# 红土镍矿火法冶炼工艺现状及进展

武兵强[1,2]，齐渊洪[1,3]，周和敏[1,3]，洪陆阔[1]，邹宗树[2]

（1 钢铁研究总院 先进钢铁流程及材料国家重点实验室，北京 100081；2 东北大学 冶金学院，辽宁 沈阳 110819；3 钢研晟华科技股份有限公司 研发部，北京 100081）

**摘要：**随着硫化镍矿资源的日趋枯竭，高效利用红土镍矿以满足不断增长的镍需求具有重要的现实意义。本文阐述了还原硫化熔炼镍锍工艺、回转窑 - 电炉冶炼镍铁工艺以及还原焙烧 - 磁选工艺等主要红土镍矿火法冶炼工艺的现状，并分析了这些工艺的优缺点，介绍了红土镍矿综合利用的研究进展，认为转底炉直接还原 - 熔分炉冶炼工艺具有发展前景，为高效利用红土镍矿资源提供参考。

**关键词：**红土镍矿；火法冶炼；工艺；进展

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2020.03.012

**中图分类号：**TD952；TF815　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-6532（2020）03-0078-07

镍是一种具有重要战略意义的金属，具有优良的化学稳定性、延展性以及机械强度，被广泛应用于不锈钢冶炼、新型复合材料制备、储氢材料制备、医疗、军事等众多行业和领域[1-5]。近年来，全世界不锈钢产量不断增长，特别是中国、印度尼西亚等东南亚国家更是如此。据中国特钢企业协会不锈钢分会统计，2018 年中国不锈钢粗钢产量为 2670.68 万 t，比 2017 年增加了 93.31 万 t，增幅为 3.62%；2018 年印尼不锈钢总产量为 219.3 万 t，比 2017 年增加了 141.3 万 t，增幅为 181.15%。不锈钢产量的快速增长推动了镍的需求量以及镍资源的消耗量大幅度增加。

目前，世界上可利用的镍资源包括 2 类，即硫化镍矿和红土镍矿。在已探明的镍资源储量中，硫化镍矿占比约 30%，红土镍矿占比约 70%[6-7]，然而，约 70% 的镍产量来源于硫化镍矿[8]。随着硫化镍矿的不断消耗，目前可供开采的硫化镍矿资源越来越少，而且硫化镍矿勘探周期和建设周期均比较长，而红土镍矿作为将来镍资源的主要原料，储量丰富，易于开采，运输便利，因此高效开发利用红土镍矿对实际生产具有重要意义。

由于红土矿中镍与其他矿物共生，镍嵌布在矿物中，难以通过选矿方法富集，通常采用直接冶炼生产金属镍、镍铁或镍锍。目前，国内外处理红土镍矿的方法主要有火法冶炼和湿法冶炼两种。火法冶炼工艺具有流程短，生产效率高，工艺成熟等优点。本文主要分析火法冶炼技术处理红土镍矿的工艺现状及研究进展。

## 1　红土镍矿火法冶炼工艺现状

### 1.1　还原硫化熔炼镍锍工艺

还原硫化熔炼镍锍工艺流程为：先将红土镍矿干燥脱除自由水以及部分结晶水，配加硫化剂[9]（硫磺、黄铁矿、石膏或含硫的镍原料）和还原剂（焦炭粉）在鼓风炉或电炉内熔炼，熔炼温度为

**收稿日期：**2019-04-08；**改回日期：**2019-04-26
**基金项目：**国家重点研发计划专项资助（2017YFB0603800，2017YFB0603805）
**作者简介：**武兵强（1987-），男，博士，从事资源综合利用新技术研究。

万方数据

1500 ～ 1600℃，通过调整还原剂和硫化剂的加入量得到不同成分的低镍锍，然后可送入转炉进一步吹炼成为高镍锍 [10]。其工艺流程见图 1。

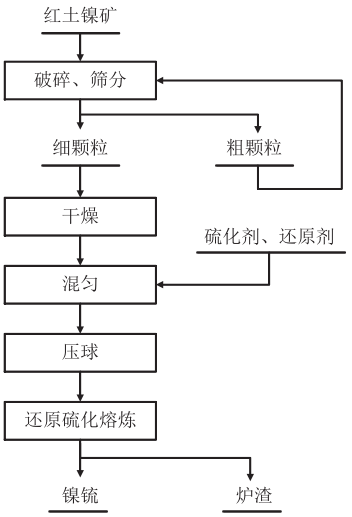


**图 1　还原硫化熔炼镍锍工艺流程**

Fig .1 Flow diagram of reduction smelting nickel matte process

还原硫化熔炼镍锍的原理为：炉料中的焦炭在鼓风炉内被热空气氧化产生 CO 和 $CO_2$，红土镍矿中的镍、铁等金属氧化物被 CO 还原为金属镍、铁，又被炉料中的黄铁矿、石膏等硫化剂硫化反应生成硫化镍、硫化铁，这些金属硫化物的混合产物即为低镍锍 [10]。

还原硫化熔炼镍锍工艺具有工艺成熟，设备成本低，操作简单，镍产品形式多样等优点，但存在能耗高，特别是煤粉消耗量大，对环境影响大 [11-12]，鼓风炉排出的烟气需要治理，镍收得率比较低等不足之处 [13]。

### 1.2　回转窑干燥预还原 - 电炉熔炼工艺

回转窑干燥预还原 - 电炉熔炼工艺（RKEF）是目前世界上应用最广泛的火法冶炼红土镍矿工艺方法。采用此方法的中国企业见表 1。

**表 1　采用 RKEF 工艺的一些企业** [14-15]

Table 1　Some companies adopting RKEF process

| 企业名称 | 地点 | 镍铁品位 /% | 生产规模 /（万吨 / 年） |
|---|---|---|---|
| 达贡山冶炼厂 | 缅甸 | 26 | 8.5 |
| 福建盛德镍业公司 | 福建罗源县 | 5、25 | 70 |
| 福建鼎信镍业有限公司 | 福建福安市 | >10 | 30 |
| 福建通海镍业公司 | 福建三明市 | >10 | 10 ～ 14 |
| 中宝滨海镍业公司 | 河北滨海黄骅港 | 25 | 8 |
| 广东广青金属科技公司 | 广东阳江 | 12 | 36 |

该方法的生产过程为：将红土镍矿破碎筛分至粒度范围为 50 ～ 150 mm，送入回转窑干燥预还原得到焙砂，焙砂配加还原剂装入电炉还原熔炼获得含镍＞ 8% 的粗镍铁，再经转炉进一步吹炼可生产出含镍＞ 25% 的高品位镍铁，可用于生产不锈钢 [14]。其工艺流程见图 2。

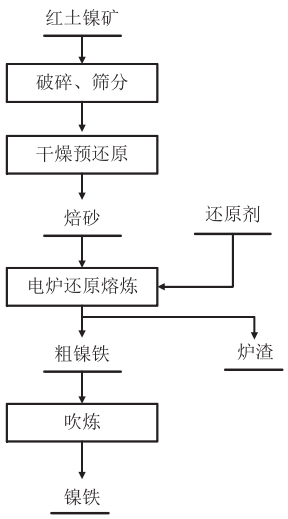


**图 2　回转窑干燥预还原 - 电炉熔炼工艺流程**

Fig .2　Flow diagram of RKEF reduction smelting process

回转窑干燥预还原 - 电炉熔炼工艺（RKEF）是目前生产镍铁合金的主要工艺 [16]，该方法具有设备简单，工艺流程短，生产效率高等优点，但仍存在以下问题需要解决或优化 [17-18]：（1）回转窑结圈严重，维修成本高；（2）能耗高，渣量大，要求当地有充沛的燃料或电力；（3）无法回收红土镍矿中的钴，适用于钴含量小于 0.05% 的红土镍矿；（4）红土镍矿中镍的含量对该工艺的生产成本影响很大，适合冶炼含镍量大于 2% 的矿石。

### 1.3　还原焙烧 - 磁选工艺

还原焙烧 - 磁选工艺又被称为回转窑直接还原工艺，目前世界上采用此工艺方法的企业只有日本大江山冶炼厂 [14]。该工艺流程为红土镍矿破

万方数据

碎磨细，配加煤粉和石灰石熔剂混匀压制成为含碳球团，送入回转窑经过干燥和还原焙烧后磨细，矿浆经过重选和磁选等处理即可获得镍铁合金[18]。其工艺流程见图 3。

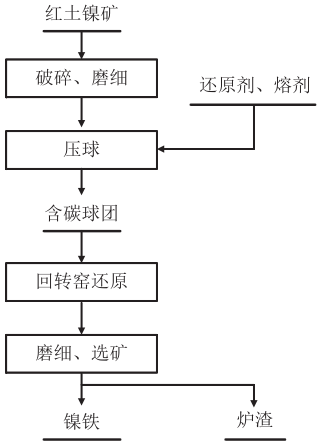


**图 3　还原焙烧 - 磁选工艺流程**

Fig .3　Flow diagram of reduction roasting magnetic separation process

还原焙烧 - 磁选工艺的优势在于能耗小，生产成本比较低[18]，但是也存在回转窑内还原难以控制，操作难度大，磁选参数不易控制等问题，生产规模仍停留在年产镍量大约 1 万 t。

### 1.4　转底炉直接还原 - 熔分炉冶炼工艺

转底炉最开始是应用于轧钢厂的环形加热炉，随后被钢铁厂用于处理含铁尘泥及固体废弃物，再后来被美国、日本、德国等国家用于直接还原铁矿石。转底炉的环形炉膛是固定的，炉膛布置有多组燃气烧嘴，用于控制转底炉内不同区域的温度和气氛；转底炉的炉底是旋转的，需要还原处理的含碳球团炉料被上料系统铺在炉底，炉料随着炉底旋转，经过转底炉内不同区域的还原温度和气氛，最终转变为金属化球团。转底炉直接还原 - 熔分炉冶炼工艺处理红土镍矿工艺主要流程为：红土镍矿破碎筛分磨细，加入还原剂（煤粉）和熔剂（石灰石）混匀，使用圆盘造球机或对辊压球机制备含碳球团，含碳球团送入转底炉直接还原后成为金属化球团，金属化球团送入熔分炉熔炼，使渣铁分离，获得镍铁合金。其工艺流程见图 4。

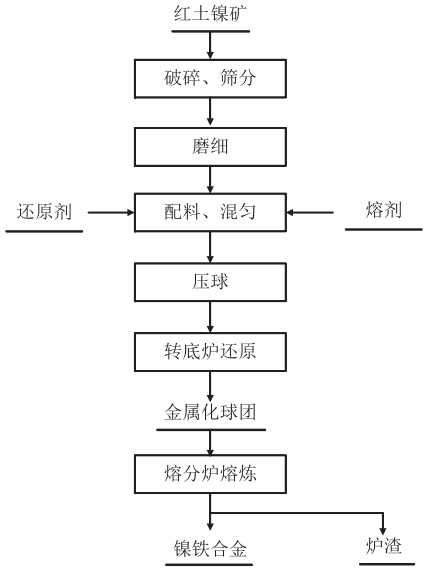


**图 4　转底炉直接还原 - 熔分炉冶炼工艺流程**

Fig .4　Flow diagram of rotary hearth furnace reduction-melting furnace smelting process

转底炉直接还原 - 熔分炉冶炼工艺的优势在于以煤制气或天然气为燃料，采用非焦煤作为还原剂，对原、燃料的适应范围广泛；工艺流程和冶炼周期短，生产效率高；生产过程容易控制，运行比较稳定；转底炉还原后的含碳球团被直接热装热送入熔分炉内，避免了含碳球团冷却造成的热量浪费，能耗低，对环境影响小；设备费用小，生产成本低[18]。但是也存在转底炉热效率低，对球团的强度要求高等需要改善的不足。

根据上述分析，对不同红土镍矿火法冶炼工艺的优缺点进行对比，结果见表 2。

**表 2　不同红土镍矿火法冶炼工艺的优缺点对比**[15]

Table 2　Comparison of different pyrometallurgy process

| 工艺类型 | 优点 | 缺点 |
|---|---|---|
| 还原硫化熔炼镍锍工艺 | 工艺成熟，操作简单，产品形式灵活 | 镍回收率低，能耗高，污染大 |
| 回转窑 - 电炉冶炼镍铁工艺 | 工艺成熟，设备简单，生产高效 | 能耗高，渣量大，冶炼温度高，存在粉尘污染 |
| 还原焙烧 - 磁选工艺 | 生产成本低，能耗低 | 回转窑结圈，还原度控制难，磁选参数不易控制 |
| 转底炉直接还原 - 熔分炉冶炼工艺 | 能耗低、原料适应性强、工艺流程短 | 热效率低、对球团强度要求高 |

万方数据

## 2 红土镍矿火法冶炼研究进展及前景

红土镍矿作为未来生产镍的主要原料，高效开发红土镍矿具有重要的现实意义。很多科研工作者对红土镍矿进行了深入研究。有的学者对焙烧过程或者干燥预处理过程中红土镍矿的矿物学特征进行了深入研究。徐玉棱等 [19] 对印度尼西亚红土镍矿焙烧过程中矿相转变进行了研究，发现红土镍矿在 300℃脱除结晶水形成赤铁矿，在 700℃蛇纹石分解产生无定形态硅镁酸盐。张钰婷等 [20] 对微波干燥后的红土镍矿进行了矿相分析，结果表明微波能够改变红土镍矿的微观结构，进一步的氢还原试验表明，经微波干燥处理后镍氧化物和铁氧化物还原率高于经常规干燥处理。刘志国等 [21] 对红土镍矿还原焙烧过程中 CaO 的作用机理进行了研究，发现 CaO 与硅酸盐矿物反应形成辉石，降低 NiO 与 $SiO_2$ 结合的概率。蒋曼等 [22] 采用选择性还原焙烧红土镍矿富集镍，并对红土镍矿微观结构和相变转化进行了分析，发现铁氧化物形成浮氏体相，硅酸盐以橄榄石形式存在。

有的学者对红土镍矿冶炼工艺条件优化进行了试验研究。朱德庆等 [23] 对低品位腐殖土型红土镍矿进行了还原 - 磁选试验研究，通过配加添加剂提高镍和铁回收效果，在添加剂质量分数为 14%，碱度为 0.2，还原温度为 1250℃，煤与矿质量比为 2.7，磨矿细度 -0.074 mm，磁选磁场强度为 131.34 kA/m 条件下，获得了镍和铁品位分别为 4.22% 和 69.75% 的精矿，镍和铁回收率分为达到 92.22% 和 85.73%。刘畅等 [24] 对适用于高镁型红土镍矿还原的渣系进行了分析，认为 MgO 含量为 21% ～ 22% 时，渣系的熔化温度较低，黏度适宜，熔炼试验结果显示渣中 NiO 含量低于 0.05%。揭晓武等 [25] 对残积型红土镍矿还原焙烧 - 磁选富集镍铁进行了试验研究，较佳工艺参数为：促进剂添加量为 5%，煤粉添加量为 7%，焙烧温度为 1200℃，焙烧时间为 150 min，获得了镍 7.32%，铁 73.85% 的精矿，镍回收率达到 93%，铁回收率达到 75%。

有的学者采用不同还原剂对红土镍矿还原进行了试验研究。胡志强等 [26] 采用 3 种不同的烟煤对红土镍矿还原焙烧进行了试验研究，发现固定碳含量相同时，挥发分越高，还原效果越好。蒋曼等 [27] 采用银坪石煤、宁夏褐煤、宁夏烟煤和云南褐煤等 4 种不同种类的煤粉作为还原剂对红土镍矿进行还原焙烧 - 磁选试验，结果发现 4 种煤粉中宁夏烟煤还原效果最好。张钰婷等 [28] 研究了氢气氮气混合气体对低品位红土镍矿还原效果，得到的最优试验条件为：还原温度为 850℃，还原时间为 40 min，氢气 65% 氮气 35% 混合气体，镍和铁的还原率分别达到 43% 和 62%。

有的学者对转底炉处理红土镍矿进行了研究。范兴祥等 [29] 研究了红土镍矿经转底炉预还原后进入电炉熔分制备镍铁合金的工艺，最优条件为：石灰质量分数为 25%，还原剂质量分数为 3.5%，预还原温度为 1150℃，预还原时间为 30 min，电炉熔分温度为 1450℃，熔分时间为 15 min，制备的镍铁合金中镍质量分数为 8.68%，铁质量分数为 86.23%，该工艺实现镍回收率达到 97.62%。胡长松 [30] 对转底炉直接还原 - 电炉熔炼工艺处理红土镍矿进行了中试试验，结果表明，石灰石配比为 6%，还原温度为 1300℃，配煤比为 1%，还原时间为 20 min，镍和铁回收率最高，分别为 81.76% 和 91.66%。在 1450℃熔炼后获得了镍 10.77%、铁 82.00% 的镍铁合金。马丁等 [31] 对转底炉处理红土镍矿工业实践进行了分析，详细介绍了转底炉系统的组成。李红科等 [32] 介绍了转底炉还原红土镍矿 - 铁浴炉冶炼镍铁合金工艺，并进行了工业实践。

最近两年新建转底炉数量不断增加，目前首钢京唐、上海宝钢等单位正在建设转底炉。随着转底炉应用越来越多，工艺参数不断优化提升，转底炉处理红土镍矿工艺的应用前景愈发光明。

## 3 结　语

（1）随着全球各国对镍需求量的不断增加，硫化镍矿资源日益枯竭，红土镍矿将成为生产镍的主要原料，高效开发利用红土镍矿成为众多科研工作者的研究焦点，综合利用红土镍矿对世界各国发展具有重要的现实意义。

（2）处理红土镍矿的工艺方法均需要考虑红土

万方数据

镍矿资源的特点、工艺流程、设备成本，建设周期、能耗大小、环境保护等因素。当前，还原硫化熔炼镍锍工艺和回转窑 - 电炉冶炼镍铁工艺均存在能耗高，污染严重的问题，还原焙烧 - 磁选工艺存在还原过程难以控制，生产规模难以扩大的不足，降低能耗，减轻污染，实现绿色生产是当下急需解决的问题。

（3）转底炉直接还原 - 熔分炉冶炼工艺处理红土镍矿，以煤制气或天热气作为能量来源，非焦煤作为还原剂与红土镍矿配矿，压制成含碳球团，送入转底炉还原后进入熔分炉熔炼生产镍铁合金。该工艺具有原料适应性强，操作简单，工艺流程短，设备成本低，生产过程容易控制，对环境影响小等优点，具有较好的发展前景。

## 参考文献：


[1] 李洋洋 , 李金辉 , 张云芳 , 等 . 红土镍矿的开发利用及相关研究现状 [J]. 材料导报 ,2015,29(17):79-83.

Li Y Y, Li J H, Zhang Y F, et al. Development and Utilization of Laterite Nickel Ore and Related Research Status [J]. Materials Review, 2015,29 (17) : 79-83.

[2] 杨志强 , 王永前 , 高谦 , 等 . 中国镍资源开发现状与可持续发展策略及其关键技术 [J]. 矿产保护与利用 ,2016(2):58-69.

Yang Z Q, Wang Y Q, Gao Q, et al. Present Situation and Development Strategy and Key Technologies of China Nickel Resources Sustainable Development [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2016 (2) : 58-69.

[3] 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 Y, Zhai Y C, Wang H. Research on Production Process of Nickel [J]. Materials Review, 2006 (3 ): 79-81,96.

[4] 赵昌明 , 翟玉春 . 从红土镍矿中回收镍的工艺研究进展 [J]. 材料导报 ,2009,23(11):73-76.

Zhao C M, Zhai Y C. Research Development on Nickel Recovery Technologies from Nickel-bearing Lateritel [J]. Materials Review, 2009,23 (11) : 73-76.

[5] 朱景和 . 世界镍红土矿资源开发与利用技术分析 [J]. 世界有色金属 ,2007(10):7-9,12.

Zhu J H. Exploration Laterite Nickel Ore and Analysis on Utilization Technology [J]. World Nonferrous Metals, 2007 (10) :7-9,12.

[6] 徐敏 , 许茜 , 刘日强 . 红土镍矿资源开发及工艺进展 [J]. 矿产综合利用 ,2009(3):28-30.

Xu M, Xu Q, Liu R Q. Exploration of Laterite Nickel Ore and Technology Advances [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2009 (3) : 28-30.

[7] 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 Y P, Zhou Y S, Li Z Y, et al. Characteristics of Laterite Resource and Analysis on Its Pyrometallurgy [J]. Ferro-alloys,2007 (6) : 18-21,40.

[8] 王成彦 , 尹飞 , 陈永强 , 等 . 国内外红土镍矿处理技术及进展 [J]. 中国有色金属学报 ,2008,18(6):1-8.

Wang C Y, Yin F, Chen Y Q, et al. Worldwide Processing Technologies and Progress of Nickel Laterites [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals,2008,18 (6) : 1-8.

[9] 及亚娜 , 孙体昌 , 蒋曼 . 红土镍矿提镍工艺进展 [J]. 矿产保护与利用 ,2011(2):43-49.

Ji Y N, Sun T C, Jiang M. Advance in Extraction of Nickel from Laterite Nickel Ore [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2011 (2) : 43-49.

[10] 李长玖 , 陈玉明 , 黄旭日 , 等 . 镍矿的处理工艺现状及进展 [J]. 矿产综合利用 ,2012(6):8-11.

Li C J, Chen Y M, Huang X R, et al. Present Situation and Development of Nickel Ore Processing Technology [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2012 (6) : 8-11.

[11]Kevin B. Hallberg, Barry M. Grail, Chris A. du Plessis, et al. Reductive dissolution of ferric iron minerals: A new approach for bio-processing nickel laterites [J]. Minerals Engineering,2011,24 (7) : 620-624.

[12]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.

[13] 刘继军 , 胡国荣 , 彭忠东 . 红土镍矿处理工艺的现状及发展方向 [J]. 稀有金属与硬质合金 ,2011,39(3):62-66.

Liu J J, Hu G R, Peng Z D. Latest and Future Development of Laterite Nickel Ore Processing Technology [J]. Rare Metals and Cemented Carbides,2011,39 (3) : 62-66.

[14] 张邦胜 , 蒋开喜 , 王海北 , 等 . 我国红土镍矿火法冶炼进展 [J]. 有色冶金设计与研究 ,2012,33(5):16-19.

Zhang B S, Jiang K X, Wang H B, et al. Progress of Pyrometallurgical Smelting Technologies for Laterite Nickel Ore in China [J]. Nonferrous Metals Engineering and Research,2012,33 (5) : 16-19.

[15] 李小明 , 白涛涛 , 赵俊学 , 等 . 红土镍矿冶炼工艺研究现状及进展 [J]. 材料导报 ,2014,28(5):112-116.

Li X M, Bai T T, Zhao J X, et al . Status and Progress of Metallurgical Technology on Laterite Nickel Ore [J]. Materials Review,2014,28 (5) : 112-116.

[16] 杨涛 , 李小明 , 赵俊学 , 等 . 红土镍矿处理工艺现状及研究进展 [J]. 有色金属 , 冶炼部分 ,2015(6):9-13.

Yang T, Li X M, Zhao J X, et al. Status and Research Progress


万方数据

of Laterite Nickel Ore [J]. Nonferrous Metals:Extractive Metallurgy,2015 (6) : 9-13.
[17] 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 A Z, Li H P. Analysis of Laterite Nickel Ore Smelting Process [J]. Modern Metallurgy,2013,41 (1) : 1-4.
[18] 刘毅 , 李波 , 王涛 . 红土矿镍铁冶炼技术进展分析 [J]. 四川冶金 ,2012,34(3):1-4,9.
Liu Y, Li B, Wang T. Analysis of Laterite Ore Fe-Ni Smelting Technology Progress [J]. Sichuan Metallurgy,2012,34 (3) : 1-4,9.
[19] 徐玉棱 , 郭曙强 , 卞玉洋 , 等 . 红土镍矿焙烧过程中的矿相转变及其对气体还原的影响 [J]. 上海大学学报 , 自然科学版 ,2014,20(6):694-700.
Xu Y L, Guo S Q, Bian Y Y, et al. Effect of Pre-roasting on Mineral Phase Transformations and Gas Reduction of Laterite Nickel Ore [J]. Journal of Shanghai University:Natural Science,2014,20 (6 ): 694-700.
[20] 张钰婷 , 张昭 , 袁熙志 , 等 . 低品位复杂红土镍矿微波干燥及矿相分析 [J]. 北京科技大学学报 ,2010,32(9):1119-1123.
Zhang Y T, Zhang Z, Yuan X Z, et al. Microwave Drying Process and Mineral Phase Analysis of Low-grade Complex Laterite Ore [J]. Journa of University of Science and Technology Beijing,2010,32 (9) : 1119-1123.
[21] 刘志国 , 孙体昌 , 蒋曼 , 等 .CaO 在红土镍矿直接还原焙烧中的作用机理 [J]. 中南大学学报 , 自然科学版 ,2015,46(10):3566-3572.
Liu Z G, Sun T C, Jiang M, et al. Mechanism of CaO in Direct Reduction Roasting of Laterite Nickel Ore [J]. Journa of Central South University:Science and Technology,2015,46 (10) : 3566-3572.
[22] 蒋曼 , 孙体昌 , 刘志国 , 等 . 红土镍矿选择性还原焙烧过程中的相变转化 [J]. 北京科技大学学报 ,2013,35(1):27-34.
Jiang M, Sun T C, Liu Z G, et al. Phase Transformation of Laterite Nickel Ore in the Selective Reduction Roasting Process [J]. Journa of University of Science and Technology Beijing,2013,35 (1) : 27-34.
[23] 朱德庆 , 郑国林 , 潘建 , 等 . 低品位红土镍矿制备镍精矿的试验研究 [J]. 中南大学学报 , 自然科学版 ,2013,44(1):1-7.
Zhu D Q, Zheng G L, Pan J, et al. Study of Producing Nickel Concentrate from Low-grade Laterite Ore [J]. Journa of Central South University:Science and Technology,2013,44 (1) : 1-7.
[24] 刘畅 , 郑少波 . 高镁型红土镍矿熔融还原冶炼渣型探究 [J]. 有色金属 , 冶炼部分 ,2017(7):11-15.
Liu C, Zheng S B. Study on Reduction Smelting Slag Type of High Magnesium-bearing Laterite Nickel Ore [J]. Nonferrous Metals:Extractive Metallurgy, 2017 (7) : 11-15.
[25] 揭晓武 , 王成彦 , 尹飞 , 等 . 残积型红土镍矿金属化还原焙烧 - 磁选高效回收镍铁 [J]. 有色金属 , 冶炼部分 ,2015(5):10-13.
Jie X W, Wang C Y, Yin F, et al. Recovery of Ferronickel from Eluvial Nickel Laterite Ore by Metallic Reduction Roasting and Magnetic Separation [J]. Nonferrous Metals:Extractive Metallurgy, 2015 (5) : 10-13.
[26] 胡志强 , 贾彦忠 , 梁德兰 , 等 . 不同烟煤还原红土镍矿的研究 [J]. 矿冶工程 ,2015,35(2):120-123.
Hu Z Q, Jia Y Z, Liang D L, et al. Effect of different Bitumite on Reduction of Laterite Nickel Ore [J]. Mining and Metallurgical Engineering,2015,35 (2) : 120-123.
[27] 蒋曼 , 孙体昌 , 刘志国 , 等 . 煤种类及添加剂对红土镍矿选择性直接还原的影响规律 [J]. 矿冶工程 ,2012,32(5):77-81.
Jiang M, Sun T C, Liu Z G, et al. Effects of Coal Types and Additives on Selective Direct Reduction of Laterite Nickel Ore [J]. Mining and Metallurgical Engineering,2012,32 (5) : 77-81.
[28] 张钰婷 , 张昭 , 袁熙志 , 等 . 低品位红土镍矿的直接氢还原试验研究 [J]. 四川大学学报 : 工程科学版 ,2011,43(2):172-176.
Zhang Y T, Zhang Z, Yuan X Z, et al. Study on Direct Hydrogen Reduction Experiment of Low-grade Laterite Nickel Ore [J]. Journa of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011,43 (2) : 172-176.
[29] 范兴祥 , 董海刚 , 汪云华 , 等 . 红土镍矿转底炉预还原 - 电炉熔分制取镍铁合金 [J]. 中南大学学报 , 自然科学版 ,2012,43(9):3344-3348.
Fan X X, Dong H G, Wang Y H, et al. Production of Ni-Fe Alloy from Laterite Nickel Ore by Prereduction-electric Furnace Smelting Separation [J]. Journa of Central South University: Science and Technology,2012,43 (9 ): 3344-3348.
[30] 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 Laterite Nickel Ore Treatment with Rotary Hearth Furnace [J]. China Nonferrous Metallurgy,2014,43 (2) : 74-78.
[31] 马丁 , 季爱兵 , 李智 , 等 . 转底炉法处理印尼红土镍矿工艺实践 [J]. 现代冶金 ,2015,43(3):9-11.
Ma D, Ji A B, Li Z, et al. Process Practice of Indonesian Laterite Nickel Ore Treatment by Rotary Hearth Furnace [J]. Modern Metallurgy,2015,43 (3) : 9-11.
[32] 李红科 , 王静静 , 宋文臣 , 等 . 转底炉还原红土镍矿工艺设计与实践 [J]. 工业加热 ,2016,45(3):27-29,41.
Li H K, Wang J J, Song W C, et al. Process Design and Practice on Reducting Laterite Nickel Ore with Rotary Hearth Furnace [J]. Industrial heating,2016,45 (3) : 27-29,41.

（下转 93 页）

万方数据

chalcopyrite under different metallogenic conditions [J]. Rare metals, 2012 (4) : 13-18.
[2] 尹升华 , 吴爱祥 , 王洪江 , 等 . 微生物浸出低品位矿石技术现状和发展趋势 [J]. 矿业研究与开发，2010(1)：23-26.
Yin S H, Wu A X, Wang H J, et al. Current situation and development trend of microbial leaching of low-grade ore [J]. Mining research and development, 2010 (1) : 23-26.
[3] 莫晓兰 , 林海 , 傅开冰 , 等 . 黄铁矿促进黄铜矿微生物浸出影响因素 [J]. 北京科技大学学报，2012(7)：21-24.
Mo X L, Lin H, Fu L B, et al. Factors affecting the microbial leaching of chalcopyrite from pyrite [J]. Journal of university of science and technology Beijing, 2012 (7) : 21-24.
[4] 董颖博 , 林海 . 低品位铜矿微生物浸出技术的研究进展 [J]. 金属矿山 ,2010(1)32-35.
Dong Y B, Lin H. Research progress of microbial leaching technology for low-grade copper mine [J]. Metal mine, 2010 (1) 32-35.
[5] 刘媛媛 , 杨洪英 , 陈国宝 , 等 . 难处理低品位铜钴矿的微生物浸出 [J]. 材料与冶金学报，2016(2)：20-24.
Liu Y Y, Yang H Y, Chen G B, et al. Microbial leaching of refractory low-grade copper and cobalt ore [J]. Acta materologica sinica, 2016 (2) : 20-24.
[6] 尹升华 , 吴爱祥 , 苏永定 , 等 . 低品位矿石微生物浸出作用机理研究 [J]. 矿冶，2006(2)：21-24.
Yin S H, Wu A X, Su Y D, et al. Mechanism of microbial leaching of low grade ore [J]. Mineral metallurgy, 2006 (2) : 21-24.

## Experimental Study on the Hornfels Ore's Microbiological Leaching in Jiama Region

Liu Mingshi, Wan Xuanzhi, Liu Zilong, Zhang Jingang, Wang Lihui, Fu Yong, Pang Junwu, Dawa Zhuoma, Hu Qixu, Liu Xiaomeng, Zhao Hucheng
(China Gold Group Xizang Huatailong Mining Co.,Ltd., Lhasa, Tibet, China)

**Abstract:** This paper introduces the ore characteristics of Tibet Huatailong Mining Co.Ltd.'s hornfels ore. A detailed study of microbial leaching test was carried on the the low grade copper ore . Under the condition that the ore grade of copper is only 0.12% and the $SiO_2$ content of raw was 69.12%, when the bacteria's inoculated dose was 10%, the copper leaching recovery was 34.44%, the leaching time is 1h and the copper leaching recovery was 70.02% in the 11d of leaching time.The copper leaching recovery was higher 17.46 percent point than in the asepsis.

**Keywords:** Low- grade copper ore; Microbiological leaching

（上接 83 页）

## Status and Progress in Pyrometallurgy Processes of a Laterite Nickel Ore

Wu Bingqiang[1,2], Qi Yuanhong[1,3], Zhou Hemin[1,3], Hong Lukuo[1], Zou Zongshu[2]
(1. State Key Laboratory of Advanced Steel Processes and Products, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing, China; 2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang, Liaoning, China; 3.Research and Development Department, CISRI Sunward Technology Co., Ltd., Beijing, China)

**Abstract:** With the depletion of nickel sulphide ore resources, it is of immediate significance for efficient utilization of laterite nickel ore to meet the growing demand for nickel. Status of pyrometallurgy processes, including reduction-sulfuration smelting nickel matte process, rotary kiln dry-electric furnace reduction smelting ferronickel process, and reduction roasting magnetic separation process, was summarized in this paper, and the advantages and disadvantages of these processes were compared. Research progress on comprehensive utilization of laterite nickel ore was introduced. It is believed that the rotary hearth furnace reduction-melting furnace smelting process has a bright future. These analyses provide reference for the efficient utilization of laterite nickel ore resources.

**Keywords:** Laterite nickel ore; Pyrometallurgy; Process; Progress

万方数据