

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.02.002

高冰镍浸出渣还原浸出工艺研究

金鑫^{1,2}, 邓志敢¹, 于睿², 周宣通¹, 徐红江², 魏昶¹, 蒋光德²

(1. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 昆明 650093;

2. 盛屯能源金属化学(贵州)有限公司, 贵州 福泉 550508)

摘要:以湿法冶炼高冰镍过程中产生的高冰镍浸出渣为研究对象,采用二氧化硫对高冰镍渣加压还原浸出,考察了初始硫酸浓度、液固比、通气方式、浸出温度和浸出时间对高冰镍渣还原浸出过程铜、铁行为的影响;对还原浸出液采用置换沉淀和冷冻结晶的方法,对还原浸出中铜和铁进行分离回收。结果表明:在初始硫酸浓度 100 g/L、液固比 6 mL/g、反应时间 3 h、反应温度 90 °C、二氧化硫分压 0.15 MPa 的条件下,铁和铜的浸出率分别为 99.35%、77.46%,浸出液中铁几乎全部为亚铁离子;在硫酸含量 20~30 g/L、温度 70 °C、铁粉加入量 5.7 g/L、反应时间 40 min 的条件下,对还原浸出液进行置换沉铜,沉铜率达到了 99.70%,渣含铜为 67.91%。在温度 -10 °C、保温时间 20~30 min、初始硫酸浓度 100 g/L 的条件下,对沉铜后液进行冷冻结晶制备硫酸亚铁,铁沉淀率达到了 72.6%,七水硫酸亚铁纯度达到了 92.93%。

关键词:高冰镍渣;还原浸出;置换沉铜;冷冻结晶

中图分类号:TF815

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2024)02-0008-08

Study on Reduction Leaching Process of High Nickel Matte Leaching Residue

JIN Xin^{1,2}, DENG Zhigan¹, YU Rui², ZHOU Xuanton¹, XU Hongjiang²,
WEI Chang¹, JIANG Guangde²

(1. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Shengtun Energy Metal Chemistry (Guizhou) Co., Ltd., Fuquan 550508, Guizhou, China)

Abstract: In order to achieve the purpose of resource utilization of high nickel matte leaching residue from hydrometallurgy process of the high nickel matte, the reduction leaching behavior of copper and iron in high nickel matte residue under the action of sulfur dioxide was studied. The effects of initial sulfuric acid concentration, liquid-solid ratio, ventilation, leaching temperature, and leaching time on reduction leaching behavior of high nickel matte residue were investigated. The methods of displacement precipitation and freezing crystallization were used to separate and recover copper and iron from the reduction leaching solution. The experimental results show that under the conditions of initial sulfuric acid concentration of 100 g/L, liquid-solid ratio of 6 mL/g, reaction time of 3 h, reaction temperature of 90 °C, sulfur dioxide partial pressure of 0.15—0.2 MPa, the leaching rates of iron and copper are 99.35% and 77.46% respectively, and iron in the leaching solution is almost all ferrous ions. Under the conditions of sulfuric acid content of 20—30 g/L, temperature of 70 °C, iron powder addition of 5.7 g/L, and reaction time of 40 min, the copper precipitation rate from reduction leaching solution reaches 99.70% and the copper content in slag is 67.91%. Finally, ferrous sulfate was prepared by freezing crystallization of the liquid after copper deposition. Iron precipitation rate is

收稿日期:2023-09-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51964029);昆明理工大学校企合作项目(KKF0202352055)

作者简介:金鑫(1982-),男,博士;通信作者:邓志敢(1983-),男,副教授

72.6% and the purity of ferrous sulfate heptahydrate is 92.93% under the conditions of temperature of $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, holding time of 20—30 minutes, and initial sulfuric acid concentration of 100 g/L.

Key words: high nickel matte residue; reduction leaching; cementation of copper; freezing crystallization

镍是经济社会发展及战略新兴产业不可缺少的基础材料和战略资源,广泛用于工业、国防军工、航空航天以及日常生活等领域,其中最主要的用途是生产不锈钢及镍合金^[1-3],同时在新能源新材料领域也表现出了强劲的发展势头,特别是近年来随着新能源汽车行业的迅猛发展,镍凭借优异的电化学性能在电池领域的应用得以迅速扩大,展现出广阔的发展前景^[4-5]。

镍目前可供经济开采的矿物资源主要有硫化镍矿、红土镍矿^[6]。红土镍矿主要分为表层褐铁矿型红土镍矿和底层腐殖土型红土镍矿,含铜量都较低。褐铁矿型红土镍矿含镍低、含钴高,主要采用全湿法冶炼工艺,产出氢氧化镍钴中间品或硫酸镍、硫酸钴产品;含镍高钴低的腐殖土型红土镍矿通常采用火法工艺,产出镍铁,近来也有再将镍铁进一步吹炼成高冰镍的生产案例,以及直接采用红土镍矿生产高冰镍的产业化研究^[7-8]。

硫化镍矿冶炼的主体工艺首先通过选矿富集得到镍精矿,然后将镍精矿经过火法造钼熔炼除去脉石、大部分铁与一部分硫,产出低冰镍,低冰镍吹炼脱铁硅后获得高冰镍。高冰镍可采用电解精炼工艺或湿法冶金工艺处理。湿法工艺的典型流程为高冰镍选择性浸出工艺,即硫酸常压浸出—高温加压浸出联合流程,产出以赤铁矿为主并富集了的铜、镍、铁和贵金属氧压浸出渣,具有重要的综合回收价值^[9-10]。

现行处理方法主要包括选矿分离工艺和火法分离工艺,选矿分离工艺主要为浮选法,铜、镍回收效率较高,但贵金属回收率低;火法分离工艺主要为高温熔炼贫化,铜、镍及贵金属都能有效富集,但能耗较高^[11]。随着环保政策愈趋严格及冶炼工艺绿色低碳转型的需要,对高冰镍浸出渣综合利用技术又提出了新的要求,针对已有工艺,广大科技工作者开展了大量的湿法浸出工艺研究。湿法浸出工艺主要分为两类方法,一是浸出铜和镍,抑制铁不浸出而保留在渣中;二是浸出铁,将铜、镍与贵金属在渣中富集,但存在有价金属分离富集比低、铁未能资源化利用等问题^[12]。如何实现高冰镍氧压浸出渣的高效回收铜和镍、分离富集贵金属及铁资源化利用亟待解决。

本文针对高冰镍氧压浸出渣的资源综合利用问题,采用全湿法冶金工艺,将铜镍分离富集为富铜镍物料,贵金属富集于渣,铁制备成硫酸亚铁产品,从

而实现高效回收铜和镍、分离富集贵金属及铁资源化利用的目的,达到固废综合利用及无废水、废渣的清洁冶炼。通过硫酸溶解高冰镍氧压浸出渣中的赤铁矿,使三价铁浸出进入溶液,且浸出过程采用低温作业,避免已溶出的三价铁高温沉淀为铁矾类物质,利用三价铁的氧化性氧化浸出硫化铜,从而实现铜、铁高效浸出,大幅减少浸出渣量,渣中贵金属富集比高,实现了冶炼渣高值化。浸出过程利用二氧化硫的还原性,在不引入其他物质的同时,将溶液中三价铁同步还原为二价铁,最终将铁以硫酸亚铁结晶形式回收,实现了铁资源化利用。同时在硫酸亚铁冷冻结晶过程中通过添加纯硫酸,提高了硫酸亚铁结晶效率,降低了结晶后液中铁浓度,获得可返回工艺流程使用的低浓度硫酸亚铁的硫酸溶液。

1 试验

1.1 试验原料

高冰镍渣来源于某炼镍厂,采用 ICP-AES 对原料中主要成分进行了分析,结果为(%): Fe 52.43、Cu 3.89、Ni 0.84、Ag 0.12、S 3.58、Zn 0.063、Pb 0.43、As 1.67。可知,原料含铁 52.43%,铜含量为 3.89%,镍为 0.84%,原料中都含有一定量的银及其他贵金属,具有较高回收价值。

高冰镍渣原料的 XRD 谱如图 1 所示,原料中的主要成分是三氧化二铁。同时,图 2 高冰镍渣的 SEM-EDS 图谱显示,原料颗粒细小致密,形状不规则,呈团聚状。

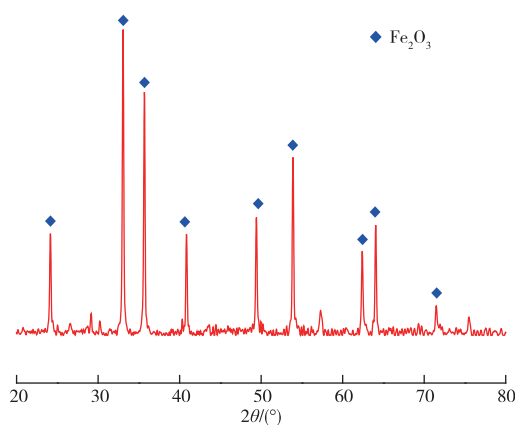


图 1 高冰镍渣的 XRD 谱

Fig. 1 XRD pattern of high nickel matte residue

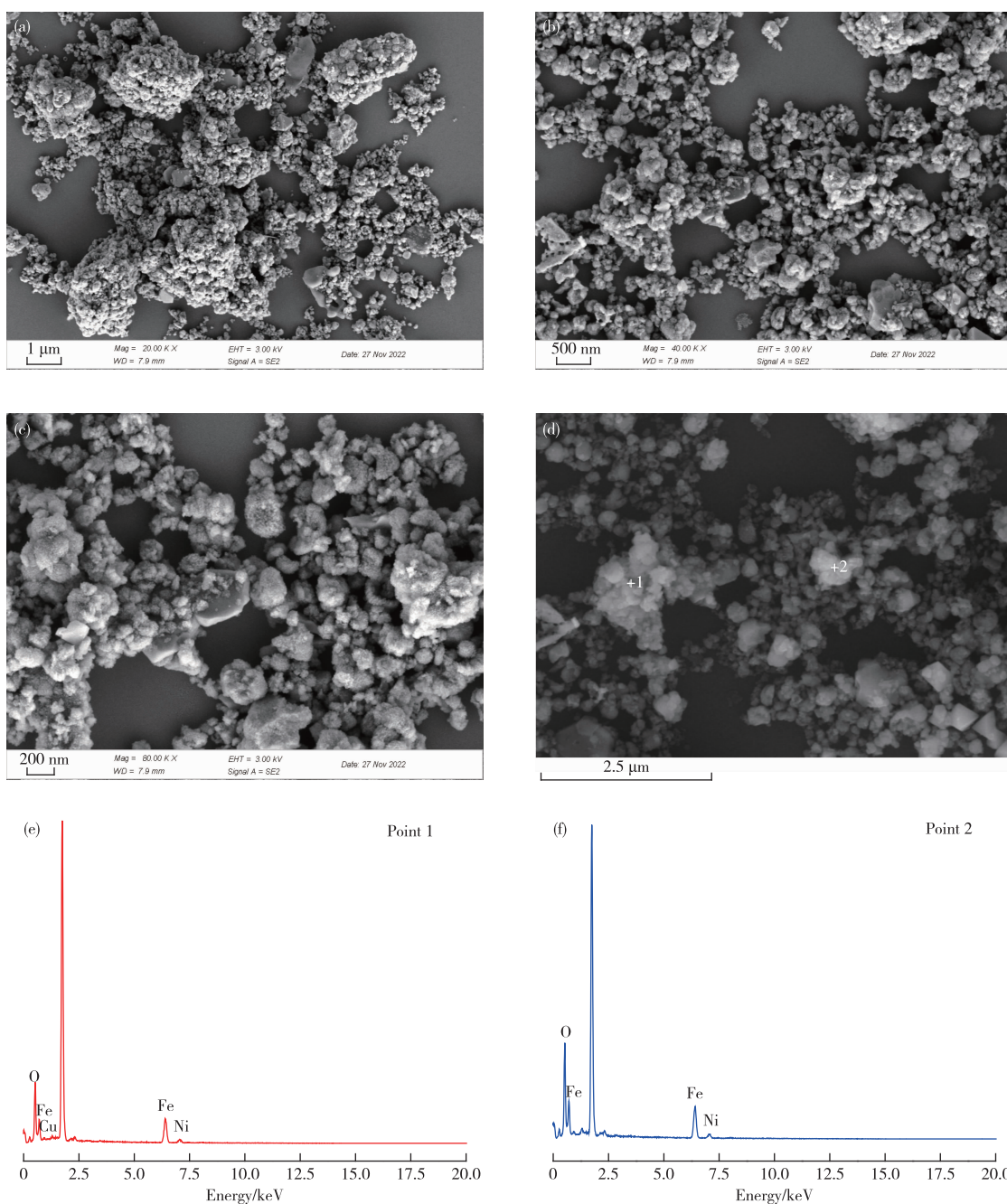


图 2 高冰镍渣原料的 SEM-EDS 图谱

Fig. 2 SEM images and EDS patterns of high nickel matte residue

1.2 试验方法

称取 200 g 高冰镍渣原料放入高压釜中,配置一定浓度的硫酸溶液,根据液固比倒入釜中,盖上釜盖,对角拧紧,拧紧后检查进口气口的气密性,打开电源,打开搅拌,开启轴冷水,开启加热,到达指定温度后关闭加热,开始计时,期间注意温度变化,温度高了则开启盘冷水降温至指定温度。反应到指定时间后停止加热,从高压釜中取出矿浆,清洗高压釜后,测量矿浆质量、体积和 pH 后沉降一段时间,然

后将矿浆过滤,测量滤液质量、体积、pH 及滤渣质量,洗渣后测量渣的湿重及烘干后的干重,送检测。根据渣的分析结果按照公式(1)计算铜、铁浸出率:

$$\text{金属浸出率} = \frac{M - m \times n}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式中, M 为原料中铜、铁质量(g); n 为渣中铜、铁含量(%); m 为干渣质量(g)。

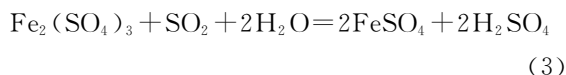
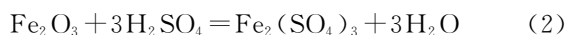
由于浸出液中含铜较高,可以用浸出液进行沉

铜,达到回收有价金属的目的,还原浸出液混合后取出 1 000 mL,倒入烧杯中进行加热,边加热边搅拌,到达指定温度后,加入称量好的铁粉,少量多次加入,避免因反应不完全造成误差;反应时间到了以后,取出溶液测量相关数据。

沉铜后液中铁含量很高,且主要以硫酸亚铁的形式存在,通过冷冻结晶制备七水硫酸亚铁。沉铜后液混合后取出 500 mL,倒入烧杯中,置于冷冻机降温到试验所需温度,保温一段时间后取出,测量相关数据,对结晶渣进行干燥处理,送样检测。

1.3 试验原理

在热酸浸出处理高冰镍渣时,渣中铁的化合物在溶解过程中会有大量的高价铁离子进入溶液,而溶液中存在大量的三价铁离子会很大程度提高溶液的氧化还原电位,不利于复杂铁氧化物的继续溶解,从而导致金属浸出率较低。在硫酸溶液中,SO₂具有较强的还原性,而且溶解度较高,还能够使还原溶液中存在的三价铁离子有效地被还原,在反应的过程中不会带入其它的杂质离子,是一种理想的还原剂。高冰镍渣中主要的物相是氧化铁,二氧化硫在酸性条件下能够有效促进氧化铁的溶解,最终形成含有硫酸铜、硫酸镍、硫酸亚铁的溶液和富含金银等贵金属的渣。反应原理为:



高冰镍渣还原浸出后的还原浸出液中具有一定量的铜,采用还原铁粉置换沉铜法主要反应:



通过铁铜的相对分子质量以及还原浸出液样品所测得的铜含量,计算出所需加入的铁粉的质量。

利用可溶物质在不同温度下的溶解度不同,根据硫酸亚铁的溶解度随着温度的降低而逐渐减小,将硫酸亚铁溶液放在一个比较低的温度下保温一段时间就可以达到冷却结晶制备七水硫酸亚铁晶体的目的。

2 结果与讨论

2.1 二氧化硫作用下高冰镍渣的还原浸出

2.1.1 初始硫酸浓度对铜、铁浸出率的影响

在液固比为 6 mL/g(体积质量比,下同)、反应温度 90 °C、反应时间 3 h、二氧化硫分压 0.15 MPa 的条件下,考察了初始硫酸浓度分别为 90、100、110、120、130 g/L 时对高冰镍渣中铜和铁等浸出行为的影响,结果如表 1 所示。

表 1 初始硫酸浓度对高冰镍渣还原浸出的影响

Table 1 Effects of initial concentration of sulfuric acid on reduction leaching of high nickel matte residue

硫酸浓度/(g·L ⁻¹)	液全铁/(g·L ⁻¹)	液含 Fe ²⁺ /(g·L ⁻¹)	液含 Cu/(g·L ⁻¹)	渣含 Fe/%	渣含 Cu/%	Fe 浸出率/%	Cu 浸出率/%
90	81.6	81.2	4.64	23.97	15.06	96.80	73.10
100	83.2	83.0	4.54	6.63	16.95	99.31	72.28
110	78.4	78.2	4.47	7.22	17.07	99.05	74.86
120	77.4	77.0	4.49	5.90	17.47	99.12	75.33
130	68.4	68.2	4.12	14.74	14.91	98.30	77.20

由表 1 可知,硫酸浓度为 90 g/L 时,铁的浸出率为 96.8%,硫酸浓度增大到 130 g/L 后,铁的浸出率增大到 98.3%;硫酸浓度为 90 g/L 时铜的浸出率为 73.1%,随硫酸浓度增大,铜的浸出率随之增大,在硫酸浓度为 130 g/L 时,铜的浸出率为 77.2%。硫酸浓度达到 130 g/L 时,溶液 pH 较低,有利于溶液的过滤;90 g/L 时由于硫酸浓度过低,最终溶液的 pH 会偏高,容易生成胶体,且金属不易溶解,不利于后续的过滤等过程。硫酸亚铁在硫酸浓度较高时溶解度低,会在氧化铁表面形成一层膜,起到阻碍氧化铁与硫酸反应的作用,硫酸浓度过高时,在生成

硫酸亚铁后,硫酸浓度依旧很高,导致硫酸与氧化铁很难继续反应,浸出率也就偏低。因此,硫酸浓度控制在 100 g/L 左右比较合适,此时浸出液中铜的浓度最高,为 83.2 g/L,渣含铁低,渣量小,且铜浸出率较低,有利于铜在渣中富集。

2.1.2 反应时间对铜、铁浸出率的影响

在硫酸浓度 100 g/L、液固比 6 mL/g、反应温度 90 °C、二氧化硫分压 0.15 MPa 的条件下,考察了反应时间分别为 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 h 时对高冰镍渣中铜和铁浸出行为的影响,结果如表 2 所示。

表2 反应时间对高冰镍渣还原浸出的影响

Table 2 Effects of reaction time on reduction leaching of high nickel matte residue

反应时间/h	液全铁/(g·L ⁻¹)	液含 Fe ²⁺ /(g·L ⁻¹)	液含 Cu/(g·L ⁻¹)	渣含 Fe/%	渣含 Cu/%	Fe 浸出率/%	Cu 浸出率/%
1.5	70.8	68.8	6.29	50.54	0.68	83.61	97.26
2.0	79.8	76.0	4.52	9.71	18.03	99.07	76.79
2.5	78.8	78.6	4.37	3.88	21.79	99.15	72.19
3.0	80.0	79.8	4.49	3.13	22.31	99.12	68.70
3.5	81.0	79.4	4.44	21.05	9.58	94.32	74.58

由表2可知,浸出液中的铁浓度在反应时间为3 h时达到最大值,为80 g/L,渣含铁也在反应时间3 h时最小,为3.13%;而浸出液中铜的浓度,在反应时间1.5 h时,为最大值6.29 g/L,渣含铜也在此时为最小值0.68%。铁的渣计浸出率在3 h之前随反应时间的增加而上升,3 h后则呈下降趋势,在2.0、2.5、3.0 h这三个时间的浸出率无明显变化,均在99%左右;铜的浸出率随反应时间的增加呈现下降趋势,且在3 h时达最小值68.7%,有利于铜在渣中富集。因此,反应时间控制在3 h左右较为合适。

2.1.3 反应温度对铜、铁浸出率的影响

在硫酸浓度100 g/L、液固比6 mL/g、反应时间3 h、二氧化硫分压0.15 MPa的条件下,考察了反应温度分别为70、80、90、100 °C时对高冰镍渣中铜和铁等浸出行为的影响,结果如表3所示。由表3可知,浸出液中的铁浓度在反应温度为90 °C时最大,为79.6 g/L,渣含铁也在此时达到相对较小的值,为5.40%。铁的渣计浸出率随着反应温度的升高而增大,但是在90 °C以后变化缓慢;铜的渣计浸出率则随着温度的升高而降低,高温有利于铜的富集。因此,反应温度控制在90 °C左右较为合适。

表3 反应温度对高冰镍渣还原浸出的影响

Table 3 Effects of reaction temperature on reduction leaching of high nickel matte residue

反应温度/°C	液全铁/(g·L ⁻¹)	液含 Fe ²⁺ /(g·L ⁻¹)	液含 Cu/(g·L ⁻¹)	渣含 Fe/%	渣含 Cu/%	Fe 浸出率/%	Cu 浸出率/%
70	70.6	70.4	5.90	69.29	0.68	74.23	97.25
80	75.6	75.4	5.26	35.24	3.30	94.12	92.31
90	79.6	78.8	4.01	5.40	19.58	99.16	73.46
100	73.6	73.4	4.22	4.39	22.09	99.18	72.11

2.1.4 液固比对铜、铁浸出率的影响

在硫酸浓度100 g/L、反应温度90 °C、反应时间3 h、二氧化硫分压0.15 MPa的条件下,考察了液固比分别为5.5、6.0、6.5 mL/g时对高冰镍渣中铜

和铁浸出率的影响,结果如表4所示。由表4可知,液固比为6 mL/g时,铁的渣计浸出率为最大值99.6%,渣铁含量最低,铜在渣中也得到了一定富集。

表4 液固比对高冰镍渣还原浸出的影响

Table 4 Effects of liquid-solid ratio on reduction leaching of high nickel matte residue

液固比/(mL·g ⁻¹)	液全铁/(g·L ⁻¹)	液含 Fe ²⁺ /(g·L ⁻¹)	液含 Cu/(g·L ⁻¹)	渣含 Fe/%	渣含 Cu/%	Fe 浸出率/%	Cu 浸出率/%
5.5	83.2	83	4.54	6.63	16.95	99.2	72.3
6.0	77.4	73.2	5.54	5.90	17.47	99.6	74.6
6.5	73.4	77.0	4.49	5.96	12.44	99.4	81.8

2.1.5 还原浸出综合验证试验

在初始硫酸浓度100 g/L、液固比6 mL/g、反应温度90 °C、反应时间3 h、二氧化硫分压0.15 MPa条件下进行2组综合验证试验,结果如表5所示。由表5可知,铁的渣计浸出率分别为99.28%、

99.42%,铜的渣计浸出率分别为78.21%、78.72%。试验所得还原浸出渣率仅为5%左右,渣中铜含量大于15%、银含量富集至2%以上,还原浸出液的硫酸含量在20~30 g/L,有利于后续分离铜和铁。

表5 综合验证试验结果

Table 5 Synthesis test results

液全铁/(g·L ⁻¹)	液含 Fe ²⁺ /(g·L ⁻¹)	液含 Cu/(g·L ⁻¹)	渣含 Fe/%	渣含 Cu/%	渣含 Ag/%	渣率/%	Fe 浸出率/%	Cu 浸出率/%
75.8	75.2	4.32	6.77	15.35	2.17	5.52	99.28	78.21
72.4	72.2	4.71	5.84	16.13	2.34	5.13	99.42	78.72

试验所得的还原浸出渣的 SEM 形貌如图 3 所示。由图 3 可以看出,还原浸出渣的形貌并不规则,

在还原浸出渣中还有一定的未浸出的铁、铜化合物,以及一定量的二氧化硅。

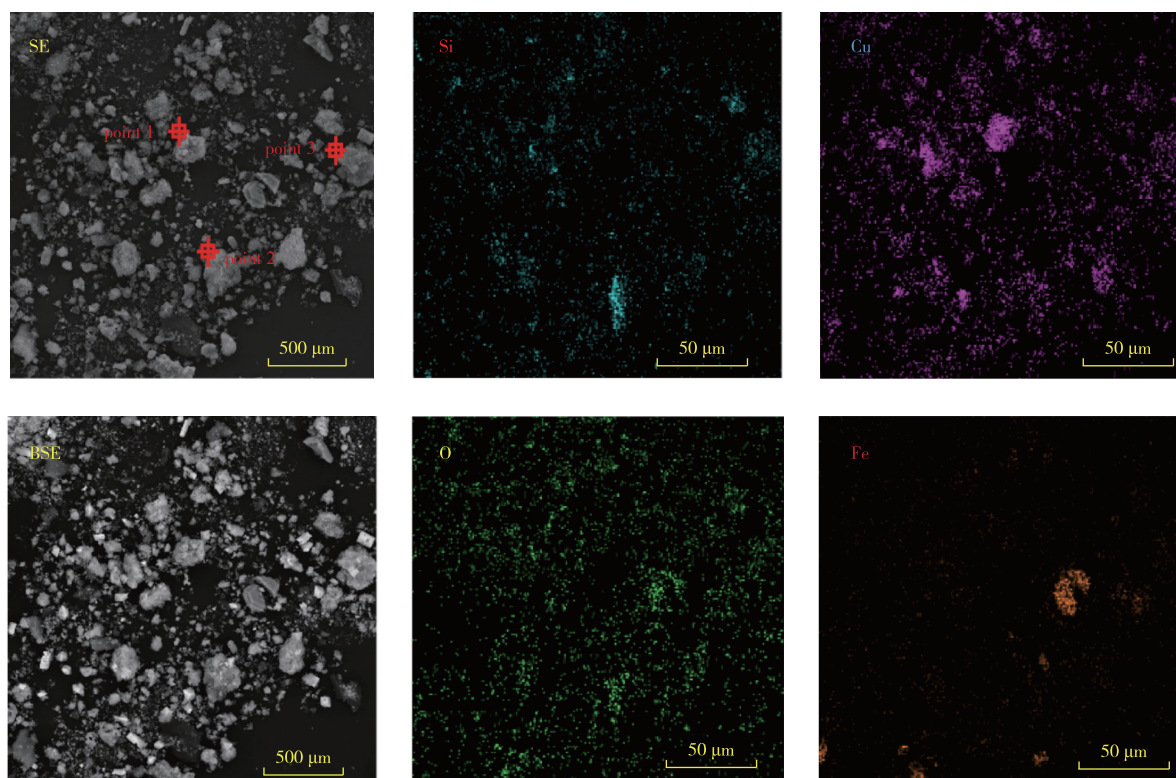


图 3 还原浸出渣的 SEM 图谱

Fig. 3 SEM images of reduction leaching residue

2.2 还原浸出液中铜的回收及铁资源化

2.2.1 还原浸出液置换沉铜

由以上还原浸出综合条件试验可知,还原浸出液中含铜、铁较高,为实现溶液中铜与铁的分选回收,还原浸出液经置换沉淀可得到含铜品位高的铜

渣,可作为炼铜的原料。将还原浸出液混合,液中含铜 4.54 g/L,全铁 75.5 g/L。取 1 L 还原浸出混合液,在温度 70 °C、铁粉加入量 5.7 g/L(依据式(4)和式(5)计算),研究了反应时间分别为 20、40、60 min 时铜的沉淀情况,结果如表 6 所示。

表 6 还原浸出液置换沉铜试验结果

Table 6 Test results of copper precipitation from reduction leaching solution

反应时间/min	沉铜后液主要成分		沉铜渣主要成分/%		铜沉淀率/%
	Cu/(g · L ⁻¹)	Fe/(g · L ⁻¹)	Cu	Fe	
20	20.36	81.0	66.10	4.37	99.52
40	15.42	79.6	67.91	3.23	99.70
60	28.94	79.6	67.29	0.11	99.31

由表 6 可知,沉铜后液中的铜浓度在反应时间为 40 min 时达到最小值,为 15.42 mg/L,渣含铜在此时取最大值 67.91%。反应时间不同时铜沉淀率都在 99% 以上,40 min 时达到了 99.7%。

铜渣的 XRD 谱如图 4 所示。由图 4 可以看出,

铜渣形貌并不规则,在沉铜渣中铜主要以 Cu₂O、Cu 的形式存在。同时,表 6 结果显示,铜渣中仍存在铁的化合物,说明存在少量未反应的铁粉。还原浸出液中的铜已经绝大部分被置换入铜渣中,残留有少量的铜在溶液中可避免砷化氢的生成。

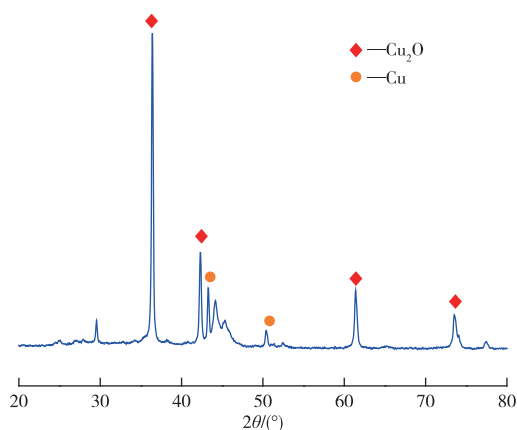


图4 铜渣的XRD谱

Fig. 4 XRD pattern of copper residue

2.2.2 沉铜后液冷冻结晶制备七水硫酸亚铁

由以上置换沉铜综合条件试验可知,沉铜后液含铁较高,且基本都以硫酸亚铁的形式存在,为实现溶液中铁的回收与资源化,沉铜后液经冷冻结晶制备七水硫酸亚铁,可作为产品。

试验沉铜后液混合,混合液中的铁浓度达到了80 g/L,铜的浓度只有24.3 mg/L。取500 mL沉铜后液混合液,在温度-10℃,加入硫酸浓度100 g/L的条件下,研究了保温时间分别为20、30、40 min时对铁沉淀的影响,结果如表7所示。由表7可知,在保温时间为20 min时,铁的沉淀率为70.3%,在保温时间为30 min时,铁的沉淀率达到了72.61%,且在30 min之后,铁的沉淀率受保温时间影响较小,考虑到冷却保温时间越长,电量消耗以及机器损耗增大,所以保温时间不宜过长,保温时间在20~30 min比较合适,经检测,所得七水硫酸亚铁结晶纯度为92.93%。

表7 硫酸亚铁溶液冷冻结晶试验结果

Table 7 Freezing crystallization test results of ferrous sulfate solution

保温时间/ min	原液含Fe/ (g·L ⁻¹)	冷冻后液含铁/ (g·L ⁻¹)	Fe沉淀 率/%
20	80	26.4	70.30
30	80	24.6	72.61
40	80	24.5	72.68

3 结论

1)高冰镍渣在初始硫酸浓度100 g/L、液固比6 mL/g、反应时间3 h、反应温度90℃、二氧化硫分压0.15 MPa的条件下进行还原浸出,铁和铜的浸出率分别为99.35%、77.46%,浸出液中铁几乎全

部为亚铁离子,硫酸含量在20~30 g/L,有利于后续分离铜和铁。

2)还原浸出液在温度70℃、铁粉加入量5.7 g/L,反应时间40 min的条件下进行置换沉铜,沉铜率达到了99.70%,渣含铜为67.91%。

3)对沉铜后液进行冷冻结晶制备硫酸亚铁,在温度-10℃、保温时间20~30 min、初始硫酸浓度100 g/L的条件下,铁沉淀率达到了72.6%,七水硫酸亚铁纯度达到了92.93%。在硫酸亚铁冷冻结晶过程通过添加纯硫酸,提高了硫酸亚铁结晶效率,降低了结晶后液中铁浓度,获得可返回工艺流程使用的低浓度硫酸亚铁的硫酸溶液。

参考文献

- [1] 蒋开喜,王玉芳,郑朝振,等. 硫化镍加压浸出研究进展与应用[J]. 矿冶,2018,27(3):45-50.
JIANG K X, WANG Y F, ZHENG C Z, et al. Research development and utilization of pressure leaching on nickel sulfide[J]. Mining and Metallurgy, 2018, 27(3): 45-50.
- [2] 杨晓霞. 镍矿的湿法冶金研究现状与发展前景[J]. 世界有色金属, 2010(7):44-45.
YANG X X. Research status and development prospect of hydrometallurgy of nickel ore[J]. World Nonferrous Metals, 2020(7):44-45.
- [3] 张亮,杨卉芃,冯安生,等. 全球镍矿资源开发利用现状及供需分析[J]. 矿产保护与利用, 2016, 36(1):64-69.
ZHANG L, YANG H P, FENG A S, et al. Study on current situation and analysis of supply and demand of global nickel resource[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2016, 36(1):64-69.
- [4] 付海阔,沈恒冠,赵喜太,等. 镍钴锰三元前驱体废料与硫化镍废料的联合浸出[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(8):15-19.
FU H K, SHEN H G, ZHAO X T, et al. Integrated leaching of wastes of nickel-cobalt-manganese ternary precursor and nickel sulfide[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022(8):15-19.
- [5] 张学东,王海北,刘三平,等. 粗制氢氧化镍钴(MHP)两段浸出工艺研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(8):32-36.
ZHANG X D, WANG H B, LIU S P, et al. Studt on two stage leaching process of crude nickel cobalt hydroxide (MHP)[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(8):32-36.
- [6] 赵顶,马保中,王成彦,等. 褐铁型红土镍矿湿法工艺研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(2):

- 401-414.
ZHAO D, MA B Z, WANG C Y, et al. Research progress of limonitic laterite hydrometallurgy[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023,54(2):401-414.
- [7] 王寨寨,李博,魏永刚.红土镍矿处理工艺研究现状[J].矿产综合利用,2022(5):95-101.
WANG Z Z, LI B, WEI Y G. Research status of laterite nickel ore processing technology [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(5):95-101.
- [8] 崔富晖,牟文宁,顾兴利,等.铜镍氧硫混合矿焙烧-浸出过程铜、镍、铁的转化[J].中国有色金属学报,2017,27(7):1471-1478.
CUI F H, MU W N, GU X L. Transformation of cooper, nickel and iron of oxide-sulfide mixed copper-nickel ore during roasting-leaching process [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(7): 1471-1478.
- [9] 陈龙义,玉日泉.高冰镍加压浸出技术[J].世界有色金属,2022(21):1-3.
CHEN L Y, YU R Q. High nickel matte pressure leaching technology [J]. World Nonferrous Metals, 2022(21):1-3.
- [10] 谢铿,王海北,马育新,等.高冰镍浸出渣冶金过程多金属走向行为探究[J].有色金属(冶炼部分),2021(12):20-27.
XIE K, WANG H B, MA Y X, et al. Exploration on multi-metal distribution behavior in metallurgical process of leaching residue of high nickel matte [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(12): 20-27.
- [11] 马红周,王耀宁,燕超,等.从高冰镍浸出渣中浸出铜[J].湿法冶金,2015,34(6):492-495.
MA H Z, WANG Y N, YAN C, et al. Leaching of copper from leaching residue of high grade nickel matte [J]. Hydrometallurgy of China, 2015, 34(6): 492-495.
- [12] 张应婷,陈胜利,吕致振.镍电解精炼过程中除铁工艺的研究及应用[J].中国有色冶金,2022,51(6):36-42.
ZHANG Y T, CHENG S L, LV Z Z. Study and application of iron removal technology in electrolytic refining of nickel [J]. Nonferrous Metallurgy of China, 2022, 51(6): 36-42.