

青海某低品位铷矿中铷的赋存状态及选矿工艺

白建海¹, 赵玉卿², 应永朋², 王守敬³, 熊馨²

(1. 青海省地质调查院, 青海 西宁 810012; 2. 青海省地质矿产测试应用中心, 青海 西宁 810008; 3. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006)

摘要: 这是一篇矿业工程领域的论文, 介绍了青海某低品位铷矿石的工艺矿物学研究和选矿工艺研究结果。通过化学分析、镜下鉴定、MLA、电子探针分析等手段, 查明了矿石中铷的赋存状态, 确定了矿石主要有用元素为 Rb, 主要含铷矿物为云母、钾长石。在此基础上, 对该矿石进行了破碎-粗粒云母筛分-磁-重-浮联合工艺选别, 回收了矿石中的铷和铯, 还通过实验证明了所得浮选云母精矿中的铷铯具有良好的可浸性, 作业浸出率可达 82% 以上。

关键词: 矿业工程; 铷矿; 工艺矿物学; 选矿工艺; 综合回收

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.05.015

中图分类号: TD92; TD983 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2023) 05-0080-06

中国的铷资源广泛分布在福建、甘肃、广西、河南、湖北、湖南、江西、内蒙古、青海、陕西、四川、西藏、新疆等省(区), 分为硬岩型铷矿资源和盐湖型铷矿资源^[1]。与国外资源相比, 中国的铷资源具有低品位、开发利用难度大的特点^[2]。针对硬岩型铷矿, 根据铷的赋存状态可分为云母型铷矿和长石型铷矿。目前, 在中国已发现的铷矿资源中, 除了江西宜春 414、新疆可可托海等少数矿山中的铷资源主要赋存在云母中外, 许多硬岩型铷矿资源主要赋存在长石中。由于长石型铷矿难以提取, 因此国内研究和开发利用的主要是云母型铷矿。

本文主要阐述对青海某低品位铷矿石进行工艺矿物学研究和选矿工艺研究的结果, 通过该研究查明了矿石中的铷主要分布在云母中, 可选矿物为云母, 并通过选矿工艺实验进一步证明了该矿石具备综合利用条件。

1 矿床地质概况

1.1 矿床地质

青海某低品位铷矿位于柴达木盆地东北缘, 祁连山南坡, 海拔 3140~4068 m, 出露地层属东昆仑—中秦岭地层分区, 为南宗务隆山地层小区, 隶属于柴达木北缘 Pb-Zn-Mn-Cr-Au-白云母成矿带。矿区主要出露地层主要为古元古代达肯大坂(岩)群片岩—大理岩段。

区内达肯大坂(岩)群呈北西-南东向展布, 普遍遭受了强烈的变质作用和深熔作用的叠加改造, 同时由于受构造影响, 该套地层整体表现一种“有层无序”的特征^[3]。根据前人资料将其划分为三个岩性段, 依次为大理岩段、片岩段、混合岩化片岩段^[4-6]。其中, 混合岩化片岩段主要岩性为灰黑夹肉红色混合岩化黑云石英片岩, 厚度超过 2 km, 岩石具混合岩化, 肉红色正长花岗岩基本沿岩石片理贯入, 少量斜交岩石片理^[7]。与片岩多呈渐变过渡整合接触, 接触界线不清晰, 与

收稿日期: 2020-10-23; 修回日期: 2021-01-05

基金项目: 青海学者专项基金(QHS201802)

作者简介: 白建海(1984-), 男, 工程师, 地质矿产专业, 主要从事地质填图, 有色金属、稀有金属、贵金属等矿产勘查工作。

通信作者: 赵玉卿(1987-), 女, 高级工程师, 主要从事有色金属、黑色金属、贵金属的矿产综合利用工作。

大理岩多呈整合接触。片岩段主要岩性为浅灰色黑云石英片岩，与大理岩段呈整合接触。大理岩段主要岩性为灰白色厚层状白云质大理岩、灰白色薄层状白云质大理岩夹透闪石大理岩，与片岩段多呈断层接触。

1.2 矿体特征

矿区内共圈定出稀有金属矿体 20 条矿体，多为多种稀有金属元素共、伴生，其中铷矿体 13 条，铷钽铍矿体 1 条、铷钽矿体 3 条、铷铍矿体 2 条、铍钽矿体 1 条；矿体主要集中分布于区内 9 条花岗伟晶岩脉中，长度约 58.5~280.08 m，真厚度约 1.12~12.48 m， Rb_2O 最高品位 0.258%、平均品位 0.08%； BeO 最高品位 0.096%、平均品位 0.05%； Ta_2O_5 最高品位 0.019%、平均品位 0.007%。其中 p_4 、 p_{87} 伟晶岩脉长度及规模均较大，显示出较好的找矿前景。

p_4 号白云母花岗伟晶岩：呈“囊”状展布，地表出露长约 480 m，宽约 35~150 m，通过工程控制在其中圈定出 $SMVI$ 铷矿体，共有 9 条单矿体组成（ $SMVI-1\cdots 9$ ），矿体整体走向 113° ，出露长度约 64.95~280.08 m，厚度 1.12~12.48 m，赋矿岩性主要为白云母花岗伟晶岩，矿化蚀变为白云母化、钠长石化。 Rb_2O 最高品位 0.24%，平均品位 0.09%；在该矿体中同时发现锂、铍矿化，其中含

铍矿物为黑色、墨绿色针状、星点状绿柱石， BeO 品位 0.05%；含锂矿物主要为浅粉紫色锂云母， LiO 品位 0.82%；该伟晶岩脉北东侧发育区内最主要断裂构造，岩脉展布方向与主构造方向一致，导致矿体受构造控制明显。

p_{87} 白云母花岗伟晶岩：呈不规则状展布，地表出露长约 320 m，宽约 40~90 m 不等，通过工程揭露，在其中圈定出 MV 稀有金属矿体，共有 2 条单矿体组成（ $SMV-1、2$ ），矿体严格受伟晶岩脉的产出形态控制，整体走向近东西，倾向近南，形态不规则。赋矿岩性为白云母花岗伟晶岩，蚀变主要为高岭土化、钾化；矿化蚀变主要为钠长石化、白云母化，白云母多呈片状展布，局部呈板状；矿体地表长度 120~400 m，厚度约 9.39~12.27 m， Rb_2O 最高品位 0.123%，平均品位 0.082%；同时伴生铍， BeO 最高品位 0.05%，平均品位 0.042%。

2 矿石特征

2.1 矿物成分

为了确定矿石中矿物组成，对原矿试样进行了 MLA 分析，分析结果见表 1。分析结果表明矿石主要组成矿物为石英、钠长石、白云母、钾长石、金云母等。

表 1 矿石矿物成分组成/%
Table 1 Mineral composition of ores

钠长石	石英	钾长石	白云母	金云母	方解石	黄铁矿	锆石	磷灰石	钙铁榴石	金红石	高岭石	针铁矿	白云石	铈铁矿
21.51	52.35	8.97	11.75	4.04	0.13	0.07	0.01	0.27	0.10	0.02	0.66	0.09	0.02	0.01

2.2 化学成分

矿石化学成分分析见表 2。由表 2 可以看出，

该矿石中主要利用元素为铷， Rb_2O 含量为 0.070%，铈和钽可考虑综合利用。

表 2 矿石化学成分分析结果/%
Table 2 Analysis results of chemical composition in ores

Li_2O	Rb_2O	Cs_2O	$Ta_2O_5^*$	$Nb_2O_5^*$	Fe_2O_3	CaO	MnO	SiO_2
0.068	0.080	0.0054	32.6	85.9	0.34	0.29	0.045	81.32
Al_2O_3	K_2O	Na_2O	MgO	S	P_2O_5	TiO_2	Au^*	Ag^*
9.97	2.74	2.65	0.48	0.0081	0.11	0.05	0.04	0.43

*单位为：g/t。

2.3 主要矿物嵌布粒度

本次研究采用 MLA 分析方法详细统计了主要矿物的粒度组成。从分析结果可以看出，矿石中石英、钠长石、钾长石和云母粒度均较粗。分析结果见表 3。

2.4 主要矿物的嵌布特征

(1) 云母

云母在矿石中总含量为 15.79%。显微镜观察显示云母主要呈自形、半自形片状晶形（图 1），浸染状分布、条带形分布（图 2），粒度较粗，一

表 3 主要矿物嵌布粒度

Table 3 Distribution size of main minerals

粒度/ μm	石英/%	钠长石/%	钾长石/%	白云母/%	金云母/%
-300+150	34.45	29.72	27.92	18.92	7.04
-150+100	18.7	17.89	15.89	12.69	6.87
-100+75	16.55	15.99	17.51	13.24	10.41
-75+38	18.26	20.17	20.98	24.15	24.88
-38+20	5.12	5.96	7.17	11.18	17.25
-20+10	2.13	3.05	3.78	7.08	14.15
-10+5	0.85	1.58	2.13	3.57	8.32
-5	0.29	0.37	1.16	1.57	3.88

一般为 0.1~0.3 mm。为了研究云母中有用元素含量,本次研究对云母进行了电子探针分析,分析结果见表 4、5。

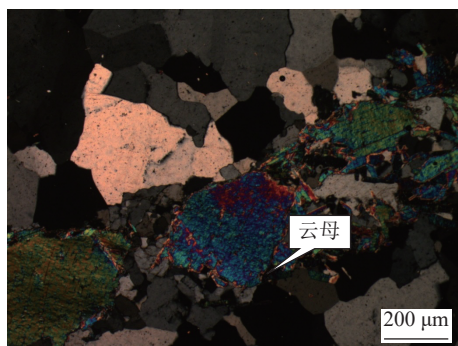


图 1 云母呈半自形片状晶型

Fig.1 Mica with hypidiomorphic lamellar crystal form

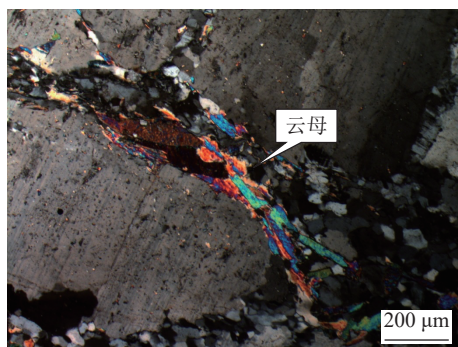


图 2 云母呈条带型定向分布

Fig.2 Mica distributed directionally in strip shape

从电子探针分析结果可以看出,云母是矿石中主要的含铷矿物,包括白云母和金云母。云母中 Rb_2O 含量变化较大,其中白云母中 Rb_2O 含量范围从 0.57% 到 0.83%,平均 0.67%;而金云母中 Rb_2O 含量范围从 0.19% 到 0.40%,平均 0.27%。

由于云母中 Rb_2O 含量变化较大,本次研究采用单矿物分析法确定矿石中云母的铷含量。首先对挑选的单矿物云母进行了 X 衍射分析,分析结果表明该单矿物样品中云母矿物含量为 97%,石英为 2%,其他矿物为 1%。其次对该单矿物样品

表 4 白云母电子探针分析结果/%

Table 4 Electron microprobe analysis of muscovite

组分	1	2	3	4	5	6	7	8	平均
Na_2O	0.43	0.45	0.44	0.47	0.37	0.56	0.35	0.50	0.45
K_2O	9.35	9.74	10.19	10.16	10.15	10.40	10.65	10.36	10.12
Rb_2O	0.71	0.83	0.62	0.59	0.62	0.79	0.66	0.57	0.67
MgO	0	0.03	0	0.01	0	0.07	0.46	0.15	0.09
MnO	0.41	0.4	0.43	0.45	0.34	0.20	0.18	0.31	0.34
TiO_2	0.06	0.05	0.06	0	0.04	0	0	0.03	0.03
SiO_2	46.61	46.42	46.20	45.44	46.34	47.32	47.06	47.41	46.60
Al_2O_3	31.70	32.09	32.52	32.57	33.59	35.17	34.21	33.26	33.14
Fe_2O_3	1.25	1.29	1.24	1.29	1.18	0.83	0.89	1.20	1.15
Cs_2O	0	0.06	0.04	0.02	0.02	0	0.06	0	0.03
Total	90.52	91.37	91.73	91.00	92.63	95.32	94.50	93.78	/

表 5 金云母电子探针分析结果/%

Table 5 Electron microprobe analysis of phlogopite

组分	1	2	3	4	5	平均
Na_2O	0.11	0.20	0.13	0.12	0.13	0.14
K_2O	9.73	8.68	9.28	9.28	9.36	9.27
Rb_2O	0.40	0.22	0.26	0.27	0.19	0.27
MgO	23.56	21.84	23.46	22.97	22.97	22.96
MnO	0.14	0.10	0.12	0.15	0.11	0.12
TiO_2	0	0	0.04	0	0.06	0.02
SiO_2	42.51	41.40	41.78	41.89	41.70	41.86
Al_2O_3	16.34	18.04	16.51	16.85	16.82	16.91
Fe_2O_3	1.70	1.64	1.57	1.89	1.73	1.71
Cs_2O	0.08	0.06	0.03	0.07	0.06	0.06
Total	94.55	92.16	93.17	93.49	93.14	

进行化学分析,结果见表 6。

表 6 云母单矿物化学分析结果/%

Table 6 Chemical analysis results of mica monomineral

Li_2O	Rb_2O	Cs_2O	Ta_2O_5^*	Nb_2O_5^*
0.22	0.37	0.019	56.6	407

*单位为: g/t。

分析结果显示云母单矿物中 Rb_2O 含量为 0.37%,是矿石中主要的含铷矿物之一。由于矿石中云母粒度较粗,有利于其选矿富集。但也由此可知,若选矿过程中只选别云母精矿,则选矿精矿产品中 Rb_2O 含量的上限为 0.37% 左右。

(2) 钾长石

钾长石是矿石中主要矿物之一,其在矿石中的含量为 8.97%。矿石中钾长石多为浸染状分布,半自形粒状颗粒,粒度较粗。对钾长石进行了电子探针分析,结果表明矿石中钾长石铷含量较低,且变化不大,平均 0.17% 左右。电子探针分析结果见表 7。

(3) 钠长石

钠长石是矿石中主要的脉石矿物之一,在矿石中含量为 21.51%。矿石中的钠长石主要呈自形

表 7 钾长石电子探针分析结果/%					
Table 7 Electron microprobe analysis of potash feldspar					
组分	1	2	3	4	平均
Na ₂ O	0.62	1.15	0.37	0.62	0.69
K ₂ O	15.56	14.71	16.01	15.25	15.38
Rb ₂ O	0.16	0.18	0.17	0.16	0.17
MgO	0	0	0	0.01	0
MnO	0.02	0	0	0	0.01
TiO ₂	0	0.02	0	0.02	0.01
SiO ₂	65.34	65.5	65.46	64.65	65.24
Al ₂ O ₃	17.98	18.33	18.04	17.95	18.08
Cs ₂ O	0	0	0	0.01	0
Total	99.68	99.89	100.05	98.67	99.58

板状，粒度较粗。对钠长石进行电子探针分析，结果表明钠长石中不含铷。

(4) 石英
石英是矿石中主要脉石矿物之一，在矿石中主要呈他形粒状，其在矿石中含量达到 52.35%。对石英进行了电子探针分析，结果表明石英中不含铷。

3 铷的赋存状态

为了确定矿石中铷的赋存状态，本次研究对原矿中的铷进行了金属量平衡计算，计算结果见表 8。经过计算，原矿石中 Rb₂O 主要分布在云母中，占比达到 82.26%，钾长石中 Rb₂O 含量则较低，占比为 17.74%。由于钾长石中的铷在后续冶炼中提取成本高、难度大，因此该矿选矿回收主要以回收云母矿物为主。

表 8 原矿石中铷金属量平衡计算				
Table 8 Equilibrium calculation of rubidium metal content in raw ore				
矿物	矿物含量/%	Rb ₂ O 含量/%	Rb ₂ O 金属量/g	Rb ₂ O 分布率/%
云母	18.49	0.37	6.84	82.26
钾长石	8.68	0.17	1.48	17.74
钠长石	20.82	0	0.00	0.00
石英	50.67	0	0.00	0.00
其他	1.34	0	0.00	0.00
合计	100.00	0.083	8.32	100.00

4 选矿工艺研究

根据工艺矿物学研究结果，针对该矿石主要回收元素为铷，主要回收矿物为云母（钾长石不做回收），并伴生回收铌钽矿物的选别特征，对该矿进行了磁选、重选、浮选单工艺和联合工艺选别，最终确定采用碎矿-粗粒云母筛分-磁重联合

回收铌钽-尾矿浮选回收铷的选矿工艺流程见图 3。闭路实验结果见表 9。

闭路实验结果表明，原矿采用碎样—粗粒云母筛分—磁重联合回收铌钽—尾矿浮选回收铷的工艺流程，可获得+2 mm 含铷云母精矿、浮选铷精矿、铌钽粗精矿产品。含铷精矿产品中 Rb₂O 总回收率为 74.09%，含铷云母精矿和浮选铷精矿的品位均接近该矿中云母纯矿物铷含量（0.37%），选别效果较好。

5 浮选精矿产品中锂、铷、铯浸出探索实验

本次研究对浮选铷精矿产品进行了锂铷铯的浸出探索实验，考查以云母为主的精矿产品中锂铷铯的浸出效果。探索实验所用铷精矿 Li₂O 含量为 0.41%，Rb₂O 含量为 0.33%，Cs₂O 含量为 0.037%。浸出探索实验流程见图 4，实验结果见表 10。

浸出探索实验结果表明，经硫酸熟化处理后，再用水浸出，铷精矿中锂、铷、铯的可浸性较好。随着熟化温度的升高，浸出率逐渐增加，经 230 ℃ 硫酸熟化，锂、铷、铯的作业浸出率均达 82% 左右，可浸性较好。但铷精矿品位较低，浸出成本很高。

6 结 论

(1) 矿石中 Rb₂O 含量为 0.080%，是主要有用元素。铷主要赋存在云母和钾长石中，以云母为主，且白云母中铷含量较高。研究结果表明，该矿云母中 Rb₂O 含量为 0.37%，分布率为 82.26%；钾长石中 Rb₂O 含量为 0.17%，分布率为 17.74%。

(2) 云母在矿石中矿物含量为 18.49%，矿石中大部分铷分布在云母中，所以铷在矿石中呈较为集中状态分布。由于钾长石中铷含量较低，且钾长石中的铷在后续冶炼中提取成本高、难度大，因此确定选矿的主要回收矿物为云母。

(3) 矿石中云母粒度较粗，一般为 0.1~0.3 mm，较为易选。

(4) 矿石中云母单矿物分析显示 Ta₂O₅ 含量为 56.6 g/t，Nb₂O₅ 含量为 407 g/t，但电子探针分析显示其不含铌钽，主要是由于云母中包裹了少量的微细粒铌钽矿物造成的。

(5) 选矿工艺研究结果表明，原矿采用碎样—粗粒云母筛分—磁重联合回收铌钽—尾矿浮选回收铷的工艺流程，可获得+2 mm 含铷云母精

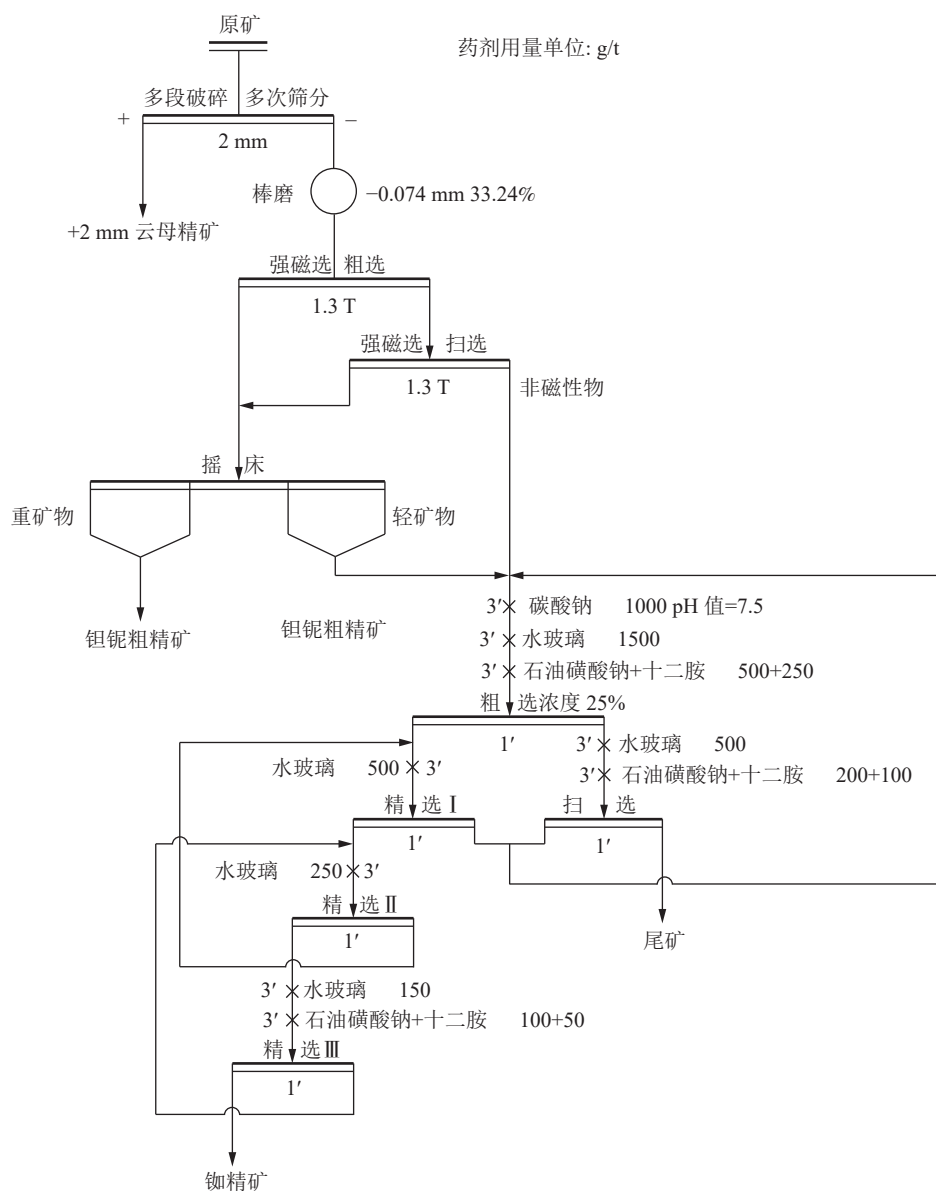


图 3 闭路实验流程

Fig.3 Closed-circuit flotation flowsheet

表 9 闭路流程技术指标

Table 9 Technical index of closed circuit process

产品名称	产率/%	Rb ₂ O 含量/%	Nb ₂ O ₅ 含量/(g/t)	Ta ₂ O ₅ 含量/(g/t)	Rb ₂ O 回收率/%	Nb ₂ O ₅ 回收率/%	Ta ₂ O ₅ 回收率/%
+2 mm 云母精矿	3.21	0.37	407	56.60	14.68	12.92	6.41
铷精矿	14.58	0.33	334	81.10	59.41	48.13	41.70
钽铌粗精矿	3.70	0.037	577	236	1.68	21.10	30.73
尾矿	78.51	0.025	23.0	7.64	24.24	17.85	21.16
原矿	100.00	0.081	101.2	28.30	100.00	100.00	100.00

矿 (Rb₂O 品位 0.37%)、浮选铷精矿 (Rb₂O 品位 0.33%)、钽铌粗精矿产品。全流程 Rb₂O 总回收率为 74.09%。

(6) 对含 Li₂O 0.41%，含 Rb₂O 0.33%，含 Cs₂O 0.037% 铷精矿进行锂铷铯的浸出探索实验，

经 230℃ 硫酸熟化，锂、铷、铯的作业浸出率均达 82% 左右，可浸性较好。但铷精矿品位较低，浸出成本很高。

(7) 通过本次研究，查明了该矿中的伴生元素锂、铷、铯均能得到可综合利用的产品。

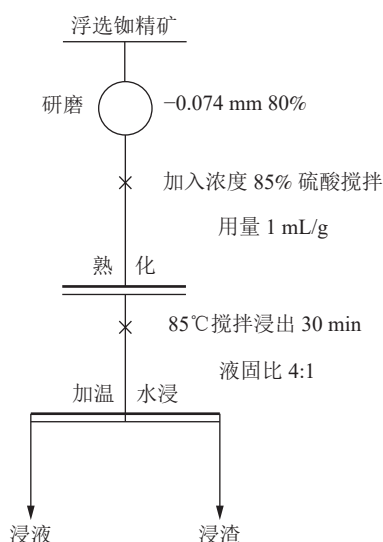


图4 浸出探索实验流程

Fig.4 Process of exploratory test of leaching process

表10 浸出探索实验结果

Table 10 Test results of leaching exploration

熟化温度/℃	浸渣产率/%	浸渣品位/%			作业浸出率/%		
		Li ₂ O	Rb ₂ O	Cs ₂ O	Li ₂ O	Rb ₂ O	Cs ₂ O
180	71.60	0.15	0.16	0.015	73.8	65.3	71.0
200	64.08	0.13	0.13	0.014	79.7	74.8	75.8
230	61.93	0.12	0.098	0.011	81.9	81.6	81.6

参考文献：

- [1] 孙艳,王瑞江,元锋,等.世界铷资源现状及我国铷开发利用建议[J].中国矿业,2013,22(9):11-13+57.
SUN Y, WANG R J, QI F, et al. The current status of rubidium resources in the world and suggestions for the development and utilization of rubidium in China[J]. China Mining, 2013, 22(9):11-13+57.
[2] 傅昕,王玲.硅酸盐矿石资源中铷的提取工艺综述[J].矿

产综合利用,2020(6):171-179.

FU X, WANG L. Review of technology of rubidium extraction from silicate ore resources[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(6):171-179.

[3] 李善平,湛守智,金婷婷,等.青海沙柳泉铌钽矿床伟晶岩稀土元素地球化学特征及物源分析[J].稀土,2016,37(1):39-46.

LI S P, ZHAN S Z, JIN T T, et al. Geochemical characteristics and provenance analysis of rare earth elements in pegmatites of Shaliuquan niobium-tantalum deposit in Qinghai[J]. Rare Earths, 2016, 37(1):39-46.

[4] 吕晓强.柴北缘生格地区花岗伟晶岩型铌钽矿成因及成矿潜力评价[R].西安:长安大学,2012.

LV X Q. Genesis and metallogenic potential evaluation of granite pegmatite-type niobium-tantalum deposit in Shengge area, northern Qaidam Basin[R]. Xi'an: Chang'an University, 2012.

[5] 张建平,等.青海省乌兰县夏日达乌铌稀有金属矿普查报告[R].西宁:青海省核工业地质局,2004.

ZHANG J P, et al. General survey report of Dawu niobium rare metal deposit in Xiaidawu, Wulan County, Qinghai Province [R]. Xining: Qinghai Provincial Nuclear Industry Geology Bureau, 2004.

[6] 徐新文.青海省铌钽矿类型、特征及找矿方向[J].西部探矿工程,2009(3):144-147.

XU X W. Types, characteristics and prospecting directions of niobium-tantalum deposits in Qinghai Province[J]. Western Prospecting Engineering, 2009(3):144-147.

[7] 赵玉卿,王守敬,田滔,等. MLA在青海某石煤钒矿钒的赋存状态研究中的应用[J].矿产综合利用,2020(1):89-93.

ZHAO Y Q, WANG S J, TIAN T, et al. Application of MLA in the study of the occurrence of vanadium in a stone coal vanadium mine in Qinghai[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(1):89-93.

Occurrence State and Beneficiation Technology of Rubidium in a Low Grade Rubidium Ore in Qinghai Province

Bai Jianhai¹, Zhao Yuqing², Ying Yongpeng², Wang Shoujing³, Xiong Xin²

(1. Qinghai Institute of Geological Survey, Xining, Qinghai, China; 2. Qinghai Province Geology Ore Testing and Application Center, Xining, Qinghai, China; 3. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Zhengzhou, Henan, China)

Abstract: This is an essay in the field of mining engineering, which introduces the research results of process mineralogy and mineral processing technology of a low-grade rubidium ore from Qinghai Province. By means of chemical analysis, microscopic identification, MLA and electron probe microanalysis, the occurrence of rubidium in the ore is found out. The main useful element of the ore is Rb, and the main rubidium-bearing minerals are mica and potash feldspar. On this basis, the combined process of crushing, coarse-grained mica screening, magnetic gravity gravity flotation was used to separate the ore, and Nb, Ta and Rb were recovered from the ore. The test results show that the lithium, rubidium and cesium in the flotation mica concentrate has good leachability, and the operation leaching rate can reach more than 82%.

Keywords: Mining engineering; Rubidium; Process mineralogy; Mineral processing technology; Comprehensive recovery