

# 红土型镍矿床找矿勘查与开发利用新进展

王瑞江<sup>1)</sup>, 聂凤军<sup>1)</sup>, 严铁雄<sup>2)</sup>, 江思宏<sup>1)</sup>, 王海波<sup>3)</sup>, 李岩<sup>4)</sup>

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037;

2) 国土资源部咨询研究中心, 北京, 100035; 3) 北京矿冶研究总院, 北京, 100037;

4) 北京经纬资产评估中心, 北京, 100044

**内容提要:**随着全球经济和社会的高速发展,镍的需求量一直保持高位增长趋势。统计数据表明,全球的镍储量约为1.6亿吨,其中硫化物型镍矿占全部储量的28%,红土型镍矿占72%。鉴于硫化物型镍矿床以品位较高、杂质较少和选冶容易等特点,因此,全球58%左右的镍产量来源于此类矿床。随着硫化物型镍矿床开采量的大量增加和储量快速减少以及后备开采基地的严重不足,因此,人们将开发的重点瞄准了红土型镍矿床。红土型镍矿资源具有以下几个特点:①世界各国已探明的红土型镍的金属量为1.15亿吨,资源丰富;②无论是找矿勘查,还是矿体的采矿和选矿,其投入成本均很低;③火法冶炼工艺已在工业生产中得到运用,湿法冶炼技术(高压酸浸和堆浸)也正日趋成熟;④红土型镍矿床大多数位于赤道附近,多数临海,便于外运。我国西南和海南岛地区超镁铁质火成岩及其相应的风化层分布广泛,个别岩体(或层)的顶部或旁侧产出有红土型镍矿床(点),因此,我国有关部门应对红土型镍矿床的找矿勘查和开发利用给予高度重视。

**关键词:**红土型镍矿床;找矿勘查;开发利用;高压酸浸;冶炼技术;澳大利亚

20世纪90年代以来,随着全球经济和社会的可持续发展,不锈钢及其原材料镍的消费量急剧增加。统计数据表明,在过去5年中,镍消费量每年增长速率均在4%以上(图1),其中我国镍消费量居各国之首。预测数据显示,今后5~10年内,全球的镍消费量每年增长率将会维持在3.5%~4%之间,其中亚洲的镍需求量将会增长7%左右(图1)。需要指出的是,全球范围内近期可供开发的硫化物型镍矿资源,除了加拿大的伏伊希湾(Voisey bay)镍矿床的产出规模较大外,其他均为一些中小矿山,镍金属的供需矛盾日趋突出(Gleeson et al., 2003; Elias, 2002)<sup>①②③④</sup>。有数据显示,全球已探明的镍储量为1.6亿吨,其中硫化物型镍占28%,红土型镍约占72%(图2a和2b)。我国周边国家已探明的镍储量有1125万吨,占全球镍储量的7%,其中俄罗斯为660万吨、印度尼西亚为320万吨、菲律宾有41万吨、缅甸为92万吨、越南有12万吨。无论在亚洲,还是在世界上的其他地区,硫化物型镍矿床以品位高、杂质少和易选冶为特征,因此,目前大约有

58%的镍产量来源于硫化物型镍矿床,其余42%镍产量来源于红土型镍矿床(图2)。随着全球经济的快速发展,镍的开采量日益剧增,传统的几个硫化物型镍矿山(加拿大的萨德伯里、俄罗斯的诺列尔斯克、澳大利亚的坎博尔达、我国的金川和南非的里腾斯堡)的开采深度日益加深、矿山开采难度加大和保有储量急剧减少,硫化物型镍资源出现危机也是预料之中的事,在此形势下,全球镍行业将资源开发利用的重点放在红土型镍矿资源上面(Gleeson et al., 2003; Elias, 2002; Golightly, 1981)<sup>①②③④</sup>。

人们为什么对红土型镍矿床产生如此浓厚的兴趣,这也许与下述3方面的原因有关,其一,二十世纪90年代初期,古巴莫西湾(Moa Bay)高压酸浸厂首次对西方国家技术人员开放,使人们认识到红土型矿石中的镍和钴是可以提取的;其二,随着一系列大型硫矿床的发现,硫酸价格大幅度的下跌,红土型矿石酸浸成本也随之降低;其三,在矿石冶炼方面,随着高压设备技术的改进与提高,部分难熔性金属矿石不再是冶炼中的难题。

收稿日期:2007-11-05;改回日期:2007-12-26;责任编辑:章雨旭。

作者简介:王瑞江,男,1956年生。研究员。从事区域矿产地质研究和科技管理工作。通讯地址:100037,北京市西城区百万庄大街26号;电话:010-6899 9031;Email: wrui jiang@mail. cgs. gov. cn。执笔人:聂凤军, nfjj@mx. cei. gov. cn。

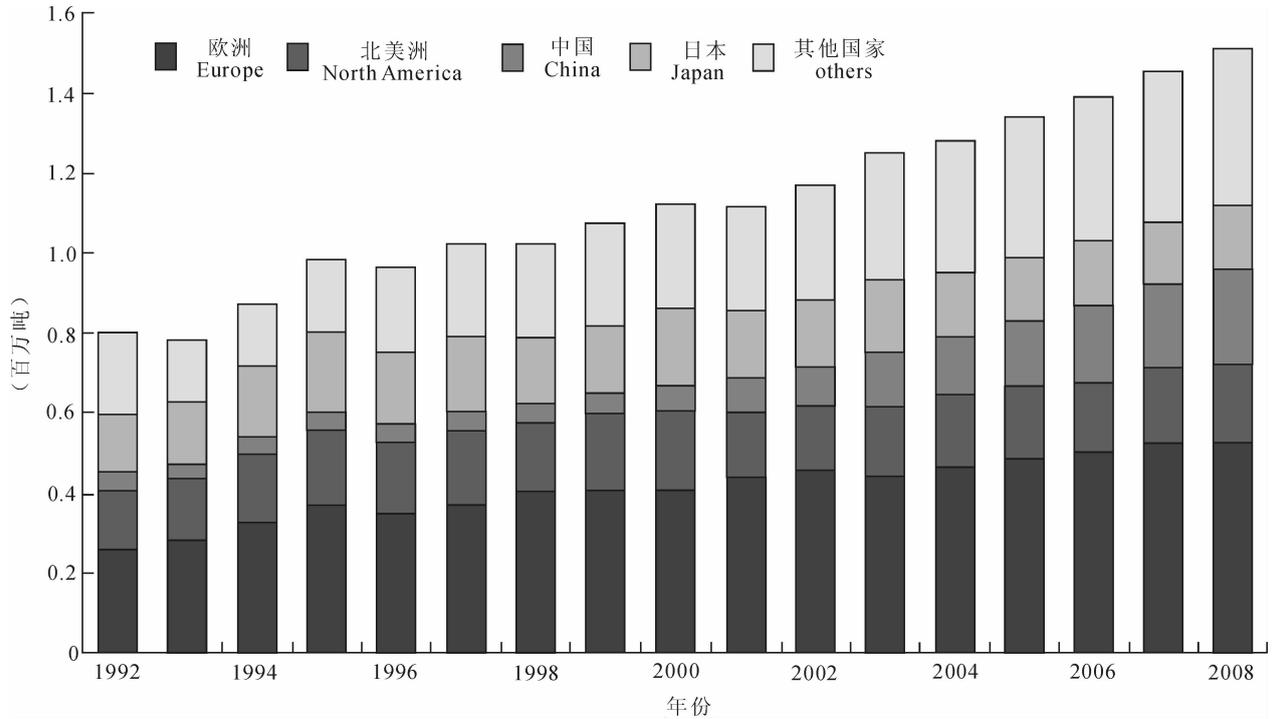


图 1 世界各国或地区镍消费量增加状况(根据王瑞江等,2007;Elias, 2006;和 Gleeson et al., 2003 资料数据汇编)

Fig. 1 The nickel consumption of various countries and regions of the world  
(after Wang et al., 2007; Elias, 2006 and Gleeson et al., 2003)

我国的红土型镍矿石主要从菲律宾进口。鉴于早在 20 世纪 70 年代初期,日本就与菲律宾有关方面成立合资矿业公司,对镍含量大于 2% 的镍矿石进行大规模的开采,并且将其运送回新日铁和住友商社进行冶炼,因此,菲律宾的高品位红土型镍矿石大部分为日本企业所垄断,我国只能进口镍含量在 0.9% ~ 1.1% 的镍矿石<sup>[16][17]</sup>。从社会和经济发展的态势来看,在未来的几年内,不锈钢及其原材料镍的消费量将会继续保持高位增长的趋势,镍的供给矛盾也会更加突出<sup>[2]</sup>。在上述情况下,地质工作者务必了解当前国内外镍矿资源找矿勘查和开发利用现状,为进一步寻找新型镍矿资源做出自己的贡献。

## 1 找矿勘查工作

### 1.1 基本概念

所谓的红土主要是指那些在热带气候条件下,岩石强烈风化作用形成的贫硅和富铁氧化物的表土层,同样的红土也可在亚热带或温带地域中的某些地段找到(Butt et al., 1992; Anand et al., 1989; Anand et al., 1988)。一般来讲,富镁岩石的物理和化学风化作用可把镍富集 20 ~ 30 倍,并且在局部地段形成红土型镍矿体。从全球范围内分布的红土型

镍矿床来看,大约有 85% 的矿床与增生地体内的纯橄岩,方辉橄岩和橄岩有关,其余 15% 的矿床则与稳定克拉通内科马提岩和层状镁铁质—超镁铁质火成岩有关。根据红土的矿物组分和元素地球化学特征,我们可将红土型镍矿床划分为以下 3 种类型:①含水硅酸盐质镍矿床:出现在红土剖面的下部层位,由含水铁镁—镍硅酸盐(如蛇纹石和硅镁镍矿)矿物组成;②粘土硅酸盐质镍矿床:出现在红土剖面的上部层位,主要由蒙脱石和其他粘土类矿物组成;③氧化物质镍矿床:出现在红土剖面的上部层位或者直接位于蚀变或新鲜基岩之上,由含水铁氧化物和氧化物组成(Brand et al., 1998, 1996; Anand et al., 1989)。

一般来讲,含水硅酸盐质红土型镍矿床大多数在构造活动频繁、热带气候环境和排水系统相对发育的地域内产出,并且以镍含量高为特征,镍的平均含量为 1.8% ~ 2.5%。新喀里多尼亚、印度尼西亚、菲律宾、巴布亚新几内亚和加勒比海地区等国家或地区产出的红土型镍矿床均属这种类型(此类矿床又被称之为“湿型”矿床)。相比之下,在距赤道较远的南半球大陆(如西澳大利亚州、昆士兰州和新南威尔士州)产出的红土型镍矿床与前述矿床存

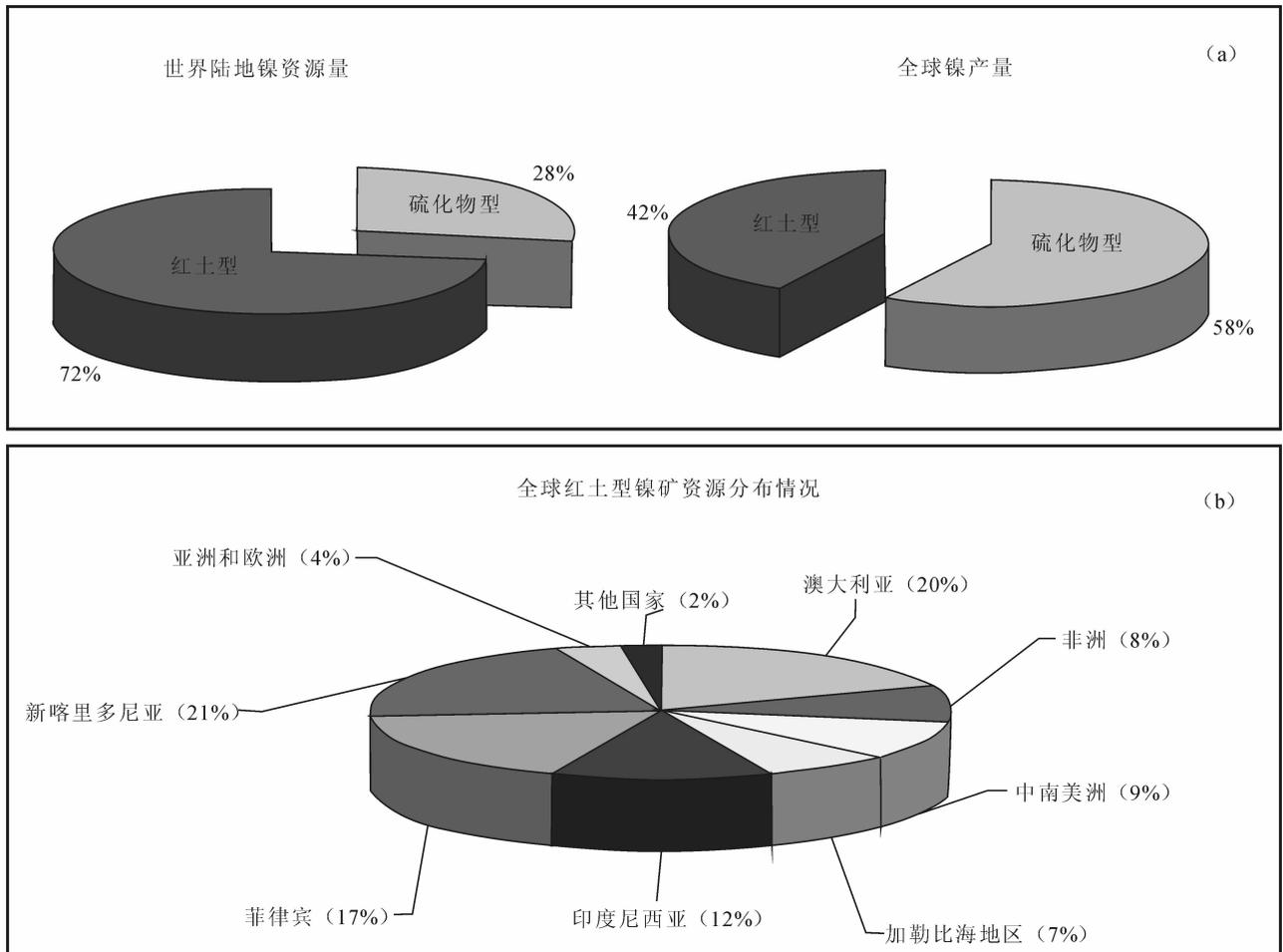


图2 全球主要硫化物型和红土型镍矿资源分布情况(据王瑞江等,2007;Elias, 2006;Gleeson et al., 2003 资料数据汇编)

Fig. 2 Distribution of nickel resource of sulfide and laterite deposits in the world

(after Wang et al., 2007; Elias, 2006; Gleeson et al., 2003)

在较明显差别。受地形地貌特点,排水系统发育程度和半干旱到干旱气候条件影响,澳大利亚各州产出的红土型镍矿床主要为粘土(蒙脱石)型和铁氧化物—硅质型(此类矿床又被称之为“干型”矿床)。代表性粘土(蒙脱石)型矿床有莫林莫林(Murrin Murrin)和布隆(Bulong),代表性氧化物—硅质矿床有考斯(Cawse)、竹草(Canegrass)和瑞恩斯索普(Ravensthorpe)。

### 1.2 全球红土型镍矿资源分布情况

世界范围内红土型镍矿床大多数分布在赤道线南北30°以内的热带地域,并且集中产出在环太平洋的热带和亚热带地区(图2)。美洲的古巴、哥伦比亚和巴西;东南亚的老挝、越南、柬埔寨、印度尼西亚和菲律宾;大洋洲的澳大利亚、新喀里多尼亚和巴布亚新几内亚均是富集红土型镍矿资源的国家。全球红土型镍矿资源分布状况见图2。在印度尼西

亚,整个红土型镍矿带可以从中苏拉威的西部一直延伸到哈尔马赫拉、奥比和瓦伊格奥群岛以及伊利安查亚的鸟头半岛的塔纳梅拉地区。菲律宾同样也产出有红土型镍矿床,主要产地分布在诺诺克岛。另外,西澳大利亚红土型镍矿床(点)分布广泛,主要在伊尔冈克拉通花岗岩—绿岩地体内产出。世界范围内代表性红土型镍矿床和硫化物型镍矿床的吨位—品位模型见图3。

### 1.3 西澳大利亚红土型镍矿资源分布情况

西澳大利亚前寒武纪镁铁质—超镁铁质火成岩分布广泛,为硫化物型和红土型镍矿床的形成提供了得天独厚的物质供给条件,其中红土型镍矿床无论是在储量和品位上,还是在开采条件方面均位于全球红土型镍矿床集中区之首,因此,该区红土型镍矿床的成矿理论研究、选矿冶炼实验、找矿勘查评价和综合性开发利用已成为国际矿业界关注的“热

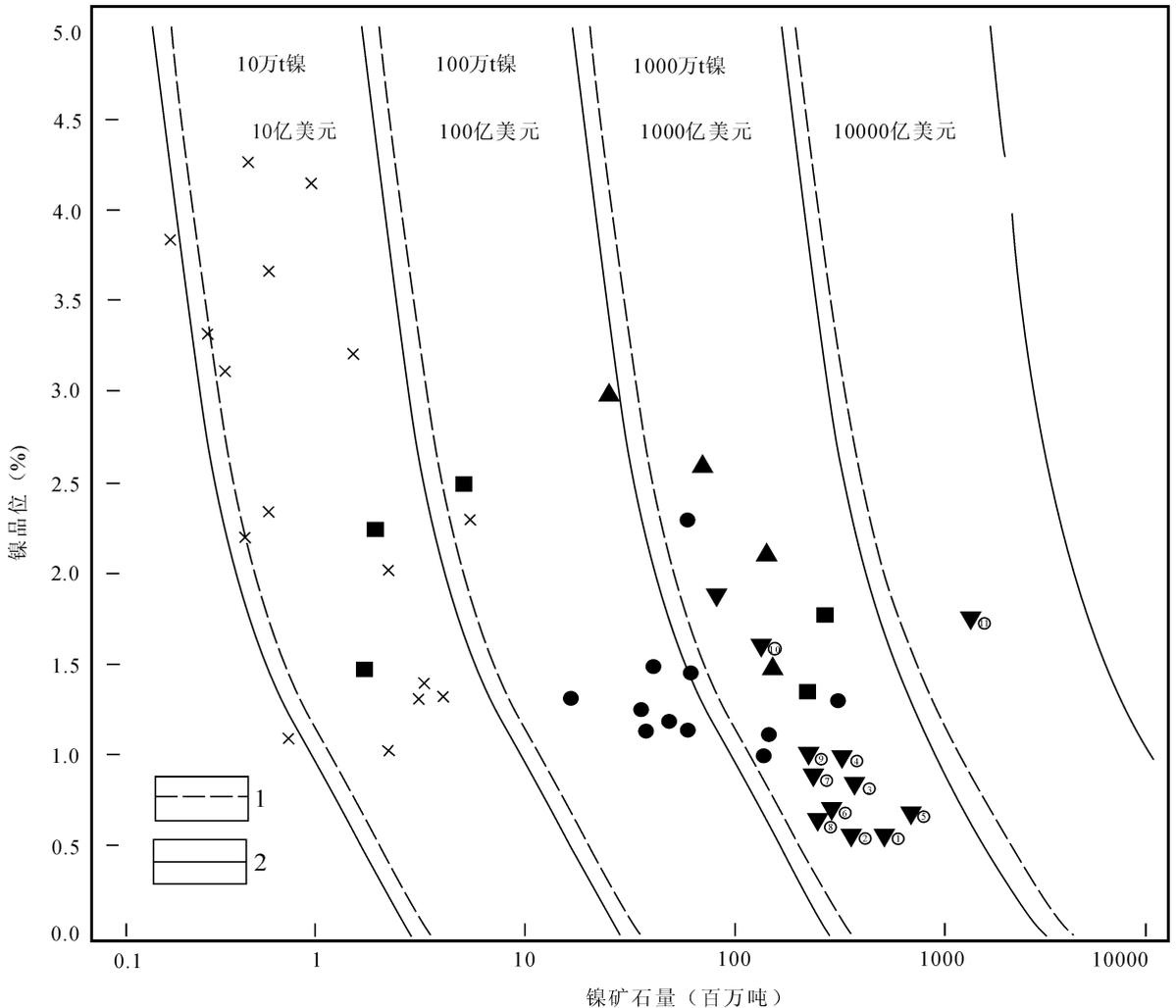


图3 全球主要硫化物型和红土型镍矿床品位—吨位模型  
(根据王瑞江等,2007;Elias, 2006;和 Gleeson et al., 2003 资料数据汇编)

Fig. 3 Grade—tonnage model of major sulfide and laterite nickel deposits in the world  
(after Wang et al., 2007;Elias, 2006 和 Gleeson et al., 2003)

1—镍的金属量线;2—镍的价值线;▲—新喀里多尼亚红土型镍矿床;■—印度尼西亚红土型镍矿床;●—其他国家红土型镍矿床;×—高品位硫化物型镍矿床;▼—代表性镍矿床;①—凯斯山(Mount Keith)硫化物型镍矿床;②—亚卡宾地(Yakabindie)硫化物型镍矿床;③—蜜月井(Honeymoon Well)硫化物型镍矿床;④—莫林莫林(Murrin Murrin)红土型镍矿床;⑤—卡尔古利(Kalgoorile)铁氧化物型镍矿床;⑥—考斯(Cawse)红土型镍矿床;⑦—卡尔古利(Kalgoorile)粘土型镍矿床;⑧—瑞温斯索普(Ravensthorpe)红土型镍矿床;⑨—温格利纳(Wingellina)红土型镍矿床;⑩—伏伊希湾(Voisey Bay)硫化物型镍矿床;⑪—诺列尔斯克(Norilsk)硫化物型镍矿床

1—Metal Ni tonnage line; 2—Meta Ni value line; ▲—New Caledonia laterite Ni deposit; ■—Indonesia laterite Ni deposit; ●—Laterite Ni deposits occurring in other countries; ×—High-grade sulfide Ni deposits; ▼—Representative Ni deposits; ①—Mount Keith sulfide Ni deposit; ②—Yakabindie sulfide Ni deposit; ③—Honeymoon Well sulfide Ni deposit; ④—Murrin Murrin laterite Ni deposit; ⑤—Kalgoorile project oxide; ⑥—Cawse laterite Ni deposit; ⑦—Kalgoorile project smectite; ⑧—Ravensthorpe laterite Ni deposit; ⑨—Wingellina laterite Ni deposit; ⑩—Voisey Bay sulfide Ni deposit; ⑪—Norilsk sulfide Ni deposit

点”(Elias; 2006; Anand t al. 1989; Elias et al., 1981)。在过去的几年中,本区发生的二个事件尤为世人所关注,并且是引发新一轮“淘镍”浪潮的原因,其一、俄罗斯诺瑞斯克镍业公司将考斯(Cawse)红土型镍矿床全资收购,并且对其进行大规模开发

利用;其二、高压酸浸(HPAL)技术在考斯(Cawse)、布隆(Bulong)和莫林莫林(Murrin Murrin)红土型镍矿石冶炼中获得成功(Brand et al., 1996)。

伊尔冈(Yilgan)克拉通是全球范围内体积最大和最完整的大陆壳块体之一,其分布面积为650000

km<sup>2</sup>,该克拉通主要由太古宙(3.0~2.6Ga)花岗岩和绿岩地体所构成。在所有花岗岩和绿岩地体中,诺斯门—维卢拉(Norseman—Wiluna)地体以出露面积最大、岩石类型最复杂和产出镍矿床数量最多为特点。主要岩石类型有火山—沉积岩、泥质岩、砂质岩、长英质火山岩、火成碎屑岩、镁铁质和超镁铁质火成岩,其中后两者大多数具有典型的鬃刺结构,属科马提质火成岩。尽管所有富MgO科马提质火成岩仅含有少量硫化物,其本身的镍含量变化范围为0.2%~0.4%,但是它们均为红土型镍矿床提供了物质来源(Elias, 2006)。有数据显示,西澳大利90%以上的红土型镍矿床(点)在诺斯门—维卢拉花岗岩—绿岩地体中产出,并且与沃特—威廉姆斯(Walter Williams)组变质火山—沉积岩地层具有密切的空间分布关系(Elias et al., 1981)。需要指出的是,在有粒玄岩墙(或脉)出现的地方,其顶部和两侧风化壳中的镍和钴含量均有骤然增高的趋势。迄今为止,在竹草红土型镍矿床外围已先后发现和圈定各种类型红土型镍矿床23处,其中铁氧化物型矿床2处,铁氧化物—硅质型矿床10处和粘土型矿床11处。已探明的镍矿石量有32.9亿吨,金属量为2506万吨,镍和钴含量变化范围分别为0.62%~1.28%和0.04%~0.10%(Elias, 2006, 2002; Elias et al., 1981)。

#### 1.4 找矿勘查工作中应该注意的几个问题

尽管红土型镍矿床是人们早已熟知的一种镍矿床类型,但是成矿理论研究长期处在停滞不前状态,找矿勘查工作同样面临着许多挑战,主要表现在以下几个方面,其一、矿床地质较为复杂,查清有用矿物和成矿元素分布规律的难度较高;其二、在目前经济技术条件下,很难利用目估法确定矿石的入选品位;其三、加大采样密度,并且对其进行化学分析是确定矿石和围岩的唯一手段。为了准确地划定矿(体)带的界线,目前使用的唯一方法就是钻探取样,然后根据化学分析结果来确定矿(体)带的规模。在找矿勘查过程中,人们常常采用地质统计学方法确定最优钻探方案,特别是勘探网度的布设。一般情况下,对于不太复杂的粘土质红土型镍矿床来讲,钻探的网度为12.5m×12.5m。相比之下,对于铁氧化物—硅质红土型镍矿床来讲,钻探的网度为5m×5m。大量找矿勘查实践表明,在红土型镍资源潜力评价过程中,为了准确划定矿体边界和制定矿石选冶方案提供科学依据,一定要处理好以下两方面问题,其一、合理确定硅质壳的爆破方案:在

部分红土型镍矿体的顶部常常分布有数米厚的铁—硅质硬壳,为了将其剥离,就需要进行爆破。如若对此处理不当,那么爆破产生的散落物将会对矿体边界的划定产生一定影响;其二、准确查明矿体中MgO含量的不连续界面:鉴于矿石中MgO含量与矿石选冶过程中酸的消耗量呈正相关关系,因此,在矿体评价过程中,查明矿石中MgO的分布状况和含量变化对于制定选冶方案至关重要。

如前所述,红土型镍矿床是镁铁质—超镁铁质岩体风化—淋滤—沉积的产物,其产出规模、分布范围和品位高低主要与原岩类型、气候条件和地形地貌具有密切成因联系。一般来讲,在红土型镍矿床(点)分布区,科马提岩和其他超镁铁质火成岩(侵入岩和火山岩)分布广泛,其顶部或旁侧常常出露有产出厚度不等和分布形态各异的红土层,并且以富镁和钴为特征。在以往的找矿勘查过程中,部分地质人员常常将其误认为是硫化物型矿体在地表的反映。系统的钻探结果表明,在这些富镍和钴红土层下部的超镁铁质火成岩中根本见不到任何含镍的硫化物,新鲜基岩样品的镍含量变化范围也只有0.2%~0.4%。大量研究结果表明,尽管红土型和硫化物型镍矿床均与超镁铁质火成岩具有密切成因联系,但是在硫化物型镍矿床的顶部不存在有红土型镍矿床,而在红土型镍矿床的下部也很难找到硫化物型镍矿床,二种类型镍矿床的“错位”关系十分明显(Butt et al., 2006; Gleeson et al., 2003; Elias, 2002)。

## 2 红土型镍矿床的成矿作用

如前所述,红土型镍矿床是富镁或超镁铁质火成岩风化作用的产物,是不是所有的富镁铁质岩都可以形成红土型镍矿床呢?回答是否定的。如若形成红土型镍矿床,除了具有良好的母岩条件外,气候条件、地形地貌、排水系统、大地构造和岩石构造均是缺一不可的重要控矿因素,因此,红土型镍矿床是地质作用,气候变异和地壳活动相互作用的产物(Daniels, 1975)。各种控矿因素简述如下:①气候条件:强降雨可以有效地提高通过岩(体)层的水流量,有利于可溶性组分的大量带出。另外,从热带到亚热带再到半干旱—干旱的气候条件变化有利于红土型剖面的形成与保存(表1);②地形地貌:排水系统是否发育?通过岩(体)层的水量有多少?潜水面高还是低?上述问题均与地貌形态和地形陡缓有关。丘陵山地和宽阔山谷有利于红土型镍矿床的

保存;③排水系统:受低缓地形和地貌形态影响,西澳大利亚伊尔冈克拉通的排水系统不甚发育,这样的排水条件有利于红土型镍矿床的形成与保存;④大地构造:稳定的大地构造环境有利于加速地势夷平,减缓地下水的运移速度和穿透能力,同时也可以增加红土层的厚度,因此,稳定的大地构造环境有利于红土型镍矿床的保存;⑤母岩类型:主要是科马提岩或其他类型的超铁镁质火成岩,其中纯橄榄岩和橄榄岩中的橄榄石易于破坏和分解;⑥构造:强烈的断裂和剪切构造作用可以极大提高基岩的渗透程度,为基岩的风化、剥蚀和分解创造了有利条件(Elias, 2006, 2002; Elias et al., 1981)

表1 化学风化作用对超镁铁质火成岩的影响

Table 1 Effects of chemical weathering on ultra-mafic rocks

序号	风化作用进程	对超镁铁质岩的影响
1	迁移组分淋滤:碱质和碱土金属元素	橄榄石、辉石和蛇纹石分解,镁、镍、锰和钙淋滤
2	稳定次生矿物的形成:铁和铝氧化物以及粘土	针铁矿和蒙脱石对溶液中的镍进行吸附
3	不易迁移组分的淋滤:硅铝和钛	雨林和潮湿气候条件下,排水系统较好地地域内,硅质发生淋滤
4	氧化-还原效应对成矿组分的迁移和沉淀具有控制作用	锰氧化物发生沉淀,并且对镍和钴产生吸附作用
5	难分解矿物的富集:锆石、铬铁矿和石英	残余铬铁矿发生富集

总而言之,红土型镍矿床的形成必须要具备以下4个条件,其一、大面积裸露的科马提岩、超镁铁质岩、(纯橄榄岩和方辉橄榄岩)和蛇绿杂岩以及先期岛弧和大洋板块碰撞环境中的镁铁质火成岩;其二、温暖的季节性潮湿(热带)气候可持续1000ka之久;其三、有利的大地构造和地形地貌条件以及较差的排水系统和较低的潜水面,风化剥蚀与土壤堆积的速率要能够达到一定的平衡;其四、基岩中各种节理和断裂构造发育,有利于地下水和地表水的流动与渗透(Gleeson et al., 2003; Golightly, 1981)。

为了解红土型镍矿床的成矿作用,我们以西澳大利亚红土型镍矿床为例详细探讨镍的迁移和富集过程。新元古代到古生代时期,西澳大利亚伊尔冈克拉通超镁铁质火成岩曾遭受到不同程度风化剥蚀作用,并且形成一系列规模大小不等和产出厚度不同的覆盖层。早二叠世,受大规模冰川移动影响,本地区先期形成的覆盖层全部被剥离掉,大部分基岩裸露地表。二叠纪冰川活动结束之后,也就是从230Ma(三叠纪)经中生代到中新世(15Ma),西澳大利亚伊尔冈克拉通气候条件从中温带变化为热带。

大规模的降雨不仅为各类植物的生长创造了有利条件,而且也有利于岩(体)层的风化作用。自中新世开始,该区的干旱程度与日俱增,风作作用强度和植被发育状况也发生明显变化。尽管半干旱到干旱气候极大地降低了化学风化的速率,并且致使土壤层的矿物组分产生某种变化,但是先期强烈风化作用产物还是保留了下来,部分学者将伊尔冈克拉通岩(体)层的风化作用过程划分为以下4个阶段(Butt et al., 1992; Daniels, 1975):①前古近纪阶段:二叠纪时,冰川对前寒武纪科马提质火成岩的冰掘效应可产生强烈的风化剥蚀作用。中生代时期,本区的地形地貌主要为连绵起伏的小山和宽大的浅谷,其内见有被红土充填的沟槽。现今克拉通地体抬升部位所观察到的线状铁质壳就是倒转地面的残留体;②古新世到始新世阶段:在中生代的古沟谷中,古沟槽进一步加深和加宽。始新世时,当地壳活动从沟槽侵蚀作用变为低能量沉积时,冲积物、港湾、湖相和海相沉积物沿古沟槽进行堆积;③渐新世到中新世阶段:古新统一始新统的沉积物和基底岩(体)层(包括先期形成的铁质壳和硅质壳)同时发生风化剥蚀作用。部分堆积物的矿物学研究结果表明,这个时期本地区雨量比较充沛;④上新世到全新世阶段:在大地构造变动引发各类岩(体)层发生风化剥蚀的同时,本地区的气候条件也在从潮湿变为半干旱到干旱。鉴于这个时期,伊尔冈克拉通中部和东部缺少良好的雨水排泄系统,因此,风化剥蚀物可以完好地保存在原地。较为干旱的气候条件可以导致部分成矿组分(从风化壳上部淋滤而来)在地势较低部位进行堆积,进而形成粘土质团块,铁质、硅质和钙质硬壳,局部地段形成红土型镍矿床(图4)(Elias, 2006; Elias et al., 1981)。

### 3 红土型镍矿床的开发利用

#### 3.1 矿石的筛选

考虑到氧化物红土型镍矿石中硅质组分含量较高,并且很容易与针铁矿或褐铁矿分离,为了提高矿石中的镍含量,首先将矿石全岩样品进行破碎,然后对其进行不同级别的筛选(图5),例如,镍含量为0.95%的矿石样品通过简单筛选可将其提到1.64%。在西澳大利亚红土型镍矿开发过程中,筛选技术已在考斯和瑞温斯索普矿山得到成功应用。一般来讲,在矿山开发利用的头几年中,采用该项技术可将矿石中的镍含量提高41%左右<sup>②</sup>。

比较干旱的气候条件  
(西澳大利亚)

潮湿的气候条件  
(新喀里多尼亚、印度尼西亚)

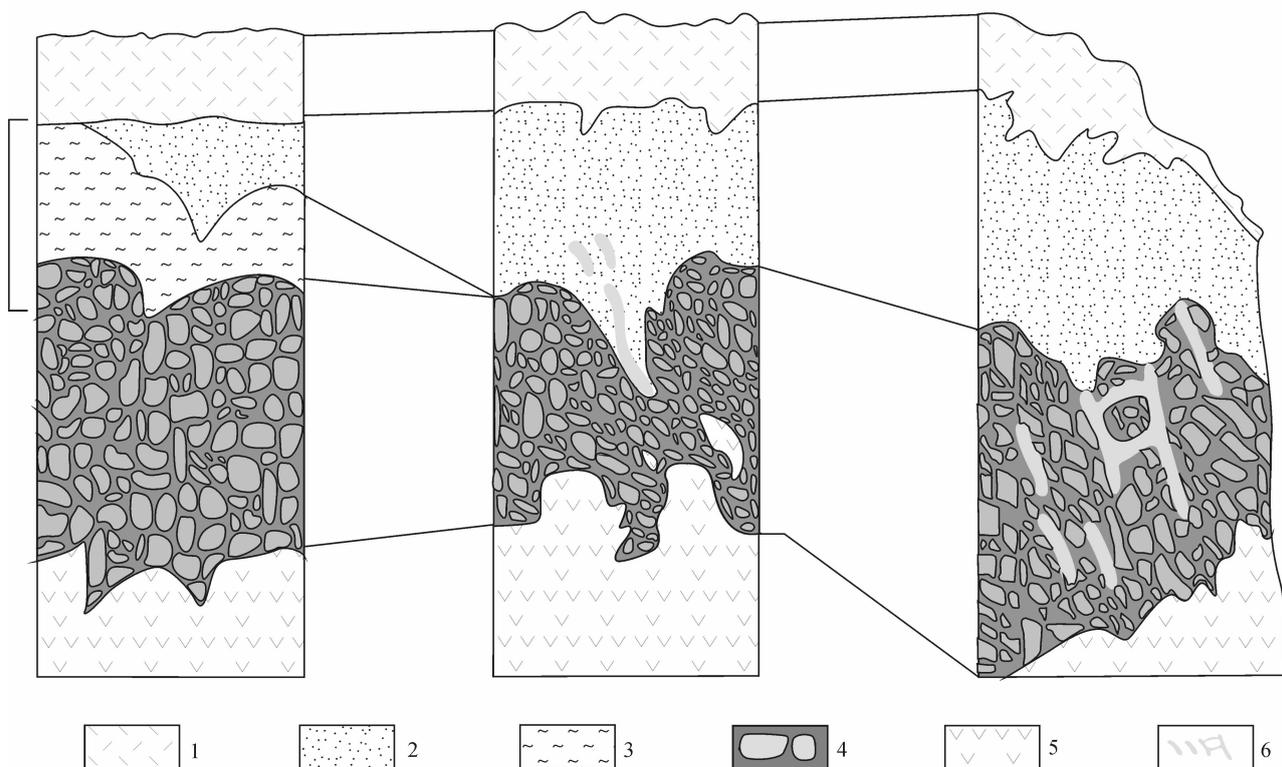


图4 红土型镍矿床成矿模式(根据王瑞江等,2007;Elias, 2006;和 Gleeson et al., 2003 资料数据汇编)

Fig. 4 Genetic model of laterite nickel deposits(after Wang et al., 2007;Elias, 2006 和 Gleeson et al., 2003)

1—铁质壳;2—褐铁矿层;3—蒙脱石层;4—富镍腐泥土;5—蚀变橄榄岩;6—富镍粘土条带

1—Ferricrete; 2—Limonite; 3—Nontronite; 4— Nickel- enriched saprolite; 5—Altered peridotite; 6—Nickel- enriched clay band

### 3.2 冶炼技术

根据红土型镍矿石的产出环境、矿物组成、化学成分和杂质类型,可采用以下5种不同的技术方法将镍和钴从红土型矿石中提取出来,它们分别是高压酸浸(HPAL)、常压酸浸(AL)、还原焙烧—氨浸、回转窑干燥预还原—电炉熔炼和堆浸<sup>1</sup>。

(1)高压酸浸:所谓的高压酸浸(HPAL)技术就是在高温(240~260℃)和高压(4.5~4.7MPa)条件下,将红土型矿石填充在一个形状如同潜水艇的设备中,然后用硫酸对其进行淋滤。通过这种工艺,可将褐铁矿型红土镍矿石中97%的镍和95%的钴萃取出到酸溶液中。在此之后,采用硫化物、水氧化物沉淀法、溶剂萃取法或电解法提取镍和钴。需要提及的是该项冶炼技术的优点是镍和钴回收率高,缺点是基础建设投资大、耗能量巨大、设备维护费用高和污染物处理难等问题。随着红土型镍矿床开采的逐渐升温,菲律宾、土耳其、巴西、新喀里多尼亚、巴布亚新几内亚和澳大利亚等国家正在计划或建设高压

酸浸工厂<sup>1②③</sup>。

(2)常压浸出:常压浸出技术适合处理那些铁含量低和镁含量高的红土型镍矿石。一般情况下,在80~85℃条件下,采用酸溶液对可浸性和渗透性均好的矿石进行搅拌,并且提取含镍和钴的浸出溶液,在此之后,通过液相和固相的分离可以沉淀回收镍钴。需要指出的是,尽管该工艺投资不是很大,同时适合小规模生产,但是其局限性很明显,只能在沿海地区建厂才能解决大量含镁废水的排放问题<sup>①</sup>。

(3)还原焙烧—氨浸:尽管“还原焙烧—氨浸”技术可用于处理那些镁含量较高的氧化质镍矿石,但是镍和钴的金属量回收率均比较低,镍的回收率在70%,钴回收率不到50%。该项技术的要点是,通过焙烧将氧化镍和铁与硅酸盐矿物分离,并且形成易于浸出的金属相和氧化亚镍,然后在氨性介质中选择性浸出镍和钴,同时将其他杂质(如铁和镁)留在渣中<sup>①</sup>。

(4)回转窑干燥预还原—电炉熔炼:该项技术

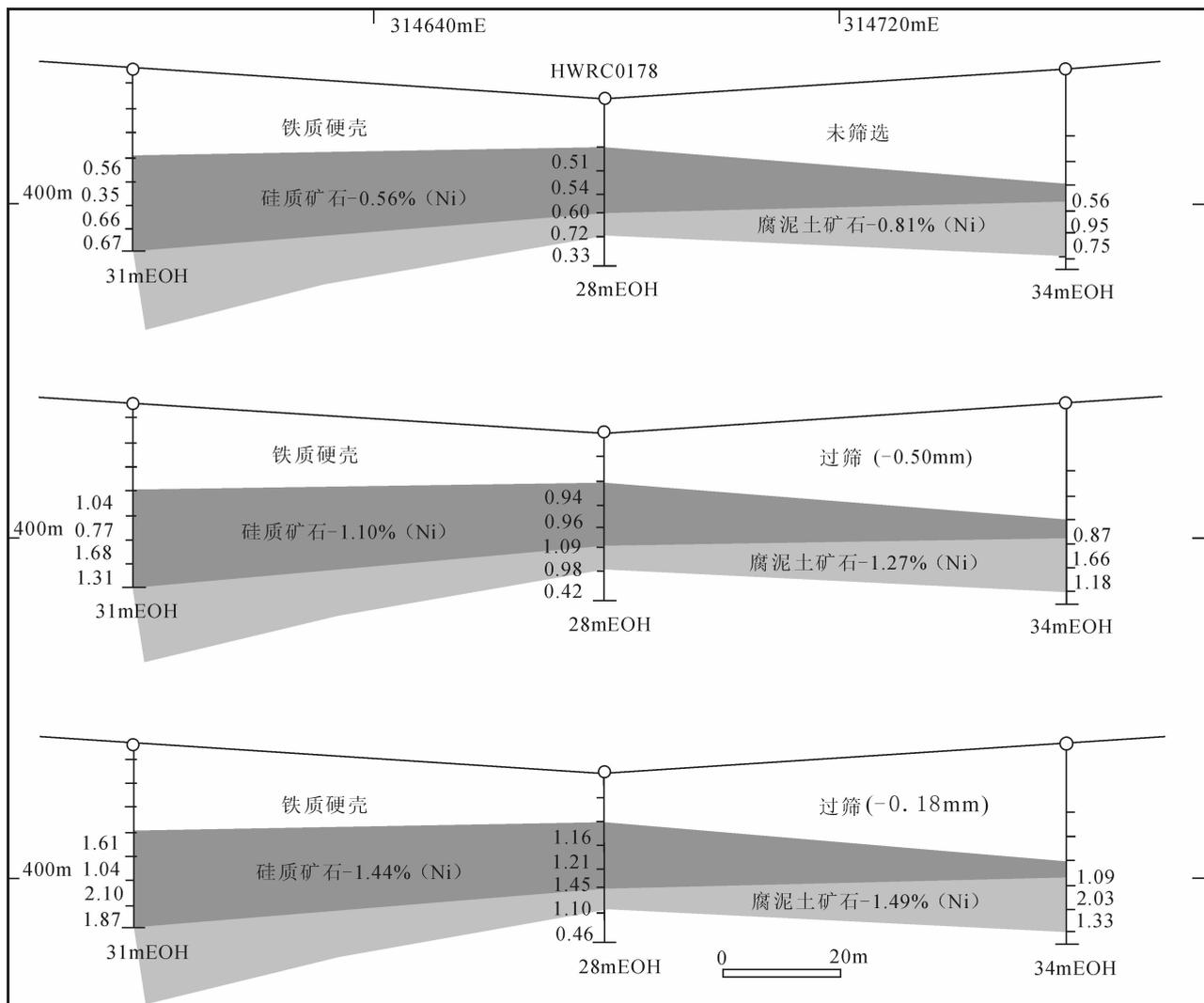


图 5 低品位红土型镍矿石的筛选实验模型

Fig. 5 Experimental screen upgrade model of low-grade laterite Ni ores

根据王瑞江等,2007;Elias, 2006;和 Gleeson et al., 2003 资料数据汇编。实验结果表明,通过筛选可将红土型镍矿石中的镍含量从 0.95% 提高到 1.64%。1—铁质壳;2—褐铁矿层;3—蒙脱石层;4—富镍腐泥土;5—蚀变橄辉岩;6—富镍粘土条带  
 after Wang et al., 2007;Elias, 2006 和 Gleeson et al., 2003. Ability to upgrade ore is valuation driver. For these low-grade laterite Ni ores, studies show that the Ni content can be upgraded from 0.95% to 1.64% by screening. 1—Ferricrete; 2—Limonite; 3—Nontronite; 4— Nickel-enriched saprolite; 5—Altered peridotite; 6—Nickel-enriched clay band

为火法冶炼的主要工艺之一,通过此种方法可直接获取镍铁或镍钨。该项冶炼技术的主要缺点是耗能量巨大和污染物处理难以以及有价金属钴无法回收。

(5)堆浸:在过去的 5 年中,为了加快红土型镍矿床找矿勘查和开发利用的速度,同时极大地降低镍和钴的回收成本,部分矿业公司正在对红土型镍矿石开展常温常压下的堆浸实验,如若实验成功,大量的低品位红土型镍矿石的利用,可以极大缓解国际金属市场镍和钴的供需矛盾,并且为全球经济和社会的可持续发展提供有力保障。需要指出的是,

迄今为止,堆浸技术仍处于工业试验研究阶段,尚没有大规模应用成功的先例。大量研究表明,采用堆浸技术处理目标矿山的镍矿石,3 个月内镍的浸出率可以达到 75% 以上,钴的浸出率可达到 60% 以上。目前,科学家正在土耳其的一些红土型镍矿山进行大规模可行性研究,有望建成世界上第一座采用堆浸技术提取镍和钴的工厂。需要指出的是,不是所有红土型镍矿床的矿石都可采用堆浸技术进行选冶,堆浸技术是否可行的关键在于以下几方面因素:①矿石性质是否适合堆浸,其渗透性如何? ②

镍和钴的可浸性如何? ③其他杂质(如铁、镁、锰和硅)的可浸性如何? 通常情况下堆浸所产生溶液的铁含量远远高于高压酸浸溶液, 高压酸浸溶液含铁只有1~2g/L, 而堆浸溶液含铁高达30~40g/L。如何实现镍和钴与铁的有效分离是堆浸技术面临的另外一个难题<sup>①②</sup>。

## 4 结论

(1)受全球硫化物型镍可供开发利用资源明显减少的影响, 世界未来十年镍产量的增加将主要来自于红土型镍矿床。鉴于大部分红土型镍矿床裸露地表, 局部地段矿体疏松, 找矿勘查和采矿成本均比较低, 再者, 湿法选矿技术也正在日臻成熟, 因此, 红土型镍矿床是传统硫化物型镍矿床的最佳替代对象。

(2)一般情况下, 常规堆浸流程的生产成本明显低于传统铁—镍冶炼流程, 加上前者的耗能低于后者, 因此, 从经济上看, 常规堆浸技术具有极为明显的优越性。采用常规堆浸技术可从红土型镍矿石直接获取镍产品, 进而解决镍精炼厂原材料供给不足问题。另外, 鉴于“湿型”红土型镍矿石具有品位较高、粘土较少和易于处理的优点, “湿型”比“干型”镍矿石更具有开发利用前景。

(3)尽管红土型和硫化物型镍矿床均与超镁铁质火成岩具有密切成因联系, 但是在许多硫化物型镍矿床的顶部不存在有红土型镍矿床, 而在红土型镍矿床的下部常常也很难找到硫化物型镍矿床。部分情况下, 富镍和钴红土层下部的超镁铁质火成岩中根本见不到任何含镍的硫化物, 新鲜基岩样品的镍含量变化范围也只有0.2%~0.4%, 因此, 红土型和硫化物型镍矿床的空间“错位”关系十分明显。

(4)我国西南和海南岛地区超镁铁质火成岩及其相应的风化层分布广泛, 个别岩体(或层)的顶部或旁侧产出有红土型镍矿床(点), 云南元江红土型镍矿床的开发利用即是很好的实例, 因此, 建议国家有关地质部门或矿山企业对上述地区红土型镍矿床的找矿勘查和开发利用给予高度重视。另外, 开展全国性或地区性红土型镍矿床综合性地质调查和研究工作也很有必要。

**致谢:** 本文系根据中国地质科学院矿产资源研究所红土型镍矿资源评价组总结报告部分内容提炼而成。野外地质调查与采样工作得到北京科瑞集团公司、中国地质科学院矿产资源研究所科技处、澳大利亚联邦科学与工业研究院(CSIRO)和澳大利亚金

凤(GPCC)矿业咨询公司的支持, 同时得到崔养权先生和布伦特·麦克尼斯(Brent McInnes)博士的大力帮助。在此, 作者对上述单位和个人表示最衷心的感谢!

## 注释 / Notes

- ① 不锈钢天地 (www. bxtid. com). 2007. 全球红土镍矿的分布及其开发利用现状 (2007年3月22日).
- ② 王瑞江, 聂凤军, 严铁雄, 等. 2007. 西澳大利亚竹草红土型镍矿床评价报告. 中国地质科学院矿产资源所境外矿产资源考察报告(内部资料), 1~65.
- ③ 洗眼看雪山. 2007. 高炉冶炼镍铁新工艺亮相, 民企专利破解红土镍矿开发利用难题. 科学时报(2007年6月1日).
- ④ 中华商务网(www. chinaccm. com). 2001. 世界红土型镍矿开发利用现状(2001年2月2日).

## 参考文献 / References

- Anand R R and Butt C R M. 1988. The terminology and classification of the deeply weathered regolith. CSIRO Division of Exploration Geoscience Discussion Paper, 1~5.
- Anand R R, Smith R E, Innes J, Churchward H M, Perdrix J L and Grunsky E C. 1989. Laterite types and associated ferruginous materials, Yilgarn Block, WA: Terminology, classification and atlas. CSIRO Division of Exploration Geoscience Report 60R.
- Brand N W, Butt C R M and Hellsten K J. 1996. Structural and lithological controls in the formation of the Cawse nickel laterite deposits western Australia—implication for supergene ore formation and exploration in deeply weathered terrains, in Grimsey E J and Neuss I. eds. Nickel '96, mineral to market. Australian Institute of Mining and Metallurgy Special Publication, 6/96, 185~191.
- Brand N W, Butt C R M and Elias, M. 1998. Nickle laterites: Classifications and features. AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics, 17(4): 81~88.
- Butt C R M and Zeegers H. 1992. Regolith exploration geochemistry in tropical and subtropical terrains. Handbook of Exploration Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 4: 1~605.
- Butt C R M, Nickel E H and Brand N W. 2006. The weathering of nickel sulfide deposits and implications for geochemical exploration. Society of Economic Geologists, Special Publication, 13: 139~165.
- Daniels J L. 1975. Paleogeographic development of Western Australia Precambrian. Geological Survey of Western Australia Memoir 2: 437~450.
- Elias Mick. 2006. Lateritic nickel mineralization of the Yilgarn craton. Society of Economic Geologists, Special Publication, 13: 195~210.
- Elias M. 2002. Nickle laterite deposits—geological overview, resources and exploitation, in giant ore deposit: Characteristics, genesis and exploration. Centre for Ore Deposit Research, University of Tasmania, Special Publication, 4: 205~220.
- Elias M, Donaldson M J and Giorgetta N. 1981. Geology, mineralogy, and chemistry of lateritic nickel—cobalt deposits near Kalgoorlie, Western Australia. Economic Geology, 76: 1775~1783.
- Gleeson S A, Butt C R M, Elias M. 2003. Nickle laterites: A review. Newsletter of the Society of Economic Geologists, 4: 1, 12~18.
- Golightly J P. 1981. Nickeliferous laterite deposits. Economic Geology,

## New Achievements of Mineral Exploration and Utilization of the Laterite Nickel Deposits

WANG Ruijiang<sup>1)</sup>, NIE Fengjun<sup>1)</sup>, YAN Tiexiong<sup>2)</sup>, JIANG Sihong<sup>1)</sup>, WANG Haibei<sup>3)</sup>, LI Yan<sup>4)</sup>

1) *Institute of Mineral Resource, Beijing, 100037;*

2) *Consulting and Research Center, Ministry of Land and Resources, Beijing, 100035;*

3) *Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing, 100037;*

4) *Beijing Jingwei Assets Appraisal Co., Ltd., Beijing, 100044*

**Abstract:** With the high-speed development of social and economic development, the assumption and demand of nickel have been kept at high level. Statistic data show that 160 Mt nickel (metal) have been identified in the world, among that the sulfide nickel accounts for 28% of the total reserve while laterite nickel occupies about 72% of the total reserve. As sulfide nickel deposits are characterized by high ore-grade, less impurity, easy mining—metallurgy, the nickel from the sulfide nickel deposits occupies 60% of the world total nickel production. With the nickel production increasing dramatically and nickel reserve depleted obviously from the sulfide deposits as well as no more new sulfide deposits being discovered, the exploration and mining of the laterite nickel deposits have attracted domestic and international geologists' attention. The following features for these laterite nickel deposits have been recognized as follows: (1) At present, 115Mt metal nickel from the laterite deposits occurring in various countries (or regions) have been located; (2) The cost for mineral exploration, mining and ore-dressing is low; (3) The traditional metallurgical methods have been applied to the utilization of the laterite nickel ores, but the high pressure acid leaching (HPAL) and heap leaching (HL) may also be used in metallurgical processes of the laterite nickel ores; (4) Most of these major laterite nickel deposits are located along the equator and close the sea. Therefore, shipment of the laterite ore will be easy. Various ultramafic and mafic igneous rocks, with weathering covers, are widely distributed in southwestern China and Hainan Island. Some laterite nickel deposits or prospects occurring have also been located at top or neighboring regions of some ultramafic rocks. Therefore, attentions have to be paid on the mineral exploration and mining of the laterite nickel deposits occurring in China.

**Key words:** laterite nickel deposits; mineral exploration; mineral utilization; high pressure acid leaching; metallurgical technique; Australia

