

# 中国镍资源开发现状与可持续发展策略及其关键技术\*

杨志强<sup>1,2</sup>, 王永前<sup>2</sup>, 高谦<sup>1</sup>, 武拴军<sup>1,2</sup>

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 金川集团股份有限公司 镍钴资源综合利用国家重点实验室, 甘肃 金昌 737100)

**摘要:** 镍矿已成为现代航空工业、国防工业以及国民经济不可或缺的战略资源。首先基于世界镍矿资源调查、开发利用现状以及供需矛盾分析, 阐述中国镍矿资源特点和资源开发面临的主要问题, 提出中国镍矿开发与可持续发展的策略。然后指出循环经济和科技与制度创新并举, 提高镍矿资源综合利用水平, 是中国镍矿资源开发的发展方向; 合理开发国内资源, 充分利用海外资源是中国镍矿资源的开发策略。寻找新的镍矿资源是提高资源保有年限的根本; 发展边角矿、残矿、贫矿、深井与原位浸出的采矿技术, 提高复杂难采矿安全、高效和经济开发, 是中国镍矿资源开发与环境保护的重要基础。最后明确红土镍矿开发利用是中国镍矿资源开发的发展趋势。

**关键词:** 中国镍矿资源; 资源开发; 可持续发展; 关键技术; 研究进展

**中图分类号:** TD864 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0076(2016)02-0058-12

**DOI:** 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2016.02.012

## Present Situation and Development Strategy and Key Technologies of China's Nickel Resources Sustainable Development

YANG Zhiqiang<sup>1,2</sup>, WANG Yongqian<sup>2</sup>, GAO Qian<sup>1</sup>, WU Shuanjun<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil and Environmental Engineering University of Science and Technology of Beijing, Beijing 100083, China; 2. National Key Laboratory of Nickel and Cobalt Resources Comprehensive Utilization Jinchuan Group Co. LTD, Jinchuan 737100, Gansu, China)

**Abstract:** Nickel has become an indispensable strategic resource of modern aviation industry, national defense industry and national economy. Firstly, based on investigation of world nickel resource, exploitation and utilization present situation and analysis of the contradiction between supply and demand, China's nickel ore resources characteristics and problems of resources development were expounded, and China's nickel mine development and sustainable development strategic decision were put forward. Then developing circular economy and the system innovation of science and technology and raising the level of comprehensive utilization of nickel resources were regarded as the development directions of China's nickel ore resources. Reasonable utilization of domestic resources and fully exploiting overseas resources were China's nickel ore resources development strategies. Looking for a new nickel ore resources was the root of improving retaining age limit. Development of marginal ore, residue ore, lean ore, deep well and in-situ leaching mining technology and

\* 收稿日期: 2016-2-28

**基金项目:** 中国工程院咨询项目(HG-001); 镍钴资源综合利用国家重点实验室资助项目(金科矿2015-01)

**作者简介:** 杨志强(1957-), 男, 山西万荣人, 博士, 教授级高工, 博士生导师, 兼职教授, 研究员, 主要从事金属矿充填法采矿地压控制、安全生产管理与废弃物资源化利用等方面的研究与管理工作。

**通讯作者:** 高谦(1956-), 男, 江苏徐州人, 教授、博导, 主要从事充填采矿和地压控制方面的教学和研究工作。

improving mining level for complex and difficult resources in security, efficient and economic ways were important basis of the nickel ore resources development and environmental protection. Finally, it was illustrated that the development and utilization of laterite nickel ore was nickel ore resources development trend of the development in China.

**Key words:** China nickel resource; resources development; sustainable development; supporting technology; research progress

1 镍金属在国民经济和国防工业中的地位

镍是一种银白色金属,1751 年由瑞典矿物学家克朗斯塔特(A. F. Cronstedt)首先分离出来。由于它具有良好的机械强度和延展性,难熔耐高温,并具有很高的化学稳定性,在空气中不氧化等特征,是一种重要的有色金属原料,被用来制造不锈钢、高镍合金钢和合金结构钢,广泛用于飞机、雷达、导弹、坦克、舰艇、宇宙飞船、原子反应堆等各种军工制造业。在民用工业中,镍常用于制造结构钢、耐酸钢、耐热钢等各种机械制造业,还可作陶瓷颜料和防腐镀层。镍钴合金是一种永磁材料,广泛用于电子遥控、原子能工业和超声工艺等领域;在化学工业中镍还常用作氢化催化剂。近年来,在彩色电视机、磁带录音机和其他通讯器材等方面镍的用量也正在迅速增加。由于镍具有优良的性能,已成为发展现代航空工业、国防工业以及建立人类高水平物质文化生活的现代化体系不可或缺有色金属。

2 世界镍矿资源与开发现状

2.1 世界镍矿资源概况

世界上已知镍矿床主要有铜镍硫化矿和红土镍矿床两种类型。根据美国地质调查局资料,2006 年世界已探明镍矿地质储量约 230 亿 t,平均镍含量 0.97%,镍总量大约 2.2 亿 t,大于 1% 镍矿资源储量有 1.30 亿 t。世界硫化镍矿储量约 105 亿 t,平均品位 0.58%,镍含量约 6 400 万 t,约占镍矿总资源量的 28%。红土镍矿储量约 126 亿 t,平均品位 1.28%;镍含量约 1.6 亿 t,约占镍矿总资源的 72%<sup>[1-4,7,12,14,17]</sup>。

铜镍硫化矿床主要分布在欧洲、亚洲、非洲、澳大利亚和北美洲的古老地盾区、中生代凹陷区和古生代地槽褶皱带的岩浆侵入岩体中,这些侵入体多受旁侧的深大断裂控制,如加拿大、俄罗斯、澳大利亚、中国、南非、津巴布韦和博茨瓦纳等国家铜镍矿床。此外大洋深海底和海山区的锰结核和锰壳壳,

还含有大量镍资源,主要分布于太平洋海底,其中约有 40 亿 t 红土镍矿适于高温冶炼,平均纯度为 1.55%,含量约为 6 200 万 t,约占红土镍矿总数的 38%;约有 86 亿 t 的红土镍矿适于水冶,平均纯度为 1.15%,含量约为 9 900 万 t,占红土镍矿总数的 62%。世界上主要国家镍产量和镍矿资源储量的分布如图 1 所示,由此可见,世界上 13 个主要镍矿储量占到了全球镍资源的 93.1%。著名镍矿区有古巴的东北部、加拿大的肖德贝利(Sudbury)、俄罗斯的诺尔里斯克(Norilsk)、新喀里多尼亚和菲律宾的苏里高(Surigao)镍矿区。

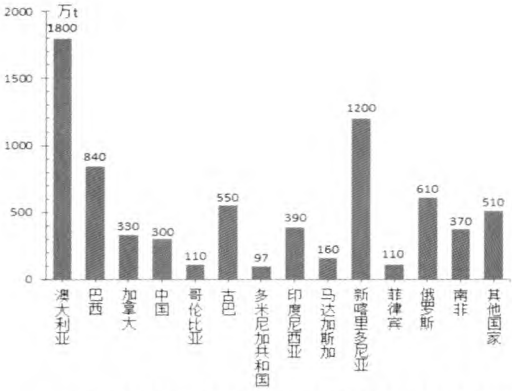


图 1 2013 年全球主要国家镍资源储量分布

随着新的镍矿床发现,世界镍资源分布格局发生较大变化。澳大利亚镍资源储量由 1997 年的第 5 位到 2002 年跃至第 1 位,至今保持第一位次,而且资源储量占据世界的 24.4%,是世界镍资源的核心区;新喀里多尼亚、古巴、俄罗斯、加拿大及等国家镍储量在世界占有重要地位,中国位居第 9 位。

2.2 全球镍矿开发与生产

2.2.1 全球镍资源开发与产量

随着世界经济的发展,各国对矿产资源需求量越来越大,作为战略物资的镍金属在全球范围内掀起了争夺矿产资源的开发与镍金属生产的浪潮。2000 ~ 2013 年世界与中国镍产量如图 2 所示。可见,2000 ~ 2007 年全球和中国镍产量持续增长。

2008 ~ 2009 年受经济危影响,2009 年镍产量降至 133 万 t,2010 年后开始回升,到 2013 年全球和中国镍产量达到历史最高的 248.55 万 t 和 89.59 万 t。

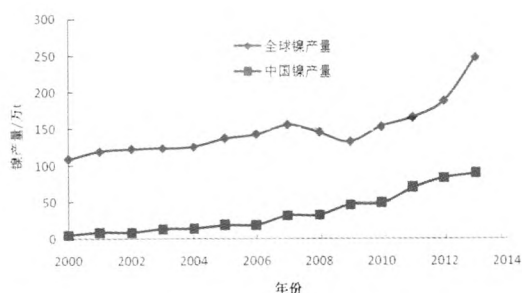


图2 全球与中国2000 ~ 2013 年镍产量变化曲线

### 2.2.2 全球与中国镍金属产量

图3 为全球和中国2000 ~ 2013 年全球和中国镍消费量变化情况。可见,2000 ~ 2007 年,全球镍消费量呈现增长态势。到2007 年镍消费量达到135.55 万 t,但2008 ~ 2009 年受金融危机影响,镍消费量急剧下降,2009 年降到123.4 万 t。中国镍从2000 年起消费量逐年增长。2008 年虽然受世界金融危机影响,但2008 年的镍消费量仍略有增长。2010 年开始快速增长,2011 年达到70.26 万 t,较2010 年增长了43.6%。到2013 年中国的镍消费量达到89.59 万 t,其主要原因是中国不锈钢产量超速增长。

### 2.2.3 全球镍价变化与预测

图4 为2004 ~ 2015 年全球镍价走势图。由此可见,21 世纪初由于中国镍消费量超速增长,2005 年后市场供应短缺,国际市场镍价一路飘升,到2007 年6 月达到历史最高点39 万元/t。2006 年中国开始使用红土镍矿生产镍铁,2007 年大量进口红土镍矿,解决了市场供应短缺的局面。2007 年国际市场镍价快速下跌,加之2008 年全球金融危机的爆发,不锈钢需求不振,镍价再度下跌。2009 年中国政府出台刺激经济政策,实施宽松货币的财政方针,加大固定资产投资力度,中国不锈钢消费量继续增加,全球消费量回升,价格上涨。由于未来几年市场供应不会出现短缺,因此镍价也不可能超越39 万元/t 的历史高点。鉴于未来几年内,国际主要货币美元难逃继续贬值之路,加之红土镍矿的经营成本高于硫化物镍矿,9 ~ 19 万元/t 的价格属于合理运行区间。

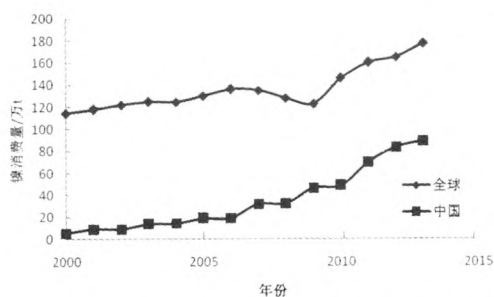


图3 全球与中国2000 ~ 2013 年镍消费量对比曲线

资料来源:① <http://www.insg.org/stats.aspx>;② World mental statistics。

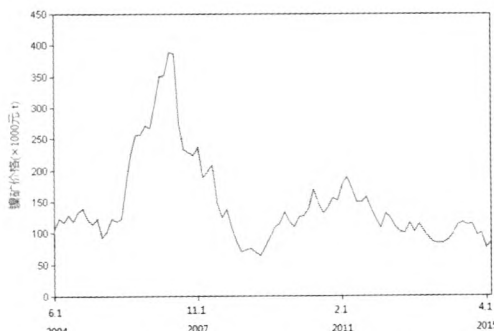


图4 国际市场2004 ~ 2015 年镍价走势图

资料来源: <http://www.infomine.com/investment/metal-prices/nickel/all/>。

## 3 中国镍矿资源、产能与需求分析

### 3.1 中国镍资源与开发现状

#### 3.1.1 中国镍矿资源分布与特点

中国镍矿资源总保有储量镍784 万 t,居世界第9 位。镍矿产地有近100 处,分布于18 个省(区)(见图5)。其中以甘肃省为主,保有储量占全国的61.9%,新疆、吉林、四川等省(区)次之。甘肃金川镍矿规模仅次于加拿大的萨德伯里镍矿,为世界第三大镍矿。

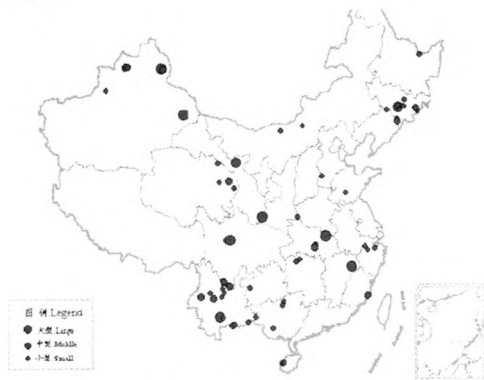


图5 中国镍矿资源分布示意图

资料来源:中国选矿技术网 [http://www.mining120.com/html/0912/20091225\\_17449.asp](http://www.mining120.com/html/0912/20091225_17449.asp)。

中国镍矿矿床类型主要为岩浆熔离矿床和风华壳硅酸盐镍矿床两个大类。后者以云南墨江镍矿为代表;前者又分岩浆就地熔离矿床与岩浆深部熔离贯入矿床两个亚类。甘肃白家嘴子镍矿即属深部熔离复式贯入矿床一类。从成矿时代分析,从前寒武纪到新生代皆有镍矿产出。岩浆型镍矿主要产于前寒武纪和晚古生代、早古生代、中生代也有镍矿产出;风华壳型镍矿则形成于新生代。中国镍矿分布主要分布在西北、西南和东北,其保有储量占全国总储量的比例分别为76.8%、12.1%、4.9%。就各省区来看,甘肃储量最多,占全国镍矿总储量的62%,其次是新疆11.6%、云南8.9%、吉林4.4%、湖北3.4%和四川3.3%。根据美国地调局2014年2月公布的矿产品数据显示,中国镍矿储量为300万t,占世界7400万t储量的4.05%,镍储量和保有储量居世界第9位,属中等国家水平。中国镍矿资源主要为硫化铜镍矿,约占全国总量的90%,红土镍矿仅占10%。近年来,在新疆哈密图拉尔根铜镍矿探明镍金属量超过10万t;新疆若羌县坡北一带探明镍金属资源量128万t,属于特大型镍矿;青海柴达木盆地发现一大型高品位镍矿床,镍金属资源量近15万t。

### 3.1.2 中国镍矿资源开发现状

中国对镍资源开采利用起步于20世纪60年代,通过几十年的努力,中国镍资源开发与利用得到飞速发展。目前镍资源领域已形成了比较配套的采、选、冶综合生产能力和装备水平。但由于中国镍矿资源所固有的特点,绝大多数镍矿属于难采矿床和地下开采,采矿成本逐年提高,直接影响资源市场竞争力;同时,作为中国最大最重要矿区—金川硫化铜镍矿床,因经历了自吕梁运动以来的各次构造运动作用、变质作用及多期岩浆的侵入作用,工程地质条件极为复杂,开采难度很大,在一定程度上制约了中国镍精矿供应产能的扩张。

目前中国除了暂难利用的氧化镍矿、硅酸盐镍矿、红土型镍矿以及贫矿外,已探明的大型硫化铜镍矿床大多已经开发利用。除了一些零星小镍矿,金川镍矿Ⅳ矿区贫矿和Ⅱ矿区“采富保贫”保留的上下盘贫矿以及新疆喀拉通克二矿区、新疆哈密黄山铜镍矿尚待开发。近年来,随着国内市场对镍需求的大幅增加,促使国内沿海地区,如江苏、浙江等一些民营企业利用从菲律宾进口的低品位红土型镍矿为原料,采用高炉生产镍铁规模迅速扩大,并已成为

国内不锈钢生产企业的重要原料来源,对缓解国内镍供应起到了重要作用。金川集团公司利用海外资源,在广西防城港建立了广西金川集团有限公司,利用海外资源进行铜镍金属冶炼与产品加工。红土镍矿和贫矿资源的开发利用,不仅面临技术难题,而且居高不下的生产成本也是重要的问题。同时,随着中国对环境保护越加重视,镍矿资源安全、高效与环保的开发利用也面临严峻挑战。

## 3.2 中国镍金属生产与需求分析

### 3.2.1 中国镍产量

根据中商产业研究院数据库(Ask CI Data)和国家统计局最新数据显示,中国镍产量从2004年的7.15万t至2014年增长到35.36万t(见表4),10年间平均年增长39.5%。图6显示中国2004~2014年镍产量及同比增长率。由此可见,中国镍产量呈波动上升态势。2012年产量大幅下跌,2013年产量开始回升,连续两年增长率超过26%。2013年产量比2012年(22.04万t)同比增长26.39%,2014年中国镍产量为35.36万t,与上一年相比增长27%。

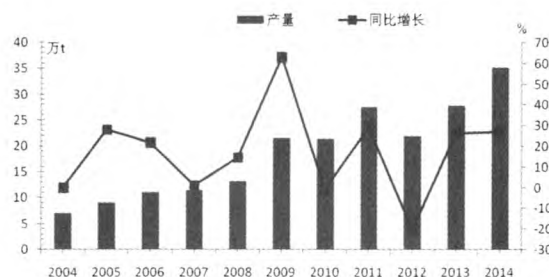


图6 2004~2014年中国镍产量统计图

资料来源:中商产业研究院数据库和国家统计局。

### 3.2.2 中国镍消费与需求分析

2005~2011年世界镍消费量一直保持在120~140万t的范围(见图7)。随着中国经济快速增长,对不锈钢需求日益增长,2005年开始中国成为世界上头号镍金属消费大国,镍消费量从2005年的19万t到2011年增加到60万t,占世界消费量的比例从2005年的15.2%到2011年增加到36.8%。就全球而言,镍消费结构变化不大,包括不锈钢65%、电镀8%、有色合金12%、合金5%和其他10%等。

图8给出了2004~2012年中国镍生产与消费的变化情况。由此可见,中国镍金属生产量与消费量的差距在逐渐增大,消费缺口逐年增加。

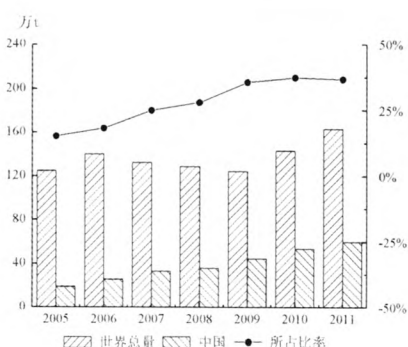


图7 2005~2011年中国和世界镍消费量

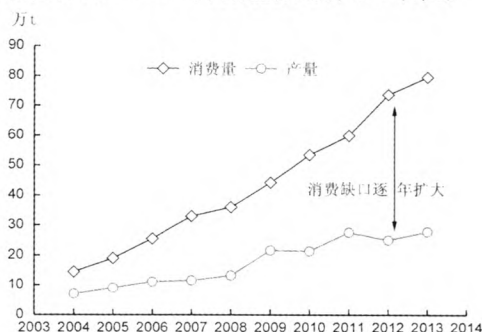
数据来源:2002~2010 中国行业咨询网,2011 年来源<sup>[8-9]</sup>。

图8 2004~2012年中国镍生产与消费量对比曲线

数据来源:USGS。

### 3.3 中国镍资源保障分析

随着镍消费量的增速大于矿石生产能力的增速,中国镍矿资源保障程度逐年降低,矿石资源需求量逐年增大,镍矿自给率逐年减低。图9所示2004~2013年中国镍矿资源产量与其消费量情况。由图可见,中国镍矿矿石生产满足程度从2006年的57.7%到2012年下降至26.32%。中国镍矿石进口量逐年递增(见图10),从2006年的380万t到2007年增至1560万t。2008年受全球性金融危机影响,镍矿石进口回落,进口量降为1230万t,2009年后镍矿石进口再次增加到1640万t,2010年达到2510万t。精矿进口变化较大,2006~2007年平均在10万t左右,2008年受多方面因素影响,进口只有1万t。2009年精矿进口达到24.2万t,占全年消费量的54%。2010年因镍矿石进口量增幅较大,精矿进口减至18.1万t。近年来中国镍矿资源对外依存程度到达80%,保障稳定的进口来源,对镍矿的供应具有重要的影响。

图11为世界和中国镍矿平均保证年限对比情况。由此可见,2002年中国镍矿保证年限为20年,全球保证年限约为46年,相差达26年。2007年中国镍矿的保证年限只有13年,相当于全球平均水平的1/3。2008年后由于中国新发现一大批新矿床,

保证年限略有增加。2009年中国保证年限为38年,与全球的平均保证年限相差17年。2011年与全球平均保证年限虽然只相差7年,但中国“十二五”期间中国镍消费量年均增长约为6.1%,2015年中国镍消费量将达到70万t。中国镍矿保证年限将继续走低,与全球平均保证年限的差距也会继续扩大。

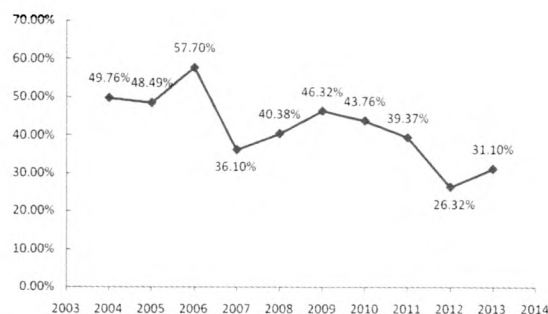


图9 2004~2013年中国镍矿资源产量占消费量的比例

数据来源:USGS,中国行业咨询网。

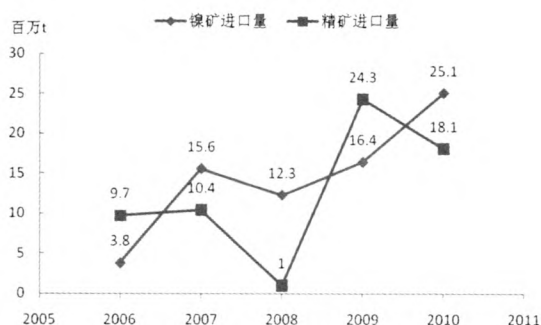


图10 2006~2010年中国镍矿石和精矿进口变化曲线

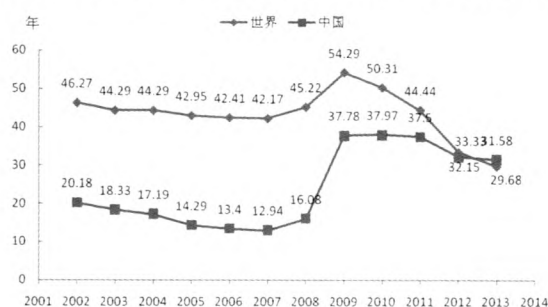


图11 中国和世界镍矿资源保证年限分布曲线

数据来源:USGS。

## 4 中国镍资源面临问题与可持续发展策略

### 4.1 中国镍矿资源开发面临的临问题

#### 4.1.1 资源短缺,对外依存度高和资源保障率低日趋严重

中国镍基础储量居世界第9位,镍矿资源相对

匮乏。已探明的镍矿资源表明,90%资源为硫化铜镍矿,仅10%为红土镍矿,与世界镍资源的型式相反,探明的镍矿储量绝大部分集中在甘肃金川地区。随着近30年来国民经济的发展,大约80%的镍矿储量已经得到了开发利用,近期可供开发利用的储量不多。

根据当前地质工作基础预测,在中国国土范围内发现类似于金川大型镍矿的可能性不大。进一步加强工作有可能发现一些铜矿伴生资源,但这些资源开发利用的经济性显然不能与金川矿区相比。由于没有新的矿产资源支撑,我国镍矿资源短缺矛盾将日益突出,面临严重的资源危机。目前国内镍找矿具有前景的地区,在新疆东部的弯塔格地区和塔里木北缘发现了有可能形成铜镍矿床的超基性岩体,是当前我国唯一的镍找矿规划区。据地质矿产部门分析,我国镍矿预测资源量为900万t,远不能满足经济发展的需要。为了缓解国内镍原料供应紧张的局面,国内主要镍生产企业开始采取进口镍精矿等原料的措施,增加国内镍冶炼产品生产。近年来,中国镍精矿进口量逐年上升,2014年我国镍矿进口量接近4800万t(见图12),因此中国镍矿资源对外依存度逐年增加。同时,中国对镍金属产品消费逐年增加,镍资源保证年限与世界平均水平不仅相差悬殊,而且差距将持续扩大。镍矿资源后备不足制约钢铁产业和国防工业的发展,影响国民经济的可持续发展。

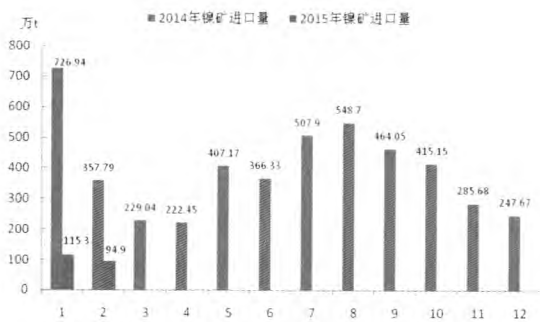


图12 2014~2015年中国镍矿进口量统计图  
资料来源:中国铁合金在线。

4.1.2 镍矿资源开发规模和采矿经济效益面临挑战

除了金川镍矿资源外,其他矿区的镍矿品位普遍偏低。经过几十年的开发,金川镍矿Ⅱ矿区富矿资源逐年减少,面临更多的是Ⅲ、Ⅳ矿区以及Ⅱ矿区上下盘贫矿资源。另外,可供开发的新疆喀拉通克二矿区、新疆哈密黄山铜镍矿资源的矿石品位普遍

较低。可以开发利用的镍矿床不仅品位低,而且矿体埋藏深,矿区地应力高,矿岩破碎,围岩稳定性差,矿石开采难度大,目前大多镍矿山普遍采用充填法开发。例如甘肃金川矿体埋深400~1200m,受历次成矿地质构造作用,地应力高,矿岩破碎。目前采矿深度近千米,采场地压大。因此采用下向分层进路式胶结充填采矿方法。新疆的喀拉通克、吉林磐石和陕西煎茶岭镍矿也均采用充填法开采。

目前已经探明的大中型硫化镍矿已基本开发利用,剩下的主要是一些零星小镍矿,因此增加资源开发规模比较困难。深埋贫矿资源的充填法开采,不仅难以扩大生产规模,而且采矿成本高,由此降低镍矿资源开发的经济效益,直接影响中国镍金属资源在国际市场上的竞争力。

4.1.3 镍矿资源安全、高效、环保开发利用面临巨大压力

深井和低品位镍矿开采伴随大量废石、废水排放;镍矿选冶也排出大量尾砂和水淬渣。废弃物排放不仅占用大量土地,而且还污染环境。同时,深井采矿的高温、高压和高渗透的“三高”采矿技术条件,不仅提高采矿成本,降低采矿经济效益,而且导致采场地压剧烈显现、围岩变形严重,由此给围岩稳定性控制带来巨大困难。与此同时,随着开采深度增加,地下承压水增大,采场突水地质灾害危险性增大,由此给资源开采带来严峻的安全、高效和环保压力。随着我国对环境保护要求越来越严格,未来深部复杂难采资源的开发利用面临更大挑战。

4.2 中国镍矿资源开发持续发展策略

以美国、日本、德国、澳大利亚为代表的发达国家,实施全球资源战略,鼓励本国公司到海外勘探开发矿产资源,优化资源配置,获取廉价和优质的矿产资源,扩大对全球资源的控制,保证本国资源需求,确保国家经济安全。针对中国镍矿资源短缺以及国民经济快速发展对镍资源存在的供需矛盾,提出中国镍矿资源可持续发展战略决策至关重要。

4.2.1 加大地质探矿投资力度,寻找新的镍矿资源,扩大矿产资源储备

根据现有地质工作基础分析,中国仍有一定的镍矿找矿前景。因此加大地质探矿投资力度,采用新技术、新方法、新理论,加强矿产资源评价,寻找新的镍矿资源,扩大矿产资源储备,是中国镍矿资源战略的一项长期任务。中国西部地区地域广阔,地质

工作程度较低,资源潜力尚未查清;东部地区勘查、开发深度不够,具有潜力可挖。因此可开辟 500 m 以下的找矿第二空间。近期的地质找矿重点应在新疆东部地区、青藏高原、云南元江和墨江等老矿区。加强重点成矿带的普查与勘探,寻找新的矿床,并在已有大型镍矿深部(甘肃金川、吉林磐石、新疆喀拉通克等)和边部找矿,增加资源储量,延长矿山服务年限。地质探矿资金投入应按有关政策,深化改革,建立健全矿权市场机制,实行国家引导,企业投资受益的原则,以推进中国镍矿地质找矿工作。

#### 4.2.2 合理开发利用国内资源,积极开发海外资源,保证中国镍原料供应

随着国民经济和社会的全面发展,中国镍资源紧张趋势将更加明显。合理开发利用国内资源,积极开发海外资源,是保证中国国民经济发展、国家安全和镍资源可持续发展的需要。中国国内镍矿资源开发,应严格遵守国家矿产资源和环境保护的法律法规,在国家产业政策和发展规划的指导下有序进行。合理规划矿山开发,严禁对镍矿资源的破坏性乱采滥挖;国家应出台相关鼓励政策,积极发展再生镍产业,建立完整的回收体系,保障再生镍原料的供应,提高再生镍在原镍产量中所占的比率。积极控制和掌握海外具有优势的镍矿资源,大力推进海外镍矿资源开发利用,实现中国镍矿资源的生产和供应的国际化经营。尤其重视红土镍矿资源的开发利用,在境外(印度尼西亚、菲律宾等)建立原料供应基地,保障中国镍矿资源供应。将实施海外镍资源开发作为中国镍资源政策的战略重点。为了更好地推动海外镍矿资源开发,适应中国企业参与全球优势镍矿资源争夺的竞争形势,国家有关部门应不断完善海外镍矿资源开发的金融、保险、服务体系,为企业的镍矿资源国际化经营创造有利的融资条件。

#### 4.2.3 镍资源开发与利用推行清洁无废生产,减少环境危害,保护矿山环境

镍资源开发与生产中伴随着废石、废渣、废水、废气等工业废弃物排放。废弃物排放与堆存必然对环境产生严重影响。镍资源的开发利用实施废弃物资源化利用,建立无废少废矿山和实现清洁生产,是未来镍矿资源开采和冶炼的发展趋势,是镍矿企业发展清洁生产的模式势在必行。镍矿企业应增加投入,开发新技术,发展循环利用,降低能耗,减少对环境的破坏。例如,利用冶金矿渣开发新型充填胶凝

材料,提高废石、尾砂和灰渣的充填采矿技术,不仅可以减少废弃物排放,而且还是降低充填采矿成本,提高采矿经济效益的必由之路,从而实现镍资源开发利用的经济效益、环境效益和社会效益的统一,以保证我国经济和社会发展需要,提升镍业企业竞争力。

在相当长的时期内,甘肃金川镍矿仍是中国镍矿资源开发和利用的主要生产基地,在中国镍矿资源开发中占有相当重要的地位。按照合理开发和实事求是的原则,以及河西走廊地区的生态环境状况,金川矿区在镍产能达到一定规模后,不宜继续扩大开发规模,应以发展镍深加工产品为主。为了实现人与自然的和谐,避免金川镍基地走资源开发型城市的发展与衰败的道路,应按新的矿产资源开发模式,逐步将金川镍基地的生活设施和深加工生产转移中心城市和沿海地区。

#### 4.2.4 优化镍工业产业结构,实现合理的产业链和企业组织结构

以镍金属产品为龙头,以资产为纽带,加快推进中国镍业的战略重组,形成以金川集团公司等为主的具有国际竞争力的大型镍业企业,实现合理的产业链和企业组织结构。按照大力开发利用海外镍矿资源的要求,进一步优化中国镍业布局结构。为了更好地利用海外资源,逐步将镍冶炼加工向沿海地区转移。利用进口红土型镍矿原料在沿海地区建设大型镍铁和氧化镍烧结块生产企业。积极调整产品结构,改变中国镍生产以电解镍为主的产品单一局面。积极发展市场需要的技术含量高,附加价值大的镍产品。近期重点应大力发展能耗低、提取率高、有利于贵金属富集、无污染和市场广泛应用的碳基镍生产,加快开发镍基合金产品。

#### 4.2.5 重视红土镍矿开发与建设与资源综合利用,注重大洋底镍矿资源

目前全球镍产量 60% 以上来自于硫化镍矿床,未来 5 年内仍将保持这种格局。但是从长期来看,以红土镍矿为原料生产镍铁将成为未来发展趋势。随着全球镍需求量增大,各国际镍公司除了加速对铜镍硫化矿床的开采利用外,十分重视红土型镍矿的开发建设。从 2012 年起,中国增加对红土镍矿的进口量,红土镍矿进口量连续 2 年连创新高,港口及企业库存于 2013 年年底达到历史新高,以应对印尼政策带来的原料供应变局。截止 2014 年 1 月 10 日,中国沿海 9 个港口的红土镍矿库存为 2 714 万

t。同时中国红土镍矿的企业库存预计在2 000万t左右。中国市场的整体红土镍矿库存量高达4 700万t左右,相当于中国市场大约1年的需求量。应鼎力支持金川集团公司、吉林镍业集团公司积极参与海外新镍矿开发和矿权市场交易,由此获得可靠的海外镍矿资源;鼓励中国五矿集团公司通过国家间经济技术合作,参与国外红土型镍矿开发;积极推动上海宝山钢铁集团公司等钢铁工业企业与国际镍业跨国公司建立战略合作伙伴关系,形成镍金属原料的长期和稳定的供应,从而规避市场风险。

据估计,在4亿 $\text{km}^2$ 海底总面积中,大约有15%为多金属结核所覆盖,而且每年还以1 000万t的速度在不断增加。目前总储量约为2~3万亿t。在这些多金属结核中,镍的平均品位达到1.26%,是一个巨大的镍矿资源,虽然对解决中国镍资源的供需矛盾不会很快起作用,但是它具有重大的战略意义,因此必须予以高度重视。

#### 4.2.6 开展镍矿资源开发利用技术攻关,提高技术水平,推动产业升级

中国镍矿开发利用技术虽然已经取得重要进展,但与国际先进水平仍存在很大差距。为了加快中国镍矿资源的开发与综合利用,实施中国镍矿资源的可持续发展战略,合理开发国内资源,充分利用海外资源,大力发展循环与环保经济,提高镍矿资源的利用水平,满足中国经济和社会发展需要,有待于依靠技术进步,推动产业升级。金川镍矿建矿以来,持续不断的开展技术攻关,在深部及周边找矿、深埋高地应力难采矿床的安全高效开采、低品位镍矿选冶以及新产品开发等方面,获得了一系列重大技术成果,为了金川镍矿安全、高效开发和资源综合利用奠定了基础。针对当前中国镍工业技术发展水平以及追求目标,确定中国镍矿资源开发与持续发展需要攻克的关键技术,争取尽快开发出具有自主知识产权先进技术,打破国际镍业跨国公司对中国的技术封锁,降低中国镍矿资源开发成本,提升镍业企业的国际竞争力。提高中国镍矿资源开发利用技术,淘汰浪费资源、污染环境、经济效益低和社会效益差的镍矿山采选和冶炼生产技术。

## 5 中国镍矿资源可持续发展的关键技术

中国镍矿资源的特点导致在开发利用过程中面临诸多困难,为此开展了大量的理论研究与技术攻关,取得了一系列成果,已在我国镍矿资源开发利用

中发挥了重要作用。本节仅就中国镍矿成矿理论与找矿方向、边角矿和二次资源开采、深井安全高效与经济采矿、低品位资源原位溶浸采矿及红土型镍矿选冶技术的研究成果作简要概述,为中国镍矿资源开发和综合利用和进一步开展研究提供参考。

### 5.1 中国镍矿成矿理论与找矿技术

中国成镍带与找矿方向的研究表明,中国镍矿床形成时代从中一新元古代一直延续到新生代,主要集中在新元古代和晚古生代两个高峰期,主要分布在西北、西南和东北地区。以镍矿床的空间分布特征为基础,以成矿规律和成矿条件为依据,将中国的范围内划分了30个成镍矿带,给出了东天山、甘一新北山、龙首山、吉中—延边、康滇、扬子南缘等6个成镍矿带,在此基础上,对中国镍矿从成矿地质背景、地球化学特征、矿床分布密集程度、成矿强度以及资源潜力方面进行了分析与综合,结合矿床类型特点,提出了喀拉通克、觉罗塔格、北山、辽吉、龙首山、祁曼塔格、墨江四平和宝坛等8个战略接续区,从成镍带角度明确了中国镍矿的找矿方向<sup>[69-72]</sup>。

作为中国最大的金川铜镍硫化物矿床,我国地质工作者对成矿理论产生极大兴趣,在成矿时代、期次、模式、控矿因素、断裂构造以及地质—地电化学—地球物理等多元信息进行了分析和研究,并对金川矿床成矿理论进行预测,为在金川矿床深部与周边找矿提供了依据<sup>[73-85]</sup>。作为我国6个成镍矿带之一的新疆地区,对哈密白鑫滩和喀拉通克铜镍硫化物矿床开展了矿床地质特征、成因以及新的找矿方向开展研究;同时在罗东镍矿和富蕴县库卫一带铜镍矿开展了找矿预测研究,为在新疆找矿奠定了理论基础<sup>[86-89]</sup>。同时,我国在云南镍矿的成矿规律和找矿前景进行了分析和预测<sup>[90-92]</sup>。

### 5.2 矿山边角矿和残矿资源开采技术

对于早期采用露天开采以及基于“采富保贫”开发战略的资源开采,在露天边坡和矿体上下盘残留一些贫矿。随着优质资源日趋减少,在前期开发过程中残留的边角矿体以及上下盘保留的贫矿开发利用,是延长矿山采矿年限和矿山企业可持续发展的重要举措。

金川镍矿在初期开采过程中,为了尽快满足我国国民经济和国防工业对镍金属的迫切需要,在Ⅱ矿区厚大矿体的开采中,实施了“采富保贫”开发决

策。为此,虽然在以后的开采中,附带开采矿体下盘的部分贫矿,但在矿体上部以及上盘,保留大量的贫矿尚待开采。经过近十年的开采,Ⅱ矿区开采已经进入深部开采,大于1%的富矿逐年减少,因此,矿体上部及上盘贫矿的开采,已经提到议事日程上。鉴于金川矿床经历了历次地质构造,不仅矿区地应力高,地压大,而且矿岩体极为破碎,矿岩稳固性差。矿体上部以及上盘矿体受采矿的影响,其围岩稳定性更差,因此给该部分矿体的开采带来更大困难。为此,金川矿山为此也开展了扰动岩体的工程地质分析、扰动围岩中贫矿二次采矿技术、工艺以及稳定性控制技术的研究和可行性评价,为保留的贫矿开采提供了理论依据。针对吉林红旗岭镍矿原开采过程中的残余矿量以及已经探明的还没有进行开采设计的深部边部盲矿体,还有将是在边开采边探过程中新发现的储量,作为二次资源的开发和利用开展研究,针对二次资源品位低、矿石量小等特点,进行采矿方法研究和选矿设备的改造。通过资源的二次开发,共可回收富家矿露天三角矿柱10万多t,以及F1断层下3万t矿石,从而为矿山持续生产打下坚实的基础,同时也对资源的二次开发利用打开新的局面<sup>[21]</sup>。

### 5.3 深井与贫矿安全高效与经济采矿技术

随着资源开发的进展,很多矿山进入深井开采阶段。同时,随着富矿资源的日趋减少,原待采或缓采的贫矿资源开发也是在必行。例如金川Ⅱ矿区开采深度接近千米,Ⅲ矿区的贫矿已经进入开发中,而Ⅳ矿区贫矿也正在详勘和可行性研究开发阶段。

深井开采所固有的高温、高压和高渗透的“三高”采矿技术条件,因此,不仅提高采矿成本,而且还使采矿生产面临严峻的安全隐患。尤其深部高应力与高渗透水压的相互渗透,采场围岩的剧烈变形以及高水压下用水、突水,都给安全采矿带来巨大困难。贫矿开采面临采矿经济效益的巨大挑战。尤其目前镍金属的国际市场处于低迷状态,实施低品位贫矿的安全、高效和经济开采,是贫矿开采必由之路。

我国镍矿开采普遍采用充填法采矿,金川镍矿的龙首矿、二矿区和三矿区、新疆地区的喀拉通克镍矿、山西省的煎茶岭镍矿以及吉林磐石镍矿均采用分层胶结充填法采矿。充填法采矿不仅可以减少废弃物排放,保护环境,实现绿色开采,而且还能够提高资源回收率,降低矿石贫化率。这对充分回收不可再生的矿产资源,延长矿山采矿年限具有重要作

用。但充填法采矿的主要问题是采矿生产能力低,充填采矿成本高,这对于贫矿开采问题更加突出。因此,提高充填采矿生产能力和降低充填采矿成本,是我国镍资源开发的关键技术。为此,金川镍矿在几十年的充填采矿中,不仅在我国首次实现膏体充填,而且在胶凝材料开发、尾砂、废石、戈壁粗骨料的高浓度充填方面,开展了大量的研究,已经取得了显著成效<sup>[104-117]</sup>。同时,为了提高采矿生产能力,首次采用无间柱大面积连续开采,成功实现了10万m<sup>2</sup>的采场的连续开采,在岩石力学、回采工艺、地压控制、矿井通风、生产管理等方面取得了丰富成果<sup>[118-135]</sup>。

### 5.4 低品位资源原位溶浸采矿技术

资源开采固体废弃物排放量大,污染环境,改革传统的开采方法已成为当务之急。地下矿产资源是在特定的化学条件下经过数亿年的地质演变于某一区域富集而成,人们一直梦想着通过改变化学条件,使固体矿物分解成液态不断地从地下滔滔流出。溶浸采矿技术就是利用化学方法开采固体矿物的特殊技术,是固体矿物形成的逆过程。溶浸采矿技术历史非常悠久,目前已能较好地回收常规采矿方法不能回收的低品位矿石、难采矿体、难选矿石和废石中的有用成分,拓宽了地下矿产资源的利用范围。与传统方法相比,溶浸采矿技术具有环境污染小、生产成本低等优势,具有应用前景十分广阔,国内外开展了广泛研究,在次生铜矿、金、铀等生物溶浸的工业应用上取得了成功。近年来对难处理铜、镍、金矿微生物浸出也开展了试验研究。但溶浸采矿技术还存在诸多理论和关键技术亟待解决。例如,溶浸矿石的渗透性、溶浸采矿浸出体系物理、化学、生物等因素的耦合机理及浸出动力学、适用于原生硫化矿溶浸开采的高效专属菌种以及溶浸范围和溶浸液流失的控制等,对钴矿和镍矿等难选难采矿石的溶浸技术尚未实现工业化应用。进一步开展溶浸采矿的理论与技术研究,有利于开发我国难采难选的镍矿资源,是实现中国镍资源综合利用和可持续发展的主要途径<sup>[39-59]</sup>。

### 5.5 红土型镍矿资源选冶技术

世界上60%镍矿资源是红土矿,仅40%为硫化矿。由于硫化铜镍资源易于加工利用,且成本低,是目前镍开发利用的主要资源。随着硫化矿资源的逐渐减少,红土镍矿的利用越来越受到重视,是未来镍

矿资源化利用主要物质基础。由于不同地域的红土镍矿品位和成分存在较大差异以及开发技术仍在试验探索中,且开发成本高,因此目前在全球范围内资源尚待开发利用。无论从应对镍资源不断增加的需求,还是从世界硫化铜镍资源日趋减少,红土镍矿资源的高效开发与综合利用势在必行,是中国镍矿资源可持续发展的必由之路。

中国红土矿主要集中在元江镍矿和元石山镍矿。元石山采用回转窑焙烧—氨浸工艺,已生产出精制硫酸镍产品。针对从新喀里多尼亚进口的红土镍矿,其选冶技术与工艺,决定资源开发利用的经济和环境效益。在现有的工艺路线中,火法路线和氨浸路线具有成功先例,但火法高能耗,氨浸技术回收率低。高压酸浸被认为是未来发展的主流工艺,目前国外不少采用该流程,其中包括新喀里多尼亚,但澳大利亚三家工厂失败值得关注。从技术经济指标看,产品深度加工、提取冶金与制备材料相结合,是开发利用红土镍矿矿物资源的发展趋势<sup>[93-97]</sup>。

## 6 结语

我国经济社会发展对镍需求量不断增长,国内镍矿资源供需矛盾日趋突出。针对中国镍矿资源特点与开发现状,制定我国镍资源开发政策和策略,是实现中国镍矿资源可持续发展的必由之路。

首先,加大我国镍矿资源地质探矿力度,努力寻找新的资源,是提高我国镍矿资源保有年限的根本。然后,合理利用我国现有的镍矿资源,开发贫矿、残矿资源,充分回收尾矿二次资源,对于有效化解国际市场风云变幻造成的风险,保证国内镍矿原料供应具有重要意义;第三,开展深埋高应力难采矿床安全、高效采矿技术攻关,提高废弃物在采矿中利用水平,实现采矿经济效益、环境效益和社会效益的统一。第四,以产品为龙头,以资产为纽带,加快推进中国镍业战略重组,形成以金川集团有限公司等为主的具有国际竞争力的大型镍业企业,实现合理的产业链和企业组织结构。最后,开展原位浸出采矿和红土型镍矿选冶技术联合攻关,开发出具有自主知识产权的先进技术,打破国际镍业跨国公司对我国技术的封锁,降低我国镍矿资源开发成本,提升镍业企业的国际竞争力。

## 参考文献:

[1] 曹昇生. 国际镍矿业进展及发展前景预测[J]. 世界有色金属, 2007

(8): 34-39.

- [2] 陈甲斌. 国内外镍资源开发现状[J]. 中国金属通报, 2008(47): 14-15.
- [3] 于兰. 俄罗斯硫化镍矿资源开发现状[J]. 世界有色金属, 2013(3): 60-62.
- [4] 李志茂, 朱彤, 吴家正. 镍资源的利用及镍铁产业的发展[J]. 中国有色冶金, 2009(1): 29-32.
- [5] 董明, 张珂. 全球镍产品供给与需求的灰色预测方法及其应用[J]. 科技情报开发与经济, 2008, 18(26): 85-87.
- [6] 王虹, 邓海波, 路秀峰. 重要有色金属资源—红土镍矿的现状与开发[J]. 甘肃冶金, 2009, 31(1): 20-24.
- [7] 张莓. 全球镍矿资源开发现状及供需展望[J]. 中国金属通报, 2011(6): 40-41.
- [8] 赵武壮. 对我国镍矿资源可持续发展的看法[J]. 中国金属通报, 2004(25): 6-9.
- [9] 曹昇生. 国内外镍工业现状及前景展望[J]. 世界有色金属, 2005(10): 67-71.
- [10] 张佳东, 张艳飞, 余倩, 等. 基于层次分析法的中国镍资源安全评价[J]. 中国矿业, 2013, 22(9): 38-41.
- [11] 米静, 池永岳. 镍铁的发展前景与生产工艺简述[J]. 重型机械, 2010(S2): 76-78.
- [12] 王冬冬, 李坚. 镍业发展动态及存在的问题[J]. 金属材料与冶金工程, 2009, 37(1): 13-16.
- [13] 袁湘沂. 浅说我国镍矿矿产资源[J]. 中国金属通报, 2006(45): 10-12.
- [14] 白雪垠. 我国镍矿资源开发利用现状及其进口策略[J]. 国际商贸, 2014(2): 123-125.
- [15] 陈甲斌. 我国镍矿资源现状及对策[J]. 矿业快报, 2006(8): 1-3.
- [16] 刘明宝, 段理伟, 高莹, 等. 我国镍矿资源现状及利用技术研究[J]. 中国矿业, 2011, 20(11): 98-102.
- [17] 宓奎峰, 王建平, 柳振江, 等. 我国镍矿资源形势与对策[J]. 中国矿业, 2013, 22(6): 6-10.
- [18] 徐爱东, 顾其德, 范润泽. 我国再生镍钴资源综合利用现状[J]. 中国有色金属, 2013(3): 64-65.
- [19] 陈伟军, 刘红涛. 对我国矿产资源可持续发展的几点思考[J]. 矿产综合利用, 2008(2): 45-49.
- [20] 谭文兵, 王永生. 发达国家的矿产资源战略以及对我国的启示[J]. 中国矿业, 2007, 16(6): 20-22.
- [21] 刘默, 张洪武. 红旗岭镍矿资源的二次开发与利用[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2005, 6(1): 48-50.
- [22] 王安建, 王高尚, 陈其慎, 等. 矿产资源需求理论与模型预测[J]. 地球学报, 2010, 31(2): 137-147.
- [23] 王恭敏. 镍资源发展透视[J]. 有色金属工业, 2005(2): 9-11.
- [24] 耿文辉, 贾国相, 张永林, 等. 我国西部地区镍钴资源综合评价[J]. 中国矿业, 2001, 10(2): 27-30.
- [25] 刘冰权, 冯增会, 周梵. 中国镍矿床的研究现状综述[J]. 科技论坛, 2009(28): 72.
- [26] 王恭敏. 镍资源要走可持续发展的道路[J]. 有色金属, 2005(2): 1-2.
- [27] 姜德波, 肖克炎, 王登红, 等. 新疆黄山镜儿泉地区岩漿型镍铜硫化物矿床远景分析[J]. 中国地质, 2013, 40(4): 1278-1289.
- [28] 赵富平. 新疆铜镍资源开发现状与对策[J]. 新疆有色金属, 2003(1): 62-65.
- [29] 董青松, 李志伟. 中国镍矿床分类和成矿分区[J]. 中国矿业, 2010, 19(增): 135-137.

- [30] 程明明. 中国镍铁的发展现状 - 市场分析与展望[J]. 矿业快报, 2008(8):1-3.
- [31] 刘梦飞. 中国镍业期待话语权[J]. 中国金属通报, 2011(14):15-17.
- [32] 张佳东. 中国镍资源安全评价[D]. 北京:中国地质大学, 2013.
- [33] 崔敏. 2013 年镍市场回顾及 2014 年展望[J]. 有色金属工程, 2014, 4(1):13-14.
- [34] 黄开国. 甘肃金川镍矿可持续发展选矿问题浅谈[J]. 国外金属矿选矿, 2001(1):31-32.
- [35] 侍爱国. 金川Ⅲ矿区贫矿资源开发利用的战略意义[J]. 矿业研究与开发, 2003(S1):108-109.
- [36] 董明, 柴有. 资源型企业发展循环经济探析——以金川公司为例[J]. 中国矿业, 2011, 20(8):15-18.
- [37] 江荣伏. 金川资源综合利用[J]. 有色矿山, 2003, 32(2):38-42.
- [38] 马忠臣, 杨长颖, 马廷全. 低品位多金属铜钴镍矿的开发与研究[J]. 有色矿冶, 2014, 30(6):15-18.
- [39] 程宗芳, 阳奕汉, 赖永春. 地浸工艺在铀矿冶中的应用及其效益分析[J]. 铀矿冶, 2007, 26(4):180-184.
- [40] 赵贺永, 谭凯旋, 刘绘珍. 地下溶浸采矿技术与我国铀矿山的可持续发展[J]. 矿业快报, 2005(12):1-3.
- [41] 赵龙云, 何海, 潘爱丽. 复杂性科学在溶浸采矿中的应用[J]. 采矿技术, 2006, 6(1):14-15.
- [42] 李晓晖. 钴镍矿微生物浸出液萃取除杂过程乳化物形成机制研究[D]. 北京:有色金属研究总院, 2014.
- [43] 王卉. 加速发展我国地下溶浸采矿技术[J]. 中国矿业, 1997, 6(6):8-11.
- [44] 王昌汉. 井下就地破碎浸铜法现场试验前期研究[J]. 湿法冶金, 1997(2):12-15.
- [45] 赵波, 王树琪. 开发矿山原地溶浸提铜技术前景广阔[J]. 世界有色金属, 2003(8):24-31.
- [46] 吴爱祥, 尹升华, 李建锋. 离子型稀土矿原地溶浸溶浸液渗流规律的影响因素[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(3):506-510.
- [47] 王世强, 谭凯旋, 易正戟. 溶浸采矿地球化学[J]. 矿业快报, 2007(6):6-8.
- [48] 吴爱祥, 王洪江, 杨保华, 等. 溶浸采矿技术的进展与展望[J]. 采矿技术, 2006, 6(3):39-48.
- [49] 王卉. 铜矿峪铜矿原地爆破浸出湿法提铜技术[J]. 采矿技术, 2006, 6(3):170-172.
- [50] 钟永明, 谢国森, 李凌波, 等. 我国原地爆破浸出采铀工艺技术研究与应用[J]. 中国矿业, 2004, 13(6):63-65.
- [51] 全爱国, 欧阳建功. 我国原地爆破浸出开采及其发展前景[J]. 铀矿冶, 2001, 20(1):1-4.
- [52] 杨仕教, 古德生, 丁德馨, 等. 用原地破碎浸出采矿法回收柏坊铜矿残矿[J]. 有色金属, 2002, 54(4):102-104.
- [53] 谭凯旋, 何海, 赵贺永, 等. 原地溶浸采矿的非线性耦合动力学[J]. 采矿技术, 2006, 6(3):167-169.
- [54] 唐雪梅, 杨殿, 唐军峰. 原地溶浸开采技术的经济预测评价[J]. 有色矿冶, 2005, 21(4):14-17.
- [55] 刘坚, 余斌, 吉兆宁, 等. 注浆防渗技术在地下溶浸中的应用[J]. 有色金属, 2003, 55(3):112-113.
- [56] 龙志高. 高泥质矿石的原地松动浸出研究[J]. 湿法冶金, 1997(2):24-26.
- [57] 喻庆华. 原地浸出及在低品位稀土矿中的应用[J]. 矿冶工程, 1995, 15(1):53-55.
- [58] 王西文. 原地浸出采铀研究[J]. 铀矿冶, 1987, 6(2):6-13.
- [59] 美国 World Mining Equipment 编辑部. 原地浸出是解决难采矿石的方法[J]. 国外金属采矿, 1985(12):74-76.
- [60] 黄平路. 构造应力型矿山地下开采引起岩层移动规律的研究[D]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008.
- [61] 马崇武, 慕青松, 宜晨虹, 等. 川二矿区地表开裂过程的数值模拟[J]. 矿业研究与开发, 2007, 27(4):9-11.
- [62] 姜晨光, 盖玉松, 廖明全, 等. 矿区地表沉降规律的新认识[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1):162-165.
- [63] 胡华, 孙恒虎. 矿山充填工艺技术的发展及似膏体充填新技术[J]. 中国矿业, 2001, 10(6):47-50.
- [64] 丁德强. 矿山地下采空区膏体充填理论与技术研究[D]. 长沙:中南大学, 2007.
- [65] 陈甲斌. 尾矿资源综合利用的困境与政策研究[J]. 化工矿物与加工, 2014(9):40-44.
- [66] 郭敏, 卢业授, 贾志红, 等. 我国大宗尾矿废石资源化对策研究[J]. 中国矿业, 2009, 18(4):35-37.
- [67] 赵生才. 深部地下空间开发利用——香山科学会议第 230 次学术讨论会侧记[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1):115-118.
- [68] 古德生, 李夕兵. 有色金属深井采矿研究现状与科学前沿[J]. 矿业研究与开发, 2003(S1):1-5.
- [69] 孙涛, 王登红, 姜德波, 等. 中国成镍带与找矿方向探讨[J]. 中国地质, 2014, 41(6):1986-2001.
- [70] 孙涛, 王登红, 钱壮志, 等. 中国镍矿成矿规律初探[J]. 地质学报, 2014, 88(12):2227-2251.
- [71] 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(3):25-28.
- [72] 姜德波, 王登红, 肖克炎, 等. 中国镍矿预测类型及主要战略接续区[J]. 中国地质, 2014, 41(3):715-727.
- [73] 赵振华, 钱汉东, 黄晨. 多元统计分析在金川铜镍矿床两类矿石中的应用[J]. 高校地质学报, 2007, 3(1):127-136.
- [74] 李天虎, 罗先熔, 彭桥梁, 等. 甘肃金川铜镍矿床矿区深部边部地质-地电化学-地球物理多元信息成矿预测[J]. 地质通报, 2012, 31(7):1192-1200.
- [75] 闫海卿, 苏尚国, 焦建刚, 等. 金川 Cu、Ni(PGE) 岩浆硫化物矿床成矿时代研究[J]. 地学前缘, 2005, 12(2):309-315.
- [76] 丁瑞颖, 闫海卿, 赵焕强, 等. 金川镍铜铂硫化物矿床成矿期次、阶段划分[J]. 矿物学报, 2011(增刊):162-164.
- [77] 刘羽, 毛先成, 裴禾, 等. 金川铜镍矿床 I 矿区地质体三维建模与矿化空间分析[J]. 矿产普查, 2014, 3(5):473-483.
- [78] 高辉, JHronsky, 曹殿华, 等. 金川铜镍矿床成矿模式-控矿因素分析与找矿[J]. 地质与勘探, 2009, 45(3):218-228.
- [79] 姜枚, 谭捍东, 钱辉, 等. 金川铜镍矿床的地球物理深部结构与成因模式[J]. 矿床地质, 2012, 31(2):207-215.
- [80] 文美兰, 罗先熔. 金川铜镍矿床多元地学信息找矿研究[J]. 中国地质, 2013, 40(2):594-601.
- [81] 张宗清, 杜安道, 唐索寒, 等. 金川铜镍矿床年龄和源区同位素地球化学特征[J]. 地质学报, 2004, 78(3):359-365.
- [82] 曾认宇, 赖健清, 毛先成, 等. 金川铜镍矿床中断裂系统的形成演化及对矿体的控制[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(9):2574-2583.
- [83] 叶亮山, 毛进书, 曹斌, 等. 金川铜镍矿东部矿区地质条件分析[J]. 西部探矿工程, 2014(3):95-100.
- [84] 王守良, 王荆程, 夏明强, 等. 金川铜镍硫化矿床成岩(矿)断裂构造分析[J]. 青海大学学报, 2014, 32(3):43:50.

- [85] 闫海卿,王强,胡彦强,等. 金川铜镍硫化物岩浆矿床前锋岩浆与岩浆通道[J]. 中国地质,2013,40(3):807-819.
- [86] 李鑫,王敦科,赵树铭. 哈密白鑫滩岩浆型铜镍硫化物矿床的发现[J]. 新疆地质,2014,12(4):466-469.
- [87] 潘振兴,许程,田战武,等. 喀拉通克铜镍硫化物矿床地质特征成因探讨及新的找矿方向[J]. 内蒙古石油化工,2007(1):125-127.
- [88] 杨建民,张玉君,姚佛军,等. 遥感找矿信息在新疆罗东镍矿发现中的主导作用[J]. 岩石学报,2007,23(10):2647-2648.
- [89] 吴晓贵. 新疆富蕴县库卫一带铜镍矿找矿预测[J]. 新疆有色金属,2013(S1):10-12.
- [90] 宋学旺,元江镍矿区硫化镍矿床找矿思路探讨[J]. 矿产与地质,2006,20(4-5):392-395.
- [91] 程迁群,张忠明,黄兆熙. 云南金平县新安里铜镍矿成矿规律与外围找矿[J]. 云南地质,2014,33(4):555-560.
- [92] 孙琦森,张世涛,张占林,等. 云南省昵博铜镍多金属矿床地质特征及找矿前景分析[J]. 地质与资源,2014,23(2):174-180.
- [93] 彭彝,岳清瑞,李建军,等. 红土镍矿利用与研究的现状与发展[J]. 有色金属工程,2011(4):15-21.
- [94] 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.
- [95] 付伟,牛虎杰,黄小荣,等. 红土型镍矿床成因的多样性-基于全球尺度的对比研究[J]. 地质学报,2013,87(6):832-849.
- [96] 冯建忠,宋新华. 红土型镍矿的勘查方法和项目研判[J]. 资源与产业,2014,16(1):61-65.
- [97] 王虹,邓海波,路秀峰. 重要有色金属资源-红土镍矿的现状与开发[J]. 甘肃冶金,2009,31(1):20-24.
- [98] 李振华,金玺,黄寅,等. 广西镍矿成因类型浅析[J]. 南方国土资源,2010(2):31-32.
- [99] 王瑞廷,毛景文,柯洪,等. 我国西部地区镍矿资源分布规律、成矿特征及勘查方向[J]. 矿产与地质,2003,17(增):266-268.
- [100] 朴景道,高岫生,徐明芳,等. 吉林长仁铜镍矿床地质特征及矿床成因探讨[J]. 吉林地质,2011,30(2):70-74.
- [101] 朱建兴,贾文艳,李福占. 内蒙古黄花滩铜镍矿矿床地质特征及矿床成因[J]. 西部资源,2014(1):128-130.
- [102] 曲晓明,赵元艺,王瑞江,等. 西藏班公湖-怒江成矿带发现硫化镍矿[J]. 矿床地质,2009,28(6):729-736.
- [103] 徐志刚,陈毓川,王登红,等. 中国成矿区带划分方案[M]. 北京:地质出版,2008:1-138.
- [104] 党明智,田维,莫亚斌. 高浓度尾砂胶结充填在金川二矿区的应用[J]. 矿业研究与开发,2004(Z1):73-75.
- [105] 李云武. 膏体泵送充填技术在金川二矿区的试验研究及应用[J]. 有色金属(矿山部分),2004,56(5):9-11.
- [106] 张秀勇,乔登攀. 金川二矿区胶结充填料浆可泵性影响因素分析[J]. 金属矿山,2010(9):34-37.
- [107] 周成浦. 金川胶结充填技术新进展[J]. 有色矿山,1992(4):1-9.
- [108] 王正辉. 金川矿山废料胶结充填工艺技术研究[J]. 采矿技术,2011,11(4):32-36.
- [109] 乔登攀,姚维信. 金川矿山废石-全尾砂高浓度充填工艺试验研究[J]. 有色金属科学与工程,2011,2(6):57-61.
- [110] 张宗生. 金川矿山废石膏体配制与流变特性研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2008.
- [111] 刘同有,周成浦. 金川镍矿充填采矿技术的发[J]. 中国矿业,1999,8(4):1-4.
- [112] 杨志强,高谦,王永前,等. 金川镍矿尾砂膏体充填采矿技术进步与展望[J]. 徐州工程学院学报,2014,29(3):1-8.
- [113] 杨志强,王永前,高谦,等. 金川镍矿尾砂膏体充填系统工艺技术改造与应用研究[J]. 有色金属科学与工程,2014,5(2):1-9.
- [114] 杨志强,高谦,王永前,等. 金川全尾砂-棒磨砂混合充填料胶砂强度与料浆流变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(增2):3985-3991.
- [115] 刘同有. 金川全尾砂膏体物料流变特性的研究[J]. 中国矿业,2001,10(1):14-21.
- [116] 郭慧高,辜大志,邹龙,等. 浅析废石胶结充填技术在金川二矿区的应用前景[J]. 采矿技术,2011,11(4):39-41.
- [117] 刘同有,金铭良,周成浦. 中国镍矿金川高浓度充填料浆管道自溜输送新工艺[J]. 中国矿业,1999,7(1):31-37.
- [118] 杨志强,高谦,王玉山,等. 特大型镍矿工程地质与岩石力学[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [119] 刘育明,高建科,王怀勇,等. 特大型镍矿开采方案与回采工艺[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [120] 姚维信,姚中亮,刘洲基,等. 高浓度大流量管输充填技术与工艺[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [121] 王永前,把多恒,高谦,等. 特大型镍矿连续开采地压控制技术[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [122] 王永前,赵千里,高创州,等. 特大型矿井通风系统优化与技术改造[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [123] 高谦,高建科,武拴军,等. 高应力破碎围岩巷道变形控制技术[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [124] 杨志强,郭慧高,薛立新,等. 特大型镍矿安全生产管理与风险控制[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [125] 包国忠,乔富贵,何煦春,等. 特大型镍矿数字化矿山建设与进展[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [126] 杨志强,杨长祥,高学栋,等. 特大型镍矿生产系统优化与产能提升[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [127] 杨志强,高谦,王虎,等. 高应力深井安全开采理论与控制技术[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [128] 陈得信,蔡美峰,王永前,等. 特大型镍矿充填法开采理论与关键技术[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [129] 杨志强,高谦,王永前,等. 金川大型难采矿床安全高效开采关键技术及面临难题[J]. 中国矿业,2014,23(5):94-112.
- [130] 高谦,刘同有,方祖烈. 金川二矿区深部开采潜在问题与优化控制技术研究[J]. 有色金属(矿山部分),2004,56(4):2-5.
- [131] 王永前,杨志强,高谦. 金川高应力区深部开采技术的地压控制[J]. 采矿技术,2002,2(3):18-19.
- [132] 高谦,吴永博,王思敬. 金川矿区深部高应力矿床开采关键技术研究与发展[J]. 工程地质学报,2007,15(1):38-49.
- [133] 金铭良. 金川镍矿的大面积开采稳定性分析与对策[J]. 岩石力学与工程学报,1995,14(3):211-219.
- [134] 高谦,杨志强,伍法权,等. 矿山工程地质综合研究方法及其在金川二矿区的应用[J]. 工程地质学报,2000,8(4):497-502.
- [135] 杨志强,高谦,王正辉. 预应力锚索支护参数优化研究及在金川二矿区的应用[J]. 岩土力学,2008,29(5):1361-1366.