

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2022.04.017

## 红土镍矿冶金工艺现状及前景分析

朱有康 沈强华 董梦奇 陈雯

(昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 昆明 650093)

**摘要:** 当今世界工业发展快速, 金属镍的消耗日益增加, 高品位硫化镍矿日益减少, 如何高效开发和利用红土镍矿逐渐成为研究的热点。分析了红土镍矿回转窑—电炉还原熔炼、还原焙烧—磁选、还原硫化熔炼 3 种火法工艺以及常压酸浸、高压酸浸及其他如氯化冶金和生物冶金等工艺研究现状, 指出了未来红土镍矿资源开发利用及冶金工艺选择需注意的问题及未来发展方向。

**关键词:** 红土镍矿; 火法冶金; 湿法冶金; 加压酸浸

**中图分类号:** TF815 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-7854(2022)04-0108-06

## Status and prospect analysis of metallurgical process of laterite nickel ore

ZHU You-kang SHEN Qiang-hua DONG Meng-qi CHEN Wen

(Faculty of Metallurgy and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** With the rapid development of industry in the world, the consumption of metal nickel is increasing day by day, and the high-grade nickel sulfide ore is decreasing day by day. How to efficiently develop and utilize laterite nickel ore has gradually become a research hotspot. This paper analyzed the three pyrometallurgical processes of laterite nickel ore (rotary kiln—electric furnace reduction smelting, reduction—roasting magnetic separation and reduction—sulfuration smelting) as well as the research status of atmospheric pressure acid leaching, high pressure acid leaching and other metallurgical processes such as chlorination metallurgy and bio metallurgy, and pointed out the problems in the development and utilization of laterite nickel ore resources and the selection of metallurgical processes, as well as the future development direction.

**Key words:** laterite nickel ore; pyrometallurgy; hydrometallurgy; high-pressure acid leaching

镍具有十分良好的延展性和力学性能, 抗腐蚀、抗氧化能力好且耐高温, 是一种重要的战略金属资源, 在国防和民用工业等领域均具有重要的应用。镍在地壳中的含量约为 3%, 仅次于硅、氧、铁、镁<sup>[1-3]</sup>。截止到 2020 年, 全球保有镍资源约 9 400 万 t。我国作为镍资源较丰富的国家之一, 其保有储量约为 900 万 t, 居世界第七位。目前, 世界上可开采的镍矿主要分为硫化镍矿和氧化镍矿

两大类, 且多数为氧化镍矿。一直以来, 硫化镍矿因镍品位较高, 是生产金属镍的主要来源, 但随着不断被开采利用, 硫化镍矿品位日益降低, 且存在后续开采困难、利用率低等问题, 如何开采利用镍储量占比较大的红土镍矿日益引起人们的重视, 有效开发利用红土镍矿对于镍工业的发展具有十分重要的现实意义。目前, 全球还有很多未被利用的红土镍矿资源, 因地域不同, 红土镍矿的品位和成分差异也较大, 但作为未来提取镍的主要矿产资源之一, 红土镍矿的综合利用及技术研究发展将会越来越受到重视。为此, 本文阐述了红土镍矿的资源特点, 总结了目前红土镍矿

收稿日期: 2022-04-06

第一作者: 朱有康, 硕士研究生, 研究方向为红土镍矿资源的综合利用。E-mail: zhuyk06@126.com

通信作者: 沈强华, 副教授; E-mail: 614436347@qq.com

冶金工艺的现状与进展，有助于后续从红土镍矿中提取有价金属，为红土镍矿的高效综合利用提供参考。

## 1 红土镍矿的特点

红土镍矿主要是由一些镍、铁元素含量较高的蛇纹岩或橄榄岩经过长时间风化、淋滤以及变质形成的，因铁含量高，经过风化，矿石中的铁被氧化成三价而使矿石颜色呈红色，所以也被称为红土

矿。研究人员按照各层次矿石的成分特点，可开采利用的矿床从外到内一般包括褐铁矿层、过渡土层和腐殖土层三层。随着地下深度的加深，矿石中的镍含量逐渐升高，铁含量逐渐降低，其具体分布和矿质特点见表1。因此，可以根据不同的元素含量选择处理方法，如低镍高铁型矿石较适合采用湿法冶金工艺，提取镍的同时便于铁的浸出和回收，而腐殖土层属于硅镁型镍矿石，采用火法工艺处理则较为合适。

表1 红土镍矿的组成与分布<sup>[4]</sup>

Table 1 Composition and distribution of laterite nickel ore<sup>[4]</sup>

矿层名称	主要成分/%					常用处理方法
	Ni	Fe	Co	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	
褐铁矿层	0.8~1.5	45~50	0.1~0.2	2~5	0.5~5	湿法冶金
过渡层	1.5~1.8	25~40	0.02~0.1	1~2	5~15	湿法冶金或火法冶金
腐殖土层	1.8~3.0	10~25	0.02~0.1	1~2	15~35	火法冶金

## 2 红土镍矿冶金工艺现状

传统红土镍矿的冶炼工艺可以分为火法、湿法、火法与湿法联合工艺。矿石品质不同，其适用的工艺也不尽相同。如前所述，可根据矿石的品质和结构特点选择不同的处理工艺。相对于湿法工艺来讲，火法工艺更偏向于处理高品位的含镍矿石，原因是火法过程的能耗大、成本高，需要通过延伸产品获得更大的经济收益。针对于难处理的低品位矿石，湿法工艺则因能耗低、提取率高而更为适合。

### 2.1 火法冶金工艺

传统的火法冶金工艺主要有两种：镍铁工艺和镍钨工艺，都是基于矿物中的氧化镍能被C、CO和Si还原的基本原理，在高温条件下，通过控制还原反应条件，使氧化镍完全还原成金属，并且只还原一部分的铁元素，利用这一部分的铁与金属镍熔融，形成镍铁合金，常用于生产不锈钢的镍铁。

#### 2.1.1 镍铁工艺

目前，工业上生产镍铁的方式主要有两种，一是回转窑电炉还原熔炼法，另一种是回转窑直接还原熔炼法。

回转窑电炉还原熔炼法，又称(RKEF)法，是一种被广泛采用的火法冶金工艺，具有工艺技术可靠且成熟的优点。其工艺过程主要包括原矿干燥、预还原焙烧、焙烧和精炼。干燥通常在干燥窑中进行，其主要作用是去除原矿中含有的大量吸附水，干燥后进入回转窑并在较高温度下长期保持还原状态，逐步除去结晶水，原矿石中的部分镍和铁氧

化物被预先还原，炉料被预热。之后，通过直接添加金属在电弧炉中进行还原熔炼，生成镍铁合金，经提炼后作为不锈钢或耐酸钢铁的原材料<sup>[5]</sup>。镍铁工艺特别适宜于提取低铁镍红土镍矿，镍铁冶炼产品中的镍含量通常控制在10%~15%，铁含量控制在60%~80%，平均镍回收率在90%以上。如胡长松<sup>[6]</sup>对红土镍矿进行了还原冶炼试验，在最佳条件下得到的镍和铁回收率分别达到81.76%和91.66%。但该工艺的缺点也很明显，如电炉生产中耗电量非常大，产品制备成本高，冶炼分离后的渣量多，渣铁分离难度大。从节能降耗和生产成本角度考虑，实际生产过程中，可以通过控制炉料比在一定范围内，并辅以热焙砂入炉和炉气回收等措施来降低能耗。

回转窑直接还原熔炼工艺比较古老，在20世纪60年代，日本就已经采用该工艺生产镍铁，经过世界各地的不断发展应用，被公认是能耗和成本最低的生产方法<sup>[7-9]</sup>。孙体昌等<sup>[10]</sup>以高镍低铁的红土镍矿为试样，采用直接还原—磁选工艺回收镍铁，所得最终产物含镍10.83%，镍回收率达到82.15%，完全符合镍铁精矿熔融还原制备镍铁合金对镍含量(通常为6%~10%)的要求。回转窑直接还原熔炼工艺不需要大量用电，可以煤代焦<sup>[11]</sup>，所以整体流程环节少、成本低、优势明显，但由于该法还存在回转窑结圈等问题，红土镍矿回转窑直接还原—磁选技术的应用仍有待改进。

#### 2.1.2 镍钨工艺

红土镍矿的镍钨冶炼工艺又称冰镍冶炼法。该

工艺主要分为预处理、熔炼和吹炼三个阶段。先将原矿石进行破碎、筛分,然后向筛分后的矿石中加入硫化剂进行熔炼,将矿石的镍和部分铁转化为低冰镍,在转化阶段生产高镍硫。低镍硫的主要化学成分为:镍(10%~30%)、铁(50%~60%)和硫(9%~12%),高镍硫的主要化学成分为:镍(75%~78%)、铁(0.5%~0.6%)和硫(21%~22%),全过程镍回收率约为70%<sup>[12,13]</sup>。在实际生产中,还原冶炼处理生产的镍硫不仅可用作羰基法精炼镍的原料,生产镍丸和镍粉,还因为该成品里面铜含量几乎为零,可以直接铸成阳极板在电解厂生产阴极镍。但因为该工艺在生产中会产生大量的有毒气体,如二氧化硫,对周边生活环境造成破坏,所以此法逐渐被淘汰<sup>[14,15]</sup>。

## 2.2 湿法冶金工艺

湿法冶金工艺的出现主要是为了弥补火法工艺消耗大的问题,而且随着国外红土镍矿的不断开发,湿法冶金工艺开始受到更多人的关注。目前,湿法冶金工艺主要包括常压酸浸和加压酸浸。

### 2.2.1 常压酸浸

常压酸浸工艺是一种使用较为广泛的红土镍矿处理工艺。常用酸浸试剂为硫酸、盐酸和硝酸。

硫酸常压酸浸工艺通常是先对矿石进行粉碎磨制、分级预选,之后对矿石进行磨矿处理,将磨好的矿浆与硫酸按照计算好的比例混合,控制酸浸温度使红土矿中的镍浸出,再用中和剂进行中和处理,矿浆再经固液分离和除杂沉降后得到硫酸镍溶液<sup>[16]</sup>。可以向浸出液中加入一些强化剂,增加镍和钴的浸出,并阻止铁、镁等杂质金属的溶解,在降低酸耗的同时提高浸出的选择性,获得更好的功效。曹占芳等<sup>[17]</sup>采用正交实验法开展了常压酸浸红土镍矿的研究,得到的镍、铁的浸出率分别为91.95%和67.96%。周安梁<sup>[18]</sup>和郭欢等<sup>[19]</sup>研究了在常压下用硫酸浸出红土镍矿,镍浸出率在97%左右。蔡文<sup>[20]</sup>发现,使用还原剂强化红土镍矿,在常压下酸浸时,可大幅度改善镍、铁的浸出率,最佳条件下镍和铁浸出率分别为80.5%和61.7%。

盐酸常压浸出也可以称之为湿法氯化。该法通过盐酸溶解,使红土镍矿中可酸溶的物质溶解在水溶液中。盐酸浸出红土镍矿的优点在于目前红土镍矿湿法冶炼往往是就地建厂,而大部分红土镍矿的开采地均在海边,所以当盐酸中的氢离子被利用完之后,氯离子可以排放进海水中,而不污染海水。

符芳铭等<sup>[21]</sup>研究了不同实验条件下,盐酸对红土镍矿浸出量的影响,发现镍的浸出率达到了93.94%。张培育<sup>[22]</sup>使用盐酸法处理红土镍矿,通过控制反应条件,实现了对红土矿中镍和铁的选择性浸出,最终得到的镍浸出率为89.4%。

硝酸的酸性较强,一方面可以有效地提升红土镍矿浸出液中的有价金属浓度,另一方面,反应过程生成的硝酸盐可以通入硫酸再生出硝酸,且可在实现硝酸循环再生的同时避免反应釜结垢,大幅度降低成本。黄诗汉等<sup>[23]</sup>利用硝酸为浸出剂对红土镍矿进行浸出,系统研究了各影响因素对浸出的影响,发现在常压下,红土镍矿中镍、铁和钴的浸出率分别达到了98.75%、81.45%和91.66%,且可实现硝酸循环再生。AGACAYAK等<sup>[24]</sup>研究了常压条件下高镁硅红土镍矿的硝酸浸出,发现当硝酸浓度为2.0 mol/L、浸出时间为240 min时,Ni浸出率高,可达98%。

常压酸浸工艺技术简便、能耗低、无需大型高压釜、投入经费少,且具有作业要求易于控制等优势,但是该工艺浸出液分散不易、浸渣中镍浓度仍较高,镍提取率不高。

### 2.2.2 加压酸浸

加压酸浸最早在1950年左右开始被使用,当时在古巴的镍冶炼厂最先用处理红土镍矿的一种方法。该工艺将稀硫酸和含有镍钴等有价金属的矿物一起混合,通过控制反应条件,使矿物中的镍、钴、铁等金属有选择性地进入溶液,铝、硅等杂质进入渣,然后依次通过净化除杂、过滤分离等工序得到硫酸镍溶液。加压酸浸温度条件一般在250℃左右,压力在4~5 MPa<sup>[25]</sup>。

李丹<sup>[26]</sup>通过正交实验总结了不同条件下硫酸对红土镍矿中Ni、Co等元素浸出率的影响,并发现加压条件下,Ni、Co和Mn的浸出率均可超过96%。苗壮等<sup>[27]</sup>分析了反应釜中Ni含量变化与酸耗量的关系后发现,当金属镍的品位增加时,金属镁的含量也会相应增加。GUO等<sup>[28]</sup>的研究发现,最佳硫酸高压浸出条件下,Ni和Co的回收率最终分别可达97%和96%。由于加压浸出反应流程中会有大量铁离子进入浸出液,造成后续分离除杂难度较大,分离成本高。为此,研究人员考虑用硝酸取代硫酸来进行实验。与硫酸相比,添加硝酸的加压浸出,酸性更强浸出效率更高。如王成彦等<sup>[29]</sup>的研究表明,红土镍矿在最优条件下,镍和钴的浸出率大于85%,并且除杂后的分离液可以再生一

定浓度的硝酸。但由于硝酸反应中可能产生氮氧化物，造成条件不可控因素增加，也是需要进一步研究解决的。

加压酸浸工艺最大的优势在于，原矿中夹带的大部分钴可以从矿石中浸出，浸出率基本可达到90%以上，远远高于其他工艺流程，但是该工艺只适合处理针铁矿为主的矿石，对于含镁、铝等杂质较高的镍矿则处理效果并不太好，浸出过程酸耗大，并且由于铝、铁、硅等生成的杂质沉淀还会造成结垢的现象，高压设备腐蚀非常严重。

总的来说，湿法冶金工艺流程较适于处理褐铁矿类、中间型的红土镍矿石，并具备能耗少、成本较低等优势，但同时也具有工序繁琐、工艺流程过长、环境污染较大等缺点。

### 2.3 其它处理工艺

#### 2.3.1 还原焙烧—氨浸

还原焙烧—氨浸工艺(RRAL)是由 Caron 教授发明的，因此又称 Caron 流程<sup>[30]</sup>。氨浸工艺是将焙烧后的矿用  $\text{NH}_3$  及  $\text{CO}_2$  将金属镍和钴转化为络合物进入溶液，并对浸出液进行硫化沉淀，再通过除铁、蒸氨，产出碱式硫酸镍，碱式硫酸镍经煅烧后生成氧化镍，也可以经还原生产镍粉。产品镍含量可达90%，全流程的镍回收率达75%~80%。氨浸工艺仅适合处理红土镍矿矿床上层的红土矿，不适合处理其它类型的矿石，极大地限制了该工艺的发展，实际上，从20世纪70年代后就没有工厂选用该工艺进行生产了。

#### 2.3.2 氯化冶金

氯化冶金是将矿石与氯化剂混合，在一定条件下使矿物中的有价金属变为氯化物，然后再将金属提取出来的冶金方法。如李金辉<sup>[31]</sup>发现，采用氯化焙烧对红土镍矿进行焙烧处理之后再浸出，镍、钴浸出率均可达到90%，证明该工艺在处理红土镍矿方面具有一定优势，但由于氯化焙烧对设备要求较高、反应温度不易控制，关于该方面的研究还有待改进。

#### 2.3.3 生物冶金

生物冶金是利用细菌、微生物新陈代谢过程中的氧化还原特性将矿石中的有价金属提取出来的一种新工艺。根据自然条件下微生物本身的氧化还原，使矿物中的有价金属被氧化或还原，矿物中的各种金属以离子形式进入溶液，之后通过添加反应物形成沉淀与矿料层分离<sup>[32]</sup>。采用生物冶金处理红土镍矿虽然可实现镍、钴的选择性提取，且具有

节能环保的优势，但该工艺所用生物对环境要求苛刻，且浸出时间长，限制了其工业应用。

## 3 结论与展望

镍是一种战略矿产资源，随着硫化镍矿资源减少、品位逐渐降低，开发利用红土镍矿资源变得非常重要。相对低品位镍矿，针对高品位镍矿，采用火法处理收益更大，但火法煅烧的结窑、产物渣量大和渣分离困难等问题尚需改进。红土镍矿种类繁多，且因地域不同，矿石中有价金属种类及含量均有差异，湿法冶金是处理红土镍矿资源较为理想的方式之一，可根据红土镍矿资源和结构性质特点选择常压或加压浸出等。此外，对于含有如战略稀土资源铈的红土镍矿，在提取镍，综合利用铁的同时，还应充分考虑对铈的综合回收。因此，如何选择合理的技术，高效开发利用红土镍矿资源，开发低能耗、绿色环保和处理效率高的冶金工艺将是未来红土镍矿资源开发利用的重要课题。

### 参考文献

- [1] 张伟娜, 许富民, 谭毅. 镍对冶金法制备多晶硅电学性能的影响[J]. 稀有金属, 2008(4): 473-477.  
ZHANG W N, XU F M, TAN Y. Effect of nickel on electrical properties of polycrystalline silicon prepared by metallurgical method[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2008(4): 473-477.
- [2] 李艳军, 于海臣, 王德全, 等. 红土镍矿资源现状及加工工艺综述[J]. 金属矿山, 2010, 39(11): 5-9, 15.  
LI Y J, YU H C, WANG D Q, et al. The current status of laterite nickel ore resources and its processing technology[J]. Metal Mine, 2010, 39(11): 5-9, 15.
- [3] 贾露萍. 镍的现状与展望[J]. 有色设备, 2018(6): 17-20.  
JIA L P. Actuality and expectation of nickel[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2018(6): 17-20.
- [4] 李金辉, 李洋洋, 郑顺, 等. 红土镍矿冶金综述[J]. 有色金属科学与工程, 2015, 6(1): 35-40.  
LI J H, LI Y Y, ZHENG S, et al. Research review of laterite nickel ore metallurgy[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2015, 6(1): 35-40.
- [5] 卢红波. 红土镍矿电炉还原熔炼镍铁合金的热力学研究[J]. 稀有金属, 2012, 36(5): 785-790.

- LU H B. Thermodynamic research on production of ferronickel alloy by electric furnace reduction from lateritic nickel ore [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2012, 36(5): 785-790.
- [6] 胡长松. 转底炉处理低品位红土镍矿的中试研究[J]. *中国有色冶金*, 2014, 43(2): 74-78.
- HU C S. Pilot study of low grade nickel laterite ore treatment with rotary hearth furnace [J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2014, 43(2): 74-78.
- [7] 王帅, 姜颖, 郑富强, 等. 红土镍矿火法冶炼技术现状与研究进展[J]. *中国冶金*, 2021, 31(10): 1-7.
- WANG S, JIANG Y, ZHENG F Q, et al. Development of pyrometallurgical technology of laterite nickel ore [J]. *China Metallurgy*, 2021, 31(10): 1-7.
- [8] 朱建文. 镍铁冶炼工艺对比—高炉、电炉、回转窑[J]. *新疆有色金属*, 2011, 34(6): 53.
- ZHU J W. Comparison of smelting process of nickel iron-blast furnace, electric furnace, rotary kiln[J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 2011, 34(6): 53.
- [9] MUHAMMAD H U, LEILI T K. The effect of sulfur in rotary kiln fuels on nickel laterite calcination[J]. *Minerals Engineering*, 2020, 157. DOI: 10. 1016/j. mineng. 2020. 106563.
- [10] 孙体昌, 杨慧芬, 曹志成. 直接还原焙烧磁选法从红土镍矿中回收镍和铁 [C] // 全国选矿学术会议论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 97-99.
- SUN T C, YANG H F, CAO Z C. Recovery of nickel and iron from laterite nickel ore by direct reduction roasting magnetic separation [C] // Proceedings of the National Beneficiation Academic Conference. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 97-99.
- [11] WANG L W, LU X M, LIU M, et al. Preparation of ferronickel from nickel laterite via coal-based reduction followed by magnetic separation [J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2018, 25(7): 744-751.
- [12] 刘云峰, 陈滨. 红土镍矿资源现状及其冶炼工艺的研究进展[J]. *矿冶*, 2014, 23(4): 70-75, 78.
- LIU Y F, CHEN B. The current status of laterite nickel ore resources and advance in its processing technology[J]. *Mining and Metallurgy*, 2014, 23(4): 70-75, 78.
- [13] GUO Q, QU J K, QI T, et al. Activation pretreatment of limonitic laterite ores by alkali-roasting method using sodium carbonate [J]. *Minerals Engineering*, 2011, 24(8): 825-832.
- [14] 杨泽宇, 张文, 申亚芳, 等. 红土镍矿处理方法现状[J]. *中国有色冶金*, 2020, 49(4): 1-6.
- YANG Z Y, ZHANG W, SHEN Y F, et al. Current status of smelting process of laterite nickel ore[J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2020, 49(4): 1-6.
- [15] 张志华, 毛拥军. 红土镍矿处理工艺研究现状[J]. *湖南有色金属*, 2012, 28(4): 31-35.
- ZHANG Z H, MAO Y J. The current situation of the technology of nickel laterite [J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2012, 28(4): 31-35.
- [16] 常龙娇, 伞欣悦, 梁栋, 等. 红土镍矿冶金技术研究现状[J]. *矿冶*, 2020, 29(5): 63-68.
- CHANG L J, SAN X Y, LIANG D, et al. Research status of laterite nickel ore metallurgy technology [J]. *Mining and Metallurgy*, 2020, 29(5): 63-68.
- [17] 曹占芳, 钟宏, 刘广义, 等. 红土镍矿镍和铁的综合回收试验[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(11): 4199-4204.
- CAO Z F, ZHONG H, LIU G Y, et al. Comprehensive recovery test of nickel and iron from nickel laterite ore [J]. *Journal of Central South University ( Science and Technology )*, 2012, 43(11): 4199-4204.
- [18] 周安梁, 霍松龄, 余群波. 印尼某红土镍矿浸出试验研究[J]. *中国资源综合利用*, 2018, 36(3): 6-8, 11.
- ZHOU AN L, HUO S L, YU Q B. Study on leaching test of a nickel laterite in Indonesia [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2018, 36(3): 6-8, 11.
- [19] 郭欢, 付海阔, 靖青秀, 等. 用硫酸从红土镍矿中常压浸出镍钴铁试验研究[J]. *湿法冶金*, 2020, 39(3): 190-193, 202.
- GUO H, FU H K, JING Q X, et al. Atmospheric leaching of Ni, Co and Fe in laterite nickel ore using sulfuric acid[J]. *Hydrometallurgy of China*, 2020, 39(3): 190-193, 202.
- [20] 蔡文. 褐铁矿型红土镍矿中镍和铁的常压酸浸行为研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- CAI W. Study on atmospheric pressure acid leaching behavior of nickel and iron of limonitic laterite ore[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [21] 符芳铭, 胡启阳, 李金辉, 等. 低品位红土镍矿盐酸浸出实验研究[J]. *湖南有色金属*, 2008, 24(6): 9-12.

- FU F M, HU Q Y, LI J H, et al. Study about hydrochloric acid leaching of nickel laterites [J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2008, 24(6): 9-12.
- [22] 张培育. 红土镍矿酸浸—水解耦合新工艺选择性浸出镍钴应用基础研究[D]. 中国科学院研究生院过程工程研究所, 2016.
- ZHANG P Y. Applied basic research on the new process for the selective leaching of Ni and Co from laterite ore by leaching-hydrolysis coupling reactions[D]. Institute of Process Engineering, Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [23] 黄诗汉, 吴浩, 郑江峰, 等. 硝酸常压浸出红土镍矿特性及镍浸出动力学[J]. *矿冶*, 2021, 30(5): 70-76.
- HUANG S H, WU H, ZHENG J F, et al. Nitric acid atmospheric pressure leaching laterite nickel ore characteristics and nickel leaching kinetics [J]. *Mining and Metallurgy*, 2021, 30(5): 70-76.
- [24] 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.
- [25] 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 B Q, QI Y H, ZHOU H M, et al. Status and prospect analysis of hydrometallurgical processes of laterite nickel ore [J]. *China Metallurgy*, 2019, 29(11): 1-5.
- [26] 李丹. Ramu 红土镍矿湿法冶炼过程中钪的富集回收[J]. *矿冶*, 2019, 28(4): 79-83.
- LI D. Enrichment and recovery of scandium in hydrometallurgical process of Ramu laterite nickel ore[J]. *Mining and Metallurgy*, 2019, 28(4): 79-83.
- [27] 苗壮, 孙宁磊, 李少龙. 镁含量对瑞木红土镍矿加压酸浸成本的影响[J]. *中国有色冶金*, 2020, 49(4): 11-13.
- MIAO Z, SUN N L, LI S L. Influence of the magnesium content on the cost of pressure acid leaching of Ramu laterite nickel ore [J]. *China Nonferrous Metallurgy*. 2020, 49(4): 11-13.
- [28] GUO X Y, SHI W T, LI D, et al. Leaching behavior of metals from limonitic laterite ore by high pressure acid leaching [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(1): 191-195.
- [29] 王成彦, 曹志河, 马保中, 等. 红土镍矿硝酸加压浸出工艺[J]. *过程工程学报*. 2019, 19(增刊 1): 51-57.
- WANG C Y, CAO Z H, MA B Z, et al. Nitric acid pressure leaching of laterite ores [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2019, 19(S1): 51-57.
- [30] CARON M H. Fundamental and practical factors in ammonia leaching of nickel and cobalt ores[J]. *JOM*, 1950, 2(1): 67-90.
- [31] 李金辉. 氯盐体系提取红土矿中镍钴的工艺及基础研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- LI J H. Technical and basis studies on the extraction of nickel and cobalt from laterite in choride medium[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [32] 李敏. 生物冶金技术研究综述[J]. *山西冶金*, 2014, 37(1): 9-10, 41.
- LI M. Research overview of bio-metallurgy technology[J]. *Shanxi Metallurgy*, 2014, 37(1): 9-10, 41.

(编辑: 王爱平)