

选矿与矿物加工

文章编号: 1004-4051(2025)10-0226-08

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20240569

刚果(金)马诺诺含锂尾矿特征及 锂资源回收评价

盛涛¹, 王武名^{1,2}, 代定¹, 雷志兰³, 李志军¹, 孙聚利¹

(1. 浙江华友钴业股份有限公司, 浙江桐乡 314500;

2. 中色地科矿产勘查股份有限公司, 北京 100012;

3. 湖南有色金属研究院有限责任公司, 湖南长沙 410100)

摘要: 刚果(金)马诺诺地区锂、锡、铌钽资源丰富, 过去开发仅针对其中的锡和铌钽矿物进行重选, 含锂矿物则随尾矿排放堆存。为了评价尾矿中锂资源回收的可行性, 对K堆和Gc堆尾矿开展工艺矿物学研究、“浮-磁”选矿试验及经济评价。K堆和Gc堆由新鲜伟晶岩碎屑成分组成, 可利用的矿石量 6.9×10^6 t, Li_2O 品位 0.79%。矿石粒度分析表明, K堆矿石粒度 $P_{80}=1.194$ mm(尾粗砂), Gc堆矿石粒度 $P_{80}=9.58$ mm(砾性尾矿)。矿样中的可回收含锂矿物为中粗粒嵌布的锂辉石, 含量为 10.23%, 铌钽铁矿和锡石以中细粒嵌布为主, 脉石矿物为白云母、石英、钠长石、微斜长石等。锂辉石选矿试验表明, 原矿 Li_2O 品位为 0.86%, 磨矿至 -0.075 mm 75% 的条件下, 经“一粗二扫三精”闭路浮选和精矿磁选流程, 可获得 Li_2O 品位为 6.03% 的化工级-1 锂辉石精矿, 回收率为 70.47%。经济性分析表明, 含锂尾矿开发项目可达到的税后内部收益率为 20.31%, 投资回收年限为 3.91 a。含锂尾矿地质特征分析、锂资源回收试验和综合评价, 可为该尾矿资源的开发利用提供技术依据和经济参考。

关键词: 锂辉石; 尾矿; 工艺矿物学; 浮选; 刚果(金)

中图分类号: TD95; TD98 **文献标识码:** A

Characteristics of lithium tailings and evaluation of lithium resource recovery in Manono, DRC

SHENG Tao¹, WANG Wuming^{1,2}, DAI Ding¹, LEI Zhilan³, LI Zhijun¹, SUN Juli¹

(1. Zhejiang Huayou Cobalt Co., Ltd., Tongxiang 314500, China;

2. SINOTECH Minerals Exploration Co., Ltd., Beijing 100012, China;

3. Hunan Research Institute of Nonferrous Metals Co., Ltd., Changsha 410100, China)

Abstract: The lithium, tin, niobium and tantalum resources are abundant in Manono, Democratic Republic of Congo (DRC). During the historical mining activities, the tin, niobium and tantalum minerals are recovered from the chute flowsheet, and the lithium-containing is discharged and stored within the tailings. In order to evaluate the lithium extraction potential from the tailings, the process of mineralogy study and closed-circuit flotation and demagnetization test are carried out on the samples

收稿日期: 2024-04-13 责任编辑: 刘硕

第一作者简介: 盛涛(1988—), 男, 汉族, 山东青岛人, 硕士, 工程师, 主要从事矿产勘查及评价工作, E-mail: 574313502@qq.com。

通讯作者简介: 王武名(1977—), 男, 江西广昌人, 博士, 高级工程师, 澳大利亚采矿与冶金学会会员(MAusIMM), 主要从事矿产勘查及矿业咨询工作, E-mail: 58637154@qq.com。

引用格式: 盛涛, 王武名, 代定, 等. 刚果(金)马诺诺含锂尾矿特征及锂资源回收评价[J]. 中国矿业, 2025, 34(10): 226-233.

SHENG Tao, WANG Wuming, DAI Ding, et al. Characteristics of lithium tailings and evaluation of lithium resource recovery in Manono, DRC[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(10): 226-233.

from the K and Gc tailings dumps. The K and Gc tailings dumps are composed of fresh pegmatites clastics, and the available mineral resource is 6.9 million tons with Li_2O grade at 0.79%. With the process of mineralogy analysis, the K dump and G dump granulometry distribution $P_{80}=1.194$ mm (coarse tailings) and 9.58 mm (gravely tailings) respectively. The lithium-containing mineral in the tailing is spodumene with main distribution in medium to coarse grain, the mineral content is 10.32%; the coltan and cassiterite are with fine to medium grain distribution; the other gangue minerals are muscovite, quartz, albite, microcline, etc. The feed ore Li_2O grade at 0.86% is ground to -0.074 mm accounting for 75% and processed by closed-circuit flotation test and demagnetization that is “rougher flotation concentrate is processed third times by cleaner flotation circuit and the rougher tailing is processed in scavenger flotation, the final cleaner concentrate is demagnetized”, and the lithium recovery is 70.47% with the concentrate Li_2O grade at 6.03% classed as the chemical grade. The preliminary economic analysis results show the after-tax IRR is 20.31% and the investment recovery period is 3.91 years. The evaluation work of the Manono lithium containing tailing dumps such as the geological features assessment, process mineralogy and flotation test could be technical guidance for the tailings deposits development.

Keywords: spodumene; tailing; process mineralogy; flotation; Democratic Republic of Congo

0 引言

锂(Li)是自然界中最轻的金属元素,自 1855 年首次分离出可供使用的锂金属,其广泛应用于陶瓷、玻璃、润滑剂及核聚变等领域。随着新能源汽车和储能材料等行业的发展,对于锂资源的需求更为强烈;同时,锂也被美国、欧盟、中国等国家(组织)列为“关键矿产”或“战略性矿产”^[1-2]。尽管在过去几年,锂的产量有较大的提升,但在新能源行业的持续推动下,锂作为“新能源矿产”和“关键矿产”仍将是世界矿产勘查和开发的热点^[3-4]。

LCT 型伟晶岩具有较高的锂含量,主要含锂工业矿物为锂辉石、透锂长石和锂云母^[5-6],也是伟晶岩型(硬岩型)锡、钽铌矿床的重要共(伴)生矿物^[7-9]。在较长的历史时期内,由于市场需求因素,LCT 型伟晶岩矿床多以开采其中的锡、钽铌等稀有金属元素(矿物)为主,而锂辉石等含锂矿物常因经济因素而被作为尾矿处理^[10]。尾矿矿床又称技术成因(technogenic)矿床或人为成因(anthropogenic)矿床,由矿石经加工处理后堆储而成^[11]。尾矿开发相较于硬岩矿开发有两个方面优势^[12]:一是由于尾矿已呈堆存状态,不需预剥离及爆破作业,采矿成本低,矿石回采率高;二是尾矿已经过碎/磨作业,加工成本显著降低。

目前,对于伟晶岩型含锂尾矿的研究,多集中于环境影响和建材应用方面^[10,13],对于含锂尾矿中锂资源的开发关注较少。在市场对于锂资源的需求持续旺盛的情况下,含锂尾矿成为锂资源的潜在来源之一^[10,12]。对含锂尾矿的再次处理和使用,有利于扩大锂矿资源的供应途径,同时也有利于矿产资源综合利用水平和采矿业循环经济的发展提高^[14]。

刚果(金)马诺诺(Manono)尾矿矿床是经过重选

加工后堆存,其硬岩矿原有的矿体结构和特征已经完全被破坏,由于含锂矿物并非是历史生产过程中的目标矿物,因此,对于尾矿堆中的锂资源赋存情况未进行详细的记录,也就难以对尾矿矿床中锂资源的开发潜力较做出全面评价。本文对马诺诺尾矿资源开展硬岩矿床相关地质特征总结、尾矿堆系统采样、工艺矿物学研究、选矿试验和经济性测算等工作,分析尾矿中锂资源回收前景,为尾矿型锂矿资源的评价和开发提供参考。

1 硬岩矿床概况

马诺诺 LCT 伟晶岩位于刚果(金)基巴拉带锂锡成矿区域($27^{\circ}23'45''\text{E}$, $7^{\circ}19'05''\text{S}$),伟晶岩走向向北东 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$,倾向南东,倾角 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$,主要沿着构造面侵入片岩、辉长岩,接触面的走向总体上和区域构造的产状相同。矿床以 Lukushi 水库为界,分为北部的 Manono 区域和南部的 Kitotolo 区域(图 1)。马诺诺伟晶岩矿床在 1919—1980 年间作为锡矿开发,主要对上部伟晶岩矿体进行开采并溜槽重选锡石和钽铌铁矿,历史总计处理矿石体积约为 $100\times 10^6\text{ m}^3$,生产锡石精矿 $140\times 10^3\text{ t}$,钽铌铁矿精矿 $4.5\times 10^3\text{ t}$,含锂矿物未回收^[15-16],尾矿沿采坑就近堆放保存至今。

根据 AVZ 公司披露,马诺诺伟晶岩型锂矿床目前探获的保有矿石量达 $842\times 10^6\text{ t}$, Li_2O 平均品位 1.61%,是目前世界最大硬岩锂矿^[17]。马诺诺 LCT 伟晶岩主体为锂辉石伟晶岩并具有一定的横向分带特征^[15],由外到内分为:外带(细晶花岗岩带),壁带(白云母长石石英带),中间带(石英钠长石带、锂辉石带),核部带(石英内核)。锂辉石带是含矿伟晶岩的主要组成部分,真厚度 $50\sim 300\text{ m}$,由石英、锂辉石、钠长石、白云母等组成,含钽铌铁矿和锡石,矿物颗

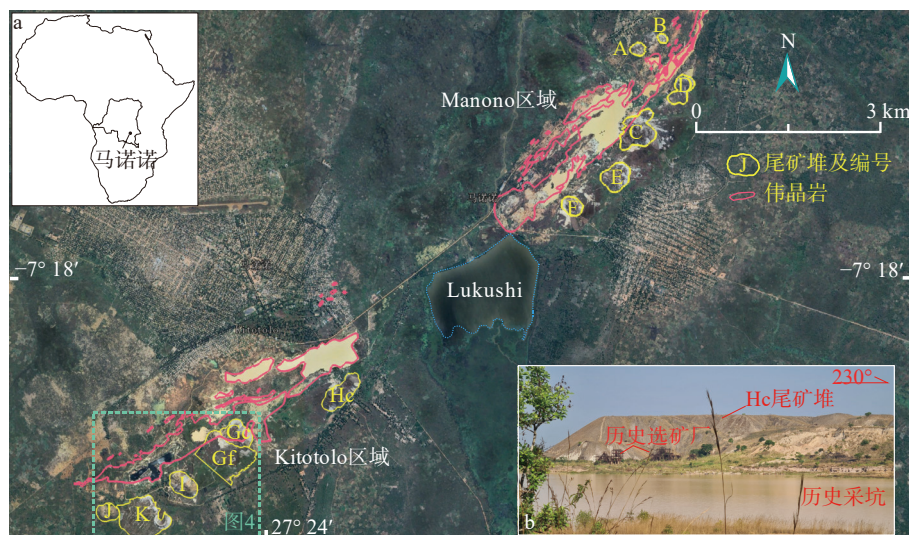


图1 马诺诺矿区尾矿分布图

Fig. 1 Tailing dumps distribution of Manono total area

粒以粗粒为主。伟晶岩中的主要含锂矿物为锂辉石, 其含量 10%~30%(图 2), 部分样品可达 50%。锂辉石伟晶岩可细分为巨锂辉石伟晶岩、钠长石锂辉石伟晶岩和石英锂辉石伟晶岩三类; 伟晶岩体受后期钠长石化和云英岩化蚀变明显。浅部伟晶岩矿体中的锂辉石在浅表湿热的氧化环境中, 锂辉石腐化成为绢云母、黏土矿物等造成 Li 元素流失^[15], 锡石则相对稳定, 结合马诺诺伟晶岩中 Li、Sn 元素垂向分带(图 3)分析, 浅部风化(<24 m)的锂辉石伟晶岩中 Li 元素已经流失, 相应的来源于浅部矿体的尾矿, 其中的锂资源经济价值(潜力)较低, 该部分尾矿在勘查开发过程中应处于次要地位。

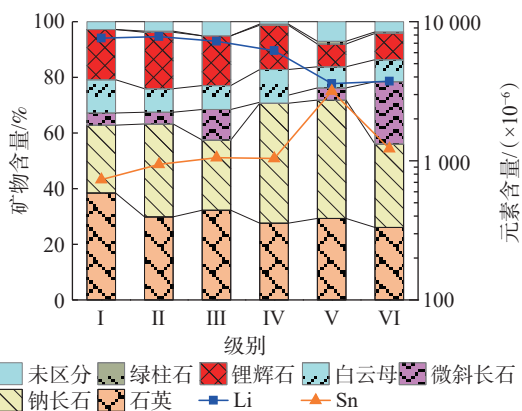


图2 马诺诺锂辉石伟晶岩矿物特征

Fig. 2 Mineral characteristics of Manono spodumene pegmatite

2 尾矿矿床特征

矿区内总计有 11 座尾矿堆, 马诺诺区域的尾矿堆分布在采坑两侧, 分别为 A、B、C、D、E、F; Kitotolo 区域的尾矿堆分布在采坑东南侧, 分别为 G、H、I、J、K; 对于不同的尾矿堆, 根据其粒度不同又分为粗粒

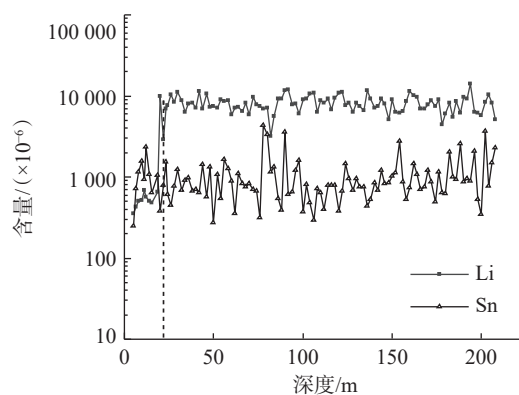


图3 马诺诺伟晶岩 Li-Sn 元素含量变化特征

Fig. 3 Li-Sn element content variation characteristics of Manono pegmatite

(资料来源: 文献[18])

(c)和细粒(f)(图 1 和图 4)。尾矿堆按原岩(层)成分主要分为伟晶岩、风化伟晶岩和(浅表)风化层物质组成。伟晶岩成分尾矿堆多呈灰白色, 主要由伟晶

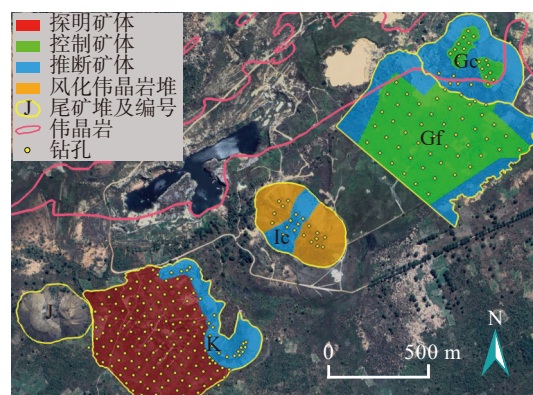


图4 Kitotolo 区域尾矿堆分布

Fig. 4 Tailing dumps distribution in Kitotolo Area

岩组分的矿物/岩石颗粒组成, 常见新鲜锂辉石颗粒, Li 含量较高。风化伟晶岩和风化层组成的尾矿堆多呈土黄色, 根据风化程度不同, 多呈沙土状, 新鲜锂辉石较少, Li 含量较低, 该类型矿堆的原岩应为浅部的风化硬岩矿。

2.1 地质特征

Kitotolo 区域 K 堆和 Gc 堆品位较高, 主要由较为新鲜的伟晶岩碎屑组成, 是该区域目前探获尾矿资源量的主体(表 1)。K 堆按相对高度分为下部矿堆和上部矿堆(图 4 和图 5), 其中, 前者较为平坦分布范围为 670 m×500 m, 中心深度达 15~17 m, 边缘

表 1 Kitotolo 区域尾矿资源量

Table 1 Mineral resource of Manono tailing dumps of Kitotolo Area

编号	控制程度	矿石量/ (×10 ⁶ t)	Li ₂ O 品位/%	Sn 品位/ (×10 ⁻⁶)	Ta 品位/ (×10 ⁻⁶)
Gc	控制	0.29	0.78	579	30
	推断	0.51	0.84	554	29
K	探明	3.77	0.86	305	25
	推断	2.33	0.67	652	35

资料来源: 文献 [16]。

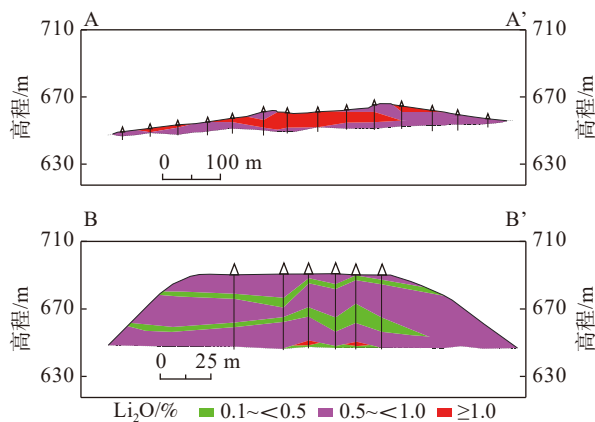
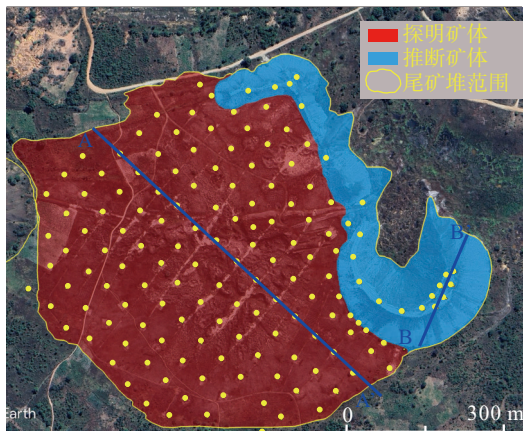


图 5 K 堆矿体地质图

Fig. 5 Geological map of K dump

(资料来源: 文献 [16])

变薄至 2~3 m, 钻孔均匀分布, 钻探工程控制间距为 40 m×40 m, 控制程度较高; 后者位于矿床东北部, 最大高度为 45 m, 限于该部分尾矿堆形态原因, 钻孔仅能沿矿堆的脊部分布, 控制程度较低。G 堆根据粒度粗细分为粗粒 Gc 堆和细粒 Gf 堆, 其中, 前者高度较高, 钻孔仅能沿矿堆脊部排布; 后者较为平坦, 钻孔均匀分布(图 4)。I(Ic)堆由粗粒物质组成, 其中的伟晶岩碎屑尾矿主要堆放在矿堆中部, 风化伟晶岩成分堆放在矿堆两侧(图 4)。在实际评价过程中, 由于 Gf 堆和 Ic 堆的品位较低, 本次工作暂不对 Gf 堆和 Ic 堆进行评价。

目前尾矿堆处于休止状态, 但由于其结构相对松散, 钻机不能在斜坡形成稳定施工平台, 因此, 仅能在较为平坦的位置或相对稳固的矿堆脊部进行钻探(图 4)。尽管尾矿矿体勘查工程的基本工程间距为 80 m×80 m, 但是在 K 堆和 Gc 堆表面系统采样后表明, K 堆和 Gc 堆地表采样的 Li₂O 含量在 0.5%~1.0%, 部分 >1.0%, 矿物成分为新鲜伟晶岩碎屑, 与钻探成果能够较好的匹配(图 5)。因此, 在本次尾矿综合评价过程中, 对于 K 堆和 Gc 堆各级别资源量利用系数均为 1。

2.2 矿石粒度特征

地表采样时使用挖掘机或人工清除采样点表面的低固结层(厚度 1~1.5 m), 而后将直(内)径 0.5 m、长度 1 m 的钢桶在尾矿堆中的按网度在不同位置敲入尾矿中, 进行取样、烘干和密度测定。原矿样品呈灰白色, 样品已破碎, G 堆相对 K 堆较粗, 存在有部分颗粒较大的矿石(图 6), 通过插值法计算 K 堆矿石粒度 $P_{80}=1.194$ mm(尾粗砂), Gc 堆矿石粒度 $P_{80}=9.58$ mm(砾性尾矿)。实测 K 堆和 Gc 堆平均堆密度分别为 1.62 g/cm³ 和 1.60 g/cm³。

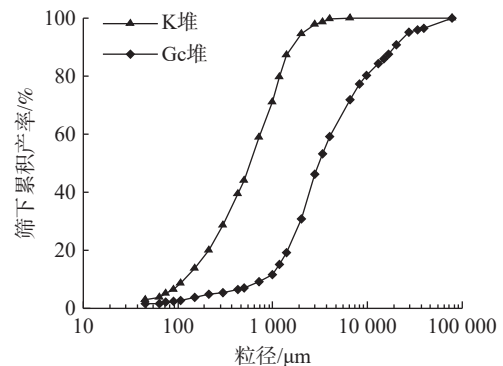


图 6 原矿样粒度分布曲线

Fig. 6 Granulometry distribution curves of feed ores

2.3 矿物粒度分布

对 K 堆样品中的锂辉石、云母类、铌钽铁矿和

锡石粒度进行统计,结果如图7所示。结合K堆矿石显微照片及背散射图像(图8)分析可知,锂辉石和云母类矿物以中粗粒嵌布为主;铌钽铁矿和锡石以中细粒嵌布为主。由于尾矿样品经过破碎,少部分样品已粉碎,因此,推测原硬岩矿石中的主要矿物粒径可能会比统计数据偏大。

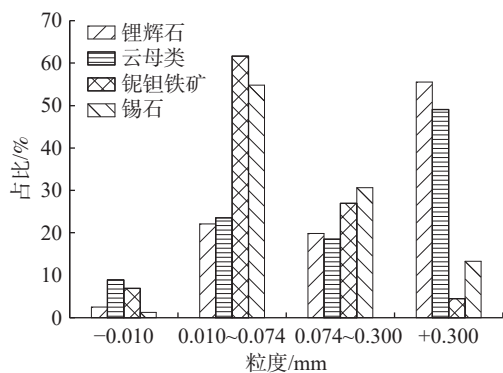


图7 K堆主要矿物的嵌布粒度分布

Fig. 7 Particle size distribution of the ore mineral from K dump

2.4 矿石矿物组成

经偏光显微镜、扫描电镜下观测鉴定,结合X-衍射分析(XRD)和MLA矿物定量检测等多种手段的研究,查明矿石中的含锂矿物为锂辉石和锂云母(微量);金属矿物为磁铁矿、锡石及铌钽铁矿;脉石矿物以白云母、石英、钠长石、微斜长石为主(表2)。结合图8可知,锂辉石多为灰白色、浅紫色、浅绿色等,呈短柱状或板状,解理发育,常与长石、石英、云母连生,部分粒径较大的晶粒内部常包裹有细粒石英、长石或云母。矿样中铌钽铁矿经扫描电镜能谱微区分析,主要为铌锰矿、铌铁矿、钽铁矿,自形晶,呈柱状、针状及粒状产出,粒度细小,常被石英、长石等包裹。锡石多呈双锥状、锥柱状等产出,常见锡石呈细小颗粒状被云母或石英包裹。

2.5 化学成分特征

原矿多元素化学成分见表3。由表3可知,矿石

中可供选矿回收的主要元素是Li,伴生(残留)有Sn、Ta(Nb)。多元素分析表明,需要通过选矿排除的主要化学组分是SiO₂、Al₂O₃、K₂O和Na₂O等,这些组分构成的脉石矿物主要是石英、长石类和云母类矿物。

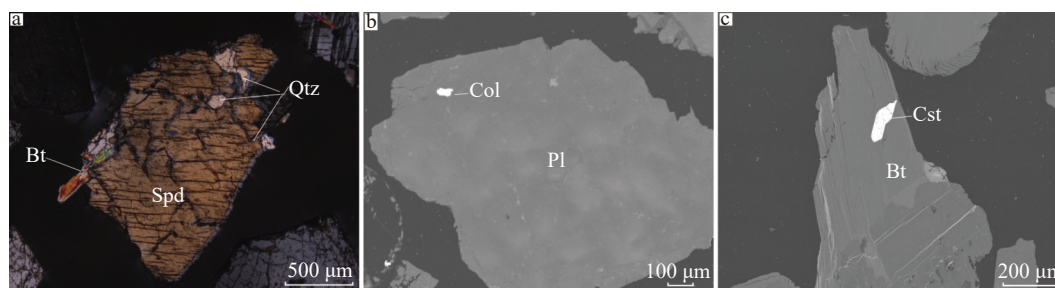
3 选矿试验

结合表2和表3可知,锂主要分布在锂辉石中,因此,需要选矿回收的含锂目标矿物为锂辉石。锂辉石型锂矿的工业选矿方法主要有重介质选矿(DMS)和浮选法,磁法多用作脱除样品中的含铁杂质及其他磁性矿物^[9]。

本文采用“浮-磁”工艺进行选矿试验。样品磨至-0.074 mm 粒级占比75%,经“一粗二扫三精”浮选闭路流程和浮选精矿一次磁选流程(图9),获得Li₂O含量6.03%的化工级-1产品锂辉石精矿和磁性产品(表4和表5)。通过镜下观察,由于部分细粒锂辉石与铁磁性矿物团聚,夹杂进入磁性产品,造成磁性产品中锂含量较高。

4 经济性评价

根据选矿试验结果,拟以K堆和Gc堆为首期开发目标进行可行性评价。K堆+Gc堆总计矿石量为6.90×10⁶ t, Li₂O平均品位为0.79%,碳酸锂当量(LCE)为13.46万t,矿石回采率99%,无贫化;设计选矿厂年处理矿石量1.0×10⁶ t,按品位先高后低的顺序进行矿石处理;选矿流程为“浮-磁”工艺流程,产品为Li₂O含量为6%的化工级锂辉石精矿(SC6),选矿指标以K堆数据为主要依据(表4)。考虑长期市场供需关系,精矿(SC6)出厂价格按900美元/t;类比刚果(金)某类似浮选厂的建设实际情况,设定本次建设投资为6580万美元,建设达产周期为1a;经测算直接运营成本为41.25美元/t矿,其中,采矿(含矿区运输)费用为5.5美元/t矿,药剂、辅料和设备维护费13.72美元/t矿,发电成本19.2美元/t矿,人力成本2.83美元/t矿;间接运营成本为7.12美元/t矿,其中,



a-锂辉石(Spd)与云母(Bt)和石英(Qtz)连生,部分细小石英呈包体产出(正交偏光);b-铌钽铁矿(Col)被长石包裹(BSE);c-锡石(Cst)被云母包裹(BSE)。

图8 K堆矿石显微照片及背散射图像

Fig. 8 Micrographs and back-scattered electron images of ore sample from K dump

表 2 原矿主要矿物组成及含量

Table 2 Mineral composition of feed ore

单位: %		单位: %	
矿物	含量	矿物	含量
石英	34.97	磷灰石	0.20
钠长石	27.87	绿柱石	0.16
钾长石	13.35	褐铁矿	0.17
锂辉石	10.23	磁铁矿	0.42
白云母	8.79	锡石	0.07
绿泥石	0.91	黑电气石	0.06
高岭石	0.68	硅铍石	0.04
锂云母	0.65	铌钽铁矿	0.02
黑云母	0.59	其他	0.57
中长石	0.26	合计	100.00

表 3 原矿多元素化学成分

Table 3 Multi-elements chemical analysis of feed ore

单位: %												
元素	Li ₂ O	Sn	Ta	Nb	Fe	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
含量	0.86	0.04	26.2	35.3	0.59	0.02	71.07	13.22	0.17	0.09	3.05	3.62

注: Nb、Ta 含量单位为 10×10⁻⁶。

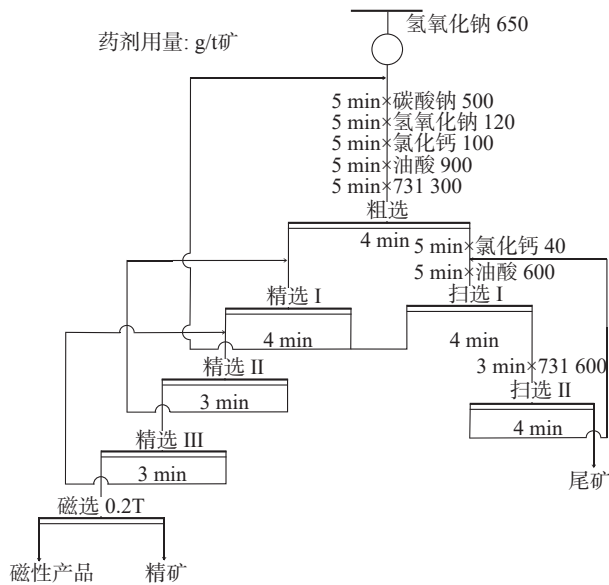


图 9 锂辉石闭路试验流程

Fig. 9 Flow of closed-circuit test of spodumene

表 4 锂辉石浮选闭路试验结果

Table 4 Flotation results of closed-circuit test of spodumene

单位: %			
名称	产率	Li ₂ O	回收率
磁性产品	1.99	4.51	10.44
锂精矿	10.05	6.03	70.47
尾矿	87.96	0.19	19.43
合计	100.00	0.86	100.00

表 5 精矿分析结果

Table 5 Analysis results of the concentrates

单位: %						
元素	Li ₂ O	Na ₂ O+K ₂ O	MgO	MnO	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃
含量	6.03	1.51	0.08	0.12	0.31	0.85

保险、管理费用及社区发展基金为 4.07 美元/t 矿,非直接人力成本 3.05 美元/t 矿;税金和所得税分别为 3.5% 和 30%;固定资产按直线法折旧,折旧年限按 7 a 计(不计残值)。分析项目现金流量情况表明(表 6),在折现率为 10% 的条件下,项目总共投资 6 580 万美元,税后净现值(NPV)为 4 648 万美元,税后内部收益率(IRR)为 20.31%,投资回收年限为 3.91 a。初步经济性分析表明,该项目具备较好的开发潜力。

5 前景分析

马诺诺含锂尾矿位于刚果(金)马诺诺锂锡矿区,该区域地形较为平坦,平均海拔约 635 m,属热带稀树草原气候,年平均气温 20 ℃,雨季自 10 月至次年 4 月,年平均降水量为 1 231 mm,地表水和地下水丰富。马诺诺锂辉石伟晶岩矿床资源量规模大,含锂矿物单一,尾矿矿床自 1919—1980 年重选锡、铌钽铁矿后堆存,至今未进行二次工业化开发。Gc 堆+K 堆矿石量 6.9×10⁶ t,平均 Li₂O 品位 0.79%,Sn 品位 452×10⁻⁶,Ta 品位 37×10⁻⁶,含锂矿物为中粗粒嵌布的锂辉石,采用浮选流程对于锂辉石的回收效果较好(表 4 和表 5)。

目前制约马诺诺地区的锂矿开发主要因素是电力、交通及人力(熟练工人)等。尽管附近马诺诺的水电站正在修复过程中,但项目前期阶段需要自发电以维持生产和生活,柴油发电成本为 19.2 美元/t 矿,占直接成本的 46.5%,预计水电接入后可一定程度降低直接成本,提高收益。自刚果(金)东南部最大城市卢本巴希(Lubumbashi)至马诺诺 630 km,雨季部分路段交通状况较差,物资运输难度较大,本项目后期规划过程中应综合考虑马诺诺-卡邦戈-利卡西的公路-铁路联运线和马诺诺-普韦托公路运线。经现场考察,历史选矿厂位于硬岩锂矿的上盘且已无法再次使用,同时,部分矿堆位于硬岩锂矿的上盘位置(图 1),因此,选矿厂和尾矿库选址时应避免对硬岩矿形成二次压覆。

通过项目现金流分析,参考某年处理量 1×10⁶ t 的浮选厂,在建设总投资 6 580 万美元时,折现率为 10% 的条件下,税后 NPV 为 4 648 万美元,税后 IRR 为 20.31%,投资回收年限为 3.91 a。尽管目前项目因发电和运输原因,运营成本较高,但项目仍具有

表6 项目现金流量

Table 6 Cash flow of project

项目	年1	年2	年3	年4	年5	年6	年7	年8
处理原矿/($\times 10^4$ t)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.83
供矿品位/%		0.86	0.86	0.86	0.86	0.72	0.71	0.67
精矿产率/%		10.05	10.05	10.05	10.05	8.41	8.30	7.83
精矿产量/($\times 10^4$ t)		100.50	100.50	100.50	100.50	87.49	79.22	64.99
销售收入/万美元		9 045	9 045	9 045	9 045	7 874	7 130	5 849
建设费用/万美元	-6 580							
直接运营成本/万美元		4 125	4 125	4 125	4 125	4 125	4 125	3 424
间接运营成本/万美元		712	712	712	712	712	712	591
税金/万美元		317	317	317	317	276	250	205
所得税前利润/万美元		3 891	3 891	3 891	3 891	2 762	2 043	1 629
所得税/万美元		1 167	1 167	1 167	1 167	829	613	489
净利润/万美元	-6 580	2 724	2 724	2 724	2 724	1 933	1 430	1 141
税前现值/万美元	-6 580	3 538	3 216	2 924	2 658	1 715	1 153	836
累计税前现值/万美元	-6 580	-3 042	174	3 097	5 755	7 470	8 623	9 460
税后现值/万美元	-6 580	2 476	2 251	2 047	1 861	1 200	807	585
累计税后现值/万美元	-6 580	-4 104	-1 852	194	2 055	3 255	4 062	4 648
主要指标		回收周期/a		IRR/%		项目投资财务净现值		
税前		2.95		39.04		9 460		
税后		3.91		20.31		4 648		

较好的开发前景。待水电站和公路修复完毕,预计对财务指标将有较大的改善。通过敏感性分析,本项目开发受锂辉石精矿价格影响较大(图10),需要项目在运营过程中注意市场因素。

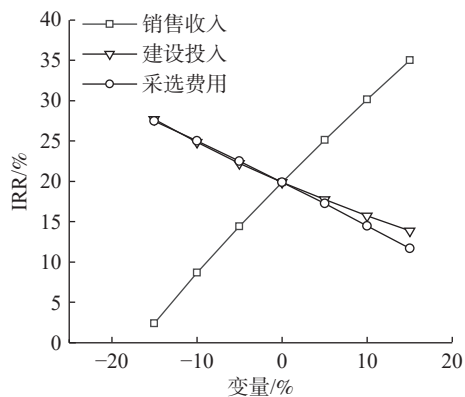


图10 IRR敏感性分析

Fig. 10 IRR sensitivity analysis

经初步分析,该项目具有较好的开发前景,但仍需后期根据矿床品位情况选择代表性样品进行工业连选试验和流程细化/调整,并对其他含锂尾矿堆中的腐锂辉石的选矿条件进行分析^[20-21]。本次选矿试验对尾矿所含锡(Sn)、钽(Ta)元素未进行回收试验,下一步试验中应对Sn、Ta综合回收加以考虑;同时,对浮选尾矿中的长石、石英产品在建筑、玻璃和熔块等方面的综合利用加以论证,以期提高矿床综合经

济价值。对于其他尾矿堆的勘查,应结合马诺诺硬岩锂矿的垂向分布特征(图2),优先选择由伟晶岩碎屑组成的矿堆进行勘查和评价^[22],以加速尾矿矿床的勘查开发流程。

6 结论

1)马诺诺含锂尾矿为历史伟晶岩型锡矿重选后堆存形成,目前探获的K堆和Gc堆由伟晶岩碎屑组成,可利用矿石量 6.9×10^6 t, Li_2O 品位7.9%, Sn品位 452×10^{-6} , Ta品位 37×10^{-6} ,尾矿已破碎(K堆 $P_{80}=1.194$ mm, G堆 $P_{80}=9.58$ mm)。矿石的矿物组成和化学组分与伟晶岩组分类似,其中,目标(可回收)含锂矿物为中粗粒嵌布的锂辉石,其他具有潜在经济价值的矿物为中细粒嵌布的钽铌铁矿和锡石。

2)“浮-磁”工艺流程表明,在原矿 Li_2O 品位为0.86%的条件下,经“一粗二扫三精”浮选闭路流程和浮选精矿一次磁选流程,获得精矿 Li_2O 品位6.03%,回收率70.47%,具有较好的选矿效果。

3)初步经济分析表明,针对马诺诺尾矿K堆和Gc堆进行浮选矿厂建设,建设总投资为6 580万美元,运营成本为48.37美元/t矿,在折现率为10%的条件下,税后财务净现值(NPV)为4 648万美元,税后内部收益率(IRR)为20.31%,投资回收年限为3.91 a,项目具备较好开发前景。

4)建议开展锡、钽铌矿物回收试验和浮选尾矿中长石、石英的综合利用研究,提高矿产资源综合利

用水平;对马诺诺地区其他含锂尾矿堆展开勘查和研究,促进区域锂产业发展,扩大锂资源供应途径。

参考文献(References):

- [1] 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(4):689-698.
MAO Jingwen, YANG Zongxi, XIE Guiqing, et al. Critical minerals: international trends and thinking[J]. Mineral Deposits, 2019, 38(4): 689-698.
- [2] 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(6):1189-1209.
WANG Denghong. Study on critical mineral resources: significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(6): 1189-1209.
- [3] 闫卫东,胡容波,林博磊,等.2024年全球矿业展望[J].中国矿业,2024,33(1):20-29.
YAN Weidong, HU Rongbo, LIN Bolei, et al. Global mining outlook in 2024[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(1): 20-29.
- [4] 张艳飞,陈其慎,邢佳韵,等.中国“新能源矿产目录”厘定研究[J].中国矿业,2024,33(1):1-11.
ZHANG Yanfei, CHEN Qishen, XING Jiayun, et al. Research on the determination of “list of new energy minerals” in China[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(1): 1-11.
- [5] BRADLEY D C, MCCAULEY A D, STILLINGS L M. Mineral-deposit model for lithium-caesium-tantalum pegmatites[R]. Reston: USGS, 2017.
- [6] 陈衍景,薛莅治,王孝磊,等.世界伟晶岩型锂矿床地质研究进展[J].地质学报,2021,95(10):2971-2995.
CHEN Yanjing, XUE Lizhi, WANG Xiaolei, et al. Progress in geological study of pegmatite-type lithium deposits in the world[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(10): 2971-2995.
- [7] 邢凯,朱清,任军平,等.全球锂资源特征及市场发展态势分析[J].地质通报,2023,42(8):1402-1421.
XING Kai, ZHU Qing, REN Junping, et al. Research on the characteristics and market development trend of global lithium resources[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(8): 1402-1421.
- [8] GROVES D I, 张良, GROVES I M, 等. 锂辉石: 巨型花岗伟晶岩锂-铯-钽矿床中关键含锂矿物[J]. 岩石学报, 2022, 38(1): 1-8.
GROVES D I, ZHANG Liang, GROVES I M, et al. Spodumene: the key lithium mineral in giant lithium-caesium-tantalum pegmatites[J]. Acta Petrologica Sinica, 2022, 38(1): 1-8.
- [9] BOWELL R J, LAGOS L, DE LOS HOYOS C R, et al. Classification and characteristics of natural lithium resources[J]. Elements, 2020, 16(4): 259-264.
- [10] LOHMEIER S, LOTTERMOSER B G, SCHIRMER T, et al. Reprocessing potential of pegmatite tailings for rare metal extraction and brick fabrication, Uis, Namibia[J]. South African Journal of Geology, 2021, 124(3): 639-662.
- [11] SUPPES R, HEUSS-ABBICHLER S. Resource potential of mine wastes: a conventional and sustainable perspective on a case study tailings mining project[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 297: 126446-126460.
- [12] SARKER S K, HAQUE N, BHUIYAN M, et al. Recovery of strategically important critical minerals from mine tailings[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10(3): 107622-1076237.
- [13] ROY T, PLANTE B, DEMERS I, et al. Multi-year in situ hydrogeochemical monitoring of hard rock lithium mine tailings in a large-scale experimental pile[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 356: 120602-120613.
- [14] LÈBRE É, CORDER G, GOLEV A. The role of the mining industry in a circular economy: a framework for resource management at the mine site level[J]. Journal of Industrial Ecology, 2017, 21(3): 662-672.
- [15] DEWAELE S, HULSBOSCH N, CRYNS Y, et al. Geological setting and timing of the world-class Sn, Nb-Ta and Li mineralization of Manono-kitotolo (Katanga, Democratic Republic of Congo)[J]. Ore Geology Reviews, 2016, 72: 373-390.
- [16] GONCALVES R. NI43-101 mineral resource estimate Manono tailings project[R]. Toronto: MSA, 2023.
- [17] JOHNSTON G. Manono project mineral resource increases 47% to 842 mt[EB/OL]. (2024-01-31)[2024-04-13]. <https://announcements.asx.com.au/asxpdf/20240131/pdf/05zy2s9jtry80.pdf>.
- [18] ECKHOF K. Further high-grade lithium mineralisation at Manono[EB/OL]. (2017-08-22)[2024-04-13]. <https://announcements.asx.com.au/asxpdf/20170822/pdf/431190h4xthzy1.pdf>.
- [19] SAHOO S K, TRIPATHY S K, NAYAK A, et al. Beneficiation of lithium bearing pegmatite rock: a review[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2024, 45(1): 1-27.
- [20] ROY T, PLANTE B, BENZAAZOUA M, et al. Geochemistry of decades-old spodumene mine tailings under a humid continental climate[J]. Applied Geochemistry, 2022, 146: 105481-105496.
- [21] 孙志健,于洋.某含腐锂辉石的难选锂辉石矿选矿试验研究[J].有色金属工程,2021,11(11):29-33.
SUN Zhijian, YU Yang. Processing research on a refractory spodumene ore containing cymatolite[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(11): 29-33.
- [22] 陈振宇,李建康,周振华,等.硬岩型锂-铍-钽-铌资源工艺矿物学评价指标体系[J].岩石学报,2023,39(7):1887-1907.
CHEN Zhenyu, LI Jiankang, ZHOU Zhenhua, et al. Study on process mineralogical evaluation index system of hard rock lithium-beryllium-niobium-tantalum mineral resources[J]. Acta Petrologica Sinica, 2023, 39(7): 1887-1907.