

青海某伟晶岩型锂铍矿工艺矿物学研究

应永朋¹, 赵玉卿¹, 熊艳², 熊馨¹

(1. 青海省地质矿产测试应用中心, 青海 西宁 810008; 2. 江西省地质调查院, 江西 南昌 330000)

摘要: 这是一篇工艺矿物学领域的论文。运用光学显微镜、化学多元素分析、化学物相分析、X射线衍射、扫描电镜—能谱仪等综合手段, 对某伟晶岩型锂铍矿工艺矿物学特征展开研究。查明了矿石中矿物组成、化学性质、矿物的共生关系、主要矿物的粒度分布和连生特征等。在此基础上阐述了矿石中锂、铍等有价元素的赋存状态和影响矿石中锂、铍等有价元素回收的矿物学因素, 为该矿的选矿工作提供了依据。

关键词: 工艺矿物学; 锂辉石; 绿柱石; 赋存状态; 嵌布特征

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.05.014

中图分类号: TD954; P575 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2023)05-0075-05

锂作为一种新型且重要的能源战略金属, 在锂电池, 新能源汽车, 可控核聚变等领域发挥着显著的作用^[1-3]。到目前为止, 自然界中发现的锂矿床最主要的有3种类型: 卤水型、伟晶岩型和沉积岩型^[4]。国内关于锂多金属矿的系统工艺矿物学研究报道极少^[5], 因此希望运用工艺矿物学原理和方法^[6],

利用X射线衍射仪、扫描电镜和矿物自动分析系统等测试分析技术^[7], 通过研究该伟晶岩型锂铍矿工艺矿物学, 为矿石的选冶实验提供依据。

1 矿石的化学性质

矿石的主要化学成分见表1。

表1 矿石多元素分析结果/%

Table 1 Multi-element analysis results of the run-of-mine ore								
Li ₂ O	BeO	Nb ₂ O	Ta ₂ O	Rb ₂ O	Cs ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O	CaO
0.75	0.055	0.0081	0.0053	0.085	0.016	2.88	4.73	0.37
CaF ₂	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Pb	Zn
0.24	0.04	10.83	72.14	0.91	0.0059	0.21	0.0026	0.0066
Co	Ni	Cr	V	Mn	Mo	Sr	Au*	Ag*
0.0001	0.0003	0.0009	0.0002	0.10	0.0001	0.0014	0.001	0.01

*单位为g/t

2 矿石的矿物组成

通过薄片鉴定、扫描电镜和X射线衍射等综合分析方式, 确定了矿石中的主要矿物组成及含

量(表2), 研究表明矿石中的透明矿物主要由石英、钠长石、正长石、锂辉石和白云母等组成, 金属矿物主要由、褐铁矿、磁铁矿、黄铁矿和闪锌矿等组成。

表2 矿石的矿物组成及含量/%

Table 2 Mineral composition and content of the ore						
钠长石	石英	钾长石	锂辉石	白云母	锂绿泥石	磷铝锂石
37.64	31.69	11.23	10.29	6.39	0.62	0.10
绿柱石	铁铝榴石	磷灰石	黑云母	方解石	其他	合计
0.39	0.35	0.25	0.20	0.11	0.74	100.00

收稿日期: 2021-05-11

基金项目: 青海学者专项(QHS201802)

作者简介: 应永朋(1991-), 男, 工程师, 从事工艺矿物学研究及珠宝玉石鉴定工作。

通信作者: 赵玉卿(1987-), 女, 高级工程师, 从事选矿工艺研究工作。

3 重要矿物的嵌布特征

锂辉石是矿石中最主要的含锂矿物，结晶程度较高，以自形-半自形结构为主，多呈柱状产出，内部解理和裂理均较为发育。锂辉石主要以单体形式存在，其次与钠长石、石英及钾长石等脉石矿物毗邻镶嵌（图 1），其共生边界多较为平整，有少量锂辉石内部分布有这些微细粒的脉石矿物而呈包晶结构（图 2）；有时可见锂辉石边缘及裂隙蚀变成白云母（图 3）。

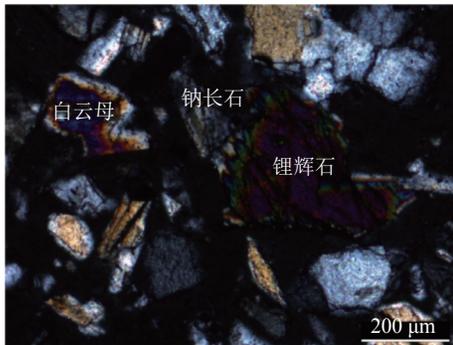


图 1 锂辉石与钠长石连生
Fig.1 Spodumene and albite contiguous

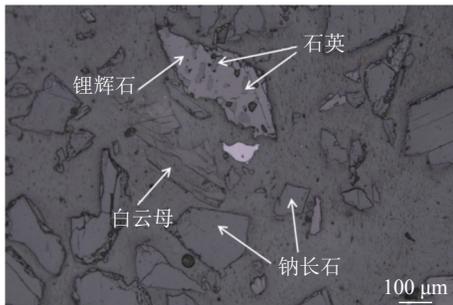


图 2 锂辉石内部包裹有微细粒的石英
Fig.2 Spodumene wrapped with fine-grained quartz

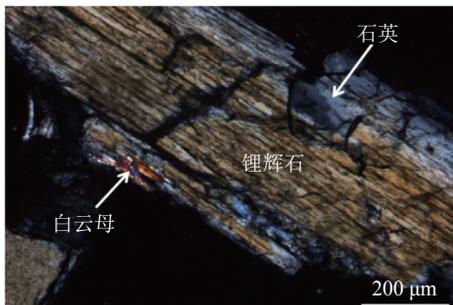


图 3 锂辉石边缘蚀变成白云母
Fig.3 Edge erosion of spodumene into muscovite

锂绿泥石在矿石中含量较少，常为锂辉石蚀变而来。X-射线能谱分析显示该矿物中常含少量的 Fe 或者 Mn，由于 Fe^{2+} 、 Mn^{4+} 是致色离子，使得部分含 Fe 的锂绿泥石呈绿色、部分含 Mn 的锂绿泥石呈红色。锂绿泥石多呈片状集合体产出，

常沿锂辉石边缘交代呈残余结构（图 4），在锂绿泥石内有时能见到残余的锂辉石；其次可见锂绿泥石常与石英、钾长石、钠长石镶嵌连生。

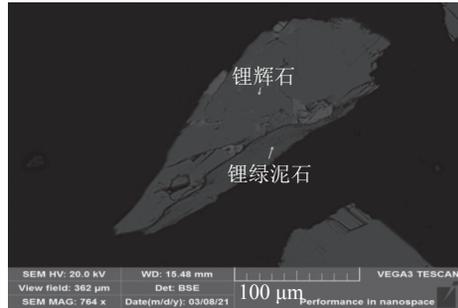


图 4 锂辉石边缘被锂绿泥石交代
Fig.4 Spodumene edge replaced by lithium chlorite

磷铝锂石为含锂的磷酸盐矿物，其中 Li_2O 的理论含量为 10.16%，也见少量磷铝锂石中含钠，系磷铝锂石中的锂被钠以类质同相的形式置换所致。其中磷铝锂石主要呈自形-半自形粒状结构产出。

白云母主要呈挠曲片状、鳞片状集合体形式产出。白云母多为单体，少量与石英、钠长石和钾长石等脉石矿物连生，偶见白云母沿锂辉石边缘及裂隙交代呈残余结构。

绿柱石是矿石中最主要的含 Be 矿物，粒度较粗，主要分布于 0.100~0.400 mm。其中 BeO 的理论含量为 14.1%。绿柱石常呈柱状或者粒状产出，自形-半自形结构，多以单体形式存在，部分与钠长石、石英等紧密镶嵌在一起（图 5）。

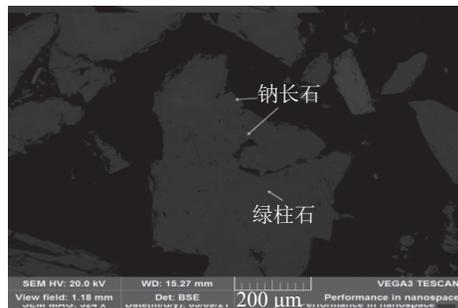


图 5 绿柱石中包裹细粒的钠长石
Fig.5 Fine-grained albite wrapped in beryl

铌钽铁矿的分子式为 $(FeMn)(NbTa)_2O_6$ ，其粒度主要分布于 0.040~0.100 mm。铁与锰、铌与钽是完全类质同象，常有钛、锡、钨、锆、铝、铀等的混入，按成分可划分为铌铁矿、钽铁矿、铌锰矿、钽锰矿等四个亚种。为了了解矿石中铌钽铁矿的成分，通过扫描电镜及 X 射线能谱对矿石中的铌钽铁矿成分进行了分析，确认矿石中的铌钽铁矿为铌锰矿和钽锰矿。矿石中铌锰矿和钽锰矿的含量很少，二者多呈自形-半自形粒状

嵌布于脉石矿物中（图6），少量以单体形式产出（图7）。

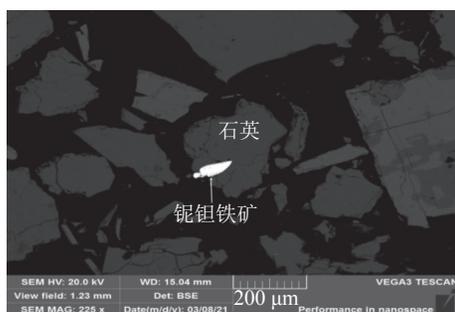


图6 铌钽铁矿分布于石英中
Fig.6 Niobium-tantalum ore is distributed in quartz

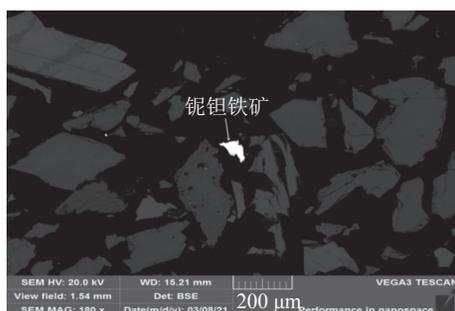


图7 铌钽铁矿呈单体分布
Fig.7 Niobium-tantalum ore is an independent entity

钠长石是矿石中含量最高的矿物，主要以柱状或者粒状产出，自形-半自形结构，多发育有聚片双晶。钠长石主要以单体形式产出，少量与石英、钾长石、白云母及锂辉石等镶嵌在一起。钠长石的粒度较粗，多在+0.150 mm。

钾长石常呈长柱状或者厚板状，自形-半自形结构，常发育有卡氏双晶。钾长石主要以单体形式存在，少量与钠长石、石英、锂辉石等矿物紧密共生在一块。钾长石的粒度很粗，多分布在+0.200 mm。

石英含量较多，主要呈粒状产出，自形-半自形结构。石英主要以单体形式产出，部分与钠长石、钾长石、锂辉石等矿物共生关系密切。石英的粒度较粗，多分布在0.150 mm以上，部分可达数毫米。

4 矿石中锂、铍等有价值元素的赋存状态

通过挑选单矿物获得锂辉石和白云母两个富集样，为了查明富集样的纯度，通过矿物自动测量手段对二产品进行矿物定量测试。结果显示，锂辉石富集产品中锂辉石的含量94.21%，白云母

1.11%，其他杂质矿物主要为钠长石、石英和钾长石等；白云母富集产品中白云母含量99.30%，锂辉石含量0.22%，其他杂质矿物含量很少。对富集的锂辉石和白云母富集样进行化学元素分析，获得二产品中Li₂O含量的含量分别为6.54%和0.19%。再通过计算获得该矿石中锂辉石和白云母中Li₂O的理论含量分别为6.94%和0.17%。磷铝锂石中的Li₂O理论含量10.16%，进而推算出锂绿泥石中Li₂O的理论含量为2.43%。

通过锂的配分平衡计算，确认矿石中的锂绝大部分赋存在锂辉石中，其占有率为95.19%，磷铝锂石和白云母中的占有率分别为1.35%和1.45%，锂绿泥石中占有率为2.01%。锂的平衡配分见表3。

表3 锂在不同矿物中的平衡配分
Table 3 Balanced distribution of lithium in different minerals

矿物名称	矿物含量/%	Li ₂ O含量/%	Li ₂ O金属量/%	占有率/%
锂辉石	10.29	6.94	0.714	95.19
锂绿泥石	0.62	2.43	0.015	2.01
磷铝锂石	0.10	10.16	0.010	1.35
白云母	6.39	0.17	0.011	1.45

矿石中的伴生有价值元素铍和钽、铌均主要以独立矿物的形式存在，其中，铍基本上都赋存于绿柱石中；铌、钽主要赋存于铌钽铁矿中。

5 重要矿物的嵌布粒度

为了解矿石中重要矿物的粒度分布特性，以便确定合理的磨矿细度，故对矿石中锂辉石和绿柱石的粒度进行测试，结果见表4。

结果表明，矿石中锂辉石和绿柱石的粒度均相对较粗。其中，锂辉石在+0.074 mm粒级的占有率高达91.06%，其粒度主要分布于0.147~0.589 mm。绿柱石的粒度分布比较均匀，集中分布于0.074~0.417 mm，在该粒级范围的占有率达到84.15%。

通过上述两种矿物的粒度分布规律可知，由于其结晶粒度均较粗，在较粗的磨矿细度下，这些矿物即可实现较好的解离。

6 矿石中锂、铍矿物的连生特征

为了解矿样中锂辉石和绿柱石的连生特征，对其单体解离度及连生状态进行了系统的测定，其结果见表5。

表 4 锂辉石和绿柱石的粒度分布
Table 4 Particle size distribution of spodumene and beryl

粒级/mm	锂辉石		绿柱石	
	占有率/%	累计/%	占有率/%	累计/%
-0.833+0.589	6.40	6.40	0.00	0.00
-0.589+0.417	25.30	31.69	0.00	0.00
-0.417+0.295	18.04	49.73	11.52	11.52
-0.295+0.208	18.18	67.92	29.16	40.68
-0.208+0.147	12.55	80.46	13.68	54.36
-0.147+0.104	6.05	86.51	17.28	71.64
-0.104+0.074	4.55	91.06	12.51	84.15
-0.074+0.053	2.31	93.37	3.35	87.50
-0.053+0.043	1.57	94.94	2.89	90.39
-0.043+0.038	0.59	95.53	1.83	92.22
-0.038+0.020	3.30	98.83	4.87	97.08
-0.020+0.015	0.71	99.54	2.02	99.11
-0.015+0.010	0.38	99.92	0.75	99.86
-0.010+0.005	0.08	99.99	0.11	99.97
-0.005	0.01	100.00	0.03	100.00

表 5 矿石中重要矿物的连生特征/%
Table 5 Connection growth characteristics of important minerals in ore

矿物名称	单体	连生体				
		长石	云母	石英	磷灰石	其他
锂辉石	84.19	11.89	3.30	0.35	0.15	0.12
绿柱石	71.33	14.45	3.47	10.56	-	0.19

由表 5 可知，锂辉石和绿柱石的单体解离度较高，二者的单体占有率分别 84.49% 和 71.43%。其连生体中，锂辉石主要与长石连生，其次与云母连生，还有少量与石英、磷灰石等脉石连生；绿柱石也主要与长石连生，其次与石英连生，少量与云母等脉石连生。故在较粗的磨矿细度下，锂辉石和绿柱石解离效果好，但是由于粗粒锂辉石在浮选过程中不易上浮，因此，在磨矿过程中要选择合适的磨矿细度，保证磨矿的均匀程度，以利于锂辉石和绿柱石的回收。

7 影响矿石中锂、铍等有价元素回收的矿物学因素

锂的赋存状态研究表明，矿石中的锂绝大部分赋存于锂辉石中，且锂辉石中 Li_2O 的含量达到 6.94%，对锂的回收指标有利。但是，矿石中有 1.35% 的锂赋存于磷铝锂石中，虽然该矿物中的 Li_2O 的含量高达 10.16%，但其内磷的含量也较高，若对其进行回收，有可能导致锂精矿中磷超标，所以要尽量避免该矿物进入锂精矿。此外，还有少量锂分布于白云母和锂绿泥石中，基本无回收价值。

锂辉石的粒度整体较粗，其在+0.074 mm 粒级

中的占有率高达 90% 以上，有利于锂辉石的磨矿解离和分选，但也有少量锂辉石内部包裹微细粒的脉石矿物，在一般磨矿细度下不易解离，在浮选过程中容易随锂辉石进入到锂精矿产品而影响精矿的品质。

矿石中锂辉石与石英、长石以及云母等硅酸盐矿物浮游性能相似，要实现它们的彼此分离以获得高品质的精矿产品，将会存在一定的难度。

矿石中的铍基本都赋存于绿柱石中，绿柱石粒度较粗，对其磨选有利。

铌、钽均分布于铌钽铁矿中，但其粒度相对较细，如果要对其进行回收，尚需对矿石进行细磨。同时，由于矿石中还存在一定量的磷铁锰矿、铁铝榴石、磷灰石等比重较大或者具有磁性的矿物，在对铌、钽矿物的磁选或者重选过程中，容易随之进入到铌钽精矿进而影响精矿品位，后续需要进一步采取手段对粗精矿进行分选以获得合格铌钽精矿。

矿石中含有一定量的磷，磷主要分布于磷灰石、磷铁锰矿和磷铝锂石中，在酸性选别条件下，磷灰石和磷铝锂石可浮性较好，在对锂辉石的选别过程中容易进入到锂精矿中。故在对锂矿物的选别过程中，要重点加强这些含磷矿物的关注，防止精矿产品中磷超标。

8 结 论

(1) 矿石中 Li_2O 的含量为 0.75%，是最主要的回收对象。此外，矿石中还存在少量的 Be、Ta、Nb、Rb 和 Cs，可以考虑综合回收。

(2) 矿石中的含锂矿物主要为锂辉石，另有少量的锂绿泥石、磷铝锂石和白云母；铍矿物主要为绿柱石；铌钽矿物主要为铌钽铁矿。其他矿物主要为石英、钾长石和钠长石，另有少量磷铁锰矿、磷灰石、铁铝榴石、黑云母和方解石等。

(3) 锂、铍的赋存状态表明，矿石中的锂绝大部分赋存于锂辉石中，且锂辉石中 Li_2O 的含量达到 6.94%，铍也基本分布于绿柱石中，对锂、铍的回收指标有利。矿石中锂辉石、绿柱石与其他脉石矿物之间的共生边界较为平整，嵌布关系比较简单，而且这些矿物的粒度整体较粗，在 +0.074 mm 粒级中的占有率分别达到 91.06% 和 84.15%，也有利于目的矿物的解离。

(4) 铌、钽主要赋存于铌钽铁矿中，由于其粒度整体较细，在磨矿过程不易解离；同时，矿

石中还有一定量磷灰石、磷铁锰矿和铁铝榴石等比重较大或者具有磁性的矿物，在对铌钽铁矿的磁选或者重选过程中，不易与这些矿物分离，会对精矿品位造成一定的影响。

(5) 矿石中存在大量的钠长石、钾长石以及石英，这些矿物纯度较高，杂质元素（如 Fe）含量低，可以考虑综合回收。

(6) 矿石中存在一定量的磷，磷主要分布于磷灰石、磷铁锰矿和磷铝锂石中，这些含磷矿物由于具有比重大、弱磁性或者可浮性好的特点，在对铌钽矿物的重选、磁选以及对锂矿物的浮选过程中，容易随之进入到铌钽精矿以及锂精矿中，造成精矿产品中的磷超标，故在选别过程中要予以重视。

(7) 综上所述，锂作为矿石中最重要的有价元素，绝大部分赋存于锂辉石中，从锂辉石的锂含量、粒度、嵌布关系等工艺矿物学特征来看，通过浮选应该可以获得高品质的锂精矿。建议采取适中的磨矿细度，保证磨矿的均匀程度，避免锂辉石过磨；同时采取合适的药剂制度，强化锂辉石与长英质矿物的分离效果，最终取得理想的选锂指标。

参考文献：

[1] 吴西顺, 王登红, 黄文斌, 等. 全球锂矿及伴生铍钽铌的采选冶技术发展趋势[J]. 矿产综合利用, 2019(1):1-6.
WU X S, WANG D H, HUANG W B, et al. Global technical development trends of lithium minerals and associated beryllium-niobium-tantalum exploitation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(1):1-6.

[2] 吴西顺, 孙艳, 王登红, 等. 国际锂矿开发技术现状、革新及展望[J]. 矿产综合利用, 2020(6):110-120.

WU X S, SUN Y, WANG D H, et al. International lithium mine utilization technology: current status, innovation and prospects[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(6):110-120.

[3] 程仁举, 李成秀, 刘星, 等. 川西某伟晶岩型锂辉石矿浮选试验研究[J]. 矿产综合利用, 2020(6):148-152.

CHENG R J, LI C X, LIU X, et al. Experimental research on the flotation of a pegmatite type spodumene ore in Western Sichuan[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(6):148-152.

[4] 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.

LIU L J, WANG D H, LIU X F, et al. Main types, distribution characteristics and current status of exploration and development of lithium deposits at home and abroad[J]. Chinese Geology, 2017, 44(2):263-278.

[5] 周乐光. 工艺矿物学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 268-310.

ZHOU L G. Process mineralogy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002, 268-310.

[6] 汪灵, 陈磊, 李彩侠, 等. 四川峨边五渡钾长石矿工艺矿物学研究[J]. 矿物岩石, 2011, 31(4):1-6.

WANG L, CHEN L, LI C X, et al. Study on process mineralogy of Wudu potash feldspar mine, Ebian, Sichuan[J]. Mineral Rocks, 2011, 31(4):1-6.

[7] 赵开乐, 王昌良, 邓伟, 等. 四川某锂多金属矿工艺矿物学特性研究[J]. 矿物岩石, 2014, 34(1):10-15.

ZHAO K L, WANG C L, DENG W, et al. Study on the technological mineralogical characteristics of a lithium polymetallic ore in Sichuan[J]. Mineral Rocks, 2014, 34(1):10-15.

Process Mineralogy of a Pegmatite Lithium Beryllium Ore in Qinghai

Ying Yongpeng¹, Zhao Yuqing¹, Xiong Yan², Xiong Xin¹

(1. Qinghai Province Geology Ore Testing and Application Center, Xining, Qinghai, China; 2. Jiangxi Geological Survey Institute, Nanchang, Jiangxi, China)

Abstract: This is an essay in the field of process mineralogy. Using optical microscope, chemical multi-element analysis, chemical phase analysis, X-ray diffraction, scanning electron microscopy-energy spectrometer and other comprehensive methods, the process mineralogical characteristics of a pegmatite lithium beryllium ore were studied. The mineral composition, chemical properties, symbiosis relationship of minerals, particle size distribution of main minerals and connection growth characteristics in the ore were ascertained. On this basis, the occurrence state of valuable elements such as lithium and beryllium in the ore and the mineralogical factors affecting the recovery of valuable elements such as lithium and beryllium in the ore are described, which provides a basis for the beneficiation work of the mine.

Keywords: Process mineralogy; Spodumene; Beryl; Existence state; Embedded features