



李家沟锂辉石矿采选固废矿物工艺矿物学及锂的赋存状态

陈彦庆, 吴俊峰, 陈林, 王盼盼

(四川省地质矿产勘查开发局 成都综合岩矿测试中心, 稀有稀土战略资源评价与利用四川省重点实验室, 四川 成都 610081)

摘要: 这是一篇工艺矿物学领域的论文。锂是重要的稀有金属, 广泛应用于冶金、机械、化工、陶瓷、玻璃建材等工业, 成为新型材料的重要部分。此次研究选取了李家沟锂辉石矿采选固废矿物, 对其进行系统的工艺矿物学研究, 查明固废矿物中主要含锂矿物以锂辉石为主, 其次为锂白云母, 少量锂云母、铁锂云母、磷锂锰矿、锂电气石等, 锂辉石为主要的回收矿物。锂辉石嵌布粒度主要分布在 0.04~0.32 mm 粒级范围。粗粒级中锂辉石解离度相对较低, 不超过 80%, 总解离度为 80.69%。精矿产品中 Li₂O 的理论品位为 7.25%, 精矿理论回收率为 89.69%。

关键词: 工艺矿物学; 李家沟; 固废矿物; 锂辉石; 锂的赋存状态; 人工重砂

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.06.030

中图分类号: TD953 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 06-0191-08

引用格式: 陈彦庆, 吴俊峰, 陈林, 等. 李家沟锂辉石矿采选固废矿物工艺矿物学及锂的赋存状态[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(6): 191-198.

CHEN Yanqing, WU Junfeng, CHEN Lin, et al. Process mineralogy of solid waste minerals from lijiaogou spodumene mine and occurrence state of lithium[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(6): 191-198.

锂是重要的稀有金属, 广泛应用于冶金、机械、化工、陶瓷、玻璃建材等工业, 成为新型材料的重要部分^[1-2]。李家沟锂辉石矿位于四川西部金川县李家沟地区^[3], 主要由近矿围岩(二云石英片岩、钠长变粒岩等变质岩)及混入的花岗伟晶岩型锂辉石矿组成。本文对李家沟锂辉石矿采选固废矿物进行了系统的工艺矿物学研究, 查明了固废矿物中含锂矿物主要为锂辉石, 锂辉石的工艺特性、锂的分布和回收富集规律、共伴生有益

组分及其可利用性等, 为再次选矿回收利用提供了详尽的固废矿物性质资料。

1 物质组成

1.1 化学成分

李家沟锂辉石矿采选固废矿物主要由近矿围岩和少量混入的锂辉石矿组成, 分析样是综合样破碎后缩分采取的, 采用化学多元素分析确定主要元素及共伴生元素含量, 结果见表1。

表1 化学分析(多项)结果/%
Table 1 Results of chemical analysis

Li ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	BeO	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Rb ₂ O	TiO ₂	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	B ₂ O ₃	
0.46	71.78	14.51	0.014	2.58	3.59	2.91	1.49	0.096	2.83	0.23	0.045	1	0.47	0.003	0.000 859	0.099

收稿日期: 2023-10-27

基金项目: 四川省地质调查研究院科研项目(SCIGS-CZDZX-2023002)

作者简介: 陈彦庆(1986-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为矿物学、岩石学。

分析样中 Li₂O 品位为 0.46%，含量虽低，但在边界品位附近，仍可再次选矿富集。伴生有价元素主要是铌、钽、铍，未达到综合回收利用标准；另外 Rb₂O 可综合回收利用；有害杂质 P₂O₅ 含量低，前期不需要单独处理。

1.2 矿物组成

自动定量检测系统 (MLA) 测定，分析样中

主要锂矿物或含锂矿物以锂辉石为主，含少量锂云母、磷锂锰矿等；伴生矿物为少量铍矿物和极微量铌钽矿物，其中铍矿物以绿柱石为主，铌钽矿物以铌铁矿、钽铁矿为主；脉石矿物以石英、斜长石为主，其次为钾长石、黑云母、白云母，含少量绿泥石、角闪石、辉石、方解石等。

LA-ICPMS 矿物微量元素原位分析见表 2。

表 2 LA-ICPMS 矿物微量元素原位分析结果/(g/t)
Table 2 Results of LA-ICPMS in situ analysis of mineral trace elements

矿物名	锂辉石	锂云母	铁锂云母	锂白云母	磷锂锰矿	锂电气石	钠长石	正长石	石英	绿柱石	磷灰石	方解石
Li	33 838.6	22 541.93	10 335.78	3 020.75	49 842.95	6 326.12	10.13	99.74	306.33	4 404.53	141.19	128.43
Li ₂ O	72 511.28	4 8304.14	22 148.09	6 473.04	106 806.32	13 555.97	21.7	213.73	656.42	9 438.29	302.55	275.2
SiO ₂	62.58	49.49	47.77	45.81	0.29	62.27	66.62	63.99	98.01	64.04	0.56	0.08
Al	153 076.16	129 876.05	177 437.17	206 849.37	79.03	0	115 514.27	103 252.66	1 035.77	103 771.09	273.03	92.86
K	37.01	96 920.71	87 312.08	86 661.11	0.42	7 115.17	770.96	129 182.78	54.74	226.36	4.29	0
Na	720.42	669.24	1 107.95	2 220.2	3.01	0	81 805.77	1 911.96	27.29	10 450.92	113.29	133.3
Mg	3.31	11.83	11.47	8.52	8.95	1 051.14	0.48	2.32	10.35	1.67	7.94	11.97
Ca	201.54	207.38	145.89	133.12	160.24	0	1 044.81	239.39	568.65	160.62	383 806.18	381 887.14
Ti	53.71	221.8	84.06	194.2	66.02	0	0.7	1.58	2.35	16.24	53.4	52.49
Mn	589.6	5 666.95	2 528.59	1 652.77	243 585.59	544.45	19.16	8.01	3 041.83	10.35	23 457	34 880.29
Fe	2 532.85	53 616.41	30 304.87	17 399.75	130 721.8	0	8.87	40.8	307.45	880.31	701.6	1 585.49
P ₂ O ₅	0.03	0.03	0.03	0.03	40.09	30.48	0.12	0.05	0.32	0.02	42.42	41.25
Be	1.44	11.8	19.45	19.39	0.02	0	2.99	0.23	43.22	46 458.98	0.08	0.83
B	5.39	12.86	110.82	167.52	0.25	11 399.91	2.39	2.58	619.45	5.87	0.83	1.77
Cu	0.35	0	0.22	0.34	0.04	135.83	3.12	0.35	4.21	0.76	0.07	0.17
Zn	7.13	639.56	502.67	395.7	405.61	1 219.94	0.32	0.25	107.98	91.93	0.69	1.84
Rb	1.78	8 889.62	6 556.42	5 184.14	0.09	0	3.12	4 423.54	0.83	248.26	0	0.01
Zr	0.21	0.01	0.05	0.31	0	0	0	0	0.01	0.25	0.02	0.28
Nb	0.34	250.66	28.41	141.32	0.01	24.08	0.09	0	0.03	0.07	0	0.04
Sn	226.45	166.63	277.52	647.21	0.25	158.37	0.54	0.4	13.85	1.1	2.03	3.45

综合上述鉴定测试方法，结合光学显微鉴定、光谱半定量分析等得出分析样中的矿物成份

及含量，结果见表 3。

表 3 李家沟固废矿物矿物成份及含量
Table 3 Composition and content of Lijiagou solid waste minerals

主要矿物		次要矿物		微量至偶见矿物
矿物名称	含量/%	矿物名称	含量/%	
石英	34	锂辉石	5	锂云母、铁锂云母、锂电气石、磷锂锰矿、铌铁矿、钽铁矿、细晶石、锡石、绿柱石、硅铍石、珍珠云母、辉石、锰铝榴石、黝帘石、蓝晶石、高岭石、榍石、方解石、铁白云石、菱铁矿、萤石、褐铁矿、钛铁矿、金红石、钙钛矿、锆石、隐钾锰矿、黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、磷灰石、独居石、磷钇矿
斜长石	24	锂白云母	2	
		白云母	8	
		黑云母	9	
		钾长石	9	
		电气石	1	
		角闪石	2	
		绿泥石	2	

2 矿物工艺特征

2.1 锂矿物与含锂矿物

主要锂矿物与含锂矿物以锂辉石为主，其次

为锂白云母，少量锂云母、铁锂云母、磷锂锰矿、锂电气石等。

锂辉石是最主要回收利用的锂矿物，仅出现于花岗伟晶岩中^[4-6]。多为自形-半自形板状、柱状

晶体（见图1），嵌布粒度较粗，粒度大小悬殊，粗大者长径多为10~50 mm，短径多为0.5~5 mm；粒度细小者多为0.2~1.5 mm。锂辉石化学成分能谱分析结果见表4，普遍含有少量铁、锰，部分含少量的钠。

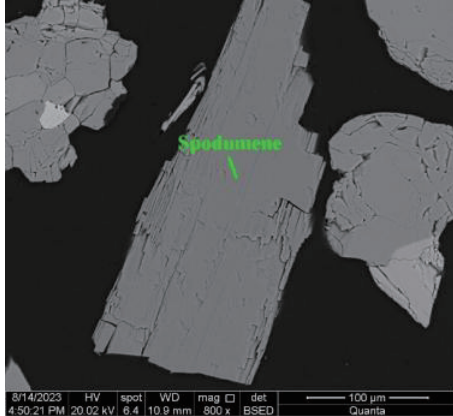


图1 锂辉石呈柱状单体颗粒

Fig.1 Spodumene columnar monomer particle

表4 锂辉石化学成分能谱分析结果/%

Table 4 Results of energy spectrum analysis of spodumene chemical components

测点	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	FeO	Na ₂ O
平均	29.62	69.79	0.47	0.10	0.02

注：能谱无法检测到Li₂O，表中数值与实际含量有偏差。

锂辉石多与石英、钾长石、斜长石、白云母毗邻嵌布，部分穿插进钾长石、斜长石中，少数被钾长石、斜长石包裹。部分颗粒边缘被细小石英及少量细小白云母、长石交代溶蚀（见图2）于选矿。

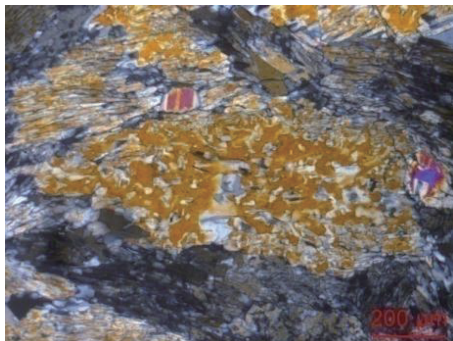


图2 石英、白云母溶蚀交代锂辉石

Fig.2 Quartz, muscovite solution replacement spodumene

锂辉石往往伴随片状白云母同时出现，而黑云母则不出现，白云母有可能是花岗伟晶岩中寻找锂辉石的指示性矿物；而黑云母出现则意味着小范围内不会有锂辉石。

2.2 绿柱石

绿柱石是主要的铍矿物，多呈半自形-他形柱状，粒径可见8 mm，柱面有纵纹。绿柱石化学成分能谱分析结果见表5，有少量碱金属钠、钡代替铍，少量铁代替铝。

表5 绿柱石化学成分能谱分析结果/%

Table 5 Results of energy spectrum analysis of chemical constituents of beryl

测点	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	Cs ₂ O
平均	0.84	21.46	77.05	0.28	0.37

注：能谱无法检测BeO，表中数值与实际含量有偏差。

绿柱石多与锂辉石、长石、石英等矿物连生（见图3）。绿柱石含量低，未达到综合回收利用标准，无经济开采价值。

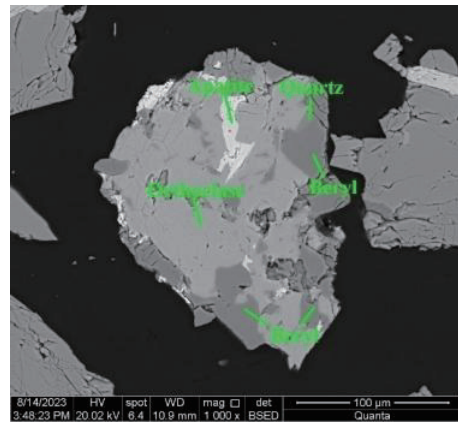


图3 绿柱石与钾长石连生

Fig.3 Beryl associated with orthoclase

2.3 铌钽矿物

铌钽矿物的化学成分能谱检测结果见表6，铌钽矿物主要为铌铁矿-钽铁矿系列矿物，含量非常低，主要有钽铌铁矿、铌铁矿、钽铁矿、铌锰矿、钽锰矿，铌钽锰矿。铁与锰、铌与钽分别为两个完全类质同象系列，常有钛、锡等的混入。一般呈自形-半自形板状晶，部分呈细粒至微细粒形式包裹在石英、钠长石、钾长石、锂辉石等矿物中。

表6 铌钽矿物化学成分能谱分析结果/%

Table 6 Results of energy spectrum analysis of chemical constituents of niobium tantalum minerals

测点	MnO	FeO	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	TiO ₂	SnO ₂	CaO
平均	10.52	9.67	59.77	19.25	0.54	0.22	0.04

铌钽矿物含量较低，未达到综合回收利用标准，无经济开采价值。

2.4 石英

石英是主要脉石矿物，其能谱测定结果见表 7，石英中杂质含量较少，普遍含少量铝元素，部分含少量钾、铁。

表 7 石英化学成分能谱分析结果/%

Table 7 Results of chemical composition analysis of quartz by energy spectrum

测点	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	FeO
平均	99.27	0.43	0.08	0.06

石英分布于两类不同类型岩石中：①分布于花岗伟晶岩中，多呈他形粒状，嵌布粒度较粗大，多为 1~5 mm，常与斜长石、钾长石紧密相连（见图 4），部分与锂辉石、白云母等紧密相连，部分与微斜长石，条纹长石构成文象结构、蠕虫结构，部分交代锂辉石，少量细小石英被斜长石、钾长石、石榴石包裹；②分布于变质岩组成的近矿围岩中，多呈他形粒状，嵌布粒度较细，多为 0.05~0.5 mm，少部分为 1~2 mm，部分被压扁拉长并沿长轴延伸方向定向分布，常与白云母、黑云母、斜长石、电气石、等矿物共生，部分斜长石中包裹细小石英形成筛状变晶结构（见图 5）。

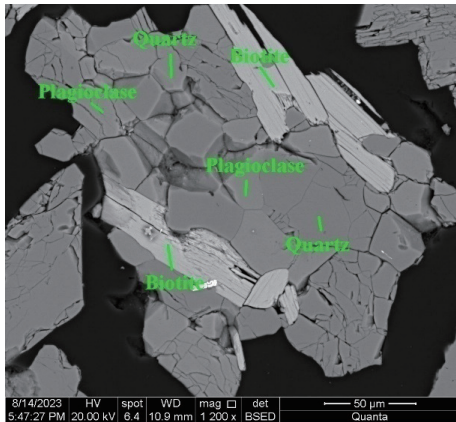


图 4 石英、斜长石、黑云母紧密连生

Fig.4 Quartz, plagioclase and ourmaline closely connected

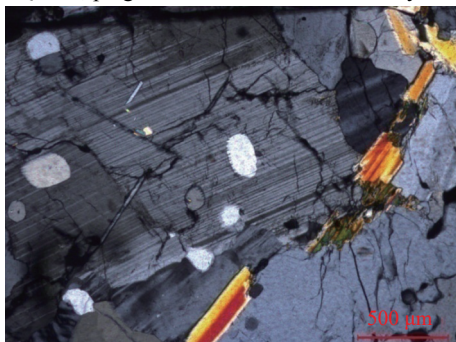


图 5 石英包裹在斜长石中

Fig.5 Quartz encased in plagioclase

2.5 斜长石

斜长石以钠长石为主，其化学成分能谱分析结果见表 8，斜长石中除含硅、铝、钠外，普遍含有钙、钾等元素。

表 8 钠长石化学成分能谱分析结果/%

Table 8 Results of energy spectrum analysis of chemical constituents of albite

测点	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	K ₂ O	FeO
平均	11.46	19.46	68.70	0.15	0.19	0.04

斜长石分布于两类不同类型岩石中：①分布于花岗伟晶岩中，多呈半自形板柱状，嵌布粒度较粗大，长径一般 5~30 mm，短径一般 0.5~5 mm。常与石英、钾长石紧密相连，部分与锂辉石、白云母等紧密相连；②分布于变质岩组成的近矿围岩中，以钠长石为主，多呈他形粒状，嵌布粒度较细，多为 0.05~0.5 mm，少部分为 1~2 mm，部分被压扁拉长并沿长轴延伸方向定向分布，常与石英、白云母、黑云母、电气石等矿物共生。

2.6 钾长石

钾长石化学成分能谱分析结果见表 9，钾长石中除含硅、铝、钾外，普遍含有钠、铷，部分含少量铁和钡，个别含锰。

表 9 钾长石化学成分能谱分析结果/%

Table 9 Results of energy spectrum analysis of chemical constituents of potassium feldspar

测点	化学成分及含量/%							
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	Rb ₂ O	Na ₂ O	FeO	BaO	MnO
平均	18.19	64.69	16.41	0.32	0.16	0.08	0.14	0.01

钾长石主要分布于花岗伟晶岩中，多呈半自形板柱状，嵌布粒度较粗大，长径多为 5~30 mm，短径 0.5~5 mm，常与石英、斜长石紧密相连，部分与锂辉石、白云母等紧密相连，部分与石英构成文象结构、蠕虫结构。少部分钾长石则分布于变质岩组成的近矿围岩^[2]中，多呈他形粒状，嵌布粒度较细，多为 0.1~0.5 mm，常与石英、白云母、黑云母、电气石等矿物共生。

2.7 白云母

白云母的化学成分能谱分析结果见表 10，白云母普遍含少量钠、铁、锰、铷等，部分含少量钡、锌等。

白云母分布于两类不同类型岩石中：①分布于花岗伟晶岩中，多呈片状，嵌布粒度较粗大，多为 0.5~5 mm，常与石英、钾长石、斜长石紧密相连，部分与锂辉石等紧密相连或交代锂辉石；

②分布于变质岩组成的近矿围岩中，多呈片状、鳞片状，嵌布粒度较细，多为0.05~1 mm，多呈定向分布，常与石英、长石、黑云母、电气石等矿物共生。

表 10 白云母成分能谱测定结果/%
Table 10 Results of composition determination of muscovite by energy spectrum

测点	F	TiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	FeO	Rb ₂ O	Na ₂ O	MgO	MnO	ZnO	Cs ₂ O
平均	0.46	0.41	35.35	47.86	11.24	3.37	0.36	0.10	0.63	0.14	0.04	0.05

注：能谱无法检测到Li₂O和H₂O，表中数值与实际含量有偏差。

2.8 黑云母

黑云母化学成分能谱分析结果见表 11，黑云

母除含钾、铁、镁、铝、硅外，普遍含有数量不等的锰、铷、铯等元素，部分含少量钒、锌、铬。

表 11 黑云母化学成分能谱分析结果/%
Table 11 Results of energy spectrum analysis of biotite chemical constituents

测点	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	TiO ₂	FeO	MnO	Rb ₂ O	V ₂ O ₅	ZnO	Cr ₂ O ₃
平均	8.10	18.59	36.65	10.03	3.52	22.64	0.34	0.05	0.06	0.01	0.01

注：能谱未能检测H₂O，表中结果比实际值偏高。

黑云母分布于两类不同类型岩石中：①大部分分布于变质岩组成的近矿围岩中，多呈片状、鳞片状，嵌布粒度较细，多为0.05~1 mm，少量可达2 mm，多呈定向分布，常与石英、长石、白云母、电气石等矿物共生，少量黑云母包裹细小石英、电气石；②少部分分布于花岗伟晶岩中，多呈片状，嵌布粒度多为0.1~3 mm，与石英、钾长石、斜长石紧密相连。

2.9 电气石

电气石主要分布于变质岩组成的近矿围岩中，多见于二云石英片岩、钠长变粒岩中，多呈半自形柱状，长径多为0.1~1.6 mm，短径多为0.02~0.4 mm，多呈定向-半定向分布，常与石英、白云母、黑云母、长石、等矿物紧密镶嵌，部分包裹细小石英形成筛状变晶结构，少量被黑云母包裹。电气石在近矿围岩中含量较高，达到

综合回收利用标准，具开采价值。

2.10 其他矿物

李家沟固废矿物中还有少量角闪石、绿泥石，微量细晶石、锡石、绿柱石、硅铍石、珍珠云母、辉石、锰铝榴石、黝帘石、蓝晶石、高岭石、楣石、方解石、铁白云石、菱铁矿、萤石、褐铁矿、钛铁矿、金红石、钙钛矿、锆石、隐钾锰矿、黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、磷灰石、独居石、磷钇矿。

3 人工重砂研究

为查明固废矿物中锂的富集规律，对其进行人工重砂研究^[1]。首先将固废矿物破碎至-2.0 mm，并进一步分离，流程见图 6。接着对各粒级样品进行筛分、重选（见表 12），并对重选产品进行了化学分析及分布率计算。

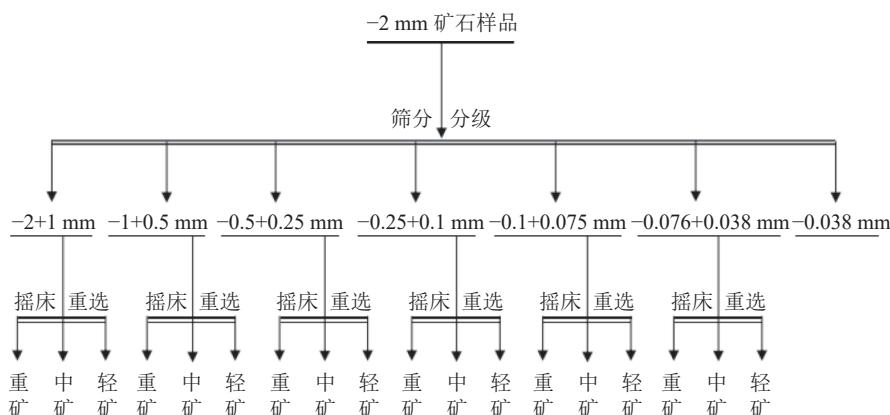


图 6 人工重砂样分离流程

Fig.6 Flow chart of manual sand sample separation

表 12 人工重砂样筛分、重选结果

Table 12 Results of screening and re-sorting of manual heavy sand samples

粒级/mm	重选产品	重量/g	产率/%	Li ₂ O 含量/%	Li ₂ O 分布率/%
-2+1	重矿	999.8	5.1	1.13	12.46
	中矿	3 008.6	15.2	0.555	18.42
	轻矿	2 674.5	13.5	0.347	10.24
	小计	6 682.9	33.8	0.56	41.12
-1+0.5	重矿	81.9	0.4	1.59	1.44
	中矿	457.8	2.3	0.587	2.96
	轻矿	403.4	2.1	0.307	1.37
-0.5+0.25	重矿	781.2	3.9	0.871	7.51
	中矿	2 393.5	12.1	0.552	14.57
	轻矿	2 097.3	10.6	0.289	6.69
-0.25+0.1	重矿	126.3	0.6	1.13	1.57
	中矿	889.2	4.5	0.503	4.93
	轻矿	1 325.1	6.7	0.287	4.19
-0.1+0.076	重矿	33.8	0.2	0.995	0.37
	中矿	291.8	1.5	0.425	1.37
	轻矿	523.6	2.6	0.263	1.52
-0.076+0.038	重矿	849.2	4.3	0.35	3.26
	中矿	34.3	0.2	0.68	0.26
	轻矿	417.6	2.1	0.368	1.70
-0.038	小计	1 891.1	9.6	0.26	5.48
合计		19 783.3	100.0	0.46	100.00

从表可知：① 随着筛分粒级由粗到细，Li₂O 含量呈现由高到低的趋势（见图 7、8、9）；② Li₂O 在粗粒级分布率较高，+0.1 mm 分布率为 86.34%；而在细粒级分布率较低，-0.1 mm 分布率仅为 13.66%；③ 在粗粒级产率较高，+0.1 mm 产率为 77%；而在细粒级产率较低，-0.1 mm 产率为 23%；④ 李家沟固废矿物各粒级轻、中、重部分 Li₂O 含量呈现一定规律性。

进一步将样品破碎至-0.2 mm 95%，采用人工重砂分离、砂光片、砂薄片鉴定、矿物自动定量检测系统（MLA）检测等方法，研究测定主要锂矿物的粒度分布和解离度（结果见表 13、14）。

由表可知，锂辉石嵌布粒度主要分布在 0.04~

表 13 锂辉石粒度分布

Table 13 Spodumene size distribution

粒径/mm	+0.32	-0.32+0.16	-0.16+0.08	-0.08+0.04	-0.04+0.02	-0.02+0.01	-0.01	平均
锂辉石嵌布粒度/%	0.00	25.54	59.50	11.99	2.29	0.62	0.06	100.00

4 锂的赋存状态

通过 LA-ICPMS 矿物微量元素原位分析，结合 MLA 矿物自动定量检测，X-射线粉晶衍射分

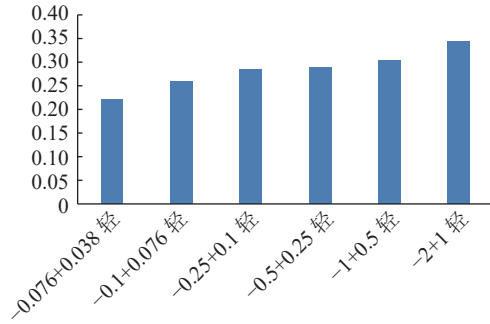


图 7 各粒级轻矿部分 Li₂O 分析结果

Fig.7 Analysis results of Li₂O in light ore of each grade

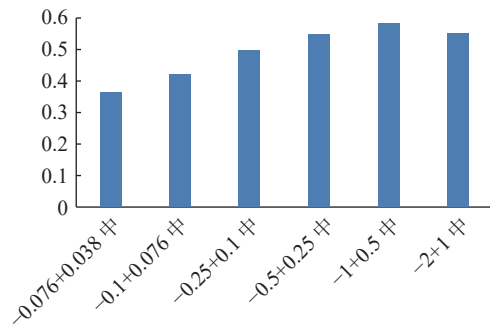


图 8 各粒级中矿部分 Li₂O 分析结果

Fig.8 Analysis results of Li₂O in medium ore of each grade

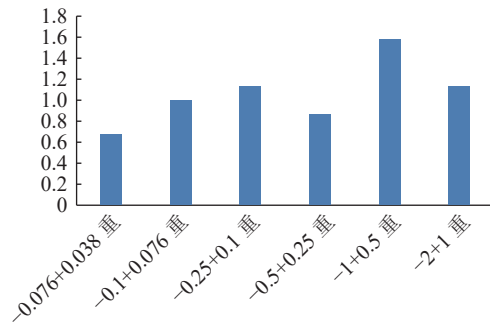


图 9 各粒级重矿部分 Li₂O 分析结果

Fig.9 Analysis results of Li₂O in heavy ore of each grade

析，薄片光学显微镜鉴定等方法，确定锂的主要载体矿物为锂辉石，另有少量锂白云母、锂云母、铁锂云母、磷锂锰矿、锂电气石，结果见表 15。

0.32 mm 粒级范围。锂辉石解离度测定结果表明，粗粒级中锂辉石解离度相对较低，不超过 80%，总解离度为 80.69%。

表 14 锂辉石解离度测定结果
Table 14 Determination of the dissociation degree of lithium pyroxene

粒级/mm	产率/%	矿物含量%	解离度
+0.1	32.00	6.541	73.18
-0.1+0.043	38.18	4.163	79.54
-0.43+0.02	23.74	3.832	96.26
-0.02	6.09	2.890	99.31
合计	100.00	4.767	80.69

表 15 锂的元素配分
Table 15 Elemental composition of lithium

矿物名称	矿物含量/%	Li ₂ O品位/%	Li ₂ O配分量/%	Li ₂ O配分比/%
锂辉石	5.69	7.251 13	0.412 60	89.69
锂白云母	2.11	0.647 3	0.013 6	2.96
钾长石	7.64	0.021 37	0.001 63	0.35
斜长石	22.87	0.002 17	0.000 50	0.11
石英	32.40	0.065 64	0.021 27	4.62
锂云母	<0.1	4.830 41		
铁锂云母	<0.1	2.214 81		
磷锂锰矿	<0.1	4.984 2		
锂电气石	<0.1	1.355 6		
其他 绿柱石	29.3	<0.2	0.010 4*	2.25*
方解石	<0.1	0.027 52		
磷灰石	<0.1	0.030 2		
其他				
合计	100.00		0.46	100.00
尾矿原矿	100.00	0.46	0.46	100.00

注：带*上标数字非实测数据计算而来，为差减值。

此外石英、长石、绿柱石、方解石等矿物中含有微量 Li。

以上数据表明，矿石中 Li₂O 在独立矿物中的回收率约为 94.65%，且主要分布在锂辉石中，是选矿回收的主要目的矿物。而云母类矿物包括锂白云母、锂云母、铁锂云母、白云母、黑云母，浮选较难互相分离，通过回收云母类矿物来回收 Li₂O，虽然会提高一些锂的回收率，但却会降低锂精矿中 Li₂O 的含量，因此，在浮选时须抑制云母类矿物进入锂精矿^[7]。磷锂锰矿、锂电气石因含量太低，难以回收利用。

另有 5.35% 的 Li₂O 分散在长石、石英、绿柱石、方解石等矿物中。石英、方解石中含有微量 Li₂O 是由于包裹有含锂矿物包体。而长石、绿柱石中的 Li₂O 存在的可能有以下两种：①包裹有含锂矿物包体；②类质同象替代：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，绿柱石中类质同象替代进入少量 Li₂O。长石、石英、绿柱石、方解石中分散的这部分 Li₂O，选矿中难以回收利用，可视作合理损失的 Li₂O。

以上分析结果可知，精矿产品中 Li₂O 的理论品位为 7.25%，精矿理论回收率为 89.69%。

5 结 论

(1) 李家沟固废矿物主要由近矿围岩和少量混入的矿石组成。近矿围岩为变质岩，矿石为花岗伟晶岩型锂辉石矿。其中 Li₂O 品位为 0.46%，可再次选矿富集回收利用；伴生有价元素主要是铌、钽、铍，未达到综合回收利用标准。

(2) 矿物成分主要由石英、斜长石、钾长石、云母、锂辉石等组成，再次选矿富集回收利用的主要为锂辉石；伴生的微量有用矿物主要为微量铌铁矿-钽铁矿系列矿物、绿柱石。

(3) 人工重砂实验显示粗粒级 Li₂O 含量、分布率、产率较高，而在细粒级较低。

(4) 锂主要赋存于锂辉石中，Li₂O 平均含量为 7.25%，占矿石中总 Li₂O 的 89.69%。另有少量锂赋存于锂白云母、锂云母、铁锂云母、磷锂锰矿、锂电气石中，但 Li₂O 含量低，配分比低，选矿中较难回收利用；此外石英、长石、绿柱石、方解石、磷灰石等矿物中还有微量锂，但不可回收利用。因此，主要回收目标矿物为锂辉石，精矿产品中 Li₂O 的理论品位为 7.25%，精矿理论回收率为 89.69%。

(5) 花岗伟晶岩型锂辉石矿中锂辉石往往伴随白云母同时出现，而黑云母则不出现，白云母有可能是花岗伟晶岩中寻找锂辉石的指示性矿物；而黑云母出现则意味着小范围内不会有锂辉石。

(6) 电气石在近矿围岩中含量较高，达到综合回收利用标准，具有开采价值。

参考文献：

- [1] 徐正震, 梁精龙, 李慧, 等. 含锂资源中锂的提取研究现状及展望[J]. 矿产综合利用, 2021(5):32-37.
XU Z Z, LIANG J L, LI H, et al. Research status and prospects of lithium extraction from lithium containing resources[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(5):32-37.

[2] 李成秀, 程仁举, 刘星. 我国锂辉石选矿技术研究现状及展望[J]. *矿产综合利用*, 2021(5):1-8.

LI C X, CHENG R J, LIU X. Research status and prospects of spodumene ore beneficiation technology in China[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(5):1-8.

[3] 代力, 谭洪旗, 周雄. 川西锂矿带资源环境特征与生态环境承载力评价[J]. *矿产综合利用*, 2023, 44(4):157-168+173.

DAI L, TAN H Q, ZHOU X. Eco-geological environment carrying capacity and resource and environmental characteristics of lithium ore belt in Western Sichuan[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023, 44(4):157-168+173.

[4] 汤集刚. 河南省卢氏县蔡家沟花岗伟晶岩型锂辉石铌钽矿可选性试样的工艺矿物学研究[R]. 北京: 北京矿冶研究总院, 2004.

TANG J G. Study on process mineralogy of the selectable sample of Caijiagou granite-pegmatitic spodumene niobium ore from Lushi County, Henan Province[R]. Beijing: Beijing

General Research Institute of Mining and Metallurgy, 2004.

[5] 程仁举, 李成秀, 刘星, 等. 新疆某伟晶岩型锂辉石矿浮选实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2023, 44(4):88-94.

CHENG R J, LI C X, LIU X, et al. Flotation of a pegmatite type spodumene ore in Xinjiang[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023, 44(4):88-94.

[6] 罗小龙, 蔡云华, 刘榆, 等. 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*, 2023, 44(2):219-224.

LUO X L, CAI Y H, LIU Y, et al. Mineralogical characteristics of spodumene in No. VIII pegmatite vein of Dangba Spodumene Deposit, Sichuan[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023, 44(2):219-224.

[7] 李艳峰, 邓雁希, 王玲. 某低品位铌-钽多金属矿中锂的可利用性[J]. *有色金属*. 2010(4): 85-91.

LI Y F, DENG Y X, WANG L. Recovery feasibility of Li in a low grade Ta & Nb polymetallic deposit[J]. *Nonferrous Metals*, 2010(4): 85-91.

Process Mineralogy of Solid Waste Minerals from Lijiagou Spodumene Mine and Occurrence State of Lithium

CHEN Yanqing, WU Junfeng, CHEN Lin, WANG Panpan

(Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources, Chengdu Analytical & Testing Center, Evaluation and Utilization of Strategic Rare Metals and Rare Earth Resource Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: This is an article in the field of process mineralogy. Lithium is an important rare metal, which is widely used in metallurgy, machinery, chemical industry, ceramics, glass building materials and other industries, and becomes an important part of new materials. In this study, solid waste minerals extracted from Lijiagou spodumene mine were selected for systematic process mineralogy research. It was found that the main lithium containing minerals in the solid waste minerals were spodumene, followed by lithium muscovite, a small amount of lithium mica, iron spodumene, lithium manganese phosphate, lithium tourmaline, etc. Spodumene was the main recovered minerals. The distribution size of spodumene mainly ranges from 0.04 to 0.32 mm. In the coarse grade, the dissociation degree of spodumene is relatively low, not more than 80%, and the total dissociation degree is 80.69%. The theoretical grade of Li_2O in concentrate product is 7.25%, and the theoretical recovery rate of concentrate is 89.69%.

Keywords: Process mineralogy; Lijiagou; Solid waste mineral; Spodumene; Occurrence state of lithium; Artificial heavy sand