酸碱蚀对浮选分离锂云母和长石的增效机制：表面性质与颗粒尺寸的影响①

张喆怡[1,2]，罗颖[1,2]，魏茜[1,2]，焦芬[1,2]
（1.中南大学 矿物加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083；2.中南大学 湖南省战略含钙矿物资源清洁高效利用重点实验室，湖南 长沙 410083）

摘　要：研究了酸蚀和碱蚀作用对锂云母和长石浮选分离的影响机制，通过表面溶蚀和捕收剂作用实现了不同粒级锂云母与长石的高效浮选分离，结果显示，碱蚀作用比酸蚀作用更能促进锂云母和长石的浮选分离，在适宜条件下，38～74 μm 粒级和－38 μm 粒级锂云母精矿的 Li_2O 回收率分别为 92.54%和 83.20%。通过接触角测试、高速摄影机观测以及 SEM、AFM、XPS、红外光谱测试等研究了酸蚀和碱蚀对矿物表面润湿性、形貌、药剂吸附及电位的影响，结果表明，碱蚀作用对锂云母和长石表面不同的作用机制促进了两种矿物的浮选分离，而酸蚀作用对矿物表面的溶蚀没有选择性；两种溶蚀作用的效果均不受矿物粒级的影响。

关键词：锂云母；长石；表面溶蚀；浮选分离；酸蚀；碱蚀
中图分类号：TD923　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.012
文章编号：0253-6099(2026)01-0073-07

Enhancement Mechanisms of Acid and Alkaline Corrosion for Flotation Separation of Lepidolite and Feldspar: Influences of Surface Properties and Particle Size

ZHANG Zheyi[1,2], LUO Ying[1,2], WEI Qian[1,2], JIAO Fen[1,2]
(1. *School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan, China*; 2. *Key Laboratory of Hunan Province for Clean and Efficient Utilization of Strategic Calcium-Containing Mineral Resources, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan, China*)

Abstract: Based on investigation of the influence mechanisms of acid and alkaline corrosion for flotation separation of lepidolite and feldspar, efficient separation of lepidolite and feldspar in different particle size fractions was achieved by flotation with surface dissolution and collector interaction. It is found that in flotation process, alkaline corrosion can promote the separation of lepidolite and feldspar more effectively than acid corrosion. Under optimal conditions, lepidolite concentrates in size fraction of 38－74 μm and －38 μm are obtained with recoveries of Li_2O at 92.54% and 83.20%, respectively. The effects of acid and alkaline corrosion on the wettability, morphology, reagent adsorption and electrical potential of the mineral surface were explored by contact angle measurements, high-speed camera observations, SEM, AFM, XPS, infrared spectroscopy and zeta potential analyses. Results show that alkaline corrosion, due to its distinct mechanisms at the surfaces of lepidolite and feldspar, can promote the separation between them; whereas acid corrosion has no selectivity for two minerals. Besides, both acid and alkaline corrosion are independent of particle size of minerals.

Key words: lepidolite; feldspar; surface corrosion; flotation separation; acid corrosion; alkaline corrosion

锂具有低密度、高反应活性和优异的电化学性能，广泛应用于新能源、核工业、新材料、航空航天和信息技术等领域[1]。锂资源的可持续供应、循环利用和创新发展已成为全球关注的焦点。自然界中的锂资源主

① **收稿日期**：2025-09-01
基金项目：湖南省杰出青年科学基金项目(2023JJ10070)；国家自然科学基金(52474317，52304316)
作者简介：张喆怡(1997—)，女，陕西西安人，博士研究生，主要研究方向为复杂难选微细粒矿物的回收技术。E-mail：18291818618@163.com
通信作者：焦芬(1983—)，女，山西运城人，博士，教授，主要研究方向为复杂难处理矿产资源分离与综合利用基础理论与应用、再生资源高效清洁利用。E-mail：jiaofen@csu.edu.cn

要分为三种类型:卤水型、硬岩型和黏土型。包括中国在内的许多国家在开发卤水型锂资源方面面临一定挑战,而硬岩型锂矿仍是锂资源的重要来源。硬岩型锂矿包括伟晶岩型、花岗岩型和隐伏角砾岩型。中国的花岗岩型锂矿床占全球锂资源供应总量的5%[2]。花岗岩型锂矿床的主要矿物是锂云母,锂云母与其脉石矿物的物理化学性质相似,分离难度较大[3]。

表面预处理是矿物浮选过程中提升矿物可浮性和选择性的关键环节之一。在表面预处理中,机械预处理技术(如选择性磨矿、机械搅拌)能增加矿物表面积,提高矿物表面活性位点的数量[4]。化学预处理则通过调节矿物表面化学组成与结构,增强浮选药剂的选择性吸附[5]。酸、碱腐蚀也是化学预处理的重要方式,它们通过改变矿物元素组成、表面电荷,显著影响浮选过程中药剂的吸附行为[6]。表面预处理通过改变矿物表面性质,有效提高了浮选效果,但其在锂云母浮选中的研究鲜有报道。

本文将表面预处理中的酸蚀和碱蚀引入锂云母和长石的浮选分离中,探讨酸蚀和碱蚀作用对锂云母与长石浮选分离的影响机制,通过表面溶蚀和捕收剂的作用来提升不同粒级锂云母与长石的浮选分离效率。利用接触角测量、扫描电子显微镜(SEM)、原子力显微镜(AFM)、X射线光电子能谱(XPS)、红外光谱以及Zeta电位测试等多种分析技术,阐明酸蚀和碱蚀对矿物表面润湿性、形貌、药剂吸附及电位的影响。

1 试验样品及试验方法

1.1 试验样品及试剂

试验样品锂云母和长石来自湖南。矿物经手工挑选、破碎、陶瓷球磨机磨矿并过筛,得到38~74 μm粒级以及-38 μm粒级样品。表1为锂云母和长石的化学成分分析结果。可见锂云母和长石样品纯度较高,其中锂云母中Li_2O含量为4.97%,符合纯矿物浮选试验标准。

表1 矿物化学成分分析结果(质量分数)

Table1 Chemical composition analysis of minerals %

矿物名称	SiO_2	Li_2O	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O
锂云母	50.84	4.97	27.24	0.10	9.91	0.43
长石	64.99	—	18.80	0.046	11.29	3.66

试验试剂包括氢氧化钠、盐酸、氯化镁、油酸钠(NaOl)和十二烷基硫酸钠(SDS),均为分析纯,购自上海阿拉丁有限公司。

试验用水为去离子水,测试中使用的水为电阻率18.25 MΩ·cm的超纯水。

1.2 试验方法

1.2.1 溶蚀-浮选试验

首先将2 g样品、40 mL去离子水和2 mL质量分数1%的NaOH(碱蚀)或HCl(酸蚀)溶液混合,在搅拌速度700 r/min和超声波强度80 Hz、100 W条件下进行溶蚀(碱蚀或酸蚀)5 min;然后静置5 min,倒掉上清液,并使用去离子水洗涤样品3次。

对溶蚀后的样品进行浮选。分别进行了单矿物浮选和人工混合矿浮选,其中人工混合矿浮选的给矿为锂云母和长石按质量比1∶1混合。浮选试验在XFG纯矿物浮选机中进行,浮选槽容积40 mL,浮选机转子转速为1 902 r/min。使用NaOH或HCl调节溶液的pH值,根据试验条件加入实验室自制的金属离子螯合捕收剂Mg(Ⅱ)-NaOl-SDS。每次加入药剂后,搅拌3 min,充气浮选,浮选刮泡时间为3 min。浮选结束后固液分离、烘干、称重,并计算回收率。

1.2.2 测试及分析

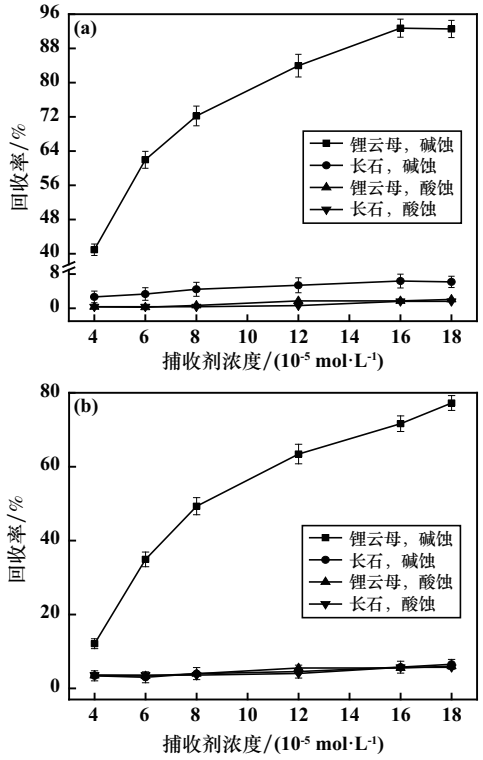
使用JY-82C接触角仪测量矿物与药剂作用前后的接触角,每组测试重复3次,取平均值。使用扫描电子显微镜TESCAN/TIMA GMH FEG SEM对酸蚀、碱蚀处理前后锂云母和长石表面进行形貌分析。使用NanoScope(Multimode 8,美国布鲁克)原子力显微镜观测酸蚀、碱蚀以及药剂作用前后锂云母和长石的表面形貌变化(AFM测试),每个样品在不同位置扫描至少3次,以排除试验的偶然性。使用Nicolet 6700傅里叶变换红外光谱仪研究酸蚀、碱蚀处理前后捕收剂在锂云母和长石表面的吸附情况。使用美国赛默飞世尔科技公司的K-Alpha仪进行XPS测试,测试结束后,使用Advantage软件对测试结果进行分析。

2 结果与讨论

2.1 浮选试验结果及分析

矿浆pH值为7,碱蚀和酸蚀作用后,捕收剂Mg(Ⅱ)-NaOl-SDS浓度对不同粒级锂云母和长石的浮选回收率的影响如图1所示。由图1可知,38~74 μm粒级锂云母在碱蚀作用下的浮选回收率随着捕收剂浓度增大而增加,捕收剂浓度1.6×10^{-4} mol/L时的回收率为92.73%,之后回收率不再随着捕收剂浓度增大而增加。酸蚀作用下,锂云母回收率始终低于5.00%。38~74 μm粒级长石浮选回收率在酸蚀和碱蚀条件下的回收率均低于10.00%,碱蚀条件下的回收率稍高于酸蚀条件。碱蚀作用促进了38~74 μm粒级锂云母的

浮选回收,而对长石浮选没有影响,这表明碱蚀对锂云母和长石的作用具有选择性,酸蚀作用对 38~74 μm 粒级锂云母和长石浮选均没有促进作用。在碱蚀作用下,-38 μm 粒级锂云母浮选回收率随着捕收剂浓度增大而增加,且在试验范围内一直呈上升趋势,最高回收率为 77.24%,低于 38~74 μm 粒级锂云母的回收率,这可能是因为细粒级锂云母比表面积更大,对药剂的消耗量更大[7],在试验范围内还未达到最大值。酸蚀作用下,锂云母浮选回收率始终低于 5.00%。-38 μm 粒级长石在碱蚀和酸蚀条件下的浮选回收率均低于5.00%,说明碱蚀作用也能促进-38 μm 粒级锂云母的浮选回收,碱蚀和酸蚀作用对锂云母、长石浮选的作用效果不随粒级变化而变化。酸蚀作用和碱蚀作用的不同效果可能源于两种溶蚀作用对锂云母表面离子的溶解机制差异[8]。



(a) 38~74 μm; (b) -38 μm

图 1　捕收剂浓度对锂云母和长石的浮选回收率的影响

Fig. 1　Effcet of collector concentration on recoveries of lepidolite and feldspars

由图 1 可知,在碱蚀作用下,锂云母和长石的单矿物浮选回收率具有较大差异,有望实现分离。因此在矿浆 pH 值为 7 条件下进行了碱蚀作用后锂云母、长石人工混合矿的浮选试验,结果如图 2 所示。随着捕收剂浓度增大,38~74 μm 粒级人工混合矿的 Li_2O 回收率先逐渐增加后保持平稳,捕收剂浓度 5×10^{-5} mol/L 时 Li_2O 回收率达到 92.54%,Li_2O 品位为 4.47%。-38 μm粒级人工混合矿的 Li_2O 回收率随着捕收剂浓度增大先增加后保持平稳,捕收剂浓度 9×10^{-5} mol/L 时 Li_2O 回收率达到 83.20%,Li_2O 品位为 4.01%。-38 μm 粒级的人工混合矿浮选回收率低于 38~74 μm 粒级,这是由于细粒级矿物质量小、动量大,难以被气泡捕捉,影响浮选速率和回收率,另外,细粒级矿物在浮选过程中容易出现夹带现象,导致 Li_2O 品位有轻微降低[7]。上述结果与单矿物试验结果相符,证明了在碱蚀作用下可实现两种粒级锂云母和长石的浮选分离。

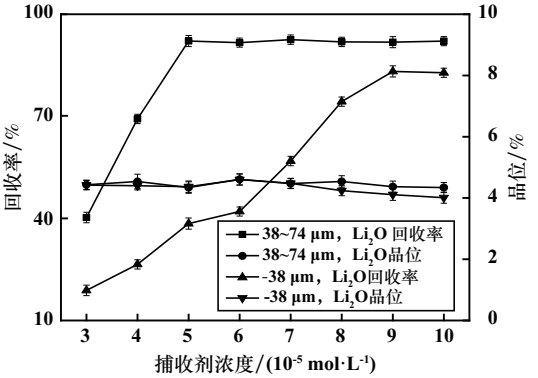


图 2　碱蚀条件下人工混合矿浮选试验结果

Fig. 2　Flotation results of artificially mixed ore with alkaline corrosion

2.2　接触角试验

捕收剂浓度 1.6×10^{-4} mol/L 条件下,锂云母和长石接触角测试结果如表 2 所示。由表 2 可见,在捕收剂体系下,未经处理的锂云母接触角仅 34.24°;酸蚀和碱蚀处理后锂云母接触角分别为 35.61°和 73.82°,表明碱蚀处理能够显著增强捕收剂与锂云母表面的相互作用,从而显著提升锂云母表面的疏水性[6]。未经处理、酸蚀和碱蚀处理的长石接触角分别为 26.40°、25.76°和 26.09°,无论酸蚀还是碱蚀处理,都未能显著影响长石表面与捕收剂的作用。碱蚀作用在锂云母与长石表面表现出的不同效果使该条件下锂云母和长石的浮选分离得以实现。

表 2　锂云母和长石接触角测试结果

Table 2　Contact angle of lepidolite and feldspars

样品名称	接触角/(°)		
	仅捕收剂	酸蚀+捕收剂	碱蚀+捕收剂
锂云母	34.24±5.2	35.61±4.9	73.82±5.3
长石	26.40±4.5	25.76±5.2	26.09±5.5

2.3　SEM 测试结果分析

图 3 展示了锂云母和长石颗粒在酸蚀和碱蚀作用

前后的表面形貌变化。未经处理的锂云母呈片状结构,表面较为光滑;长石则呈块状,表面仅有少量小孔。经过酸蚀和碱蚀处理后,两种矿物表面均出现了明显的裂隙和孔洞,表面粗糙度显著增加。这表明酸蚀和碱蚀对矿物表面的溶解和侵蚀效果强烈,矿物表面形貌发生了变化[9]。矿物表面粗糙度的增加也为矿物颗粒之间的相互作用提供了有利条件,结合高速摄影机观测结果推测,溶蚀作用导致矿物表面粗糙度增大,这可能在疏水力和剪切力的作用下进一步促进矿物颗粒间的絮凝[10]。

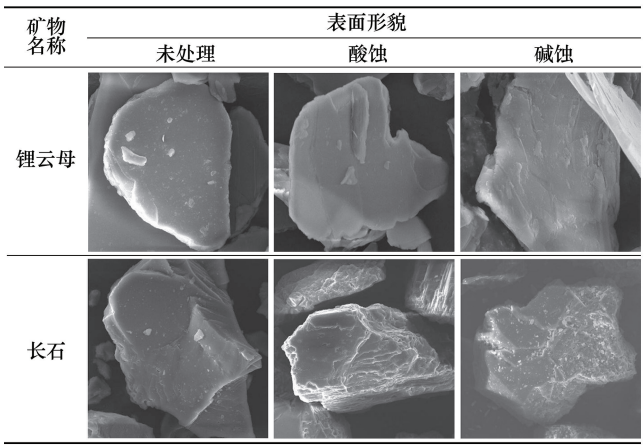


图 3 锂云母与长石在碱蚀和酸蚀作用前后的表面形貌

Fig. 3 Surface morphology of lepidolite and feldspars before and after alkaline and acid corrosion

2.4 AFM 测试结果分析

图 4 显示了在碱蚀和酸蚀作用前后锂云母和长石的二维和三维高度 AFM 成像。未经处理的锂云母样品表面平坦光滑,没有明显的起伏。未经处理的长石

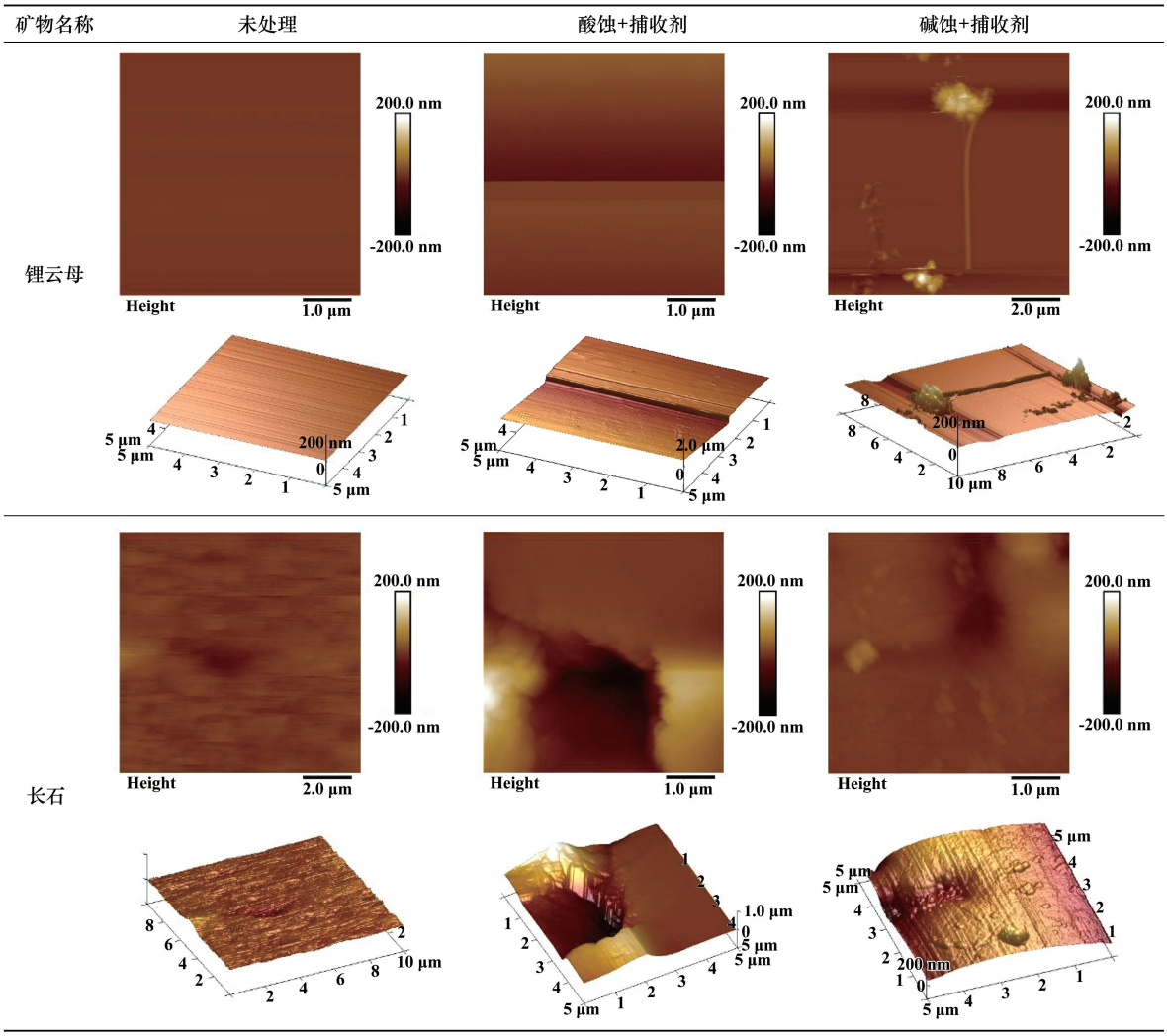


图 4 碱蚀和酸蚀作用前后锂云母和长石的二维和三维高度 AFM 成像

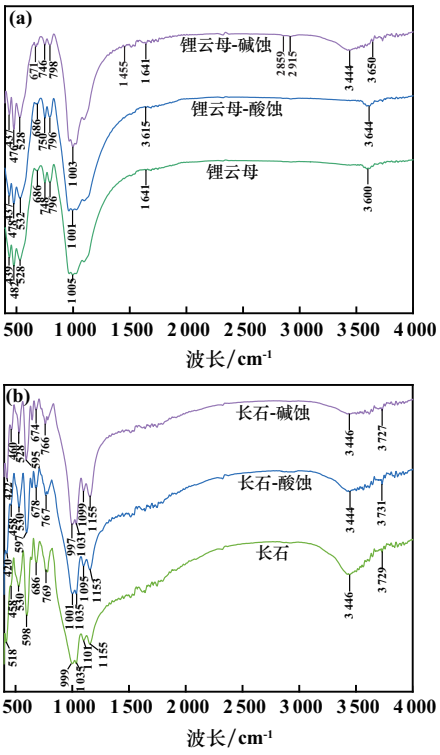
Fig. 4 2D and 3D AFM height images of lepidolite and feldspars before and after alkaline and acid corrosion

也具有平坦的表面,但略有起伏,结合 SEM 测试结果可知,这可能是长石表面本身存在一些孔洞结构导致的。经酸蚀处理并与捕收剂(捕收剂浓度 1.6×10^{-4} mol/L)作用后,锂云母和长石表面均出现了明显的裂隙,表面变

得更粗糙,但没有观察到捕收剂的吸附,说明酸蚀作用并没有使得锂云母或长石表面暴露出更多可与捕收剂作用的活性位点,无法促进两种矿物与捕收剂的吸附[9]。经碱蚀处理并与捕收剂(捕收剂浓度 1.6×10^{-4} mol/L)相互作用后,锂云母表面的裂隙上出现了明显的药剂吸附,吸附高度可达 200 nm,长石表面也观察到了药剂吸附,但吸附高度不足 20 nm,与锂云母表面的药剂吸附厚度相差较大。这表明,与长石相比,碱蚀作用促进了捕收剂在锂云母表面的吸附,且吸附范围更广,吸附层更厚[6]。这也解释了锂云母和长石不同的浮选行为,与浮选结果相符。

2.5　红外测试结果分析

酸蚀和碱蚀处理前后锂云母和长石与捕收剂作用后的红外光谱如图 5 所示,其中捕收剂浓度为 1.6×10^{-4} mol/L。锂云母红外光谱中,3 600 cm^{-1}、1 641 cm^{-1}处为 Si—O—H 和 Al—O—H 中 O—H 键伸缩振动峰,1 005 cm^{-1}、796 cm^{-1}、748 cm^{-1}处依次为 Si—O 键反对称伸缩、对称伸缩与变形振动峰,528 cm^{-1}、482 cm^{-1}处为[AlO_6]八面体中 Al—O 键振动峰。酸蚀处理后的锂云母与捕收剂作用后,红外光谱中没有出现新的吸收峰,锂云母特征峰也没有消失或发生明显偏移,说明捕收剂并没有吸附在锂云母表面。碱蚀处理后的锂云母与捕收剂作用后,在 2 915 cm^{-1}和 2 859 cm^{-1}处出现了新的吸收峰,分别为—CH_2—和 C—H 键的反对称和对称伸缩振动峰,在 1 455 cm^{-1}和 671 cm^{-1}处出现了新的吸收峰,分别为羧酸根—COO—的对称伸缩振动峰和—CH_2—中 C—H 键的面内摇摆振动峰,上述基团均包含于捕收剂 NaOl 或 SDS 分子结构中。除此之外,在 3 444 cm^{-1}处出现了锂云母新的特征峰 Si—O—H中 O—H 键的伸缩振动峰,说明碱蚀作用后,捕收剂明显在锂云母表面发生了吸附[11]。长石红外光谱图中,1 000~1 200 cm^{-1}处为 Si—O 键伸缩振动峰,400~800 cm^{-1}处为 Si—O 键变形振动峰和 Al—O 键振动峰。酸蚀处理的长石与捕收剂作用后,没有出现新的特征峰,长石原有特征峰也没有消失或明显偏移,说明捕收剂没有吸附在长石表面。碱蚀处理的长石与捕收剂作用后,在 2 929 cm^{-1}处出现了新的吸收峰,分别为—CH_2—中 C—H 键的反对称和对称伸缩振动峰,但峰强度较弱,除此之外,长石特征峰没有消失或明显偏移,说明捕收剂在长石表面发生了较弱的吸附[11]。结合 AFM 测试结果可知,酸蚀作用对捕收剂在两种矿物表面的吸附没有影响,而碱蚀作用强烈促进了捕收剂在锂云母表面的吸附,同时也对捕收剂在长石表面的吸附产生了影响。



(a) 锂云母;(b) 长石

图 5　酸蚀和碱蚀处理前后锂云母和长石与捕收剂作用后的红外光谱

Fig. 5　Infrared spectra of lepidolite and feldspar interaction with collectors before and after acid and alkaline corrosion

2.6　XPS 测试结果分析

图 6 展示了锂云母和长石表面在不同处理条件下(未经处理、酸蚀和碱蚀后)加入捕收剂后的 C1s 光谱分峰拟合结果,其中捕收剂浓度为 1.6×10^{-4} mol/L。在未处理状态下,锂云母和长石表面均在 284.8 eV 和 286.4 eV 附近分别呈现 C—C 和 C—O 的吸附峰。经过酸蚀处理,加入捕收剂后,锂云母和长石表面均在 288.7 eV 左右出现了一个新的吸附峰,即 C ═ O 吸附峰。然而,该吸附峰非常微弱,表明捕收剂在这两种矿物表面的吸附较弱。该结果说明,酸蚀处理对捕收剂在矿物表面吸附的促进效果有限。碱蚀处理又加入捕收剂后,锂云母表面的 C ═ O 吸附峰强度和面积显著增加,表明碱蚀作用显著促进了捕收剂在锂云母表面的吸附。而长石表面的 C ═ O 吸附峰保持不变,表明碱蚀和酸蚀对长石表面捕收剂吸附的影响相似。由此可知,碱蚀处理在锂云母和长石表面的作用效果存在差异,推测碱蚀诱导了锂云母表面的选择性溶解,使得捕收剂的吸附效果更显著[11]。而长石表面的碱蚀作用缺乏选择性,未能有效促进捕收剂的吸附。此外,酸蚀处理对锂云母和长石表面均未表现出选择性,导致

两种矿物表面对捕收剂的吸附均较弱。

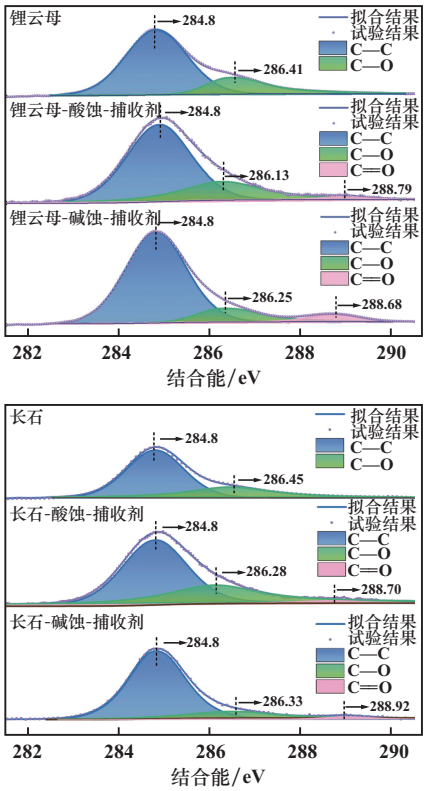


图 6 锂云母和长石 C1s 的分离和拟合峰

Fig. 6 Deconvolution of C1s peak for lepidolite and feldspars

锂云母和长石酸蚀和碱蚀前后的 XPS 全谱图如图 7 所示。与未经处理的锂云母相比，碱蚀处理后锂云母表面 O1s 原子分数从 43.14%降至 39.24%，Si2p 原子分数从 17.68%增至 19.58%，Al2p 原子分数由 8.95%增至 11.17%。酸蚀处理后锂云母表面 O1s、Si2p 和 Al2p 原子分数分别为45.13%、14.85%和8.27%，与未经处理的锂云母表面相比，未发生规律性变化。碱蚀后锂云母表面 O1s 原子分数明显降低，说明碱蚀对锂云母表面元素的溶解具有一定选择性，O1s 优先溶解，这可能是由于受到 OH^- 的作用，锂云母表面的 Si—O 和 Al—O 键更容易发生断裂。键的断裂和 O 原子的流失会使锂云母表面的能量状态发生变化，导致表面能降低，捕收剂更容易吸附到锂云母表面，从而促进了吸附过程。另外 Si—O 和 Al—O 键断裂后，原本被这些化学键束缚的原子周围的电子云分布发生改变，暴露出更多的活性位点，如不饱和的Si 原子和 Al 原子等。这些活性位点具有较高的化学反应活性，能够与捕收剂中的功能基团发生更强的化学键合作用，从而增强捕收剂在锂云母表面的吸附稳定性[12-13]。与锂云母不同，酸蚀和碱蚀处理前后的长石表面 3 种原子的原子分数均未发生明显变化，说明酸蚀和碱蚀对长石表面元素的溶解没有选择性，各元素均匀地发生溶解。

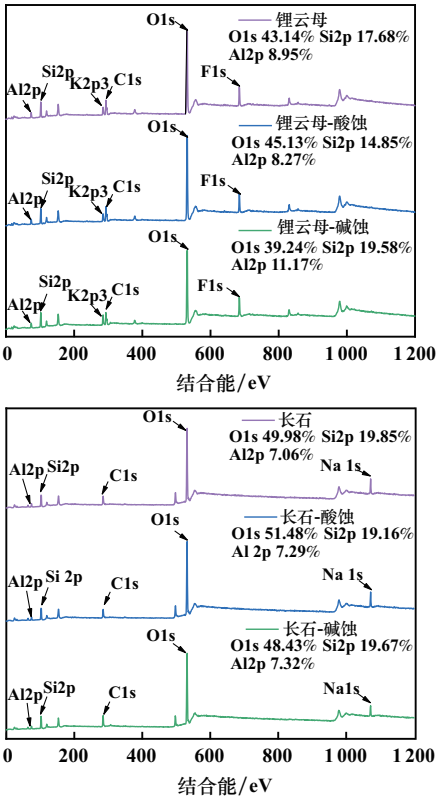


图 7 锂云母和长石酸蚀和碱蚀前后的 XPS 全谱图

Fig. 7 XPS survey spectra of lepidolite and feldspars before and after acid and alkaline corrosion

3 结论

1）在锂云母和长石的浮选过程中，碱蚀比酸蚀更能促进两种矿物的浮选分离。碱蚀条件下，38~74 μm 粒级和-38 μm 粒级人工混合矿的 Li_2O 回收率分别达到了 92.54%和 83.20%，而酸蚀条件下 Li_2O 回收率较低。

2）碱蚀作用显著提高了锂云母表面与药剂作用后的疏水性，而酸蚀作用对锂云母表面润湿性影响不大。长石表面润湿性受酸蚀和碱蚀作用影响均较小。

3）酸蚀和碱蚀作用均能导致矿物表面形貌发生变化；碱蚀作用能显著促进锂云母表面捕收剂的吸附，但对长石表面的吸附作用影响较小。

4）碱蚀处理对锂云母表面溶蚀具有选择性，能优先溶解某些元素，降低矿物表面能，增加矿物表面的活性位点，促进矿物与药剂的吸附。酸蚀处理对锂云母表面的溶蚀不具备这种选择性。

5）两种溶蚀处理对锂云母与长石的影响不同。本文研究结果不仅为深入理解锂云母与长石浮选分离

的机制提供了科学依据,还为提高锂回收效率提供了可行的解决方案,具有重要的理论和实践意义。通过优化表面预处理方法,可以有效解决锂云母与长石分离中的难题,为细粒级矿物分离提供技术思路,为锂资源的高效回收提供技术支持。

参考文献(References):

[1] 郭春丽,张斌武,郑义,等. 中国花岗岩型锂矿床:重要特征、成矿条件及形成机制[J]. 岩石学报, 2024,40(2):347-403.
GUO Chunli, ZHANG Binwu, ZHENG Yi, et al. Granite-type lithium deposits in China: Important characteristics, metallogenic conditions, and genetic mechanism[J]. Acta Petrologica Sinica, 2024,40(2):347-403.

[2] 舒良树,朱文斌,许志琴. 华南花岗岩型锂矿地质背景与成矿条件[J]. 地质学报, 2021,95(10):3099-3114.
SHU Liangshu, ZHU Wenbin, XU Zhiqin. Geological settings and metallogenic conditions of the granite-typelithium ore deposits in South China[J]. Acta Geologica Sinica, 2021,95(10):3099-3114.

[3] 余裕森,崔立雪,王云帆,等. 锂云母提锂技术的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2023,33(6):1972-1993.
YU Yusen, CUI Lixue, WANG Yunfan, et al. Research progress of lithium extraction technology from lepidolite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023,33(6):1972-1993.

[4] 吴港生,胡阳,王毓华,等. 机械搅拌预处理强化锂辉石和硅酸盐矿物浮选分离的研究[J]. 有色金属工程, 2022,12(10):95-100.
WU Gangsheng, HU Yang, WANG Yuhua, et al. Study on strengthening flotation separation of spodumene and silicate minerals by mechanical stirring pretreatment[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022,12(10):95-100.

[5] 黄鹏亮,杨丙桥,胡杨甲,等. 氧化预处理对铜钼浮选分离效果的影响[J]. 矿冶工程, 2021,41(3):46-50.
HUANG Pengliang, YANG Bingqiao, HU Yangjia, et al. Influence of oxidation pretreatment on chalcopyrite-molybdenite flotation separation efficiency[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(3):46-50.

[6] 张宇新,陈兰兰,褚浩然,等. 超声预处理对锂辉石矿物浮选分离的影响[J]. 中国有色金属学报, 2024,34(2):586-597.
ZHANG Yuxin, CHEN Lanlan, CHU Haoran, et al. Effect of ultrasonic pretreatment on flotation saparation of spodumene ore[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024,34(2):586-597.

[7] ZHANG Z Y, WEI Q, JIAO F, et al. Role of nanobubbles on the fine lepidolite flotation with mixed cationic/anionic collector[J]. Powder Technology, 2023,427:118785.

[8] XIE Y, BAN X Q, YIN W Z, et al. The influence of hydrochloric acid corrosion pretreatment on the flotation performance of hematite and its surface acid corrosion mechanism[J]. Advanced Powder Technology, 2024,35(7):104515.

[9] MURWAMADALA R D, MATHEBELA L B, MUBIAYI M P. Impact of alkali treatment on the internal microstructure, surface topography and the resulting mechanical properties of single sisal fibers[J]. Journal of Natural Fibers, 2024,21(1):2370028.

[10] 卜祥宁,童正,孙玉金,等. 矿物表面粗糙度对颗粒-气泡相互作用影响的研究进展[J]. 煤炭学报, 2023,48(11):4171-4182.
BU Xiangning, TONG Zheng, SUN Yujin, et al. Research progress on the impact of mineral surface roughness on particle-bubble interaction[J]. Journal of China Coal Society, 2023,48(11):4171-4182.

[11] 刘资余. 阴阳离子捕收剂体系中锂云母、长石、石英与气泡的黏附机理[D]. 长沙:中南大学, 2023.
LIU Ziyu. Attachment mechanism between bubbles and lepidolite, feldspar or quartz in the combined anion-cation collectors[D]. Changsha: Central South University, 2023.

[12] 刘文宝,甘琦强,刘文刚,等. 新型组合捕收剂对锂云母、钠长石和石英的浮选性能研究[J]. 矿产保护与利用, 2023,43(3):34-42.
LIU Wenbao, GAN Qiqiang, LIU Wengang, et al. Study on the flotation performance of a new combined collector for lepidolite, albite and quartz[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023,43(3):34-42.

[13] 王宇斌,文堪,张鲁,等. Ca^{2+}与白云母作用机理的 XPS 分析[J]. 矿物学报, 2018,38(4):462-468.
WANG Yubin, WEN Kan, ZHANG Lu, et al. XPS analysis for mechanism of the interaction between Ca^{2+} and muscovite[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2018,38(4):462-468.

引用本文:张喆怡,罗颖,魏茜,等. 酸碱蚀对浮选分离锂云母和长石的增效机制:表面性质与颗粒尺寸的影响[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):73-79.

ZHANG Zheyi, LUO Ying, WEI Qian, et al. Enhancement mechanisms of acid and alkaline corrosion for flotation separation of lepidolite and feldspar: Influences of surface properties and particle size[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):73-79.