



# 镍矿湿法冶金技术应用进展及研究展望

孙建之, 陈勃伟, 温建康, 王淀佐

(北京有色金属研究总院 生物冶金国家工程实验室, 北京 100088)

**摘要:** 介绍了世界上镍资源的分布、开发利用现状, 提出高镁是镍资源综合利用的一个瓶颈问题, 阐述了还原焙烧-氨浸、高压酸浸、常压酸浸、堆浸等氧化镍矿湿法冶金处理工艺的基本流程、优缺点与应用前景, 总结了氧化镍矿、硫化镍矿生物冶金技术的研究应用情况, 指出非常规体系生物浸出是解决高镁问题的一个方向。展望了高镁型镍矿处理工艺的发展方向, 其中常压酸浸、生物浸出技术为研究热点。

**关键词:** 高镁型镍矿; 硫化镍矿; 氧化镍矿; 湿法冶金; 生物冶金

文章编号: 1004-0609(2018)-02-0356-09

中图分类号: TF815

文献标志码: A

## 1 国内外镍矿资源分布及开发利用现状

镍矿床有岩浆硫化镍矿床、热液砷镍矿床、红土型镍矿床以及沉积型镍矿床, 现今具有经济意义的矿床为岩浆硫化镍矿床和红土型镍矿床<sup>[1]</sup>。全球镍矿总储量大约在 231 亿 t, 其中硫化镍矿储量约为 105 亿 t, 平均品位为 0.58%, 镍金属量约为 6200 万 t, 约占全部镍资源含量的 28%(质量分数, 下同); 氧化镍矿储量约为 126 亿 t, 平均品位为 1.28%, 镍金属量约为 1.6 亿 t, 约占全部镍资源含量的 72%<sup>[2]</sup>。

全球镍矿资源主要集中分布在新喀里多尼亚、澳大利亚、俄罗斯、印度尼西亚、菲律宾。按照镁含量的高低可将镍矿分为 3 类, 其中低镁镍矿镁含量在 3% 以下, 中等镁含量的镍矿镁含量为 3%~9%, 高镁镍矿镁含量在 9% 以上。多数硫化镍矿镁含量较高, 如西澳的 Kambald、津巴布韦的丹巴、加拿大的 Langmuir 等属于与超镁铁质熔岩流有关的矿床, MgO 含量在 15% 以上, 有时可高达 40%; 西澳的阿格纽、凯斯山和福利斯坦尼亚等属于与超镁铁质侵入体有关的矿床, 岩石含 MgO 很高, 可达 45%<sup>[3]</sup>, 我国的金川铜镍硫化矿是全国最大的镍矿床, 镍储量占全国的 68.5%,

其脉石中 MgO 含量高达 30%~35%<sup>[4]</sup>。氧化镍矿床为含镍橄榄岩在热带或亚热带地区经过大规模的长期风化淋滤变质而成, 氧化镍矿带主要有新喀里多尼亚镍矿带、澳大利亚昆士兰镍矿带、古巴奥连特镍矿带以及菲律宾巴拉望地区镍矿带等<sup>[1]</sup>。一般而言, 氧化镍矿可采部分分为 3 层: 褐铁矿层、过渡层、腐殖层。其中褐铁矿层 MgO 含量为 0.5%~5%, 过渡层 MgO 含量为 5%~15%, 腐殖层 MgO 含量为 15%~35%<sup>[5]</sup>。

对镍资源的利用起于硫化镍矿, 经过多年的工业实践形成了一套成熟的选矿、冶炼工艺。氧化镍矿开发呈逐年上升趋势, 目前, 世界上的镍产品来自于硫化镍矿和氧化镍矿的各占一半左右, 氧化镍矿略多一些<sup>[2]</sup>。硫化镍矿的处理工艺为原矿经浮选后火法冶炼, 冶炼炉 70% 为闪速炉, 其余 30% 为电炉<sup>[6]</sup>, 电炉的缺点为耗电量大, 成本高, 闪速炉则对入料 MgO 含量有很高的要求。氧化镍矿处理工艺分为镍铁工艺和镍钨工艺, 两者均存在着成本过高、污染严重的问题。与火法冶金相比, 湿法冶金工艺具有清洁、绿色、低排放、低能耗等优点, 在镍矿的应用中前景广阔。硫化镍矿处理工艺技术成熟, 且多伴生有具有较大经济价值的铜以及铂族金属, 因而在一段时间内硫化镍矿的开采利用仍占据着很重要的地位。氧化镍矿中主要有价金属为镍和钴, 利润空间较小, 但湿法冶金工艺的日渐成熟促进了氧化镍矿的开采。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51404033)

收稿日期: 2016-11-02; 修订日期: 2017-04-04

通信作者: 温建康, 教授级高级工程师; 电话: 010-82241313; E-mail: kang3412@126.com

## 2 镍矿湿法冶金技术研究应用进展

20世纪50年代以来, 湿法冶金开始应用于镍矿, 主要的工艺有还原焙烧-氨浸工艺、硫酸(硫酸铵)焙烧-水浸工艺、高压酸浸工艺、常压酸浸工艺、堆浸工艺、氯化离析工艺、微波浸出工艺、生物浸出工艺等, 各工艺特点详见表1。

### 2.1 还原焙烧-氨浸工艺

还原焙烧-氨浸工艺是一种火法湿法联合工艺流程, 该工艺能够处理 MgO 含量大于 10% 的氧化镍矿。其原理为控制还原条件, 使大部分镍还原成金属镍而铁仅被还原成  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , 之后用  $\text{NH}_3$  及  $\text{CO}_2$  将还原产物中的镍、钴转化成镍氨和钴氨络合物进入溶液, 部分铁进入溶液后氧化水解沉淀。该方法的一个主要优点

是试剂可以循环利用, 节约成本, 最大的问题是镍钴回收率较低, 尤其在铁水解沉淀过程中钴损失较大, 因而不适用于钴含量较高的原矿<sup>[7]</sup>。较差的适用性使其应用前景暗淡, 目前, 世界上采用 Carnon 法的镍处理厂主要在菲律宾、澳大利亚、古巴, 均为建成多年的老厂, 新建的氧化镍矿处理厂鲜见采用氨浸工艺。国内对于该法的研究也较少, 尹飞等<sup>[8]</sup>采用该方法从一低品位氧化镍矿中综合提取镍钴铁, 实验室条件下确定了最佳的工艺参数, 综合实验的镍钴浸出率分别为 89.87% 和 62.20%。在相关研究的基础上, 青海元石山镍铁矿采用氨浸工艺处理低品位难处理氧化镍矿, 该项目于 2008 年夏竣工, 由于技术和环境条件, 经过一年的调试后投入生产, 又经过一年才达到稳定生产<sup>[9]</sup>。

氧化焙烧-硫酸化焙烧-水浸工艺同样为火法湿法联合工艺, 与还原焙烧不同, 该工艺流程主要为氧化焙烧后加入浓硫酸熟化, 最后按一定液固比水

表1 几种镍矿湿法冶金工艺

Table1 Several kinds of nickel hydrometallurgy process

Technology	Application condition	Reaction condition	Leaching rate	Advantage	Disadvantage	Application case
High pressure acid leaching	$w(\text{Ni}) \geq 1.3\%$ $w(\text{Mg}) \leq 10\%$	250–270 °C, 4–5 MPa, strong acid	$w(\text{Ni}) \geq 95\%$ $w(\text{Co}) \geq 90\%$	High leaching rate, high reaction rate	Strict operation condition, high cost	Mauá, Cawse, Bulong, Murrin Murrin
Atmospheric-pressure acid leaching	Low iron, high magnesium	60–150 °C, atmospheric-pressure, strong acid	—	Simple technology, low cost	Long reaction time and low leaching rate, immature technology	Jiangxi Jiangli Sci-Tech Corp., Guangxi Yinyi Sci-Tech Corp.
Heap leaching	$w(\text{MgO}) \geq 15\%$	Normal pressure and temperature	$w(\text{Ni}) \leq 80\%$ $w(\text{Co}) \leq 60\%$	Low cost	Long reaction time and low leaching rate	Turkey Caldag, Yunnan Yuanjiang China
Ammonia leaching	$w(\text{Ni})$ : About 1%, $w(\text{MgO}) \geq 10\%$	Roasting at 600–700 °C, leaching at normal temperature	$w(\text{Ni})$ : 75%–80% $w(\text{Co})$ : 40%–50%	Recyclable leaching agent	Low leaching rate of Co	Philnico Industrial Corp., Nicaro Cuba, Yabulu Australia
Bioleaching	Low grade ores, gangues,	Normal pressure and temperature	$w(\text{Ni}) \leq 60\%$ $w(\text{Co}) \leq 50\%$	Eco-friendly, low cost	Long reaction time, low leaching rate, poor adaptable of microorganism	—
Sulfating roasting-water immersion	High iron, high magnesium	Roasting at 700 °C	$w(\text{Ni})$ : About 80% $w(\text{Co})$ : Unknow	Separation of Ni, Co, Fe	Unmanageable reaction process	—
Chloridizing segregation	—	Chloridizing in weak reducing, segregating at 900–1000 °C	$w(\text{Ni})$ : 80%–90% $w(\text{Co})$ : 50%–70%	Low leaching rate of Fe	Complex process, strict operation condition	—

浸<sup>[10]</sup>。该工艺主要针对于镍钼矿。针对硫酸化焙烧能耗高、腐蚀大的问题,有学者提出了硫酸铵焙烧-水浸工艺<sup>[11]</sup>,该工艺可以很好地抑制铁的溶出,并取得了较高的镍钴浸出率,不足之处是硫酸铵的用量较大。

## 2.2 高压酸浸工艺

与氨浸工艺相比,高压酸浸工艺的一个主要优点是钴的回收率较高,但当原矿 MgO 含量较高时会带来不必要的酸耗,增加成本。因而高压酸浸工艺适合于钴含量高、镁含量低于 10%(特别是低于 5%)的原矿。高压酸浸基本流程为:矿浆经加热达到 505~541 K 后泵入高压釜酸浸,釜中压力为 4~5 MPa,该反应条件下镍钴浸出率较高,铁浸出率较低,反应后降温调节 pH 至 2.6 左右,固液分离后溢流通入硫化氢,使镍钴以硫化物的形式沉淀。

高压酸浸工艺 20 世纪 50 年代率先在古巴 Moa 开始应用,经过多年的生产实践,证明是经济可行的;西澳的 Cawse、Bulong、Murrin Murrin 镍冶炼厂均采用高压酸浸法,虽然以上三厂自建成后受到多方面因素影响未能获得巨大成功,但建厂的主体工艺是可行的,因而该工艺被认为具有广阔的应用前景<sup>[12]</sup>。高压酸浸工艺存在的一个主要问题是反应条件恶劣,在低 pH、高温高压条件下,设备腐蚀损耗非常严重,维护费用高,对设备的制造材料提出了很高的要求。针对高压酸浸工艺存在的问题,学者们也提出了很多改进方案,JOHNSON 等<sup>[13-14]</sup>在对澳大利亚多处氧化镍矿进行酸浸实验时发现,在加酸量相同的情况下添加 NaCl 或 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 可以提高 Ni 的浸出率。

## 2.3 常压酸浸工艺

与高压酸浸工艺相比,常压酸浸工艺不需要高压反应釜,极大地节省了投资和运营成本。常压酸浸工艺浸出剂一般为硫酸或盐酸,硫酸应用较多,盐酸更适于浸出高镁腐殖土型红土矿。常压酸浸的工艺流程为:原矿经磨矿分级处理后与浸出剂按一定比例混合,在加热条件下浸出,浸出液经中和处理用 H<sub>2</sub>S 或 CaO 进行沉镍。常压酸浸可以处理易浸蛇纹石型氧化镍矿,但也存在酸耗大、大量含镁废水难处理的问题;低压浸出也会产生浸出率较低,渣品位过高等问题。BÜYÜKAKINCI 等<sup>[15]</sup>研究了绿脱石和褐铁矿型氧化镍矿的常压酸浸,镍均取得了较高的浸出率,但钴的浸出率较低,酸耗也较高,均在 700 kg/t 左右。

尽管常压酸浸存在着一些优势,但由于技术不成熟,国外鲜见采用常压酸浸工艺的镍处理厂。在国内,

江锂集团率先采用常压酸浸工艺处理镍红土矿,原矿进口自印度尼西亚,镁含量高达 12%,该厂采用硫铁矿制酸,目前在建废水硫酸镁提取工艺,计划年产 12 万 t 高纯氧化镁以及 68 万 t 二水硫酸钙。广西银亿科技矿冶有限公司采用常压酸浸法处理印尼氧化镍矿,该厂采用硫磺制酸,浸出液采用氢氧化钠沉镍,生产过程产生了大量硫酸镁废液,镁离子浓度在 25~40 g/L,为回收镁金属,采用恩菲公司设计的氨/铵沉镁工艺制取氢氧化镁和碱式碳酸镁。

此外还有一种两段酸浸工艺<sup>[16]</sup>,其主要流程为将一段浸出的富酸浸出液用高镁型镍矿中和(既可以用红土镍矿也可以用硫化镍矿),中和后的浸渣可以视其品位返回一段浸出,其主旨是既解决了低镁镍矿浸出液酸度过高的问题,又处理了部分高镁型镍矿。

## 2.4 堆浸工艺

堆浸是一种流程简单、成本低廉的工艺,最先应用在低品位铀矿和氧化铜矿中,近年来,开始有学者将其应用于氧化镍矿的浸出。刘三平等<sup>[17]</sup>将菲律宾某高镁型氧化镍矿进行预先分级,粒径大于 25 mm 粗粒矿石采用堆浸工艺,经过 142 d 的浸出后,镍累计浸出率达到 80%。童伟峰等<sup>[18]</sup>对澳大利亚某氧化镍矿采用两段逆流堆浸,总浸出时间为 76~86 d,镍的总浸出率为 80.28%。与上述工艺相比,堆浸工艺浸出率低,浸出时间长,不适合处理品位较高的原矿,此外堆浸工艺还存在着酸耗大、浸出液难处理等问题,这些都限制着堆浸工艺的推广应用。

自 2005 年起,欧洲镍业公司开始在土耳其 Caldag 建设氧化镍矿堆浸场,该厂年产 2000 t 金属镍,镍、钴的浸出率分别为 80%和 57%,铁的浸出率仅有 8%。我国云南元江镍矿是一种高镁型氧化镍矿, MgO 含量高达 28%且镍赋存状况极其复杂,为降低投资成本,曾建成年产 1000 t 电积镍的堆浸工艺流程。

# 3 镍矿生物冶金技术研究应用进展

## 3.1 氧化镍矿生物冶金技术研究现状

氧化镍矿生物冶金技术是在传统的生物冶金技术兴起后起步的,不同于硫化镍矿,氧化镍矿生物冶金所采用的浸矿菌种为真菌,其相应的浸矿机理也有一定的差异。目前,该技术处在初始研究阶段,其浸矿菌种、作用机理、工艺流程等仍需进行更深入的研究。

氧化镍矿生物冶金的浸矿机理分为机械破坏和化

学溶解两方面,机械破坏是指微生物的作用对矿石基质结构的破坏,是一种可视的宏观作用;化学溶解是指微生物代谢产物对矿物结构的破坏,主要包括酸解、络合、碱解、生物还原作用等,其中有机酸的酸解和络合作用至关重要<sup>[19]</sup>。GADD<sup>[20]</sup>认为真菌新陈代谢产生的草酸、柠檬酸、甲酸、乙酸、丙酮酸、乳酸等有机酸在浸矿过程中起到了主导作用,浸矿环境的pH值、盐度等条件对矿物的溶解影响很大。LIAN等<sup>[21]</sup>则采用透析膜对比烟曲霉菌与某矿物直接接触和间接接触时K<sup>+</sup>溶出量,结果表明直接接触下K<sup>+</sup>的溶出量为间接接触时的3倍。两者的结论验证了真菌生物浸出存在着有机酸的酸解作用以及生物大分子的络合作用,同样也表明真菌的生物浸出也存在着类似于直接作用和间接作用的作用机理。

氧化镍矿的浸矿菌种以青霉菌和烟曲霉菌为主。TZEFERIS等<sup>[22]</sup>分别采用青霉菌和曲霉菌分泌浸出低品位氧化镍矿,实验结果表明Ni在生物质中的损失可以达到3.5%~10.8%,这可能是由于真菌对金属离子的吸附作用导致。刘学等<sup>[23]</sup>分离得到了一株高效浸出氧化镍矿的黑曲霉菌,在不同酸浸对比实验中发现有机酸可以优先选择性浸出镍钴;生物浸出实验结果显示间接浸出具有较高的浸出率,这主要是由于真菌及其分泌物对镍钴金属离子具有一定的络合能力。VALIX等<sup>[24]</sup>对比了不同菌种的浸矿能力,发现黑曲霉菌对氧化镍矿的浸出率普遍高于青霉菌,而青霉菌则更有利于钴的浸出。很多学者致力于提高浸矿菌种的离子耐受能力,VALIX等<sup>[25]</sup>驯化了一株在NaCl浓度为 $5 \times 10^{-4}$ 下仍有较高生物活性的黑曲霉菌。SANTHIYA等<sup>[26]</sup>逐步提高了黑曲霉菌对金属离子的耐受性,最终黑曲霉菌可以同时耐受Ni<sup>2+</sup>、Mo<sup>2+</sup>、Al<sup>3+</sup>离子的浓度达到1、1.2和2g/L。

### 3.2 硫化镍矿生物冶金技术研究现状

#### 3.2.1 硫化镍矿常规生物冶金技术研究现状

镍黄铁矿为主要的产镍硫化矿物,其在酸性条件下可以自发分解<sup>[27]</sup>,因而硫化镍矿的生物浸出多存在着微生物和H<sup>+</sup>的双重作用。

镍离子对嗜酸菌的生长代谢具有抑制作用。嗜酸氧化硫硫杆菌对Ni<sup>2+</sup>极为敏感,当浓度达到293mg/L时即失去氧化硫元素的能力<sup>[28]</sup>,NOGAMI等<sup>[29]</sup>认为Ni<sup>2+</sup>在生物膜上同时阻碍两种酶的生成,这两种酶分别可以催化硫氧化为二氧化硫和亚硫酸氧化为硫酸。嗜酸氧化亚铁硫杆菌对Ni<sup>2+</sup>的耐受性较高,经过不断驯化,很多菌株对Ni<sup>2+</sup>的耐受性达到了20~30g/L。

在硫化镍矿微生物浸出中,也进行了其他耐受性的研究:温建康等<sup>[30]</sup>采用现代微生物驯化育种技术,选育了抗毒性强和适合浸出高砷硫低镍钴硫化矿的浸矿菌种,该菌在镍、钴、砷浓度为5、3和2.5g/L下亚铁氧化速率最快可达到1.4g/(L·h)。刘学等<sup>[31]</sup>分离得到一株在低温条件下仍具有铁氧化性能的菌种,低温条件下逐步驯化后该菌种耐受砷浓度达到4g/L,并在15℃时亚铁氧化速率可以达到1.2g/(L·h)。

GARCIA等<sup>[32]</sup>对某含镍黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、方黄铜矿的精矿样品分别采用*At. ferrooxidans*和*At. thiooxidans*进行生物浸出后发现,*At. ferrooxidans*作用下磁黄铁矿可以完全氧化,其他矿物仅部分氧化;*At. thiooxidans*作用下磁黄铁矿仅部分氧化而其他矿物却没有发生氧化。ZHANG等<sup>[33]</sup>对镍黄铁矿纯矿物进行生物浸出,结果显示微生物可以极大的促进镍黄铁矿浸出,且在浸出过程中,直接作用比间接作用更重要。

陈勃伟等<sup>[34]</sup>考察了接种量、初始pH、矿石粒度、浸出周期对某低品位硫化镍铜矿的生物浸出的影响。在矿石粒度<74μm占90%、矿浆浓度2%,细菌接种量30%、初始pH1.5、浸出周期30d、摇床转速150r/min的条件下,可获得最大的镍铜浸出率,分别为89.79%和41.80%。赵月峰等<sup>[35]</sup>研究某株极度嗜热菌浸出镍铜硫化矿精矿的工艺条件,结果表明:初始pH在1.2~1.6、低矿浆浓度、细矿石粒度有利于细菌浸出。在68℃,初始pH=1.6,接种量10%,矿浆浓度5%,4.5d后Ni、Cu的浸出率分别为99.78%和86.30%,添加酵母粉和硫酸铁实验表明两种物质均可强化镍铜的浸出。CHEN等<sup>[36]</sup>在对老挝某高镁铁硫化镍矿(Ni 0.21%,Mg 20.24%)生物浸出时发现:预酸化可以强化生物浸出的效果,但酸化过程中所需的加酸量仅为该矿理论酸耗的一半左右。

#### 3.2.2 硫化镍矿非常规生物冶金技术研究现状

常规的生物冶金技术需要在较低pH值下(≤2.5)进行,高镁型硫化镍矿在该条件下浸出会产生难以承受的酸耗成本,因而对于这种矿石,考虑在较高pH值下浸出以减少成本,本实验中将较高pH值(≥2.5)下的生物浸出技术称为非常规生物浸出技术,将较高浸出pH值(≥2.5)的体系称为非常规生物浸出体系。

不同的浸出体系对菌种有不同的要求。高镁型硫化镍矿生物浸出环境下浸矿微生物最重要的特点为耐高pH值的能力、耐高Mg<sup>2+</sup>的能力。PLUMB等<sup>[37]</sup>发现*At. thiooxidans*在pH在3.0、3.5时仍具有较高的硫氧化能力;*L. ferriphilum*在pH为3.0时亚铁氧化能力

也维持在较高的水平。MERUANE 等<sup>[38]</sup>认为 pH 过高影响 *At. ferrooxidans* 氧化  $Fe^{2+}$  能力的原因主要是  $Fe^{3+}$  形成沉淀后阻碍了细菌表面的传质过程, 实验得出了初始亚铁浓度为 1 g/L 时不同初始 pH 值条件下的亚铁氧化速率以及细菌浓度变化, 结果显示当 pH 在 5.0~7.0 之间, 亚铁的化学氧化作用要大于 *At. ferrooxidans* 菌的生物氧化作用, 当 pH 在 2.5~5.0 之间, 细菌的氧化作用要大于化学氧化作用。甄世杰等<sup>[39]</sup>经过近两年的驯化, 将一株细菌对  $Mg^{2+}$  的耐受能力由 10 g/L 提高到 30 g/L, 采用该菌株进行柱浸实验最终镍、钴的浸出率分别达到 91%、81%。

加拿大学者 Cameron 对硫化镍矿非常规生物浸出进行了初步的探究<sup>[40-43]</sup>, 对某高镁型硫化镍矿在 pH 为 2~6 下进行生物搅拌浸出, 发现在  $pH \leq 5$  时镍的浸出率均在 70% 以上, 而镁的浸出率在  $pH=2$  时为 70%, 当  $pH=5$  时仅为 10%; 对比不同镁含量的硫化镍矿在不同 pH 值下的浸出行为发现在  $pH=3$  时, 无论是否为高镁型硫化镍矿, 浸出酸耗均有明显下降, 有个别矿样浸出终了甚至出现产酸现象,  $pH=2$  和  $pH=3$  两种体系下 Ni 的浸出率无明显差距, 而  $pH=2$  时溶液中  $Fe^{3+}$ 、 $Mg^{2+}$  的浓度远高于  $pH=3$  时的, 可见在非正规体系下浸出可以实现在不影响镍浸出率的同时降低酸耗、降低浸出液后期处理难度; 不同温度下的浸出实验显示低温不利于镍的浸出, 但低温条件下 pH 越高镍浸出率越高。在对菌群群落结构进行分析后发现, 不同 pH 值( $pH$  为 3、4、5)菌群群落结构无明显差异。

### 3.3 硫化镍矿生物冶金技术应用现状

#### 3.3.1 硫化镍矿生物搅拌浸出应用现状

DEW 等<sup>[44]</sup>以 *Acidimicrobium*、*Sulfobacillus* 和 *At. caldus* 为主要浸矿细菌在 50 °C 下开展了针对镍精矿的生物搅拌浸出扩大试验, 结果显示磁黄铁矿和镍黄铁矿的生物浸出效果优先于黄铁矿的, 当采用最适温度为 68 °C、78 °C 的两种古菌时, 硫化物快速氧化, 在 68 °C 下浸出 4 d 后, 镍的浸出率为 98%。

荷兰 Mondo mineral 公司是世界第二大滑石生产商, 该公司在芬兰有两个矿山 Sotkamo 和 Vuonos。在滑石生产过程中会产生含镍钴砷的副产品: 一种为富镍浮选精矿(NFC: Ni 10.5%, Co 0.5%, Fe 35%, As 1.3%); 一种为富砷浮选精矿(GFC: Ni 14.3%, Co 2.7%, Fe 25.3%, As 15.4%), 采用生物搅拌浸出的方式回收其中的有价金属, 镍浸出率为 95%, 回收率为 93%。该生物搅拌浸出厂设计年处理精矿 1.2 万 t, 镍产量 1 kt。

澳大利亚 Cosmic Boy 浮选厂隶属于 Western area 公司, 年处理能力为 55 万 t, 每年产生大量浮选尾矿, 主要为红砷镍矿和辉砷镍矿。2009 年, Western area 收购了 BioHeap 公司后开始尝试采用生物浸出技术回收浮选尾矿中的镍, 在矿石粒度小于 150  $\mu m$  的占 80%, 在矿浆浓度 28% 的条件下, 搅拌浸出连续运行了 76 d, 镍的总回收率接近 90%。

#### 3.3.2 硫化镍矿生物堆浸应用现状

芬兰 Talvivaara 矿业公司<sup>[45]</sup>在芬兰东部拥有一座低品位硫化镍矿山(Ni 0.23%, Zn 0.51%, Cu 0.13%, Co 0.02%), 由于原矿品位过低, 采用常规选冶难以实现经济利用, 2005 年开始筑堆进行生物浸出, 原矿破碎后采用硫酸酸化至  $pH=1.8$ , 采用双堆浸出, 第一堆浸出镍钴, 浸出一年半后移至第二堆浸出铜钴, 堆内温度在 30~90 °C, 浸出液细菌浓度在  $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^8 / mL$ , 2006 年底第一堆镍钴铜的浸出率分别达到 94%、83%、14%、3%, 移堆后最终镍钴浸出率达到 100%, 钴和铜浸出率分别为 35% 和 22%<sup>[46-47]</sup>。该堆场 2012 年共产镍 12916 t, 锌 25867 t。

澳大利亚西部地区拥有丰富的硫化镍矿资源, 但原矿镍含量高达 20.10%, 镍仅有 0.68%。2009 年, 开始将生物堆浸技术应用在镍矿的生产中。最初堆浸浸出液 pH 值在 1.8~2.5 之间, 导致酸耗过高。FEWINGS 等<sup>[48]</sup>提出可以在较高 pH 值下进行生物堆浸。生物堆浸实验结果表明在一定范围内( $1.8 \leq pH \leq 3.5$ )pH 对镍的浸出率影响不大, 通过提高浸出液 pH 值可以明显降低酸耗。目前该矿正在进行工业应用试验。

云南墨江硫化镍钴矿属于含砷低品位镍矿床, 镍平均品位为 0.5%, 钴平均品位为 0.05%。北京有色金属研究总院针对墨江镍矿矿石性质开展了生物浸出实验室摇瓶小试和柱浸扩大试验。在实验室试验研究成果的基础上, 又进行了单堆矿石量分别为 2、4、10 和 20 kt 的工业试验, 常温浸矿菌(25~45 °C)和中等嗜热浸矿菌(45~60 °C)混合应用, 浸出周期 12 个月, 镍、钴浸出率均达到 70%<sup>[49]</sup>。

吉林白山镍钴铜矿位于中国吉林省白山市, 该矿含镍 0.18%、铜 0.169%、钴 0.058%、硫 0.52%、砷 0.07%。2007 年从该矿区酸性矿坑水中筛选到一株可在 15 °C 具有较高亚铁氧化性能的菌群。北京有色金属研究总院采用生物堆浸技术对该矿进行实验室小试和柱浸试验, 结果表明, 镍浸出率可达到 70% 以上。2010 年完成了万吨级矿石的生物堆浸试验, 矿石破碎至粒径小于 8 mm, 浸出周期 12 个月, 镍、钴的浸出率分别为 71.89%、72.41%; 到 2014 年, 共完成了约 6 万

t 矿石的生物堆浸工业试验。堆长 135 m, 宽 54 m, 高 5 m, 矿石粒度小于 20 mm。浸出 16 个月后, 镍、钴、铜浸出率分别为 79.18%、77.25%、46.93%<sup>[50]</sup>。

## 4 镍矿湿法冶金技术发展趋势

### 4.1 氧化镍矿湿法冶金技术发展趋势

近年来新建了许多氧化镍矿湿法工艺处理厂, 这得益于酸浸工艺的推广应用, 在未来一段时间内, 酸浸工艺仍将为主要的研究热点。加压酸浸工艺经过近 60 年的发展, 工艺技术逐渐成熟, 该工艺适用于低镁矿石, 应用于高镁矿石还需要进一步降低酸耗成本。高压酸浸工艺虽然技术成熟, 但工艺复杂, 前期的设备投资过高, 由于生产过程中高压反应釜以及排料管线结垢严重, 导致生产过程中需定期停产清理, 影响处理能力。为提高浸出率, 浸出液中大多含有过量的游离酸, 一般在 20~70 g/L 之间, 而弱酸性条件有利于浸出液的后续处理<sup>[51]</sup>, 妥善利用浸出液中过量的游离酸既可以降低酸耗成本也可以省去萃取工艺中浸出液的中和处理环节, 缩短工艺流程。

常压酸浸工艺目前正在逐渐推广, 研究人员希望在更温和的条件下取得良好的工艺指标, 但常压下采用硫酸浸出会造成大量铁溶出, 此外, 酸耗过高、浸出时间过长也影响了该工艺的应用。

还原焙烧-氨浸工艺已经十分成熟, 适用于处理表层的红土镍矿, 但该工艺钴的回收率较低, 虽然经过了多年的实验研究, 钴的回收率最高也仅在 60% 左右。由于在碱性条件下浸出, 该工艺在高镁型镍矿的处理中有一定的应用空间。

采用真菌产生有机酸浸出氧化镍矿不失为一种最大限度利用有价金属的好方法, 对该工艺而言, 寻找合适的有机碳源以及选育适应性强的浸矿菌种至关重要。在应用中, 具体的工艺条件和工艺流程均有待开发, 如何提高浸出速率也是一个亟待解决的问题。

堆浸工艺可以很好的处理低品位矿石, 在当前原矿品位逐渐降低的趋势下具有广阔的应用前景, 与生物冶金技术结合可以降低酸耗, 提高浸出率。

### 4.2 硫化镍矿湿法冶金技术发展趋势

传统的硫化镍矿处理技术均为火法冶金技术, 由于原矿产位的下降以及人们环保意识的日益提高, 生物冶金技术开始用于处理硫化镍矿。在未来的研究工作中, 选育稳定高效的浸矿菌种始终是重要的研究方向, 提高浸矿菌种对不同离子的耐受性也是菌种选育

工作的主要目的之一。浸出液的后续处理同样重要, 现今的处理方法主要有硫化沉淀和萃取, 两种工艺均需要进一步的完善。此外, 极端条件下生物浸出技术的研究也十分必要, 在低温、多雨、高原、低硫等极端条件下进行生物浸出均需要对菌种和工艺进行相应的调整。对于高镁型硫化镍矿, 已经有学者开始研究其在非常规体系下生物浸出的可行性, 包括微生物的在非常规体系下的生长代谢规律、硫化镍矿在非常规体系下的生物浸出机制以及非常规体系下浸出液中金属离子的变化规律等均是未来的研究方向。

## 5 结语

湿法冶金技术在镍矿中的应用越来越广, 其中以加压酸浸技术最为成熟, 常压酸浸技术可以很好的节省投资、运行成本, 但浸出率以及浸出效率仍有待进一步改善。堆浸技术在处理低品位镍矿中具有成本优势, 但大范围的推广还需要解决浸出周期过长以及浸出液后续处理的问题。还原焙烧-氨浸工艺可以处理高镁镍矿, 但由于该工艺成本较高、钴回收率较低, 其适用范围很窄。生物冶金技术在处理低品位镍矿方面具有广阔的应用前景。初步的研究工作显示, 对于高镁型硫化镍矿, 在非常规体系下生物浸出具有一定的可行性, 但仍需进行更深入的研究。

## REFERENCES

- [1] 陈浩琉. 镍矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1993.  
CHEN Hao-liu. Nickel deposit[M]. Beijing: Geology Publishing House, 1993.
- [2] 任杰. 海外矿产资源项目投资风险评估与实物期权研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014: 38-48.  
REN Jie. Research on risk Assessment and real option of overseas mineral resources project investment[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2014: 38-48.
- [3] 刘民武. 中国几个镍矿床的地球化学比较研究[D]. 西安: 西北大学, 2003: 7-9.  
LIU Min-wu. Geochemical comparison of several nickel deposits in China[D]. Xi'an: Northwest University, 2003: 7-9.
- [4] 胡显智. 高镁矿石酸浸降镁及浸出液综合利用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2002: 13-18.  
HUN Xian-zhi. Removal of Magesium oxide from high MgO Content ores using surfuric acid Leaching method and Comprehensive Utilization of the Leaching solution[D]. Kunming: Kuming University of Science and Technology, 2002: 13-18.

- [5] 赵景富, 孙 镇, 郑 鹏. 镍红土矿处理方法综述[J]. 有色矿冶, 2012, 28(6): 39-42.  
ZHAO Jing-fu, SUN Zhen, ZHENG Peng. Review: Processes for laterite-nickel ore[J]. Non-ferrous Mining and Metallurgy, 2012, 28(6): 39-42.
- [6] 肖安雄. 美国金属杂志对世界有色金属冶炼厂的调查(第四部): 硫化镍[J]. 中国有色冶金, 2008(6): 1-19.  
XIAO An-xiong. Investigation to smelters of American journals of metals (part IV): Nickel sulfides[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2008(6): 1-19.
- [7] 刘明宝, 印万忠. 中国硫化镍矿和红土镍矿资源现状及利用技术研究[J]. 有色金属工程, 2011(5): 25-28.  
LIU Ming-bao, YIN Wan-zhong. Research on resources and utilization of Chinese nickel sulfide and laterite[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2011(5): 25-28.
- [8] 尹 飞, 阮书锋, 江培海, 王成彦, 陈永强. 低品位红土镍矿还原焙砂氨浸试验研究[J]. 矿冶, 2007(3): 29-32+4.  
YIN Fei, RUAN Shu-feng, JIANG Pei-hai, WANG Cheng-yan, CHEN Yong-qiang. Experimental study on roasted ore of poor nickeliferous laterite ore with ammonia leaching technology[J]. Mining & Metallurgy, 2007(3): 29-32+4.
- [9] 阮书锋, 王成彦, 尹飞, 陈永强, 王 军, 揭晓武. 青海元石山镍铁矿综合利用项目设计[J]. 有色金属工程, 2015(1): 41-45.  
RUAN Shu-feng, WANG Cheng-yan, YIN Fei, CHEN Yong-qiang, WANG Jun, JIE Xiao-wu. Project design of comprehensive utilization of nickel laterite from Yuanshishan in Qinghai[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2015(1): 41-45.
- [10] 彭 俊, 王学文, 王明玉, 肖彩霞, 施丽华. 从镍钼矿中提取镍钼的工艺[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(2): 553-559.  
PENG Jun, WANG Xue-wen, WANG Ming-yu, XIAO Cai-xia, SHI Li-hua. Extraction process of molybdenum and nickel from Ni-Mo ore[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(2): 553-559.
- [11] 张云芳, 李金辉, 高 岩, 陈志峰, 廖春发. 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 Yun-fang, LI Jin-hui, GAO Yan, CHEN Zhi-feng, LIAO Chun-fa. Roasting process of nickel laterite using ammonium sulfate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(1): 155-161.
- [12] 王成彦, 尹 飞, 陈永强, 王 忠, 王 军. 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(S1): s1-s8.  
WANG Cheng-yan, YIN Fei, CHEN Yong-qiang, WANG Zhong, WANG Jun. Worldwide processing technologies and progress of nickel laterites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(S1): s1-s8.
- [13] JOHNSON J A, MCDONALD R G, MUIR D M, TRANNE D P. Pressure acid leaching of arid region nickel laterite ore[J]. Hydrometallurgy, 2005, 78(3): 264-270.
- [14] JOHNSON J A, CASHMORE B C, HOCKRIDGE R J. Optimisation of nickel extraction from laterite ores by high pressure acid leaching with addition of sodium sulphate[J]. Minerals Engineering, 2005, 18: 1297-1303.
- [15] BÜYÜKAKINCI E, TOPKAYA Y A. Extraction of nickel from lateritic ores at atmospheric pressure with agitation leaching[J]. Hydrometallurgy, 2009, 97(1/2): 33-38.
- [16] ARROYO J C, NEUDORF D A. Atmospheric leach process for the recovery of nickel and cobalt from limonite and saprolite ores: the United States, US6680035B2[P]. 2001-07-17.
- [17] 刘三平, 王海北, 张 磊, 邹小平. 红土镍矿堆浸/搅拌浸出结合工艺中试研究[J]. 矿冶工程, 2014(5): 97-99, 104.  
LIU San-ping, WANG Hai-bei, ZHANG Lei, ZOU Xiao-ping. Pilot study on a combined process of heap leaching and atmospheric tank leaching for nickel laterites[J]. Mineral and Metallurgical Engineering, 2014(5): 97-99, 104.
- [18] 童伟锋, 汪云华, 吴晓峰, 范兴祥. 红土镍矿堆浸试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2012(6): 4-6.  
TONG Wei-feng, WANG Yun-hua, WU Xiao-feng, FAN Xing-xiang. Experimental study on heap leaching of nickel laterite[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2012(6): 4-6.
- [19] 董发勤, 徐龙华, 代群威, 谌 书, 刘明学. 微生物浸出低品位氧化物型镍钴矿研究新进展[J]. 地球与环境, 2013(4): 358-363.  
DONG Fa-qin, XU Long-hua, DAI Qun-wei, SHEN Shu, LIU Ming-xue. New progress in investigation on bioleaching of low-grade nickel-cobalt oxidized ore[J]. Earth and Environment, 2013(4): 358-363.
- [20] GADD G M. Geomycology: Biogeochemical transformations of rocks, minerals, metals and radionuclides by fungi, bioweathering and bioremediation[J]. Mycological Research, 2007, 111(1): 3-49.
- [21] LIAN Bin, WANG Bin, PAN Mu, LIU Cong-qiang, TENG H H. Microbial release of potassium from K-bearing minerals by thermophilic fungus *Aspergillus fumigatus*[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72(1): 87-98.
- [22] TZEFERIS P G, AGATZINI S, NERANTZIS E T. Mineral leaching of non-sulphide nickel ores using heterotrophic micro-organisms[J]. Letters in Applied Microbiology, 1994, 18(4): 209-213.
- [23] 刘 学, 温建康, 阮仁满. 真菌衍生有机酸浸出低品位氧化镍矿[J]. 稀有金属, 2006, 30(4): 490-493.  
LIU Xue, WEN Jian-kang, RUAN Ren-man. Leaching of nickel and cobalt from low-grade lateritic nickel ores using organic acids produced by fungus *Aspergillus niger*[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30(4): 490-493.
- [24] VALIX M, USAI F, MALIK R. Fungal bio-leaching of low grade laterite ores[J]. Minerals Engineering, 2001, 14(2): 197-203.
- [25] VALIX M, THANGAVELU V, RYAN D, TANG J. Using

- halotolerant *Aspergillus foetidus* in bioleaching nickel laterite ore[J]. International Journal of Environment and Waste Management, 2009, 3(3/4): 253–264.
- [26] SANTHIYA D, TING Y P. Use of adapted *Aspergillus niger* in the bioleaching of spent refinery processing catalyst[J]. Journal of Biotechnology, 2006, 121(1): 62–74.
- [27] WATLING H R. The bioleaching of nickel-copper sulfides[J]. Hydrometallurgy, 2008, 91(1/4): 70–88.
- [28] MAEDA T, NEGISHI A, NOGAMI Y, SUGIO T. Nickel inhibition of the growth of a sulfur-oxidizing bacterium isolated from corroded concrete[J]. Bioscience, Biotechnology and Biochemistry, 1996, 60(4): 626–629.
- [29] NOGAMI Y, MAEDA T, NEGISHI A, SUGIO T. Inhibition of sulfur oxidizing activity by nickel ion in *Thiobacillus thiooxidans* NB1–3 isolated from the corroded concrete[J]. Bioscience, Biotechnology and Biochemistry, 1997, 61(8): 1373–1375.
- [30] 温建康, 阮仁满. 高砷硫低镍钴硫化矿浸矿菌的选育与生物浸出研究[J]. 稀有金属, 2007(4): 537–542.  
WEN Jian-kang, RUAN Ren-man. Selection of bioleaching bacteria and bioleaching of high arsenic/sulfur, low-grade nickel/cobalt sulfide ore[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2007(4): 537–542.
- [31] 刘学, 宋永胜, 温建康. 含砷复杂硫化镍矿低温生物浸出行为研究[J]. 稀有金属, 2014(6): 1127–1133.  
LIU Xue, SONG Yong-sheng, WEN Jian-kang. Dissolution behavior of arsenic-bearing complex nickel sulfide ores at low-temperature by bacteria leaching[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2014(6): 1127–1133.
- [32] GARCIA O, BIGHAM J M, MORETTO R, TUOVINEN O H. Products of oxidative dissolution of a complex sulfide mineral system by *Thiobacillus ferrooxidans* and *Thiobacillus thiooxidans*[C]// Proceedings IBS 97–Biome 97 (Sydney) Australian Mineral Foundation Glenside. Australia: Mineral Foundation, 1997: M7.2.1–M7.2.9.
- [33] ZHANG Guang-ji, FANG Zhao-heng. The contribution of direct and indirect actions in bioleaching of pentlandite[J]. Hydrometallurgy, 2005, 80(1/2): 59–66.
- [34] 陈勃伟, 刘爽, 刘兴宇, 温建康. 低品位硫化镍铜矿生物浸出工艺研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2011(1): 2–4, 8.  
CHEN Bo-wei, LIU Shuang, LIU Xing-yu, WEN Jian-kang. Study on bioleaching process of low-grade nickel and copper sulfide ore[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2011(1): 2–4, 8.
- [35] 赵月峰, 方兆珩. 极度嗜热菌 *Acidianus brierleyi* 浸出镍铜硫化矿精矿[J]. 过程工程学报, 2003(2): 161–164.  
ZHAO Yue-feng, FANG Zhao-hang. Bioleaching of Ni-Cu sulfide with acidophilic thermophile *Acidianus brierleyi*[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2003(2): 161–164.
- [36] CHEN Bo-wei, CAI Liao-lu, WU Biao, LIU Xue, WEN Jian-kang. Investigation of bioleaching of a low grade nickel-cobalt-copper sulfide ore with high magnesium as olivine and serpentine from Lao[C]// HU X, KINTAKLAU A. Integration of Scientific and Industrial Knowledge on Biohydrometallurgy. Switzerland: Trans Tech Publ, 2013: 396–400.
- [37] PLUMB J, MUDDLE R, FRANZMANN P. Effect of pH on rates of iron and sulfur oxidation by bioleaching organisms[J]. Minerals Engineering, 2008, 21(1): 76–82.
- [38] MERUANE G, VARGAS T. Bacterial oxidation of ferrous iron by *Acidithiobacillus ferrooxidans* in the pH range 2.5–7.0[J]. Hydrometallurgy, 2003, 71(1): 149–158.
- [39] ZHEN Shi-jie, YAN Zhong-qiang, ZHANG Yan-sheng, WANG Jun, CAMPBELL M, QIN Wen-qing. Column bioleaching of a low grade nickel-bearing sulfide ore containing high magnesium as olivine, chlorite and antigorite[J]. Hydrometallurgy, 2009, 96(4): 337–341.
- [40] CAMERON R A, LASTRA R, MORTAZAVI S, BEDARD P L, MORIN L, GOULD W D, KENNEDY K J. Bioleaching of a low-grade ultramafic nickel sulphide ore in stirred-tank reactors at elevated pH[J]. Hydrometallurgy, 2009, 97(3): 213–220.
- [41] CAMERON R A, LASTRA R, MORTAZAVI S, GOULD W D, THIBAUT Y, BEDARD P L, MORIN L, KENNEDY K J. Elevated-pH bioleaching of a low-grade ultramafic nickel sulphide ore in stirred-tank reactors at 5 to 45 °C [J]. Hydrometallurgy, 2009, 99(1): 77–83.
- [42] CAMERON R A, YEUNG C W, GREER C W, GOULD W D, MORTAZAVI S, BÉDARD P L, MORIN L, LORTIE L, DINARDO O, KENNEDY K J. The bacterial community structure during bioleaching of a low-grade nickel sulphide ore in stirred-tank reactors at different combinations of temperature and pH[J]. Hydrometallurgy, 2010, 104(2): 207–215.
- [43] CAMERON R A, LASTRA R, GOULD W D, MORTAZAVI S, THIBAUT Y, BEDARD P L, MORIN L, KOREN D W, KENNEDY K J. Bioleaching of six nickel sulphide ores with differing mineralogies in stirred-tank reactors at 30 °C [J]. Minerals Engineering, 2013, 49: 172–183.
- [44] DEW D W, VAN BUUREN C, MCEWAN K, BOWKER C. Bioleaching of base metal sulphide concentrates: a comparison of mesophile and thermophile bacterial cultures[J]. Process Metallurgy, 1999, 9: 229–238.
- [45] RIEKKOLA-VANHANEN M. Talvivaara Sotkamo mine—bioleaching of a polymetallic nickel ore in subarctic climate[J]. Nova Biotechnol, 2010, 10(1): 7–14.
- [46] RIEKKOLA-VANHANEN M. Talvivaara black schist bioleaching demonstration plant[C]// HU X, KINTAKLAU A. Biohydrometallurgy: From the Single Cell to the Environment. Switzerland: Trans Tech Publ, 2007: 30–33.
- [47] HALINEN A K, RAHUNEN N, MÄÄTTÄ K, KAKSONEN A H, RIEKKOLA-VANHANEN M, PUHAKKA J A. Microbial



- community of the Talvivaara demonstration-scale bioheap[C]// HU X, KINTAKLAU A. Biohydrometallurgy: From the Single Cell to the Environment. Switzerland: Trans Tech Publ, 2007: 579.
- [48] FEWINGS J, SEET S. Bacterial leaching at elevated pH using BioHeap™ technology[C]// TAYLOR A. Nickel-Cobalt-Copper Conference. Australia: ALTA Metallurgical Services, 2012: 370–377.
- [49] 温建康. 低品位镍钴铜矿石生物堆浸技术[R]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2014.
- WEN Jian-kang. Heap bioleaching technology for low-grade nickel, cobalt and copper ores[R]. Beijing: General Research Institute for Nonferrous Metals, 2014.
- [50] WEN Jian-kang, CHEN Bo-wei, SHANG He, ZHANG Guo-cheng. Research progress in biohydrometallurgy of rare metals and heavy nonferrous metals with an emphasis on China[J]. Rare Metals, 2016, 35(6): 433–442.
- [51] 杨成武, 廖亚龙, 彭志强. 离子交换吸附富集红土镍矿浸出液中的镍[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(8): 2145–2151.
- YANG Cheng-wu, LIAO Ya-long, PENG Zhi-qiang. Enrichment of nickel ions by ion-exchange adsorption from leaching solution of nickel-bearing laterite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(8): 2145–2151.

## Application and research progresses of hydrometallurgy technology for nickel ore

SUN Jian-zhi, CHEN Bo-wei, WEN Jian-kang, WANG Dian-zuo

(National Engineering Laboratory of Biohydrometallurgy,  
General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

**Abstract:** The general situation of distribution, exploitation and utilization of nickel resources was introduced. The basic process, advantages and disadvantages and application prospect of some hydrometallurgy processes, such as ammonia leaching, high pressure acid leaching, atmospheric-pressure acid leaching and heap leaching, were elaborated. The research and application of bio-hydrometallurgy for nickel oxides and sulfides were summarized. It is suggested that the key to solve the problem of high magnesium is bioleaching at elevated pH. Finally, the development direction of processes for high-magnesium nickel ore was prospected. The atmospheric-pressure acid leaching and bio-hydrometallurgy are the hot areas of research.

**Key words:** high-magnesium nickel ore; nickel sulfides; nickel oxides; hydrometallurgy; bioleaching;

**Foundation item:** Project(51404033) supported by the National Natural Science Foundation of China

**Received date:** 2016-11-02; **Accepted date:** 2017-04-04

**Corresponding author:** WEN Jian-kang; Tel: +86-10-82241313; E-mail: kang3412@126.com

(编辑 李艳红)