

引文格式:刘冬梅,张继豪,宫嘉辰,等. 某过渡型红土镍矿工艺矿物学及碳热还原焙烧行为[J]. 中国有色冶金, 2026, 55(3): 67-78.

LIU Dongmei, ZHANG Jihao, GONG Jiachen, et al. Process mineralogy and carbothermic reduction roasting behavior of a transitional laterite nickel ore[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(3): 67-78.

某过渡型红土镍矿工艺矿物学及碳热还原焙烧行为

刘冬梅, 张继豪, 宫嘉辰, 单连军

(沈阳有色金属研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110141)

[摘 要] 过渡型红土镍矿属于呆滞难利用资源, 现有的酸浸工艺易将铁、镁、铝等杂质元素带入浸出液, 难以有效分离; 还原焙烧-氨浸工艺易生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体, 镍、钴回收率低, 且流程长。本研究针对此问题, 以某矿山过渡型红土镍矿为研究载体, 系统研究其工艺矿物学特征, 提出碳热还原-磁选回收镍铁的工艺, 并考察了温度对镍、铁回收的影响, 分析了产物结构特征, 得到以下主要结论。矿石化学成分与矿相分析结果显示, 试样中镍、铁品位分别为 1.23% 和 28.14%, SiO_2/MgO 为 1.53, 归属于低铁高镁型过渡红土镍矿; 矿物微观特征分析表明, 镍、铁元素赋存具有多载体特征, 以镍磁铁矿、针铁矿为主要赋存物相; 镍以类质同象分布在橄榄石、褐铁矿和紫苏辉石中。在原料中添加 25% 煤粉和 5% CaO , 于 1 340℃ 条件下还原焙烧 2 h, 产物的物相组成为 Fe-Ni 、 Mg_2SiO_4 、 Al_2SiO_5 , 磁选产物中 Ni 、 Fe 品位分别达 4.04% 和 83.67%, 对应回收率分别为 92.26% 和 79.87%; 经磁选后, Fe-Ni 合金富集在磁选产物中, 磁选产物具有饱和磁化现象, 饱和磁化强度为 $145.51 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$, 可通过弱磁磁选高效富集; Si 、 Mg 等杂质主要以 Mg_2SiO_4 形式随磁选尾渣排出。

[关键词] 过渡型红土镍矿; 呆滞难利用资源; 工艺矿物学; 碳热还原焙烧; Fe-Ni 合金

[中图分类号] TF815; TF803.13 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6103(2026)03-0067-12

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.03.007

0 引言

金属镍凭借优异的耐蚀性、高温力学性能与合金化能力, 在化工装备、航空航天、特种合金等领域被广泛应用^[1-3]。近年来, 我国新能源汽车产业的快速发展, 极大拉动了高能量密度动力电池的市场需求, 镍钴锰三元正极材料作为动力电池核心组分, 产业链协同效应直接推动镍资源需求持续攀升^[4]。全球镍矿储量中约 63% 为红土镍矿, 主要分布在印尼、菲律宾、新喀里多尼亚等热带地区, 剩余 37% 以硫化镍矿床为主, 集中在加拿大、俄罗斯、澳大利亚

等国, 主要用于生产高纯度电解镍^[5,6]。随着镍资源的日渐消耗, 传统的高品位红土镍矿 ($\text{Ni} > 1.5\%$) 日益枯竭, 印尼等国转向开发含镍 1.2% 以下的低品位矿床, 以满足未来巨大的需求增长^[7]。目前我国镍矿主要进口来源于缅甸等国家, 该区域红土镍矿虽以中低品位为主, 但品位仍高于我国镍矿平均水平, 具备较高的开发利用价值^[8]。

红土镍矿是超基性岩在热带-亚热带气候条件下, 经长期风化淋滤形成的典型表生矿床, 依据风化程度可划分为褐铁矿型与腐岩型两类^[9,10]。褐铁矿型位于风化壳表层, 腐岩型位于风化壳下层, 位于褐铁矿和腐岩型临界层的矿床被称为过渡层红土镍矿^[11]。其成矿原因使之兼具其他两类矿石的特性, 成分更混杂, 且两类矿物占比接近, 无明显主导成分。镍元素赋存形态更为复杂, 部分以类质同象形式置换铁、镁离子进入氧化铁与蛇纹石晶格, 同时矿石粒度多为微米级, 镍铁矿物以微细包裹体

[收稿日期] 2026-01-30 [修订日期] 2026-03-10

[录用日期] 2025-03-11 [出版日期] 2026-06-01

[第一作者] 刘冬梅(1996—), 女, 辽宁东港人, 硕士研究生学历, 工程师, 主要从事工艺矿物学研究。

[通信作者] 张继豪(1993—), 男, 辽宁阜新人, 博士研究生学历, 工程师, 主要从事冶金工程、固废处理。

[基金项目] 中国有色集团科技青年专项(2023KJZX013)。

形式嵌布于氧化物或硅酸盐矿物中,矿物解离难度极高。过渡层红土镍矿的核心特征是镍、铁、镁、硅含量介于褐铁型与腐岩型红土镍矿之间,镍品位区间为1.0%~1.4%^[12,13]。

上述特性使过渡型红土镍矿既无法匹配褐铁矿型红土镍矿所适用的高压酸浸法(HPAL),也不适用于腐岩型红土镍矿所适用的回转窑-电炉法(RKEF),因而,长期被归为呆滞难利用资源^[14]。为实现过渡型红土镍矿的高效利用,国内外科研人员已进行大量理论研究和工业化研究,主要有小高炉工艺、常压酸浸工艺和还原焙烧-氨浸工艺^[15-18]。其中,小高炉工艺是以焦炭为还原剂,采用200 m³以下的小高炉使矿石中的镍铁同步还原,产出可作为300系不锈钢的初级材料,其Ni品位为5%~8%,但该工艺原料适配性差、焦炭与熔剂消耗量大、环境污染严重,不符合我国环保要求,已被逐步淘汰^[19]。常压酸浸工艺其本质与高压浸出一致,均是利用酸中游离的H⁺使Ni以Ni²⁺的形式进入液相中。Agacayak在常压下利用80℃、2 mol/L硝酸浸出红土镍矿,镍回收率可达98%^[20]。司金凤等^[21]利用90℃、210 g/L硫酸常压浸出Ni品位为0.83%的红土镍矿,浸出6 h后,镍和铁的浸出率分别为93.6%和75.4%。在酸浸过程中,大量的诸如铁、镁、铝等杂质元素随镍同步进入溶液,难以有效分离,因此过渡型红土镍矿不适用于酸浸回收镍。还原焙烧-氨浸法即矿石经还原焙烧,使Fe、Ni等转化为金属态,随后进行多级逆流氨浸,获得碱式碳酸镍,最后煅烧获得氧化镍^[22]。然而在工业生产中多采用回转窑进行还原焙烧,其还原气氛难以控制,且在氨浸过程中Fe容易生成吸附性极强的Fe(OH)₃胶体,造成镍、钴回收率低,工艺流程过长也限制了其工业化推广^[23]。

碳热还原焙烧在火法冶金领域具有广泛的应用,该工艺的本质是利用煤粉燃烧时产生热量的同时释放大强还原性的CO,将矿物中的高价金属氧化物还原为低价氧化物或金属单质,具备原料适应性强、流程短、能耗低等优势,被视作处理中低品位红土镍矿的有效技术路径。李艳军等^[24]采用深度还原-磁选工艺,将红土镍矿中的Ni-Fe矿物还原为镍、铁含量分别为5.01%和22.46%的镍铁产品。然而,该工艺受限于Ni-Fe矿物在矿石中的嵌布特性,还原过程中细小的Ni-Fe矿物易与硅酸盐脉石

形成致密共生结构,降低产物的Ni-Fe品位。徐东^[25]发现不同的碳热还原红土镍矿,金属镍在镍铁合金富集,其回收率可达95.44%,但是不同的镍矿物在还原过程中的稳定性和还原性差异较大。于浩博^[26]通过在1 400℃半熔融还原试验发现SiO₂、MgO等高熔点脉石矿物需添加助熔剂调整渣型,降低渣相对金属颗粒的包裹,使彼此分离完全。由此可见,还原焙烧工艺的核心瓶颈,即还原效率、渣相调控与焙烧性能,本质上与红土镍矿的矿物组成、结构及嵌布特征密切相关。因此,针对过渡型红土镍矿开展系统深入的工艺矿物学研究,是揭示还原机理、优化焙烧工艺参数、提升技术经济指标的科学基础。

基于此,本文以某过渡型红土镍矿为研究载体,系统研究其工艺矿物学特征、碳热还原对镍铁回收的影响及产物结构特征。首先分析了Ni、Fe元素在不同粒度矿石中的分布规律;其次对矿石化学成分及矿相进行了分析,确定了矿石的元素含量和物相组成;然后通过光学显微镜、电子显微镜及矿物自动定量分析系统,阐明矿物微观分布与解离特性;最后,考察还原温度对镍铁回收率及产物品位的影响,总结还原焙烧产物和磁选产物的矿物和磁性特征。

1 试验方法与原料

1.1 试验材料及设备

1.1.1 原料及试剂

试验用矿石原料取自某矿山,利用自动振筛机筛分出粒度为-1.00 mm、1.00~3.00 mm和3.00~5.00 mm用于研究矿石粒度与Ni、Fe品位的分布规律,其结果如表1所示。

由表1可知,矿石的产率在25.89%~42.31%范围内,各粒级产率随着粒级的降低而减少。粒级为

表1 矿石的粒度组成与Ni、Fe品位分布

Table 1 Particle size distribution and Ni, Fe grade of

raw ore			
粒度分级/mm	产率/%	Ni 品位/%	Fe 品位/%
3.00~5.00	42.31	0.98	25.86
1.00~3.00	31.80	1.35	30.21
-1.00	25.89	1.32	32.14
合计	100.00	—	—

-1.00 mm 和 1.00~3.00 mm 的矿石中 Ni 和 Fe 的品位接近,而粒级为 3.00~5.00 mm 的矿石中 Ni 和 Fe 品位较低,分别为 0.98% 和 25.86%。这导致 Ni 和 Fe 的分布出现一定的偏析特征。将全部粒级的矿石经球磨机破碎至 80% 粒径-0.074 mm,作为碳热

还原焙烧试验原料。

试验用辅助试剂包括生石灰(CaO 含量为 87.6%)和煤粉(固定碳含量为 67.21%),均为外购。

1.1.2 设备

试验过程中所使用的主要仪器设备见表 2。

表 2 主要设备一览表
Table 2 List of main equipment

序号	设备名称	型号	生产厂商
No. 1	自动振筛机	XSZ-200	石城县浩鑫矿山机械制造有限公司
No. 2	X 射线荧光光谱仪(XRF)	ZSX100e	日本理学(Rigaku)
No. 3	X 射线衍射仪(XRD)	PW3040/60	荷兰帕纳科(Panalytical)
No. 4	制样机	UNIPOL-1202	沈阳科晶自动化设备有限公司
No. 5	偏光显微镜	Leica DM2500P	德国徕卡(Leica)
No. 6	扫描电子显微镜(SEM)	SSX-550	日本岛津(Shimadzu)
No. 7	电子探针显微分析仪(EPMA)	8050G	日本岛津(Shimadzu)
No. 8	场发射扫描电子显微镜	Quanta 250 FEG	美国 FEI(现赛默飞 Thermo Fisher)
No. 9	振动样品磁强计(VSM)	Lake Shore 7407	美国湖岸(Lake Shore)
No. 10	行星式球磨机	MSK-SFM-15	沈阳科晶自动化设备有限公司
No. 11	马弗炉	ZY/SXG1700	上海梓研仪器有限公司
No. 12	磁选管	XCSG-Φ50 mm	江西龙中机械设备有限公司

1.2 工艺矿物研究

采用 X 射线荧光光谱仪(XRF)对原矿石和还原熟料的化学成分进行分析。矿石矿相分析采用 X 射线衍射仪(XRD),扫描速度(2θ)为 $3^\circ/\text{min}$ 。将粒度为-1.00 mm 的红土镍矿与酚醛树脂混合后,利用制样机制样,并进行抛光,制成光片。采用偏光显微镜观察,在单偏光及正交偏光下利用物镜观察($5\times\sim 50\times$)记录矿物形态、干涉色及消光特征。利用扫描电子显微镜(SEM)研究红土镍矿的微观形貌和微区成分,加速电压为 15 kV。采用矿物自动定量分析系统(MLA)对粒度为-1.00 mm 的红土镍矿进行表征,并以电子探针显微分析(EPMA)测定该矿物样品中的矿物分配和解离情况,测试设备为场发射扫描电子显微镜,搭配 EDX 探测器。通过背散射电子图像(BSE)与能谱(EDS)数据耦合,实现矿相识别、解离度计算及粒度分布统计。采用振动样品磁强计(VSM)测试样品磁化强度,在室温下施加 ± 2 T 磁场,扫描速率 50 Oe/s,记录磁化强度随磁场变化数据,获取磁性特征参数。

1.3 碳热还原试验

称取一定量粉碎的红土镍矿,加入工业生石灰与煤粉,置于行星式球磨机中以 200 r/min 混

合 30 min。将混合物料压制成 $\Phi 20$ mm $\times 10$ mm 圆柱样,干燥后放入马弗炉,以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温至 $850\sim 1\,100^\circ\text{C}$,保温 1~2 h 进行还原焙烧。焙烧产物经水淬冷却后破碎至-2 mm,经振动筛分获得粒径-0.5 mm 粉末。利用磁选管磁选分离,调节励磁电流至 0.5~1.5 A(对应磁场强度 0.1~0.3 T),控制矿浆浓度为 20%~30%(质量分数),每次磁选时间 3 min。粗选精矿经二次磁选(磁场强度 0.2 T)提纯后,所得铁精矿于 105°C 烘干 2 h,称重并采用荧光分析法测定镍、铁品位,计算镍、铁回收率与精矿品位,镍回收率计算见式(1),铁回收率计算类同。

$$\eta = \frac{m_{\text{磁选产物}} \times Ni_1}{m_{\text{生料}} \times Ni_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η 为 Ni 的回收率,%; $m_{\text{磁选产物}}$ 和 $m_{\text{生料}}$ 为磁选产物和生料的质量,g; Ni_1 和 Ni_2 分别为还原焙烧产物和生料中 Ni 的品位,%。

2 结果与讨论

2.1 矿石化学成分及矿相分析

分别采用 XRF 和 XRD 分析红土镍矿的化学成分和矿相组成,结果分别见表 3、表 4 和图 1。

表3 原矿 XRF 分析结果(质量分数)

Table 3 XRF analysis results of raw ore (mass fraction)

%

元素	Ni	Fe	Mg	Si	Al	Cr	Mn	Ti
含量	1.83	43.9	7.48	9.41	1.87	1.62	0.790	0.0801
元素	Ca	Zn	V	Ho	Cu	Cl	S	As, P
含量	0.204	0.0484	0.0204	0.071	0.0205	0.0559	0.157	<0.01

表4 原矿主要成分定量分析结果(质量分数)

Table 4 Quantitative analysis results of raw ore (mass fraction)

%

成分	Ni	TFe	SiO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃
含量	1.23	28.14	23.22	15.17	0.21	2.38

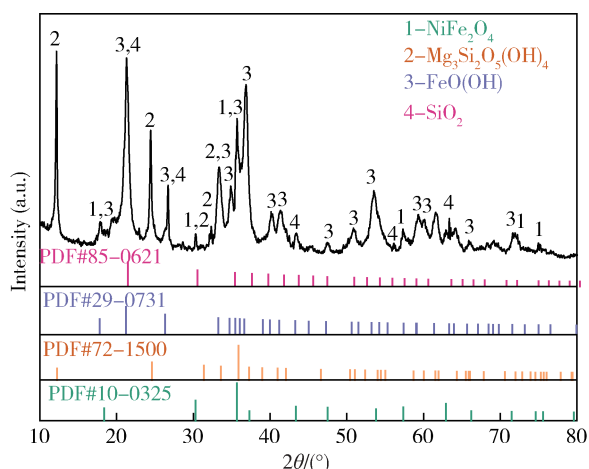


图1 红土镍矿的XRD图谱

Fig. 1 The XRD pattern of laterite nickel ore

由表3可知,红土镍矿中含有17种元素。金属元素包括Ni、Fe、Mg、Al、Cr、Mn、Ti、Ca、Zn、V和Cu;非金属元素包括Si、Cl、S、As和P,其中As和P元素含量低于0.01%,属微量元素;此外还含有稀土元素Ho。

定量分析结果(表4)表明,红土镍矿中主要有价金属元素Ni和Fe含量分别为1.23%和28.14%;杂质金属成分包括MgO、CaO和Al₂O₃,总含量为17.79%;非金属成分以SiO₂为主,含量为23.22%;SiO₂/MgO为1.53。综上所述,该红土镍矿属于硅镁镍矿型(腐殖土型/中间过渡型)红土镍矿,为富镍矿石。

对红土镍矿XRD图谱(图1)进行分析,发现红土镍矿中主要矿相有镍磁铁矿(NiFe₂O₄, PDF #10-0325)、叶蛇纹石(Mg₃Si₂O₅(OH)₄, PDF #72-1500)、针铁矿(FeO(OH), PDF #29-0731)和石英(SiO₂, PDF #85-0621);其他矿物质量分数较少,未在XRD

图谱中显示。

对XRD图谱采用Rietveld全谱拟合法对原矿中的矿相进行半定量分析,结果见表5。表5数据表明,矿石中镍磁铁矿为Ni元素的主要赋存形式,含量为8.1%,Fe元素主要以针铁矿形式赋存,含量为32.4%,镁和硅元素的主要赋存矿相为叶蛇纹石,含量为38.5%,石英含量为15.2%,上述矿相总占比94.2%,其余5.8%为氧化钙、氧化铝等杂质相。该红土镍矿矿相组成相对简单,以硅酸盐镍与针铁矿为主,镍无独立矿相,需破坏硅酸盐晶格使镍元素从晶格中释放为游离态或形成镍的固溶体,以达到镍元素与脉石分离的目的。

表5 红土镍矿中矿相半定量分析结果(质量分数)

Table 5 Semi-quantitative analysis results of raw ore (mass fraction)

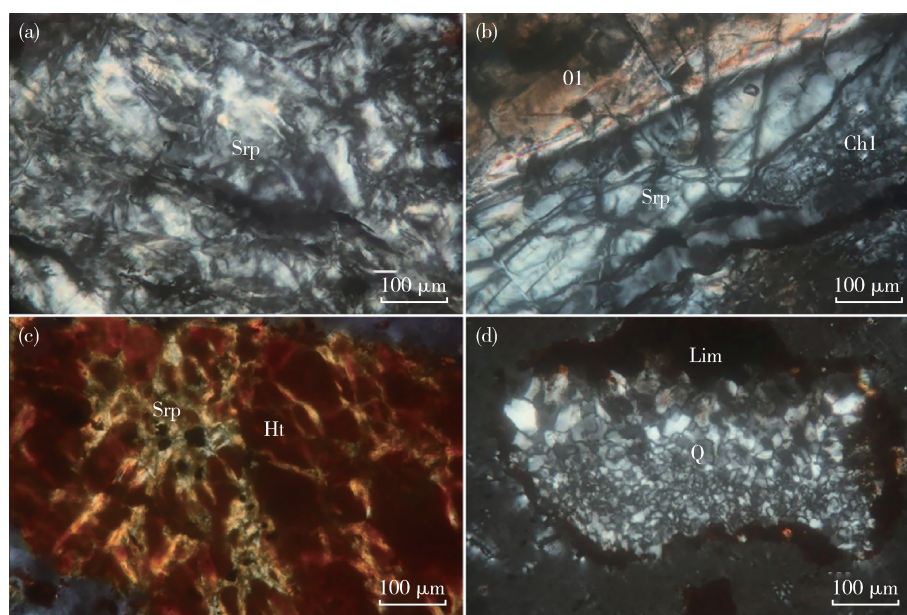
%

成分	NiFe ₂ O ₄	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	FeO(OH)	SiO ₂
含量	8.1	38.5	32.4	15.2

2.2 矿物嵌布特征与元素分布

红土镍矿的冶金工艺性能与矿相空间分布、嵌布关系及元素赋存状态密切相关。针对该矿样中镍磁铁矿、针铁矿、石英等主要矿物的复杂共生的结构特征,利用偏光显微镜、扫描电镜和MLA进行系统研究,结果见图2-4,以及表6和表7。

图2反映了正交偏光下分析镍磁铁矿、针铁矿和石英的光学性质。图2(a,b)中,镍磁铁矿多以叶片状、片状、纤维状及集合体产出,粒度较细小。镍磁铁矿呈橄榄绿色,正低突起,一级黄白干涉色,具典型网状或叶片状结构;镍磁铁矿呈鳞片状集合体,二级蓝绿干涉色,显示层状解离特征。镍磁铁矿沿橄榄石和紫苏辉石的边缘、裂隙及解理发生交代作用,包裹橄榄石和紫苏辉石的细小残余体;部分以网脉状、网格状充填于橄榄石和紫苏辉石的裂隙与解理缝中;另有镍磁铁矿完全与橄榄石和紫苏辉石交叠,形成致密集合体^[27]。图2(c)中针铁矿呈



(a,b) 镍磁铁矿偏光图; (c) 针铁矿偏光图; (d) 石英偏光图

图2 原矿的矿物连生特征

Fig. 2 The intergrowth characteristics of minerals in raw ore

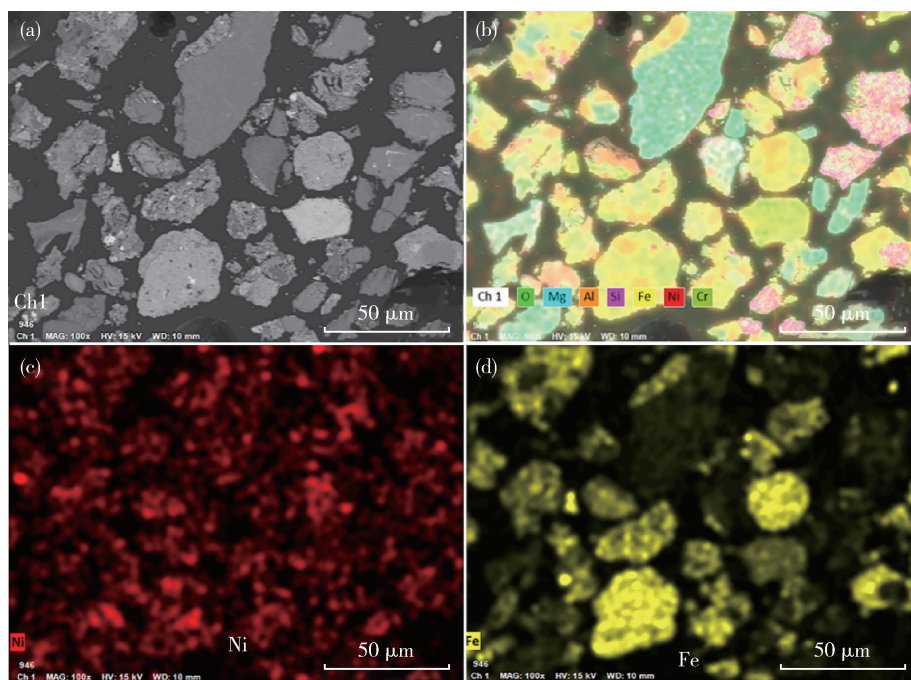
棕褐色,均质性,胶状和鲕状构造,颗粒间和裂隙中填充丝脉状、细粒状和蛛网状的镍磁铁矿。图2(d)中石英呈灰白色,且具有平行消光特征和明显双折射效应,符合石英的典型光学特征;褐铁矿以薄膜状赋存于石英颗粒表面,呈均质特征,与石英的强双折射效应形成明显光学反差^[28]。

图3为红土镍矿的SEM图像与能谱分析,图3(b)–(d)分别表示全元素、Ni和Fe元素在(a)微区中分布结果。由图3(a,b)分析可知,该样品中红土镍矿呈不规则颗粒状,边界清晰,金属相以不规则颗粒状嵌布于镁铝硅酸盐类脉石间隙中,二者界面清晰,呈机械共生关系;矿石粒径分布接近,主要集中在20~40 μm区间;颗粒表面分布Mg、Fe、Al、Si、Ni和Cr,其中Mg元素分布集中,主要分布在暗灰色颗粒表面,其表面无明显孔洞,结合XRD结果分析,该矿物可能为镍磁铁矿。由图3(c,d)可以看出,Ni元素呈散点分布在矿物颗粒表面,且Ni、Fe富集区域高度重合元素周围,并且分布少量Cr,说明镍磁铁矿伴生有少量铬铁矿。

为探究红土镍矿中镍铁类矿物赋存的矿相形式,对红土镍矿进行MLA和EPMA分析,结果见图4、表6和表7。由图4可知,矿物分布图像直观呈现了镁铁硅酸盐(蛇纹石/橄榄石/紫苏辉石)与铁氧化

物(赤铁矿/褐铁矿)的机械嵌布特征,颗粒边界清晰且接触紧密,二者连生边界紧密。镍在硅酸盐与氧化物中的赋存形式主要为晶格型和吸附型,具有显著差异。赤铁矿/褐铁矿呈不规则状嵌布于镁铁硅酸盐间隙,与脉石连生以“细粒附着-边缘交代”为主。结合表6中数据分析可知,镍主要赋存于镍磁铁矿/橄榄石(40.63%)、紫苏辉石(30.64%)及褐铁矿(16.10%)中,具有多载体特征。一方面镍以类质同象形式进入镁铁硅酸盐晶格(镍磁铁矿/橄榄石、紫苏石),另一方面,镍经表生氧化作用富集于铁的氢氧化物(褐铁矿),呈现“原生晶格赋存-次生氧化富集”的双重载体特征。其中,镍磁铁矿/橄榄石(40.63%)为镁铁硅酸盐矿物,镍以类质同象形式替代晶格中的 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 等阳离子,说明镍在岩浆/热液阶段随硅酸盐结晶同步富集;褐铁矿(16.10%)为表生氧化矿物,镍以吸附态或细粒包裹体形式赋存,指示原生镍载体(橄榄石、辉石等)经风化氧化后,镍伴随铁的氢氧化物沉淀发生次生再分配^[29]。

矿物学分析表明,该矿石中Ni赋存状态多元且分散,镍磁铁矿与橄榄石形成致密结合体,镍以类质同象进入镁铁硅酸盐晶格。部分镍磁铁矿填充在针铁矿缝隙中,造成镍铁分离困难;铁以复合物相赋存,靶向提取难度大,进一步加剧镍铁分离难度。



(a)原矿 SEM 图;(b)原矿主要元素面扫描图;(c,d) Ni、Fe 元素面扫描图

图 3 原矿中镍铁 SEM-EDS

Fig. 3 SEM-EDS images of nickel and iron in raw ore

表 6 表征了赤铁矿/褐铁矿与脉石矿物的连生-解离规律,数据表明,随着赤铁矿/褐铁矿颗粒所占面积百分比的提升,其单体解离度呈阶梯式增长(如 $80 < x \leq 100$ 区间内,赤铁矿/褐铁矿解离度达 91.84%),而脉石矿物(镍磁铁矿/橄榄石)的连生体占比随颗粒面积增大骤降(0 区间占 59.16%, $80 < x \leq 100$ 区间仅 1.62%)。在 $0 < x \leq 20$ 区间赤铁矿/褐铁矿解离度仅 7.63%,表明赤铁矿/褐铁矿与脉石的连生以“细粒附着-边缘交代”为主,风化氧化作用局限于矿物表面与裂隙,未完全破坏原矿结构。

2.3 还原温度对镍铁回收性能的影响

红土镍矿的还原焙烧过程是多元复杂体系,涉及到的主要化学反应见式(2)~(6)^[30]。采用热力学软件 HSC Chemistry 对反应(2)~(6)的标准 Gibbs 自由能变化和组分平衡进行计算,结果如图 5 所示。

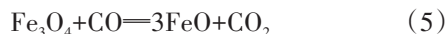
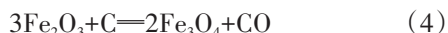
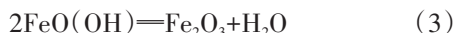


图 5(a)中,在 $500 \sim 1\,500^\circ\text{C}$ 范围内,反应(2)~(4)的 ΔG° 随着温度升高持续降低且小于 0,表明反应是

可以自发进行的吸热反应,升高温度有利于镍磁铁矿还原金属铁和镍;高温下固体碳的直接还原(反应(6))是比 CO 间接还原更具热力学优势的主导路径,这合理解释了平衡组成中金属 Fe 与 CO_2 同步生成的现象。基于反应趋势与驱动力,建议工艺温度应高于 $1\,000^\circ\text{C}$,以确保反应快速、完全地进行,最终获得 Ni-Fe 合金产物。反应(2)随温度升高,系统内的组分平衡如图 5(b)所示, 600°C 时镍磁铁矿完全消失,产物中 Fe 与 CO_2 的摩尔分数呈同步一致的增大趋势,这从热力学上证实了铁的还原主要由反应(6)这一直接气-固反应路径所主导,而非通过 CO 的间接还原。该过程最终获得化学计量比为 1:2 的 Ni-Fe 合金。

作者前期研究了红土镍矿还原制度和配料制度对矿相转变及其对镍铁回收性能的影响,并且确定了最佳的还原工艺条件^[31]。在此基础上,本研究为获得更加精确的还原焙烧温度,进一步缩小还原温度范围, $1\,300 \sim 1\,350^\circ\text{C}$ 步长 10°C ,并确定还原时间为 2 h,煤粉和 CaO 加入量分别为红土镍矿的 25%、5%,所得磁选产物中镍、铁回收率及品位如图 6 所示。

由图 6 中数据分析可知,在温度范围 $1\,300 \sim$

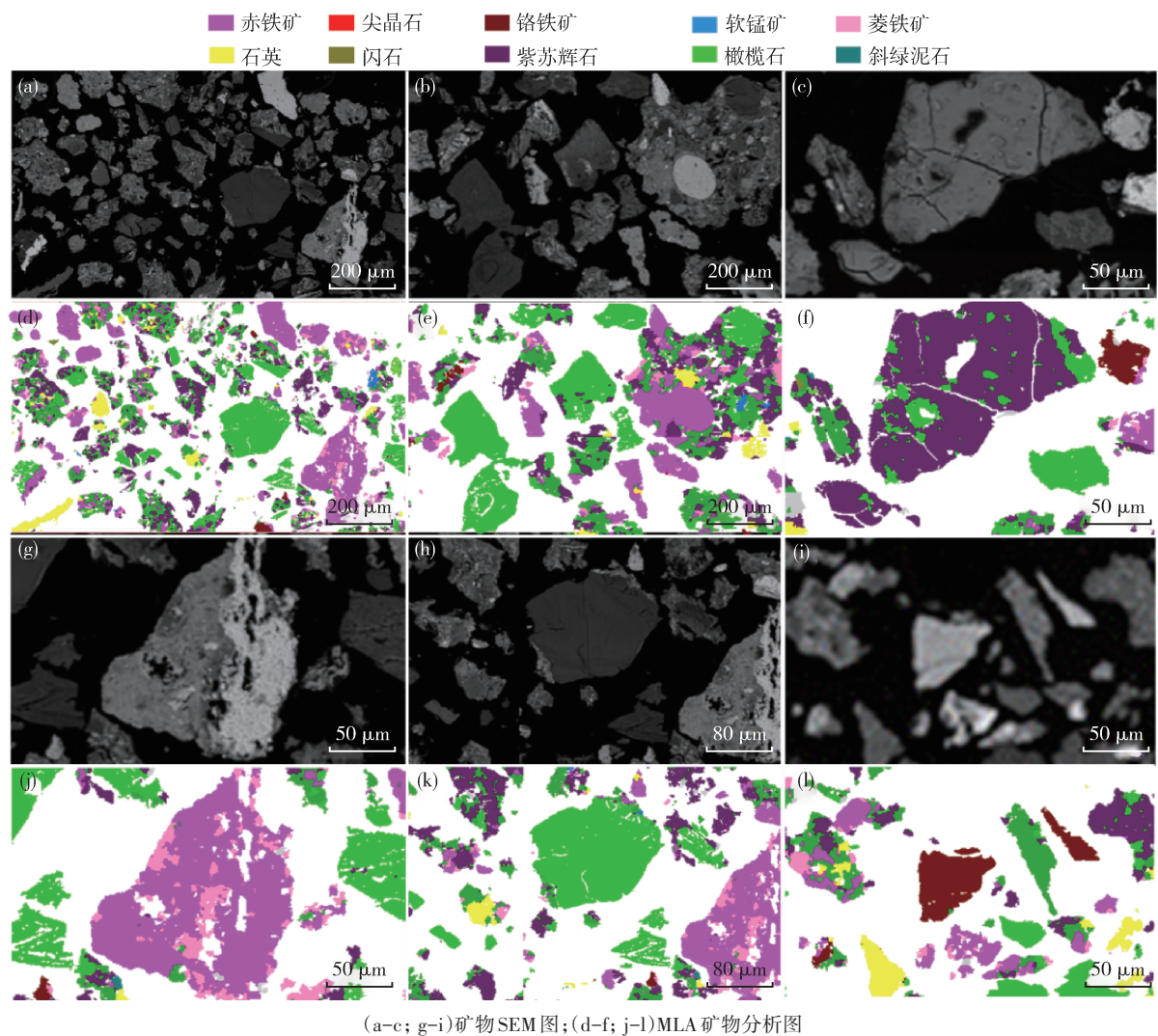


图 4 矿物组成及矿相关系示意图

Fig. 4 Schematic diagram of mineral composition and mineral correlation system

表 6 镍在各矿物中的分配情况(质量分数)

Table 6 The calculation results of nickel distribution in various minerals (mass fraction)				%
矿物名称	矿物量	镍在矿物中含量	镍的金属量	镍的占有率
镍磁铁矿/橄榄石	44.84	1.02	0.004 574	40.63
紫苏辉石	18.65	1.85	0.003 450	30.64
褐铁矿	18.87	0.96	0.001 812	16.10
赤铁矿	3.88	0.22	0.000 854	7.59
菱铁矿	5.56	0.98	0.000 545	4.84
铬铁矿	2.07	0.11	0.000 023	0.20
其他矿物	—	—	—	—
合计			0.011 258	100.00

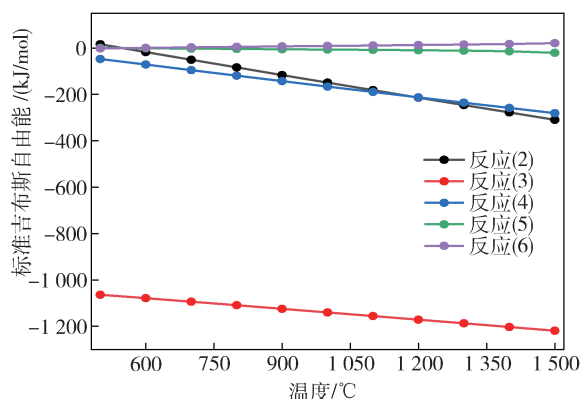
1 350℃中,磁性产物中镍铁品位和镍铁的回收率变化幅度随还原温度升高较小,但其整体呈逐渐上升趋势。随温度升高,磁性产物中镍铁品位与回收率整体呈上升趋势,镍回收率由 87. 96% 升至 92. 39%,铁回收率由 80. 48% 降至 80. 19%,其原因在于,高温强化还原性气氛向颗粒内部扩散,提升

表7 赤铁矿/褐铁矿解离分析

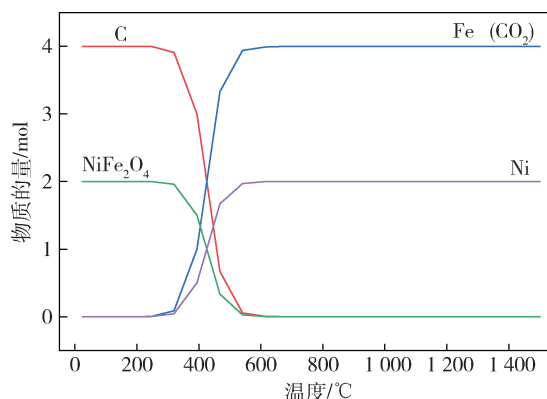
Table 7 Dissociation analysis of hematite/limonite (mass fraction)

%

赤铁矿/褐铁矿所占面积百分比分级	0	0%<x≤20%	20%<x≤40%	40%<x≤60%	60%<x≤80%	80%<x≤100%	100%
分布率	0.00	13.08	13.53	11.43	15.43	43.16	3.36
赤铁矿/褐铁矿	0.00	7.63	29.57	50.75	72.27	91.84	100.00
尖晶石	0.15	0.02	0.47	0.04	0.07	0.00	0.00
菱铁矿	2.53	5.26	8.50	11.23	14.88	5.49	0.00
石英	5.73	3.98	2.75	1.14	0.93	0.21	0.00
镍磁铁矿/橄榄石	59.16	54.09	42.47	28.13	9.64	1.62	0.00
斜绿泥石	0.17	0.09	0.06	0.11	0.00	0.00	0.00
其他矿物	2.13	0.91	0.56	0.48	0.21	0.10	0.00



(a) 标准Gibbs自由能



(a) 式(2)组分平衡关系

图5 还原焙烧过程相关反应热力学随温度变化关系

Fig. 5 The relationship between thermodynamics of reactions associated with reduction roasting process and temperatures

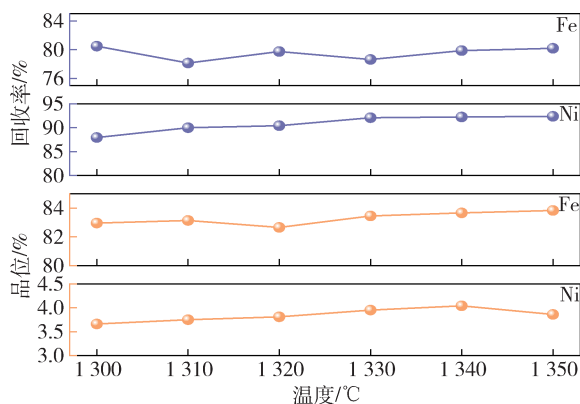


图6 还原温度对镍、铁回收率及品位的影响

Fig. 6 The effect of reduction temperatures on the recovery performance of nickel and iron

金属化率,促进铁镍合金颗粒奥氏熟化,磁性增强且与脉石界面清晰化,提升磁选分离效率,同时促进铁镍合金颗粒发生奥氏熟化,颗粒从亚微米级增长至微米级,磁性增强且与脉石矿物的界面更加清

晰,更易在磁选过程中彼此分离,因此回收率随温度升高持续升高。然而,在1350℃时,磁选产物中镍品位出现显著下降,从4.04%下降至3.86%。经上述矿物学分析,镍在矿物中以低含量类质同象为主,还原后镍铁合金以细粒包裹体形式,嵌布于铁颗粒或脉石中。在1350℃高温下,部分脉石在CaO作用下发生局部熔融,导致镍铁合金与脉石的连生体比例增加。同时,铁的过度还原稀释了镍的相对含量,最终使镍品位在1350℃时出现下降。在升温过程中,铁品位变化不明显,变化幅度仅1.18%,根据相关热力学计算结果表明,铁氧化物还原为金属铁的热力学趋势强^[32],且铁在红土镍矿中以高含量氧化物为主,还原后金属铁相独立成粒,未发生显著的脉石包裹或连生,因此Fe品位在较宽温度区间内保持稳定。综合镍铁回收率与品位指标,最优还原温度为1340℃,此条件下镍、铁回收率分别为92.26%、79.87%,品位分别为4.04%、83.67%。

2.4 产物特征分析

焙烧产物、磁选产物和磁选尾渣的XRD分析结果如图7所示。由图7可知,焙烧产物的物相主要由 Mg_2SiO_4 、 Al_2SiO_5 和Fe-Ni组成,与原矿XRD图谱对比,不难发现,原矿石中的 $\text{FeO}(\text{OH})$ 、 $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 、 NiFe_2O_4 的特征峰完全消失,说明在还原焙烧过程中 $\text{FeO}(\text{OH})$ 和 NiFe_2O_4 完全转化为Fe-Ni。同时, $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 历经脱水反应转化为 Mg_2SiO_4 。

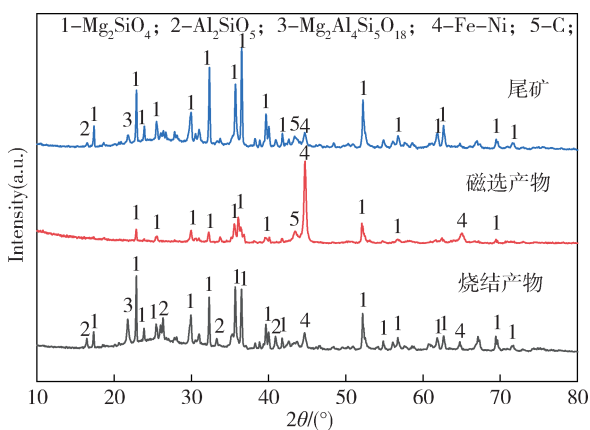


图7 焙烧产物、磁选产物和尾渣的XRD图谱

Fig. 7 XRD patterns of roasting product, magnetic separation product, and tailing

镍、铁均为过渡型金属元素,原子外层电子构型相近,且原子半径相差极小,符合“Hume-Rothery规则”中金属互溶的关键条件,熔融态原子可充分互溶形成铁镍合金。经过磁选后,磁选产物的主要物相为Fe-Ni、C和 Mg_2SiO_4 ,其原因在于,Fe-Ni合金具有较强铁磁性,在磁场作用下易被吸附并富集于磁选产物中;C和 Mg_2SiO_4 均为非磁性物相,但其可能通过机械吸附或包裹作用附着于Fe-Ni合金颗粒表面,随磁性颗粒一同进入磁选产物,导致部分C和 Mg_2SiO_4 未能与磁性颗粒有效分离,被裹挟进入磁选产物。

原矿、还原焙烧产物、磁选产物和尾渣的磁性分析曲线如图8所示。由图8(a)可以看出,原矿与磁选尾渣磁化强度随外磁场线性增长,无饱和磁化现象。还原焙烧产物和磁选产物的磁化强度起初随着外磁场强度的增加而迅速增加,到达一定数值后,继续增加外磁场强度,磁化强度趋于稳定,呈现饱和磁化特征,饱和磁化强度分别为 $52.84 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ 和 $145.51 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ [33]。

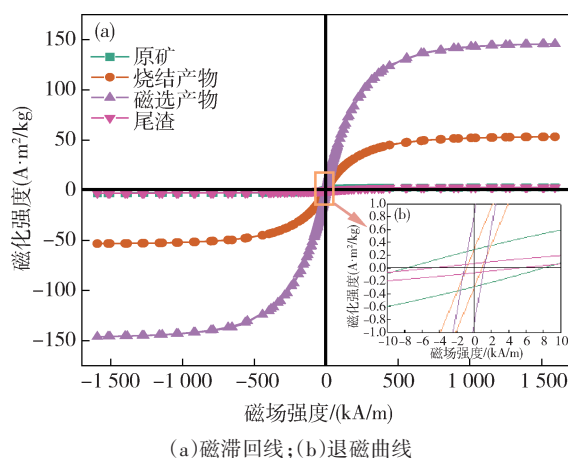


图8 原矿、焙烧产物、磁选产物和磁选尾渣磁性特征

Fig. 8 The magnetic characteristic of ore, roasting product, tilling

根据图8(b)可分别得出,原矿、还原焙烧产物、磁选产物和尾渣的饱和磁化强度(M_s),剩余磁化强度(M_r),矫顽力(H_c),结果列于表8 [34]。从 M_r 数据可知,磁选产物的 M_r 达 $0.76 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$,显著高于原矿($0.28 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$)、焙烧产物($0.28 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$)和磁选尾渣($0.07 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$)。这源于磁选产物中Fe-Ni合金等强磁性物相被富集,磁畴在外场作用下定向排列后,撤去磁场仍维持较高有序度。磁选尾渣的 M_r 最低,其原因在于非磁性的硅酸盐占主导,磁矩无序化程度高。

表8 原矿、焙烧产物、磁选产物和尾渣的磁性特征分析

Table 8 Magnetic characteristic of ore, roasting product, magnetic concentrate, and tailing

磁性特征	原矿	焙烧产物	磁选产物	尾渣
$M_r (\text{A} \cdot \text{m}^2/\text{kg})$	0.28	0.28	0.76	0.07
$M_s (\text{A} \cdot \text{m}^2/\text{kg})$	—	52.84	145.51	—
$H_c (\text{kA/m})$	8.05	0.88	1.06	4.86

3 结论

针对呆滞难利用资源——过渡型红土镍矿现有冶炼工艺存在的问题,本研究以某矿山过渡型红土镍矿为研究载体,系统研究其工艺矿物学特征,提出碳热还原-磁选回收镍铁的工艺,并考察了温度对镍、铁回收的影响,分析了产物结构特征。

1) 试验所用过渡型红土镍矿的镍、铁品位分别为 1.23% 和 28.14%, MgO 含量为 15.17%, SiO₂/MgO 为 1.53。粒度为 -1.00 mm 的矿石产率最低, 但其中 Ni 和 Fe 品位最高为 1.32% 和 32.14%。矿石主要矿相为针铁矿(32.4%)、镍磁铁矿(8.1%)、叶蛇纹石(38.5%)与石英(15.2%), 铁主要赋存于针铁矿, 镍主要赋存于镍磁铁矿, 硅镁杂质金属赋存于叶蛇纹石与石英。

2) 矿石中橄榄石、镍磁铁矿和紫苏辉石等以网脉状、网格状相互嵌布, 形成致密集合体, Ni 具有多载体特征, 以类质同象广泛分布在橄榄石、褐铁矿和紫苏辉石中, 以吸附态或细粒包裹体形式赋存。在成矿过程中, 风化氧化仅发生在矿物表面或裂隙中, 未完全破坏原矿结构, 赤铁矿/褐铁矿等解离度仅 7.63%。

3) 碳粉和 CaO 添加量分别为红土镍矿的 25% 和 5%, 在 1 340℃ 还原焙烧 2 h, 所得磁选产物中 Ni、Fe 的品位分别达 4.04% 和 83.67%, 对应回收率分别为 92.26% 和 79.87%。Ni 和 Fe 主要以 Ni-Fe 合金在磁选产物中回收。Si、Mg 等杂质金属以 Mg₂SiO₄ 随磁选尾渣排出。磁选产物呈现饱和磁化特性, 其饱和磁化强度为 145.51 A·m²/kg, 磁性显著提升, 可通过弱磁磁选高效富集。

[参考文献]

- [1] ZENG M, YAN H, YU B B, et al. Microstructure, microhardness and corrosion resistance of laser cladding Ni-WC coating on AlSi₃Cu₁Mg alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(9): 2716-2728.
- [2] 董波, 田庆华, 许志鹏, 等. 新能源战略金属镍钴锂资源清洁提取研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(22): 127-141.
DONG Bo, TIAN Qinghua, XU Zhipeng, et al. Advances in clean extraction of nickel, cobalt and lithium to produce strategic metals for new energy industry [J]. Materials Reports, 2023, 37(22): 127-141.
- [3] 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.
- [4] ZENG X Y, ZHENG H G, GONG R Y, et al. Uncovering the evolution of substance flow analysis of nickel in China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 135: 210-215.
- [5] GAVIN M M. Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites [J]. Ore Geology Reviews, 2010, 38(1-2): 9-26.
- [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] SAEED F, LEV F, DANIEL F. Pre-concentration of nickel in laterite ores using physical separation methods [J]. Minerals Engineering, 2019, 141: 1347-1356.
- [8] 田庆华, 李中臣, 王亲猛, 等. 红土镍矿资源现状及冶炼技术研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(9): 2975-2997.
TIAN Qinghua, LI Zhongchen, WANG Qinmeng, et al. Present situation of laterite nickel ore resources and research progress of smelting technology [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(9): 2975-2997.
- [9] 石文堂. 低品位镍红土矿硫酸浸出及浸出渣综合利用理论与工艺研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
SHI Wentang. Fundamental and technological study on sulfuric acid leaching of low grade nickel laterite and comprehensive utilization of leaching residue [D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [10] 刘安治, 李韩璞. 红土镍矿冶炼工艺分析[J]. 现代冶金, 2013, 41(1): 1-4.
LIU Anzhi, LI Hanpu. Analysis on smelting process of laterite nickel ore [J]. Modern Metallurgy, 2013, 41(1): 1-4.
- [11] 张云芳, 李金辉, 高岩, 等. 红土镍矿的硫酸铵焙烧过程[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(1): 155-161.
ZHANG Yunfang, LI Jinhui, GAO Yan, et al. Roasting process of nickel laterite using ammonium sulfate [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(1): 155-161.
- [12] 马保中, 王成彦, 杨卜, 等. 硝酸加压浸出红土镍矿的中试研究[J]. 过程工程学报, 2011, 11(4): 561-566.
MA Baozhong, WANG Chengyan, YANG Bu, et al. Pilot plant study on pressure leaching of nickel laterite in nitric acid medium [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2011, 11(4): 561-566.
- [13] SHAO S, MA B Z, WANG X, et al. Nitric acid pressure leaching of limonitic laterite ores: Regeneration of HNO₃ and simultaneous synthesis of fibrous CaSO₄·2H₂O by-products [J]. Journal of Central South University, 2020, 27(11): 3249-3258.
- [14] 傅建国, 刘诚. 红土镍矿高压酸浸工艺现状及关键技术[J]. 中国有色冶金, 2013, 42(2): 6-13.
FU Jianguo, LIU Cheng. Present state of nickel laterite HPAL process and its key technique [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2013, 42(2): 6-13.
- [15] 许欣. 红土镍矿火法冶炼制备高镍钨工艺及关键设备研发方向展望[J]. 有色设备, 2022, 36(5): 28-32.
XU Xin. Research and development direction of high nickel

- matte process and key equipment for pyrometallurgical preapration of laterite nickel ore [J]. *Nonferrous Metallurgical Equipment*, 2022, 36(5): 28–32.
- [16] 丁志广, 李博, 魏永刚. 氢气作用下硅镁型红土镍矿的低温还原特性[J]. *中国有色金属学报*, 2018, 28(8): 1669–1675.
- DING Zhiguang, LI Bo, WEI Yonggang. Reduction characteristic of garnieritic laterite ore using hydrogen at low temperature [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2018, 28(8): 1669–1675.
- [17] HE A P, ZENG J M, LIU S H. Influence of laterite nickel ore on extracting iron from Bayer red mud by carbothermal smelting reduction [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2021, 28(6): 661–668.
- [18] Eliana S M, Laurent C, Sabine P, et al. Ni-smectitic ore behavior during the Caron process [J]. *Hydrometallurgy*, 2019, 186: 200–209.
- [19] 王寨寨, 李博, 魏永刚. 红土镍矿处理工艺研究现状[J]. *矿产综合利用*, 2022, 18(5): 95–101.
- WANG Zhaizhai, LI Bo, WEI Yonggang. Research status of laterite nickel ore processing technology [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022, 18(5): 95–101.
- [20] AGACAYAK T, ZEDEF V, ARAS A. Kinetic study on leaching of nickel from Turkish lateritic ore in nitric acid solution [J]. *Journal of Central South University*, 2016, 23(1): 39–43.
- [21] 司金凤, 李丙亮. 基于常压酸浸的低品位红土镍矿综合利用研究[J]. *中国资源综合利用*, 2023, 41(09): 5–8, 12.
- SI Jinfeng, LI Bingliang. Study on comprehensive utilization of low-grade laterite nickel ore based on atmospheric acid leaching [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2023, 41(9): 5–8, 12.
- [22] 赵顶, 马保中, 王成彦, 等. 褐铁型红土镍矿湿法工艺研究进展[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2023, 54(2): 401–414.
- ZHAO Ding, MA Bazhong, WANG Chengyan, et al. Research progress of limonitic laterite hydrometallurgy [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2023, 54(2): 401–414.
- [23] CARON M H. Fundamental and practical factors in ammonia leaching of nickel and cobalt ores [J]. *Journal of the Minerals Metals and Materials Society*, 1950, 2: 67–90.
- [24] 李艳军, 李淑菲, 韩跃新. 红土镍矿深度还原-磁选富集镍铁实验研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2011, 32(5): 740–744.
- LI Yanjun, LI Shufei, HAN Yuexin. Deep reduction/magnetic separation of laterite for concentration of Ni and Fe [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2011, 32(5): 740–744.
- [25] 徐冬, 刘岩, 李杰, 等. 碳热还原-磁选工艺富集红土镍矿中金属镍[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2010, 31(4): 559–563.
- XU Dong, LIU Yan, LI Jie, et al. Enriching metallic nickel from laterite-nickel ore via thermal carbon reduction-magnetic separation process [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2010, 31(4): 559–563.
- [26] 于浩博, 姜鑫, 高强健, 等. 红土镍矿高料层碳热还原试验[J]. *钢铁*, 2020, 55(11): 10–15, 36.
- YU Haobo, JIANG Xin, GAO Qiangjian, et al. Experiment on carbothermal reduction of laterite nickel ore in tall pellets bed [J]. *Iron & Steel*, 2020, 55(11): 10–15, 36.
- [27] 杨洪英, 李雪娇, 佟琳琳, 等. 高铅铜阳极泥的工艺矿物学[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(1): 269–278.
- YANG Hongying, LI Xuejiao, TONG Linlin, et al. Process mineralogy of high lead copper anode slime [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(1): 269–278.
- [28] 刘伟锋, 胡晓丽, 张杜超, 等. 废线路板破碎分选产物的工艺矿物学[J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32(9): 2703–2713.
- LIU Weifeng, HU Xiaoli, ZHANG Duchao, et al. Process mineralogy of waste printed circuit board crushing and sorting products [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2022, 32(9): 2703–2713.
- [29] 吴为荣, 赵前飞, 高鹏, 等. 云南某难处理金精矿生物氧化产品工艺矿物学研究及悬浮焙烧工艺论证[J]. *中国有色金属学报*, 2025, 35(5): 1785–1798.
- WU Weirong, ZHAO Qianfei, GAO Peng, et al. Study on process mineralogy of biological oxidation products from refractory gold concentrate in Yunnan Province and demonstration of suspension roasting process [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2025, 35(5): 1785–1798.
- [30] 于海燕, 张继豪, 潘晓林, 等. 铁铝共生矿熔分还原过程矿相转变行为[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(2): 433–442.
- YU Haiyan, ZHANG Jihao, PAN Xiaolin, et al. Mineral transition of iron-aluminum symbiotic ore during melting reduction process [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(2): 433–442.
- [31] 宫嘉辰, 赵景富, 潘建, 等. SiO_2/MgO 质量比对低品位红土镍矿直接还原-磁选工艺的影响研究[J]. *稀有金属与硬质合金*, 2025, 53(5): 28–36.
- GONG Jiachen, ZHAO Jingfu, PAN Jian, et al. Effect of SiO_2/MgO mass ratio on direct reduction-magnetic separation process of low-grade lateritic nickel ore [J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 2025, 53(5): 28–36.
- [32] ZHANG Jihao, PAN Xiaolin, LV Zhongyang, et al. Recovery of iron and alumina from iron-aluminum symbiotic ore via low-calcium carbothermal reduction [J]. *Minerals Engineering*, 2023, 204: 108426–108438.
- [33] ZHANG Xiaolong, HAN Yuexin, SUN Yongsheng, et al. Innovative utilization of refractory iron ore via suspension

- magnetization roasting: A pilot-scale study [J]. Powder Technology, 2019, 352: 16–24.
- [34] PAN Xiaolin, QI Yafei, PEI Jiannan, et al. Mineral transition and iron recovery from high-iron red mud by coal-based magnetization roasting [J]. Minerals Engineering, 2025, 228: 109350–109362.

Process mineralogy and carbothermic reduction roasting behavior of a transitional laterite nickel ore

LIU Dongmei, ZHANG Jihao, GONG Jiachen, SHAN Lianjun

(Shenyang Research Institute of Nonferrous Metals Co., Ltd., Shenyang 110141, China)

Abstract: Transitional laterite nickel ore is a sluggish and difficult-to-utilize resource. The existing acid leaching process tends to introduce impurity elements such as iron, magnesium, and aluminum into the leachate, making effective separation difficult. The reduction roasting-ammoniacal leaching process tends to generate $\text{Fe}(\text{OH})_3$ colloid, resulting in low recovery rates of nickel and cobalt and a lengthy process. This study addresses this issue by focusing on a certain mine's transitional laterite nickel ore as the research subject. It systematically investigates its process mineralogy characteristics, proposes a process for recovering nickel and iron through carbothermic reduction-magnetic separation, examines the impact of temperature on nickel and iron recovery, and analyzes the structural characteristics of the products. The main conclusions are as follows. The chemical composition and mineral phase analysis of the ore reveal that the nickel and iron grades in the sample are 1.23% and 28.14%, respectively, with SiO_2/MgO ratio of 1.53, indicating a low-iron, high-magnesium transitional laterite nickel ore. The microscopic analysis of minerals indicates that nickel and iron elements occur in multiple carriers, with nickel magnetite and goethite being the main occurrence phases; nickel is distributed in olivine, limonite, and hypersthene in an isomorphism manner. By adding 25% coal powder and 5% CaO to the raw material and reducing it through roasting at $1\,340^\circ\text{C}$ for 2 hours, the phase composition of the product consists of Fe-Ni, Mg_2SiO_4 , and Al_2SiO_5 . The grades of Ni and Fe in the magnetic separation product reach 4.04% and 83.67%, respectively, with corresponding recovery rates of 92.26% and 79.87%. After magnetic separation, the Fe-Ni alloy is enriched in the magnetic separation product, which exhibits saturation magnetization with a saturation magnetization intensity of $145.51\text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$, allowing for efficient enrichment through low-intensity magnetic separation. Impurities such as Si and Mg are mainly discharged with the magnetic separation tailings in the form of Mg_2SiO_4 .

Key words: transitional laterite nickel ore; sluggish resources; process mineralogy; carbothermic reduction roasting; Fe-Ni alloy