

## 油酸钠对微细粒钛铁矿的捕收机理

张国范, 朱阳戈, 冯其明, 卢毅屏, 欧乐明

(中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

**摘要:** 以油酸钠为捕收剂, 通过浮选实验、溶液化学计算、动电位和红外光谱检测研究了微细粒钛铁矿的可浮性及药剂与矿物的作用机理。结果表明: 当油酸钠浓度为 0.2 mmol/L 时, 微细粒钛铁矿可浮性较好的 pH 值为 4~10。油酸钠对钛铁矿的捕收作用主要由两方面因素控制: 当 pH 值为 4~6 时, 以油酸根离子与钛铁矿表面铁质点间发生化学作用为主, 红外光谱分析显示作用产物为油酸铁; 当 pH 值为 6~10 时, 上述化学作用减弱, 但油酸钠溶液中高表面活性组分离子-分子缔合物浓度增大, 使钛铁矿保持了较好的可浮性。

**关键词:** 钛铁矿; 油酸钠; 溶液化学; 浮选

**中图分类号:** TD91      **文献标识码:** A

## Flotation mechanism of fine ilmenite by sodium oleate

ZHANG Guo-fan, ZHU Yang-ge, FENG Qi-ming, LU Yi-ping, OU Le-ming

(School of Mineral Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The flotation of fine ilmenite using sodium oleate as collector and the collection mechanism were studied through flotation tests, solution chemistry calculations, zeta potential measurements and infrared spectroscopic analysis. The results show that fine ilmenite shows good floatability in pH range of 4–10, when the concentration of sodium oleate is 0.2 mmol/L. The collection of sodium oleate to ilmenite is controlled by two factors. In pH range of 4–6, chemical reactions between oleate and iron play important roles, and infrared spectroscopic analysis shows that the product of their reactions is ferrous oleate. While in pH range of 6–10, the above reactions become weaker, but the concentration of ion and molecular association of a high surface activity component in sodium oleate solution becomes higher and keeps the floatability good.

**Key words:** ilmenite; sodium oleate; solution chemistry; flotation

在浮选过程中, 捕收剂在固-液界面的吸附与浮选的关系一直受到矿物加工研究者的关注。多年来, 许多学者试图从矿物的表面化学、动电性质和表面活性剂的溶液化学等角度来解释捕收剂在矿物表面的吸附机理<sup>[1]</sup>。作为氧化矿浮选中应用最多的捕收剂之一, 人们对脂肪酸类捕收剂在矿物表面的作用机理进行了较多研究: 许多体系的动电位测试表明, 静电吸附是油酸根离子吸附的一个重要方面<sup>[2]</sup>; 在油酸盐浮选方解石<sup>[3]</sup>和一水硬铝石<sup>[4]</sup>等矿物过程中, 有研究发现了油酸盐在矿物表面发生化学吸附或化学反应。另外, 19

世纪 70 年代以后, 以 SOMASUNDARAN<sup>[5]</sup>为代表的一些研究者开始关注捕收剂的溶液化学性质在浮选中的作用, 提出了离子-分子缔合物是油酸盐浮选的主要活性组分的观点, 并很好地解释了油酸钠选别赤铁矿时的浮选行为。

油酸和油酸盐用于浮选钛铁矿有大量研究报道<sup>[6-7]</sup>, 对于其在矿物表面的作用机理, 已有研究较多地关注捕收剂与矿物间的化学作用, 而对于该体系的溶液化学行为并没有综合考虑。如 GUTIERREZA<sup>[8]</sup>认为钛铁矿表面的 Fe<sup>2+</sup>易被氧化成 Fe<sup>3+</sup>, 油酸根与矿物

表面的  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  发生化学交换反应或电化学反应, 生成难溶的油酸铁而导致浮选。而 PARKINS<sup>[9]</sup> 的研究表明, 油酸根在钛铁矿-水界面的吸附在低吸附密度下是放热过程, 为物理吸附, 在高吸附密度下, 则是吸热过程, 为化学吸附。FAN 等<sup>[10]</sup> 则认为油酸根离子在钛铁矿表面的吸附是一替代过程, 在弱酸性和弱碱性 pH 值区间, 油酸根离子取代其表面亚铁离子羟基配合物中的羟基而固着于金属活性点。

本文作者通过研究油酸钠对微细粒钛铁矿的捕收性能, 并综合考虑矿物表面化学和捕收剂溶液化学, 运用电位测试和红外光谱测试等分析手段, 系统讨论了油酸钠对微细粒钛铁矿的捕收机理。

## 1 实验方法

### 1.1 实验原料

钛铁矿取自中国四川攀枝花, 原料经弱磁选、强磁选和摇床反复精选后, 采用周期式搅拌球磨机磨细, 得到实验矿样。实验矿样纯度为 96.88%, 平均粒度为  $7.31 \mu\text{m}$ , 化学成分分析结果如表 1 所列。矿浆 pH 调整剂为硫酸和氢氧化钠, 均为分析纯。油酸钠为化学纯。实验用水为一次蒸馏水。

表 1 实验矿样化学成分分析结果

TiO <sub>2</sub>	FeO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
50.99	38.48	5.093	1.66	2.48
CaO	MnO	SO <sub>3</sub>	CoO	ZrO <sub>2</sub>
0.363	0.668	0.238	0.015 6	0.013 3

### 1.2 浮选实验

浮选实验在容积为 40 mL 的 XFG 型挂槽式浮选机上进行, 浮选温度为 25 °C。每次实验称取矿样 2 g, 与蒸馏水混合置于浮选槽内, 加 pH 值调整剂后搅拌 3 min, 加入捕收剂搅拌 3 min 后测定 pH 值, 浮选 3 min, 浮选过程采取手工刮泡, 浮选完成后将刮出的泡沫(精矿)烘干、称量, 计算回收率。实验流程如图 1 所示。

### 1.3 浮选实验矿物表面电位测量与红外光谱测定

将矿物磨至粒径小于  $2 \mu\text{m}$ , 每次称样 30 mg 置于烧杯中, 加入 50 mL 蒸馏水并调节溶液 pH 值, 按照与浮选实验相同的调浆条件加药剂, 采用磁力搅拌器搅拌 10 min 后在 Zetaplus Zeta 分析仪上测量矿物表面动电位。

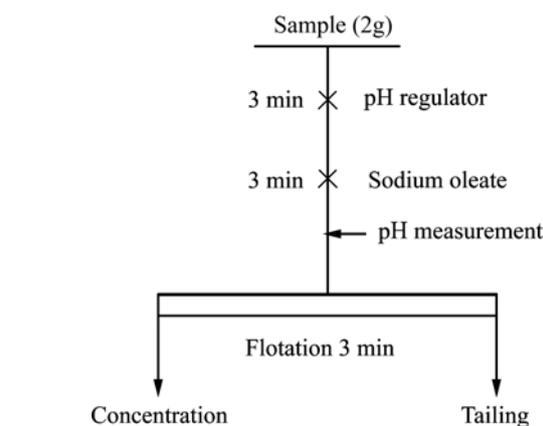


图 1 浮选实验流程图

Fig.1 Flowsheet of flotation experiment

红外光谱测试在 Nicolet NEXUS 670 傅里叶变换红外光谱仪上进行测定。采用 KBr 压片, 测量范围为  $400\sim 4\,000 \text{ cm}^{-1}$ 。红外分析样品制备过程如下: 将一定量的矿物给入浮选槽, 调节 pH 值后加入适量油酸钠溶液, 充分搅拌后固液分离, 采用相同 pH 值的蒸馏水溶液洗涤矿物 2 次, 所得样品在 70 °C 以下烘干, 进行红外光谱检测。

## 2 结果与讨论

### 2.1 实验结果

图 2 所示为钛铁矿在不同 pH 值下采用油酸钠浮选时的可浮性。由图 2 可以看出, 当 pH 值为 4~10 时, 钛铁矿都保持了较好的可浮性。图 3 所示为当 pH 为 4.5~5.0 时油酸钠用量与矿物回收率的关系。由图 3

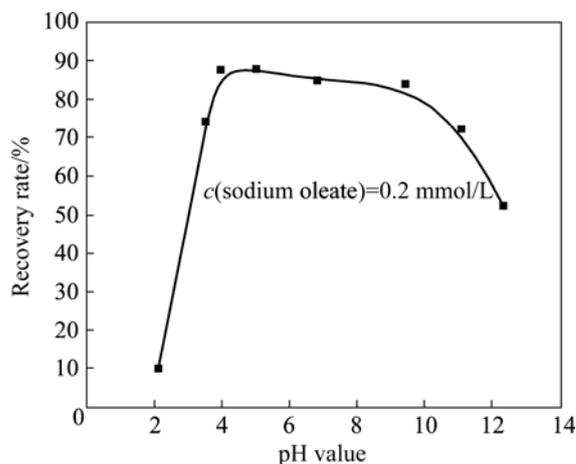


图 2 钛铁矿 pH 值与矿物回收率的关系

Fig.2 Relationship between mineral recovery rate and pH value for ilmenite

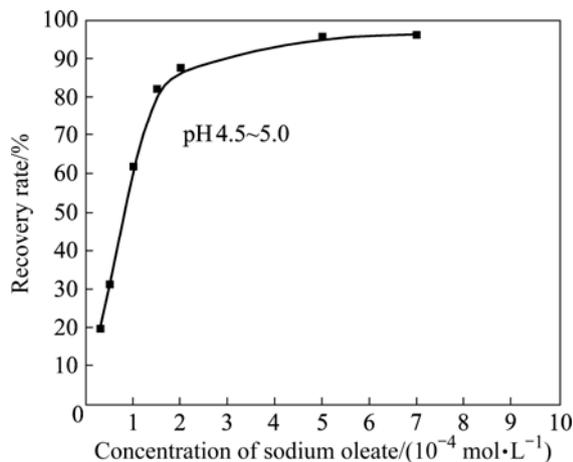


图3 油酸钠用量与矿物回收率的关系

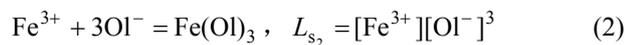
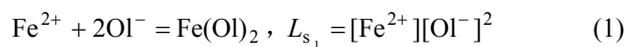
Fig.3 Relationship between dosage of sodium oleate and recovery rate of mineral

可知,当油酸钠用量为0~0.2 mmol/L时,钛铁矿的回收率随其用量的增大而快速提高;进一步增加其用量,回收率增加缓慢;当油酸钠用量达到0.2 mmol/L时,回收率达到87.87%。由此可见,在适当的浮选环境下,油酸钠对钛铁矿有较强的捕收作用。

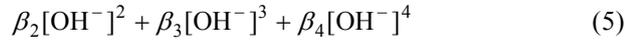
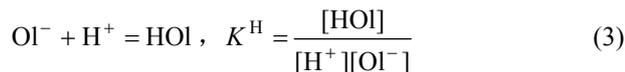
## 2.2 捕收机理

### 2.2.1 油酸钠与钛铁矿表面质点反应的标准吉布斯自由能

钛铁矿矿物表面质点主要为亚铁离子和钛离子,在弱酸性和弱碱性环境中,铁质点是主要活性质点。根据LUSZCZKIEWICZ等<sup>[11-12]</sup>对钛铁矿-水-氧气-油酸钠体系的研究,Fe<sup>2+</sup>在水溶液中接触空气时容易被部分氧化成Fe<sup>3+</sup>,故与油酸根发生反应的质点可能为Fe<sup>2+</sup>或Fe<sup>3+</sup>,假设它们均与油酸钠发生化学反应,其化学反应方程式为



油酸根离子的加质子反应为



式中  $L_{s_1}$  和  $L_{s_2}$  分别为油酸亚铁和油酸铁的溶度积(分别为  $1 \times 10^{-15.4}$  和  $1 \times 10^{-34.2}$ );  $K^{\text{H}}$  为油酸根离子的加质子常数( $1 \times 10^6$ );  $\beta_n$  和  $\beta_n'$  为铁离子和亚铁离子的羟基络合物累积稳定常数(见表2);  $\alpha_{(\text{OI})}$  为油酸根离子副反应系数;  $\alpha_{\text{Fe}^{2+}}$  和  $\alpha_{\text{Fe}^{3+}}$  为亚铁离子和铁离子副反应系数。令  $L'_s$  代表条件溶度积,则式(1)和(2)的反应标准自由能变化为

$$\Delta G_{\text{Fe}^{2+}}^{\ominus} = RT \ln L'_s = RT \ln L_{s_1} \alpha_{\text{Fe}^{2+}} \alpha_{(\text{OI})}^2 \quad (7)$$

$$\Delta G_{\text{Fe}^{3+}}^{\ominus} = RT \ln L'_s = RT \ln L_{s_2} \alpha_{\text{Fe}^{3+}} \alpha_{(\text{OI})}^3 \quad (8)$$

表2 Fe<sup>2+</sup>和Fe<sup>3+</sup>的羟基络合物累积稳定常数

Table 2 Accumulation stability constants of Fe<sup>2+</sup> (or Fe<sup>3+</sup>) hydroxo complex

Ion	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$
Fe <sup>2+</sup>	4.50	7.4	10.00	9.6
Fe <sup>3+</sup>	11.81	22.3	32.05	34.3

由式(1)~(8)可以分别算出Fe<sup>2+</sup>和Fe<sup>3+</sup>与油酸钠反应的标准吉布斯自由能 $\Delta G^{\ominus}$ 与pH值的关系(见图4)。

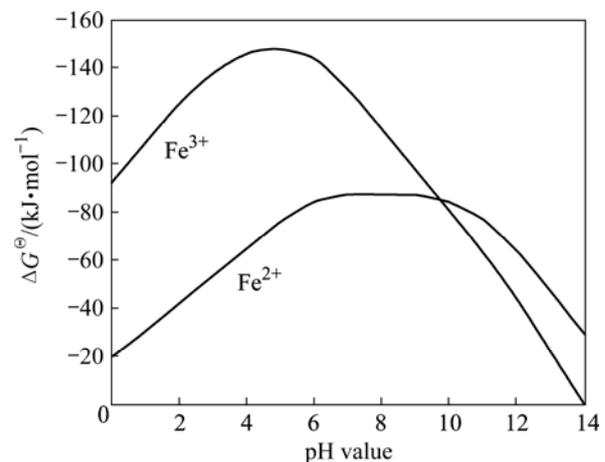


图4 油酸根离子与Fe<sup>2+</sup>或Fe<sup>3+</sup>反应的 $\Delta G^{\ominus}$ 与pH值的关系

Fig.4 Relationship between pH value and free energy  $\Delta G^{\ominus}$  of Fe<sup>2+</sup> (or Fe<sup>3+</sup>) and oleate reaction

图4可以看出,当pH值为5~11时,油酸根离子与亚铁离子反应的 $\Delta G^{\ominus}$ 负值较大,与钛铁矿可浮性良好的pH值为4~10基本重合。但需注意的是,在油酸钠对钛铁矿捕收良好的pH值范围内(pH为4~10),三价铁离子与油酸根离子反应的 $\Delta G^{\ominus}$ 有更大负值。也就是说,相对亚铁离子,油酸根离子更容易与三价铁离子发生化学反应形成油酸盐沉淀。因此,该反应过程应该为钛铁矿表面二价铁离子氧化生成三价铁离子,油酸根离子取代三价铁离子羟基配合物中的羟基生成

难溶的油酸铁, 固着于矿物表面。油酸根离子与三价铁离子反应的  $-\Delta G^\ominus$  较大的 pH 值区间为 4~6。因此, 在此 pH 值范围内, 钛铁矿表面的亚铁离子在有空气存在时被氧化生成三价铁离子, 进而与油酸根离子发生化学反应生成油酸铁是油酸钠浮选钛铁矿的主要原因。而在 pH 值为 6~10 时, 上述反应自由能负值减小, 但钛铁矿保持了良好的可浮性, 应该有其他因素的作用。下面研究该浮选体系油酸钠的溶液化学性质。

2.2.2 油酸钠溶液的化学性质

油酸的溶解度  $S$  为  $10^{-7.6}$  mol/L, 在通常浮选用量下, 矿浆中油酸的浓度均大于其溶解度, 此时, 水溶液中溶解的油酸  $\text{HOI}_{(\text{aq})}$  与不溶液态油酸  $\text{HOI}_{(\text{l})}$  间存在动态解离与缔合平衡<sup>[13]</sup>, 其平衡反应及平衡常数为

$$\text{HOI}_{(\text{l})} \rightleftharpoons \text{HOI}_{(\text{aq})}, \quad S = 10^{-7.6} \quad (9)$$

$$\text{HOI}_{(\text{aq})} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{OI}^-, \quad K_a = \frac{[\text{H}^+][\text{OI}^-]}{[\text{HOI}_{(\text{aq})}]} = 10^{-4.95} \quad (10)$$

$$2\text{OI}^- \rightleftharpoons (\text{OI})_2^{2-}, \quad K_d = \frac{[(\text{OI})_2^{2-}]}{[\text{OI}^-]^2} = 10^{4.0} \quad (11)$$

$$\text{HOI}_{(\text{aq})} + \text{OI}^- \rightleftharpoons \text{H}(\text{OI})_2^-$$

$$K_{\text{im}} = \frac{[\text{H}(\text{OI})_2^-]}{[\text{HOI}_{(\text{aq})}][\text{OI}^-]} = 10^{4.7} \quad (12)$$

质量平衡式(MBE)为

$$c_t = [\text{HOI}_{(\text{aq})}] + [\text{OI}^-] + 2[(\text{OI})_2^{2-}] + 2[\text{H}(\text{OI})_2^-] \quad (13)$$

将式(9)~(11)代入式(12), 并令  $K_H = \frac{K_a}{[\text{H}^+]}$ , 得

$$2(K_{\text{im}}K_H + K_dK_H^2)[\text{HOI}_{(\text{aq})}]^2 + (1 + K_H)(\text{HOI}_{(\text{aq})}) - c_t = 0 \quad (14)$$

$\text{HOI}_{(\text{aq})}$  与  $\text{HOI}_{(\text{l})}$  成平衡的临界 pH 值由下式确定:

$$2(K_{\text{im}} \frac{K_a}{[\text{H}^+]} + K_d \frac{K_a^2}{[\text{H}^+]^2})S^2 + (1 + \frac{K_a}{[\text{H}^+]})S - c_t = 0$$

$$[\text{H}^+]^2 - \frac{2.83 \times 10^{-13}[\text{H}^+]}{c_t - [S]} - \frac{2 \times 10^{-21.10}}{c_t - S} = 0 \quad (15)$$

式中  $c_t$  为油酸钠初始总浓度。由式(15)可以计算出不同浓度下  $\text{HOI}_{(\text{aq})}$  与  $\text{HOI}_{(\text{l})}$  平衡时的 pH 值, 并可由式(9)~(15)绘出不同油酸钠初始浓度时各组分浓度与 pH 值的关系。图 5 所示是  $c_t$  为 0.2 mmol/L 时溶液各组分浓度与 pH 值的关系。

根据 SOMASUNDARAN 的研究<sup>[5]</sup>, 在长链捕收剂浮选体系中, 离子-分子缔合物与其母体相比较,

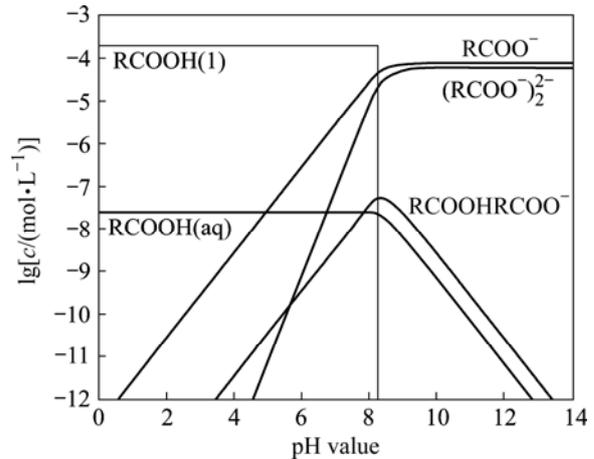


图 5 油酸盐溶液中各组分的  $\lg c$  和 pH 值的关系  
Fig.5 Relationship between  $\lg c$  and pH value of sodium oleate solution components ( $c_t=0.2$  mmol/L)

离子-分子缔合物具有更大的表面活性, 是浮选的主要活性组分, 对矿物的浮选过程有重要影响。由图 5 可以看出, 当油酸根总浓度为 0.2 mmol/L 时, 形成离子-分子缔合物浓度的最大值在 pH 值 8.29 附近。在此 pH 值附近, 生成油酸铁的反应标准吉布斯自由能  $\Delta G^\ominus$  已经不是最小值, 而钛铁矿在 pH 为 6~10 范围内仍具有很好的可浮性, 应该与离子-分子缔合物的形成并优化了油酸钠对钛铁矿的浮选有关。

2.2.3 钛铁矿的表面电性

图 6 所示为矿物的电位与 pH 值的关系。从图 6 可以看出, 以硫酸和氢氧化钠调节 pH 值时, 钛铁矿表面在所研究的 pH 范围内荷负电, 未测试到零电点, 这与文献报道结果<sup>[14]</sup>一致, 该研究将此归因于钛铁矿表面存在  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{HSO}_4^-$  离子的特性吸附, 这种吸附改

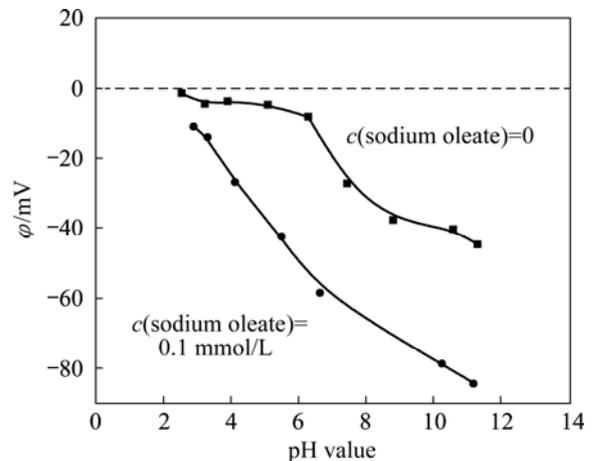


图 6 矿物的电位与 pH 值的关系  
Fig.6 Relationship between Zeta potential of minerals and pH value

变了钛铁矿-水界面的双电层。尽管如此,在整个研究的 pH 范围内,加入油酸钠使相同 pH 值下的电位发生负移,特别是在钛铁矿可浮性较好的 pH 区内,电位降低的幅度更大,说明油酸根钛铁矿表面发生吸附。与矿物表面带同种电荷的油酸根可以很好地吸附在矿物表面,表明油酸根与钛铁矿之间的作用力不以静电力为主,而应该与化学作用有关。

#### 2.2.4 红外光谱分析

图7所示为油酸钠和矿物作用前后的红外光谱测定结果。在钛铁矿的红外光谱图中,只在  $600\text{ cm}^{-1}$  以内出现数个特征峰;在油酸钠的红外光谱图中,在  $2924.1$  和  $2853.8\text{ cm}^{-1}$  处的2个吸收峰是油酸钠中  $-\text{CH}_2-$  和  $-\text{CH}_3$  中 C—H 键的对称振动吸收峰,  $1713.1$ 、 $1562.0$ 、 $1448.4$  和  $1423.3\text{ cm}^{-1}$  处的峰为 R—COOH 中  $-\text{COO}-$  基团的特征吸收峰,  $722.7\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰为其面内弯曲振动吸收峰。在 pH=5.58 环境下,经油酸钠作用后,钛铁矿的红外光谱发生了明显变化,除钛铁矿的谱带外,还在  $2925.1$  和  $2854.8\text{ cm}^{-1}$  处出现了新的吸收峰,与油酸钠光谱中  $2924.1$  和  $2853.8\text{ cm}^{-1}$  处的亚甲基吸收峰对应,说明药剂吸附于钛铁矿表面。另外,在  $1725.7$ 、 $1587.1$  和  $1463.1\text{ cm}^{-1}$  处,也出现了新的吸收峰,与油酸钠光谱中  $1713.1$ 、 $1562.0$  和  $1448.4\text{ cm}^{-1}$  处羧基的特征峰相比,其波数分别移动了约  $12.6$ 、 $25.1$  和  $14.7\text{ cm}^{-1}$ ,说明钛铁矿与油酸钠发生了化学作用<sup>[15]</sup>。

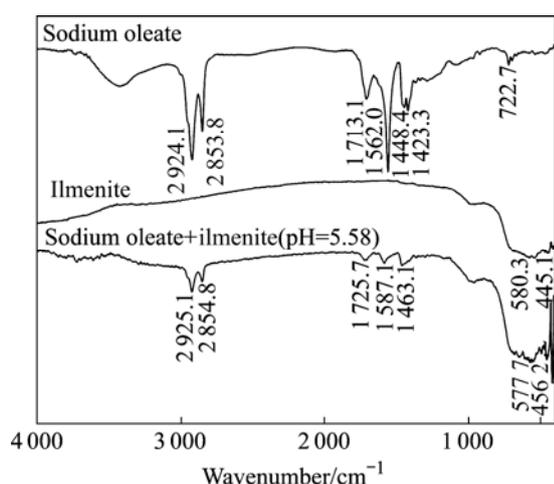


图7 油酸钠与钛铁矿作用前后的红外光谱

Fig.7 Infrared spectra of sodium oleate and ilmenite before and after interaction

根据 PECK 等<sup>[16]</sup>的研究结果,油酸铁在  $1590\text{ cm}^{-1}$  附近出现吸收带,与图7中药剂与矿物作用后谱带中

$1587.1\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰很好对应,故可判断为油酸根离子与钛铁矿作用生成油酸铁,证实了上述关于油酸钠与钛铁矿表面铁离子反应的计算结果。

### 3 结论

1) 油酸钠对微细粒钛铁矿具有良好的捕收性能,使其在较宽 pH 值范围内均具有较好可浮性。

2) 当 pH 值为 4~6 时,油酸钠对钛铁矿的捕收过程以化学作用为主;当 pH 值为 6~10 时,油酸盐溶液形成的离子-分子缔合物浓度较大,对捕收过程起重要作用。

3) 油酸钠可以依靠化学作用吸附在钛铁矿表面,使矿物动电位发生负移,其化学作用产物为油酸铁。

### REFERENCES

- [1] BARRY A W. Wills' mineral processing technology[M]. UK: Elsevier, 2007: 267-344.
- [2] FUERSTENAU D W, PRADIP. Zeta potentials in the flotation of oxide and silicate minerals[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2005, 114/115: 9-26.
- [3] YOUNG C A, MILLER J D. Effect of temperature on oleate adsorption at a calcite surface: an FT-NIR/IRS study and review[J]. International Journal of Mineral Processing, 2000, 58(2): 331-350.
- [4] 张国范, 陈启元, 冯其明, 张平民. 温度对油酸钠在一水硬铝石矿物表面吸附的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(6): 1042-1046.  
ZHANG Guo-fan, CHEN Qi-yuan, FENG Qi-ming, ZHANG Ping-min. Influence of temperature on absorption of sodium oleate on surface of diaspore[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(6): 1042-1046.
- [5] SOMASUNDARAN P. 以离子-分子络合物为基础的浮选机理[J]. 中南矿冶学院学报, 1983, 8(S2): 59-68.  
SOMASUNDARAN P. Flotation mechanism based on Ion-molecular complexes[J]. Journal of Central South Institute of Mining and Metallurgy, 1983, 8(S2): 59-68.
- [6] 尹志福. 微细粒原生钛铁矿浮选新药剂研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005: 6-9.  
YIN Zhi-fu. Study of new collector for fine ilmenite[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2005: 6-9.
- [7] 魏民. 新型钛铁矿浮选捕收剂的研究[D]. 长沙: 长沙矿冶研究院, 2006: 5-8.  
WEI min. Study of new collector for ilmenite[D]. Changsha:

- Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy, 2006: 5-8.
- [8] GUTIERREZA C. Influence of previous aeration in water or heating in air of ilmenite on its flotation with oleic acid[J]. International Journal of Mineral Processing, 1976, 3(3): 247-256.
- [9] PARKINS E J, The effect of temperature on the conditioning and flotation of an ilmenite ore[C]// FUERSTENAU M C. Flotation: AM gaudin memorial volume. New York: AIME and Petroleum Engineers, 1976: 561-579.
- [10] FAN X, ROWSON N A. The effect of  $Pb(NO_3)_2$  on ilmenite flotation[J]. Mineral Engineering, 2000, 13(2): 205-215.
- [11] LUSZCZKIEWICZ A, LEKKI J, LASKOWSKI J S. Flotability of ilmenite[C]// Treatment of Iron-Titanium Ores Round Table Seminar. Poland: PWN, Thirteenth International Mineral Processing Congress. 1979: 164-182.
- [12] 张国范, 冯其明, 卢毅屏, 欧乐明. 油酸钠对一水硬铝石和高岭石的捕收机理[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(2): 298-301. ZHANG Guo-fan, FENG Qi-ming, LU Yi-ping, OU Le-ming. Mechanism on diaspore and kaolinite collected by sodium oleate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(2): 298-301.
- [13] 任飞, 韩跃新, 印万钟, 王泽红, 袁致涛, 王子祥. 油酸钠浮选电气石的溶液化学分析[J]. 有色矿冶, 2005, 21(7): 158-159. REN Fei, HAN Yue-xin, YIN Wan-zhong, WANG Ze-hong, YUAN Zhi-tao, WANG Zi-xiang. Solution chemistry of tourmalin flotation[J]. Nonferrous Mining and Metallurgy, 2005, 21(7): 158-159.
- [14] 朱俊士. 中国钒钛磁铁矿选矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 91-102. ZHU Jun-shi. Mineral processing of Chinese vanadium titanium magnetite[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996: 91-102.
- [15] 许向阳, 张涇生, 王安五, 谢建国, 陈让怀. 微细粒级钛铁矿浮选药剂 ROB 的作用机理[J]. 矿冶工程, 2003, 23(6): 23-26. XU Xiang-yang, ZHANG Jing-sheng, WANG An-wu, XIE Jian-guo, CHEN Rang-huai. Action mechanism of collector ROB in Panzhihua ultrafine ilmenite flotation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2003, 23(6): 23-26.
- [16] PECK A S, RABY L H, WADSWORTH M E. An infrared study of the flotation of hematite with oleic acid and sodium oleate[J]. Trans Soc Min Eng AIME, 1966, 235(3): 301-307.

(编辑 李艳红)