

综合评述

中国关键矿产清单、应用与全球格局

张生辉¹, 王振涛², 李永胜³, 莫宣学⁴, 董庆吉¹, 陈丛林¹, 耿林¹, 王利¹, 张海啟⁵, 谭秀民⁵, 薛迎喜⁶, 周尚国⁷, 田郁溟⁷, 姚超美⁸, 焦森⁸, 陈正国⁹, 陈军元⁹, 王寿成¹⁰, 张浩钰¹⁰, 付水兴¹¹, 王春连², 王永¹²

1. 中国地质调查局, 北京 100037;
2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
3. 自然资源部矿产勘查技术指导中心, 北京 100037;
4. 中国地质大学(北京), 北京 100083;
5. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006;
6. 中国地质图书馆, 北京 100083;
7. 中国冶金地质总局, 北京 100025;
8. 中化地质矿山总局, 北京 100013;
9. 中国建筑材料工业地质勘查中心, 北京 100035;
10. 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012;
11. 北京矿产地质研究院有限责任公司, 北京 100012;
12. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

中图分类号: TD98;F205 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2022)05-0138-31
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.07.016

摘要 关键矿产是指对经济社会发展和国家安全至关重要, 由于供应短缺存在较大风险或者具有一定优势对全球供应具有较强影响力的矿产资源。当前国际贸易争端由经济领域、技术领域扩展到矿产资源领域, 世界局势变化对中国矿产资源安全保障提出了新的挑战, 也带来了新的机遇。简要介绍了具有代表性的美国、欧盟和日本关键矿产/原材料清单, 并分析了当前关键矿产的竞争态势: 一是美欧日关键矿产清单重合度高, 二是美欧日均出台并实施供应链安全战略, 三是关键矿产对碳中和进程至关重要。在此基础上提出了一份 37 种中国关键矿产建议清单, 包括大宗矿产、三稀金属矿产、关键黑色有色贵金属矿产、战略非金属矿产和特种气体矿产。在这份清单中 31 种矿产与美国、欧盟、日本清单重合。文章还对 37 种关键矿产的应用领域, 全球分布、生产和贸易格局等进行了概略研究。研究表明, 这些关键矿产既是当今世界经济社会发展不可或缺的重要物质基础, 也是战略性新兴产业、清洁能源、国防军工技术发展不可替代的重要物质保障。37 种关键矿产中我国需要净进口的 22 种, 净进口超过 50% 的 19 种, 超过 90% 的 10 种; 我国净出口的 11 种, 净出口超过 50% 的 5 种, 其中镓超过了 90%。文章最后对中国关键矿产安全战略提出了建议: 一是制订、公布并适时更新关键矿产清单; 二是基于全产业链进行系统布局, 掌握一批关键核心技术; 三是统筹紧缺矿产和优势矿产, 提高话语权和控制力; 四是加强国内资源调查、勘查和选冶等技术攻关; 五是建立关键矿产储备制度; 六是加强海外资源勘查开发合作; 七是完善相关法律制度。其中, 基于全产业链布局、统筹紧缺与优势矿产和加大调查勘查力度等尤为重要。

关键词 关键矿产; 清单研究; 应用概要; 全球格局; 安全战略

1 引言

随着现代社会经济发展、技术进步和人们生活水平提高, 矿产资源使用量越来越大。据经合组织数据^[1], 全球原材料使用总量从 1970 年的 270 亿 t 增长到 2017 年的 890 亿 t, 增长了 2.3 倍; 预计到 2060 年将进一步增长到 1 670 亿 t, 其中金属矿产使用量将从 2017 年的 90 亿 t 增长到 2060 年的 200 亿 t, 非金属矿产从 440 亿 t 增长到 860 亿 t, 化石燃料矿产从 150 亿 t 增长到 240 亿 t。

矿产资源应用范围越来越广, 从现代通信到可再生能源发电, 从健康医疗到绿色交通方式。制造现代计算机芯片需要元素周期表中超过一半的元素, 尽管许多元素用量很少, 但每个元素对于芯片的功能和性能都至关重要^[2]。智能手机要用到约 75 种元素, 手机构件中的化合物、金属和复合材料都来自于矿产, 芯片、显示器、电池和扬声器等都由矿产品制成。

经济增长、生活质量提高、国家防卫和现代社会的整体运行对更多样化矿产品的需求不断增加, 人们再次认识到关于矿产资源的竞争和冲突可能对依赖这些矿

对中国而言,经济与技术重要性需要具体考虑:(1)作为中国经济社会发展的物质保障、维系经济安全和粮食安全的大宗矿产;(2)作为国家安全和高质量发展的物质保障,维系战略性新兴产业和国防军工安全的战略新兴矿产。

中国大宗矿产资源需求将长期保持高位运行的态势。至 2035 年基本实现现代化时,中国还将需要消费 83 亿 t 粗钢、2.05 亿 t 精炼铜、4.95 亿 t 原铝,以及种类更多的其他矿产资源^[9]。即便步入了后工业化发展阶段,中国仍需要大量的大宗矿产资源作为支撑。

战略新兴矿产需求将持续保持增长态势。新一代信息技术、高端装备制造、新能源、新材料、健康环保等战略性新兴产业发展,5G 基站、特高压、城际高速铁路和城市轨道交通、新能源汽车充电桩、大数据中心、人工智能、工业互联网等新型基础设施建设,风电、光伏、核电、储能、新能源汽车、电网等清洁能

源转型技术发展以及现代国防建设对“三稀”金属、关键黑色有色贵金属、战略非金属、特种气体等战略新兴矿产提出了新需求。如新能源汽车产业的发展,2035 年相比 2017 年将增加 10 倍的锂、2.3 倍的钴、1.5 倍的镍、2.7 倍的稀土以及 1.8 倍的石墨、1.69 倍的铂需求^[14]。

本文参考美、欧、日关键矿产/原材料清单相关研究报告,参考《自然·化学》50 多种元素的综述文章,并结合国内有关研究文献,系统梳理了本文和美、欧、日清单所列各种矿产的重要应用领域(表 1),以期能够大致反映这些关键矿产的经济与技术重要性。经梳理发现,无论是对中国还是对其他国家,这些关键矿产都是当今世界经济社会发展不可或缺的重要物质基础,也是战略性新兴产业发展、清洁能源转型、国防军工技术发展不可替代的重要物质保障。这些关键矿产是当今和未来矿产资源争夺的焦点。

表 1 本文和美、欧、日清单所列关键矿产/原材料重要应用领域一览表

Table 1 The list of important application fields of key minerals/raw materials by this paper and the USA, Europe and Japan

品种	本文'	美国'	欧盟'	日本'	重要应用领域
铁	√				建筑,制造,交通运输,日常生产生活,软态不锈钢精密箔材
锰	√	√		√	锰钢,炼钢,炼铝,合金,锰锌铁氧(软磁)体,电池,工业催化剂,饲料肥料,水处理,颜料
铜	√				航空航天舰船车辆电气,发电和输配电,充电和电动,集成电路、印刷电路板,电池,通信电缆,消费电子
铝	√	√	√		航空航天舰船车辆及其他铝合金,建筑,交通,输配电,包装,日常生产生活,电子封装,耐火材料
钾盐	√				95%用作农业肥料,5%用于工业(如手机防护玻璃)
稀土	√	√	√	√	永磁材料(计算机硬盘驱动器,智能手机扬声器、拾音器和振动装置,机器人步进电机和伺服电机,飞行器惯性导航系统,飞机发动机控制器,高铁永磁牵引电机,新能源汽车电动机,风力发电机,核磁共振;卫星、雷达行波管、环形器,导弹制导电子束致聚焦和方向舵驱动),发光材料(航空显示磷光体等),储氢材料,催化裂化材料,玻璃添加剂,抛光材料,激光(测距,制导,通讯,医疗,工业,电子对抗),声呐,光纤,微电子(源、漏、栅极互连),电子封装,合金添加剂,核反应控制 钨:催化剂(炼油),陶瓷,玻璃(相机镜头),冶金,电池(储氢),改性膨润土(抑制蓝绿藻类繁殖) 铈:催化转化器,陶瓷,玻璃,冶金,抛光(半导体晶圆,平板显示器),固体氧化物燃料电池,荧光体(铈掺杂钇铝石榴石) 镨:永磁体,电池,航空合金,陶瓷和着色剂,玻璃(护目镜),高温超导材料 钕:永磁体,医疗,工业激光器,玻璃(环境色) 钐:永磁体,核反应堆吸收剂,癌症治疗 铕:磷光体(将紫外线转化为可见光),核反应控制棒,荧光生物探针,温室塑料 钆:医学造影,磁制冷,铀燃料混合,紫外线吸收和能量转移,核反应控制,中子吸收、探测与防护等 铽:铽镨铁磁体(致动器,声呐),光纤,激光器,固态电子器件,生物探针 镱:永磁体,数据存储设备,激光器,医学造影 铥:永磁体,核控制棒,激光器 钇:掺钇光纤放大器,光子探测和光转换,激光器

续表 1

品种	本文 ¹	美国 ²	欧盟 ³	日本 ⁴	重要应用领域
					铊: X射线源, 各种金属合金, 激光器 镱: 催化剂, 闪烁计数器, 便携式X光机, 应力计, 激光器, 冶金, 原子钟 镓: 医学成像闪烁体, 正电子成像仪探头, 癌症治疗, 玻璃(光刻物镜) 铟: 铟铝合金(军用飞机), 固体氧化物燃料电池, 紫外线探测, 核反应堆中子滤波, 泛光灯 钇: 钇钡铜氧超导材料, 氧化钇粉末(飞机发动机涡轮热障涂层、燃油喷嘴耐火涂层、集成电路蚀刻工艺腔保护涂层), 激光器, 白光源, 冶金
锂	√	√	√	√	锂电池, 航空铝锂合金, 高温润滑, 热交换, 压水堆化学平衡, 钍基熔盐反应堆冷却剂, 氦生产, 医药(情绪稳定类), 玻璃与陶瓷, 钢铁, 炼铝
铍	√	√	√	√	惯性导航系统, 中子反射材料, 卫星通信, 导弹制导, 战斗机、坦克通信、瞄准和火控系统, 雷达、手机发射器, 电连接铍合金, 微波器、真空管、磁控管、气体激光器, 核燃料, 氧化铍陶瓷, 量子计算
铌	√	√	√	√	导弹制导, 喷气涡轮机、核反应堆包壳等超合金, 高强度钢材, 铌电容器, 超导合金, 医用合金, 铌酸锂光学材料, 太阳能光解水制氢催化剂, 储能材料
钽	√	√	√	√	机载设备(双筒望远镜、识别设备/红外、惯性导航、雷达)电容器, 手机电容器, 喷气发动机和其他推进系统超合金, 芯片磁控溅射靶材, 医用金属, 钽酸锂铁电材料, 光学玻璃, 碳化钽, 伽马射线激光器
铯	√		√	√	陶瓷铁氧体永磁铁, 铝合金, 仿钻, 照明弹, 跟踪弹, 焰火, 骨科医疗
铷、铯	√	√		√	星载铷原子钟, 铷燃气激光器, 红外夜视设备, 医疗, 闪烁计数器, 铷玻璃, 射线探测, CCD感光元件, 高温高压钻井, 离子技术
铟、铊	√	√	√	√	铀燃料包壳, 耐火材料, 高温陶瓷, 耐蚀合金, 喷气发动机热障涂层, 雷达光电系统(氧化铟), 燃烧弹, 核反应控制
镓	√	√	√	√	集成电路(手机、相控阵雷达、人工智能), 通信(射频放大器), 激光二极管、发光二极管(LED), 电力电子, 红外成像, 车载电子设备, 导弹制导, 砷化镓太阳能电池(天基和陆基), 铜铟镓硒薄膜太阳能电池
锗	√	√	√	√	硅锗半导体, 光纤, 惯性和战斗导航机载电子设备, 红外跟踪系统, 双筒望远镜(包括夜视), 制导系统, 卫星太阳能电池、高亮度发光二极管基板, 化疗
锡	√	√	√	√	(触屏、手机、电视)平板显示(锡锡氧化物), 激光瞄准, 传感器, 惯性导航, 相控阵雷达车载电子设备, 红外成像系统识别设备, 太阳能电池, 焊料, 特种合金, 核反应控制, 发光二极管和激光二极管
铼	√			√	喷气发动机涡轮叶片镍基高温合金, 铂铼催化剂, 空间核反应堆芯材料, 其他合金
碲	√	√		√	合金剂, 红外夜视设备, 光盘存储, 温度控制系统, 太阳能电池, 感光材料, 量子存储
铊				√	合金, 高温超导, 红外及其他光电、光学材料, 光纤, 医药
铋	√	√		√	航空航天车辆舰船核电等铬镍不锈钢, 喷气发动机超合金, 特种钢材, 电镀, 宝石改色
钒	√	√	√	√	钒钢, 喷气发动机超合金, 飞机机身钛合金, 舰船、装甲、飞机、陆基涡轮机和电动机等含钒合金, 钒电池, 传感器
钛	√	√	√	√	航空航天用超合金、钛合金, 陆上车辆装甲, 火炮, 焊接防腐涂层, 镍钛合金(医疗等), 钛白粉, 钛酸钡压电陶瓷、吸波材料
镁	√	√	√		镁合金(无人机、散热器等), 铝合金(运输, 包装), 氧化镁陶瓷(耐火材料、电子封装、红外窗口), 镁电池(探空雷达), 军火, 燃烧弹
镍	√	√		√	不锈钢, 铬镍钢, 镍基超合金(高温合金、耐磨合金、耐蚀合金), 镍钛合金(形状记忆合金), 因瓦(Invar)合金, 三元锂电池, 含镍酶

续表 1

品种	本文 ¹	美国 ²	欧盟 ³	日本 ⁴	重要应用领域
钴	√	√	√	√	锂电池, 钕铁硼永磁体, 铁钴软磁合金, 涡轮导向叶片、喷嘴叶片钴基超合金, 硬质合金及金刚石工具, 维生素B12, 颜料, 钴基催化剂
钨	√	√	√	√	高强耐磨合金, 航空超合金, 镇流器、弹头、聚能装药、射管、焊接、电气、穿甲和坦克弹药钨合金, 硬质合金, 电致变色材料, 电子封装, 催化剂
锡	√	√			平板显示器(氧化锡), 锡基轴承合金, 焊料, 电子封装, 半导体激光器, 锡罐
铋	√	√	√	√	阻燃材料、助燃材料, 铅铋电池极板, 铋基半导体激光器, 红外夜视设备, 金属硬化剂, 陶瓷、玻璃添加剂, 核反应堆中子源
铌	√	√	√	√	医药, 化妆品, 无铅焊料, 易熔及其他合金, 热电材料, 磁悬浮材料, BGO闪烁晶体, 有机合成催化剂, 原子能研究
锌		√			镀锌钢, 青铜和黄铜, 锌基压铸合金, 化学品
钼				√	钼合金(耐高温、耐辐射部件), 硫化钼(工业润滑、催化、石油脱硫), 柔性电子
钡				√	光学玻璃, 陶瓷釉, 其他产品
铂族	√	√	√	√	催化剂, 涡轮叶片热障涂层, 珠宝, 电子封装, 传感器, 硅酮, 一氧化氮制造, 工业坩埚, 计算机硬盘, 心脏起搏器 铂: 燃料电池催化转化器, 催化剂 钯: 汽车尾气催化转化器, 催化剂 铑: 电气触点, 耐磨机器部件, 催化剂 铱: 电化学过程阳极涂层, 化学催化剂 钌: 催化剂, 计算机中的电触点, 片式电阻器 铱: 催化转化器, 电子元件, 催化剂
金	√				本位货币, 首饰, 导电金球, 传感器, 纳米金催化剂, 半导体封装
高纯石英	√				导热硅脂, 气凝胶, 富铝合金, 催化剂, 芯片, 光纤, 太阳能电池, 航天、红外、激光等窗口玻璃, 信息显示玻璃, 印刷电路板, 飞机、卫星等防热部件
金属硅			√	√	富铝合金, 化学应用
天然石墨	√	√	√	(碳)	芯片散热, 锂电池和燃料电池, 核电和航空密封, 船舶防腐, 电子屏蔽、隐身和吸波材料, 防弹衣, 军火, 炼钢、铸造用耐火材料, 高温润滑剂, 合成金刚石, 单晶硅炉, 高温气冷堆, 石墨烯柔性电子
萤石	√	√	√	(氟)	铀浓缩和提纯, 半导体加工, 炼钢、炼铝和其他冶金, 锂电池, 航空航天密封, 红外窗口, 炊具涂层, 电气绝缘, 制冷和空调, 医药, 农用化合物, 防腐材料, 压电材料, 氟原子激光器
硼	√		√	√	半导体掺杂, 核反应中子吸收, 固体火箭推进剂, 钕铁硼永磁, 超高温部件材料, 超导材料, 硼玻璃, 陶瓷, 化肥, 氢-硼聚变材料
磷			√		化工应用
重晶石		√	√		油气钻井液, 橡胶塑料油漆纸张填料, 化工
砷		√			微波通信(砷化镓半导体)
硒				√	感光、光电、红外, 玻璃, 颜料, 冶金, 农业和生物, 医疗保健
磷酸盐岩			√		矿物肥料, 食品添加剂
焦煤			√		金属冶炼
氦气	√				核磁共振, 高温气冷堆, 半导体、光纤生产, 受控大气, 焊接, 检漏, 潜水, 火箭燃料加压, 激光器

1 本文研究提出的37种关键矿产建议清单; 2 美国2022年发布的关键矿产清单; 3 欧盟委员会2020年发布的关键原材料清单; 4 日本稀有金属清单

4.3 基于供应风险性选择

世界各国对供应风险性的考量大同小异, 都是将原材料、技术和行业结合在一起进行分析。宏观层面, 供应链中断的原因可能包括自然灾害、劳资纠纷、贸

易摩擦和贸易壁垒、资源保护主义、地区冲突等等。微观层面, 供应风险性体现在生产高度地理集中、资源禀赋下降、日益严格的环境和绩效审查、越来越高的气候风险、勘查开发项目投资大周期长、矿产品价格大幅上涨等方面。

对中国而言, 供应风险性也需要综合考虑各方面因素。具体到进出口百分比这一量值, 则应考虑: (1) 净进口比例大于 50% 的矿产, 或净进口比例虽小于 50% 但未来应用需求会快速增长而国内勘查开发进展缓慢的矿产; (2) 净出口比例较大、在国际上有一定控制力和话语权的矿产, 或净出口比例不大但产量占比大有利于提升国际竞争力和话语权的矿产。

经梳理各种参考文献, 系统列出了中国关键矿产进出口百分比(表 2), 作为反映这些矿产供应风险性的一个量值。

表 2 中国关键矿产进出口百分比

Table 2 The percentage of Chinese import and export of key minerals

进出口	矿产
净进口 > 90%	锰、铌、锆、钨、钼、镍、钴、铂族、高纯石英、氦气
净进口 > 50%	铁、铜、铝、锂、铍、钽、铌、金、硼
净进口	钾盐、钛、锡
供需基本平衡	铈、铷、铯、钒
净出口	稀土、锗、碲、铋、石墨、萤石
净出口 > 50%	铟、镁、钨、铀
净出口 > 90%	镓

尽管美、欧、日等在制订关键矿产/原材料清单时都将中国视为最主要的生产国和供应国, 但分析表 2 可以发现, 中国净进口的矿产远多于净出口的矿产。37 种关键矿产中, 中国净进口矿产 22 种, 净进口超过 50% 的 19 种、其中进口超过 90% 的 10 种, 不仅大宗矿产, 一些战略新兴矿产也严重依赖进口。净出口矿产 11 种, 净出口超过 50% 的 5 种、其中铟超过 90%。全部 11 种净出口矿产产量超过全球产量的 50%。总的来说, 中国关键矿产净进口品种多、进口量大。近年美国挑起并不断升级的贸易摩擦使得全球资源供应链愈加脆弱, 中国获取境外资源的风险加剧, 关键矿产供应形势不容乐观。

5 关键矿产应用领域分述

5.1 大宗矿产

5.1.1 铁

98% 以上铁矿石用于钢铁冶炼。钢铁产品用途广泛, 是建筑、汽车、机械等工业的核心构件。在当前中国钢铁实际消费中, 一半以上用于建筑行业, 其余主要用于机械行业、汽车行业、能源行业等。除了传统用途, 出现了一些新的应用领域。“手撕钢”, 即软态不锈钢精密箔材用于锂离子电池及电容器封装材料、电池集流体、薄膜太阳能电池、OLED 显示

器及纸质电子显示产品等柔性产品基材, 硬盘驱动器悬挂装置, 清洁汽车气体排放物金属蜂窝式触媒吸收装置, 通信卫星等的热发动机隔热屏(镀镍不锈钢), 信号干扰屏蔽装置, 发动机燃烧室叶片以及防护服。铁的应用也在向化工催化领域拓展, 已用于合成氨气和醇类, 未来或将有效替代当前的贵金属催化剂^[15]。

5.1.2 锰

因为锰太脆而不被单独作为金属使用, 95% 的锰进入合金中, 主要是生产钢铁, 其中约 1% 用于生产“锰钢”。锰钢含有大约 13% 的锰, 非常坚固, 用于铁轨、土方机械、保险柜、军队头盔、步枪管等。锰也用来与铝、铜等有色金属生产合金。锰的非冶金应用包括锌锰电池负极(主要是二氧化锰)、电子信息材料软磁体(锰锌铁氧体)、肥料和动物饲料中的微量营养素添加剂(硫酸锰和氧化锰)。二氧化锰用作橡胶添加剂、工业催化剂和着色剂, 一氧化锰用作缺锰土壤的肥料, 高锰酸钾用于去除废气和废水中的有机杂质; “锰紫罗兰”用于化妆品、艺术家使用的釉料、塑料和粉末涂料的着色^[2,16]。

5.1.3 铜

铜作为“电气之王”广泛应用于工业各领域。电力行业消费 40% 的铜, 电子与通信、日用品各消费 15%。未来铜的需求在战略性新兴产业领域会持续旺盛。一台混合动力汽车含铜约 40 kg, 一台纯电动汽车含铜约 80 kg, 风电、光伏、充电桩、磁悬浮轨道等也都大量使用铜。未来电网建设需要大量的铜。用于集成电路和半导体分立器件的铜基引线框架材料、射频电缆、用于印刷电路板基板和锂离子电池负载体铜箔等是支撑半导体、通信、消费电子、电动汽车等产业的重要技术材料。

5.1.4 铝(铝土矿)

铝用途广泛, 从建筑到运输、电缆、包装材料和日用品。90% 以上的铝土矿用于生产原铝, 其余用作耐火、研磨材料等。在中国 124 个产业部门中, 有 114 个部门使用铝土矿资源产品。特别是作为“飞机金属”, 铝是各种航空飞行器中用量最多、最广的金属。波音 767 飞机使用铝合金约占机体结构质量的 81%。C919 大飞机铝合金材料的用量约占材料总量的 70%(其中, 铝锂合金材料在机体结构用量达到 8.8%)^[17]。铝及铝合金也是车辆、舰船大量使用的结构和功能材料, 美国“福特”号航母电磁炮发射轨道和炮弹都由铝合金制造。铝金属用于芯片焊盘铝基板、硅铝合金用于半导体封装壳体, 铝-空气等燃料电池技术也在研发中。

5.1.5 钾盐

世界上 95% 的钾盐产品用作肥料, 5% 用于工业。工业用途包括生产洁净剂, 以碳酸盐和硝酸盐形式用于玻璃和陶瓷工业, 纺织和染色, 制化学药品以及罐头、皮革、电器和冶金工业等。钾的氯化盐、过磷酸盐和硝酸盐是制造焰火、炸药和火箭燃料的重要原料。钾的化合物还用于印刷、电池、电子管、照相等工业部门, 此外也用于航空汽油及钢铁、铝合金的热处理。智能手机屏幕石英玻璃中添加钾元素以增加强度。

5.2 “三稀”金属矿产

5.2.1 稀土

稀土永磁材料占稀土用量的 35% 以上, 典型应用包括计算机硬盘驱动器, 智能手机扬声器、拾音器和振动装置, 机器人步进电机和伺服电机, 飞行器惯性导航系统, 飞机发动机控制器, 高铁永磁牵引电机, 新能源汽车电动机, 风力发电机, 核磁共振等^[18]; 以及卫星、雷达等的行波管、环行器, 导弹制导系统中的电子束致聚焦和方向舵驱动^[19]。稀土永磁材料主要是钕铁硼磁体, 使用元素钕、镨, 含少量镝、铽等以提高高温性能和抗退磁性能。另一种钕钴磁体具有更好的耐热性, 在飞机和军事领域高温环境使用。

稀土作为添加剂为玻璃提供颜色和特殊的光学性能。镧和镨极大地提高光学玻璃折射率, 镧在相机镜头使用, 镨在浸入式光刻物镜使用。许多稀土单独或复合用于为平板显示器和发光二极管制造荧光粉。钐荧光粉用于 X 射线成像和各种医疗应用, 如核磁共振成像(MRI)^[2]。稀土荧光粉和掺镧玻璃成功应用于夜视系统, 海湾战争中多国部队就是用这种夜视镜一次又一次地观测伊军目标, 以小小代价换取大胜利^[19]。

催化剂是稀土的另一个重要用途。镧基催化剂用于炼油, 铈基催化剂用于汽车尾气催化转化器; 少量的钕、镨和钇被用作催化剂以减少汽车一氧化碳的排放^[2]。1997 年第一批大规模生产的镍氢电池驱动汽车开始在日本的道路上行驶^[20], 镍氢电池使用镧基合金作为阳极, 每辆混合动力电动汽车中的镍氢电池镧使用量高达 10~15 kg^[2]。

早期稀土在冶金中的应用是打火石 Fe-Ce 合金, 美国军火中的稀土合金底火 70% 来自中国。钢铁和铸铁工业一直是稀土应用最多的领域之一。有色金属及其合金中加入少量的单一或混合稀土金属后, 可以提高耐热性、强度、抗蚀性和加工性能。镨、钕用作镁铸件的合金添加剂, 这样的镁合金用于飞机发动机的生产^[21]。添加混合稀土的铜基合金用于集成电路引线框架^[22], 稀土金属硅化物广泛用于微电子器件中的源、漏、栅极与金属电极间的接触^[23], 添加稀土元素

的无铅焊料、基板用于集成电路封装^[24]。

大约 90% 的激光材料都涉及到稀土。钇铝石榴石(YAG: $Y_3Al_5O_{12}$)晶体是当今普及的一种在室温下可获得连续高功率输出的激光晶体, 用于激光测距、激光制导、激光通信。钕铁石榴石是微波雷达控制高频信号的组分, 在雷达遥控遥测、导航及电子对抗中有特殊用途^[19]。钕掺杂钇铝石榴石激光器等设备常用于医学和工业部门。掺钕玻璃激光介质对高功率应用(包括激光聚变研究)非常重要。铽掺杂、铒掺杂钇铝石榴石常用于外科激光器。铒激光器用于口腔和皮肤护理。掺铽、铈、镨的钇铝石榴石用于一种最重要的、高效率的 2 μm 激光晶体, 广泛应用于医疗和气象等领域, 还被用于导弹防御系统的激光雷达, 可以明显提高测距和弹道估算的精确度。

镧改性膨润土可抑制蓝绿藻类繁殖, 从而控制湖泊富营养化^[25]。含氧化铈的水溶液用于对半导体晶片、平板显示器及其他光学玻璃表面进行化学机械抛光, 氧化铈用于固体氧化物燃料电池以促进水汽化学反应^[26]。氧化镨在一种潜在的高温超导材料($\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_8$)中被用作间隔层^[27]。将氧化钕熔化到玻璃中会根据环境光源产生从热粉红色到蓝色不等的色调^[28]。钐可用于核反应堆控制棒, SmI_2 用于合成治疗癌症的药物^[29]。以红色的 Eu^{3+} 、绿色的 Tb^{3+} 和蓝色的 Eu^{2+} 构成的磷光体能将紫外线转化为可见光, 在 X 射线增感屏、等离子体屏幕、节能荧光灯和发光二极管中都会用到它们。以铈和其他镧系元素制作的荧光生物探针广泛用于生命科学研究。掺入二价铈和一价铜的塑料能够高效地将阳光中的紫外线转化为可见光, 使用这种塑料建造温室可使作物收成提高大约 10%^[30]。钐用作核磁共振造影剂。钐及其合金或盐在磁制冷中起着突出的作用。钐可以吸收紫外线辐射, 并将其能量转移到其他镧系元素。钐可用于反应堆控制棒^[31]。含有铽的化合物已被用作生物医学领域的探针, 如氟免疫测定和超分子发光传感器。铽镨铁合金是一种磁致伸缩材料, 已用于致动器和水下传感器^[32]。镝的磁性也可以用于核磁共振造影剂。夹在酞菁环之间的镝离子层的行为像“单分子磁体”, 开辟了存储信息新的可能性^[33]。铽的高磁化率意味着它可被用于高强磁体, 特别是作为磁通集中器, 但铽的磁性仅在低温下表现显著^[34]。掺杂三价铈离子的掺铈光纤放大器实现一根光纤中多路光信号同时放大, 支撑更大容量、更高速、更长距离通信。三价铈离子理论上是红外探测器的完美材料, 利用其超激发态实现光子探测。人们正探索在含铈固体中引入少量三价铈杂质获得可以高效地将近红外光转化为绿光的材料, 以便应用于激光笔、太阳能电池, 或者作为可见光光纤掺杂材料^[35]。放射性同位素 ^{170}Tm 是便携式设备的 X 射线来源, 欧元纸币紫外线下的蓝色荧光可能产生于防伪油墨中

Tm³⁺ 离子^[36]。镱在高压下变为半导体, 已经用于制造应力计。放射性同位素¹⁶⁹Yb 也用于便携式 X 光机。最近的一个应用是原子钟, 使用超冷¹⁷⁴Yb 可以保证 500 亿年误差 1 s 的精度, 镱原子钟可能进入导航和通信系统, 并可能最终帮助重新定义国际制秒(SI 秒)^[37]。莫特沙芬镱在动态光疗中可能是一个很好的光敏剂, 并且一直在进行抗前列腺癌的第一阶段人体试验。镱同位素¹⁷⁷Lu 成功地用于实验和临床治疗一些严重的癌症^[38]。镱基闪烁晶体用作医用正电子成像仪(PET)的探头材料。铈铝合金用于制造俄罗斯先进米格喷气式战斗机的一些部件。氧化铈可用作紫外线探测器的专用光学涂层, 还被用于核反应堆的中子滤波器。铈添加到汞蒸气灯中产生更类似于阳光的柔和光, 常用于运动场的泛光灯。铈化合物显现了作为氢化催化剂的潜力, 硫酸铈同样具有种子发芽剂的作用^[39]。在固体氧化物燃料电池应用中, 铈添加到氧化锆基电解质中以提高功率密度和降低电池反应温度。掺杂铈的钇石榴石被作为荧光体与蓝色发光二极管结合使用, 从发光二极管中发出的蓝光“流”过荧光体后降频转换为黄光, 其后黄光又依次与蓝光叠加产生类日光的白光。钇钡铜氧陶瓷在 93 K 发生超导现象, 这一临界温度高于液氮沸点(77 K), 是一个实际可行的制冷温度^[40]。高纯氧化钇粉末使用等离子喷涂方法, 可生成飞机发动机涡轮热障涂层、燃油喷嘴耐火涂层、集成电路刻蚀工艺腔保护涂层。

在所有元素中钷吸收中子的能力最强, 钷与铀混合可促进燃烧、降低铀的消耗并提高能量输出, 还防止了核燃料棒膨胀, 全世界计划兴建的 115 座压水堆核电站应用氧化钷。稀土钷、铈和镱已用作中子增殖反应堆的中子吸收剂, 稀土钷可用作熔盐反应堆的管材, 添加稀土钷和镱的薄箔材料可用作航天、核工业工程中的中子探场仪, 少量的稀土钷和铈用作密封管中子发生器的靶材料, 涂有含氧化钷的特殊涂料的装甲车可防中子辐射^[19]。

5.2.2 锂

全球约 3/4 的锂用于锂离子电池, 锂离子电池技术是发展可再生能源(储能)和电动汽车所必需。陶瓷和玻璃是锂的第二大应用领域。锂也被用来制作高温润滑剂, 为合金增加强度, 以及用于热交换。有机锂化合物在精细化工中得到广泛应用。锂制剂被作为情绪稳定药物使用。利用中子轰击⁶Li 可以制取³H(氚)^[41]。锂是电解铝工艺所需的一种少量但关键的成分, 氢氧化锂用于压水堆水化学(pH 值)控制, 氟锂铍可用于钍基熔盐反应堆冷却剂。

5.2.3 铍

铍的最大用途是合金, 其次是氧化铍陶瓷。铍-铜合金(通常含有高达 2.5% 的铍)无磁性可在陀螺仪

或核磁共振设备中使用, 也用于制造触点和连接器、开关、继电器。铍-镍合金用于生产耐磨和尺寸稳定的高温弹簧、触点和连接器, 铍-铝合金对于生产具有高刚度重量比和低表面振动的飞机和卫星结构部件具有价值。铍金属用于光学瞄准系统和火控系统, 在核电厂和核武器中作为中子反射器, 也被用于大型强子对撞机加速器。铍玻璃和薄箔用于卫星铍镜、天文望远镜、光学制导系统。在硅芯片和金属安装底座之间使用氧化铍陶瓷的半导体器件在发热回路(如气流少或暴露于高环境温度的电路)持续时间更长, 用于导弹制导系统、雷达和手机发射器。氧化铍陶瓷用于制造高性能微波器件、真空管、磁控管和气体激光器的部件, 对于核磁共振成像(MRI)仪、医疗激光器和便携式除颤器等关键的医疗技术设备至关重要。目前正在努力开发一种可行的同时含有铍氧化物和钍氧化物的核燃料制造工艺, 尽管铍的成本比铀更高, 但含铍燃料可能比传统燃料更持久、更高效、更安全。铍离子还可能作为量子计算机的处理器^[2,42]。高纯度铍金属已被作为国际热核聚变实验堆面向等离子体第一壁材料。

5.2.4 铌、钽

铌和钽都是高温合金元素。全球约 3/4 的铌用来生产各种钢合金, 用于管道、道路和建筑等领域。镍基、钴基和铁基超合金中都含有铌, 用于喷气发动机部件、核反应堆包壳、燃气轮机、火箭组件、涡轮增压器系统以及其他耐热和燃烧设备。铌合金(如 NbTi 和 Nb₃Sn)超导磁铁用于核磁共振、粒子加速器以及超导电动机、超导电缆、磁悬浮机车等。国际热核聚变实验堆计划, 中国承担了总计 174 t NbTi 和 35 t Nb₃Sn 超导股线的制造任务。铌钨合金作为牙科合金和骨植入物已得到应用。铌与锡或锆的合金具有类超导性, 有望被用于储能材料。掺杂铌氧化物可以作为太阳能电池的薄膜电容器。铌酸盐有望作为太阳能光解水制氢催化剂。用铌构建新型无机框架用于生物质转化和太阳能收集^[43]。铌酸锂是非线性光学仪器中的重要材料。未来铌金属可能用作超级电容器电极。

钽的最大用量在钽电容, 占一半以上。钽电容是保障集成电路完整性的重要器件, 在手机、硬盘驱动器和植入式医疗设备(用于助听器和起搏器)中广泛使用, 迄今尚未发现可不损失性能的可替代品。钽可用作更坚固基材(如不锈钢)上的涂层, 用于血管支架、板、骨置换、缝合夹和线等医疗应用。长寿命核同质异能素¹⁸⁰Ta 可能迫使其衰变到基态而以伽马射线形式释放能量, 这可能导致伽马射线激光器或者一种新型核电池的发展^[2,44]。钽环件被用于半导体芯片磁控溅射过程以提高产额。钽酸锂是激光技术、红外技术、

电子工业中广泛应用的铁电材料。碳化钽耐超高温陶瓷应用于工具钢、耐磨损部件、硬质涂层、导电薄膜、光学涂层以及飞行器前缘和鼻锥等领域。含 Ta_2O_5 或 Nb_2O_5 的高折射率低色散光学玻璃是重要兵器材料,对于提高摄影观测瞄准系统成像质量和简化设计有重要意义。

5.2.5 铯

铯的最大消费是铁氧体陶瓷磁铁的生产。铯铁氧体具有较高的矫顽力和磁能积、单轴磁晶各向异性等优点而被广泛用作永磁材料、微波毫米波段材料、微波吸收材料和高密度垂直磁记录介质等,是电子工业的一种基础功能材料^[45]。铯铁氧体是最常见的铁氧体永磁体之一,用于冰箱磁铁、扬声器和小型电机等设备。铯的其他日常用途包括仿钻石(钛酸铯)、夜光玩具(铯掺杂的铝酸铯)和用于敏感牙齿的牙膏(氯化铯)。今天,烟火仍然占初级铯化合物使用量的 30%。铯对人体基本无害,甚至已被研究用于预防和治疗骨病如骨质疏松症。在受控剂量范围内,⁸⁹Sr 和⁹⁰Sr 也用于骨癌放射治疗^[46]。

5.2.6 铷、铯

特种玻璃和夜视装置是铷的主导市场,另一个极重要应用是铷原子钟。超冷(铷)原子气体是原子钟或传感器(重力、旋转、磁性)等技术的关键。铯和铷都设定了时间标准,低成本、更小尺寸和更大稳定性使铷钟成为许多商业应用(包括全球定位系统)的理想选择。如今,铷钟已经小型化到火柴盒大小,却仅有 10^{-12} 误差^[47]。铷原子钟是卫星导航系统应用最多的星载原子钟,被誉为中国北斗卫星的心脏。碳酸铷用来降低导电率,以提高光纤远程通信网络稳定性和耐久性。铷盐用于抗休克剂和癫痫、甲状腺机能障碍治疗,放射性同位素⁸²Rb 用作正电子发射断层成像血流示踪剂,氯化铷用作抗抑郁症药。量子计算设备是具有大量铷消费潜力的一种未来应用,预计 10 年内达到原型阶段。铷的光发射特性使其成为运动传感器设备、光电电池(太阳能电池板)、光电倍增管中电信号发生器的有用之物。

从用量上看,铯主要应用于油气勘探开发高压高温钻井的甲酸铯卤水。铯只有一种是稳定的同位素(¹³³Cs),最常见的放射性同位素是铀或钚的裂变产物¹³⁷Cs,是高能辐射的长期来源,在诸如测井装置和水平计等工业领域以及癌症治疗中都已发现其用途。1967 年,国际单位系统(SI)将秒定义为¹³³Cs 原子基态的两个“超精细”能阶之间跃迁时所辐射电磁波周期的 9 192 631 770 倍时间,从那时起,铯原子钟得到了广泛应用^[48]。铯化合物可潜在地用于光电池。溴化铯用于红外探测器、光学器件、光电池、闪烁计数器

和分光光度计。碳酸铯用于有机化合物的烷基化和能量转换装置,诸如燃料电池、磁流体发电机和聚合物太阳能电池。氯化铯作为试剂用于分析化学、高温焊剂、医疗、杀虫剂等。氢氧化铯作为电解液用于碱性蓄电池。碘化铯用于透视设备——傅里叶变换红外光谱仪,以及用于闪烁器。硝酸铯用于烟火、石油裂化、闪烁计数器以及 X 射线磷光体。硫酸铯主要用于水处理、燃料电池,以及改进科学仪器的光学质量。铯同位素¹³¹Cs 用于电子、医疗(癌症)、冶金等。¹³⁷Cs 可用于工业仪表,采矿和地球物理仪器,食品、污水和设备的灭菌。

5.2.7 锆、铪

陶瓷、铸造砂、不透明剂和耐火材料是锆石的主要终端用途,金属锆的主要消费是核能工业。锆石本身是一种耐火材料,可作为熔炉的内衬、铸造模具等。锆石可耐受 3 000 °C 以上的高温,可用作航天器的绝热材料。二氧化锆熔点高达 2 500 °C,且不易开裂,用于制造耐火坩埚。二氧化锆陶瓷层能保护喷气发动机涡轮叶片以及燃气涡轮机,并兼具隔热作用。纯二氧化锆用于化妆品、止汗剂、食品包装,甚至被制成仿钻。锆-锡合金用作氧化铀燃料组件的包壳^[49]。金属锆在高温下仍能稳定,可用来保护重返大气层的太空飞行器。

金属铪的主要用途是高温合金,也用作核反应控制棒。核反应控制棒中的铪通过调整中子通量来控制反应堆的能量输出。铪在高温陶瓷中也有应用,与钽一样,铪的硼化物、氮化物和碳化物耐火性极强,熔点超过 3 000 °C(碳化铪甚至高于 3 800 °C)^[50]。

5.2.8 镓

超过 80% 的镓用于半导体行业。砷化镓的应用包括手机里的高速逻辑芯片和前置放大器等,而铝镓砷和铟镓砷是蓝光激光二极管的发光材料^[51]。砷化镓能够直接将电转换为激光,用于制造光电子器件(激光二极管、发光二极管、光探测器和太阳能电池)。砷化镓还用于生产高度专业化的集成电路、半导体和晶体管,是国防应用和高性能计算机所必需。氮化镓主要用于发光二极管和激光二极管、电力电子和射频电子器件的制造,在有线电视传输、商业无线基础设施、电力电子和卫星市场应用。铜铟镓硒薄膜光伏发电具有较高的吸收系数。由于镓的高沸点,用于制造测量极高温度的温度计。液态镓金属热对流的基本特性被用来研究行星和天体物理磁流体动力学的各个方面^[2]。相控阵雷达大量使用单片微波集成电路作为发送/接收单元,砷化镓基金属-半导体场效应晶体管是单片微波集成电路的核心。

5.2.9 锗

光纤、红外、太阳能、半导体等是锗的重要应用领域。四氯化锗用于制造光纤电缆,在硅芯中加入锗成分以增加其折射率,并最大限度地减少长距离信号损耗。用于瞄准和测距的砷化镓基激光器需要使用锗透镜和窗口。军事和执法机构广泛使用红外成像设备监视、侦察和获取目标,越来越多地用于遥控无人武器和无人机;红外光学设备也用于边境巡逻和应急小组进行搜索和救援行动。锗基板砷化镓多结太阳能电池是目前效率最高的太阳能电池,是天基太阳能电池首选,也可作为陆基集光器用于大规模发电站。锗基板还用于高亮度发光二极管作为液晶显示器背光源以及车辆大灯和尾灯^[2]。1947年,随着点接触晶体管的发明,锗在开启信息时代方面起到了关键作用。20世纪60年代以来硅精炼的改进暂时减少了工业对锗的需求,但近年来在7 nm(<60个Ge原子)微芯片硅锗(Si-Ge)合金中找到了锗的新用途^[52]。锗的其他用途包括化疗、冶金和荧光粉,以及作为生产塑料聚乙烯对苯二甲酸酯(PET)树脂的催化剂。

5.2.10 铟

铟的主要用途是氧化铟锡,超过铟所有应用的2/3。其他包括焊料、合金、半导体等。用于触屏设备、智能手机和液晶电视的氧化铟锡是一种独特的材料,既导电又透光,其透光性是这些应用所需的关键性能。氧化铟锡还是大多数太阳能电池的重要组成部分,无论电池的主成分是何种材料,其外侧吸光层的电路通常都用透明氧化铟锡实现。氧化铟锡的脆性不能很好匹配柔性显示产品的需求,碳纳米管、石墨烯等无铟透明导电材料或部分替代氧化铟锡,以使更多的铟满足光伏需求^[53]。合金和焊料是铟的第二大用途,含铟的焊料具有抗裂纹、耐热和抗疲劳性,在电子设备上使用,同时抑制金成分的析出。某些类型的铟合金可用作非金属材料如玻璃、釉面陶瓷和石英之间的黏合剂。铟也用于牙科合金和白金合金。银铟镉合金还用作核反应控制棒。铟的另一个重要用途是半导体材料,包括碲化铟、砷化铟、磷化铟、铟镓砷等,用于发光二极管和激光二极管,发光二极管主要用于光学数据传输、少量用于显示屏,激光二极管用于光纤通信^[2]。

5.2.11 铼

大部分铼被用来制造超合金,用于喷气发动机零件。在制造无铅和高辛烷值汽油的过程中,铼和铂的组合是首选的催化剂。铼催化剂在各种工业过程中的氢化反应中非常有用。二硼化铼是所有已知物质中最硬的,与其他超硬材料(如钻石)不同,它不必在

高压下制造^[54]。高温合金和铂-铼催化剂分别占铼终端用途的80%和15%,使用铼的镍基超合金主要用于制造喷气式飞机发动机和陆基涡轮发电机涡轮叶片,铼的高温特性能使发动机实现更高的推力和更高的运行效率。钨-铼和钼-铼合金还可制造电气接触点、闪光灯、加热元件、真空管、X射线管和标靶^[2]。钼铼合金是空间核电源中最佳反应堆芯结构材料^[55]。

5.2.12 碲

碲的主要工业用途是太阳能电池和热电产品,分别占消费量的40%和30%。冶金和橡胶也是碲的重要应用领域。碲作为冶金合金剂,添加到钢和铜中使之更易加工,添加到铸铁中以减少热冲击并减少疲劳。橡胶工业中作为加速器和硫化剂。电子行业新开发的相变存储器芯片以及可重写的CD、DVD和蓝光光盘都使用碲(碲碲碲)。碲化铋广泛应用于热电冷却装置,如便携式食品冷却器、汽车座椅冷却系统。碲对于我们生活的最大影响可能来自碲化镉太阳能电池板^[56]。碲也用作陶瓷和玻璃中的着色剂。碲-硒合金用于复印机感光器。碲镉汞合金半导体用于低温红外探测。超导体材料-二碲化铀可以用来设计量子比特。

5.3 关键黑色有色贵金属矿产

5.3.1 铬

黑色铬(IV)氧化物因具有铁磁性在磁带的黄金时代被广泛使用。含有8%铬和18%镍的常规不锈钢是铬的主要用途之一,铬能提高钢的抗氧化性和耐腐蚀性,因此常在钢的表面镀上薄薄一层高亮度的铬^[57]。铬镍不锈钢是造船、汽车、航空航天、核电以及国防军工不可缺少的材料。铬盐是无机盐的主要品种之一,用于电镀、鞣革、印染、医药、燃料、催化剂、氧化剂等。铬铁矿还用来制造铬砖、铬镁砖和其他特殊耐火材料。

5.3.2 钒

钒主要用作钢铁的合金化剂,改善钢的品质,提高钢的强度和硬度,尤其能改善钢的热处理品质。军用车辆要求极好的越野性能,含钒钢能满足这一点,几乎所有的坦克和汽车都离不开含钒钢,无论是结构件还是重要的弹簧。钒的主要非冶金用途是用作马来酸酐和硫酸生产的催化剂。全钒液流电池是储能装置的选择之一。当冷却到室温以下时二氧化钒从导电金属过渡到非导电绝缘体,这种金属—绝缘体转换可以使用一系列外部参数(如压力、掺水和应用电场)进行控制,因而二氧化钒广泛用于涂料和传感器^[58]。

5.3.3 钛

世界上约93%的钛被用于钛白粉(TiO₂)颜料,约

2.5%的钛被用于生产具有高强度和耐腐蚀性的钛合金。人们有很多使用钛的方式,无论是耳环、婚戒,用来固定骨折的某些针脚和紧固件,或是含有二氧化钛增白粉的牙膏,卧室墙壁油漆或药品涂层中的白色颜料。单晶钛半导体将很快在太阳能电池板和平板电脑中找到位置。钛甚至被内置于美国航天飞机的耐热船体中被射入太空。从制药到油漆,从化学到珠宝,钛随处可见^[59]。在航空发动机上,高温钛合金主要用于制造压气机和风扇的盘件、叶片和机匣等零件,中国 Ti-60 合金加入了约 1% 的稀土元素钕(Nd),在一定程度上改善了合金的热稳定性。钛还用于焊接杆涂层以保护焊接表面免于与大气产生反应,以碳化物和其他钛化学品形式用于电子设备的陶瓷部件,以合金形式用于造船、深海石油探采以及地热发电设施。在钢铁行业,钛用于脱氧、粒径控制以及控制和稳定碳和氮含量。钛越来越多地用于制造医疗器件,如髋关节和膝关节、骨螺钉和板以及牙科植入物^[2]。C919 大飞机钛合金材料用量约 10%。长征五号火箭氢泵涡轮由钛合金制成。几乎所有超声波仪器中都要用到钛酸钡压电陶瓷。钛酸钡可以置于铁轨之下测量火车通过时候的压力,医生用它制成脉搏记录器。用钛酸钡做的水底探测器可以看到暗礁、冰山和敌方潜艇等。钛酸钡还是一种不错的雷达吸波剂。

5.3.4 镁

氧化镁和镁金属是镁的两种主要应用方式。氧化镁用作耐火材料、电子封装陶瓷基板、各种磁性材料。镁金属由于低密度、较强的延展性和良好的导电导热性使其成为有魅力的合金组分,在建筑、飞行器制造、光学和电子器件行业都广泛应用。Al-4.5wt%Mg 铝合金拥有高抗腐蚀性、良好的可焊性和中等的强度,被广泛应用于舰艇、汽车、飞机、制冷装置、医疗器械、压力容器、钻探设备、导弹零件、装甲等领域。镁是一种常见的肥料添加剂,也用于药物。含有镁-碳键的有机金属化合物格氏试剂适合作为大规模工业生产的中间产物,许多重要的药物都是通过利用格氏试剂来进行工业制备^[60]。雷达探空系统采用镁电池作为电源。镁也可以被用于闪光灯和焰火。

5.3.5 镍

镍在不锈钢、合金、电镀、电池等领域广泛应用,不锈钢和合金占总用量的 80% 以上。镍基合金(Ni、Cr 为主,根据不同用途添加适量 Ti、Al、Mo、W、Cu 以及 Nb、Ta、In、Y 等)在材料领域占据重要地位,镍基高温合金广泛用于燃气轮机叶片、涡轮盘、火箭发动机、核反应堆,镍基耐磨合金用作石油化工设备、原子能设备以及喷气飞机和内燃机等阀门、泵件、活塞、活塞环、密封件、制动器、挺杆、轮叶及叶片等,

镍基耐蚀合金用于能源、化工和海洋工程中高温及中温的耐蚀部件。铬镍钢既是装甲钢和炮钢,也是制造航空发动机和军车的各种轴和连杆的重要材料。镍基形状记忆合金(NiTi 合金)用于制造航天器自动张开结构件、宇航设备自激励紧固件、人造心脏马达等。Invar(铁镍合金)被称为金属之王,用于航天遥感器、精密激光设备、光学测量系统、波导管结构件、光刻掩模板等。镍也作为硬币的成分。镍还用于催化氢化,并能给玻璃带来绿色色调。今天,科学家们更感兴趣的是应用含镍酶来解决当今世界能源和环境问题:氢酶化学对氢燃料电池技术很有吸引力,而一氧化碳脱氢酶和乙酰辅酶 A 合成酶可用于煤电厂降低二氧化碳排放^[61]。

5.3.6 钴

在全球范围内,钴的主要用途是生产锂离子、镍镉和镍氢等可充电电池的正极材料,用于消费电子、电动和混合动力汽车、储能装置和电动工具。电池占钴用量的 60% 以上。钴基超合金主要用于喷气发动机、工业燃气轮机、舰船燃气轮机的导向叶片和喷嘴导叶等部件。由钴和碳化钨制成的复合硬质合金被金属加工、采矿、油气钻探以及建筑行业用作切削工具和耐磨部件。金刚石工具中,钴是将耐磨颗粒结合在一起的基质。钴用于制造永久和软磁性合金。含钴的钢包括用于切削刀具的高速钢和强度大、韧性强、可加工性强的镶结钢。其他含钴合金具有耐腐蚀和(或)磨损或特定的热膨胀特性。钴的其他化学应用包括动物饲料添加剂,钢带子午线轮胎的黏接剂,化工、石油和其他行业的催化剂,油漆干燥剂,玻璃脱色剂,瓷釉质的底釉,湿度指示器,磁性记录介质,颜料^[2]。钴也是人类必需的微量元素,存在于维生素 B12 和一系列称为钴胺的其他联合酶中。在催化领域,钴可替代铂和镍调节交叉耦合反应。科学家正在研究用钴基催化剂调节光解水制氢反应过程的技术,这一技术的发展或可最终促进氢能的绿色利用^[62]。

5.3.7 钨

钨主要作为硬质合金成分用于各种切割工具耐磨零部件,占用量的 60%。其次作为金属材料用于电气组件(灯丝、电阻和 X 射线管)以及超合金。高速钢、碳化钨金属陶瓷等硬质合金是消耗量极大的军工材料,含钨结构钢是现代兵器应用最多的钢种之一,钨是制造火箭、导弹喷管的关键金属,钨合金在穿甲弹、火箭弹和炮弹、药型罩等战斗部材料中得到广泛应用。高纯钨及其合金(W-Ti、W-Si 等)材料常用作物理气相沉积用溅射靶材,用于制造半导体集成电路的栅电极、连接布线、扩散阻挡层等。三氧化钨是第一种被确定的电致变色材料,在显示器和智能窗户中应用能

够限制光和热量的传递。智能窗户将很快出现在技术最先进的汽车和建筑物中^[63]。

5.3.8 锡

焊锡、镀锡板、合金普遍使用锡金属,其中焊锡约占锡消费的一半。锡焊材料应用于电子电器产品的装联,锡以及锡基合金(Sn-Ag、Sn-Cu、Sn-Bi)用于制作集成电路及各类其他电子器件引脚可焊性电镀层。印刷电路板使用锡铅合金焊料,用于连接复杂电子电路中的触点。这一光亮的银色金属独特的导电性、电子结构和容易形成合金的倾向使其在太阳能和下一代电子设备中具有新的作用。锡基纳米粒子有望成为锂离子电池的下一代阳极材料。锡化合物出现在防污涂料、PVC管内甚至可能在骨骼中^[64]。镀锡板在包装领域大量使用。锡基(锡铈铜或锡铜)轴承合金是一切耐磨金属滑动轴承中应用最广的材料,用于制造飞机、坦克、舰船等的轴承和轴套。碲锡金属互化物 SnTe 半导体制成的激光器可以检测出空气中浓度 10^{-10} 的气体污染,已用于环保和医疗卫生系统。

5.3.9 铈

在美国,铈 40% 用于阻燃剂,36% 用于铅铈合金和弹药,24% 用于陶瓷、玻璃、橡胶等。三氧化二铈(Sb_2O_3)用于黏合剂、油漆、纸张、塑料和密封剂中的阻燃剂,也用作橡胶和纺织品内饰的阻燃背衬,通常与溴或氯基卤化物一道使用,阻燃剂的主要市场包括电子、塑料和用于制造儿童服装、飞机和汽车座椅罩以及床上用品的织物。利用铈的抗腐蚀性,铅酸蓄电池中含有 4%~6% 的铅铈合金。在滚珠轴承、穿甲子弹和铅弹中,铈是一种金属硬化剂。橡胶工业使用铈作为硫化剂。在陶瓷和玻璃制造中也使用铈,例如使用合适的稳定剂和着色添加剂,除长波红外线外,三氧化二铈玻璃可对所有可见光不透明。高纯度的铈金属($\geq 99.999\%$)被半导体行业用在硅晶片中制造红外探测器、二极管和其他器件。抗摩擦轴承、机械排版型活字合金、焊料(含铈可多达 10%,但通常要少得多)以及大不列颠金属(含铈 5%)的装饰铸件和紫砂(现代产品中含铈 7.5%)也含有铈。石墨轴承用铈浸渍以提高热耐受性。在核反应堆中,铈和铍被用于启动中子源。“黑铈”是精细研磨的金属铈,用于金属和石膏铸件青铜镀。硫化铈是制造弹药引体、雷管、烟幕发生器、视距探测壳、示踪弹和安全火柴电弧触发面的关键助燃成分,还提供烟花中的“闪光”效果^[2]。一些 5 价铈的化合物可被用于治疗黑热病。铈化锂(Li_3Sb)具有较高的理论容量而被认为是高能量密度锂离子电池有前途的阳极材料^[65]。

5.3.10 铋

铋化学品是铋的最大应用领域,用于化妆品、工

业品和药品,占铋消费的 60% 以上。铋及其化合物对人体无害,赢得“绿色元素”的地位。氯化铋被用于化妆品和护肤品以散发银光,硝酸氧铋用于手术杀菌,最著名的铋基药物水杨酸铋用于治疗肠胃紊乱及烧伤。铋在工业领域用于制作陶釉、水晶器皿和珠光颜料。铋有着广泛的冶金应用,包括用作铸造添加剂以改善可锻铸铁的金属完整性,在黄铜、易加工钢和焊料中用作铅的无毒替代品。铋是各种易熔合金的重要成分,这些合金可以用于研磨光学透镜的夹持装置、废弃油井的堵头、消防喷头的触发机构等。在焊料中经常使用铋,越来越多的场合铋正在替代具有高毒性的铅金属。铋和石墨一样是最具反磁性的材料之一,被用于制造磁悬浮列车。最近在有机合成中,作为路易斯酸,环保的三价铋化合物催化剂得到了重要应用^[66]。在核医学成像(XCT、PET)、工业无损检测、安全检查、高能物理及核物理等领域有着广泛应用的闪烁晶体铈酸铋是综合性能最好的闪烁晶体之一,占 PET 市场用闪烁晶体的 50% 以上。碲化铋半导体热电材料用于环境友好型制冷和废热发电。铋碲氧合金薄膜浆料用于半导体器件制作。

5.3.11 铂族

铂族最主要的应用在于催化剂,特别是催化汽车尾气中低浓度的未燃烧烃类完全燃烧成二氧化碳、水和氮气、裂解长链烃。铂族纳米材料用于制备燃料电池以便于环保地制取氢。铂族的另一个重要应用领域是抗癌药物的研制。一系列铂的化合物和聚合物已经被用于制作各种传感器、光敏剂和有机光伏电池材料^[67]。化学工业需要铂或铂-铑合金制造一氧化氮,用作制造炸药、化肥和硝酸的原料。铂族还用于生产特种硅酮,用作汽车安全气囊的涂层、防水涂料和便笺黏合剂。铂族合金非常坚硬且耐用,是用于制造化学品和合成材料(如用于生产发光二极管的高纯度单晶)的工业坩埚中最著名的涂层。铂族被用于玻璃纤维、平板和液晶显示器的生产。铂金用于医疗植入物如心脏起搏器。铂族也用于超级合金添加剂。在电子行业,铂族用于计算机硬盘以提高存储容量,在电子设备、混合集成电路和多层陶瓷电容器中无处不在^[2]。高纯铂、钌金属及合金在半导体分立器件和集成电路制造中用作金属硅化物、扩散阻挡层及电极等材料。

5.3.12 金

黄金既是首饰,也是各国央行本位货币储备,还是电子行业高端材料。全球黄金消费估计为:首饰 47%,金条 21%,中央银行和其他机构 14%,官方硬币、奖牌和仿制硬币 10%,电气和电子 7%,其他 1%。导电金球是目前世界上电子行业超细间距柔性连接所不可缺少的关键材料,包含导电金球的各向异性导电

胶膜(ACF)主要用于平板显示器、硬盘驱动器磁头、微波高频通讯、存储器模块、光耦合器件、表面封装(SMT)等^[68]。金纳米线在负载型传感器、催化型传感器及应变型传感器等生物传感器领域都有实际应用^[69]。当分成仅由几个原子组成的纳米碎片,金就会成为异常有效的催化剂。除了一氧化碳和乙炔氢氧化的最佳催化剂之外,金对烯烃环氧化和醇氧化的催化也是高效的。金与钼结合还能极好地催化由氢和氧直接产生过氧化氢的反应^[70]。金等贵金属还是先进半导体封装材料。

5.4 战略非金属矿产

5.4.1 高纯石英

石英矿物原料以三种形式被工业利用:一是直接利用石英矿物晶体,二是为玻璃、陶瓷、耐火材料等提供SiO₂成分,三是制取金属硅。石英矿物晶体和金属硅利用方式要求高纯石英(SiO₂含量>99.9%)原料。当今利用电炉加热二氧化硅与碳的混合物来实现金属硅的大规模生产,超过90%的金属硅用于制造合金及化学品,如汽车铝合金以及广泛用作润滑脂、树脂、橡胶或者密封胶的硅脂。二氧化硅气凝胶是非常有效的绝缘材料。一小部分(约5%)高纯金属硅用于电脑芯片、功率晶体管、太阳能电池、液晶显示器和半导体探测器等各种电子器件。多孔硅由于其发光特性以及巨大的表面积也促进了一系列传感器的发展,纳米多孔硅胶颗粒可以用于催化、分离、环境清理、药物释放以及纳米科技等领域。“黑硅”通过将可见光捕获在表面尖峰之间而大大增强了光吸收性能,这使其在太阳能产量的应用更有前景^[71]。将金属硅转变成四氯化硅(SiCl₄)或三氯氢硅(SiHCl₃),经分离提纯后由氢还原制成多晶硅。将超纯多晶硅置于石英坩埚中用提拉法(Czochralski法)制成单晶硅。多晶硅和单晶硅均可制作太阳能电池。将单晶硅锭切成薄片经过抛光后作为硅半导体基片使用。

半导体制程氧化、扩散等工序需将硅基片置于石英舟和石英管中进行。这些石英坩埚、石英舟、石英管,均需采用二氧化硅含量大于99.998%的高纯石英原料。这种纯度的高纯石英还用于制造航天器光学系统、红外跟踪系统、分光器、准分子激光器、光电探测器等窗口玻璃。二氧化硅含量在99.99%~99.998%之间的高纯石英原料,可用于制作石英光纤、激光玻璃、导弹和雷达天线罩等。二氧化硅含量在99.9%~99.99%之间的高纯石英原料,可用于制作金属硅、气凝胶、光伏玻璃、信息显示玻璃、航空玻璃和石英球形微粉等,其中石英球形微粉除了用于印刷电路板,还用于飞机、火箭、卫星等防热部件等。

5.4.2 石墨

电池、刹车片、润滑剂、粉末冶金、耐火材料、炼钢等是当今石墨的主要应用领域。手机、平板电脑芯片散热均要使用天然石墨散热薄膜。高导热柔性石墨(散热)膜是航天器三线阵电荷耦合立体相机成像质量的重要保障条件。天然石墨是高温高压法合成金刚石的原料。球化石墨用作锂离子电池负极材料,氟化石墨用作锂原电池正极材料,膨胀石墨用作燃料电池双极板可能成为未来石墨最主要用途。膨胀石墨(柔性石墨)也用作核电阀门、飞机发动机气缸垫等密封材料,船舶防腐涂料,红外屏蔽(隐身)材料,雷达遮蔽材料等。氟化石墨也是飞机发动机润滑剂。美国研制的石墨/环氧树脂复合材料(超黑粉),对雷达波的吸收率达到99%,且在低温环境下具有良好的韧性。等静压石墨是制造单晶硅炉、有色冶金连铸石墨结晶器、电火花石墨电极、高温气冷堆堆芯结构等的高附加值材料。石墨烯作为一种透明导电材料,可能替代传统的氧化铟锡薄膜用于触摸屏,未来石墨烯可能用于制作高频电子器件和光电器件。

5.4.3 萤石

超过50%的萤石用于氟化工,氟化工对萤石的利用首先是转化为氟化氢(氢氟酸),作为生产其他含氟化学品的主要原料。其他主要用途包括陶瓷、玻璃、炼钢(助熔剂)、钢铁铸件以及焊条涂层。氢氟酸是炼铝的关键原料。电子级氢氟酸应用于大规模集成电路、薄膜晶体管等刻蚀和清洗工艺,是半导体制程应用最多的化学品之一。氢氟酸还是溶解精制氢氧化铍制取核级金属铍的关键材料。六氟化铀是现行铀浓缩提纯流程气体扩散-离心法的关键材料。六氟化硫被用作电气设备内的绝缘介质。氟化合物最著名的例子莫过于不粘锅上广泛使用的特氟龙(聚四氟乙烯)。当今大约20%的医药产品、30%的农用化合物都含有氟^[72]。在电池领域,改性聚偏氟乙烯是锂离子电池隔膜材料、六氟磷酸锂是锂离子电池电解液的主要成分。氟橡胶用作航空发动机、导弹和飞船燃料系统等密封材料,二氟化镁用作导弹红外跟踪器窗口材料和宇宙飞船紫外光学仪器透镜材料,含氟涂料作为雷达表面涂层、舰船防腐涂料等。氟气用于氟原子激光器已经实用化,聚偏氟乙烯作为压电材料已经在海底侦测网络、声纳等方面得到应用。

5.4.4 硼

制作玻璃和陶瓷是硼的主要用途,磨料、清洁剂、杀虫剂、隔热绝缘材料等也是重要应用领域。硼有两种稳定同位素¹⁰B和¹¹B,富含¹⁰B的材料是中子吸收剂,应用于核电领域。硼作为半导体掺杂剂用于

制作 p 型半导体,由于¹⁰B的中子吸收截面小,用作半导体掺杂剂可有效提升电子设备的抗辐射、抗干扰能力。高纯度硼粉(99%)用于固体火箭含硼富燃料推进剂,硼化物用作空间核反应堆控制棒和飞行器鼻锥、机翼前缘、发动机涡轮风扇等超高温部件材料。二硼化镁超导材料在核磁共振、磁悬浮列车、高效电力传输等方面有应用前景。硼还是钕铁硼永磁材料的成分。

5.5 特种气体矿产-氦气

物理学家、医生和核工程师们依靠液氦进行原子撞击实验,进行核磁共振,并冷却核反应堆到适当的低温。其中核磁共振是氦气最大应用领域。除了作为物理、医学和核能应用的低温剂起到辅助作用外,电弧焊工用作惰性防护罩,火箭科学家用来加压燃料箱,深海潜水员使用它与氧气混合以防止在长时间潜水期间遭受氮麻醉。氦氖激光器广泛用于产生可见波长相干光,1978年第一个商用光盘存储介质使用氦氖激光来读取信息。最近,科学家已经证明氦离子束可用于纳米电子和纳米光子器件的制造和成像。氦也可以与其他元素结合形成受激分子,由氦和另一个元素(例如碘、钨或硫)组成的受激分子在高压和电刺激条件下形成,它们最常用于制造用于半导体加工和眼科手术等的激光器^[73]。在半导体工业中,高纯氦气用作生长硅和锗晶体的保护气。氦气还被用作光纤生产冷却气体。

6 关键矿产全球格局分述

6.1 大宗矿产

6.1.1 铁

2020年全球铁矿产量(铁精粉)24.7亿t,产量超过1亿t的有澳大利亚9.12亿t、巴西3.88亿t、中国3.6亿t、印度2.04亿t、俄罗斯1亿t,五国合计占全球产量的80%。全球铁矿资源充足,但分布极不均匀。2021年全球铁矿储量(含铁量)850亿t,超过百亿吨的国家有澳大利亚250亿t、巴西150亿t、俄罗斯140亿t,三国合计占全球储量的64%^[74]。

目前有工业开采意义的铁矿床主要有(BIF)沉积变质型、矽卡岩型、岩浆型、火山岩型、沉积型等成因类型。其中(BIF)沉积变质型铁矿床及其氧化矿床占全球储量的60%~70%,占全球富铁矿储量的70%以上,占全球铁矿产量的90%以上。沉积变质型铁矿亦是中国主要的铁矿类型,储量占一半以上,但矿石品位低、伴生组分多,绝大多数需经复杂的选矿工艺处理才能入炉。中国四川攀西地区与基性层状岩体有关的岩浆型钒钛磁铁矿分布区是全球最大的钒钛磁铁矿集中区,对世界钒、钛资源格局具有重要意义。

全球有50多个国家生产铁矿石,对世界格局影响大的国家主要有澳大利亚、巴西、印度和南非。澳大利亚赤铁矿粉具有较好的烧结性能,是亚洲钢铁厂烧结匀矿配料的主要矿种;褐铁矿绝大多数含磷低,部分矿石由于 $Al(OH)_3$ 含量较低,大量使用后不仅可以降低成本而且可降低高炉渣量,目前被日本钢铁厂和中国宝钢等企业大量使用。巴西铁矿石具有品位高、铝含量低、有害杂质少、烧结性能好等特点,加之巴西港口条件好,被世界各国钢铁厂普遍使用。欧洲离巴西近,运费低,是巴西铁矿出口的主要市场。印度矿因具有较好品质和运距优势,受到亚洲钢铁厂的普遍欢迎。南非块矿是非常好的高炉直接入炉原料,粉矿则适合在寒冷地区使用。但南非铁矿石钾、钠等碱金属含量高,长期使用对高炉寿命不利。南非块矿主要出口欧洲市场,粉矿则主要供应中国中、小型钢铁厂^[75]。

全球铁矿石贸易已基本形成由澳大利亚、巴西、南非等向中国、日本、韩国及东盟等出口的局面。铁矿供应高度集中于澳大利亚、巴西两个国家,其出口量约占全球3/4;高度集中于淡水河谷、必和必拓、力拓和FMG四大公司,其出口量约占全球2/3。2020年中国进口铁矿11.7亿t,来自澳大利亚、巴西的进口量分别占总进口量的60%、20%以上。按2020年数据,中国铁矿进口比例为76%。

6.1.2 锰

2020年全球锰矿产量1890万t,其中产量超过百万吨的国家有南非650万t、澳大利亚333万t、加蓬331万t、中国134万t,四国合计占全球产量的76%。2021年全球锰矿储量15亿t,其中储量超过亿吨的国家有南非6.4亿t、澳大利亚2.7亿t、巴西2.7亿t、乌克兰1.4亿t,四国合计占全球储量的88%^[74]。乌克兰锰矿品位低且含磷高。加蓬锰矿储量虽不足1亿t(6100万t),但矿石品位高,对全球锰矿供应具有较大意义。

锰矿床的类型主要有沉积型、火山沉积型、沉积变质型、热液型、风化型和海底结核-结壳型等。世界高品位锰矿(含锰35%以上)资源主要分布在南非、澳大利亚、加蓬和巴西等。南非锰矿是冶金级优质富锰矿石,在南非东北部以生产化学级锰矿石为主。澳大利亚是世界主要的高品级锰矿石生产国和出口国。加蓬是世界著名的富锰矿石和电池级锰矿石产地和出口国。巴西锰矿资源分布广泛,产出高品级的电池级锰矿石^[76]。中国锰矿资源表现出“小、贫、杂、细”的特点,开采条件复杂,选冶困难。近年贵州东北部发现的埋深超过1000m的沉积型碳酸锰矿床规模大,品位高于目前国内开采锰矿石品位,科学利用有可能改变中国锰矿供需格局。

2020 年中国锰矿石消费量为 4 206 万 t, 其中国内生产锰矿石 1 031 万 t, 进口 3 166 万 t。锰矿进口主要来自南非 1 370 万 t、澳大利亚 535 万 t、加蓬 474 万 t、巴西 280 万 t、加纳 187 万 t、科特迪瓦 117 万 t、马来西亚 86 万 t、缅甸 56 万 t。按矿石量计算 2020 年中国锰矿对外依存度为 75%。因国内锰矿石品位低, 按金属量计算 2020 年中国锰矿对外依存度超过 90%^[77]。

6.1.3 铜

2020 年全球矿山铜产量 2 060 万 t, 产量超过百万吨的国家有智利 573 万 t、秘鲁 215 万 t、中国 172 万 t、刚果(金) 160 万 t、美国 120 万 t, 五国合计占全球产量的 60%; 精炼铜产量 2 530 万 t, 产量超过百万吨的国家有中国 1 000 万 t、智利 233 万 t、日本 158 万 t、刚果(金) 135 万 t、俄罗斯 104 万 t, 五国合计占全球产量的 64%。2021 年全球铜储量 8.8 亿 t, 储量超 5 000 万 t 的国家有智利 2 亿 t、澳大利亚 9 300 万 t、秘鲁 7 700 万 t、俄罗斯 6 200 万 t、墨西哥 5 300 万 t, 五国合计占全球储量的 55%^[74]。

世界上铜矿主要类型有斑岩型、沉积岩型层状、岩浆硫化物型、火山块状硫化物型、铁氧化物铜-金型、矽卡岩型等, 分别占世界总资源储量的 69.0%、11.8%、5.1%、4.9%、4.7%、2.2%, 合计为 97.7%^[78]。斑岩型铜矿是世界最重要的铜矿资源, 伴生的金、钼或锌也具有较大经济价值。超大型(500 万 t 以上)斑岩铜矿集中分布于环太平洋成矿域(智利、秘鲁、美国、巴拿马、印度尼西亚、菲律宾、巴布亚新几内亚等)、特提斯—喜马拉雅成矿域(中国、巴基斯坦等)和古亚洲成矿域(蒙古、哈萨克斯坦等), 环太平洋成矿域尤以南美安第斯成矿带集中分布。主要产于中非成矿区(刚果(金)、赞比亚等)的沉积岩型层状铜矿床具有十分重大的经济价值, 也是钴的主要来源。此类铜矿亦产于俄罗斯、波兰、阿富汗、哈萨克斯坦、智利、澳大利亚等国。岩浆硫化物典型矿床有俄罗斯诺里尔斯克—塔尔纳赫镍铜矿、美国德卢斯铜镍矿、加拿大肖得贝里镍-铜-铂族元素矿床以及中国甘肃金川铜镍矿等, 火山块状硫化物典型矿床有葡萄牙的内维升—科尔沃锌铜矿床等, 铁氧化物铜-金典型矿床有澳大利亚奥林匹克坝铜-铀-金-稀土-铁矿床等, 矽卡岩型典型矿床有美国南瓜谷铜矿和中国安徽铜陵冬瓜山铜矿等。

全世界有 50 多个国家开采铜矿。除了产量超百万吨的 5 个国家, 澳大利亚、赞比亚、俄罗斯、墨西哥、加拿大、哈萨克斯坦、印度尼西亚、波兰等也都是重要的铜生产国, 以上 13 个国家产量占全球的 86.2%。智利国家铜业、瑞士嘉能可、澳大利亚必和必拓、美国自由港—麦克莫兰、美国南方铜业、加拿大第一量子矿业、波兰铜业集团、英国力拓、智利安托法加斯塔、英国英美资源等 10 大公司 2020 年铜产量占全球

的 45%。

铜精矿主要出口国有智利、美国、印尼、加拿大、巴西、澳大利亚等; 主要进口国是中国、日本、印度、韩国、德国、西班牙、菲律宾、保加利亚、巴西和瑞典等, 这 10 个国家的进口量占全球进口量的 80% 以上。精炼铜主要出口国有智利、赞比亚、印度、秘鲁、日本、澳大利亚、俄罗斯、波兰等, 进口国主要有中国、德国、美国、意大利等。全球铜材贸易的主要国家有美国、英国、法国、德国、意大利、日本和中国, 德国和日本是净出口国, 美国和中国是净进口国。

目前中国已成为全球最大铜生产国和进口国。智利、秘鲁、蒙古、墨西哥和澳大利亚是中国铜精矿主要进口来源, 智利、印度、哈萨克斯坦、日本和秘鲁是中国精炼铜主要进口来源, 赞比亚和智利是中国阳极铜主要进口来源^[79]。2020 年中国精炼铜产量 1 003 万 t, 其中国内矿山铜产量 172 万 t、废杂铜利用约 50 万 t, 计算铜精矿对外依存度 78%; 精炼铜表观消费量约 1 190 万 t, 计算铜金属对外依存度为 82%。

6.1.4 铝(铝土矿)

2020 年, 全球铝土矿产量 3.91 亿 t, 超过 2 000 万 t 的国家有澳大利亚 1.04 亿 t、中国 9 270 万 t、几内亚 8 600 万 t、巴西 3 100 万 t、印度尼西亚 2 080 万 t、印度 2 020 万 t, 六国产量占全球产量的 90.7%。全球原铝产量 6 510 万 t, 其中中国产量 3 710 万 t, 占比 57%。俄罗斯、印度、加拿大、阿拉伯联合酋长国以及澳大利亚、巴林、挪威、美国、冰岛等也都是重要的铝生产国。2021 年全球铝土矿储量 320 亿 t, 20 亿 t 以上的国家有几内亚 74 亿 t、越南 58 亿 t、澳大利亚 53 亿 t、巴西 27 亿 t、牙买加 20 亿 t, 五国合计占全球的 72.5%^[74]。

世界铝土矿主要有红土型和岩溶型两大类, 红土型占 90%, 岩溶型约占 10%。红土型主要含铝矿物为三水铝石, 岩溶型主要含铝矿物为一水硬铝石和一水软铝石。非洲西部红土型铝土矿是世界铝土矿主要来源之一, 铝土矿资源较为丰富的国家包括几内亚、喀麦隆、加纳等。南美洲北部红土型铝土矿主要分布于巴西、圭亚那、苏里南和委内瑞拉等国。印度也是红土型铝土矿重要资源国。东南亚红土型铝土矿主要分布在越南和印度尼西亚。澳大利亚铝土矿资源亦为红土型, 昆士兰北部和西澳达令山脉是两处世界上最大的已探明可开发的铝土矿集中区。欧洲及地中海国家希腊、土耳其、意大利、葡萄牙、西班牙、法国、匈牙利、克罗地亚、波黑等广泛发育岩溶型铝土矿。加勒比海地区牙买加岩溶型铝土矿在全球铝土矿供需格局中占有重要地位。伊朗也是重要的岩溶型铝土矿资源国。中国的铝土矿资源 90% 以上为岩

溶型^[80]。

全球铝土矿海运量从2012年的7 600万t增长到2019年1.39亿t,出口国以几内亚、澳大利亚、印度尼西亚为主,进口国以中国、欧洲、北美为主。2019年,几内亚(6 628万t)、澳大利亚(3 700万t)、印度尼西亚(1 400万t)、巴西(711万t)四国占全球出口量的89%,中国(10 051万t)、欧洲(1 932万t)、北美(739万t)占全球进口量的91%。当前,中国、欧洲和北美仍然是全球铝土矿需求的中心。几内亚铝土矿主要出口到中国 and 欧洲,澳大利亚、印尼和马来西亚铝土矿的95%以上都出口到中国,巴西、牙买加铝土矿主要出口到美国、欧洲^[81]。铝土矿生产集中度高,2019年前三家企业(力拓、美铝、赢联盟)产量占全球的41%。2019年中国国内铝土矿产量6 840万t,按实物量估算对外依存度60%。

6.1.5 钾盐

2020年,全球钾盐产量4 400万t,加拿大(1 380万t)、俄罗斯(811万t)、白俄罗斯(740万t)、中国(600万t)四国合计占全球产量的80%。2021年全球钾盐储量超过35亿t,加拿大(11亿t)、白俄罗斯(7.5亿t)、俄罗斯(4亿t)、中国(3.5亿t)、美国(2.2亿t)五国合计占全球的80%。此外,以色列和约旦从死海提取钾盐,包含约20亿t氯化钾^[74]。

钾盐资源分为两种类型,一种是以固体钾矿石形式存在,如钾石盐矿床、光卤石矿床和钾长石矿床;另一种是以含钾的卤水形式存在,包括硫酸盐型、氯化物型和硝酸盐型等含钾卤水。固体钾矿占比在85%左右,卤水钾盐占比在15%左右。固体钾矿资源集中分布在加拿大、俄罗斯、白俄罗斯、泰国、老挝、欧洲等地区,矿床类型以海相成因为主,主要矿石为钾石盐和光卤石。美国含钾卤水为硫酸盐型,以色列与约旦为氯化物型,智利为硝酸盐型。中国察尔汗和罗布泊均为氯化物型。加拿大萨斯卡彻温盆地、俄罗斯乌拉尔边缘的上卡姆盆地和白俄罗斯涅帕盆地呵斯塔罗宾三大钾矿探明储量占全球总量的71%。钾盐生产高度集中,加拿大Nutrien、俄罗斯Uralkali、白俄罗斯Belarusk Ali、加拿大Mosaic、中国盐湖股份、德国K+S、以色列ICL、约旦Arab Potash、中国藏格钾肥和国投罗钾等十家公司产量占全球的90%^[82]。

中国、美国、印度和巴西是世界主要的钾肥消费国,约占世界总量的70%;因自身钾资源分布少,均需大量进口钾肥。加拿大、俄罗斯和白俄罗斯等主要钾盐生产国自身消费量少,其生产量的约3/4用于出口。2019年中国钾肥总产量966万t(实物量,下同),进口量921万t,自给率超过50%。主要进口来源国为加拿大(325万t)、俄罗斯(217万t)、白俄罗斯(187万t)、以色列(88万t)、约旦(68万t)、老挝(20万t)^[83]。

6.2 “三稀”金属矿产

6.2.1 稀土

2020年全球稀土矿产量(稀土氧化物,下同)24万t,其中中国产量14万t,占58%。其他产量较大的国家还有美国3.9万t、缅甸3.1万t、澳大利亚2.1万t。以上四国占全球产量的96%。2021年全球储量1.2亿t,其中中国4 400万t、越南2 200万t、俄罗斯和巴西各2 100万t,以上四国合计占全球的90%。其他储量较多的国家地区还有印度690万t、澳大利亚400万t、美国180万t、格陵兰150万t^[74]。

自20世纪90年代末以来,中国平均提供了全球90%以上的稀土供应。“中国的稀土材料、器件以及节能灯、微特电机、镍氢电池等终端产品,满足了世界各国特别是发达国家高技术产业发展的需求”(中华人民共和国国务院新闻办公室,中国的稀土状况与政策,2012年6月)。中国稀土资源经过多年高强度开发,储量减少,尤其是中重稀土储量减少,中国稀土资源优势逐渐减弱。近年来世界各国对稀土矿产勘查开发逐渐重视。据不完全统计,有37个国家的261家公司开发了共计429个稀土项目,新启动了8~10万t稀土矿山产能^[84]。2021年,美国加州芒廷帕斯的氟碳铈矿和美国东南部的独居石矿都被开采。中国也不再是全球稀土冶炼分离产品唯一来源。澳大利亚莱纳斯公司是中国以外最大的稀土冶炼分离产品供应商,产量约占全球10%。澳大利亚莱纳斯公司与美国蓝线公司计划合资在美国建立稀土分离生产线,由莱纳斯公司每年提供1 200 t原料。美国MP Materials公司位于德克萨斯州沃斯堡的首个稀土金属、合金和磁体制造工厂已经开工建设,建成后拥有每年生产约1 000 t钕铁硼磁体的能力以及规模扩展空间。美国国防部已授予MP Materials资金用于在加州芒廷帕斯稀土材料生产厂精炼和分离重稀土元素。澳大利亚Peak Resources Limited计划在英国蒂斯谷(Tees Valley)建设稀土分离厂,加工坦桑尼亚Ngualla项目生产的稀土矿。据美联社2022年8月23日报道,总部设在加拿大多伦多的稀土加工企业新性能材料公司购买了在格陵兰岛的采矿权,计划开采格陵兰岛西南部的萨尔法托克矿,并将矿石运往该公司位于爱沙尼亚的工厂。

2008—2018年,中国稀土矿进口额增长了20倍,永磁类产品出口额增长了1倍,稀土金属、混合稀土及钛合金类出口在2011年前后大幅增长后逐渐趋于稳定。上游产品稀土矿的进口主要源自澳大利亚、智利、缅甸、伊朗等国,而面向日本、韩国、丹麦及美国出口。中游产品稀土金属及合成物的进口主要源自马来西亚,美国、日本既是进口来源国也是主要出口

市场。下游稀土永磁产品的进口主要源自日本和菲律宾,出口则较为分散,面向美、欧、日及“一带一路”沿线国家^[85]。中国虽进口部分稀土原矿,但稀土金属及合成物、稀土永磁等产品大量出口,属于稀土净出口国,出口比例约为40%。当前,中国并非在稀土领域占据绝对优势。尽管是第一稀土产品出口国,但高端材料(高性能钕铁硼永磁材料、高纯稀土金属等)及其应用技术与日、美等发达国家仍有差距。中国目前仍然只是稀土产业大国而非稀土产业强国。不断提高中国稀土生产开发的技术水平,才能真正保持并强化中国的稀土优势地位。

6.2.2 锂

2020年,全球生产锂矿产品(锂含量)8.25万t,澳大利亚(3.97万t)、智利(2.15万t)、中国(1.33万t)三国产量占90%。阿根廷(0.59万t)和巴西(0.14万t)也是重要的锂矿生产国。2021年全球锂矿储量2200万t,智利(920万t)、澳大利亚(570万t)、阿根廷(220万t)、中国(150万t)四国储量占84%。美国(75万t)和津巴布韦(22万t)也是重要的锂矿资源国^[74]。

锂矿常以两种形式产出,一种是矿物形式产于花岗伟晶岩、花岗岩、云英岩及沉积岩等的硬岩型锂矿,一种是以离子形式产于盐湖、地下卤水及油气田水等的卤水型型锂矿。世界主要锂矿集中区包括:加拿大魁北克省魁北克及其北部杰姆斯湾伟晶岩型锂矿和沃巴赤伟晶岩型锂矿,美国北卡罗来纳州克利夫兰金斯山伟晶岩型锂矿、内华达州金斯谷沉积型锂矿和银峰盐湖型锂矿;玻利维亚波托西省乌尤尼盐湖型锂矿,智利安托法加斯塔省阿塔卡玛盐湖型锂矿、力拓奥盐湖型锂矿和Nx—Uno盐湖型锂矿,阿根廷萨尔塔省翁布雷穆埃尔托盐湖型锂矿、Jujuy省高查理—奥拉罗斯盐湖型锂矿、卡塔马卡省维达盐湖型锂矿。津巴布韦维多利亚堡比基塔伟晶岩型锂矿、卡马蒂维伟晶岩型锂矿,刚果(金)加丹加省马诺诺—基托托洛伟晶岩型锂矿;澳大利亚耶尔岗地区格林布什伟晶岩型锂矿和芒特麦里翁伟晶岩型锂矿、帕冈谷瑞伟晶岩型锂矿;塞尔维亚贝尔格莱德雅达沉积型锂矿,捷克波西米亚高原锡诺维克伟晶岩型锂矿,奥地利沃尔夫斯贝格伟晶岩型锂矿;阿富汗乌鲁兹甘省塔格豪罗伟晶岩型锂矿,中国青海察尔汗盐湖型锂矿、川西甲基卡伟晶岩型锂矿^[86]。

中国、日本、韩国是全球锂资源主要消费国,中国更是第一大进口国。2017年以来,中国锂辉石精矿和锂盐产品进口均呈现增长态势,对外依存度超过70%。2020年中国锂辉石精矿进口量约为145万t,澳大利亚是主要进口来源国。2020年中国碳酸锂进口量5.01万t,智利和阿根廷是主要进口来源(占比达到

99.74%);出口量7488t,90%出口至韩国和日本。全球90%的氢氧化锂产能集中在中国,中国氢氧化锂以出口为主,2020年出口量5.7万t,95%出口至日韩。2020年韩国碳酸锂进口总量3.12万t,87%来自智利、11%来自中国;进口氢氧化锂3.62万t,79%来自中国、15%来自智利、5%来自俄罗斯。2020年日本进口碳酸锂1.77万t,75%来自智利、13%来自中国、11%来自阿根廷;进口氢氧化锂3.25万t,80%来自中国,16%来自美国^[87]。作为当前全球最大的电动汽车生产商,特斯拉正在加大对上游原材料的掌控力度。2022年3月份,澳大利亚锂矿商Core Lithium宣布与特斯拉达成供应协议,从2023年开始将在4年内向特斯拉供应11万t的锂辉石精矿。此前特斯拉则与另一家澳大利亚锂生产商Liontown Resource签署了一项5年供货协议,特斯拉将从2024年开始向其采购锂辉石精矿合计约70万t。此外,特斯拉还与澳洲锂矿企业Kidman和Piedmont Lithium签署了锂精矿供货协议,并与中国企业赣锋锂业签署了一份为期3年的电池级氢氧化锂采购合同。

6.2.3 铍

2020年全球铍矿产量250t,美国(165t)和中国(70t)两国占94%。全球铍矿储量数据目前不可获得,资源量估计大于10万t,60%分布在美国^[74]。

目前可利用的含铍矿物主要是羟硅铍石和绿柱石两种。美国分布有世界上最丰富的羟硅铍石型铍矿。巴西和印度盛产花岗伟晶岩绿柱石型铍矿。俄罗斯铍矿多为花岗伟晶岩型或绿柱石—云母交代型。美国不仅是铍资源大国,而且是全球铍资源利用历史最悠久的国家,对世界铍矿产业具有重大影响。美国拉什-威尔曼公司生产的铍足以满足西方国家的需要。美国既是铍产品的主要出口国,也是铍原料的进口国。发展中国家的铍资源(绿柱石)流向美国,美国向世界发达国家提供铍的半成品和精加工产品。美国只向特定国家出口纯金属铍。

中国仅有的两家铍矿生产厂家主要掌握的是绿柱石型铍矿选矿和冶炼技术,对羟硅铍石型铍矿选矿和冶炼技术掌握较少。因而中国新疆白杨河铍矿暂时未能开发利用。目前中国铍矿产品年需求量在150t上下,进口比例大于50%。中国主要进口来源国有哈萨克斯坦、马达加斯加、埃塞俄比亚、美国、挪威等。当前非洲的供应基地还未成熟,中国企业也未与国际大型铍矿山企业签订长期供货合同,铍矿物原料供应稳定性没有保障^[88]。

6.2.4 铌、钽

2020年全球铌矿产量6.77万t,其中巴西5.98万t,加拿大0.65万t,其他国家0.14万t。2021年全球铌矿

储量大于1 700万t,其中巴西1 600万t,加拿大160万t,美国17万t。2020年全球钽矿产量(金属量)2 100 t,其中刚果(金)780 t,巴西470 t,尼日利亚260 t,卢旺达254 t,四国合计占84%。中国生产了74 t。全球钽矿资源丰富,澳大利亚钽矿储量达9.4万t,巴西4万t。美国5.5万t的资源储量在2021年被认为不经济^[74]。

碳酸岩型烧绿石矿是铌矿最主要类型,巴西和加拿大均以此类矿床为主。碱性伟晶岩是另一类与铌成矿有关的岩石,同时伴生重稀土矿。全球钽资源主要产自与过铝质花岗岩和花岗伟晶岩有关的矿床。烧绿石型碳酸岩风化后可进一步富集形成品位高的大型甚至超大型铌矿,如巴西的Morro dos Seis Lagos以及刚果(金)的Lueshe。非洲的钽矿也以花岗伟晶岩风化后次生成矿为主(钽矿物主要是钽铁矿、细晶石等)。中国花岗伟晶岩型铌钽矿床以新疆可可托海、福建南平为代表,但它们均处于闭坑状态。近几年陆续发现的湖南仁里、四川甲基卡、新疆大红柳滩等锂-铌-钽型伟晶岩提供了新的重要铌钽(特别是钽)资源来源。中国白云鄂博铁-铌-稀土矿床伴生铌预计可达660万t(以 Nb_2O_5 计),是中国最应该重视的铌资源^[89]。

中国每年生产钽铌精矿仅数百吨,远远不能满足需求。在2006年以后铌对外依存度高达99%,进口主要来源于巴西(87%)、加拿大(3%)和尼日利亚等非洲国家(9%)。中国钽矿在2017年对外依存度上升到84%,主要从非洲直接开采或进口钽铌精矿到国内再进行加工,主要进口来源国是尼日利亚、卢旺达和刚果(金)。目前中国钽铌矿还未形成持续稳定的供货渠道,由于下游消费电子技术不足,中国目前生产的钽金属多数直接出口发达国家特别是美国,美国进口的钽金属占到全世界钽生产的30%以上,其中大约1/4来自中国^[90]。

6.2.5 铯

2020年全球铯产量(铯含量)估计为35万t,产自西班牙(15万t)、伊朗(9万t)、中国(8万t)、墨西哥(3.35万t)以及阿根廷(700t)。全球铯资源估计超过10亿t,但大部分国家铯储量数据不可获得^[74]。

全球范围内铯矿资源短缺或枯竭的可能性很低。但优质资源(天青石原矿品位在80%以上,且伴生的钡、钙等含量相对较低)集中分布在墨西哥、西班牙、伊朗、土耳其等少数几个国家。美国广泛分布铯矿产地,但自1959年起就停止了铯矿开采,2006年起更是停止了碳酸铯的国内生产。美国主要从墨西哥和德国进口天青石矿和铯化合物满足其需求。中国铯资源品位低、杂质含量高。由于国内天青石禀赋较差,中国是天青石的主要进口国之一,2008年前主要从西班牙进口,2011年起主要从伊朗进口。同时,中国是

碳酸铯净出口国,主要出口到日本、伊朗、越南、俄罗斯等国^[91]。2020年,中国铯矿产品产量占全球23%,进出口基本平衡。鉴于铯铁氧体在汽车、家电、计算机等领域的应用越来越广,且在吸波材料领域的应用越来越重要,铯矿资源保障需提早谋划。

6.2.6 铷、铯

锂云母和铯榴石是两种主要含铷矿物,分别含3.5%和1.5%的氧化铷。铯榴石是铯的主要矿石矿物,大部分铯榴石含5%~32%的氧化铯。2021年铷、铯产量全球没有公开报道,但是认为主要在中国生产。纳米比亚、加拿大、津巴布韦、澳大利亚等国在过去20年里陆续停止了铷、铯生产。近期报道显示,按照当前位于德国的全球主要铷化合物加工厂的加工速度,中国之外全世界铷矿石存量将于2022年耗尽。按照当前位于德国的唯一中间精炼厂加工速度,中国之外全世界铯矿石存量也将在几年内耗尽^[74]。

纳米比亚卡里比布花岗伟晶岩带估算了890万t资源量(矿石量),含0.23%的铷和 303×10^{-6} 的铯;估算了672万t储量(矿石量),含2.26%的铷和 320×10^{-6} 的铯。卡里比布工程开发2021年在继续推进,主要产品将是锂、铯、钾、铷是潜在的副产品^[74]。

含铷的矿物资源全球存在,重要的含铷花岗伟晶岩已经在阿富汗、澳大利亚、加拿大、中国、丹麦、德国、日本、哈萨克斯坦、纳米比亚、秘鲁、俄罗斯、英国、美国和赞比亚发现。在智利北部、中国的卤水中以及在美国(新墨西哥州和犹他州)、法国和德国的蒸发盐中也发现了少量的铷。全球范围内铯与含锂的伟晶岩伴生,已经在澳大利亚、加拿大、美国、津巴布韦发现。在美国,铯榴石产于阿拉斯加、迈阿密、南达科他州。较低品位的铯出现在智利和中国的卤水以及德国、印度和中国的地热系统。中国被认为产出富铯的硅华、锂云母和铯榴石矿床,品位最高者在江西省宜春市^[74]。

全球铷、铯消费量较小。近十年来美国平均每年仅消费2t铷、数吨铯化学品。德国、日本、加拿大、中国也是重要消费国,消费量每年也只有数吨水平。

6.2.7 锆、铪

锆的主要来源是锆石,铪是锆石(和斜锆石)加工的副产品。锆石中锆和铪的质量比值约为36:1。2020年全球锆矿及其精矿产量(实物量)120万t,主要产自澳大利亚(40万t)、南非(28万t)、中国(14万t)和莫桑比克(11万t),四国合计占77%。美国生产了3万t。2021年全球锆矿储量(ZrO_2 当量)7 000万t,其中澳大利亚5 000万t、南非590万t、莫桑比克180万t,三国合计占全球的82%。美国和中国储量各为50万t^[74]。

美国约 1 400 万 t 锆石资源与重矿物砂矿中的钛资源共生, 磷酸盐岩和砂砾石矿床作为副产品潜在产出巨量锆石。俄罗斯科拉半岛的 Kovdor 斜锆石矿是较著名的碳酸岩型锆矿床。全球极少有内生火成岩型锆矿可供经济开采, 太平洋、大西洋和印度洋海岸带分布的一系列滨海锆砂矿是目前最经济的锆资源, 目前集中产自澳大利亚东海岸与西南海岸的 Murray、Perth 和 Eucla 三大盆地以及南非东海岸的 Kwazulu-Natal 等省。碱性花岗岩型锆矿床是重要的锆资源类型, 内蒙古巴尔哲碱性花岗岩是中国最典型的铈-锆-稀土成矿花岗岩, 锆石是主要的锆资源赋存矿物。中国伟晶岩型锆矿床规模小, 主要分布于江西和新疆。碱性伟晶岩中锆资源值得重视。目前中国可供开采的锆资源主要来源于外生矿床, 分为滨海沉积型、河流冲积型和风化壳与残坡积型三类, 其中滨海沉积型锆资源占绝对优势^[89]。

全球锆的消费主要集中在美国、中国、日本和欧盟等地, 中国是第一锆资源消费国。据海关信息网数据, 2021 年中国锆矿砂及其精矿净进口 127 万 t, 锆的氯化物及氢氧基氯化物净出口 5.6 万 t, 硅酸锆净出口 2.1 万 t, 未锻压锆及粉末净出口 65 t, 锻压锆及锆制品净进口 190 t。以锆矿砂及其精矿计算, 进口比例为 90%。主要进口来源包括澳大利亚(55%)、南非(15%)、莫桑比克(6%)、塞拉利昂(4%)。

6.2.8 镓

2020 年全球原生镓产量 327 t, 其中中国生产 317 t, 占 97%; 俄罗斯、日本、韩国产量分别为 5 t、3 t、2 t。中国、日本、斯洛伐克和美国是已知的高纯精炼镓的主要生产者。匈牙利和乌克兰被认为分别于 2015 年和 2019 年停止了原生镓生产。英国于 2018 年停止了高纯精炼镓生产。德国原预计于 2021 年底重启原生镓生产。加拿大、中国、德国、日本、斯洛伐克和美国从锌废料中回收镓^[74]。

铝土矿中平均镓含量为 50×10^{-6} 。全球铝土矿中的镓含量估计超过 100 万 t。另有大量镓可能赋存于锌资源, 但潜在可回收的镓不到 10%。目前全球 90% 的镓源自炼铝副产品。中国是氧化铝生产大国, 也是镓生产大国。据美国地质调查局数据(2011—2022 年 Mineral Commodity Summaries), 2010—2021 年美国进口砷化镓晶圆、金属镓总计折合金属镓 3 880 t, 接近同期全球原生镓产量总和(4 125 t)。可以看出, 中国原生镓出口比例接近 100%。

6.2.9 锗

2020 年全球精炼锗产量 140 t, 其中中国 95 t, 占 67%; 俄罗斯生产 5 t, 其他国家生产 40 t。2021 年, 美国阿拉斯加生产含锗的锌精矿, 然后出口到加拿大的

精炼厂加工和回收锗^[74]。

可用的锗资源与某些锌矿石和铅锌铜硫化物矿石共生。全球范围为, 锌精矿赋存的锗至少 3% 得到回收。另外, 大量的锗赋存在某些类型燃煤发电产生的煤灰中。2021 年中国是最大锗出口国, 1—9 月出口未锻压锗、锗粉和废旧锗废料 27.8 t, 同比增长 24%。几乎全部产品出口到俄罗斯、德国、比利时、日本和美国。根据美国地质调查局数据(2011—2022 年 Mineral Commodity Summaries), 2010—2021 年全球生产锗矿产品折合锗金属 1 638 t, 中国生产了其中的 1 090 t, 占 66%; 同期美国进口锗矿产品 333 t, 占全球产量的 20%。按 2021 年中国生产锗矿产品 95 t, 锗金属出口 37 t(按前 9 个月出口量推算), 出口比例为 39%。如考虑氧化锗出口, 则出口比例更高。

6.2.10 铟

铟最通常是从硫化锌矿石矿物闪锌矿中回收, 这些锌矿床回收铟的含量从不足 10^{-6} 到 10^{-4} 。2020 年全球精炼铟产量 960 t, 其中中国产量 540 t, 占 56%; 韩国产量 210 t, 占 21%^[74]。

全球铟消费的 80% 为氧化铟锡靶材, 10% 为半导体化合物, 10% 为焊料及合金、光伏薄膜及其他领域。日本是全球最大的铟消费国, 其消费量约占全球的 50%。韩国近年来氧化铟锡靶材生产发展迅猛, 凭借其价格优势不断与日本争夺市场, 成为继日本之后的第二大铟消费国。美国铟消费量位居全球第三。中国是铟生产大国, 但不是消费大国。2010—2021 年, 中国平均年生产精炼铟约 380 t, 年消费约 150 t, 出口比例约 60%。

6.2.11 铊

铊主要从铜矿伴生辉钼矿中回收。2020 年全球矿山铊产量 59.3 t, 其中智利产量 30 t, 占 50.5%。其他重要生产国包括波兰(9.5 t)、美国(8.83 t)、乌兹别克斯坦(4.9 t)、韩国(2.8 t)、中国(2.5 t)。大部分铊在斑岩铜矿中与钼共生。亚美尼亚、哈萨克斯坦、波兰、俄罗斯、乌兹别克斯坦的沉积矿床中, 铊与铜矿物共生。全球铊储量很大, 2021 年智利铊储量 1 300 t, 美国 400 t, 俄罗斯 310 t, 哈萨克斯坦 190 t, 亚美尼亚 95 t^[74]。

美国是世界最大的铊消费国, 消费量约占世界的 70%~75%; 西欧和中国各占 8%~10%; 俄罗斯占 5%~6%; 日本占 2%~3%; 其他地区不足 2%。近年来, 中国的铊消费量每年约 8 t, 其中催化剂消费约 5 t, 高温合金消费约 1 t, 其他消费约 2 t。中国需要从国外进口铊金属、铊化合物或含铊钼精矿, 估算进口比例在 50% 以上^[92]。预期中国未来航空业会迅速发展, 对铊的需求将随之增长。中国的一些斑岩铜(钼)矿中辉钼矿可能含有数百吨铊资源, 是国内的保障基础。另

一方面,也要积极寻找海外长期稳定的合作伙伴,打破美国对铌市场的垄断。

6.2.12 碲

2020年全球精炼碲产量估计为562 t,其中中国产量330 t,占比58%。其他重要生产国有俄罗斯(71 t)、日本(70 t)、加拿大(44 t)、瑞典(42 t)。2021年全球碲储量3.1万t,其中中国6600 t、美国3500 t,两国合计约占1/3。超过90%的碲从电解铜厂的阳极泥中生产,其余从铅精炼厂产生的浮渣和铋、铜、铅锌矿石冶炼产生的烟尘和气体中提取。潜在的碲资源包括铋碲矿和金碲矿矿石^[74]。

2021年,加拿大的一家公司宣布为其新的超纯碲生产线追加投资。该生产线预期可生产高达7N纯度的碲,用于数字和固态辐射探测器以及其他应用。固态辐射探测器产生高精度成像,应用于医疗健康、安全和军用系统^[74]。

据美国地质调查局数据(2017—2022年 Mineral Commodity Summaries),2016—2021年,全球(不包括美国)生产碲矿产品折合碲金属2952 t,中国生产1810 t,占61%;同期美国净进口502 t,占全球产量17%。假定美国占全球碲进口量的1/3,中国碲出口比例约为30%。值得注意的是,美国碲进口量在2018年达到192 t高值后,2019—2021年大幅下降为59 t、12 t、22 t。

6.3 关键黑色有色贵金属矿产

6.3.1 铬

2020年全球铬矿产量(金属量)3700万t,其中南非1320万t,土耳其800万t,哈萨克斯坦700万t,印度250万t,芬兰229万t,其他国家398万t。2021年全球铬矿储量5.7亿t,其中哈萨克斯坦2.3亿t,南非2亿t,印度1亿t,土耳其2600万t,芬兰1300万t。全球铬资源超过120亿t,95%集中在哈萨克斯坦和南非^[74]。

南非是最大的铬矿生产国。中国是最大的铁铬合金和不锈钢生产国,也是最大铬消费国。中国铬矿资源匮乏,铬矿产品严重依赖进口。自1999年后进口依存度在95%以上,2017年起进口量维持在1000万t以上^[93]。主要进口来源地为南非、哈萨克斯坦和印度等,其中南非占一半以上。

6.3.2 钒

2020年全球钒矿产量10.5万t,其中中国7万t,俄罗斯1.95万t,南非0.86万t,巴西0.66万t。2021年,全球钒矿储量2400万t,其中中国950万t,澳大利亚600万t,俄罗斯500万t,南非350万t^[74]。

钒产于磷酸盐岩、钛磁铁矿、含铀(粉)砂岩等矿床,这些母岩中包含不到2%的钒。大量的钒也出现在铝土矿和煤、原油、油页岩、油砂等含碳物质中。中国以钒钛磁铁矿为原料的主要产区在四川和河北,以石煤为原料的主要产区在陕西、河南、甘肃、湖北和湖南等地。国外大约有20余家钒制品生产企业,除利用钒钛磁铁矿为原料外,也利用废催化剂、石油残渣等含钒废物为原料,或者利用氧化钒生产钒铁^[94]。中国和美国是全球前两大钒消费国家。由于螺纹钢新标的应用和钢筋产量进一步提升,2020年中国钒在钢中消费强度首次超过全球平均值。2018年中国生产钒矿产品(折 V_2O_5)8.86万t,消费及库存4.69万t,出口比例约47%。2020年,中国钒表观消费量(折金属钒)约为76200 t,进出口量在数千吨。从年度数据看,基本属于供需平衡。

6.3.3 钛

2020年全球海绵钛产量23万t,其中中国12.3万t,日本4.9万t,俄罗斯3.1万t,哈萨克斯坦1.5万t。2020年全球钛矿产量(TiO_2 当量)为钛铁矿800万t(其中中国280万t、南非102万t、莫桑比克96万t、加拿大59万t、澳大利亚48万t、乌克兰46万t、挪威44万t)、金红石60万t(其中澳大利亚19万t、塞拉利昂11万t、乌克兰9万t、南非8万t、肯尼亚7万t)。2021年全球钛矿储量为钛铁矿7亿t(其中中国2.3亿t、澳大利亚1.6亿t、印度8500万t、巴西4300万t、挪威3700万t、加拿大3100万t、南非3000万t)、金红石4900万t(其中澳大利亚3100万t、印度740万t、南非650万t、乌克兰250万t)^[74]。

世界钛矿消费90%为钛铁矿。中国是世界最大的钛精矿生产国和消费国。根据海关信息网数据,2021年中国国内钛矿产量(TiO_2 当量)300万t,钛铁矿及其精矿净进口376万t,钛的氧化物和钛白粉净出口119万t,海绵钛净进口1.3万t,其他钛材净出口0.9万t。按照钛精矿含 TiO_2 47.5%折算,估算2021年中国钛矿进口比例约为17%。2021年中国钛矿主要进口国为莫桑比克、澳大利亚、越南和肯尼亚等国,钛白粉主要出口国家为印度、巴西、韩国、土耳其、越南、印度尼西亚、阿联酋、马来西亚、法国和泰国等。值得注意的是,中国高端航空级金属钛的原料90%依赖于从澳大利亚、越南等国进口。

6.3.4 镁

2020年全球镁矿产量(MgO 当量)2700万t,其中中国1900万t,占70%;其他较重要的生产国包括巴西180万t,土耳其147万t,俄罗斯100万t。2020年镁金属冶炼产量100万t,其中中国88万t。可大量提取镁化合物的资源全球广泛分布。镁金属可以从

海水、天然卤水、白云石、蛇纹石及其他矿物中提取。已探明菱镁矿资源和水镁石资源分别为 130 亿 t 和数百万 t。白云石、镁橄榄石和含镁的蒸发岩矿物以及含氧化镁的卤水资源估计共有数十亿吨。海水中可提取氢氧化镁。蛇纹石储量巨大,可作为提取氧化镁的来源。2021 年全球镁矿储量(MgO 当量)72 亿 t,其中俄罗斯 23 亿 t,中国 10 亿 t,其他国家 26 亿 t^[74]。

中国原镁的大规模生产是通过“硅热还原”白云石煅烧氧化镁实现,在美国则使用电解水合氯化镁而得到。中国是全球最大的氧化镁和菱镁矿生产国、消费国和产品出口国,是美国和许多其他国家氧化镁的主要进口来源国。2020 年,中国各类镁金属出口 29 万 t,以镁金属估计出口比例为 48%。2021 年出口达到 47 万 t,出口比例超过 50%。

6.3.5 镍

2020 年全球镍矿产量 251 万 t,其中印度尼西亚 77 万 t,菲律宾 33 万 t,俄罗斯 28 万 t,新喀里多尼亚 20 万 t,澳大利亚 17 万 t,加拿大 16 万 t,中国 12 万 t。已探明的平均含镍大约 0.5% 或更高的陆基资源至少 3 亿 t 镍,60% 为红土矿,40% 为硫化矿。广泛分布的镍资源也在海底锰结核和结核中发现。2021 年,全球镍矿储量超过 9 500 万 t,其中澳大利亚和印度尼西亚各 2 100 万 t,巴西 1 600 万 t,俄罗斯 750 万 t,菲律宾 480 万 t,中国 280 万 t,加拿大 200 万 t^[74]。

2005 年,中国镍消费量超过日本和美国,成为全球第一大消费国。2019 年中国镍消费 130 万 t,生产 12 万 t,如不考虑废钢中含镍,进口比例 90%,主要从印度尼西亚和菲律宾进口。2021 年中国镍消费量达 154 万 t,生产 12 万 t,如不考虑废钢中含镍,进口比例 92%。由于 2020 年印尼出台镍矿石不出口政策,2021 年中国镍矿超过九成从菲律宾进口。

值得注意的是,2022 年 1 月,特斯拉与美国矿商 Talon Metals 签署一份供货合同,将在未来 6 年内向 Talon Metals 位于明尼苏达州的 Tamarack 矿山至少采购 7.5 万 t 镍精矿。除此之外,特斯拉还与法属新喀里多尼亚矿业公司普罗尼资源、澳大利亚矿业巨头必和必拓、巴西淡水河谷、加拿大矿业公司 Giga Metals 等多家矿产公司签署了多份镍精矿供货协议。

6.3.6 钴

2020 年全球矿产钴产量 14.2 万 t,其中刚果(金) 9.8 万 t,俄罗斯 9 000 t,澳大利亚 5 600 t,菲律宾 4 500 t,古巴 3 800 t,加拿大 3 700 t,巴布亚新几内亚 2 900 t,摩洛哥 2 300 t,中国 2 200 t,印度尼西亚 1 100 t,马达加斯加 850 t,美国 600 t,其他国家 7 600 t。刚果占全球产量的 69%。美国已探明钴资源大约 100 万 t,分布在明尼苏达等 10 余州,均为伴生矿。全球已探明陆

地钴资源大约 2 500 万 t,绝大部分产于刚果(金)和赞比亚的沉积岩容矿的层状矿床,澳大利亚及附近岛屿国家和古巴的红土镍矿,澳大利亚、加拿大、俄罗斯和美国的基性—超基性岩浆铜镍硫化物矿床。超过 1.2 亿 t 钴资源产于太平洋、印度洋和大西洋海底多金属结核和结壳中。2021 年全球钴矿储量 7 600 万 t,其中刚果(金)3 500 万 t,澳大利亚 1 400 万 t,印度尼西亚 600 万 t,古巴 500 万 t,菲律宾 260 万 t,俄罗斯 250 万 t,加拿大 220 万 t,马达加斯加 100 万 t^[74]。

刚果(金)是世界最大的矿产钴来源。中国是世界最大的精炼钴生产国,绝大多数进口自刚果(金)的不完全精炼钴生产。澳大利亚、加拿大也是重要的进口来源国。中国是全球最大钴消费国,超过 80% 用于可充电电池产业。预计 2021 年中国钴消费量 9.4 万 t,国内矿产量 2 200 t,进口比例为 97%。

6.3.7 钨

2020 年全球钨矿产量 7.84 万 t,其中中国 6.6 万 t,占 84%;越南 4 500 t,俄罗斯 2 400 t,玻利维亚 1 350 t,其他国家均不到 100 t。世界钨资源分布广泛。中国钨资源和储量世界第一,并有一些大矿分布。加拿大、哈萨克斯坦、俄罗斯和美国也有大量钨资源。2021 年全球钨矿储量 370 万 t,其中中国 190 万 t,俄罗斯 40 万 t,越南 10 万 t,西班牙 5.2 万 t,朝鲜 2.9 万 t,澳大利亚 1 万 t^[74]。

中国是世界最大钨生产国、消费国、出口国。世界钨供应主要由中国生产,从中国出口。出口钨产品约 90% 销往日本、美国、荷兰、德国等发达国家。据美国地质调查局数据(1996—2020 年 Mineral Commodity Summaries),1994—2018 年中国累计生产钨矿产品约 125 万 t,同期累计净出口约 38 万 t,出口比例 30%。值得注意的是,近年来钨矿产品出口数量呈增长趋势,2018 年出口比例超过 50%。因新冠疫情影响 2019、2020 年出口比例才下降。2016—2020 年,中国生产钨矿产品分别为 7.2 万 t、6.7 万 t、6.5 万 t、6.9 万 t、6.6 万 t,出口比例分别为 34%、48%、53%、40%、27%^[95]。

6.3.8 锡

2020 年全球生产锡矿 26.4 万 t,其中中国 8.4 万 t,印度尼西亚 5.3 万 t,缅甸 2.9 万 t,秘鲁 2 万 t,刚果(金)和巴西各 1.7 万 t,玻利维亚 1.4 万 t。2021 年全球锡矿储量 490 万 t,其中中国 110 万 t,印度尼西亚 80 万 t,缅甸 70 万 t,澳大利亚 56 万 t,巴西 42 万 t,玻利维亚 40 万 t,俄罗斯 20 万 t,秘鲁 15 万 t,刚果(金)13 万 t^[74]。

中国是全球最大锡矿生产国和消费国,也是最大贸易国。中国精炼锡的消费领域包括锡焊料、镀锡板(马口铁)、锡化学品、锡合金,近年来锡在太阳能光伏焊带、铅酸电池等的应用得到迅速发展。锡焊料占

总消费量的一半以上,主要是电子焊锡。由于需求大,2007年开始中国从锡矿净出口国变成净进口国。全球锡矿贸易格局中,中国占据重要地位。2020年中国生产精炼锡20.3万t,进口锡精矿15.8万t(按40%品位折算,合金属约6.3万t),进口比例31%。八成以上自缅甸进口,其他从澳大利亚、刚果(金)、老挝、越南等国进口。

6.3.9 铟

2020年全球铟矿产量11.1万t,其中中国6.1万t,俄罗斯2.5万t,塔吉克斯坦1.3万t。2021年全球铟矿储量大于200万t,其中中国48万t,俄罗斯35万t,玻利维亚31万t,吉尔吉斯斯坦26万t,缅甸14万t,澳大利亚和土耳其各10万t^[74]。

中国是铟金属第一生产大国、消费大国和出口大国。美国是中国第一大出口目标国,其次是日本、韩国、比利时等。据美国地质调查局数据(2016—2022年 Mineral Commodity Summaries),2015—2021年,中国铟矿产品产量(折金属量)626 600 t,同期美国从中国进口铟矿产品(折金属量)103 356 t。2014—2018年,中国生产铟矿产品53万t,消费30万t,出口比例约43%。

6.3.10 铋

2020年全球精炼铋产量1.9万t,其中中国1.6万t,老挝1 000 t,韩国970 t,日本570 t,哈萨克斯坦230 t。铋常作为铅矿石加工的副产品生产。在中国和越南,铋是钨矿和其他金属矿加工的副产品。玻利维亚的塔斯那矿和中国的一座矿山是仅有的可以作为主产品的铋矿,塔斯那矿自1996年已停产^[74]。

中国是全球最大的铋生产国、消费国和出口国,2004—2014年,中国铋年产量从10 420 t快速增加到15 300 t,年消费量从4 515 t增加到7 534 t,年出口量从3 076 t增加到8 082 t,2014年净出口7 789 t^[96],出口比例为51%。据美国地质调查局数据(2016—2022年 Mineral Commodity Summaries),2015—2021年,中国生产精炼铋95 000 t,出口美国11 318 t,按照美国占中国出口市场22%(2014年占比)估计,中国铋矿产品出口比例为60%。

6.3.11 铂族

2020年全球铂钯矿产量382.19 t,其中南非185.5 t,俄罗斯116 t,津巴布韦27.9 t,加拿大27 t,美国18.8 t,其他国家6.99 t。全球铂族资源估计超过10万t。大部分铂族储量赋存于南非布什维尔杂岩体。2021年全球铂族矿储量7万t,其中南非6.3万t,俄罗斯4 500 t,津巴布韦1 200 t,美国900 t,加拿大310 t^[74]。

中国目前铂消费以首饰为主,钯、铑等消费以催

化剂为主(铑是唯一能减少汽车尾气中氮氧化物排放量的铂族金属)。鉴于质子交换膜电解水制氢是面向可再生能源生产“绿氢”的首选方法,铂族金属作为质子交换膜电解水制氢反应的催化剂,未来需求大,其供应安全对碳中和进程具有重要影响。中国目前仅有两座矿山生产少量铂族矿产品,二次资源利用回收产量也有限。2016—2020年,中国铂年供应量从4 t增加到8 t,钯年供应量从12 t增加到16 t。2020年中国进口铂87.15 t,进口钯41.88 t。从2020年数据看,中国铂进口比例达到90%,钯和铑分别达到70%和80%^[97]。

6.3.12 金

2020年全球矿产金产量3 030 t,其中中国365 t,澳大利亚328 t,俄罗斯305 t,美国193 t,加拿大170 t,加纳125 t,墨西哥102 t,乌兹别克斯坦101 t。2021年全球金矿储量5.4万t,其中澳大利亚1.1万t,俄罗斯6 800 t,南非5 000 t,美国3 000 t,印度尼西亚2 600 t,巴西2 400 t,加拿大2 200 t,中国和秘鲁各2 000 t,乌兹别克斯坦1 800 t,阿根廷1 600 t,墨西哥1 400 t,巴布亚新几内亚1 100 t,加纳和哈萨克斯坦各1 000 t^[74]。

中国是全球第一大黄金生产国、消费国和进口国。据中国黄金协会统计,2021年中国共生产黄金443.6 t,其中利用国内原料生产黄金329 t,利用进口原料生产黄金114.6 t。2021年中国黄金消费量1 121 t,其中黄金首饰消费量711.3 t,金条及金币消费量312.9 t,工业及其他领域消费量96.8 t。根据国内产量和消费量计算,进口比例70%。主要进口来源包括瑞士、澳大利亚、加拿大等。

6.4 战略非金属矿产

6.4.1 高纯石英

2020年全球硅材料产量(硅铁、金属硅,硅含量)812万t,其中中国560万t,俄罗斯57.6万t,巴西40.4万t,挪威34.5万t,美国27.7万t,法国11.2万t,马来西亚10.9万t,冰岛10.3万t。大约70%是硅铁,主要生产国是中国、俄罗斯和挪威。金属硅的主要生产国是中国、巴西和挪威^[74]。

全球生产SiO₂含量≥99.9%高纯石英砂的国家主要有美国、中国、挪威、加拿大、俄罗斯、巴西等国。2019年美国产量65.52万t,占全球产量的53%中国产量23.7万t,占19%。2019年全球生产SiO₂含量≥99.99%高纯石英42.58万t,其中美国产量36.24万t,占全球85%;挪威产量3.79万t,占19.17%;中国产量1.36万t,占3.2%。2019年全球消费高纯石英121.44万t,其中用于电光源领域消费占3.90%,半导体领域消费占65.30%,光伏领域消费占11.93%,光通信领域

消费占 14.80%，其他领域消费占 4.04%。中国是高纯石英消费大国，中国光伏产业为全球市场供应超过 70% 的组件。全球主要高纯石英进口国包括中国、日本等；主要出口国包括德国、韩国和美国等，其拥有资源或先进的高纯石英加工技术，出口和高附加值的高纯石英精加工制品。2019 年，中国进口高纯石英 14.45 万 t，其中从德国进口 5.27 万 t，占 36.47%，其他进口量分别为韩国 4.89 万 t、马来西亚 2.13 万 t、美国 0.59 万 t、日本 0.46 万 t^[98]。中国主要进口 SiO₂ 含量 ≥ 99.99% 高纯石英，按照 2019 年数据计算，这一等级高纯石英进口比例达到 91%。此外，用于芯片制造的 SiO₂ 含量 ≥ 99.998% 的高纯石英唯有美国科维亚(原尤尼明)公司可以提供，进口比例 100%。

6.4.2 石墨

2020 年全球石墨矿产量 96.6 万 t，其中中国 76.2 万 t，巴西 6.36 万 t，莫桑比克 2.8 万 t，俄罗斯 2.5 万 t，马达加斯加 2.1 万 t，乌克兰 1.6 万 t，挪威 1.2 万 t。2021 年全球石墨储量 3.2 亿 t，其中土耳其 9 000 万 t，中国 7 300 万 t，巴西 7 000 万 t，马达加斯加 2 600 万 t，莫桑比克 2 500 万 t，坦桑利亚 1 800 万 t^[74]。

中国石墨大约 76% 为鳞片石墨、24% 为隐晶质石墨。大多数球化石墨也在中国生产。美国一家正在建设的锂离子动力电池工厂生产电芯、电池组、驱动单元和储能装置，全部投产后预计每年需要 35 200 t 球化石墨用于电池负极。位于路易斯安那州的一家澳大利亚工厂一直在生产纯化包覆球化石墨，以挑战中国对全球纯化包覆球化石墨生产的控制。新的提纯技术使得石墨在碳-石墨复合材料、电子、箔箔、摩擦材料、专门润滑材料中应用成为可能。柔性石墨生产线似乎是增长最快的市场。正在开发的大规模燃料电池应用未来可能消费所有其他领域同样多的石墨^[74]。

当前，全球石墨消费主要集中在中国、日本、韩国、印度、加拿大、巴西、美国等国家，主要出口国为中国、巴西、印度、莫桑比克、朝鲜、加拿大、马达加斯加等国家，主要进口国为中国、日本、美国、德国、韩国、荷兰等国家。2019 年，中国石墨产量 125 万 t，进口量 20 万 t，出口量 29 万 t，消费量 116 万 t。中国主要是从莫桑比克、马达加斯加等非洲国家进口鳞片石墨，出口产品以石墨原料及各种规格的石墨粉片、球化石墨产品为主，主要出口到日本、韩国、印度、美国、伊朗、德国、荷兰、土耳其等国家^[99]。按 2019 年数据，出口比例 7%。

6.4.3 萤石

2020 年全球萤石矿产量 824 万 t，其中中国 540 万 t，墨西哥 91.5 万 t，蒙古 68.5 万 t，南非 33 万 t，越南

22 万 t，西班牙 13.1 万 t，加拿大 10 万 t。2021 年全球萤石储量 3.2 亿 t，其中墨西哥 6 800 万 t，中国 4 200 万 t，南非 4 100 万 t，蒙古 2 200 万 t，西班牙 1 000 万 t^[74]。

俄罗斯、日本、美国是全球萤石进口大国，墨西哥、蒙古、中国是全球萤石出口大国。俄罗斯及亚洲国家主要进口氟化钙含量 ≤ 97% 的萤石，美国及欧洲国家主要进口氟化钙含量 > 97% 的萤石。中国在全球萤石资源中占有举足轻重的地位。中国早期生产的萤石主要用于出口，1993 年达历史高点 137 万 t，之后出口量基本保持在 100 万 t 以上。2013—2018 年，中国萤石年出口量在 40 万 t。2018 年中国氟化钙含量 ≤ 97% 的萤石出口目标国家前 3 位为韩国、印度和日本，氟化钙含量 > 97% 的萤石出口目标国家前 3 位为印度、日本和荷兰。2018 年中国氟化钙含量 ≤ 97% 的萤石进口国家前 3 位为蒙古、缅甸和墨西哥，氟化钙 > 97% 的萤石进口国家前 3 位为墨西哥、南非和缅甸。2018 年，中国萤石进口量 51.07 万 t，进口量首次超过出口量的 40.4 万 t，成为萤石(原矿)净进口国^[100]。氢氟酸、氟硅酸、氟化铝等是中国大量出口的氟化工产品，日本大金，美国 3M、科慕、霍尼韦尔，法国阿科玛等氟化工企业都以合资或独资形式进入中国办厂，因此中国仍是萤石矿产品净出口国。值得提及的是，2019 年“多氟多”电子级氢氟酸成功进入韩国三星和 SK 两大半导体公司供应链，被最终应用于 3D-NAND(闪存)和 DRAM(内存)存储器工艺制程。

6.4.4 硼

2020 年，土耳其生产精炼硼酸盐 200 万 t，无疑是全球最大生产国。中国生产硼矿(氧化硼当量)38 万 t，智利、玻利维亚分别生产硼钠石 35 万 t、20 万 t，德国生产硼化合物 12 万 t，秘鲁生产粗硼酸盐 11 万 t。2021 年土耳其硼矿储量 12 亿 t，美国和俄罗斯各 4 000 万 t，智利 3 500 万 t，中国 2 400 万 t^[74]。

世界范围内，四种硼酸盐矿物(硬硼钙石、四水硼砂、粗硼砂和硼钠石)占工业开采硼酸盐矿物的 90%。硼酸盐矿床与火山活动和干旱气候有关，最大的商业可行的矿床位于美国莫哈维沙漠、欧亚大陆南缘的阿尔卑斯带和南美的安第斯带。美国矿床主要由粗硼砂、四水硼砂以及卤水中的硼酸盐构成，少量的硼钠钙石和硬硼钙石。土耳其所有矿床的 70% 是硬硼钙石，主要用于制造耐热玻璃。尽管硼酸盐用于 300 多个领域，但超过 3/4 的世界消费用于陶瓷、洗洁剂、废料和玻璃。中国、印度、荷兰、马来西亚和墨西哥是从美国进口大量精炼硼酸盐的主要国家^[74]。

土耳其和美国是世界上两个最大的硼产品生产国和出口国，其他出口较多的国家还有阿根廷、智利和马来西亚。中国是全球硼产品最大的进口国，日本对硼矿产品的需求也主要依靠进口，另外韩国以及荷

兰和欧洲大部分国家也需要少量进口。1999—2017年,日本、印度、英国、德国、意大利等国的硼消费量总体保持稳定,美国硼消费量从40.1万t(B_2O_3)降至2015年的23.7万t,中国硼消费量从16.5万t增至70.4万t,全球硼矿消费中心从美国逐渐转移至中国。中国硼矿对外依存度也由20%增加到80%。硼砂主要从美国进口,硼酸主要从美国、俄罗斯、智利进口,硼钠钙石主要从土耳其进口^[10]。

6.5 特种气体矿产-氦气

氦以 α 粒子(He^{2+})形式积聚在天然气田中,供应商通过分馏法将其分离。2020年全球氦气产量1.6亿 m^3 ,其中美国8300万 m^3 、卡塔尔5100万 m^3 、阿尔及利亚1400万 m^3 、俄罗斯500万 m^3 、澳大利亚400万 m^3 。全球氦气资源(不包括美国)估计为313亿 m^3 ,主要分布于卡塔尔101亿 m^3 、阿尔及利亚82亿 m^3 、俄罗斯68亿 m^3 、加拿大20亿 m^3 、中国11亿 m^3 。2021年氦气储量分别为美国85亿 m^3 、阿尔及利亚18亿 m^3 、俄罗斯17亿 m^3 、卡塔尔储量最大^[74]。

2021年美国A级氦气表观消费量4000万 m^3 ,用于磁共振成像、提升气体、分析和实验室、电子和半导体制造、焊接、工程和科学,以及许多其他小的用途。美国2021年氦气产量下降归因于几家生产厂家意外停产,包括土地管理局的粗氦浓缩装置。俄罗斯一家每年生产6000万 m^3 氦加工厂已建成,2021年秋季第一条年产2000万 m^3 的生产线已投产,另一条计划2022年2月投产^[74]。

近年来中国氦气需求不断增加,主要用于核磁共振、制冷、磁悬浮列车、焊接、检漏和科研等领域。2015—2020年,中国氦气需求量从1459万 m^3 增长到2500万 m^3 ,同期进口量从1458.47万 m^3 增长到2071.67万 m^3 。2020年中国主要进口来源国为卡塔尔、美国和澳大利亚。预计未来中国将提高从卡塔尔和俄罗斯等地区氦气进口份额。鉴于中国目前每年生产氦气仅数十万立方米,进口比例在98%以上^[102]。

7 讨论

7.1 中国需要制定关键矿产安全保障战略

中国进入新发展阶段,对关键矿产资源安全保障提出了更高要求,既要满足“碳达峰、碳中和”高质量发展的需求,又要适应“以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进”的新发展格局。无论是保证经济社会平稳运行,还是端稳粮食和制造业饭碗,都需要大宗矿产的供应基本稳定;无论是大飞机、舰船、高铁,还是核电、风电、光伏、电动汽车和燃料电池汽车,还是现代计算机、智能手机、通信卫星,这些战略性新兴产业发展均需要使用更多样化的矿产品。

在当前全球关键矿产资源供应链和产业链竞争加剧的形势下,需要从总体国家安全观的视角制定中国关键矿产安全保障国家战略,提升关键矿产资源安全保障能力,巩固矿产资源在国家安全全局中的基础地位。

一是制订、公布并适时更新关键矿产清单。二是基于全产业链进行系统布局,掌握一批关键核心技术。三是统筹紧缺矿产和优势矿产,提高话语权和控制力。四是加强国内资源调查、勘查和选冶等技术攻关。五是建立关键矿产储备制度。六是加强海外资源勘查开发合作。七是完善相关法律制度。其中,基于全产业链布局、统筹紧缺与优势矿产和加大调查勘查力度等尤为重要。

制订和公布关键矿产清单是目前国际普遍做法。清单是矿产资源安全战略的核心。一份公开的清单可以全方位调动政府、科学机构、企业、社会各界力量,为开展战略规划、资源调查、矿产勘查、理论创新、技术研发、产业再造、人才培养等提供引领。一份科学的、符合中国资源、产业实际和发展趋势的清单,可以引导资本、技术、智力投向正确的方向,真正为资源和产业安全保障作出各自应有的贡献。关键矿产储备方面,要分类施行储备政策,大宗矿产实施180d储备,三稀金属矿产,特别是通过综合回收生产的三稀金属矿产,实施不限量储备。海外资源勘查开发合作宜重点依托“一带一路”建设,通过投资、贸易、外交,以及与资源产出国或原材料生产国共享技术和信息、合作培养各类人才、共同建设采-选-运基础设施、建立联合储备机制等途径,构建稳定的、可持续的供应链。关键矿产全球供应链安全是全球治理的重要内容,要通过法治途径保证中国矿产资源用于增加中国和全世界民生福祉,并发挥优势矿产资源在国际博弈中的作用。

7.2 基于全产业链进行系统布局,掌握一批关键核心技术

当今围绕关键矿产的国际博弈已经不是简单的矿产品供需的博弈,而是全产业链条的博弈。一种矿产从发现到进入终端消费领域,其生命周期贯穿全产业链,在不同阶段发挥不同作用,支撑不同产业,产生不同价值。从全产业链进行系统布局,在产业链的不同环节掌握一批关键核心技术,真正用好关键矿产资源,发挥其应有的技术和经济效能,是关键矿产供应安全最重要的保障。

日本、美国由于其其在材料、零部件乃至最终产品制造环节掌握关键核心技术,大量利用了他国(包括中国)的关键矿产资源。作为美国重要战略性武器、精密仪器配件供应国,日本是全球最大稀土进口国,但日本不进口稀土矿石,而是采用国家战略囤积。近

年来,日本为一些潜在稀土资源国提供贷款或援助,企业积极跟进在当地投资办厂;日本在中国进行稀土中初级加工端投资,合资企业在当地大量买入稀土初加工产品,运到国外进行深加工或储备,并成功规避中国出口限制^[103]。美国是全球镓的最大消费国。美国AXT(American Xtal Technology)公司在中国共有10家子公司和合资企业,在中国生产砷化镓、磷化铟和锗单晶片等高性能半导体基板及其他关键原材料和零件,保证了美国航空航天、国防、高性能计算机、通信等领域的关键矿产品需求。

中国具有世界上唯一齐全的产业门类。在关键矿产领域,中国生产了全球39%的精炼铜、56%的原铝、36%的镍、30%的锡、52%的锑、90%的镁(金属)、52%的海绵钛、90%的稀土和钨、60%的萤石。但是这种产量和产能优势并不代表技术优势。电动汽车和电力电子高端铜材技术落后于人,发动机用镍基高温合金尚待突破,铝合金、镁合金等轻量化技术尚未大量应用,稀土永磁技术还主要处在中低端,新型电池技术研发不足,氢能也多使用现有旧技术。中国亟待掌握并突破一批关键核心技术尤其是终端产品的核心技术,如高端稀土功能材料、高纯稀有金属材料、高温合金、砷化镓晶圆等高端新材料技术,飞机发动机、高安全动力电池、高效驱动电机、智能制造与机器人等终端应用技术。

7.3 统筹紧缺矿产与优势矿产,提高话语权和控制力

每个国家都会有许多矿产品既不能满足需求,也没有大量已查明矿床供开采,而主要依靠进口。一些矿产(例如锂、铍、铌、钽、钴、镍、铂族、高纯石英等)目前产量基本上仅限于一个或几个国家,供应存在风险。

中国有11种净出口的优势矿产,对清洁能源转型等战略性新兴产业以及国防军工具有关键作用。除了众所周知的稀土,镓、锗、铟、钨、锑、萤石和石墨等也都具有极为重要的技术和军事用途。如和砷化镓半导体是智能手机射频芯片、F系战机、宙斯盾驱逐舰和国家导弹防御系统相控阵雷达(雷达的关键器件是砷化镓发送/接收组件)等的关键材料,锗是光导纤维、红外探测和夜视装备等的关键材料。中国镓产量占全球镓产量的95%以上,而美国以砷化镓晶圆以及金属镓的形式进口了几乎全球所有镓矿产品。中国可以统筹紧缺和优势矿产,在全球供应链中充分发挥优势矿产的作用,提高话语权和控制力,间接缓解紧缺矿产的约束,必要时还可用于维护国家利益。

7.4 加强国内关键矿产资源调查、勘查和选冶等技术攻关

关键矿产中,铷、铯、钨、钼、锑、铟、铪、碲等稀有稀散金属矿产多是共、伴生矿产,在开采主矿产时

被综合回收。共、伴生矿产的生产受到主矿产生产动向影响,一些矿产(如钨、钼等)虽没有列入清单但因共、伴生矿产而被关联上。随着矿产资源应用领域的变化,关键矿产的清单也会不断更新,例如光伏发电很可能成为金属银的一个重要应用领域,1亿千瓦光伏发电装置需消耗约8500t银,也许不久银就成了关键矿产。

作为关键矿产安全保障最基础的工作,调查、勘查和利用技术攻关至关重要。一是关键矿产资源现状与潜力动态评价。建设贯穿关键矿产全生命周期、覆盖全球和全产业链的基本数据库,并适时进行动态更新。二是关键矿产资源专项调查。既有针对一种或几种矿产的全国性摸底调查,也有针对一种或几种矿产重要远景区的找矿调查。三是关键矿产资源重点勘查。既有新发现大型矿产地的集中勘查,也有重要在产矿山的接替资源勘查。四是关键矿产资源勘查、开采乃至加工技术的攻关。既包括航空物探、卫星遥感等数据获取技术,大数据智能预测等数据处理技术以及地球深部探测技术等,也包括绿色采矿技术,金属、矿物分离提纯以及深加工技术等。这些工作都是支撑国家关键矿产资源安全所必需的基础研究工作,需由国家财政长期稳定支持。

致谢 翟裕生院士、叶天竺教授级高工、严光生研究员审阅了初稿,为本文内容完善提供了建议性意见;王保良、严铁雄、王安建、王高尚、邵厥年、王京彬、林元华、陈仁义、王登红、马飞宙、张作衡、邢树文、琚宜太、唐靖炎、袁继明、张安文、李建武、陈其慎、王全明、于晓飞、刘长森、王平户、易继宁、郭佳、张之武等专家对清单拟定提供了很好的意见。在此一并致谢!

参考文献:

- [1] OECD. Global material resources outlook to 2060: Economic drivers and environment consequences, OECD Publishing, Paris[EB/OL]. (2019-12-12)[2022-09-08]. <https://doi.org/10.1787/9789264307452.en..>
- [2] U. S. Geological Survey. Critical mineral resources of the United States-Economic and environmental geology and prospects for future supply[R]. New York: U. S. Geological Survey Professional, 2017.
- [3] 毛景文,杨宗喜,谢桂青,等.关键矿产—国际动向与思考[J].矿床地质,2019,38(4):689-698.
MAO J W, YANG Z X, XIE G Q, et al. Critical minerals: International trends and thinking[J]. Mineral Deposits, 2019, 38(4): 689-698.
- [4] FORTIER S M, NASSAR N T, LEDERER G W, et al. Draft critical mineral list- summary of methodology and background information-U. S. Geological Survey technical input document in response to secretarial order No. 3359[R]. Reston, VA: U. S. Geological Survey, 2018.
- [5] U. S. Geological Survey. 2022 final list of critical minerals[EB/OL]. (2022-02-24)[2022-09-10]. <https://www.federalregister.gov/documents/2022/02/24/2022-04027/2022-final-list-of-critical-minerals>.
- [6] European Commission. Report on critical raw materials and the circular

- economy[EB/OL].[2022-09-08].https://ec.europa.eu/info/publications/report-critical-raw-materials-and-circular-economy_en.
- [7] European Commission. Critical raw materials resilience: charting a path towards greater security and sustainability[EB/OL]. (2020-09-15) [2022-09-10].<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474>.
- [8] 曹庭宇. 日本稀有金属保障战略[J]. 国土资源情报, 2011(4): 42-46.
CAO T Y. The protection strategy of rare metal in Japanese. *Natural Resources Information*, 2011(4): 42-46.
- [9] U. S. Department of Commerce. A federal strategy to ensure secure and reliable supplies of critical minerals[EB/OL]. (2019-06-04) [2022-09-12].<https://www.commerce.gov/data-and-reports/reports/2019/06/federal-strategy-ensure-secure-and-reliable-supplies-critical-minerals>.
- [10] 総合資源エネルギー調査会, 資源燃料分科会. 新国際資源戦略策定に向けた提言. 2020[EB/OL]. (2020-03-30) [2022-09-12].<https://www.meti.go.jp/press/2019/03/20200330009/20200330009.html>.
Comprehensive Resources and Energy Research Committee, Resource and Fuel Subcommittee Proposals for the formulation of a new international resource strategy[EB/OL]. (2020-03-30) [2022-09-13].<https://www.meti.go.jp/press/2019/03/20200330009/20200330009.html>.
- [11] International Energy Agency. The role of critical minerals in clean energy transitions[EB/OL]. (2021-05-01) [2022-09-13].<https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.
- [12] 中华人民共和国国土资源部. 2011中国矿产资源报告[M]. 北京: 地质出版社, 1-110.
Ministry of Land and Resources, PRC. China Mineral Resources 2011[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-110.
- [13] 王安建, 王高尚, 邓祥征, 等. 新时代中国战略性关键矿产资源安全与管理[J]. 中国科学基金, 2019(2): 133-140.
WANG A J, WANG G S, DENG X Z, et al. Security and management of China's critical mineral resources in the New Era[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation*, 2019(2): 133-140.
- [14] 文博杰, 陈毓川, 王高尚, 等. 2035年中国能源与矿产资源需求展望[J]. 中国工程科学, 2019, 21(1):68-73.
WEN B J, CHEN Y C, WANG G S, et al. China's demand for energy and mineral resources by 2035[J]. *Strategic Study of CAE*, 2019, 21(1): 68-73.
- [15] BOLM C. A new iron age[J]. *Nature Chemistry*, 2009(1): 420.
- [16] EMSLEY J. Manganese the protector[J]. *Nature Chemistry*, 2013(5): 978.
- [17] 王运锋, 何蕾, 郭薇. C919大型客机总装下线助推我国材料产业发展[J]. 新材料产业, 2016(1): 25-31.
WANG Y F, HE L, GUO W. The final assembly line of the C919 large passenger jet boosting the development of China's materials industry[J]. *Advanced Materials Industry*, 2016(1): 25-31.
- [18] 董生智, 李卫. 稀土永磁材料的应用技术[J]. 金属功能材料, 2018, 25(4): 1-7.
DONG S Z, LI W. The application technology of rare earth permanent magnetic material[J]. *Metallic Functional Materials*, 2018, 25(4): 1-7.
- [19] 李中华, 张卫平, 刘甲祥. 稀土材料在现代军事技术上的应用及发展趋势[J]. 湖南冶金, 2006, 34(4): 44-48.
LI Z H, ZHANG W P, LIU J X. Application and development trend of rare earth materials in modern military technology[J]. *Hunan Geology*, 2006, 34(4): 44-48.
- [20] GROCHALA W. First there was hydrogen[J]. *Nature Chemistry*, 2015(7): 264.
- [21] 李国玲, 李星国. 稀土金属及其金属间化合物的研究与应用[J]. 中国稀土学报, 2016, 34(6): 748-763.
LI G L, LI X G. Research and application of rare earth metal and intermetallic[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2016, 34(6): 748-763.
- [22] 张萌, 高鹏. 新型铜-稀土系引线框架材料研制[J]. 江西冶金, 2003, 23(6): 58-61+68.
ZHANG M, GAO P. Study on some Cu-RE alloys for new lead-frame materials[J]. *Jiangxi Metallurgy*, 2003, 23(6): 58-61+68.
- [23] 屠海令, 王磊, 杜军. 半导体集成电路用金属硅化物的制备与检测评价[J]. 稀有金属, 2009, 33(4): 453-461.
TU H L, WANG L, DU J. Preparation and characterization of metal silicides used for semiconductor integrated circuits[J]. 2009, 33(4): 453-461.
- [24] 姜楠, 张亮, 熊明月, 等. 电子封装无铅软钎焊技术研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(12): 3862-3875.
JIANG N, ZHANG L, XIONG M Y, et al. Preparation and characterization of metal silicides used for semiconductor integrated circuits[J]. 2019, 33(12): 3862-3875.
- [25] THORNTON B F, BURDETTE S C. Seekers of the lost lanthanum[J]. *Nature Chemistry*, 2019, 11: 188.
- [26] SCHELTER E J. Cerium under the lens[J]. *Nature Chemistry*, 2013(5): 348.
- [27] DINGLE A. Praseodymium unpaired[J]. *Nature Chemistry*, 2018(10): 576.
- [28] THORNTON B F, BURDETTE S C. The neodymium neologism[J]. *Nature Chemistry*, 2017(9): 194.
- [29] STREKOPYTOV S. Salute to samarium[J]. *Nature Chemistry*, 2016(8): 816.
- [30] BÜNZLI J C. Europium in the limelight[J]. *Nature Chemistry*, 2010(2): 696.
- [31] PYYKKÖ P. Magically magnetic gadolinium[J]. *Nature Chemistry*, 2015(7): 680.
- [32] DENG G. Terbium glows green[J]. *Nature Chemistry*, 2018(10): 110.
- [33] GATTESCHI D. Anisotropic dysprosium[J]. *Nature Chemistry*, 2011(3): 830.
- [34] THORNTON B F, BURDETTE S C. Homely holmium[J]. *Nature Chemistry*, 2015(7): 532.
- [35] PIGUET C. Extricating erbium[J]. *Nature Chemistry*, 2014(6): 370.
- [36] ARNOLD P. Thoroughly enthralling thulium[J]. *Nature Chemistry*, 2017(9): 1288.
- [37] SKELTON A, THORNTON B F. Iterations of ytterbium[J]. *Nature Chemistry*, 2017(9): 402.
- [38] ÖHRSTRÖM L. Rounding up lutetium[J]. *Nature Chemistry*, 2018(10): 372.
- [39] EMSLEY J. Unsporting scandium[J]. *Nature Chemistry*, 2014(6): 1025.
- [40] DINÉR P. Yttrium from ytterby[J]. *Nature Chemistry*, 2016(8): 192.
- [41] TARASCON J M. Is lithium the new gold?[J]. *Nature Chemistry*, 2010(2): 510.
- [42] PUCHTA R. A brighter beryllium[J]. *Nature Chemistry*, 2011(3): 416.
- [43] TARSELLI M A. Subtle niobium[J]. *Nature Chemistry*, 2015(7): 180.
- [44] BACCOLO G. Tantalizing tantalum[J]. *Nature Chemistry*, 2015(7): 854.
- [45] 张晏清, 邱琴, 张雄. 六角晶系钕铁氧体与镨铁氧体吸波性能的比较[J]. 材料导报, 2009, 23(5): 5-7.

- ZHANG Y Q, QIU Q, ZHANG X. Comparison of microwave absorbing property between hexagonal barium ferrite and strontium ferrite[J]. *Materials Reports*, 2009, 23(5): 5-7.
- [46] COUDERT F X. Strontium's scarlet sparkles[J]. *Nature Chemistry*, 2015(7): 940.
- [47] GEORGESCU I. Rubidium Round-the-Clock[J]. *Nature Chemistry*, 2015(7): 1034.
- [48] ANSOBORLO E, LEGGETT R W. Quantum cesium[J]. *Nature Chemistry*, 2015(7): 360.
- [49] EMSLEY J. The A-Z of Zirconium[J]. *Nature Chemistry*, 2014(6): 254.
- [50] BURDETTE S C, THORNTON B F. Hafnium the Lutécium I Used to be[J]. *Nature Chemistry*, 2018(10): 1074.
- [51] BRENNAN M. Gregarious gallium[J]. *Nature Chemistry*, 2014(6): 1108.
- [52] BURDETTE S C, Thornton B F. The germination of germanium[J]. *Nature Chemistry*, 2018(10): 244.
- [53] RENOUF C. A touch of indium[J]. *Nature Chemistry*, 2012(4): 862.
- [54] SCERRI E. Recognizing rhenium[J]. *Nature Chemistry*, 2010(2): 598.
- [55] 黄洪涛, 王卫军, 钟武焯, 等. 铜铍合金在空间核电源中的应用性能研究进展[J]. *原子能科学技术*, 2020, 54(3): 505-511.
- HUANG H T, WANG W J, ZHONG W Y, et al. Research progress on application of Mo-Re alloy in space nuclear power[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2020, 54(3): 505-511.
- [56] IBERS J. Tellurium in a twist[J]. *Nature Chemistry*, 2009(1): 508.
- [57] LENNARTSON A. The colours of chromium[J]. *Nature Chemistry*, 2014(6): 942.
- [58] TARONI A. V for vanadium[J]. *Nature Chemistry*, 2017(9): 602.
- [59] TARSELLI M A. Titanium tales[J]. *Nature Chemistry*, 2013(5): 546.
- [60] KNOCHEL P. A flash of magnesium[J]. *Nature Chemistry*, 2009(1): 740.
- [61] CATHERINE Drennan. In the nickel of time[J]. *Nature Chemistry*, 2010(2): 900.
- [62] LINDSAY D, KERR W. Cobalt close-up[J]. *Nature Chemistry*, 2011(3): 494.
- [63] GOYA P, MARTÍN N, ROMÁN P. W for tungsten and wolfram[J]. *Nature Chemistry*, 2011(3): 336.
- [64] TARSELLI M A. Tin can[J]. *Nature Chemistry*, 2017(9): 500.
- [65] HANSELL C. All manner of antimony[J]. *Nature Chemistry*, 2015(7): 88.
- [66] MOHAN R. Green bismuth[J]. *Nature Chemistry*, 2010(2): 336.
- [67] YAM V W W. Behind platinum's sparkle[J]. *Nature Chemistry*, 2010(2): 790.
- [68] 赵玉媛. 各向异性导电膜的组成及技术要求[J]. *电子世界*, 2016(14):131.
- ZHAO Y Y. Composition and technical requirements of anisotropic conductive films[J]. *Electronics World*, 2016(14): 131.
- [69] 金嘉炜, 刘传扬, 张冶, 等. 金纳米线的制备及传感应用研究进展[J]. *材料导报*, 2020, 34(3): 5085-5095.
- JIN J W, LIU C Y, ZHANG Y, et al. Preparation and application in sensing fields of gold nanowires[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(3): 5085-5095.
- [70] HUTCHINGS G. A golden future[J]. *Nature Chemistry*, 2009(1): 584.
- [71] JAARONIEC M. Silicon beyond the valley[J]. *Nature Chemistry*, 2009(1): 166.
- [72] ROESKY H W. A flourish of fluorine[J]. *Nature Chemistry*, 2010(2): 240.
- [73] HERMAN C. Cool as helium[J]. *Nature Chemistry*, 2012(4): 140.
- [74] United States Geological Survey (USGS). Mineral commodity summaries 2022 [R]. Reston VA: U. S. Geological Survey, 2022: 1-202.
- [75] 张典波, 万海明, 郑江. 世界铁矿石资源情况及中国铁矿石供需态势[J]. *中国冶金*, 2004(6): 26-29.
- ZHANG D B, WAN H M, ZHENG J. Analysis on global iron ore resources and china's iron ore supply and demand[J]. *China Metallurgy*, 2004(6): 26-29.
- [76] 严旺生, 高海亮. 世界锰矿资源及锰矿业发展[J]. *中国锰业*, 2009, 27(3): 6-11.
- YAN W S, GAO H L. The resource of mn ore & its development of mn-mining[J]. *China Manganese Industry*, 2009, 27(3): 6-11.
- [77] 覃德亮, 陈南雄. 2020 年全球锰矿及我国锰产品生产简述[J]. *中国锰业*, 2021, 39(4): 10-12.
- QIN D L, CHEN N X. 2020 global manganese ore and the production brief in China's manganese products[J]. *China Manganese Industry*, 2021, 39(4): 10-12.
- [78] 江少卿. 全球铜矿资源分布[J]. *世界有色金属*, 2018(2): 1-3.
- JIANG S Q. The distribution of copper resources in the world[J]. *World Nonferrous Metals*, 2018(2): 1-3.
- [79] 沈建鑫. 我国铜资源国际贸易研究[J]. *冶金经济与管理*, 2019(5): 21-24.
- SHEN J X. The study on China's international trade of copper resources[J]. *Metallurgical economy and management*, 2019(5): 21-24.
- [80] 张海坤, 胡鹏, 姜军胜, 等. 铝土矿分布特点、主要类型与勘查开发现状[J]. *中国地质*, 2021, 48(1): 68-81.
- ZHANG H K, HU P, JIANG J S, et al. Distribution, genetic types and current situation of exploration and development of bauxite resources[J]. *Geology in China*, 2021, 48(1): 68-81.
- [81] 陈昱鸣. 全球铝土矿贸易格局及对干散货航运市场的影响[J]. *世界海运*, 2020, 43(12): 7-16.
- CHEN Y M. The trade pattern of the global bauxite and its impact on the shipping market of dry bulk[J]. *World Shipping*, 2020, 43(12): 7-16.
- [82] 熊增华, 王石军. 中国钾资源开发利用技术及产业发展综述[J]. *矿产保护与利用*, 2020(6): 1-7.
- XIONG Z H, WANG S J. Overview of potassium resources exploitation & utilization technology and potash industry development[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2020(6): 1-7.
- [83] 屈小荣, 亓昭英. 我国钾肥行业现状及未来发展趋势分析[J]. *肥料与健康*, 2020, 47(5): 7-11.
- QU X R, QI S Y. Analysis of current situation and future development trend of China's potash fertilizer industry[J]. *Fertilizer & Health*, 2020, 47(5): 7-11.
- [84] 郑国栋, 王琨, 陈其慎, 等. 世界稀土产业格局变化与中国稀土产业面临的问题[J]. *地球学报*, 2021, 42(2): 265-272.
- ZHENG G D, WANG K, CHEN Q S, et al. The change of world rare earth industrial structure and the problems faced by China's rare earth industry[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2021, 42(2): 265-272.
- [85] 夏启繁, 杜德斌, 段德忠, 等. 中国稀土对外贸易格局演化及影响因素[J]. *地理学报*, 2022, 77(4): 976-995.
- XIA Q F, DU D B, DUAN D Z, et al. Evolution and influencing factors of China's foreign trade in rare earth metals[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(4): 976-995.
- [86] 张苏江, 崔立伟, 孔令湖, 等. 国内外锂矿资源及其分布概述[J]. *有色金属工程*, 2020, 10(10): 95-104.

- ZHANG S J, CUI L W, KONG L H, et al. Summarize on the lithium mineral resources and their distribution at home and abroad[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2020, 10(10): 95-104.
- [87] 陈光辉. 2020 年中日韩锂盐进出口情况简析[J]. *世界有色金属*, 2021(4): 1-3.
- CHEN G H. Brief analysis of lithium salt import and export of China, Japan and South Korea in 2020[J]. *World Nonferrous Metals*, 2021(4): 1-3.
- [88] 李娜, 高爱红, 王小宁. 全球铍资源供需形势及建议[J]. *中国矿业*, 2019, 28(4): 69-73.
- LI N, GAO A H, WANG X N. Global beryllium supply and demand trends and its enlightenment[J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(4): 69-73.
- [89] 王汝成, 车旭东, 邬斌, 等. 中国铌钽钨资源[J]. *科学通报*, 2020, 65(33): 3763-3777.
- WANG R C, CHE X D, WU B, et al. Critical mineral resources of Nb, Ta, Zr, and Hf in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(33): 3763-3777.
- [90] 邓攀, 陈玉明, 叶锦华, 等. 全球铌钽资源分布概况及产业发展形势分析[J]. *中国矿业*, 2019, 28(4): 63-68.
- DENG P, CHEN Y M, YE J H, et al. Study on the resource distribution and industry development of global niobium and tantalum[J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(4): 63-68.
- [91] 徐桂芬, 胡玥, 任卉, 等. 中国锆矿供需形势分析及展望[J]. *国土资源情报*, 2020(10): 81-84.
- XU G R, HU Y, REN H, et al. Analysis and prospect of supply and demand situation of strontium in China[J]. *Natural Resources Information*, 2020(10): 81-84.
- [92] 郭娟, 崔荣国, 王卉, 等. 世界铼资源供需现状及展望[J]. *国土资源情报*, 2020(10): 67-74.
- GUO J, CUI R G, WANG H, et al. Supply and demand situation and outlook of global rhenium resources[J]. *Natural Resources Information*, 2020(10): 67-74.
- [93] 王代军, 贺万才. 浅析我国铬铁合金冶炼发展趋势[J]. *铁合金*, 2020(4): 40-44.
- WANG D J, HE W C. Analysis on the development trend of ferrochrome smelting in China[J]. *Ferro-Alloys*, 2020(4): 40-44.
- [94] 吴优, 陈东辉, 刘武汉, 等. 2020 年全球钒工业发展报告[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(5): 1-9.
- WU Y, CHEN D H, LIU W H, et al. Global vanadium industry development report 2020[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(5): 1-9.
- [95] 余泽全, 苏刚. 2020 年中国钨工业发展报告[J]. *中国钨业*, 2021, 36(2): 1-9.
- YU Z Q, SU G. Development report of China tungsten industry in 2020[J]. *China Tungsten Industry*, 2021, 36(2): 1-9.
- [96] 龙涛, 陈其慎, 于汶加, 等. 中国铋供需形势分析及对策建议[J]. *中国矿业*, 2016, 25(5): 11-15.
- LONG T, CHEN Q S, YU W J, et al. The analysis and suggestions of the bismuth's supply and demand in China[J]. *China Mining Magazine*, 2016, 25(5): 11-15.
- [97] 姬长征, 田孝光. 我国铂族金属产业现状及战略储备研究[J]. *中国有色金属*, 2022(9): 48-49.
- JI C Z, TIAN X G. Research on the industry status and strategic reserve of platinum group metal in China[J]. *China Nonferrous Metals*, 2022(9): 48-49.
- [98] 郝文俊, 冯书文, 詹建华, 等. 全球高纯石英资源现状、生产、消费及贸易格局[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2020(5): 15-19.
- HAO W J, FENG S W, ZHAN J H, et al. Current situation, production, consumption and trade pattern of high purity quartz in the world[J]. *China Non-metallic Minerals Industry*, 2020(5): 15-19.
- [99] 陈军元, 颜玲亚, 刘艳飞, 等. 全球石墨资源供需形势分析[J]. *国土资源情报*, 2020(10): 90-97.
- CHEN J Y, YAN Y L, LIU Y F, et al. Analysis of supply and demand situation of global graphite resources[J]. *Natural Resources Information*, 2020(10): 90-97.
- [100] 徐鼎, 吕晶, 刘倩, 等. 中国萤石资源进出口贸易现状特征分析及建议[J]. *现代矿业*, 2019(10): 12-15.
- XU D, LV J, LIU Q, et al. Analysis and suggestions on the current situation of China's fluorite resources import and export trade[J]. *Modern Mining*, 2019(10): 12-15.
- [101] 焦森, 郑厚义, 屈云燕, 等. 全球硼矿资源供需形势分析[J]. *国土资源情报*, 2020(10): 85-89.
- JIAO S, ZHENG H Y, QU Y Y, et al. Supply and demand situation of global boron resources[J]. *Natural Resources Information*, 2020(10): 85-89.
- [102] 周军, 陈玉麟, 王璿清, 等. 氦气资源产量及市场发展现状分析[J]. *天然气化工-C1化学与化工*, 2022(47): 1-7.
- ZHOU J, CHEN Y L, WANG R Q, et al. Analysis of helium resource production and market development status[J]. *Natural Gas Chemical Industry*, 2022(47): 1-7.
- [103] 高风平, 张璞, 刘大成, 等. 国际稀土市场新格局与中国稀土产业战略选择[J]. *国际贸易问题*, 2019(7): 63-81.
- GAO F P, ZHANG P, LIU D C, et al. The rare earths global market updates and the rare earths industry master plan of the United States and its allies[J]. *Journal of International Trade*, 2019(7): 63-81.

List, Application and Global Pattern of Critical Minerals of China

ZHANG Shenghui¹, WANG Zhentao², LI Yongsheng³, MO Xuanxue⁴, DONG Qingji¹, CHEN Conglin¹, GENG Lin¹, WANG Li¹, ZHANG Haiqi⁵, TAN Xiumin⁵, XUE Yingxi⁶, ZHOU Shangguo⁷, TIAN Yuming⁷, YAO Chaomei⁸, JIAO Sen⁸, CHEN Zhengguo⁹, CHEN Junyuan⁹, WANG Shoucheng¹⁰, ZHANG Haoyu¹⁰, FU Shuixing¹¹, WANG Chunlian², WANG Yong¹²

1. China Geological Survey, Beijing 100037, China;

2. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

3. Mineral Exploration Technical Guidance Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100037, China;

4. China University of Geosciences (Beijing) 100083, China;

5. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Zhengzhou 450006, Henan, China;

6. National Geological Library of China, Beijing 100083, China;

7. China Metallurgical Geology Bureau, Beijing 100025, China;

8. China Chemical Geology and Mine Bureau, Beijing 100013, China;

9. China National Geological Exploration Center of Building Materials Industry, Beijing 100035, China;

10. China Geological Survey for Nonferrous Metals Resource, Beijing 100012, China;

11. Beijing Institute of Geology For Mineral Resources Co., Ltd. Beijing 100012, China;

12. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Critical minerals refer to the mineral resources playing an essential role in our socio-economic development and national security. Some of them may have a great risks due to supply shortage, others may have a strong influence on global market due to our strong supply chains. At present, the international trade disputes have expanded from the economic and technological fields to the mineral resources. New challenges and new opportunities are faced to China's security of mineral resources due to continue changes of world political and economic situation. Representative list of critical minerals/raw materials of the United States, the European Union and Japanese briefly introduced, and the present competitive situation of critical minerals in the world is analyzed in this contribution. Firstly, the list of critical minerals in various countries overlaps highly with each other. Secondly, major powers have put forward and implemented strategies to strengthen their security of supply chain. Thirdly, critical minerals are essential to the process of carbon neutrality. In this context, a recommended list of 37 critical minerals of China was put forward, including bulk minerals, three-type rare (rare, rare earth and rarely scattered) metal minerals, ferrous-nonferrous-precious metals minerals, strategic non-metallic minerals and special gas minerals. 31 of which coincide with the lists of the United States, the European Union and Japan. A general study on the application fields, global spatial distribution, production and trade patterns of the 37 critical minerals are carried out in this paper. The results indicate that these critical minerals are not only an indispensable material basis for the economic and social development of the world today, but also an irreplaceable material guarantee for the development of strategic emerging industries, clean energy, national defense and military technology. Among the 37 critical minerals, 22 are net imports, 19 are over 50% net imports, and 10 are over 90% net imports. And 11 critical minerals are of net exports, 5 are over 50% net exports, especially gallium is over 90% net exports. At the end of this paper, the security strategy of China's critical minerals is discussed. Firstly, the list of critical minerals should be formulated, published and updated timely. Secondly, a number of key core technologies should be mastered and systematically arranged based on the whole industrial chain. Thirdly, arrangements for the scarce and advantageous minerals should be made overall to improve the right of speech and control. Fourthly, the technical breakthroughs of the domestic resources in the stage of survey, exploration, mineral processing and smelting and others should be strengthened. Fifthly, the critical minerals reserve system should be established. Sixthly, the cooperation in the exploration and development of overseas resources should be strengthened. Seventhly, the relevant legal system should be improved. Among them, it is particularly important to arrange the entire industrial chain, plan the scarce and advantageous minerals as a whole and increase the survey and exploration efforts.

Keywords: critical minerals; study on critical minerals list; application; global pattern; security strategy

引用格式: 张生辉, 王振涛, 李永胜, 莫宣学, 董庆吉, 陈丛林, 耿林, 王利, 张海敏, 谭秀民, 薛迎喜, 周尚国, 田郁溟, 姚超美, 焦森, 陈正国, 陈军元, 王寿成, 张浩钰, 付水兴, 王春连, 王永. 中国关键矿产清单、应用与全球格局[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(5): 138-168.

ZHANG Shenghui, WANG Zhentao, LI Yongsheng, MO Xuanxue, DONG Qingji, CHEN Conglin, GENG Lin, WANG Li, ZHANG Haiqi, TAN Xiumin, XUE Yingxi, ZHOU Shangguo, TIAN Yuming, YAO Chaomei, JIAO Sen, CHEN Zhengguo, CHEN Junyuan, WANG Shoucheng, ZHANG Haoyu, FU Shuixing, WANG Chunlian, WANG Yong. List, application and global pattern of critical minerals of China [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(5): 138-168.