

# 中国铍资源供给风险分析

陈子瞻<sup>1)</sup>, 郭冉启<sup>2)</sup>, 韩梅<sup>1)</sup>, 李芳琴<sup>1)</sup>

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;  
2) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

**摘要:** 铍在航空航天、国防和一些特殊领域具有不可替代性, 是关乎国家安全和高端制造业的关键性矿产之一。本文从铍资源分布、供应和需求等角度出发, 分析了全球资源供需格局, 并基于产业链视角剖析了中国铍资源的供应、产业等风险。研究结果显示, 我国铍资源禀赋较差, 未来供应增长潜力有限, 不能满足未来需求的快速增长; 高端铍产品技术存在短板, 严重依赖进口; 全球铍资源的供应链、产业链呈现高度垄断特征, 安全风险高。基于未来安全风险, 本文从增强战略储备、拓展进口来源、加大科技攻关三个方面提出针对性建议, 为我国铍产业链安全供应提供参考。

**关键词:** 铍; 全产业链; 供给风险; 贸易

**中图分类号:** F426.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2022.112802

## Supply Risk Analysis of Beryllium in China

CHEN Zi-zhan<sup>1)</sup>, GUO Ran-qi<sup>2)</sup>, HAN Mei<sup>1)</sup>, LI Fang-qin<sup>1)</sup>

1) *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;*  
2) *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083*

**Abstract:** Beryllium is an irreplaceable metal in aerospace, defense, and other specialized fields. It is one of the key minerals related to national security and high-end manufacturing. This study analyzed the global supply and demand pattern of beryllium resources from the perspective of distribution, supply, and demand, and analyzed the supply and industrial risks of beryllium resources in China from the perspective of the industrial chain. The results showed that China's beryllium resource endowment is poor, and that the future supply growth potential is limited and thus will not be able to meet the rapid growth in demand in the future. There are shortcomings in high-end beryllium product technology, which depend heavily on imports. The global supply chain and industrial chain of beryllium resources are characterized by a high level of monopoly and a high security risk. Considering the future safety risk, targeted suggestions are proposed based on the three aspects of strengthening the strategic reserve, expanding import sources, and increasing scientific and technological breakthroughs. Moreover, references are provided for the safe supply of the beryllium industrial chain in China.

**Key words:** beryllium; beryllium industry chain; supply risk; trade

铍是一种储量低、用量少但非常关键的金属矿产, 在核技术、航空航天、国防、医疗、导弹等关键领域不可或缺(赵云鹏等, 2016)。如铍铝合金是制造惯性导航器的最佳选择(李笑等, 2021), 铍合金在

计算机、智能手机、汽车、电子电气领域扮演着重要角色, 铍的氧化物是特种陶瓷和冶金工业中关键性原料。X射线对铍的穿透力是铝的17倍, 故被广泛用于制作“金属玻璃”; 由于精抛光铍的红外线

本文由国家自然科学基金重大研究计划集成项目“中国关键金属矿产清单厘定与风险评估”(编号: 92162321)、国家自然科学基金重大项目“新时代战略性关键矿产资源安全与管理”(编号: 71991480)及其课题5“新时代中国战略性关键矿产资源全球治理体系研究”(编号: 71991485)、国家社会科学基金重大项目“自然资源高效利用与经济安全 and 高质量发展机制研究(编号: 21&ZD104)”和“全球矿产资源战略研究”(编号: DD20221795)联合资助。

收稿日期: 2022-10-08; 改回日期: 2022-11-28; 网络首发日期: 2022-11-29。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 陈子瞻, 男, 1985年生。博士, 助理研究员。主要从事资源经济学和矿产资源战略的研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街26号。电话: 010-68997436。E-mail: cdiseqno@foxmail.com。

反射率极高,因此被用于詹姆斯-韦伯等太空望远镜(郑莉芳等, 2021)。铍在原子能工业上被应用于中子增殖剂和核反应堆,在热核实验堆中,铍基材料也起到关键作用(丁孝禹等, 2013; Miyamoto et al., 2021)。因此,铍被主要国家列为高新技术产业发展的战略性和保障性资源之一。

铍作为重要的战略物资和高技术工业材料,其市场供需情况得到了学者的广泛关注。许秀婷等(2021)分析和预测了未来全球铍工业的市场供需情况。美国铍矿产业供需格局受国际形势以及本国经济政策的影响较大,未来供需缺口可能存在扩大的趋势(刘劲松和高丽丽, 2022),并且该国高度重视铍资源,通过对资源、生产、技术和市场的全面垄断、推行军民一体化政策、政府与企业合作以及铍资源储备等多种手段保障美国的铍资源供应(王仁财等, 2014)。梁飞等(2018)预测了中国 2030 年铍的需求量将达到 310 t(金属当量),境外资源供应连续性得不到保障,资源安全形势不容乐观(林博磊等, 2018)。李娜等(2019)分析得到中国铍资源品位较低且存在加工冶炼技术壁垒,现阶段及未来的产量远不能满足国内需求,对外依存度较高;且中国铍及铍材料在品级、工艺技术和材料研发水平上与国外存在着很大的差距,影响着铍产业链的发展和铍材料的自主供给(许德美等, 2014),究其原因主要是生产规模小、生产线技术与装备落后、自动化程度低、性价比差等诸多因素(王伟, 2014)。学者对铍的供需进行了比较深入的研究,但对其供应风险分析的文献极少,仅黄健柏和孙芳(2020)分析了铍的供应风险和环境影响。其余的研究大多集中于铍的毒性对环境、人体健康以及放射性铍对铍肺病影响的研究(Welch et al., 2004)。

以上研究表明铍的重要性日益凸显,但中国铍的对外依存度逐年提高,下游在高端产业部分缺失,难以支撑关键领域的未来需求以及发展,因此全面分析中国铍资源的供给风险显得尤为重要。本文从资源、贸易及产业等多方面分析评估中国铍资源供应面临的风险,这将对中国铍资源的可持续发展战略及相关的保障铍资源供应措施提供重要的参考价值。

## 1 铍产业链解析

### 1.1 性质与作用

铍是密度最小的碱土金属元素,具有刚度大、熔点高、热容量高、比强度高、良好的热导率和辐照透过性等特性,具备优异的加工性能。金属铍应用于航空航天领域的惯性制导原件、航天器的隔热剂;核裂变反应堆芯的屏蔽材料以及天文望远镜的红外观测镜组等。铍铜合金导电性好,带电接触时不产

生电火花,安全性极高,是电子、电气产业的高导、高强弹性材料。铍铝合金密度低,在极端环境下机械稳定性好,用于航空、航天等框架材料。铍镍合金抗冲击性能强,在精密机械、航空仪表、电子和仪器工业中可用作高热弹力原件(李欣, 2019)。氧化铍陶瓷具有良好的绝缘性能,用于生产高压绝缘材料。铍消费结构中铍铜合金占比最大,为 65%~75%,金属铍占 10%~20%,其余为氧化铍陶瓷及其它铍合金。

### 1.2 产业链概述

自然界中铍矿物主要以绿柱石、羟硅铍石、硅铍石三种矿物形式存在。具备经济可采和符合工业冶炼需求的主要为羟硅铍石和绿柱石。二者均需通过破碎、冶炼、浸出等一系列工艺制取得到工业氢氧化铍。氢氧化铍通过煅烧可制得氧化铍和氟化铍,也可制备成金属铍。氧化铍通过还原反应可制成金属铍,也用于生产铍母合金,其渗入少量添加元素,可制成各种牌号的铍铜合金(图 1)。铍的回收主要由铍产品生产过程中产生的新废和从终端产品中使用的铍产品中产生。

### 1.3 产业链垄断

全球铍产业链高度垄断,主要体现在资源垄断和产品垄断。全球铍资源供应集中在美国 Materion(先进材料公司)公司(王仁财等, 2014),哈萨克斯坦 Ulba Metallurgical(乌尔巴冶金)等少数巨头手中。美国先进材料公司是全球最有影响力的铍资源供应企业,其拥有世界上储量最大的犹他州西部的 Topaz-Spor Mountain(托帕兹-斯波尔山)铍矿。哈萨克斯坦乌尔巴冶金生产也与美国先进材料公司密切相关,苏联解体后乌尔巴冶金就陷入了生产停滞,自 2000 年接受先进材料公司投资后逐渐恢复生产,每年铍产量 170~190 t。

全球铍金属、铍合金、氧化铍产品主要生产企

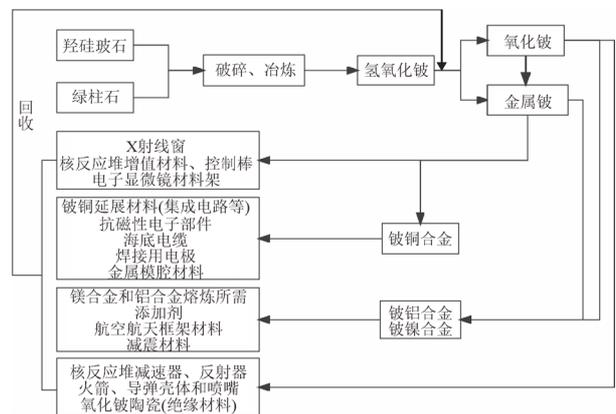


图 1 铍全产业链流向图  
Fig. 1 Flow direction of the entire beryllium industry chain

业有: 美国先进材料公司、日本碍子-特陶株式会社(NGK-NTK)等。其中先进材料公司是全球最大的铍金属、铍合金和氧化铍生产企业, 并拥有强大的铍合金研发能力, 是美国军方关键的合作伙伴。日本NGK 是全球第二大铍铜合金生产商, 精密电气电子领域用铍铜合金多出自该公司及其控股企业。该公司也是全球最大的特种陶瓷生产商和最大的车用火花塞生产企业, 产品主要用于民用。

美国先进材料公司从铍资源开采、提取冶金, 加工制造等建立了完整的产业链, 还直接或间接控股重要铍矿山企业, 从源头上控制原材料供应和多种不同性能用途的铍材料关键技术, 在全球铍产业链中体现出强大的控制力。

## 2 中国铍资源供需情况

### 2.1 资源的分布

我国铍资源储量为 1.42 万 t(BeO), 折合铍金属当量 0.5 万 t, 主要资源为绿柱石。中国铍资源储量仅占全球储量(约 10 万 t 铍金属量)的不到 4%(图 2)。美国为全球储量第一大国, 占全球 60%的储量, 除

美国之外储量比较大的国家还有巴西、俄罗斯、印度等(安泰科, 2021; USGS, 2022)。中国的铍资源主要分布在新疆、江西、云南等地, 主要有可可托海 3 号矿、白杨河铍矿、香花岭和哲理木盟 801 矿等。目前可生产铍精矿的选矿厂有水口山和新疆有色, 年产量约为 1000~1500 t 和 1600 t(许秀婷等, 2021)。

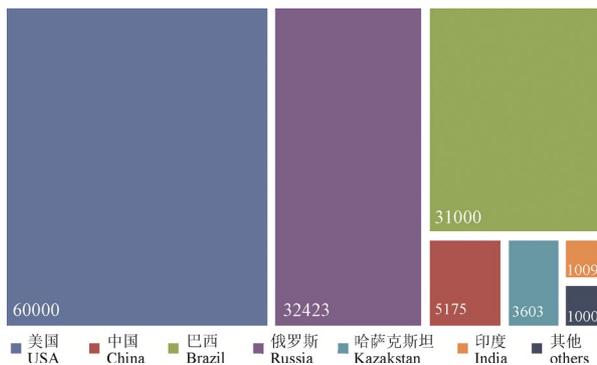


图 2 全球铍资源储量情况 (铍金属当量, t; 数据来源: USGS, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022; 安泰科, 2021; 自然资源部)  
 Fig. 2 Global beryllium reserves (tons, beryllium metal equivalent; data sources: USGS, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022; Antaike, 2021; Ministry of Natural Resources)

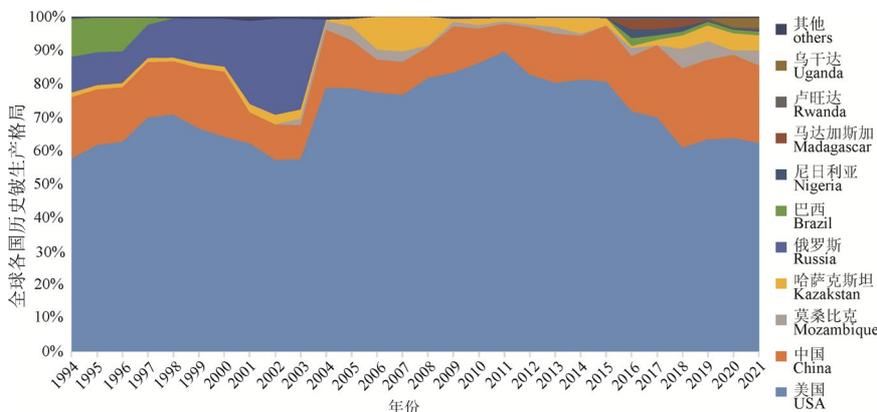


图 3 1994—2021 年全球铍生产格局(数据来源: USGS, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022; 安泰科, 2018, 2020, 2021)  
 Fig. 3 Global beryllium production pattern from 1994 to 2021 (data sources: USGS, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022; Antaike, 2018, 2020, 2021)

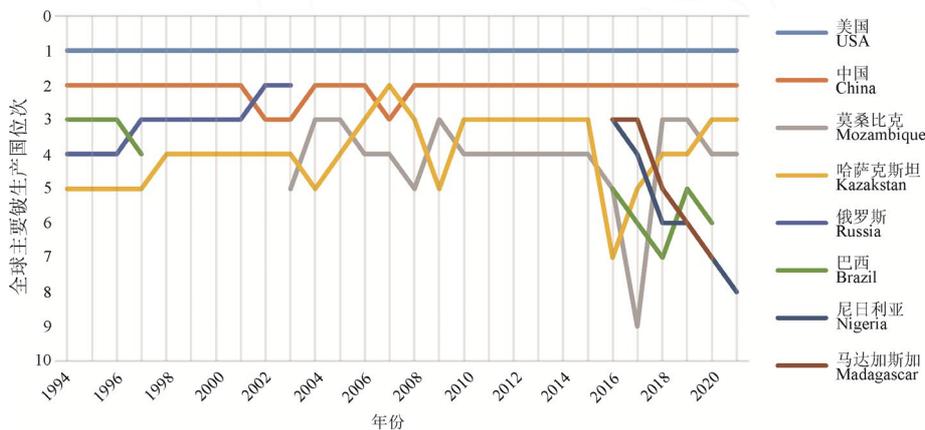


图 4 全球各铍矿生产国历史排名(1994—2021)(数据来源: USGS, 1998, 2000, 2011, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022; 安泰科, 2014, 2016, 2017, 2018, 2020, 2021)  
 Fig. 4 Historical ranking of beryllium-producing countries from 1994 to 2021 (data sources: USGS, 1998, 2000, 2011, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022; Antaike, 2014, 2016, 2017, 2018, 2020, 2021)



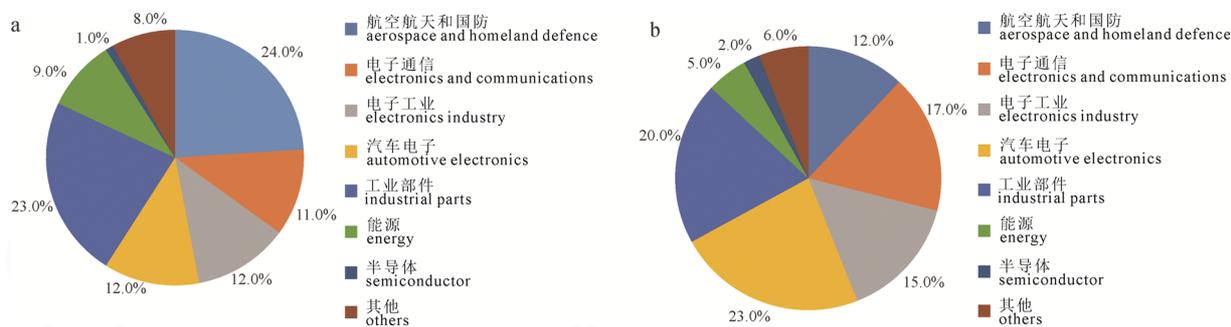


图7 2021年美国铍消费结构(a)与2040年中国铍消费结构预测(b)

Fig. 7 Beryllium consumption structure in the US in 2021 (a) and forecast of beryllium consumption structure in China in 2040 (b)

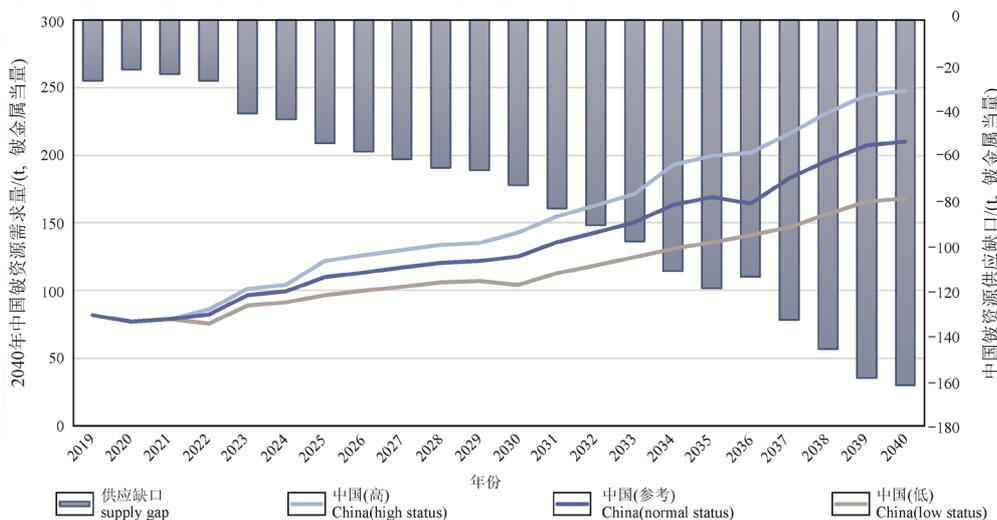


图8 2040年中国铍需求量及供应缺口预测

Fig. 8 Forecast of the demand and supply gap of beryllium in China in 2040

化和智能化已是大势所趋, 铍铜合金在汽车电气和电子市场上的新应用也在不断发展。

中国在 2017—2021 年间, 铍表观消费量从 58.5 t 增长至 2020 年最高的 93.8 t, 2021 年受各种因素影响, 降至 84.2 t。参考美国 2020 年消费结构(图 7a)以及铍在民用领域发展等因素, 预计中国在 2040 年, 航空航天和国防、电子通信、电子工业、汽车电子和工业部件为铍的 5 个最大的消费领域。其中航空航天和国防以及能源工业主要消耗金属铍, 约占铍消费量的 12%~15%, 其余为铍的各种合金与氧化物。

根据山澤逸平和平田彰(1990)提出的产业发展的“雁形理论”(郑京淑和李佳, 2007)以及产业转移的“时间机器”(曾航等, 2014)理论, 预计 2040 年中国的铍消费量以及消费结构与 2021 年美国的铍产业结构类似(图 7b), 随着中国制造业的持续发展并向附加值高的上游转移(黄群慧和贺俊, 2013)带动终端产品需求的快速增长, 汽车电子、机电和装备制造制造业逐渐向中国集聚。本研究基于部门需求预测方法, 未来 20 年中国铍消费增长可分为两个阶段。第一阶段主要驱动力来自航空和航天领域, 此阶段

金属铍的用量增长在铍的各产业部门中增长最快, 预计在 2030 年金属铍需求量将达 17% 的最高比例, 年需求量约为 22 t; 第二阶段受汽车电子和电子通信等民用产业的快速带动。受汽车电气化以及去燃油车政策的影响, 铍基金属在汽车电子领域需求有望进一步扩大, 民用领域的铍合金成为需求增长的主要动力, 铍基金属与金属铍的消费比例呈现 80%~20% 的关系, 到 2040 年, 金属铍需求量将降至总需求量的 12%。

综上, 预计 2025、2030、2035 和 2040 年中国铍需求量分别为 99 t、125 t、169 t 和 210 t(参考方案)。据估算铍供应缺口分别为 55 t、73 t、119 t 和 162 t, 供需缺口逐年扩大, 2024 年对外依存度将达到 77%(图 8)。

### 3 中国铍资源供应风险分析

铍资源在全球分布广泛, 但生产国却具有高度集中性和垄断性。铍的历史价格波动幅度较大, 国际贸易链条过于集中并脆弱, 产生供应风险可能性较高(黄健柏和孙芳, 2020)。我们主要从中国铍资源供应风险、贸易风险分析和产业风险分别阐述中国

表 1 美司法部赫尔芬达(HHI)指数分级标准  
Table 1 Herfindahl-Hirschman Index Grading Standard of the US Department of Justice

市场结构	寡占型				竞争型	
	高寡占I型	高寡占II型	低寡占I型	低寡占II型	竞争I型	竞争II型
HHI 值	$HHI \geq 3000$	$3000 > HHI \geq 1800$	$1800 > HHI \geq 1400$	$1400 > HHI \geq 1000$	$1000 > HHI \geq 500$	$500 > HHI$

面临的挑战。

### 3.1 资源供需风险分析

中国铍资源约 5175 t(铍金属当量), 储量增长缓慢, 但未来铍资源需求将快速增长, 预计到 2040 年中国累计铍资源需求量为 2700 t。若以 2040 年后 210 t/y 的需求量计算, 理论上仅能满足到 2053 年的铍资源需求。

同时, 中国铍矿资源的开采也面临约束。中国没有大型铍矿山, 资源多为共伴生, 品位低, 实际生产低于理论产能, 矿产量难以提升(李娜等, 2019)。预计到 2040 年, 中国铍原矿产量将维持在 2020 年水平, 仅有 50 t, 无法满足 2040 年 210 t 的铍资源需求。因此, 中国铍资源保障面临巨大风险。

### 3.2 铍贸易风险分析

#### (1) 铍贸易风险

图 4 显示, 中国每年从哈萨克斯坦、尼日利亚和莫桑比克进口的铍矿和未锻轧铍粉末共占据中国铍总进口量(铍金属当量)的 86%。

另外两处苏联时期建立的铍矿场在哈萨克斯坦境内, 长期处于关闭状态, 2000 年后哈萨克斯坦接受国外公司投资逐渐修复产能, 但产能水平未知, 主要出口伙伴为中国和美国。中国来自非洲的铍矿多是通过在当地的矿石贸易商零散收集, 最后集中发回国内(梁飞等, 2018)。现代化程度较低, 贸易量以及品质难以保证。

#### (2) 铍贸易集中度指数

衡量铍的全球贸易集中度, 可采用衡量产业市场集中度的赫芬达尔—赫希曼指数(简称赫芬达尔指数, HHI), 该指数用以计量市场中厂商规模的离散度, 该指数愈高, 揭示该市场的垄断集中度越高(表 1, 公式(1); MBA-Lib, 2011)。本研究采取赫芬达尔指数进行铍全球贸易集中度分析。

$$HHI = 10000 \times \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_i}{X}\right)^2 = 10000 \times \sum_{i=1}^N S_i^2 \quad (1)$$

以“铍及其制品/未锻轧铍粉末”的出口格局为基础数据, 将不同进口来源国当作一家独立的“企业”, 则美国、哈萨克斯坦、尼日利亚和莫桑比克四国合计 HHI 指数为 2224, 全球铍原料贸易属于高寡占II型市场结构(MBA-lib)。

2021 年中国从哈萨克斯坦、尼日利亚和莫桑比克进口铍资源和铍产品占进口总量(包括 HS 811212

和 HS 811219)的 88%以上。经过计算, 上述国家在中国进口贸易中赫尔芬达指数为 2799, 高于全球集中度, 说明中国的铍原材料进口贸易呈现较高的寡占度, 存在着较高垄断风险。

#### (3) 产业风险

铍的产业风险体现在极少部分国家对资源、技术和市场的垄断和控制上。美国是唯一具备完整铍产业链的国家, 涵盖了资源勘探、开采、金属冶炼、合金加工以及下游产品生产。美国凭借着自身在铍产业领域的控制力, 严格限制铍原料和产品对包含中国在内的部分国家出口, 部分特种合金和纯铍金属完全不对外销售。美国先进材料公司作为全球最大的铍金属及铍合金生产企业, 具备强大的技术实力和研发能力, 同时控制了数座矿山以保持其资源供应。在尖端铍材料领域, 先进材料公司几乎是市场垄断者。据其官方介绍, 目前人类最先进的红外线望远镜詹姆斯·韦伯太空望远镜(JWST)的 18 块反射镜面采用的就是先进材料公司生产的高抛光度铍反射镜。

哈萨克斯坦乌尔巴冶金在苏联时期就是全苏最重要的铍开采、冶炼、加工、生产联合体。甚至苏联其他加盟共和国开采的铍矿石都运至该企业进行冶炼和生产。苏联解体后长期生产停滞, 直到 21 世纪才逐步恢复生产。乌尔巴冶金也是较早进入国内的国外独资铍业企业, 最高曾一度占据中国铍铜母合金销量的 70%。哈萨克斯坦作为全球重要的铍原材料和中间产品供应国, 在全球铍产业链中起到不可忽视的作用。

## 4 结论建议

### 4.1 结论

(1) 中国铍资源储量不高, 铍矿品位低共伴生情况复杂, 可开采经济性较差。受资源情况限制, 铍资源开发增长潜力不高, 现有储量无法保障中国未来 30 年铍产业发展的需求。

(2) 铍的全球生产格局、产业链和贸易链均呈现出高度集中的特点, 铍基本为几家国际巨头竞争性垄断, 部分企业甚至相互持股以追求利润最大化。中国铍进口贸易格局为高寡占型市场, 主要进口贸易来源集中于哈萨克斯坦、尼日利亚和莫桑比克三国。其中来自哈萨克斯坦的未锻轧铍和铍粉占进口

量的 41.7%。自 2017 年起, 中国成为哈萨克斯坦最大的铍资源贸易伙伴。该国 60% 以上的铍产品出口至中国。尼日利亚、莫桑比克、卢旺达和赞比亚等非洲国家具有较高相似度。铍矿在当地属于宝石采选和加工的废弃物副产品, 主要采集方式为人工筛选, 并未形成工业规模, 存在着供应不稳定、采选效率不高的缺点。由于铍具有毒性, 依靠人工采选存在铍中毒风险。非洲与中国距离较远, 运输周期长, 运输链脆弱。铍贸易量少, 通常采取小批量海运或散货运输的方式, 成本较高。中国铍的贸易呈现高寡占度和供应稳定性差的双重风险。

(3) 金属铍与铍合金广泛用于国防、航空航天、电子电气工业、工业零件以及能源领域。随着中国产业转型、汽车电气化变革以及航空航天产业的快速发展, 铍的需求在未来 20~30 年间将有高速发展。预计到 2040 年, 中国年铍资源需求将达到 210 t 金属当量。其中 80% 以上为高性能牌号铍合金、氧化铍陶瓷等铍化合物。目前这些领域国内企业虽有所涉及, 但部分高端材料产品的生产技术和工艺依旧在少数美、日巨头企业控制下。中国目前在金属铍领域与国际领先水平差距较小, 但在高端铍金属加工领域, 如超高纯度铍金属冶炼技术尚不成熟; 铍金属高精度平整、抛光和成型工艺水平与美国先进材料公司等企业仍有一定差距; 在铍回收利用领域亦有待加强。

#### 4.2 建议

(1) 加强铍开发和开采技术研发, 提高国内铍资源供应能力, 降低铍资源对外依存度。可借鉴美国国防后勤局战略物资局的经验, 从国家层面建立铍资源储备机制, 在国内建立由一家或少数几家企业组成的铍储备联盟, 在国内储备一定量可保障国防安全需求的铍粉末、铍氧化物或铍铜合金。

(2) 拓宽中国铍进口来源, 分散铍资源贸易集中度(HHI 指数)过高的风险。积极开拓新的铍进口来源地。在现有的进口来源国加强与当地企业、政府的合作, 巩固现有铍供应渠道。如通过与当地关键企业资本合作, 保障资源优先供应权。深耕缺乏规模化采选产业的尼日利亚、莫桑比克等非洲国家, 在当地建立一定规模的开采、选矿、初级冶炼基地, 提高资源收集效率并获取更高经济效益。巩固与哈萨克斯坦的供应合作关系, 将其定义为境外铍资源供应的基础保障。针对当前中国所处的外交阶段和中美在全方位竞争的时代, 需建立异于现有以美-欧-加为主导的铍开采、生产及供应体系。

(3) 加强高端铍材料制造、加工技术, 科研攻关关键领域特种材料的国产化工作, 提升高端材料的自主水平, 并加强中下游产业应用研究。同时积极

推动铍替代元素的研发工作, 采用更常见更普遍的材料替代铍, 降低对稀有材料的依赖。

#### Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 92162321, 71991480 and 1991485), and National Social Science Funds of China (Nos. 21&ZD104 and DD20221795).

#### 参考文献:

- MBA-Lib. 2011. 赫芬达尔—赫希曼指数[EB/OL]. [2011-01-13]. <https://wiki.mbalib.com/wiki/%E8%B5%AB%E5%B8%8C%E6%9B%BC%E6%8C%87%E6%95%B0>.
- 安泰科. 2014. 2014 年有色金属市场发展报告[R]. 北京: 安泰科咨询研究部.
- 安泰科. 2016. 2016 年有色金属市场发展报告[R]. 北京: 安泰科咨询研究部.
- 安泰科. 2017. 2017 年有色金属市场发展报告[R]. 北京: 安泰科咨询研究部.
- 安泰科. 2018. 2018 年有色金属市场发展报告[R]. 北京: 安泰科咨询研究部.
- 安泰科. 2020. 2020 年有色金属市场发展报告[R]. 北京: 安泰科咨询研究部.
- 安泰科. 2021. 2021 年有色金属市场发展报告[R]. 北京: 安泰科咨询研究部.
- 曾航, 刘羽, 陶旭骏. 2014. 移动的帝国: 日本移动互联网兴衰启示录[M]. 杭州: 浙江大学出版社.
- 丁孝禹, 李浩, 罗来马, 黄丽枚, 罗广南, 咎祥, 朱晓勇, 吴玉程. 2013. 国际热核试验堆第一壁材料的研究进展[J]. 机械工程材料, 37(11): 6-11.
- 黄健柏, 孙芳. 2020. 中国稀有轻金属关键性动态评估——以锂和铍为例[J]. 长江流域资源与环境, 29(4): 879-888.
- 黄群慧, 贺俊. 2013. “第三次工业革命”与中国经济发展战略调整——技术经济范式转变的视角[J]. 中国工业经济, (1): 5-18.
- 李娜, 高爱红, 王小宁. 2019. 全球铍资源供需形势及建议[J]. 中国矿业, 28(4): 69-73.
- 李笑, 刘志中, 王涛, 荣福杰, 常博文. 2021. 铍及铍铝合金的研究及发展[C]//2021 中国铸造活动周论文集: 66-71.
- 李欣. 2019. 高强铝合金的发展及其材料的制备加工技术[J]. 内燃机与配件, (22): 89-90.
- 联合国贸易统计数据库. 2022. UN Comtrade[DB/OL]. [2022-08-24]. <https://comtrade.un.org/db/dqQuickQuery.aspx>.
- 梁飞, 赵汀, 王登红, 刘超, 王安建. 2018. 中国铍资源供需预测与发展战略[J]. 中国矿业, 27(11): 6-10, 17.
- 林博磊, 尹丽文, 崔荣国, 李冰心, 徐桂芬. 2018. 全球铍资源分布及供需格局[J]. 国土资源情报, (1): 13-17.
- 刘劲松, 高丽丽. 2022. 美国铍矿产业供需格局及产业政策分析[J]. 中国矿业, 31(3): 31-36.
- 山澤逸平, 平田章. 1991. 先進諸国の産業調整と発展途上

国[M]. 东京: 胜美印刷株式会社.

- 王仁财, 邢佳韵, 彭浩. 2014. 美国铍资源战略启示[J]. 中国矿业, 23(10): 21-24.
- 王伟. 2014. 铍铜合金的生产和应用前景分析[J]. 有色金属加工, 43(2): 9-12.
- 许德美, 秦高梧, 李峰, 王战宏, 钟景明, 何季麟, 何力军. 2014. 国内外铍及含铍材料的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 24(5): 1212-1223.
- 许秀婷, 教镇渤, 海国泉, 杨雨, 李军丽, 滕莹雪. 2021. 铍矿产业发展现状[J]. 新疆有色金属, 44(1): 4-8.
- 赵云鹏, 曾福明, 周志勇, 成志忠, 孙蕾. 2016. 新型铝合金的发展及其在密封舱结构上的工程应用[J]. 载人航天, 22(3): 302-307.
- 郑京淑, 李佳. 2007. “后雁形模式”与东亚贸易结构的变化[J]. 市场论坛, (3): 31-34.
- 郑莉芳, 王晓刚, 岳丽娜, 黄俊忠, 钟景明. 2021. 稀有轻金属铍及其合金的应用进展[J]. 稀有金属, 45(4): 475-483.
- 中华人民共和国海关总署. 2022. 海关统计数据在线平台 [DB/OL]. [2022-10-08]. <http://43.248.49.97>.

## References:

- Antaika. 2014. The development of nonferrous metals market report in 2014[R]. Beijing: Beijing Antaika Consulting and Research Department(in Chinese).
- Antaika. 2016. The development of nonferrous metals market report in 2016[R]. Beijing: Beijing Antaika Consulting and Research Department(in Chinese).
- Antaika. 2017. The development of nonferrous metals market report in 2017[R]. Beijing: Beijing Antaika Consulting and Research Department(in Chinese).
- Antaika. 2018. The development of nonferrous metals market report in 2018[R]. Beijing: Beijing Antaika Consulting and Research Department(in Chinese).
- Antaika. 2020. The development of nonferrous metals market report in 2020[R]. Beijing: Beijing Antaika Consulting and Research Department(in Chinese).
- Antaika. 2021. The development of nonferrous metals market report in 2021[R]. Beijing: Beijing Antaika Consulting and Research Department(in Chinese).
- DING Xiao-yu, LI Hao, LUO Lai-ma, HUANG Li-mei, LUO Guang-nan, ZAN Xiang, ZHU Xiao-yong, WU Yu-cheng. 2013. Progress in research of international thermonuclear experimental reactor first wall materials[J]. Materials of Mechanical Engineering, 37(11): 6-11(in Chinese with English abstract).
- HUANG Jian-bai, SUN Fang. 2020. Dynamic criticality assessment of rare light metals in China: Case study of lithium and beryllium[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 29(4): 879-888(in Chinese with English abstract).
- HUANG Qun-hui, HE Jun. 2013. “The Third Industrial Revolution” and the adjustment of China’s economic strategy——Transformation of techno-economic paradigm[J]. China Industrial Economics, (1): 5-18(in Chinese with English abstract).
- LI Na, GAO Ai-hong, WANG Xiao-ning. 2019. Global beryllium supply and demand trends and its enlightenment[J]. China Mining Magazine, 28(4): 69-73(in Chinese with English abstract).
- LI Xiao, LIU Zhi-zhong, WANG Tao, RONG Fu-jie, CHANG Bo-wen. 2021. Research and development of beryllium and beryllium aluminum alloys[C]//Collection of Essays on Chinese Foundry Activities Week: 66-71(in Chinese with English abstract).
- LI Xin. 2019. Development of high strength aluminum alloy and its material preparation and processing technology[J]. Internal Combustion Engine & Parts, (22): 89-90(in Chinese).
- LIANG Fei, ZHAO Ting, WANG Deng-hong, LIU Chao, WANG An-jian. 2018. Supply and demand forecast and development strategy of beryllium resources in China[J]. China Mining Magazine, 27(11): 6-10(in Chinese with English abstract).
- LIN Bo-lei, YIN Li-wen, CUI Rong-guo, LI Bing-xin, XU Gui-fen. 2018. Global beryllium resources distribution and supply and demand pattern[J]. Land and Resources Information, (1): 13-17(in Chinese with English abstract).
- LIU Jin-song, GAO Li-li. 2022. Analysis on the supply and demand pattern and industrial policy of beryllium mine industry in the United States[J]. China Mining Magazine, 31(3): 31-36(in Chinese with English abstract).
- MBA-Lib. 2011. Herfindahl-Hirschman Index[EB/OL]. [2011-01-13]. <https://wiki.mbalib.com/wiki/%E8%B5%AB%E5%B8%8C%E6%9B%BC%E6%8C%87%E6%95%B0>(in Chinese).
- MIYAMOTO M, SUGIMOTO Y, NISHIJIMA D, BALDWIN M J, DOERNER R P, ZALOZNIK A, KIM J H, NAKAMICHI M. 2021. Comparative study of surface modification and D retention between beryllium and beryllides under high flux plasma exposure[J]. Nuclear Materials and Energy, 27: 101014.
- United Nations Commodity Trade Statistics Databases. 2022. UN Comtrade [DB/OL]. [2022-08-24]. <https://comtrade.un.org/db/dqQuickQuery.aspx>.
- USGS (U. S. Geological Survey). 1998. Mineral Commodity Summaries [EB/OL]. [2021-10-12]. <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/mineral-pubs/beryllium/100398.pdf>.
- USGS (U. S. Geological Survey). 2000. Mineral Commodity Summaries [EB/OL]. [2021-10-12]. <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/mineral-pubs/beryllium/100300.pdf>.
- USGS (U. S. Geological Survey). 2011. Mineral Commodity Summaries [EB/OL]. [2021-10-12]. <https://d9-wret.s3.us-w>

- est-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/mineral-pubs/beryllium/mcs-2011-beryl.pdf.
- USGS (U. S. Geological Survey). 2013. Mineral Commodity Summaries [EB/OL]. [2021-10-12]. <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/mineral-pubs/beryllium/mcs-2013-beryl.pdf>.
- USGS (U. S. Geological Survey). 2014. Mineral Commodity Summaries [EB/OL]. [2021-10-12]. <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/mineral-pubs/beryllium/mcs-2014-beryl.pdf>.
- USGS (U. S. Geological Survey). 2015. Mineral Commodity Summaries [EB/OL]. [2021-10-12]. <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/mineral-pubs/beryllium/mcs-2015-beryl.pdf>.
- USGS (U. S. Geological Survey). 2016. Mineral Commodity Summaries [EB/OL]. [2021-10-12]. <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/mineral-pubs/beryllium/mcs-2016-beryl.pdf>.
- USGS (U. S. Geological Survey). 2017. Mineral Commodity Summaries [EB/OL]. [2021-10-12]. <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/mineral-pubs/beryllium/mcs-2017-beryl.pdf>.
- USGS (U. S. Geological Survey). 2018. Minerals yearbook beryllium ([ADVANCE RELEASE])[EB/OL]. [2021-10-12]. <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/myb1-2018-beryl.pdf>.
- USGS (U. S. Geological Survey). 2019. Mineral Commodity summaries (Beryllium)[EB/OL]. [2019-02-12]. <https://d9-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/mcs-2019-beryl.pdf>.
- USGS (U. S. Geological Survey). 2020. Mineral Commodity summaries (Beryllium)[EB/OL]. [2020-01-15]. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-beryllium.pdf>.
- USGS (U. S. Geological Survey). 2021. Mineral Commodity summaries (Beryllium)[EB/OL]. [2021-01-15]. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-beryllium.pdf>.
- USGS (U. S. Geological Survey). 2022. Mineral Commodity summaries (Beryllium)[EB/OL]. [2022-01-15]. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-beryllium.pdf>.
- WANG Ren-cai, XING Jia-yun, PENG Hao. 2014. Enlightenment of United States' beryllium resources strategy[J]. *China Mining Magazine*, 23(10): 21-24(in Chinese with English abstract).
- WANG Wei. 2014. Production status and application prospect of beryllium copper alloy[J]. *Nonferrous Metals Processing*, 43(2): 9-12(in Chinese with English abstract).
- WELCH L, RINGEN K, BINGHAM E, DEMENT J, TAKARO T, MCGOWAN W, CHEN An-na, QUINN P. 2004. Screening for beryllium disease among construction trade workers at department of energy nuclear sites[J]. *American Journal of Industrial Medicine*, 46: 207-218.
- XU De-mei, QIN Gao-wu, LI Feng, WANG Zhan-hong, ZHONG Jing-ming, HE Ji-lin, HE Li-jun. 2014. Advances in beryllium and beryllium-containing materials[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 24(5): 1212-1223(in Chinese with English abstract).
- XU Xiu-ting, JIAO Zhen-bo, HAI Guo-quan, YANG Yu, LI Jun-li, TENG Ying-xue. 2021. Development status of beryllium mining industry[J]. *Xinjiang Non-ferrous Metals*, 44(1): 4-8(in Chinese).
- YAMAZAWA I, HIRATA A. 1991. Developed countries' trade policies toward developing countries[M]. Tokyo: Asian Economic Research Institute(in Japanese).
- ZENG Hang, LIU Yu, TAO Xu-jun. 2014. Mobile empire: The apocalypse of the rise and fall of the mobile internet in Japan[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press(in Chinese).
- ZHAO Yun-peng, ZENG Fu-ming, ZHOU Zhi-yong, CHENG Zhi-zhong, SUN Lei. 2016. Development and potential applications of advanced aluminum alloy in spacecraft pressurized cabin[J]. *Manned Spaceflight*, 22(3): 302-307(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Jing-shu, LI Jia. 2007. "Post-flying geese pattern" and the change of trade structure in East Asia[J]. *Market Forum*, (3): 31-34(in Chinese).
- ZHENG Li-fang, WANG Xiao-gang, YUE Li-na, HUANG Jun-zhong, ZHONG Jing-ming. 2021. Progress in application of rare light metal beryllium and its alloys[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 45(4): 475-483(in Chinese with English abstract).