

河南卢氏花岗伟晶岩的矿物学特征及综合利用

库建刚¹, 刘羽¹, 刘文元¹, 刘树林², 何遼¹

(1. 福州大学 紫金矿业学院, 福州 350116;

2. 灵宝金源矿业股份有限公司, 灵宝 472500)

摘要: 对河南卢氏花岗伟晶岩的矿物学特征进行研究, 开发“重选-正反浮选”联合工艺回收电气石和云母新技术, 采用光学显微镜(OM)、XRD、SEM 及 EDS 对原矿和精矿形貌及矿物组成进行表征, 并对原矿、精矿及尾矿中元素含量进行分析。结果表明: 花岗伟晶岩主要矿物组成为电气石、石英、钠长石、白云母和锂云母; 当磨矿粒度小于 74 μm 的矿石含量为 40% 时, 采用“重选-浮选”新技术可获得电气石品位为 98.31%、回收率为 82.19% 的电气石精矿和云母品位为 98.94%、回收率为 93.95% 的云母精矿; 电气石化学式为 $\text{Na}(\text{Li}, \text{Al}_2)\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_x (x=4 \text{ 或 } 5)$, 结晶度为 95.94%。

关键词: 伟晶岩; 电气石; 结晶度; 矿物学特征; 综合利用

中图分类号: P575; TD954

文献标志码: A

Mineralogical characteristics and comprehensive utilization of pegmatite tourmaline in Lushi, Henan Province

KU Jian-gang¹, LIU Yu¹, LIU Wen-yuan¹, LIU Shu-lin², HE Kui¹

(1. College of Zijin Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. Lingbao Jinyuan Mining Company Limited, Lingbao 472500, China)

Abstract: Based on the study of mineralogical characteristics of granitic pegmatite in Lushi, Henan Province, a novel technology for recovery of elbaite and mica was developed with gravity and direct or reverse-flotation separation. The morphology and the mineral composition of the raw ore and the concentrate were investigated by optical microscopy (OM), XRD, SEM and EDS, and chemical composition of the raw ore, concentrate and tailings were analyzed. The results show that the major minerals of granitic pegmatite are elbaite, quartz, albite, muscovite and lepidolite. The elbaite concentrate with tourmaline grade of 98.31% and tourmaline recovery of 82.19% and mica concentrate with mica grade of 98.94% and mica recovery of 93.95% can be obtained by gravity and flotation when the particle grinding size of mineral less than 74 μm and content of 40%. The chemical formula for elbaite is $\text{Na}(\text{Li}, \text{Al}_2)\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_x (x=4 \text{ or } 5)$ with crystallization of 95.94%.

Key words: pegmatite; elbaite; crystallization; mineralogical characteristics; comprehensive utilization

电气石具有唯一的极轴, 其方向与晶体柱延长方向一致, 当压力或温度变化时, 其内部由于总电矩发生变化, 在极轴方向的两端产生电性相反、数量相等的电荷, 构成静电场-自发极化效应, 前者称为压电效应, 后者称为热电效应^[1]。电气石独特的内部结构特点使其具有自发极化性、热释电性、压电性、红外

辐射和释放负离子等多种特性^[2-4], 在电磁、催化、红外辐射、保健、环保、宝石等材料领域^[5-9]具有广泛的应用。虽然国内外学者对电气石产品有较多的研究, 但是针对电气石选矿及提纯的研究却鲜见报道。

金华爱等^[10]研究了 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Fe^{2+} 对电气石浮选的作用效果。任飞等^[11]研究了油酸钠和十二胺对

不同种类电气石的作用机理, 并采用晶体化学理论分析了电气石的可浮性。张开永等^[12]研究了产于石英脉中气成热液型电气石的工艺矿物学, 并分别采用浮选和湿式强磁选分离出电气石产品。以上研究均未涉及花岗伟晶岩型锂电气石的矿物学特征及综合利用, 同时, 由于河南卢氏花岗伟晶岩型锂电气石含有大量白云母和锂云母, 其分选难度更大, 因此, 对花岗伟晶岩型锂电气石的开发利用具有一定的指导意义。

河南省卢氏县伟晶岩矿脉分布广, 储量大^[13], 仅202(蔡)矿区的矿石储量就高达200多万t, 矿区共30余条沿脉, 按空间构造规律和密集状况, 自西而东划分为3个矿段, 矿段间距依次为450和700m, 各段岩矿脉平行密集组成, 全矿区沿矿脉产状基本一致, 倾向为300°~350°, 倾角为48°~78°^[14]。由于选矿技术水平和产品质量等因素的限制, 该地区资源一直未得到有效开发, 本文作者主要对卢氏官坡花岗伟晶岩进行矿物学特征研究, 同时对锂电气石和云母的回收进行实验研究, 实现资源的综合利用。

1 实验

1.1 实验原料

本研究中, 使用的原料取自河南省卢氏县官坡镇大小西沟矿段和程家院矿段, 原料主要成分为电气石、石英、钠长石和云母。电气石多为粉红色, 发育完好的斑晶极少, 其照片如图1(a)所示。通过双目显微镜观察可以发现, 晶体透明度较高、有玻璃光泽、大小为0.2~0.5cm、颜色不均匀、粉红色至无色, 有少量发育完好的锂电气石晶体(<5%), 如图1(b)所示。

原料经破碎、磨矿送化验分析, 其主要化学成分(质量分数)如表1所示。由表1可以看出: 原料的主要化学成分为SiO₂, 其含量为52.18%, 其次是Al₂O₃, 含量为23.21%, 两者均为造岩矿物; 原料中主要有价成分为铷、铍、铯、锂、铌、钽, 均达到了综合利用的工业品位。

为了解伟晶岩主要矿物组成及矿物结晶特点, 在福州大学测试中心对电气石进行了XRD分析、SEM观察和EDS分析, 实验仪器分别为X'Pert Pro MPD和XL30 ESEM-TMP。

对原料进行XRD分析。实验条件如下: Co靶, K_α辐射源, 波长λ=1.7890, 靶电压为40kV, 靶电流为30mA, 扫描步长0.001°, 其XRD谱见图2。由图2可知, 电气石的主要矿物组成为锂电气石、钠长石、

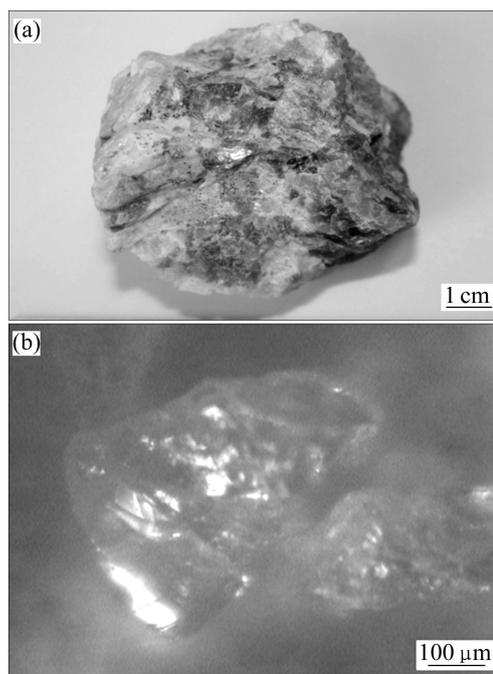


图1 电气石样品照片

Fig. 1 Photos of tourmaline ore: (a) Tourmaline ore; (b) Tourmaline particle crushed (reflected light)

表1 原矿多元素化学分析

Table 1 Chemical analysis of multi-element (mass fraction, %)

Na	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	Ca
1.79	2.91	23.21	52.18	3.01	1.29
TFe	Bi	S	Mn	Cu	Zn
1.01	0.02	0.51	0.07	0.02	0.03
Rb	Nb	Cs	Ta	Li	Be
0.282 8	0.010 7	0.491 2	0.018 4	0.664 6	0.458 3

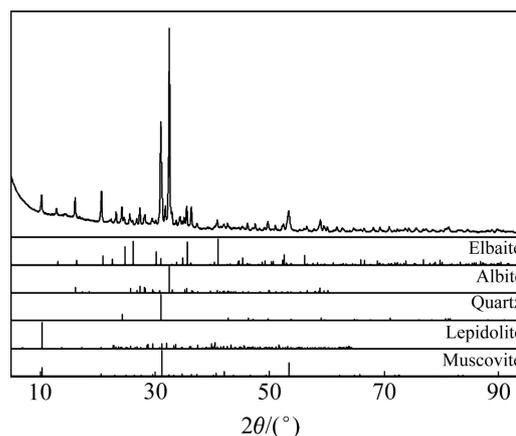


图2 原料的XRD谱

Fig. 2 XRD pattern of raw ore

石英、锂云母和白云母; 电气石、石英及钠长石的衍射峰强、尖锐且对称, 结晶度高。

原矿的 SEM 观察结果和 EDS 分析结果如图 3 和 4 所示。矿石中主要矿物相比较明显, 矿物结晶粒度

大, 尤其是锂电气石和石英(见图 3(a)和(b)), 样品均未经喷金处理, 在云母和长石表面出现明显的充放电现象(见图 3(b)和(c))。从 EDS 分析结果来看, 钠长石和石英的纯度非常高, 根据主要元素的原子个数比可

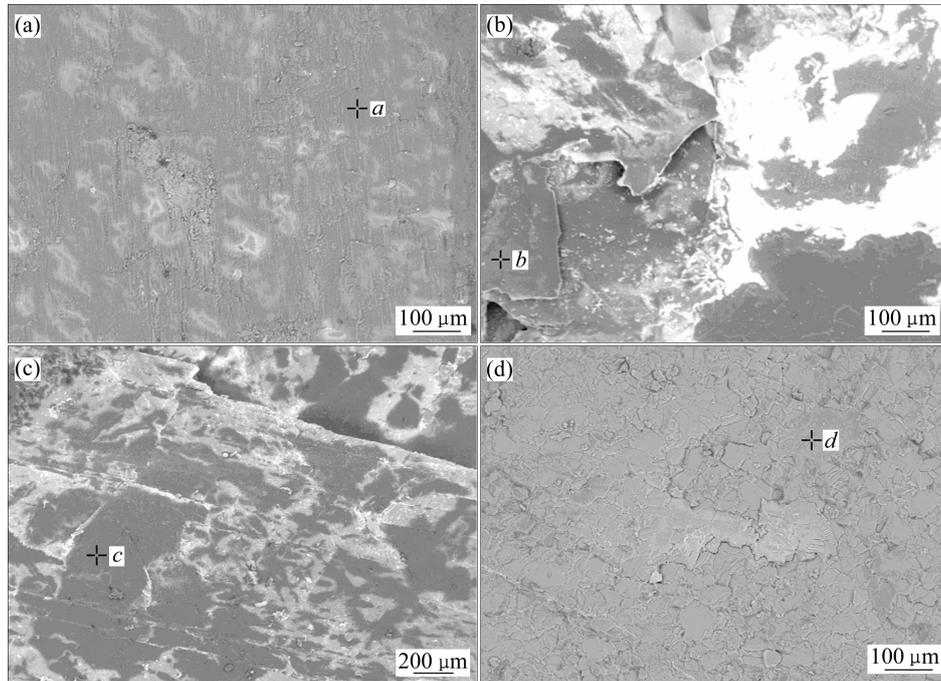


图 3 不同矿物颗粒的 SEM 像
Fig. 3 SEM images of different mineral particles

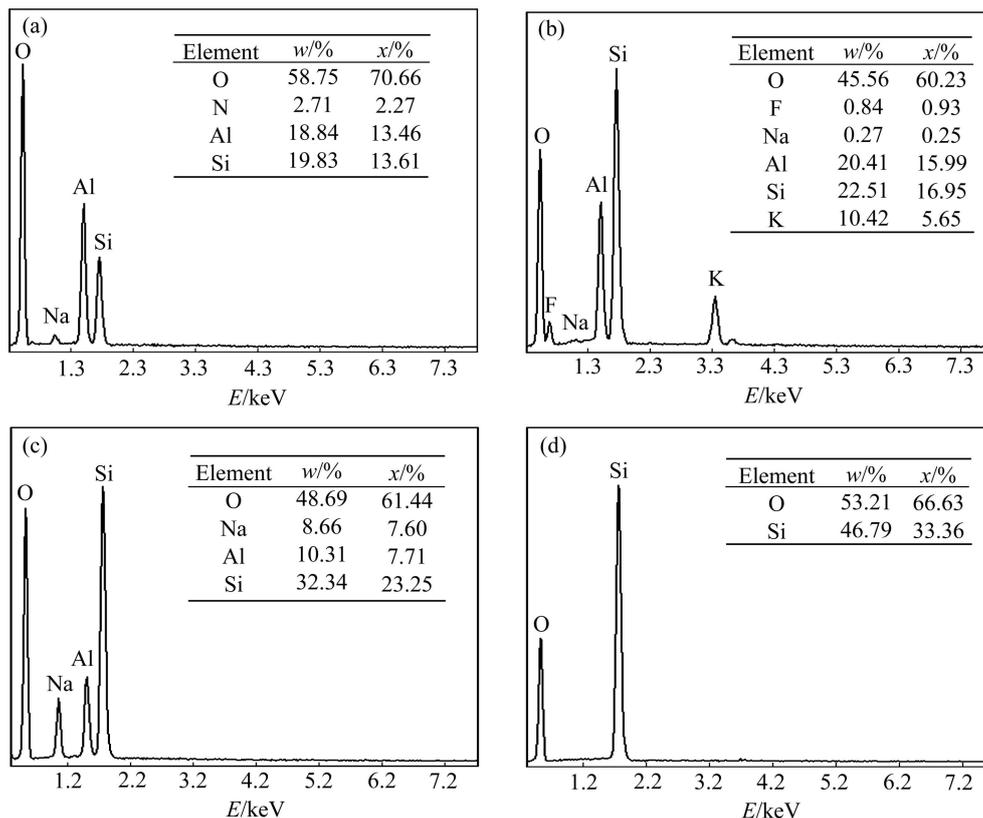


图 4 图 3 中 a、b、c 和 d 点的 EDS 谱
Fig. 4 EDS patterns of points a(a), b(b), c(c) and d(d) shown in Fig. 3

知,图 4(a)中主要矿物为电气石,图 4(b)中主要矿物为云母,图 4(c)中主要矿物为钠长石,图 4(d)中主要矿物为石英。

1.2 实验方法

将电气石制成光片和薄片,采用 Olympus 光学显微镜观察其光学显微特征(包括反射光、单偏光和正交偏光),对破碎后的矿粒采用 SEM 和 EDS 进行表征,并结合 XRD 和元素分析研究浮选产品,在此基础上从工艺矿物学角度提出电气石综合利用的新工艺。

将矿石破碎,进行磨矿、重选及浮选等工艺参数实验。在不同磨矿细度下,采用摇床分选获得片状云母产品;对重选尾矿进行再磨,在不同磨矿细度下采用十二胺作为捕收剂对电气石进行粗选,然后采用硫酸调整矿浆 pH 值,在常温下进行精选;调整电气石浮选后尾矿矿浆的 pH 值,对细粒云母进行浮选,以获得锂电气石和云母两种产品,最后,采用 XRD 研究产品的矿物相及结晶度。

2 电气石矿石薄片特征

2.1 锂电气石

锂电气石在单偏光下具有多色性(见图 5(a)和 5(c)),无解理,正中高突起。正交偏光镜下干涉色为 I 级橙红(见图 5(b))或 II 级蓝(见图 5(d))。锂电气石的粒度分布范围较宽,一般在 0.1 mm 至数厘米,但多数在 0.5 mm 以上。

2.2 钠长石

钠长石在单偏光镜下为浅灰色或白色。正交偏光镜下干涉色为一级白,近无色透明,部分长石呈一级灰,具有板状长条状晶型,两组轴面交角近 90°,是发育典型的聚片双晶(见图 5(b))。钠长石主要呈集合状,粒度较大,一般在 0.5 mm 以上。

2.3 云母

云母在单偏光镜下为浅黄色、浅灰色、III级绿。正交偏光镜下,干涉色一级灰至一级黄。云母结构主要呈片状、板状,片径一般大于 0.2 mm,集中分布在 0.2~0.5 mm,如图 5(a)和(c)所示。

2.4 石英

石英呈他形粒状结构,单偏光下近白色,正低突起,无解理,粒度一般大于 0.2 mm,集中分布在 0.2~0.5 mm,如图 5(a)和(b)所示。

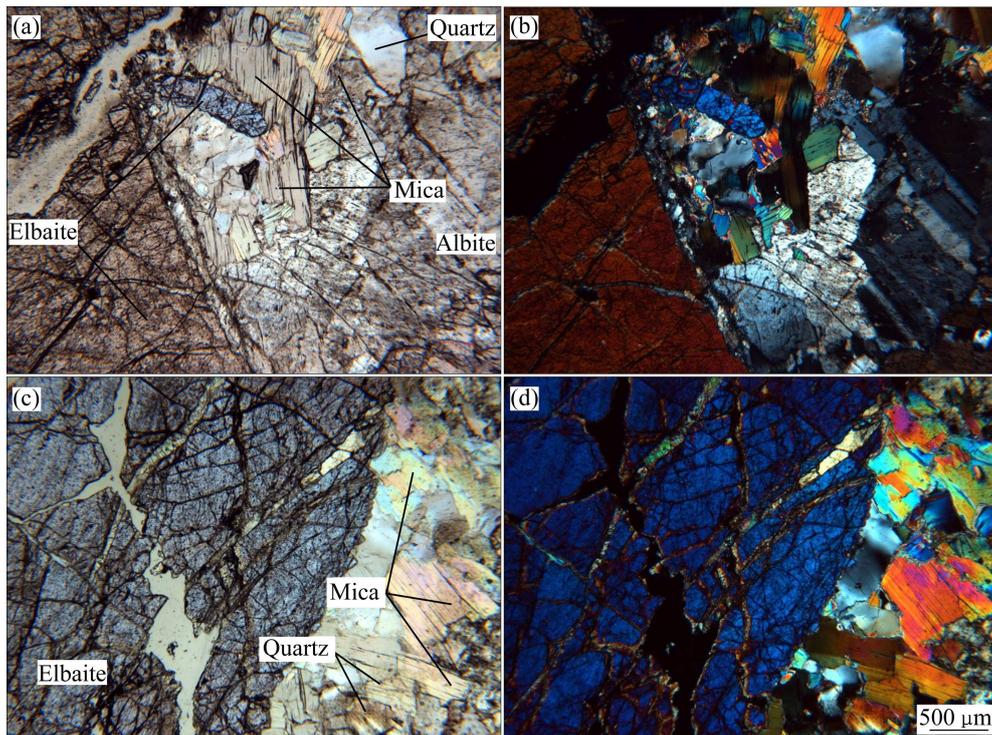


图 5 电气石显微结构特征

Fig. 5 Microstructure characteristics of tourmaline: (a) Elbaite and albite (plane-polarized light); (b) Elbaite and albite (cross-polarized light); (c) Elbaite, mica and quartz (plane-polarized light); (d) Elbaite, mica and quartz (cross-polarized light)

3 电气石的提取工艺

3.1 试验原理及工艺方案的制定

锂电气石晶体结构是由 $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$ 六元环、 $[\text{BO}_3]$ 三角、 $[\text{AlO}_6]$ 八面体和 $[\text{LiO}_6]$ 三重八面体组成。在锂电气石晶格结构中 Na^+ 、 Li^+ 、 Al^{3+} 、 Si^{4+} 、 B^{3+} 与O原子之间的静电力相差很大, M—O静电力越大,键合强度就越强,键越牢固,矿物解离时就越难以断裂。按M—O键的易断裂程度,由易到难分别为Li—O、Na—O、Al—O、Si—O和B—O。首先,Na—O和Li—O键的强度较小,因此,锂电气石易在平行于 $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$ 环面处断裂。当锂电气石晶体断裂时,表面的 Al^{3+} 裸露且不溶,使矿物表面带正电荷。其次, $[\text{AlO}_6]$ 八面体围绕三次螺旋轴,起到连接复杂络阴离子的作用,Al—O键弱于Si—O键,在矿物解离时,也易发生断裂,因此,常见电气石沿着垂直于环平面方向的环间断裂,环间断裂导致电气石表面大量的 Na^+ 和 Li^+ 裸露,这些阳离子易受水分子的吸引而离开晶体表面进入水相,进而使电气石晶体表面带负电荷。有时 $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$ 六元环也可能被破坏,导致Si—O键断裂,断裂的Si—O在水中与水分子作用,使电气石表面羟基化而带负电荷,电气石环间断裂和六元环被破坏均会使锂电气石表面带负电荷。另外,矿物表面暴露的 Na^+ 和 Li^+ 易溶于水,并与水中的 H^+ 交换,导致电气石晶体表面羟基化。因此,当锂电气石在平行于 $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$ 环面处断裂时,表面上的裸露 Al^{3+} 使矿物表面带正电荷,可用阴离子捕收剂如油酸钠进行浮选,当电气石晶体表面金属离子解离或表面羟基化时,可用阳离子捕收剂如胺类进行浮选,但采用任何一种捕收剂进行浮选均会受到pH值的显著影响^[15]。

白云母一般在酸性环境中浮选,锂云母一般在弱酸性或中性环境中浮选^[16-17],而锂电气石在中性环境中具有较好的可浮性。因此,应先把矿浆调整到酸性,这样才能达到抑制电气石的上浮,实现云母与电气石有效分离的目的。

根据伟晶岩的矿物学特征和锂电气石及云母的浮选机理,可在较粗细度下采用选矿方法对电气石进行有效分离,采用重选回收片状云母、采用浮选-反浮选回收锂电气石以及采用浮选回收细粒云母。

3.2 提取工艺参数的确定

3.2.1 重选回收片状云母

云母呈片状,其径厚比高,而长石、石英和电气

石主要呈棱角状或浑圆状,因此,可以利用棒磨机的选择粉碎作用,最大限度保留云母的片状结构。将矿石破碎,磨至不同细度。磨矿采用XMB-240×300棒磨机,磨矿浓度为60%,磨矿时间为6min;摇床实验粗选采用LYN 1 100 mm×500 mm矿泥摇床,实验条件为冲程10 mm,冲次300次/min,横向倾角1.5°,纵向倾角0.5°,给矿量为0.04 t/(m²·h);精选时给矿量为0.02 t/(m²·h),其他条件同粗选,实验结果见表2。表2中云母回收率通过化验云母精矿中钾含量计算得出,并辅以显微镜进行检查。

3.2.2 锂电气石粗选实验

锂电气石粗选采用XFG-1.5 L挂槽式浮选机,浮选温度为20~25℃,矿浆pH值为7.5,捕收剂作用时间2 min,浮选时间3 min。十二胺用量与浮选指标的关系见图6。

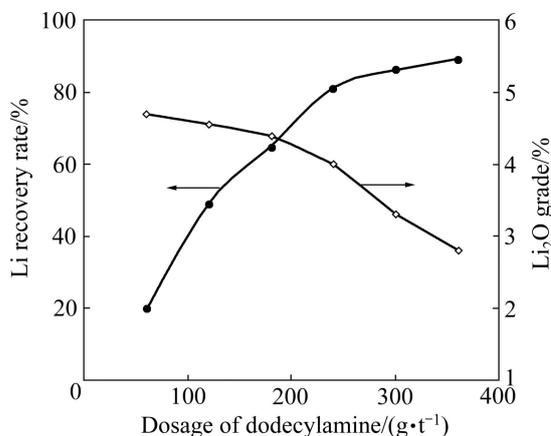


图6 十二胺用量对锂品位和回收率的影响

Fig. 6 Effects of dodecylamine consumption on Li_2O grade and Li recovery rate

从图6可看出,当 $\text{pH}\approx 7$ 时,随着十二胺用量的增加,粗选精矿锂的回收率呈先快速上升后趋于平缓的变化趋势,而锂品位呈先缓慢下降后快速下降的趋势,当十二胺用量达到360 g/t时,锂回收率为89.11%。由此可见,采用十二胺浮选锂电气石可取得较好的浮选效果。

3.2.3 锂电气石精选试验

锂电气石精选采用XFG-0.5 L挂槽式浮选机,浮选温度为20~25℃,十二胺用量为100 g/t,捕收剂作用时间2 min,浮选时间4 min。粗选精矿在XMQ150×50锥形球磨机中擦洗后进行反浮选,擦洗时间为30 s。矿浆pH值与精选指标的关系见图7。

从图7可知,随着pH值的降低,精选回收率和精矿的锂品位均呈不断下降的变化趋势。由于锂云母

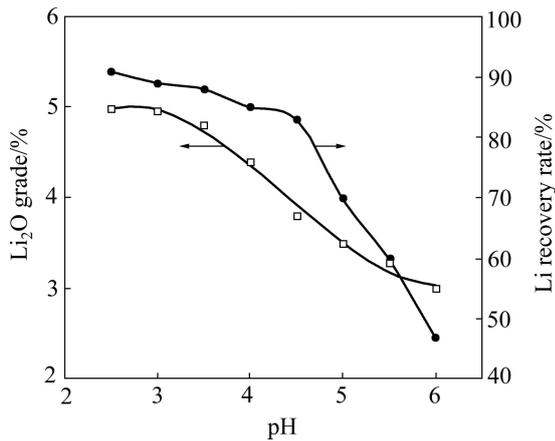


图7 pH值对锂品位和回收率的影响

Fig. 7 Effects of pH on Li₂O grade and Li recovery rate

和白云母浮选分离条件不同,当pH值较低时,白云母可浮性好;随着pH值的不断上升,锂云母开始上浮,当pH=3时,用显微镜检查云母产品,几乎见不到电气石颗粒。综合考虑,在pH为3.0时,可以实现锂电气石与云母的有效分离。

3.2.3 浮选回收细粒云母

对浮选电气石的尾矿进行云母浮选实验。实验采用XFG-1.0L挂槽式浮选机,浮选温度为20~25℃,矿浆pH值为3,捕收剂作用时间2.5min,浮选时间4min。十二胺用量与云母浮选回收率的关系见图8。

由图8可以看出,随着十二胺用量的增加,粗选精矿云母的回收率呈先快速上升后趋于平缓的变化趋势,综合考虑,十二胺的适宜用量为180g/t。

3.2.4 综合利用工艺

综合以上实验结果,推荐电气石综合利用工艺流程如图9所示,试验结果见表2。

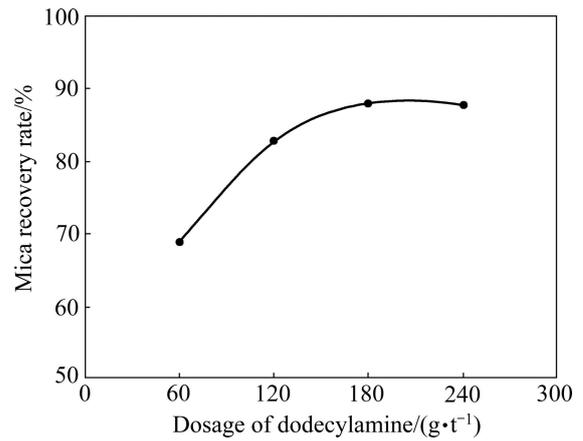


图8 十二胺用量对云母回收率的影响

Fig. 8 Effects of dodecylamine consumption on recovery rate of mica

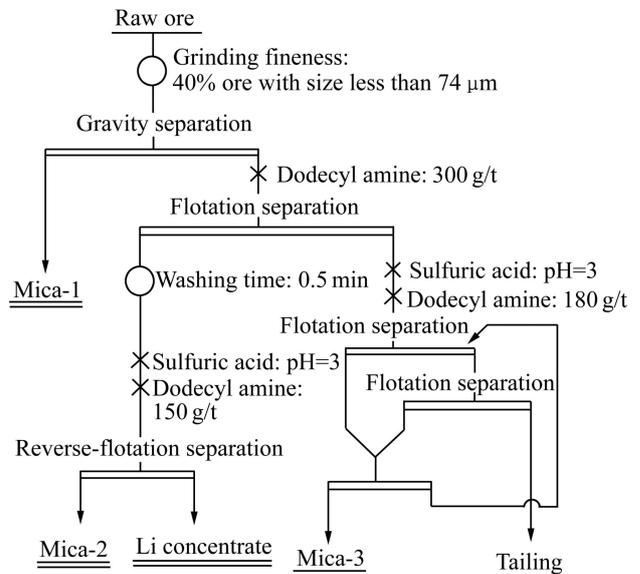


图9 电气石综合利用工艺流程

Fig. 9 Flowsheet for comprehensive utilization of tourmaline

表2 综合实验结果

Table 2 Results of comprehensive experiment

Product	Yield/%	Mica		Tourmaline	
		Mass fraction/%	Recovery rate/%	Mass fraction/%	Recovery rate/%
Mica-1	3.51	99.31	21.42	—	—
Mica-2	2.21	98.19	13.34	—	—
Mica-3	9.73	98.97	59.19	—	—
Li concentrate	22.85	—	—	98.31	82.19
Tailing	56.70	—	—	—	—
Raw ore	100.0	16.27	100.0	27.33	100.0

由表2可以看出,采用联合工艺可以获得品位为98.31%、回收率为82.19%的锂电气石产品,同时可获得云母含量为98.94%、回收率为93.95%的云母副产品。

3.3 产品特性分析

为了考察产品的矿物组成和结晶度,对产品进行XRD分析。实验条件如下:Co靶,波长 $\lambda=1.7890$,靶电压为40 kV,靶电流为30 mA,扫描步长 0.001° ,实验结果见图10。

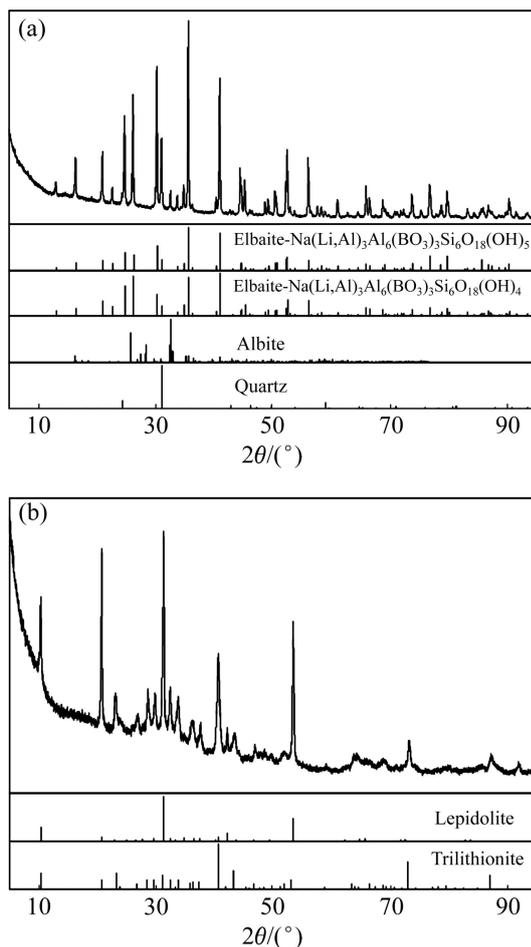


图10 浮选精矿的XRD谱

Fig. 10 XRD patterns of flotation concentrate: (a) Li concentrate; (b) Mica

由图10可以看出,锂电气石精矿中仅有少量的石英和钠长石,云母产品中主要成分为锂云母和白云母。采用Jade5.0计算锂电气石结晶度为95.94%,云母中白云母和锂云母所占比例分别为66%和34%。

同时,为确定锂电气石矿物的化学式和锂电气石矿物中微量元素的含量,采用等离子体质谱仪(ICP-MS)对电气石中微量元素进行分析,结果见表3。

表3 锂精矿化学多元素分析

Table 3 Chemical analysis of Li concentrate (mass fraction, 10^{-6})

B	Rb	Nb	Cs	Ta	Li	Be
34 100.0	27.1	8.3	16.7	23.2	7 420.0	16.9

由表3可以看出,微量元素在锂电气石矿物中含量很低,因此微量元素可能赋存于其他矿物中或以独立矿物存在。根据摩尔分数与质量分数之间的关系,可以推算出锂电气石矿物中 Li_2O 的质量分数为1.60%,结合XRD分析(见图10(a)),可以推出锂电气石矿物的化学式为 $\text{Na}(\text{Li},\text{Al}_2)\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_x$ ($x=4$ 或5)。

4 结论

1) 电气石矿石是伟晶结构,其主要成分包括锂电气石、石英、钠长石、白云母和锂云母。

2) 采用十二胺作为捕收剂对电气石进行浮选,当矿浆 $\text{pH}\approx 7$ 时,电气石的回收率可达90%以上,当矿浆 $\text{pH}=3$ 时,浮选中电气石被有效抑制。

3) 该重选-浮选新技术能够实现电气石的综合利用。在推荐的工艺条件下,可以获得电气石品位为98.31%、回收率为82.19的锂电气石精矿,同时可获得云母品位为98.94%、回收率为93.95%的云母精矿。

4) 锂电气石产品的结晶度为95.94%,化学式为 $\text{Na}(\text{Li},\text{Al}_2)\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_x$ ($x=4$ 或5)。

REFERENCES

- [1] 冀志江. 电气石自极化及应用基础研究[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究院, 2003: 13-17.
YI Zhi-jiang. Studies on the spontaneous polarity of tourmaline and its applied foundation[D]. Beijing: China Building Materials Academy, 2003: 13-17.
- [2] 莫尊理, 孙 豫, 郭瑞斌, 冯 超. 电气石的性能及应用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(4): 822-826.
MO Zun-li, SUN Yu, GUO Rui-bin, FENG Chao. Research progress in the performance and application of tourmaline[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2011, 30(4): 822-826.
- [3] 李雯雯, 张晓晖, 吴瑞华, 孟 琳. 不同种属电气石的压电效应及磁学性质的研究[J]. 硅酸盐通报, 2007, 26(6): 1116-1121.
LI Wen-wen, ZHANG Xiao-hui, WU Rui-hua, MENG Lin. Piezoelectricity and magnetic properties of diverse tourmalines[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2007,

- 26(6): 1116–1121.
- [4] LI Ke-xin, CHEN Tong, YAN Liu-shui. Synthesis of mesoporous grapheme and tourmaline co-doped titania composites and their photocatalytic activity towards organic pollutant degradation and eutrophic water treatment[J]. *Catalysis Communications*, 2012, 28(5): 196–201.
- [5] 梁岩, 商平, 孙恩呈, 王怀硕. 电气石粉对油田采出废水处理效果实验研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 2007, 26(4): 275–380. LIANG Yan, SHANG Ping, SUN En-cheng, WANG Huai-shuo. The effect of tourmaline powder particles on the treatment of oil field waste water[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2007, 26(4): 275–380.
- [6] XU Huan-yan, ZHENG Zhuo, MAO Gui-jie. Enhanced photocatalytic discoloration of acid fuchsine wastewater by TiO₂/schorl composite catalyst[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 175(3): 658–665.
- [7] HU Ying-mo, YANG Xue. The surface organic modification of tourmaline powder by span-60 and its composite[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(19): 7540–7545
- [8] JIANG Kan, SUN Tie-heng, SUN Li-na, LI Hai-bo. Adsorption characteristics of copper, lead, zinc and cadmium ions by tourmaline[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(6): 1221–1225
- [9] 祝爱侠, 刘海英, 谢中国, 牛化欣, 过世东. 超细电气石粉吸附水体中的 Cu(II)、Pb(II)和 Zn(II)[J]. *岩石矿物学杂志*, 2011, 39(10): 1585–1591. ZHU Ai-xia, LIU Hai-ying, XIE Zhong-guo, NIU Hua-xin, GUO Shi-dong. Adsorption of Cu(II), Pb(II) and Zn(II) from aqueous solution using ultra-fine powder of tourmaline[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2011, 39(10): 1585–1591.
- [10] 金华爱, 李柏淡, 吉干. 金属阳离子对石英、锂电气石、方解石作用的研究[J]. *中南矿冶学院学报*, 1980, 4: 23–28. JIN Hua-ai, LI Bo-yan, JI Gan. The action of metallic ions on quartz, elbaite and calcite[J]. *Journal of Central South Institute of Mining and Metallurgy*, 1980, 4: 23–28.
- [11] 任飞, 韩跃新, 印万忠, 王泽红, 袁致涛, 王子祥. 电气石可浮性与晶体化学关系的研究[J]. *金属矿山*, 2005(2): 36–38, 63. REN Fei, HAN Yue-xin, YIN Wan-zhong, WANG Ze-hong, YUAN Zhi-tao, WANG Zi-xiang. Relationship of tourmaline flotability with crystal chemistry[J]. *Metal Mine*, 2005(2): 36–38, 63.
- [12] 张开永, 曲鸿鲁, 成学海. 邹城电气石选矿试验研究[J]. *有色金属: 选矿部分*, 2004, 2: 23–25, 32. ZHANG Kai-yong, QU Hong-lu, CHENG Xue-hai. The study of sillimanite separation in Zoucheng[J]. *Nonferrous Metals: Mineral Processing Section*, 2004(2): 23–25, 32
- [13] 李赋屏, 彭光菊, 卢宗柳, 陈大经. 我国电气石资源分布、地质特征及其开发利用前景分析[J]. *矿产与地质*, 2004, 18(5): 493–497. LI Fu-ping, PENG Guan-ju, LU Zhong-liu, CHEN Da-jing. Distribution, geological character and utilization outlook of tourmaline resources in China[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2004, 18(5): 493–497.
- [14] 河南省卢氏县 202(蔡)矿区花岗伟晶岩型稀有金属矿床工业报告[R]. 宝鸡: 陕西省地质局第三地质队, 1970. Industry report of granite pegmatite rare metals deplsit in 202 (Cai) mining area in Lushi, Henan Province[R]. Baoji: Third Geological Team of Geological Bureau of Shanxi, 1970.
- [15] 印万忠. 硅酸盐矿物晶体化学特征与表面特性及可浮性关系的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 1999: 24–25. YIN Wan-zhong. Studies on the spontaneous polarity of tourmaline and its applied foundation[D]. Shenyang: Northeastern University, 1999: 24–25.
- [16] JIANG Hao, XIE Zhen, LIU Guo-rong, YU Ya-wen, ZHANG Ding. Interaction forces between muscovite and silica surfaces in electrolyte solutions measured with AFM[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23(6): 1783–1788.
- [17] 邓海波, 张刚, 任海洋, 许霞, 赵佳. 季铵盐和十二胺对云母类矿物浮选行为和泡沫稳定性的影响[J]. *非金属矿*, 2012, 35(6): 23–25. DENG Hai-bo, ZHANG gang, REN Hai-yang, XU Xia, ZHAO Jia. Influence of quaternary ammonium salt and dodecylamine on the flotation behavior and froth stability of mica minerals[J]. *Non-Metallic Mines*, 2012, 35(6): 23–25.

(编辑 龙怀中)