

基于物质流分析的中国钴资源供需形势

邢欣然¹, 汤林彬^{2*}, 汪鹏^{3,4}, 王鹤鸣^{1*}, 岳强¹, 陈伟强^{3,4}, 杜涛¹

1. 东北大学国家环境保护生态工业重点实验室, 沈阳 110819

2. 中国科学院赣江创新研究院, 赣州 341000

3. 中国科学院城市环境研究所, 中国科学院城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

4. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为厘清中国钴资源的供需形势, 利用物质流分析 2000—2020 年中国钴资源流量、存量和供需格局变化。研究发现: (1) 中国钴矿进口量逐年提升, 对外依存度高, 每年均在 70% 以上, 精炼钴产量及净出口量逐年增长, 2020 年分别达到了 8.5 万 t 和 1.4 万 t。(2) 钴产品制造量不断提高, 从 2000 年的 0.01 万 t 上升至 2020 年的 6.3 万 t, 电池是钴主要的制造产品; 在贸易阶段, 钴产品整体呈现净出口, 2020 年净出口量为 1.7 万 t。(3) 钴产品在用存量持续上升, 2020 年达到了 12.5 万 t。钴产品整体回收率低, 进一步加大回收是应对钴需求扩张的主要方法。同时, 建议提高技术水平, 减少加工过程的浪费, 降低对于钴资源的依赖, 还需要做好资源储备, 应对国际局势变化。

关键词 钴; 动态物质流; 供需关系; 全生命周期

中国在 2020 年提出了碳达峰、碳中和的发展目标^[1-2]。交通部门在碳中和中发挥重要作用^[3], 近年来电动汽车逐步走入市场, 钴正是电动汽车中的关键金属之一。金属与能源供应间相互依赖^[4], 资源之间相互关联, 对可持续发展有着深远影响^[5], 探究钴资源供需格局可以有效应对其他资源和能源的供需变化。

关键矿产在国家经济及各方面发展中发挥重要作用^[6-7]。钴是关键矿产之一, 广泛应用于电池、高温合金、硬质合金、磁性材料、催化剂等^[8-9], 截至 2020 年, 全球已探明的钴矿总储量为 710 万 t, 钴矿储量集中, 陆地钴矿资源主要集中在刚果民主共和国(简称“刚果(金)”)、澳大利亚、古巴等国, 其中, 刚果(金)的储量为 360 万 t, 占全球

收稿日期: 2022-06-03; 修回日期: 2022-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871204, 52070034)

作者简介: 邢欣然, 硕士研究生, 研究方向为工业生态学, 电子信箱: 2101590@stu.neu.edu.cn; 汤林彬(通信作者), 博士, 研究方向为关键金属物质流分析与资源安全评估, 电子信箱: linbintang@iue.ac.cn; 王鹤鸣(共同通信作者), 教授, 研究方向为工业生态学, 电子信箱: wangheming2006@gmail.com

引用格式: 邢欣然, 汤林彬, 汪鹏, 等. 基于物质流分析的中国钴资源供需形势[J]. 科技导报, 2022, 40(21): 120-128; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.21.012

总储量的 50.7%^[10]。在目前已探明的钴矿中,独立钴矿床较少,钴矿主要伴生于铁、镍、铜等矿产中^[11-12]。30年来,全球钴矿产量在波动中增长,钴矿价格受多方因素影响,经历了3次较大起伏。近5年钴矿价格又呈现出新的发展趋势,刚果(金)政府的政策及钴产品技术变革,势必会影响钴矿价格^[6]。中国国内的钴矿储量为8万t,占世界总储量的1.1%^[10],钴矿分布在青海、甘肃、云南、吉林等省份^[13]。中国钴矿多为伴生矿,矿石品位较低,可回收利用率不高,中国钴资源供应形势紧张,钴矿依赖于进口^[14]且进口量逐年攀升^[15-16],厘清中国钴的供需形势对于保障电池及其他钴产品供应、实现碳中和及碳达峰的发展目标至关重要。

物质流分析追踪物质从自然界开采到进入人类经济体系中,并在不同时段和区域中流动,最后回到自然环境中的过程,是分析经济、环境、社会影响的有效方法^[17]。物质流分析广泛应用于金属领域,例如:铁^[18-19]、铜^[20]、铝^[21]、铅^[22]、稀土^[23]等。因此,可以利用此方法寻找保证钴资源安全供给的有效方法。目前,钴物质流及供需关系相关研究主要针对世界^[24-26]、美国^[17]、中国^[27-30],还有研究仅针对电池的发展进行了分析,未分析其他钴产品^[31-35],也有研究主要从某个阶段对钴进行了分析^[36-37]。

前人研究对于中国钴供需变化描述相对简略,有的研究仅描述了单一年份中国钴物质流变化^[27,29],缺少动态性。近年来,随着三元电池技术的发展,电动汽车行业逐渐走入市场,钴需求进入了新的发展阶段,因此,有必要从全生命周期视角探讨中国钴的物质流动及其资源供需形势。本研究立足于供需关系,采用动态物质流分析方法,从全生命周期视角,分析2000—2020年中国钴供需关系及物质流变化。

1 物质流分析方法及数据来源

1.1 研究方法

基于动态物质流分析方法,分析中国钴物质流动,空间边界为中国大陆,时间边界为2000—2020年,各阶段的每个流量值都以含钴量进行衡量,钴物质流分析框架主要由采矿、精炼、加工制造、使用、废物管理和贸易阶段构成,如图1所示。

矿石的开采和初步加工被称为采矿阶段,绝大部分的钴是作为铜、镍矿的副产品被开采出来,进口钴矿主要包括钴矿、镍矿、铜矿、湿法冶金中间品和白合金,其中,湿法冶金中间品和白合金是采矿产物经过初步加工得到的产品^[16]。

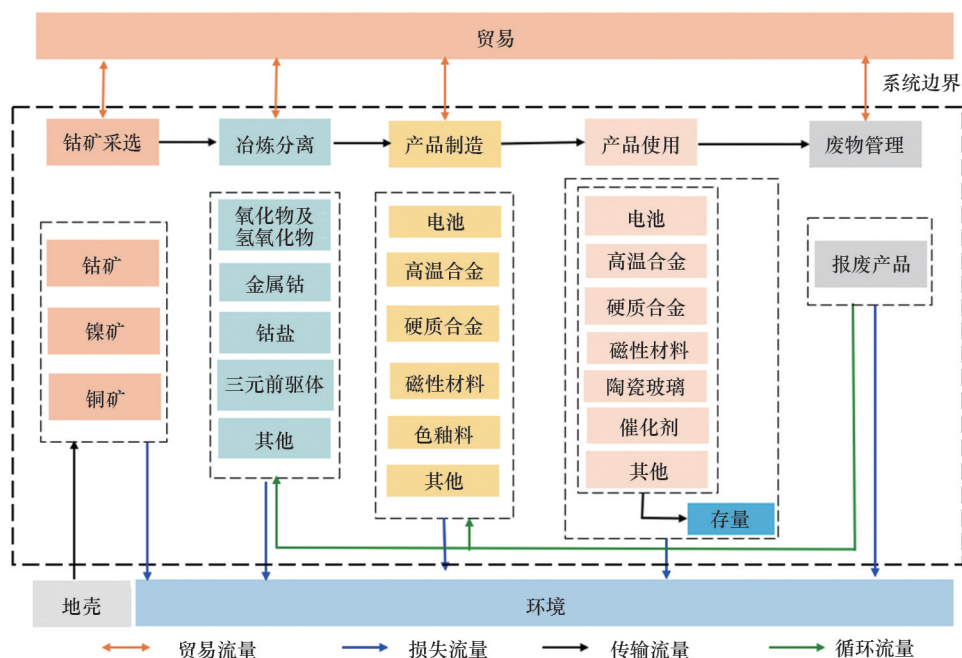


图1 基于全生命周期贸易关联的中国钴物质流分析框架

在钴的冶炼阶段,中间品会被首先加工成硫酸钴和氯化钴,再被进一步加工成为其他的钴盐、钴的氧化物、金属钴等。钴镍锂锰、锂镍钴铝酸盐和钴酸锂是锂离子电池的主要材料,钴盐和金属钴则主要用于生产合金或磁性材料等。

钴的终端产品包括电池产品、高温合金、硬质合金、磁性材料、陶瓷玻璃、催化剂和其他(包括干燥剂、试剂、染料等)^[7]。电池产品主要包括手机、平板电脑、电动汽车等。根据相关调研,钴在电池中起到稳定材料的层状结构,提高材料的循环和倍率性能的作用。在合金中,钴能够提高钢耐磨性和切削性能、提高合金韧性、降低合金的冲击敏感性。同时,钴是少数磁化一次就能保持磁性的金属之一。

在废物管理阶段,产品达到寿命终点,回收或者报废。对回收的部分,废钴产品被收集、分离、处理再循环利用。不同的钴产品的回收率不同,根据产品各自的回收情况进行计算。废物主要包括企业自产废物的回收及报废产品的回收。企业自产废物主要为加工制造过程中报废的产品,再进行进一步的再利用;报废产品主要为到达使用寿命后的产品的回收。

1.2 数据来源

相关数据及数据来源如表1所示,调研结果主要来自于各阶段各产品生产公司年报、公司官网信息、证券报告、相关新闻报道或相关研究会议报告等。

表1 数据来源

数据类型	数据来源
矿石生产数据	美国地质调查局 ^[38-40]
精炼钴生产数据	主要来源于中国有色金属工业年鉴 ^[41] ,部分缺失数据来源于文献[17,25,28,30]
钴产品生产数据	主要来源于中国统计年鉴 ^[42] ,部分缺失数据来源于文献[17,25,28,30]及数据调研
贸易数据	中国海关统计年鉴 ^[43] 、UNComtrade ^[44]
相关贸易代码	文献[17,25,28,30]
钴含量数据	数据调研、文献[17,25,28,30]
回收率及寿命数据	数据调研、文献[17,25,28,30]

在原材料获取阶段,钴原料主要有钴矿及精矿、镍矿及精矿、铜矿及精矿、湿法冶金中间体和白合金。矿石从矿床中开采后,被加工成钴化学品。湿法冶金中间体和白合金是原始矿物的粗炼产品,两者都作为提炼生产相关化学品的原材料向中国出口。不同产品的钴回收率不同,使用寿命也有显著差异。

1.3 计算方法

采用动态物质流计算2000—2020年中国含钴产品的流量及在用存量。含钴产品的流量遵循质量守恒,具体计算公式为

$$OU_{i,t} + EX_{i,t} = IN_{i,t} + IM_{i,t} \quad (1)$$

式中, $IN_{i,t}$ 、 $IM_{i,t}$ 、 $EX_{i,t}$ 、 $OU_{i,t}$ 分别为第 t 年以钴质量衡量的第 i 类含钴产品的流入量、进口量、出口量和流出量。

目前,分析中常用的寿命分析模型有:固定寿命模型、高斯正态分布模型、威布尔模型,使用高斯正态分布模型拟合产品的使用寿命

$$E_i = \int_{t-1}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt \quad (2)$$

$$W_{i,t} = \sum_0^{n=n_{\max}} (S_{N-n} E_t) \quad (3)$$

式中, i 为产品; t 为年份; E_t 为使用了 t 年的产品的报废比例; $W_{i,t}$ 为产品 i 在 t 年的报废量; n_{\max} 为最高使用寿命; n 为实际使用寿命; S_{N-n} 为 $N-n$ 年的表观消费量。

在用存量是指以最终产品的形式在社会经济系统中累积的矿物量,具体计算公式为

$$ST_{i,t} = \sum_i (OU_{i,t} - W_{i,t}) \quad (4)$$

钴回收量计算公式为

$$RE_{i,t} = W_{i,t} R_{i,t} \quad (5)$$

式中, $ST_{i,t}$ 为 t 年 i 类材料的在用存量; $W_{i,t}$ 为报废量; $RE_{i,t}$ 为钴回收量; $R_{i,t}$ 为含钴废料的回收率。

对外依存度全称是对外贸易依存度,是用来反映一个国家对外贸易活动依赖程度的经济指标。一个国家产品生产和消费依赖国际贸易取得产销平衡的程度^[45]。 $F_{i,t}$ 为 t 年 i 类材料的对外依存度,计算公式为

$$F_{i,t} = \frac{IM_{i,t} - EX_{i,t}}{IM_{i,t} - EX_{i,t} + IN_{i,t}} \quad (6)$$

2 结果及讨论

2.1 总体格局分析

2000—2020年中国钴元素整体物质流格局分析如图2所示,在2000—2020年,在采矿阶段,中国国内钴原矿开采量少,仅为7.8万t,二次资源回收量为8.8万t,钴矿净进口量为71.7万t,对外依存度达到81.2%。在精炼阶段,国内精炼钴产量为63.9万t,净出口量为9.3万t,精炼过程产生的废弃物为

24.4万t。钴产品制造和使用阶段均以电池为主导,电池的制造量及表观消费量分别为31.0万、19.9万t,其余钴产品的制造量为:高温合金为4.1万t、硬质合金为2.4万t、磁性材料为3.2万t、陶瓷玻璃为2.6万t、催化剂为2.6万t。对表观消费量而言:高温合金为2.8万t、硬质合金为4.6万t、磁性材料为1.9万t、陶瓷玻璃为1.8万t、催化剂为2.7万t。钴产品的报废量为21.5万t,总体报废量高。

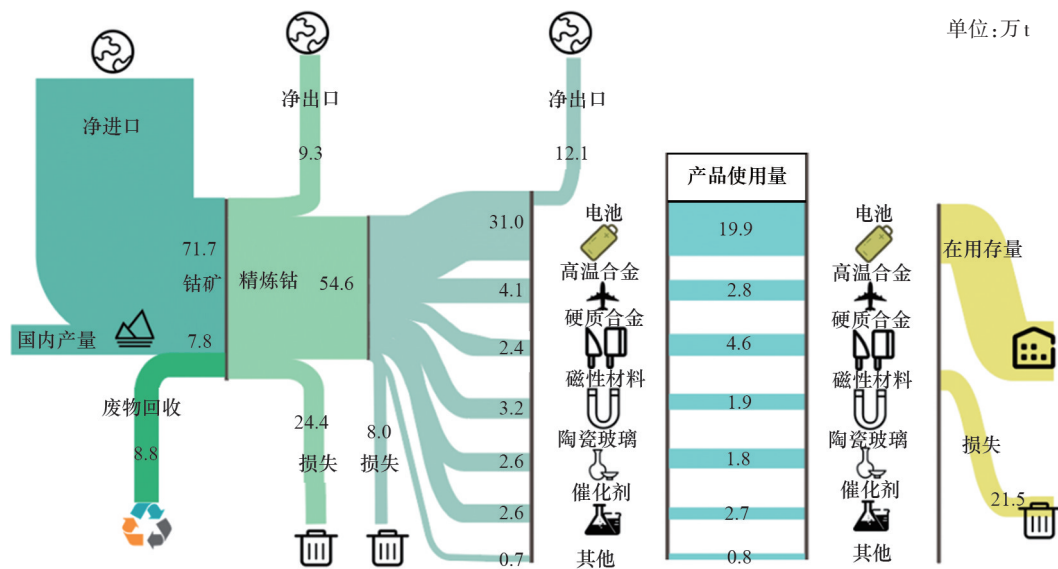


图2 2000—2020年中国钴物质流分析

2.2 开采及精炼阶段

2000—2020年中国钴矿供需情况如图3、图4所示,中国国内钴矿产量难以满足需求,钴矿依赖于进口。2000年中国钴原矿开采量为0.01万t,

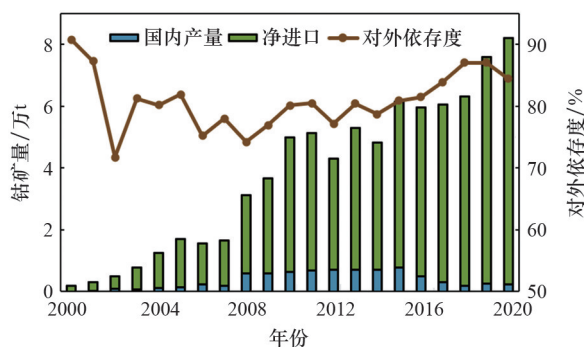


图3 2000—2020年中国钴矿产量、净进口及对外依存度

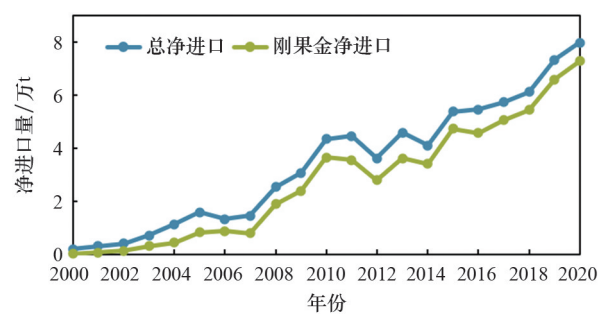


图4 2000—2020年 钴矿净进口、从刚果(金)净进口

2020年增长至0.2万t,增长了25倍,钴矿净进口量从2000年的0.01万t增长至2020年的8.0万t,增长了40倍,对外依存度每年均在70%以上。刚果(金)是中国钴矿主要的供应国,从该国进口的量由2000年的0.01万t增长到2020年达到了7.3万t,而从该国进口的量占总进口量比例在2020年达到最

高,为91%。

精炼钴国内产量如图5所示,2000—2020年中国精炼钴产量不断上升,国内供应尚能满足国内需求。精炼钴产量从2000年的0.1万t上升至2020年的8.5万t。其中,钴氧化物在精炼阶段占据主导地位,其产量从2000年的近0.1万t增长至2020年的4.5万t,生产占比均在50%以上。三元前驱体产量从2000年的不足0.01万t(占比2%)增长至2020年的2.8万t(占比33%),其中,2016—2020年三元材料技术飞速发展,三元电池逐渐进入应用,三元材料产量占比提升了21%。钴氧化物是生产钴酸锂的主要原料,三元前驱体用来生产三元材料。金属钴及钴盐在2010—2020年间均稳定在0.4万t左右。

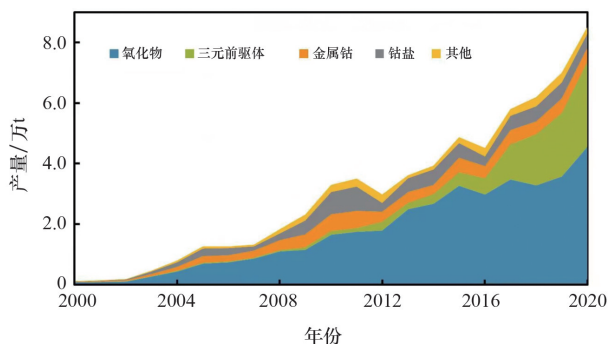


图5 2000—2020年中国精炼钴产量

精炼钴贸易情况如图6所示,精炼钴以净出口为主,2000年净出口量为0.02万t,2020年增长至1.4万t。其中,钴氧化物是主要的净出口产品,其贸易情况主要可以分为3个阶段:2000—2013年快速增长阶段、2013—2018年平稳阶段、2018—2020年波动阶段。2000年净出口不足0.01万t,在2013年达到0.7万t,2013—2018年相对平稳,在2018年

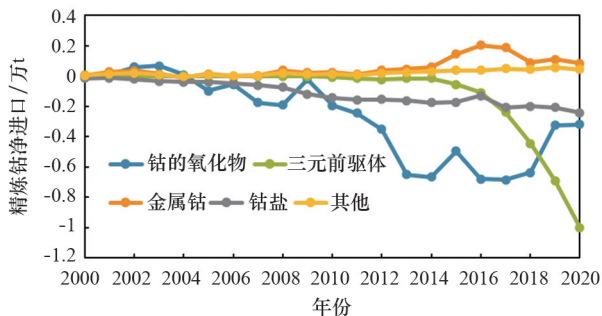


图6 2000—2020年中国精炼钴净进口

净出口量最大,但在2019、2020年,受物流运输、疫情及三元电池不断推广的影响,钴氧化物净出口量有所下滑,2020年下降至0.3万t。

三元前驱体的贸易主要分为2个阶段:2000—2015年技术发展及成熟阶段、2016—2020年应用飞速扩张阶段。2000—2015年由于三元材料技术尚未成熟,三元前驱体贸易量低,处于缓慢增长阶段,从2000年的净出口量不足0.01万t增长至2015年的0.06万t,2016年后受三元材料技术发展的影响,三元前驱体净出口量加速增长,从2016年的0.1万t增长至2020年的1.0万t,2019年超过了钴氧化物成为净出口量最大的产品。

其他精炼钴产品净出口量在增长后相对稳定,2000年金属钴净进口量不足0.01万t,钴盐净进口量为0.01万t,在2020年金属钴净进口为0.1万t,钴盐净出口为0.2万t。总体来看,中国精炼钴除满足国内需求外,还存在对外出口。

2.3 制造阶段

钴产品制造阶段如图7所示,在2000—2020年,钴产品制造量呈现上升趋势,从2000年的0.1万t上升至2020年的6.3万t。电池是钴制造阶段的主要产品,其产量从2000年的不足0.01万t上升至2020年的5.1万t。其制造可分为2个阶段:2000—2016年平稳增长阶段,2016—2020年电动汽车驱动增速加快。在第2阶段,即2016年之后,三元锂电池逐渐走向应用,电动汽车产业飞速发展,含钴电池在钴产品制造中的比重加大,从2016年的68%增长至2020年的81%。

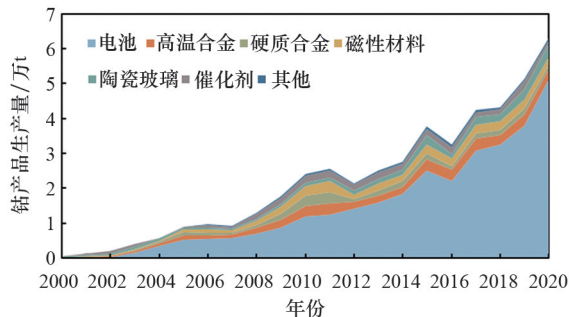


图7 2000—2020年中国钴产品制造量

其他钴产品产量在上升后趋于相对稳定,2010年后均稳定在0.1万~0.3万t,2000年制造阶段其他

各产品产量:高温合金、硬质合金和磁性材料不足0.01万t,陶瓷玻璃为0.02万t,催化剂为0.02万t。2020年制造阶段各产品产量:高温合金为0.3万t,硬质合金为0.2万t,磁性材料为0.2万t,陶瓷玻璃为0.2万t,催化剂为0.1万t。

钴产品贸易情况如图8所示,钴产品以出口为主,贸易量从2000年的净进口0.03万t增长至2020年的1.7万t。含钴电池贸易主要可以分为2个阶段:2000—2006年平稳增长阶段,2006—2020年电池驱动飞速增长阶段。2000—2006年含钴电池贸易量低,2006—2020年,净出口量增长明显,从2006年的不足0.01万t增长至2020年的1.3万t。含钴电池贸易在第2阶段开始,主要是由于钴酸锂电池应用量飞速增加,推动着贸易量的增长,在2016年后电动汽车国际贸易市场扩大推动电池贸易量增长。

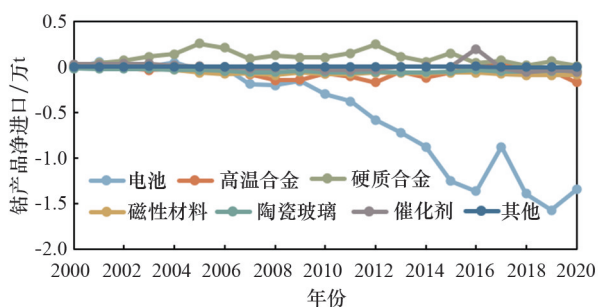


图8 2000—2020年钴产品净进口

除电池外,其他钴产品在2000—2020年间整体进出口小幅上升后趋于相对稳定,其中,2000年高温合金、硬质合金净进口不足0.01万t,磁性材料净进口0.1万t,催化剂净进口0.03万t,陶瓷玻璃净出口0.01万t。2020年高温合金净出口0.2万t,硬质合金净进口0.01万t,磁性材料净出口0.1万t,催化剂净出口0.04万t,陶瓷玻璃净出口0.05万t。

2.4 在用存量及回收利用情况

钴产品在用存量如图9所示,2000—2020年间,钴产品在用存量处于增长状态,从2000年的0.1万t增长至2020年的12.5万t,电池是主要的在用产品,其在使用存量从2000年的不足0.01万t增长至2020年的8.9万t。电池在用存量可分为2个阶

段:2000—2016年3C驱动增长阶段,2016—2020年电动汽车驱动增长阶段。其中,2000—2016年,电池的在用存量增长相对平稳,到2016年增长至3.4万t,电池在钴产品总在用存量中占比从2000年的3%增长至2016年的55%,从2016年起,电池在用存量增速加快,2016—2020年增长了2.6倍,2020年电池在用存量在总在用存量中占比71%。与此同时,高温合金与磁性材料由于使用寿命长,其在使用存量在钴产品总在用存量中占比较高,但随着电池的逐步推广,高温合金与磁性材料的占比有所下滑,从2000年的占比14%、12%,下滑至2020年的11%、9%,2020年高温合金与磁性材料的在用存量分别达到1.4万、1.1万t。其他产品在用存量:硬质合金为0.3万t、陶瓷玻璃为0.5万t、催化剂为0.3万t。

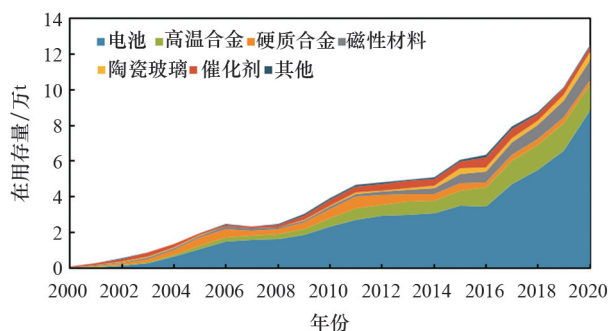


图9 2000—2020年钴产品在用存量

钴产品报废及回收情况如图10所示,钴产品的报废量逐年增加,电池为主要的报废产品,其次为硬质合金,主要原因是电池使用量大,硬质合金寿命短。2020年钴产品的报废量分别为:电池为1.5万t、高温合金为0.2万t、硬质合金为0.2万t、陶瓷玻璃为0.1万t、磁性材料为0.2万t、催化剂为0.1万t。其中,电池报废量占总报废量的51%。2000—2020年报废钴产品的整体回收率在15%左右。近年来,含钴电池报废量增长迅速,但由于手机等产品的回收率低,钴产品的整体回收率略有下滑,2020年整体回收率为13%。2020年各产品回收量分别为:电池为0.2万t、高温合金为0.1万t、硬质合金为0.05万t、磁性材料为0.01万t,电池回收占总回收量的48%。

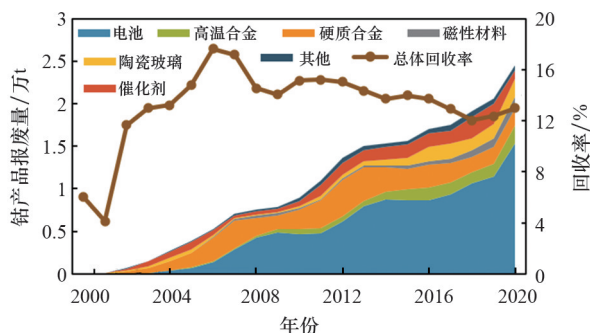


图10 2000—2020年钴产品报废量及整体回收率

3 结论

2000—2020年中国钴整体供需量大,部分产品国内供应远不能满足国内需求,具体结论如下。

1) 国内钴矿产量不能满足国内需求,钴矿大量依赖于进口,且进口主要来源为刚果(金),钴矿的进口受刚果(金)的国家政策及国际关系的影响,因此,有必要采取相关措施,降低对钴矿的对外依存度。

2) 在钴精炼及制造阶段,国内产量能够满足国内需求。钴氧化物和三元前驱体作为电池的前端产品在钴精炼阶段占据主导地位,电池在钴产品制造阶段占据主导地位,2016年后,随着三元材料技术的发展,三元电池逐步进入市场,电池及其前端精炼产品的生产量明显提升;2020年,钴氧化物、三元前驱体、含钴电池产量分别为4.3万、2.8万、5.1万t。其他钴产品及其前端精炼产品的产量在上升后趋于相对稳定,2020年其他钴产品制造量在0.1万~0.3万t。在贸易阶段,中国出口大量的精炼钴及钴产品,净出口量呈现上升趋势,中国在精炼钴及钴产品的国际贸易市场占据重要地位。

3) 2000—2020年钴产品在用存量逐年上升,电池是主要的在用产品,2016年后,在用存量增速进入新阶段,2020年电池在用存量达到了8.9万t。其他钴产品在2020年在用存量为:高温合金为1.5万t、硬质合金为0.3万t、磁性材料1.1万t、陶瓷玻璃为0.5万t、催化剂为0.3万t。随着电动汽车的进一步推广,钴产品在用存量在未来会加速增长。

4) 在钴产品报废及回收阶段,电池占据主导地位,2020年钴产品总报废量为2.4万t,但钴产品

整体回收率低,2020年为14%。有效地提升钴产品的回收率可以降低钴矿的对外依存度。

基于研究结果,针对中国钴需求不断增长,国内钴矿产量低的现状,提出以下建议。

1) 对于钴矿的高对外依存度,通过加强国际合作、加快国内资源勘探等方式,降低对单一国的依赖。强化各国间的交流合作,对其他国家的钴资源开发利用进行扶持,实现各国各类资源间的优势互补,实现多渠道、多种方式进口。同时,加强对国内钴矿的勘探,充分发掘国内钴矿资源,建立良好的国家储备。

2) 在精炼及制造阶段,要强化技术革新,抓住技术发展关键节点。在“双碳”背景下,三元电池技术正处于高速发展的关键阶段,三元正极材料钴含量不断变化,三元锂电池朝着低钴化发展,但钴能稳定电池的层状结构,提高材料的循环和倍率性能。因此,可以通过加强对低钴电池新技术的研发,抓住技术转型的关键节点,缓解钴的需求量。对除含钴电池外的其他产品,要优化传统技术,减少生产过程原材料的损失,降低钢铁及其他生产企业的环境污染。同时,发展新兴技术,进一步在国际贸易市场占据重要地位。

3) 对于回收阶段,加强回收,减少资源浪费,以降低对原材料的需求。对于电子废弃产品,建立合理的电池回收体系,分类收集产品,通过政策扶持和提高产品回收技术的方式,加强对于废弃物的回收。同时,加强对废合金及磁性材料等的回收管理,推动合金回收技术发展和回收企业发展,落实回收相关政策。建立健全的回收系统,鼓励发展高效回收技术,提升回收率,保障中国钴生产和使用的可持续发展。

参考文献 (References)

- [1] 邹才能,熊波,薛华庆,等. 新能源在碳中和中的地位与作用[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 411-420.
- [2] 王灿,张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境管理, 2020, 12(6): 58-64.
- [3] 王晨阳,汪鹏,汤林彬,等. 碳中和背景下中国电动车产业稀土需求预测[J]. 科技导报, 2022, 40(8): 50-61.

- [4] Wang P, Wang H M, Chen W Q, et al. Carbon neutrality needs a circular metal-energy nexus[J]. *Fundamental Research*, 2022, 2(3): 392-395.
- [5] Zhang C, Liu B, Li N, et al. Resource nexus for sustainable development: Status quo and prospect[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 66(26): 3426-3440.
- [6] 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.
- [7] 赵桑, 汪鹏, 王路, 等. 美国关键矿产战略的演化特征及启示[J]. *科技导报*, 2022, 40(8): 91-103.
- [8] 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.
- [9] 公凡影, 周园园, 于晓飞, 等. 钴资源的应用历史和发展[J]. *地球*, 2019(11): 34-39.
- [10] US Geological Survey. Mineral commodity summaries, 2020[M]. Reston: Government Printing Office, 2021.
- [11] 李成伟, 王家义. 全球钴资源供应现状简析[J]. *中国资源综合利用*, 2018, 36(7): 102-103.
- [12] 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.
- [13] 刘彬, 王银宏, 王臣, 等. 中国钴资源产业形势与对策建议[J]. *资源与产业*, 2014, 16(3): 113-119.
- [14] 徐昱, 王建平, 吴景荣. 我国钴矿资源现状及进出口分析[J]. *矿业研究与开发*, 2014, 34(5): 112-115, 132.
- [15] 刘全文, 沙景华, 闫晶晶, 等. 中国钴资源供应风险评估与治理研究[J]. *中国矿业*, 2018, 27(1): 50-56.
- [16] 周艳晶, 李建武, 王高尚, 等. 中国钴资源进口安全分析[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(5): 50-55.
- [17] 刘立涛, 赵慧兰, 刘晓洁, 等. 1995—2015年美国钴物质流演变[J]. *资源科学*, 2021, 43(3): 524-534.
- [18] 李新, 任强, 罗胤达, 等. 基于物质流分析的中国机械行业铁资源代谢过程研究[J]. *资源科学*, 2018, 40(12): 2329-2340.
- [19] Song L L, Wang P, Hao M, et al. Mapping provincial steel stocks and flows in China: 1978—2050[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262: 121393.
- [20] 郝敏, 陈伟强, 马梓洁, 等. 2000—2015年中国铜废碎料贸易及效益风险分析[J]. *资源科学*, 2020, 42(8): 1515-1526.
- [21] Chen W Q. Dynamic product-level analysis of in-use aluminum stocks in the United States[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2017, 22(6): 1425-1435.
- [22] 李新, 康欣宇, 林靖, 等. 中国铅资源流动及其循环效率[J]. *资源科学*, 2021, 43(3): 535-545.
- [23] 陈玮, 汪鹏, 赵桑, 等. 稀土元素物质流分析研究进展[J]. *科技导报*, 2022, 40(8): 14-26.
- [24] Sun X, Hao H, Liu Z, et al. Tracing global cobalt flow: 1995—2015[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2019, 149: 45-55.
- [25] Harper E M, Kavlak G, Graedel T E. Tracking the metal of the goblins: Cobalt's cycle of use[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(2): 1079-1086.
- [26] Zeng A Q, Chen W, Rasmussen K D, et al. Battery technology and recycling alone will not save the electric mobility transition from future cobalt shortages[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 1341.
- [27] 文博杰, 韩中奎. 2015年中国钴物质流研究[J]. *中国矿业*, 2018, 27(1): 73-77.
- [28] Chen Z Y, Zhang L G, Xu Z M. Tracking and quantifying the cobalt flows in mainland China during 1994—2016: Insights into use, trade and prospective demand[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 672: 752-762.
- [29] Chen Z Y, Zhang L G, Xu Z M. Analysis of cobalt flows in mainland China: Exploring the potential opportunities for improving resource efficiency and supply security[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 275: 122841.
- [30] Wang Y B, Ge J P. Potential of urban cobalt mines in China: An estimation of dynamic material flow from 2007 to 2016[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 161: 104955.
- [31] Dunn J, Slattery M, Kendall A, et al. Circularity of lithium-ion battery materials in electric vehicles[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(8): 5189-5198.
- [32] Asari M, Sakai S I. Li-ion battery recycling and cobalt flow analysis in Japan[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2013, 81: 52-59.
- [33] Bobba S, Mathieux F, Blengini G A. How will second-use of batteries affect stocks and flows in the EU? A model for traction Li-ion batteries[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 145: 279-291.
- [34] Liu W Q, Liu W, Li X X, et al. Dynamic material flow analysis of critical metals for lithium-ion battery system in China from 2000—2018[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 164: 105122.
- [35] Song J L, Yan W Y, Cao H B, et al. Material flow analysis on critical raw materials of lithium-ion batteries in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 570-581.
- [36] Mudd G M, Weng Z, Jowitt S M, et al. Quantifying the recoverable resources of by-product metals: The case of cobalt[J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 55: 87-98.

- [37] Gulley A L, Mccullough E A, Shedd K B. China's domestic and foreign influence in the global cobalt supply chain[J]. Resources Policy, 2019, 62: 317–323.
- [38] US Geological Survey. Mineral commodity summaries, 2020[M]. Reston: Government Printing Office, 2020.
- [39] US Geological Survey. Mineral commodity summaries, 2019[M]. Reston: Government Printing Office, 2019.
- [40] US Geological Survey. Mineral commodity summaries, 2018[M]. Reston: Government Printing Office, 2018.
- [41] 中国有色金属工业协会. 中国有色金属工业年鉴[M]. 北京: 中国有色金属杂志社, 2020.
- [42] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [43] 中华人民共和国海关总署. 中国海关统计年鉴[M]. 北京: 中国海关出版社, 2020.
- [44] UN Comtrade. International trade statistics database[EB/OL]. [2022-07-30]. <https://comtrade.un.org/>.
- [45] 王婧. 矿产品对外依存度计量方法模型与应用研究[J]. 中国国土资源经济, 2020, 33(9): 60–67.

Supply and demand situation of cobalt resources in China based on material flow analysis

XING Xinran¹, TANG Linbin^{2*}, WANG Peng^{3,4}, WANG Heming^{1*}, YUE Qiang¹, CHEN Weiqiang^{3,4}, DU Tao¹

1. State Environmental Protection Key Laboratory of Eco-Industry, Northeastern University, Shenyang 110819, China
2. Ganjiang Innovation Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Ganzhou 341000, China
3. Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to clarify the supply and demand situation of cobalt resources in China, material flow was used to analyze the changes in the flow, stock and supply and demand pattern of cobalt resources in China during 2000—2020. This article shows that 1) the import volume of cobalt ore to China was increasing year by year and the degree of external dependence was high, i.e., more than 70% yearly, and refined cobalt production and net exports increased year by year, reaching 85000 t and 14000 t, respectively in 2020; 2) the production of cobalt products was increasing from 100 t in 2000 to 63000 t in 2020, and batteries were the main cobalt products; in the trade phase, cobalt products showed a net export of 17000 t in 2020; 3) the stock of cobalt products in use continued to rise, reaching 125000 t in 2020. On the other hand, the overall recovery rate of cobalt products has been low, and improvement in recycling is the primary way to cope with the expansion of cobalt demand. At the same time, the article suggests improving the technical level, reducing the waste during processing process, reducing the dependence of cobalt resources, and doing an excellent job in resource reserve to adapt to the change of the international situation.

Keywords cobalt; dynamic mass flow; supply and demand; whole life cycle ●



(责任编辑 刘志远)