

# 四川党坝锂辉石矿VI号脉工艺矿物学及 锂的赋存状态研究

恽虎<sup>1</sup>, 费光春<sup>1</sup>, 朱汇派<sup>2</sup>, 谭华<sup>2</sup>, 蔡云华<sup>2</sup>, 李佑国<sup>1</sup>, 陈宵杰<sup>1</sup>, 赵文皓<sup>1</sup>,  
陈治坪<sup>1</sup>, 罗小龙<sup>1</sup>, 陈曦<sup>3</sup>

(1. 成都理工大学地球科学学院, 自然资源部构造矿成藏重点实验室, 四川成都 610059; 2. 四川省地质矿产勘查  
开发局化探队, 四川德阳 618000; 3. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川成都 610500)

**摘要:** 党坝锂辉石矿床位于四川可尔因矿田的东南部, 其VI号脉是矿区新发现的稀有金属伟晶岩脉, 矿石研究程度低。为合理开发利用党坝锂辉石矿床锂资源并且为选矿工艺流程的制定提供理论依据, 文章以党坝锂辉石矿床VI号脉锂辉石矿石为研究对象, 采用显微镜下观察、电子探针(EPMA)、激光剥蚀等离子质谱(LA-ICP-MS)、X射线衍射分析(XRD)、矿物自动定量分析系统(TIMA)和矿物解离分析仪(MLA)等测试手段, 开展了详细的工艺矿物学研究。结果显示, 矿石中Li<sub>2</sub>O含量为0.99%, 锂辉石是主要的矿石矿物, 脉石矿物主要为长石和石英, 其次为云母。锂辉石晶体虽然粒度粗细不均, 但是多集中在中粗粒范围内(320~1280 μm), 属于均匀较易解离矿石类型。矿石中锂主要赋存于锂辉石中, 锂辉石中锂的配分比为97.80%, 伴生有Nb、Be等有益组分且达到综合回收指标值。LA-ICP-MS实测锂辉石中Li<sub>2</sub>O的平均含量为6.88%, 锂辉石单矿物电子探针结果显示锂辉石中含有FeO(0.45%~0.73%), 且少量Fe、Mn等杂质充填在锂辉石的解理、裂隙中, 会一定程度上限制锂辉石精矿品级。

**关键词:** 锂辉石; 工艺矿物学; 赋存状态; 党坝锂辉石矿

中图分类号: P578.954; P618.71; P579

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)03-0407-10

## Study on process mineralogy and occurrence state of lithium from No. VI vein of Dangba spodumene ore in Sichuan Province

YUN Hu<sup>1</sup>, FEI Guang-chun<sup>1</sup>, ZHU Hui-pai<sup>2</sup>, TAN Hua<sup>2</sup>, CAI Yun-hua<sup>2</sup>, LI You-guo<sup>1</sup>, CHEN Xiao-jie<sup>1</sup>,  
ZHAO Wen-hao<sup>1</sup>, CHEN Zhi-ping<sup>1</sup>, LUO Xiao-long<sup>1</sup> and CHEN Xi<sup>3</sup>

(1. College of Earth Science, Key Laboratory of Tectonic Controls on Mineralization and Hydrocarbon Accumulation, Ministry of Natural Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Geochemistry Exploration Team of the Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, Deyang 618000, China; 3. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** Dangba spodumene deposit is located in the southeast of Sichuan Ke'eryin orefield. The No. VI vein is a newly discovered rare metal pegmatite vein in the mining area, and the ore research degree is low. In order to reasonably develop and utilize the lithium resources of the Dangba spodumene deposit and provide theoretical basis for the formulation of beneficiation process, the detailed process mineralogy research of the spodumene ore from No. VI vein of the Dangba spodumene deposit was studied by microscopic observation, electron probe microanalysis (EPMA), laser ablation plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS), X-ray diffraction analysis (XRD), Tescan integrated

收稿日期: 2022-12-02; 接受日期: 2023-03-02; 编辑: 曲丽莉

基金项目: 四川省科技厅应用基础研究(2021yj0309); 四川省地质矿产勘查开发局化探队科研项目(HTD2022-005)

作者简介: 恽虎(1998-), 男, 硕士研究生, 地质工程专业, E-mail: 869241522@qq.com; 通讯作者: 费光春(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事稀有金属矿床成矿作用及综合利用研究, E-mail: feiguangchun07@cdut.cn。

mineral analyzer (TIMA), and mineral liberation analyzer (MLA). The results show that the content of  $\text{Li}_2\text{O}$  in the ore is 0.99%, the main ore mineral is spodumene, while the gangue minerals mainly include feldspar and quartz, followed by mica. Although the particle size of spodumene crystals is uneven, they are mostly concentrated in the range of medium to coarse particles (320~1 280  $\mu\text{m}$ ), which belongs to the ore type that is homogeneous and easy to dissociate. Lithium mainly occurs in spodumene, with a lithium-partition ratio of 97.8%. Nb and Be are associated with lithium and reach the comprehensive recycling indices. The mean content of  $\text{Li}_2\text{O}$  in spodumene is 6.88% by LA-ICP-MS. The spodumene contains FeO (0.45%~0.73%) by EPMA, and a small amount of impurities such as Fe and Mn and other are filled in the cleft and cracks of spodumene, which will limit the grade of spodumene concentrate.

**Key words:** spodumene; process mineralogy; occurrence state; Dangba spodumene ore

**Fund support:** Science and Technology Department of Sichuan Province (2021yj0309); Geochemistry Exploration Team of the Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources (HTD2022-2025)

锂属低碳能源金属,是实现地球低碳化的关键元素,也是我国关键战略金属之一,在航天航空、新能源汽车和高新技术等方面具有重要的战略价值(翟明国等, 2019; Sovacool *et al.*, 2020)。自然界中发现的锂矿床主要有3大类:卤水型、伟晶岩型和沉积岩型(许志琴等, 2021)。虽然我国卤水型锂矿储量巨大,但开发利用技术尚未成熟,而花岗伟晶岩型锂矿由于品位高、规模大、易开发的特点而成为我国锂等稀有金属的主要来源之一(王登红等, 2022)。花岗伟晶岩矿石提锂成为了锂资源的重要获取途径。近年来,我国在花岗伟晶岩型锂矿床勘查工作中取得了重大的突破,在长约2 800 km的松潘-甘孜-甜水海造山带中,发现和探明了一些超大型-大型花岗伟晶岩型锂矿床,如四川西部的甲基卡矿田和马尔康的可尔因矿田(王登红等, 2017; Fei *et al.*, 2020; 袁彦伟等, 2022),其中甲基卡锂矿床是目前中国乃至亚洲最大的锂辉石型稀有金属矿床(李名则等, 2018),可尔因矿田亦发现了李家沟和党坝2个超大型稀有金属锂辉石矿床。

党坝锂辉石矿床(下文简称党坝矿床)位于四川省阿坝州马尔康县党坝乡,可尔因矿田东南部,探明的 $\text{Li}_2\text{O}$ 规模达到超大型(王子平等, 2018)。前人对党坝矿床的研究主要集中在矿区北带的Ⅷ号脉,主要开展了成矿规律(古城会, 2014; 马圣钞等, 2019)、成矿年代学(费光春等, 2020)以及矿物学特征(罗小龙等, 2023)等研究。近年来四川省地质矿产勘查开发局化探队对党坝矿区的中部地拉秋地段的伟晶岩实施了钻孔控制,深部找矿取得了重大突破,并开展了伟晶岩地球化学特征及年代学研究(谭华等, 2023; 朱汇派等, 2023)。VI号脉是党坝矿区

中带新发现的典型稀有金属伟晶岩脉,矿石研究程度低。本文以党坝矿区中部的VI号脉为研究对象,通过显微镜下鉴定、电子探针(EPMA)、激光剥蚀等离子质谱(LA-ICP-MS)、X射线衍射分析(XRD)、矿物自动定量分析系统(TIM A)和矿物解离分析仪(MLA)等测试手段,开展了系统的矿石工艺矿物学研究,查明了矿石的组构特征、化学成分、矿物组成、主要矿物的嵌布特征及工艺粒度、锂辉石单体解离度和锂的赋存状态等工艺矿物学特征,为合理开发利用该矿床锂资源提供了理论依据,并为制订最佳选矿工艺流程提供了详尽可靠的资料。

## 1 地质概况

可尔因矿田在大地构造位置上处于松潘-甘孜造山带中段,夹在羌塘-昌都板块、华北板块和扬子板块之间(图1a)(许志琴等, 2018)。可尔因矿田内主要出露三叠系西康群的一套复理石沉积地层,包括上三叠统杂谷脑组( $T_3z$ )、侏倭组( $T_3zw$ )和新都桥组( $T_3x$ ),该区由于印支期碰撞造山运动使地壳抬升并在燕山期受到长期风化剥蚀,导致缺失侏罗纪、白垩纪和第三纪的地层,其岩性主要由灰黑色变质长英质砂岩和粉砂岩、绢云母板岩、泥质板岩及结晶灰岩等组成(费光春等, 2020)。可尔因矿田出露的侵入岩主要是可尔因岩体和太阳河岩体。可尔因岩体由二云母花岗岩、黑云母正长花岗岩、黑云母二长花岗岩和白云母钠长花岗岩组成;太阳河岩体主要由黑云母二长花岗岩和石英闪长岩组成。因侵入岩体岩浆的烘烤作用,在围岩与侵入岩体接触部位及邻区发生了热接触变质作用。围绕可尔因和太阳河





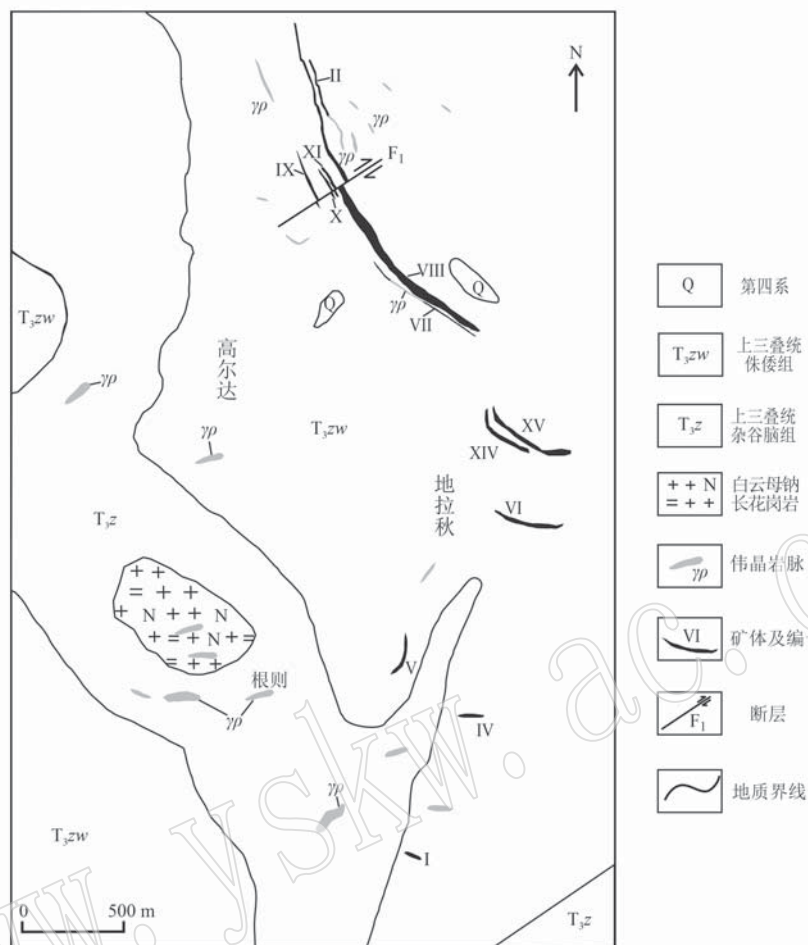


图2 党坝矿区地质简图[底图据费光春等(2020)修编]

Fig.2 Geological map of the Dangba deposit (modified from Fei Guangchun *et al.*, 2020)

体外侧局部发育少量无矿伟晶岩(钠长石伟晶岩),其顶板围岩为侏倭组绢云母板岩和阳起长英角岩互层,底板围岩为侏倭组阳起长英角岩(图3b)。

## 2 样品采集和分析方法

本次分析的矿石样品采集自VI号脉地表露头及钻孔。显微镜下观察鉴定拍照在成都理工大学地球科学学院综合岩矿鉴定实验室完成。矿石多元素分析和矿物综合矿物分析(TIMA)在河北廊坊市诚谱检测地质服务公司完成。主量元素采用 ICP-OES (Agilent 720) 进行测定,主要氧化物浓度(>0.5%)的分析精度为±2%,次要氧化物浓度(0.1%~0.5%)的分析精度为±5%。微量元素采用 Jena 等离子体定量电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS),分析的误差值为±5%。TIMA 实验加速电压 HV 为 25 kV,工作

距离为 15 mm,电流大小为 5 nA。锂辉石电子探针成分分析在西南石油大学地球科学与技术学院电子探针实验室完成。分析测试的仪器型号为 JEOL-JXA-8230,配备有 4 道波谱仪,测试条件为加速电压 15 kV,加速电流 20 nA,束斑直径 10 μm,测试数据均进行了 ZAF 校正处理。矿物原位微量元素含量在武汉上谱分析科技有限责任公司用 LA-ICP-MS 完成。测试所使用的仪器为 GeolasPro 激光剥蚀系统,由 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成,ICP-MS 型号为 Agilent 7700e,激光束斑大小为 44 μm,频率为 5 Hz。数据处理采用标准物质 BIR-1G, BCR-2G 和 BHVO-2G 进行多外标无内标校正。X 射线粉晶衍射在自然资源部构造矿成藏重点实验室完成,测试条件为最大功率≥3 000 W,光管焦斑≤0.4 mm×12 mm。采用光学编码器技术,测角仪半径≥250 mm,2θ 转

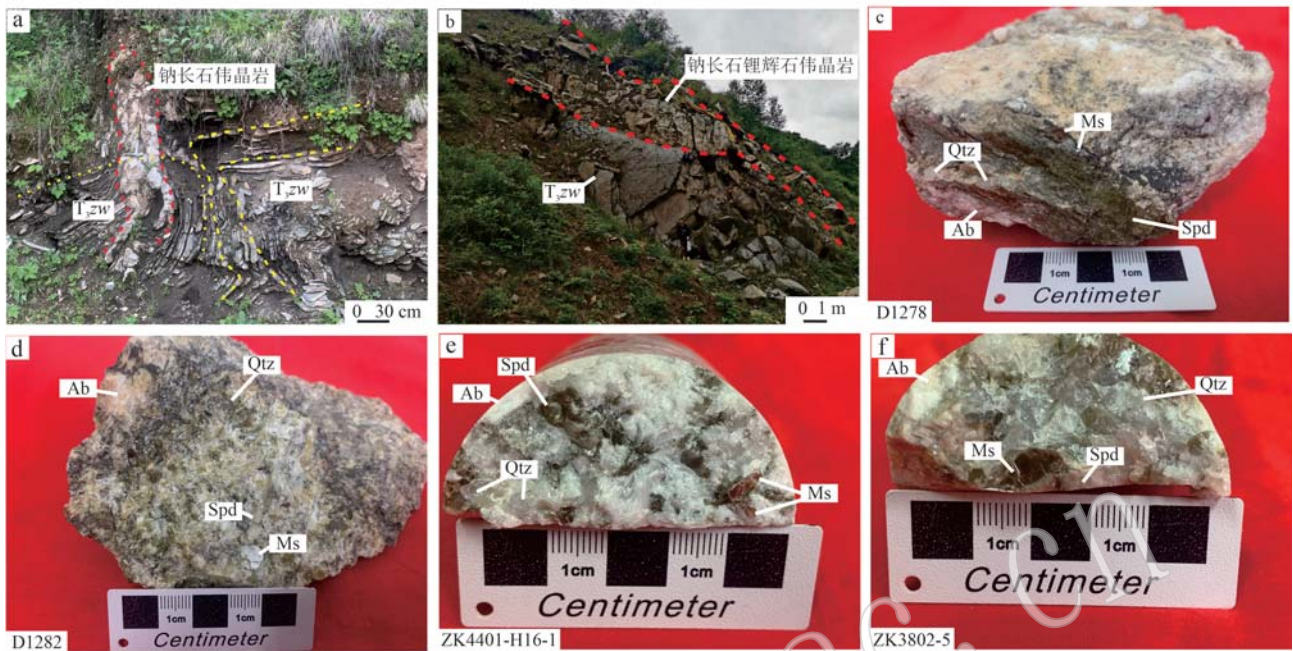


图 3 党坝花岗伟晶岩野外露头 and 手标本照片

Fig. 3 Field and hand specimen photos of the Dangba granitic pegmatite

a—侏倭组切层产出的钠长石伟晶岩；b—VI号脉与围岩( $T_{3zw}$ )分界线；c—D1278 手标本；d—D1282 手标本；e—ZK4401-H16-1 手标本；f—ZK3802-5 手标本； $T_{3zw}$ —上三叠统侏倭组；Ab—钠长石；Ms—白云母；Qtz—石英；Spd—锂辉石  
a—albite pegmatite penetrated into Zhuwu Formation；b—the boundary between No. VI vein and wall rock( $T_{3zw}$ )；c—hand specimen of D1278；d—hand specimen of D1282；e—hand specimen of ZK4401-H16-1；f—hand specimen of ZK3802-5； $T_{3zw}$ —Upper Triassic Zhuwu Formation；  
Ab—albite；Ms—muscovite；Qtz—quartz；Spd—spodumene

动范围： $-110^{\circ} \sim 168^{\circ}$ ，可读最小步长：0.000  $1^{\circ}$ ，测量  $2\theta$  角度最低从  $0.2^{\circ}$  开始。矿物解离分析 (MLA) 测试在湖南碚金矿业科技有限公司进行，分析仪器为 MLA 650，矿物参数自动分析系统软件型号为 MLA 3.1。采用 MLA XBSE\_STD 模式，扫描电镜设置工作距离 10 mm，电压 20 kV，放大倍数 300 ~ 1 000 倍，光斑大小为  $6.3 \mu\text{m}$ 。

### 3 矿石组构特征

样品整体以灰白色为主，局部呈浅灰绿色，常有黑色铁锰质矿物嵌布。原矿矿石的构造以块状构造为主，少量条带状和斑杂状构造，矿石的结构以伟晶

结构、花岗结构为主，此外还有自形结构、半自形结构、溶蚀结构、残余结构和后成合晶结构等(图 3c~f)。

## 4 矿石物质组成

### 4.1 化学组成

伟晶岩矿石的多元素化学成分见表 1。矿石中锂是主要的可以供工业利用的元素， $\text{Li}_2\text{O}$  平均品位为 0.99%。 $\text{Nb}_2\text{O}_5$  平均品位为 0.01%， $\text{Ta}_2\text{O}_5$  平均品位为 0.004%， $\text{BeO}$  平均品位为 0.05%。 $\text{Rb}_2\text{O}$ 、 $\text{SnO}_2$  和  $\text{Cs}_2\text{O}$  平均品位低，分别为 0.045%，0.004% 和 0.008%。整体上看，矿石属于低品位锂多金属矿石。

表 1 矿石多元素分析结果

Table 1 The chemical analysis of multi-elements of pegmatite ore samples

$w_B/\%$

成分	$\text{Li}_2\text{O}$	$\text{Nb}_2\text{O}_5$	$\text{Ta}_2\text{O}_5$	$\text{SnO}_2$	$\text{BeO}$	$\text{Rb}_2\text{O}$	$\text{Cs}_2\text{O}$	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	TFe	MnO	MgO	CaO	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$
含量	0.99	0.01	0.004	0.004	0.05	0.045	0.008	72.53	17.39	0.36	0.055	0.04	0.30	5.31	2.31	0.26



## 4.2 矿物组成

利用光学显微镜镜下观察,矿石的主要矿物组成为锂辉石、石英、钠长石、微斜长石和白云母(图

4a、4b);副矿物有铌钽铁矿(图4c)、锡石、磷灰石和锆石等。

依据伟晶岩矿石全岩XRD衍射图谱和衍射数

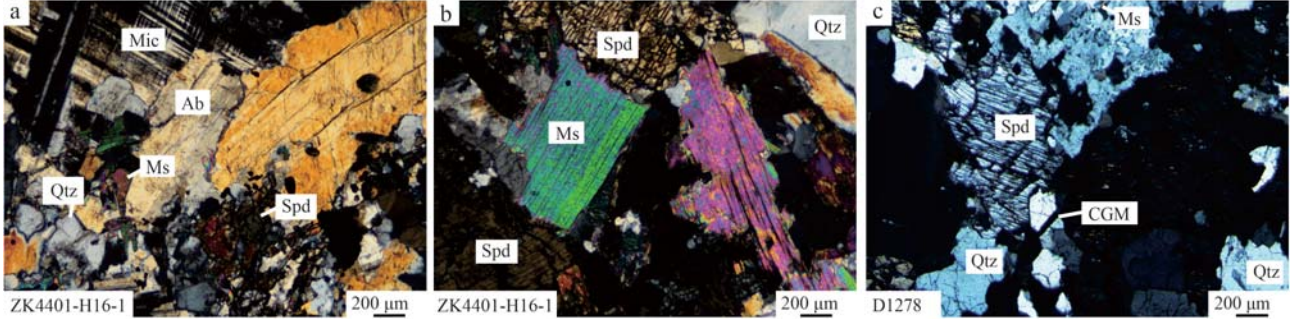


图4 矿石中矿物显微照片

Fig. 4 The microscopic photographs of minerals from the ore

a—锂辉石交代蚀变强烈,与钠长石、白云母、石英和微斜长石共生(正交偏光); b—锂辉石与白云母毗邻镶嵌(正交偏光); c—锂辉石与石英毗邻镶嵌,与白云母和铌钽铁矿共生(正交偏光); Ab—钠长石; Mic—微斜长石; Ms—白云母; Spd—锂辉石; Qtz—石英; CGM—铌钽铁矿

a—strong metasomatic alteration of spodumene, paragenesis with albite, muscovite, quartz and microcline (crossed polarizer); b—spodumene and muscovite constitutes adjacent mosaic (crossed polarizer); c—spodumene and quartz constitutes adjacent mosaic, paragenesis with muscovite and columbite group minerals (CGM) (crossed polarizer); Ab—albite; Mic—microcline; Ms—muscovite; Spd—spodumene; Qtz—quartz;

CGM—columbite group minerals

据分析可知,VI号脉矿石中主要的矿物成分为锂辉石(Spd)、钠长石(Ab)、白云母(Ms)、石英(Qtz)和微斜长石(Mic)(图5),这与手标本及镜下观察到的矿物共生组合一致。

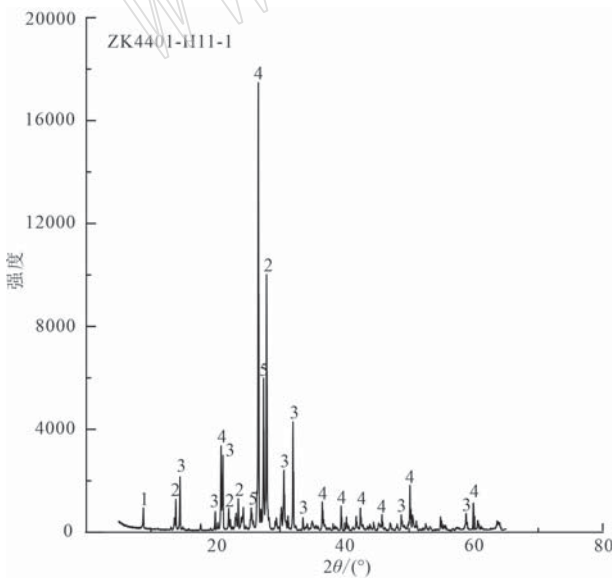


图5 原矿X射线粉晶衍射图

Fig. 5 X-ray powder diffraction pattern of raw ore

1—白云母; 2—钠长石; 3—锂辉石; 4—石英; 5—微斜长石

1—muscovite; 2—albite; 3—spodumene; 4—quartz;

5—microcline

在镜下观察和XRD分析的基础上,将原矿样品碎样后,采用MLA矿物解离分析,测定不同粒径下矿石主要矿物组成(表2)。结果表明,矿石的矿物主要为锂辉石、石英、钠长石和白云母,矿物量达到了矿石的96%以上。矿石的主要独立锂矿物为锂辉石。

矿石中锂辉石电子探针化学分析结果见表3。 $Al_2O_3$ 的含量为27.32%~27.60%,平均值(27.5%)略高于理论值(27.40%)。锂辉石中含FeO(0.45%~0.73%)、MnO(0.07%~0.12%)和 $Na_2O$ (0.08%~0.11%)的杂质,可能会对锂辉石精矿品级有一定影响。因电子探针无法直接测试 $Li_2O$ 含量,本文中 $Li_2O^*$ 含量由LA-ICP-MS测试。实测的 $Li_2O$ 含量(6.48%~7.49%,平均值6.88%),低于理论值(8.02%)。综上所述,锂辉石中存在钠、钾替代晶格中的锂等类质同象替代的现象(白峰等,2011)。

利用TIMA对矿石中铌钽铁矿开展能谱自动识别分析(表4),矿物中检测出主要元素为Nb、O、Ta、Fe和Mn,以及少量的Ti和Mg,其中Nb、O、Ta、Fe和Mn元素含量达到98.33%,说明铌钽铁矿较纯。铌钽铁矿的种类以铌锰矿、铌铁矿为主,少量钽铁矿。

## 4.3 主要矿物的嵌布特征及工艺粒度

### 4.3.1 锂辉石

锂辉石肉眼颜色为乳白色、浅绿色-黄绿色。矿

表2 矿石主要矿物含量的 MLA 分析结果

 $w_B/\%$ 

Table 2 The content of the major minerals in ore by MLA

矿物	锂辉石	石英	钠长石	白云母	微斜长石	黑云母、Iron 铁屑、磷灰石、铌钽铁矿、 锡石、磷锰矿、高岭石、方解石等	总量
0.106~0.075 mm	14.68	26.81	49.77	6.00	1.68	1.06	100.00
<0.075 mm	12.81	24.45	52.97	6.09	2.03	1.66	100.00

表3 锂辉石单矿物电子探针成分分析

 $w_B/\%$ 

Table 3 The monomineral chemical analysis of spodumene by EPMA

测点	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	Li <sub>2</sub> O*	合计
1	0.08	-	0.00	66.26	27.58	0.63	0.12	7.49	102.16
2	0.11	0.01	0.01	65.98	27.32	0.73	0.07	6.48	100.71
3	0.08	0.00	0.02	66.19	27.60	0.45	0.09	6.66	101.09

-代表低于检测限; Li<sub>2</sub>O\* 为锂辉石 LA-ICP-MS 测试结果。

表4 铌钽铁矿单矿物元素含量 TIMA 分析结果

 $w_B/\%$ 

Table 4 The element content of the columbite group minerals by TIMA

元素	Nb	O	Ta	Fe	Mn	Ti	Mg	Si	Sn	Al	Zr	P	Na	其他	合计
含量	35.46	25.19	24.64	9.23	3.81	0.68	0.64	0.16	0.08	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	100.00

石手标本样品中,锂辉石粒径差异较大。锂辉石主要呈较为粗大的柱状晶体产出,长度一般 10~50 mm,个别晶体长度可达 70~100 mm;横断面多为 1~3 mm,个别晶体可达 4~8 mm。细粒的锂辉石一般介于 0.05~0.1 mm 之间。镜下正极高突起,可见两组解理与裂理,干涉色为一级灰白至一级橙。镜下观察显示,锂辉石受石英、钠长石和白云母交代呈交代残余结构,部分颗粒蚀变较弱,边部具后成合晶结构(图 4a)。大部分锂辉石与白云母和石英毗邻镶嵌(图 4b,c)。

将样品破碎至 3 mm,进行缩分制样,在镜下通过顺尺线测法对 VI 号脉多件组合样品进行工艺粒度的测定(表 5)。结果显示,矿石的粒度范围较宽,但整体上,矿石粒度多集中在中粗粒范围内(320~1 280 μm),640~1 280 μm 占据 66%以上,属于均匀矿石类型。

解离度测定结果(表 6)表明,<0.075 mm 粒级和 0.106~0.075 mm 粒级范围的解离度分别为 74.98%和 71.83%。0.074~0.038 mm 粒级的锂辉石可浮性最好,欲使锂辉石获得充分解离,磨矿粒度

表5 锂辉石工艺粒度统计结果

Table 5 The statistical results of processing size of spodumene

粒径范围/μm	0~20	20~40	40~80	80~160	160~320	320~640	640~1 280	1 280~2 264
含量/%	0.002	0.046	0.33	1.232	6.304	24.301	66.636	1.149
累计含量/%	100	99.998	99.952	99.622	98.39	92.085	67.785	1.149

表6 锂辉石单体解离度测定结果

Table 6 Measured results of monomer dissociation degree of the spodumene

产率/%	粒级/mm	单体/%	连生体/%			
			1/4	2/4	3/4	>3/4
28.42	0.6~0.25	63.11	1.96	4.8	11.7	18.43
30.40	0.25~0.106	67.83	2.53	4.31	7.82	17.47
13.69	0.106~0.075	71.83	0.63	1.56	9.38	16.6
27.49	<0.075	74.98	1.16	1.94	9.12	12.8

表 6 中的产率为锂辉石在碎矿磨矿后,各粒级锂辉石质量除以锂辉石破碎前的质量。

达到 0.075 mm 可能为最佳粒径。

#### 4.3.2 长石类

长石(包括钠长石和微斜长石)是矿石样品中最主要的脉石矿物,含量占矿石中矿物总量的 51.45%~55%。

钠长石呈板柱状,粒径一般为 0.2~6 mm,单偏光下无色,正低突起,正交偏光下一级灰白干涉色,有明显的聚片双晶。钠长石常与石英和云母等矿物构成花岗结构,边缘常被白云母交代,内部偶见白云

母包体,多与石英和白云母毗邻镶嵌(图4a)。

微斜长石呈板柱状,粒径一般为2~6 mm,单偏光下无色,正低突起,正交偏光下一级灰白干涉色,格子状双晶明显,呈不对称格子状(图4a)。微斜长石表面存在粘土化,多与钠长石和石英毗邻镶嵌。

#### 4.3.3 石英

石英肉眼颜色一般为无色或乳白色,油脂光泽(图3e,f),少量石英含杂质而呈淡绿色,呈不规则粒状,粒径大小不一,为0.1~10 mm,单偏光下为无色,无多色性,正低突起,正交偏光下为一级灰白干涉色。多与锂辉石、长石和白云母毗邻相嵌(图4a,b),偶见石英与钠长石形成的交代蠕虫结构。

#### 4.3.4 白云母

白云母常呈片状,部分因蚀变呈叶片状、放射状,粒径大小不一,为0.05~1.5 mm,单偏光下无色,正交偏光下干涉色鲜艳、明亮,二级顶至三级顶。常见白云母沿裂隙及边缘交代锂辉石与钠长石,白云母内部偶见钠长石和石英的包体,多与锂辉石、石英和长石毗邻镶嵌(图4a,b)。

#### 4.3.5 铌钽铁矿

铌钽铁矿呈短柱状,不规则粒状,粒径一般为0.05~0.15 mm,透射单偏光下,铌钽铁矿呈深棕红色或不透光。主要与石英、钠长石、锂辉石和白云母共生(图4c)。

## 5 锂的赋存状态

锂辉石单矿物 LA-ICP-MS  $\text{Li}_2\text{O}$  平均含量 6.88%,与矿石  $\text{Li}_2\text{O}$  含量(0.99%)相对应,属于低品位锂多金属矿石,与川西的措拉锂矿石类似(周雄等,2020)。锂辉石中含有少量 Fe、Mn 和 Na 等杂质,FeO、MnO 等铁锰质部分填充在锂辉石解理、裂隙中,在一定程度上限制了锂辉石精矿品级。其中 FeO 的质量分数介于 0.45%~0.73% 之间,这给选矿过程中生产低铁锂辉石(质量分数要求:  $\text{Li}_2\text{O} > 6.0\%$ ,  $\text{FeO} < 0.28\%$ ) 提高了难度(赵开乐等,2014)。

根据矿石中主要单矿物 LA-ICP-MS 的锂分析结果,矿石中主要矿物锂的平衡配分计算结果见表 7。计算结果表明,矿石中 97.80% 的锂赋存于锂辉石中,白云母和电气石中锂的配分量分别为 2.02% 和 0.08%;长石中锂配分量仅有 0.07%。矿石中有益组分以 Li 为主, Li 元素主要以锂辉石矿物形式存在于矿石中,锂辉石是选矿回收锂的主要目标矿物。锂

表 7 矿石中锂的平衡配分计算结果

Table 7 The calculative results of equilibrium assignment of lithium in the ore

矿物	矿物含量/%	Li 含量/ $10^{-6}$	配分量/ $10^{-6}$	配分比/%
锂辉石	14.6	31 905	4 658.13	97.80
白云母	6	1 602	96.12	2.02
钠长石	49.7	2.9	1.44	0.03
微斜长石	2	100	2	0.04
电气石	1	362	3.62	0.08
其他	26.7	6.51	1.74	0.04
总 Li		33 978.4	4 763.05	100
平衡系数(K)	(4 763.05~4 598.55)/4 598.55=3.58%			

注:矿物含量依据手标本,镜下观察以及 MLA 分析矿石中含量综合确定,单矿物中锂的含量来自 LA-ICP-MS 分析结果。

辉石的粒度多集中在中粗粒范围内,与石英、云母等矿物呈边界较平整的毗邻连生镶嵌,同时解理完全,裂理十分发育,该类矿石较易解离,预计需磨矿到 0.075 mm 即可得到较高解离效果。因此锂辉石的综合回收利用较易,能够有效节省选矿成本。但是后成合晶的锂辉石交代较为严重,  $\text{Li}_2\text{O}$  含量从 7.49% 降低到 6.48%, 会一定程度增加回收利用难度。因锂辉石解理完全、裂理十分发育,在破碎及磨矿过程中粒度易于细化,并且有少量锂辉石粒度较细,因此应注意细粒级锂辉石的回收(徐莺等,2013)。

矿石中  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  平均品位达到了伴生综合回收的参考工业指标(0.009%)。MLA 分析(表 2)和镜下鉴定(图 4c)均发现铌钽铁矿,说明 Nb 主要赋存于铌钽铁矿中,可以考虑综合回收。 $\text{BeO}$  的平均品位也刚好达到伴生综合回收最低工业指标(0.04%),但是伟晶岩中未发现绿柱石等含 Be 的矿物,能否有效综合利用还需要进一步的工艺矿物学和选矿试验研究确定。

## 6 结论

(1) 党坝锂辉石矿 VI 号脉矿石中  $\text{Li}_2\text{O}$  含量为 0.99%,矿石中伴生有 Nb、Be 等有益组分达到综合回收指标值,矿样属于低品位锂多金属矿石。

(2) 矿石中的主要矿物有锂辉石、石英、钠长石和白云母等,主要回收稀有金属矿物是锂辉石,锂辉石中锂的配分比为 97.80%。

(3) 矿石中锂辉石矿物粒度多集中在 320~1 280  $\mu\text{m}$  的区间内,属于中粗粒范围均匀矿石类型,该类矿石较易解离,较易回收利用。



(4) LA-ICP-MS 分析显示锂辉石  $\text{Li}_2\text{O}$  较低, 表明锂辉石中存在类质同象替代的现象。锂辉石含有一定的 Fe、Mn 杂质, 可能会对锂辉石精矿品级有一定影响。

## References

- Bai Feng, Feng Hengyi, Zou Sijie, *et al.* 2011. A mineralogical study of spodumene from Guanpo pegmatites in Lushi, Henan Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30 (2): 281~285 (in Chinese with English abstract).
- Fei G C., Menuge J F, Li Y Q, *et al.* 2020. Petrogenesis of the Lijiagou spodumene pegmatites in Songpan-Garze Fold Belt, West Sichuan, China: Evidence from geochemistry, zircon, cassiterite and coltan U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions[J]. *Lithos*, 364~365: 105555.
- Fei Guangchun, Yang Zheng, Yang Jiye, *et al.* 2020. New precise timing constraint for the Dangba granitic pegmatite type rare-metal deposit, Markam, Sichuan Province, evidence from cassiterite LA-MC-ICP-MS U-Pb dating[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94 (3): 836~849 (in Chinese with English abstract).
- Gu Chenghui. 2014. Metallogenic regularity of spodumene deposit in the closely spaced pegmatite area in the southeastern Keeryin pegmatite field, Sichuan Province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 29 (1): 59~65 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiankang. 2006. Mineralizing Mechanism and Continental Geodynamics of Typical Pegmatite Deposits in Western Sichuan, China[D]. China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Li Mingze, Qin Yulong, Li zheng, *et al.* 2018. Geochemical characteristics of two-mica granite and granite pegmatite in Jiajika area, western Sichuan, and their geological implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37 (3): 366~378(in Chinese with English abstract).
- Luo Xiaolong, Cai Yunhua, Liu Yu, *et al.* 2023. Mineralogical characteristics of spodumene in No. VIII pegmatite vein of Dongba spodumene deposit, Sichuan[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, (2): 219~224(in Chinese with English abstract).
- Ma Shengchao, Wang Denghong, Liu Shanbao, *et al.* 2019. Mineral chemistry of micas from Ke'eryin pegmatite type lithium orefield in western Sichuan and its indication for rare metal mineralization and prospecting[J]. *Mineral Deposits*, 38 (4): 877~897 (in Chinese with English abstract).
- Sovacool B K, Ali S H, Bazilian M, *et al.* 2020. Sustainable minerals and metals for a low-carbon future[J]. *Science*, 367 (6 473): 30~33.
- Tan Hua, Fei Guangchun, Cai Yunhua, *et al.* 2023. Geochemical characteristics and significance of pegmatites in the middle and south belts of the Dangba rare-metal deposit in Ke'eryin orefield, Sichuan Province[J]. *Mineralogy and Petrology*, 43(1): 61~72 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Dai Hongzhang, Liu Shanbao, *et al.* 2022. New progress and trend in ten aspects of lithium exploration practice and theoretical research in China in the past decade[J]. *Journal of Geomechanics*, 28 (5): 743~764 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Wang Chenghui, Sun Yan, *et al.* 2017. New progresses and discussion on the survey and research of Li, Be, Ta ore deposits in China[J]. *Geological Survey of China*, 4 (5): 1~8 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ziping, Liu Shanbao, Ma Shengchao, *et al.* 2018. Metallogenic regularity, deep and peripheral prospecting of Dangba superlarge spodumene deposit in Aba, Sichuan Province[J]. *Earth Science*, 43 (6): 2 029~2 041 (in Chinese with English abstract).
- Xu Ying, Yang Lei, Liu Feiyan. 2013. Study on process mineralogy for a spodumene ore in Sichuan [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, (3): 43~46 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Wang Rucheng, Zhao Zhongbao, *et al.* 2018. On the structural backgrounds of the large-scale "hard-rock type" lithium ore belts in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92 (6): 1 091~1 106 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Zhu Wenbin, Zheng Bihai, *et al.* 2021. New energy strategy for lithium resource and the continental dynamics research-celebrating the centenary of the School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95 (10): 2 937~2 954 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Yanwei, Fei Guangchun, Zheng Luo, *et al.* 2022. U-Pb Age and Lu-Hf isotopic of detrital zircon, geochemistry characteristics and geological significance for Zhuwo Formation meta-sedimentary rocks in Ke'eryin region, Western Sichuan[J]. *Earth Science*, 47 (8): 2 902~2 924 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Wu Fuyuan, Hu Ruizhong, *et al.* 2019. Critical metal mineral resources: current research status and scientific issues[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 33 (2): 106~111 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Kaile, Wang Changliang, Deng Wei, *et al.* 2014. Mineralogical characteristics of lithium-polymetallic ore occurred in Sichuan Prov-

- ince, China[J]. *Mineralogy and Petrology*, 34 (1): 10~15 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xiong, Zhou Yu, Tan Hongqi, *et al.* 2020. Mineralogical study on Cuola lithium polymetallic mining area, Western Jijika, Sichuan[J]. *Mineral Resources*, (6): 148~152 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Huipai, Fei Guangchun, Tan Hua, *et al.* 2023. Geological characteristics and metallogenic age of pegmatites in the central zone of the Dangba pegmatite-type rare-metal deposit in the Ke'eryin orefield, Sichuan Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 42(2): 350~359 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 白峰, 冯恒毅, 邹思劼, 等. 2011. 河南卢氏官坡伟晶岩中锂辉石的矿物学特征研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 30 (2): 281~285.
- 费光春, 杨峥, 杨继忆, 等. 2020. 四川马尔康党坝花岗伟晶岩型稀有金属矿床成矿时代的限定: 来自 LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 定年的证据[J]. *地质学报*, 94 (3): 836~849.
- 古城会. 2014. 四川省可尔因伟晶岩田东南密集区锂辉石矿床成矿规律[J]. *地质找矿论丛*, 29 (1): 59~65.
- 李建康. 2006. 川西典型伟晶岩型矿床的形成机理及其大陆动力学背景[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 李名则, 秦宇龙, 李铨, 等. 2018. 川西甲基卡二云母花岗岩与伟晶岩脉地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 37 (3): 366~378.
- 罗小龙, 蔡云华, 柳榆, 等. 2023. 四川党坝锂辉石矿床Ⅷ号脉锂辉石矿物学特征[J]. *矿产综合利用*, (2): 219~214.
- 马圣钞, 王登红, 刘善宝, 等. 2019. 川西可尔因锂矿田云母矿物化学及稀有金属成矿和找矿指示[J]. *矿床地质*, 38 (4): 877~897.
- 谭华, 费光春, 蔡云华, 等. 2023. 四川可尔因矿田党坝稀有金属矿床中带和南带伟晶岩地球化学特征及地质意义[J]. *矿物岩石*, 43(1): 61~72.
- 王登红, 代鸿章, 刘善宝, 等. 2022. 中国锂矿十年来勘查实践和理论研究的十个方面新进展新趋势[J]. *地质力学学报*, 28 (5): 743~764.
- 王登红, 王成辉, 孙艳, 等. 2017. 我国锂铍钽矿床调查研究进展及相关问题简述[J]. *中国地质调查*, 4 (5): 1~8.
- 王子平, 刘善宝, 马圣钞, 等. 2018. 四川阿坝州党坝超大型锂辉石矿床成矿规律及深部和外围找矿方向[J]. *地球科学*, 43 (6): 2 029~2 041.
- 徐莺, 杨磊, 刘飞燕. 2013. 四川某锂辉石矿工艺矿物学研究[J]. *矿产综合利用*, (5): 43~46.
- 许志琴, 王汝成, 赵中宝, 等. 2018. 试论中国大陆“硬岩型”大型锂矿带的构造背景[J]. *地质学报*, 92 (6): 1 091~1 106.
- 许志琴, 朱文斌, 郑碧海, 等. 2021. 新能源锂矿战略与大陆动力学研究——纪念南京大学地球科学与工程学院 100 周年华诞[J]. *地质学报*, 95 (10): 2 937~2 954.
- 袁彦伟, 费光春, 郑璐, 等. 2022. 川西可尔因地区侏倭组变质沉积岩地球化学、碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Lu-Hf 同位素特征及其地质意义[J]. *地球科学*, 47 (8): 2 902~2 924.
- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等. 2019. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题[J]. *中国科学基金*, 33 (2): 106~111.
- 赵开乐, 王昌良, 邓伟, 等. 2014. 四川某锂多金属矿工艺矿物学特性研究[J]. *矿物岩石*, 34 (1): 10~15.
- 周雄, 周玉, 谭洪旗, 等. 2020. 四川措拉锂多金属矿的矿物学特征研究[J]. *矿产综合利用*, (6): 148~152.
- 朱汇派, 费光春, 谭华, 等. 2023. 四川可尔因矿田党坝伟晶岩型稀有金属矿床中带伟晶岩地质特征及成矿时代[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 42(2): 350~359.