

氧化沉淀法除铁在精制硫酸镍中的应用^①

蒋学先^{1,2}, 王露森¹, 朱文云¹, 何贵香^{1,2}, 李中林¹, 李源萍², 何宗庆³, 黄彩红³, 杨永明³, 陈小兰²

(1.桂林理工大学材料科学与工程学院, 广西 桂林 541004; 2.桂林理工大学南宁分校冶金与资源工程学院, 广西 南宁 530001; 3.广西南国铜业有限责任公司, 广西 扶绥 532301)

摘要: 采用氧化沉淀法除去粗硫酸镍溶液中的铁, 以过氧化氢或氯气为氧化剂, 将溶液中的 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} , 调节 pH 值使溶液中的 Fe^{3+} 以 $Fe(OH)_3$ 和 $FeOOH$ 形式沉淀。结果表明, 以过氧化氢为氧化剂适宜的除铁条件为: 过氧化氢用量 3.84%、反应温度 75 °C、pH=4.5、 H_2O_2 溶液滴加速度 0.33 mL/min、陈化时间 90 min, 在该条件下铁去除率达到 99.74%; 以氯气为氧化剂适宜的除铁条件为: 反应温度 70 °C、pH=4.5、 Cl_2 通气时间 60 min、陈化时间 90 min, 在该条件下铁去除率达到 99.72%。以过氧化氢或氯气为氧化剂除铁后溶液中铁含量均能达到 GB/T 26524—2023 精制硫酸镍 I 类标准的要求(铁质量分数不大于 0.000 5%)。

关键词: 硫酸镍; 氧化除铁; 过氧化氢氧化法; 氯气氧化法

中图分类号: TF111

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.04.025

文章编号: 0253-6099(2025)04-0137-04

Application of Oxidative Precipitation for Iron Removal in Refining Nickel Sulfate

JIANG Xuexian^{1,2}, WANG Lusen¹, ZHU Wenyun¹, HE Guixiang^{1,2}, LI Zhonglin¹, LI Yuanping²,

HE Zongqing³, HUANG Caihong³, YANG Yongming³, CHEN Xiaolan²

(1.School of Materials Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 2.School of Metallurgy and Resource Engineering, Guilin University of Technology at Nanning, Nanning 530001, Guangxi, China; 3.Guangxi Nanguo Copper Co., Ltd., Fusui 532301, Guangxi, China)

Abstract: In an experiment, oxidative precipitation method was adopted to remove iron from crude nickel sulphate solution. With H_2O_2 or Cl_2 as oxidant, Fe^{2+} in the solution was oxidized to Fe^{3+} , and then Fe^{3+} was precipitated in the form of $Fe(OH)_3$ and $FeOOH$ by adjusting the pH of the solution. It is found that under the optimum conditions for iron removal with H_2O_2 as the oxidant, including H_2O_2 dosage of 3.84%, temperature of 75 °C, pH of 4.5, dropping of H_2O_2 solution at a rate of 0.33 mL/min, and the aging time of 90 min, the removal rate of iron can reach 99.74%. Under the optimal conditions for iron precipitation with Cl_2 as oxidant, including reaction temperature of 70 °C, pH of 4.5, Cl_2 injection time of 60 min and aging time of 90 min, the iron removal rate can reach 99.72%. It is shown that the solution after iron removal with H_2O_2 or Cl_2 as an oxidant can have the iron content therein up to the class I standard (iron content no more than 0.000 5%) in GB/T 26524—2023 Refined Nickel Sulfates.

Key words: nickel sulfate; iron removal by oxidation; hydrogen peroxide oxidation; chlorine oxidation

硫酸镍在化工、冶金和电池等领域得到广泛应用^[1-5]。近年来,随着电池材料行业需求迅速增加,作为镍系电池主要原材料的硫酸镍需求不断增加。硫酸镍作为电极材料时,其中含有的铁在充电过程中会发热和析氧,降低充电效率。目前工业上常用的除铁方

法有氧化沉淀法、萃取法和电解法等。氧化沉淀法具有试剂成本低、工艺流程简单、能耗低等优势。使用氧化沉淀法除铁,能够极大地降低粗硫酸镍溶液中铁的含量,有利于后续粗硫酸镍精制与回收。本文采用氧化沉淀法除去粗硫酸镍溶液中的铁,以过氧化氢和氯

① 收稿日期: 2025-02-10

基金项目: 广西科技重大专项(桂科 AA22067077); 广西科技重大专项(桂科 AB21196046); 崇左市科技计划项目(崇科 20220601)

作者简介: 蒋学先(1972—), 男, 广西平乐人, 教授, 主要研究方向为有色金属冶金及资源回收利用。E-mail: 153193806@qq.com

通信作者: 何贵香(1973—), 女, 湖南郴州人, 博士, 教授, 主要研究方向为有色金属冶金及资源回收利用。E-mail: hgx@glut.edu.cn

气为氧化剂,探究氧化除铁的反应条件,在保证杂质铁去除率以及镍回收率的前提下,缩短原有除铁工艺流程,降低生产成本。

1 实验部分

1.1 实验试剂与实验仪器

实验所用原料为铜电解液脱镍产生的粗硫酸镍,取自广西某铜业公司,其主要化学成分见表1。

表1 粗硫酸镍主要化学成分(质量分数)

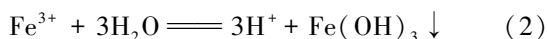
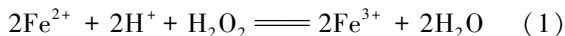
| Table 1 Chemical composition of crude nickel sulfate % | | | | |
|--|------|-------|------|------|
| Ni | Fe | Co | Cu | Zn |
| 15.82 | 0.32 | 0.079 | 0.19 | 0.93 |

实验试剂包括浓硫酸、浓盐酸、氨水、高锰酸钾、氢氧化钠、30%过氧化氢等,均为分析纯试剂。

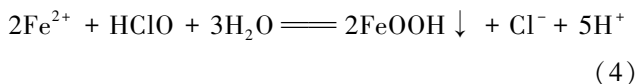
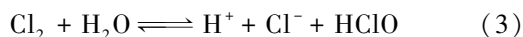
主要仪器包括集热式恒温加热磁力搅拌器、蠕动泵驱动器、pH计、铂电极、参比电极、X射线荧光分析仪、电子天平等。

1.2 实验原理

过氧化氢(H_2O_2)氧化除铁:通过向粗硫酸镍溶液中加入氧化剂 H_2O_2 ,将溶液中的 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} ;调节溶液pH值,使 Fe^{3+} 发生水解。 Fe^{3+} 在水溶液中水解反应的实质是离子型化合物的阳离子(Fe^{3+})具有足够强的极化能力,在与水分子发生作用时使水分子中的O—H键断裂,然后 Fe^{3+} 与 OH^- 基团结合,生成难溶物质 $Fe(OH)_3$ 。 H_2O_2 氧化法基本反应方程式为:



氯气(Cl_2)氧化除铁:将 Cl_2 通入粗硫酸镍溶液中, Cl_2 与水反应生成的 $HClO$ 将 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} 进而沉淀,且在低酸性和低 Fe^{3+} 浓度条件下,溶液中的 Fe^{3+} 还能以 $FeOOH$ 形式沉淀析出。 Cl_2 氧化法的基本反应方程式为:



1.3 实验方法

H_2O_2 氧化除铁在自制装置中进行。在一个圆口玻璃器上方配有密封橡胶塞,橡胶塞上方设有4个孔,分别用于通气以及安装铂电极、参比电极、滴液管。将250 mL粗硫酸镍溶液加入自制容器中,加热并保温,用氨水调节溶液pH值至2.5~3.0;在30 min内向粗硫

酸镍溶液匀速滴入30% H_2O_2 溶液10 mL,均匀搅拌,确保反应过程中溶液电极电势不超过0.6 V。 H_2O_2 滴加完毕后停止搅拌,待溶液自然冷却至室温后,用氨水调节pH值,陈化一段时间,过滤。

Cl_2 氧化除铁在自制装置中进行。先将 Cl_2 出气孔与进气孔相连接,将200 mL粗硫酸镍溶液加入 Cl_2 氧化装置内,用氨水调节溶液pH值至2.5~3.0,加热并保温;将浓盐酸缓慢滴入高锰酸钾溶液中,生成 Cl_2 并使 Cl_2 进入粗硫酸镍溶液中,均匀搅拌,确保反应过程中溶液电极电势不超过0.6 V。通气结束后停止搅拌,待溶液自然冷却至室温后,用氨水调节pH值,陈化一段时间,过滤。

分析 H_2O_2 和 Cl_2 氧化除铁后的滤液成分,并计算Ni和Fe沉淀率。

2 结果与讨论

2.1 过氧化氢氧化法

2.1.1 pH值的影响

粗硫酸镍溶液初始pH值2.5~3.0、氧化温度65℃、氧化剂 H_2O_2 滴加速度0.33 mL/min、 H_2O_2 用量3.84% (相对溶液的体积分数)、陈化时间60 min,溶液pH值对Fe、Ni沉淀率的影响如图1所示。由图1可知,随着pH值不断升高,铁沉淀率先增大后变化平缓。pH值2.5时铁沉淀率较低,这是因为在较低的pH值条件下,溶液中 Fe^{2+} 不易被氧化成 Fe^{3+} ,而 Fe^{2+} 不易水解且 $Fe(OH)_2$ 溶解度相对较高。pH值6.5时铁沉淀率较高,这是因为在较高pH值条件下, Fe^{2+} 较为容易被氧化成 Fe^{3+} ,而 Fe^{3+} 易于水解,能够形成溶解度相对较低的 $Fe(OH)_3$ 沉淀^[6];但此时镍沉淀率也达到最高,为24.59%,这是因为pH值升高导致 Ni^{2+} 水解,镍沉淀率增加^[7]。pH值4.5时镍沉淀率不高,而铁沉淀率能达到98.61%。综合考虑镍的损失和铁的去除,适宜的溶液pH值为4.5。

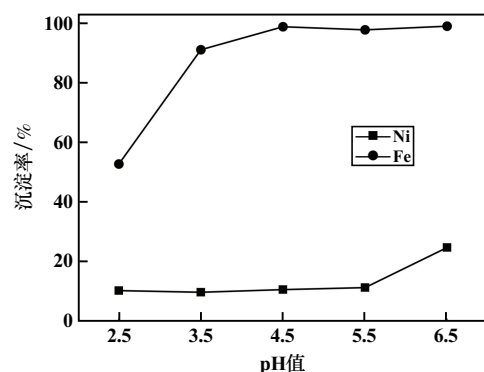


图1 pH值对Fe、Ni沉淀率的影响

Fig.1 Effect of pH value on precipitation rates of Fe and Ni

2.1.2 陈化时间的影响

沉铁溶液 pH 值 4.5,其他条件不变,陈化时间对 Fe、Ni 沉淀率的影响如图 2 所示。由图 2 可知,陈化时间 30~90 min,随着陈化时间延长,铁沉淀率逐渐增大。延长陈化时间能提高氧化剂与铁离子之间化学反应的完成度,从而提高铁沉淀率^[8];延长陈化时间还能促进铁氧化物沉淀的生成和凝聚,进而提高铁沉淀率。陈化时间超过 90 min 后铁沉淀率变化不大,是因为溶液中的铁趋于全部沉淀。陈化时间 90 min 时,Ni 沉淀率较低,铁沉淀率达到了 97.84%。综合考虑铁的去 除、镍的损失及时间成本,陈化时间 90 min 为宜。

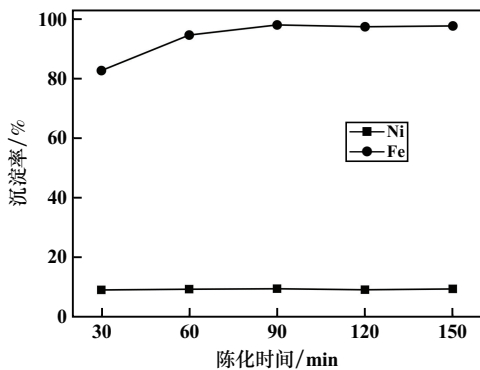


图 2 陈化时间对 Fe、Ni 沉淀率的影响

Fig.2 Effect of aging time on precipitation rates of Fe and Ni

2.1.3 反应温度的影响

陈化时间 90 min,其他条件不变,考察了反应温度对 Fe、Ni 沉淀率的影响,结果见图 3。由图 3 可知,随着反应温度升高,铁沉淀率一直保持在较高水平,Ni 沉淀率也保持在一个相对较低的水平,说明升高温度对氧化剂的活性产生了积极影响。但反应温度超过 75 °C 后,铁沉淀率随着温度上升有所下降,这是因为过高的温度导致 H₂O₂ 分解,降低了其氧化能力^[9]。适宜的反应温度为 75 °C,此时铁沉淀率为 98.47%。

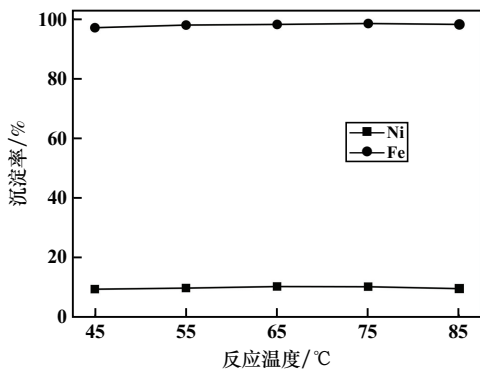


图 3 反应温度对 Fe、Ni 沉淀率的影响

Fig.3 Effect of reaction temperature on precipitation rates of Fe and Ni

2.1.4 优化条件验证实验

根据 H₂O₂ 氧化法的单因素实验结果,粗硫酸镍溶液除铁的优化条件为:溶液初始 pH 值 2.5~3.0、氧化剂 H₂O₂ 滴加速度 0.33 mL/min、H₂O₂ 用量 3.84%、沉铁溶液 pH 值 4.5、陈化时间 90 min、反应温度 75 °C,此条件下进行了 3 组平行试验,结果见表 2。结果表明,在适宜条件下,铁平均去除率为 99.74%;蒸发结晶获得的硫酸镍达到了 GB/T 26524—2023 精制硫酸镍 I 类标准的要求(铁质量分数不大于 0.000 5%),既可以去除杂质铁,又可以有效回收镍。

表 2 H₂O₂ 氧化除铁平行试验结果

Table 2 Parallel testing of iron removal by H₂O₂ oxidation

| 实验编号 | Ni 沉淀率/% | Fe 沉淀率/% |
|------|----------|----------|
| 1 | 9.05 | 99.74 |
| 2 | 9.70 | 99.74 |
| 3 | 9.43 | 99.74 |
| 平均 | 9.39 | 99.74 |

2.2 氯气氧化法

文献[10]以 Cl₂ 为氧化剂,对粗硫酸镍溶液进行氧化除铁,适宜的 pH 值为 4.5~5.0。在该 pH 值范围内,铁去除率均能达到 97% 以上,但 Ni 损失率会随着 pH 值增大而增加。综合考虑铁的去 除及镍的损失,最终选择 pH 值 4.5 进行 Cl₂ 氧化除铁实验。

2.2.1 通氯气时间的影响

粗硫酸镍溶液温度 70 °C、陈化 60 min、pH 值 4.5 条件下,通氯气时间对 Fe、Ni 沉淀率的影响如图 4 所示。由图 4 可知,15~60 min 内,随着通氯气时间延长,Fe 沉淀率上升。这是因为随着通氯气时间延长,更多的 Fe²⁺ 与 Cl₂ 反应,使得 Fe²⁺ 被氧化成 Fe³⁺,Fe³⁺ 水解形成了更多的 FeOOH 沉淀^[11]。通氯气时间超过 60 min 后,铁沉淀率随着通氯气时间延长无明显变化,此时溶

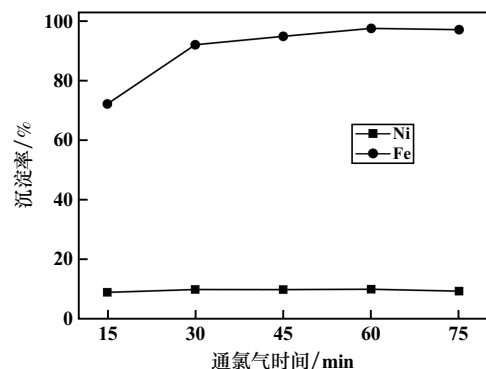


图 4 通氯气时间对 Fe、Ni 沉淀率的影响

Fig.4 Effect of Cl₂ injection time on precipitation rates of Fe and Ni

液中的铁已经与氯气完全反应。适宜的通氯气时间为 60 min。

2.2.2 陈化时间的影响

通氯气时间 60 min,其他条件不变,考察了陈化时间对 Fe、Ni 沉淀率的影响,结果如图 5 所示。由图 5 可知,陈化时间 30~90 min,随着陈化时间延长,铁沉淀率逐渐增大;陈化时间超过 90 min 后,铁沉淀率无明显变化。这是因为在陈化的前 90 min,随着陈化时间延长,溶液中更多 Fe^{2+} 被 Cl_2 氧化水解,铁沉淀率增加;陈化时间超过 90 min 后,沉淀物的生成和凝聚过程已接近完成,再延长陈化时间对除铁作用有限。适宜的陈化时间为 90 min。

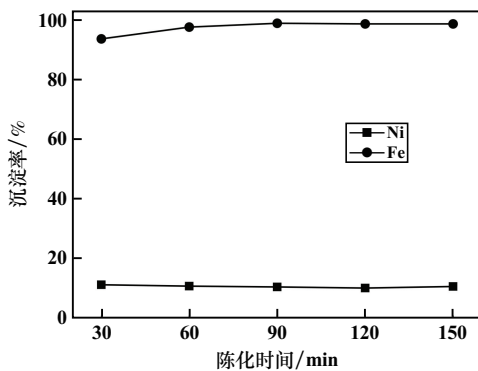


图 5 陈化时间对 Fe、Ni 沉淀率的影响

Fig. 5 Effect of aging time on precipitation rates of Fe and Ni

2.2.3 反应温度的影响

陈化时间 90 min,其他条件不变,考察了反应温度对 Fe、Ni 沉淀率的影响,结果如图 6 所示。由图 6 可知,反应温度 40~70 °C 时,随着反应温度升高,铁沉淀率显著增长,这是因为升高温度增加了分子的运动速度和碰撞频率,加速了氧化反应的进程,使得更多的 Fe^{2+} 被 Cl_2 氧化并水解生成沉淀。温度超过 70 °C 后,过高的温度导致沉淀稳定性降低,铁沉淀率有所下降。

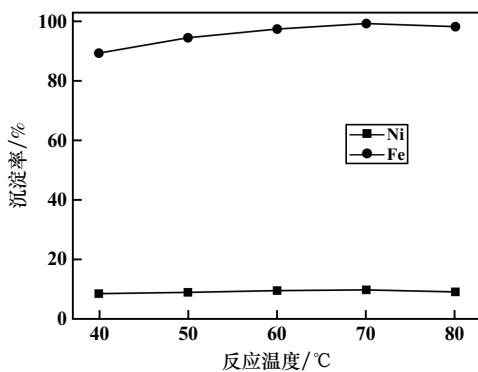


图 6 反应温度对 Fe、Ni 沉淀率的影响

Fig. 6 Effect of reaction temperature on precipitation rates of Fe and Ni

综合考虑,适宜的反应温度为 70 °C。

2.2.4 综合验证实验

根据 Cl_2 氧化除铁法的单因素实验结果,氯气氧化法除铁的适宜条件为: Cl_2 通气时间 60 min、陈化时间 90 min、溶液 pH 值 4.5、反应温度 70 °C,在该条件下进行了 3 组平行试验,结果见表 3。结果表明,在适宜条件下,铁平均去除率为 99.72%,镍平均损失率为 10.52%。

表 3 Cl_2 氧化除铁平行试验结果

Table 3 Parallel testing of Cl_2 oxidation for iron removal

| 实验编号 | Ni 沉淀率/% | Fe 沉淀率/% |
|------|----------|----------|
| 1 | 10.82 | 99.72 |
| 2 | 10.51 | 99.72 |
| 3 | 10.24 | 99.72 |
| 平均 | 10.52 | 99.72 |

3 结语

1) 以粗硫酸镍溶液为原料,以 H_2O_2 或 Cl_2 为氧化剂,分别考察了 pH 值、氧化时间、陈化时间、反应温度对除铁的影响。结果表明:在反应温度 75 °C、溶液 pH 值 4.5、 H_2O_2 溶液滴加速度 0.33 mL/min、 H_2O_2 用量 3.84%、陈化时间 90 min 条件下, H_2O_2 氧化法除铁的铁去除率达到 99.74%,镍损失率为 9.39%;在反应温度 70 °C、溶液 pH 值 4.5、 Cl_2 通气时间 60 min、陈化时间 90 min 条件下, Cl_2 氧化法除铁的铁去除率达到 99.72%,镍损失率为 10.52%。

2) H_2O_2 和 Cl_2 都能作为氧化剂有效除铁,但 Cl_2 本身毒性较强,需要额外处理尾气,导致除铁成本上升,并增加了硫酸镍溶液中的杂质离子;使用 Cl_2 氧化时,镍损失率也略高于使用 H_2O_2 。从经济效益、操作难度和环境保护的角度来看,选择 H_2O_2 作为粗硫酸镍溶液除铁的氧化剂更合适。

参考文献 (References):

- [1] 王雪志, 缪志毅, 王倩英, 等. 硫酸镍催化硬脂酸甘油酯的合成工艺研究[J]. 药品评价, 2021, 18(19): 1183-1186.
WANG Xuezhi, MIAO Zhiyi, WANG Qingying, et al. Study on synthesis of glycerol stearate catalyzed by nickel sulfate[J]. Drug Evaluation, 2021, 18(19): 1183-1186.
- [2] 向倩, 王文昌, 张然, 等. 镍离子浓度对低共熔溶剂中化学镀 Ni-Mo-P 合金镀层的影响[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(12): 17-24.
XIANG Qian, WANG Wenchang, ZHANG Ran, et al. Effect of nickel ion concentration on electroless plating of Ni-Mo-P alloy in deep eutectic solvent[J]. Plating and Finishing, 2022, 44(12): 17-24.

(下转第 146 页)

- proach for enhanced scandium and titanium leaching efficiency from bauxite residue with suppressed silica gel formation[J]. Scientific Reports, 2018,8:5676.
- [7] JIANG T, SINGH S, DUNN K A, et al. Optimizing leaching of rare earth elements from red mud and spent fluorescent lamp phosphors using levulinic acid[J]. Sustainability, 2022,14(15):9682.
- [8] UJACZKI É, ZIMMERMANN Y, GASSER C, et al. Red mud as secondary source for critical raw materials: Purification of rare earth elements by liquid/liquid extraction[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2017,92(10):2683-2690.
- [9] 刘利辉,王立平,何海娜,等. 正交实验法优化废氧化锌催化剂中氧化锌的回收工艺[J]. 化工技术与开发, 2022,51(8):86-88.
LIU Lihui, WANG Liping, HE Haina, et al. Optimum of zinc oxide recycled process from waste zinc oxide catalyst by orthogonal experiment[J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2022,51(8):86-88.
- [10] 朱晓波,王涛,李望. 醋酸浸出赤泥及P507萃取浸出液回收钪的实验研究[J]. 工程科学与技术, 2021,53(4):240-246.
ZHU Xiaobo, WANG Tao, LI Wang. Experimental study on recovery of Y by acetic acid leaching from red mud and solvent extraction by P507 from leaching solution[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021,53(4):240-246.
- [11] JIANG T, SINGH S, DUNN K A, et al. Optimizing leaching of rare earth elements from red mud and spent fluorescent lamp phosphors using levulinic acid[J]. Sustainability, 2022,14(15):9682.
- [12] LI Z L, XIE Z H, DENG J, et al. Leaching kinetics of rare earth elements in phosphoric acid from phosphate rock[J]. Metals, 2021,11(2):239.
- [13] 宁凌峰,何德文,陈伟,等. 赤泥中硫酸选择性浸出铁、钪及动力学研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(3):81-84.
NING Lingfeng, HE Dewen, CHEN Wei, et al. Sulfuric acid leaching and kinetics study for separation of iron and scandium from red mud[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(3):81-84.
- [14] 王杰,张覃,邱跃琴,等. 方解石晶体结构及表面活性位点第一性原理[J]. 工程科学学报, 2017,39(4):487-493.
WANG Jie, ZHANG Qin, QIU Yueqin, et al. The first principles of the crystal structure and active sites of calcite[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017,39(4):487-493.
- [15] 李昆,李春全,孙志明. 粉煤灰制备 NaA 型分子筛及其对铅离子的吸附性能研究[J]. 矿业科学学报, 2022,7(5):604-614.
LI Kun, LI Chunquan, SUN Zhiming. Preparation of NaA zeolite with fly ash and its adsorption properties for lead ions[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022,7(5):604-614.
- [16] 黄魁,丁艳,唐启彬,等. 拜耳法赤泥中钪、钇浸出行为及动力学研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):111-115.
HUANG Kui, DING Yan, TANG Qiheng, et al. Leaching behavior and kinetics of scandium and yttrium from Bayer red mud[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(3):111-115.
- [17] 柴野,张覃. 不同环境因素下赤泥中重金属离子及 Na^+ 、 K^+ 的溶出特性[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):86-90.
CHAI Ye, ZHANG Qin. Dissolution characteristics of heavy metal ions and Na^+ , K^+ in red mud influenced by different environmental factors[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(3):86-90.
- 引用本文:刘文宝,丁睿,李维超,等. 拜耳法赤泥酒石酸脱碱提钪试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):141-146.
LIU Wenbao, DING Rui, LI Weichao, et al. Experimental study on alkali removal and titanium extraction from red mud with tartaric acid by bayer process[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):141-146.
- (上接第140页)
- [3] ZHANG X, GAN X, E Q, et al. Ameliorative effects of nano-selenium against NiSO_4 -induced apoptosis in rat testes[J]. Toxicology Mechanisms and Methods, 2019,29(7):467-477.
- [4] 王彩霞,张蕊,王爽,等. 纳米硒对硫酸镍诱导大鼠肾细胞凋亡的干预作用研究[J]. 毒理学杂志, 2021,35(3):193-197.
WANG Caixia, ZHANG Rui, WANG Shuang, et al. Protective effects of nano-selenium on nickel-induced renal cell apoptosis in rats[J]. Journal of Toxicology, 2021,35(3):193-197.
- [5] 李静,李吉刚,孙冬冬,等. 铁路客车用富液式 MH/Ni 电池的研制[J]. 电池, 2020,50(2):168-171.
LI Jing, LI Jigang, SUN Dongdong, et al. Development of flooded type Ni-MH battery for railway passenger car[J]. Battery Bimonthly, 2020,50(2):168-171.
- [6] 陈宇辉,陶涛,余健. pH 值对地下水除铁除锰影响机理的研究[J]. 工业用水与废水, 2005,36(5):17-19.
CHEN Yuhui, TAO Tao, YU Jian. Effects of pH value on removal of iron and manganese from groundwater[J]. Industrial Water & Wastewater, 2005,36(5):17-19.
- [7] PIASECKI W, SZYMANEK K, CHARMAS R. Fe^{2+} adsorption on iron oxide: The importance of the redox potential of the adsorption system[J]. Adsorption, 2019,25(3):613-619.
- [8] 申亚芳,张文,郝百川,等. 湿法冶金过程中除铁工艺研究进展[J]. 矿产综合利用, 2021(3):114-119.
SHEN Yafang, ZHANG Wen, HAO Baichuan, et al. Research progress in chemical removal of iron in hydrometallurgy[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(3):114-119.
- [9] 张建凯,张家全,雒庆堂,等. 粗硫酸镍精制方法的试验研究[J]. 世界有色金属, 2017(21):6-7.
ZHANG Jiankai, ZHANG Jiaquan, LUO Qingtang, et al. Experimental study on the method of refining crude nickel sulfate[J]. World Nonferrous Metals, 2017(21):6-7.
- [10] 吴晓莉. 粗硫酸镍的提纯工艺研究[J]. 铜业工程, 2018(5):52-56.
WU Xiaoli. Study on purification of crude nickel sulfate[J]. Copper Engineering, 2018(5):52-56.
- [11] 马宝军,罗贯文,占焕武,等. 氯气同步氧化除去混合镍盐溶液中铁钴[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):97-101.
MA Baojun, LUO Guanwen, ZHAN Huanwu, et al. Removal of iron and cobalt from nickel sulfate mixture solution by oxidation with chlorine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(2):97-101.
- 引用本文:蒋学先,王露森,朱文云,等. 氧化沉淀法除铁在精制硫酸镍中的应用[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):137-140.
JIANG Xuexian, WANG Lusen, ZHU Wenyun, et al. Application of oxidative precipitation for iron removal in refining nickel sulfate[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):137-140.