doi: 10.20239/j.issn.1671-9492.2026.09.004

广西某铷矿工艺矿物学特征及伴生组分综合利用潜力分析

王海波[1],韩正伟[2,3],宋银博[3],贺治国[3]
(1. 中冶长天国际工程有限责任公司,长沙 410007;
2. 洛阳盛龙矿业集团股份有限公司,河南 洛阳 471023;
3. 中南大学 资源加工与生物工程学院,长沙 410083)

摘 要: 为明确广西全州县李家伟晶岩型铷矿石中铷及共伴生钽、铌、锂的赋存状态,评估矿石选矿回收的矿物学潜力,采用化学多元素分析、X射线衍射(XRD)、矿物解离分析(MLA)及扫描电镜能谱(SEM-EDS)开展系统工艺矿物学研究。结果表明,原矿主要有价组分Rb_2O品位为0.1124%;伴生Nb_2O_5品位60 g/t、Ta_2O_5品位31 g/t、Li_2O品位330 g/t,具备综合回收利用价值。铷主要以类质同象赋存于云母与钾长石内,云母Rb_2O平均品位为0.32%,钾长石Rb_2O平均品位为0.27%,另有少量铷分布在铁铝氧化物相中。铌、钽的独立载体矿物为富钨铌锰矿与含铌金红石,铌锰矿Nb_2O_5、Ta_2O_5平均品位分别为45.70%、16.39%,含铌金红石Nb_2O_5平均品位为5.45%;两类矿物嵌布粒度微细,集中在5~70 μm,与石英、云母等脉石矿物嵌连紧密。云母、长石以中粒嵌布为主,粒度0.1~0.6 mm;当磨矿细度为-0.074 mm占85%时,二者单体解离度分别为77.07%、78.51%,具备浮选分离的矿物学条件。本次测试未发现独立锂矿物,结合矿物组合特征推测锂以类质同象赋存于云母晶格,仅依靠物理选矿难以产出高品位铷精矿,载体矿物富集后需辅以冶金手段提取。本研究全部结论基于本次测试岩芯样品。

关键词: 铷矿;伟晶岩型;工艺矿物学;赋存状态;铌钽矿;解离度;综合利用
中图分类号: TD91;TD983 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9492(2026)09-0037-10

Process Mineralogy Characteristics and Comprehensive Utilization Potential of Associated Components in a Rubidium Ore from Guangxi, China

Wang Haibo[1], Han Zhengwei[2,3], Song Yinbo[3], He Zhiguo[3]
(1. MCC Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410007, China;
2. Luoyang Shenglong Mining Group Co., Ltd., Luoyang 471023, Henan, China;
3. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: To clarify the occurrence states of rubidium and its associated tantalum, niobium and lithium in a pegmatite-type rubidium ore from Lijia, Quanzhou County, Guangxi, and evaluate its mineralogical potential for beneficiation recovery, systematic process mineralogical studies were carried out by means of multi-element chemical analysis, X-ray diffraction (XRD), mineral liberation analysis (MLA) and scanning electron microscopy-energy dispersive spectroscopy (SEM-EDS). The results show that the main valuable component of raw ore is Rb_2O with a grade of 0.1124%, accompanied by 60 g/t Nb_2O_5, 31 g/t Ta_2O_5 and 330 g/t Li_2O, which presents comprehensive utilization value. Rubidium mainly occurs as isomorphism in mica and K-feldspar, with the average Rb_2O grade of 0.32% for mica and 0.27% for K-feldspar; a small amount of rubidium is distributed in Fe-Al oxide phases. The independent carrier minerals of niobium and tantalum are W-rich manganocolumbite and Nb-bearing rutile. The average grades of Nb_2O_5 and Ta_2O_5 in manganocolumbite are 45.70% and 16.39%, respectively, while the average Nb_2O_5 grade of Nb-bearing rutile is 5.45%. These two minerals are finely disseminated mainly in 5—70 μm and

收稿日期: 2026-06-08
基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC2903203-02)
作者简介: 王海波(1977—),男,湖南道县人,学士,高级工程师,主要从事稀有金属高效选冶回收利用技术研究。
通信作者: 贺治国(1978—),男,江西莲花人,博士,教授,主要从事战略有色金属高效提取技术研究。

closely intergrown with gangue minerals such as quartz and mica. Mica and feldspar are medium-grained with particle sizes of 0.1—0.6 mm. At the grinding fineness of 85% passing 0.074 mm, their monomer liberation degrees reach 77.07% and 78.51%, respectively, showing favorable mineralogical conditions for flotation separation. No independent lithium-bearing mineral is identified in this test. Combined with mineral assemblages, it is inferred that lithium occurs in mica lattice in isomorphism form. High-grade rubidium concentrate cannot be obtained merely by physical beneficiation, and metallurgical extraction is required after carrier-mineral preconcentration. All conclusions of this study are based on the tested core samples.

Key words: rubidium ore; pegmatite type; process mineralogy; occurrence state; Nb-Ta minerals; liberation degree; comprehensive utilization

铷(Rb)是重要的稀有碱金属元素,在特种玻璃、电子器件、生物医学以及航空航天等高新技术领域具备不可替代的战略应用价值。铷极少形成独立工业矿物,大多以伴生组分赋存于花岗伟晶岩矿床的云母、长石等硅酸盐矿物中。花岗伟晶岩矿床往往共伴生铌(Nb)、钽(Ta)、锂(Li)、铯(Cs)等关键金属,资源综合利用潜力突出。但伟晶岩型铷矿石普遍存在有价组分品位偏低、载铷矿物种类繁杂、矿物嵌布关系复杂、矿石易泥化等特点,造成选矿富集难度大、有价组分综合回收率不理想。因此,开展系统的工艺矿物学研究,查清矿石化学组成、矿物种类、有价元素赋存状态以及主要矿物的嵌布、解离特征,是分选工艺设计与实现资源梯级利用的前提与关键[1-9]。

广西某铷矿属于华南地区典型伟晶岩型稀有金属矿床,目前公开文献中针对该矿区矿石的系统工艺矿物学研究较为匮乏,对铷及伴生钽、铌、锂的赋存规律认识尚不充分,制约了选矿工艺优化与资源潜力评估工作。本文选取矿区代表性岩芯样品为研究对象,综合采用化学多元素分析、X射线衍射(XRD)、矿物解离分析(MLA)、扫描电镜-能谱(SEM-EDS)等多种测试手段,系统查明矿石化学-矿物组成、关键有价元素赋存状态、主要矿物嵌布特征与解离行为,评估伴生组分综合回收的矿物学潜力,并基于矿物学规律提出原则性选矿方向。需要说明,本研究全部结论仅适用于本次试验样品,可为国内同类复杂伟晶岩稀有金属矿产的开发利用提供矿物学参考依据[10-18]。

1 试验样品与分析方法

1.1 试验样品

试验样品(岩芯样)采自广西某铷矿,经自然风干、破碎、混匀、缩分后制备。原矿经强酸消解成溶液,采用ICP分析主要化学成分,分析结果见表1。由表1可知,SiO_2品位67.57%,Al_2O_3品位14.85%,K_2O品位5.59%,Na_2O品位2.46%,Fe_2O_3品位2.31%左右。有价组分Rb_2O品位0.1124%,Nb_2O_5品位60 g/t,Ta_2O_5品位31 g/t,Li_2O品位330 g/t。矿石中Rb_2O品位达到工业综合利用标准,Nb、Ta、Li具备潜在回收价值。

1.2 分析测试方法

1.2.1 主要化学成分分析

矿石中主要及微量元素采用X射线荧光光谱仪(XRF)与电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,铷化学物相采用选择性溶解-ICP-MS法完成分析。

1.2.2 矿物组成与结构分析

采用布鲁克D8 Advance X射线衍射仪(XRD)进行物相定性分析,工作条件:Cu靶Kα辐射,管电压40 kV,管电流40 mA,扫描范围5°~80°。利用奥林巴斯BX53偏光显微镜、配备Oxford X-Max能谱仪的ZEISS Sigma300场发射扫描电镜,观察矿物晶体形态、嵌布关系并进行微区成分分析。

1.2.3 矿物定量与解离分析

借助FEI QEMSCAN 650矿物解离分析仪(MLA,XMOD测试模式)完成矿物含量、嵌布粒度、解离度、连生关系的自动定量统计,加速电压为

表1 矿石主要化学成分分析结果

Table 1 Results of main chemical composition analysis of the ore /%

组分	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	Fe_2O_3	Rb_2O	Nb_2O_5	Ta_2O_5	Li_2O
含量	67.57	14.85	5.59	2.46	2.31	0.112 4	0.006	0.003 1	0.033

25 kV，束斑直径为1 μm。MLA基于二维切面统计，对粒径小于2 μm的微细颗粒存在一定统计误差，分析结果仅作为矿物学研究参考[16-18]。

2　结果与讨论分析

2.1　矿石主要矿物组成及含量

MLA分析结果见表2。由表2可知，矿石矿物组成较为复杂。有价矿物中载铷矿物主要为云母与长石，云母以白云母为主，其次为黑云母，含少量珍珠云母；长石包含钠长石、钾长石，另有少量钠钙长石；铌、钽独立矿物为铌锰矿与金红石。脉石矿物以石英为主，其次为水铝石、电气石，还含有少量绿泥石、高岭石、赤褐铁矿、萤石、方解石等矿物[10-18]。

表2　矿石主要矿物组成及含量

Table 2　Main mineral composition and relative content of the ore　/%

矿物名称	含量	矿物名称	含量
铌锰矿(含钽铁钨)	0.01	黄铜矿	0.01
金红石(含铌)	0.02	钛铁矿	0.04
金云母	6.47	磷灰石	0.07
白云母	9.29	橄榄石	0.19
珍珠云母	1.19	黄铁矿	0.03
钠长石	21.34	闪锌矿	0.01
钾长石	16.14	锆石	0.03
钠钙长石	1.23	独居石	<0.01
石英	38.72	磷钇矿	0.01
水铝石	2.36	晶质铀矿	<0.01
电气石	0.99	钍石	<0.01
赤褐铁矿	0.14	绿泥石	0.09
高岭石	0.58	菱铁矿	0.01
萤石	0.10	滑石	0.07
方解石	0.09	白钨矿	<0.01
透辉石	0.21	其他	0.37
石榴石	0.19	合计	100.0

从矿物组合特征判断，该矿石属于典型硅铝酸盐型伟晶岩，长石、石英、云母三者占比超过90%。载铷矿物分布广泛，但矿物内部铷品位整体偏低，选矿的关键是实现云母、长石与石英的高效分离。铌钽独立矿物总含量仅0.03%，属于极低品位伴生资源，需要采用高富集比的联合分选工艺才具备回收可行性。

2.2　矿石中主要元素的赋存状态

2.2.1　铷

矿石中铷的化学物相分析结果见表3。由表3可知，矿石中96.49%的Rb_2O分布于硅酸盐矿物相中，仅3.51%存在于铁铝氧化物相，结合表4～6的MLA及能谱微区成分分析结果，进一步定量确认，约50%的铷赋存于云母中，云母平均含Rb_2O 0.32%，最高达到0.83%。另约50%的铷赋存于长石中，其中钾长石平均含Rb_2O 0.27%，而钠长石含Rb_2O仅0.04%。这一差异与铷离子半径(0.166 nm)与钾离子半径(0.138 nm)相近、易于在含钾矿物中发生类质同象替代有关。钠长石中钠离子半径(0.102 nm)与铷相差较大，因此铷进入量极低[2-3,10]。

表3　矿石中铷的化学物相分析结果

Table 3　Results of rubidium chemical phase analysis of the ore　/%

铷相别	硅酸盐中的Rb	铁铝氧化物中的Rb	合计
含量	0.110 4	0.002	0.112 4
分布率	96.49	3.51	100.0

基于上述赋存特征估算：若将全部云母和钾长石浮选富集，忽略浮选损失，铷的理论最大回收率可达95%。精矿理论品位受载体矿物中Rb_2O含量制约，以云母为载体时，精矿最高Rb_2O理论品位约0.32%～0.38%；以钾长石为载体时，精矿最高Rb_2O理论品位约0.14%～0.18%。仅依靠物理选矿难以得到高品位铷精矿，需结合冶金工艺进一步提取[11,19]。

2.2.2　锂

矿石中Li_2O品位为330 g/t，含量较低。由于锂常与铷在伟晶岩中伴生，且主要赋存于云母类矿物，尤其是锂云母和少量锂辉石中[8-10]。本次MLA鉴定未发现独立锂矿物，结合矿物组合特征，推测锂以类质同象形式赋存于云母晶格中。

2.2.3　铌、钽

铌、钽主要赋存于两种独立矿物，铌锰矿(富钨变种)和含铌金红石。铌锰矿能谱微区分析结果见表7，由表7可知，铌锰矿成分不稳定，Nb_2O_5含量为32%～58%，平均值45.70%；Ta_2O_5含量为8%～25%，平均值16.39%。此外，富含WO_3(7%～25%，平均值13.27%)和MnO(10%～16%，平均值12.97%)，属富钨铌锰矿。含铌金红石能谱微区分析结果见表8，由表8可知，Nb_2O_5平均品位为5.45%，Ta_2O_5平均品位为2.07%，TiO_2品位为86.29%。根据矿物含量及品位估算，约80%的Nb_2O_5和70%的Ta_2O_5赋存于铌锰矿中，其余赋存于金红石中。由于二者嵌布粒度极细，且含量甚微，需采用高富集比的重选、浮选、电选联合流程才能获得合格产品[12-15]。

表4 云母的扫描电镜能谱微区成分分析结果

Table 4 Micro-area composition analysis results of mica by scanning electron microscope energy dispersive spectroscopy /%

序号	Rb_2O	FeO	MgO	K_2O	Na_2O	Al_2O_3	SiO_2	F
1	0.39	4.73	1.01	9.86	1.02	35.12	46.93	0.75
2	0.25	4.38	0.89	9.61	0.85	35.64	47.51	0.66
3	0.22	3.75	0.88	9.66	1.17	36.80	46.79	0.54
4	0.60	5.12	0.88	9.81	0.64	34.41	47.81	0.73
5	0.64	4.06	0.89	10.13	1.09	35.43	47.12	0.64
6	0.24	3.61	0.71	10.13	0.69	35.46	48.56	0.40
7	0.29	5.11	0.97	9.59	1.25	35.19	46.85	0.55
9	0.06	0.84	0.88	5.27	0.43	55.86	36.35	0.32
10	0.76	8.25	1.01	10.22	0.62	31.34	46.97	0.82
11	0.02	5.75	1.04	9.62	0.92	34.22	47.20	0.52
12	0.09	6.81	1.09	9.28	1.11	33.56	46.86	0.60
13	0.70	7.17	1.19	10.07	1.34	32.58	46.42	0.52
14	0.19	5.48	0.71	10.11	0.70	33.33	48.31	0.86
15	0.83	8.77	1.09	10.09	0.67	30.29	47.59	0.67
16	0.54	4.42	0.98	9.47	1.17	35.33	47.74	0.36
17	0.35	0.19	0.45	13.42	0.60	19.99	64.79	0.21
18	0.40	4.03	0.66	10.60	0.59	31.89	51.53	0.32
19	0.67	8.28	0.83	10.25	0.59	30.88	47.70	0.79
20	0.77	13.81	0.73	11.17	0.49	27.20	45.24	0.60
平均	0.32	5.50	0.89	9.91	0.84	33.92	47.80	0.57

表5 钾长石的扫描电镜能谱微区成分分析结果

Table 5 Micro-area composition analysis results of potassium feldspar by scanning electron microscope-energy dispersive spectroscopy /%

序号	Rb_2O	Na_2O	K_2O	CaO	Al_2O_3	SiO_2
1	0.25	0.35	17.37	0.00	17.80	64.22
2	0.22	0.00	17.63	0.12	17.62	64.40
3	0.22	0.00	18.30	0.03	17.34	64.11
4	0.21	0.00	19.38	0.03	17.28	63.09
5	0.30	0.00	18.20	0.06	17.46	63.98
6	0.30	0.00	18.43	0.00	17.35	63.93
7	0.29	0.00	17.54	0.03	17.54	64.60
8	0.26	0.00	18.72	0.04	17.76	63.21
9	0.29	0.00	18.26	0.00	17.77	63.68
10	0.29	0.00	18.53	0.03	17.52	63.63
平均	0.27	0.04	18.24	0.03	17.55	63.88

表6 钠长石的扫描电镜能谱微区成分分析结果

Table 6 Micro-area composition analysis results of sodium feldspar by scanning electron microscope-energy dispersive spectroscopy /%

序号	Rb_2O	Na_2O	K_2O	CaO	Al_2O_3	SiO_2
1	0.02	10.65	0.20	0.31	21.20	67.62
2	0.03	9.98	0.96	1.22	20.31	67.50
3	0.06	11.24	0.16	0.61	21.03	66.89
4	0.04	11.17	0.24	0.09	21.02	67.44
5	0.03	11.38	0.38	0.03	21.17	67.01
6	0.02	11.38	0.18	0.12	21.15	67.15
7	0.00	11.07	0.22	1.35	21.35	66.01
8	0.03	11.35	0.21	0.15	21.16	67.10
9	0.03	11.19	0.12	0.21	21.42	67.03
10	0.04	11.03	0.20	0.37	21.41	66.94
平均	0.04	11.04	0.29	0.45	21.12	67.07

表 7　铌锰矿的扫描电镜能谱微区成分分析结果

Table 7　Micro-area composition analysis results of manganocolumbite by scanning electron microscope-energy dispersive spectroscopy

/%

序号	Nb_2O_5	Ta_2O_5	WO_3	Sc	TiO_2	FeO	MnO
1	57.95	7.95	7.59	0.15	4.45	11.29	10.62
2	52.63	11.24	11.92	0.32	2.94	4.70	16.25
3	43.39	20.96	11.34	0.76	4.54	6.22	12.79
4	44.73	16.18	15.98	0.42	2.68	8.12	11.89
5	46.37	22.22	7.53	0.20	3.33	6.90	13.46
6	32.31	24.42	20.30	0.25	3.21	9.51	10.01
7	41.77	19.67	8.80	0.80	9.73	5.60	13.64
8	49.46	15.36	13.12	0.38	2.68	9.18	9.82
9	40.66	25.00	9.26	0.77	3.26	4.56	16.49
10	46.45	19.09	11.07	0.08	1.46	5.36	16.48
11	47.91	11.57	14.76	0.56	4.34	9.10	11.76
12	44.72	11.79	17.19	0.80	3.67	8.85	12.97
13	46.99	17.89	11.69	0.35	2.41	7.56	13.12
14	51.17	16.81	8.98	0.00	2.23	6.77	14.05
15	50.27	13.94	11.62	0.07	2.94	7.88	13.28
16	44.22	17.76	10.52	0.47	3.64	12.53	10.86
17	42.29	11.05	22.83	0.06	2.16	8.74	12.87
18	39.03	12.28	24.59	0.04	2.31	8.07	13.69
19	46.04	16.23	13.01	0.41	4.22	7.65	12.43
平均	45.70	16.39	13.27	0.36	3.48	7.82	12.97

表 8　金红石的扫描电镜能谱微区成分分析结果

Table 8　Micro-area composition analysis results of rutile by scanning electron microscope-energy dispersive spectroscopy

/%

序号	Nb_2O_5	Ta_2O_5	TiO_2	FeO	WO_3
1	2.37	0.41	94.52	2.71	0.00
2	3.39	1.17	92.14	3.30	0.00
3	5.29	1.26	83.26	5.02	5.17
4	6.68	1.29	82.35	4.78	4.90
5	9.52	6.23	79.19	4.42	0.64
平均	5.45	2.07	86.29	4.05	2.14

2.3　矿石中主要矿物的产出形式与嵌布特征

2.3.1　云母

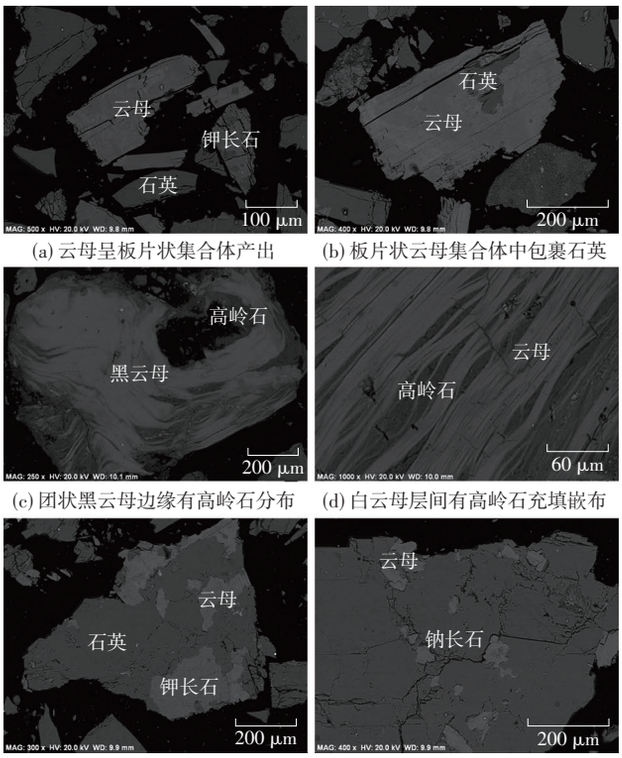
样品中云母含量相对长石与石英较低，主要为白云母$KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH,F)_2$，其次为黑云母$K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(F,OH)_2$，云母的产出形式见图1。由图1可知，云母主要呈自形板片状或叶片状，集合体可呈团块状，多沿石英、长石粒间或边缘嵌布，云母粒度主要分布在0.1～0.6 mm。两种云母在成分上呈过渡状态，因此将两种矿物归为一类进行了能谱微区成分分析[10]。

2.3.2　长石

长石是矿石中含量最高的矿物组合，包括钾长石和钠长石，两者常密切伴生，构成团块状或粒状集合体，作为矿石的矿物骨架，见图2。由图2可知，钾长石多呈半自形板状，可见卡斯巴双晶。钠长石多呈聚片双晶，具细条纹构造。长石常被后期高岭石、绢云母沿边缘及裂隙交代，产生一定程度的高岭土化。长石与石英、云母的嵌布关系极为紧密，部分颗粒相互穿插、包裹。长石粒度主要分布在0.1～0.8 mm，与云母相近，属中粒嵌布。这种紧密镶嵌关系意味着，若磨矿不足，长石与石英难以充分解离，影响长石精矿的品位[19]。

2.3.3　石英

石英是矿石中含量最高的单一矿物，呈它形粒状，集合体多为团块状，见图3。由图3可知，石英主要与长石紧密镶嵌构成矿石基底，部分与云母、高岭石、绿泥石等矿物嵌连。石英粒度相对较粗，主要分布在0.15～1.2 mm，是粗粒级中的主要脉石矿物。石英对Rb、Nb、Ta均无贡献，是选矿主要的脱除对象。



(a) 云母呈板片状集合体产出　(b) 板片状云母集合体中包裹石英

(c) 团状黑云母边缘有高岭石分布　(d) 白云母层间有高岭石充填嵌布

(e) 云母嵌布在石英、长石粒间　(f) 云母嵌布在钠长石粒间

图1　云母的产出形式

Fig. 1　Forms of mica occurrence

2.3.4　铌锰矿

铌锰矿是铌、钽、钨的主要载体矿物，反射光下呈灰白色，金属光泽，主要呈不规则粒状、柱粒状或板状，浸染状嵌布于云母、石英、长石等脉石矿物基底中，见图4。由图4可知，部分铌锰矿与白钨矿、电气石、萤石、晶质铀矿、钍石、磷钇矿等稀有金属矿物伴生，形成复杂的“矿巢”。铌锰矿粒度极不均匀，粗者可达0.1 mm，微细者小于0.005 mm，主要变化于0.007～0.07 mm，属于微细粒嵌布范畴。这种微细粒、稀疏浸染状的特征，是该矿石铌钽难以高效回收的根本原因。

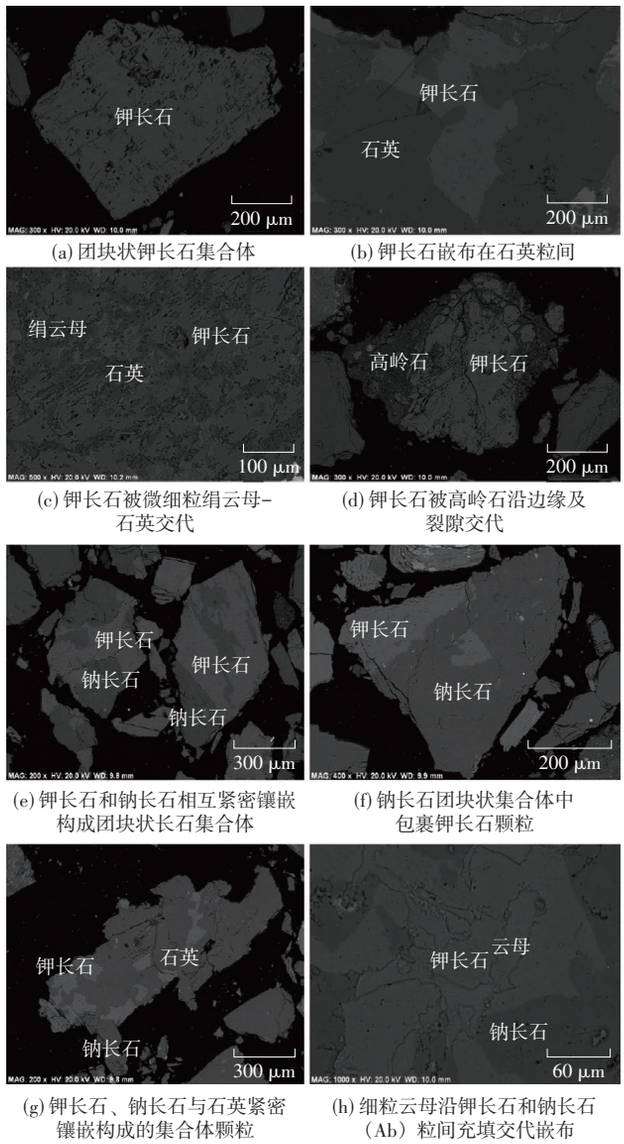
2.3.5　金红石

金红石是铌的次要载体矿物，反射光下呈灰黄色，主要呈柱粒状或不规则粒状，亦呈浸染状嵌布于脉石矿物中，与云母关系最为密切，见图5。由图5可知，金红石粒度略粗于铌锰矿，主要变化于0.01～0.10 mm，但依然属微细粒嵌布。部分金红石与铌锰矿连生或被包裹于石英中。

2.4　矿石中主要矿物的嵌布粒度分布

采用MLA对样品中云母、长石、石英及铌钽矿物的嵌布粒度进行了系统统计，结果见表9。

1）云母和长石的粒度分布极为相似，均以中粒



(a) 团块状钾长石集合体　(b) 钾长石嵌布在石英粒间

(c) 钾长石被微细粒绢云母–石英交代　(d) 钾长石被高岭石沿边缘及裂隙交代

(e) 钾长石和钠长石相互紧密镶嵌构成团块状长石集合体　(f) 钠长石团块状集合体中包裹钾长石颗粒

(g) 钾长石、钠长石与石英紧密镶嵌构成的集合体颗粒　(h) 细粒云母沿钾长石和钠长石（Ab）粒间充填交代嵌布

图2　长石的产出形式

Fig. 2　Forms of feldspar occurrence

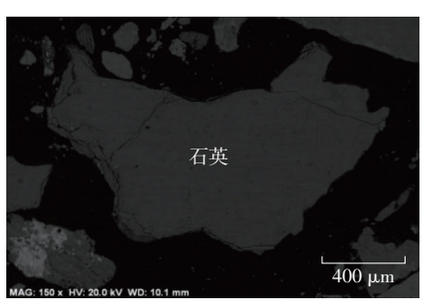
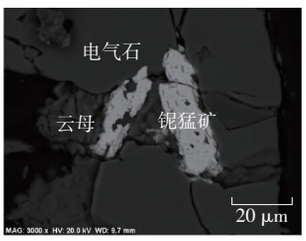


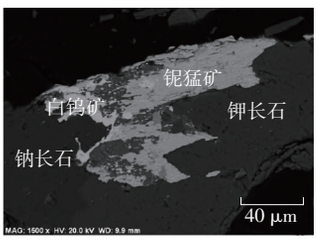
图3　石英的产出形式

Fig. 3　Forms of quartz occurrence

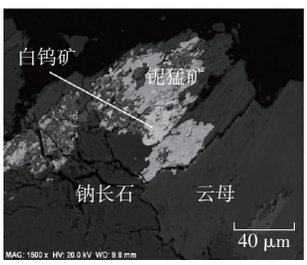
(0.1～0.8 mm)为主，二者在0.1～0.8 mm内的累计分布率分别达到80%、85%左右，这为采用浮选工艺实现两者与石英的分离提供了有利条件，因为在此粒度范围内，常规浮选机可以较好地回收。



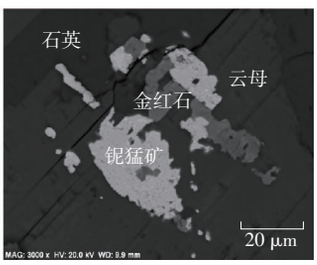
(a) 柱粒状铌锰矿(Col)嵌布在云母(M)和电气石(Sl)粒间



(b) 柱粒状铌锰矿与白钨矿(W)伴生嵌布在钠长石和钾长长石集合体中



(c) 不规则状铌锰矿与白钨矿伴生嵌布在钠长石和云母基底中



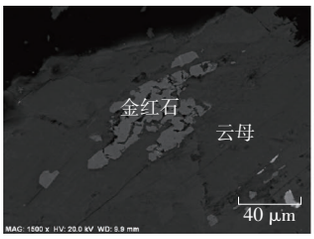
(d) 柱粒状与金红石(R)伴生嵌布在石英和云母基底中

图 4　铌锰矿的产出形式

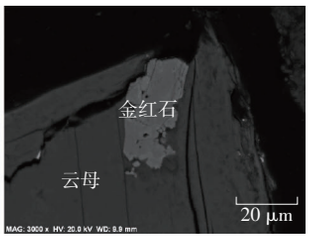
Fig. 4　Forms of mangancolumbite occurrence

2)石英粒度相对更粗，主要分布于－1.2+0.15 mm，+0.3 mm粒级分布率接近45%。石英在粗磨条件下即可大量解离，可通过分级预先抛除，减少后续磨浮负荷。

3)铌锰矿和金红石的粒度显著偏细。铌锰矿在－0.05 mm粒级分布率达到99%以上，其中－0.01 mm微细粒级分布率达到77.84%。金红石在



(a) 不规则粒状金红石构成的集合体嵌布在云母基底中



(b) 柱粒状金红石嵌布在云母基底中

图 5　金红石的产出形式

Fig. 5　Forms of rutile occurrence

－0.05 mm粒级分布率亦达到96%以上。如此微细的嵌布粒度，要求磨矿细度至少达到－0.038 mm占90%以上才能实现较好地解离，但过细磨矿会导致云母和长石严重泥化，引发浮选选择性下降及药剂消耗增加。因此，需采用阶段磨矿、分级分选的策略，对粗粒级先选别载铌矿物，对细粒级再磨再选以释放铌钽矿物。

2.5　矿石中主要矿物的解离度及连生关系

在推荐的一次磨矿细度－0.074 mm占85%(对应MLA测定样品)条件下，开展主要矿物解离度与连生关系分析，分析结果见表10、11。

2.5.1　解离度分析

由表10可知，云母、长石单体解离度分别达到77.07%、78.51%；二者连生体以富连生体(目的矿物占3/4以上)为主，占比依次为17.72%、18.42%，中低品位连生体(<1/2)合计不足5%。结果表明，该

表 9　主要矿物的嵌布粒度统计结果(累积分布率)

Table 9　Statistical results of distribution particle sizes for major minerals (cumulative distribution rate)　/%

粒径/μm	铌锰矿	金红石	云母	长石	石英
>1200	—	—	0.80	0.67	—
850	—	—	1.52	2.97	3.48
600	—	—	3.18	5.79	7.47
425	—	—	12.30	11.77	13.03
300	—	—	19.81	21.48	23.44
212	—	—	18.85	21.41	21.48
150	—	—	14.47	14.56	13.76
106	0.59	3.25	10.03	8.34	7.39
75	1.45	7.79	6.25	4.70	4.27
53	5.61	13.13	4.51	3.03	2.37
38	15.96	22.53	3.04	1.80	1.39
27	19.01	23.06	2.18	1.28	0.87
19	29.88	16.55	1.47	0.95	0.58
13.5	15.18	7.50	0.83	0.71	0.34
9.6	8.06	2.23	0.36	0.32	0.11
6.8	2.15	2.12	0.15	0.08	0.01
4.8	0.96	0.84	0.09	0.05	0.01
3.4	0.34	0.33	0.06	0.04	—
2.4	0.30	0.25	0.05	0.03	—
1.75	0.29	0.20	0.03	0.01	—
1.2	0.22	0.22	0.02	0.01	—

表10 主要矿物在磨矿细度-0.074 mm占85%时的解离度

Table 10 Dissociation degree of main minerals at fineness of -0.074 mm accounting for 85% /%

矿物名称	单体	连生体			
		≥3/4	>1/2~3/4	>1/4~1/2	≤1/4
铌矿物	32.14	23.13	7.66	5.35	31.72
云母	77.07	17.72	1.00	1.74	2.47
长石	78.51	18.42	1.04	1.15	0.88
石英	73.88	22.24	2.71	0.61	0.56

磨矿细度下云母与长石大部分能够和脉石矿物解离，基本满足浮选给矿条件。石英单体解离度73.88%，解离程度同样较高。铌矿物单体解离度仅32.14%，贫连生体(目的矿物<1/4)占比高达31.72%，说明即使磨至-0.074 mm占85%，大量铌矿物仍与脉石矿物紧密连生，该现象与其微细嵌布特征(粒度大多小于50 μm)直接相关。若进一步细磨至-0.038 mm以下提升铌矿物解离度，会造成云母、长石过粉碎、泥化，对浮选分选效果产生明显负面影响。因此铌钽不宜在一段浮选同步回收，建议在载铯矿物浮选完成后，对浮选尾矿实施再磨再选，采用“先易后难、梯级解离”分步回收思路开展回收试验[20]。

2.5.2 连生关系分析

表11列出了主要目的矿物与其他矿物的连生比例。铌矿物主要和石英、云母、长石、电气石连生，该共生特征决定单纯依靠密度差异的常规重选难以实现有效分离。部分铌矿物与云母紧密连生，若云母进入浮选精矿，这部分铌矿物随之富集，会造成铌组分分散，不利于集中回收。铌矿物伴生电气石、白钨矿，存在回收钨等副产物的潜在价值。云母主要与长石、石英连生，长石多与石英、云母连生，与镜下观察到长石-石英-云母紧密镶嵌的特征一致，也是降低浮选选择性的重要因素。在酸性介质中，十二胺在长石与石英表面存在选择性吸附差异，借助氢氟酸对长石的活化作用，有望实现长石与石英的浮选分离[19]。

表11 主要目的矿物与嵌连矿物的比例

Table 11 Ratio of main target minerals to intercalated minerals /%

嵌连矿物/目的矿物	铌矿物	云母	长石	石英
铌矿物	—	0.17	0.12	0.27
云母	24.76	—	32.94	24.86
长石	14.50	53.97	—	68.65
石英	31.11	34.93	59.25	—
水铝石	3.48	4.14	1.85	0.27
电气石	9.92	0.99	1.58	1.62
钛铁矿	5.48	0.17	0.03	0.12
绿泥石	3.50	1.66	0.79	0.27
白钨矿	5.67	0.04	0.02	0.04
其他	1.58	3.93	3.42	3.90
合计	100.0	100.0	100.0	100.0

2.6 磨矿方式对矿物解离及泥化的影响

矿石含有云母等易泥化层状硅酸盐矿物，磨矿方式对后续分选影响显著。在相同磨矿时间条件下对比球磨、棒磨产品粒度组成，筛析结果见表12。由表12可以看出，棒磨产品-0.074 mm产率略低于球磨，但-0.038 mm细泥含量明显更低；例如，磨矿2 min时，棒磨-0.038 mm粒级产率为20.8%，球磨达到29.3%。与此同时，棒磨产物+0.15 mm粗粒级占比更低，-0.15+0.038 mm中间粒级占比更高，说明棒磨具备选择性解离特点，优先沿矿物颗粒界面解离，可较好保留云母片状晶体结构，减轻泥化程度。据此推荐一段磨矿选用棒磨，后续配套分级浮选工艺：+0.15 mm粗粒级返回再磨，-0.15+0.038 mm中间粒级直接浮选，-0.038 mm细粒级经脱泥后再开展浮选试验。

表12 球磨与棒磨产品粒度分布对比

Table 12 Comparison of particle size distribution between ball milling and rod milling products /%

粒级/mm	棒磨时间/min						球磨时间/min				
	0	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
+0.15	35.8	5.5	3.2	1.2	0	0	2.8	—	—	—	—
-0.15+0.1	31.5	26.3	20.9	12.6	5.2	1.2	29.1	16.5	11.6	4.5	1.8
-0.1+0.074	8.8	21.1	18.8	10.5	9.6	2.8	19.5	10.9	9.5	8.8	3.9
-0.074+0.05	8.6	16.8	20.2	18.8	28.3	22.7	18.9	24.5	22.9	26.8	25.4
-0.05+0.038	4.5	14.8	16.1	24.5	20.5	30.5	12.5	18.8	22.5	21.1	24.6
-0.038	10.8	15.5	20.8	32.4	36.4	42.8	17.2	29.3	33.5	38.8	44.3
给矿	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

2.7　影响选矿工艺的主要矿物学因素及选别建议

综合上述工艺矿物学研究结果，影响该矿石选矿效果的主要矿物学因素可归纳为以下几点。

1）铷载体矿物种类较多，不同矿物可浮性存在差异。云母、钾长石是铷主要载体，二者合计占矿石总量25%以上，嵌布粒度适中、单体解离度较高。酸性环境下云母可浮性优于长石，理论上可采用优先浮选云母、活化浮选长石实现铷分步富集。但钾长石与钠长石理化性质相近，二者难以有效分离，因此依靠物理选矿得到的长石精矿铷品位提升空间有限。

2）铌钽矿物嵌布粒度微细、分布分散，适合阶段磨矿联合分选流程。铌锰矿、金红石粒度主要集中在5～70 μm，即使细磨至－0.038 mm粒级，仍存在未解离颗粒。单一重选或者浮选难以获得合格精矿，可尝试采用“分级重选（离心＋摇床）预富集—粗精矿再磨—浮选”联合流程，以期实现较高富集倍数。

3）矿石易泥化，对浮选产生不利影响。矿石中云母、高岭石易形成细泥，微细泥粒容易覆盖矿物表面，增加药剂消耗，降低分选选择性。对应的改善思路为：选用棒磨减轻过粉碎；增设脱泥作业，利用水力旋流器脱除－15 μm矿泥；细粒级采用高选择性药剂、低浓度矿浆浮选。

4）锂主要赋存于云母中，具备作为副产品回收的潜力。

3　结论

1）广西某铷矿属于典型伟晶岩型稀有金属矿石，主要有价组分Rb_2O品位0.1124%，伴生Nb_2O_5品位60 g/t、Ta_2O_5品位31 g/t、Li_2O品位330 g/t，具备较好的多元素综合回收潜力。脉石矿物以石英、钠长石、钾长石为主。

2）铷以类质同象形式主要赋存于云母与钾长石晶格内，云母中Rb_2O平均品位为0.32%，钾长石中Rb_2O平均品位为0.27%，二者承载的铷分布率合计接近100%。云母、长石嵌布粒度集中在0.1～0.6 mm，属于中粒嵌布；在－0.074 mm占85%的磨矿细度条件下，二者单体解离度分别达到77.07%和78.51%，具备浮选分离的矿物学基础。

3）矿石未发现独立锂矿物，锂主要赋存于云母晶格中，可在云母富集后实现协同回收。铌、钽的独立矿物为富钨铌锰矿（Nb_2O_5品位45.70%，Ta_2O_5品位16.39%）与含铌金红石（Nb_2O_5品位5.45%）；两类矿物嵌布粒度微细，粒度区间多为0.005～0.07 mm，且与石英、云母连生关系密切，是铌钽回收难度较大的根本原因。

4）该矿石中的层状硅酸盐矿物易泥化，相比球磨，棒磨能够有效减轻矿物过粉碎现象。基于矿物学特征提出“阶段棒磨—分级—重选（离心＋摇床）—云母、长石浮选—铌钽粗精矿再磨—浮选”联合工艺思路，有望实现载铷矿物及伴生铌、钽、锂的分步富集与梯级综合利用。

5）本文研究结果可为该铷矿选冶工艺方案制定提供详实的矿物学依据，对国内外同类复杂伟晶岩型稀有金属资源开发具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 王登红，孙艳，代鸿章，等. 我国“三稀矿产”的资源特征及开发利用研究[J]. 中国工程科学，2019，21(1)：119-127.
Wang Denghong，Sun Yan，Dai Hongzhang，et al. Characteristics and exploitation of rare earth，rare metal and rare-scattered element minerals in China[J]. Engineering Science，2019，21(1)：119-127.

[2] 孙艳，王瑞江，祁锋，等. 国内外铷资源现状及我国开发利用建议[J]. 中国矿业，2013，22(9)：11-13.
Sun Yan，Wang Ruijiang，Qi Feng，et al. The global status of rubidium resource and suggestions on its development and utilization in China[J]. China Mining Magazine，2013，22(9)：11-13.

[3] 傅昕，张汉鑫，梁精龙，等. 硅酸盐矿石资源中铷的提取工艺综述[J]. 矿产综合利用，2021，42(3)：1-7.
Fu Xin，Zhang Hanxin，Liang Jinglong，et al. Review on extraction technology of rubidium from silicate ore resources[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources，2021，42(3)：1-7.

[4] 缪煜清，欧阳瑞镯，李钰皓. 铷元素科学研究与应用进展[J]. 有色金属材料与工程，2023，44(2)：11-15.
Miao Yuqing，Ouyang Ruizhuo，Li Yuhao. Progress in scientific research and application of rubidium[J]. Nonferrous Meaterials and Engineering，2023，44(2)：11-15.

[5] Černý P. Rare-element granitic pegmatites. Part I：anatomy and internal evolution of pegmatite deposits[J]. Geoscience Canada，1991，18(2)：49-67.

[6] Cerny P，Ercit T S. The classification of granitic pegmatites revisited[J]. The Canadian Mineralogist，2005，43(6)：2005-2026.

[7] London D. Granitic pegmatites：an assessment of current concepts and directions for the future[J]. Lithos，2005，80(1/2/3/4)：281-303.

[8] Linnen R L, Van Lichtervelde M, Cerny P. Granitic pegmatites as sources of strategic metals[J]. Elements, 2012, 8(4): 275-280.

[9] Bradley D C, McCauley A D, Stillings L M. Mineral-deposit model for lithium-cesium-tantalum pegmatites[R]. Reston: U. S. Geological Survey, 2017.

[10] 王汝成, 谢磊, 诸泽颖, 等. 云母: 花岗岩-伟晶岩稀有金属成矿作用的重要标志矿物[J]. 岩石学报, 2019, 35(1): 69-75.
Wang Rucheng, Xie Lei, Zhu Zeying, et al. Micas: important indicators of granite-pegmatite-related rare-metal mineralization[J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(1): 69-75.

[11] 胡永兴, 宿虎, 张红斌, 等. 工艺矿物学研究在甘肃某铷矿应用[J]. 矿产综合利用, 2021, 42(5): 135-138, 161.
Hu Yongxing, Su Hu, Zhang Hongbin, et al. Application of process minerals research in a rubidium mine in Gansu Province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021, 42(5): 135-138, 161.

[12] 李美荣, 李波, 梁冬云, 等. 非洲某风化伟晶岩型钽铌矿石工艺矿物学及可选性研究[J]. 矿产综合利用, 2020, 41(6): 135-141.
Li Meirong, Li Bo, Liang Dongyun, et al. Study on process mineralogy and separability of a weathered pegmatite type tantalum-niobium ore from Africa[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020, 41(6): 135-141.

[13] 徐健, 罗仙平, 曹飞, 等. 江西松树岗、福建南平和四川甲基卡钽铌矿分选行为的工艺矿物学因素分析[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(5): 1-6.
Xu Jian, Luo Xianping, Cao Fei, et al. Analysis of process mineralogical factors in the separation behaviour of tantalum-niobium ores from Songshugang, Jiangxi, Nanping, Fujian and Jiajika, Sichuan[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(5): 1-6.

[14] 曹飞, 杨卉芃, 张亮, 等. 全球钽铌矿产资源开发利用现状及趋势[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(5): 56-67, 89.
Cao Fei, Yang Huipeng, Zhang Liang, et al. Current situation and trend analysis of global tantalum and niobium mineral resources[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(5): 56-67, 89.

[15] 张琦, 唐远, 刘爽, 等. 湖北某低品位铌钽矿选矿工艺试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(1): 28-37.
Zhang Qi, Tang Yuan, Liu Shuang, et al. Experimental study on mineral processing technology of a low-grade niobium-tantalum ore in Hubei[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(1): 28-37.

[16] Gottlieb P, Wilkie G, Sutherland D, et al. Using quantitative electron microscopy for process mineralogy applications[J]. JOM, 2000, 52(4): 24-25.

[17] Gu Ying. Automated scanning electron microscope based mineral liberation analysis an introduction to JKMRC/FEI mineral liberation analyser[J]. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 2003, 2(1): 33-41.

[18] Fandrich R, Gu Ying, Burrows D, et al. Modern SEM-based mineral liberation analysis[J]. International Journal of Mineral Processing, 2007, 84(1/2/3/4): 310-320.

[19] 李勇, 张艳松, 李潇, 等. 西昆仑阿克塔斯北锂铍稀有金属矿矿相学研究及可选性分析[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(8): 7-14.
Li Yong, Zhang Yansong, Li Xiao, et al. Mineralogical study and washability analysis of Aketasibeili-beryllium rare-metal deposit in West Kunlun[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2023(8): 7-14.

[20] Wills B A, Finch J A. Wills′ mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery[M]. 8th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016.

(本文编辑 刘水红)