

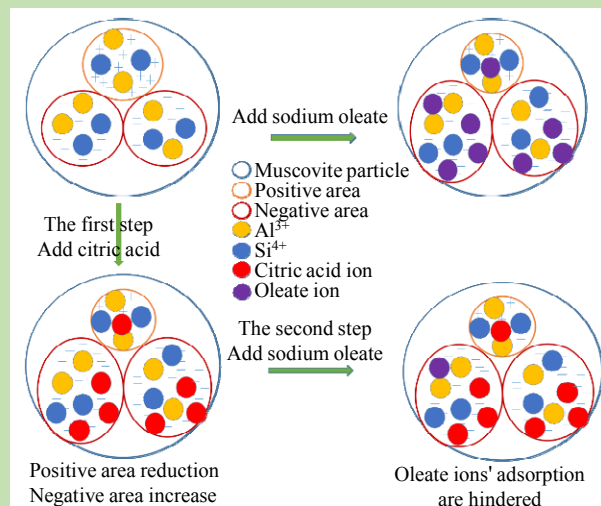


Inhibition mechanism of citric acid on the floatability of muscovite

Yubin WANG, Kan WEN*, Wangbo WANG

School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China

Abstract: Citric acid is usually used as an adjustment agent in mineral processing. In order to investigate the effect regularity of citric acid on the floatability of muscovite and the action mechanism of citric acid on muscovite under sodium oleate system, different muscovite samples were characterized by means of FT-IR, flotation solution chemistry, Zeta potential and XPS spectra etc. The results showed that the floatability of muscovite could be obviously inhibited by citric acid. The muscovite recovery rate only reached 0.40% when the concentrations of sodium oleate and citric acid were 9.20×10^{-4} and 4.76×10^{-5} mol/L respectively at pH value of 6. The reason for the inhibition of the floatability of the muscovite by citric acid was that citric acid



generated $C_6H_7O_7^-$ and $C_6H_6O_7^{2-}$ etc. in the solution. $C_6H_7O_7^-$ and $C_6H_6O_7^{2-}$ etc. could adsorb on muscovite surface, then hinder oleate ions adsorbed on muscovite surface, and the collection performance of sodium oleate on muscovite could be weakened. Meanwhile $C_6H_7O_7^-$ and $C_6H_6O_7^{2-}$ etc. which adsorbed on muscovite surface aroused muscovite surface Zeta potential negative direction increase, this means that the local positive region on the surface of muscovite will decrease, therefore the electrostatic adsorption action and the chemical adsorption of oleate ions on muscovite surface was weakened. Furthermore, these ions were generated by citric acid contained strong hydrophilic groups, and adsorbed on muscovite surface that caused muscovite surface with strong hydrophilicity, this means that the muscovite could be more difficult to float up, hence the floatability of muscovite decreased significantly under the above comprehensive effect. This work can provide a certain theoretical basis for the floatation separation of muscovite, and it can also provide some degree of reference for the selection of adjustment agents in the process of muscovite flotation.

Key words: citric acid; muscovite flotation; sodium oleate; inhibition mechanism

收稿: 2018-05-14, 修回: 2018-06-26, 网络发表: 2018-08-25, Received: 2018-05-14, Revised: 2018-06-26, Published online: 2018-08-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51674184); 陕西省教育厅基金资助项目(编号: 16JK1467)

作者简介: 王宇斌(1972-), 男, 河南省偃师市人, 博士, 副教授, 矿物加工工程专业, Tel: 13488326923, E-mail: wangyubin1972@sohu.com; 文堪, 通讯联系人, Tel: 18710482285, E-mail: m18710482285@163.com.

引用格式: 王宇斌, 文堪, 王望泊. 柠檬酸对白云母可浮性的抑制机理. 过程工程学报, 2019, 19(2): 338-344.

Wang Y B, Wen K, Wang W B. Inhibition mechanism of citric acid on the floatability of muscovite (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2019, 19(2): 338-344, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.218201.

柠檬酸对白云母可浮性的抑制机理

王宇斌, 文 堪*, 王望泊

西安建筑科技大学资源工程学院, 陕西 西安 710055

摘 要: 为研究油酸钠体系中柠檬酸对白云母可浮性的影响规律及其与白云母的作用机理, 利用红外光谱(FT-IR)、光电子能谱(XPS)、 ζ 电位和浮选溶液化学等方法对不同白云母样品进行了表征。结果表明, 柠檬酸可明显抑制白云母的可浮性, 在矿浆 pH 值为 6、油酸钠浓度为 9.20×10^{-4} mol/L 的条件下, 使用 4.76×10^{-5} mol/L 柠檬酸, 白云母的回收率仅为 0.40%。柠檬酸抑制白云母的可浮性主要是柠檬酸在溶液中生成的 $C_6H_7O_7^-$ 和 $C_6H_6O_7^{2-}$ 等离子吸附在白云母表面, 阻碍了油酸根等离子的吸附, 且这些离子的吸附导致白云母表面 ζ 电位负向增大, 削弱了油酸根等离子在白云母表面的静电吸附及化学吸附作用。此外, $C_6H_7O_7^-$ 和 $C_6H_6O_7^{2-}$ 等离子含羟基等强烈亲水基团, 吸附在白云母表面会使白云母表面强烈亲水, 白云母的可浮性大大降低。

关键词: 柠檬酸; 白云母浮选; 油酸钠; 抑制机理

中图分类号: TD97; TU528

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2019)02-0338-07

1 前言

浮选中, 柠檬酸常被用作硅酸盐等脉石矿物的抑制剂^[1]。白云母属于硅酸盐矿物, 常作为脉石矿物伴生于萤石、硅线石等各种矿产资源中, 采用浮选法回收萤石等矿物时, 常需加入能抑制白云母的调整剂才能将其与有用矿物分离^[2], 因此揭示抑制剂与白云母的作用机理十分有必要。王宇斌等^[3]曾对无机抑制剂如水玻璃与白云母的作用机理进行了研究, 但关于有机抑制剂如柠檬酸与白云母作用机理的研究较少。本工作研究柠檬酸对白云母可浮性的影响规律, 分析了柠檬酸与白云母的作用机理, 可为白云母的选别提供一定理论参考。

2 实验

2.1 材料与试剂

以陕西某白云母矿为原料, 对其进行摇床提纯、球磨及酸洗预处理, 筛选出粒径 75~150 μm 的样品作为实验样。原矿的 XRD 分析结果如图 1 所示。由图可知,

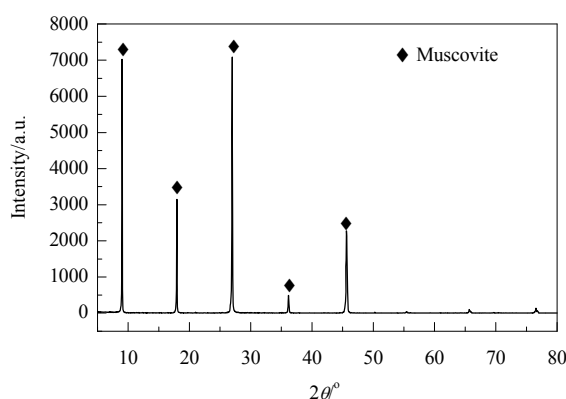


图1 白云母的 XRD 谱

Fig.1 XRD pattern of muscovite

样品的特征吸收峰明显且无杂峰, 可见样品纯度较高。

试剂: H_2SO_4 , $C_6H_8O_7 \cdot H_2O$ (柠檬酸, 分析纯, 天津红岩化学试剂厂), $C_{17}H_{33}COONa$ (油酸钠, 分析纯, 天津光复化学试剂厂)。

2.2 实验设备与分析仪器

FGC 型挂槽浮选机(武汉洛克粉磨设备制造有限公司), JS94H 型微电泳仪(上海中晨数字技术设备有限公司), K-Alpha 型 X 射线光电子能谱仪(XPS, 英国赛默飞世尔科技公司), Tensor27 型傅立叶变换红外光谱仪(FT-IR, 德国布鲁克公司)。

实验流程见图 2。每次实验时称取 30 g 单矿物倒入浮选槽中, 加入 195 mL 二次蒸馏水, 浮选时依次加入试剂并调节矿浆, 精矿产品过滤、烘干, 称重, 计算得其回收率。

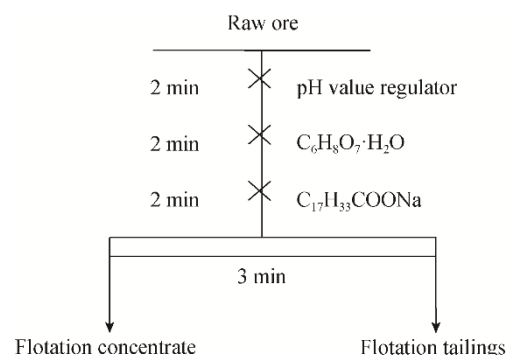


图2 纯矿物浮选流程

Fig.2 Flow chart of single mineral flotation test

2.3 实验方法

2.3.1 Zeta 电位检测

称取少量小于 44 μm 的样品置于烧杯中, 加入 20 mL 二次蒸馏水并调节溶液 pH 值。将适量柠檬酸加入烧杯中搅拌均匀, 静置一段时间后, 取 2 mL 上清液置

于电泳槽中,用微电泳仪对其进行检测。

2.3.2 XPS 检测

称取适量小于 $44\ \mu\text{m}$ 的样品用 XPS 检测,用 Advantage 软件对检测结果进行分析,分析过程中用 C1s $284.6\ \text{eV}$ 标定。

2.3.3 FT-IR 分析

称取适量小于 $44\ \mu\text{m}$ 的样品与 KBr 粉末按一定比例混合磨匀,装入压片模具制样,进行红外光谱分析。

3 结果与讨论

3.1 油酸钠体系中柠檬酸对白云母浮选行为的影响

前期研究^[4,5]结果表明, $\text{pH}=6$ 及 $\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COONa}$ 浓度为 $9.20\times 10^{-4}\ \text{mol/L}$ 时,白云母回收率达 10.10% 。由于破碎过程中白云母大部分会沿解理面解离,少部分可能沿断裂面断裂,会暴露部分 Si 和 Al 等活性点,因此在无活化剂时用油酸钠作捕收剂,油酸根离子等会与白云母表面暴露的部分 Si 和 Al 活性点作用,使之具有一定可浮性。此外,白云母的可浮性与其粒度、纯度也有一定关系。本实验在前期实验条件下 ($\text{pH}=6$, $\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COONa}$ 浓度 $9.20\times 10^{-4}\ \text{mol/L}$),考察柠檬酸浓度对白云母回收率的影响,结果如图 3 所示。由于柠檬酸添加量很少,对溶液 pH 值基本无影响,因此可忽略柠檬酸对溶液 pH 值的影响。由图可知,随柠檬酸浓度增大,白云母回收率逐渐减小,柠檬酸浓度为 $1.51\times 10^{-5}\ \text{mol/L}$ 时,白云母回收率为 0.90% ,柠檬酸浓度增大到 $4.76\times 10^{-5}\ \text{mol/L}$ 时,白云母回收率降低到 0.40% ,比只经油酸钠作用的白云母回收率下降了 9.7% ,表明柠檬酸可显著抑制白云母的可浮性。

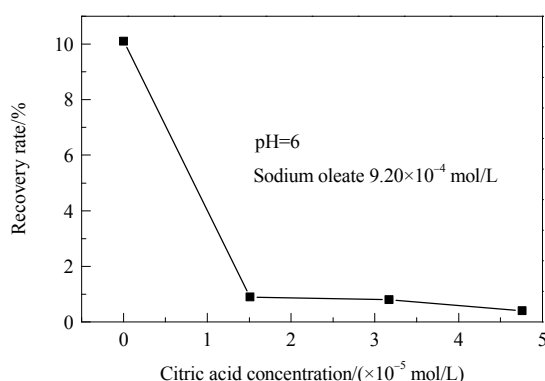


图 3 柠檬酸浓度对白云母回收率的影响

Fig.3 Influence of citric acid concentration on recovery rate of muscovite

3.2 浮选溶液化学分析

按文献^[6]方法分别对不同 pH 值下 $\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COONa}$ 溶液及 $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7\cdot\text{H}_2\text{O}$ 的组分进行计算,结果如图 4 和 5 所

示。

从图 4 可知,柠檬酸在溶液中主要以 $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$, $\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_7^-$, $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_7^{2-}$ 和 $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7^{3-}$ 形式存在; pH 值 <3 时有有效组分为 $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$; $3<\text{pH}<5$ 时 $\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_7^-$ 为有效组分; $5<\text{pH}<6.38$ 时主要组分为 $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_7^{2-}$; $\text{pH}=6$ 时以 $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_7^{2-}$ 为主,且存在部分 $\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_7^-$ 和 $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7^{3-}$; $\text{pH}>6.38$ 时 $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7^{3-}$ 逐渐成为有效组分。

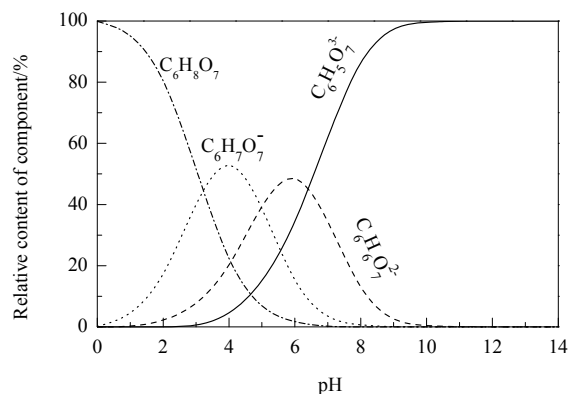


图 4 不同 pH 值下柠檬酸组分分布

Fig.4 Distribution of citric acid components at different pH values

由图 5 可知, $\text{pH}<8.76$ 时 $\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COONa}$ 在溶液中的有效组分为 $\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COOH}$, 还存在 $\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COO}^-$, $(\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COO})_2^{2-}$ 及油酸根离子-分子缔合物, $\text{pH}>8.76$ 时 $\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COO}^-$ 和 $(\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COO})_2^{2-}$ 为有效组分,且含量随 pH 值增大变化不大。

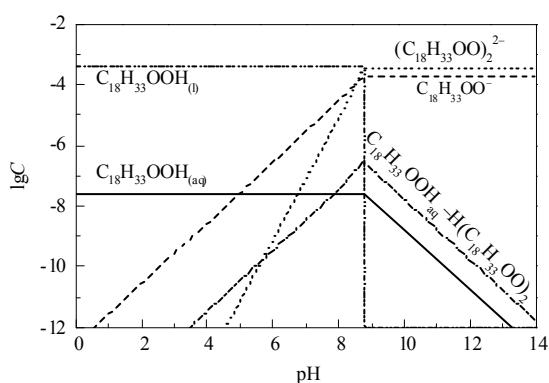


图 5 油酸钠各组分浓度(C)-pH 图

Fig.5 Diagram of sodium oleate component concentration (C)-pH

3.3 白云母表面 Zeta 电位检测

对不同浓度柠檬酸作用后的白云母表面的 ζ 电位进行了检测,结果见图 6。从图可以看出,随柠檬酸浓度增大,白云母表面的 ζ 电位逐渐负向增大。柠檬酸浓度增大到 $1.51\times 10^{-5}\ \text{mol/L}$ 时,白云母表面的 ζ 电位为-

26.66 mV，进一步增大柠檬酸浓度时，白云母表面的 ζ 电位基本保持不变。由柠檬酸的溶液化学分析可知，pH=6 时，柠檬酸在溶液中的有效组分为 $\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_7^-$ 、 $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_7^{2-}$ 和 $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7^{3-}$ ，增大柠檬酸浓度会导致溶液中 $\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_7^-$ 和 $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_7^{2-}$ 等离子含量增多，且这些带负电的离子会吸附在白云母表面，进而使白云母表面的 ζ 电位逐渐负向增大。

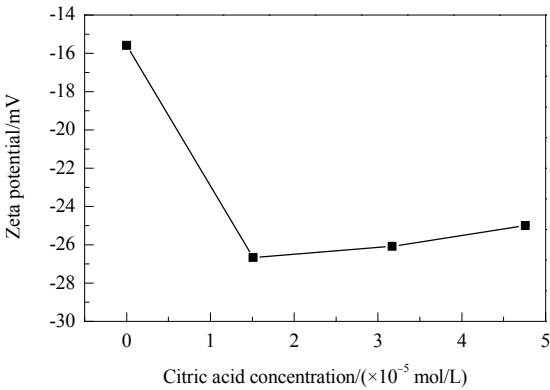


图 6 不同浓度柠檬酸作用下白云母表面的 ζ 电位
Fig.6 Influence of concentration of citric acid on the Zeta potential of muscovite

3.4 样品的红外光谱

对不同白云母试样(处理条件见表 1)进行了 FT-IR 分析，结果如图 7 所示。从图可知，样品 1(未经处理的白云母)在 3624 cm^{-1} 处出现纯白云母矿物的 $-\text{OH}$ 吸收峰， 975 、 906 、 805 和 747 cm^{-1} 处为白云母表面 $\text{Si}-\text{OH}$ 基团的特征吸收峰^[7]。样品 2(油酸钠作用下的白云母)在 3339 、 1270 、 2974 和 2884 cm^{-1} 处出现了新吸收峰，而 3339 和 1270 cm^{-1} 处为油酸分子的羟基伸缩和弯曲振动吸收峰， 2974 和 2884 cm^{-1} 处为油酸根离子中甲基和亚甲基的特征吸收峰，表明油酸钠以物理吸附方式吸附在了白云母表面。此外， 1651 cm^{-1} 处为油酸铝的特征峰^[8]，表明油酸钠也在白云母表面发生了化学吸附。样品 3(油酸钠和 $1.51\times 10^{-5}\text{ mol/L}$ 柠檬酸作用下的白云母)于 1804 和 3630 cm^{-1} 处出现柠檬酸的 $\text{C}=\text{O}$ 吸收峰及 $-\text{OH}$ 吸收峰^[9-11]，且强度明显增强，表明柠檬酸根离子吸附在了白云母表面，油酸分子中甲基和亚甲基的特征峰减弱或消失，表明加入柠檬酸后，矿浆中 $\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_7^-$ 和 $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_7^{2-}$ 等离子吸附并覆盖在白云母表面，阻碍了油酸根等离子在白云母表面吸附，进而使油酸根等离子在白云母表面的吸附作用减弱。样品 4(油酸钠和 $4.76\times 10^{-5}\text{ mol/L}$ 柠檬酸作用下的白云母)各吸收峰的强度变化不大，这主要是由于 $\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_7^-$ 和 $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_7^{2-}$ 等离子在白云母表面吸附饱和所致。

表 1 白云母的处理条件			
Table 1 Treatment conditions of muscovite			
Sample	pH value of pulp	Reagent concentration/(mol/L)	
		Citric acid	Sodium oleate
1	—	—	—
2	6	—	9.20×10^{-4}
3	6	1.51×10^{-5}	9.20×10^{-4}
4	6	4.76×10^{-5}	9.20×10^{-4}

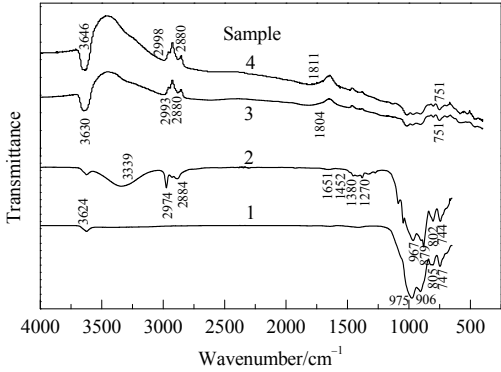


图 7 白云母样品的红外光谱
Fig.7 FT-IR spectra of muscovite samples

3.5 样品的 XPS 表征

为进一步揭示柠檬酸与白云母的作用机理，采用 Advantage 软件对不同白云母样品表面主要元素的含量及电子结合能进行了分析，结果如表 2 所示。由表可知，与样品 1 相比，样品 2 表面碳元素含量有所增加，表明油酸钠吸附在了白云母表面。样品 3 和 4 表面碳元素含量都有所下降，由红外分析可知， $\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_7^-$ 和 $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_7^{2-}$ 等会吸附在白云母表面，碳元素含量下降可能是 $\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_7^-$ 和 $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_7^{2-}$ 等与 $\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COO}^-$ 等离子中的碳含量差异引起的。此外还发现，经柠檬酸作用后，白云母表面 Si 和 Al 元素的结合能有变化，表明柠檬酸对白云母表面 Si 和 Al 元素的化学环境产生了一定影响。

表 2 各样品表面碳元素相对含量及硅铝元素电子结合能
Table 2 Carbon element relative content of samples surface and silicon and aluminum elements electron binding energy under medicament action

Sample	C content/atom%	Binding energy/eV	
		Si 2p	Al 2p
1	14.82	102.16	74.03
2	61.29	101.33	73.47
3	16.66	103.04	74.86
4	15.54	103.42	75.23

对不同药剂作用后的白云母样品进行了 XPS 检测，结果如图 8 所示。由图可知，白云母中含钾、硅、氧、铝、碳等元素。与纯白云母(样品 1)相比，经药剂作用后的样品表面各元素的特征峰峰形有一定变化。

为了解白云母样品表面活性点硅和铝元素的价键

情况,对白云母样品的 XPS 谱进行了分峰^[12]拟合处理,结果如表 3、4 和图 9、10 所示。结合图表可知,与纯白云母相比,样品 2 表面新出现了 Al-OOCR(羧酸铝)和 Si-OOCR(羧酸硅)等,表明油酸根离子与白云母表面暴露的 Al 和 Si 发生了化学反应,这也是油酸钠改变白云母可浮性的主要原因。

此外,与样品 2 相比,样品 3 表面的 Al-OOCR 和 Si-OOCR 相对含量分别降低了 22.20%和 26.94%,原因在于加入柠檬酸后,其在溶液中生成的 $C_6H_7O_7^-$ 和 $C_6H_6O_7^{2-}$ 等离子吸附在白云母表面,减弱了油酸根等离子在白云母表面的化学吸附作用。与样品 3 相比,样品

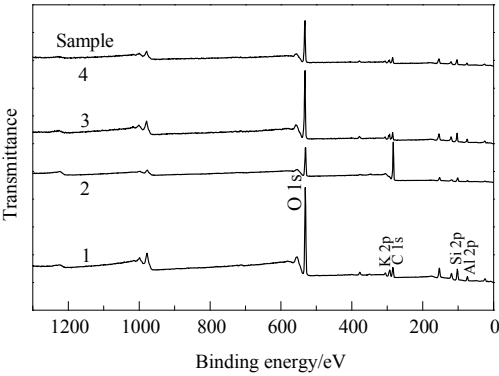


图 8 白云母样品的 XPS 全谱
Fig.8 XPS full spectra of muscovite samples

表 3 Al 的价键形态及其分布
Table 3 The valence bond morphology and distribution of Al

Sample	Peak area				Relative content/%		
	Al-O	Al-OH	Al-OOCR	Total	Al-O	Al-OH	Al-OOCR
1	1478.11	5226.70	0.00	5704.81	25.91	74.09	0.00
2	917.24	353.27	374.07	1644.58	55.78	21.48	22.74
3	2020.98	2496.16	24.62	4541.76	44.50	54.96	0.54
4	1837.57	1329.38	11.59	3178.54	57.82	41.82	0.36

表 4 Si 的价键形态及其分布
Table 4 The valence bond morphology and distribution of Si

Sample	Peak area			Relative content/%	
	Si-O	Si-OOCR	Total	Si-O	Si-OOCR
1	15966.96	0.00	15966.96	100.00	0.00
2	4210.19	2394.63	6604.82	63.74	36.26
3	10909.09	1120.66	12029.75	90.68	9.32
4	10405.24	282.48	10687.72	97.36	2.64

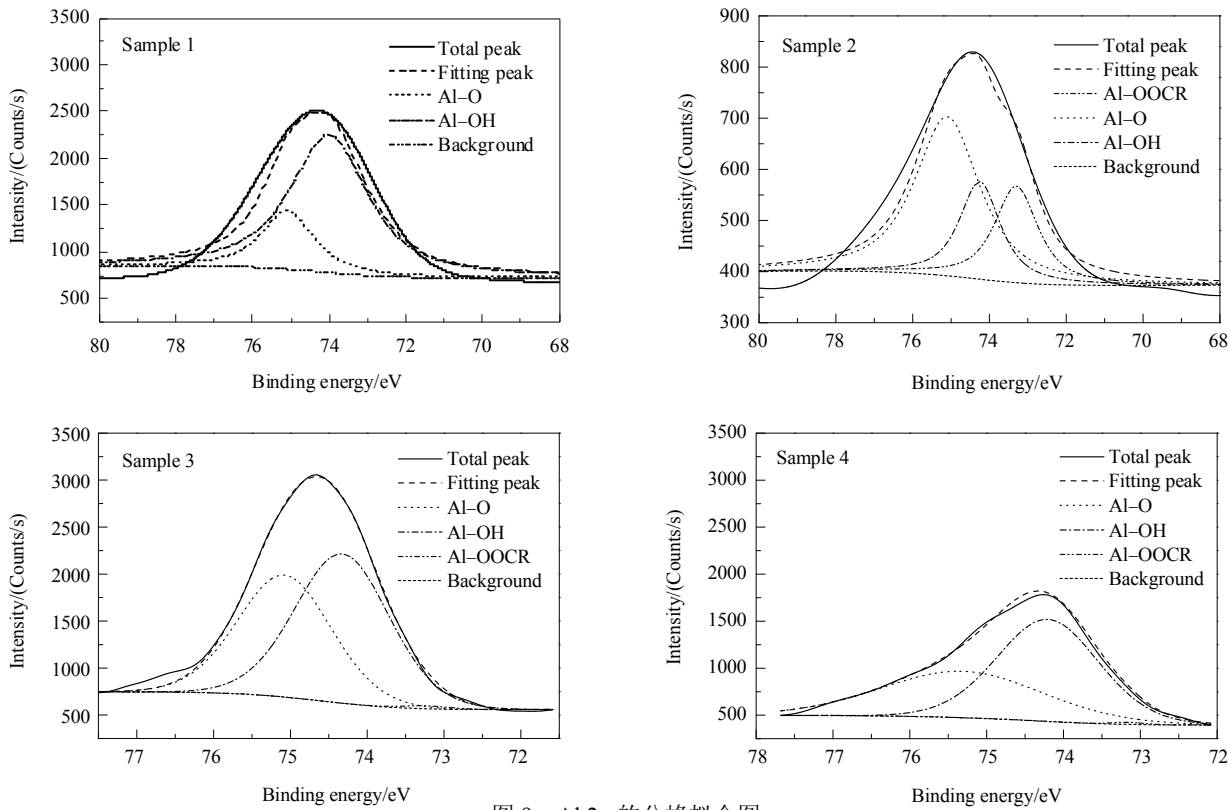


图 9 Al 2p 的分峰拟合图
Fig.9 Fitting spectra of Al 2p

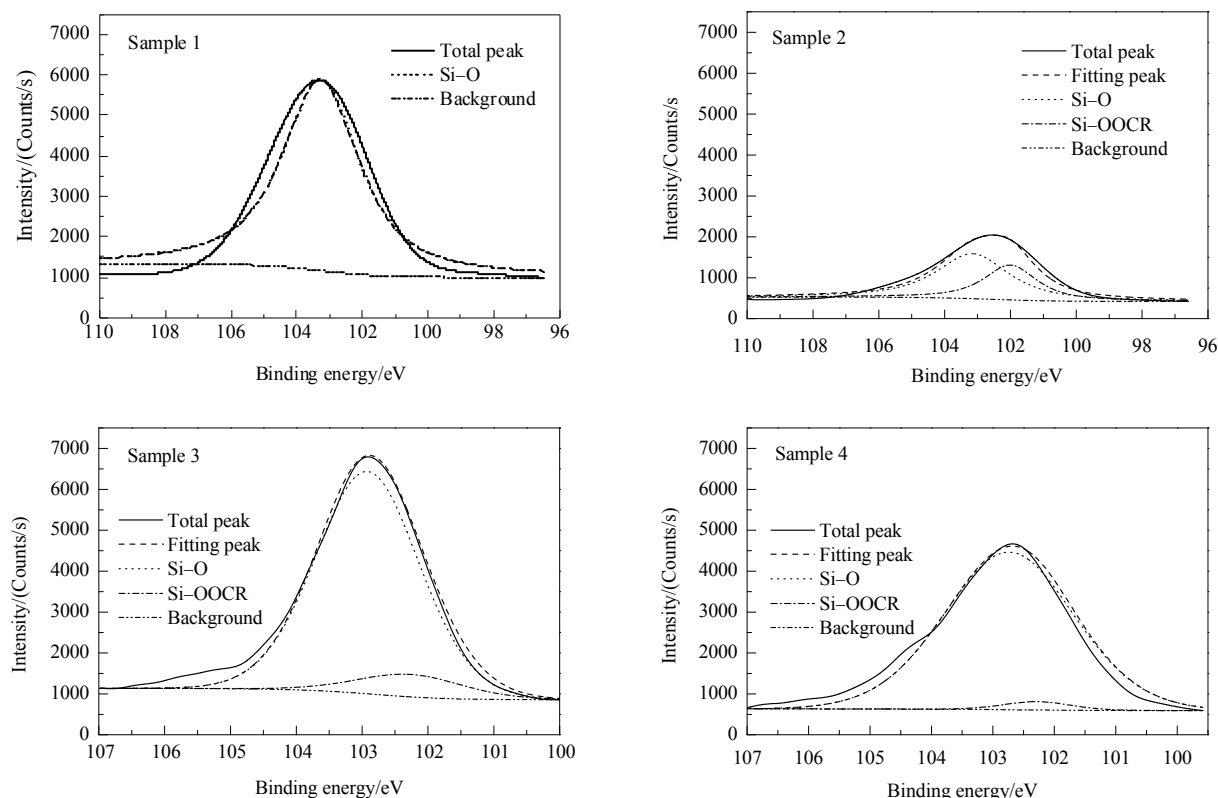


图 10 Si 2p 的分峰拟合图
Fig.10 Fitting spectra of Si 2p

4 表面的 Al-OOCR 和 Si-OOCR 含量已很低, 表明 4.76×10^{-5} mol/L 浓度的柠檬酸已完全抑制了白云母的可浮性。由于白云母表面存在局部正电区域及负电区域, 两区域在中和之后其表面整体荷负电, 而带负电的油酸根等离子会在白云母表面局部正电区域发生静电吸附作用^[13], 结合图 6 可知, 随柠檬酸浓度增大, 白云母表面的 ζ 电位逐渐负向增大, 可见加入柠檬酸会使白云母表面局部正电区域减小, 从而减弱油酸根等离子在矿物表面的静电吸附作用。此外, $\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_7^-$ 和 $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_7^{2-}$ 等离子含羟基等亲水基团, 这些离子吸附在白云母表面会使其表面强烈亲水, 因此柠檬酸显著抑制了白云母的可浮性。

4 结 论

利用红外光谱(FT-IR)、光电子能谱(XPS)、 ζ 电位和浮选溶液化学等方法对不同白云母样品进行了表征, 得到如下结论:

- (1) 柠檬酸对白云母的可浮性有显著的抑制作用, 且抑制效果在一定范围内随其用量增加而增强。
- (2) 柠檬酸的抑制机理在于, $\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_7^-$ 和 $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_7^{2-}$ 等吸附在白云母表面不仅使白云母的表面 ζ 电位负向增大, 而且还阻碍了油酸根等离子在白云母表面的吸附,

进而减弱了油酸根等离子在白云母表面的静电吸附作用及化学吸附作用。此外, $\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_7^-$ 和 $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_7^{2-}$ 等离子含亲水基团, 其吸附在白云母表面会使得矿物表面的亲水性增强, 从而导致白云母的可浮性大大降低。

参考文献

- [1] 刘邦瑞. 螯合浮选剂 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982: 71-75, 170-182.
Liu B R. Chelating flotation reagent [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1982: 71-75, 170-182.
- [2] 张凌燕, 洪礼, 王芳, 等. 某难选萤石矿低温浮选试验研究 [J]. 中国矿业, 2009, 18(7): 70-72, 75.
Zhang L Y, Hong L, Wang F, et al. A flotation experimental research on a hard-selected fluorite in Inner Mongolia at low temperature [J]. China Mining Magazine, 2009, 18(7): 70-72, 75.
- [3] 王宇斌, 文堪, 张小波, 等. 油酸钠体系下 SiO_3^{2-} 对白云母的抑制机理研究 [J]. 非金属矿, 2017, 40(6): 63-65.
Wang Y B, Wen K, Zhang X B, et al. Study on the inhibition mechanism of SiO_3^{2-} on muscovite in sodium oleate system [J]. Non-Metallic Mines, 2017, 40(6): 63-65.
- [4] 王宇斌, 张小波, 余乐, 等. 油酸钠体系下 Pb^{2+} 对白云母的活化机理研究 [J]. 非金属矿, 2016, 39(6): 15-19.
Wang Y B, Zhang X B, Yu L, et al. The activation mechanism study of Pb^{2+} about muscovite in sodium oleate system [J]. Non-Metallic Mines, 2016, 39(6): 15-19.
- [5] 彭祥玉, 王宇斌, 张小波, 等. 油酸钠体系下 Mg^{2+} 对白云母的活化机理研究 [J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(1): 401-407.
Peng X Y, Wang Y B, Zhang X B, et al. Activation mechanism of

- Mg²⁺ on muscovite in sodium oleate system [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(1): 401–407.
- [6] 王淀佐, 胡岳华. 浮选溶液化学 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1988: 9–40.
- Wang D Z, Hu Y H. Flotation solution chemistry [M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1988: 9–40.
- [7] 杨南如, 岳文海. 无机非金属材料图谱手册(上) [M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 2000: 302–303.
- Yang N R, Yue W H. Manual of inorganic nonmetallic materials atlas (Part I) [M]. Wuhan: Wuhan Industrial University Press, 2000: 302–303.
- [8] 游传文, 曾宪滨. 硅线石浮选捕收剂选择的研究 [J]. 武汉工业大学学报, 1990, (3): 52–58.
- You C W, Zeng X B. The Research of sillimanite flotation collection selection [J]. Journal of Wuhan Industry University, 1990, (3): 52–58.
- [9] Nakanishi K. Infrared absorption spectroscopy [M]. San Francisco: Holden-Day Inc., 1997: 499.
- [10] Kaliva M, Gabriel C, Raptopoulou C P, et al. pH-specific synthesis, isolation, spectroscopic and structural characterization of a new dimeric assembly of binuclearvanadium(V)–citrate–peroxo species from aqueous solutions [J]. Inorganica Chimica Acta, 2008, 361(11): 1–10.
- [11] Kaliva M, Kyriakakis E, Gabriel C, et al. Synthesis, isolation, spectroscopic and structural characterization of a new pH complex structural variant from the aqueous vanadium(V)–peroxo–citrate ternary system [J]. Inorganica Chimica Acta, 2006, 359(9): 4535–4548.
- [12] Moudler J F, Stickle W F, Sobol P E, et al. Handbook of X-ray photoelectron spectroscopy [M]. Eden Prairie: Physical Electronics Division Press, 1992: 11–13.
- [13] 刘亚川, 龚焕高, 张克仁. 石英长石矿物结晶化学特性与药剂作用机理 [J]. 中国有色金属学报, 1992, 2(4): 21–25.
- Liu Y C, Gong H G, Zhang K R. Crystal chemical characteristics of quartz feldspar and its mechanism of action with reagent [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1992, 2(4): 21–25.