

试验研究

引文格式:杨翠霞,肖发新,刘骥鹏,等.褐铁型红土镍矿硫酸焙烧过程中铁物相转化机制研究[J].中国有色冶金,2026,55(2):138-147.

YANG Cuixia, XIAO Faxin, LIU Jipeng, et al. Transformation mechanism of iron phases in sulfation roasting process of limonitic lateritic nickel ore[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(2): 138-147.

褐铁型红土镍矿硫酸焙烧过程中铁物相转化机制研究

杨翠霞¹, 肖发新^{1,2}, 刘骥鹏¹, 张向军², 施善林³, 孙树臣^{1,2}, 涂赣峰^{1,2}

(1. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中国有色创新研究院(天津)有限公司, 天津 300380;

3. 沈阳有色金属研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110141)

[摘 要] 采用硫酸化焙烧-水浸工艺提取褐铁型红土镍矿中镍、钴时,镍、钴的选择性浸出对后续的萃取分离工序影响重大,现有文献对铁物相转化机制及转化效率缺乏探究。本研究以缅甸褐铁型红土镍矿为原料,采用浓硫酸熟化焙烧-常压水浸工艺选择性提取镍、钴,通过单因素试验优化了焙烧条件,并结合热力学分析及原料和不同温度下过程产物的表征分析探究铁物相转化机制,得出以下主要结论。最佳焙烧工艺条件为硫酸浓度90%、硫酸与原料质量比0.7:1、温度650℃、时间30 min,在此条件下铁、钴、镍浸出率分别为20.06%、84.33%、78.15%,实现了铁与钴镍的初步分离;焙烧渣表征分析表明,当硫酸焙烧温度为300℃时,针铁矿、蛇纹石、白云石、铬铁矿及滑石转化成相应的硫酸盐,由于浓硫酸破坏了原本铁的矿物结构,使晶格中的钴、镍元素释放出来与浓硫酸反应生成硫酸钴和硫酸镍;650℃下 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 进一步转化为不溶于水的 Fe_2O_3 ,在随后的水浸过程中保留在渣中,从而实现了镍钴的选择性浸出,硫酸铁分解转化效果决定着镍钴选择性浸出效率。本试验中铁浸出率依然高达20.06%,后续可采用流态化焙烧或者使物料处于翻滚状态来强化铁物相的转化,降低铁浸出率。

[关键词] 褐铁型红土镍矿; 硫酸焙烧; 铁物相转化机制; 硫酸铁分解; 选择性浸出; 镍、钴提取

[中图分类号] TF815; TF801 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2026)02-0138-10

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.02.015

0 引言

镍是一种银白色金属(密度 8.9 g/cm^3 ,熔点 1455°C)^[1,2],具有良好的磁性、延展性、导电导热性及耐腐蚀性能,广泛应用于不锈钢(占消费60%)、动

力电池(三元材料)、电镀、军工及航空航天领域^[3-5]。我国是镍生产和消费大国,2013—2022年原镍消费量从75万t增至165万t,年均增速8%,近年来因新能源车爆发及不锈钢产业扩张,镍的需求更是持续爆发。全球镍资源60%来自氧化矿(红土镍矿),40%为硫化矿^[6],深海锰结核亦含丰富镍、钴资源,开发潜力巨大但受技术制约^[7-9]。

随着硫化镍矿枯竭,红土镍矿成为镍钴提取的重要原料。红土镍矿按成分可分为褐铁矿型(高铁低镍)、硅镁镍矿型(高硅镁镍)及过渡型^[10,11],其处理工艺选择取决于矿石成分,其中硅镁镍矿型矿石

[收稿日期] 2025-09-20 [修订日期] 2025-10-24

[录用日期] 2025-10-29 [出版日期] 2026-04-01

[第一作者] 杨翠霞(1998—),女,硕士研究生,主要研究方向为湿法冶金。

[通信作者] 肖发新(1980—),副教授,主要研究方向为有色金属冶金、固废资源化、纳米材料。

[基金项目] 国家重点研发计划(2020YFC1909003)。

适合火法处理,典型工艺包括电炉熔炼^[12](主流镍铁工艺)和镍硫工艺^[13-15],但能耗高、钴回收率低。褐铁矿型矿石适合湿法冶金,主流技术如高压酸浸^[16](HPAL),但需高温高压操作,对生产设备和操作人员技术水平要求很高。硫酸化焙烧-水浸工艺^[17]则是火法-湿法联合处置工艺,核心机制是红土镍矿与浓硫酸在高温下反应,破坏矿物晶格结构,将镍、钴转化为可溶性硫酸盐,而铁、铝形成难溶氧化物。相比现有的 HPAL 工艺,该工艺无需高压操作,操作简便。

裴彦林等^[18]针对褐铁型红土镍矿开展硫酸熟化-水浸研究,并在硫酸焙烧过程加入氟化钠来促进矿料熟化并常压水浸,在焙烧温度 450℃、硫酸用量 50%、加水 20%、NaF 用量 4% 的条件下, Ni、Co、Fe 浸出率分别为 78.1%、91.1%、9.6%,但 NaF 的加入在试验过程中产生剧毒物质氟化氢气体。石剑锋等^[19]对硅镁型红土镍矿采用硫酸氢铵焙烧,在焙烧温度 300℃、时间 90 min 条件下,镍钴提取率分别为 95% 和 96%,但铁的提取率高达 79%。汪云华等^[20]采用两段硫酸化焙烧-水浸工艺回收镍钴,适宜焙烧条件为酸料比 0.6、一段焙烧温度 250℃、时间 60 min、二段焙烧温度 650℃、时间 3 h,水浸后得到镍钴浸出率分别为 93.38% 和 91.95%。邱沙等^[21]将红土镍矿硫酸化焙烧后水浸处理,在焙烧温度 250℃、时间 2.5 h、水浸温度 60℃、水浸时间 1 h、液

固比 8:1、酸料比 0.5:1(mL/g)的条件下,镍浸出率为 76.27%,钴浸出率仅为 55.88%。上述研究目的均在于取得较好的镍、钴浸出率,对铁物相转化机制及转化效率缺乏探究,本研究采用硫酸化焙烧-水浸工艺处理褐铁型红土镍矿,重点分析铁物相转化机制,以期对该类红土镍矿中铁与镍、钴资源的分离提供参考。

1 试验介绍

1.1 原料及试剂

本试验原料来自缅甸的褐铁矿型红土镍矿,采用球磨机磨至细度-0.074 mm 占 70%,在 110℃ 下干燥 24 h,成分分析见表 1。试验用浓硫酸(98%,分析纯)来自于天津大茂试剂公司。

由表 1 可知,红土镍矿中主要成分为 Fe、Al、Si、Ca,属于典型的褐铁型红土镍矿,而镍钴的含量相对较低,对红土镍矿中的铁、钴、镍定量分析,得到其含量分别为 40.9%、0.13%、0.80%,样品物相见图 1,XRD 结果表明该矿石主要包括针铁矿、蛇纹石、白云石、磁铁矿、铬铁矿、镍蛇纹石和滑石等矿物。图 1 中,钴的衍射峰在图中较为微弱,可能有两个原因:一方面,样品中钴的含量极低,导致其相关矿物的衍射信号很弱;另一方面,钴可能以晶格替代的方式存在于铁矿物中,而并未形成独立的钴矿物。

表 1 红土镍矿化学组分 XRF 半定量分析(质量分数)

Table. 1 Semi-quantitative analysis of chemical composition of lateritic nickel ore by XRF (mass fraction) %

成分	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Ca	Cr ₂ O ₃	MgO	MnO	NiO
含量	71.56	7.03	7.02	6.330	2.50	1.86	1.31	1.29
成分	SO ₃	Co ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	ZnO	P ₂ O ₅	ZrO ₂	CuO
含量	0.52	0.20	0.14	0.10	0.04	0.02	0.02	0.18

样品微观形貌表征见图 2。从图 2(a)红土镍矿形貌图中可看出,磨细之后红土镍矿呈现颗粒状,部分呈现球状。从图 2(b)红土镍矿的面扫描图像中能发现, Si、O 和 Mg 元素的分布重合度高,因此推测原矿石中含有滑石(Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂)或蛇纹石(Mg₃Si₂O₅(OH)₄)。Fe 与 O 元素分布重合度较高,但是与 Si 和 Mg 元素的分布重合度低。因此推测红土镍矿中 Fe 元素主要以针铁矿或铁的氧化物形式存在。

1.2 试验步骤

称取 10 g 红土镍矿样品加入坩埚中,加入一定浓度的浓硫酸搅拌熟化 24 h,然后加入到马弗炉中,在一定温度下焙烧一段时间。焙烧结束后,使用研钵将焙烧渣磨细,随后称量、装袋。称取上述焙烧渣,按照液固比 5:1 加入水,在 60℃ 下浸出 2 h,反应结束后过滤并水洗,滤渣在 100℃ 下烘干 3 h 称重。

1.3 分析及计算方法

采用 XRF(ZSXPrimus 日本理学公司)半定量分析原料样品的化学成分,通过 ICP(AVIO500, PE)

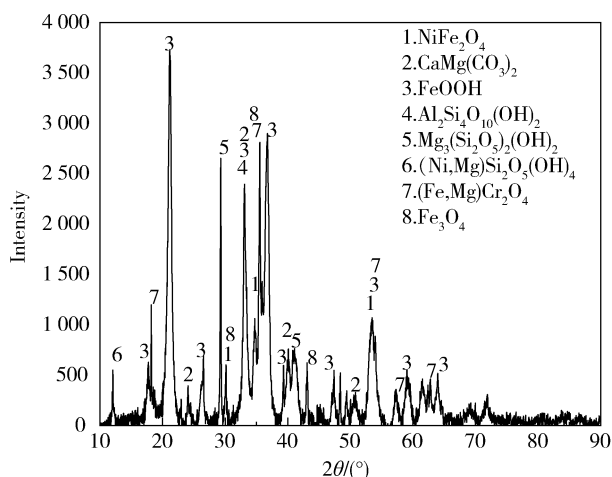


图1 褐铁型红土镍矿 XRD 图谱

Fig. 1 XRD of lateritic nickel ore

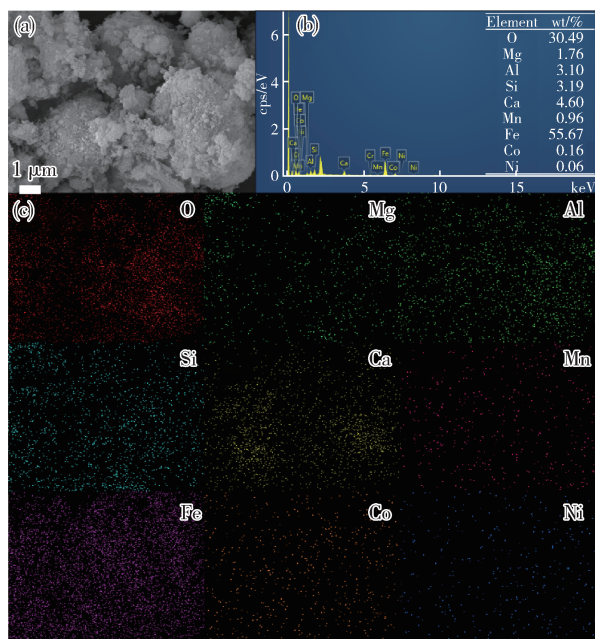


图2 红土镍矿形貌图

Fig. 2 Morphology of lateritic nickel ore

精确测量浸出渣和浸出液的化学成分,红土镍矿原料及焙烧渣的物相通过XRD(德国布鲁克,D8 ADVANCE)进行分析,并采用SEM-EDS对样品微观形貌进行研究。

通过分析得到Ni、Co元素含量,利用式(1)计算回收率。

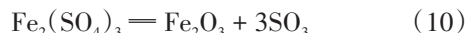
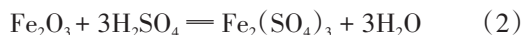
$$\text{回收率}(\%) = \frac{\text{原料中元素含量}(\text{g}) - \text{渣中元素含量}(\text{g})}{\text{原料中元素含量}(\text{g})} \times 100\%$$

(1)

2 试验结果与讨论

2.1 热力学分析

焙烧时可能发生的化学反应见式(2)~(10)。红土镍矿硫酸化过程中生成的硫酸盐分解会生成对应的金属氧化物,理想的情况是铁的硫酸盐完全分解生成氧化物,而Ni、Co的硫酸盐在熟化温度下不分解,仍以NiSO₄、CoSO₄的形式存在,后续水浸时,目标有价金属Ni、Co进入溶液,而Fe₂O₃则不溶于水。



采用HSC 6.0对焙烧反应热力学进行计算,对反应(2)~(10)的吉布斯自由能进行计算,结果如图3所示。从图3中可知,相比钴、镍的矿物,铁的矿物更加容易与浓硫酸发生反应。因此,为使钴、镍的矿物完全硫酸化,在焙烧时需要加入适当过量的浓硫酸。反应(7)在400℃时的吉布斯自由能低于0,这时浓硫酸开始分解产生SO₃。高于600℃时,硫酸铁分解的吉布斯自由能会低于硫酸钴和硫酸镍分解的吉布斯自由能。此时,硫酸铁相比硫酸钴和硫

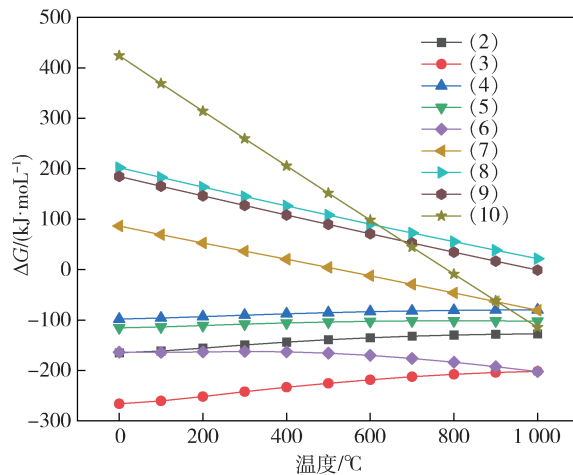


图3 方程式(2)到(10)的吉布斯自由能

Fig. 3 Gibbs free energy of equations (2) to (10)

酸镍会更容易分解。这为后续常压水浸的选择性提取钴镍提供了热力学依据。

2.2 工艺条件优化

采用单因素试验考察焙烧阶段硫酸浓度、焙烧温度、焙烧时间、硫酸用量对镍、钴、铁浸出率的影响,结果如图4所示。

在焙烧温度 200℃、硫酸用量为原矿质量的 0.7

倍、焙烧时间 1 h 的条件下,考察硫酸浓度对镍、铁、钴浸出率的影响,结果见图 4(a)。由图可知,随着硫酸浓度的升高,钴、镍的浸出率不断提高,硫酸浓度为 90% 时,钴、镍的浸出率分别达到了 77.24% 和 60.35%,但非目标元素铁的浸出率也达到了 43.28%。当硫酸浓度超过 90% 时,铁、钴、镍的浸出率都出现了不同程度的下降,适宜的硫酸浓度为 90%。

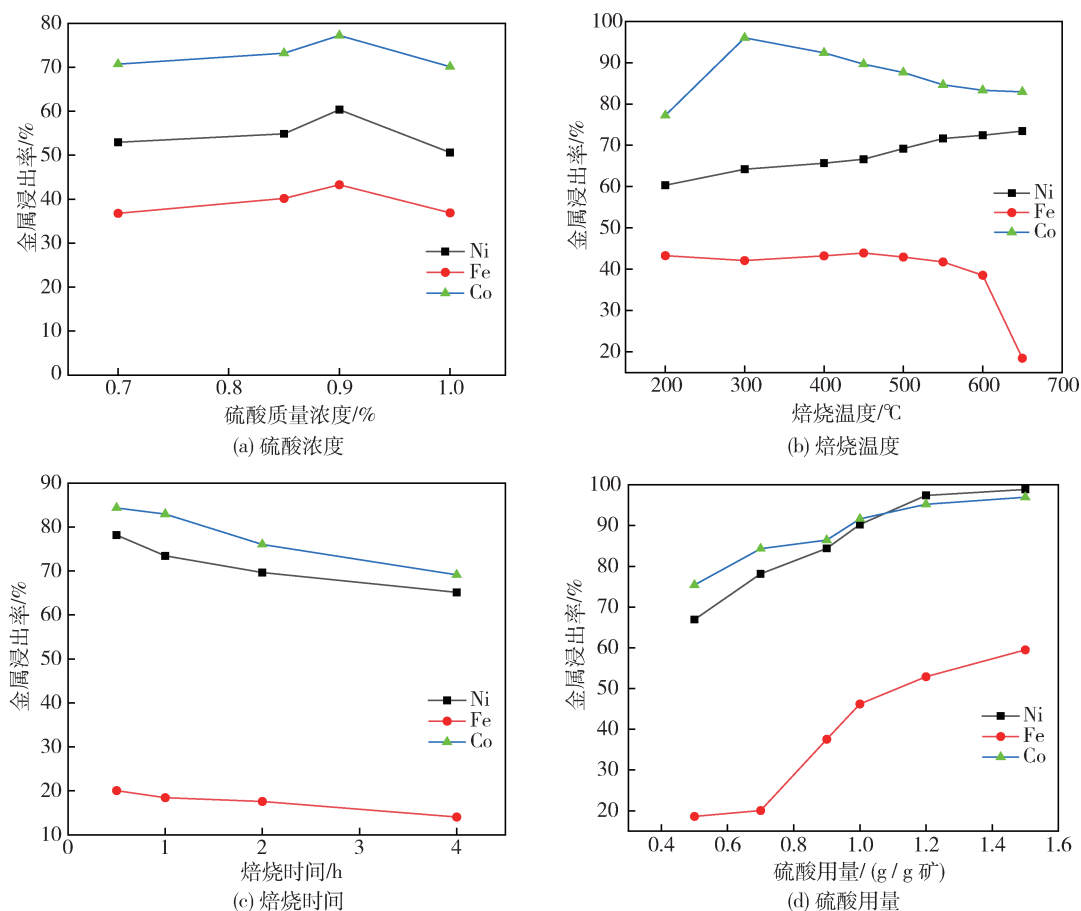


图4 各焙烧工艺条件对镍钴铁浸出率的影响

Fig. 4 Effects of various roasting process conditions on the leaching rates of nickel, cobalt and iron

在硫酸浓度 90%、硫酸用量为原矿质量的 0.7 倍、焙烧时间 1 h 的条件下,考察焙烧温度对镍、铁、钴浸出率的影响,结果见图 4(b)。由图可知,温度低于 550℃ 时,铁浸出率基本保持不变,升温到 600℃ 时,浸出率骤然减小至 18.45%。查阅文献后发现硫酸铁的分解温度在 700℃ 左右,因此 600℃ 可能已经有部分 FeSO_4 分解成了 Fe_2O_3 , 而 Fe_2O_3 不溶于水,因此浸出率降低。镍浸出率随着温度增加而不断升高,最高达到了 73.46%。低于 300℃ 时,钴浸出率随温度增加不断升高,300℃ 时达到 96.03%,随后

不断降低。综合考虑,适宜的焙烧温度为 650℃。

在硫酸浓度 90%、硫酸用量为原矿质量的 0.7 倍、焙烧温度 650℃ 的条件下,考察焙烧时间对镍、铁、钴浸出率的影响,结果见图 4(c)。由图可知,焙烧 30 min 时,铁、钴、镍的浸出率都达到最高值,分别为 20.06%、84.33%、78.15%。随着焙烧时间的延长,铁、钴、镍的浸出率均不断下降。可能原因是过长的焙烧时间会使已生成的硫酸盐发生进一步分解或物相转化,生成难溶于水的氧化物,从而导致浸出率下降。焙烧时间为 4 h 时铁钴镍的浸出率

到达了最小值,分别为14.06%、69.12%、65.15%。适宜的焙烧时间为30 min。

在硫酸浓度90%、焙烧温度650℃、焙烧时间0.5 h的条件下,考察硫酸用量对镍、铁、钴浸出率的影响,结果见图4(d)。由图可知,随着硫酸用量的增加,铁、钴、镍的浸出率均呈上升趋势,其中镍、钴元素浸出率的增加趋势相一致,但当硫酸用量大于7 g/10 g红土镍矿时,铁浸出率的图像斜率出现较大变化。其原因可以用式(2)–(3)的反应方程式来解释,随着硫酸的过量加入,由针铁矿转变来的 Fe_2O_3 与过量硫酸反应,生成可溶性 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$;而镍浸出率保持固有上升态势。可见,硫酸用量过高之后,大量Fe元素进入溶液,但Ni、Co的浸出率提高不明

显,不利于后续Ni、Co与Fe的分离,因此在实际生产中应该控制硫酸用量,适宜的 $m_{\text{H}_2\text{SO}_4}:m_{\text{原料}}=0.7:1$ 。

综上所述,本研究提出的硫酸焙烧–水浸试验的适宜工艺条件为硫酸浓度90%、 $m_{\text{H}_2\text{SO}_4}:m_{\text{原料}}=0.7:1$ 、温度650℃、时间30 min,该条件下称取10 g原料进行焙烧,得到12.48 g焙烧渣,经水浸后得到5.38 g浸出渣,滤液成分见表2,元素平衡见表3。

表2 浸出液主要成分

Table 2 The main components of the leaching solution g/L

成分	Ni	Fe	Co	Al	Ca	Mg	Mn
含量	0.347	4.59	0.061	0.45	0.142	1.62	0.165

表3 主要元素平衡表

Table3 Balance sheet of main elements

原料质量	Fe 含量	Co 含量	Ni 含量	Fe 质量	Co 质量	Ni 质量
10 g	40.90%	0.13%	0.80%	4.09 g	0.013 g	0.08 g
浸出渣质量	Fe 含量	Co 含量	Ni 含量	Fe 质量	Co 质量	Ni 质量
5.38 g	60.829%	0.037 9%	0.325%	3.273 g	0.002 g	0.017 5 g
浸出液体积	Fe 含量	Co 含量	Ni 含量	Fe 质量	Co 质量	Ni 质量
180 mL	4.59 g/L	0.061 g/L	0.347 g/L	0.826 2 g	0.010 98 g	0.062 46 g
铁总质量	钴总质量	镍总质量	金属平衡	铁	钴	镍
4.098 79 g	0.013 02 g	0.079 96 g		100.21 %	100.15 %	99.95%

根据表3结果进行计算,渣计浸出率和液计浸出率基本相当,且铁、钴、镍金属基本平衡。相对于原料中Fe/Ni质量比51.13、Fe/Co质量比314.62,浸出液中Fe/Ni和Fe/Co质量比大幅降低,分别为12.94、72.77,实现了镍钴的初步富集和Ni和Co的初步选择性浸出,但该研究结果有待进一步完善。

3 焙烧机理分析

红土镍矿与浓硫酸发生放热的熟化反应,温度可达350℃以上,破坏矿物晶体结构并生成金属硫酸盐。吉布斯自由能计算表明,铁氧化物比镍、钴矿物更易与硫酸反应,因此需过量酸($m_{\text{H}_2\text{SO}_4}:m_{\text{原料}}=0.7:1$)以确保镍、钴完全硫酸化。随着焙烧温度升高,600℃时铁硫酸盐开始分解为 Fe_2O_3 和 SO_3 ,导致铁浸出率下降而镍、钴浸出率略有上升;至650℃时,镍、钴硫酸盐仍未分解($\Delta G>0$),而铁硫酸盐进一步转化为不溶于水的 Fe_2O_3 留在渣相,从而实现铁与

镍、钴的有效分离^[22]。因此,通过分析300℃(硫酸盐形成阶段)与650℃(铁氧化物生成阶段)焙烧渣的成分与物相变化,可清晰揭示选择性浸出的机理。

3.1 300℃及650℃焙烧渣成分分析

300℃及650℃焙烧渣化学组分分别见表4和表5。

由表4和表5与表1对比可知经过硫酸化焙烧后,硫的含量显著增加,显然在硫酸化过程中Fe、Al、Ca、Cr、Mg、Ni、Co等元素与浓硫酸发生反应,生成了相应的硫酸盐。

3.2 300℃及650℃焙烧渣物相分析

对300℃和650℃下焙烧渣分别进行XRD测试,结果见图5和图6。

对比图5和图6后可以发现,300℃下焙烧渣物相主要为赤铁矿、磁铁矿、石英、硫酸铁、硫酸钙、硫酸镁;同比原料的物相可知,原料中主要物相针铁

表 4 300℃焙烧渣的化学组分 XRF 半定量分析(质量分数)

Table 4 Semi-quantitative XRF analysis of the chemical composition of the calcined residue at 300℃
(mass fraction) %

成分	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Cr ₂ O ₃	MgO	MnO	NiO
含量	50.68	5.34	5.96	4.07	1.89	1.73	0.92	1.01
成分	SO ₃	Co ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	ZnO	CuO	ZrO ₂	Na ₂ O
含量	28.00	0.15	0.09	0.09	0.04	0.016	0.012	0.00

表 5 650℃焙烧渣的化学组分 XRF 半定量分析(质量分数)

Table 5 Semi-quantitative XRF analysis of the chemical composition of the calcined residue at 650℃
(mass fraction) %

成分	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Cr ₂ O ₃	MgO	MnO	NiO
含量	49.79	5.35	6.19	4.14	1.73	1.60	0.91	0.98
成分	SO ₃	Co ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	ZnO	P ₂ O ₅	ZrO ₂	Na ₂ O
含量	28.87	0.15	0.07	0.1	0.04	0.01	0.016	0.00

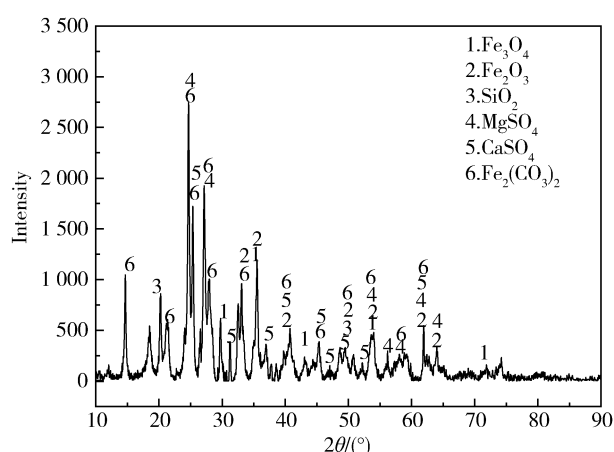


图 5 300℃焙烧渣 XRD 图谱

Fig. 5 XRD pattern of roasted residue at 300℃

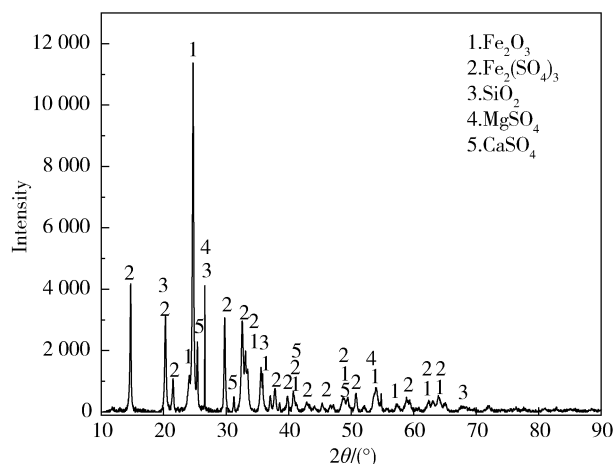


图 6 650℃焙烧渣 XRD 图谱

Fig. 6 XRD pattern of roasted residue at 650℃

矿、蛇纹石、白云石、铬铁矿及滑石的物相消失,表明在 300℃下就可把这些矿相转化成相应的硫酸盐;进一步升温至 650℃,硫酸铁的特征峰显著变弱(在整个物相中的占比降低),推测有部分硫酸铁在 650℃的高温下分解为 Fe₂O₃。

图 7 为水浸渣 XRD 分析图谱结果。从图 7 可以看出,浸出渣主要物质铁以 Fe₂O₃ 和 Fe₃O₄ 的形式存在,其中 Fe₂O₃ 主要来自于 Fe₂(SO₄)₃ 的分解。SiO₂ 在硫酸化时不与硫酸反应,也不溶于水,存在于浸出渣中。与图 1 原矿的 XRD 图谱对比,针铁矿、蛇纹石、白云石、铬铁矿、镍蛇纹石和滑石等矿物均已不见,进一步说明了本研究实现了镍钴的初步选择性浸出。

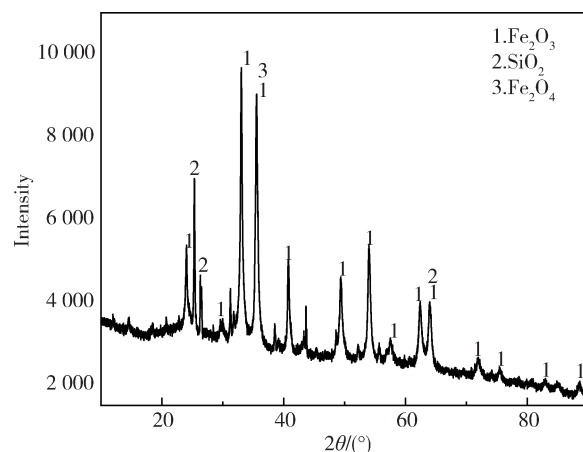


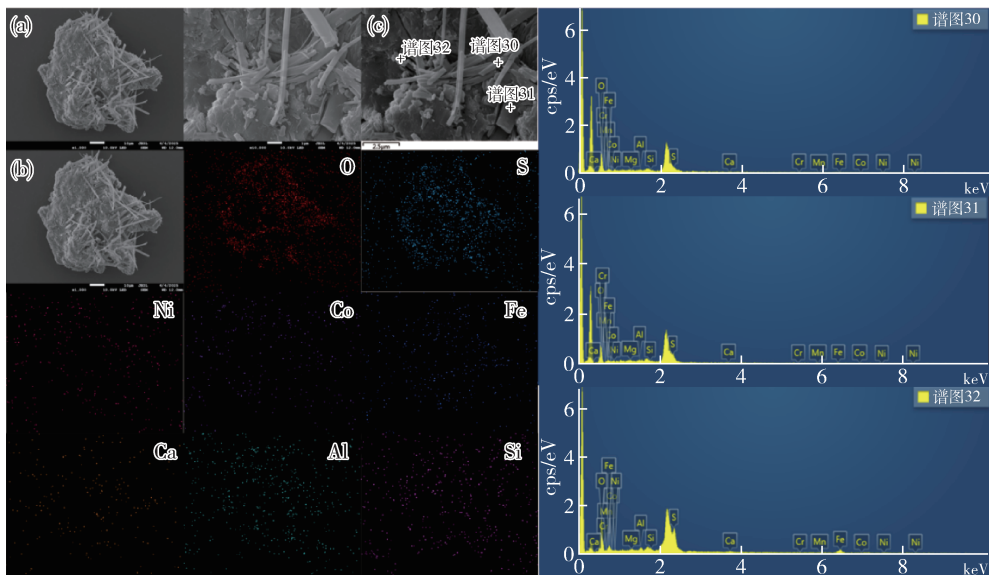
图 7 浸出渣 XRD 图谱

Fig. 7 XRD pattern of leaching residue

3.3 300℃及650℃条件下的焙烧渣扫描电镜-能谱分析

对300℃和650℃下焙烧渣分别进行SEM-EDS

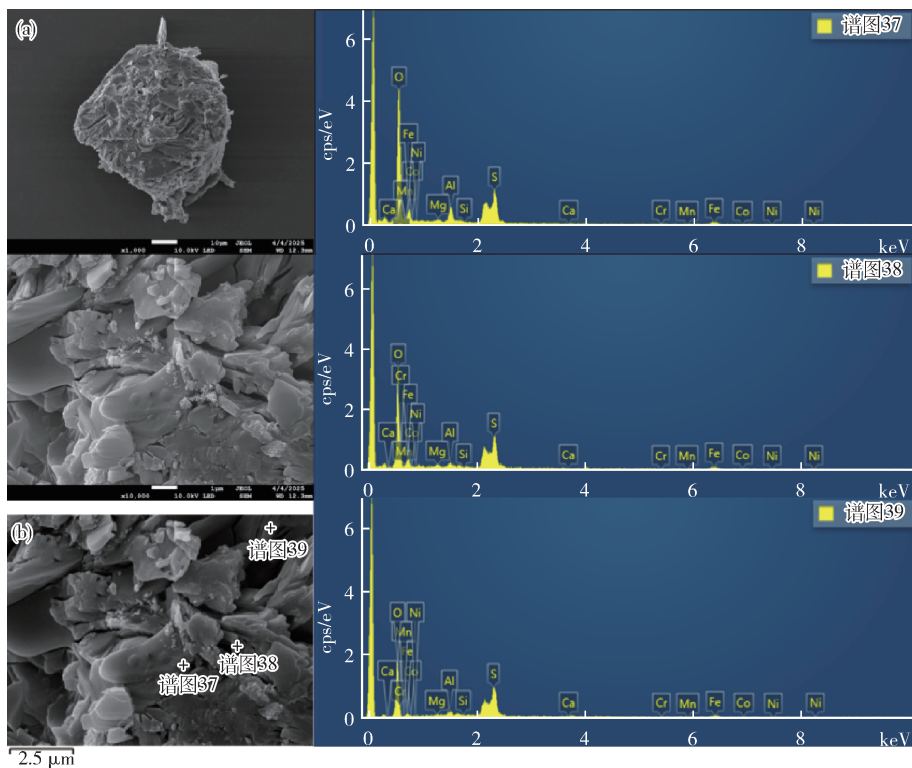
测试,结果如图8和图9。对比图8和图9的焙烧渣形貌图(a):在300℃下进行硫酸化焙烧得到的焙烧渣有许多球状、颗粒状的结晶体;650℃下的



(a)300℃焙烧渣形貌图;(b)焙烧渣面扫描图像;(c)300℃焙烧渣点扫描图像

图8 300℃条件下烧渣扫描电镜-能谱分析

Fig. 8 SEM-EDS analysis of the roasted residue at 300℃



(a)650℃焙烧渣形貌图;(b)650℃焙烧渣点扫描图像

图9 650℃焙烧渣扫描电镜-能谱分析

Fig. 9 SEM-EDS analysis of the roasted residue at 650℃

焙烧渣则相对平整,没有球状、颗粒状的结晶,结晶沿着粉末之间的空隙析出。结合EDS分析,白色的区域为硫酸铁的结晶。因此可以推测,经过硫酸转化焙烧,Fe、Al、Ca、Cr、Mg、Ni、Co等矿物中的主要元素与浓硫酸发生反应生成了相应的硫酸盐。

综上所述,褐铁型红土镍矿经浓硫酸熟化后在300℃下焙烧,其原有主要物相针铁矿、蛇纹石、白云石、铬铁矿及滑石转化成相应的硫酸盐;进一步升温至650℃,部分硫酸铁在650℃的高温下分解为了 Fe_2O_3 。在硫酸转化的过程中,浓硫酸破坏了原本铁的矿物结构,使晶格中的钴、镍元素释放出来与浓硫酸反应生成硫酸钴和硫酸镍,实现了镍钴铁的选择性浸出。Fe物相在焙烧过程中的转化效果是实现镍钴选择性浸出的关键,其与硫酸用量、焙烧温度、焙烧时间、焙烧方式等均有关,强化红土镍矿焙烧将是实现这一目标的途径,可采用流态化焙烧或者使物料处于翻滚状态强化Fe物相的转化,以降低铁的浸出率。

4 结论

本研究以缅甸褐铁矿型红土镍矿为原料,采用浓硫酸熟化焙烧-常压水浸工艺选择性提取镍、钴,通过试验优化工艺条件,并结合热力学分析及原料和不同温度下过程产物的表征分析探究铁物相转化机制,得出以下主要结论。

1)最佳焙烧工艺条件为硫酸浓度90%、焙烧温度650℃、 $m_{\text{H}_2\text{SO}_4}:m_{\text{原料}}=0.7:1$ 、温度650℃、时间30 min,在此条件下铁、钴、镍的浸出率分别为20.06%、84.33%、78.15%,铁与钴镍分离效果显著。

2)在褐铁型红土镍矿硫酸焙烧过程中,铁矿物相转化的两个温度节点分别为300℃和650℃左右,原有主要物相针铁矿、蛇纹石、白云石、铬铁矿及滑石在300℃左右转化成相应的硫酸盐,镍钴也转化为相应的硫酸盐,并在随后的水浸中进入溶液; $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 在650℃左右分解成不溶于水的 Fe_2O_3 ,此条件是实现镍、钴选择性浸出的关键。

3)本研究初步实现了镍、钴的选择性浸出,但铁浸出率依然高达20.06%,后续可采用流态化焙烧或者使物料处于翻滚状态来强化铁物相的转化,降低铁浸出率。

[参考文献]

- [1] 邱竹贤. 有色金属冶金学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988: 153-176.
QIU Zhuxian. Metallurgy of nonferrous metals [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press. 1988: 153-176.
- [2] 李栋, 郭学益. 低品位镍红土矿湿法冶金提取基础理论及工艺研究[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2015.
LI Dong, GUO Xueyi. Basic theory and process research on hydrometallurgical extraction of nickel from low-grade nickel laterite ore [M]. Changsha: Central South University Press. 2015.
- [3] 张友平, 周渝生, 李肇毅, 等. 红土矿资源特点和火法冶金工艺分析[J]. 铁合金, 2007(6): 18-21, 40.
ZHANG Youping, ZHOU Yusheng, LI Zhaoyi, et al. Analysis of the resource characteristics of laterite ores and pyrometallurgical processes [J]. Ferroalloy. 2007(6): 18-21, 40.
- [4] 刘岩, 翟玉春, 王虹. 镍生产工艺研究进展 [J]. 材料导报, 2006(3): 79-81, 96.
LIU Yan, ZHAI Yuchun, WANG Hong. Research on production process of nickel [J]. Materials Reports, 2006(3): 79-81, 96.
- [5] MESHRAM P, Abhilash, PANDEY B D. Advanced review on extraction of nickel from primary and secondary sources [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2019, 40 (3): 157-193.
- [6] KEMPTHORNE D, MYERS D M. Mineral commodity summaries 2010 [R]. Washington: US Geological Survey, 2010: 108-109.
- [7] MUDD G M. Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites [J]. Ore Geology reviews, 2010, 38(1-2): 9-26.
- [8] BAHFIE F, MANAF A, ASTUTI W, et al. From nickel ore to Ni nanoparin the extraction process: properties and application [J]. Progress in Physics of Metals, 2023, 24(1): 173-196.
- [9] ASADROKHT M, ZAKERI A. Chemo-physical concentration of a low-grade nickel laterite ore [J]. Minerals Engineering, 2022, 178: 107398.
- [10] 王瑞江, 聂凤军, 严铁雄. 红土型镍矿床找矿勘查与开发利用新进展 [J]. 地质评论, 2008, 54(2): 215-224.
WANG Ruijiang, NIE Fengjun, YAN Tiexiong. New achievements of mineral exploration and utilization of the laterite nickel deposits [J]. Geological Review, 2008, 54 (2): 215-224.
- [11] KANAZAWA Y, KAMITANI M. Rare earth minerals and resources in the world [J]. Journal of Alloy & Compounds. 2006, 408-412: 1339-1343.
- [12] THUBAKGALE C K, MBAYA R K K, KABONGO K. A study of atmospheric acid leaching of a south african nickel laterite [J]. Minerals Engineering, 2013, 54: 79-81.
- [13] LYU Xuewei, BAI Chengguang, HE Shengping. Mineral change of philippine and indonesia nickel lateritic ore during sintering and mineralogy of their sinter [J]. ISIJ International,

- 2010, 3(50): 380–385.
- [14] 孙余一, 何艳明, 王扬. 浅谈镍铁生产工艺的研究及设计进展[J]. 有色金属设计, 2008(2): 7–13.
SUN Yuyi, HE Yanming, WANG Yang. An elementary introduction on ferronickel technical process [J]. Nonferrous Metals Design, 2008(2): 7–13.
- [15] 一种干红土型镍矿熔池熔炼生产镍钨的方法[J]. 中国有色冶金, 2013, 42(5): 106.
A method for producing nickel matte from dry lateritic nickel ores by melt pool smelting [J]. Chinese Nonferrous Metallurgy, 2013, 42(5): 106.
- [16] ONAL Mehmet Ali Recai, TOPKAYA Vavuz Ali. Pressure acid leaching of Çaldağ lateritic nickel ore: an alternative to heap leaching[J]. Hydrometallurgy, 2014, 142: 98–107.
- [17] 徐郭莉, 徐小锋, 李冲, 等. 红土镍矿浸出渣还原焙烧-还原熔炼试验研究[J]. 绿色矿冶, 2025, 41(3): 6–13.
XU Guoli, XU Xiaofeng, LI Chong, et al. Experimental study on reduction roasting-reduction smelting of leaching residue of laterite nickel ore [J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(3): 6–13.
- [18] 裴彦林. 褐铁型红土镍矿硫酸熟化-水浸镍钴过程及其机理研究[D]. 昆明理工大学, 2016.
PEI Yanlin. Study on the process and mechanism of sulfuric acid calcination and water leaching of nickel and cobalt from goethite-type lateritic nickel ores [D]. Kunming University of Science and Technology, 2016.
- [19] 石剑锋, 王志兴, 胡启阳, 等. 硫酸氢铵硫酸化焙烧法红土镍矿提取镍钴[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(2): 510–515.
SHI Jiangfeng, WANG Zhixing, HU Qiyang, et al. Recovery of nickel and cobalt from nickel laterite ore by sulfation roasting method using ammonium bisulfate [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(2): 510–515.
- [20] 汪云华, 董海刚, 范兴祥, 等. 两段硫酸化焙烧-水浸从红土镍矿中回收镍钴[J]. 有色金属(冶炼部分), 2012(2): 16–18.
WANG Yunhua, DONG Haigang, FAN Xingxiang, et al. Recovery of Ni and Co from nickel laterite with two stages sulphation roasting-water leaching process [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2012(2): 16–18.
- [21] 邱沙, 车小奎, 郑其, 等. 红土镍矿硫酸化焙烧-水浸实验研究[J]. 稀有金属, 2010, 34(3): 406–412.
QIU Sha, CHE Xiaokui, ZHENG Qi, et al. Experimental study on laterite-nickel ore with sulfating roasting-water immersion methods [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2010, 34(3): 406–412.
- [22] ROMERO Johanna M, PARRA Yuleisy S. Improving the rotary kiln-electric furnace process for ferronickel production: data analytics-based assessment of dust insufflation into the rotary kiln flame[J]. Alexandria Engineering, 2022, 61: 3215–3228.

Transformation mechanism of iron phases in sulfation roasting process of limonitic lateritic nickel ore

YANG Cuixia¹, XIAO Faxin^{1,2}, LIU Jipeng¹, ZHANG Xiangjun², SHI Shanlin³, SUN Shuchen^{1,2}, TU Ganfeng^{1,2}

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang, 110819, China;

2. China Nonferrous Metal Innovation Research Institute (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300380, China;

3. CNMC Shenyang Research institute of Nonferrous Metals Co., Ltd., Shenyang 110141, China)

Abstract: During the extraction of nickel and cobalt from limonitic laterite nickel ore using the sulfation roasting-water leaching process, the selective leaching of nickel and cobalt significantly affects subsequent extraction separation. However, the phase transformation mechanism of iron and its conversion efficiency have been insufficiently investigated in existing literature. In this study, a limonitic laterite nickel ore from Myanmar was treated by a concentrated sulfuric acid curing-roasting followed by atmospheric water leaching to selectively extract nickel and cobalt. The roasting conditions were optimized through single-factor experiments. Combined with thermodynamic analysis and characterization of the raw material and process intermediates obtained at different temperatures, the phase transformation mechanism of iron was elucidated. The main conclusions are as follows. The optimal roasting conditions were determined as: sulfuric acid concentration of 90%, sulfuric acid-to-ore mass ratio of 0.7:1, roasting temperature of 650°C, and roasting time of 30 min. Under these conditions, the leaching rates of iron, cobalt, and nickel were 20.06%, 84.33%, and 78.15%, respectively, achieving preliminary separation of iron from cobalt and nickel. Characterization of the roasted residues revealed that at a roasting temperature of 300°C, goethite, serpentine, dolomite, chromite, and talc were transformed into corresponding sulfates. The concentrated sulfuric acid destroyed the original iron mineral structure, releasing lattice-bound cobalt

and nickel, which then reacted with the acid to form cobalt and nickel sulfates. At 650°C, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ was further converted into water-insoluble Fe_2O_3 , which remained in the residue during subsequent water leaching, thereby enabling selective leaching of nickel and cobalt. The decomposition and conversion of ferric sulfate directly determine the efficiency of nickel-cobalt selective leaching. Nevertheless, the iron leaching rate remained as high as 20.06% in this experiment. Future work could employ fluidized roasting or maintain the material in a tumbling state to enhance iron phase conversion and reduce iron leaching.

Key words: lateritic nickel ore; sulfation roasting; phase transformation mechanism of iron; decomposition of ferric sulfate; selective leaching; extraction of nickel and cobalt

一季度国民经济实现良好开局 全国规模以上工业增加值同比增长6.1%

近日,国家统计局数据显示,初步核算,一季度国内生产总值334 193亿元,按不变价格计算,同比增长5.0%,比上年四季度加快0.5个百分点。“主要宏观指标增速回升,新动能快速成长,国民经济实现良好开局。”在国务院新闻办举行的发布会上,国家统计局副局长毛盛勇表示,一季度经济表现可圈可点,充分体现了我国经济的强大韧性和旺盛活力。

分产业看,第一产业增加值11 941亿元,同比增长3.8%;第二产业增加值116 135亿元,增长4.9%;第三产业增加值206 117亿元,增长5.2%。从环比看,一季度国内生产总值增长1.3%。

其中,工业生产增长加快,装备制造业和高技术制造业快速增长。一季度,全国规模以上工业增加值同比增长6.1%,比上年四季度加快1.1个百分点。分三大门类看,采矿业增加值同比增长6.0%,制造业增长6.4%,电力、热力、燃气及水生产和供应业增长4.3%。装备制造业增加值同比增长8.9%,高技术制造业增加值增长12.5%,分别快于全部规模以上工业增加值2.8和6.4个百分点。分经济类型看,国有控股企业增加值同比增长4.8%;股份制企业增长6.6%,外商及港澳台投资企业增长3.9%;私营企业增长6.1%。分产品看,3D打印设备、锂离子电池、工业机器人产品产量同比分别增长54.0%、40.8%、33.2%。3月份,规模以上工业增加值同比增长5.7%,环比增长0.28%。3月份,制造业采购经理指数为50.4%,比上月上升1.4个百分点;企业生产经营活动预期指数为53.4%。1—2月份,全国规模以上工业企业实现利润总额10 246亿元,同比增长15.2%。

总的来看,一季度主要宏观指标增速回升,新动能快速成长,国民经济实现良好开局。但也要看到,外部形势更加复杂多变,国内供强需弱矛盾仍然突出,经济向好基础仍需巩固。毛盛勇强调,下阶段,要坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导,坚决贯彻党中央、国务院决策部署,完整准确全面贯彻新发展理念,加快构建新发展格局,着力推动高质量发展,坚持稳中求进工作总基调,实施更加积极有为的宏观政策,持续扩大内需、优化供给,做优增量、盘活存量,着力稳就业、稳企业、稳市场、稳预期,不断巩固拓展经济稳中向好态势。

(资料来源:中国有色金属报)