

世界红土型镍矿的资源分布及勘查、开发利用现状

杨学善¹⁾, 郭远生¹⁾, 陈百友¹⁾, 崔银亮¹⁾, 郭欣²⁾

1) 云南省有色地质局, 云南昆明 650051;

2) 云南国土资源职业学院, 云南昆明 650217

摘要: 目前世界上最具开发利用价值的镍矿床类型为岩浆硫化镍矿床和红土型镍矿床。本文在全面收集、整理和综合世界红土型镍矿相关资料的基础上, 对世界红土型镍矿的资源概况、地理分布、地质特征以及勘查和开发利用现状进行了系统的分析与阐述, 文章对我国地勘单位和矿业企业走出去勘查和开发利用国外红土型镍矿资源具有现实的借鉴和指导意义。

关键词: 世界; 红土型镍矿; 资源概况; 勘查现状; 开发利用现状

中图分类号: P618.2; P612; P967 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2013.s1.30

The Distribution and the Exploration, Development and Utilization Situation of the Lateritic Nickel Ore Resources in the World

YANG Xue-shan¹⁾, GUO Yuan-sheng¹⁾, CHEN Bai-you¹⁾, CUI Yin-liang¹⁾, GUO Xin²⁾

1) Yunnan Nonferrous Metals Geology Bureau, Kunming, Yunnan 650051;

2) Yunnan Land and Resources Vocational College, Kunming, Yunnan 650217

Abstract: Magmatic sulfide nickel deposit and lateritic nickel deposit have highest development and using potential among the nickel deposits in the world now. On the basis of collecting, sorting out and synthesizing the related data of the lateritic nickel ore deposits in the world, the authors systematically analyzed and elaborated the lateritic nickel ore deposits in the world in the aspects of resources distribution, geological characteristics and current exploration, development and utilization situation. This paper is of realistic reference and guiding significance for Chinese geological exploration units and mining enterprises that intend to go abroad to carry out the exploration, development and utilization of the lateritic nickel ore deposits.

Key words: the world; lateritic nickel ore deposit; general situation of resource; current situation of exploration; current situation of development and utilization

镍是一种与钢铁工业紧密相关并在航天、国防和民用工业上有着广泛用途的有色金属, 是一种不可或缺的战略资源, 具有重要的经济地位。

根据世界已知镍矿床产出的地质环境、围岩性质、矿石物质组分以及矿床成因, 可将镍矿床分为岩浆硫化镍矿床、红土型镍矿床、热液砷镍矿床和沉积镍矿床四大类型(陈浩疏等, 1993), 其中, 目前最具开发利用价值的矿床类型为岩浆硫化镍矿床和红土型镍矿床。

由于岩浆硫化镍矿床具有矿石可选性好、提镍工艺成熟等特点, 且矿山运营成本和资本支出较低, 长期以来一直是开发利用的主要对象, 但因长期开采, 导致世界上该类型镍矿的镍保有储量逐年下降、开采深度逐步加深、开采难度不断加大、产能扩充日益困难。随着全球经济的快速发展, 镍需求量的大幅提高, 全球镍行业将资源开发的重点不得不转向资源丰富的红土型镍矿。

世界红土型镍矿资源相当丰富, 但相对而言,

本文由财政部国外矿产资源风险勘查专项(编号: 20121101)资助。

收稿日期: 2013-04-23; 改回日期: 2013-05-07。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 杨学善, 男, 1963年生。硕士, 教授级高级工程师。长期从事矿产地质勘查及技术管理工作。通讯地址: 650051, 云南省昆明市人民东路93号。电话: 0871-63142061。E-mail: ynysyxs@163.com。

我国红土型镍矿资源不占优势,因此,近年来国内一些矿业企业和地勘单位看准时机,纷纷涉足国外红土型镍矿的勘查和开发,形成了一轮到境外“淘镍”的热潮。遗憾的是,从公开发表的文献来看,目前国内尚难见到较为全面系统地介绍世界红土型镍矿资源概况及勘查、开发利用现状等方面的文章。

本文在全面收集、整理和综合世界红土型镍矿相关资料和文献的基础上(陈百友等, 2013; 何灿等, 2013), 对世界红土型镍矿的资源概况、地理分布、地质特征以及勘查开发利用现状进行了系统的分析与阐述, 以期为我国地勘单位和矿业企业走出去勘查和开发利用国外红土型镍矿资源提供一份较为详实的背景材料。

1 世界红土型镍矿的资源分布

红土型镍矿(Nickel Laterites)是指在热带或亚热带气候条件下, 超基性岩(纯橄榄岩、橄榄岩、蛇纹岩等)遭受强烈化学风化作用, 镍从含镍的硅酸盐矿物(橄榄石、顽火辉石等)中分解出来, 随地表水往下渗透, 并在风化壳中新生成富含镍的次生矿物, 使原来呈分散状态的镍得到富集, 从而形成的可供工业利用的风化壳型镍矿床。红土型镍矿具有规模大、埋藏浅、综合利用价值高(常伴生或共生铁、钴、铬、锰、钒等)及易于勘探和开采等特点(陈浩疏等, 1993; Brand et al., 1998; Elias, 2002; 何灿等,

2008)。

根据美国地质调查局网站公布的统计资料, 2012年底世界镍矿金属储量约为7500万吨, 储量基础约为1.5亿吨; 全球陆地已查明的镍资源量至少为1.3亿吨(镍品位 $\geq 1\%$), 其中约60%为红土型, 约40%为硫化物型。

红土型镍矿床主要分布在赤道附近的新喀里多尼亚、澳大利亚、印度尼西亚、菲律宾、古巴、巴西、哥伦比亚、多米尼加和科特迪瓦等国(图1)。根据红土型镍矿床的地理分布, 可将全球的红土型镍矿大致分为大洋洲、东南亚、中南美洲、非洲、欧洲和乌拉尔等六个成矿区, 此外, 中国、印度、美国等地也有少量红土型镍矿分布。

综合有关文献资料(Boldt, 1967; Golightly, 1981; Schellman, 1989; 赵魁阁等, 1991; De Oliveira et al., 1992; 陈浩疏等, 1993; Brand et al., 1998; Elias, 2002; 兰兴华, 2002; Gleeson et al., 2003; Dalvi et al., 2004; 戴自希等, 2004; 曹异生, 2005; 任学佑, 2005; 刘冰川, 2005; Thompson, 2006; 宋国明等, 2006; 施俊发等, 2006; 何灿等, 2008; 王虹等, 2009; 付伟等, 2010; Berger et al., 2011), 结合近年的勘查进展情况, 各成矿区的资源分布和地质特征如下:

大洋洲成矿区: 大洋洲是世界上红土型镍矿最丰富的地区之一, 区内已查明的红土型镍矿资源量已达数千万吨, 其中大部分产于新喀里多尼亚及澳

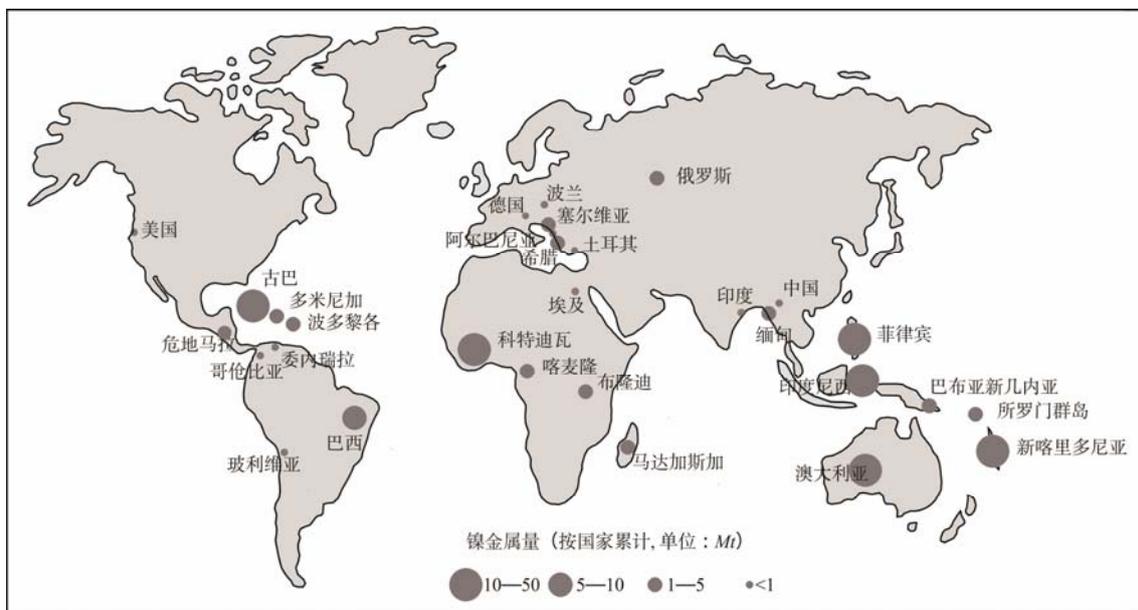


图1 世界红土型镍矿分布简图(据 Brand 等, 1998, 修编)

Fig. 1 Simplified map showing distribution of lateritic nickel ore deposits in the world (modified after Brand et al., 1998)

大利亚, 巴布亚新几内亚、所罗门群岛及新西兰有少量分布。新喀里多尼亚为位于大洋洲东北部的一个岛国, 北西长约 400 km, 北东宽约 48 km, 面积约 19000 km²; 该岛为中生代以后由于太平洋板块向澳大利亚板块俯冲而逐步形成的一个岛弧, 区内岩层主要为中新生的蛇绿岩套、火山岩及碎屑沉积物; 全岛约 75% 左右的面积分布有超镁铁质-镁铁质岩系; 岛上已知的红土型镍矿产地约有 1500 余处, 比较集中地分布于该岛的东、西海岸。澳大利亚的红土型镍矿也相当丰富, 镍矿的成矿母岩(超镁铁岩)主要是前寒武纪或古生代侵位的; 红土型镍矿主要产于东北部昆士兰州的格林维尔、南澳州的文吉利以及西澳州的卡尔古利以北地区; 澳大利亚的红土型镍矿以含钴较高为特征, 往往形成很有价值的红土型镍钴矿床。本成矿区内重要矿产地有: 新喀里多尼亚的戈罗(Goro)、科尼亚姆波(Koniambo)、努美阿(Noumea)、蒂翁(Thio)、库阿奥阿(Kouaoua)、尼泊伊(Nepoui)、纳凯蒂(nakety), 澳大利亚昆士兰州的马尔伯勒(Marlborough)、洛克哈普敦(Rockhampton)、格林维尔(Greenvale)、南澳州的文吉利(Wingelina)、西澳州的卡尔古利(Kalgoorlie)、瑞恩斯索普(Ravensthorpe)、芒特马加雷特(Mt Margaret)、莫林莫林(Murrin Murrin)、考斯(Cawse)、布隆(Bulong)、贡加里(Goongarrie)、新南威尔士州的塞耳斯通(Syerston)和塔斯马尼亚州的比肯斯菲尔德(Beaconsfield), 巴布亚新几内亚的马鲁姆(Marum)和拉姆(Ramu)。

东南亚成矿区: 东南亚也是世界上红土型镍矿最丰富的地区之一, 区内已查明的红土型镍矿资源量已达数千万吨, 其中大部分产于印度尼西亚和菲律宾, 部分产于缅甸, 少量产于马来西亚。印度尼西亚的红土型镍矿主要分布于东部, 矿带可从中苏拉威西的西部一直延伸到哈马黑拉、奥比、格贝、加格、瓦伊格奥群岛以及伊里安查亚的鸟头半岛和塔纳梅拉地区。菲律宾的红土型镍矿分布在菲律宾群岛的东、西缘, 与蛇绿岩带的分布相一致。缅甸的红土型镍矿主要沿若开山脉东缘长约 1000km 的南北向晚三叠世—早始新世蛇绿杂岩带分布。本成矿区内重要矿产地有: 印度尼西亚的哈马黑拉岛(Halmahera)、索罗科(Soroako)、加格岛(Gag Is.)、波马拉(Pomalaa)、格贝岛(Gebe Is.)、哇格岛(Waigeo Is.)、普劳塞布库(Pulau Sebuku)、昔克鲁普(Cykloop)、库库桑(Kukusan)、北科纳威(Konawe Utara)、苏巴印(Subaim)和马布里(Mabuli), 菲律宾

的苏里高(Surigao)、里奥图巴(Rio Tuba)、圣克鲁斯(Santa Cruz)、诺诺克岛(Nonoc Is.)、赛莱斯泰尔(Celestial)和贝龙(Berong), 缅甸的达贡山(Tagauung Taung)和莫苇塘(Mwetaung)。

中南美洲成矿区: 中南美洲红土型镍矿资源十分丰富, 区内已查明的红土型镍矿资源量已达数千万吨, 主要分布于古巴、巴西、危地马拉、多米尼加、波多黎各、哥伦比亚和委内瑞拉等赤道与近赤道国家, 其中又以古巴、巴西、危地马拉等国最为丰富。本成矿区原生岩石(母岩)类型有两种: 一种为中、新生代造山活动带逆冲蛇绿岩套蚀变蛇绿岩, 如古巴、危地马拉等的一些镍矿床的母岩; 另一种为前寒武纪地盾区绿岩带内的超镁铁质岩, 如巴西东南部的镍矿床的母岩。本成矿区红土型镍矿床中除蕴藏着丰富的镍外, 尚伴(共)生有钴、铁、锰等矿产。古巴的红土型镍矿主要分布在东北部近海岸的马亚里—巴腊夸地区东西长 100~200 km、南北宽 30~35 km 的范围内。巴西的红土型镍矿多限于南纬 8°~25°之间, 并主要集中于西部的戈亚斯州及北部的巴拉州, 其次在东北地区的巴伊亚州和东南部的米纳斯吉拉斯州也有发育。危地马拉的红土型镍矿主要分布在东部离加勒比海海滨巴里奥斯港约 80 km 的内陆, 矿床主要分布在伊萨瓦尔湖南北两岸由部分蛇纹石化的橄榄岩构成的东西向广大的山丘地区。本成矿区内重要的矿产地有: 古巴的莫亚湾(Moa Bay)、尼卡罗(Nicarao)、马亚里(Mayari)和卡雅尔巴(Cajalbana), 巴西的翁卡普马(Onca Puma)、尼克兰迪亚(Niquelandia)、上巴鲁(Barro Alto)、韦尔梅柳(Vermelho)、塞拉多斯撒拉亚斯(Serra dos carajas)和普拉塔波利斯(Pratapolis), 危地马拉的莱克伊萨贝尔(Lake Izabal), 多米尼加的法尔卡多(Falcondo), 波多黎各的马亚古埃斯(Mayaguez), 哥伦比亚的塞罗马托索(Cerro Matoso), 委内瑞拉的洛马海罗(Loma Hierro)。

非洲成矿区: 本成矿区内已查明的红土型镍矿资源量已超过上千万吨, 主要分布在非洲西部、中部及北部地区, 此外, 马达加斯加岛也有规模较大的红土型镍矿产出。红土型镍矿主要为超镁铁质岩经新生代风化作用形成。本区红土型镍矿多数只有次经济意义, 具开采价值的只有科特迪瓦、布隆迪、埃及、喀麦隆和马达加斯加的少数几个矿床。本成矿区内重要矿产地有: 科特迪瓦的锡皮卢(Sipilou)和比昂库马-图巴(Biankouma-Touba), 布隆迪的穆桑加提(Musongati), 埃及的圣约翰岛(St. John's Is.),

马达加斯加的安巴朵韦(Ambatovy)。

欧洲成矿区:本成矿区内已查明的红土型镍矿资源量约 400 多万吨,主要分布在欧洲的希腊、塞尔维亚、波兰、阿尔巴尼亚等国以及与其紧邻的西亚土耳其。欧洲北西—南东向的代那里克和阿尔卑斯两个造山带中分布的超镁铁质-镁铁质侵入体,在中生代热带气候条件下,经由化学风化作用形成了一些红土型镍矿。本成矿区内重要矿产地有:希腊的埃维厄岛(Euboea Is.)、拉雷姆纳(Larymna)和弗里萨基亚(Vrissakia),塞尔维亚的格拉维萨-锡卡托沃(Glavica-Cikatovo),马其顿的热扎诺沃(Rzanovo),波兰的宗布科维采(Zabkowice),阿尔巴尼亚的库克斯(Kukes),德国的圣埃吉丁(St.Egidien),土耳其的恰尔达格(Caldag)。

乌拉尔成矿区:本成矿区内已查明的红土型镍矿资源量约 200 多万吨,主要分布在俄罗斯乌拉尔的中部和南部,少量分布在北哈萨克斯坦。本成矿区的红土型镍矿是超镁铁岩(其中常常含一定比例的纯橄榄岩)在三叠—侏罗纪炎热气候条件下风化形成的,一般直接产于超基性岩风化壳之中,矿体露出或接近地表,多数可露天开采;部分矿石的镍含量较高,可达 1.8%~2.5%。本成矿区内重要矿产地有:上乌发列依(Верхний Уфалей)、利波夫斯克(Липовск)、哈里洛夫(Халилов)、布鲁克塔尔(Буруктал)和肯皮尔赛(Кемпирсай)。

除上述六个成矿区外,尚有几处零星分布有少量红土型镍矿,如中国云南省的元江和德宏邦滇寨、青海省的平安县元石山、印度奥里萨邦的苏金达(Sukinda)、Kansa、Kaliapani、Saruabil、Bhimatagar,以及美国俄勒冈洲西南部的里德尔(Riddle)。这几处零星分布的红土型镍矿已查明的镍资源总量为 300 多万吨。

2 世界红土型镍矿的勘查现状

1864年法国首先在大洋洲的新喀里多尼亚发现了红土型镍矿。1875年以后,法国人开始从镍红土中提取镍,为人类镍的生产翻开了新的一页。由于该类型镍矿床储量大、埋藏浅、易于开采,引起了人们的普遍重视。之后不久一直到 20 世纪末期,在一些近赤道和低纬度的国家和地区(如大洋洲的新喀里多尼亚、澳大利亚,中南美洲的古巴、巴西、多米尼加、波多黎各岛、危地马拉,东南亚的印度尼西亚、菲律宾、缅甸,非洲的布隆迪、埃及、科特迪瓦,中国的云南等)及少数中纬度的国家和地区(如前苏联及欧洲的希腊、德国、波兰、前南斯拉夫

和阿尔巴尼亚等)相继发现和探明了一大批红土型镍矿,其中有一些是世界级的大矿,如新喀里多尼亚的戈罗、科尼亚姆波,澳大利亚的马尔伯勒、罗克哈普敦、莫林莫林、瑞恩斯索普、芒特马加雷特、塞耳斯通,菲律宾的里奥图巴、苏里高,印度尼西亚的哈马黑拉岛、索罗科、加格岛,古巴的莫亚湾,科特迪瓦的锡皮卢、比昂库马-图巴等矿床的镍金属储量均在 200 万吨之上,世界镍矿资源量为之大增,红土型镍矿至少占陆地已查明镍资源量的 60%以上,成为镍资源中最主要的类型(戴自希等, 2004; 曹异生, 2005; 王虹等, 2009)。

长期以来,红土型镍矿的勘查重点一直是高品位矿(镍品位在 1.5%~1.8%以上),但近年来,随着镍矿资源需求的不断增加和镍价的大幅度攀升,中低品位的红土型镍矿(镍品位在 1.0%~1.5%)也成了重点勘查对象。2006 年至 2008 年上半年,当世界镍价处于历史新高期间,国内外众多企业和地勘单位纷纷投资开展红土型镍矿的勘查工作,在印度尼西亚、菲律宾、巴西、危地马拉、新喀里多尼亚、巴布亚新几内亚、马达加斯加、喀麦隆、塞尔维亚、土耳其、哈萨克斯坦等地发现了一大批红土型镍矿,使得世界镍资源量在短期内快速增加,并且提高了部分以前发现的矿床的资源量级别和研究程度(王绍伟等, 2006)。根据有关资料初步估计,仅中国的中钢集团、印度尼西亚的 Antam 公司(PT Aneka Tambang)和 Inco 公司(PT International Nickel Indonesia, PT Inco)及俄罗斯的诺里尔斯克镍业公司,近年来在印度尼西亚和菲律宾新探获的红土型镍矿的镍资源量就达千万吨左右。

云南省有色地质局自 2004 年以来,先后在东南亚的缅甸达贡山、莫苇塘、印度尼西亚拉姆拉姆、苏巴印、马布里、北科纳威、冷博、格贝岛以及菲律宾卡拉曼宿等地开展了红土型镍矿的勘查工作,累计探获镍资源量近千万吨,预测远景资源量数百万吨。

在镍价处于历史高位时,中国云南德宏潞西市邦家寨和青海平安县元石山等低品位镍矿也开展过勘查工作。

目前,全球红土型镍矿找矿勘查的重点区域和热点地区有:一是东南亚成矿区,其中印度尼西亚和菲律宾蛇绿岩分布广泛,气候湿热,红土型镍矿的成矿条件优越,找矿潜力巨大,是世界红土型镍矿找矿勘查的重点;二是中南美洲成矿区,其成矿母岩既有新生代的蛇绿岩套,又有前寒武纪地盾区绿岩带内的超镁铁质岩,尚有较好的找矿前景;三

是大洋洲成矿区,其中新喀里多尼亚大面积分布的超镁铁质-镁铁质岩系之上仍有较好的找矿潜力,澳大利亚西部前寒武纪超镁铁质-镁铁质火成岩分布广泛,为红土型镍矿的形成提供了得天独厚的物质条件。此外,非洲地区也有一定的找矿前景,20世纪90年代在非洲西部的科特迪瓦发现了多个红土型镍矿床,其中的比昂库马-图巴和锡皮卢两个矿床的资源量均在400万吨以上(戴自希等,2004;王瑞江等,2008)。

应该说,红土型镍矿的勘查并不存在明显的技术困难。过去,依靠常规的地质及地球化学(如水系沉积物测量)方法业已发现了大量的红土型镍矿床。由于人们目前已较为系统地掌握了地表超镁铁质岩的产出与分布情况,因此过去的一些勘查方法在现代红土型镍矿的勘查过程中的作用已有所减弱,相反,新技术、新方法在红土型镍矿的勘查过程中的作用已变得愈来愈重要,如根据不同比例尺的航空磁法测量结果,人们可以更容易、更精确地圈定出超镁铁质岩的分布范围、岩性变化情况及有利的构造部位;利用航空照片,可以初步勾画出工作区的地形、地貌及构造等方面的图件;利用遥感技术及磁法测量结果可以确定出多数可供进一步工作的有利地段;利用航空电磁法测量结果可以进行风化壳的三维地质填图(Gleeson et al., 2003)。此外,近年来,便携式矿石元素X荧光分析仪在红土型镍矿找矿靶区的快速优选及经济快速勘查评价中发挥了重要作用。

尽管红土型镍矿床是人们早已熟知的一种镍矿床类型,但其成矿理论研究却长期处在停滞不前的状态,找矿勘查工作也面临着不少问题,主要表现在以下几个方面:其一是矿床地质较为复杂,查清有用矿物和成矿元素分布规律的难度较大;其二是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;其三是加大采样密度,并且对其进行化学分析是确定矿石和围岩的唯一手段(王瑞江等,2008)。

3 世界红土型镍矿的开发利用现状

人类使用镍的历史可一直追溯到公元前300年左右。我国及国外一些国家的古代冶炼技术中早已利用镍,我国在春秋战国时期就已出现了含镍成分的兵器及合金器皿,古代云南产出的一种“白铜”中,就含有较高含量的镍。但是,直到1751年,瑞典矿物学家克朗斯塔特(A.F.Cronstedt)才首次从红砷镍矿中分离出金属镍。1825—1826年间瑞典开始

了镍的工业生产,但限于当时的生产技术条件,镍的生产长期未能得到显著的发展,直到发现将镍制成合金钢以后,铜镍分离技术得到了开发推广,镍工业才有了较快的发展,产量也迅速上升。1910年世界镍产量只有2.3万吨,到2012年全球原生镍产量已达到168.7万吨,镍的消费量也达到164.4万吨。近年来,世界镍消费量年均增长率均在4%以上,中国的镍消费量年均增长率则在20%以上。统计数据表明,促使镍需求量不断增长的驱动力主要来自两个方面:从使用角度看,驱动力来自不锈钢工业用量的增加;从地区角度看,驱动力来自中国需求量的不断增长(丁晓红,2005)。

红土型镍矿曾是早期镍的主要来源,以1875年新喀里多尼亚红土型镍矿开发利用为标志,从红土型镍矿中生产金属镍已有上百年的历史。但由于红土型镍矿品位较低,很难通过选矿获得较高品位(6%以上)的镍精矿,同时需要大规模开发,投资大、能耗高,因此,以20世纪初期开发加拿大萨德伯里(Sudbury)硫化镍矿为契机,人们将更多的注意力转移到开发硫化镍矿上。然而,由于世界已发现的硫化镍矿的资源量有限,且大部分都已被开发,因此近年来人们又开始重新关注红土型镍矿的开发利用(刘庆成等,2006)。

从红土型镍矿中提取镍主要有火法冶金和湿法冶金两类技术,近年来也出现了一些新技术,如生物技术、微波技术等。湿法冶金技术中又有两种主要工艺:一种为还原焙烧-氨浸工艺(简称为REAL法、Caron或卡隆法);另一种为高压酸浸工艺(简称HPAL法)。此外,针对我国元江红土型镍矿的矿石特点,我国有关单位借鉴低品位铀矿和低品位氧化铜矿的堆浸技术,开展了低品位红土型镍矿石的堆浸(常压酸浸)研究和实践,并已取得了初步成功;土耳其的恰尔达格红土型镍矿也开展了常压堆浸实验(徐爱东等,2001; Bergman, 2003; 张守卫等, 2003; Dalvi et al., 2004; 丁晓红, 2005; 曹异生, 2005; Waner et al., 2006; 朱景和, 2007; 王成彦等, 2008; 周晓文等, 2008; 翟秀静等, 2008; 晓华, 2008; 王虹等, 2009)。

自20世纪50年代以来,红土型镍矿的开发利用大致经历了以下几个阶段:

20世纪50—70年代初:由于对镍需求量的持续增长,红土型镍矿的开发利用得到了长足的发展,日本、美国、前苏联、古巴、巴西纷纷建设(或扩建)矿山和冶炼厂开发利用红土型镍矿资源。此期间,古巴的莫亚湾、尼卡罗,希腊的拉雷姆纳、埃维厄

岛, 美国的里德尔, 印度尼西亚的波马拉及新喀里多尼亚、菲律宾、巴西、多米尼加的一批红土型镍矿开始得到开发利用。除古巴的莫亚湾和尼卡罗分别采用高压酸浸和卡隆湿法冶炼工艺外, 其它多数采用火法冶炼工艺。

20 世纪 70 年代中期至 90 年代初: 由于石油危机及全球经济增幅的减缓, 红土型镍矿的生产成本急剧上升, 许多红土型镍矿项目被迫关闭。尽管如此, 此期间还是有一些红土型镍矿床得到了不同程度的开发利用, 如菲律宾的苏里高、里奥图巴, 印度尼西亚的索罗科、格贝岛, 澳大利亚的格林维尔, 危地马拉的莱克伊萨贝尔, 哥伦比亚的塞罗马托索及希腊、前南斯拉夫、巴西等国的一批红土型镍矿山均是在此期间投产的, 生产工艺仍以火法冶炼为主。

20 世纪 90 年代中期至 20 世纪末: 随着古巴莫亚湾高压酸浸厂首次对西方国家技术人员开放以及硫酸价格的大幅下跌, 红土型镍矿酸浸成本随之降低, 部分难溶性矿石不再是冶炼中的难题。澳大利亚采用高压酸浸工艺对莫林莫林、布隆、考斯等大型矿山进行开发利用, 并带动了周边印度尼西亚、菲律宾、新喀里多尼亚等国红土型镍矿的开发利用, 整体推动了世界红土型镍矿产量的上升。

21 世纪以来, 随着世界对镍需求量的进一步增长, 又有一批红土型镍矿山已投入或即将投入建设之中。综合有关文献及报刊报道, 目前全球在建与拟建的红土型镍矿项目主要有: 新喀里多尼亚的戈罗、科尼亚姆波、纳凯蒂, 巴布亚新几内亚的拉姆, 澳大利亚的马尔伯勒、卡尔古利、瑞恩斯索普、芒特马加雷特、塞耳斯通, 菲律宾的赛莱斯泰尔、贝龙, 印度尼西亚的哈马黑拉岛、加格岛、波马拉、北科纳威、苏巴印、马布里, 缅甸的达贡山, 巴西的韦尔梅柳、上巴鲁、翁卡普马和土耳其的恰尔达格等。此外, 我国元江镍矿工艺的改造成功, 使这一属于矿石镍品位低于国际工业开发标准、成分复杂、开发难度大的“边缘性经济资源”也已得到了开发利用; 我国青海元石山镍铁矿经过多种方案论证后, 业已采用还原焙烧-氨浸工艺建厂, 并已开始试厂进行开发利用。可以预见, 这些红土型镍矿项目的实施, 必将进一步提升红土型镍的开发利用水平及产量(赵魁阁等, 1991; 徐爱东等, 2001; Bergman, 2003; 张守卫等, 2003; Dalvi et al., 2004; 丁晓红, 2005; 曹异生, 2005; Waner, et al., 2006; 朱景和, 2007; 王成彦等, 2008; 周晓文等, 2008; 翟秀静等, 2008; 晓华, 2008; 王虹等, 2009; 李启厚等, 2009)。

在 20 世纪 50 年代以前, 约 80% 以上的镍是从硫化镍矿生产的。20 世纪 50 年代以来, 红土型镍矿产量占世界镍总产量的比例大致为: 50 年代约 20%, 60 年代约 22%, 70 年代约 28%, 80 年代约 35%, 90 年代约 38%, 近年来从红土型镍矿中提取的镍已差不多占世界总产量的 50%(何焕华, 2001; 卢生康等, 2004, 李启厚等, 2009)。

以往红土型镍矿的主要开采对象是高品位(1.5%~1.8% 以上)的矿床, 随着镍价的上涨及开发利用水平的提高, 近几年来一些中、低品位(1.0%~1.5%)的红土型镍矿床也开始被开采。近几年来, 除加拿大、俄罗斯、澳大利亚等国的矿业公司外, 中国国有及民营企业也纷纷参与海外红土型镍矿的开发, 如中国有色集团和山西太原钢铁公司投资开发的缅甸达贡山镍矿, 矿山系统已于 2011 年 3 月正式投产, 项目竣工后, 可年产镍铁 8.5 万吨, 含镍金属量约 2.2 万吨; 中国冶金科工集团有限公司投资开发的巴布亚新几内亚拉姆(瑞木)镍矿, 项目竣工后, 可年产 3.3 万吨镍和 3 千吨钴; 云南恒昊、沈阳罕王、陕西奥威等民营矿业公司也正在着手开发印度尼西亚的马布里、北科纳威和苏巴印等红土型镍矿。随着中国市场近年来对镍需求的大幅增加, 促使国内沿海地区如江苏、浙江等省的一些民营企业利用从菲律宾等国进口的低品位(1%左右)红土型镍矿石为原料, 采用高炉生产镍铁, 并已成为国内不锈钢生产企业镍的重要来源, 对缓解国内镍供应起到了重要的作用(陈甲斌, 2009)。福建吴航还从菲律宾进口低品位褐铁矿型镍矿石直接生产不锈钢。

总之, 因红土型镍矿石的冶炼技术复杂、成本较高, 目前红土型镍矿的开发利用水平总体上低于硫化镍矿, 大量的红土型镍矿尚未得到有效的开发利用。由于全球硫化镍矿可供开发资源的明显减少、开采深度的增加、采矿及环保成本的加大, 必将促使人类将开发重点转向资源丰富、易于开采且总体生产成本因技术进步可与硫化镍矿相竞争的红土型镍矿上来。随着红土型镍矿开发及综合利用水平的提高, 红土型镍矿的产量将在近年内超过硫化镍矿的产量。

4 结论

世界红土型镍矿资源丰富, 已查明的红土型镍矿资源主要分布在大洋洲、东南亚、中南美洲和非洲四个成矿区, 其中的大洋洲、东南亚和中南美洲三个成矿区成矿地质条件良好, 具有巨大的找矿潜

力。红土型镍矿分布集中、矿床规模大、矿床类型简单, 具有地质找矿方法和勘查手段相对简单、勘查成本较低等诸多优势, 地质勘查工作容易取得突破。红土型镍矿一方面具有适宜大规模露天开采、矿床开采成本较低的有利因素, 另一方面又具有矿石冶炼成本高、大规模开发前期投入相对较大、投资收益易受镍价波动影响等不利因素。随着人类对镍需求量的进一步加大, 红土型镍矿将是未来的主要开采对象。充分利用我国地勘单位和矿业企业的人才、技术和资金优势, 在优选勘查区域、精选开发项目的基础上, 采取多种形式积极、稳妥地走出去到境外勘查和开发利用红土型镍矿对缓解我国镍的供需矛盾具有现实而又长远的意义。

参考文献:

- BOLDT J R. 1967. 金川有色金属公司译. 1977. 镍(地质、采矿)[M]. 北京: 冶金工业出版社: 1-152.
- 曹昇生. 2005. 国内外镍工业现状及前景展望[J]. 世界有色金属, (10): 67-71.
- 陈百友, 刘洪滔, 杨平, 孙媛. 2013. 全球红土型镍矿床的基本成矿规律[J]. 地球学报, 34(s1): 202-206.
- 陈浩疏, 吴水波, 傅德彬, 钟宝兴, 傅泰治. 1993. 镍矿床[M]. 北京: 地质出版社: 1-194.
- 陈甲斌. 2009. 国内外镍资源开发利用分析[N]. 中国有色金属报, 1月20日第002版.
- 戴自希, 王家枢. 2004. 矿产勘查百年[M]. 北京: 地震出版社: 215-216.
- 丁晓红. 2005. 2010年前世界镍矿形势展望[J]. 国土资源情报, (5): 53-54.
- 付伟, 周永章, 陈远荣, 胡云沪, 陈南春, 牛虎杰, 张志伟, 李小龙. 2010. 东南亚红土镍矿床地质地球化学特征及成因探讨—以印尼苏拉威西岛 Kolonodale 矿床为例[J]. 地学前缘, 17(2): 127-139.
- 何灿, 孙建平, 程迁群. 2013. 红土型镍矿床勘查评价方法与优化[J]. 地球学报, 34(s1): 221-228.
- 何灿, 肖述刚, 谭木昌. 2008. 印度尼西亚红土型镍矿[J]. 云南地质, 27(1): 20-26.
- 何焕华. 2001. 世界镍工业现状及发展趋势[J]. 有色冶炼, 31(6): 1-3.
- 兰兴华. 2002. 新喀里多尼亚的镍工业[J]. 中国金属通报, (12): 9-10.
- 李启厚, 王娟, 刘志宏. 2005. 世界红土镍矿资源开发及湿法冶金技术的进展[J]. 湖南有色金属, 25(2): 21-24.
- 刘冰川. 2005. 菲律宾铜、镍矿产资源[J]. 中国金属通报, (28): 24-25.
- 刘庆成, 李洪元. 2006. 红土型镍矿项目的经济性探讨[J]. 世界有色金属, (6): 68-69.
- 卢生康, 赵万双. 2004. 镍工业发展趋势研究[J]. 兰州工业高等专科学校学报, 11(4): 55-58.
- 任学佑. 2005. 澳大利亚镍、镁矿产资源[J]. 中国金属通报, (11): 28-29.
- 施俊发, 李友权, 金庆花, 唐金荣, 姚华军. 2006. 世界矿情(亚洲卷)[M]. 北京: 地质出版社: 1-497.
- 宋国明, 何金祥, 陈丽萍, 付庆云, 王正立, 刘伟, 丁晓红, 张迎新. 2004. 非洲矿业投资指南[M]. 北京: 地质出版社.
- 王成彦, 尹飞, 陈永强, 王忠, 王军. 2008. 国内外红土镍矿处理技术与进展[J]. 中国有色金属学报, 18(专辑 1): 1-8.
- 王虹, 邓海波, 路秀峰. 2009. 重要有色金属资源—红土型镍矿的现状与开发[J]. 甘肃冶金, 31(1): 20-24.
- 王瑞江, 聂凤军, 严铁雄, 江思宏, 王海北, 李岩. 2008. 红土型镍矿床找矿勘查与开发利用新进展[J]. 地质论评, 54(2): 215-224.
- 王绍伟, 刘树臣. 2006. 21世纪初期国外矿产勘查形势与发现[M]. 北京: 地质出版社: 88-89.
- 晓华. 2008. 世界铜镍矿物原料基地: 回顾与展望(下)[J]. 国土资源情报, (12): 32-39.
- 徐爱东, 青峰. 2001. 澳大利亚三个采用 PAL 新工艺的红土矿开发项目进展状况[J]. 世界有色金属, (4): 62-64.
- 翟秀静, 符岩, 衣淑立. 2008. 镍红土矿的开发与研究进展[J]. 世界有色金属, (8): 36-38.
- 张守卫, 谢曙斌, 徐爱东. 2003. 镍的资源、生产及消费状况[J]. 世界有色金属, (11): 9-14.
- 赵魁阁, 顾丽兰, 刘宇翔. 1991. 世界镍钴矿山实录[M]. 北京: 冶金工业出版社: 1-108.
- 周晓文, 张建春, 罗仙平. 2008. 从红土镍矿中提取镍的技术研究现状及展望[J]. 四川有色金属, (1): 18-22.
- 朱景和. 2007. 世界镍红土矿资源开发与利用技术分析[J]. 世界有色金属, (10): 7-9.

References:

- BERGER V I, SINGER D A, BLISS J D, MORING B C. 2011. Ni-Co laterite deposits of the world—database and grade and tonnage models[R]. U.S. Department of the Interior & U.S. Geological Survey, Open-File Report 2011-1058: 1-26.
- BERGMAN R A. 2003. Nickel production from low-iron laterite ores: process descriptions[J]. CIM Bulletin, 96(1072): 127-138.
- BOLDT J R. 1967. Translated by Jinchuan Non-ferrous Metals Company. 1977. Nickel(Geology and Mining)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press: 1-152(in Chinese).

- BRAND N W, BUTT C R M, ELIAS M. 1998. Nickel laterites: classification and features[J]. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(4): 81-88.
- CAO Yi-sheng. 2005. Status quo and prospects of nickel industry at home and abroad[J]. *World Nonferrous Metals*, (10): 67-71(in Chinese with English abstract).
- CHEN Bai-you, LIU Hong-tao, YANG Ping, SUN Yuan. 2013. The Basic Metallogenic Regularity of Global Lateritic Nickel Ore Deposits[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(s1): 202-206(in Chinese with English abstract).
- CHEN Hao-liu, WU Shui-bo, FU De-bin, ZHONG Bao-xin, FU Tai-zhi. 1993. Nickel deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-194(in Chinese).
- CHEN Jia-bin. 2009. Development and utilization analysis of nickel resources at home and abroad[N]. *China Nonferrous Metals News*, On January 20, 002 edition(in Chinese).
- DAI Zi-xi, WANG Jia-shu. 2004. Mineral exploration in one hundred[M]. Beijing: The Earthquake Publishing House: 215-216(in Chinese).
- DALVI A D, BACON W G, OSBORNE R C. 2004. The past and future of nickel laterites[C]. *PDAC 2004 International Convention, Trade Show & Investors Exchange*, March 7-10: 1-27.
- DE OLIVEIRA S M B, TRESCASES J J, MELFI A J. 1992. Lateritic nickel deposits of Brazil[J]. *Mineral Deposita*, 27(2): 137-146.
- DING Xiao-hong. 2005. Outlook of supply and demand of nickel before 2010 in the world[J]. *Land and Resources Information*, (5): 53-54(in Chinese).
- ELIAS M. 2002. Nickel laterite deposits-geological overview, resources and exploitation, in COOKE D and PONTGRATZ J, eds., *Giant ore deposit: characteristics, genesis and exploration*[C]. Centre for Ore Deposit Research, University of Tasmania, Special Publication 4: 205- 220.
- FU Wei, ZHOU Yong-zhang, CHEN Yuan-rong, HU Yun-hu, CHEN Nan-chun, NIU Hu-jie, ZHANG Zhi-wei, LI Xiao-long. 2010. Geological and geochemical characteristics of laterite nickel deposit and ore genesis-A case study of Kolonodale deposit in Indonesia Sulawesi, Southeast Asia[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 127-139(in Chinese with English abstract).
- GLEESON S A, BUTT C R M, ELIAS M. 2003. Nickel laterites: A review[J]. *SEG NEWSLETTER*, Society of Economic Geologists, 54: 1, 12-18.
- GOLIGHTLY J P. 1981. Nickeliferous laterite deposits[J]. *Economic Geology*, 75th Anniversary Volume: 710-735.
- HE Can, SUN Jian-ping, CHENG Qian-qun. 2013. Exploration and Evaluation Methods for Lateritic Nickel Deposits and Their Optimization[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(s1): 221-228(in Chinese with English abstract).
- HE Can, XIAO Shu-gang, TAN Mu-chang. 2008. The Ni deposits of laterite type in Indonesia[J]. *Yunnan Geology*, 27(1): 20-26(in Chinese with English abstract).
- HE Huan-hua. 2001. Present situation and development trend of world nickel industry[J]. *Non-ferrous Smelting*, 31(6): 1-3(in Chinese).
- LAN Xing-hua. 2002. Nickel industry of New Caledonia[J]. *China Metal Bulletin*, (12): 9-10(in Chinese).
- LI Qi-hou, WANG Juan, LIU Zhi-hong. 2005. Development of exploitation and hydrometallurgical processes of nickel laterite resources in the world[J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 25(2): 21-24(in Chinese with English abstract).
- LIU Bing-chuan. 2005. Copper and nickel mineral resources of The Philippines[J]. *China Metal Bulletin*, (28): 24-25(in Chinese).
- LIU Qing-cheng, LI Hong-yuan. 2006. Economic discussion of laterite nickel project[J]. *World Nonferrous Metals*, (6): 68-69(in Chinese with English abstract).
- LU Sheng-kang, ZHAO Wan-shuang. 2004. Research on the developing tendency of nickel industry in China[J]. *Journal of Lanzhou Polytechnic College*, 11(4): 55-58(in Chinese with English abstract).
- REN Xue-you. 2005. Nickel and magnesium mineral resources of Australia[J]. *China Metal Bulletin*, (11): 28-29(in Chinese).
- SCHELLMAN W. 1989. Composition and origin of lateritic nickel ore at Tagaung Taung Burma[J]. *Mineralium Deposita*, 24(3): 161-168.
- SHI Jun-fa, LI You-quan, JIN Qing-hua, TANG Jin-rong, YAO Hua-jun. 2006. *World mineral fact(Aisa)*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-497(in Chinese).
- SONG Guo-ming, HE Jin-xiang, CHEN Li-ping, FU Qing-yun, WANG Li-zheng, LIU Wei, DING Xiao-hong, ZHANG Ying-xin. 2004. *African minerals investment guide*[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- THOMPSON M. 2006. *Base metals handbook*[M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited: 1-466.
- WANER A E M, DIAZ C M, DALVI A D, MACKEY P J, TARASOV A V. 2006. JOM world nonferrous smelter survey, Part III: Nickel: laterite[J]. *JOM*, 58(4): 11-20.
- WANG Cheng-yan, YIN Fei, CHEN Yong-qiang, WANG Zhong, WANG Jun. 2008. Worldwide processing technologies and progress of nickel laterites[J]. *The Chinese Journal of Non-ferrous Metals*, 18(special 1): 1-8(in Chinese with English ab-

- stract).
- WANG Hong, DENG Hai-bo, LU Xiu-feng. 2009. Important laterite nickel ore resources in the world: Present situation and exploitation[J]. *Gansu Metallurgy*, 31(1): 20-24(in Chinese with English abstract).
- WANG Rui-jiang, NIE Feng-jun, YAN Tie-xiong, JIANG Si-hong, WANG Hai-bei, LI yan. 2008. New achievements of mineral exploration and utilization of the laterite nickel deposits[J]. *Geological Review*, 54(2): 215-224(in Chinese with English abstract).
- WANG Shao-wei, LIU Shu-chen. 2006. Foreign mineral exploration situation and discovery in the early 21st century[M]. Beijing: Geological Publishing House: 88-89(in Chinese).
- XIAO Hua. 2008. World copper nickel mineral raw material base: Review and prospects (Part II)[J]. *Land and Resources Information*, (12): 32-39(in Chinese).
- XU Ai-dong, QING Feng. 2001. Development progress of three nickel laterite PAL projects in Australia[J]. *Wold Nonferrous Metals*, (4): 62-64(in Chinese).
- ZHAI Xiu-jing, FU Yan, YI Shu-li. 2008. The development and research progress of nickel laterite ore[J]. *Wold Nonferrous Metals*, (8): 36-38(in Chinese).
- ZHANG Shou-wei, XIE Shu-bin, XU Ai-dong. 2003. Status quo of nickel resources, production and consumption[J]. *Wold Nonferrous Metals*, (11): 9-14 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO Kuai-ge, GU Li-lan, LIU Yu-xiang. 1991. Brief introduction of nickel and cobalt mines in the world[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press: 1-108(in Chinese).
- ZHOU Xiao-wen, ZHANG Jian-chun, LUO Xian-ping. 2008. The current situation and prospects of the process and technology of nickel extraction from laterite-nickel ore[J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, (1): 18-22(in Chinese with English abstract).
- ZHU Jing-he. 2007. Exploration laterite-nickel ore and analysis on utilization technology[J]. *Wold Nonferrous Metals*, (10): 7-9(in Chinese).