

我国钴资源产业发展现状与对策研究

段俊¹, 徐刚¹, 汤中立^{1*}, 闫海卿¹, 刘君泰², 陈阳阳¹, 刘奇¹

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054; 2. 甘肃省地质矿产勘查开发局第二地质矿产勘查院, 兰州 730020)

摘要: 钴金属是新能源行业发展所必需的材料。根据钴资源产业最新数据, 本文通过分析全球及我国钴资源禀赋、钴精矿与精炼钴供需情况和钴资源产业政策, 得出我国钴资源产业发展存在的问题为: 我国钴矿资源极其稀缺, 但却是全球第一大精炼钴生产国和钴消费国; 超高的对外依存度叠加不可替代的单一进口来源, 使得我国钴资源保障面临重大隐患。针对上述问题, 提出下列钴资源保障对策: 加强我国钴矿资源有效增储举措; 拓展多元化钴资源进口渠道, 确保稳定获取境外钴矿资源; 实施扶持性政策, 帮扶海外中资企业钴资源平稳产出; 建立钴资源储备体系, 提高钴资源保障能力; 提升钴资源综合利用技术水平, 增加可利用钴资源量; 重视海底铁锰结核(结壳)等潜在钴资源开采方案研究。

关键词: 钴资源; 钴精矿; 精炼钴; 对外依存度; 钴产业链

中图分类号: P612; P617; P618 **文献标识码:** A

Current Situation and Countermeasure Analysis of China's Cobalt Industry

Duan Jun¹, Xu Gang¹, Tang Zhongli^{1*}, Yan Haiqing¹, Liu Juntao², Chen Yangyang¹, Liu Qi¹

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Second Geological and Mineral Exploration Institute of Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Cobalt is an essential material for the development of the new energy industry. Based on the latest data regarding the cobalt resource industry of China and worldwide, this study analyzes the challenges faced by the development of China's cobalt resource industry from the aspects of cobalt resource endowment, supply-demand situation of cobalt concentrate and refined cobalt, and industry policy. China is the world's largest producer of refined cobalt and largest consumer of cobalt; however, its cobalt resources are extremely scarce and its ultra-high dependence on foreign countries and single source of imports have put China's cobalt resource security at risk. In response to the above problems, we propose the following countermeasures: (1) adopting effective measures to increase China's cobalt reserves; (2) diversifying cobalt import channels to ensure a stable access to overseas cobalt resources; (3) implementing supportive policies to help China-invested overseas enterprises stabilize their production; (4) establishing a cobalt reserve system to improve the cobalt resource guarantee capacity of China; (5) strengthening the comprehensive utilization technologies to increase the amount of available cobalt resources; and (6) emphasizing research of potential cobalt resources, such as sea-floor cobalt resources in ferromanganese nodules and crusts.

收稿日期: 2023-12-20; **修回日期:** 2024-01-23

通讯作者: *汤中立, 长安大学地球科学与资源学院教授, 中国工程院院士, 主要研究方向为地质矿产勘查与岩浆矿床研究;

E-mail: zytangzl@chd.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“面向新能源、新材料的战略矿产保障研究”(2022-XY-82), “新形势下我国钾锂等关键战略性矿产资源-产业高质量发展战略研究”(2023-XY-20), “我国能源安全战略研究”(2022-JB-05); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2021JM-157, 2023-JC-YB-224)

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

Keywords: cobalt resources; cobalt concentrate; refined cobalt; external dependence; cobalt industry chain

一、前言

钴金属因具有良好的耐高温、耐腐蚀、铁磁性和延展性而被广泛应用于航空航天、机械制造、电气电子、化学、陶瓷等工业领域^[1,2]。从自然界采掘的钴矿石经过富集处理后，形成品位较高的矿料，称为钴精矿。钴精矿经加工后制成钴中间品或直接制成氯化钴、硫酸钴等钴盐产品，称为精炼钴。钴盐产品经加工后可制成钴氧化物、钴粉及电解钴等产品。金属钴和钴粉等主要用于高温合金、硬质合金、催化剂和磁性材料领域；三氧化二钴主要用于计算机、通信类、消费类电子产品（3C）的锂电池，硫酸钴主要用于动力锂电池领域。3C类锂电池的正极材料以钴酸锂为主，主要用于便携式电子产品，如手机、笔记本电脑、数码电子产品等；动力锂电池正极材料以三元材料（如镍钴锰酸锂和镍钴铝酸锂）、磷酸铁锂等为主，主要用于新能源汽车^[3]。钴对确保锂电池的耐久性和安全性至关重要，是实现新能源转型的重要战略金属^[4,5]。

我国的钴资源储量极其有限，作为全球最大的钴消费国，每年需要进口大量的钴原料，且进口渠道单一。随着国际钴价飙升，进口成本不断增加，使得我国钴资源供应链面临严峻挑战^[6-12]。此外，美国《通胀削减法案》和欧盟《关键原材料法案》等政策的实施与我国钴资源产业供需之间存在竞争关系。全球范围内钴供应链的不稳定性和不确定性加大了我国的钴资源风险，保障钴原材料供应，确保国内钴资源产业平稳、持久发展问题亟待解决。

针对上述问题，本文通过总结全球及我国钴资源产业的发展现状及趋势，分析我国钴资源产业发展面临的问题，提出保障我国钴资源产业发展的对策建议。

二、全球钴资源产业发展现状和趋势

（一）全球钴资源禀赋

全球钴资源相对丰富，且潜在资源量很大，可以保证全球经济发展对钴的需求^[11-13]。根据美国地质调查局数据，截至2022年，全球钴资源储量约为 8.3×10^6 t^[14]。其中，刚果民主共和国的钴资源储量

为 4×10^6 t，约占全球钴资源总量的48%，其次是澳大利亚、印度尼西亚、古巴、菲律宾等国（见表1）。此外，在大西洋、印度洋和太平洋海底的多金属结核（结壳）中发现了超过 1.2×10^8 t的钴资源^[13-18]，但目前尚不能被利用。

陆地上钴矿床的主要类型有：沉积岩容矿型铜-钴矿床、红土型镍-钴矿床、岩浆型镍-钴硫化物矿床、热液脉型钴矿床四种。沉积岩容矿型铜-钴矿床中的钴资源量占全球钴资源量的41%^[19-22]，主要集中在中非新元古代铜矿带，该矿带由赞比亚中部向西南延伸至刚果民主共和国境内，具有规模大、品位高的特点，主要铜-钴矿有Katanga、Mutanda、Tenke Fungurume（TFM）、Kisanfu（KFM）等^[23-26]；红土型镍-钴矿床占全球钴资源量的36%，主要分布在北纬 23.6° ~南纬 23° 的热带地区^[27,28]，包括新喀里多尼亚、印度尼西亚、菲律宾等国家，主要富钴矿物是钴土矿、含镍钴土矿和含钴的铁氢氧化物，钴平均品位为0.06%~0.09%；岩浆型镍-钴矿床占全球钴资源量的15%，绝大部分集中在镍黄铁矿中，该类矿床中的钴含量与镍品位密切相关，镍品位越高，钴的含量也就越高^[29]；热液脉型钴矿床占全球钴资源量的2%，目前仅有摩洛哥

表1 全球钴资源产量与储量分布表^[14]

国家	产量/t		储量/ $\times 10^4$ t
	2021年	2022年	2022年
刚果民主共和国	119 000	130 000	400
印度尼西亚	2700	10 000	60
澳大利亚	5295	5900	150
古巴	4000	3800	50
菲律宾	3600	3800	26
俄罗斯	8000	8900	25
加拿大	4361	3900	22
中国	2200	2200	14
马达加斯加	2800	3000	10
巴布亚新几内亚	2953	3000	4.7
美国	650	800	6.9
土耳其	2400	2700	3.6
摩洛哥	2300	2300	1.3
其他国家	4567	5200	61
合计	164 826	185 500	834.5

哥 Bou Azzer 地区的超大型钴（镍-金）矿床以钴为主要开采对象，矿体赋存于蛇纹岩与中酸性侵入岩体的接触部位，含钴矿物主要为镍钴砷矿物，钴品位在 1.0%~1.6%，最高可达 18%^[21]。

（二）钴资源生产情况

1. 钴精矿供应概况

2022 年全球钴金属产量为 1.9×10^5 t，钴精矿主要供应国包括刚果民主共和国（73%）、印度尼西亚（5%）、澳大利亚（3%）、菲律宾（3%）^[14]等（见图 1）。刚果民主共和国在全球钴供应中占主导地位，2022 年的钴产量为 1.3×10^5 t。刚果民主共和国主要的钴精矿生产商有嘉能可斯特拉塔股份有限公司和洛阳栾川钼业集团股份有限公司（以下简称洛阳钼业）等。嘉能可斯特拉塔股份有限公司旗下拥有两大世界级铜钴矿山 Mutanda 和 Katanga，2022 年的钴产量共计 4.9×10^4 t。洛阳钼业旗下拥有两大新兴的世界级铜钴矿山 TFM 和 KFM，2022 年 TFM 钴产量为 2.03×10^4 t，占全球钴产量的 10%。

2022 年，印度尼西亚成为第二大钴生产国，钴产量为 1×10^4 t，超过了澳大利亚、菲律宾和古巴等主要钴生产国。随着红土镍矿湿法冶炼工艺的不断发展和，高压酸浸工艺（HPAL）已成为处理低品位红土型镍-钴矿的主流技术路线。宁波力勤资源科技开发有限公司的红土镍矿湿法冶炼项目（OBI 项

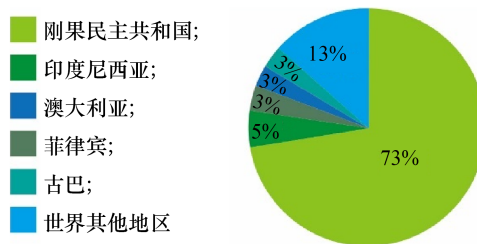


图1 2022 年全球钴供应量概况

目）是印度尼西亚首个 HPAL 项目，2022 年的钴产量为 2800 t；华友钴业股份有限公司的华越镍钴项目是第二家投产的 HPAL 项目，2022 年的钴产量为 2400 t；格林美股份有限公司的青美邦 HPAL 项目在 2022 年 8 月份投产后，钴产量达 1600 t。随着印度尼西亚镍-钴化合物生产线的逐渐投产，红土型镍-钴矿有望成为未来钴供应增速最快的原料来源（见表 2）^[14,30]。

2. 精炼钴供应概况

2022 年，全球精炼钴供应量为 1.65×10^5 t，同比增加 1.2×10^4 t^[31]。我国作为全球主要精炼钴供应国，2022 年精炼钴（包括电解钴、钴粉、钴盐等）整体产量约为 1.45×10^5 t，占全球精炼钴供应量的 76%。越来越多的精炼钴化学品（硫酸钴和其他盐类）被用于制造锂电池，2022 年的精炼钴化学品占到精炼钴总产量的 80%。2022 年，我国精炼钴化学品产量占全球精炼钴化学品供应量的 91%；其他国

表 2 2021—2025 年全球主要钴增量项目情况

（单位：t）

公司名称	项目	类型	时间/年				
			2021	2022	2023E	2024E	2025E
嘉能可斯特拉塔股份有限公司	Mutanda 矿 ⁺	铜-钴矿 ⁺	3900	15 000	16 000	16 000	20 000
Chemaf Sarl 钴矿公司	Mutoshi 矿 ⁺	铜-钴矿 ⁺			4000	16 000	16 000
洛阳钼业	Kisanfu 矿 ⁺	铜-钴矿 ⁺			10 000	25 000	30 000
洛阳钼业	Tenke Fungurume 矿 ⁺	铜-钴矿 ⁺	18 501	19 000	22 000	35 000	37 000
金川集团股份有限公司	Musconoi 矿 ⁺	铜-钴矿 ⁺				3000	7000
中国铁路工程集团有限公司	Sicomines 矿 ⁺	铜-钴矿 ⁺	1316	3000	4000	6000	6000
华友钴业股份有限公司	华越 HPAL 项目	湿法镍		2400	7800	7800	7800
华友钴业股份有限公司	华飞 HPAL 项目	湿法镍			3750	7500	15 000
华友钴业股份有限公司	华山 HPAL 项目	湿法镍				1000	7500
华友钴业股份有限公司	淡水河谷公司合资 HPAL 项目	湿法镍				800	4000
宁波力勤资源科技股份有限公司	OBI HPAL 项目	湿法镍	1125	2800	7825	12 375	12 375
格林美股份有限公司	青美邦 HPAL 项目	湿法镍			2000	6000	8000

注：E 代表预估的产量。

家主要是生产精炼钴金属产品，占金属钴供应量的66%。除中国外，主要精炼钴供应国还包括芬兰、加拿大、挪威和澳大利亚等国家（见表3）^[30]。

（三）精炼钴消费及需求情况

2015—2020年，全球钴需求量从2015年的不足 1×10^5 t增长到2020年的 1.43×10^5 t，以9.2%的复合年均增长率增长。2020年，疫情对大多数钴应用行业形成了冲击，需求增长放缓甚至处于停滞状态。随着全球经济复苏，锂电池市场需求快速增长，2021年的钴需求量上升至 1.75×10^5 t，比2020年增加了 3.16×10^4 t^[32]。2022年钴需求量增至 1.87×10^5 t，比2021年增加了 1.2×10^4 t。如前所述，钴金属主要被应用于锂电池、合金、磁性材料等产业，随着第五代移动通信（5G）技术与新能源汽车行业的快速发展，钴在电池产业的用量超过了高温合金产业，2022年，锂电池的钴用量占钴总需求量的70%^[30]（见图2）。

1. 新能源汽车市场

2021年，全球新能源汽车销量（纯电动和混合

动力汽车的总和）增加340万辆，达到670万辆，销量同比增长102%。2022年，全球电动汽车销量增长380万辆，达到1030万辆^[31]。全球三大新能源汽车市场分别为中国、欧洲和北美（见图3）。电动汽车行业成为全球最大的钴消费行业，占钴总消耗量的40%（见图2），且这一比例还在继续上升。2022年，新能源汽车行业的钴需求量达到 7.4×10^4 t，较2021年（ 5.6×10^4 t）增长33%。

2. 便携式电子产品

随着5G技术产品的涌现，智能手机的更新换代，增强现实（AR）设备、虚拟现实（VR）设备、无人机等新兴电子产品广泛应用于医疗、娱乐、安全等领域，便携式电子产品需求稳步增长。2020年，笔记本电脑、平板电脑等便携式设备的购买量显著增加。

钴对便携式电子产品行业的发展至关重要，77%的便携式电子产品需要钴酸锂（LCO）作为锂电池的正极材料。2021年，便携式电子产品的钴需求量占钴总需求量的31%，共计 5.2×10^4 t^[32]。其中手机是最大的应用市场。2021年，手机市场钴需求量约为 2.6×10^4 t，同比增长12%。第二大市场是笔记本电脑和平板电脑，2021年的钴需求量为 1.6×10^4 t，同比增长约1200 t。此外，无人机正越来越多地用于娱乐、工业和军事，占2021年锂离子电池钴需求增长量的5%。2022年，便携式电子产品的需求继续下滑，不再是钴需求量的最大驱动力。根据国际数据公司的电子产品消费数据，2022年全球智能手机出货量同比下降11.3%，笔记本和平板电脑市场也面临压力。

3. 工业应用

2021年，工业应用占钴总需求量的25%，包括多种金属和化学产品应用。金属应用包括硬质合金、高温合金和钐钴磁铁；化学应用包括颜料、催化剂、轮胎、油墨和干燥剂。2021年金属应用需求量占工业应用总需求量的57%。硬质合金是最大的

表3 全球精炼钴产量份额

国家/地区	全球精炼钴产量份额/%	
	2021年	2022年
中国	74	76
芬兰	10	10
加拿大	4	4
挪威	2	2
澳大利亚	2	2
马达加斯加	1	2
刚果民主共和国	1	1
摩洛哥	1	1
俄罗斯	1	1
世界其他地区	4	1

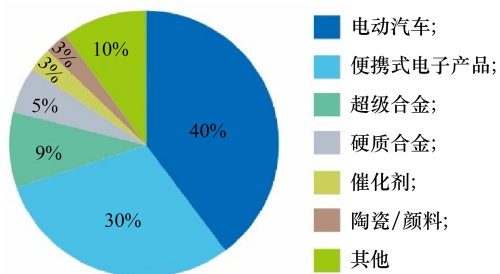


图2 2022年钴应用量概况

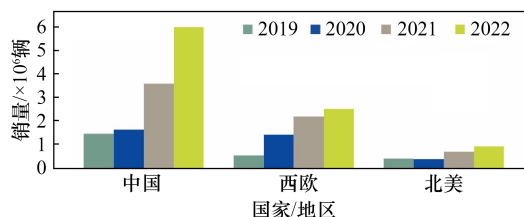


图3 2019—2022年全球电动汽车销量图

钴金属应用行业，占 2021 年工业金属应用量的 37%。聚酯产品是钴化学应用最大的消耗领域（占 2021 年工业化学应用量的 31%），紧随其后的是陶瓷和染料（占工业化学应用量的 28%）。2022 年，钴的工业应用占钴总需求量的 28%，对年需求增长的贡献率为 6%（约为 1300 t）。

（四）主要国家钴产业政策

1. 美国《通胀削减法案》

2022 年 8 月，美国政府通过了《通胀削减法案》，该法案规定，电池中一定比例的关键矿物材料必须在美国或与其签订自由贸易协定的国家开采或加工，才能享受相应的优惠政策。此外，电池中不得包含由外国关注实体（FEOC）制造或组装的部件，以及由 FEOC 开采、加工或回收的关键矿物。2023 年 12 月，美国能源部明确 FEOC 涵盖的国家包括中国、俄罗斯、朝鲜和伊朗。

目前，美国已经与 20 个国家签订了全面自由贸易协定，包括澳大利亚、巴西、加拿大等。美国财政部和国内收入署提议，将更多国家纳入自由贸易协定伙伴范畴。2023 年 3 月，美国与日本签订了《关键矿产协议》，其中包含“确保关键矿产自由贸易”的强制义务。《通胀削减法案》可能会重新塑造全球钴供应链。目前未被列入《通胀削减法案》合规国家名单的主要钴生产国有刚果民主共和国、印度尼西亚、马达加斯加和菲律宾（2022 年，这些国家钴开采总量占全球钴产量的 82%）。2023 年 1 月，美国与刚果民主共和国、赞比亚签署了一份关于“电动汽车电池价值链”的谅解备忘录。因此，从长远角度看，美国或其他合规国家的精炼钴原料仍需要来自这些国家。

2. 欧盟《关键原材料法案》

考虑到美国《通胀削减法案》颁布可能会使电池投资者转移到美国本土，欧盟于 2023 年 3 月出台了《关键原材料法案》，承诺在未来 10 年大幅增加关键原材料的开采和矿物加工，发展欧洲清洁能源经济，减少对中国的依赖。《关键原材料法案》的目标是到 2030 年，欧洲矿业至少满足欧盟战略原材料年消费量的 10%，至少满足其加工矿物需求的 40%，至少有 15% 的矿产材料来自欧洲本土的回收利用，来自非欧盟国家的关键原材料比例不超过 65%。钴与其他重要的电池金属一起被列为关键战略原材料。为了实现《关键原材料法案》制定的目标，欧盟将加大对精炼钴的投资，精钴矿原料将会依赖刚果民主共和国供应。

3. 加拿大政府基金支持关键矿产行业

2023 年 11 月，加拿大能源和自然资源部宣布将在 7 年内提供高达 15 亿美元的资金，以支持“战略性”基础设施项目的发展，实现关键矿产的可持续生产，并将资源与市场联系起来，强化供应链。强调加拿大将与美国互相支持，推动电动汽车行业的发展，并将制造业、炼油业和采矿加工业迁回北美。

三、我国钴资源产业发展现状和趋势

（一）我国钴资源禀赋

截至 2022 年，我国已探明钴资源量为 1.4×10^5 t，仅占全球钴资源量的 1.7%^[14]。我国的钴矿特征为：富矿少、贫矿多，鲜有独立的钴矿床，主要伴生在其他矿产中。最主要含钴矿床类型为：岩浆镍-钴硫化物矿床、热液及火山成因钴多金属矿床、沉积岩容矿型铜-钴矿床^[19]。目前，我国可利用的钴金属全部来自岩浆型镍-钴矿床，且回收率不足

表 4 我国主要钴矿床分布表

序号	矿床名称	赋矿位置	矿床类型	矿床规模	备注	文献
1	甘肃金川矿床	华北克拉通	岩浆型镍-钴矿	大型	伴生	[34]
2	新疆图拉尔根矿床	中亚造山带	岩浆型镍-钴矿	中型	伴生	[35]
3	新疆黄山矿床	中亚造山带	岩浆型镍-钴矿	中型	伴生	[19]
4	新疆黄山东矿床	中亚造山带	岩浆型镍-钴矿	中型	伴生	[19]
5	吉林红旗岭矿床	中亚造山带	岩浆型镍-钴矿	中型	伴生	[19]
6	青海夏日哈木矿床	东昆仑造山带	岩浆型镍-钴矿	中型	伴生	[36]
7	吉林大横路矿床	辽东-吉南成矿带	沉积岩容矿型铜-钴矿	大型	共生	[37]
8	青海德尔尼矿床	东昆仑造山带	块状硫化物型铜-钴矿	大型	共生	[19]

20%^[33]，以上3类钴矿床分布见表4。

(1) 岩浆镍-钴矿床，位于华北克拉通南缘的金川铜镍硫化物矿床是我国钴储量最大的矿床，伴生钴品位为0.05%~0.11%，金属量约为 1.6×10^5 t，产量占全国的70%以上^[34]；位于中亚造山带南缘图拉尔根、黄山西、黄山东和红旗岭铜镍矿床中的钴品位为0.03%~0.05%，金属量约为 $1 \times 10^4 \sim 2 \times 10^4$ t；东昆仑造山带夏日哈木铜镍矿床中的钴品位约为0.03%，金属量约为 4.3×10^4 t^[35]。此外岩浆型钒钛磁铁矿床中也伴生大量钴，如攀枝花钒钛磁铁矿床中的钴品位为0.01%~0.02%，金属量约为 2×10^4 t^[19]。

(2) 热液及火山成因钴多金属矿床，青海德尔尼铜钴矿是赋存于蛇绿岩中的块状硫化物矿床^[5]，该矿床为大型铜钴矿，钴品位约为0.1%，钴金属量约为 3×10^4 t^[19]。此外，矽卡岩和铁氧化物-铜-金(IOCg)型矿床中伴生大量钴，该类型占据全国钴资源量的16%^[29]。

(3) 沉积岩容矿型铜-钴矿床，辽吉裂谷目前已发现10余处大中型及小型铜-钴矿床，其中大横路铜矿床的钴品位为0.04%，金属量 $>2 \times 10^4$ t^[36]，该矿床目前尚未开发利用，且成因仍存在争议。

(二) 我国钴资源生产和需求情况

1. 钴精矿供应概况

在钴原料供应方面，2008年以来，国内钴需求快速增长，国际钴价飙升，刺激国内矿山扩大开采。2016年，国内钴产量达到7700 t的历史最高水平；2016年后，进口原材料成本低于国内矿山生产的钴，国内矿山钴产量稳步下降，最近几年国内钴产量稳定在2200 t。

2013年，刚果民主共和国执行采矿禁令，限制原料出口，导致我国钴矿石进口量逐年减少，钴湿法冶炼中间品进口逐年增加。2022年，我国进口钴的湿法冶炼中间产品为 3.466×10^5 t，钴矿砂及其精矿为 2.62×10^4 t，其他钴矿及冶炼钴时所得的中间产品为 1.1×10^4 t，未锻轧钴为2700 t，锻轧钴及钴制品为1000 t。经折合，2022年全年进口钴金属量约为 1.13×10^5 t^[38]，是国内钴制品企业最主要的原料来源。此外，随着二次资源回收产业的发展，2022年我国回收的金属钴产量约为 2.7×10^4 t，主要原料有废旧三元锂电池、钴酸锂电池，以及锂电池生产过程中产生的报废料、边角料等^[38]。

2. 精炼钴生产、需求概况

2022年，我国精炼钴（包括电解钴、钴粉、钴盐等，折合金属量）整体产量约为 1.45×10^5 t。国内钴产品的消费量约为 1.41×10^5 t，约有4000 t的钴产品出口，其中锂电池是钴产品的最大终端消费领域。2022年，我国三氧化二钴的产量（钴酸锂前驱）为 6.7×10^4 t，硫酸钴（三元锂电池材料前驱）的产量为 8.7×10^4 t，消费金属钴合计约为 1.25×10^4 t。

除了用于锂电池外，钴粉（电解钴、电积钴）还用于硬质合金、磁性材料、钴化合物、催化剂等生产。随着装备制造业、信息技术等高新技术产业发展持续良好，我国硬质合金产业向高质量方向稳定发展。上海有色金属网显示，我国硬质合金产量从2010年的 2.2×10^4 t，增长至2022年的 4.9×10^4 t（消费钴粉约5000 t）。此外，2022年我国钐钴磁铁产量约为3000 t，消费钴粉约为1500 t；其他消费及库存钴约为9500 t。

四、我国钴资源产业存在的问题

(一) 钴资源储量极低

我国的钴资源极其稀缺，截至2022年年底，我国已探明的钴资源可采储量仅占全球钴储量的1.7%。我国已知钴矿有150处，分布于24个省份，储量超过 2×10^4 t的有甘肃金川铜镍硫化物矿床、青海德尔尼铜钴矿床、吉林大横路铜钴矿床。对我国钴储量大于1000 t的58个矿床的统计结果表明，钴的平均品位仅为0.02%，伴生钴品位偏低，钴精矿回收率低且生产成本低^[9]。总体来看，我国钴矿资源禀赋不足，呈现分布地区较广、伴生矿多、矿床规模小、品位低、分离难度较高的特征。

(二) 不能满足新能源行业发展的需求

2015—2019年，我国新能源汽车年销售量从20万辆上升到120万辆，占同期全球销售总量的46%。2021年，我国新能源汽车销售量达350万辆，销售量突飞猛进的一个主要因素是迷你电动车凭借价格优势实现市场急速暴发。2022年，我国继续引领全球电动汽车市场，销售量超过600万辆（见图3），占全球总增长量的75%，比2021年翻了一番。我国新能源汽车出口也在迅速增长，国际上对我国电动汽车的需求显著上升。2021年我国十大新

能源车型中有五款使用的是磷酸铁锂电池。虽然磷酸铁锂电池比三元锂电池成本低,但续航能力和性能相对较差。三元锂电池由于其优越的能量密度、性能和可回收性,在电动汽车领域占据主导地位^[39,40]。为了追求更高的能量密度,进一步提高汽车的续航里程和性能,三元锂电池将向能量密集型的高镍和低钴材料的方向发展。虽然高镍电池中钴的用量有所降低,但对于稳定性和安全性而言,钴仍然是一种至关重要的材料,源于整个电动汽车行业的支撑,钴的需求仍将保持强劲的年增长率。

(三) 超高对外依存度构成重大安全隐患

我国钴矿资源先天不足,却是全球第一大精炼钴生产国和钴资源消费国。2022 年我国钴产量仅为 2200 t,钴资源累计消费量约为 1.41×10^5 t,对外依存度高达 98%。2001—2021 年,我国精钴矿石、湿法冶炼钴中间品以及其他原材料的累计进口总量达 1.495×10^6 t,其中 83.4% 的精钴矿石以及 96% 的湿法冶炼中间品来自刚果民主共和国嘉能可斯特拉塔股份有限公司、洛阳钼业、欧亚资源有限公司等矿业公司^[9]。超高的对外依存度叠加不可替代的单一进口来源,构成我国稀缺战略金属资源在稳供、保供中的最大隐患。一旦供应链条中出现任何不可抗力,或者地缘政治发生变化,均有可能造成我国钴资源的临时性短供、断供。

(四) 钴产业链有待提升

刚果民主共和国的钴原料产量占全球钴原料产量的 73%,中国的精炼钴产量占全球精炼钴产量的 76%。刚果民主共和国的矿业公司产出半成品粗制氢氧化钴后,由国际金属贸易商通过运输公司从刚果民主共和国经南非德班港口运输钴原料至中国港口,锂电池生产商再从国内钴冶炼生产商处购买。钴行业已经形成了“刚果民主共和国钴资源—中国钴冶炼”的产业格局。

在钴资源产业链中,由于冶炼扩张相对容易,因此,上游资源对钴的供给有较强的约束,而下游市场前景和技术发展对钴的需求则有重要影响。我国是全球最大的钴原料进口国,以及最大精炼钴生产国和钴加工产品出口国,钴资源的稀缺性加上巨大的冶炼加工产能使我国在钴市场上没有定价权^[11]。因此,我国的钴产业链一体化水平有待进一

步提升。作为全球最大的钴盐加工中心和需求中心,我国亟需建立自己的钴市场定价权。

五、我国钴资源产业保障对策

(一) 加强国内钴资源有效增储

与世界主要钴矿类型不同,我国的钴矿床类型主要为岩浆型镍—钴硫化物矿床,占我国钴储量的 45%。我国需深化岩浆型镍—钴硫化物矿床研究,建立岩浆型镍—钴矿床有效勘查模型,继续在金川矿床深边部、中亚造山带南缘、昆仑造山带等镍—钴成矿带开展找矿勘查,保证我国钴资源有效增储。沉积容矿型铜钴矿床目前已发现了大横路等大型铜钴矿床,应结合中资企业在刚果民主共和国同类型铜钴矿床的勘查经验,予以主攻,争取在我国沉积容矿型铜钴矿床实现找矿重大突破。此外,我国造山带中广泛分布的蛇绿岩带,为热液型钴矿的形成提供了可能,应加强蛇绿岩与中酸性火成岩接触带相关热液脉型钴矿床的勘查和调查研究,切实提高我国钴矿资源安全保障水平。钴作为幔源橄榄石的相容元素,岩浆硫化物型、沉积容矿型和热液型钴矿床的形成,均与地质历史上的高程度部分熔融形成的幔源岩浆作用有关,或直接熔离成矿、或经热液作用成矿。因此,应以此为主线,加强钴矿成矿理论和勘查技术方法的研究。

(二) 国外钴资源保障对策

1. 多元化钴资源进口渠道

扩大和稳定海外钴资源供应对我国钴资源保障至关重要。想要改变高度集中的供应模式,化解供给风险,一方面要继续稳定从刚果民主共和国获取更多钴资源;另一方面要引导国内优势企业,积极投入国外矿山资源勘查和开发,拓宽资源进口来源,通过“开源”切实提高钴金属资源的保障能力。2022 年,印度尼西亚的钴产量为 1×10^4 t,是其 2020 年钴产量的 10 倍,成为全球第二大钴生产国。印度尼西亚作为新兴的钴资源供应国,其钴资源主要为红土型镍矿中的伴生钴。目前正在运营或于 2023 年开工的所有 HPAL 项目均由中国和印度尼西亚的公司运营,产出的氢氧化镍钴大部分运往中国。这很大程度上要归功于中资企业在高压酸浸技术方面的突破,以及中国为印度尼西亚新兴钴资源

选矿市场提供了充足的设备和材料。到2040年,印度尼西亚的钴产量预计还将增长10倍。此外,俄罗斯拥有的钴储量达 2.5×10^5 t, 2022年的钴产量为8900 t, 自2022年2月俄乌战争爆发以来,欧美针对俄罗斯的钴出口进行制裁,使得俄罗斯向我国销售的钴数量有所增加。

2. 帮扶海外中资企业平稳产出

洛阳钼业是全球第二大钴生产商,预计2025年以后洛阳钼业将具备约 6×10^4 t/a以上的钴生产能力。类似的海外中资公司还有华友钴业股份有限公司、宁波力勤资源科技股份有限公司、格林美股份有限公司、金川集团国际资源有限公司等。随着中资企业在供给国的发展,海外从事钴资源开发的中资企业的平稳运行一定程度上保障了我国钴资源的供给安全。建议加大对相关海外中资企业的全方位支持力度,注入优质资本和提供充分的外交协助等,增强企业内生动力,切实保障国外钴资源的稳定供给和运输安全。

3. 建立钴资源储备体系

2022年,我国精炼钴产量为 1.45×10^5 t,占全球钴矿总产量的75%,而我国国内钴的消费量只有 6.8×10^4 t,仅占精炼钴产量的48%。也就是说,我国大量进口钴矿资源经过冶炼后,超半数的精炼钴以其他形式出口。钴作为我国极度稀缺的金属品种,只在我国进行了形式转化的短暂停留,并未对我国经济发展所需的战略性矿产资源保障提供应有的作用。基于以上分析,建议在我国建立钴资源储备体系,并通过市场手段,剥离产业链中的无效、低效资产,同时还要减少不必要的出口,提高我国钴资源保障能力,推动我国钴金属行业的高质量发展。

(三) 加强钴资源综合利用

钴矿在开采过程中形成了大量的品位相对较低的尾矿,同时,在冶炼过程中也会形成大量的含钴矿渣。随着冶炼技术和装备水平的提高,早期积累的低品位尾矿和矿渣二次开发成为现实;此外,从锂电池回收钴也是我国钴来源的一个重要补充。加强钴资源的二次利用,可有效增加可利用的钴资源储量,这将有助于满足钴的供需平衡,促进钴的可持续发展。因此,我国应在改进钴的回收率技术方向加大投入,优化选冶技术,在技术研发过程中加强“产学研”合作,促进技术创新和进步,提高产业

竞争力。

(四) 重视潜在钴资源研究

在全球范围内,巨大的钴资源量位于现代海底铁-锰结核(结壳)中,这些钴资源处于海底6000 m以下,现有的技术、经济和法律等方面的问题阻碍了钴资源的开采。深海采矿技术、海底采矿对生态系统的影响以及采矿船只排放废水污染等问题正在被北美和欧洲的投资者关注,投资深海采矿的热度堪比19世纪北美的“淘金热”。我国也应提早布局,加强海底富钴铁-锰结核(结壳)分布规律和形成环境的研究,探索经济高效的开采方式,确保未来我国钴矿资源的安全稳定供给。

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: December 20, 2023; **Revised date:** January 23, 2024

Corresponding author: Tang Zhongli is a professor from School of Earth Science and Resources, Chang'an University, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research fields include geological mineral exploration and research on magmatic deposits. E-mail: zytangzl@chd.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Mineral Resources Guarantee for New Energy and New Materials” (2022-XY-82), “Key Strategic Mineral Resources such as Potassium and Lithium in China under the New Situation - Industry High Quality Development Strategy” (2023-XY-20), “China’s Energy Security Strategy” (2022-JB-05); Shaanxi Province Natural Science Basic Research Program Project (2021JM-157, 2023-JC-YB-224)

参考文献

- [1] 卢宜冠,郝波,孙凯,等. 钴金属资源概况与资源利用情况分析[J]. 地质调查与研究, 2020, 43(1): 72-80.
Lu Y G, Hao B, Sun K, et al. General situation of cobalt resource and its utilization analysis [J]. Geological Survey and Research, 2020, 43(1): 72-80.
- [2] 杨卉芄,王威. 全球钴矿资源现状及开发利用趋势[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(5): 41-49, 55.
Yang H P, Wang W. Global cobalt resources status and exploitation trends [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(5): 41-49, 55.
- [3] 徐爱东,陈瑞瑞,李烁,等. 镍钴行业发展形势分析及建议[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(6): 9-15.
Xu A D, Chen R R, Li S, et al. Analysis and suggestions on the development of nickel-cobalt industry [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(6): 9-15.
- [4] 王海南,王礼恒,周志成,等. 新兴产业发展战略研究(2035)[J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 1-8.

- Wang H N, Wang L H, Zhou Z C, et al. Development strategy of emerging industries (2035) [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(2): 1–8.
- [5] 丰成友, 张德全, 党兴彦. 中国钴资源及其开发利用概况 [J]. 矿床地质, 2004, 23(1): 93–100.
Feng C Y, Zhang D Q, Dang X Y. Cobalt resources of China and their exploitation and utilization [J]. Mineral Deposits, 2004, 23(1): 93–100.
- [6] 陈甲斌, 刘超, 冯丹丹, 等. 矿产资源安全需要关注的六个风险问题 [J]. 中国国土资源经济, 2022, 35(1): 15–21, 70.
Chen J B, Liu C, Feng D D, et al. Six risk problems of mineral resources security need to focus on [J]. Natural Resource Economics of China, 2022, 35(1): 15–21, 70.
- [7] 陈甲斌, 刘超, 聂宾汗, 等. 矿产资源安全需要重点关注十种矿产 [J]. 中国国土资源经济, 2023, 36(5): 14–21, 41.
Chen J B, Liu C, Nie B H, et al. Focus on ten minerals for mineral resources security [J]. Natural Resource Economics of China, 2023, 36(5): 14–21, 41.
- [8] 左更. 我国战略性金属矿产资源保供形势分析 [J]. 中国价格监管与反垄断, 2022 (10): 70–73.
Zuo G. Analysis on the situation of ensuring supply of strategic metal mineral resources in China [J]. Price Supervision and Anti-Monopoly in China, 2022 (10): 70–73.
- [9] 邢佳韵, 陈其慎, 龙涛, 等. 发达国家战略性矿产安全保障举措及启示 [J]. 自然资源情报, 2023 (1): 28–36.
Xing J Y, Chen Q S, Long T, et al. Research on critical minerals security strategy of developed countries [J]. Natural Resources Information, 2023 (1): 28–36.
- [10] 王东方, 王婉君, 陈伟强. 中国战略性金属矿产供应安全程度评价 [J]. 资源与产业, 2019, 21(3): 22–30.
Wang D F, Wang W J, Chen W Q. Supply security of strategic metal ores in China [J]. Resources & Industries, 2019, 21(3): 22–30.
- [11] 刘超, 陈甲斌. 全球钴资源供需形势分析 [J]. 国土资源情报, 2020 (10): 27–33.
Liu C, Chen J B. Analysis of supply and demand situation of global cobalt resources [J]. Land and Resources Information, 2020 (10): 27–33.
- [12] 李颖, 周艳晶, 张艳飞. 未来全球钴资源供应形势分析 [J]. 中国矿业, 2014, 23(8): 1–4.
Li Y, Zhou Y J, Zhang Y F. The future supply situation analysis of global cobalt resources [J]. China Mining Magazine, 2014, 23(8): 1–4.
- [13] Lusty P A J, Hein J R, Josso P. Formation and occurrence of ferromanganese crusts: Earth's storehouse for critical metals [J]. Elements, 2018, 14(5): 313–318.
- [14] U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2023 [R]. Washington D C: U.S. Government Publishing Office, 2023.
- [15] Hein J R, Koschinsky A. Deep-ocean ferromanganese crusts and nodules 2014 [M]. Holland H D, Turekian K K. Treatise on geochemistry. Inded. Amsterdam: Elsevier, 2014: 273–291.
- [16] 邓贤泽, 任江波, 邓希光, 等. 富钴结壳关键元素赋存状态与富集机理 [J]. 地质通报, 2021, 40(S1): 376–384.
Deng X Z, Ren J B, Deng X G, et al. Cobalt-rich crust obtains high contents of key elements from seawater: Element absorption and distribution [J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(S1): 376–384.
- [17] 何高文, 孙晓明, 杨胜雄, 等. 太平洋多金属结核和富钴结壳稀土元素地球化学对比及其地质意义 [J]. 中国地质, 2011, 38(2): 462–472.
He G W, Sun X M, Yang S X, et al. A comparison of REE geochemistry between polymetallic nodules and cobalt-rich crusts in the Pacific Ocean [J]. Geology in China, 2011, 38(2): 462–472.
- [18] 韦振权, 何高文, 邓希光, 等. 大洋富钴结壳资源调查与研究进展 [J]. 中国地质, 2017, 44(3): 460–472.
Wei Z Q, He G W, Deng X G, et al. The progress in the study and survey of oceanic cobalt-rich crust resources [J]. Geology in China, 2017, 44(3): 460–472.
- [19] 赵俊兴, 李光明, 秦克章, 等. 富含钴矿床研究进展与问题分析 [J]. 科学通报, 2019, 64(24): 2484–2500.
Zhao J X, Li G M, Qin K Z, et al. A review of the types and ore mechanism of the cobalt deposits [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(24): 2484–2500.
- [20] Schulz K J, DeYoung J H, Seal R R, et al. Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply [R]. Virginia: U.S. Geological Survey Professional Paper, 2017.
- [21] Vasyukova O V, Williams-Jones A E. Constraints on the genesis of cobalt deposits: Part II. applications to natural systems [J]. Economic Geology, 2022, 117(3): 529–544.
- [22] Williams-Jones A E, Vasyukova O V. Constraints on the genesis of cobalt deposits: Part I. theoretical considerations [J]. Economic Geology, 2022, 117(3): 513–528.
- [23] 李向前, 毛景文, 闫艳玲, 等. 中非刚果(金)加丹加铜钴矿带主要矿化类型及特征 [J]. 矿床地质, 2009, 28(3): 366–380.
Li X Q, Mao J W, Yan Y L, et al. Regional geology and characteristics of ore deposits in Katangan copper-cobalt belt within Congo (Kinshasa), Central Africa [J]. Mineral Deposits, 2009, 28(3): 366–380.
- [24] 覃锋, 郭健, 张雪亭, 等. 赞比亚铜钴矿产分布特征及控矿因素研究 [J]. 矿床地质, 2010, 29(S1): 1129–1130.
Qin F, Guo J, Zhang X T, et al. Study on distribution characteristics and ore-controlling factors of copper and cobalt minerals in Zambia [J]. Mineral Deposits, 2010, 29(S1): 1129–1130.
- [24] 覃锋, 郭健, 张雪亭, 等. 赞比亚铜钴矿产分布特征及控矿因素研究 [J]. 矿床地质, 2010, 29(S1): 1129–1130.
Qin F, Guo J, Zhang X T, et al. Distribution characteristics and ore-controlling factors of Cu-Co deposits in Zambia [J]. Mineral Deposits, 2010, 29(S1): 1129–1130.
- [25] 孙凯, 张航, 卢宜冠, 等. 中非铜钴成矿带地质特征与找矿前景分析 [J]. 中国地质, 2022, 49(1): 103–120.
Sun K, Zhang H, Lu Y G, et al. Analysis on geological characteristics and prospecting potential of the Central African Cu-Co metallogenic belt [J]. Geology in China, 2022, 49(1): 103–120.
- [26] 周艳晶, 梁海峰, 李建武, 等. 钴资源供需格局及全球布局研究 [J]. 中国矿业, 2019, 28(7): 65–69, 80.
Zhou Y J, Liang H F, Li J W, et al. Supply and demand pattern and overseas layout of cobalt resources [J]. China Mining Maga-

- zine, 2019, 28(7): 65–69, 80.
- [27] 张伟波, 叶锦华, 陈秀法, 等. 全球钴矿资源分布与找矿潜力[J]. 资源与产业, 2018, 20(4): 56–61.
Zhang W B, Ye J H, Chen X F, et al. Global cobalt resources distribution and exploration potentials [J]. Resources & Industries, 2018, 20(4): 56–61.
- [28] Berger V I, Singer D A, Bliss J D, et al. Ni-Co laterite deposits of the world—Database and grade and tonnage models [R]. Virginia: U.S. Geological Survey, 2011.
- [29] 张洪瑞, 侯增谦, 杨志明, 等. 钴矿床类型划分初探及其对特提斯钴矿带的指示意义[J]. 矿床地质, 2020, 39(3): 501–510.
Zhang H R, Hou Z Q, Yang Z M, et al. A new division of genetic types of cobalt deposits: Implications for Tethyan cobalt-rich belt [J]. Mineral Deposits, 2020, 39(3): 501–510.
- [30] U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2022 [R]. Washington D C: U.S. Government Publishing Office, 2022.
- [31] Fisher H. Cobalt market report 2021 [R]. Guildford: Cobalt Institute, 2021.
- [32] Fisher H. Cobalt market report 2022 [R]. Guildford: Cobalt Institute, 2022.
- [33] 张照伟, 李文渊, 丰成友, 等. 中国钴—镍成矿规律与高效勘查技术[J]. 西北地质, 2022, 55(2): 14–34.
Zhang Z W, Li W Y, Feng C Y, et al. Study on metallogenic regularity of co Ni deposits in China and its efficient exploration techniques [J]. Northwestern Geology, 2022, 55(2): 14–34.
- [34] 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 等. 中国镍铜铂岩浆硫化物矿床与成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
Tang Z L, Qian Z Z, Jiang C Y, et al. Magmatic Ni-Cu-PGE sulfide deposits and metallogenic prognosis in china [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.
- [35] 秦克章, 丁奎首, 许英霞, 等. 东天山图拉尔根、白石泉铜镍钴矿床钴、镍赋存状态及原岩含矿性研究[J]. 矿床地质, 2007, 26(1): 1–14.
Qin K Z, Ding K S, Xu Y X, et al. Ore potential of protoliths and modes of Co-Ni occurrence in Tulargen and Baishiquan Cu-Ni-Co deposits, East Tianshan, Xinjiang [J]. Mineral Deposits, 2007, 26(1): 1–14.
- [36] 于晓飞, 公凡影, 李永胜, 等. 中国典型钴矿床地质特征及重点地区矿产资源预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(5): 1377–1418.
Yu X F, Gong F Y, Li Y S, et al. Geological characteristics of typical cobalt deposits in China and prediction of mineral resources in the key areas [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(5): 1377–1418.
- [37] 李斌, 杨正萌, 齐岩, 等. 吉林省钴矿矿产资源潜力评价成果报告[R]. 长春: 吉林省地质调查院, 2019.
Li B, Yang Z M, Qi Y, et al. Report on the evaluation results of cobalt mineral resources potential in Jilin Province [R]. Changchun: Jilin Institute of Geological Survey, 2019.
- [38] 姜曙光. 中国钴产业链物质流分析及二次资源潜力测算[D]. 烟台: 鲁东大学(硕士学位论文), 2023.
Jiang S G. Material flow analysis and secondary resource potential prediction of China's cobalt industry chain [D]. Yantai: Ludong University (Mester's thesis), 2023.
- [39] 韩见, 陈其慎, 杨雪松, 等. 钴资源现状及未来5—10年供需形势分析[J]. 中国地质, 2023, 50(3): 743–755.
Han J, Chen Q S, Yang X S, et al. Current situation of cobalt resources and analysis of supply and demand situation in the next 5–10 years [J]. Geology in China, 2023, 50(3): 743–755.
- [40] 黄学杰, 赵文武, 邵志刚, 等. 我国新型能源材料发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 60–67.
Huang X J, Zhao W W, Shao Z G, et al. Development strategies for new energy materials in China [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 60–67.