第 39 卷 第 4 期
2024 年 12 月:570－574

地 质 找 矿 论 丛
Contributions to Geology and Mineral Resources Research

Vol. 39 No. 4
Dec. 2024:570－574

doi:10.6053/j.issn.1001－1412. 2024. 04. 016

四川雅江县锂多金属矿工艺矿物学研究

杜新[1,2],石磊[1,2],袁敬杰[1,2],王艳[1,2],李兵容[1,2]

(1.四川省冶金地质勘查院,成都 610051;
2.四川西冶检测科技有限公司,成都 611743)

摘要: 雅江县锂多金属矿中 Li_2O 品位为 1.49%,其中的铌、钽、锡等元素也达到综合利用标准。研究中采用化学多元素分析、光学显微分析、X 射线衍射分析、人工重砂、电子探针、扫描电镜-能谱检测等多种分析手段,对锂多金属矿进行工艺矿物学研究。查明了原矿的矿物组成和化学性质,主要矿物的嵌布粒度、赋存状态、共生关系。在此基础上指出了影响此矿石中锂辉石、铌钽铁矿、锡石回收的因素,并对后续的选冶试验工作提出建议。

关键词: 锂多金属矿;锂辉石;铌钽矿;工艺矿物学研究;雅江县;四川省

中图分类号: P616.4 **文献标识码:** A

0 引言

锂作为一种新型且重要的能源战略金属,自然界中发现的锂矿资源主要分为卤水型、伟晶岩型和沉积岩型等 3 种类型[1-5]。四川省的锂辉石资源主要分布在金川—马尔康成矿区和康定—道孚成矿区。雅江县锂多金属矿属于伟晶岩型锂矿,其资源禀赋较好,分布集中,矿石品位较高。主要有用矿物除锂辉石外还伴生有铌钽矿和锡石。因此,对其进行详细的矿石工艺矿物学研究是选矿试验取得成功的关键。

1 矿石工艺矿物学研究

1.1 矿石化学多元素分析

原矿化学多元素分析结果见表 1。多元素分析结果表明,雅江县锂多金属矿原矿中锂品位 $w(Li_2O)=1.49\%$,达到开发利用标准;同时,铌、钽含量也达到了花岗伟晶岩矿床中伴生铌、钽矿的工业指标,应考虑综合回收利用。

1.2 矿石矿物组成

根据光、薄片鉴定结果,同时配合 X 射线衍射分析、电子探针等分析手段[6],确定了原矿中的矿石组成及其含量(表 2)。

表 2 结果表明,原矿中主要的含锂矿物为锂辉石,另有少量含锂白云母、微量电气石和磷锂铝石。伴生元素铌、钽、锡主要以铌钽铁矿和锡石形态存在。

1.3 矿石结构构造

原矿矿石构造主要为块状构造;矿石结构主要为伟晶结构和半自形粒状结构。

(1)伟晶结构。石英、长石及锂辉石的粒径主要为 0.5～2 cm,部分自形程度较高的锂辉石及长石粒径>3 cm,为伟晶结构(图 1a)。

(2)半自形粒状结构。锂辉石呈半自形柱状,多为白色,可见部分半自形柱状长石颗粒(图 1b)。

1.4 矿石主要矿物的嵌布特征

(1)锂辉石。矿石中的锂辉石晶体呈透明-微透明。一般呈板柱状、柱状晶体,常与石英和白云母共生嵌布(图 2a),且锂辉石中常常包裹细粒铁矿物和白云母(图 2b),这部分细粒矿物很难与锂辉石单体解离,容易进入锂辉石精矿而影响其品位。

收稿日期: 2024－01－09; **改回日期:** 2024－09－19; **责任编辑:** 余和勇

作者简介: 杜新(1979—),男,高级工程师,主要从事资源综合利用及选冶试验研究工作。通信地址:四川省成都市郫都区现代工业港北区蜀新大道 356 号西冶科技园。邮政编码:611743。E-mail:478419827@qq.com

通信作者: 石磊(1984—),男,高级工程师,从事矿产资源综合利用及选冶试验研究工作。通信地址:四川省成都市郫都区现代工业港北区蜀新大道 356 号西冶科技园。邮政编码:611743。E-mail:shiyitianya@163.com

表 1　原矿化学多元素分析结果

Table 1　Muti-element analysis of the raw ore

项目	Li_2O	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	MnO	PbO
质量分数	1.49	16.19	1.76	0.405	0.300	2.53	3.64	0.110	0.022
项目	BaO	SnO_2*	Nb_2O_5*	Ta_2O_5*	SiO_2	BeO*	Rb_2O*	Cs_2O*	P_2O_5
质量分数	0.044	644	122	64.6	71.14	366.7	1020	315	0.422

量单位:w_B/%;带 * 者 $w_B/10^{-6}$。

表 2　原矿矿物组成及其含量

Table 2　Mineral composition of raw ore and contents of each mineral

项目	锂辉石	含锂白云母	磷锂铝石	电气石	石英	黑云母	钠长石	钾长石	磷灰石
w_B/%	18.80	7.44	0.40	3.19	27.33	2.05	30.16	9.52	0.40
项目	铌钽铁矿	锆石	高岭石	锡石	绿泥石	磁黄铁矿	碳酸盐矿物	其他	合计
w_B/%	0.01	0.01	0.23	0.01	0.21	0.03	0.03	0.18	100.0

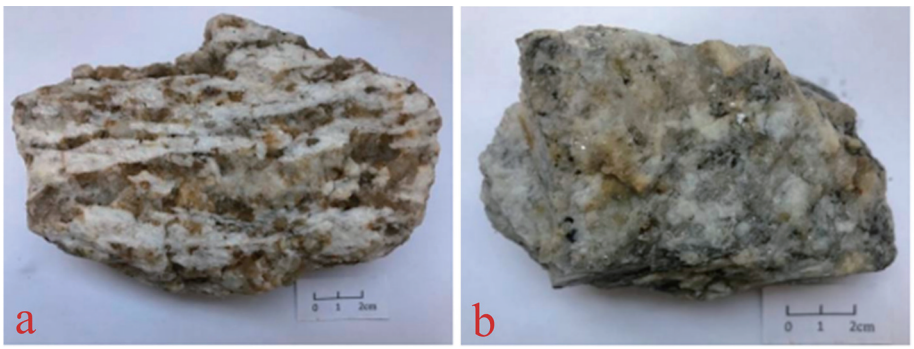

图 1　锂辉石矿的矿石结构

Fig. 1　Structure of spodumene ore

a. 伟晶结构;b. 半自形粒状结构

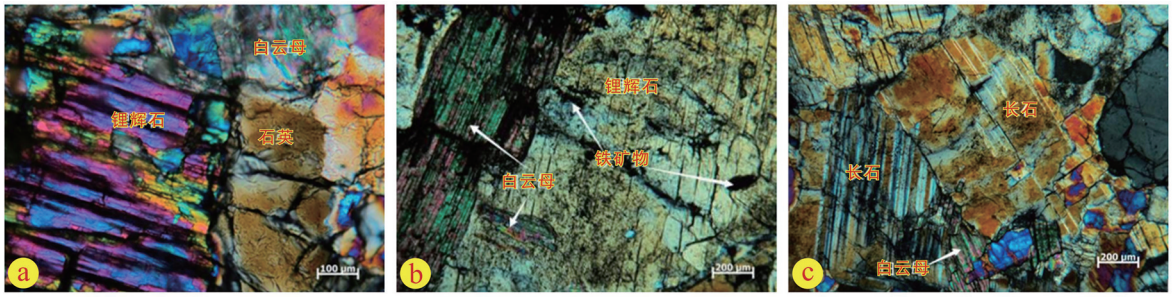

图 2　锂辉石矿的矿物嵌布特征显微照片

Fig. 2　Microscopic photo showing mineral embedding characteristics of spodumene ore

a. 锂辉石与石英和白云母共生嵌布;b. 锂辉石中包裹铁矿物和白云母;c. 长石与白云母共生嵌布

(2)含锂白云母。矿石中的云母主要为含锂白云母,少量为黑云母。粒度分布不均,主要以集合体形式产出,与长石、石英、锂辉石、黑云母等紧密共生(图 2a)。粒径大小 1～5 mm,大者可达 1～2 cm(图 2c)。

(3)磷锂铝石。矿石中磷锂铝石含量较低,仅占矿物总量的 0.35%。显微镜下观察发现,磷锂铝石颜色呈微带黄的灰白色、白色以及粉红色,玻璃光泽或油脂光泽。常与锂辉石、微斜长石或条纹长石、石英、含锂白云母、电气石等共生。磷锂铝石可见被晚期矿物交代,生成许多次生磷酸盐矿物(图 3a)。矿石中磷锂铝石以他形粒状为主,粒径介于 0.05～

0.2 mm 之间。

(4)铌钽铁矿。矿石中主要是铌钽铁矿,化学式为$(Fe,Mn)(Nb,Ta)_2O_6$,其中 Fe 与 Mn、Nb 与 Ta 为完全类质同象。通常含有 Ti、Sn、W、Y、U、Zr 等类质同象或机械混入物[7-9]。原矿中含有可供综合回收的 Nb、Ta 元素,但含量较低,矿物含量仅为 0.01%。铌钽铁矿在矿石中呈针状、短柱状、纤维状,粒径介于 0.02～0.1 mm 之间(图 3b、图 3c)。对铌钽铁矿进行电子探针分析得知,其中平均含有 44%左右的 Nb_2O_5、27%左右的 Ta_2O_5。

(5)锡石。锡石化学组成为 SnO_2,晶体属四方晶系的氧化物矿物。常含 Fe 和 Ta、Nb 等氧化物的细分散包裹物,但 Nb、Ta 也可以类质同象方式替代 Sn。锡石在矿石中含量较低,仅占矿物总量的 0.01%,常呈半自形-自形晶粒状赋存于脉石矿物中,或呈微细粒状嵌布于锂辉石中。对其进行能谱分析得知锡石中含微量的 Rb(图 3d)。

(6)脉石矿物。矿石的脉石矿物主要为长石和石英,长石常以集合体形式产出,使其工艺粒度有所增大。长石的粒径介于 0.1～2 mm 之间,大者可达 5 mm;石英粒度粗者 2～5 mm,小者仅 0.01～0.05 mm,一般为 0.5～1.5 mm;云母单体片径大者 2～4 mm,小者 0.01～0.1 mm,一般 0.4～1 mm。

1.5 矿石主要成矿元素的赋存状态

矿石破碎后经人工挑选出含锂单矿物,采用化学分析、扫描电镜、AMICS 矿物自动分析等方法确定了矿石含锂矿物的构成,进而确定矿石中 Li 元素的赋存状态及分布状况。对矿石中的 Li_2O 进行平衡配分计算,结果见表 3。

Li_2O 的平衡配分结果显示,原矿中锂辉石中的 Li_2O 含量占总量的 90.6%,表明该矿中 Li 元素绝大部分都赋存于锂辉石中,其他矿物中的 Li 元素分布率较低,锂辉石是矿石中 Li 的主要回收矿物。其锂辉石精矿 Li_2O 的理论品位为 7.14%,理论回收率为 90.60%。而剩下的含锂白云母、电气石、磷锂铝石、石英及长石中微量的 Li 为选矿试验的合理损失。

同时查明矿石中主要伴生元素 Sn、Nb 和 Ta 均存在于独立矿物中,Sn 主要以锡石的形式存在,锡石含量占总矿物量的 0.01%;Nb 和 Ta 则赋存于铌钽铁矿中,含量占矿物总量的 0.01%。

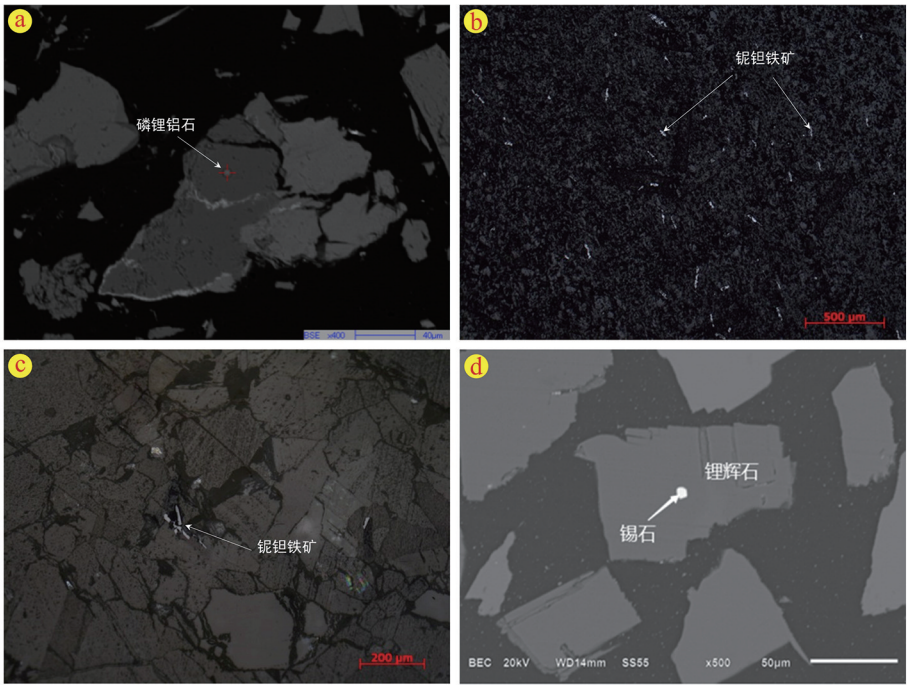

图 3 锂矿石中伴生矿物的显微特征

Fig. 3 Microscopic characteristics of the associated minerals in lithium ore

a. 磷锂铝石(扫描电镜);b. 针状铌钽铁矿(光片);
c. 十字形铌钽铁矿(光片);d. 锡石嵌布于锂辉石中(扫描电镜)

表 3　原矿锂元素的平衡配分结果

Table 3　Balanced distribution of Li in raw ore

矿物名称	矿物含量 φ_B/%	品位 $w(Li_2O)$/%	金属量 $w(Li_2O)$/%	分布率/%
锂辉石	18.80	7.14	1.34	90.60
磷锂铝石*	0.40	9.29	0.037	2.50
电气石	3.19	0.06	0.002	0.14
含锂白云母	7.44	0.30	0.022	1.50
石英类	27.33	0.07	0.019	1.28
长石类	39.68	0.15	0.059	3.98
其他	3.16	—	—	—
合 计	100.00	—	1.479	100.00
原矿综合样品位 $w(Li_2O)$/%			1.490	
平衡系数(k)			1.479/1.490=99.26	

1.6　主要矿物在不同磨矿细度条件下的解离度

对原矿在磨矿细度−0.074 mm 占 55%、65%、75%、85%、95%产品中的锂辉石、含锂白云母的单体解离度进行分析。结果表明,原矿中锂辉石的解离性较含锂白云母好,在磨矿细度−0.074 mm 占 75%时,锂辉石的单体解离度为 93.56%;含锂白云母在细度−0.074 mm 占 85%时,其单体解离度为 87.58%。解离度检测结果详见表 4。

表 4　解离度检测结果

Table 4　Results of dissociation degree test

磨矿细度 −0.074mm	矿物	解离度/%	
		单体	连生体
55%	锂辉石	73.77	26.23
	含锂白云母	66.25	33.75
65%	锂辉石	83.25	16.75
	含锂白云母	76.48	23.52
75%	锂辉石	93.56	6.44
	含锂白云母	82.47	17.53
85%	锂辉石	95.63	4.37
	含锂白云母	87.58	12.42
95%	锂辉石	96.95	3.05
	含锂白云母	90.16	9.84

2　影响原矿中有价元素选矿指标的因素

矿石中锂辉石、长石、石英、云母等矿物的粒度普遍粗大,锂辉石晶体解理、裂理十分发育,在破磨过程中锂辉石易于细化,有利于锂辉石的解离和浮选。同时,原矿不同磨矿细度产品中锂辉石的单体解离度结果也表明,矿石中锂辉石解离性较好,在磨矿细度−0.074 mm 占 75%时,锂辉石的单体解离度为 93.56%。因此,在选矿过程中应尽量避免锂辉石的过度研磨。在药剂制度能较好回收锂辉石的条件下,磨矿细度宜在−0.074 mm 占 75%左右。

矿样以伟晶岩型矿石为主,脉石含量大,且种类繁多。这部分脉石无磁性,比重与锂辉石相近,任其混入原矿中会降低入选品位,且增加选矿难度。但可以利用脉石颜色较锂辉石颜色深、可浮性较锂辉石好的特点,提前对粗粒原矿采用“色选”工艺预先抛掉深色脉石,或者在浮选回收锂辉石前采用“预浮选”工艺流程,提前去除原矿中易浮的脉石矿物,提高锂辉石的入选品位,达到节能增效的目的。

在选矿作业时应该留意 Fe、P 元素对锂辉石精矿品质的影响。研究中发现,锂辉石中含微量的 Fe,锂辉石解理、裂理发育缝隙常被铁质充填,若不除去,容易对锂辉石品级造成影响;同时锂辉石矿物中还偶见 0.05～0.1 mm 的微细磷灰石包体,选矿作业时应重点关注这部分含磷的矿物,避免精矿中 P 元素含量超标。

3　结论

(1)雅江县伟晶岩型锂多金属矿 Li_2O 含量较高,达到了 1.49%,是该矿主要的回收元素。伴生有价元素主要为 Nb、Ta 和 Sn,其中 Nb_2O_5 含量为 0.0122%,Ta_2O_5 含量为 0.00646%(≥0.0030%),SnO_2 含量为 0.0644%,可考虑综合回收。

(2)矿石中主要的含锂矿物为锂辉石和含锂白云母,另有少量电气石和微量磷锂铝石;伴生的铌钽矿物类型为铌钽铁矿,含锡矿物主要为锡石,二者含量极低;脉石矿物含量较高,且种类繁多,主要有石英、钠长石、钾长石,另有少量黑云母、磷灰石、高岭石、绿泥石。

(3)Li_2O 平衡配分结果表明,Li_2O 主要赋存在

锂辉石中，锂辉石中 Li_2O 品位 7.14%，分布率为 90.60%；其次赋存在磷锂铝石和含锂白云母中，分布率分别为 2.50%和 1.50%；少量 Li_2O 赋存于电气石中，分布率为 0.15%。同时，石英类和长石类脉石矿物中 Li_2O 含量分别占 1.28%和 3.98%。在选矿过程中，应采取措施避免磷锂铝石和含锂白云母进入锂精矿中，虽然这样会造成少量回收率的损失，但可以保证锂精矿质量。

(4)Sn 元素主要赋存于锡石中，Nb、Ta 主要赋存于铌钽铁矿中，由于其粒度较细且含量较低，在综合回收锡精矿、铌钽精矿时，选矿工艺应尽量简单，以降低选矿成本。

根据原矿的工艺矿物学特征，建议考虑“预浮选(或色选)除杂—浮选—强磁—重选”的联合选矿工艺流程，在适中的磨矿细度条件下，得到指标较佳的锂辉石精矿。同时，矿石中的 Sn、Nb 和 Ta 也能得到充分的回收利用。

参考文献：

[1] 吴西顺，王登红，黄文斌，等. 全球锂矿及伴生铍铌钽的采选冶技术发展趋势[J]. 矿产综合利用，2019(1)：1－6.

[2] 李成秀，王国祥，王昌良，等. 四川某锂多金属矿综合回收试验研究[J]. 矿产综合利用，2008(6)：3－6.

[3] 应永朋，赵玉卿，熊艳，等. 青海某伟晶岩型锂铍矿工艺矿物学研究[J]. 矿产综合利用，2023(5)：75－79.

[4] 朱文龙，黄万抚. 国内外锂矿物资源概况及其选矿工艺综述[J]. 现代矿业，2010(7)：1－4.

[5] 刘丽君，王登红，刘喜方，等. 国内外锂矿主要类型、分布特点及勘查开发现状[J]. 中国地质，2017，44(2)：263－278.

[6] 周乐光. 工艺矿物学[M]. 北京：冶金工业出版社，2002：270.

[7] 叶强. 从锂辉石矿中综合回收铌钽铁矿及锡石矿的试验研究[J]. 新疆有色金属，2006(1)：16－18.

[8] 周旻，曾晓建，陈正钱. 江西葛源稀有金属矿床铌钽赋存状态[J]. 江西有色金属，2006(4)：1－5.

[9] 邓攀，陈玉明，叶锦华，等. 全球铌钽资源分布概况及产业发展形势分析[J]. 中国矿业，2019，28(4)：63－68.

Study on process mineralogy of Li-poly-metallic ore in Yajiang county, Sichuan ptovince

DU Xin[1,2], **SHI Lei**[1,2], **YUAN Jingjie**[1,2], **WANG Yan**[1,2], **LI Binrong**[1,2]

(1. *Sichuan Metallurgical Exploration Institute*, *Chengdu* 610051, *Sichuan Province*, *China*;
2. *Sichuan Xiye Testing Technology Co.*, *Ltd.*, *Chengdu* 611743, *Sichuan Province*, *China*)

Abstract: Li-poly-metallic ore occurs in Yajiang county, Sichuan Province. This paper deals with process mineralogy of the ore and technology of multi-element chemical analysis, optical microscopy, X-ray diffraction analysis, artificial panning, electronic probe, scanning electronic microscope-energy spectrum detection etc. are applied to study the process mineralogy. Li_2O grade of the ore is 1.49% and niobium, tantalum and tin can be recovered as by-products. Mineral composition, chemical property of the raw ore, embed partial size of the main minerals and occurrences and their symbiotic relationship are acertained. Then factors affecting recovery of spodumene, niobium tantalite and cassiterite of the ore are pointed out and suggestion proposed for later ore dressing and metallurgical experiments.

Key Words: Li-poly-metallic ore; spodumene; niobium tantalum ore; process mineralogy; Sichuan Province