

钴金属资源概况与资源利用情况分析

卢宜冠^{1,2}, 郝波³, 孙凯^{1,2}, 何胜飞^{1,2}, 许康康^{1,2}, 龚鹏辉^{1,2}, 张航^{1,2}

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 华北地质科技创新中心, 天津 300170;
3. 赞比亚谦比希湿法冶炼有限公司, 赞比亚 谦比希 22880)

摘要: 钴是新兴产业发展的重要金属资源, 未来全球对钴的需求将持续增长。本文主要从地球化学属性、元素分布与迁移、矿床类型划分以及资源利用情况等几方面对钴矿资源进行概述和总结, 结合中国钴资源情况, 就全球钴资源的分布以及目前供需情况对未来钴市场进行了分析研究。研究认为, 为保障中国钴资源行业的可持续发展, 未来应提升对刚果(金)以外的海外钴资源配置比例, 同时亟需新型产品的生产研发以替代钴在锂电池、合金等领域的使用。另外, 深海钴开采前景广阔, 应重视并逐步加大在该领域的投入。

关键词: 钴; 关键矿产; 矿床分类; 资源利用; 未来市场

中图分类号: P618.62

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2020)01-0072-09

关键矿产是影响或制约国家经济发展的紧缺矿种或者优势矿种, 在国际上被形象地描述成“被别人卡脖子”或“卡别人脖子”的矿产资源^[1]。关键矿产之所以关键, 在于它们在高科技领域的广泛应用^[2]。高新技术产业发展刺激了全球对钴需求的持续增长, 当前已被多国列入关键性矿产目录^[3], 中国《全国矿产资源规划(2016—2020年)》也首次将包括钴在内的24种矿产列入战略性矿产目录。

钴是具有光泽的钢灰色硬质金属, 具铁磁性, 耐腐蚀性、耐磨性、高熔点等特征, 被广泛应用于电池材料(30%)、超级合金(19%)、硬质合金(13%)、陶瓷原料(9%)、催化剂(9%)和磁性材料(7%)等领域^[4]。钴主要为镍矿及铜矿的副产品, 少见独立矿床, 生产量受市场对铜和镍需求影响。中国具有较为丰富的大陆钴矿床类型, 其中绝大部分钴为共生或伴生矿种, 仅有个别为独立矿种^[5]; 大部分为中小型矿床, 大型以上矿床较少^[6]。当前, 中国作为全球第一大钴资源消费国, 国内钴资源明显不足, 超过90%以上的钴原料进口自刚果(金)等国。

中国钴需求的迅猛增长主要源于电子设备和新能源汽车产业的快速发展带动上游电池材料需求的增长。超级合金是钴消费的第二大领域, 这一领域中钴主要是用于航空航天发动机。此外, 钴催化剂对石油脱硫的功能也是其他材料难以替代的。因

此, 在低碳经济、循环经济时代, 钴工业的发展前景十分广阔。而且, 钴作为新兴产业的关键矿产, 在保障我国战略性新兴产业发展、保障国家能源资源安全方面有着非常重要的意义。本文通过对钴地球化学属性、在自然界中的分布、矿床类型划分等几个方面对钴金属资源进行了概述, 并结合钴资源利用现状对钴市场未来走向进行分析, 给出了今后钴资源开发和利用的建议。

1 钴地球化学属性

钴作为一种微量元素, 在地壳当中含量仅为 17.3×10^{-6} ^[7], 然而在镁铁质-超镁铁质岩石中却具有非常高的含量, 并与镍元素展现出较强的相关性。含钴矿物多为硫化物, 例如硫钴矿、碲硫镍钴矿、硫铜钴矿和辉砷钴矿等, 另外一些常见含钴矿物还包括方钴矿、钴华、菱钴矿和水钴矿等。含钴矿物中钴的含量通常介于14.5%~67.4%之间, 化学式和矿物中钴的含量详见表1。此外, 钴常以类质同象形式赋存于硫化物当中, 如毒砂、磁黄铁矿、黄铁矿和镍黄铁矿^[8]。

地球上钴分布不均一, 由地核向地壳迅速递减。地核中钴含量为0.25%, 到上地幔减至 102×10^{-6} , 再到地壳含量只有 $(35 \sim 10) \times 10^{-6}$ 。在球粒陨石中钴可达 $(500 \sim 513) \times 10^{-6}$ 。自然界中钴广泛赋存在火成岩和沉积岩中, 但主要富集于超镁铁质岩石中, 平均

收稿日期: 2019-12-30

资助项目: 中国地质调查局项目“非洲中东部大型铜-钴资源基地评价(DD20190439)”

作者简介: 卢宜冠(1990-), 男, 博士, 工程师, 毕业于中国地质大学(北京), 主要从事矿床学与矿产勘查研究工作, E-mail: luyiguan@mail.cgs.gov.cn。

表1 含钴矿物名称及其对应钴含量(据参考文献[15])
Tab.1 The list of the chemical formula and cobalt contents for the cobalt minerals

矿物名称	化学式	钴含量(%)
钴镍黄铁矿	Co ₉ S ₈	67.40
水钴矿	Co ³⁺ O(OH)	64.10
硫钴矿	Co ²⁺ Co ³⁺ ₂ S ₄	57.95
菱钴矿	CoCO ₃	49.55
方硫钴矿	CoS ₂	47.89
辉砷钴矿	CoAsS	35.52
钴华	Co ₃ (AsO ₄) ₂ ·8(H ₂ O)	29.53
硫铜钴矿	Cu(Co,Ni) ₂ S ₄	28.56
铁硫砷钴矿	(Co,Fe)AsS	26.76
硫锑钴镍矿	(Co,Ni)SbS	20.78
方钴矿	(Co,Ni)As _{3-x}	17.95
钴孔雀石	(Cu,Co) ₂ (CO ₃)(OH) ₂	17.84
硫钴镍矿	(Ni,Co) ₃ S ₄	14.51

含量可达 110×10^{-6} ,在玄武质岩浆分异过程中,钴逐渐进入到镁铁质矿物当中^[9-11]。此外,在空气、水、土壤及植物当中钴也展现出不同程度的富集。在海水中钴主要以Co²⁺形式存在,源于海水能够萃取深海锰结核和洋壳中的钴,这部分钴常常与Mn和Fe的氢氧化合物结合在一起^[12-13]。在深海锰酸盐中钴最初以Co²⁺形式存在,由于Mn⁴⁺离子的作用而氧化形成Co³⁺,最后在铁氢氧化合物中Co³⁺以类质同象形式取代Fe³⁺。此外,在水钠锰矿中钴同样会被吸附并以二价钴(中性条件)或三价钴(碱性条件)的形式存在。尽管目前缺乏对土壤中孔隙水、地下水、地表水中钴含量的综合分析,但已有研究表明在这类环境中钴的含量介于 $0.006 \mu\text{g/L} \sim 0.43 \mu\text{g/L}$ ^[14]。而由于三价钴极低的溶解度,在陆地环境下钴主要以二价氧化态赋存在含水矿物中。

2 钴的分布与迁移

在地表风化环境中,Co²⁺和Co³⁺以水氧化物、氟化物、硫酸盐、磷酸盐、氯化物或有机物的形式进行迁移。在风化环境下钴通常与铁和锰结合在一起,尤其是锰氧化物,具有较强的钴离子吸附能力,其溶解性和运移能力与pH值和温度有关。钴在风化条件下相对活泼,通常聚集在硫化物和砷化物中,因为硫化物在溶解的过程中会释放金属元素,同时产生酸性物质并降低pH值,这也使得高浓度的金属矿物溶解并导致矿山排放大量的酸性废水。包括钴在内溶解于矿山酸性废水中的金属元素通过沉淀、被氢氧化物吸收、被水稀释等方式浓度逐渐降低。或者,这些金属元素将会迁移至下游地区从而更广泛分布在自然界中^[4]。在热液环境中,钴主要以正二价氯络合物迁

移。其中,在体系有H₂S的条件下,钴在200~300°C条件下主要以氯络合物CoCl₂⁻迁移,在<200°C条件下主要以硫氢络合物Co(HS)⁺迁移^[6]。

自然界中钴在岩石、土壤、水、空气中的含量如表2所示。土壤中钴的含量与母岩的钴含量有关,一般来说未受工业污染的土壤中钴含量范围在 $(0.5 \sim 30) \times 10^{-6}$ 左右。海水中钴的含量约为 $0.0003 \sim 0.004 \mu\text{g/L}$ 。河流的钴含量介于 $0.006 \sim 0.43 \mu\text{g/L}$ 之间。河流中的悬浮颗粒钴含量可达 22.5×10^{-6} 。在大气中钴赋存于矿物尘埃颗粒中,在相对无污染的空气中,例如南极,钴含量介于 $0.1 \sim 1.2 \text{ ng/m}^3$ 之间^[4]。

表2 钴在岩石、土壤、水系和空气中的含量(据参考文献[4])
Tab.2 Cobalt concentrations in rocks, soils, waters, and air

环境/位置	钴含量	备注
地壳	29	
上地壳	10	
下地壳	35	
玄武岩	47	
纯橄岩	109	
花岗岩	2.4	
辉石岩	55.2	
蛇纹岩	115	
页岩	19	
美国西部	7.1	平均深度20 cm
美国东部	5.9	平均深度20 cm
加拿大	2~6	远离萨德伯里镍矿区
加拿大	22~37	靠近萨德伯里镍矿区
刚果(金)	17~33	远离中非铜矿带矿区
刚果(金)	204~6150	靠近中非铜矿带矿区
非洲河流	0.04~0.43	
欧洲河流	0.08~0.26	
北美河流	0.02~0.15	
南美河流	0.02~0.18	
中国黄河	0.006~0.03	
全球	0.13~37	“遭受污染”,平均值为 3 ng/m^3
南极	0.1~1.2	
格陵兰	70~150	

注:岩石、土壤中钴含量单位为 10^{-6} ,水系中钴含量单位为 $\mu\text{g/L}$,空气中钴含量单位为 ng/m^3

矿业生产加工的影响可以导致周围环境中钴具有较高的背景值(表2)。例如矿区附近的土壤中钴的含量可高达 $(22 \sim 6150) \times 10^{-6}$ 。此外,靠近矿业城市的水系也检测出较高的钴含量,介于 $3 \sim 1100 \mu\text{g/L}$ 之间,其中俄罗斯Khovu-Aksy矿的尾矿周围废水检测出极高的钴含量。在钴的冶炼和提取过程中部分钴排放到大气当中,这也使得工厂附近的空气检测出具有较高的钴含量^[4]。

3 钴矿床类型划分

钴矿石主要包括铜钴硫化物、镍铜钴硫化物及

镍钴红土型矿石等,其中钴常以副矿物形式与铜、镍及铂族金属元素共生在一起。全球主要钴矿床类型按照产出的背景,可分为大陆钴矿和现代海底钴矿两种^[6]。其中大陆钴矿主要类型包括沉积岩型层状铜钴矿床、红土型镍钴矿床和岩浆型铜镍钴铂族元素矿床,占全球总的钴资源量的16%(图1),其他次要类型含钴矿床包括黑色页岩型Ni-Cu-Zn-Co矿床、矽卡岩和交代型Fe-Cu-Co矿床、铁氧化物铜金型Cu-Au-(Co)矿床、变质沉积岩型Co-Cu-Au矿床、密西西比型Zn-Pb-(Co)矿床和多金属及其他富钴脉型矿床等^[4];现代海底钴矿主要类型为洋底铁锰结核矿床和洋底铁锰结壳矿床,占全球总的钴资源量的83%(图1),其次为火山块状硫化物矿床^[4]。中国具有较为丰富的钴矿床类型,代表性矿床包括金川铜镍钴矿(岩浆硫化物型)、元江镍钴矿(风化型)、中条山铜矿峪铜钴矿(变质沉积型)、东川铜钴矿(沉积岩型)、昭苏卡拉盖雷铜钴金矿(火山块状硫化物型)等^[16-21],其中大部分钴为伴生或共生矿种,矿床规模

为中型及以下^[6]。综合前人研究成果,全球钴资源主要集中于以下几种矿床类型^[4,22](图1,2):

(1)沉积岩型层状铜钴矿床

世界上此类矿床的绝大多数为伴生矿,钴主要伴生在硅质碎屑或碳酸盐地层中的沉积岩型铜钴矿床中。主要矿石矿物为黄铜矿、黄铁矿、硫铜钴矿,少量斑铜矿和辉铜矿;脉石矿物为钾长石、白云母、

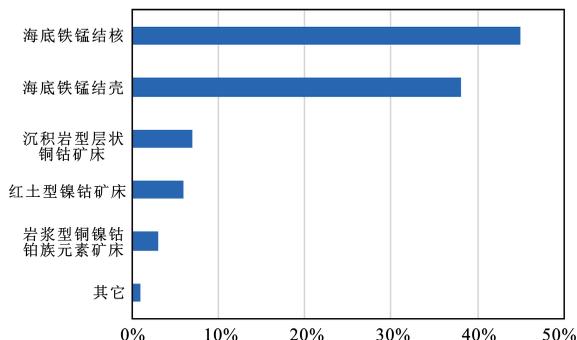


图1 全球各类型钴矿床储量百分比(据参考文献[4])

Fig.1 The ratio of the cobalt reserves for each kind of cobalt deposit type in the world

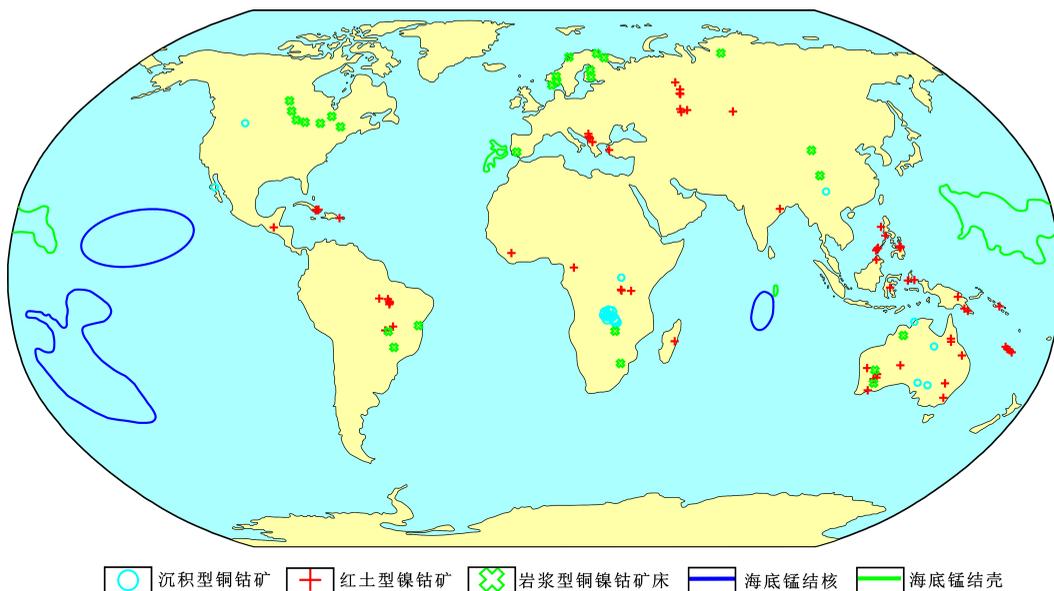


图2 主要类型钴矿床全球分布简图(据参考文献[4])

Fig.2 Several major types of cobalt deposits distribution in the world

黑云母、钠长石、石英和碳酸盐矿物等。沉积岩型铜钴矿床成矿年龄主要为中元古代、新元古代和二叠纪。尽管该类型矿床的矿床成因模型还尚存争议,但存在一点共识,即矿床的形成与成岩期和成矿早期变形变质阶段中低温条件下含矿含盐热液流体的加入密切相关^[23-25]。沉积岩型层状铜钴矿床主要分布在中非铜矿带的刚果(金)和赞比亚境内,其中代表性铜钴矿床包括刚果(金)的卡莫托、滕凯-丰古鲁

梅、科卢韦齐,赞比亚的恩卡纳和谦比希矿床等^[25-30](图3,表3)。

(2)红土型镍钴矿床

红土型镍钴矿床常常发育在潮湿热带环境中,超基性岩由于风化作用,镍钴金属得以富集成矿^[31-32]。红土型镍矿具有良好的垂向分带性,从上至下依次为残余红土带、腐岩带、基岩,镍钴含矿层厚度为10~40 m,通常镍品位>1%,钴品位<0.15%。该

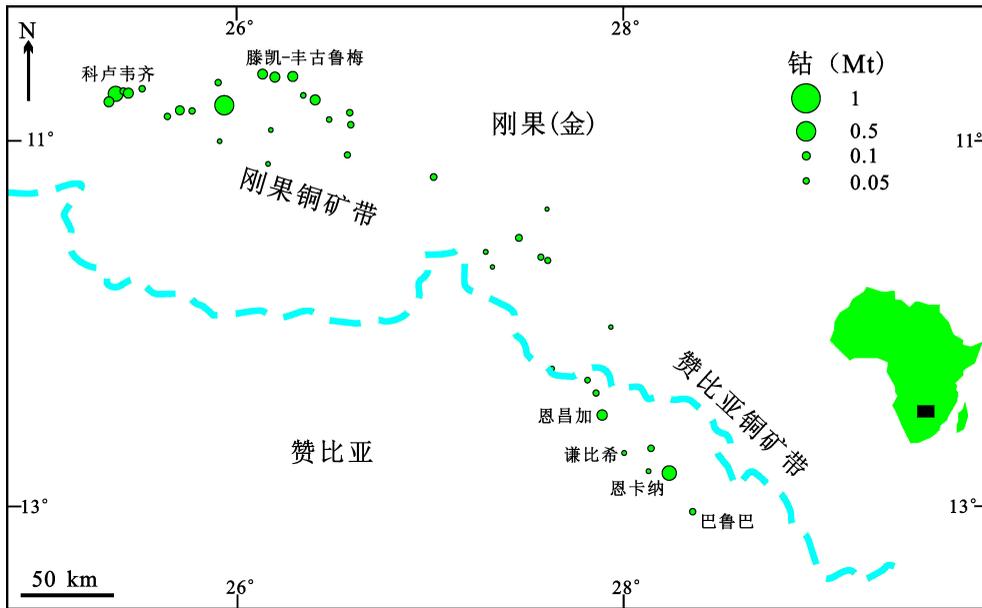


图3 中非铜钴矿带钴矿床分布示意图(据文献[24])

Fig.3 The distribution of the main cobalt deposits in Central African Copper belt

表3 中非铜矿带沉积岩型层状铜钴矿床特征简表(据参考文献[25-30])

Tab.3 Geological characteristics of sedimentary Cu-Co deposits in the Central African Copperbelt

矿床名称	钴金属量(10 ⁴ t)	钴品位(%)	控矿构造	赋矿围岩	矿石矿物	成矿年龄(Ma)	矿床成因类型
谦比希	153	0.12	矿体位于卡富埃背斜西南翼,受一系列向斜与背斜不对称的褶皱控制	下罗安亚群泥质板岩	辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿	503±5 (Re-Os)	沉积变质-热液改造
卢安夏-巴鲁巴	113.6	0.15	矿体位于复式向斜构造中,呈NWW走向	下罗安亚群白质页岩	黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、硫铜钴矿、铜蓝、辉铜矿、赤铜矿等	501-499 (Rb-Sr, Sm-Nd)	沉积变质-热液改造
恩昌加	178	0.48	向西北倾伏的复背斜和向斜	下罗安亚群长石砂岩	黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、黄铁矿	583 (Re-Os)	沉积变质-热液改造
恩卡纳	838.5	0.13	矿体分布在恩卡纳复向斜东翼	下罗安亚群泥质页岩	斑铜矿、黄铜矿、硫铜钴矿	583-525 (Re-Os)	沉积变质-热液改造
卡莫托	-	0.5	走向北东的椭圆形向斜构造	矿山亚群白质页岩或粉砂岩	辉铜矿、斑铜矿、硫铜钴矿、黄铜矿	609-473 (Re-Os)	沉积变质-热液改造
滕凯-丰古鲁梅	416.5	0.35	紧闭的背斜或被后期断层破坏的褶皱构造	罗安群角砾岩	孔雀石、硅孔雀石、水钴矿、辉铜矿、菱钴矿	-	同生沉积-表生氧化
卢斯韦希	117.8	0.95	破碎的倾向西南的等斜向斜	矿山亚群细-中粒白云岩	硫铜钴矿、斑铜矿、辉铜矿、黄铜矿	-	沉积变质-热液改造

类型矿床主要矿物为褐铁矿、绿脱石、硅镁镍矿(含镍蛇纹石)等。

红土型镍钴矿床代表性矿床有西澳 Kalgoorlie (Co资源量32万吨)和Murrin Murrin(Co资源量35.1万吨)矿床,新喀里多尼亚 Goro 矿床(Co资源量35.5万吨),喀麦隆 Nkamouna 矿床等(Co资源量86万

吨)^[33-34]。

(3)岩浆型铜镍钴铂族元素矿床

岩浆硫化物矿床中的钴主要赋存于镁铁质-超镁铁质岩石中,矿石类型为浸染状、半致密块状和致密块状等,矿体常常发育在层状杂岩体、岩浆通道、超镁铁质侵入岩和火山熔岩中^[35]。世界上一些大型-超大型岩浆硫化物矿床形成时代较老,如形成于新太古代的Mt. Keith(Co资源量6.7万吨)和 Kambalda(Co资源量13.9万吨),形成于古元古代的Pechenga(Co资源量15.3万吨),Thompson(Co资源量6.9万吨)和 Sudbury(Co资源量100.6万吨)矿床,以及形成于中元古代的Eagle(Co资源量0.4万吨)和 Voisey's Bay(Co资源量12.3万吨)矿床。而中国的岩浆硫化物矿床形成年代较新,其中绝大部分分布于新元古代至晚三叠世^[36]。这类矿床中钴主要作为镍和铂族金属的副产品产出。含

钴矿物主要为镍黄铁矿,其次为硫钴矿,成矿过程与岩浆期硫化物熔离及岩浆期后热液作用有关。

钴作为伴生矿的代表性岩浆硫化物矿床主要有加拿大的Voisey's Bay矿床和Sudbury矿床,俄罗斯Norilsk矿床(Co资源量79.8万吨),以及中国金川铜镍钴矿床(Co资源量9.8万吨)^[35]。

(4) 洋底铁锰结核矿床

洋底铁锰结核中富含大量的镍、铜、钴、钼等金属元素^[37]。铁锰结核常常发育在海平面以下3 500~6 500 m的深海平原,由产生于海水及沉淀物空隙流体中的铁锰氢氧化物沉淀而成。这类结核的生长速率差异较大,直径通常为2~8 cm,主要组成成分包括了二氧化锰、钡镁锰矿等其它锰酸盐,以及少量水钠锰矿、铁氢氧化物和铝硅酸盐等。其中钴常常被吸附于锰氢氧化物的表面并贮存于其中,这类洋底铁锰结核的形成年代通常早于全新世。大量的洋底铁锰结核发现于太平洋Clarion-Clipperton断裂带、库克岛经济海域、Penrhyn-Samoa盆地和秘鲁盆地等^[37]。

(5) 洋底铁锰结壳矿床

位于海平面以下800~3 000 m的洋中脊扩张区、海山及高原区的洋底铁锰结壳中同样蕴含了大量的钴、钼、稀有金属等元素^[38]。由于沉淀物仅仅来源于海水,因此这类结壳的生长速率较慢。结壳的厚度变化较大,从小于1 cm至26 cm不等,主要组成物包括二氧化锰、氢氧化铁、碳酸盐岩、针铁矿及少量长英质矿物等。洋底铁锰结壳中钴的富集机制与富集过程与铁锰结核类似。大量的洋底铁锰结壳发现于太平洋赤道中部、东北大西洋、印度洋Afanasiy-Nikitin海山等^[39-40]。

由于钴矿床种类众多,因此勘查方法各异。例如对沉积岩型层状铜钴矿床,勘查方法主要是对化探、构造、地层、地球物理及钻孔数据的综合分析和解译。在红土型镍钴矿床勘查过程中,关键点在于对深部风化的超基性岩体、红土层位及富集钴镍的风化层厚度的勘查研究。大多数岩浆型铜镍钴铂族元素矿床发育于大型镁铁质侵入岩体中,该类型矿床中矿体常常发育在杂岩体底部层位,勘查方法包括电法、磁法等地球物理勘查方法。对深海锰结壳,利用浅钻定点获取结壳岩芯样品,是目前富钴结壳资源勘查最重要的方法之一^[41]。另外,电视抓斗和水下机器人(ROV)也已普遍应用于深海钴资源开采^[42]。随着科技不断进步,未来包含更高精度、高清晰的水下可视装备等新型采样技术将继续应用于深海钴资源勘查和开采当中。

4 钴资源利用概况

钴具有铁磁性、耐腐蚀性、耐磨性、高熔点等特

征,由于其良好的物理化学和机械性能,钴及其化合物常常用于以下几个领域^[43]:

(1) 电池材料。全球生产出的钴大约有50%作为电池材料使用,这里主要包括了便携式设备(手机、笔记本电脑、平板电脑等),电动及混合动力汽车,电动列车和可再生能源电站。钴可以防止锂离子电池中树突的发生,具有延长碱性电池使用寿命的作用。

(2) 集成电路。由于钴独特的物理化学属性,广泛适用于各类部件集成电路(例如触头、金属电缆、电路板等),所用的电阻材料一般包括了钴-锑、钴-硼、钴-钨、钴-钼、钴-磷、钴-铈、钴-铈、钴-钨、钴-钨、钴-钨、钴-钨等化合物。

(3) 半导体和磁性隧道结晶体管。光电器件使用Co-Si-Ge化合物来改善接触接口。得益于最新一代半导体技术发展,结合不同的方法可以将钴添加到各类元器件上。例如:物理气相沉积(PVD)利用蒸发离子束使得钴在目标物体表面沉淀下来;化学气相沉积利用化学反应物将钴添加到目标物体表面;金属电镀则利用电流使得钴沉淀下来。

(4) 磁记录设备。在磁记录过程中钴是一种不可或缺的金属,主要用于数据记录设备,如硬盘。数字信息的存储便于记录照片、视频及文件等。

(5) 催化剂。钴在天然气和精炼石油产品制备中常作为催化剂使用。每吨含钴的催化剂化合物的使用可减少25 000吨硫氧化物和750吨氮氧化物的排放。同时,钴也用于聚酯前体的合成及羰基合成反应中来自烯烃里醛的生成。钴催化剂用于合成对苯二甲酸(TPA)和二甲基对苯二甲酸酯(DMT),它们主要用于聚酯(PET)的合成。另外,钴催化剂也用于纺织品和可回收塑料瓶的生产中。

(6) 着色剂。钴氧化物和其他钴化合物常常作为着色剂用于玻璃、陶瓷、油墨和珐琅涂料等。除了常见的“钴蓝”颜色,钴也用来制作其他颜色,如紫色、绿色、粉色、棕色和黄色等。

(7) 合金。含钴的合金可分为超合金、磁合金、钴基合金等。含钴超合金用于燃气轮机、航天器、核反应堆、发电厂涡轮机和化学设备等;含钴磁合金常用于永久磁铁、传感器和发动机;钴基合金是一种能耐各种类型磨损和腐蚀以及高温氧化的硬质合金,即通常所说的司太立(Stellite)合金。它们可以制成焊丝,粉末用于硬面堆焊,热喷涂、喷焊等工艺。

(8)医疗保健。钴以金属、钴胺素和钴同位素(^{60}Co , ^{58}Co , ^{57}Co 和 ^{55}Co)的形式用于肿瘤、癌症的诊断和放疗。钴以维生素B12形式参与核酸、胆碱、蛋氨酸的合成及脂肪与糖的代谢。此外,钴还可用于医疗器材的消毒使用^[43,44]。

在160种含Co的不同商品中,全球流通的前三种分别为64.5千吨的HS-810510(粗钴以及其他钴冶炼的中间产品;未锻轧钴;废品和废料;粉末),21.7千吨的HS-850780(蓄电池)^[45]。由于一直以来钴价都存在较大波动,因此亟需寻找一些钴的替代品以规避风险。然而由于钴的独特属性,几乎所有的钴替代品所导致的结果都是产品性能的降低。常见的钴替代品主要涵盖了以下几个领域:(1)用钕或镨铁氧体,或者钕-铁-硼及镍铁合金制成的磁铁;(2)涂料中采用铈、铁、铅、锰或钒代替;(3)在喷气发动机和石油催化剂领域使用镍和镍基合金;(4)锂离子电池:铁磷-锰,镍-钴-铝或镍-钴锰。对于钴资源的利用可采取使用一些价格更为便宜的金属和合金作为替代,随着技术的进步在各类钴应用领域所占的比值可以从60%降低至10%以内^[15]。

5 钴的供需及未来市场

过去钴常常用作颜料的原料使用,之后由于钴在化工业中的广泛使用(主要为合金和催化剂),自二十世纪中叶以来钴的产量随之迅速增长(图4)。然而70年代后期由于刚果(金)的政治动乱使得钴严重短缺导致价格飞涨,而后80年代初期由于生产过剩,钴价猛烈下跌(图4)。之后自1990年以来至今全世界钴的需求量经历了大幅度的增长。从1950年至2011年全世界钴的产量约增长了一个数量级^[4]。其中刚果(金)钴资源储量最为丰富,约占世界总储量的49%;年产量可达9万吨(2018年),约占世界总产量64%(表4),其他一些钴资源大国包括澳大利亚、古巴、俄罗斯、菲律宾、加拿大等,中国钴的储量和年产量分别占全世界的1%和2%(表4)。

在过去很长一段时间内由于钴价过高导致各类钴产品被替代,因而绝大部分钴资源未被开发利用。如今在许多领域,如果钴持续被其他金属所替代,会进一步导致产品性能的损失和成本的增加,特别是用于飞机涡轮发动机的零件,还包括船舶推进系统、导弹制导系统、传感器和雷达等,这些用途使得钴在军事和民用工业发展方面占有重要地位。钴

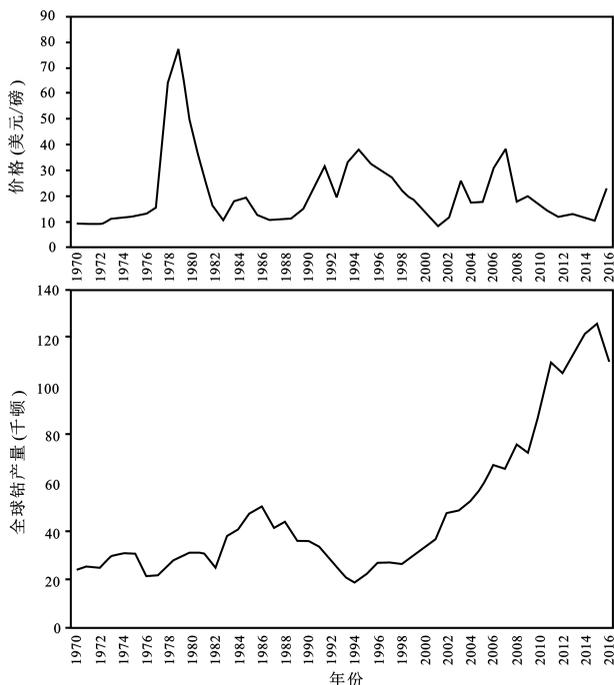


图4 1970—2016年全球钴价格与产量变化
(据参考文献[46])

Fig.4 Annual real price and production of cobalt from 1970 to 2016

表4 世界各国钴矿产储量和2018年产量(据参考文献[47])
Tab.4 World mine production and reserves in 2018

国家	储量(万吨)	2018年产量(万吨)
刚果(金)	340	9
澳大利亚	120	0.47
古巴	50	0.49
菲律宾	28	0.46
俄罗斯	25	0.59
加拿大	25	0.38
马达加斯加	14	0.35
中国	8	0.31
巴布亚新几内亚	5.6	0.32
美国	3.8	0.05
南非	2.4	0.22
摩洛哥	1.7	0.23
世界总量	690	14

常常作为其他金属类大宗商品(如镍或铜)的副产品开采,因此,钴的生产往往受到铜镍等金属市场的影响,而非钴自身的需求。2009—2015年,由于钴矿生产项目的扩建和增长,使得这一期间世界范围内钴的生产量大于消费量,因此价格也出现了一定量的回落。2015年后由于电池行业对钴的旺盛需求导致钴价格上涨。2018年全球钴消费约12.6万吨,其中电池行业 and 高温合金是钴最重要的两个消费领域,占总消费比分别为60.9%和13.7%,接近该年世界总的钴产量。然而,截至2019年6月初钴价跌到3.2万美元/t,较2018年钴价最高点下跌幅度达到66%,这

其中供应和囤货过剩及中国新能源汽车的退坡政策为主要因素,而刚果(金)政府政策的不确定性(新矿业法的实施等)以及时局的不稳定,也将给未来钴的价格带来更多的扰动^[48]。

如今钴的供应市场情况和1978年类似,即刚果(金)在钴的供应链上占据了主导地位。不过与以往不同在于,当今钴资源的利用更多的在锂电池的使用上。研究分析,至2025年中国钴需求量可能达到11.1万吨,其中锂电池领域需求8.1万吨^[49]。因此,假如未来新能源汽车持续得到普及使用,可以预计的是作为铜镍副产品开采加工的钴资源在供应上是远远不够的。

目前,国内超过90%以上的钴原料进口自刚果(金)等国,预计未来随着需求增长缺口还将增加。自2018年起,刚果(金)政府已经把钴上升为战略性矿产资源,关税从2%上涨至10%。此外,2019年初新总统上任后,矿业部将暂停所有矿业公司出口矿产。因此,90%以上的钴原料进口来自刚果(金)显然不是对我国最为有利的进口结构。为解决这种困境,一是积极拓展刚果(金)以外的海外钴资源配置。除非洲中部外,太平洋国家澳大利亚、新喀里多尼亚、巴布亚新几内亚和菲律宾也是重要的钴矿资源国和供应国,且地缘政治风险均低于刚果(金)^[50]。二是加大深海钴矿开采的投入,因为深海中钴的储量要远远多于陆地中钴储量(图1)。然而值得注意的是,加大商业化深海钴矿开采的投入也可能会导致市场钴价格上涨。另外,减少钴在锂电池方面的应用以保证供需平衡,这与上世纪九十年代面对钴价飞涨所采取的减少钴在永久性磁铁方面的使用类似。综合来看,未来市场影响钴价格的主导因素可能仍将是新能源汽车行业,钴的长期高价也将刺激替代产品的研发,新产品出现将改变当下市场的供需格局。

6 结论及建议

(1)全球钴矿资源主要集中于沉积岩型层状铜钴矿床、红土型镍钴矿床、岩浆型铜镍钴铂族元素矿床、洋底铁锰结核矿床、洋底铁锰结壳矿床等五大类矿床中。其中洋底铁锰结核壳中蕴含了丰富的钴资源,深海钴资源开采前景广阔。

(2)钴广泛应用于电池材料、合金、陶瓷原料、催化剂、磁性材料等领域。由于钴价波动较大,因此对

于钴资源的利用可采取使用一些价格更为便宜的金属和合金作为替代,预计未来各类钴应用领域所占的比值可以从60%降低至10%以内。

(3)长期以来刚果(金)在全球钴市场供应链上都占据了主导地位,今后面对旺盛的钴需求,我国应提升对刚果(金)以外的海外钴资源配置比例。此外,在减少锂电池应用的同时亟需新型产品的生产研发以维持供需平衡。

参考文献:

- [1] 王登红. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J]. 地质学报, 2019, 93(06): 1189-1209.
- [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(04): 689-698.
- [3] 本刊编辑部. 美国内政部确定钨、稀土、锂等35种关键矿产清单[J]. 中国地质, 2018, 45(5): 1086.
- [4] 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[C]. Geological Survey, 2018.
- [5] 刘利宝, 王巍巍, 吕新彪, 等. 白云鄂博地区发现独立钴矿床. 中国地质, 2018, 45(5): 1082-1083.
- [6] 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.
- [7] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust[J]. Treatise on geochemistry, 2003, 3: 1-659.
- [8] Donaldson J D, Beyersmann D. Cobalt and cobalt compounds [J]. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 2000, 9, 1-38.
- [9] Pourret O, Faucon M P. Cobalt[J]. Encyclopedia of Geochemistry: A Comprehensive Reference Source on the Chemistry of the Earth, 2016: 1-3.
- [10] Palme H, Lodders K, Jones A. Solar system abundances of the elements[J]. Planets, Asteroids, Comets and The Solar System, Volume 2 of Treatise on Geochemistry (Second Edition). 2014, 15-36.
- [11] McDonough W F. 3.16-Compositional model for the Earth's core[J]. Treatise on geochemistry, 2003: 547-568.
- [12] Brown Jr G E, Calas G. Section 18. Mineral-Water interfaces as driving forces for metal concentration: the example of cobalt trapping by Mn-oxides[J]. Geochemical Perspectives, 2012, 1(4-5): 667-669.
- [13] Bruland K W, Lohan M C. Controls of trace metals in seawater[J]. The oceans and marine geochemistry, 2006, 6: 23-47.
- [14] Gaillardet J, Viers J, Dupré B. Trace elements in river waters[J]. Treatise on geochemistry, 2003, 5: 195-235.
- [15] Roberts S, Gunn G. Cobalt[J]. Critical Metals Handbook, 2014: 122-149.

- [16] Li C, Ripley E M. The giant Jinchuan Ni-Cu-(PGE) deposit; tectonic setting, magma evolution, ore genesis, and exploration implications[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2011, 17: 163-180.
- [17] 黄小荣,付伟,牛虎杰,等. 云南元江富镍红土风化壳的垂向结构及矿物组成[J]. *矿床地质*, 2012, 31(S1): 1127-1128.
- [18] 张晗. 山西中条山北段古元古代铜矿成矿作用[D]. 吉林大学, 2012.
- [19] 代鸿章, 刘家军, 朱文兵. 云南因民铜矿床构造沉积环境及成矿机制研究[J]. *地学前缘*, 2018, 25(01): 108-124.
- [20] 沈利霞, 郭鹏志, 李文圣, 等. 新疆昭苏卡拉盖雷铜钴金矿区火山岩地层构造环境判别[J]. *地质调查与研究*, 2014, 37(01): 13-19.
- [21] 郭鹏志, 沈利霞, 葛文胜, 等. 新疆昭苏卡拉盖雷铜钴金矿床成矿流体特征研究[J]. *地质调查与研究*, 2012, 35(02): 146-153.
- [22] Mudd G M, Weng Z, Jowitz S M, et al. Quantifying the recoverable resources of by-product metals: The case of cobalt[J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 55: 87-98.
- [23] Hitzman M, Kirkham R, Broughton D, et al. The sediment-hosted stratiform copper ore system[J]. *Economic geology*, 2005, 100.
- [24] Hitzman M W, Selley D, Bull S. Formation of sedimentary rock-hosted stratiform copper deposits through Earth history[J]. *Economic Geology*, 2010, 105(3): 627-639.
- [25] Hitzman M W, Broughton D, Selley D, et al. The Central African Copperbelt: diverse stratigraphic, structural, and temporal settings in the world's largest sedimentary copper district[J]. *Society of Economic Geologists Special Publication 16*, 2012 (Paper 19): 487-514.
- [26] Hitzman M W, Bookstrom A A, Slack J F, et al. Cobalt—styles of deposits and the search for primary deposits[J]. *US Geological Survey Open-File Report*, 2017, 1155.
- [27] Saintilan N J, Selby D, Creaser R A, et al. Sulphide Re-Os geochronology links orogenesis, salt and Cu-Co ores in the Central African Copperbelt[J]. *Scientific reports*, 2018, 8(1): 14946.
- [28] 刘国平, 肖波, 孙希文, 等. 非洲卢富里安成矿带地质演化与找矿[M]. 地质出版社, 2018: 1-177.
- [29] 郭健, 牛斯达, 孙赫, 等. 赞比亚砂(页)岩型铜矿成矿年龄及其成因意义[J]. *地质与勘探*, 2018, 54(3): 634-644.
- [30] El Desouky H A, Muchez P, Boyce A J, et al. Genesis of sediment-hosted stratiform copper-cobalt mineralization at Luiswishi and Kamoto, Katanga Copperbelt (Democratic Republic of Congo)[J]. *Mineralium Deposita*, 2010, 45(8): 735-763.
- [31] Freyssinet P, Butt C R M, Morris R C, et al. Ore-forming processes related to lateritic weathering[J]. 2005, 681-722.
- [32] Butt C R M, Cluzel D. Nickel laterite ore deposits: weathered serpentinites[J]. *Elements*, 2013, 9(2): 123-128.
- [33] Gaudin A, Decarreau A, Noack Y, et al. Clay mineralogy of the nickel laterite ore developed from serpentinised peridotites at Murrin Murrin, Western Australia[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2005, 52(2): 231-241.
- [34] Dzemua G L, Gleeson S A. Petrography, mineralogy, and geochemistry of the Nkamouna serpentinite: Implications for the formation of the Cobalt-Manganese Laterite Deposit, Southeast Cameroon[J]. *Economic Geology*, 2012, 107(1): 25-41.
- [35] Naldrett A J. *Magmatic Sulfide Deposits: Geology, Geochemistry and Exploration*[M]. Berlin: Springer. 2004.
- [36] Lu Y G, Leshner C M, Deng J. Geochemistry and genesis of magmatic Ni-Cu-(PGE) and PGE-(Cu)-(Ni) deposits in China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 107: 863-887.
- [37] Hein J R, Mizell K, Koschinsky A, et al. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green- technology applications: Comparison with land-based resources[J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 51: 1-14.
- [38] 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.
- [39] Rajani R P, Banakar V K, Parthiban G, et al. Compositional variation and genesis of ferromanganese crusts of the Afanasiy-Nikitin Seamount, Equatorial Indian Ocean[J]. *Journal of Earth System Science*, 2005, 114(1): 51-61.
- [40] Glasby G P, Mountain B, Vineesh T C, et al. Role of Hydrology in the Formation of Co-rich Mn Crusts from the Equatorial N Pacific, Equatorial S Indian Ocean and the NE Atlantic Ocean[J]. *Resource geology*, 2010, 60(2): 165-177.
- [41] 于彦江, 段隆臣, 刘方兰, 等. 深海浅钴在富钴结壳资源勘查中的应用[J]. *矿业研究与开发*, 2015, 35(11): 89-92.
- [42] 李力, 李占钊. 大洋富钴结壳采样技术革新及发展趋势. *海洋科学前沿*[J]. 2016, 3(4): 109-117.
- [43] Kovacheva-Ninova V K, Savov G M, Vassileva V, et al. Trends in the development of cobalt production[J]. "E+E", 2018, 53(3-4): 84-94.
- [44] 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, (01): 93-100.
- [45] Nansai K, Nakajima K, Kagawa S, et al. Global flows of critical metals necessary for low-carbon technologies: the case of neodymium, cobalt, and platinum[J]. *Environmental science & technology*, 2014, 48(3): 1391-1400.
- [46] Campbell G A. The cobalt market revisited[J]. *Mineral Economics*, 2019: 1-8.
- [47] U.S. Geological Survey. *Mineral Commodity Summaries*[R]. 2019.
- [48] 杨卉芑, 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(05): 41-55.
- [49] 王京, 石香江, 王寿成, 等. 未来中国钴资源需求预测[J]. *中国国土资源经济*, 2019(10): 28-33.
- [50] 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(05): 50-55.

General situation of cobalt resource and its utilization analysis

LU Yi-guan^{1,2}, HAO Bo³, SUN Kai^{1,2}, HE Sheng-fei^{1,2}, XU Kang-kang^{1,2},
GONG Peng-hui^{1,2}, ZHANG Hang^{1,2}

(1. *Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China*; 2. *North China Center for Geoscience Innovation, Tianjin 300170, China*; 3. *Sino-Metals Leach Zambia Limited, Chambishi 22880, Zambia*)

Abstract: Cobalt is an important metal resource for the development of emerging industries, and the global demand for cobalt will continue to grow in the future. This paper mainly summarizes the cobalt resources from the aspects of geochemical properties, element distribution and migration, deposit type classification and resource utilization. Combined with the situation of China's cobalt resources, this study also analyzes the future cobalt market based on the global cobalt resources and current supply and demand situation. It is suggested that in order to ensure the sustainable development of China's cobalt resources industry, the proportion of overseas cobalt resources outside the DRC should be increased in the future. At the same time, the research and development of new products is urgently needed to replace the excess of cobalt in lithium batteries and alloys. In addition, the prospect of deep sea cobalt mining is broad, and we should pay attention to and gradually increase investment in this field.

Key words: cobalt; critical minerals; ore deposit classification; resource utilization; future market

Geological characteristics and mineralization potential analysis for the Pan-African Hook Batholith in Central Zambia

GU A-lei¹, WANG Jie¹, REN Jun-ping¹, ZUO Li-bo¹, SUN Hong-wei¹, XING Shi², LIU Zi-jiang²,
Ezekiah Chikambwe³

(1. *Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China*; 2. *No. 5 Geological Team, Bureau of Geologic Exploration and Mineral Development of HeBei Province, Hebei Tangshan 063000, China*; 3. *Geological Survey Department of Zambia, P.O. Box.50135 Lusaka, Zambia*)

Abstract: The Pan-African Hook Batholith is located in central Zambia, which is a natural laboratory to study the characteristics of tectonic magmatism as a result of collisional stage interaction between the Congo Craton and the Kalahari Craton during the assembly of the Gondwana supercontinent. By summarizing the petrology, chronology, geochemistry and mineral geology of magmatic rocks. We conclude that Hook granitoids are characterized as aluminous, calc-alkaline to alkaline series rocks, which show rich in Na, K, depleted in Ca, Mg, Al and other elements, with typical A-type granitoid geochemical signature. Magmatism occurred between 566 Ma and 519 Ma, which can be further divided into two stages: early stage (566 ~ 544 Ma) for A2-type and late stage (544 ~ 519 Ma) for A1-type, respectively, indicating the tectonic environment of the extension and transformation of post-orogenic orogeny. The primitive magma is the mixed source region of crust and mantle, which was generated by the fractional crystallization and show evidence of only minimal crustal contamination during ascent. There has an iron oxide copper gold (IOCG) metallogenic system in the eastern Hook area, especially the exposed area of the late syenitic bodies, which may be an important prospecting indicator for finding similar prospecting target areas.

Key words: Pan-African; geological characteristics; mineralization potential; Hook Batholith; IOCG metallogenic system; Central Zambia