电感耦合等离子体发射光谱法测定红土镍矿中镍物相的研究①

漆欢，李志辉，卢美玲，于铱铱，曾赟，符招弟，杨林
（长沙矿冶研究院有限责任公司，湖南 长沙 410012）

摘　要：建立了红土镍矿中镍的化学物相分析方法，分别采用碳酸钙溶液浸出硫酸镍中镍、乙酸-亚硫酸钠溶液浸出赋存于锰矿物中的氧化镍中镍、过氧化氢-乙酸铵溶液浸出硫化镍中镍，各相态中镍含量及镍总量均采用电感耦合等离子体发射光谱法（ICP-OES）检测。结果表明，各相态镍加和与总镍量相比相对偏差小于 1%，且各相态镍含量与自动矿物分析仪检测结果基本吻合，证实该方法准确可靠，可用于红土镍矿的镍物相分析。

关键词：红土镍矿；镍；物相分析；电感耦合等离子体发射光谱法
中图分类号：TD982　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.02.023
文章编号：0253-6099(2026)02-0145-05

Chemical Phase Analysis of Nickel in Laterite Nickel Ore by Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy

QI Huan, LI Zhihui, LU Meiling, YU Yiyi, ZENG Yun, FU Zhaodi, YANG Lin
(*Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd.*, *Changsha* 410012, *Hunan*, *China*)

Abstract: A chemical phase analysis method for nickel in laterite nickel ore was proposed. Calcium carbonate solution was used to leach nickel from nickel sulfate. Acetic acid-sodium sulfite solution was applied to extract nickel from nickel oxide hosted in manganese minerals, and hydrogen peroxide-ammonium acetate solution was adopted to leach nickel from nickel sulfide. Both the nickel content in each phase and the total nickel content were determined by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). The results show that the relative deviation between the sum of nickel contents in each phase and the total nickel content is less than 1%. In addition, the nickel content in each phase is basically consistent with the test results obtained by automatic mineral analyzer. It is verified that this method is accurate and reliable, and can be applied to the nickel phase analysis of laterite nickel ore.

Key words: laterite nickel ore; nickel; phase analysis; inductively coupled plasma emission spectroscopy

在全球镍资源需求持续攀升的背景下，硫化镍矿资源日渐枯竭，储量更丰富的红土镍矿已逐步取代硫化镍矿，成为镍资源开发利用的主体矿物[1-4]。镍的赋存状态直接决定了红土镍矿冶炼工艺路线的选择与冶炼效率的高低[5-6]。物相分析作为精准解析镍赋存状态的核心技术手段，是优化冶炼工艺、提升资源利用率与降低生产成本的关键支撑，具有不可替代的作用[7-8]。

当前镍物相分析研究多围绕硫化镍矿展开，尚无契合红土镍矿特性的专属分析方法。若直接套用现有的镍物相分析方法[9]，会因红土镍矿自身特点产生以下问题：① 硫酸镍含量低，浸出试剂引入的铵盐难以消除基体效应，导致检测误差偏大；② 硫化镍含量低，采用酸性饱和溴水浸出时会引发硅酸镍串相，造成硫化镍测量结果偏高，而赋存在硅酸盐中的镍偏低；③ 缺乏赋存在锰矿物中氧化镍的分离方法，无法完整解析镍的赋存方式，制约冶炼工艺优化。这些技术瓶颈导致现有方法难以满足红土镍矿冶金工艺对精准检测结果的需求，相关技术亟须针对性突破。

① **收稿日期**：2025-10-15
基金项目：国家重点研发计划(2021YFC2903001)
作者简介：漆欢(1991—)，女，湖南醴陵人，硕士，工程师，主要从事矿物元素分析及化学物相分析。E-mail:1620840635@qq.com
通信作者：李志辉(1979—)，男，湖北荆州人，硕士，高级工程师，主要从事矿物元素分析及化学物相分析。E-mail:83152467@qq.com

本文针对红土镍矿中镍主要以类质同象形式赋存于硅酸盐矿物、铁矿物及锰矿物的特点,将其中镍物相分为硫酸镍、赋存在锰矿物中的氧化镍、赋存在铁矿物中的氧化镍、硫化镍和硅酸镍,通过单矿物浸出实验和实际矿样分离实验,建立了红土镍矿中镍的化学物相分析方法。该方法的建立,可为测定红土镍矿中镍的相态分布提供准确数据,为地质勘探、资源评价以及红土镍矿湿法浸出中还原剂的用量评估提供可靠的技术依据。

1 实验部分

1.1 实验仪器和试剂

主要实验仪器包括微量天平(AB204-S)、马弗炉、电感耦合等离子体发射光谱仪(AVIO500)、控温电热板和控温水浴锅。电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)测定镍的工作条件为:射频功率1 300 W、雾化器流量0.7 L/min、辅助气流量0.2 L/min、泵速1.5 mL/min、测定谱线波长231.604 nm。

主要实验试剂包括碳酸钙、亚硫酸钠、乙酸、抗坏血酸、柠檬酸、过氧化氢、乙酸铵、盐酸、硝酸、硫酸、高氯酸,均为分析纯;实验用水为去离子水。

碳酸钙饱和溶液制备:称取0.1 g碳酸钙于碘量瓶中,加入50 mL去离子水,室温振荡10 min,现配现用。乙酸-亚硫酸钠溶液制备:称取0.5 g亚硫酸钠,溶于100 mL体积分数10%的乙酸溶液中,现配现用。抗坏血酸-柠檬酸溶液制备:称取0.5 g抗坏血酸,溶解于100 mL质量浓度200 g/L的柠檬酸溶液中。过氧化氢-乙酸铵溶液制备:量取10 mL过氧化氢与10 mL质量浓度500 g/L的乙酸铵溶液混合,用去离子水定容至100 mL,调节溶液pH值至4.0。镍标准储备液(GSB 04-1740-2004)质量浓度为1 000 mg/L,由国家有色金属及电子材料分析测试中心生产,其相对扩展不确定度为0.7%(包含因子$k=2$)。

1.2 实验样品

实验所用红土镍矿样品粒度为0.149 mm,烘干待测。采用X射线荧光光谱法(XRF)测定红土镍矿的镍含量,红土镍矿的主要化学成分见表1。

表1 红土镍矿主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of laterite nickel ore %

Ni	Fe	Mg	Si	Mn	S	O
1.716	38.290	2.510	6.656	1.116	0.254	32.700

采用ICP-OES测定红土镍矿中镍含量,检测结果见表2。采用矿物自动分析仪(MLA)测定红土镍矿中镍的化学物相,结果见表3。由表3可知,红土镍矿中的镍主要分布于锰矿物中。

表2 红土镍矿中镍含量检测结果

Table 2 Nickel content in laterite nickel ore

测试次数	镍含量(质量分数)/%
1	1.54
2	1.58
3	1.55
4	1.54
5	1.56
6	1.59
平均值	1.56
相对标准偏差(RSD)	1.34

表3 红土镍矿中镍化学物相分析结果

Table 3 Chemical phase analysis of nickel in laterite nickel ore

相态	分布率/%
褐铁矿中镍	35.21
锰矿物中镍	44.98
硅镁矿中镍	19.81

1.3 相态分离方法

1.3.1 硫酸镍的分离与测定

准确称取1.000 0 g红土镍矿置于碘量瓶中,加入50 mL碳酸钙饱和溶液,室温振荡5 min,采用中速定量滤纸过滤,用去离子水洗涤碘量瓶及滤纸5~7次,得滤液1和残渣1。将滤液1置于200 ℃电热板上浓缩至约30 mL,加入2.5 mL浓盐酸,冷却至室温后定容至50 mL容量瓶中,采用ICP-OES测定硫酸镍中镍含量。

1.3.2 赋存在锰矿物中的氧化镍的分离与测定

将残渣1连同滤纸一并放回原碘量瓶,加入100 mL乙酸-亚硫酸钠溶液,于60 ℃水浴加热30 min,补加0.5 g亚硫酸钠后继续水浴30 min。过滤并洗涤碘量瓶及滤纸5~7次,得滤液2和残渣2。向滤液2中加入5 mL浓盐酸,于200 ℃电炉上浓缩至约5 mL,冷却后补加2.5 mL浓盐酸,定容至100 mL容量瓶中,采用ICP-OES测定镍含量,即为赋存于锰矿物中的氧化镍的镍(以下简称锰相镍)含量。

1.3.3 赋存在铁矿物中的氧化镍的分离与测定

该步骤参考现有镍物相测试方法[9],将残渣2连同滤纸放回原碘量瓶,采用100 mL抗坏血酸-柠檬酸溶液进行浸出,得滤液3和残渣3。滤液3定容至100 mL容量瓶中。分取其中5 mL试液加入硝酸、硫酸溶液(浓硫酸与水体积比1∶1)消解其中有机物,并最终定容至50 mL容量瓶中,采用ICP-OES测定镍含量,即为赋存于铁矿物中的氧化镍的镍(以下简称铁

相镍)含量。

1.3.4　硫化镍的分离与测定

将残渣 3 连同滤纸放回原碘量瓶,加入 100 mL 过氧化氢-乙酸铵溶液,室温振荡 60 min,过滤并洗涤 5~7 次,得滤液 4 和残渣 4。向滤液 4 中加入 2.5 mL 高氯酸,于 200 ℃电热板上加热至冒浓白烟,冷却后补加 2.5 mL 浓盐酸,定容至 50 mL 容量瓶混匀,采用 ICP-OES 测定镍含量,即为硫化镍中镍的含量。

1.3.5　硅酸镍的分离与测定

该步骤参考现有镍物相测试方法[9],将残渣 4 连同滤纸移入 125 mL 瓷坩埚,于电热板上进行烘干,冷却后置于马弗炉中灰化至无黑色炭粉。冷却后将残渣用盐酸、氢氟酸、高氯酸进行消解后冷却定容至 100 mL 容量瓶混匀,采用 ICP-OES 测定镍含量,即为硅酸镍中镍的含量。

1.3.6　总镍量的测定

称取 0.1 g 试样(精确至 0.000 1 g)试样于聚四氟乙烯烧杯中,依次加入 5 mL 浓盐酸、2 mL 浓硝酸、2 mL 氢氟酸、2 mL 高氯酸,于 200 ℃电热板上加热至冒高氯酸浓白烟。冷却后加入 20 mL 水,低温加热溶解可溶性盐类,冷却后转入 100 mL 容量瓶,以水定容混匀,采用 ICP-OES 测定镍含量,即为矿石中总镍量。

2　结果及讨论

2.1　硫酸镍的选择性浸出

硫酸镍易溶于水,为防止浸出过程中可能产生的酸性物质,导致其他相态镍同步浸出,引发串相问题,传统方法常采用大量乙酸铵作为缓冲液控制浸出液保持中性,但乙酸铵会引发基体效应,影响检测结果准确性;大量盐类易在仪器进样管内结晶,造成管路堵塞,干扰检测。本文采用碳酸钙饱和溶液控制浸出体系酸度,可有效克服上述缺陷。其控酸原理为:利用碳酸钙同溶液中的氢离子反应生成二氧化碳逸出,从而维持体系 pH 值,实现酸度调控。硫酸镍的浸出实验以七水硫酸镍为研究对象,系统考察碳酸钙溶液对硫酸镍浸出效果的影响,进而确定硫酸镍选择性浸出的最佳工艺条件。

2.1.1　振荡时间的影响

准确称取七水硫酸镍 0.1 g(精确至 0.000 1 g)于一组烧杯中,分别加入 50 mL 碳酸钙饱和溶液,室温振荡,考察振荡时间对硫酸镍中镍浸出率的影响,结果见表 4。由表 4 可知,振荡时间 5 min 时,镍浸出率已达 99.9%;继续延长振荡时间,浸出率无明显变化。适宜的振荡时间为 5 min。

表 4　振荡时间对硫酸镍中镍浸出率的影响

Table 4　Effect of oscillation time on leaching rate of nickel from nickel sulfate

振荡时间/min	镍浸出率/%
1	95.7
5	99.9
10	99.8

2.1.2　碳酸钙用量的影响

振荡时间 5 min,其他条件不变,碳酸钙用量对硫酸镍中镍浸出率的影响见表 5。由表 5 可知,当碳酸钙的加入量为 0.10 g 时,硫酸镍中镍浸出率可达 99.9%,而且绝大部分碳酸钙未溶解。适宜的碳酸钙用量为 0.10 g。

表 5　碳酸钙用量对硫酸镍中镍浸出率的影响

Table 5　Effect of calcium carbonate on leaching rate of nickel from nickel sulfate

碳酸钙用量/g	镍浸出率/%
0	99.8
0.05	99.8
0.10	99.9
0.15	99.7
0.20	99.8
0.25	99.9

为确保酸度控制效果与浸出效率,最终确定实验条件为:室温、碳酸钙用量 0.10 g、振荡时间 5 min。在此条件下,镍浸出率为 99.9%。

2.2　锰相镍的选择性浸出

现有镍物相分析方法中,尚未见针对锰相镍的测定方法。文献[10]表明在乙酸溶液中加入亚硫酸钠,可选择性浸出锰相镍。亚硫酸钠在酸性条件下既可还原锰矿石、促进氧化镍的浸出,又能维持还原气氛、抑制硫化镍的氧化。但亚硫酸钠在酸性介质中易分解生成二氧化硫,该气体易挥发,造成还原气氛流失,因此亚硫酸钠分 2 次加入。在 60 ℃恒温水浴条件下,考察亚硫酸钠用量、乙酸溶液浓度和水浴时间对锰相镍浸出效果的影响。

2.2.1　亚硫酸钠用量的确定

准确称取 1.000 0 g 红土镍矿、100 mL 10%(体积分数,下同)乙酸溶液、60 ℃恒温水浴 60 min,考察亚硫酸钠用量对锰相镍浸出效果的影响,结果见表 6。由表 6 可知,随着亚硫酸钠用量增加,锰相镍占比呈现先增大再减小的趋势,亚硫酸钠用量 1.00 g 时,锰相镍的占比为 38.46%。适宜亚硫酸钠用量为 1.00 g,即 10.00 g/L。

表6 亚硫酸钠用量对锰相镍浸出效果的影响

Table 6 Effect of sodium sulfite dosage on leaching of nickel oxide from manganese minerals

亚硫酸钠用量/g	镍含量测定值/%	锰相镍的占比/%
0	0.29	18.59
0.50	0.45	28.85
1.00	0.60	38.46
1.50	0.58	37.18

2.2.2 乙酸溶液浓度的确定

亚硫酸钠用量1.00 g,其他条件不变,乙酸溶液浓度对锰相镍浸出效果的影响见表7。由表7可知,乙酸溶液浓度5%时,锰相镍占比偏低,无法满足检测需求;乙酸溶液浓度为10%和15%时,锰相镍占比无显著差异,说明乙酸溶液浓度10%已能达到理想浸出效果。适宜乙酸溶液浓度为10%。

表7 乙酸溶液浓度对锰相镍浸出效果的影响

Table 7 Effect of acetic acid concentration on leaching of nickel oxide from manganese minerals

乙酸溶液浓度/%	镍含量测定值/%	锰相镍占比/%
5	0.38	24.36
10	0.60	38.46
15	0.59	37.82

2.2.3 水浴时间的影响

乙酸溶液浓度10%,其他条件不变,水浴时间对锰相镍浸出效果的影响如表8所示。由表8可知,水浴时间60 min时,锰相镍占比为38.46%;继续延长水浴时间,锰相镍占比变化不大。适宜的水浴时间为60 min。

综上分析,锰相镍的优化浸出条件为:亚硫酸钠用量1.0 g、100 mL 10%乙酸溶液、60 ℃恒温水浴60 min。在此条件下,锰相镍占比为38.46%。

表8 水浴时间对锰相镍浸出效果的影响

Table 8 Effect of water bath time on leaching of nickel oxide from manganese minerals

水浴时间/min	镍含量测定值/%	锰相镍的占比/%
30	0.47	30.13
60	0.60	38.46
90	0.59	37.82
120	0.60	38.46

2.3 硫化镍的选择性浸出

现有硫化镍浸出多采用饱和溴水溶液,但红土镍矿中硫化镍含量极低,且饱和溴水酸性较强,易造成串相,导致硫化镍检测结果偏高。以红土镍矿为研究对象,考察过氧化氢-乙酸铵溶液的pH值对红土镍矿中硫化镍浸出效果的影响,并与饱和溴水方法进行对比,结果见表9。结合表1和表3可知,该红土镍矿中硫化镍类矿物极低。从表9可以看出,以酸性较强的饱和溴水及pH=1.0~3.0的过氧化氢-乙酸铵溶液浸出时,镍含量测定值均偏高,主要是因为在浸出过程中会同步浸出部分硅酸镍,导致硫化镍中镍测定值偏高;pH=4.0~6.0的过氧化氢-乙酸铵溶液对镍含量测定值影响较小。为防止pH值过高生成氢氧化镍沉淀,选用pH=4.0的过氧化氢-乙酸铵溶液作为红土镍矿中硫化镍的浸出剂。

表9 饱和溴水与过氧化氢-乙酸铵测试结果对比

Table 9 Comparison of results between saturated bromine water and perhydrol-ammonium acetate solutions

浸出试剂	pH值	镍含量测定值/%	硫化镍中镍占比/%
饱和溴水	—	0.015 6	1.00
过氧化氢-乙酸铵溶液	1.0	0.016 9	1.08
	2.0	0.014 1	0.90
	3.0	0.011 2	0.72
	4.0	0.009 9	0.63
	5.0	0.009 8	0.63
	6.0	0.009 9	0.63

2.4 精密度

采用本文建立的化学物相分析方法对红土镍矿进行精密度试验,结果见表10。

表10 精密度试验结果

Table 10 Precision testing rests

相态	测试结果/%							RSD/%
	1	2	3	4	5	6	平均值	
硫酸镍中镍	0.001 0	0.000 8	0.001 2	0.001 1	0.000 7	0.001 2	0.001 0	20.98
锰相镍	0.650 1	0.573 9	0.554 2	0.621 8	0.593 3	0.604 1	0.599 6	5.69
铁相镍	0.641 3	0.702 9	0.710 3	0.680 5	0.700 3	0.671 4	0.684 5	3.76
硫化镍中镍	0.013 1	0.011 4	0.008 1	0.009 2	0.008 3	0.010 0	0.010 0	19.31
硅酸镍中镍	0.260 3	0.291 4	0.292 2	0.250 7	0.259 4	0.276 8	0.271 8	6.49

2.5　分相加和与总量的比较

用本文建立的化学物相分析方法对红土镍矿平行测定 6 次,计算各相态测定的平均值然后进行加和,并与单独分析的红土镍矿中镍总量进行比较,结果见表 11。根据《地质矿产实验室测试质量管理规范》(DZ/T 0130.3—2006)规定,物相分析总量为 0.2%~3%时,分量总和与单独分析的总量相对偏差允许限不得超过 20%。结果表明,各分相加和与总量的相对偏差(RD)小于 1%,能够满足《地质矿产实验室测试质量管理规范》的要求。

表 11　红土镍矿中各相态镍加和与总镍量的测定结果

Table 11　Determination of sum of nickel in various phases and total nickel in laterite nickel ore

相态	测定值/%
硫酸镍中镍	0.001 0
锰相镍	0.599 6
铁相镍	0.684 5
硫化镍中镍	0.010 0
硅酸镍中镍	0.271 8
总镍	1.560 0
相对偏差(RD)	0.44

2.6　对比实验

采用矿物自动分析仪(MLA)与本文建立的化学物相分析方法对同一红土镍矿样品进行镍物相定量分析,2 种方法的测试结果对比见表 12。由表 12 可知,本文建立的化学物相分析方法与 MLA 法测定的镍物相占比趋势一致,相对偏差均在可接受范围内,表明本文建立的化学物相分析方法准确可靠。

表 12　测试结果比较

Table 12　Comparison of testing results

相态	含量平均值/%	镍物相占比/%	
		化学物相分析法	MLA 法
硫酸镍中镍	0.001 0	0.06	—
锰相镍	0.599 6	38.27	44.98
铁相镍	0.684 5	43.68	35.21
硫化镍中镍	0.010 0	0.64	—
硅酸镍中镍	0.271 8	17.35	19.81

3　结论

1) 采用碳酸钙饱和溶液(20 g/L),室温振荡 5 min 即可高效浸出硫酸镍,浸出率达到 99.9%;以含 10 g/L 亚硫酸钠的 10%乙酸溶液为浸出体系,60 ℃水浴 60 min 浸出锰相镍,浸出效果很好;选用 pH=4.0 的过氧化氢-乙酸铵溶液浸出硫化镍,可有效避免硅酸盐中镍的溶解,解决了传统方法存在的串相问题。

2) 采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)测定各相态镍及总镍含量,实际样品验证结果显示,红土镍矿中各相态镍加和与总镍量的相对偏差小于 1%,该方法与自动矿物分析仪(MLA)测试结果趋势一致,表明方法准确可靠、稳定性良好。

3) 该化学物相分析方法可为红土镍矿资源勘查评价、选冶工艺方案优化提供精准的镍相态数据支撑,兼具重要的理论意义与显著的实际应用价值。

参考文献(References):

[1] 徐刚,段俊,汤中立,等. 镍资源找矿突破与综合开发利用[J]. 中国工程科学, 2024,26(3):86-97.
XU Gang, DUAN Jun, TANG Zhongli, et al. Exploration breakthrough and comprehensive development and utilization of nickel resources[J]. Strategic Study of CAE, 2024,26(3):86-97.

[2] 刘国庆,杨卫严,杨慧兰,等. 红土镍矿富氧侧吹生产镍锍的工艺浅析[J]. 甘肃冶金, 2024,46(5):71-74.
LIU Guoqing, YANG Weiyan, YANG Huilan, et al. Technical analysis of nickel matte production by oxygen-rich side-blowing in laterite nickel ore[J]. Gansu Metallurgy, 2024,46(5):71-74.

[3] 余建文,郭壹泽,王家奇,等. 红土镍矿开发利用研究现状与前景展望[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):142-150.
YU Jianwen, GUO Yize, WANG Jiaqi, et al. Development status and prospects of lateritic nickel ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):142-150.

[4] 武兵强,齐渊洪,周和敏,等. 红土镍矿湿法冶金工艺现状及前景分析[J]. 中国冶金, 2019,29(11):1-5.
WU Bingqiang, QI Yuanhong, ZHOU Hemin, et al. Status and prospect analysis of hydrometallurgical processes of laterite nickel ore[J]. China Metallurgy, 2019,29(11):1-5.

[5] 金建文. 蛇纹石型红土镍矿中镍的赋存特征[J]. 矿冶, 2022,31(6):120-126.
JIN Jianwen. Occurrence characteristics of Ni in serpentine laterite nickel ore[J]. Mining and Metallurgy, 2022,31(6):120-126.

[6] 朱德庆,田宏宇,潘建,等. 低品位红土镍矿综合利用现状及进展[J]. 钢铁研究学报, 2020,32(5):351-362.
ZHU Deqing, TIAN Hongyu, PAN Jian, et al. Comprehensive utilization status and progress of low-grade laterite nickel ore[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020,32(5):351-362.

[7] 符招弟,傅饶,杨炳红. 分相浸出-火焰原子吸收光谱法测定高硫高砷金矿石及选冶物料中金的赋存状态[J]. 冶金分析, 2015,35(11):23-27.
FU Zhaodi, FU Rao, YANG Binghong. Application of phase separation leaching-flame atomic absorption spectrometry to the determination of occurrence state of gold in high-sulfur high-arsenic gold ore and smelting materials[J]. Metallurgical Analysis, 2015,35(11):23-27.

(下转第 155 页)

2) 基于 $L_{25}(5^4)$ 正交试验,在表面活性剂添加量 0.5%、超声频率 100 kHz、超声温度 90 ℃、超声时间 15 min、固液比 1∶9 条件下,石墨分离率高达 95.75%。回收的石墨结构完整、杂质少($I_D/I_G=0.422$);回收的铜箔抗拉强度达 180 ~ 190 MPa,载流子迁移率为 35.68 $cm^2/(V\cdot s)$,电阻率仅为 $2.05\times10^{-6}\ \Omega\cdot cm$,力学性能与导电性能均满足再生利用要求,可直接作为电池集流体或导电部件回用。

3) 表面活性剂协同超声分离工艺可实现废旧锂离子电池负极片中石墨与铜箔的高效分离,最大限度保留石墨与铜箔的结构完整性,可为负极片关键材料的高值化回收提供技术支撑。

参考文献(References):

[1] GAVIN B, ERIKA F. Towards the lithium-ion battery production network: Thinking beyond mineral supply chains[J]. Energy Research & Social Science, 2022,89:102659.

[2] SHAHJALAL M, ROY P K, SHAMS T, et al. A review on second-life of Li-ion batteries: Prospects, challenges, and issues[J]. Energy, 2022,241:122881.

[3] ZHANG W X, XU C J, HE W Z, et al. A review on management of spent lithium ion batteries and strategy for resource recycling of all components from them[J]. Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy, 2018,36(2):99-112.

[4] MORADI B, BOTTE G G. Recycling of graphite anodes for the next generation of lithium ion batteries[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2016,46(2):123-148.

[5] 高凯,赵春宝,冯硕,等. 废旧锂电池负极石墨粉制备石墨烯及其电化学研究[J]. 化学工程师, 2018,32(11):5-7.
GAO Kai, ZHAO Chunbao, FENG Shuo, et al. Preparation and electrochemical properties of graphene from graphite powder of spent lithium-ion batteries[J]. Chemical Engineer, 2018,32(11):5-7.

[6] 詹剑虹,杜志威,张思维,等. 废旧锂离子电池负极石墨闭环回收的基础研究[J]. 电源技术, 2020,44(2):173-175.
ZHAN Jianhong, DU Zhiwei, ZHANG Siwei, et al. Research on closed-loop recovery of graphite in cathode for spent lithium batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020,44(2):173-175.

[7] 毛盼,王吉祥,柏松,等. 熔体超声处理对 Al-Cu-Mg-Ag 合金微观组织和硬度的影响[J]. 矿冶工程, 2024,44(6):139-143.
MAO Pan, WANG Jixiang, BAI Song, et al. Effect of ultrasonic melt treatment on microstructure and hardening of Al-Cu-Mg-Ag alloys[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(6):139-143.

[8] 徐尚睿,柏松,刘志义. 超声处理时间对 Al-Cu-Mg-Ag-Fe-Ni 合金组织和硬度的影响[J]. 矿冶工程, 2025,45(5):176-180.
XU Shangrui, BAI Song, LIU Zhiyi. Effect of ultrasonic melt processing time on microstructures and hardness of Al-Cu-Mg-Ag-Fe-Ni alloys[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(5):176-180.

[9] 刘晓峰,黄自力,肖骁,等. 废旧电池回收过程中磷酸铁渣的提纯[J]. 矿冶工程, 2024,44(2):78-82.
LIU Xiaofeng, HUANG Zili, XIAO Xiao, et al. Purification of iron phosphate waste generated after recycling of spent batteries[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(2):78-82.

[10] DE VITA L, CALLEGARI D, BIANCHI A, et al. A green process for effective direct recycling and reuse of graphite from end-of-life Li-ion batteries black mass[J]. ChemSusChem, 2025,18(17):e202500550.

[11] 张盼阳,王庆福,李谋翠,等. 阴极辊在线抛光工艺对锂电铜箔性能的影响[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):84-89.
ZHANG Panyang, WANG Qingfu, LI Moucui, et al. Effect of online polishing of cathode roller on performance of electrolytic copper foil[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):84-89.

[12] YANG W C, TONG Z, BU X N, et al. Mechanical and ultrasonic pretreatments for efficient peeling of metal foils from spent lithium-ion batteries[J]. ACS Omega, 2025,10(11):11214-11224.

[13] 姬琳,樊斌锋,王庆福,等. 聚醚类添加剂在 5 μm 极薄电解铜箔制备中的影响[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):72-74.
JI Lin, FAN Binfeng, WANG Qingfu, et al. Effect of polyether additives in preparation of ultra-thin electrolytic copper foil (5 μm)[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):72-74.

引用本文:郑志强,杨义升,徐子芳,等. 表面活性剂协同超声分离废旧锂离子电池负极片中石墨与铜箔工艺研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):150-155.
ZHENG Zhiqiang, YANG Yisheng, XU Zifang, et al. Surfactant-assisted ultrasonic separation process for copper foil and graphite in anode sheets of spent lithium-ion batteries[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):150-155.

(上接第 149 页)

[8] 金绍祥. 化学物相分析法测定瓮福磷尾矿中钙镁磷元素形态含量[J]. 岩矿测试, 2011,30(3):357-360.
JIN Shaoxiang. Determination of occurrence states of calcium, magnesium, phosphorus in Wengfu phosphorus tailings by chemical phase analysis[J]. Rock and Mineral Analysis, 2011,30(3):357-360.

[9] 青海省市场监督管理局. 镍矿石物相分析规程:DB63/T 1728—2019[S]. 西宁:青海省市场监督管理局, 2019.
Qinghai administration for market regulation. Code for phase analysis of nickelores: DB63/T 1728—2019 [S]. Xining: Qinghai Administration for Market Regulation, 2019.

[10] 《岩石矿物分析》编委会. 岩石矿物分析第 3 分册[M]. 北京:地质出版社, 2011.
Editorial board of rock and mineral analysis. Rock and mineral analysis part 3[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.

引用本文:漆欢,李志辉,卢美玲,等. 电感耦合等离子体发射光谱法测定红土镍矿中镍物相的研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):145-149.
QI Huan, LI Zhihui, LU Meiling, et al. Chemical phase analysis of nickel in laterite nickel ore by inductively coupled plasma emission spectroscopy[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):145-149.