

全球钴矿产的供应安全与技术创新

张惠¹, 吴西顺^{1,2}, 杨添天³, 孙张涛¹

(1. 中国地质调查局地学文献中心, 中国地质图书馆, 北京 100083; 2. 中国地质调查局国际矿业研究中心, 北京 100037; 3. 北京电子科技职业学院, 北京 100176)

摘要: 世界范围内的钴矿贸易和供应链危机已经引起很多国家和机构的关注, 以致被纳入主要国家的关键矿产系列或清单当中。世界上的钴资源储量巨大, 但产量有限且有地缘政治风险。这主要表现为钴矿产资源的生产、加工和消费的高度集中。除海底钴矿以外, 陆地钴资源主要赋存在: 沉积型铜钴矿床 (约 58%), 主要位于刚果民主共和国和赞比亚; 红土型镍钴矿床 (约 29%) 主要是澳大利亚、新喀里多尼亚和古巴; 岩浆型镍铜-PGE-钴矿床 (约 9%), 主要是澳大利亚、加拿大、俄罗斯、芬兰和美国。全球钴精矿的产量 60% 以上在刚果(金)。而钴矿的精炼加工 60% 以上在中国, 精炼钴消费 60% 以上在中国、欧盟和美国, 中国、英国、日本的进口依赖度近乎百分百。形势严峻, 竞争激烈, 技术创新势在必行。新的技术正在逐渐得到应用, 如选冶联合工艺以及一些新的提取方式。主要挑战是钴矿石回收率的提高、二次资源利用和产品回收利用方面。中国的许多部门、机构和企业也都进行了长期深入的工作部署, 但在国际上的影响力和供应链的控制力仍比较小, 与发达国家相比有很大差距。我国的钴矿供应安全也极其重要, 其原材料供应和西方国家形成很强的竞争性。提高钴供应的安全程度, 需要全面掌握几种主要资源的赋存特征、大力开展采选冶技术创新和高标准高质量进行产业创新, 同时应高度重视推动国际产业联盟和技术合作, 以应对国际产业链重构和竞争格局变化。

关键词: 钴矿产; 供应安全; 技术创新; 绿色减排

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.04.024

中图分类号: TD353 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 04-0134-09

为了减缓气候变化并减轻对环境的影响, 世界各国都十分重视能源转型以及可持续高质量发展。随着低碳技术越来越受欢迎, 可再生能源转型和电动汽车的兴起被认为是减少温室气体 (GHG) 排放和空气污染的关键杠杆。全球性的能源转型极大刺激了新能源金属如锂、镍、钴、稀土等关键矿产的需求。研究认为, 绿色能源转型中, 钴供应可能长期成为行业瓶颈^[1]。在全球绿色经济转型推动下, 未来 2~3 年里甚至 2025 年以后, 全球钴行业仍将供不应求, 价格继续上涨,

而面临巨大发展机遇。

1 钴供应安全概述

钴 (Co) 的应用非常广泛, 在古代就被用作珠宝、陶器和绘画的蓝色颜料 (钴蓝), 并可给玻璃镀上一层独特的蓝色。在现代工业中, 它 also 具有许多理想的独特性质: ①作为催化剂, 具有独特的价态特性和灵活的氧化态而用途广泛; ②金属硬度高、耐腐蚀, 可保持到熔点 1495℃, 可制造超级合金; ③可被磁化而具有铁磁特性,

收稿日期: 2022-01-17

基金项目: 中国地质调查项目“地学文献信息更新与服务”(DD20190413); “战略性矿产资源勘查开发科技跟踪”(DD20211407)

作者简介: 张惠 (1973-), 女, 硕士, 副研究员, 主要从事矿产资源管理、国土资源经济、地学文献资源咨询服务的科学研究工作。

通信作者: 吴西顺 (1975-), 男, 博士, 副研究员, 现主要从事矿产资源、矿业科技、非常规能源、海洋地质和产业政策的研究工作。

而且居里点(1121℃)在已知材料中最高,这意味着磁性能保留到这个温度,因此可制造永磁体。20世纪初,钴才开始用于各种合金和作为化学工业的催化剂,使其产量在20世纪中期迅速增加。在20世纪90年代,钴的主要应用是生产非常坚硬且又具有独特磁性和耐高温性的超合金^[2]。含钴超合金的终端用途包括航空航天工业、陆基和船载涡轮机以及各种工业、医疗、汽车和国防相关领域。目前,充电电池领域占全球钴市场钴使用量的58%,而1999年电池行业仅占钴市场份额的10%。20世纪以来,钴的多样化应用促使钴的产量不断增加,但由于政治不稳定和国际市场价格的波动,钴的产量几经起伏(图1)。需求的增长特别是电池市场的增长主要是由于智能手机、平板电脑和笔记本电脑以及电动汽车(EV)和插电式混合动力汽车(PHEV)所需的大型电池的出现所致。需求增长、产量不稳、价格波动以及地缘政治、气候变化和政策法规导致钴供应安全成为一个愈加突出的问题。

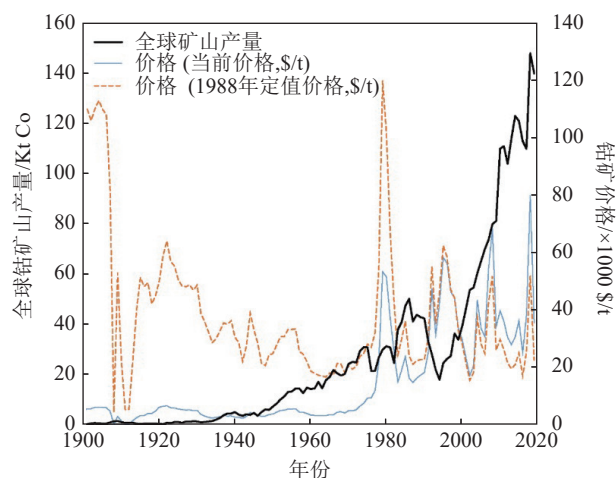


图1 1900~2019世界钴矿石年产量和价格走势^[3]

Fig.1 1900~2019 world cobalt ore annual production and price trends

在2000年代后期,随着低碳技术开始取得突破,战略材料的关键性评估研究蓬勃发展作为预测和实现战略规划的手段。钴由于其供应安全的问题,在世界许多国家被确定为战略性关键矿产。各国随后开始向其经济发布正式的关键材料清单,如欧盟、美国、澳大利亚、日本、中国、加拿大等^[3]。产业链中的钴矿产开发利用技术的进步成为一个重要关键环节。

2 全球的钴资源量巨大,但产量有限且不稳定

世界上的钴资源储量巨大,但产量很有限且不透明,而且有地缘政治风险。这主要表现为两个资源、生产和消费高度集中。Slack等认为,陆地上大约95%的钴资源位于:a)层状沉积岩或页岩型铜钴矿床(约58%),主要位于刚果民主共和国和赞比亚;b)澳大利亚、新喀里多尼亚和古巴的红土型镍钴矿床(约29%);c)澳大利亚、加拿大、俄罗斯、芬兰和美国的岩浆型镍铜-PGE-钴矿床(约9%)。海底的钴矿产资源更大。基于目前海洋地质调查的资源估计,海洋钴资源将占地球钴资源总量的80%左右。全球钴资源量约为1.54亿t钴,其中1.21亿t钴来自海底资源^[4]。全球钴资源储量高度地缘集中。据美国地质调查局发布的钴资源报告数据,2020年全球钴储量为712万t,钴资源集中分布于刚果(金)、澳大利亚、古巴等国家,其中刚果(金)的钴资源最为丰富。2002年来,全球钴资源总储量一直保持在700万t左右,2018年为690万t,增加不显著。近20年来,世界钴资源储量排名前3位的国家一直是刚果(金)、澳大利亚和古巴。2018年超过全球总储量的74%。产量方面,20世纪90年代,钴矿生产相对多样化,赞比亚、加拿大、澳大利亚、俄罗斯和其他所有国家的生产分布较为均衡。但自2010年,刚果(金)重新成为钴矿主要生产国,产量超过全球的50%^[5]。2020年钴金属产量达到9万t,占全球的60%以上。但有数据显示,世界钴供应的重要份额来自刚果(金)手工小规模采矿(ASM),2018年该国1500t的钴产量来自手工小规模采矿作业。来自ASM的钴通过独立贸易商在当地的子公司卖给中国的公司,然后供应给一些世界领先的电子公司。此外,尽管刚果民主共和国在地质上很有吸引力,是世界上最大的矿业生产国之一,也是钴的第一生产国,但由于政治不稳定、缺乏透明度和政府政策支持,刚果民主共和国被列为矿业投资的风险管辖区域。

3 钴矿产开发技术现状

钴在能源转型中地位重要,长期供不应求,甚至可能成为能源转型的长期瓶颈。全球钴产量

的大部分来自于铜（约 55%）、镍（约 35%）和砷等商品提取的伴生产品^[6]。唯一的例外是正在开采的摩洛哥 Bou Azzer 矿山^[7]和现已关闭的加拿大安大略省钴矿、美国爱达荷州的黑鸟区和澳大利亚昆士兰州的钴矿山^[8]，它们在全球钴产量中占的比例很小。由于作为副产品进行回收，钴的回收效率相对较低且不稳定，大量的钴经常残留在尾矿或冶炼炉渣中。

钴矿的采选特征包括粒径大小、粉碎研磨性、重力选矿、磁力选矿、浮选，至于浸提工艺主要涉及冶金范畴。由于钴的副产品地位，加之与回收主要商品（即镍或铜）所需的工艺相比，钴选矿工艺通常是次要的。因此，钴的回收通常在提取和浓缩相关主要金属后才开始的。钴的提取可分为三种主要工艺：a) 湿法冶金；b) 高温冶金；c) 气化冶金。所涉及的工艺和所采用的流程取决于矿石矿物学特征，这也通常是某一矿床类型甚至矿石类型所特有的性质。以 HPAL 为主要工艺的 Ni 红土矿床的钴回收率较高，其次是岩浆型 Ni 硫化物矿床，最后是 SSH 铜钴矿床，这些矿床的回收效率变化很大，特别是当采用浮选作为主要选矿手段时。

3.1 层状沉积岩型

对于层状沉积岩型 Cu-Co 矿石，经过粉碎阶段后，铜钴矿石将按照定制的工艺路线进行加工，加工路线取决于所提取的矿石类型。例如，氧化矿石通常通过浸出-溶剂萃取-电解冶金路线（L/SX/EW）进行处理。硫化矿石传统上通过浮选处理，而混合矿则采用浸出和浮选相结合的方式处理。氧化矿石浸出后，用溶剂萃取法将铜和钴分离，并在钴沉淀前除去铁、锌、锰等杂质。中间或最终钴产品的选择与生产是可以操作的。产品中的钴品位和杂质与流程的复杂程度有关。去除杂质后，钴通常以氢氧化钴的形式作为中间产物沉淀下来。去除杂质后可直接进行电解冶金以提高钴与其他元素的分离度。这可获得更高的产品价值和更小的钴损失，但也存在一些操作上的限制。氧化物与硫化物的比例可能是最重要的矿石属性，因为它决定了采用哪种加工方案来处理矿石。氧化物矿石通常按照整体浸出的概念进行处理，即先对原矿矿石进行粉碎，然后使用硫酸进行浸出。有时会加入还原剂，以改善水钴矿的浸出^[9]。

3.2 红土型钴矿

红土矿的加工工艺主要有两大类，即高温冶金工艺和湿法冶金工艺。虽然大多数红土镍矿都是通过高温冶金来生产铁镍合金的，但钴没有被回收并在矿渣中流失，非常可惜。根据矿石类型的不同，钴湿法冶金加工路线主要有两种，即针对褐铁矿的高压酸浸法（HPAL）和针对褐铁矿或腐泥土-褐铁矿混合矿石的 Caron 法。HPAL 是钴回收的首选工艺^[10]。矿石首先在高压釜中进行高压和高温浸出，然后通过逆流倾析（CCD）进行中和和固液分离。得到的预浸溶液可以经过几个阶段的净化以去除污染物（主要是铁、镁、铝和铜），并用硫化氢气体处理以沉淀出镍钴硫化物。另外，钴也可以通过镍钴氢氧化物的形式沉淀回收。在大型 HPAL 项目中，通过氢还原法精炼钴以生产钴粉或团块，或通过电解冶金法生产钴阴极。传统的 Caron 工艺采用的是还原焙烧后再进行氨浸。在通过 CCD 和溶剂萃取进行固液分离后，钴以硫化钴的形式沉淀，而镍则以碳酸镍的形式通过蒸汽剥离回收。处于试验或测试阶段的其他较新的湿法冶金工艺包括强化压力酸浸（EPAL）、大气浸出（AL）、堆浸处理腐泥土矿石以及氯化物浸出处理褐铁矿-腐泥土混合矿石^[11]。Crundwell 等研究认为，在 HPAL 流程的各个阶段，钴的回收率从浸出阶段（浸出、逆流倾析和提纯）的 95%、硫化物沉淀阶段的 99% 到精炼阶段（电解冶金、氢还原）的 99% 不等。钴的总体回收率约为 93%。Caron 工艺的钴回收率（<80%）一般低于 HPAL 工艺。

3.3 岩浆型镍硫化矿

岩浆型镍硫化物矿石的加工包括破碎和研磨，然后进行泡沫浮选和脱水以生产镍钴硫化物精矿。通常，镍和钴在浮选回路的某个环节与铜分离，一般先生产硫化物精矿，然后再浮选铜（如 Sudbury-Xstrata、Noril'sk 公司）；或者先按照顺序浮选铜，然后浮选镍和钴（如 Kevitsa 公司）。精矿先经过闪速熔炼或电炉熔炼，随后被转化为低铁的 Co-Ni-S 硫。在第一种方案中，氧化过程（转化）在熔炉里进行，而在第二种方案中，氧化过程是在单独的阶段通过焙烧进行的。所得的硫然后通过湿法冶金工艺精炼成高纯度的镍和钴，湿法冶金工艺的特点是使用盐酸中的氯、氨溶液中的空气或硫酸中的氧气进行浸出。

最后，在溶剂萃取后，从纯化的浸出液中通过电解冶金法或氢还原法生产金属钴。根据 Crundwell 等的研究，钴在各个加工阶段的回收率从浓缩阶段（破碎/研磨和浮选）的 $(90 \pm 5)\%$ 、冶炼期间的 $50 \pm 20\%$ 和精炼期间的 $(95 \pm 2)\%$ 不等，导致钴的总体回收率约为 40%，这与根据对当前工业作业的审查得出的计数较为接近。这表明，钴的损失主要是由于将硫化物精矿转化为铈的冶炼过程所致。冶炼厂的钴回收率相对较低，从 25%~80% 不等，平均为 50%。这远远低于镍和铜的平均回收率，后者分别为 97% 和 95%（图 2a）。虽然闪速熔炼比电弧炉更节能，但可以看出，在给料品位相等的情况下，闪速熔炼会导致金属大量损失至矿渣中，尤其是钴的损失更大。电弧炉处理 PGM-Ni 矿石的回收率较低，原因是进料中钴含量较低，而氧化镁含量较高。如第 2 节所述，

钴的物理特性与铁和镍接近。钴在冶炼过程中的氧化程度往往比镍高，而比铁低。钴和铁在不同高温冶金系统中具有不同的分馏行为。在中性或还原性冶炼条件下，钴可以有效地回收至铈中，而在氧化性条件下，钴主要损失至矿渣中^[12]。各种提高钴回收率的策略也已进行了评估，例如在更高的温度下冶炼或使用矿渣添加剂。钴回收率也可以通过在渣洗电弧炉或直流电弧炉中产生二次铈来提高。另一种不太常见的替代冶炼方法是通过压力酸浸（PAL）、溶剂萃取和低品位 PGM 浮选精矿的沉淀处理。该工艺已被用于处理金宝山矿床（中国）的 PGM-Ni（-Cu）矿石，最终的铜回收率为 95%，镍和钴回收率为 99%^[13]。

4 技术创新与绿色减排

目前，处理含钴矿石的新技术也已逐渐得到了应用，如选冶联合工艺以及一些新的提取方式。澳大利亚 Murrin Murrin 镍红土矿的堆浸技术^[14]和芬兰 Talvivaara/Sotkamo Ni-Zn-Cu-Co 黑色页岩型矿床的生物堆浸技术^[15]。这些替代技术在经济上很有吸引力，与现有工厂相比（Caron、HPAL、RKEF），其资本成本和能源需求都要低得多。来自以前被认为非经济性矿床的矿石，如菲律宾的 Acoje 矿床，可能适合以这种方式浸出。与每一项新技术一样，由于缺乏商业实践，堆浸仍面临一些质疑。堆浸的回收率低于 HPAL，但很难进行直接比较，因为 HPAL 只适用于目标矿石带，而堆浸通常处理整个矿体。不同矿床之间的矿石和浸出动力学差异存在技术和商业上的不确定性。在 Sotkamo 多金属硫化物矿床，生物浸出技术在常压和温度下取得了成功。在乌干达 kasese 的搅拌池中应用的生物浸出法从早期铜矿开采过程中产生的黄铁矿精矿中成功的回收了钴。

直镍（Direct Nickel）工艺是一种针对红土矿的湿法冶金工艺，利用硝酸提取所有有价值的成分（镍、钴、铝和铁）。其优点是可以处理腐泥土和褐铁矿，而且 95% 的硝酸可以回收利用。镍和钴沉淀在氢氧化物类产品中。试点工厂的应用表明该方法是成功的，并且已经进行了商业化的可行性研究，但结果没有更新。目前正在开发的一种新工艺旨在利用热解（煅烧）从含钴的黄铁矿生产硫酸钴。黄铁矿在氮保护气氛下通过高温

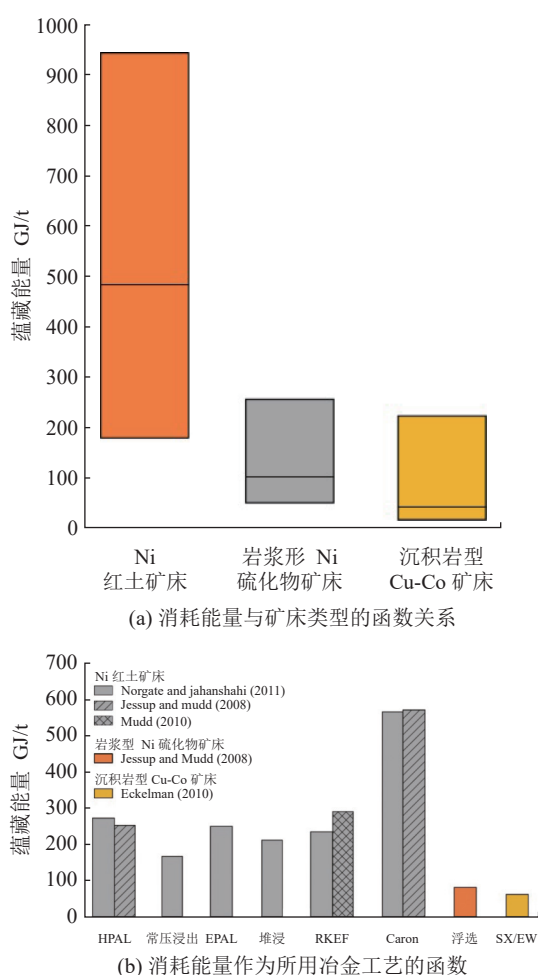


图2 不同钴工艺能耗比较
Fig.2 Comparison of energy consumption for different cobalt processes

冶金过程分解成磁黄铁矿和硫，然后将合成的磁黄铁矿暴露在硫酸浸出液中并进行若干净化和沉淀步骤，以生产最终产品硫酸钴。

植物采矿是一种在富含金属的基质上种植高生物量植物以生产金属“作物”的方法。该方法已被证明适合于提取镍和钴，生长成熟的植物可用于传统的镍冶炼或精炼^[16]。目前没有关于植物采矿在商业应用中的数据，可能是由于目标金属在基质中的含量随着时间的推移而减少，商业回报有限。

目前已有研究正在开发通过高温冶金工艺从海底克拉里昂-克利珀顿区（CCZ）多金属铁锰结核中生产硫酸钴的技术，但该技术的有关细节尚不明朗。可发展的其他新方法包括红土矿床的原地浸出工艺以及能够经济地回收纯橄榄岩或其他超镁铁质岩石中橄榄石等硅酸盐矿物的工艺。

减少对环境的影响，特别是在能源成本和和相关温室气体排放方面的影响，对钴开采的未来至关重要。平均而言，每公斤精炼钴的碳排放量为 38 kg 二氧化碳，需要消耗 883 kJ 的一次能源。总的来说，钴生产项目所涉及的具体能源差别很大，取决于矿床或矿石类型以及加工路线（图 2）。平均而言，镍钴红土矿石加工比岩浆型镍硫化物矿石或铜钴沉积岩型矿石加工的能耗高 2 至 5 倍^[17]。由于在酸浸过程中不需要外部加热，所以后者的加工过程是能耗低的^[18]。对于镍红土矿石来说，根据所采用的工艺不同，其具体能耗也有很大的差异。特别是 Caron 工艺，其蕴含能量是其他工艺的两倍多^[19]。随着全球金属矿石品位的下降，可能更倾向于使用铜矿或镍矿的替代工艺路线，因为这些工艺路线在蕴含能量和温室气体排放方面更为合适。根据矿石的矿物学特征，这可能包括压力浸出、堆浸或原位浸出等技术^[20]。需要考虑的一个重要因素是老旧设施和较新设施的直接排放差异。例如，刚果民主共和国和赞比亚现在仍在使用的某些焙烧炉均建于 20 世纪 50 年代。可以预计的是，这些设施中排放的二氧化硫数量远高于其他处于管辖监测下的焙烧炉和冶炼厂。

钴硫化物在 CAC 中的部分回收会导致尾矿中存在硫化物矿物，如果这些矿物没有得到适当的处理，就会导致酸性矿山废水污染。含有方解石和白云石等脉石矿物的 SSH 铜钴矿床可用于中和

酸的形成。此前，钴硫化物开采产生的废物已导致美国黑鸟矿区的酸性矿山废水污染。以钴为主要金属的矿床往往含有较高含量的砷（如摩洛哥的 Bou Azzer 矿床、美国的黑鸟矿区）或铀（如芬兰的 Sotkamo 矿床）。如果不正确处置和管理矿山废物，可能会造成严重的环境问题。这些元素也可能出现在最终产品中。例如，由于氢氧化钴产品中含有铀，KCC 在 2018 年暂停了钴的生产。一个解决办法是在湿法冶金步骤中回收这些元素，它具有解决尾矿处理问题和生产经济性副产品的双重优势。例如，Bou Azzer 矿石中的砷通过焙烧和过滤去除，并作为三氧化二砷（ As_2O_3 ）出售，而 Terrafame 公司正计划从 Sotkamo 矿石中回收铀，并将其提炼成黄饼。开发海底钴矿资源的主要障碍是环境问题，可能将导致潜在的复杂环境和社会问题，也包括高昂的海上开采成本和相关风险。

5 技术创新与提高经济收益

这主要表现为钴矿石回收率的提高、二次资源利用和产品回收利用方面。

5.1 钴矿回收率的提高

提高钴的总体回收率，减少钴的损失，特别是 SSH 铜钴矿床的矿石。虽然影响回收率的因素很多，但就钴作为副产品而言，观察到的趋势主要是由经济、地缘政治以及最后的技术因素造成的。长期以来，很少有采矿作业真正以钴回收为目标，因为钴被广泛视为次要产品，而工艺性能的重点是主要商品。钴的回收在很大程度上受到这些金属市场的影响，这些主要商品的价格下降可能导致钴的回收率降低^[21]。因此，矿业公司通过最大限度地生产质量较低的产品，以损害资源效率为代价，寻求快速的投资回报^[22]。不过，随着近期充电电池和电动车的发展，钴的需求量增加，钴价也相应飙升，一些企业重新考虑了回收钴的成本和效益。

传统用于硫化物矿石中回收铜和镍的浮选法对钴来说回收率很低。因此，提高钴的浮选性能，特别是对于 SSH 铜钴矿床，是首要问题。随着越来越多的高度氧化的铜钴矿石枯竭，以及更多的硫化物氧化物混合矿石的开采，这种要求将变得更加明显。因此，需要对钴浮选进行更为深入的基础研究。目前的研究主要集中在异羟肟酸

类螯合收集剂的使用^[23]、工艺水的作用^[24]以及对富含碳酸盐的矿石使用反向浮选^[25]。

总的来说，更严格地理解钴回收率的可变性，并通过应用地质冶金学将其纳入空间模型，是提高钴回收效率的最终解决方案^[26]。迄今为止，公开的例子仅限于刚果民主共和国的 Ruashi 铜钴矿山^[27]，地质冶金方法的应用产出了一个吞吐量、酸消耗和铜钴回收模型。将这些地质冶金因素整合到三维模型中，可提供这些因素在矿体内的分布信息，并通过根据矿石类型和品位控制变量以改进库存和工厂进料策略。

5.2 二次资源利用

钴的一个潜在重要来源是二次资源，如矿山

尾矿或冶炼炉渣。如前文所述，利用浮选工艺回收钴的数量相对较少，这意味着大量的钴流向尾矿。在高温冶金工厂，钴往往在冶炼过程中根本无法回收，而是流失在熔渣中。因此，可利用湿法冶金或优化的冶炼方法从浮选尾矿或冶炼厂废渣^[28]再加工回收钴。表1列出了目前正在开发或利用的一些尾矿再处理项目，其中一些项目与原生资源相比显示出非常大的矿产资源量，其品位和吨位均优于目前开发的一些 SSH 铜钴矿床，但它没有采矿成本，不需要或很少需要再研磨处理。尾矿的再处理提供了额外的收入来源，并减少了采矿作业对环境的影响，同时确保了资源的保存。

表1 国际富钴 SSH 尾矿再加工项目资源估算
Table 1 Resource estimation of the international cobalt-rich SSH tailings reprocessing project

尾矿项目名称	国家	尾矿类型	吨位/Mt	Co品位/%	Co含量/kt	公司	状态
Kamoto临时尾矿坝 (KITD)	刚果 (金)	浮选尾矿	7.8	0.16	12.48	Katanga Mining ltd	运营
Etoile HMS尾矿	刚果 (金)	重力分选 HMS尾矿	3.2	0.51	16.05	Shalina Resources	运营
Metalkol Roan尾矿再利用 (RTR)	刚果 (金)	浮选尾矿	112.8	0.32	360.96	欧亚资源集团ERG	运营
Kipushi (Cu-Co & Zn-Co)尾矿	刚果 (金)	浮选尾矿	4.4	0.23	10.37	Cape Lambert Resources ltd	规划
Kakanda尾矿	刚果 (金)	浮选尾矿	18.5	0.15	~27.75	BeWhere Holdings Inc.	规划
Big Hill-Lubumbashi	刚果 (金)	炉渣	~4.5	~2.1	~94.5	福勒斯特集团, Gecamine	运营
Kitwe – Nkana尾矿坝	赞比亚	炉渣	~6.6	~0.76	-	Cape Lambert Resources ltd	规划
Kasese尾矿	乌干达	浮选尾矿	5.5	0.11	6.27	卡塞塞钴公司	终止

5.3 产品回收利用

对于国内钴储量极少的国家来说，回收钴，特别是回收废旧锂离子电池中的钴，是未来钴供应的主要挑战之一。除了技术和后勤方面的挑战外，它还要求再循环过程在数量、成本和环境影响方面具有与从矿石中获得钴资源相竞争的能力。据估计，2012 年全球范围内高达 69% 的报废钴被送往填埋场^[29]。回收工艺和回收成功与否，将取决于含有钴的报废产品和钴价格的高低。欧盟以前的目标是到 2016 年回收 40% 的电池，以减少对原生钴的需求。目前尚不清楚这一目标是否已经实现。从区域来看，2015 年英国、法国和德国的钴回收利用率在 25%~30% 之间。具体到动力电池领域，据估计到 2030 年从废旧锂离子电池 (LIBs) 中回收的钴可以供应高达 10% 的电动车钴需求。从环境角度来看，与高温冶金途径相比，利用有机酸可被视为一种环境友好型回收方

法。高温冶金能耗高，需要进行烟气处理，还需要额外的处理步骤进行提炼。因此，锂离子电池中回收含钴阴极材料的低碳工业化工艺大有可为^[30]。

6 结 语

世界范围内的钴贸易和供应链危机已经引起很多国家和机构的关注^[31]，以致被纳入主要国家的关键矿产系列或清单当中。中国的许多部门、机构和企业也都进行了长期深入的工作部署^[32]，但是在国际上的影响力和供应链的控制力还比较薄弱，与发达国家相比有很大差距。当前，我国的钴矿供应安全极其重要，其原材料供应和西方国家形成很强的竞争性。提高钴供应的安全程度，需要全面掌握几种主要资源的赋存特征、大力开展采选冶技术创新和高标准高质量进行产业创新，同时应高度重视推动国际产业联盟和技术合作，以应对国际产业链重构和竞争格局变化。

参考文献:

- [1] Gondia Sokhna Seck, Emmanuel Hache, Charlene Barnet. Potential bottleneck in the energy transition: The case of cobalt in an accelerating electro-mobility world[J]. *Resources Policy*, Vol75, 2022:102516.
- [2] Seddon M. The cobalt market—current volatility versus future stability?[J]. *Applied Earth Science*, 2001, 110:71-74.
- [3] Bartekov'a E, Kemp R. Critical raw material strategies in different world regions[R]. United Nations University, Maastricht Economic and social Research institute on Innovation and Technology. Working paper Series, 2016. #2016-005.
- [4] Slack J F, Kimball B E, Shedd K B. Cobalt. In: Schulz K J, DeYoung J H, Seal R R, Bradley D C (Eds.), *Critical mineral resources of the United States—economic and environmental geology and prospects for future supply reston*[R], 2017: F1-F40.
- [5] 余韵, 杨建锋. 中国战略性矿产地位和作用的变化——以钴为例[J]. *矿业研究与开发*, 2020, 40(12):177-183.
- YU Y, YANG J F. Changes in the status and role of China's strategic minerals—taking cobalt as an example[J]. *Mining Research and Development*, 2020, 40(12):177-183.
- [6] Smith C G. Always the bridesmaid, never the bride: cobalt geology and resources[J]. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section B-Applied Earth Science*, 2001, 110:B75-B80.
- [7] Leblanc M, Billard P. Cobalt arsenide ore bodies related to an upper Proterozoic ophiolite: Bou Azzer (Morocco)[J]. *Economic Geology*, 1982.<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.77.1.162>.
- [8] Croxford N J W. Cobalt mineralization at Mount Isa, Queensland, Australia, with references to Mount Cobalt[J]. *Mineral Deposita*, 1974, 9:105-115.
- [9] Crundwell F K, Moats M S, Ramachandran V, et al. *Extraction of cobalt from nickel laterite and sulfide ores*[M]. Elsevier, 2011: 365-376.
- [10] Fisher K G. Cobalt processing developments[C]. in: *The Southern African Institute of Mining and Metallurgy 6th Southern African Base Metals Conference*, 2011. 237-258.
- [11] Warner A E M, Díaz C M, Dalvi A D, et al. JOM world nonferrous smelter survey Part IV: Nickel: Sulfide[J]. *JOM*, 2007, 59:58-72.
- [12] Vernon P N, Burks S F. The application of Ausmelt technology to base metal smelting, now and in the future[J]. *Journal of South African Institute Mineral Metallurgy*, 1997, 97:89-98.
- [13] Huang K, Li Q, Chen J. Recovery of copper, nickel and cobalt from acidic pressure leaching solutions of low-grade sulfide flotation concentrates[J]. *Minerals Engineering*, 2007, 20:722-728.
- [14] Mudd G M. Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites[J]. *Ore Geological Review*, 2010, 38:9-26.
- [15] Riekkola-Vanhanen M. Talvivaara mining company - From a project to a mine[J]. *Minerals Engineering*, 2013, 48:2-9.
- [16] Chaney R L, Angle J S, Baker A J M, et al. Method for phytomining of nickel, cobalt and other metals from soil[P]. US Patent 5711784 A, 1999.
- [17] Eckelman M J. Facility-level energy and greenhouse gas life-cycle assessment of the global nickel industry[J]. *Resources Conservation Recycle*, 2010, 54:256-266.
- [18] Schmidt T, Buchert M, Schebek L. Investigation of the primary production routes of nickel and cobalt products used for Li-ion batteries[J]. *Resources Conservation Recycle*, 2016, 112:107-122.
- [19] Norgate T, Jahanshahi S. Assessing the energy and greenhouse gas footprints of nickel laterite processing[J]. *Minerals Engineering*, 2011, 24:698-707.
- [20] Norgate T, Jahanshahi S. Low grade ores – smelt, leach or concentrate[J]. *Minerals Engineering*, 2010, 23:65-73.
- [21] Sun X, Hao H, Liu Z, et al. Tracing global cobalt flow: 1995-2015[J]. *Resources Conservation Recycle*, 2019, 149:45-55.
- [22] Sole K C. Copper solvent extraction: Status, operating practices, and challenges in the African Copperbelt[J]. *Journal of South African Institute Mineral Metallurgy*, 2016, 116:553-560.
- [23] Lee K, Archibald D, McLean J, et al. Flotation of mixed copper oxide and sulphide minerals with xanthate and hydroxamate collectors[J]. *Minerals Engineering*, 2009, 22:395-401.
- [24] Shengo L M, Gaydardzhiev S, Kalenga N M. Assessment of water quality effects on flotation of copper-cobalt oxide ore[J]. *Minerals Engineering*, 2014, 65:145-148.
- [25] Dehaine Q, Filippov L O, Glass H J, et al. Rare-metal granites as a potential source of critical metals: a geometallurgical case study[J]. *Ore Geological Review*, 2019,

104:384-402.

[26] 吴西顺, 张炜, 杨添天, 等. 地质冶金学发展及对建设智慧矿山的意义[J]. *矿产综合利用*, 2021(5):67-75.

WU X S, ZHANG W, YANG T T, et al. Development of geometallurgy and its significance to the construction of wisdom mines[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(5):67-75.

[27] Macfarlane, A S, Williams T P. Optimizing value on a copper mine by adopting a geometallurgical solution[J]. *Journal of South African Institute Mineral Metallurgy*, 2014, 114:929-936.

[28] Shengo M L, Kime M B, Mambwe M P, et al. A review of the beneficiation of copper-cobalt-bearing minerals in the Democratic Republic of Congo[J]. *Journal of Sustainable Mining*, 2019, 18:226-246.

[29] Harper, E M, Kavlak G, Graedel T E. Tracking the metal of the goblins: cobalt's cycle of use[J]. *Environment Science*

Technology, 2012, 46:1079-1086.

[30] Vel'azquez-Martínez O, Valio J, Santasalo- Aarnio, et al. A critical review of lithium-ion battery recycling processes from a circular economy perspective[J]. *Batteries*, 2019.<https://doi.org/10.3390/batteries5040068>.

[31] 吴西顺, 王蛟. 日本富钴结壳大比例尺填图对西太平洋勘探的启示[J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(1):43-51.

WU X S, WANG J. Enlightenment of large-scale mapping of cobalt-rich crusts in Japan for exploration in the Western Pacific[J]. *Frontiers in Marine Geology*, 2015, 31(1):43-51.

[32] 陈忠玉, 刘强, 江皇义, 等. 分级-反浮选-重选高效分选刚果(金)某氧化钴铜矿[J]. *矿产综合利用*, 2021(4):170-175.

CHEN Z Y, LIU Q, JIANG H Y, et al. Beneficiation treatment of a cobalt-copper mine in DRC by combined process of classification-reverse flotation-gravity separation[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):170-175.

Supply Security and Technological Innovation of Global Cobalt Minerals

ZHANG Hui¹, Wu Xishun^{1,2}, Yang Tiantian³, Sun Zhanqiao¹

(1.Geosciences Documentation Center, China Geological Survey, China Geological Library, Beijing, China;

2.International Mining Research Center, China Geological Survey, Beijing, China; 3.Beijing Vocational College of Electronics Technology, Beijing, China)

Abstract: The worldwide cobalt ore trade and supply chain crisis has attracted the attention of many countries and institutions, in such a manner that major countries have listed it among their key mineral series or list. The world has huge reserves of cobalt resources, however, with limited production and presence of geopolitical risks. This is mainly manifested in the existence of the highly concentrated production, refinery and consumption of cobalt resources. In addition to seabed cobalt deposits, cobalt exists in the following forms in the continents: layered sedimentary copper-cobalt deposits (about 58%), mainly located in the Democratic Republic of Congo and Zambia; laterite-type nickel-cobalt deposits (about 29%), mainly situated in Australia, New Caledonia and Cuba; magmatic nickel-copper-PGE-cobalt deposits (about 9%), mainly distributed in Australia, Canada, Russia, Finland and the United States. Over 60% of the world's cobalt concentrate is produced in D.R.Congo. But above 60% of cobalt ore refining and processing are done in China, while more than 60% of refined cobalt are consumed by China, the European Union and the United States. In particular, China, the United Kingdom, and Japan are nearly 100% dependent on import for cobalt supply. In face of such severe situation and intense competition, technological innovation is key. New technologies have actually been gradually applied, for example, the combined process of beneficiation and metallurgy, as well as some new extraction methods. Major challenges lie in the improvement of cobalt ore recovery rate, secondary resource utilization and product recycling. Many departments, institutions and enterprises in China have made long-term and in-depth arrangements in this regard. However, China's international influence and control over the supply chain remain relatively weak. A big gap still exists as compared against the developed countries, making cobalt supply security an extremely important issue for China. Competition stays intense between China and western nations in terms of raw material supply. To improve the security of cobalt supply, it is crucial to gain a full understanding of the occurrence

characteristics of the several major resource types, impose immense efforts on technological innovation in mining, ore processing and metallurgy, and push industrial innovation with high standards and high quality. In the meantime, considerable attention should also be paid to promoting international industrial alliances and technological cooperation, with a vision to get well prepared for the restructuring of the international industrial chain and changes in the competitive landscape.

Keywords: Cobalt minerals; Supply security; Technological innovation; Green emission reduction

////////////////////////////////////
(上接第 122 页)

Research Progress of Recovery Process of Valuable Metals in Cathode Materials of Waste Lithium Batteries

Xu Zhengzhen, Liang Jinglong, Li Hui, Guo Jiaming

(Key Laboratory of Ministry of Education for Modern Metallurgy Technology, College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei, China)

Abstract: With the rapid development of new energy vehicles, electronic products and other industries, the demand for its core component lithium-ion batteries has increased significantly, but the environmental pollution and resource waste caused by waste lithium-ion batteries have become increasingly serious. Therefore, the harmless treatment of waste lithium-ion batteries and the effective recycling of the scarce valuable metals have become the hotspot and focus of research in domestic and foreign research institutes. The process of extracting valuable metals from the cathode materials of waste lithium-ion batteries is summarized: wet recovery process, fire roasting-wet metallurgy combined recovery process, biological leaching recovery process and other recovery processes. The principle, advantages and disadvantages of various methods are mainly described, and the future development direction of the recycling process is pointed out.

Keywords: Waste lithium ion battery; Cathode material; Recycling process; Development direction