

含镍料液中硝酸铵和硝酸镍的分离研究^①

李 雅¹, 王启伟¹, 赵宇婧¹, 刘晨明²

(1.北京赛科康仑环保科技有限公司,北京 100083; 2.中国科学院过程工程研究所,北京 100190)

摘要:以分离并回收含镍料液中的硝酸铵和硝酸镍为目的,验证了纳滤和硫化铵沉淀联用技术的可行性,并通过考察纳滤浓水侧压力、纳滤级数、硫化铵沉淀 pH 值等的影响,获得适宜的工艺路线为:两级纳滤+KLNi-01 离子交换除镍+硫化铵沉镍+硝酸溶解回收硝酸镍。操作参数如下:纳滤进水 pH=6、浓水侧压力 0.8 MPa,经两级纳滤后,产水镍含量降至 0.181 g/L,再经 KLNi-01 树脂吸附后,镍含量降至 0.002 mg/L;纳滤浓水在初始 pH=6、硫化铵溶液加入量 36 mL/L 条件下沉镍,此时出水镍含量 4.7 mg/L,无硫化物检出;使用硝酸溶解硫化镍沉淀,可获得浓度为 258.40 g/L 的硝酸镍溶液。物料衡算可得:处理 1 m³ 含镍料液,获得产水 0.3 m³,消耗 20%~26% 的硫化铵溶液 25.20 L,消耗浓硝酸 37.22 L,消耗水体积 109.05 L,可获得 258.40 g/L 的硝酸镍溶液 192.93 L。

关键词: 纳滤分盐; 硫化铵; 硝酸镍; 硝酸铵

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.01.026

文章编号: 0253-6099(2023)01-0118-05

Separation of Ammonium Nitrate and Nickel Nitrate from Nickel-Containing Feed Solution

LI Ya¹, WANG Qiwei¹, ZHAO Yujing¹, LIU Chenming²

(1. Beijing Cycle Columbus Environmental Science and Technology Co Ltd, Beijing 100083, China; 2. Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A technique of nanofiltration combined with ammonium sulfide precipitation was verified for its feasibility of separating and recovering ammonium nitrate and nickel nitrate from nickel-containing feed solution. Based on investigating the effects of pressure on the side of concentrate stream in nanofiltration, stages of nanofiltration and pH value of ammonium sulfide precipitate, an appropriate route was determined, including two-stage nanofiltration, KLNi-01 ion exchange to remove nickel, nickel precipitation with ammonium sulfide, and dissolution with nitric acid to recover nickel nitrate. The feed stream with pH of 6 was subjected to a two-stage nanofiltration, with pressure of 0.8 MPa on the side of concentrate stream. The obtained permeate stream with nickel content decreased to 0.181 g/L was adsorbed with KLNi-01 resin, leading to the nickel content therein further reduced to 0.002 mg/L. Then, 36 mL/L ammonium sulfide solution was added into the concentrate stream with an initial pH of 6 for nickel precipitation. The generated solution had nickel content of 4.7 mg/L, and no sulfide was detected, while the obtained precipitate of nickel sulfide was then dissolved with nitric acid, and the nickel nitrate solution was obtained with concentration of 258.40 g/L. The material balance calculation shows that treatment of 1 m³ of nickel-containing feed stream can generate 0.3 m³ permeate, and 192.93 L of nickel nitrate solution with concentration of 258.40 g/L can be generated with the consumption of 25.20 L of ammonium sulfide solution with concentration of 20%–26%, 37.22 L of concentrated nitric acid and 109.05 L of water.

Key words: salt separation by nanofiltration; ammonium sulfide; nickel nitrate; ammonium nitrate

镍冶炼主要以硫化镍矿或氧化镍矿为原料生产金属镍或者其他镍产品^[1-2]。对于硫化镍矿,通过浮选可获得镍精矿(含镍 4%~8%);镍精矿经焙烧、熔炼和吹

炼获得高硫镍,再经缓冷、结晶、离析和细磨等一系列工序获得二次镍精矿;二次镍精矿经电解获得金属镍^[3]。硫化镍的全湿法生产流程是将二次镍精矿通

① 收稿日期: 2022-09-09

作者简介: 李 雅(1990—),女,河北石家庄人,硕士,工程师,主要从事工业废水处理研究。

通信作者: 刘晨明(1981—),男,北京人,博士,研究员,教授级高级工程师,主要从事工业废水处理研究。

过浸出、净液、电积等过程获得电解镍^[4-5]。对于氧化镍(含镍1%~2%),通常采用直接冶炼的方式,获得电炉冶炼镍铁和湿法冶炼镍产品;湿法冶炼处理氧化镍矿通常采用加压酸浸和还原焙烧-氨浸2种流程^[6-8]。

通过湿法冶炼工艺获得的硝酸镍料液中含有大量硝酸铵,使用该混合料液无法制备高纯度的镍产品,因此,将料液中镍、氨分离,并分别回收硝酸铵和硝酸镍具有重要意义。本文采用纳滤分盐初步实现镍氨分离,再使用离子交换树脂深度脱除产水中的残余镍,采用硫化沉淀法提纯浓水中的硝酸镍,实现镍氨的彻底分离。分别考察了纳滤浓水压力、纳滤级数、硫化铵沉镍药剂投加量、pH值等对分离效果的影响,优化了工艺参数,对工业大规模应用具有指导意义。

1 实验部分

1.1 实验原料及试剂

实验原料为四川某企业含镍料液,其水质指标见表1。

表1 四川某企业含镍料液水质指标

| pH 值 | 电导率/ (mS·cm ⁻¹) | 杂质含量/(mg·L ⁻¹) | | | | |
|------|--------------------------------|----------------------------|-------|----------|------------------|------------------------------|
| | | COD | 游离氨氮 | 总氨氮 | Ni ²⁺ | NO ₃ ⁻ |
| 7.78 | 92.21 | 144.5 | 140.8 | 14 654.0 | 11 416 | 89 161 |

主要实验试剂包括:硫化铵、硝酸、氢氧化钠,均为分析纯。

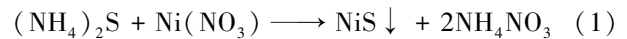
1.2 实验设备及材料

纳滤分盐实验在北京聚瓷公司生产的纳滤膜设备上,纳滤膜为特种专利 TFC[®]聚酰胺复合膜,型号为 TFC[®] SR100,膜结构为玻璃钢缠绕外壳,螺旋卷式。镍离子交换树脂为 KLNi-01。

1.3 实验方法

纳滤分盐:纳滤膜是一种允许溶剂分子或某些低分子量溶质或低价离子透过的功能性半透膜^[9]。在盐溶液中,阴离子因价态不同,在本征负电性的纳滤膜所构成的系统中,得到显著的选择性截留^[10-11],一般而言,一价阴离子(如 Cl⁻)的盐可透过膜,而多价阴离子(如 SO₄²⁻)则具有很高的截留率,纳滤膜的这种效应称作道南效应^[12]。此现象对阳离子同样适用,对于含镍料液,NH₄⁺离子可透过膜,而 Ni²⁺被拦截,从而实现硝酸铵与硝酸镍分离。

硫化铵沉镍:在含镍料液中投加硫化铵,将料液中的硝酸镍转化成硫化镍和硝酸铵,再通过添加硝酸,将硫化镍转化成硝酸镍,既不引入杂质,又可实现硝酸镍与硝酸铵分离。反应方程式如下:



1.4 分析方法

通过电感耦合等离子体分析仪测试镍含量;通过氨气敏电极分析总氨氮含量;通过离子色谱分析仪测试 NO₃⁻含量;通过 pH 计测试 pH 值;通过电导率仪测试电导率。

2 实验结果与讨论

2.1 纳滤分盐

2.1.1 预处理

从表1可知,料液水质呈现弱碱性,会有游离态的氨存在,进行纳滤之前,先通过煮沸的方式,使料液中游离氨挥发,再加纯水补齐原来的体积,煮沸后水质指标见表2。

表2 去除游离氨后水质

| pH 值 | 电导率/ (mS·cm ⁻¹) | 杂质含量/(mg·L ⁻¹) | | | |
|------|--------------------------------|----------------------------|--------|------------------|------------------------------|
| | | 游离氨氮 | 总氨氮 | Ni ²⁺ | NO ₃ ⁻ |
| 6.95 | 93.35 | 32.1 | 14 520 | 10 900 | 87 330 |

从表2看出,煮沸后料液中游离氨浓度明显降低,从140.8 mg/L降至32.1 mg/L,氨气随着水蒸气一起挥发到体系外。但溶液中镍含量和硝酸根含量略微降低,可能有细小的硝酸镍结晶产生,被过滤去除。

2.1.2 浓水侧压力的影响

将去除游离氨的溶液使用纳滤进行分盐,通过调节浓水阀来控制浓水侧压力,考察浓水侧压力对分盐效果的影响,同时验证纳滤分盐的可行性,结果见图1。

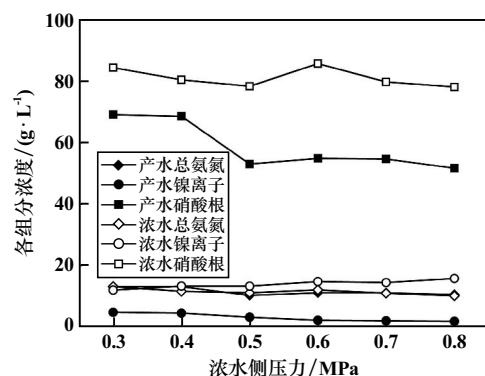


图1 浓水侧压力对分盐效果的影响

由图1可见,经过纳滤后,浓水中硝酸根和镍离子浓度明显高于产水中的浓度,而产水和浓水中总氨氮浓度相差不大,说明纳滤对于镍离子和铵根离子具有明显的分离效果,纳滤膜可以使铵根离子通过,截留二价镍离子。故使用纳滤进行镍离子和铵根离子的分离

具有可行性。而为了维持产水和浓水各自体系中的电荷平衡,硝酸根离子会随着铵根和硝酸根浓度的差异在产水和浓水中合理分配。

随着浓水侧压力升高,产水中镍离子浓度逐步降低,当浓水侧压力增加到 0.6 MPa 时,产水中镍含量为 2.34 g/L,镍截留率为 78.53% (进纳滤原水镍含量为 10.90 g/L),继续增大浓水侧压力,产水中镍离子浓度继续降低,但下降速率变慢,当浓水侧压力为 0.8 MPa 时,产水中镍含量为 2.02 g/L,镍截留率为 81.47%。由于继续增大压力镍离子截留率提高不明显,确定浓水侧操作压力为 0.8 MPa。经计算,原始料液中硝酸镍浓度为 33.93 g/L,硝酸铵浓度为 82.83 g/L,硝酸铵与硝酸镍质量浓度比为 82.83/33.93=2.44。经纳滤分盐后,当浓水侧操作压力为 0.8 MPa 时,纳滤产水中硝酸铵浓度为 61.12 g/L,硝酸镍浓度为 6.29 g/L;浓水中硝酸铵浓度为 58.82 g/L,硝酸镍浓度为 49.54 g/L。可以发现,产水中硝酸铵与硝酸镍质量浓度比为 61.12/6.29=9.72,质量浓度差将近 10 倍。说明该条件下,纳滤对硝酸铵与硝酸镍的分离具有明显效果。

2.1.3 多级纳滤实验

在浓水侧压力为 0.8 MPa 时,单级纳滤虽提高了硝酸铵和硝酸镍的浓度差,但并没有实现严格意义上的分离,产水依然含有 2.02 g/L 的镍(6.29 g/L 硝酸镍),浓水中硝酸镍和硝酸铵的浓度也并未得到浓缩。为了进一步提高浓水中硝酸铵和硝酸镍的浓度,降低产水中硝酸镍的含量,真正意义上实现镍和氨的分离,开展了多级纳滤,考察其分离效果。

在纳滤浓水侧压力为 0.8 MPa 条件下,为防止碱性条件下分子态氨氮的产生,取原水加硝酸调节 pH 值至 6(该过程会导致料液中硝酸根增加),进行一级纳滤;对一级纳滤浓水进行二级纳滤;对二级纳滤浓水进行三级纳滤;对三级纳滤浓水进行四级纳滤。对比各级纳滤后浓水中各项指标变化,结果见图 2。对一级纳滤的产水进行二级纳滤,获得产水的二级纳滤产水和浓水,分析相关指标,结果见表 3。

由图 2 看出,通过对各级浓水再浓缩,随着浓缩级数增加,浓水中镍离子浓度呈上升趋势,总氨氮呈下降趋势,经四级浓缩后,浓水中镍含量由一级纳滤浓水的 15.99 g/L 提高到 17.97 g/L(硝酸镍浓度 55.94 g/L),提高了 12.38%;总氨氮浓度由一级纳滤浓水的 14.02 g/L 降至 11.56 g/L(硝酸铵浓度 66.03 g/L),降低了 17.55%。多级纳滤可以提高浓水中镍离子的浓度并降低总氨氮的浓度,但效率不高,若增加级数,由于每一级进水总 TDS(总溶解性固体物质)值提高,必然会提高运行能耗。

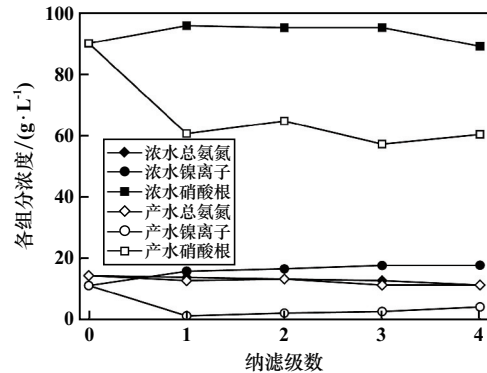


图 2 纳滤级数对分盐效果的影响

表 3 多级纳滤实验产水水质分析结果

| 项目 | 总氨氮/(g·L ⁻¹) | Ni ²⁺ /(g·L ⁻¹) | NO ₃ ⁻ /(g·L ⁻¹) |
|---------|--------------------------|--|--|
| 原水硝酸调节后 | 14.58 | 11.39 | 90.12 |
| 一级纳滤产水 | 12.98 | 1.56 | 60.77 |
| 二级纳滤产水 | 12.16 | 0.18 | 54.22 |
| 二级纳滤浓水 | 12.31 | 2.20 | 59.18 |

由表 3 可知,对原水调酸后进行一级纳滤,产水中镍和氨的分离效果较不调酸时效果更明显,一级纳滤产水总氨氮浓度为 12.98 g/L(硝酸铵浓度 74.21 g/L),镍离子浓度为 1.56 g/L(硝酸镍浓度 4.86 g/L)。硝酸铵和硝酸镍的质量浓度比为 15.28(大于不调酸时的 9.72),镍氨分离效果明显。对一级纳滤产水进行二级纳滤,二级纳滤产水中镍含量明显降低,从 1.56 g/L 降至 0.181 g/L(硝酸镍浓度 0.56 g/L)。产水中硝酸铵和硝酸镍的质量比进一步提高到 124.15。

为了进一步去除二级纳滤产水中的镍,彻底实现镍氨的分离,试验取 10 mL 的 KLNi-01 镍离子交换树脂,对 50 mL 二级纳滤产水进行处理,振荡混合 30 min,产水中镍离子浓度降至 0.002 mg/L,彻底实现了镍氨分离。树脂吸附饱和后,可使用硝酸再生,再生液产生的硝酸镍进入纳滤浓水,树脂再生后使用氨水进行转型。期间不引入其他杂质离子,保证产水中硝酸铵的纯度。

2.2 硫化铵沉镍实验

纳滤分盐结合离子交换可将产水中硝酸镍和硝酸铵彻底分离,但浓水中仍含有高浓度的硫酸镍和硫酸铵混合溶液,此浓液虽然体积得到了一定程度浓缩,但仍需要开展硫化铵沉镍实验,考察其镍氨分离效果。

2.2.1 硫化铵添加量的影响

碱性条件下加硫化铵会有氨气生成,酸性条件下又会有硫化氢生成,为了避免副产物气体产生,先尝试将原水 pH 值调节为 7。取调节 pH 值后的溶液,加入有效浓度 20%~26% 的硫化铵溶液,沉淀除镍,反应 40 min,沉淀 1 h 后过滤,取滤液分析镍含量,结果见图 3。

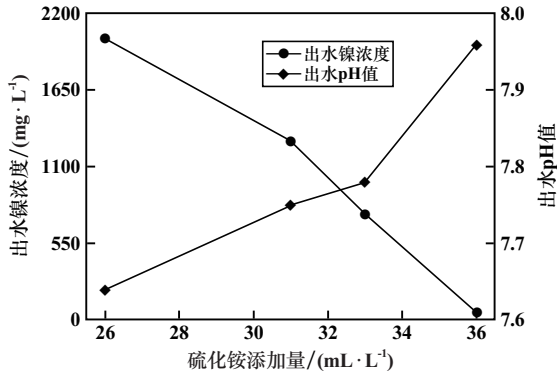


图 3 硫化铵添加量对沉镍效果的影响

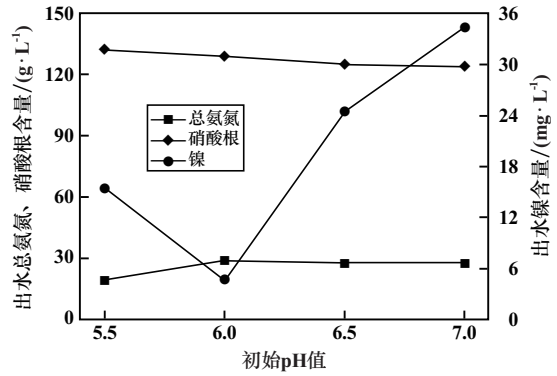


图 4 初始 pH 值对沉镍效果的影响

由图 3 可知, 硫酸铵添加量由 26 mL/L 增加到 36 mL/L, 出水镍浓度从 2 024 mg/L 降至 56 mg/L, 除镍效果明显, 且通过颜色观察, 当硫化铵添加量为 36 mL/L 时, 出水由原来的蓝绿色变成透明无色, 说明使用硫化铵除镍具有可行性。但是随着硫化铵添加量升高, 反应体系 pH 值也逐渐升高, 当硫化铵添加量为 36 mL/L 时, 出水 pH = 7.96, 呈现弱碱性。弱碱性条件下会有挥发性氨气生成, 气味明显, 操作环境不佳。因此需要探索硫化铵法除镍的最佳初始 pH 值。

2.2.2 初始 pH 值的影响

分别取原液, 调节废水 pH 值为 5.5、6.0、6.5、7.0, 然后加入 36 mL/L 有效浓度 20%~26% 的硫化铵溶液, 沉淀除镍, 反应 40 min, 沉淀 1 h, 过滤取滤液分析镍含量, 结果见图 4。

由图 4 可看出, 当初始反应 pH = 6 时, 出水镍含量为 4.7 mg/L, 此时出水 pH = 6.97。出水总氨氮浓度随着初始反应 pH 值增高, 在 pH = 6 时达到最高值, 随着 pH 值继续增加, 总氨氮浓度基本维持平稳, 这是因为初始 pH > 6 之后, 出水 pH > 7, 呈现碱性, 开始有分子态氨挥发出来。故确定最佳初始反应 pH = 6, 可保证镍去除效果并预防分子态氨的挥发, 且在此条件下, 出水未检出硫化物, 出水硝酸镍浓度为 0.015 g/L, 硝酸铵浓度为 166.77 g/L, 镍氨分离效果明显。

2.2.3 硫化镍沉淀溶解制硝酸镍

硫化铵沉镍获得的硫化镍沉淀, 采用抽滤方式获得滤饼, 测得滤饼含水率为 73%。取一定质量湿滤饼, 加入硝酸溶液(有效含量 65%~68%, 密度 1.405 g/mL)溶解, 获得硝酸镍溶液。20 °C 下六水合硝酸镍的溶解度为 963.20 g/L, 根据公式(2), 取湿泥 12.226 6 g(干泥 3.292 6 g)加入 7.1 mL 硝酸溶液(HNO₃ 有效含量 65%~68%)溶解, 溶解后体积为 16 mL。溶解后液理论上硝酸镍浓度为 640.58 g/L(镍浓度 205.79 g/L, 折算六水合硝酸镍浓度为 1 019.27 g/L), 已超过溶解度, 加水稀释至 36.8 mL(稀释 2.3 倍), 确保沉淀全部溶解。溶解后的溶液成分见表 4。

表 4 硫化镍溶解液(稀释 2.3 倍后)成分测定结果

| pH 值 | 总氨氮/ (g · L ⁻¹) | Ni ²⁺ / (g · L ⁻¹) | NO ₃ ⁻ / (g · L ⁻¹) | 总硫化物/ (mg · L ⁻¹) |
|------|--------------------------------|--|--|----------------------------------|
| 0.27 | 0.12 | 83.01 | 181.23 | 0 |

从表 4 看出, 硫化镍沉淀用硝酸溶解后得到的硝酸镍溶液中, 镍含量为 83.01 g/L, 换算硝酸镍浓度为 258.40 g/L, 硝酸铵含量为 0.69 g/L, 未检出总硫化物。

综上所述, 可确定工艺流程如图 5 所示, 全流程镍回收率 98.42%, 氨回收率 99.18%。

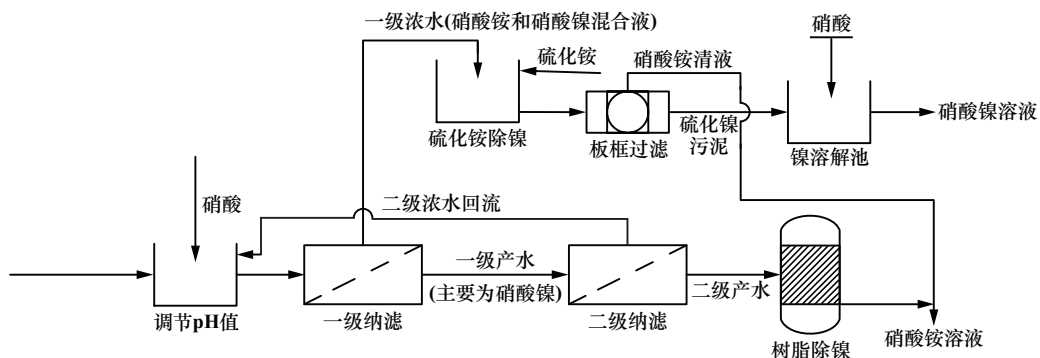


图 5 工艺流程

2.3 物料衡算

单级纳滤产水率约为30%，故一级纳滤处理 1 m^3 料液可获得产水 0.3 m^3 ，浓水 0.7 m^3 。对 0.3 m^3 产水进行二级纳滤处理，产水率为50%，获得产水 0.15 m^3 。分别对二级纳滤产水 0.15 m^3 进行离子交换除镍，二级纳滤浓水 0.15 m^3 返回原水槽，对一级纳滤浓水 0.7 m^3 进行硫化铵沉镍和硝酸回收硝酸镍。即使用二级纳滤处理 1 m^3 含镍料液，得到产水 0.15 m^3 ，浓水 0.7 m^3 ，其中产水采用离子交换除镍，浓水采用沉淀法回收镍。

处理 0.7 m^3 镍含量为 15.99 g/L 的含镍料液，需投加有效浓度20%~26%的硫化铵 $36\text{ mL/L}\times 700\text{ L}=25.20\text{ L}$ ，产生含水率为73%的湿硫化镍滤饼 64.10 kg ，需消耗浓硝酸体积 $7.10\text{ mL}/12.23\text{ g}\times 64.10\text{ kg}=37.21\text{ L}$ ，需添加水体积 $[(16.00-7.10)\text{ mL}\times 64.10\text{ kg}/12.226\text{ g}+7.10\text{ mL}/12.23\text{ g}\times 64.10\text{ kg}]\times 1.30=109.05\text{ L}$ ，可得到 258.40 g/L 的硝酸镍溶液 $[(16.00-7.10)\text{ mL}\times 64.10\text{ kg}/12.23\text{ g}+7.10\text{ mL}/12.23\text{ g}\times 64.10\text{ kg}]\times 2.30=192.93\text{ L}$ 。

3 结 论

1) 纳滤技术可实现硝酸铵与硝酸镍的分离，当浓水侧压力为 0.8 MPa 时，调节进水 $\text{pH}=6$ ，经两级纳滤，产水总氨氮浓度为 12.98 g/L （硝酸铵浓度 74.21 g/L ），镍离子浓度为 1.56 g/L （硝酸镍浓度 4.86 g/L ），两级纳滤产水中镍含量降至 0.181 g/L （硝酸镍 0.56 g/L ），再经KLNi-01镍离子交换树脂除镍后，镍含量降低至 0.002 mg/L 。

2) 硫化铵沉镍工序初始 $\text{pH}=6$ 、质量浓度20%~26%的硫化铵溶液加入量为 36 mL/L ，此时沉淀出水镍含量 4.7 mg/L （硝酸镍 0.015 g/L ）、硝酸铵 166.77 g/L 、

$\text{pH}=6.96$ ，无硫化物检出。

3) 使用硝酸溶解硫化镍沉淀，可获得浓度 258.40 g/L 的硝酸镍溶液，硝酸铵含量 0.69 g/L ，全流程镍回收率98.42%，氨回收率99.18%。

参考文献:

- [1] 罗雅虹. 国内外镍资源开发现状分析[J]. 技术与市场, 2015, 22(12): 417.
- [2] 张魁芳, 刘志强, 钟晓聪, 等. 高镁低品位铜镍矿氧压硫酸浸出液综合回收研究[J]. 2022, 42(4): 90-94.
- [3] 李 静. 镍钴冶炼中典型重金属污染识别与防控对策研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 2015.
- [4] 王永录. 我国贵金属冶金工程技术的进展[J]. 贵金属, 2011, 32(4): 59-71.
- [5] 刘志健. 工业电解镍沉积层微观组织及晶粒演变特征[D]. 兰州: 兰州理工大学材料科学与工程学院, 2021.
- [6] 何焕华, 蔡乔方. 中国镍钴冶金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [7] 翟莉慧. 镍湿法冶炼过程中含砷铁渣的无害化处理暨综合利用研究[D]. 兰州: 兰州大学化学化工学院, 2017.
- [8] 刘建东, 刘三军, 孙 伟, 等. 镍钼矿选废水处理回用试验研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(1): 62-64.
- [9] 潘 涛, 田 刚. 废水处理工程技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [10] Rautenbach R, Groschl A. Separation potential of nanofiltration membranes[J]. Desalination, 1990, 77(1/2/3): 73-84.
- [11] Garcia A J, Dickson J M. Mathematical modeling of nanofiltration membranes with mixed electrolyte solutions[J]. Journal of Membrane Science, 2004, 235(1/2): 1-13.
- [12] 塞世杰. 纳滤膜在高盐废水零排放领域的分盐性能研究[J]. 工业水处理, 2017, 37(9): 75-78.

引用本文: 李 雅, 王启伟, 赵宇婧, 等. 含镍料液中硝酸铵和硝酸镍的分离研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(1): 118-122.

(上接第117页)

- [10] 王毅军, 郭军勋. 晶型碳酸镧沉淀制备工艺的研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2003(2): 12-14.
- [11] 李永绣, 何小彬, 辜子英, 等. RECl_3 与 NH_4HCO_3 的沉淀反应及伴生杂质的共沉淀行为[J]. 稀土, 1999(2): 21-24.
- [12] 姜晓丽, 陈建博, 国树山, 等. 用碳酸钠作沉淀剂制备低钠碳酸镧[J]. 稀土, 2015, 36(6): 118-122.
- [13] 王 军, 姜晓丽, 李维华, 等. 大颗粒 LSM 的制备及表征[J]. 稀土, 2011, 32(3): 75-79.
- [14] 张梅英, 张 松, 简春晖. 代采缓蚀剂用氧化钨粉末的制备[J]. 矿冶工程, 2022, 42(3): 121-124.
- [15] Lamer V K, Dinegar R H. Theory, Production and Mechanism of

Formation of Monodispersed Hydrosols[J]. IEEE, 1950, 72(11): 4847-4854.

- [16] Voorhees P W. The theory of Ostwald ripening[J]. Journal of Statistical Physics, 1985, 38(1): 231-252.
- [17] 高国华, 赖安邦, 廖春发, 等. Na_2CO_3 沉淀制备超细 Y_2O_3 粉体的研究[J]. 中国稀土学报, 2020, 38(5): 622-632.
- [18] 黄 昕, 李 琴, 杨 明, 等. 大颗粒草酸铵热分解特性及动力学研究[J]. 中国稀土学报, 2016, 34(1): 83-92.

引用本文: 叶 毅, 李益民, 曾纪术, 等. 碳酸氢钠沉淀法制备大粒度高纯度氧化镧研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(1): 114-117.