

刚果（金）铜-钴矿业发展现状

谢 添^{1, 3}, 徐敬元^{2, 4}, 姚 刚^{2, 3}, 张书琛^{2, 3}, 童 雄¹, 邱冠周^{1, 2}, 王振堂², 刘仕统², 孙 欣², 刘殿文¹, 王 军²

(1.昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093; 2.中南大学资源加工与生物工程学院, 长沙 410083;
3.中铁资源集团, 北京 100039; 4.北方矿业有限责任公司, 北京 100053)

摘 要:刚果（金）地处中南部非洲, 闻名世界的铜矿带主要埋藏于该国境内西南部地区。本文对刚果（金）的铜-钴资源赋存状况、中外企业在刚果（金）的投资及其生产工艺技术和未来发展等方面进行综述。刚果（金）铜-钴资源储量巨大, 主要以孔雀石、水钴矿等氧化矿和黄铜矿、硫铜钴矿等硫化矿形式存在, 目前各大铜钴矿业企业主要生产铜钴精矿、阴极铜、粗铜和氢氧化钴等产品。紫金矿业、洛阳钼业、中铁资源、北方矿业等中资企业及嘉能可、欧亚资源等外资企业因矿储丰富、工艺成熟、设备先进而发展良好。在生产工艺方面, 本文对纯湿法、湿法火法结合、选冶结合等三种工艺技术进行了论述, 可为国内矿业企业践行“一带一路”倡议和坚持矿业开发“走出去”发展战略提供借鉴和参考。

关键词:刚果（金）; 铜-钴矿; 企业发展; 选冶工艺现状

中图分类号: TD-05 文献标志码: A

A review of the development status of copper-cobalt mining in Congo (DRC)

XIE Tian^{1, 3}, XU Jing-yuan^{2, 4}, YAO Gang^{2, 3}, ZHANG Shu-chen^{2, 3}, TONG Xiong¹, QIU Guan-zhou^{1, 2}, WANG Zhen-tang², LIU Shi-tong², SUN Xin²,
LIU Dian-wen¹, WANG Jun²

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China; 3. China Railway Resources Group, Beijing 100039, China; 4. North Mining Company Limited, Beijing 100053, China)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774332); 国家自然科学基金资助项目(51934009)

通讯作者: 王 军, 教授, 博士; 电话: 13975808100; E-mail: 13975808100@163.com

Abstract: The world - famous central African copper belt is mainly buried in the southwest of Democratic Republic of Congo (DRC). In this paper, the occurrence of copper and cobalt resources in DRC, the investment of Chinese and foreign enterprises in the DRC copper and cobalt mines, the production technology and the future development are summarized. Copper and cobalt resources and reserves are huge in DRC, mainly in the form of malachite, hydrocobalt and other oxide ore and chalcopyrite, copper sulfide cobalt and other sulfide ore exist. At present, the major copper and cobalt mining enterprises mainly produce copper and cobalt concentrate, cathode copper, crude copper and cobalt hydroxide and other products. Zijin Mining co., LTD., Luoyang Molybdenum Co., LTD., China Railway Resources Co., LTD., and Glencore and Eurasia Resources Co., LTD., foreign-funded enterprises have developed well due to rich mineral reserves, mature technology and advanced equipment. In terms of production technology, this paper discusses the single hydrometallurgy process, the combination of hydrometallurgy process and pyrometallurgy process, and the combination of beneficiation and metallurgy, which can provide reference for domestic mining enterprises to practice the "One Belt and One Road" initiative and adhere to the "going abroad" development strategy of mining development.

Key words: Democratic Republic of Congo; Copper-cobalt ore; Enterprise development; State of the beneficiation and metallurgy technology

1 前言

刚果民主共和国简称刚果（金），自然资源丰富，素有“世界原料仓库”，“中非宝石”之称，其矿产资源、森林资源、水资源的储量均位居世界前列。在矿产资源方面，刚果（金）金属矿物资源极为丰富，且开发力度较大，是其财政收入的主要来源^[1]。其境内西南部的铜矿带长宽分别约 300 公里和 30 公里，其中铜、钴矿石的平均品位分别为 2%-4%和<1%。相关文献表明^[2]，刚果（金）资源情况如表 1 所示，其中铜金属储量 7500 万吨，是世界上铜储量较多的国家之一，自 2012 年以来年产铜超过 60 万吨，且逐年攀升；钴金属储量 470 万吨，约占世界总储量的 36.15%，是世界上最大的钴生产国。

表 1 刚果（金）主要矿产资源储量情况
Table 1 Main mineral resources and reserves of DRC

Mineral species	Copper	Cobalt	Niobium	Lithium	Iron	Manganese	Zinc	Tin
Reserves /10 ⁴ t	7500	470	3000	3100	100000	700	700	45

刚果（金）矿产开发最早始于 20 世纪初。自 21 世纪以来，刚果（金）政府通过制定一

系列矿业政策、鼓励其他国家进行投资，国际矿产资源开发实体陆续布局当地，主要集中在铜矿带上的卢本巴希-利卡西-克鲁维奇三座矿业城市周边。其中外资企业以嘉能可和欧亚资源为主，中资企业以洛阳钼业、中铁资源、紫金矿业、中国有色、北方矿业和五矿资源等为主。据刚果金中矿协统计，中资矿业企业在刚果（金）的总投资已超过 250 亿美元。在刚果（金）的铜-钴矿开发是这些中资矿业企业经营业务中的重要部分。同时，中资企业在刚果（金）的矿业投资在其外资引入中也占有举足轻重的地位。

上世纪 50 年代，刚果金国家矿业公司全球第一，由于刚果金长年战乱，刚果金矿业逐渐没落。自 20 世纪初期开始，随着国家政局稳定，欧美及中资企业陆续进入，矿业再度得到重视，成为国家经济发展支柱。尽管刚果（金）的矿业实践已经非常丰富，也有一些关于资源勘查和金属提取的文献^[3]，但对于各矿业经营者针对其特定矿床的投资开发和生产情况尚缺乏总结与论述。本文将有助于生产者和研究者们了解刚果（金）的矿业布局、技术现状与发展难题等，对促进刚果（金）等中南部非洲国家的铜钴工业和国民经济发展具有重要意义。因此，本文将从刚果（金）铜-钴资源赋存状况、中外企业投资及其生产技术现状和未来发展等方面进行综述。

2 刚果（金）铜-钴矿资源禀赋及开发概况

铜和钴在工业应用中都扮演着重要角色，其中铜在电气、机械制造、建筑业、国防工业等领域被广泛应用，而钴在新能源材料领域应用较多。在自然界中，钴通常伴生于铜矿物中，该伴生特征在刚果（金）的铜-钴矿中尤为明显。相关地质研究表明，刚果（金）铜矿带的铜钴矿床主要赋存于新元古代的 Roan 群（距今约 880-730 Ma）下部，该岩群以交替的碳酸盐岩和碎屑岩为特征^[3,4]。之后的成岩期，开始发生铜-钴硫化矿的矿化作用^[4,5]。铜-钴的矿化作用沉淀约发生于 800 Ma 的裂谷发育过程中^[6]，该阶段形成的富钴矿物包括：硫铜钴矿（ CuCo_2S_4 ）、块硫镍钴矿（ $(\text{Ni}, \text{Co})_3\text{S}_4$ ）和硫钴矿（ $\text{Co}^{2+}\text{Co}_2^{3+}\text{S}_4$ ）。铜钴氧化矿是上新世（ $3.4\pm 0.8 \text{ Ma}$ ）风化/氧化的结果^[7]。从水钴矿和硫铜钴矿中的钴含量来看，这一过程对表生矿物的钴富集有重要作用。刚果（金）的铜矿资源具有较好的开发前景，钴资源储量也极为丰富，它们是刚果（金）的战略金属^[8]。

在刚果（金）铜矿带上，很多大型矿业企业已经开始依势进行投资生产。另外，根据相关统计，刚果（金）铜矿带上不同地理位置的经营企业所开采的矿石类型和性质也有较大差异^[9]。图 1 为刚果（金）主要企业分布情况，其中南部企业处理的铜矿石通常以硫化矿为主，

且常有砷、锑等环境有害元素和金、银、铂等贵金属伴生，中部和西部为典型的沉积型矿床，按照赋存深度依次是氧化矿（孔雀石、硅孔雀石和水钴矿等）、混合矿和硫化矿（黄铜矿、斑铜矿和硫铜钴矿等）。以上对矿石成矿和矿石性质进行了综合性描述，将有助于研究者、生产者和管理者们了解刚果（金）的矿业背景，以便进一步开展创新型研究和现代化生产。与之相结合，下面将分别针对铜、钴资源，从资源储量、品位和开发情况等方面进行阐述，为后续生产工艺的总结和评述提供依据。

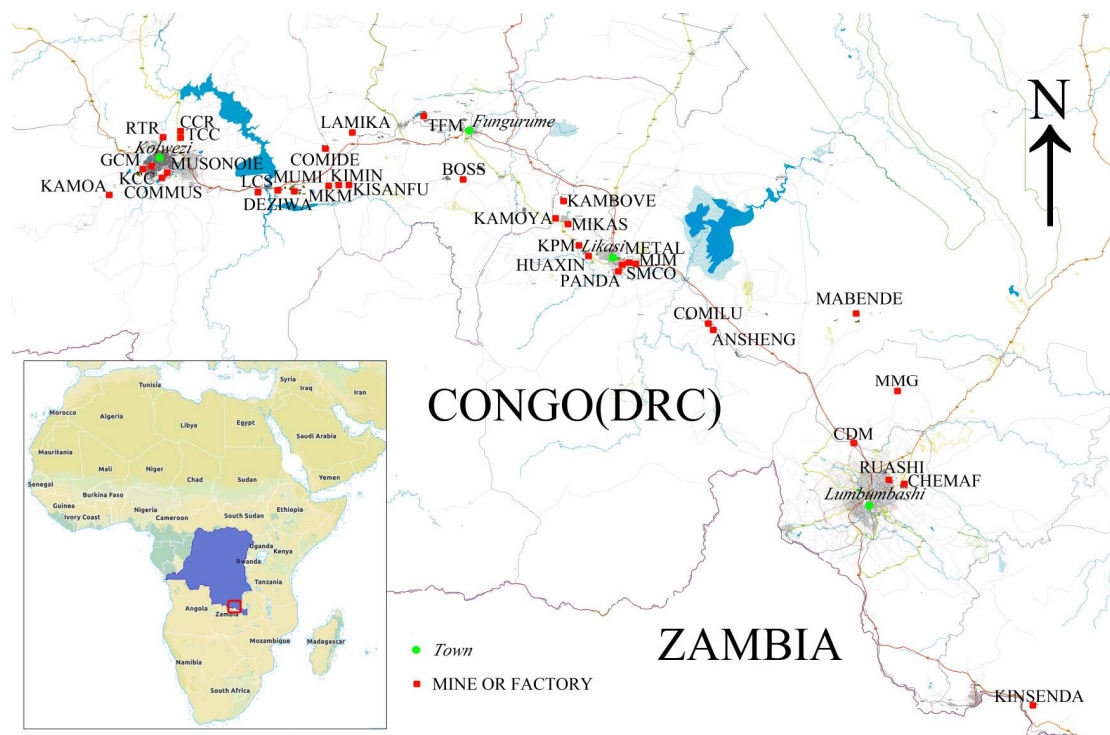


图 1 刚果（金）主要企业分布情况

Fig. 1 Distribution of major mining projects in Democratic Republic of the DRC.

2.1 铜资源赋存及开发概况

虽然目前刚果（金）探明的铜资源储量在世界范围并不惊人，但其国土面积巨大，且大部分地区勘探程度还很低，所以未来的增储潜力巨大。另外，刚果（金）拥有诸多超高品位的铜钴特大型矿山，具有埋藏极浅、开发成本较低等特点。因此吸引世界各国的矿业巨头前来投资开发。尤其是近年来，从刚果（金）卢本巴希市到科卢韦齐市的铜钴带上，众多中资企业投资建厂，采用不同的选冶工艺生产阴极铜、铜精矿和粗铜等产品。全球和刚果（金）的铜年产量数据如图 2 所示。数据表明近年来（2010 年-2020 年），刚果（金）铜年产量持续升高，在全球地位不断攀升。

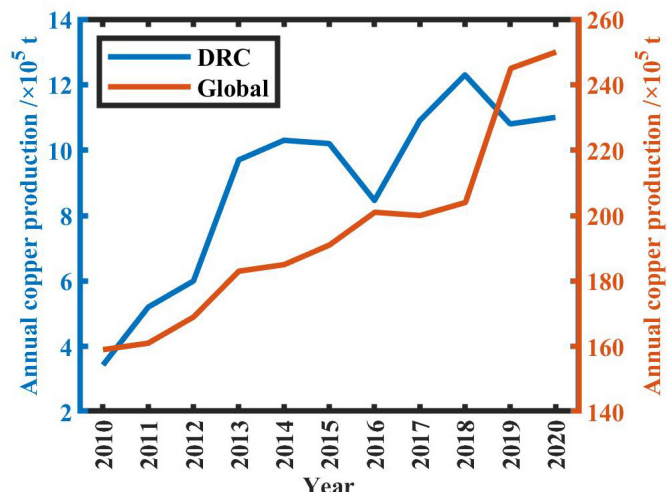


图2 刚果（金）铜资源历史年产量^[10]

Fig. 2 Historical annual production of Copper resources in DRC.

2.2 钴资源赋存及开发概况

近年来，全球新能源材料领域蓬勃发展，钴金属受到市场高度关注。目前，陆地钴矿资源主要集中在刚果（金）和赞比亚的沉积型层状铜钴矿中，澳大利亚、古巴、菲律宾和马达加斯加等国的红土型镍钴矿床，以及澳大利亚、加拿大和俄罗斯等国的岩浆型镍-铜硫化物矿床中，然而目前只有刚果（金）、澳大利亚等少数几个国家拥有的钴矿资源具备经济价值。刚果（金）是全球钴矿资源量最多的国家，也是钴产品产量最高的国家，所以受到国内众多矿业公司的投资，纷纷布局上游钴资源开发产业，投资建厂生产钴精矿（氢氧化钴）。2020年，全球钴矿储量约710万吨，刚果（金）占一半以上。全球和刚果（金）的钴年产量数据如图3所示。数据表明，2020年全球钴产量约14万吨，仅刚果（金）钴就近10万吨，占比达到70%以上。

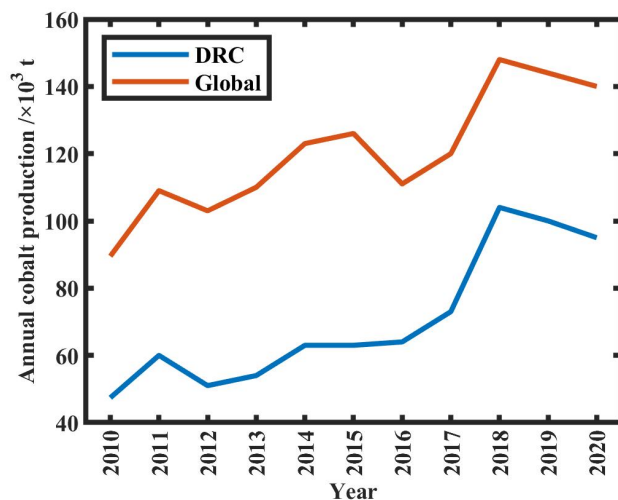


图3 刚果（金）钴资源历史年产量^[10]

Fig. 3 Historical annual production of cobalt resources in DRC.

3 刚果（金）主要铜-钴矿企业情况

全面掌握刚果（金）境内矿业企业的投资及发展状况，将有利于了解刚果（金）矿业发展战略、预测其未来发展趋势，对于激励工艺瓶颈突破、解决目前非洲中南部发展问题有重大意义。本章节将尽可能详细地对该信息进行阐述。表 2 展示了刚果（金）主要企业铜钴资源及生产状况。

表 2 刚果（金）主要企业铜钴资源及生产状况
Table 2 Copper and cobalt resources and processes in major mining projects in DRC.

Number	Project	Owner	Reserves (10 ⁴ t) / grade (%)		Product
			Cu	Co	
1	La miniere de kalumbwe-myunga s.a.s (MKM)	China railway resources 80.2%, Gecamines 19.8%	3.1/2.16	0.3/0.25	Cathode copper; Cobalt hydroxide
2	Compagnie miniere de luisha s.a.s (COMILU)	China railway resources 72%, Gecamines 28%	54.8/2.30	3.3/0.11	Cathode copper; Copper concentrate; Cobalt hydroxide
3	La sino-congolaise des mines s.a (SICOMINES)	China railway resources 41.72%, Power China 25.28%, Gecamines 32%	868/3.47	54/0.22	Cathode copper; Copper concentrate; Cobalt hydroxide
4	Ruashi mining s.a.s (RUASHI)	Metorex limited 75%, Gecamines 25%	17.8/2.9	1.3/0.21	Cathode copper; Cobalt hydroxide
5	Kinsenda copper company (KINSENDI)	Metorex limited 77%, Sodiminco 23%	29.4/5.8	-/-	-
6	Musonoi project (MUSONOI)	Metorex limited 75%, Gecamines 25%	59.4/2.92	17.4/0.80	-
7	Tenke fungurume mining s.a (TFM)	China molybdenum 80%, Gecamines 20%	371.3/2.10	53.0/0.3	Cathode copper; Cobalt hydroxide
8	Kisanfu mining (KFM)	China molybdenum 71.25%, Contemporary Amperex Technology 23.75%, Congo real estate 5%	-/-	-/-	-
9	MMG kinsevere sarl (Kinsevere)	China minmetals nonferrous metals 95%, Gecamines 5%	-/-	-/-	Cathode copper
10	Compagnie miniere de kambove (COMIKA)	Northern mining 70%, Gecamines 30%	137.0/-	33.0/-	Cathode copper; Copper concentrate; Cobalt concentrate; Cobalt

					hydroxide
11	La miniere de kalukundi s.a (LAMIKAL)	Northern mining 75%, Managem20%, Congo real estate 5%	76.1/1.72	12.1/0.44	Cathode copper
12	Shituru mining corporation s.a.s (SMCO)	Pengxin 72.5%, Gecamines 27.5%	2.7/2.62	-/-	Cathode copper
13	Kamoa copper s.a (Kamoa-Kakula)	Zijin Mining 49.5%, Citic metal 50.5%	1134.0/4.63	-/-	Copper concentrate
14	La compagnie miniere de musonie global s.a.s (COMMUS)	Zijin Mining 72%, Gecamines 28%	196/3.28	6.69/0.14	Cathode copper; Copper concentrate; Cobalt hydroxide
15	Congo dongfang international mining s.a.s (CDM)	Huayou cobalt 100%	28.3/1.87	3.5/0.44	Cathode copper; Cobalt hydroxide; Blister Copper
16	La miniere de kasombo s.a.s (MIKAS)	Huayou cobalt 72%, Gecamines 28%	-/-	-/-	Cathode copper; Cobalt hydroxide
17	Societe miniere de deziwa s.a.s (DEZIWA)	China nonferrous metal mining 51%, Gecamines 49%	460.0/-	42.0/-	Cathode copper; Cobalt hydroxide
18	CNMC congo compagnie miniere sar (PANDA)	China nonferrous metal mining 100%	-/-	-/-	Cathode copper; Cobalt hydroxide
19	Lualaba copper smelter s.a.s (LCS)	China nonferrous metal mining 62%, Yunnan copper 38%	-/-	-/-	Blister Copper
20	Huachin metal leach s.a (HUACHIN)	China nonferrous metal mining 67.5%, Shanghai chinafortune 32.5%	-/-	-/-	Cathode copper; Cobalt hydroxide
21	La compagnie miniere de kambove s.a.s (KAMBOVE)	China nonferrous metal mining 55%, La Generale Des Carrieres Et Des Mines SA 45%	32.0/-	-/-	Cathode copper; Cobalt hydroxide
22	CNMC huachin mabende mining s.a(MABENDE)	China nonferrous metal mining 65%, Shanghai chinafortune 35%	-/-	-/-	Cathode copper
23	HanruiMetal (Congo) sarl (METAL)	Nanjing hanrui cobalt	-/-	-/-	Cathode copper; Cobalt hydroxide
24	M.j.m sarlu (MJM)	Guangdong dowstone technology	-/-	-/-	Cathode copper; Cobalt hydroxide
25	Kai peng mining sarl (KPM)	Holdings	200.0/-	40.0/-	Cathode copper; Cobalt hydroxide
26	Cheng tun gongo ressources sarl (CCR)	Chengtun mining group	-/-	-/-	Cathode copper; Cobalt hydroxide
27	Kalongwe mining (KALONGWE)	Chengtun mining group	30.2/2.72	4.3/0.62	-
28	Tengyuan cobalt and copper	Ganzhou tengyuan	-/-	-/-	Cathode

	resources (TCC)	cobalt			copper; Cobalt hydroxide Cathode
29	New mining	New mining	37.8/2.287	3.8/0.227	copper; Cobalt hydroxide Cathode
30	Mutanda mining sprl (MUMI)	Glencore	511.5/1.39	202.4/0.55	copper; Cobalt hydroxide Cathode
31	Kamoto copper company sarl (KCC)	Glencore 86.33%, Gecamines 13.67%	-/-	-/-	copper; Cobalt hydroxide Cathode
32	Boss mining s.a.s (BOSS)	Eurasian resources group 95.4%	248.9/-	15.9/-	copper; Cobalt hydroxide
33	The roan tailings reclamation (RTR)	Eurasian resources group 85%, China nonferrous metal mining 15%	168.1/1.49	36.1/0.32	Cathode copper; Cobalt hydroxide
34	La congolaise des mines et de developpement(COMIDE)	Eurasian resources group	-/-	-/-	Copper concentrate
35	Frontier s.a (Frontier)	Eurasian resources group 95%, Gecamines 5%	-/-	-/-	Copper concentrate
36	Societe miniere du katanga (SOMIKA)	-	-/-	-/-	Cathode copper; Cobalt hydroxide
37	Kisanfu mining sprl (KIMIN)	-	33.0/-	-/-	Cathode copper; Cobalt hydroxide
38	Etoile extension(chemaf)	Chemaf	100.0/-	-/-	Cathode copper; Cobalt hydroxide
39	Societe d'exploitation de kipoi sprl (SEK)	Sanhe mining 95%, Congo real estate 5%	53.5/-	-/-	Cathode copper

Note: - Indicates no relevant data at present

据统计，2020年，中资矿业企业在刚果（金）生产铜金属量112万余吨，占刚果（金）铜产量的75%以上；钴金属产量5.5万吨，占刚果（金）钴产量的49%左右，刚果（金）铜产量最大的三家中资企业为洛阳钼业、华刚矿业和紫金矿业，钴产量最大的三家中资企业分别为洛阳钼业、华友钴业和金川集团。根据目前掌握的各中资矿企扩产情况，未来3-4年，刚果（金）中资企业铜产量将超过180万吨/年，钴产量将超过8万吨/年。2020年，刚果（金）铜产量和钴产量最大的三家外资企业均为嘉能可、欧亚资源和CHEMAF。目前，嘉能可计划重启此前已停产约两年的Mutanda铜钴项目，复产后与Katanga的产能将达到铜46万吨/年、钴5万吨/年。欧亚资源RTR尾矿项目二期于2019年投产，具备铜10.5万吨/年、钴2万吨/年的产能，但受供料影响并未达产。此外，欧亚资源的COMIDE和BOSS项目基本处于停滞状态。CHEMAF拥有Usoko和Etoile两个冶炼厂，以及数个矿权项目及勘探权，近年又在Mutoshi新建冶炼厂，达产后CHEMAF将具备铜7万吨/年、钴2.2万吨/年的产能。艾芬豪与紫金矿业共同投资兴建的卡莫阿-卡库拉项目，在2021年5月25日投产，未来将

形成 45 万吨/年的铜精矿产能。

3.1 在刚果（金）投资的中国企业情况

3.1.1 中铁资源集团有限公司

中铁资源集团在刚果（金）投资了华刚矿业、MKM 矿业和绿纱矿业三家矿业公司。

华刚矿业是由中国中铁、中国电建组成的中方企业集团与刚果矿业总公司共同发起成立的国际化矿业公司，注册资本金 1 亿美元。华刚矿业投资开发、建设和运营的 SICOMINES 铜钴矿项目于 2015 年 10 月正式投产，设计年处理矿石量 455 万吨，年产品含铜 12.5 万吨，已连续五年实现稳产超产。目前该项目总投资已达 67 亿美元。迄至今日，华刚矿业仍为刚果（金）境内投资最大的中资企业。在 2019 年底，华刚矿业启动了二期工程，已于 2021 年 6 月 30 日建成投产，也标志着华刚矿业产能已经达到铜 25 万吨/年、钴 5000 吨/年。

MKM 是集矿山开采、选矿、冶炼、矿产品加工及销售为一体的综合型矿产资源开发企业，设计产能年产阴极铜 2.2 万吨，氢氧化钴含钴金属 1800 吨，硫酸 12 万吨，二氧化硫 5000 吨。目前该矿资源已近枯竭，主要以外购矿石作为生产原料。

绿纱矿业于 2012 年开工建设一期湿法冶金系统；2013 年开始投产运行，并于同年启动二期粗碎-浮选-焙烧-制酸系统；在 2015 年建成投产。可年产 2.5 万吨阴极铜，1500 吨氢氧化钴。

3.1.2 紫金矿业集团股份有限公司

紫金矿业目前在刚果（金）投资的矿企主要为穆索诺伊和卡莫阿铜矿。

紫金矿业分别于 2014 年 11 月和 2016 年 8 月，收购华友钴业持有的该项目 51%和 21% 股份，成为穆索诺伊公司最大股东。穆索诺伊拥有刚果（金）矿业部颁发的两个矿权证，矿权面积 3.36 平方公里，拥有铜资源量 108 万吨，平均品位 4.17%。该项目分两期进行，一期采选冶项目于 2015 年 6 月动工建设，2017 年全面投产，总投资 2.5 亿美元，设计年产铜金属量 5 万吨。二期铜钴回收项目于 2018 年 3 月动工建设，2019 年 4 月全面投产，总投资 2.6 亿美元，设计年产铜金属量 5 万吨、钴金属量 3000 吨。2019 年时，穆索诺伊生产铜 8 万吨、钴 500 吨。

2015 年 5 月，紫金矿业收购卡莫阿控股有限公司 49.5%的股份。目前，卡莫阿铜矿铜资源量 4369 万吨，平均品位为 2.53%，为全球第四大、刚果（金）第一大铜矿。卡莫阿-卡库拉高品位铜矿体将分三阶段、逐步开采，一期工程于 2017 年 11 月启动建设，项目建设投资预计超过 11 亿美元，已于 2021 年 5 月投产，设计矿石处理能力 600 万吨/年，年产精矿含铜 40 万吨；五年内启动二期工程，总矿石开采量将达到 1200 万吨/年；三期扩产后的卡

莫阿-卡库拉铜矿年开采矿石将达 1800 万吨，铜产量将超 70 万吨/年。

3.1.3 洛阳栾川钼业集团股份有限公司

2016 年 11 月，洛阳钼业以 26.5 亿美元收购了美国自由港所持有的 TFM 的母公司 TFHL 的 70% 股权，从而间接持有 TFM 56% 权益。2019 年 1 月，洛阳钼业通过其合作伙伴 BHR 间接获得 TFM 24% 股权。目前，洛阳钼业持有 TFM 80% 的权益。

TFM 矿区面积超过 1500 平方公里，总资源量 8.25 亿吨，其中铜金属 2471 万吨、钴金属 247 万吨，为全球范围内储量最大、品位最高的铜钴矿之一，也是刚果（金）国内最大的外商投资项目，已于 2009 年建成投产。2020 年，TFM 生产阴极铜 17.8 万吨、钴 1.54 万吨。2021 年 7 月 16 日 TFM 铜钴矿 10K 扩产增效项目进入试生产阶段，10K 项目投资 3 亿美元，设计产能年处理矿石量 330 万吨，年产阴极铜 8.85 万吨，年产氢氧化钴 7280 吨。扩产后年产铜金属 18.73-22.89 万吨、钴金属 1.65-2.01 万吨。

2020 年 12 月 13 日，洛阳钼业与自由港达成了股份购买协议，以 5.5 亿美元总价收购后者在刚果（金）Kisanfu 铜钴矿中 95% 的间接权益。2021 年 4 月 10 日，宁德时代间接控股公司宁波邦普时代全资子公司香港邦普时代新能源有限公司以总对价 1.375 亿美元获得 KFM 25% 的股权，从而间接持有 Kisanfu 23.75% 的权益。Kisanfu 位于刚果（金）卢阿拉巴省，是世界上最大、最高品位未开发的铜钴矿项目之一，矿石资源量达 3.65 亿吨，铜品位为 1.72%，含铜金属量约 628 万吨；钴品位为 0.85%，含钴金属量约 310 万吨。当前勘探深度以下还有成矿能力，有望成为洛阳钼业投资组合中另一具有持久生命力的世界级矿产。目前，项目已经开始初步设计和基建剥离工作。

3.1.4 中国有色矿业集团有限公司

中色矿业香港控股公司注册资本金 4800 万美元，主营业务为湿法炼铜及其相关的工程建设、采矿安装业务。其在刚果（金）投资了两家子公司，分别为中色华鑫马本德矿业和中色华鑫湿法冶炼厂。2019 年，中色矿业香港控股公司产铜 5.6 万吨，均为收购矿石的冶炼项目。

中色华鑫马本德冶炼厂设计年产阴极铜 2 万吨，已经完成年产 4.5 万吨阴极铜的扩产改建^[11, 12]，主要处理氧化铜矿。

中色华鑫利卡西冶炼厂设计年产阴极铜 1 万吨、硫酸 4 万吨以及部分氢氧化钴产品。经过改扩建，实际可达到年产阴极铜 2 万吨^[13, 14]，主要处理氧化铜钴矿。

迪兹瓦矿业由中国有色矿业集团与刚果（金）国家矿业公司按 51:49 的比例合资成立。该项目资源包括主矿床和东矿床两个矿床，一期开发主矿体，总投资 8.8 亿美元，采用露天

开采和湿法冶炼工艺生产阴极铜和氢氧化钴；设计年处理原矿 450 万吨，年产阴极铜 8 万吨、氢氧化钴含钴 8000 吨，已于 2020 年 1 月建成投产。东矿床作为延长矿山服务年限或扩大生产规模的备用资源^[15-17]。目前，迪兹瓦矿业正在规划二期扩建工程，计划新增铜产能 10 万吨/年。

中色刚波夫矿业于 2020 年 1 月启动建设，预计总投资 2.5 亿美元，计划两年内建设年产矿石量 100 万吨的露天矿山和年处理矿石 100 万吨的湿法冶炼厂，设计年产阴极铜 3 万吨、粗制氢氧化钴含钴 1000 吨。二期深部矿体井下硫化矿项目预计 2025 年投产，新增产能铜 2 万吨/年、钴 1000 吨/年。届时，刚波夫矿业将年产铜 5 万吨、钴 2000 吨。

3.1.5 其他中国矿业公司

五矿集团旗下 MMG 集团的世界级矿山 Kinsevere，在 2020 年生产铜 7.1 万吨^[18]。目前，Kinsevere 铜矿正在进行二期硫化矿焙烧工程，计划 2022 年建成投产，铜产能将达到 10 万吨/年。

金川集团在刚果（金）运营如瓦西矿业和金森达铜业两个项目。此外，穆松尼项目正在建设阶段，采用地下开采方式，预计 2024 年投产。鲁班巴项目正处于预可研阶段。如瓦西矿业于 2008 年建成 SX-EW 湿法冶炼系统，设计处理能力 120 万吨/年氧化铜钴矿，年产阴极铜 4.5 万吨，氢氧化钴金属 5000 吨。2019 年，如瓦西矿业生产铜 3.4 万吨、钴 5070 吨。金森达铜业为梅特瑞斯公司旗下的一个集地下采矿、选矿于一体的地采矿山，于 2013 年开工建设、2017 年试生产、2018 年达产达标。2019 年，金森达铜业产铜达 3 万吨。

华友钴业在刚果（金）分为刚果东方国际矿业（CDM）和刚果（金）卡松波矿业（MIKAS）。CDM 主要生产模式为矿山开发、采选、火法和湿法冶炼，主要产品为硫化铜钴精矿、粗铜、阴极铜和粗制氢氧化钴。其矿权分为鲁苏西和鲁库尼两个矿段。鲁苏西矿段铜金属储量 15 万吨、钴金属 4.5 万吨。CDM 在该矿段建设了一条年处理 100 万吨矿石的采选系统，主要产品为硫化铜钴精矿。鲁库尼矿段铜金属储量 17 万吨、钴金属 2000 吨，该矿段 100 万吨/年矿石处理量、年产阴极铜 3 万吨的生产线于 2019 年底投产。CDM 建设了一套日处理 1500 吨干矿的湿法冶炼系统和日处理 180 吨干矿的硫化矿焙烧系统，主要产品为电极铜和粗制氢氧化钴。其设计年产电积铜 2.4 万吨、粗制氢氧化钴及钴 1.44 万吨。MIKAS 于 2017 年初启动湿法钴铜冶炼项目建设，目前项目一期、二期均已建成投产。项目设计年产电积铜 3 万吨、粗制氢氧化钴含钴 7000 吨，产能均来自收矿冶炼和代加工。在 2020 年，华友钴业在刚果（金）生产铜 6.1 万吨、钴 7000 吨。

北方矿业在刚果（金）投资了科米卡和拉米卡两家矿业公司。科米卡公司一期项目为硫

化矿选矿，设计年产硫化铜钴精矿 6 万吨；二期项目开发氧化矿和地下硫化矿，设计年产阴极铜 5 万吨、氢氧化钴折金属钴 5000 吨，其中氧化矿采用露天开采+湿法冶金工艺流程，硫化矿采用地下开采+焙烧+湿法冶金工艺流程。目前科米卡公司正在进行二期工程建设，预计最终将达到年产铜 7 万吨、钴 1.3 万吨的生产规模。拉米卡公司总投资约 6.4 亿美元，采用露天开采+湿法冶金工艺流程开发氧化矿，设计年产阴极铜 4.5 万吨、氢氧化钴折金属 5000 吨，项目铜系统于 2020 年 9 月投产、钴系统于 2021 年 3 月投产。

3.2 在刚果（金）投资的其他国家企业情况

3.2.1 艾芬豪矿业公司

艾芬豪自上世纪 90 年代进入刚果（金）投资矿业，主要投资领域为矿产勘探。其在刚果（金）共注册了 50 个勘探权，主要找矿成果集中在科卢韦齐，代表性成果为卡莫阿矿权。目前艾芬豪持有卡莫阿铜矿 39.6%的权益。另外，艾芬豪持有 KIPUSHI 矿 68%的权益，该矿于 2017 年启动重建工程，预计 2021 年投产，设计平均年产 22.5 万吨锌金属。艾芬豪正逐步由勘探型向生产型企业转型。

3.2.2 嘉能可国际公司

嘉能可为刚果（金）的主要投资者之一，主要资产有 KAMOTO 矿、MUTANDA 矿和 CHABARA 矿，其铜钴资源储量稳居刚果（金）前三位。同时，嘉能可在刚果（金）开展金属贸易业务。

3.2.3 第一量子矿业公司

第一量子在刚果（金）曾拥有众多资产，如 Kingajambo 尾矿坝及 7 万吨工厂、COMIDE 矿山群、BOSS MINING 及 FRONTIER 矿山群，其铜钴储量曾位居刚果（金）第四位。但目前，其资产已转至欧亚资源。

3.2.4 欧亚资源公司

欧亚资源于 2012 年前后斥资 17 亿美元收购了第一量子在刚果（金）的所有资产。2017 年，欧亚资源启动尾矿回收项目 RTR，该项目一期工程于 2018 年底投产，设计年产钴 1.4 万吨、铜 7.7 万吨；二期扩建项目于 2019 年上半年投产。目前，RTR 项目设计产能已达钴 2 万吨/年、铜 10.5 万吨/年；但受供料影响，并未达产。据媒体报道，欧亚资源有意出售其在刚果（金）境内所有的矿业资产。

4 刚果（金）铜钴矿选冶工艺现状

根据矿石氧化率的不同，将氧化率小于 10%的矿石划分为硫化矿，大于 90%的矿石划

分为氧化矿，氧化率在 10%~90%内的矿石划分为混合矿^[19]。对于中非铜矿带而言，矿床受热液改造的程度不同，氧化程度亦不同，平均氧化率约 72%。氧化矿、混合矿和硫化矿分布复杂，氧化带深度少则 20~50 m，最深可达 300 m^[20]。目前开采出来的矿石大部分为氧化矿，部分地区出现硫化矿。铜品位为 1.39%~4.63%，钴品位 0.11%~0.62%。

在实际铜-钴矿的加工过程中，矿石性质的差异决定着选冶工艺的设计。比如，若有用矿物与脉石矿物的密度差异较大，重介质分选可作为预选步骤，预先除去大量脉石。这在当地矿山企业中已经得到了广泛应用^[21]。如果硫化铜矿的脉石中含有黄铁矿、磁黄铁矿和白铁矿等矿物，那么使用常规的黄药或黑药捕收剂进行浮选将很难获得较高品位精矿，而采用硫代氨基甲酸盐捕收剂则可以选择性地将含铜硫化矿上浮^[22]。也可以通过向矿浆中添加氰化物以抑制黄铁矿，使硫化铜矿被单一浮选^[23]。对于孔雀石、硅孔雀石和水钴矿等氧化矿，较强的亲水性使它们不能直接使用常规硫化矿捕收剂进行浮选。这时就需要对氧化矿进行硫化处理，在其表面形成硫化物薄膜，然后再开展常规浮选工艺^[24]。另外，当使用水玻璃作为抑制剂时，脂肪酸捕收剂对孔雀石、水钴矿和方解石、白云石、滑石等脉石的捕收能力差异较为显著，此时采用优先浮选可依次获得铜精矿和钴精矿^[25]。

4.1 火法冶炼工艺提取铜钴资源

原生硫化铜矿晶格稳定，不易溶于酸。目前，火法冶炼是提取硫化矿中铜金属的有效手段。北方矿业利卡西富力冶炼厂是第一家现代化火法冶炼厂，目前已经处于停产状态。中色 LCS 项目是刚果（金）首个规模型现代化火法铜冶炼厂，项目一期设计年处理 40 万吨铜精矿，年产粗铜 11.8 万吨和铜钴合金 1 万吨。项目一期已于 2020 年 1 月投产。该项目采用造钼熔炼和吹炼的粗铜冶炼工艺，原料采用外购的硫化精矿。

不同于金属硫化矿物熔炼，吹炼和精炼的火法冶炼过程，金属氧化矿的火法冶炼主要通过还原熔炼直接生产粗铜。孔雀石受热分解为 CuO，在大于 1060℃熔炼温度下，CuO 分解为 Cu₂O。与焦炭或煤粉接触，Cu₂O 被还原为金属^[26]。水钴矿在高温下分解为 CoO^[27]。铜钴的还原熔炼原理如下：



当铜含量较高时，氧化铜经过还原熔炼一般会生成粗铜，粗铜中 Cu 品位为 94%~96.8%，Co 品位为 1%~6%。当钴含量较低时，一般以铜钴合金的形式回收钴资源，铜钴合金中 Cu 品位 70%~90%，Co 品位 10%~30%。而当氧化矿中铜钴品位均较低时，一般选择直接还原熔炼生产铜钴合金。生产粗铜时还原熔炼温度大约为 1200℃左右，而生产铜钴合金时还原

熔炼温度大约为 1400 °C^[28]。谢添等^[27]研究了中铁资源绿纱项目浮选精矿电炉还原熔炼工艺，结果表明，最佳还原熔炼条件为：还原熔炼温度为 1500 °C，焦煤加入量为 6.5%，CaO 加入量为 25%，时间为 45 min。所得合金含铜约 70%，含钴约 20%，含铁约 8%，铜的回收率大于 98%，钴的回收率大于 95%。自 2017 年起，紫金矿业穆索诺伊项目开始采用鼓风炉还原熔炼生产粗铜，其中 Cu 品位为 96.8%，钴品位为 6%。

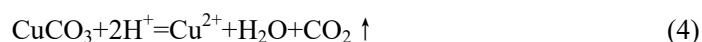
4.2 湿法冶炼工艺提取铜钴资源

目前，刚果（金）开采出来的铜钴矿主要为氧化矿，所以湿法浸出是常用的传统工艺。

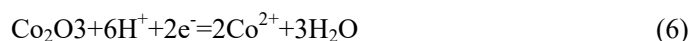
4.2.1 搅拌浸出

由于铜氧化矿如孔雀石和硅孔雀石等可溶于硫酸溶液，而三价钴氧化物需要被还原为二价钴才可溶于硫酸溶液，所以铜钴氧化矿的浸出采用硫酸和还原剂分步浸出铜和钴。常用的还原剂有焦亚硫酸钠和二氧化硫等，一般情况下，配套有硫磺制酸厂的项目使用二氧化硫，其他项目一般使用焦亚硫酸钠。分步浸出机理如下^[29]：

酸浸：



还原浸出：



早期部分矿山矿石品位较高，针对铜含量较高、铁含量较低的浸出液，一般直接进行矿浆电积工艺获得阴极铜，但该工艺生成的产品质量不稳定。随着市场对产品质量要求越来越高，新建项目都采用萃取-电积工艺生产阴极铜。铜电积后的电积液或萃余液需要经过净化除铜除杂作业才能进行沉钴作业或后续电钴工艺生产。分步浸出原则流程如图 4 所示。中铁资源 MKM 矿业(KALUMBWE-MYUNGA)、北方矿业拉米卡(庞比)、金川如瓦西(RUASHI)和洛阳钼业(TFM)均采用硫酸和还原剂分段浸出铜和钴，经过萃取，电极获得阴极铜，萃余液经过净化，沉钴得到氢氧化钴等产品。

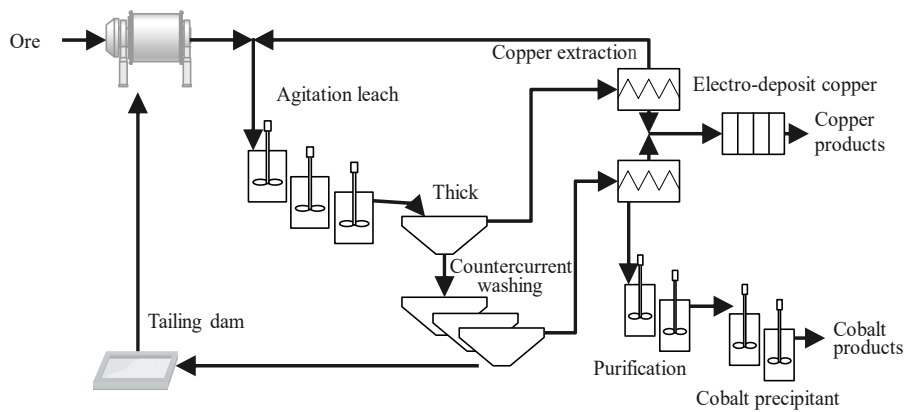


图 4 铜钴硫化矿分步浸出-萃取-电积流程

Fig. 4 Step leaching - extraction - electrodeposition process of copper-cobalt oxide ore.

4.2.2 堆浸

针对刚果（金）低品位氧化矿或尾矿，堆浸具有很大潜力。堆浸不仅避免过量破碎硬度大的脉石矿物，同时解决湿法体系废水处理问题。其次随着氧化矿的不断开采，硫化矿逐渐增多，该工艺后续可以转型为低品位硫化矿生物堆浸^[30,31]。目前，已经采用堆浸工艺的项目有中铁资源 MKM，中铁资源绿纱，中铁资源华刚，中国有色华鑫，中国有色潘达，鑫鹏资源希图鲁和华友钴业 MIKAS。紫金矿业穆索诺伊和迪兹瓦项目正在规划该工艺。

4.3 浮选工艺回收硫化铜钴精矿

与氧化矿相比硫化矿具有非常好的天然可浮性，所以浮选是选别硫化矿的常用选矿工艺。黄药及其衍生物和黑药等阴离子捕收剂经常作为硫化矿的捕收剂。紫金矿业卡莫阿，金川金森达，北方矿业科米卡和欧亚资源 Frontier 项目已经采用该工艺进行生产。该工艺生产的铜钴精矿直接销售给赞比亚和刚果（金）的火法冶炼企业，但是随着刚果（金）政府收紧精矿出口的政策，预计后续刚果（金）境内生产的硫化铜钴精矿都将在本地火法冶炼加工企业处理。

4.4 选冶联合工艺提取铜钴资源

4.3.1 硫化浮选—湿法浸出联合

因含有大量白云石等碳酸盐矿物，导致铜钴氧化矿浸出酸耗增大，有的甚至高达 500 kg/t 原矿，为企业的生产成本带来巨大难题^[32]。同时，铜钴氧化矿与碳酸盐脉石表面性质相似，可浮性较差，通过脂肪酸类捕收剂较难实现有效的分离。通过添加硫化钠、硫氢化钠等硫化剂预处理，然后使用黄药类捕收剂可实现铜钴氧化矿的有效回收。硫化浮选—湿法浸出联合流程如图 5 所示。段景文^[33]采用开路浮选-搅拌浸出联合工艺处理刚果(金)某高碳酸盐氧化铜矿，在保证总回收率 85.04%的情况下，浸出酸耗比原矿酸浸降低 80%，搅拌浸出处理量

仅为原矿浸出的 20%左右，取得了良好的技术经济指标。当前紫金矿业穆索诺伊已经采用该工艺进行生产，北方矿业拉米卡项目的后续规划也将采用该工艺。

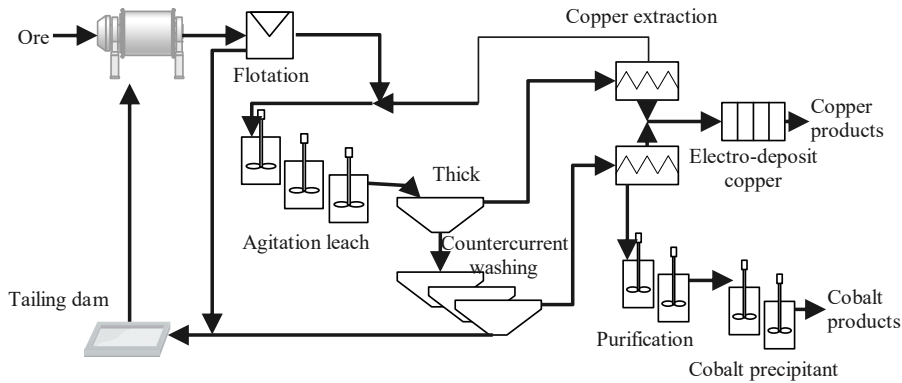


图 5 硫化浮选—湿法浸出联合流程
 Fig. 5 Combined process of sulfidized flotation and hydro-leaching.

4.3.2 异步浮选硫化矿和氧化矿—焙烧—浸出联合

随着氧化矿物的开采，部分厂区原矿中出现硫化矿。依据“能收早收，应收尽收”的原则，通常优先浮选可浮性较好的硫化矿，然后浮选回收氧化矿。硫化矿精矿可直接售卖至火法冶炼厂。然而，位于刚果（金）的选厂一般选择在浮选铜精矿湿法工艺前加沸腾炉氧化焙烧作业，将硫化矿焙烧氧化为氧化矿，生成的 SO_2 气体可用于硫酸制备。焙渣和浮选氧化矿精矿一起送入湿法工艺。典型的原则流程如图 6 所示。

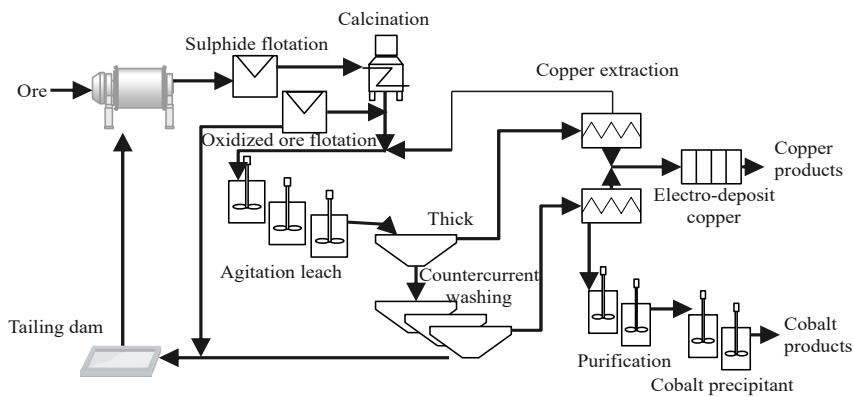


图 6 硫化矿-氧化矿分步浮选-焙烧-浸出联合流程
 Fig. 6 Combined process of step flotation - roasting - leaching of oxidized-sulfide ore.

华刚矿业，绿纱矿业，华友钴业 MIKAS 和华友钴业 CDM 等项目均采用该工艺进行生产。另外，北方矿业科米卡，金川集团穆松尼和五矿资源 KINSEVERE 项目正在建设该工艺设施。

5 刚果（金）矿业企业发展面临的问题和挑战

刚果（金）地处中非铜带，铜钴资源非常丰富。在空间上，矿石从上到下分布依次为：氧化矿，混合矿和硫化矿。随着资源的不断开采，高品位氧化矿日益减少。而低品位铜钴氧化矿在浮选领域属于难选矿；在湿法浸出时，其伴生的大量碳酸盐脉石矿物会导致大量的酸耗。混合矿和硫化矿的出现使得原矿性质出现显著变化，为适应新矿石性质，原有铜钴资源提取工艺需进行较大调整。所以高效处理低品位矿氧化矿，混合矿和硫化矿逐渐成为刚果（金）矿业发展的主要问题。

刚果（金）政治环境复杂政府政策多变，政府信用和履约意识不强；个别地区非法武装活动仍然猖獗，恶性案件时有发生；在新冠疫情背景下，刚果（金）卫生和医疗水平相对落后，疫情防控难度大。这些因素都将是影响外资企业在刚果（金）的发展。

在“一带一路”倡议及国际产能合作的持续推动下，凭借我国铜钴产业的后发优势以及企业不断提升的综合实力，未来我国境外资源开发将形成以建设具有国际影响力的境外资源基地为着力点，构建以企业为主体的全球铜钴资源开发体系。

6 结语

刚果（金）铜-钴资源储量丰富，主要以氧化矿、硫化矿及二者混合矿的形式存在，已经吸引了较多中外企业在其境内投资生产，产品主要为铜钴精矿、阴极铜、粗铜和氢氧化钴等。从中外投资发展来看，中资企业在刚果（金）矿业领域投资热度较高，资源占有量和产量呈增加趋势，且随着中资企业在矿业行业装备水平及工艺技术的逐步提升，以及国内上市公司与外资企业的高度市场化合作，必将会给刚果（金）的矿业行业带来巨大的发展机遇。中资企业要在非洲打造长青基业，不能闭门造车、关门办厂，必须要以更加开放包容的心态打造“多国部队”“本土团队”，实现中方、国际和属地团队的融合发展。这就要求企业适应当地形势，改革管理体系，进而促进自身能力的全面提升和可持续发展。随着“一带一路”倡议和国际产能合作的深入推进，未来以项目换资源、租赁经营等其他新型合作模式进行资源开发将具有很大的发展前景。

参考文献

- [1] SAAD L, PARMENTIER I, COLINET G, et al. Investigating the Vegetation-Soil

Relationships on the Copper–Cobalt Rock Outcrops of Katanga (D. R. Congo), an Essential Step in a Biodiversity Conservation Plan [J]. *Restoration Ecology*, 2012, 20(3): 405-415.

[2] CRUNDWELL F K, PREEZ N, KNIGHTS B. Production of cobalt from copper-cobalt ores on the African Copperbelt – An overview [J]. *Minerals Engineering*, 2020, 156: 106450.

[3] HAEST M, MUCHEZ P, DEWAELE S, et al. Petrographic, fluid inclusion and isotopic study of the Dikulushi Cu–Ag deposit, Katanga (D.R.C.): implications for exploration [J]. *Mineralium Deposita*, 2009, 44(5): 505.

[4] HAEST M, MUCHEZ P, DEWAELE S, et al. Structural Control on the Dikulushi Cu-Ag Deposit, Katanga, Democratic Republic of Congo [J]. *Economic Geology*, 2007, 102(7): 1321-1333.

[5] MUCHEZ P, VANDERHAEGHEN P, DESOUKY H E, et al. Anhydrite pseudomorphs and the origin of stratiform Cu–Co ores in the Katangan Copperbelt (Democratic Republic of Congo) [J]. *Mineralium Deposita*, 2008, 43(5): 575.

[6] MUCHEZ, P., ANDRÉ-MAYER, AS., EL DESOUKY, H.A. et al. Diagenetic origin of the stratiform Cu-Co deposit at Kamoto in the Central African Copperbelt [J]. *Mineralium Deposita*, 2015, 50(4): 437-447.

[7] DECRÉE S, DELOULE É, RUFFET G, et al. Geodynamic and climate controls in the formation of MioPliocene world-class oxidized cobalt and manganese ores in the Katanga province, DR Congo [J]. *Mineralium Deposita*, 2010, 45(7): 621-629.

[8] 陈兴海, 刘运纪, 杨焱, 等. 刚果(金)SICOMINES 铜钴矿床地质特征及成因探讨 [J]. *有色金属(矿山部分)*, 2012, 64(006): 31-37.

CHEN Xing-hai, LIU Yun-ji, YANG Yan, et al. Geological characteristics and genesis of the Sicomines copper-cobalt deposit in the Democratic Republic of Congo [J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2012, 64(006): 31-37.

[9] 张晓峰, 李耀麟, 李绍成, 等. 马本德矿业铜湿法冶金工艺及管理特点简述 [J]. *世界有色金属*, 2017, 000(022): 11,13.

ZHANG Xiao-feng, LI Yao-lin, LI Shao-cheng, et al. Brief introduction of the characteristics of copper hydrometallurgical process and management in Mabende Mining [J]. *World Nonferrous Metals*, 2017, 000(022): 11,13.

[10] Shedd, K. *Minerals Yearbook - Metals and Minerals*[EB/OL]. [2021]. <https://www.usgs.gov/>

centers/nmic/minerals-yearbook-metals-and-minerals.

[11] 赵要锋, 张晓峰. 中色华鑫马本德矿业碎磨车间生产实践 [J]. 世界有色金属, 2019, 000(013): 143-144.

ZHAO Yao-feng, ZHANG Xiao-feng. Production practice of crushing and grinding workshop of Zhongse Huaxin mabende Mining Co., Ltd [J]. World Nonferrous Metals, 2019, 000(013): 143-144.

[12] 钟先林, 张晓峰, 陈胜兵, 等. 刚果(金)中色华鑫湿法冶炼厂提质增效实践 [J]. 中国金属通报, 2020, No.1024(07): 98-99.

ZHONG Xian-lin, ZHANG Xiao-feng, CHEN Sheng-bin, et al. Practice of improving quality and increasing efficiency in Congo (DRC) Zhongse Huaxin hydrometallurgy plant [J]. China Metal Bulletin, 2020, 1024(07): 98-99.

[13] 张晓峰, 王刚. 中色华鑫湿法改扩建项目阴极铜系统全线投产 [J]. 中国有色金属, 2019, 643(07): 21-22.

ZHANG Xiao-feng, WANG Gang. The cathode copper system of Zhongse Huaxin wet process reconstruction and expansion project was put into operation [J]. China Nonferrous Metals, 2019, 643(07): 21-22.

[14] 薛璇. 迪兹瓦矿业:奋力打造精品工程 [J]. 中国有色金属, 2018, No.628(16): 42-43.

XUE Xuan. Dizwa Mining: Strive to create high-quality projects [J]. China Nonferrous Metals, 2018, No.628(16): 42-43.

[15] 韩冬, 谢永生. 迪兹瓦矿业基建期绿色矿山建设实践与经验 [J]. 有色矿冶, 2020(1): 25+72-74.

HAN Dong, XIE Yong-sheng. Practice and experience of green mine construction in dizwa mining construction period [J]. Nonferrous Mining and metallurgy, 2020 (01): 25+72-74.

[16] 石薇. 刚果(金)Deziwa 铜钴矿湿法冶炼工程总图设计 [J]. 有色冶金设计与研究, 2019, v.40/ No.190(06): 57-59.

SHI Wei. General drawing design of hydrometallurgical engineering of Deziwa copper-cobalt mine in Congo [J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2019, v.40/No.190(06): 57-9.

[17] 谢添, 蓝仁魏. 刚果(金)加丹加铜钴矿带矿山企业调研 [J]. 中国矿山工程, 2015, 044(003): 6-9,32.

XIE Tian, LAN Ren-wei. Investigation on mining enterprises in Katanga copper-cobalt ore belt of

- Congo (DRC) [J]. *China Mine Engineering*, 2015, 044(003): 6-9,32.
- [18] 蓝少青, 奚荣. 浅论刚果(金)希图鲁铜矿电气设计 [J]. *有色冶金设计与研究*, 2011, 32(Z1): 79-81.
- LAN Shao-qing, XI Rong. A brief discussion on electrical design of Hitulu copper mine in DRC [J]. *Nonferrous Metals Engineering & Research*, 2011, 32(Z1): 79-81.
- [19] 朴永超, 杨海瑞, 王立刚, 等. 刚果(金)某高钙镁-硫氧混合型铜钴矿选冶工艺探讨 [J]. *中国矿业*, 2018, 027(0z1): 267-272.
- PU Yong-chao, YANG Hai-rui, WANG Li-gang, et al. Discussion on Beneficiation and smelting process of a high calcium magnesium sulfur oxygen mixed copper cobalt ore in Congo (DRC) [J]. *China Mining Magazine*, 2018, 027(0z1): 267-272.
- [20] 苏凤来, 杨必文, 张登高, 等. 刚果(金)某氧化铜精矿还原熔炼渣物化性能研究 [J]. *有色金属:冶炼部分*, 2021, (06): 18-24.
- SU Lai-feng, YANG Bi-wen, ZHANG Deng-Gao, et al. Study on physicochemical properties of reduction smelting slag of a copper oxide concentrate in the Democratic Republic of Congo [J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2021, (06): 18-24.
- [21] 牟兴兵, 杨雪, 杨大锦, 等. 还原熔炼铜渣回收铜钴的试验研究 [J]. *云南冶金*, 2017, (3): 31-34.
- MOU Xing-bing, YANG Xue, YANG Da-jin, et al. The Experimental Study on Copper,Cobalt Recovery by Reduction of Copper Smelting Slag [J]. *Yunnan Metallurgy*, 2017, (3): 31-34.
- [22] CHADWICK J. Advances in Copper Extraction: Cu roundup [J]. *International Mining*, 2013: 20-32.
- [23] MLS A, MBK B, MPMC D, et al. A review of the beneficiation of copper-cobalt-bearing minerals in the Democratic Republic of Congo - ScienceDirect [J]. *Journal of Sustainable Mining*, 2019, 18(4): 226-246.
- [24] WANG X H, FORSSBERG K. The solution electrochemistry of sulfide-xanthate-cyanide systems in sulfide mineral flotation [J]. *Minerals Engineering*, 1996, 9(5): 527-546.
- [25] MWENA M, MPOYO M. Improvements of cobalt recovery in flotation of cupro-cobaltiferous ore at Gecamines [J]. *Proceedings of Copper Cobalt Nickel and Zinc Recovery*, 2001: 1-9.
- [26] ZIENTEK M L, BLISS J D, BROUGHTON D W, et al. Sediment-Hosted stratabound copper

assessment of the Neoproterozoic Roan Group, Central African Copperbelt, Katanga Basin, Democratic Republic of the Congo and Zambia [J]. U. S. Geological Survey, 2014:178.

[27] 李明. 刚果(金)氧化铜钴矿冶炼工艺综述 [J]. 有色冶金设计与研究, 2012, 33(001): 16-18.

LI Ming. Summary of smelting process of copper cobalt oxide ore in DRC [J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2012, 33(001): 16-18.

[28] 谢添, 廖春发, 吴免利, 等. 刚果(金)绿纱矿浮选铜钴精矿还原熔炼工艺研究 [J]. 中国有色冶金, 2014, 43(2):79-82.

XIE Tian, LIAO Chun-fa, WU Mian-li, et al. Study on reduction smelting process of flotation copper cobalt concentrate in lvsha mine, Democratic Republic of Congo [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2014, 43(2):79-82.

[29] 牛磊, 胡亮. 酸浸法从刚果(金)低品位氧化铜钴矿提取铜钴试验研究 [J]. 湖南有色金属, 2020, 36(06): 29-31+48.

NIU Lei, HU Liang. Experimental study on Extraction of copper and cobalt from low-grade copper cobalt oxide ore in DRC by acid leaching [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2020, 36(06): 29-31+48.

[30] LIAO Rui, WANG Xing-xing, YANG Bao-jun, et al. Catalytic effect of silver-bearing solid waste on chalcopyrite bioleaching: A kinetic study[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(5):1395-1403.

[31] LIAO Rui, YANG Bao-jun, HUANG Xiao-tao, et al. Combined effect of silver ion and pyrite on AMD formation generated by chalcopyrite bio-dissolution[J]. Chemosphere, 2021, 279:130516.

[32] 杨慧沙, 唐国标, 张帆. 某混合铜钴矿选冶工艺方案研究 [J]. 有色冶金设计与研究, 2021, 42(3): 5-9.

YANG Sha-hui, TANG Guo-biao, ZHANG Fan. Study on Beneficiation and smelting process scheme of a mixed copper cobalt ore [J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2021, 42(3): 5-9.

[33] 段景文, 王振堂, 陈普, 等. 刚果(金)某高碳酸盐氧化铜矿酸浸前浮选抛尾试验研究 [J]. 矿冶工程, 2018, 38(04): 69-72,79.

DUAN Jing-wen, WANG Zhen-tang, CHEN Pu, et al. Experimental study on flotation tailing

before acid leaching of a high carbonate oxidized copper mine in the Democratic Republic of Congo [J]. Mining and metallurgy engineering [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018, 38(04): 69-72,79.