

# 褐铁矿型和蛇纹石型红土镍矿氯化浸出-选择性水解耦合提镍钴工艺研究<sup>①</sup>

王洋洋<sup>1</sup>, 王 硕<sup>1</sup>, 崔伟勇<sup>1,2</sup>, 李永利<sup>2</sup>, 郭 强<sup>1,2</sup>, 康跻耀<sup>1,2</sup>

(1.河北中科同创科技发展有限公司,河北 衡水 053000; 2.中国科学院过程工程研究所 绿色过程与工程重点实验室,北京 100190)

**摘要:** 针对褐铁矿型和蛇纹石型红土镍矿开展了以盐酸为初始浸出介质的褐铁矿型红土镍矿氯化浸出-蛇纹石型红土镍矿选择性水解耦合提取镍钴工艺研究。结果表明,酸矿质量比 5:4、液固质量比 4:1、反应温度 100 °C、反应时间 30 min 条件下,氯化浸出褐铁矿型红土镍矿时 Ni、Co、Fe 浸出率分别为 99.6%、100%、96.9%;采用褐铁矿型红土镍矿浸出液与浓盐酸按体积比 1:4 调配,在液固比 1:1、温度 150 °C、浸出时间 90 min 条件下浸出,蛇纹石型红土镍矿中 Ni 和 Co 浸出率分别达到 84.9% 和 100%。

**关键词:** 红土镍矿; 褐铁矿型; 蛇纹石型; 氯化浸出; 镍; 钴

中图分类号: TF111

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.03.026

文章编号: 0253-6099(2023)03-0115-04

## A Coupled Process of Chloridizing Leaching and Selective Hydrolysis for Extracting Nickel and Cobalt from Limonite-Type and Serpentine-Type Nickel Laterite Ores

WANG Yangyang<sup>1</sup>, WANG Shuo<sup>1</sup>, CUI Weiyong<sup>1,2</sup>, LI Yongli<sup>2</sup>, GUO Qiang<sup>1,2</sup>, KANG Jiyao<sup>1,2</sup>

(1. Hebei Zhongke Tongchuang Technology Development Co Ltd, Hengshui 053000, Hebei, China; 2. Key Laboratory of Green Process and Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Limonite-type and serpentine-type nickel laterite ores were taken for experiment. A coupled process for extracting nickel and cobalt was adopted, consisting of chloridizing leaching with HCl as the initial leaching medium for limonite-type nickel laterite ore, and selective hydrolysis for serpentine-type nickel laterite ore. The leaching rates of Ni, Co, and Fe from limonite-type laterite ore were 99.6%, 100%, and 96.9% respectively, under the conditions including acid-to-ore ratio of 5:4, liquid-to-solid ratio of 4:1, reaction temperature of 100 °C, and reaction time of 30 min. After that, the obtained lixivium of limonite-type nickel laterite ore, being mixed with concentrated HCl in a volume ratio of 1:4, was used to leach serpentine-type nickel laterite at 150 °C for 90 min with a liquid-to-solid ratio of 1:1, resulting in the leaching rates of Ni and Co up to 84.9% and 100%.

**Key words:** nickel laterite ore; limonite type; serpentine type; chloridizing leaching; nickel; cobalt

作为重要的战略金属资源,镍广泛应用于不锈钢以及电池材料等领域<sup>[1-3]</sup>。镍资源主要来源于红土镍矿。红土镍矿存在形式包括褐铁矿型、蛇纹石型以及过渡型<sup>[4-6]</sup>。湿法冶金是处理红土镍矿的重要方式之一<sup>[7-8]</sup>,其中高压酸浸是当前应用较广泛的工艺,其优点是镍回收率高,但浸出条件苛刻、运行成本高且安全

风险较大<sup>[9-11]</sup>。常压酸浸反应条件温和,但存在酸耗高、浸出时间长且浸出液中 Ni 与 Fe 分离困难等问题<sup>[12-15]</sup>。高压-常压联合工艺浸出效率较高且能够同时兼顾 2 种难处理红土镍矿,但硫酸产渣量大且反应时间长<sup>[16-17]</sup>。本文开展了褐铁矿型-蛇纹石型红土镍矿氯化浸出-选择性水解耦合提镍钴工艺研究,为红土

① 收稿日期: 2022-12-19

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFC1909601,2020YFC1909603);河北省自然科学基金(E2020111205);河南省重点研发计划(212102310066);中国博士后基金(2022M723179)

作者简介: 王洋洋(1990—),女,河北省衡水人,硕士,主要研究方向为工业固废与难处理矿物深度资源化与高值化利用。

通信作者: 郭 强(1982—),男,北京人,博士,研究员,主要研究方向为工业固废与难处理矿物深度资源化与高值化利用。

崔伟勇(1988—),男,北京人,博士,副研究员,主要研究方向为难处理矿物分选及工业固废选冶结合深度资源化与高值化利用。

镍矿的开发提供技术支持。

## 1 试验

### 1.1 试验原料

试验所用红土镍矿均产自菲律宾某矿场,矿石经破碎、研磨至 $-0.074\text{ mm}$  粒级占90%后备用;2种红土镍矿化学多元素分析结果见表1。试验所用浸出试剂均为分析纯,所用水为去离子水。

表1 红土镍矿种类及主要元素组成(质量分数) %

镍矿类别	Fe	Ni	Co	Mg	Mn	Si	Al	Cr
褐铁矿型	34.41	0.65	0.043	1.75	0.46	3.43	2.35	1.46
蛇纹石型	16.87	1.58	0.023	12.59	0.33	8.98	1.19	1.19

### 1.2 试验方法

**褐铁矿型红土镍矿浸出试验:**称取一定量褐铁矿型红土镍矿放入聚四氟乙烯反应内衬中,加入一定量浸出剂(根据酸矿质量比、液固质量比可计算出盐酸与去离子水的量,配成浸出剂),将反应内衬放入钢制反应釜中,密封后装入均相反应器中,连续旋转,保温一定时间后,将物料取出,抽滤分离,收集滤液备用,之后加水洗涤滤饼,收集、测试,并计算浸出率。

**蛇纹石型红土镍矿浸出试验:**称取一定量蛇纹石型红土镍矿放入聚四氟乙烯反应内衬中,加入一定量浸出剂(根据液固比可计算出浸出剂的量),将反应内衬放入钢制反应釜中,密封后装入均相反应器中,连续旋转,保温一定时间后,将物料取出,抽滤分离,并加水冲洗;滤液和滤饼分别收集测试,并计算浸出率。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 褐铁矿型红土镍矿盐酸浸出工艺

#### 2.1.1 酸矿质量比对浸出率的影响

设定液固质量比(浸出剂与褐铁矿型红土镍矿质量之比)4:1、反应温度 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、反应时间30 min,酸矿质量比(盐酸与褐铁矿型红土镍矿质量之比)对Ni、Co、Fe浸出率的影响见图1。由图1可知,酸矿质量比5:4时,Ni、Co、Fe浸出率分别达到99.6%、100%、96.9%;随着酸矿质量比进一步增加,Ni、Co、Fe浸出率变化不大;此外,酸矿质量比增加会增加原料成本。因此,选择酸矿质量比5:4,此时Ni、Co、Fe均可维持较高的浸出率。

#### 2.1.2 液固质量比对浸出率的影响

酸矿质量比5:4,其他条件不变,液固质量比对Ni、Co、Fe浸出率的影响见图2。由图2可知,随着液

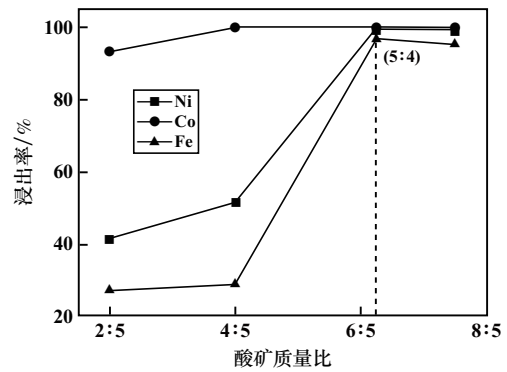


图1 酸矿质量比对Ni、Co、Fe浸出率的影响

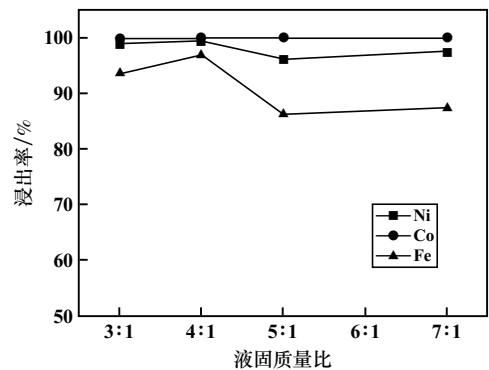


图2 液固质量比对Ni、Co、Fe浸出率的影响

固质量比增大,液相中盐酸被稀释,此时Ni、Co浸出率并没有发生显著变化,但Fe浸出率下降较快。考虑到液固质量比较小时,所需反应器体积减小,浸出液中铁、镍等金属离子浓度增大有利于在热分解等工序中降低能耗,因此较小的液固质量比更有利于浸出。当液固质量比小于4:1时,盐酸浓度会达到31%以上。高浓度的盐酸挥发性和腐蚀性强,同样会对操作、设备以及后续盐酸回收等提出更高要求。因此,适宜的液固质量比为4:1。

#### 2.1.3 反应温度对浸出率的影响

液固质量比4:1,其他条件不变,反应温度对Ni、Co、Fe浸出率的影响见图3。由图3可知,反应温度

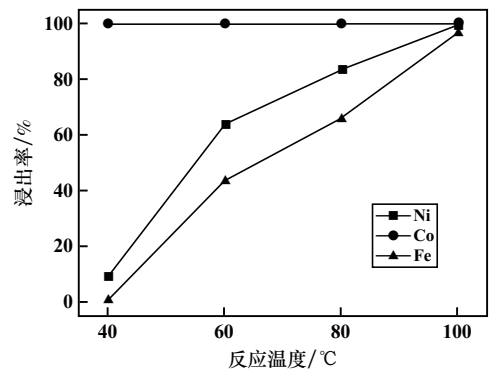


图3 反应温度对Ni、Co、Fe浸出率的影响

40 ℃时,Ni 浸出率仅 9.4%;随着反应温度逐渐升高,Ni 浸出率急剧增加,当反应温度 100 ℃时,Ni 浸出率达到 99.6%。Fe 浸出率随温度变化规律与 Ni 类似,100 ℃时浸出率已接近最大值。Co 浸出率随温度升高变化不明显。因此,选择反应温度为 100 ℃。

2.1.4 反应时间对浸出率的影响

反应温度 100 ℃,其他条件不变,反应时间对 Ni、Co、Fe 浸出率的影响见图 4。由图 4 可知,反应时间由 15 min 延长至 30 min 时,Ni 浸出率由 94.6%增至 99.6%,浸出率已接近最大值;反应延长至 120 min 时,Ni 浸出率变化不大。随反应时间变化,Fe 浸出规律与 Ni 相似。反应时间由 15 min 延长至 120 min 时,Co 浸出率变化不明显,而且延长反应时间会增加能耗与时间成本,因此,选择浸出时间为 30 min。

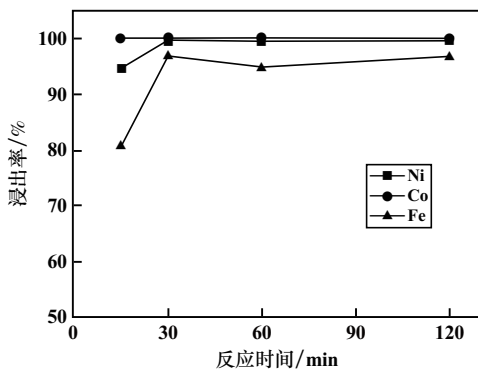


图 4 反应时间对 Ni、Co、Fe 浸出率的影响

2.1.5 褐铁矿型红土镍矿浸出优化条件试验

通过以上单因素试验,确定采用盐酸浸出褐铁矿型红土镍矿的优化条件为:酸矿质量比 5:4,液固质量比 4:1,反应温度 100 ℃,反应时间 30 min。在此条件下进行了综合试验,Ni、Co、Fe 浸出率分别为 99.6%、100%、96.9%。

2.2 蛇纹石型红土镍矿氯化浸出-选择性水解

在优化条件下,得到褐铁矿型红土镍矿盐酸浸出液,其组成见表 2。从表 2 可以看出,浸出液中 Fe 浓度为 145.57 g/L,盐酸浓度 58.34 g/L,浸出液中还含有少量 Ni、Co、Al、Cr 等。

表 2 褐铁矿型红土镍矿浸出液中各组分浓度 g/L

Ni	Co	Mn	Fe	Cr	Al	Mg	HCl
2.66	0.27	1.78	145.57	3.05	8.96	2.95	58.34

以褐铁矿型红土镍矿浸出液与盐酸/氯化铁溶液按体积比调配成浸出剂,通过调节褐铁矿型红土镍矿

浸出液与浓盐酸的体积比来调控浸出剂中的盐酸浓度;通过调节褐铁矿型红土镍矿浸出液与 746.3 g/L 氯化铁溶液的体积比来调控浸出剂中 Fe 浓度;液固比为浸出剂体积与红土镍矿质量之比,通过调节浸出剂体积来调控液固比。

2.2.1 盐酸浓度对浸出及沉淀的影响

反应温度 150 ℃、反应时间 90 min、液固比 1:1 条件下,盐酸浓度对 Ni、Co 浸出及 Fe 沉淀的影响见图 5。由图 5 可看出,随着盐酸浓度由 58.3 g/L 增加至 361 g/L 时,Ni 浸出率不断升高,但 Co 浸出率变化不大;Fe 沉淀率总体呈下降趋势。盐酸浓度为 361 g/L 时,Ni 浸出率达到 84.9%,Fe 沉淀率达到 85.8%;HCl 浓度增加至 440 g/L 时,Ni 浸出率提高了 4.7%,Fe 沉淀率则下降了 9.7%。此外,高浓度盐酸势必对操作、设备以及后续盐酸回收等提出更高要求。经过综合评估,选择盐酸浓度 361 g/L,此时对应浸出液与浓盐酸体积比为 1:4。

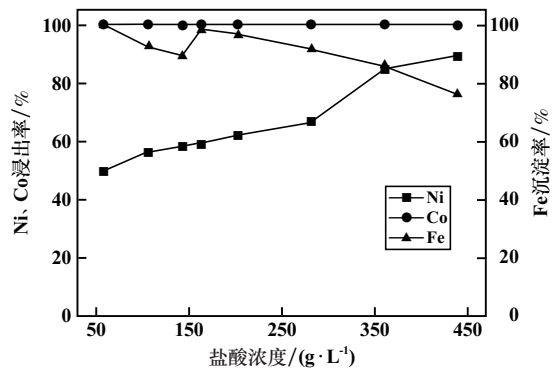


图 5 盐酸浓度对 Ni、Co 浸出率及 Fe 沉淀率的影响

2.2.2 Fe 浓度对浸出及沉淀的影响

反应温度 150 ℃、反应时间 90 min、液固比 1:1,以 FeCl<sub>3</sub> 为调整剂,溶液中 Fe 浓度对 Ni、Co 浸出率及 Fe 沉淀率的影响见图 6。由图 6 可看出,溶液中 Fe 浓度变化对 Ni、Co 浸出率和 Fe 沉淀率影响不大,Ni 浸出率均处在一个较低水平,Fe 沉淀率保持在较高水平,

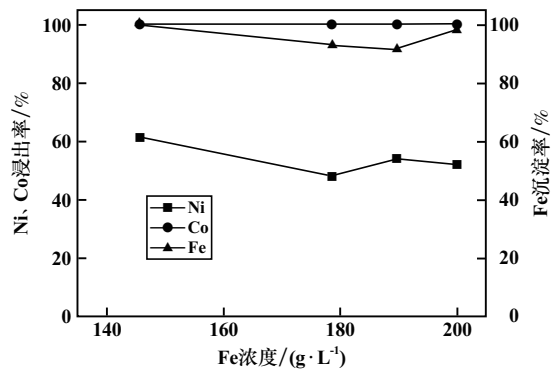


图 6 溶液中 Fe 浓度对 Ni、Co 浸出率及 Fe 沉淀率的影响

不能满足蛇纹石型红土镍矿中 Ni 高效浸出,因此试验过程中不再考虑调控溶液中 Fe 浓度。

### 2.2.3 反应时间对浸出及沉淀的影响

盐酸浓度 361 g/L,其他条件不变,反应时间对 Ni、Co 浸出率及 Fe 沉淀率的影响见图 7。由图 7 可看出,浸出时间 30 min 时,Co 浸出率接近 100%,表明 Co 浸出速率较快;延长反应时间,Ni 浸出率逐渐增加,反应时间 90 min 时,Ni 浸出率最高,为 84.9%;反应时间由 30 min 延长至 120 min,Fe 沉淀率由 69.3% 增至 96.7%。延长反应时间会增加能耗与时间成本,因此选择反应时间为 90 min。

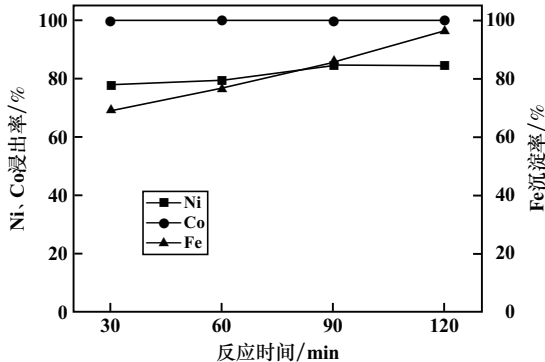


图 7 反应时间对 Ni、Co 浸出率及 Fe 沉淀率的影响

### 2.2.4 反应温度对浸出及沉淀的影响

反应时间 90 min,其他条件不变,反应温度对 Ni、Co 浸出率及 Fe 沉淀率的影响见图 8。由图 8 可看出,升高温度有利于 Ni 的浸出反应,温度由 130 °C 增至 160 °C 时,Ni 浸出率由 79.8% 增至 87.3%。升高温度同样有利于 Fe 的沉淀,温度由 130 °C 增至 150 °C 时,铁沉淀率由 82.1% 增至 85.8%。升高温度会造成能耗、设备投资与操作费用上涨,因此,选择反应温度 150 °C,此时 Ni 浸出率为 84.9%,Fe 沉淀率为 85.8%。

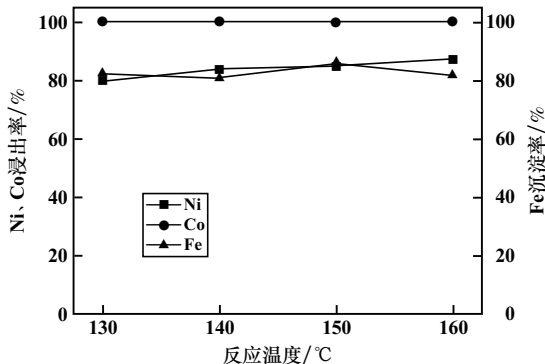


图 8 反应温度对 Ni、Co 浸出率及 Fe 沉淀率的影响

### 2.2.5 液固比对浸出及沉淀的影响

反应温度 150 °C,其他条件不变,液固比对 Ni、Co

浸出率及 Fe 沉淀率的影响见图 9。由图 9 可看出,液固比由 4:5 增至 7:5 时,Ni 浸出率由 74.2% 增至 94.1%,Fe 沉淀率由 94.6% 降至 64.0%,表明增加液固比虽然有利于 Ni 的浸出,但 Fe 沉淀率明显降低,在较大液固比条件下并不能起到 Ni、Co 与 Fe 初步分离的目的。较低的液固比条件下,Ni 浸出率较低,并会影响浆料的流动性,导致出料、过滤困难,因此选择液固比为 1:1。

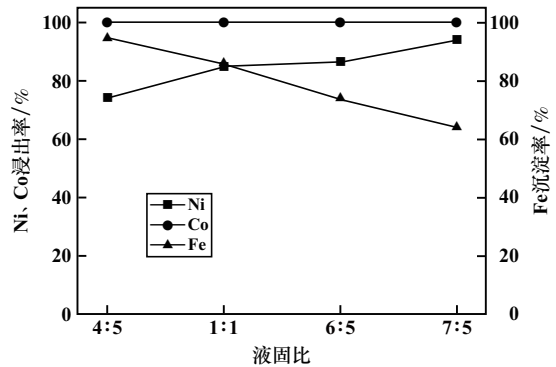


图 9 液固比对 Ni、Co 浸出率及 Fe 沉淀率的影响

### 2.2.6 蛇纹石型红土镍矿浸出优化条件试验

由单因素试验结果可知,在采用褐铁矿型红土镍矿盐酸浸出液浸出蛇纹石型红土镍矿时,需要调配浸出液中的酸浓度,优化的浸出条件为:盐酸浓度 361 g/L (浸出液与浓盐酸体积比 1:4)、液固比 1:1、反应温度 150 °C、反应时间 90 min,在此条件下进行了综合试验,Ni 浸出率 84.9%,Co 浸出率 100%,Fe 沉淀率 85.8%,达到了 Ni、Co 与 Fe 初步分离的目的。

## 3 结 论

针对褐铁矿型和蛇纹石型难处理红土镍矿,以盐酸为初始浸出介质开展了褐铁矿型红土镍矿氯化浸出以及蛇纹石型红土镍矿选择性水解耦合提镍钴工艺研究,结果如下:

1) 盐酸浸出褐铁矿型红土镍矿优化条件为:酸矿质量比 5:4、液固质量比 4:1、反应温度 100 °C、反应时间 30 min,此时 Ni、Co、Fe 浸出率分别为 99.6%、100%、96.9%。

2) 采用褐铁矿型红土镍矿浸出调配液水解蛇纹石型红土镍矿的优化条件为:浸出液与浓盐酸按体积比 1:4 (对应盐酸浓度 361 g/L)、液固比 1:1、反应温度 150 °C、反应时间 90 min,此时,蛇纹石中 Ni 浸出率 84.9%、Co 浸出率 100%、Fe 沉淀率 85.8%。

3) 选择性水解蛇纹石后,酸性滤液中 Fe 浓度大大降低,经萃取-反萃取处理后可实现镍和钴梯级分离。

(下转第 123 页)

验结果表明,  $\text{SO}_4^{\cdot-}$  和  $\text{O}_2^{\cdot-}$  是导致氧氟沙星降解的 2 种活性物种。随着 pH 值升高, 反应体系中  $\text{SO}_4^{\cdot-}$  的量逐渐减少。

### 参考文献:

- [1] 孟磊, 杨兵, 薛南冬. 氟喹诺酮类抗生素环境行为及其生态毒理研究进展[J]. 生态毒理学报, 2015, 10(2): 76-88.
- [2] 杨声海, 蒋涛, 唐建军, 等.  $\text{TiO}_2$  可见光催化  $\text{H}_2\text{O}_2$  降解特丁津的降解过程[J]. 矿冶工程, 2016, 36(3): 107-111.
- [3] 唐建军, 邹原. Fe- $\text{TiO}_2$  可见光催化  $\text{H}_2\text{O}_2$  降解水溶液中的阿特拉津[J]. 矿冶工程, 2012, 32(1): 95-98.
- [4] 姜智超, 余侃萍, 张玉凤. 臭氧氧化-循环喷淋法处理钨钼选矿废水[J]. 矿冶工程, 2020, 40(3): 75-78.
- [5] 孙磊, 吴江求, 曹学锋, 等. 微电解 Fenton 法处理有机废水可行性研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(1): 101-104.
- [6] 蔡文良, 谢艳云. Fenton 氧化-混凝沉淀处理电镀废水中重金属镍的研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(4): 106-109.
- [7] 李伟, 苗冬田, 魏秋平, 等. 过硫酸盐电解质支撑的 BDD-PS 电化学氧化 RB-19 的研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(2): 119-122.
- [8] 薛洪海, 高斯屿, 付依, 等. 紫外活化过硫酸盐技术去除水中人工甜味剂的研究进展[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(32): 17-23.
- [9] XING S T, LI W Q, LIU B, et al. Removal of ciprofloxacin by persulfate activation with CuO: A pH-dependent mechanism[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 382(C): 122837.

- [10] 李洋. CuO/ZSM-5 活化过硫酸盐降解印染尾水中苯胺的研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学生物与化学工程学院, 2018.
- [11] 黄群莲, 邓以平, 徐绍友. 紫外分光光度法测定氧氟沙星的解离常数[J]. 中国药房, 2010, 21(41): 3907-3909.
- [12] LIU C, Salli E, Crou J, et al. Chlorination of Iodide-Containing Waters in the Presence of CuO: Formation of Periodate[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(22): 13173-13180.
- [13] 张磊, 林子雨, 张文静. 紫外强化 CuO 活化过硫酸盐降解罗丹明 B 染料废水[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(11): 82-89.
- [14] 徐西蒙, 宗绍燕, 刘丹. 钢渣碱活化过硫酸盐降解双酚 A[J]. 中国环境科学, 2019, 39(7): 2889-2895.
- [15] 邵永, 肖蕾, 吴云霞, 等. 过硫酸钠降解印染有机废水的研究进展[J]. 应用化工, 2017, 46(1): 180-183.
- [16] 李文清. 氧化铜活化过硫酸盐降解医药品类污染物[D]. 石家庄: 河北师范大学化学与材料科学学院, 2020.
- [17] 王建勋. 单过硫酸氢钾复合盐活化技术的研究[D]. 石家庄: 河北科技大学化学与制药工程学院, 2017.

引用本文: 周自成, 徐大伟, 张士雨, 等. 纳米 CuO 活化过硫酸盐催化降解氧氟沙星[J]. 矿冶工程, 2023, 43(3): 119-123.

(上接第 118 页)

### 参考文献:

- [1] Faris N, Fischmann A J, Assmann S, et al. A study into the behaviour of nickel, cobalt and metal impurities during partial neutralisation of synthetic nickel laterite pressure leach solutions and pulps[J]. Hydrometallurgy, 2021, 202(4): 105604.
- [2] MA F, YU Z, WU Y, et al. Preparation of  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$  cathode materials from the hydrochloric acid leaching of laterite: A short and low-cost process[J]. Hydrometallurgy, 2020, 195: 105370.
- [3] Park K J, Lim B B, Choi M H, et al. A high-capacity  $\text{Li}[\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.06}\text{Mn}_{0.14}]\text{O}_2$  positive electrode with a dual concentration gradient for next-generation lithium-ion batteries[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(44): 22183-22190.
- [4] Quintero-Coronel D A, Guillin-Estrada W D, Echeverri-Roman J L, et al. Large- and Particle-Scale energy assessment of reduction roasting of nickel laterite ore for Ferronickel production via the rotary Kiln-Electric furnace process[J]. Thermal science and engineering progress, 2022, 32: 101331.
- [5] 牟文宁, 崔富晖, 黄志鹏, 等. 红土镍矿酸浸废水中铁镁分离与回收利用[J]. 矿冶工程, 2017, 37(2): 79-83.
- [6] Pickles C A, Forster J, Elliott R. Thermodynamic analysis of the carbothermic reduction roasting of a nickeliferous limonitic laterite ore[J]. Minerals Engineering, 2014, 65: 33-40.
- [7] Norgate T, Jahanshahi S. Assessing the energy and greenhouse gas footprints of nickel laterite processing[J]. Minerals Engineering, 2011, 24(7): 698-707.
- [8] Çetintaş S, Bingöl D. Performance evaluation of leaching processes with and without ultrasound effect combined with reagent-assisted

- mechanochemical process for nickel recovery from Laterite: Process optimization and kinetic evaluation[J]. Minerals Engineering, 2020, 157: 106562.
- [9] Büyükkakinci E, Topkaya Y A. Extraction of nickel from lateritic ores at atmospheric pressure with agitation leaching[J]. Hydrometallurgy, 2009, 97(1-2): 33-38.
- [10] TIAN Q, DONG B, GUO X, et al. Comparative atmospheric leaching characteristics of scandium in two different types of laterite nickel ore from Indonesia[J]. Minerals Engineering, 2021, 173: 107212.
- [11] Sarbishei S, Khajavi L T. Kinetic analysis on nickel laterite ore calcination using model-free and model-fitting methods[J]. Minerals Engineering, 2019, 136: 129-139.
- [12] GUO Q, QU J, HAN B, et al. Innovative technology for processing saprolitic laterite ores by hydrochloric acid atmospheric pressure leaching[J]. Minerals Engineering, 2015, 71: 1-6.
- [13] 罗文波, 江爱敏, 洪开发, 等. 红土镍矿常压还原浸出试验研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(5): 124-127.
- [14] 付中梦, 郑宇, 巩勤学, 等. 印尼某红土镍矿常压浸出实验研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(6): 167-169.
- [15] 郭学益, 吴展, 李栋, 等. 红土镍矿常压盐酸浸出工艺及其动力学研究[J]. 矿冶工程, 2011, 31(4): 69-72.
- [16] 刘玉强, 王少华, 沙滨, 等. 一种常压及加压联合酸浸处理低品位红土镍矿的湿法冶金方法: 中国, CN111154974A[P]. 2020.
- [17] 刘三平, 蒋开喜, 王海北, 等. 红土镍矿常压-加压两段联合浸出新工艺研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2014(11): 12-15.

引用本文: 王洋洋, 王硕, 崔伟勇, 等. 褐铁矿型和蛇纹石型红土镍矿氯化浸出-选择性水相耦合提镍工艺研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(3): 115-118.