

矿物岩石地球化学通报

Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry

ISSN 1007-2802, CN 52-1102/P

《矿物岩石地球化学通报》网络首发论文

题目: “镍” 槃重生, “镍” 创未来
作者: 吕骏腾, 陈鑫, 连东洋, 蔡鹏捷
收稿日期: 2024-07-20
网络首发日期: 2024-11-18
引用格式: 吕骏腾, 陈鑫, 连东洋, 蔡鹏捷. “镍” 槃重生, “镍” 创未来[J/OL]. 矿物岩石地球化学通报. <https://link.cnki.net/urlid/52.1102.P.20241114.1812.001>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

“镍”槃重生,“镍”创未来

吕骏腾^{1,2}, 陈鑫^{1*}, 连东洋³, 蔡鹏捷³

1. 中国地质大学(武汉) 资源学院, 武汉 430074; 2. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100091;
3. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210046

0 引言

镍(Ni)的开发利用已有2000多年的历史,在人类物质文明发展过程中起着重要作用(刘金龙等, 2023)。中国古代将铜镍矿石称为白铜,早在公元前2世纪就开始冶炼,采冶历史十分悠久(Baldwin, 1931)。在公元200年,俄国巴特里王朝就开始利用镍合金模压钱币(刘金龙等, 2023);镍因其耐高温、耐腐蚀、抗氧化、铁磁性强、可塑性强、易形成合金等特点,被誉为“钢铁工业的维生素”。主要用于制造不锈钢、高镍合金、合金结构钢等,广泛应用于宇宙飞船、飞机、导弹、雷达、车辆、轮船等军工和民用机械制造业。镍还可作为陶瓷颜料和防腐镀层,在电子工业、化学工业方面应用广泛(王岩等, 2020; 刘金龙等, 2023)。镍作为我国紧缺战略矿产资源,消耗量位居世界第一。然而,我国镍资源对外依存度十分高,从产量口径看高达86.7%;从消费量口径看更是高达92.5%(苏本勋等, 2023; 徐刚等, 2024),被“卡脖子”的风险很大。因此,了解28号元素“镍”的起源、性质、应用与资源分布是十分必要且刻不容缓的,这有助于我

们更好地合理开发利用和保护镍资源,提高大国博弈核心竞争力,对国家和新兴产业发展具有重大意义。

1 溯源:镍的发现与性质

1.1 镍的发现

在18世纪初的欧洲,当地经常产出一一种奇怪的矿石——密度大,呈现出红棕色,并且在其表面常有绿色斑点。这些特征与铜矿石十分相似,而被大家误认为铜,然而这种矿石中无法提炼出铜,因此这种奇怪的矿石被称为“尼喀尔铜”(Kupfernickel),意为“假铜”。1751年,瑞典化学家Alex Fredrik Cronstedt发现,尼喀尔铜溶于硫酸中呈现出绿色,与铜盐溶液颜色一致,当强烈加热时,会变成灰色的氧化物。他通过还原氧化物后成功得到了一种灰白色的金属单质——硬且脆,微有磁性,这与当时已知的所有金属单质的性质都不同,一定是一种新的金属! Alex Fredrik Cronstedt将这种金属称为“镍”(Nickel),随后将这一重大发现发表在了斯德哥尔摩科学院的院刊上(Bartow, 1953)。

虽然化学元素镍直到18世纪才被发现,但对于镍合金的使用,

可以追溯到公元前2世纪我国的西汉。当时我国古代冶金家们在云南发现了一种铜镍矿石,并已掌握在这种矿石中添加锌即可制成一种耐用且美观的合金,其主要成分为铜、镍、锌。当时的中国称这种合金为“白铜”(西方称其为“pak-tong”),并远销海外至巴克特里亚王国(Bactria)(Baldwin, 1931)。东晋常璩《华阳国志》中记载:“堂螂县因山名也,出银、铅、白铜、杂药”,是已知有关镍白铜的最早记载(黄超, 2015)。劳费尔(2001)在《中国伊朗篇:中国对古代伊朗文明史的贡献》一书中提到:众所周知,中国人有一种特别的铜合金,内含铜40.4%,锌25.4%,镍31.6%,铁2.6%,有时含一点银和砷,色白如银,故称之为白铜(黄超, 2015)。直到如今,波斯语、阿拉伯语仍将白铜称为“中国石”(李约瑟, 1976; 劳费尔, 2001)。

1.2 镍的性质

镍是化学元素之一,英文名为Nickel,化学符号为Ni,原子序数为28,相对原子质量为58.69,它位于元素周期表中的VIII副族第四周期,属于过渡金属元素(图1)。金属镍密度为8.902 g/cm³,熔点为

收稿编号:2024-0135, 2024-07-20 收到, 2024-09-03 改回

基金项目:国家重点研发计划“地球系统与全球变化”重点专项课题(2023YFF0804402)

第一作者简介:吕骏腾(2002—),男,博士研究生,地球化学专业。E-mail: jtlv@stu.pku.edu.cn。

*通信作者简介:陈鑫(1991—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向:矿产成矿机制和勘查评价。E-mail: chenxin68@cug.edu.cn。

引用此文:

吕骏腾, 陈鑫, 连东洋, 蔡鹏捷. 2024. “镍”槃重生, “镍”创未来. 矿物岩石地球化学通报, doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20240120

1453 ℃,沸点为2732 ℃,其熔点比黄金还高。它在强度和韧性上类似于铁(铁的原子序数为26),但在抗氧化和耐腐蚀方面更像铜(铜的原子序数为29),这种特性组合使其在许多场景中得以广泛使用 (Britannica, 2024)。镍具有高导电性和高导热性。生产的镍中有一半以上用于与铁的合金,制作不锈钢,其余大部分用于与铜的耐腐蚀合金和与铬的耐热合金(镍的质量分数一般超过50%)。镍还用于制造电阻合金、磁性合金以及其他多种合金,如镍银(含铜和锌但不含银)。纯镍通过电镀的方法用在其他金属上形成保护涂层。此外,镍还可以制作电池以及化学反应的催化剂(刘葵等,2016)。

镍元素在地球化学中属于中等亲铁元素,在地球核幔分异过程中更倾向于在地核里富集。地球90%以上的Ni分布在地核中,其余10%的Ni主要赋存在硅酸盐矿物里,如橄榄石和辉石(段庆等, 2023)。基于宇宙化学模型和对铁陨石的研究,人们认为地球的地核是由镍铁合金组成的,其中镍的质量占比为5%~15%(Torchio等, 2020)。由于Ni属于相容元素,在部分熔融和分离结晶过程中更倾向于留在/进入固体相,因此,地幔岩石中的Ni的平均含量(1960 μg/g)远高于洋壳(150 μg/g)和陆壳(50 μg/g)中Ni的平均含量(图2;段庆等, 2023)。

1.3 镍的同位素

镍(Ni)在自然界中存在5种具有微小质量差异的稳定同位素,具体包括:⁵⁸Ni(68.27%);⁶⁰Ni(26.10%);⁶¹Ni(1.13%);⁶²Ni(3.59%);⁶⁴Ni(0.91%)(Britannica, 2024)。目前对于Ni的稳定同位素测试,主要通过先进行化学纯化,通过树脂从样品中分离提纯Ni,再使用MC-ICPMS对Ni同位素及其比值进行

测定。虽然Ni有5种稳定同位素,但由于⁵⁸Ni和⁶⁰Ni的丰度最高,所以测定的结果在国际上通常用δ⁶⁰Ni表示:δ⁶⁰Ni=[(⁶⁰Ni/⁵⁸Ni)样品/(⁶⁰Ni/⁵⁸Ni)标准-1]*1000。目前,Ni同位素在国际上普遍使用

NIST SRM 986作为同位素标准。

Ni同位素的运用可以理解作为一种“侦探工具”,可以帮助科学家们解开地球内部甚至是宇宙相关的重大谜团。它们是一些具有微小质量差异的Ni同位素,在地球

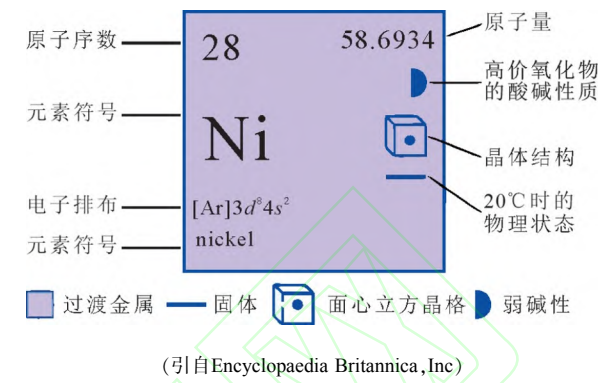
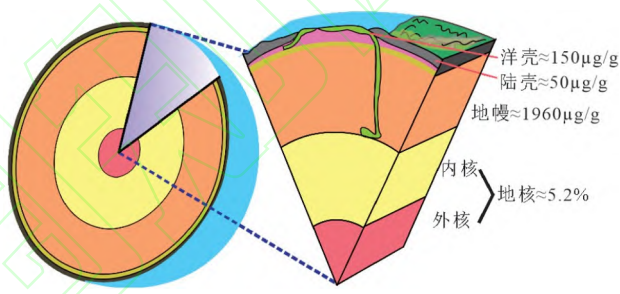
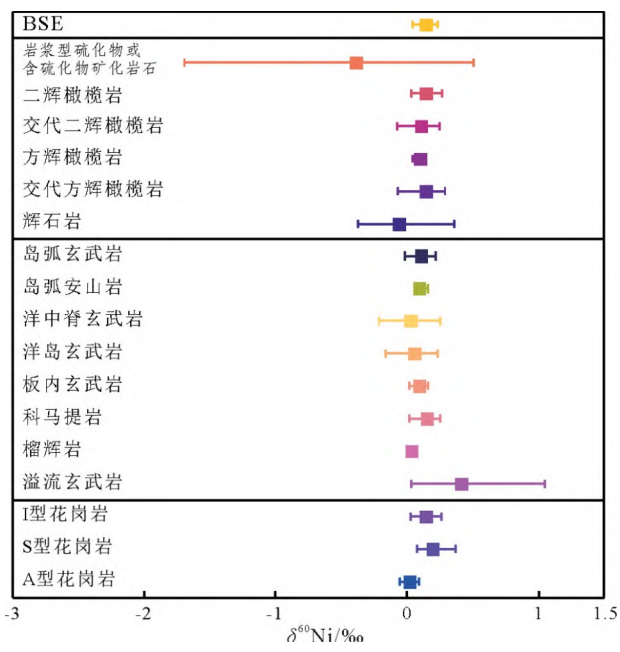


图1 镍元素的物理化学性质



(引自段庆等,2023)

图2 地核、地幔、洋壳和陆壳中镍的平均含量



(据张泽等,2024)

图3 不同储库的镍同位素值

的不同部分有不同的分布(图3),通过分析这些分布,科学家可以揭示地球深处的物理化学过程,比如岩浆硫化物矿床的物源追踪;Ni同位素可以告诉我们月球是通过类似水星的星球与地球碰撞形成的;Ni同位素还可以告诉我们二叠纪末生物大灭绝是由于岩浆大量喷发使得生物生存环境灾难性恶化导致的(段庆等,2023;张泽等,2024)。镍同位素的应用横跨了从地质学、环境科学到天文学等多个领域,是我们解读地球故事的关键线索。

2 发展:镍的应用

镍是一种具有银白色光泽的过渡金属,其卓越的物理和化学特性使其在现代工业和日常生活中扮演着重要角色。作为一种重要的工业原材料,镍被广泛应用于制造不锈钢、合金以及高性能电池和催化剂等。凭借其独特的性能和广泛的用途,镍已成为现代工业中的关键金属。镍在多个产业中的应用主要包括(图4):

不锈钢制造:镍的最大应用领域是生产不锈钢,大约2/3的镍都用于此(刘葵等,2016;USGS,2019)。人们最熟悉的不锈钢大概是304不锈钢,其中含有18~20%的Cr以及8~10%的Ni。不锈钢抗高

温氧化的主要元素是Cr,其与空气中的氧结合形成一层薄膜,可以防止材料内部的氧化,而加入一定量的Ni可以提高铬原子的扩散能力,进而提高合金钢的抗高温氧化能力(刘亚丕等,2016)。不锈钢具有优异的耐腐蚀性、耐高温性和良好的机械性能,能够抵抗大气、蒸汽、水以及酸、碱、盐的侵蚀。这使得镍不锈钢广泛应用于建筑、家用产品、医疗器械、化工能源、食品饮料、海洋工程等多个领域(刘葵等,2016;刘亚丕等,2016)。镍不锈钢的广泛应用,凸显了其在现代工程领域中的重要性和不可替代性。

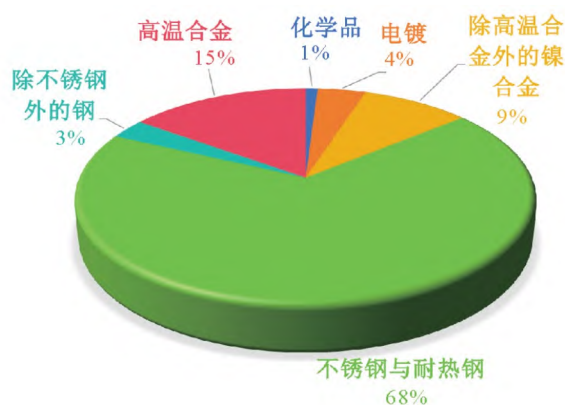
镍基合金制造:镍基合金是指镍的质量分数超过50%的合金,具体可分为镍基高温合金、镍基耐腐蚀合金、镍基形状记忆合金等等(刘葵等,2016)。在航空航天领域,镍基高温合金是关键材料之一,用于制造在650~1000℃温度范围内仍能运行的航空发动机和燃气轮机部件,以保证其在极端条件下可以正常运转,按成分可分为镍铜合金、镍铬合金、镍钼合金等等(刘葵等,2016)。形状记忆合金指当这类材料发生塑性形变后,通过控温又能恢复到原始形状,多用于制造心脏马达、眼镜框架等物品(刘葵等,2016)。目前先进的形状记忆合金有镍钛合金,普通的合金材料

变形数千次就会断裂,而其形变千万次仍不会发生断裂(Chluba et al.,2015;刘葵等,2016)。

镀镍:镍镀是一种重要的表面处理技术,通过在金属表面形成均匀、致密的镍层,可以显著提升材料的硬度、耐磨性和抗腐蚀能力。镍镀包括2种方法:电镀和化学镀。电镀是通过电化学的方法,在基体材料表面形成一层镍层(刘葵等,2016);而化学镀是在不通电的状态下,在含有特定金属盐和还原剂的溶液中的自催化反应,析出的金属在固态基材表面形成金属镀层的成膜技术(Sudagar et al.,2013)。镍镀被应用于汽车制造、电子产品、机械设备等领域,延长了各种设施、设备的使用寿命以及外观质感,可以减少维护成本并提高工作效率。

含镍电池:镍在电池中的应用也非常重要,尤其是在可充电电池领域。已用于工业生产的含镍电池有镍氢电池、镍铁电池和锌镍电池等等。这些电池具有较高的容量、工作温度宽、成本低廉和无污染等诸多优势(王晓函等,2023;刘葵等,2016)。虽然在当前的电池领域中,锂电池因其能量密度高、环境友好而备受瞩目,但与含镍电池相比,锂电池安全性不高,热失控现象时有发生(冯振华等,2024)。因此,在未来含镍电池仍将和锂电池一同竞争,继续发展,含镍电池短时间内不会被锂电池完全替代。

除上述用途外,镍在其他方面同样有着很大的作用。镍基催化剂在化工生产中应用广泛,例如在石油精炼、合成氨、氢化反应等过程中起重要作用;镍具有良好的磁性,常用于制造磁性材料;镍和其化合物在陶瓷和电子器件中也有应用,例如电阻、电容器等。镍的多种特性使其成为现代工业和



(引自USGS,2019)

图4 镍的主要应用

科技发展的重要材料,广泛应用于各种军工制造业、民用机械制造业等各大领域,给人类社会带来了极大的便利(刘葵等,2016)。

3 寻镍:资源与勘探

3.1 镍的矿床类型

根据镍矿床的地质环境、围岩特征、矿石成分和矿床成因,全球绝大多数具有经济价值的镍矿床主要分为两类(刘金龙等,2023;图5):(1)风化壳型(红土型)镍矿床:这种类型的镍矿主要由超镁铁质岩风化淋滤形成,具有埋藏浅、规模大的特点。风化壳型镍矿储量约占全球镍储量的54%(USGS, 2024)。然而,尽管储量较大,其冶炼技术相对复杂,成本较高;(2)岩浆型(硫化物型、硫化镍型)镍矿:这种类型的镍矿与镁铁-超镁铁质岩有关,分布广泛、资源丰富、品级较高、选冶技术简单。岩浆型镍矿被视为更重要的勘探目标,有64%的镍来自这种类型的矿床,储量约占全球镍储量的35%(USGS, 2024; Mudd, 2010; 刘金龙等, 2023),在我国已查明的全部镍矿储量中占89.6%(王岩等,2020)。

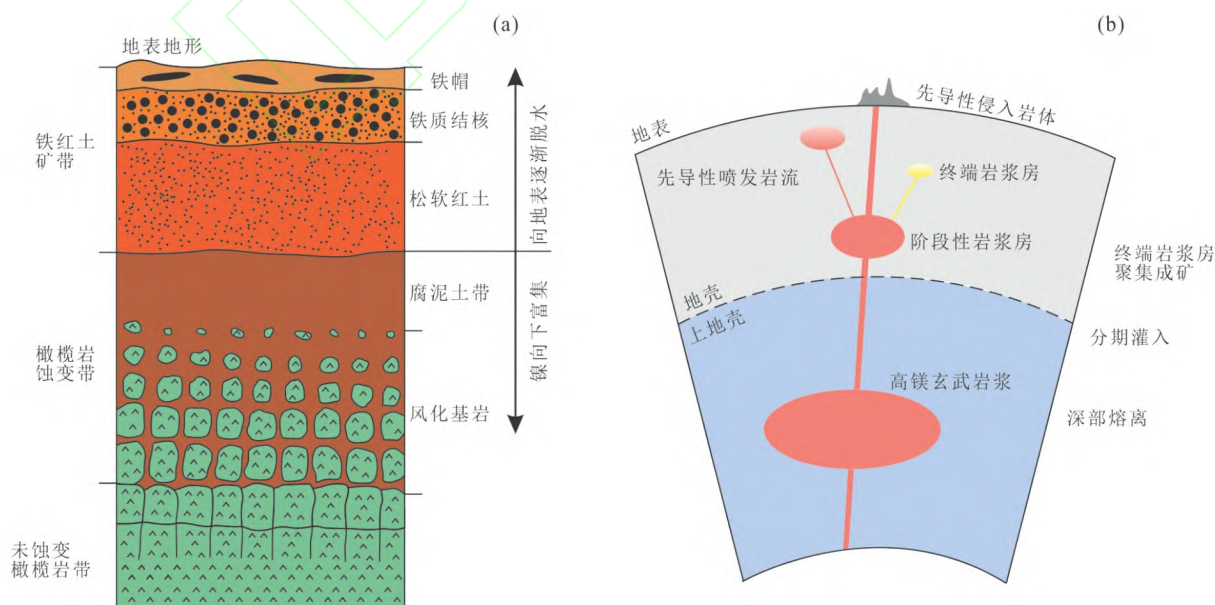
此外,还有沉积岩-变沉积岩容矿型、热液型、火山块状硫化物型、海底锰结核型等其他类型的镍矿床,约占全球镍储量的10%(USGS, 2024)。

风化壳型(红土型)镍矿床:在热带或亚热带气候条件下,超基性岩(如纯橄岩、橄榄岩、蛇纹岩等)经历了强烈的化学风化作用后,镍从含镍的硅酸盐矿物(如橄榄石、顽火辉石)中分解出来,并随着地表水向下渗透,在风化壳中形成富含镍的次生矿物。这一过程中,原本分散的镍得到富集,最终形成具有工业价值的矿床(Ernst and Jowitt, 2013)。这意味着,风化壳型镍矿的形成需要以下几个条件:(1)基岩的镍含量需较高,如橄榄岩、蛇纹岩等,且易于风化分解;(2)气温炎热、降水丰沛,使岩石得到足够的氧化风化分解,保证镍能够充分的淋滤并沉积;(3)保持氧化环境,并具备良好的排水条件(陈百友等,2013)。

通常,风化壳型镍矿床的矿体垂向分带呈现出自下而上5个部分(图5a):风化基岩带、腐泥土带、松软红土带、铁质结核带和铁帽带。

(陈正和雷蕴芬,1988),每个部分通常是渐变过渡的。在降雨量充沛的热带、亚热带地区,当地形起伏,且地下水排泄条件较好时,所形成的风化壳剖面通常具有2层结构:上层为氧化镍矿层,下层为含水镁硅酸盐矿层;而在热带半干旱气候或季节性潮湿的温带地中海、温带大陆性气候地区,当地形平缓且基岩蛇纹石化强烈时,常形成3层结构:上层为氧化镍矿层,中层为粘土硅酸盐矿层,下层为含水镁硅酸盐矿层。下层镍品位一般高于上层氧化镍层的镍品位(陈百友等,2013)。

岩浆型镍矿床:主要指的是铜-镍硫化物矿床,这种矿床与镁铁-超镁铁质岩浆成矿作用有关,且主要以硫化物为主的矿床(汤中立, 1992; Naldrett, 1997)。在该类型的镍矿床中,镍、铜、钴和铂族元素为最具经济效益的金属元素;而金、银、镉和铅为伴生金属元素。很多构造环境都可以产出岩浆型镍矿床,如与裂谷有关的大陆溢流玄武岩、与陨石坑有关的基性岩体、科马提岩-玄武岩-相关侵入体、拉斑玄武质侵入体等等(刘金龙等,2023)。



(据汤中立和李文渊,1991;陈浩疏等,1993;刘金龙等,2023)

图5 (a)风化壳型镍矿垂直分带剖面示意图;(b)岩浆型镍矿典型成矿模式图

值得注意的是,我国科学家汤中立在矿床成因方面提出了创新性的理论,即“小岩体,成大矿”的模式(汤中立,1992,1996)。该模式认为“深部熔离-贯入成矿作用”是岩浆型镍矿床的重要成因(图5b)。母岩浆侵入到现存空间之前,在深部就已发生了熔离和部分结晶作用,使母岩浆分离成不含矿岩浆、含矿岩浆、富矿岩浆和矿浆几部分,然后在现存空间中一次或多次上侵-贯入成矿(汤中立和李文渊,1991)。

3.2 世界镍资源格局

镍矿在全球分布广泛,储备丰富,世界各地资源量及储量区域高度集中(图6)。截止2023年,全球已探明镍矿储量大于1.3亿吨,岩浆型镍矿约占全球镍储量的35%,主要分布在加拿大、俄罗斯、澳大利亚、中国、南非、美国等国家;风化壳型镍矿约占全球镍储量的54%,主要分布在古巴、新喀里多尼亚、印度尼西亚、菲律宾、缅甸、越南、巴西等国

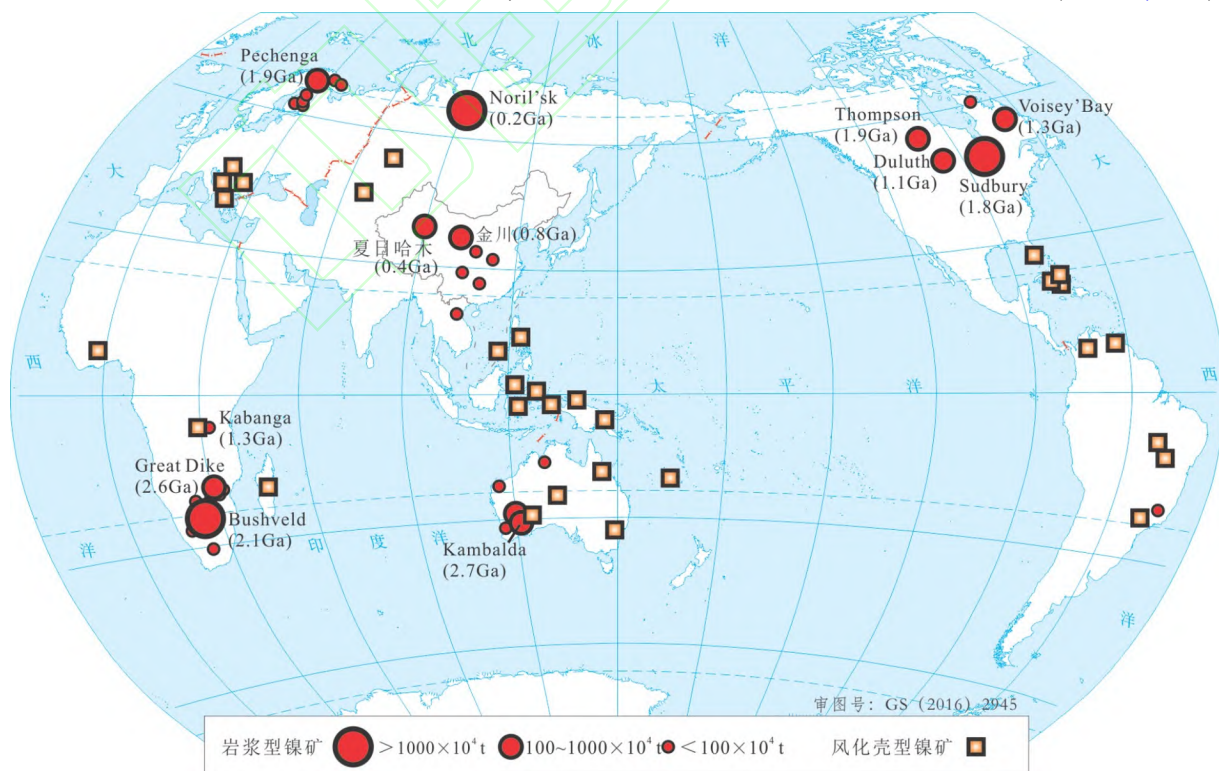
家(USGS,2024)。

储量名列前茅的国家为印度尼西亚、澳大利亚、巴西三个国家,其储量占全球的72.5%,其中印度尼西亚探明储量达5500万吨,占世界总储量的42%,属世界第一(USGS,2024;图7)。全球几乎没有一个国家同时盛产岩浆型镍矿与风化壳型镍矿。这是因为岩浆型镍矿主要与镁铁-超镁铁质岩石有关,当一个地区广泛分布这些基性的岩石,就说明当地的风化作用较弱;而风化壳型镍矿主要由超镁铁质岩石风化淋滤形成,当一个地区的风化壳型镍矿较多,就说明风化淋滤较强,岩浆型镍矿难以保存(刘金龙等,2023)。

3.3 中国镍资源分布

我国镍矿产主要出于岩浆型镍矿,镍资源总储量在2022年约为422万吨(中华人民共和国自然资源部,2023),在2023年为420万吨(USGS,2024)。我国镍资源分布不均,主要的镍资源储备产自甘

肃,约占我国镍资源总量的43%,其次分布在新疆、青海、内蒙古等11个省份(图8;徐刚等,2024)。镍矿山规模按镍金属储量计,大型镍矿储量 ≥ 10 万吨;中型镍矿储量在2~8万吨之间;小型镍矿储量 < 2 万吨(中华人民共和国自然资源部,2021)。近十年来,我国持证镍矿矿山一直在60多家,大中型镍矿矿山占比不断增加,但总量基本保持不变;镍矿石产量在1100~1400万吨之间波动,整体变化趋势不大(图9;吴琪等,2024)。2021年,中国镍矿矿山有61个,其中大中型矿山22个。然而,61个矿山中,生产矿山仅有12家(其余因成本高于镍矿市场价而停产),其中大中型矿山企业5家,分别是:甘肃省金昌市白家嘴子镍铜矿(金川镍矿)、新疆亚克斯资源开发股份有限公司黄山铜镍矿、新疆喀拉通克矿业有限责任公司喀拉通克铜镍矿、新疆哈密图拉尔根铜镍矿,以及吉林通化吉恩镍业赤柏松铜镍矿(吴琪等,2024)。



(据王岩等,2020;刘金龙等,2023)

图6 全球主要镍矿分布简图

4 “镍”创未来：需求与展望

4.1 市场需求现状

我国是世界最大的镍矿产品消费大国和进口大国(王岩等,

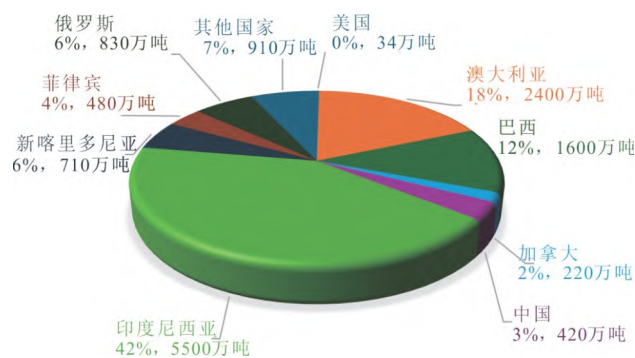
2020),但镍资源储量排名第七(USGS,2024)。镍矿是我国的净进口矿产,2021年,我国镍资源对外依存度从产量口径看高达86.7%;从消费量口径看更是高达92.5%(徐刚等,2024),且进口高

度集中,2021年,从菲律宾进口的镍矿砂及精矿(万吨)占总进口量的89.64%(图10;吴琪等,2024),存在相当高的供应风险,被“卡脖子”的风险较大。因为我国镍资源紧缺,又拥有全球最大的不锈钢和新能源汽车消费市场,供需不对位的情况下,使得我国的镍资源长期依赖对外进口。

2022年,原生镍(以金属计)在我国消费最高的为不锈钢制造行业,占比67%,这与镍最基本的性质有关;其次为电池制造行业,占比22%,这与中国新能源汽车的崛起密不可分。新能源汽车的快速普及带动了镍的需求,电池材料领域对镍的需求尤为突出。镍氢电池是当下新能源汽车领域中应用最为成熟的二次电池,是国家扶持的重点发展新能源,尤其是在混合动力汽车方面。伴随新能源汽车的发展,镍作为关键材料可能迎来更高的增长点(图11;刘金龙等,2023)。

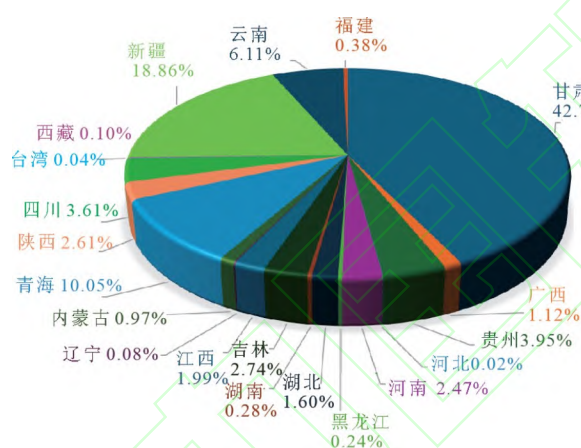
4.2 未来展望

据中联金统计,2023年我国不锈钢消费量约为3153.05万吨,同比增加211.81万吨,增幅7.21%,已超过新华社预测2025年消费量3000万吨(吴琪等,2024);此外,



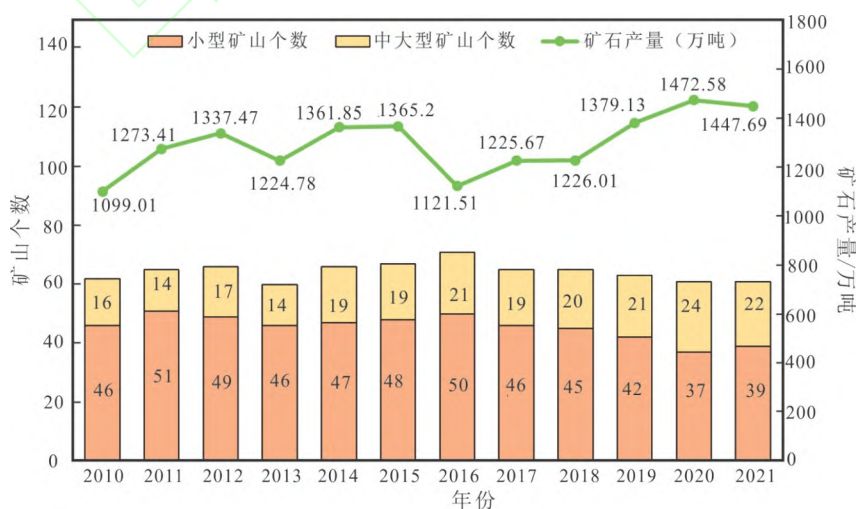
(据USGS,2024)

图7 全球镍资源储量分布国家



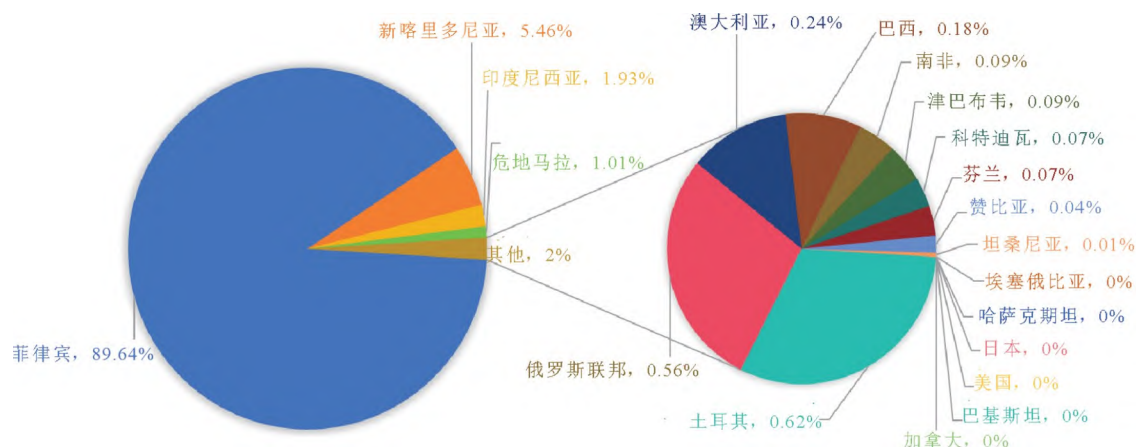
(据徐刚等,2024)

图8 我国镍矿探明资源储量分布图



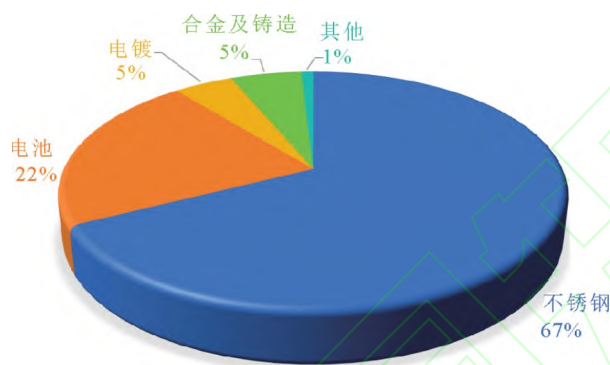
(据吴琪等,2024)

图9 2010—2021年全国持证镍矿矿山开发情况



(据吴琪等,2024)

图10 2021年中国进口镍矿砂及精矿来源国及进口量占比



(据吴琪等,2024)

图11 2022年中国原生镍消费结构

根据中汽协统计,2023年我国汽车销售量3009.4万辆,其中新能源汽车销量949.5万辆,占总销量的31.6% (刘瑾,2024),远超过中华人民共和国工业和信息化部《汽车产业中长期发展规划》指出的2025年新能源汽车销量占总销量的20% (吴琪等,2024)。

鉴于我国镍消费占比最大的不锈钢消费市场和新能源汽车市场(图11)未来不断增长的趋势,我国镍需求量必然也处于上升趋势,对外依存度也将保持增长趋势,而国内镍矿矿山数量、矿石产量却几乎保持不变(图9),资源安全保障存在着一定的隐患。因此,我国仍需加大对镍矿的勘查程度,寻找新的镍矿,增加镍矿石产量,提高我国资源安全保障。此外,我国镍矿进口十分单一、高度集中,从菲律

宾进口的镍矿就占了总进口量的九成(图10)。倘若菲律宾要“卡”我国的脖子,镍资源的进口替代国是谁? 因此,加强“一带一路”沿线国家之间的资源合作、优势互补,有利于降低镍资源进口国家单一的风险。降低进口集中度,在多个国家投资,可以降低我国镍资源供给平衡的风险。同时,也要规范镍资源的回收体系,使镍产品得以回收利用,可降低对镍资源的需求,扶持符合环保要求的企业,大力发展镍资源回收再利用行业。

致谢: 感谢《战略性关键矿产科普平台》微信公众号和《矿物岩石地球化学通报》提供撰写科普文章的机会,同时感谢中国科学院广州地球化学研究所赵太平研究员及审稿人提出的宝贵建议及指导写作,在此表示衷心感谢!

参考文献 (References):

- Britannica T. 2024. Editors of Encyclopaedia. nickel. Encyclopedia Britannica
- Bartow V. 1953. Axel Fredrick Cronstedt. Journal of Chemical Education, 30(5): 247
- Baldwin W H. 1931. The story of Nickel. I. How "Old Nick's" gnomes were outwitted. Journal of Chemical, Education 8: 1749
- Chluba C, Ge W, Lima de Miranda R, Strobel J, Kienle L, Quandt E, Wuttig M. 2015. Ultralow-fatigue shape memory alloy films. Science, 348(6238): 1004–1007
- Ernst R E, Jowitt S M. 2013. Large Igneous Provinces (LIPs) and Metallogeny. Society of Economic Geologists, Special Publication 17:17–51
- Mudd G M. 2010. Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites. Ore Geology Reviews, 38 (1–2): 9–26
- Naldrett A J. 1997. Key factors in the genesis of Noril'sk, Sudbury, Jinchuan, Voisey's Bay and other world-class Ni-Cu-PGE deposits: Implications for exploration. Australian Journal of Earth Sciences, 44: 283–315
- Sudagar J, Lian J, Sha W. 2013. Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings—A critical review. Journal of alloys and compounds, 571: 183–204
- Torchio R, Boccato S, Miozzi F, Rosa A D, Ishimatsu N, Kantor I, Sévelin-Radiguet N, Briggs R, Meneghini C, Irifune T, Morard, G. 2020. Melting curve and phase relations of Fe-Ni alloys: Implications for the Earth's core composition. Geophysical Research Letters, 47, e2020GL088169
- Urey H C. 1947. The thermodynamic properties

- of isotopic substances. *Journal of the Chemical Society(Resumed)*, 5:562–581
- USGS. 2024. *Mineral Commodity Summaries*. p: 124–125
- USGS. 2019. *Minerals Yearbook*. p: 51.1–51.19
- 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. *地球学报*, 34(s1): 202–206
- 陈浩疏, 吴水波, 傅德彬. 1993. 镍矿床. 北京: 地质出版社, 1–199
- 陈正, 雷蕴芬. 1988. 风化壳氧化镍-硅酸镍矿石建造. *成都理工大学学报(自然科学版)*, (01): 4–22
- 段庆, 陈列猛, 周生华, 康健. 2023. 高温地质过程镍同位素地球化学研究进展. *矿物岩石地球化学通报*, 42(04):914–930
- 冯振华, 邱祥云, 张涛, 戴作强, 郭向欣. 2024. 全固态锂电池热安全性研究进展. *精细化工*, 41(05):960–970
- 黄超. 2015. 从中国西南地区村镇中发掘古代科技文化遗产——以中国古代镍白铜作为考察对象. *广西民族大学学报(自然科学版)*, 21(02): 34–39
- 劳费尔. 2001. 中国伊朗编: 中国对古代伊朗文明史的贡献. 北京: 商务印书馆, 388–389
- 李约瑟. 1976. 中国科学技术史(第5卷 地学). 北京: 科学出版社, 379
- 刘瑾. 2024. 汽车强国建设站上新起点. *经济日报*, 006
- 刘金龙, 李仁民, 周永恒, 王力, 王冠, 姜平, 陈良玺, 董存杰. 2023. 镍矿床分布、成矿背景和开发现状. *中国地质*, 50(01): 118–132
- 刘葵, 龙华, 梁少俊. 2016. 镍的应用. *化学教育*, 37(18): 10–14
- 刘亚丕, 牛振标, 周焊峰, 石凯翔, 石康. 2016. 现代不锈钢材料: 结构、性能、特点和应用. *磁性材料及器件*, 47(01):72–77+80
- 汤中立, 李文渊. 1991. 中国硫化镍矿床成矿规律的研究与展望. *矿床地质*, (03): 193–203
- 汤中立. 1992. 超大型岩浆硫化物矿床的类型及地质对比意义. *甘肃地质学报*, 1(1): 24–47
- 汤中立. 1996. 中国岩浆硫化物矿床的主要成矿机制. *地质学报*, (3): 237–243
- 吴琪, 李政, 王楠, 陈从喜, 吴初国, 高宇, 朱先云, 齐书花. 2024. 中国镍矿供需形势及对策建议. *科技导报*, 42(05): 53–60
- 王岩, 王登红, 孙涛, 黄凡. 2020. 中国镍矿成矿规律的量化研究与找矿方向探讨. *地质学报*, 94(01): 217–240
- 王晓函, 杨少华, 李继龙. 2023. 铁镍电池负极研究进展. *辽宁化工*, 52(11):1686–1689
- 苏本勋, 蒋少涌, 崔梦萌, 袁庆哈, 闫立志. 2023. 钴镍成矿规律与勘查技术研究进展: 前言. *岩石学报*, 39(04): 963–967
- 徐刚, 段俊, 汤中立, 杨怀玉, 孙涛, 闫海卿, 吴建涛. 2024. 镍资源找矿突破与综合开发利用. *中国工程科学*, (03):86–97
- 张泽, 薛胜超, 唐冬梅, 王路阳, 王晓曼, 田洪庆, 张瑞麟. 2024. 镍同位素在高温岩浆系统中的研究进展和矿床学应用. *岩石学报*, 40(06): 1959–1971
- 中华人民共和国自然资源部. 2021. 矿产资源储量规模划分标准. 北京: 中华人民共和国自然资源部
- 中华人民共和国自然资源部. 2023. 2022 年中国自然资源统计公报. 北京: 中华人民共和国自然资源部

(本文责任编辑: 龚超颖)