

· 工艺矿物学 ·

Doi: 10.20086/j.cnki.yskw.2025.4052

刚果(金)马诺诺某含锂尾矿工艺矿物学研究

盛涛¹, 王武名^{1,2}, 雷志兰³, 张书超¹, 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. 江苏省地质局, 江苏 南京 210007; 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)马诺诺地区伟晶岩型锂、锡、铌钽资源丰富,历史生产过程中,只对锡和铌钽矿物进行回收,含锂矿物则随尾矿排放并堆存至今。为确定尾矿中含锂矿物的赋存特征,通过综合运用粒度分析、X射线荧光光谱分析(XRF)、化学多元素分析、X射线衍射、扫描电镜等方法,对某尾矿矿样进行了含锂矿物的工艺矿物学研究。结果表明,该含锂尾矿样品 Li_2O 品位为1.05%,矿石中的锂元素95.04%分布于锂辉石中。矿样中锂辉石矿物含量为13.1%,锂辉石以中粗粒嵌布为主,与其他矿物连生关系简单,腐化程度较低,锂辉石中 Li_2O 含量为7.9%。通过含锂矿物的工艺矿物学研究,确定该含锂尾矿属于锂辉石型(尾)矿床,具有较好的选矿工艺矿物学指示,为尾矿中锂辉石的回收提供了技术依据。

关键词: 工艺矿物学; 尾矿; 锂辉石; 赋存状态; 刚果(金)

中图分类号: P578.954; P579

文献标识码:

文章编号: 1000-6524(2025)04-0995-08

Study on process mineralogy of lithium-containing tailings in Manono, Democratic Republic of Congo

SHEN Tao¹, WANG Wu-ming^{1,2}, LEI Zhi-lan³, ZHANG Shu-chao¹, LI Zhi-jun¹ and SUN Ju-li¹

(1. Zhejiang Huayou Cobalt Company Limited, Tongxiang 314500, China; 2. Geological Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210007, China; 3. Hunan Research Institute of Nonferrous Metals Co., Ltd., Changsha 410100, China)

Abstract: The Manono region of the DRC is rich in pegmatite-type lithium, tin, niobium and tantalum resources. In the historical production process, only tin and niobium tantalum minerals were recovered, while lithium-containing minerals were discharged with tailings and stored until now. To determine the occurrence characteristics of lithium-containing minerals in tailings, the process mineralogy of lithium-containing minerals in tailings samples was studied by particle size analysis, X-ray fluorescence spectroscopy (XRF), chemical multi-element analysis, X-ray diffraction, scanning electron microscopy, and other comprehensively methods. The results indicate that the Li_2O grade of the lithium-containing tailings sample is 1.05%, and 95.04% of the lithium element in the ore is distributed in spodumene. The mineral content of spodumene in the raw tailing ore sample is 13.1%. Spodumene is mainly distributed in medium-coarse grains and has a simple association with other minerals, with low weathering degree. The Li_2O content in spodumene is 7.9%. Through the study of process mineralogy of lithium-containing minerals, it has been determined that the lithium-containing tailings belong to the spodumene-type (tailings) deposit, with good mineralogical indicators for mineral processing, providing a technical basis for the recovery of spodumene from tailings.

收稿日期: 2024-02-03; 接受日期: 2025-05-21; 编辑: 郝艳丽

作者简介: 盛涛(1988-), 男, 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: 王武名(1977-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事矿产勘查及矿业咨询工作, E-mail: 58637154@qq.com。

Key words: process mineralogy; tailings; spodumene; occurrence state; Democratic Republic of Congo (DRC)

锂(Li)是自然界中最轻的金属,作为关键金属或关键矿产被广泛应用于新能源、核聚变、玻璃、陶瓷等领域,伴随着锂离子电池、新能源汽车和储能材料等行业的迅猛发展,国内外锂矿的找矿工作进入高潮期(毛景文等, 2019; 王登红, 2019)。同时,锂已先后被中国《全国矿产资源规划(2016–2020)》、欧盟《关键原材料法案(2020)》、美国《关键矿产目录(2022)》等列为战略性或关键矿产(国土资源部, 2016; Beer, 2020; Applegate, 2022)。

2022年全球锂产量的45%来源于伟晶岩型锂矿(Sahoo *et al.*, 2024),而锂辉石($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$)和锂云母 $[\text{K}(\text{Li}, \text{Al})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2]$ 是硬岩型锂矿的主要锂工业矿物,也是伟晶岩型锂矿床的重要共(伴)生矿物(Bowell *et al.*, 2020; Groves *et al.*, 2022; 邢凯等, 2023)。但在较长的历史时期内,含锂伟晶岩型矿床多以开采其中的锡、铌、钽等经济矿物为主,锂辉石等含锂矿物在伟晶岩型矿床中的经济价值通常被忽略或居次要地位而作为尾矿处理。随着近年来锂矿资源的勘查和开发,含锂尾矿因其开采、破碎成本低,其潜在经济价值也被逐渐发现和重视(Saker *et al.*, 2022),但对于该类项目尚无较为详细的工艺矿物学研究。

刚果(金)马诺诺伟晶岩型锂锡矿床是目前探明的世界最大硬岩锂矿,探获的保有矿石量达 5.74×10^4 万t, Li_2O 品位1.63%(Johnston, 2023)。本文研究的含锂尾矿是1919至1980s期间对该矿床上部矿体溜槽重选锡石和铌钽铁矿的尾矿堆存形成,历史生产锡金属量14~18.5万t,铌钽铁矿精矿0.45万t,锂辉石未回收(Dewaele *et al.*, 2016),因此对该尾矿堆锂矿资源调查具有重要意义。在锂辉石型硬岩锂矿的勘查和开发中发现,风化作用导致浅部锂辉石容易沿其解理或裂隙发生蚀变生成钠长石、白云母、绿泥石及黏土矿物等导致锂元素流失,蚀变后的锂辉石常被称为腐锂辉石,风化作用的存在导致浅部锂辉石中锂含量的流失,是导致锂辉石型伟晶岩浅部不能进行有效开发的主要技术因素(Singh and Gilkes, 1993; Wilson, 2004; 李继业等, 2023)。马诺诺矿区的氧化带深度0~70 m,最深达100 m,而氧化带中的锡矿是历史开采的主要对象,对于矿石中 Li_2O 含量、含锂矿物的工艺矿物学未进行详细研究,因此,对于该尾矿中锂矿资源的经济价

值判断难度较大。为确定尾矿中含锂矿物的工艺矿物学特征,探索该地区的含锂尾矿的开发价值,本文对马诺诺某含锂尾矿进行工艺矿物学研究,以期为该地区尾矿型锂矿开发提供依据,并为尾矿型锂矿资源的评价提供参考。

1 样品概况

尾矿堆分布于马诺诺历史露天矿坑附近(图1),尾矿堆高出地表约65 m,部分位置已有杂草生长。在野外采样过程中,使用挖掘机清除采样点表面的低固结层后(厚度 ~ 1.5 m),将直(内)径50 cm、长为1 m的钢桶在尾矿堆中的不同位置敲入尾矿中,进行取样、烘干和密度测定。尾矿原矿样品呈灰白色,占干样品已破碎,为确定尾矿原矿物料的颗粒大小和粒度分布的定量数据,采用筛分实验方法进行粒度分析。将实验选用的钢丝筛网按上粗下细的顺序层叠成套堆放在振动器上进行筛分,尾矿原矿筛分后的累积粒度分布曲线见图2,插值法计算尾矿原矿80%的物料粒度小于1.035 mm,即 $F_{80} = 1.035$ mm。实测尾矿原矿平均堆密度为 1.62 g/cm^3 。

2 分析方法

尾矿样品的主要测试工作在湖南有色金属研究院进行,扫描电镜(SEM)为SU-3500,能谱仪(EDS)为Oxford X-MaxN50,测试依据《GB/T25189-2010 微束分析扫描电镜能谱仪定量分析参数的测定方法》。X射线荧光光谱分析(XRF)使用设备为Bruker S8 TIGER 波长色散型X射线荧光光谱仪,测试参考《DZ/T 0279.1-2016 区域地球化学样品分析方法 第1部分: Al_2O_3 等24个成分量测定 粉末压片-X射线荧光光谱法》。尾矿多元素化学成分分析,碳(C)和硫(S)测定采用燃烧红外吸收光谱法检测,使用COREY-205(TC/S)型多项红外碳硫分析仪,测试参考《DZ/T 0279-2016 区域地球化学样品分析方法 第25部分: 碳量测定》;氟(F)量测定采用离子选择电极法,使用FXSJ-216F型离子计,测试依据《DZ/T 0279-2016 区域地球化学样品分析方法 第21部分: 氟量测定》;锡(Sn)、钽(Ta)、铌(Nb)测试采用

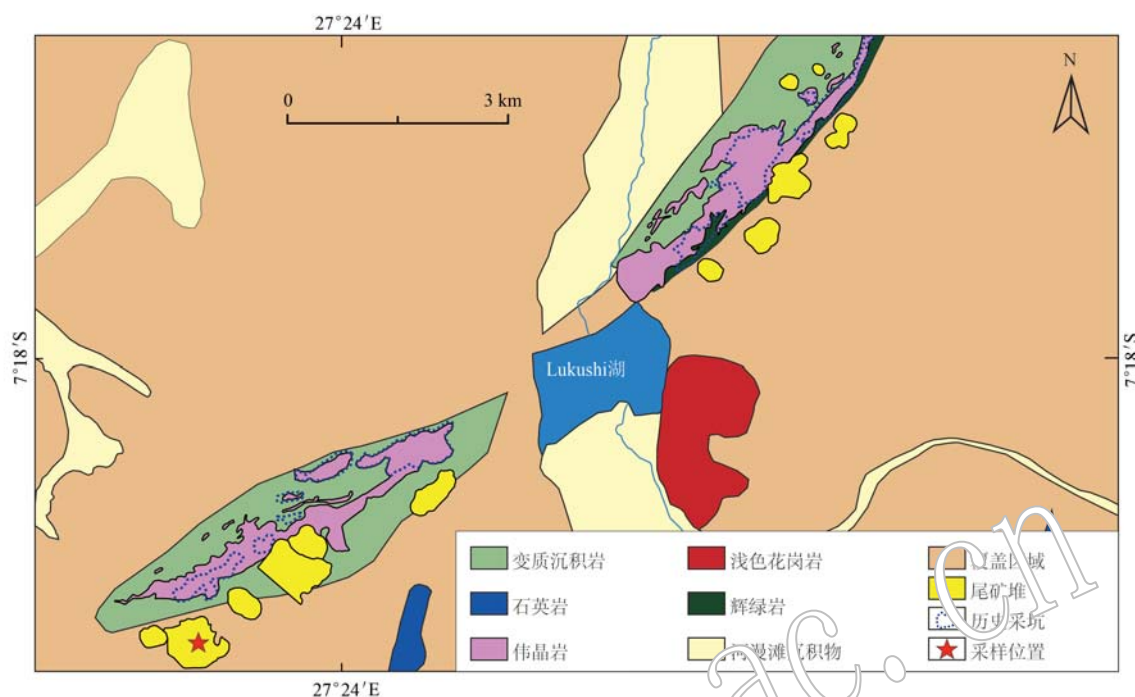


图1 马诺诺矿区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Manono area

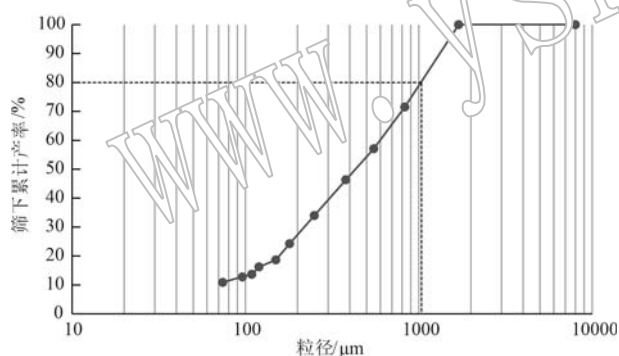


图2 尾矿原矿样粒度分布曲线

Fig. 2 Granulometry distribution curve of the tailing raw ore

电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS),使用仪器为三重四极杆电感耦合等离子体质谱仪(TQ-ICP-MS),测试依据《GB/T37837-2019 四极杆电感耦合等离子体质谱方法通则》和《GB/T14506.30-2010 硅酸盐岩石化学分析方法 第30部分:44个元素量测定》;其余元素含量测定采用等离子体原子发射光谱法(ICP-AES),使用SPECTRO BLUE SOP等离子体发射光谱仪,测试依据《GB/T 36244-2018 电感耦合等离子体原子发射光谱》。

马诺诺硬岩锂矿和浮选精矿测试由津巴布韦PLZ实验室承担,锂(Li)含量测定采用原子吸收方

法(AAS),使用设备为TAS-990原子吸收分光光度计,测试依据《GB/T174131-2010 锂矿石、铷矿石、铯矿石化学分析方法》;对于 Li_2O 含量 $\geq 4\%$ 的样品,测试依据《YS/T509.1-2008 锂辉石、锂云母精矿化学分析方法》。X射线衍射测试(XRD)采用Olympus BTX III型XRD分析仪,实验条件为:电压30 kV,电流330 μA , 2θ 角为 $5^\circ \sim 55^\circ$,分辨率为 $0.25^\circ 2\theta\text{FWHM}$ 。

3 分析结果

3.1 矿石化学成分

为确定矿石元素分布情况,对尾矿原矿样品进行了X射线荧光光谱分析,结果见表1。为确定尾矿原矿样品中Li、Sn、Nb、Ta元素含量情况,又进行了多元素分析,结果见表2。

分析结果表明,矿石中可供选矿回收的主要元素是Li, Li_2O 品位为1.05%,伴生(残留)有Sn、Nb、Ta,可考虑综合回收。分析结果表明,需要通过选矿排除的主要化学组分是 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 和 Na_2O 等,这些组分构成的脉石矿物主要是石英、长石类和云母类。

表 1 尾矿原矿样品 X 射线荧光光谱分析成分表

$w_B/\%$

Table 1 X-ray fluorescence analysis of the tailing raw ore

元素	SnO ₂	ZnO	BaO	Fe ₂ O ₃	MnO	Rb ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O
含量	0.01	0.0102	0.021	0.9763	0.0695	0.0503	3.062	4.37
元素	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl
含量	0.0583	72.76	15.28	0.142	0.16	0.16	0.019	0.009

表 2 尾矿原矿样品多元素化学成分表

$w_B/\%$

Table 2 Chemical multi-element analysis of the tailing raw ore

元素	Li ₂ O	Nb	Ta	Sn	Fe	Ti	F	SiO ₂
含量	1.05	0.005 87	0.005 01	0.035	0.60	0.031	0.12	72.74
元素	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	S	C	
含量	15.46	0.091	0.11	3.04	3.82	0.018	0.038	

3.2 矿石矿物成分

将尾矿样品进行 X 射线衍射 (XRD) 分析,并结合镜下鉴定和多元素化学成分,查明了矿石中有用矿物主要有锂辉石、钽铁矿、钽铁矿、锡石等,其他金属矿物是黄铁矿、钛铁矿、磁铁矿、褐铁矿等。脉石矿物以云母、钠长石、石英为主,有少量微斜长石;副矿物为微量的独居石、锆石、金红石等(表 3)。

马诺诺伟晶岩属锂-铌-钽 (LCT) 伟晶岩,伟晶岩自外向内分为细晶花岗岩带、白云母长石石英带、

石英钠长石带、锂辉石带、石英带(内核) (Dewaele *et al.*, 2016; Bradley *et al.*, 2017; 曾瑞垠等, 2024),其中,锂辉石带是马诺诺硬岩锂矿的主要赋矿岩性,岩石呈灰白色,主要由石英、锂辉石、钠长石、白云母等组成,含少量钽钽铁矿和锡石,粗粒结构。锂辉石呈长柱状,粒径 0.5~10 cm 不等,定向排列,含量为 10%~30%,最高可达 50%以上。马诺诺不同品位锂辉石伟晶岩的 X 射线衍射分析结果见表 4。

表 3 尾矿原矿样品的主要矿物组成及含量

$w_B/\%$

Table 3 Mineral composition and content of the tailing raw ore

石英	云母	钠长石	微斜长石	锂辉石	绿泥石、黏土矿物	钛铁矿、磁铁矿、褐铁矿	电气石	锡石
35.9	25.2	21.2	2.6	13.1	1.2	0.56	0.2	0.04
钽铁矿、钽铁矿		独居石	锆石	金红石	榍石	磷灰石	黄铁矿	合计
微		微	微	微	微	微	微	100

云母类包括白云母(包括含锂白云母及极少量锂云母)、黑云母、绢云母等。

表 4 马诺诺硬岩锂矿石 X 射线衍射分析结果

$w_B/\%$

Table 4 XRD analysis results of the hard rock lithium ore in Manono

样号	石英	钠长石	微斜长石	白云母	锂云母	锂辉石	锡石	绿柱石	未区分	Li ₂ O
I	32.9	4.6	0	3.3	0	53.9	0	0	5.3	4.32
II	29.8	22.1	9.7	6.2	0	28.6	0	0.4	3.2	2.26
III	38.1	23.9	4.2	10.1	0	20.4	0.1	0.5	2.7	1.65
IV	26.9	42.5	0.7	12.1	0	15.9	0.1	0.2	1.6	1.27
V	26.2	29.9	22.3	7.8	0	9.5	0.1	0.7	3.5	0.75

尾矿矿石的主要矿物组成与硬岩矿石的矿物组成进行比较(表 3、表 4),发现尾矿矿石的矿物含量有以下特点:石英含量整体略高于硬岩锂矿;云母含量明显高于硬岩锂矿;尾矿中未见绿柱石。

3.3 重要矿物特征

锂辉石是原矿中最主要含锂矿物,矿物自形程度较好,呈短柱状和板状,多为灰白色、浅紫色、浅绿色、浅黄色、翠绿色等,解理发育,常见简单双晶和聚

片双晶,常沿裂隙或边缘不同程度地蚀变为绿泥石、钠长石、白云母、黏土矿物等,常与含锂白云母、电气石、铌铁矿等共生,粒径范围较大,粒径最大者可达2 cm,粒径细小者约0.01 mm,常与长石、石英、云母连生,部分粒径较大的晶粒内部常包裹细粒的石英、长石或云母(图3a)。

云母类主要为白云母,次为黑云母。白云母呈板状、片状和鳞片状产出,透光下为无色-淡绿色,具多色性,解理发育,主要分布于石英、长石等矿物粒间(图3b),片径0.03~1 mm。

通过扫描电镜及X射线能谱对矿石中的铌钽矿物成分进行分析,确认样品中铌钽矿物主要为铌锰

矿,见少量的钽铁矿、铌铁矿和钽锰矿。铌锰矿内反射色呈褐红色,具强非均质性,主要为自形晶,呈柱状、针状及板状集合体,部分呈粒状分布,粒径介于0.01~0.15 mm之间(图3c),常与石英、长石、白云母等伴生,也可见少部分与锂辉石连生。

锡石含量较少,颜色常为褐色至黑色,呈双锥状和锥柱状产出,集合体常呈不规则粒状(图3d),粒径介于0.01~0.15 mm之间。

脉石矿物以钠长石为主,呈板状、柱状,双晶和聚片双晶发育;次为云母、石英等,石英为他形不规则粒状遍布全岩;少量钾长石(微斜长石)、细小纤维状绿泥石和细小板状高岭石。

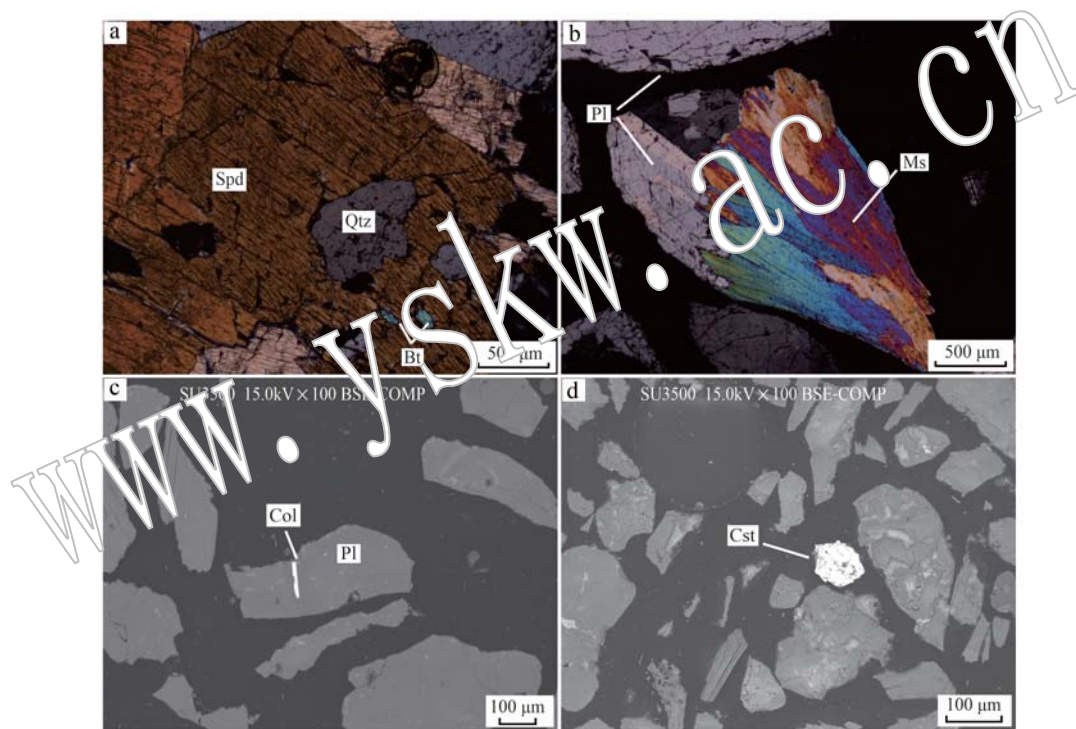


图3 尾矿矿石显微照片及背散射图像

Fig. 3 Micrographs and back-scattered electron images of the tailing ore

a—锂辉石包裹细粒的黑云母和石英(正交偏光); b—鳞片状白云母与斜长石连生(正交偏光); c—铌钽铁矿被长石包裹(BSE); d—粒状锡石颗粒(BSE); Bt—黑云母; Cst—锡石; Col—铌钽铁矿; Pl—斜长石; Ms—白云母; Qtz—石英; Spd—锂辉石
a—fine grains biotite and quartz are included in the spodumene (CPL); b—flaky muscovite intergrows with plagioclase (CPL); c—fine coltan grain is included in plagioclase (BSE); d—individual medium granular cassiterite exists in the raw tailing ores (BSE); Bt—biotite; Cst—cassiterite; Col—coltan; Pl—plagioclase; Ms—muscovite; Qtz—quartz; Spd—spodumene

3.4 锂(Li)元素的平衡配分

锂是尾矿原矿样品中最主要的有价元素,通过对含锂元素的主要矿物进行单矿物挑选和化学分析工作,并根据矿样中主要矿物的相对含量以及矿物中 Li_2O 的品位进行了平衡计算,结果(表5)显示样品中的锂元素主要赋存于锂辉石中,配分比为

95.04%,在其他矿物中分配率较低;锂辉石中 Li_2O 含量为7.9%,略低于理论 Li_2O 含量(Sahoo *et al.*, 2024)。

3.5 矿物粒度分布

镜下采用横尺线测法对尾矿矿石制成的砂薄片中所含锂辉石、云母、铌钽铁矿和锡石的粒度进行测

表 5 锂在不同矿物中的平衡配分

Table 5 Balanced distribution of lithium in different minerals

矿物	矿物 含量/%	Li ₂ O 含量/%	Li ₂ O 金属量/%	配分 比/%
锂辉石	13.1	7.90	1.035	95.04
云母	25.2	0.20	0.050	4.63
长石	23.8	0.01	0.002	0.22
石英	35.9	—	—	—
绿泥石、黏土矿物	1.2	0.1	0.001	0.11
其他矿物	0.8	—	—	—
合计	100		1.088	100

试和统计,结果(表 6)表明:锂辉石以中粗粒嵌布为主,粗粒粒级(+0.294 mm)占有率为 55.5%,中粒粒级(+0.074~−0.294 mm)占有率为 19.9%;云母类矿物以中粗粒嵌布为主,粗粒粒级(+0.294 mm)占有率为 49.1%,中粒粒级(+0.074~−0.294 mm)占有率为 18.5%;铌钽铁矿以中细粒嵌布为主,中粒粒级(+0.074~−0.294 mm)占有率为 27.0%,细粒粒级(+0.01~−0.074 mm)占有率为 61.6%;锡石以中细粒嵌布为主,中粒粒级(+0.074~−0.294 mm)占有率为 30.6%,细粒粒级(+0.01~−0.074 mm)占有率为 54.8%。由于样品为破碎样,且有少部分已

表 6 主要目的矿物的嵌布粒度统计结果

Table 6 Particle size distribution of the ore mineral

粒级/mm	锂辉石		云母类		铌钽铁矿		锡石	
	分布率	累计	分布率	累计	分布率	累计	分布率	累计
>1	15.1	15.1	10.2	10.2	—	—	—	—
−1~+0.5	23.3	38.4	16.5	26.7	—	—	4.9	4.9
−0.5~+0.294	17.1	55.5	22.1	48.8	4.5	4.5	8.4	13.3
−0.294~+0.152	10.2	65.7	10.4	59.2	10.1	14.6	12.1	25.4
−0.152~+0.074	8.7	74.4	8.1	67.3	16.9	31.5	18.5	43.9
−0.074~+0.037	8.4	82.8	—	75.4	20.2	51.7	21.3	65.2
−0.037~+0.019	7.8	90.6	8.1	83.5	25.6	77.3	25.4	90.6
−0.019~+0.010	6.9	97.5	7.6	91.1	15.8	93.1	8.1	98.7
<0.010	2.5	100.0	8.9	100.0	6.9	100.0	1.3	100.0

云母类包括黑云母、白云母以及少量的绢云母。

粉碎(图 2),推测硬岩矿石中主要矿物粒径比本次统计值稍大。

4 可选性分析

马诺诺含锂尾矿为原马诺诺锡矿重选形成,锡矿石来源包括风化带中残积型锡矿(土黄色)和部分硬岩型锡矿(灰白色),残积型锡矿由于锂辉石在地表湿热的氧化环境中,锂辉石已经腐化成为绢云母、黏土矿物等造成锂元素流失(Dewaele *et al.*, 2016; 李继业等, 2023; 曾瑞垠等, 2024),而硬岩锡矿中的锂辉石由于受风化程度相对较低得以保存,是目前尾矿中主要含锂矿物。尾矿为硬岩锡矿经破碎、溜槽重选后形成,造成尾矿中的云母含量相对升高,其他矿物组成与马诺诺锂辉石伟晶岩相近(表 3),应参考伟晶岩型锂矿选矿工艺流程的主要矿物学指标(舒宇等, 2022; 陈振宇等, 2023),影响尾矿原矿选矿工艺流程的主要矿物学指标为主要工

业矿物、主要目的组分的配分和粒度特征。矿石中的主要回收矿物为锂辉石,尾矿矿石中锂元素 95.04%配分于锂辉石中,长石、云母、绿泥石及黏土矿物中含有少许锂,但不会对锂的回收造成大的影响;锂辉石以中粗粒嵌布为主,锂辉石的 Li₂O 含量为 7.9%,锂辉石与其他矿物的连生关系简单,有利于锂辉石磨矿的解离和分选;部分锂辉石内部包裹有微细粒脉石矿物、腐锂辉石的产出(Wilson, 2004; Karrech *et al.*, 2020)、锂辉石解理和裂隙发育等因素可能会对选矿过程有一定影响(图 3a)。

根据主要矿物的物理性质差异(表 7),锂辉石型锂矿的工业选矿方法主要有重介质选矿和浮选法,磁选法多用于脱除锂辉石精矿中的含铁杂质及其他磁性矿物(杨金山等, 2022; Sahoo *et al.*, 2024)。重介质选矿小型实验表明,尾矿原矿 Li₂O 品位为 1.05%的 3~0.5 mm 粒级矿石,采用密度分别为 2.75 g/cm³ 和 2.95 g/cm³ 的重介质进行一粗一精两段重选流程,获得 Li₂O 品位 6.5%、回收率

表7 原矿主要矿物的物理性质

Table 7 The physical properties of the primary minerals in raw ore

矿物	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比磁化系数/ ($10^{-6} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	介电常数	莫氏硬度
锂辉石	3.03~3.22	4.86~0.43	8.4	6.5~7
铌钽铁矿	5.37~7.85	48.3~50.9	26.8	4.2~7
锡石	6.8~7.0	2.16~0.42	24~81	6~7
赤铁矿	5.0~5.3	30.91~18.91	19.5~25	5~6
石英	2.65	-0.41~-1.03	6.53	7
长石	2.62~2.76	-0.25~-0.61	6.02	6~6.5
白云母	2.76~3.10	2.18~7.68	6.2~8	2.5
黑云母	3.02~3.12	57.81~52.60	10.3	2.5~3
绿泥石	2.7~3.4	46.19~12.24	8.63	2~3
绿柱石	2.6~2.9	7.14~4.29	3.9~7.7	7.5~8

63%的锂辉石精矿(Goncalves, 2023)。将 Li_2O 品位1.01%的尾矿原矿磨矿至-0.074 mm 粒径物料占比75%(200目P75),采用“一粗二扫三精+精矿磁选”的闭路试验流程,获得精矿 Li_2O 品位5.47%,回收率73%。通过重介质选矿和浮选的小型实验表明,该锂辉石型尾矿的选矿效果较好。

矿石中的铌、钽、锡分别赋存在铌锰矿、钽铁矿、铌铁矿、钽锰矿和锡石中(图3),含量较低,矿物粒度细小(表6),应从经济效益角度考虑是否综合回收。

5 结论

(1) 马诺诺某含锂尾矿为历史伟晶岩型锡矿重选后堆存形成,尾矿已破碎($F_{80}=1.035 \text{ mm}$),尾矿矿样中的 Li_2O 含量为1.05%,尾矿矿石中的锂主要赋存在锂辉石中,配分比为95.04%,锂辉石中的 Li_2O 含量为7.9%。

(2) 尾矿原矿中锂辉石以中粗粒嵌布为主,连生关系简单,有利于目的矿物的解离和分选;锂辉石受风化作用较小,但是锂辉石解理、裂隙发育及内部脉石矿物包体的存在可能会对选矿有一定影响。重介质选矿和浮选小型试验表明该尾矿具备较好的选矿回收率和精矿品位指标,具有潜在的开发价值。

(3) 矿石中的铌、钽、锡含量较低且矿物粒度相对细小,应从工艺流程和经济效益角度考虑是否综合回收。

References

Applegate J D. 2022. Final List of Critical Minerals [R]. Virginia, Reston: USGS, 1~7.

Beer N. 2020. Critical Raw Materials Act [R]. Brussels: European-Commission, 1~23.

Bowell R J, Lagos L, de los Hoyos C R, *et al.* 2020. Classification and characteristics of natural lithium resources [J]. *Elements*, 16(4): 259~264.

Bradley D C, McCauley A D and Stillings L M. 2017. Mineral-deposit Model for Lithium-cesium-tantalum Pegmatites [R]. Virginia, Reston: USGS, 1~58.

Chen Zhenyu, Li Jiankang, Zhou Zhenhua, *et al.* 2023. Study on process mineralogical evaluation index system of hard rock lithium-beryllium-niobium-tantalum mineral resources [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(7): 1887~1907 (in Chinese with English abstract).

Dewaele S, Hulsbosch N, Cryns Y, *et al.* 2017. Geological setting and timing of the world-class Sn, Nb-Ta and Li mineralization of Manono-Kitotolo (Kivu, Democratic Republic of Congo) [J]. *Ore Geology Reviews*, 72: 373~390.

Goncalves R. 2023. Niobium Mineral Resource Estimate Manono Tailings project [R]. Canada, Toronto: Tantalex, 1~103.

Guo D, Zhang Liang, Im Groves, *et al.* 2022. Spodumene: The key lithium mineral in giant lithium-cesium-tantalum pegmatites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(1): 1~8 (in Chinese with English abstract).

Johnston G. 2023. Carriere De L'iste Maiden Mineral Resource Estimate [R]. West Perth: AVZ, 1~41.

Karrech A, Azadi M R, Elchalakani M, *et al.* 2020. A review on methods for liberating lithium from pegmatites [J]. *Minerals Engineering*, 145: 106085.

Li Jiye, Zhu Yongping, Liu Changfeng, *et al.* 2023. Geological characteristics and metallogenic regularity of rare metal deposit in Manono area of Democratic Republic Congo [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 38(1): 110~117 (in Chinese with English abstract).

Mao Jingwen, Yang Zongxi, Xie Guiqing, *et al.* 2019. Critical minerals: International trends and thinking [J]. *Mineral Deposits*, 38(4): 689~698 (in Chinese with English abstract).

Ministry of Land and Resources (MLR). 2016. National Land & Resources Information (2016-2020) [R]. Beijing: State Council of the People's Republic of China, 1~72 (in Chinese).

Sahoo S K, Tripathy S K, Nayak A, *et al.* 2024. Beneficiation of lithium bearing pegmatite rock: A review [J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 45(1): 1~27.

Sarker S K, Haque N, Bhuiyan M, *et al.* 2022. Recovery of strategically

- important critical minerals from mine tailings[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3): 107622.
- Shu Yu, Cheng Zhouyueyang, Wang Ling, *et al.* 2022. Process mineralogy characteristics of spodumene ore in China and its effect on flotation behavior[J]. *Modern Mining*, 38(12): 55~61 (in Chinese with English abstract).
- Singh B and Gilkes R J. 1993. Weathering of spodumene to smectite in a lateritic environment[J]. *Clays and Clay Minerals*, 41(5): 624~630.
- Wang Denghong. 2019. 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*, 93(6): 1 189~1 209 (in Chinese with English abstract).
- Wilson M J. 2004. Weathering of the primary rock-forming minerals: Processes, products and rates[J]. *Clay Minerals*, 39(3): 233~266.
- Xing Kai, Zhu Qing, Ren Junping, *et al.* 2023. Research on the characteristics and market development trend of global lithium resources [J]. *Geological Bulletin of China*, 42(8): 1 402~1 421 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jinshan, Qing Linjian, Zhang Liangang, *et al.* 2022. Current condition and development tendency of spodumene beneficiation processing[J]. *Modern Mining*, 38(2): 28~31 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Ruiyin, Zhu Xinyou, Wang Rong, *et al.* 2024. Geological and mineralization characteristics of manono-kitotolo Li-Cs-Ta pegmatite in the democratic republic of Congo[J]. *Geology in China*, 51(2): 443~456 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈振宇, 李建康, 周振华, 等. 2023. 硬岩型锂-铍-铋-钽资源工艺矿物学评价指标体系[J]. *岩石学报*, 39(7): 1 887~1 907.
- Groves D, 张 良, Groves I, 等. 2022. 锂辉石: 巨型花岗伟晶岩锂-铍-钽矿床中关键含锂矿物[J]. *岩石学报*, 38(1): 1~8.
- 国土资源部. 2016. 全国矿产资源规划(2016-2020)[R]. 北京: 中华人民共和国国务院, 1~72.
- 李继业, 祝永平, 柳长峰, 等. 2023. 刚果(金)马诺诺地区稀有金属矿床成矿地质特征与成矿规律[J]. *地质找矿论丛*, 38(1): 110~117.
- 毛景文, 杨宗喜, 谢桂青, 等. 2019. 关键矿产——国际动向与思考[J]. *矿床地质*, 38(4): 677~698.
- 舒 宇, 乘舟越洋, 汪 灵, 等. 2022. 我国锂辉石矿的工艺矿物学特征及其对浮选行为的影响[J]. *现代矿业*, 38(12): 55~61.
- 王等红. 2019. 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*, 93(6): 1 189~1 209.
- 邢 凯, 朱 清, 任军平, 等. 2023. 全球锂资源特征及市场发展态势分析[J]. *地质通报*, 42(8): 1 402~1 421.
- 杨金山, 卿林江, 张建刚, 等. 2022. 锂辉石矿的选矿工艺现状与发展趋势[J]. *现代矿业*, 38(2): 28~31.
- 曾瑞垠, 祝新友, 王 蓉, 等. 2024. 刚果(金)Manono-Kitotolo 含锂-铍-钽伟晶岩地质与矿化特征研究[J]. *中国地质*, 51(2): 443~456.