

我国关键矿产及其材料产业供应链高质量发展战略研究

干勇^{1*}, 彭苏萍², 毛景文³, 裴荣富³, 李仲平⁴, 屠海令⁵, 孙传尧⁶,
陈其慎³, 谢曼¹, 郑文江⁷

(1. 钢铁研究总院, 北京 100081; 2. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083;
3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 4. 航天材料及工艺研究所, 北京 100076; 5. 有研科技集团有限公司, 北京 100088; 6. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160; 7. 中国工程院战略咨询中心, 北京 100088)

摘要: 关键矿产和材料是事关国民经济、国防建设、居民生活的基础原料, 其供应链的稳定性意义重大。本文将矿产资源与材料产业进行关联, 从资源勘查、采选、冶炼, 材料加工、制造, 产品回收等全产业链条的角度着手, 分析了我国关键矿产及其材料产业的战略需求与发展现状; 凝练了以产业链不畅通, 资源端关键矿产供给不足, 冶炼端耗能高、规模过大, 材料端支撑保障能力不足、创新能力不强、产业基础薄弱, 循环利用端发展滞后等问题。按照“找得着”(勘查)、“采得出”(采矿)、“用得上”(基础原材料制备)的基本思路, 论证提出了2035年“三步走”目标, 并从采选、冶炼、基础原材料方面剖析了技术发展重点。系统提升国内矿产资源供给保障能力、全面提升新材料技术竞争力、畅通资源—冶炼—材料—循环利用产业链, 以此为重点举措来推动我国关键矿产及其材料产业供应链的高质量发展。

关键词: 关键矿产; 材料; 全产业链; 供应链; 高质量发展; 循环利用

中图分类号: F426.1 文献标识码: A

High-Quality Development Strategy for the Supply Chain of Critical Minerals and Its Material Industry in China

Gan Yong^{1*}, Peng Suping², Mao Jingwen³, Pei Rongfu³, Li Zhongping⁴, Tu Hailing⁵,
Sun Chuanyao⁶, Chen Qishen³, Xie Man¹, Zheng Wenjiang⁷

(1. Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology, Beijing 100076, China; 5. GRINM Group Corporation Limited, Beijing 100088, China; 6. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China; 7. Center for Strategic Studies, Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China)

Abstract: Critical minerals and materials are fundamental to national economy, national defense construction, and residents' lives; therefore, it is of great significance to ensure the stability of their supply chain. This study associates mineral resources with the

收稿日期: 2022-03-15; 修回日期: 2022-05-09

通讯作者: *干勇, 钢铁研究总院教授级高级工程师, 中国工程院院士, 研究方向为矿产、新材料战略、科技创新体系;
E-mail: zhyf1014@163.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“国家关键矿产及其材料产业供应链高质量发展战略研究”(2021-XBZD-06)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

material industry and analyzes the strategic needs and development status of China's key minerals and their raw material industries from the perspective of the entire industrial chain including resource exploration, mining, smelting, material processing, manufacturing, and product recycling. Moreover, problems are summarized including blocked industrial chain; insufficient supply of key minerals at the resource end; high energy consumption and excessive scale at the smelting end; insufficient support capacity, inadequate innovation ability, and weak industrial foundation at the material end; and lagging development at the recycling end. Focusing on exploration, mining, and basic raw material preparation, a three-step goal by 2035 is proposed, and technological development priorities are summarized from the aspects of mining, smelting, and basic raw materials. Furthermore, we propose suggestions for the high-quality development of China's key minerals and material industry supply chain, including promoting the supply guarantee capacity of domestic mineral resources, improving the technical competitiveness of new materials, and unblocking the resource-smelting-material-recycling industrial chain.

Keywords: critical minerals; materials; entire industrial chain; supply chain; high-quality development; recycling

一、前言

关键矿产和材料是国民经济、社会发展、国防建设、居民生活的物质基础。当前，世界面临百年未有之大变局，国际形势发生深刻变化 [1]，发达国家重视关键矿产及其材料产业供应链安全问题并开展谋划和布局；我国也强调提高产业链供应链稳定性和竞争力、增强产业链供应链自主可控能力。

关键矿产及其材料产业供应链的安全和稳定受到各国政府和学者的高度关注。各国一方面加强本土供应链建设，另一方面强化供应链领域的国际合作。关键矿产及其材料已成为国际供应链竞争的焦点。部分国家试图构建独立于中国的矿产资源及其材料供应链，并通过政治、经济、军事、运输通道、国际规则、股权投资、媒体等多种手段掌控全球战略资源。当前在复杂的国际环境下，我国关键矿产与材料产业供应链面临巨大风险。一是我国矿产和原材料整体对外依存度高，缺口仍在不断增大；二是部分国家结成联盟，对我国关键矿产与原材料的海外供应实施围堵和封锁；三是我国优势矿产开发利用水平低，原材料高值化利用程度低，优势矿种的高品质原材料仍然依赖进口，资源优势并未转化为产业优势，在国际分工中处于出口初级产品、进口优质加工产品的不利地位。

我国学者近年来也高度重视关键矿产和材料供应链研究。一方面总结了国外发展战略及对我国的启示 [2,3]，另一方面分析和评估了我国关键矿产及材料领域面临的供应风险并提出相应发展建议 [4-9]。中国工程院在矿产资源和材料领域已分别组织了强国战略研究，如“矿产资源强国战略研究”项目组系统分析了我国矿产资源产业发展面临的重大问题，提出了相应的发展战略和不同类型矿产的发展

路径 [10,11]；“新材料强国 2035 战略研究”项目组系统分析了材料产业发展的现状、形势及问题，针对 2035 年战略需求制定了技术路线图 [12]。然而在以往的咨询项目中，没有开展矿产资源-材料供应链的串联研究。事实上，矿产资源是材料产业的基础，材料产业是矿产资源的下游，将矿产资源与材料产业串联，开展跨学科、跨领域战略研究，更加有利于从全链条的角度梳理产业链供应链发展现状，分析面临的关键问题，从保障供应链安全、畅通产业链条、促进国内大循环和国际国内双循环的角度系统提出发展战略。

本研究涉及的关键矿产及其材料产业指包含资源勘查、采选、冶炼、加工、制造、回收利用等矿产原材料供给全链条的产业体系。关键矿产及其材料产业的高质量发展包括两层含义，一是资源端、冶炼端、产品制造端、循环利用端四大环节全链条的高质量发展，二是为国家经济社会高质量发展、中华民族伟大复兴提供高水平的原材料支撑。关键矿产及其材料产业高质量发展的特征体现在产业链条完善、产业国际竞争力强、绿色发展水平高、科技水平国际领先、关键原材料安全可控。本文立足我国矿产资源禀赋条件和材料产业发展现状，系统厘清关键矿产及其下游冶炼、材料制备、回收利用链条，梳理每一环节的产品及其供应状况，在此基础上分析我国关键矿产及其材料产业发展面临的形势、问题和战略需求，提出矿产资源及其材料产业供应链高质量发展战略。

二、高质量发展背景下我国关键矿产及其材料战略需求分析

我国是世界最大的矿产资源进口国，2020 年我

国矿产品进口额为 1.8 万亿元，未来 15 年对关键矿产的依赖程度仍将不断加大。我国又是世界最大的原材料消费国，在转型升级和新型工业化发展的交汇时期，运载工具、能源动力设备、信息显示、生命健康等国家关键战略领域对高端材料需求日益突出。

（一）能源与资源需求

1. 化石能源

在经济高质量发展，碳达峰、碳中和（“双碳”）背景下，能源需求仍将保持增长，面临“保总量”“调结构”的双重压力。2020—2035 年能源需求总体保持增长、结构快速调整，可再生能源需求将在 2035—2040 年间超过化石能源。能源消费总量有望在 2035 年前后达到峰值（约 6.2×10^9 tce），较 2020 年（ 4.98×10^9 tce）增长 25%；化石能源消费量将陆续达峰，如煤炭在“十四五”时期达峰，石油在 2028 年前后达峰，天然气在 2040 年前达峰，核电、水电等会持续增长。

2. 黑色金属

钢铁需求高位运行，黑色金属需求保持较高水平。在钢铁消费量方面，2020 年为 1.03×10^9 t，预计 2025 年、2030 年、2035 年分别为 1.02×10^9 t、 1×10^9 t、 9.5×10^8 t，即 2035 年前整体处于高位运行、缓慢下降的态势。铁矿石、锰矿需求将表现为缓慢下降趋势：在铁精矿（62% 品位）消费量方面，2020 年约为 1.38×10^9 t，预计 2025 年、2035 年分别为 1.32×10^9 t、 1.1×10^9 t；在锰矿消费量方面，2020 年为 1.3×10^7 t，预计 2025 年、2035 年分别为 1.08×10^7 t、 8.5×10^6 t。

3. 其他关键矿产

战略性新兴产业带动了铜、铝、锂、钴、镍关键矿产的需求增长。与新能源汽车、新能源产业、其他战略性新兴产业快速发展相对应，铜、铝、锂、钴、镍等新能源产业矿产保持着增长态势：铜需求量仍呈上升态势，2020—2035 年将从 1.3×10^7 t 增加至 1.96×10^7 t；随着交通、航空航天、机械等装备的轻量化发展，铝需求量也将不断增长，2020—2035 年将从 3.686×10^7 t 增加至 5.738×10^7 t；锂、钴、镍、稀土的需求量将分别从 2020 年的 2.3×10^5 t、 7×10^4 t、 1.35×10^6 t、 1.85×10^5 t 增加至 2035 年的 2×10^6 t、 2×10^5 t、 2.9×10^6 t、 1×10^6 t 以上。

（二）关键战略领域对高端材料的需求

1. 运载工具

大型运输机对诸多高端材料提出了需求：复合材料、超高强度钢、高强不锈钢、铝/钛/镁轻质合金、高分子材料、电池材料、稀土永磁材料、密封阻尼材料、防冰材料、透明座舱材料、雷达罩（窗）材料；高速列车在精密轴承钢、齿轮钢、工模具钢、轮轨钢、车轴钢、铝/钛/镁轻质合金、耐热合金方面需求迫切。预计 2030 年，国产大型运输机数量将超过 1000 架，航空发动机用量为 3×10^4 台，高温合金的需求量可达 7×10^4 t；高速列车基础零部件用轴承钢、齿轮钢、模具钢的年需求量分别为 3×10^6 t、 2×10^6 t、 5×10^5 t。

2. 能源动力领域

核电、油气开发等能源领域的重大项目，对特种合金、稀土材料、非晶材料、超导材料、复合材料等提出迫切需求。预计 2030 年，我国新建 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ 超超临界火电机组超过 1000 台，耐热钢、耐热合金的需求量在千万吨级；海洋资源勘探、开采、储运及相关基础设施建设，对钢及耐蚀合金的年需求量为 6×10^5 t。

3. 信息显示领域

新一代信息技术领域对大尺寸硅及第三代半导体材料、新型显示材料、稀土发光材料、石墨烯、超材料等提出迫切需求。预计 2030 年，信息显示领域中的先进半导体抛光片的年需求量为 7.5×10^8 片，其中照明和工业节能的第三代半导体材料外延芯片年需求约 6×10^8 in²（1 in=25.4 mm），新型显示材料年需求 3.5×10^8 m²。

4. 生命健康领域

生物医药、医疗设备等领域对生物基高性能尼龙、生物基聚氨酯、骨科植入物、心脑血管植入物、齿科材料及口腔材料等需求迫切。预计 2035 年，用于胃和肠道疾病、皮肤疾病常用药物的填料（矿物纳米材料）需求量将达 3×10^5 t。

三、我国关键矿产及其材料产业的发展现状

（一）矿产资源及其材料产业规模庞大，成为支撑工业化、城镇化发展的基石

着眼国际横向比较，我国在矿产资源生产、冶炼加工制造、材料及资源回收利用的规模方面均有

优势，形成了世界规模最大的矿产资源及其材料产业。例如，我国矿产资源总产量、总产值均保持领先，冶炼加工产业总产值占全球比例超过50%；先进储能材料、光伏材料、有机硅、超硬材料、特种不锈钢等百余种材料产量，废钢、废铝等金属回收规模均居世界前列。

关键矿产及其材料产业主要涵盖：工业部门中的煤炭、油气、黑色金属、有色金属和非金属采矿业，石油加工、炼焦和核燃料加工业，化学原料和化学制品制造业，黑色金属冶炼和压延加工业，有色金属冶炼和压延加工业等冶炼产业，不能在标准分类中找到明确对应的新材料产业、二次金属矿产资源回收利用产业。按照2020年的产品产量和价格估算，采矿业产值约为6万亿元，冶炼产业产值约为40万亿元，新材料产业产值约为5万亿元，二次金属矿产资源回收利用产值约为8000亿元；四方面合计约为51.8万亿元，在工业总产值中的比例超过1/3。

关键矿产及其材料产业为国家基础设施建设、飞机、高速铁路列车、汽车、船舶、电子通信、家用电器等设备及产品制造提供了各类原材料，支撑了工业制造业、建筑业合计约90万亿元产值（2020年价格），因对快速工业化和城镇化的重要保障作用而成为我国经济发展的基石。未来15年是我国发展战略性新兴产业，建设矿产资源强国、新材料强国的重要阶段，也是经济和产业转型升级的关键时期；稳定的矿产原材料供应和自主可控的关键材料供应，将保障国防装备、航空航天、信息通信、新能源等关键产业部门的稳定发展，驱动实现经济社会高质量发展。

（二）在资源端，成为世界最大的矿产资源生产和消费国

我国地质找矿工作进展良好，截至2020年共发现矿产资源173种，查明资源储量的矿产有189种。整体来看，我国矿产资源禀赋居世界第三位，钽铁矿、钒、钨、锡、钼等10种矿产排名第一位，铅、锌、石墨、萤石、锂等14种矿产排名前五位。目前，我国是世界最大的矿产资源生产国，煤炭、钒、铅、锌、钨、锡、钼、锑、金、稀土、石墨、萤石等36种矿产产量居首位，除黄金、硼以外的34种矿产产量的世界占比均超过20%，镓、镁、

汞、铋、钨等9种矿产产量的世界占比超过70%，硅、锗等12种矿产产量的世界占比超过50%。庞大的矿产资源生产能力有力支撑了我国的快速工业化发展。

我国进入了工业化中后期发展水平阶段，矿产资源需求种类多、用量大，矿产资源在国民经济中的基础性、支撑性地位也将长期保持。2020年，我国煤炭消费量为 4.98×10^9 tce（占世界的54%），石油消费量为 6.9×10^8 t（占世界的17%），天然气消费量为 3.28×10^{11} m³（占世界的9%），铁矿石消费量为 1.43×10^9 t（占世界的67%），铜矿石消费量为 1.453×10^7 t（占世界的49%）。未来15年，我国煤炭、铁、锰等大宗矿产消费继续保持高位，石油、天然气、锂、钴、镍等战略性矿产需求仍将适度增长。

（三）在冶炼端，建成规模大、产业较为完善的冶炼加工产业

2000年后我国步入工业化快速发展阶段，同步形成了规模庞大、产业链完善、产品种类齐全、技术水平高的冶金产业。2020年，我国粗钢、精炼铜、原铝、精炼铅、精炼镍、精炼锡、原镁、精炼钴的产量分别为 9.3×10^8 t、 7.28×10^6 t、 3.708×10^7 t、 6.44×10^6 t、 7.3×10^5 t、 2×10^5 t、 8.9×10^5 t、 9×10^4 t，对应的世界占比分别为51%、40%、40%、49%、30%、55%、89%、68%。我国油气加工能力进入世界前列，2020年原油加工量为 6.7×10^8 t，年产汽油 1.3×10^8 t、柴油 1.6×10^8 t、煤油 4.05×10^7 t。

（四）在材料产品端，产业体系完整且部分具有国际竞争优势

我国形成了世界门类最全、规模第一的材料产业体系，钢铁、有色金属、稀土金属、水泥、玻璃、化学纤维、先进储能材料、光伏材料、有机硅、超硬材料、特种不锈钢等百余种材料产量均居世界首位。近年来我国新材料产业实现了产值快速增长，围绕新材料关键“一跃”的重大问题，启动建设了核能材料、航空发动机材料、航空材料、集成电路材料等一批国家级新材料生产应用示范平台，显著提升了新材料的应用技术水平。自主开发了拓扑绝缘体材料、高温超导材料、块状纳米材料、仿生与超材料、半导体照明材料、光伏材料、

深紫外等人工晶体材料、分离膜材料、器官替代及病毒快速检测等高端生物医用材料,研发、生产与应用技术整体接近国际水平,部分达到国际领先水平 [12]。

(五) 在循环利用端,初步建立资源循环利用产业体系

经过多年发展,我国初步建立了涵盖“回收-加工-再利用”的废旧资源回收利用产业体系。从回收量看,废钢、废弃有色金属等资源的回收规模已是世界首位。2020年,我国废钢、废弃有色金属的回收量分别为 2.6×10^8 t、 1.3×10^7 t,远高于传统发达国家和地区。根据中国物资再生协会研究数据,2019年我国再生资源回收企业约有 1×10^5 家,回收行业从业人员约有 1.5×10^7 人 [13]。

四、关键矿产及其材料产业发展面临的重大问题

(一) 国际供应链竞争和不稳定性对产业高质量发展构成威胁

当前,国际地缘局势高度不稳定,进入了新旧秩序调整的动荡期,造成国际能源、大宗商品、关键技术及产品供应链的不稳定;传统发达国家和地区显著提升了国际竞争力度,持续调整其关键产品和技术的供应链战略布局,力求在加强自身供应链稳定性和自主可控性的同时,通过国际调查等方式将其他国家关键矿产及材料的脆弱性作为恶性竞争“筹码”。在此背景下,我国关键矿产及其材料供应链的安全和稳定成为影响产业发展、经济发展乃至国家安全的重要因素;构建以国内供应为主体、国际国内双循环的矿产及材料产业高质量发展新格局,尤为迫切。

(二) 产业链呈现“纺锤形”态势,引发上、下游出现产品与技术卡点

从产品产量和产值看,整个矿产及其材料产业集中于冶炼加工产业,而资源端、材料端、回收利用端的占比均较小,导致整个产业链形成“中间大、两头小”的“纺锤形”发展态势。虽然材料、回收利用产业近年来都有快速发展,但因过去“世界加工厂”发展模式的影响依然深远,产业上、下游不

通畅,造成产业链上游(资源端)与冶炼端、冶炼端与材料端、回收利用与整个产业链流通等方面的卡点。我国经济从快速发展阶段转入高质量发展阶段,关键矿产及其材料产业链的高端化、畅通化、绿色化、低碳化是经济社会发展的必然要求;“纺锤形”态势将不再适应,亟需进行调整和变革。

(三) 关键矿产国内供给保障能力不足

由于长时间、高强度的开发利用,加之政策引导、环境保护等因素作用,我国矿产资源开发空间受限,矿业市场投资低迷,国内矿产储量难以增长且产量明显下降。在我国关键矿产资源需求保持增长的情况下,国内供应能力的下降造成对外依存度的进一步提升。关键矿产的国内供给保障能力不足主要反映在以下三方面。① 勘查投入下滑,矿产资源储量增幅下降。2020年我国固体勘查投入仅为162亿元,较2012年下降68%;铁、铜、钾盐、萤石等23种矿产查明资源储量增幅出现下降。② 投资环境差,勘查开发活动萎缩。2011—2021年,我国探矿权数量从 3.6×10^4 个减少到 1.1×10^4 个(下降69%),采矿权数量从 1.01×10^5 个减少到 3.6×10^4 个(下降64%)。③ 采矿业固定资产投资收缩,重要矿产产量下降明显。2013—2020年,我国采矿业固定资产投资从1.46万亿元下降至1.02万亿元,石油、铁、锰、铬、钼、锡、锑、磷矿、萤石等16种矿产的产量下降幅度介于10%~60%。

(四) 冶炼环节因高耗能、高排放导致绿色发展水平不足

作为我国矿产及材料产业的中间环节之一,冶炼加工环节规模较大、产业技术水平较高、具备一定的国际竞争力;主要冶炼产品产量的世界占比均在50%左右,绝大多数冶炼加工产品均能满足下游需求。然而,因产业规模庞大、对上游资源消耗大、难以完全转化成下游材料等高端产品,充沛的冶炼加工产能造成高能耗、高排放,成为产业链绿色发展的薄弱和突出环节。2020年,我国钢铁工业能耗约为 4×10^8 tce,有色金属工业能耗约为 2×10^8 tce,合计占全国工业能耗近1/5;冶炼加工产业的碳排放量占全国比例超过20%,其中钢铁工业排放 CO_2 约 1.5×10^9 t(占全国比例为15%),有色金属工业排放 CO_2 约 7×10^8 t(占全国比例为7%)。

（五）关键材料产业因创新能力不强、基础薄弱而未能充分保障重点领域需求

在代表我国先进制造水平的重点领域，高端材料供应不充分，支撑保障能力不强。例如，显示产业规模达到世界首位，但新型显示用材料仍然较多依赖进口；高速铁路列车已成为我国高端制造的“名片”，但牵引电机、变流器所用芯片进口比例较高。材料领域的整体创新能力不强，虽然在材料科学基础研究的众多方向取得良好进展，但在重大材料创制及突破方面的贡献与领域体量不成比例。例如因瓦合金和艾林瓦合金、半导体材料、富勒烯和石墨烯、光纤、蓝光发光二极管、拓扑相变与拓扑材料等划时代的新型材料，均不是我国科学家首先发现。我国材料产业的关键基础依然薄弱，关键原辅材料、分析仪器、部分制造装备严重依赖进口；国产装备研发仍然较多采取跟踪、追随模式，多处于原型样机阶段而未开展产业应用，技术引领性不足，面临潜在的知识产权风险。

（六）循环利用端发展滞后，成为全链条最明显短板

我国资源及材料的循环利用产业体系尚不健全，回收利用水平远低于传统发达国家和地区。2020年我国钢铁原料中的废钢占比仅为22%，而美国为70%以上、欧盟平均为55%~60%、韩国超过50%、日本为35%以上；我国铝、铜、铅的二次资源供应（新废与旧废合计）占消费量的比例分别为18%、16%、39%，均明显低于传统发达国家和地区水平，提升空间较大。当前，我国各类废旧产品的回收率普遍不高，如报废汽车回收率仅为0.7%（国际水平为4%~6%），家电、电子产品、废旧电池等的回收率也低于国际水平。此外，我国金属资源循环利用方面的法律与标准体系不健全、规范化水平低，大宗固废产生强度高、利用不充分、综合利用产品附加值低，技术水平及数字化、精细化管理水平亟待提升 [13]。

五、关键矿产及其材料产业供应链高质量发展的目标和举措

（一）基本策略与发展目标

在新发展格局背景下谋划关键矿产及其材料产业供应链的发展，国内以保障矿产资源安全底线为

重心，国外以提升矿产资源国际经略能力为重心，系统性提升资源产业的供应能力，增强冶金、材料产业的自主创新能力；着力提高发展质量和效益，实践绿色低碳循环发展模式，确保战略性矿产资源“找得着”（勘查）、“采得出”（采矿）、“用得上”（基础原材料制备）。①围绕战略性新兴产业和重大装备发展亟需的铁、铜、铝、铀、锂、钴、镍、铬、钾盐、锰、金、钽、铌等紧缺基础原材料，推进找矿勘查取得重大突破，大幅度增储扩产，显著提升国内基础原材料的供给能力。②围绕新一代信息技术、新能源、生命健康等重点领域所亟需的铟、镓、锗、碲、铋等稀有稀散金属和石化材料，突破材料高质、高纯、高值制备以及二次资源回收利用关键技术及装备，提升高端应用保障能力和产业综合竞争力。③围绕稀土、钨钼、石墨、钒钛、萤石等优势资源，以满足高端应用需求为重点，突破材料高值化技术体系，开发与资源特色相适应的关键技术与装备，形成较强的国际市场竞争能力。

针对关键矿产及其材料产业供应链的资源供给、科技水平、绿色发展、循环利用等薄弱环节，利用15年时间，坚持自主创新、优化产业结构、提升质量效益、追求绿色低碳，实现关键资源和材料的自主可控，壮大一批具有国际市场竞争力的企业，全面实现我国矿产及材料产业的高质量发展。①到2025年，关键矿产及材料产业初步形成产业链条较为通畅、各环节发展水平明显提升的高质量发展新格局，资源端供应能力明显改善，材料端突破一批紧缺关键技术，循环利用效率显著提升。②到2030年，关键矿产及其材料产业供应链初步实现高质量发展，资源端自主保障能力和国际经略能力明显增强，冶炼端产业规模趋于合理并实现绿色、高效发展，材料端突破一批关键核心技术，初步建成循环利用产业体系，基本实现关键材料自主可控。③到2035年，关键矿产及其材料产业供应链全面实现高质量发展，资源端完全自主可控，冶炼端产业发展质量效益大幅提升，关键产品和技术实现完全自给，循环利用产业体系健全。

（二）核心关键技术突破

一是发展智能找矿勘查技术。创新找矿预测理论，研制先进找矿勘查技术装备，支持高海拔、深切割、浅覆盖新区的找矿工作，改善找矿效率。

二是发展与我国资源禀赋相适应的资源开发利用技术。开发大型矿产资源共伴生矿高效选冶及综合利用技术,应用于攀西地区(攀枝花市和西昌市)钒钛磁铁矿、包头市白云鄂博铁铌稀土矿、阿坝藏族羌族自治州金川铜镍钴矿等,提高资源综合利用水平。开展精准采选、绿色低碳冶炼分离及物料循环利用、高纯化及高质化基础原料制备、高丰度稀土元素规模化平衡应用、二次资源综合回收利用等关键技术攻关,解决稀土提取分离过程存在的资源利用率较低、冶炼分离产品档次偏低、稀土元素应用不平衡等问题。

三是发展材料深度提纯技术。针对高品质硅单晶、高档光刻胶、封装基板、高端溅射靶材、前驱体等方面的高纯原材料需求,开展高纯及超高纯铁、铜、铝、钛、钴、钨、钼、钽、镍、锆、铈、镱、铍、石英、石墨、氟、磷、成膜树脂等原材料提纯制备技术研发,匹配新一代信息技术、高端装备制造的高质量发展。

四是发展新能源用材料和环境友好材料。针对核石墨、玄武岩纤维、动力电池隔膜用树脂材料等基础原材料,开发高性能、规模化的工艺技术;布局前沿基础材料研究,如石墨烯、储氢材料、超高压电缆用聚丙烯树脂等;重点针对动力电池、光伏电池,完善回收与循环利用体系;开发具有低析出、低气味、高生物相容性等特征的聚烯烃、聚酯、聚酰胺、聚氨酯等石化基础原材料制备技术及装备,形成大健康合成树脂基础材料体系。

五是发展材料流程制造技术。突破钢铁冶金长/短流程、特种冶炼短流程、先进材料近终型制造、石油化工流程等关键流程技术体系,实现大宗原材料制造流程的绿色化、智能化,形成达到国际先进水平,具有动态有序、高效协同特征的大宗原材料先进制造流程。

(三) 产业供应链提升的重点举措

1. 提升国内矿产资源供给保障能力

合理加大矿产资源勘查投入,实施新一轮找矿突破战略行动,重点加强老矿山、现有大中型矿山的深边部资源勘查,努力提高矿产资源储量。保持公益性勘查投入,鼓励商业性勘查投入。

加强国内矿山生产保障,确保大中型矿山稳定供应。大中型矿山的当前供应能力占我国总量的

80%以上,应科学开展调查分析,明确发展面临的问题,积极实施财税、金融、矿业权审批等方面的支持措施,精准加强相应的资源供给保障能力。

控制矿产资源消费总量。控制能源消费总量,降低单位产值对应的能耗和碳排放强度。持续优化能源消费结构,积极实施煤炭清洁高效利用;推进深部热能资源开发,有序提高核能、风能、生物质能等可再生能源在一次能源供应结构中的比例。保障战略性矿产需求,科学确定矿产资源消费上限,集约、节约利用矿产资源,促进生产生活方式转变。

开展紧缺矿种的“采选冶”技术攻关。针对资源禀赋差、受“选冶”技术制约的钾盐、锂、钴、铬、镍、锆、钨、铌、钽、铍、铯等危机矿种,在找矿、选矿、分离、冶炼等环节分别设立技术攻关项目,力求突破低品位、难“选冶”资源开发利用技术难题,提高相关矿产的国内供应能力。

强化矿产资源储备能力建设。加大紧缺矿产品的应急储备规模,适度开展矿产地储备、矿山产能储备;加强紧缺矿产需求替代技术研究,如铝代铜、镁代铝、钠镁钒替代锂等技术;构建涵盖矿山生产-冶炼-材料-装备制造-循环利用全链条的储备体系。

优化国家资源管理政策,提振矿业市场信心。建议调整权益金制度,适度降低探矿权的权益金,采矿权的权益金可后置收取(以“产量”计价并在生产过程中随税费一同缴纳);优化矿产资源出让制度,制定有利于地勘单位找矿增储、企业自主探矿的出让制度细则。

2. 提升材料技术竞争力

针对国际影响大、技术难度高的“材料群”,给予长期稳定支持。建议启动实施新材料科技重大项目,力争突破一批关键核心技术,探索提升引领发展、具有可持续发展能力的路径,形成新材料研发及应用全流程协同创新体系。

完善材料科技创新体系,重组优化材料领域国家重点实验室。围绕国家战略需求和重大创新任务,针对新一代信息技术、“双碳”战略目标、高端装备制造、生命健康等对新材料的需求,调整原有国家重点实验室的定位和研究方向,以统筹规划、系统布局、分类管理促进中长期技术研究提升。

筑牢材料技术基础。借鉴发达国家和地区的基

基础研究成功经验，在材料基础、共性领域、交叉领域、前瞻领域，以高校、科研院所为承研主体，加大公共资源的持续性、稳定性投入，提升原始创新能力，取得重大原创性成果；在以关键基础原材料、基础工艺与装备、基础零部件/元器件、基础检验检测仪器、基础工业软件等产业基础领域，以优势企业为主体，“产学研”紧密结合，组织开展全产业链创新，充分提升产业基础能力，为材料产业发展提供持续动力。

促进科技研发与管理模式创新。改革科研评价机制，成果评价导向从以论文为主转向以创新性、实用性、社会效益综合评价为主，鼓励青年研究人员更多面向应用开展研究。促进材料科研成果转化与应用，推动高端装备制造领域更大力度为国产材料提供验证和应用机遇，着眼实际应用驱动材料技术演进升级。强化材料领域智力建设，引导青年研究人员扎实开展材料研究，吸引海外高端人才参与研究。

3. 畅通资源—冶炼—材料—循环利用产业链条

顺应“双碳”战略目标、高质量发展形势，着力推动关键矿产及其材料产业的结构调整。严格限制高耗能、耗矿产原料、产业附加值低的初级冶炼和加工制造产业（如粗钢、煤电铝、初级化工等）的发展规模，改变现有“纺锤形”产业发展格局。

全方位提升国内企业的国际市场竞争力。推进产业整合，确保战略性资源产业集中度不低于70%；引导企业加强自主创新，注重原始创新；鼓励龙头企业延伸产业链条，形成全产业链的控制力和影响力。

推动资源产业绿色转型，提升产业绿色发展水平。提高产业绿色准入门槛，建设绿色矿山、绿色资源型产业，引导企业朝着支撑新能源、新材料、新一代信息技术所需资源方向转型；加快构建碳排放、碳交易标准，利用标准和规则引导产业规范转型；实施企业碳排放管理账户制度，按照国际标准管理企业碳排放，与下游冶炼、运输企业合作，协同降低价值链的碳排放强度。

构建二次资源供给体系，提高供应能力。完善二次资源回收利用体系，优化二次资源回收政策体系；利用信息技术手段构建资源回收利用管理平台，提高钢铁、有色金属、稀贵金属等的二次利用水平。运用产品制造与使用全流程跟踪技术，产品

回收、拆解和再利用技术，大幅度提高国内产品中的金属回收利用率，将废钢、废铜、废铝、废旧电池中锂、钴、镍等金属资源的循环利用量提高至消费量占比的30%（2035年），有效缓解资源保障安全压力。加快资源循环利用基地建设，推动建设一批高环保标准、高技术水准的废弃物综合处置示范基地，弥补城市绿色发展“短板”，助力新型城镇化建设。

六、结语

当前，我国关键矿产资源及材料产业处于高质量发展的初期阶段，大而不强、技术跟跑、绿色发展水平低是突出表现。其中，资源端是相对薄弱环节，尚未进入高质量发展阶段；冶炼端相对其他环节发展较好，已进入高质量发展阶段；材料端基本处于追赶国际先进水平态势，部分领域进展良好，但整体基础薄弱、竞争力不强、关键核心技术不成体系；循环利用端是相对薄弱环节，尚未进入高质量发展阶段。为了支撑关键矿产资源及材料产业供应链的高质量发展，建议部署以下三大工程/项目。

战略性矿产资源供应底线红线构筑工程，旨在防范矿产资源安全出现重大风险，综合考虑对外依存度、国内资源条件、资源需求、替代与二次资源供应来划定我国矿产资源安全底线，包括资源自给率底线、产量底线、新增资源储量底线、储备量底线；科学划定矿产资源开发红线、矿产资源勘查红线。

重点新材料研发及应用重大项目，以高温合金、高端装备用特种合金、高性能纤维及复合材料、特种高分子材料、电子信息材料、稀土新材料、材料基因工程为重点，尽快构建关键核心技术体系，形成全流程协同创新体系，探明产业高质量发展路径。

二次资源供给体系构建与能力提升工程，通过二次资源回收利用体系建设，发展资源回收利用管理平台，突破全流程跟踪与回收再利用技术体系，以金属回收利用率提高来缓解资源保障安全压力，加快以废弃物综合处置示范基地为代表的资源循环利用基地建设。

通过上述重大工程/项目建设，推进关键矿产

资源及材料产业供应链的上、下游协同发展,为我国经济社会高质量发展提供坚实的物质支撑。值得指出的是,本文主要根据国内矿产资源及其材料产业的现状布局展开研究,后续将着眼新的国际态势,进行全球战略矿产资源经略及布局课题研究,以期为国家宏观经济研究与管理提供参考。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: March 15, 2022; **Revised date:** May 9, 2022

Corresponding author: Gan Yong is a professor-level senior engineer from Central Iron and Steel Research Institute, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research fields include mineral and new materials strategy and scientific innovation systems. E-mail: zhyf1014@163.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on the High-Quality Development of the Supply Chain of Critical Minerals and its Material Industry in China” (2021-XBZD-06)

参考文献

- [1] 新华网. 习近平在看望参加政协会议的农业界社会福利和社会保障界委员时强调把提高农业综合生产能力放在更加突出的位置 [EB/OL]. (2022-03-06)[2022-04-24]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1726560627717273531&wfr=spider&for=pc>. Xinhua Net. Xi Jinping stressed that improving the overall agricultural production capacity should be given a more prominent position when visiting members of the agricultural social welfare and social security circles attending the CPPCC session [EB/OL]. (2022-03-06)[2022-04-24]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1726560627717273531&wfr=spider&for=pc>.
- [2] 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.
- [3] 张所续, 刘伯恩, 马朋林. 美国关键矿产战略调整对我国的相关启示 [J]. 中国国土资源经济, 2019, 32(7): 38–45.
Zhang S X, Liu B E, Ma P L. The relevant enlightenment of the strategic adjustment of critical minerals in the United States [J]. Natural Resource Economics of China, 2019, 32(7): 38–45.
- [4] 黄健柏, 孙芳, 宋益. 清洁能源技术关键金属供应风险评估 [J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1477–1488.
Huang J B, Sun F, Song Y. Supply risk assessment of critical metals in clean energy technology [J]. Resources Science, 2020, 42(8): 1477–1488.
- [5] 陈其慎. 正确认识美国的“危机矿产” [J]. 国土资源情报, 2020 (7): 3–11.
Chen Q S. Make a statement for U.S. critical minerals [J]. Land and Resources Information, 2020 (7): 3–11.
- [6] 沈曦, 郭海湘, 成金华. 突发风险下关键矿产供应链网络节点韧性评估——以镍矿产品为例 [J]. 资源科学, 2022, 44(1): 85–96.
Shen X, Guo H X, Cheng J H. The resilience of nodes in critical mineral resources supply chain networks under emergent risk: Take nickel products as an example [J]. Resources Science, 2022, 44(1): 85–96.
- [7] 曾昆. “十四五”我国新材料产业高质量发展建议 [J]. 新材料产业, 2020 (6): 2–5.
Zeng K. Suggestions on high quality development of China’s new material industry in the 14th Five Year Plan [J]. Advanced Materials Industry, 2020 (6): 2–5.
- [8] 干勇. 运载交通工具与冶金材料产业发展 [J]. 现代交通与冶金材料, 2021, 1(1): 6–13.
Gan Y. Development of transport vehicles and metallurgical materials industry [J]. Modern Transportation and Metallurgical Materials, 2021, 1(1): 6–13.
- [9] 干勇. 关键基础材料的发展及创新 [J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(10): 997–1002.
Gan Y. Development and innovation of key basic materials [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(10): 997–1002.
- [10] 陈其慎, 干勇, 延建林, 等. 从矿产资源大国到矿产资源强国: 目标、措施与建议 [J]. 中国工程科学, 2019, 21(1): 49–54.
Chen Q S, Gan Y, Yan J L, et al. Transition from a large to a powerful country in mineral resources: Objectives, measures, and proposals [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(1): 49–54.
- [11] 李政, 姜兴伟, 麻林巍, 等. 中国建设“矿产资源强国”的内涵探讨和政策建议 [J]. 中国工程科学, 2019, 21(1): 55–60.
Li Z, Jiang X W, Ma L W, et al. Connotation discussions and policy proposals for constructing a “great power of mineral resources” [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(1): 55–60.
- [12] 谢曼, 干勇, 王慧. 面向 2035 的新材料强国战略研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 1–9.
Xie M, Gan Y, Wang H. Research on new material power strategy by 2035 [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 1–9.
- [13] 中国物资再生协会. 中国再生资源回收行业发展报告 [EB/OL]. (2020-06-01)[2022-04-24]. <http://images.mofcom.gov.cn/ltfzs/202106/20210630093358717.pdf>.
China National Resources Recycling Association. Development report of China’s renewable resources recycling industry [EB/OL]. (2020-06-01)[2022-04-24]. <http://images.mofcom.gov.cn/ltfzs/202106/20210630093358717.pdf>.