

# 刚果民主共和国腾克丰古鲁梅铜钴矿山

李长根

(北京矿冶研究总院, 北京 100044)

**摘要:**刚果民主共和国腾克丰古鲁梅(Tenke Fungurume)铜钴矿山是世界上现有的最大的铜钴矿山,它具有世界上最丰富的铜钴资源。现有的矿石储量可能超过1.19亿t,其中含2.64%铜和0.35%钴。矿山采用常规的露天开采方法。平均每天开采4.65万t物料,其中7000t高品位矿石、7500t低品位矿石和32000t废石。选矿厂日处理矿石7000t,年产11.1万t铜和8545t钴(氢氧化钴)。选矿流程包括磨矿、硫酸浸出和对流倾析、中和、溶剂萃取/电积和钴的回收。矿山和选矿厂基本投资为17.50亿美元,矿石的采矿和选矿总成本为85.10美元/t矿石。

**关键词:**选矿厂; 铜矿; 钴矿; 硫酸浸出; 溶剂萃取/电积; 钴回收

**中图分类号:**TD928 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-6532(2012)01-0064-05

刚果民主共和国腾克丰古鲁梅(Tenke Fungurume)铜钴矿山是世界上现有的最大的铜钴矿山,它具有世界上最丰富的铜钴资源。几个连成一片的矿产地包含有高品位的铜钴矿物资源,现有的矿石储量可能超过1.19亿t,其中含2.64%铜和0.35%钴。这个矿床目前仍处在勘探之中。该铜钴矿山主要参数见表1。

腾克丰古鲁梅矿业公司归以下三家公司所有:Lundiding矿业公司(24%股份)、FCX公司(56%股份)和刚果国家矿业公司(10%股份)。

## 1 位置和交通

腾克丰古鲁梅铜钴矿床位于连续的1437km<sup>2</sup>区域内,距刚果共和国加丹加省省会卢本巴希(Lubumbashi)西北175km(见图1)。矿区位于Kolwezi山区,在Tenke(腾克)和Fungurume(丰克鲁梅)(TF)乡村中间。总共有41个小村庄,人口52000人。Fungurume和Tenke分别是地区的主要交通和商业中心。

刚果共和国国内没有港口,只能利用南非、坦桑尼亚和纳米比亚的港口运输矿产品和所需要的原材料和设备。有权通过赞比亚、波茨瓦纳和津巴布韦到达港口。从卢本巴希到TF矿区有公路相通,但从TF到Likasi之间的道路需要升级。

从Tenke到运输目的地和进出港口的距离分别

表1 腾克丰古鲁梅铜钴矿山主要技术经济指标

项目	参数
服务年限	41a
项目铜总产量	4526Mlbs(205.7万t)
项目钴总产量	579Mlbs(26.3万t)
平均年产量(2009~2018年)	
铜	2.446亿磅/a(11.1万t/a)
钴	0.188亿磅/a(8545t/a)
2009年12月31日止的储量	1.19亿t
矿石铜品位(LOM)	2.64%
矿石钴品位(LOM)	0.35%
年平均矿石开采量(2009~2018年)	260万t/a
矿石铜品位	4.57%
矿石钴品位	0.369%
生产期间剥采比	3.10
预开发期剥采比	2.20
选矿厂	
铜平均回收率	95%
钴回收率(到金属)	83.3%
钴回收率(到Co(OH) <sub>2</sub> )	85%
硫酸消耗量	28.27kgS/t矿石
年酸消耗量	14.4万t/a
总投资	17.50亿美元
采矿和选矿总成本	85.10美元/矿石

为:恩多纳(赞比亚)460km、约翰内斯堡(南非)2560km、达拉斯萨达姆(坦桑尼亚港口)2490km、威

收稿日期:2011-11-22

作者简介:李长根(1941-),男,教授级高级工程师,主要从事矿物加工及资源综合利用研究和设计工作。

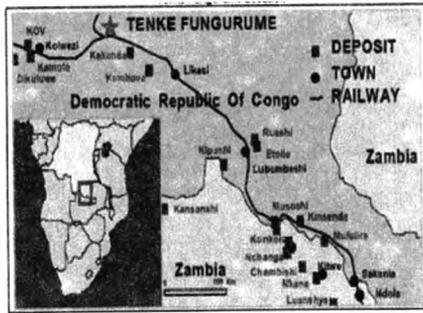


图1 腾克丰古鲁梅铜钴矿山地理位置

尔维斯湾(纳米比亚港口)2955km、理查茨湾(南非港口)3000km和杜班(南非港口)3160km。

## 2 地质和矿化

腾克丰古鲁梅矿床属于沉积型层控矿床,铜矿化产生在特定层位中。上面的矿化层位为SDB(片岩、白云岩和基性白云岩化页岩),中部铜矿化侵入为RSC(片岩、砂化页岩),下部矿化层为RSF(分层状硅质页岩)。上层和下层矿化部分厚度在5~15m之间,中层RSC厚度在20m左右。在RSC中,已知铜矿化主要分布在RAT(含泥质和滑石的岩石)中,最近的钻孔揭露了RSC中可能含有钴矿化。氧化矿石分布在广泛的蚀变岩石中。

在矿床中铜和钴主要以孔雀石、假孔雀石、硅孔雀石和水钴矿存在。白云石和石英是矿石中的主要脉石矿物。白云石和白云岩组成了大部分基岩。基岩风化程度一般与深度有关,随着深度加大,风化强度减弱。在白云石消耗时,产生了水化的氧化铁和二氧化硅。其结果是,白云石被浸出去了,因而,在矿石酸浸过程中,氧化带中存在的脉石耗酸量较低。

## 3 矿床和资源量

在2009年3月的NI43-101报告中,对腾克丰古鲁梅铜钴矿区的Kwatebala、Goma、Fwaulu、Mwadinkomba、Kanasawile、Mambilima和Fungurume七个矿床进行了资源量估算(见表2)。探明的和控制的矿石资源量为3.49亿t,其铜品位为2.40%,钴品位为0.28%。推断的矿石资源量为1.41亿t,其铜品位为2.14%,钴品位为0.22%(见表2)。在该矿区还发现有其他矿床,有的已经进行了初步勘探,确定了资源量。还有一些具有勘探潜力的靶

区,具有增加资源量的空间。

表2 腾克丰古鲁梅铜钴矿区探明和控制的资源量

矿床名称	探明和控制的资源量			推断的资源量		
	Mt	TCu/%	TCo/%	Mt	TCu/%	TCo/%
Kwatebala	102.23	1.994	0.364	12.51	1.567	0.348
Tenke	77.82	2.234	0.286	44.43	1.754	0.259
Fwaulu	19.15	2.939	1.160	21.11	2.025	0.184
Mwadinkomba	26.50	3.263	0.144	8.96	2.870	0.119
Kanasawile	22.48	2.767	0.155	19.80	2.301	0.180
Mambilima	42.76	2.510	0.169	27.93	2.346	0.152
Fungurume	58.18	4.350	0.369	6.15	4.058	0.303
总计	349.12	2.700	0.280	140.89	2.144	0.216

对七个矿床中Kwatebala、Kwatebala、Tenke、Fwaulu、Mwadinkomba和Kanasawile六个矿床进行了可行性研究,根据可行性研究结果计算出的证实和概略的矿石储量为1.19亿t,其铜品位为2.64%,钴品位为0.35%。

## 4 采 矿

矿山规划年产11.5万t铜,年产8545t钴。矿山露天开采高品位矿石19a,处理早期贮存的低品位矿石22a,矿山总共服务年限为41a。

矿山采用常规的露天开采方法。废石采用6.3m<sup>3</sup>轮式装载机和45t卡车开采,开采台阶高度为5m。采用钻孔和爆破法开采废石。用连续露天开采机破碎深度为0.625m矿层中的矿石。用轮式装载机将破碎的矿石装载到45t卡车中。平均每天开采4.65万t物料,其中7000t高品位矿石、7500t低品位矿石和32000t废石。根据长期铜价1.05美元/磅铜和12.00美元/磅钴,圈定了开采区域,估算了矿床的矿石储量。

先期采矿主要集中在以下三个矿床:Kwatemala、Fwaulu和Goma。2008~2016年开采Kwatebala矿床,2017~2020年开采Goma矿床,2021~2022年Fwaulu矿床提供矿石,2027年末所有的矿床提供不同量的矿石。高边界品位产生了一定量的低品位堆存矿石,等矿山服务年限结束后再处理。

由于矿床矿层薄,所以选择性开采是很重要的。为了降低矿石的贫化率和矿石损失量,应用露天开采矿机对薄矿层(0.6m)进行开采。

露天采矿机是安装在轨道上的带有大的旋转滚筒和合金钢刀片的采矿机械,它可在现场破碎大块

矿石。由于不需要打炮眼、爆破和矿石粗碎,所以可以大幅度降低设备投资和操作费用。矿石破碎到 -150mm 后,用前端装载机装到 25t 载重车中,高品位矿石运到选矿厂原矿堆场中,低品位矿石运到选矿厂西北部的废石场中。主要采矿设备见表 3。

表 3 主要采矿设备

设备名称	台数	设备名称	台数
45t 载重汽车	33	钻机	2
履带式推土机	4	自行式推土机	1
6.3m <sup>3</sup> 装载机	8	平地机	2
露天采矿机	2	洒水车	2

## 5 选 矿

选矿厂日处理 Keatebala 矿床矿石 7000t, 年产 11.1 万 t 铜和 8545t 钴(氢氧化钴)。根据地形在靠近 Kwatebala 和 Goma 矿床的地附近选择了选矿厂的厂址。选矿厂位于 Fungurume 西部 16km、Tenke 东北 8km 处。

腾克丰古鲁梅选矿厂主要车间分布见图 2。



图 2 腾克丰古鲁梅选矿厂主要车间分布图

选矿流程包括磨矿、硫酸浸出、对流倾析、中和、溶剂萃取、电积以及钴的回收。选矿厂工艺流程见图 3。

原矿由载重卡车运到原矿堆垫上。用前端装载机对矿石进行混矿,然后给人原矿仓中。用格条筛脱除过大矿块。矿石运到一段与一组直径为 660mm 的旋流器组成闭路的 6.1m x 6.1m 半自磨机中。旋流器溢流细度为 80% -0.074mm。

细磨的矿浆浓缩后,泵到 5 个串联的浸出桶的第一个桶中,与二氧化硫、硫酸和萃余液混合,以便对给矿浸出。浸出过的矿浆经浓缩后,固体浓度为 20% 的浓密机的溢流泵到高品位 (HG) 富浸出液池

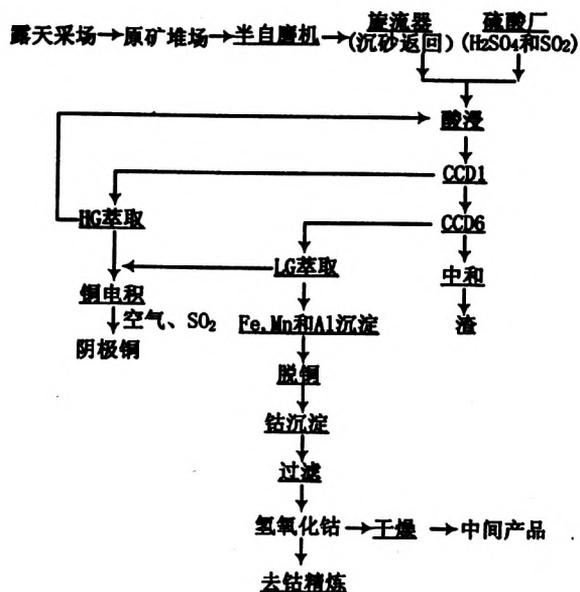


图 3 选矿工艺流程

(PLS)中,其中铜含量为 14g/L。在浸出作业中,铜和钴的浸出率分别为 95% 和 85% 以上。

浓密机底流由泵打到对流倾析 (CCD) 回路中,以便从浸出过的固体中回收可溶的铜和钴。CCD1 的溢流 (含 6g/L) 澄清后给到低品位 (LG) 池 (PLS) 中。从 CCD6 排出的清洗过的固体泵到中和回路中 (见图 4)。



图 4 选矿厂半自磨车间和浸出及对流倾析浓密车间

用熟石灰中和 CCD6 的溢流、多余的 CCD 洗液、铁渣浆和钴精炼排出的废液。添加熟石灰至 pH 10.5,以沉淀镁。最后将中和过的固体浓度为 46% 的矿浆泵到有衬里的尾矿库中。

铜的溶剂萃取由四段萃取和两段反萃取组成。采用 Cognis LIX984N 萃取剂和 Chevron/Phillips SX-80 稀释剂进行萃取。HG 和 LG 萃取各由两段萃取组成,二段萃取得到的有机液流合并经两段反萃

取处理。用有机溶剂作为萃取剂从 PLS 中萃取铜，萃取剂的浓度为 30% (v/v)。从有机相中反萃出铜，得到浓度为 55g/L Cu 的强电解液。

铜反萃得到的强电解液经过滤，除去混入的有机溶液，然后电积得到阴极铜。剥离出阴极铜，然后清洗、称重和打包。不锈钢阳极片返回电积作业中再用(见图 5)。

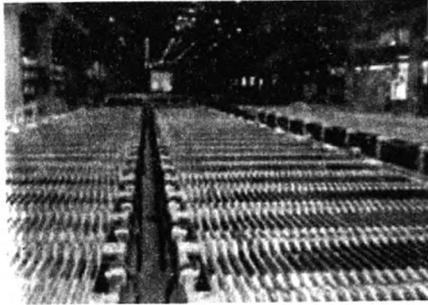


图 5 铜电积车间

含有 1.6g/L Cu、7g/L Co 和 19g/L  $H_2SO_4$  的 HG 萃余液返回到浸出回路中，以降低新鲜酸的消耗量和达到所有求的矿浆浓度。

钴的回收包括除杂、钴的沉淀和钴精炼三个单独的回路，钴精炼工艺流程见图 6。

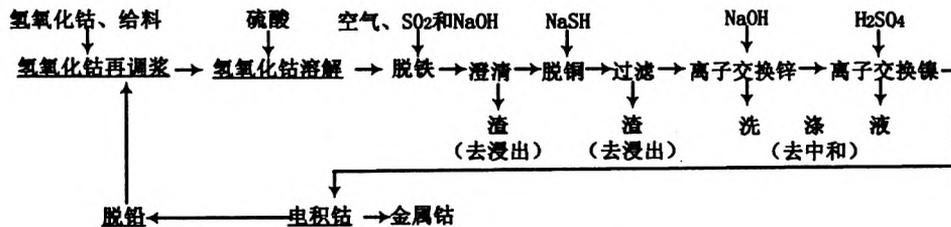


图 6 钴精炼工艺流程

(2) 脱铜: 添加硫化钠, 从溶液中沉淀微量的铜。溶液过滤, 将过滤出的固体返回到浸出回路中, 以回收其中的钴。

(3) 钴的电积: 将脱除了 Zn/Cu/Ni 的强电解液通过 62 个电积槽, 应用阳极包工艺, 电积的电流密度为 350A/m<sup>2</sup>, 用碳酸镉脱除铅。用树脂将 50% 阴极表面遮住, 以形成直径为 25mm, 厚度为 6mm 的阴极钴圆片。电积后从电积槽中拿出阴极, 再用热的去离子水清洗, 用手工剥离出阴极母板。高纯度金属钴打包、取样、称重和装载。

## 5 辅助设施

用石灰石中和含有 0.44g/L Cu、3.5g/L Co 和 11.3g/L  $H_2SO_4$  的多余的 HG 和 LG 溶液至 pH3.5。在氧化条件下, 喷入  $SO_2$  和空气, 以沉淀其中的铁、铝和镁。将石灰石添加到每个搅拌槽中, 以控制 pH 值。矿浆经浓缩和过滤, 以回收含钴的溶液。将主要含有石膏、氢氧化铁和氢氧化镁的滤饼分离出去, 再泵到中和回路中。

将熟石灰添加到由 Fe/Al/Mg 脱除回路排出的溶液中, 至 pH5.8, 以沉淀出铜。将二氧化硫和空气喷入到搅拌槽中, 以促使剩余的镁沉淀。矿浆浓缩, 固体返回到浸出回路中, 以回收沉淀出的铜。

将氢氧化镁添加到由铜沉淀回路排出的溶液中, 以产生氢氧化钴。应用二段沉淀工艺, 以提高氢氧化钴的纯度和降低氧化镁的耗量。浓缩后将沉淀的氢氧化钴过滤出来, 要么给到钴精炼作业, 要么给到闪速干燥炉中干燥, 然后装包外运。脱除钴的溶液主要用作 CCD 的清洗液, 多余的给到中和回路。

矿山中的钴精炼回路由以下作业组成:

(1) 氢氧化钴溶解: 用硫酸溶解氢氧化钴回路中的氢氧化钴滤饼, 以便将钴溶解到溶液中。将碳酸钠和空气/二氧化硫混合物添加到浆液中, 以沉淀可溶的铁。溶液澄清。

通过架空高压线从 Fungurume 变电所向选矿厂供给电力, 并向选矿厂周围供给 11kV、15kV、33kV、220V、380V 和 690V 电力, 还可向永久营地供应民用电。

Kwatebala 周围 3 个分隔开的水井持续向矿山和选矿厂供水。选矿厂尾矿库表面水、从废石堆场收集的水和选矿厂的回水供给选矿用水。由位于 Fungurume 的单独的水井, 并通过管路向 Fungurume 北部乡村供给饮用水。

废料管理包括尾矿废石、家庭垃圾、工业废料和有毒废料的堆存设施。所有的有毒废料都运出矿山。废料的管理目的是:

(1)减少、回收和再利用废料,以及在矿山内部对废料进行处理。

(2)将产生的废料安全贮存。使废料贮存对环境影响最小。

用不透水的内衬材料对尾矿设施进行衬里,并使所有的尾矿水返回选矿厂再用。收集废石堆场和低品位矿石堆场排水和选矿的排水,以便选矿厂再用。

对固体废料分类,根据它们的特点贮存起来,以便作为清洁的垃圾填埋起来、作混合肥料和分出有毒的废料。

应用综合的监控程序,跟踪废料的体积和种类,评价表面水和地下水条件的变化。

由于矿区附近没有硫酸厂,外购硫酸运输距离远,所以矿石酸浸和钴净化作业所用的硫酸和二氧化硫是在现场通过熔化和燃烧硫磺来制取。硫酸厂硫消耗量为 8 万 t。硫酸厂的生产能力为 24 万 t/a。

## 6 经济数据

根据该项目 2009 年 NI43-101 技术报告,原矿处理量为 7000t 的矿山和选矿厂基本投资为 17.50 亿美元(见表 4)。

2010 年矿山生产成本见表 5。矿石的采矿和选矿的成本为 85.10 美元/t 矿石。

### 参考文献:

[1] GRDMinproc. Tenke Fugurume Corp Tenke Fugurume Feasibility Study, Technical Report, April 2007.

表 4 腾克丰古鲁梅铜钴矿山和选矿厂基本投资

项目	数值/百万美元
选矿厂和基础设施	920
税收、关税和其它	71
第一批设备和备用零件	22
采矿和预生产运行	266
业主间接费和风险金	471
总计	1750

表 5 腾克丰古鲁梅铜钴矿山和选矿厂生产成本

项目	生产成本/美元·t <sup>-1</sup> 矿石
采矿	13.00
选矿	41.70
管理	16.20
运输	14.20
总计	85.10

[2] GRDMinproc. Tenke Fugurume Corp Tenke Fugurume Feasibility Study, Technical Report, April 2006.

[3] Lundin Mining Corporation. Technical Report for the tenke fungurume project, katanga province, democratic republic of congo, March 31, 2009.

[4] SRK. 刚果民主共和国 Tenke Fungurume 铜钴矿项目初步评估报告, Oct. 2009.

[5] www. lundinmining. com/i/pdf/summary-report-tenke-fugurume.

[6] www. lundinmining. com/s/ tenkefugurume. asp.

[7] www. fcx. com/operations/tenke/factfacts/tenke-fast-facts. english.

## The DRC Tenke Fugurume Copper and Cobalt Mine

LI Chang-gen

(Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing, China)

**Abstract:** The DRC Tenke Fugurume Copper-Cobalt Miner is the world's most present copper and cobalt mine. It is believed to hold one of the richest and extensive high grade copper and resources. The ore reserves approximate 119 million tons at average ore grades of 2.64% copper and 0.35% cobalt. The ores are mined with typical open pit mining method. The average daily mining rate will be 46,500 tpd over the mine life. Ore deliveries to the high-grade stockpiles will be 7,000 tpd, low-grade ore production will average 7,500 tpd and waste production will average 32,000 tpd. 7000 t/d ores are delivered to the process plant. 111000 t/a are produced of copper cathode. 8545t/a contained in a hydroxide are produced as the commercial production target. The ore processing flowsheet consists of semi autogenous grinding, sulphuric acid leaching, counter current decantation, neutralization, solvent extraction/electrowinning and cobalt recovery. The capital cost of mining and processing plant is 1750 million US \$. The operation cost of mining and processing is 81.50 US/t ore.

**Key words:** Ore processing plant; Copper ore; Cobalt ore; Sulphuric acid leaching; Solvent extraction/electrowinning; Cobalt recovery