

非洲某锂矿石的工艺矿物学

刘飞燕¹, 孙宝伟², 周雄¹, 梁友伟¹

(1. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 自然资源部战略性矿产综合利用工程技术创新中心, 四川 成都 610041; 2. 四川省地质矿产勘查开发局四〇五地质队, 四川 成都 611830)

摘要: 这是一篇工艺矿物学领域的论文。国外某锂矿研究程度低, 矿石不仅具有较高的锂, 而且伴生铌、钽、铷、铯等有益元素。为实现矿石资源综合利用, 对该矿进行了详细的工艺矿物学研究。采用 X 射线荧光光谱分析及其他化学分析手段, 查明了矿石化学成分; 利用电子探针、X 射线衍射分析仪、扫描电镜与能谱分析 (SEM-EDS) 等方法, 研究了矿物的嵌布特征, 重点考查了锂的赋存状态。研究表明: 矿石中锂的主要载体矿物为锂辉石, 次为磷锂铝石, 其他矿物中的锂为包裹、夹杂的不可利用锂。元素配分结果表明, 锂精矿的理论品位为 6.64%, 理论回收率为 74.98%。分析了影响选矿回收指标的矿物学因素, 摸清了伴生有益组分的赋存状态, 为矿山资源综合利用提供了矿物学理论支撑。

关键词: 锂; 工艺矿物学; 赋存状态; 伴生元素; 综合利用

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.05.009

中图分类号: TD913 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 05-0057-06

引用格式: 刘飞燕, 孙宝伟, 周雄, 等. 非洲某锂矿石的工艺矿物学[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(5): 57-62.

LIU Feiyan, SUN Baowei, ZHOU Xiong, et al. Process mineralogy of a lithium ore in africa[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(5): 57-62.

锂作为稀有金属, 被誉为“白色石油”, 但并不稀有, 地壳中约有 0.006 5% 的锂, 其丰度居第 27 位^[1]。随着“一带一路”推进, 国外某锂矿被当作矿业投资者的首选地, 但地质工作落后、地质资料缺乏, 致使开发者投资风险增加, 当地大量的矿产资源深埋地下, 无法实现利用价值, 更谈不上资源的综合利用^[2]。因此, 利用当地已开采的矿山进行矿石的锂的回收实验, 然后以点扩面, 对区域下一步找矿、资源综合利用尤为重要。为摸清该矿资源特点, 在选矿回收锂实验前采集了不同类型代表性矿石开展了系统工艺矿物

学研究。矿石矿物定量采用 Sigma300 矿物自动分析系统、矿物嵌布特征主要采用光学显微镜, 矿物组合采用 DX-2700BH 衍射仪等多手段相结合的方法, 查明了矿石性质, 为投资者回收锂, 制定合理的选冶工艺提供矿物学数据支撑。

1 矿石矿物组成

1.1 化学成分

矿石化学多项分析见表 1。矿石中 Li_2O 、 Ta_2O_5 、 Cs_2O 、 Rb_2O 均达到工业品位, Nb_2O_5 可作为生组分综合利用^[3]。

表 1 矿石化学多项分析结果/%
Table 1 Chemical composition of raw materials

| Al_2O_3 | SiO_2 | Li_2O | Cs_2O | Fe_2O_3 | Nb_2O_5 | Ta_2O_5 | TiO_2 | K_2O | Na_2O | P_2O_5 | MnO | Rb_2O | CaO | MgO | SrO |
|-------------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|----------------------|-----------------------|------------------------|--------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| 15.78 | 70.82 | 1.70 | 0.296 | 0.901 | 0.006 0 | 0.046 7 | 0.02 | 3.61 | 2.86 | 0.78 | 0.25 | 0.329 | 0.37 | 0.27 | 0.005 |

收稿日期: 2023-11-17

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目 (DD20230039)

作者简介: 刘飞燕 (1975-), 女, 高级工程师, 从事各类矿产的工艺矿物学研究。

通信作者: 孙宝伟 (1980-), 男, 工程师, 主要从事地质调查工作。

1.2 矿物组成

矿石的矿物组成见表 2，矿石中矿物种类较多，接近 30 种，矿石中主要的锂矿物为锂辉石，另有少量的磷锂铝石、微量的锂云母；铌钽矿物类型为细晶石、铌-钽铈矿，含量极微，仅 0.10%，矿石中有少量铯榴石矿物。

表 2 矿石的矿物组成及相对含量

Table 2 Mineral composition and its relative content in the ore

| 矿物名称 | 含量/% | 矿物名称 | 含量/% |
|---------|-------|---|------|
| 钾长石 | 15.45 | 磷锂铝石 | 0.72 |
| 钠长石 | 22.42 | 细晶石、铌-钽铈类等 | 0.10 |
| 锂辉石 | 19.67 | 铯榴石 | 0.92 |
| 石英 | 29.05 | 磷灰石、钛铁矿、赤铁矿、角闪石、绿泥石、白云石、硬石膏、楣石、金红石、锆石、辉石、高岭石、菱锌矿、闪锌矿等矿物 | 3.03 |
| 铁磷锰类氧化物 | 1.37 | | |
| 云母类 | 7.27 | | |

主要的脉石矿物为长石、石英和云母类，矿石中含量少的矿物有绿泥石、磷灰石、角闪石、楣石、钛铁矿、赤铁矿、辉石、高岭石等。长石根据其成分，分为钠长石和钾长石。云母类绝大多数为含锂白云母，有少量的黑云母^[3]。

2 矿石的结构构造

矿石的结构包括自形结构、半自形结构、中粒结构、花岗结构、他型粒状结构、网脉状结构、交代溶蚀结构、包含结构、碎裂结构等。其中自形-半自形结构主要表现为锂辉石呈长柱状分布在石英、长石粒间；花岗结构主要表现为自形程度好的矿物先结晶，长石及石英充填在其他矿物间隙；溶蚀结构表现为锂辉石被溶蚀后，有石英等矿物充填；碎裂结构主要表现为部分锂辉石

沿解理面发生碎裂，裂纹发育。

矿石构造主要为块状构造和斑杂状构造等。锂辉石、石英、长石矿物颗粒分布较均匀，紧密嵌布，构成块状构造；斑杂状构造为大小不等的暗色矿物，以斑点、团块状分布在锂辉石、长石、石英、白云母等颜色较浅的矿物集合体中，构成斑杂状构造。

3 主要矿物的工艺特征

3.1 锂辉石

锂辉石为矿石中主要回收利用的矿物，呈浅灰白色，少量浅绿色、浅粉色，集中产出的锂辉石晶体的长轴方向基本呈一致排列，可见双晶。锂辉石主要与石英、长石毗连嵌布，少量锂辉石与粗粒云母连生，锂辉石颗粒内易被他型粒状石英、长石交代呈破布状，交代矿物粒度一般分布在 0.02~0.05 mm，少数石英达 0.10 mm。此外，粗大锂辉石裂理发育，碎裂结构明显，解理缝局部被灰黑色铁锰质矿物充填^[4]。

矿石中锂辉石主要为中粒型，宏观结晶程度较好，微观下可见部分锂辉石呈细小集合体状嵌布在脉石粒间。柱状锂辉石晶体的长径一般 0.7~3 mm，个别集合体长度可长达 10~20 mm；横断面 0.2~0.9 mm，个别晶体可达 4 mm。锂辉石发育一组完全解理，加上裂理发育，破碎时易单体解离，同时易使锂辉石晶体细化。

此外，锂辉石裂隙中可见铯榴石嵌布，这种类型的铯榴石易进入锂精矿。

为确定锂辉石的化学成分，在实体镜下进行锂辉石单矿物挑选工作，锂辉石单矿物的化学多项分析结果见表 3。锂辉石中 Li₂O 含量为 6.51%，同时有其他微量元素检出。

表 3 锂辉石单矿物化学分析/%

Table 3 Chemical analysis of pure minerals of spodumene

| SiO ₂ | Rb ₂ O* | TFe | Li ₂ O | Al ₂ O ₃ | Cs ₂ O* | MnO | K ₂ O | Na ₂ O | Nb ₂ O ₃ * | Ta ₂ O ₅ * |
|------------------|--------------------|------|-------------------|--------------------------------|--------------------|-------|------------------|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 64.20 | 11.5 | 0.13 | 6.51 | 26.41 | 202 | 0.002 | 0.063 | 0.14 | 22.2 | 114 |

*单位为g/t。

3.2 长石

长石类矿物是地壳中分布最广泛的造岩矿物，为典型的架状结构铝硅酸盐矿物。自然界的长石基本分子有钾、钠、钙、钡长石分子构成的混合晶体（过渡系列）^[5]。经过光学显微镜观察鉴定，矿石中的长石包括斜长石亚族中的钠长石，

碱性长石亚族中钾长石。钠长石，主要呈半自形-他形结构，板柱状、粒状集合体产出，解理 {010} 发育，{100} 完全，具卡氏双晶和聚片双晶的复合式双晶，粒径一般 0.1~0.5 mm 之间。钾长石，以半自形-他形结构产出，结晶程度略差于钠长石，呈短柱状、粒状，{001} 解理完全，{010} 解

理次之，具卡氏双晶，粒度一般在0.15~1 mm。

长石常与石英、云母、锂辉石等矿物毗邻相嵌，接触界限部分不平直。长石中元素含量通过电子探针微区波谱分析测得，Li 电子探针无法检

测，Li₂O 的含量以单矿物化学分析为准；Ta₂O₅、Cs₂O、Nb₂O₅ 等痕量元素含量受设备检测限精度约束，数据参考见表4、5。

表4 长石的电子探针波谱微区成分分析结果/%

Table 4 Results of electron microprobe analysis of albite and feldspar

| 测点 | Al ₂ O ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | Ta ₂ O ₅ * | FeO | MnO | Nb ₂ O ₅ * | Cs ₂ O* | MgO | SiO ₂ | CaO | |
|-------------|--------------------------------|-------------------|------------------|----------------------------------|-------|-------|----------------------------------|--------------------|-------|------------------|--------|-------|
| 钠 长 石 | 1 | 20.552 | 12.178 | 0.056 | 0.017 | 0.015 | 0.018 | — | — | — | 69.631 | 0.017 |
| | 2 | 20.541 | 12.106 | 0.033 | — | 0.012 | — | — | 0.001 | — | 68.008 | 0.03 |
| | 3 | 20.437 | 11.951 | 0.024 | 0.172 | 0.029 | — | — | — | 0.013 | 68.382 | 0.048 |
| | 4 | 20.284 | 12.246 | 0.035 | — | — | 0.014 | 0.168 | 0.022 | — | 68.795 | 0.189 |
| | 5 | 20.247 | 12.171 | 0.049 | — | 0.037 | — | — | 0.019 | — | 69.011 | 0.022 |
| | 平均 | 20.412 | 12.131 | 0.039 | 0.038 | 0.019 | 0.006 | 0.034 | 0.008 | 0.003 | 68.765 | 0.061 |
| 钾 长 石 | 1 | 19.505 | 0.306 | 15.09 | — | 0.032 | 0.023 | — | 0.304 | 0 | 64.861 | — |
| | 2 | 19.354 | 0.298 | 15.741 | 0.017 | — | — | 0.009 | 0.088 | 0 | 64.867 | — |
| | 3 | 19.233 | 0.204 | 15.855 | — | — | 0.023 | — | 0.096 | 0 | 64.27 | — |
| | 4 | 19.298 | 0.259 | 15.682 | 0.001 | — | — | — | 0.061 | 0 | 65.939 | — |
| | 5 | 18.969 | 0.285 | 15.103 | 0.039 | 0.014 | 0.006 | — | 0.112 | 0 | 63.951 | — |
| | 平均 | 19.272 | 0.27 | 15.494 | 0.011 | 0.009 | 0.011 | 0.002 | 0.132 | 0 | 64.778 | — |

标*处受设备检测限制，数据供参考（下同）

表5 长石单矿物化学分析结果/%

Table 5 Chemical analysis of pure minerals of feldspar

| Li ₂ O | TFe | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | CaO |
|-------------------|------|------------------|--------------------------------|------|
| 0.25 | 0.04 | 60.11 | 19.71 | 0.11 |

3.3 石英

石英，无色，部分颗粒铁染呈棕色，玻璃或油脂光泽，透光镜表面干净，是矿石中含量次于长石，高于锂辉石的主要矿物。石英粒度较锂辉石略细，分布非常普遍。石英常呈他型粒状结构，与锂辉石、长石、云母等矿物紧密相嵌，见

石英熔蚀交代锂辉石现象，溶蚀交代强烈者可使锂辉石呈交代残余状。石英粒度不均匀，粒度粗者2~5 mm，细者仅0.02~0.10 mm，一般0.25~1 mm。

石英经过实体镜下挑纯工作获得单矿物，可能混入有微量的长石、云母等杂质。石英的单矿物化学分析结果见表6。一般而言，石英成分较干净，不含Li₂O，单矿物分析结果显示其中Li₂O含量0.16%，可能是单矿物挑选中无法避免的其他含Li₂O矿物混入或存在微细包体所造成。

表6 石英的单矿物化学分析结果/%

Table 6 Chemical analysis of pure minerals of quartz

| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Cs ₂ O* | MnO | K ₂ O | Li ₂ O | Rb ₂ O* | Na ₂ O | Nb ₂ O ₃ * | Ta ₂ O ₅ * |
|------------------|--------------------------------|--------------------|--------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 96.37 | 2.22 | 1.231 | 0.0054 | 0.32 | 0.16 | 182 | 0.18 | 6.62 | 89.41 |

*单位为g/t。

3.4 云母

矿石中云母主要为含锂的白云母，含极微量黑云母。云母是一种很常见的造岩矿物，为层状结构的铝硅酸盐矿物。矿石中白云母结晶粗大，呈片状结构，一组解理完全；显微镜下白云母无色-灰白，被铁锰氧化物污染的微带浅褐色。云母粒度不均，片径大者2~8 mm，小者0.01~

0.15 mm，一般1~1.5 mm。

云母主要以集合体形式产出，分布于长石、石英、锂辉石粒间构成花岗结构；少量细粒绢云母鳞片充填在长石颗粒表面及裂缝、孔隙；偶见以包体形式包裹于锂辉石、长石晶体中，部分云母解理缝中充填有石英集合体。云母的电子探针波谱微区成分分析结果见表7。

表 7 云母电子探针微区波谱分析结果/%
Table 7 Results of electron microprobe analysis of mica

| 测点 | Na ₂ O | K ₂ O | Ta ₂ O ₅ * | FeO | Al ₂ O ₃ | MnO | Nb ₂ O ₅ * | Cs ₂ O* | MgO | SiO ₂ | CaO |
|----|-------------------|------------------|----------------------------------|-------|--------------------------------|-------|----------------------------------|--------------------|-------|------------------|-----|
| 1 | 0.266 | 9.354 | 0.003 | 0.011 | 30.001 | 0.03 | 0.018 | 1.516 | 0.000 | 49.895 | — |
| 2 | 0.487 | 9.861 | 0.056 | 2.138 | 35.537 | 0.297 | 0.187 | 0.063 | 0.079 | 46.123 | — |
| 3 | 0.326 | 9.549 | 0.004 | 0.035 | 27.290 | 0.282 | 0.213 | 0.588 | 0.007 | 50.718 | — |
| 4 | 0.281 | 9.632 | 0.000 | 0.431 | 29.714 | 0.528 | 0.186 | 0.311 | 0.013 | 48.699 | — |
| 5 | 0.405 | 10.25 | 0.072 | 1.235 | 37.113 | 0.117 | 0.144 | 0.074 | 0.000 | 45.629 | — |
| 平均 | 0.353 | 9.729 | 0.027 | 0.770 | 31.931 | 0.251 | 0.150 | 0.511 | 0.020 | 48.213 | — |

*单位为g/t。

考虑到部分元素波谱无法检测，且单矿物分析数据代表性更强，在波谱微区分析基础上，挑选

出的云母纯矿物进行化学多元素分析，见表 8。云母含有少量 TFe、Rb₂O、Na₂O、Nb₂O₃、Ta₂O₅ 微少。

表 8 云母单矿物化学分析结果/%
Table 8 Chemical analysis of pure minerals of mica

| Li ₂ O | Rb ₂ O* | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Cs ₂ O* | MnO | K ₂ O | Na ₂ O | Nb ₂ O ₃ * | Ta ₂ O ₅ * | TFe |
|-------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|--------------------|------|------------------|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|------|
| 1.19 | 10 800 | 44.60 | 29.15 | 1 160 | 0.20 | 10.43 | 0.54 | 223 | 199 | 1.99 |

*单位为g/t。

3.5 铌-钽-锑矿物

矿石中含有可供回收的钽及伴生的铌、锑元素，含量较低，为了查明铌、钽、锑的矿物种类，富集了大量矿石。研究发现，矿石中铌-钽-锑矿物为细晶石、钽锑矿（图 1）和微量铌钽铁矿。细晶石，黄褐色，玻璃-油脂光泽，粒径 0.02~0.6 mm。细晶石元素含量见表 9。

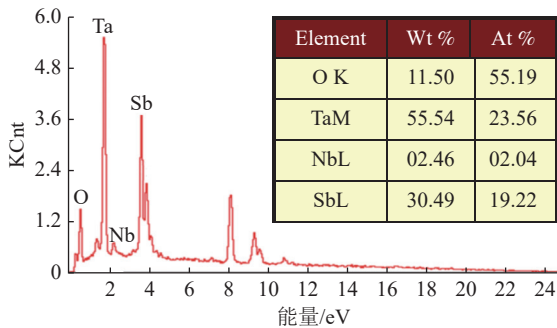


图 1 钽锑矿能谱微区分析结果

Fig.1 Energy spectrum microregion analysis results of stibiotantalite

3.6 铯榴石

矿石中含少量铯，对矿石富集鉴定，载体矿物为铯榴石，铯榴石白色微带浅红，玻璃光泽，易风化，表面或裂隙常有高岭石类分解物，多嵌布在石英和钾长石等矿石粒间或锂辉石解理、裂隙中，部分铯榴石中包裹有细粒石英、长石等杂质矿物。铯榴石能谱分析（表 10）显示 Cs₂O 含量

在 21.57%~38.15%，平均 31.62%，常含有少量 Na，偶见含 K。

表 9 细晶石微区能谱分析结果/%

| 测点 | Na ₂ O | CaO | Nb ₂ O ₅ | Ta ₂ O ₅ |
|-----|-------------------|-------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 4.41 | 11.62 | 0.00 | 83.97 |
| 2 | 6.41 | 13.99 | 0.00 | 79.60 |
| 3 | 4.59 | 9.29 | 5.81 | 80.31 |
| 4 | 4.43 | 9.42 | 6.48 | 79.67 |
| 平均值 | 4.96 | 11.08 | 3.07 | 80.79 |

4 有价元素的赋存状态

有价元素的赋存状态是决定矿石是否具有选冶价值的重要参考依据^[6]，矿山主要利用锂元素，通过电子探针结合单矿物分析矿物中锂的含量，确定了锂的分布状态，见表 11。

锂：矿石中的锂的载体矿物较多，赋存状态复杂，锂的独立矿物为锂辉石、磷铝锂石，其他载体矿物为长石、云母、石英等，其中锂辉石中 Li₂O 占矿石中总 Li₂O 的 77.54%，磷铝锂石中 Li₂O 占矿石中总 Li₂O 的 4.40%，云母中 Li₂O 占矿石中总 Li₂O 的 5.24%，长石中 Li₂O 占矿石中总 Li₂O 的 5.73%，石英中 Li₂O 占矿石中总 Li₂O 的 2.81%。

以上数据表明，Li₂O 主要分布在锂辉石中，

表 10 铯榴石微区能谱成分分析结果/%
Table 10 Microregion energy spectrum analysis results of pollucite

| 测点 | Cs ₂ O | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Na ₂ O | K ₂ O |
|-----|-------------------|------------------|--------------------------------|-------------------|------------------|
| 1 | 30.65 | 47.06 | 19.93 | 2.36 | — |
| 2 | 20.69 | 52.46 | 23.61 | — | 3.24 |
| 3 | 20.61 | 49.30 | 30.09 | — | — |
| 4 | 21.57 | 50.93 | 22.17 | 5.33 | — |
| 5 | 33.09 | 45.06 | 19.46 | 2.39 | — |
| 6 | 33.53 | 46.57 | 18.07 | 1.83 | — |
| 7 | 35.04 | 44.95 | 18.17 | 1.85 | — |
| 8 | 38.15 | 41.39 | 18.72 | 1.74 | — |
| 9 | 33.53 | 46.57 | 18.07 | 1.83 | — |
| 10 | 35.04 | 44.95 | 18.17 | 1.85 | — |
| 11 | 37.24 | 42.07 | 19.46 | 1.23 | — |
| 12 | 34.06 | 44.53 | 18.34 | 2.12 | — |
| 13 | 37.82 | 41.87 | 18.69 | 1.62 | — |
| 平均值 | 31.62 | 45.98 | 20.23 | 2.20 | 0.25 |

表 11 矿石中锂的平衡配分/%
Table 11 Equilibrium distribution of lithium in the ore

| 矿物名称 | 矿物量% | Li ₂ O含量% | Li ₂ O配分量/% | Li ₂ O分配率/% |
|------|--------|----------------------|------------------------|------------------------|
| 石英 | 29.05 | 0.16 | 0.05 | 2.81 |
| 长石 | 37.87 | 0.25 | 0.09 | 5.73 |
| 锂辉石 | 19.67 | 6.51 | 1.28 | 77.55 |
| 云母 | 7.27 | 1.19 | 0.09 | 5.24 |
| 磷铝锂石 | 0.72 | 10.10 | 0.07 | 4.40 |
| 其他矿物 | 5.42 | 1.30 | 0.07 | 4.27 |
| 合计 | 100.00 | 1.70 | 1.667 | 100.00 |

其余 Li₂O 分散在磷铝锂石、云母、长石、石英、含锂绿泥石中，主要回收目标矿物为锂辉石和磷铝锂石，精矿产品中 Li₂O 的理论品位为 6.64%，精矿理论回收率为 74.98%。其中长石、石英等脉石矿物中 Li₂O 存在的可能有以下几种可能：(1) 单矿物纯度无法达到 100%，不可避免的会有极少量的含锂杂质矿物或含锂包体矿物混入；(2) 长石成分中含与 Li 同族的 K、Na 元素，会有与 Li 发生类质同象替代的可能。

铌、钽：原矿综合样中铌、钽含量低，通过大量光薄片查定，铌钽主要以独立矿物形式存在，为细晶石、铌-钽铈矿、铌钽铁矿。

铷、铯：铷以分散状态存在于其他矿物中。从矿石单矿物的化学分析结果和电子探针分析结果推测，长石、云母、铯榴石中含有较高的 Rb₂O，其他矿物中铷含量微少。

矿石中铯含量 Cs₂O 含量为 0.295%，达到综合回收的工业品位（0.05%~0.06%），铯主要以独立矿物铯榴石形式存在，锂辉石和云母中类质同象的铯较少。

5 矿石性质对选矿指标的影响

综合分析，选矿主要回收锂元素，其他有益组分作为伴生元素考虑。影响锂回收的因素：

(1) 载锂矿物主要为锂辉石，其他脉石矿物中有少许微细包裹锂，但不会对锂的回收率造成大的影响，锂的分布相对集中，对锂回收非常有利；

(2) 石英的硬度高于锂辉石和长石，锂辉石解理、裂理十分发育，在破磨过程中易使锂辉石泥化，影响锂的有效回收；(3) 锂辉石与其他矿物的接触边界比较清晰平整，易与其他脉石矿物宏观解离，但部分锂辉石中含有细小石英颗粒，这部分石英即使细磨也难同锂辉石中分离出来，使得锂辉石精矿中不可避免的含有石英；(4) 锂辉石解理、裂理缝隙常见被铁锰质充填污染，易对锂辉石品级造成影响。

6 结 论

(1) 矿石中矿物组成主要有长石（钠长石、钾长石）、石英、锂辉石、云母等矿物构成，另外有少-微矿物铯榴石、细晶石、钽铈矿、铌钽铁矿、磷铝锂石、含锂绿泥石、锆石、楣石、锡石、磷灰石、铁锰氧化物、钛铁矿等矿物。

(2) 矿石中 Li₂O 含量 1.70%，为矿山主要利用元素，锂主要赋存于锂辉石中，锂辉石中锂占矿石中总锂的 77.55%，磷铝锂石中锂占矿石中总锂的 4.40%，从分布特征看，可一并回收。锂配分显示，锂精矿产品中 Li₂O 的理论品位为 6.64%，精矿理论回收率为 74.98%。

(3) 锂辉石中普遍发育微细石英溶蚀交代现象，导致锂精矿中 SiO₂ 增高。此外，锂辉石解理、裂理发育，其缝隙常见被铁锰质充填，易对锂辉石品级造成影响。

(4) 矿石伴生铷、铌、铯、钽等有益组分，铷主要赋存于长石、云母类矿物中；铌、钽以独立矿物形式存在于细晶石和钽铈矿中，少量分布在铌钽铁矿中；铯以铯榴石形式存在。这几类稀有金属均达到综合回收指标值^[7-8]，建议未来矿山

在利用锂的基础上, 加强伴生稀有组分的综合利用, 可极大地增加资源附加价值。

参考文献:

[1] 刘绪凯, 亓亮, 姜信德, 等. 锂云母提锂新工艺[J]. 中国有色金属, 2014(12):66-67.

LIU X K, QI L, JIANG X D, et al. New technology for extracting lithium from lepidolite[J]. China Nonferrous Metals, 2014(12):66-67.

[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] 《矿产资源工业要求手册》编委会. 矿产资源工业要求手册[M]. 北京: 地质出版社, 2010.

Editorial Board of the Mineral Resources Industry Requirements Manual. Mineral Resources Industry Requirements Manual[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.

[4] 刘飞燕. 津巴布韦锂矿工艺矿物学研究报告[R]. 2018.

LIU F Y. Research Report on Process Mineralogy of Lithium Mines in Zimbabwe [R]. 2018.

[5] 常丽华, 陈曼云. 透明矿物薄片鉴定手册[M]. 北京: 地质出版社, 2006.

CHANG L H, CHEN M Y. Handbook of thin slice identification of transparent minerals [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.

[6] 刘飞燕, 谢志远, 李成秀, 等. 西北地区某钛铁矿中钽的赋存状态研究[J]. 矿产综合利用, 2023(4):177-181.

LIU F Y, XIE Z Y, LI C X, et al. Occurrence of scandium in an ilmenite ore in Northwest China[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(4):177-181.

[7] 冀成庆, 沈明伟, 朱昌洛, 等. 微波场中锂辉石晶型转化实验研究[J]. 矿产综合利用, 2019(4):79-82.

JI C Q, SHEN M W, ZHU C L, et al. Study on spodumene phase transformation in microwave field[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(4):79-82.

[8] 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, 2020(1): 1-9.

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, 2020(1): 1-9.

Process Mineralogy of a Lithium Ore in Africa

LIU Feiyan¹, SUN Baowei², ZHOU Xiong¹, LIANG Youwei¹

(1. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Technology Innovation Center for Comprehensive Utilization of Strategic Minerals Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. 405 Geological Team of Sichuan Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, Chengdu 611830, Sichuan, China)

Abstract: This is an article in the field of process mineralogy. The research degree of lithium ores abroad is low, and the ore not only has high lithium but also is associated with niobium, tantalum, rubidium, cesium and other beneficial elements. To realize the comprehensive utilization of ore resources, the process mineralogy of the ore was studied in detail. The chemical composition of the ore was ascertained by X-ray fluorescence spectrometry and other chemical analysis methods. Using electron probe, X-ray diffraction analyzer, scanning electron microscope and energy dispersive spectrometry (SEM-EDS), the distribution characteristics of the mineral were studied, especially the occurrence state of lithium. The results show that the main carrier of lithium in the ore is spodumene, followed by amblygonite, and the lithium in other minerals is unusable lithium wrapped and included. The element partitioning results show that the theoretical grade of lithium concentrate is 6.64% and the theoretical recovery is 74.98%. The mineralogical factors affecting the recovery index of mineral processing were analyzed, and the occurrence state of associated beneficial components was found, which provided the mineralogical theoretical support for the comprehensive utilization of mine resources.

Keywords: Lithium; Process mineralogy; Occurrence status; Accompanying elements; Comprehensive utilization