$  值下反应平衡时镍物相分布情况

Fig. 2 Phase distribution of nickel at reaction equilibrium with different sulfurization agent dosage under different smelting atmospheres

由图 2 可知,  $S_{实际}/S_{理论}$  和  $F$  值对镍物相组成的调控作用与铜的类似,但相比于铜,镍的氧化物态存在区域更大,因为镍需要更高的  $F$  值以使其还原或还原硫化;在该铜镍共存体系中,镍硫化所需的硫化剂用量和  $F$  值高于铜,且体系中铜的硫化比例高于镍,这主要是因为铜的亲硫性远大于镍。

### 2.1.3 Cr 在不同硫化剂用量和熔炼气氛下的平衡组成及热力学分析

基于表 1 参数,设定温度 1 300 °C,通过改变参数进行多相反应平衡模拟计算,得出不同硫化剂用量和熔炼气氛  $F$  值下反应平衡时铬物相分布情况,结果如图 3 所示。

从图 3(a) 和 (b) 可以看出,铬相对稳定,仅在极强的还原性气氛下才会发生硫化 and 还原,这在铜镍还原熔炼过程中几乎可以忽略不计,铬主要以氧化物态存在。

由图 3(c) 和 (d) 可知,还原性气氛极弱时(或偏中性及弱氧化性气氛时),高温下极少量铬会被氧化,并以高价态铬氧化物存在。但在还原熔炼气氛下,超过 99.9% 的铬氧化物以低价态氧化物存在,其物相主

要为  $CaO \cdot Cr_2O_3$ 、 $FeCr_2O_4$  和  $Cr_2O_3$ ,以  $FeCr_2O_4$  为主。

## 2.2 铜镍还原硫化熔炼中冰镍过程分析

### 2.2.1 冰镍熔炼平衡组成及热力学分析

不同硫化剂用量和熔炼气氛  $F$  值下还原硫化产物的组成情况见图 4,不同硫化剂用量和熔炼气氛  $F$  值下冰镍熔炼技术指标见图 5。

依据生产经验,冰镍中硫的质量分数一般不低于 20%,故本文将计算的硫化物中硫的质量与“硫相”质量(硫化物质量和金属合金相质量之和)之比等于 20% 记为“ $S = 20\%$ ”,在图中以黑色虚线表示,并在各指标的等高线图中标出,虚线上部包围区为“ $S \geq 20\%$ ”,即冰镍熔炼控制区域。进而对熔炼过程主要产物组成及技术指标进行分析。

由图 4(a) 可以看出,图中  $S \geq 20\%$  区域为冰镍熔炼的硫化剂量和还原性气氛控制的优选区域。由图 4 和图 5 可以得出,在该优选区域内冰镍中铜的预期含量(质量分数,下同)为 25%~54%,镍的预期含量为 23%~35%,铁的预期含量为不高于 36%,渣铜品位低于 0.78%,渣镍品位低于 2.3%。另由图 4 和 5 可知,在优选区域内,当还原性气氛  $F$  值相同时,以  $F = 50\%$  为例,通过改变  $S_{实际}/S_{理论}$ ,渣铜渣镍品位变化不大。

但  $S_{实际}/S_{理论}$  相同时,通过提高  $F$  值,即增强还原性气氛,可以显著降低渣铜渣镍品位,提高铜镍直收率,但同时也会降低冰镍中铜镍含量而升高冰镍中铁含量。

综上所述,铜镍还原硫化冰镍过程中需要协调控制熔炼气氛和硫化剂用量,以获得更好的产品方案和铜镍资源的直收率。

2.2.2 热力学计算的中冰镍熔炼优化还原硫化条件

将冰镍中铁含量 5%~25% 的冰镍称为中冰镍,熔炼中冰镍的主要目的是在兼顾金属回收率的前提下,减轻冰镍吹炼除铁压力,减少吹炼渣量,从而降低铜镍资源回收的综合成本。结合熔炼技术要求,由图 4 和图 5 的优选区域,确定在  $F=60\% \sim 75\%$ 、 $S_{实际}/S_{理论} = 1.6 \sim 2.0$

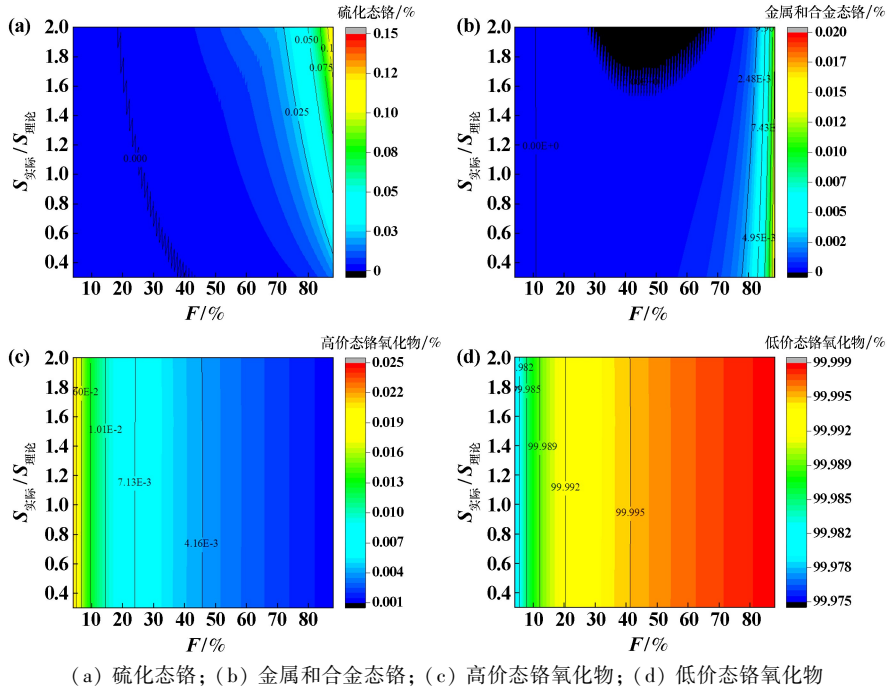


图3 不同硫化剂用量和熔炼气氛  $F$  值下反应平衡时铬物相分布情况

Fig.3 Phase distribution of chromium at reaction equilibrium with different sulfurization agent dosage under different smelting atmospheres

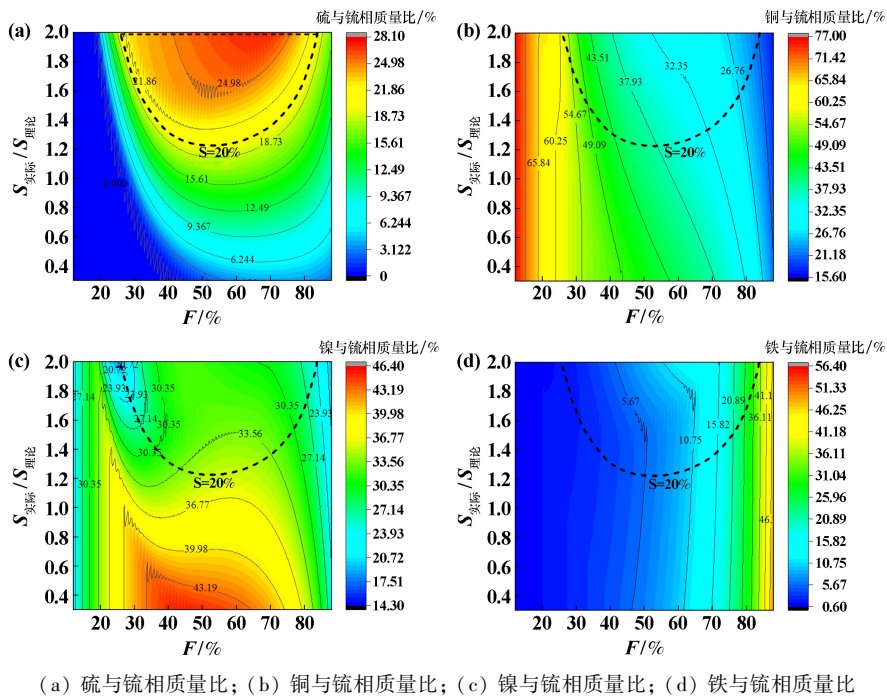
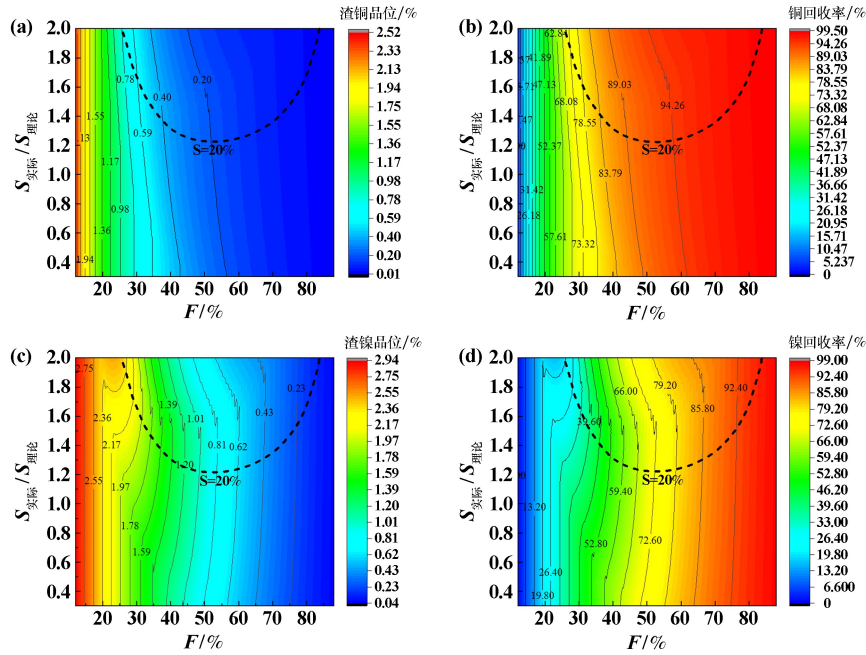


图4 不同硫化剂用量和熔炼气氛  $F$  值下还原硫化产物组成情况

Fig.4 Composition of products after reduction-sulfurization process with different sulfurization agent dosage under different smelting atmospheres



(a) 渣铜品位; (b) 铜回收率; (c) 渣镍品位; (d) 镍回收率

图 5 不同硫化剂用量和熔炼气氛 F 值下冰镍熔炼技术指标

Fig. 5 Technical indicators for nickel matte smelting with different sulfurization agent dosage under different atmospheres

的区域内进行还原熔炼,有望获得铁含量小于 20% 的中冰镍,预期区域内的优选渣铜、渣镍品位分别可低于 0.20%、0.43%,铜和镍回收率分别可达 95% 和 90% 以上,同时铬在渣中的固定率可超过 99.9%。

### 3 生产实践

利用热力学分析结果,在生产配料过程中控制合适的硫化剂用量,并通过调节鼓风量和焦炭量来控制还原性气氛,开展了中冰镍还原熔炼试验,统计结果如表 2、表 3 和图 6 所示。结果显示,中冰镍产品中铜、镍、铁、硫平均品位分别为 26.76%、28.51%、20.15%、18.28%,渣铜和渣镍平均品位分别为 0.24% 和 0.32%,该渣或可进一步深度资源化<sup>[14-15]</sup>。此外,由图 6 可知,铜和镍主要分布在冰镍中,平均分布比例分别为 92.12% 和 91.79%,在渣中的平均损失率分别为 5.35% 和 6.67%,铜镍总回收率符合理论预期。铁主要分布在渣和冰镍中,铁的分布不仅影响冰镍的产品质量,也

表 3 炉渣的铜镍品位统计结果(质量分数)

Table 3 Statistical results of copper and nickel contents in slag %

项目	Cu	Ni
统计结果	0.11~0.42	0.09~0.49
均值	0.24	0.32

注:共统计样本数据 130 组。

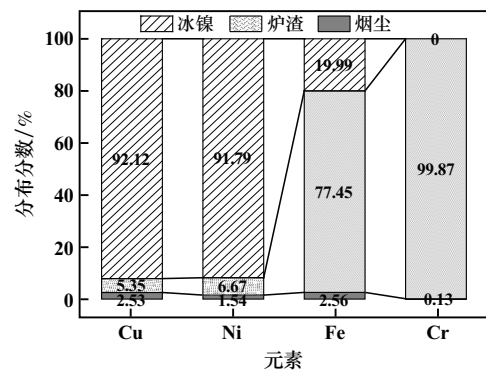


图 6 主要金属元素在熔炼产物中的分布

Fig. 6 Distribution of main metal elements in smelting products

表 2 冰镍主要化学组成统计结果(质量分数)

Table 2 Statistical results of main chemical composition of nickel matte %

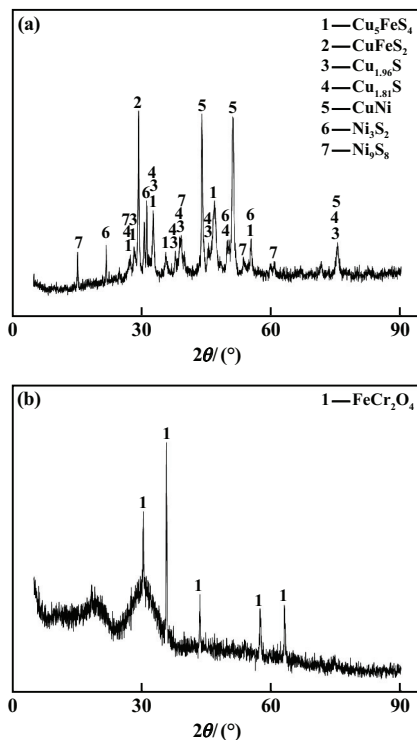
项目	Cu	Ni	Fe	S
统计结果	23.62~29.41	24.81~33.59	15.76~22.16	16.08~22.15
均值	26.76	28.51	20.15	18.28

注:共统计样本数据 43 组。

关系到熔炼渣型,生产中需要根据渣型进行配伍调控。约 99.87% 的铬分布在渣中,其在冰镍和烟尘中的分布微乎其微。

对生产过程中某一批次典型产物中冰镍和炉渣(水淬渣样)进行 XRD 表征,结果如图 7 所示。由图 7 可知:冰镍中主要存在  $Cu_{1.96}S$ 、 $CuFeS_2$ 、 $Cu_5FeS_4$ 、 $Cu_{1.81}S$ 、

CuNi、Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> 和 Ni<sub>9</sub>S<sub>8</sub> 等物相,炉渣中明显存在 FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 尖晶石相,符合铬的主要存在物相特征。



(a) 冰镍; (b) 炉渣

图7 熔炼产物 XRD 图谱

Fig. 7 XRD patterns of smelting products

综上所述,基于 HSC Chemistry 建立的铜镍污泥还原熔炼中冰镍工艺数学模型具有良好的可靠性,对生产具有一定指导意义。

## 4 结论

1) 热力学分析结果显示:在高温还原硫化过程中,铜镍赋存状态主要受硫化剂用量比及熔炼气氛的耦合作用影响,而铬主要呈低价氧化物态存在,并以 FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 尖晶石为主。

2) 经理论计算,铜镍污泥还原硫化熔炼中冰镍理论上可行,其可选的优化工艺条件: $F = 60\% \sim 75\%$ ,  $S_{\text{实际}}/S_{\text{理论}} = 1.6 \sim 2.0$ ,在该区域范围内进行还原熔炼,有望获得铁含量小于 20% 的中冰镍,预期区域内的优选渣铜和渣镍品位可分别低于 0.20% 和低于 0.43%,铜和镍回收率分别可达 95% 和 90% 以上。

3) 生产样本统计结果显示,铜、镍、铬的分布行为与热力学分析结果基本一致,说明基于热力学建立的铜镍污泥还原熔炼中冰镍工艺数学模型具有良好的可靠性,对生产具有一定的指导意义。

## 参考文献 (References):

- [1] 刘维,蒋善钦,焦芬,等. 电镀污泥资源化处理技术研究进展[J]. 电镀与涂饰, 2022,41(8):585-592.  
LIU Wei, JIANG Shanqin, JIAO Fen, et al. Progress in research of resource-oriented treatment technologies for electroplating sludge[J]. Electroplating & Finishing, 2022,41(8):585-592.
- [2] 黄秋云. 氯化焙烧法分离回收电镀污泥中有价金属及其资源化研究[D]. 广州:华南理工大学, 2021.  
HUANG Qiuyun. Study on the separation and recovery of valuable metals from electroplating sludge by chlorinating roasting and its resource utilization[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [3] 周兆安,刘小文,李俊,等. 低品位铜镍电镀污泥还原硫化熔炼低冰镍[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):133-138.  
ZHOU Zhaoan, LIU Xiaowen, LI Jun, et al. Production of low-grade nickel matte by sulphidizing smelting of low grade copper-nickel-bearing electroplating sludge[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(6):133-138.
- [4] HUANG R, HUANG K, LI Z, et al. Recovery of valuable metals from electroplating sludge with reducing additives via vitrification[J]. Journal of Environmental Management, 2013,129:586-592.
- [5] 刘超,陈志强,刘勇,等. 某低品位铜镍电镀污泥矿化-浮选工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(3):21-27.  
LIU Chao, CHEN Zhiqiang, LIU Yong, et al. Study on mineralization-flotation process of a low grade copper-nickel electroplating sludge[J]. Nonferrous Metals( Mineral Processing Section), 2021(3):21-27.
- [6] 吕昊子,贺志壮,陈志强,等. 含铜、镍电镀污泥硫化烧结-浮选工艺[J]. 中国有色金属学报, 2020,30(4):942-950.  
LYU Haozi, HE Zhuangzhi, CHEN Zhiqiang, et al. Sulfidation sintering-flotation process of copper-nickel-bearing electroplating sludge[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020,30(4):942-950.
- [7] 周雪. 电镀污泥的焙烧浸出实验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2015.  
ZHOU Xue. Roasting and leaching experiment of the electroplating sludge[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- [8] 姜中孝. 含铜含镍污泥浸出液铜镍提取的影响因素研究[J]. 中国资源综合利用, 2022,40(8):1-5.  
JIANG Zhongxiao. Study on influencing factors of copper and nickel extraction from leaching solution of sludge containing copper and nickel[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2022,40(8):1-5.
- [9] 董万强,李军,黄雯琦,等. 酸浸法回收电镀污泥中铜镍[J]. 环境科学与技术, 2016,39(增刊1):307-310.  
DONG Wanqiang, LI Jun, HUANG Wenqi, et al. Recovery of copper and nickel from electroplating sludge with acid leaching method[J]. Environmental Science & Technology, 2016,39(S1):307-310.
- [10] LI P P, PENG C S, LI F M, et al. Copper and nickel recovery from electroplating sludge by the process of acid-leaching and electro-depositing[J]. International Journal of Environmental Research, 2011,5(3):797-804.
- [11] 张焕然,蓝碧波,伍赠玲,等. NH<sub>3</sub>-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 体系浸出电镀污泥中铜、镍试验研究[J]. 湿法冶金, 2015,34(1):25-28.  
ZHANG Huanran, LAN Bibo, WU Zengling, et al. Leaching of copper and nickel from electroplating sludge in NH<sub>3</sub>-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> system[J]. Hydrometallurgy of China, 2015,34(1):25-28.

(下转第 151 页)

- process of low-grade manganese rhodochrosite ore from Yingjiang County of Yunnan Province[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(5):74-76.
- [3] 中华人民共和国自然资源部. 2023年自然资源公报[R]. 2024. Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2023 natural resources bulletin[R]. 2024.
- [4] 程湘,胡鹏,张海坤,等. 锰矿主要类型、分布特点及开发现状[J]. 中国地质, 2021,48(1):102-119. CHENG Xiang, HU Peng, ZHANG Haikun, et al. The main types, distribution and current development of manganese ore deposits[J]. Geology in China, 2021,48(1):102-119.
- [5] 邓文兵,张彦文,孔令湖,等. 中国锰矿资源现状与国家级锰矿床实物地质资料筛选[J]. 中国矿业, 2019,28(9):175-182. DENG Wenbing, ZHANG Yanwen, KONG Linghu, et al. Current status of manganese ore resources in China and selecting for national physical geological data of manganese ore deposit[J]. China Mining Magazine, 2019,28(9):175-182.
- [6] 吴昊,王自国,路萌. 贵州锰矿资源现状简析及发展建议[J]. 中国锰业, 2022,40(2):6-10. WU Hao, WANG Ziguo, LU Meng. A brief analysis of manganese resources in Guizhou Province and some development suggestions[J]. China's Manganese Industry, 2022,40(2):6-10.
- [7] 王杨,伍成波,岳林,等. 高磷菱锰矿焙烧-氨浸实验研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(5):100-103. WANG Yang, WU Chengbo, YUE Lin, et al. Experimental Research on roasting and ammonia leaching of high phosphorus rhodochrosite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(5):100-103.
- [8] 邹兴. 一种改进的菱锰矿湿法提取锰的方法:中国,CN02116945.4[P]. 2003-11-05. ZOU Xing. An improved method for leaching manganese from rhodochrosite: China, CN02116945.4[P]. 2003-11-05.
- [9] 张辉,宋达,王泽江,等. 菱锰矿开发利用及其制备硫酸锰工艺研究进展[J]. 盐科学与化工, 2023,52(2):13-16. ZHANG Hui, SONG Da, WANG Zejiang. The research process of the development and utilization of the rhodochrosite and the preparation of manganese sulfate[J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 2023,52(2):13-16.
- [10] 汤文果. 高硫酸锰矿与软锰矿直接浸出实验[J]. 四川有色金属, 2014(3):38-40. TANG Wenguo. High sulphur manganese carbonate and manganese ore direct leaching experiment[J]. Sichuan Nonferrous Metals, 2014(3):38-40.
- [11] 刘亮. 低品位菱锰矿两种浸出工艺综合利用试验研究[J]. 江西冶金, 2010,30(5):5-7. LIU Liang. Experimental study on comprehensive use of two leaching processes for low grade manganese[J]. Jiangxi Metallurgy, 2010,30(5):5-7.
- [12] 孟运生,徐晓军,王吉坤. 贫锰矿细菌浸出试验研究[J]. 湿法冶金, 2002,21(4):184-187. MENG Yunsheng, XU Xiaojun, WANG Jikun. Research on bacteria leaching of low grade manganese ore[J]. Hydrometallurgy of China, 2002,21(4):184-187.
- [13] 李小英,彭建蓉,阎江峰. 高硅低品位锰矿加压浸出锰的试验研究[J]. 云南冶金, 2014,43(4):28-31. LI Xiaoying, PENG Jianrong, YAN Jiangfeng. Experimental study on pressure leaching of high silicon low grade manganese ore[J]. Yunnan Metallurgy, 2014,43(4):28-31.
- [14] 钱振,谭杰,李重洋,等. 电解锰阳极液浸出菱锰矿的热力学和动力学研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(1):77-80. QIAN Zhen, TAN Jie, LI Chongyang, et al. Thermodynamics and kinetics of leaching rhodochrosite from electrolytic manganese anode solution[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(1):77-80.
- [15] 李少平. 菱锰矿与钙镁碳酸盐矿物晶体结构、表面特性和浮选行为研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2019. LI Shaoping. Study on the crystal chemistry, surface characteristics and flotation behavior between rhodochrosite and calcium-magnesium carbonate minerals[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2019.
- 引用本文:王垣智,彭俊,张喜龙,等. 低品位碳酸锰精矿硫酸直接浸出行为研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):147-151. WANG Yuanzhi, PENG Jun, ZHANG Xilong, et al. Direct sulfuric acid leaching behavior of low-grade manganese carbonate concentrate[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):147-151.

(上接第146页)

- [12] GENG Shuhua, LI Guangshi, ZHAO Yong, et al. Extraction of valuable metals from low nickel matte by calcified roasting-acid leaching process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019,29(10):2202-2212.
- [13] 司俊起,赵云,王传强. 吉恩镍业转炉吹炼生产高冰镍生产实践[J]. 中国有色冶金, 2019,48(6):30-33. SI Junqi, ZHAO Yun, WANG Chuanqiang. Production practice of high nickel matte produced by converter in Ji'en Nickel Smelter[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2019,48(6):30-33.
- [14] 吴海祥,吴维新,岳涛,等. 某铜冶炼渣浮选回收铜工艺试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(1):57-59. WU Haixiang, WU Weixin, YUE Tao, et al. Reclaiming copper resource from copper smelting slag by flotation approach[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(1):57-59.
- [15] 刘超,陈志强,胡红喜,等. 国外某低品位难选硫化铜镍矿选矿工艺研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):70-73. LIU Chao, CHEN Zhiqiang, HU Hongxi, et al. Beneficiation experiment on low-grade refractory copper-nickel sulfide ore from abroad[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(6):70-73.
- 引用本文:周兆安,刘小文,李俊,等. 铜镍电镀污泥硫化熔炼中冰镍的热力学及工艺研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):141-146. ZHOU Zhaoan, LIU Xiaowen, LI Jun, et al. Thermodynamic analysis and processing technology for producing medium-grade nickel matte by sulfidation smelting of copper-nickel electroplating sludge[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):141-146.