

钛辉石与钛铁矿颗粒间相互作用的影响因素

张国范, 王 丽, 冯其明, 欧乐明, 卢毅屏

(中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

摘 要:通过 DLVO 理论计算、动电位、接触角和扫描电镜检测及浮选试验, 研究影响钛辉石和钛铁矿颗粒间相互作用的 3 个主要因素, 即表面电性、颗粒粒径和表面润湿性。结果表明, 钛辉石和钛铁矿的表面荷电绝对值增大, 则颗粒间斥力增大; 粒径越大, 斥力越大。通过人工混合矿浮选试验结果和扫描电镜检测验证, 微细粒钛辉石会在钛铁矿表面发生罩盖现象; 矿物表面疏水性增强, 两种矿物颗粒间的引力相应增大。

关键词:钛辉石; 钛铁矿; 表面电性; 颗粒粒径; 表面润湿性

中图分类号: TD952

文献标识码: A

Influence factors for interparticle interaction between titanaugite and ilmenite

ZHANG Guo-fan, WANG Li, FENG Qi-ming, OU Le-ming, LU Yi-ping

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

Abstract: Three main factors (viz. surface potential, particle size and surface wettability) that influence the interparticle interaction between titanaugite and ilmenite particles were investigated in detail through the calculation of DLVO theory, measurements of electrokinetic potential and contact angle, experiments of floatation and characterization of scanning electron microscope (SEM). The results show that the repulsion between particles increases with increasing absolute surface potential of titanaugite and ilmenite, and the bigger the particle size, the greater the repulsion. According to the results of floatation of artificial mixed mineral and characterization of SEM, the surface of ilmenite will be coated by micro-size titanaugite, and the increase of mineral surface hydrophobicity can result in the increase of attractive force between the two kinds of mineral particles.

Key words: titanaugite; ilmenite; surface potential; particle size; surface wettability

攀枝花-西昌地区是我国重要的钛资源基地, 钛资源储量占全国储量的 90.54%^[1]。攀钢矿业公司选钛厂的入选原料为选铁厂所排出的磁选尾矿^[2], 由于矿石性质的变化, 以及选铁厂采用细磨措施提高铁精矿品位, 致使选钛厂的入选原料日趋细化^[3]。目前现场的原矿回收率仅为 21%左右^[4], 导致回收率低的一个主要原因就是原料中粒径 < 19 μm 的矿物由于选别技术水平限制被分级脱泥作业作为尾矿抛弃。据检测, 磁选尾矿中粒径 < 19 μm 的矿物含量占 35%左右^[5], TiO₂ 分布率约为 30%^[6]。可见, 大量含钛矿物因此流失。有关单位对于微细粒级钛铁矿的回收开展了大量

研究工作, 包括选别工艺、选别设备以及浮选药剂方面, 其中以研究浮选药剂^[5]为主。目前在现场使用的浮选药剂是 MOS, 但尚未有效解决微细粒级钛铁矿的回收问题。对粒径 < 19 μm 的钛铁矿的研究多从微细粒钛铁矿的强化捕收方面着手, 如张国范等^[7]和朱阳戈等^[8]研究了油酸钠对微细粒钛铁矿的捕收机理以及微细粒钛铁矿的自载体浮选, 冯其明等^[9]对脂肪酸捕收剂浮选钛铁矿的性能进行过研究, 但目前尚未有科研人员对质量分数约为 46%的主要脉石矿物钛辉石和钛铁矿颗粒间的相互作用进行过系统的研究。

粒径 < 19 μm 的矿物之所以难以回收, 一方面是

因为钛铁矿颗粒过细导致其可浮性变差,另一方面则是因为脉石矿物钛辉石对钛铁矿的可浮性有一定的影响。因此,研究钛辉石与钛铁矿颗粒间相互作用的影响因素可以为有效回收微细粒级钛铁矿提供理论指导。

1 实验

1.1 试样

试验样品中,钛铁矿取自攀枝花选钛厂电选精矿,经摇床、磁选制得钛铁矿纯矿物;钛辉石取自攀枝花选钛厂电选尾矿,采用摇床、磁选、电选制得钛辉石纯矿物。两种纯矿物经瓷球磨、筛分和水析,分别制得3个粒级(74~100 μm, 38~74 μm, 10~38 μm)的钛辉石试样,以及粒径<74 μm的颗粒含量为93%的钛铁矿和钛辉石全粒级试样(0~100 μm);粒径<10 μm的两种纯矿物试样则由周期式搅拌球磨机制得。对两种单矿物进行化学成分分析,结果见表1。

1.2 人工混合矿浮选试验

试验所用药剂均为分析纯或化学纯试剂,捕收剂为油酸钠,pH调整剂为硫酸和氢氧化钠。试验用水是一次蒸馏水。

浮选试验是在槽容积为40 mL的XFG型挂槽式浮选机进行,浮选温度为25℃。每次试验称取人工混合矿样5 g置于槽中,加入适量蒸馏水,搅拌1 min后加pH调整剂搅拌3 min,再加捕收剂搅拌4 min,经PHS-3C型精密pH计测定pH值后,浮选5 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、化验,计算回收率。

1.3 动电位测试

将矿物磨至粒径小于0.002 mm,每次称样30 mg相同的调浆条件加药剂,用磁力搅拌器搅拌5 min后

置于烧杯中,加入50 mL的蒸馏水,按照与浮选实验在Zetaplus Zeta分析仪上进行矿物表面ζ电位测量。

1.4 扫描电子显微镜电镜检测

将浮选试验尾矿矿浆滴一滴于盖玻片上,使其自然晾干,喷金后用Quanta 200环境扫描电镜进行检测。

1.5 粉末接触角测定^[10]

将样品(粒径<10 μm)装入长120 mm,内径10 mm,低端嵌有微孔材料的玻璃管中,边装边振动,每次测量尽量保持相同的紧密度,再将玻璃管用细绳系住,垂直挂于天平下端,缓慢而平稳地调节升降台,使玻璃管的另一端刚好浸入所测液体表面,浸入时即开始测量。测定装置如图1所示。

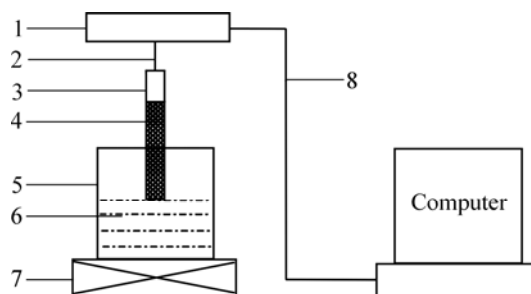


图1 粉末接触角测定装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of powder contact angle measuring device: 1—Electric balance; 2—String; 3—Glass tube; 4—Mine tablets; 5—Beaker; 6—Solution; 7—Lift table; 8—Data cable

2 结果与讨论

在浮选体系中,矿物颗粒间的相互作用的机理和相互作用能的大小通常用DLVO理论及相应计算来解释说明。因此本文从DLVO理论方面探讨钛辉石和钛

表1 单矿物样品化学成分分析结果

Table 1 Chemical compositions of samples (mass fraction, %)

Element	O	Ti	Si	Fe	Ca	Mg	Al	Na
Ilmenite	33.52	30.56	1.16	29.91	0.26	3.07	0.88	
Titanaugite	42.60	1.72	19.93	10.28	12.72	7.697	4.23	0.489
Element	Mn	S	K	Co	Zn	Sr	Zr	
Ilmenite	0.52	0.095		0.0123			0.0099	
Titanaugite	0.19	0.0789	0.048	0.0054	0.009	0.0136	0.003	

铁矿之间的相互作用。由 DLVO 理论计算公式可知, 影响两种颗粒间相互作用的因素主要有: 表面电性、颗粒粒径、表面润湿性。本文作者将针对这 3 个影响因素分别加以讨论。

2.1 表面电性

图 2 所示为钛辉石和钛铁矿的动电位与 pH 值的关系, 采用硫酸做 pH 值调整剂。由于钛铁矿表面存在 SO_4^{2-} 和 HSO_4^- 的特殊吸附, 这种吸附强烈地改变钛铁矿-水界面的双电层, 所以未能测出钛铁矿的零电点, 文献[2]采用盐酸做 pH 值调整剂测得钛铁矿零电点约为 3.3。本研究测得钛辉石的零电点为 3.45, 文献[1]中的钛辉石的零电点为 3 左右^[11]。两种矿物动电位与 pH 值的关系相似, 几乎在整个 pH 值区间矿物表面都荷负电, 随 pH 值增大矿物表面电位绝对值相应增大, 且增大的趋势在碱性条件下更为显著。

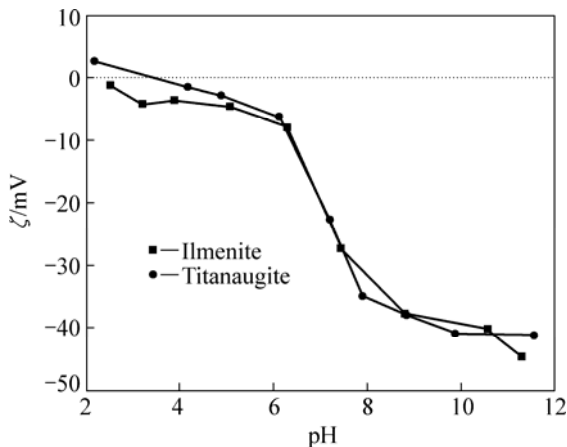


图 2 矿物动电位与 pH 值的关系

Fig.2 Relationship between mineral potential and pH value

为了考察颗粒表面电性对颗粒间相互作用的影响, 根据经典 DLVO 理论分别计算 pH 值为 5.5 和 8.5 时, 水溶液中粒径 $< 10 \mu m$ 的钛辉石和粒径为 $0 \sim 100 \mu m$ 的钛铁矿颗粒间的相互总作用能。计算中分别用 5 和 $38 \mu m$ 代表这两个粒级。

各种矿物在真空中的 Hamake 常数^[12-14]为: 钛辉石 $A_{11}=8.6 \times 10^{-20} J$; 钛铁矿 $A_{22}=13.1 \times 10^{-20} J$; 水 $A_{33}=4 \times 10^{-20} J$, 由图 2 可知, 钛铁矿和钛辉石在 pH 值为 5.5 时的动电位分别是 -5.7 和 $-4.5 mV$, pH 值为 8.5 时分别是 -35.5 和 $-37 mV$ 。根据经典 DLVO 理论计算公式^[15-18]可得钛辉石和钛铁矿颗粒间在不同 pH 值条件下的总作用能如下:

当 pH=5.5 时,

$$V_T^D = 0.05 \times 10^{-17} (0.97p + q) - \frac{1.11 \times 10^{-17}}{H} \quad (1)$$

当 pH=8.5 时,

$$V_T^D = 2.5 \times 10^{-17} (p + q) - \frac{1.11 \times 10^{-17}}{H} \quad (2)$$

微细粒钛辉石与全粒级钛铁矿颗粒间相互作用势能与颗粒间距的关系如图 3 所示。由图 2 可见, 在弱酸性条件下, 由于钛辉石和钛铁矿的表面电位值绝对值较小, 静电势能也就较小, 因此在颗粒间总相互作用能中, 范德华力贡献较大, 表现为引力。在碱性条件下, 钛辉石和钛铁矿的表面电位绝对值较大, 静电排斥能远大于范德华吸引能, 所以整体以斥力为主。

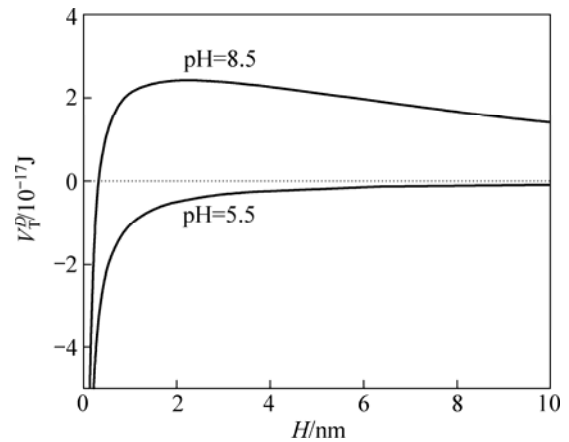


图 3 钛辉石与钛铁矿相互作用势能与颗粒间距的关系

Fig.3 Relationship between interaction potential energy and particle distance of titanite ($< 10 \mu m$) and ilmenite ($0 \sim 100 \mu m$)

2.2 颗粒粒径

根据经典 DLVO 理论考察了油酸钠溶液 ($1.5 \times 10^{-4} mol/L$) 中 pH 值为 5.5 时 4 个不同粒级 ($< 10 \mu m$, $10 \sim 38 \mu m$, $38 \sim 74 \mu m$, $74 \sim 100 \mu m$) 的钛辉石与全粒级 ($0 \sim 100 \mu m$) 钛铁矿的相互作用能。这 4 个粒级分别用粒径为 5、20、50 和 $80 \mu m$ 的颗粒作代表, 全粒级则以粒径为 $38 \mu m$ 的颗粒作代表。

已知油酸钠作用后的钛铁矿和钛辉石在 pH=5.5 时的 ζ 分别为 -44.2 和 $-17.3 mV$, 根据经典 DLVO 理论计算公式, 可得以下不同粒径的钛辉石与钛铁矿之间的总相互作用能。

当粒径为 $5 \mu m$ 时:

$$V_T^D = 2.17 \times 10^{-17} (0.68p + q) - \frac{1.11 \times 10^{-17}}{H} \quad (3)$$

当粒径为 $20 \mu m$ 时:

$$V_T^D = 6.44 \times 10^{-17} (0.68p + q) - \frac{3.3 \times 10^{-17}}{H} \quad (4)$$

当粒径为 $50 \mu m$ 时:

$$V_T^D = 10.62 \times 10^{-17} (0.68p + q) - \frac{5.43 \times 10^{-17}}{H} \quad (5)$$

当粒径为 80 μm 时，

$$V_T^D = 12.67 \times 10^{-17} (0.68p + q) - \frac{6.48 \times 10^{-17}}{H} \quad (6)$$

不同粒度钛辉石在弱酸性条件下与钛铁矿颗粒间的总相互作用能情况如图 4 所示。4 个粒度均是随间距变大，引力变小，当颗粒间距约为 1.3 nm 时，由引力转变为斥力。就不同粒度而言，当颗粒间距大于 1.3 nm 时，粒径越大，斥力越大；当颗粒间距小于 1.3 nm 时，粒径大的相应引力也要大一些，但差别不是很明显。5 μm 粒级的钛辉石虽然在颗粒间距大于 1.3 nm 时，引力转为斥力，但是斥力较弱，所以它与钛铁矿的作用力总体表现为引力。引力的作用将有可能使微细粒钛辉石在钛铁矿表面会发生罩盖作用。

不同粒度钛辉石含量与钛铁矿可浮性的关系如图 5 所示。由图 5 可以看出，粗粒级的钛辉石对钛铁矿的回收影响较小，而微细粒级的钛辉石在其含量大于 40% 时会使钛铁矿的回收率急剧降低，其原因可能就是微细粒钛辉石在钛铁矿表面发生了罩盖现象。

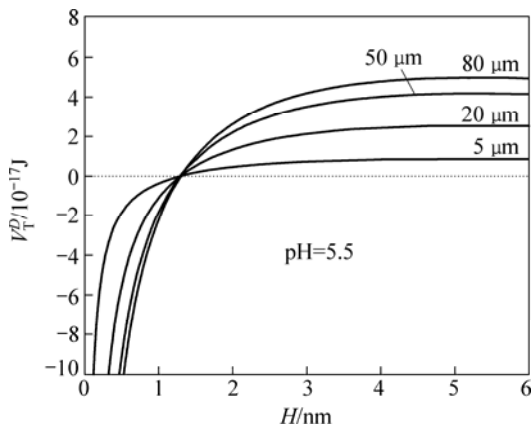


图 4 酸性条件下不同粒度钛辉石与钛铁矿相互作用势能曲线

Fig.4 Interaction potential energy curves of titanite with different grain sizes and ilmenite(38 μm) under acidic conditions

为了验证钛辉石是否在钛铁矿表面发生了罩盖作用，对实验产物进行了扫描电镜检测。首先将钛铁矿(0~100 μm)同钛辉石(< 10 μm = 按照质量比为 2:3 的比例混合，以油酸钠为捕收剂(用量 1.5×10^{-4} mol/L)，在 pH=5.8 的条件下进行浮选试验，将浮选尾矿送去扫描电镜检测，结果如图 6 所示。由于钛铁矿的分子式是 $FeTiO_3$ ，因此在其 EDS 能谱中可见以含 Ti 和 Fe 元素为主(见图 7)；由于钛辉石是硅酸盐类，因此在其 EDS 能谱中可见除了含有一些金属元素外，还含有 Si

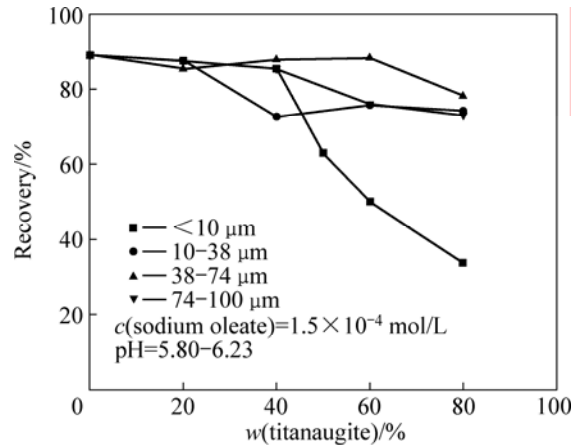


图 5 不同粒度钛辉石含量与钛铁矿可浮性的关系

Fig.5 Relationship among contents of titanite with different grain sizes and recovery of ilmenite(38 μm)

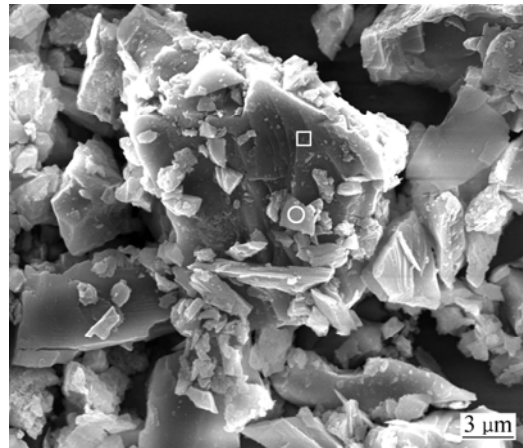


图 6 浮选尾矿的 SEM 像

Fig.6 SEM image of flotation tailings (Offices marked with a square mark is where Fig.7 collect spectrum in, offices marked with a circular mark is where Fig.8 collect spectrum in)

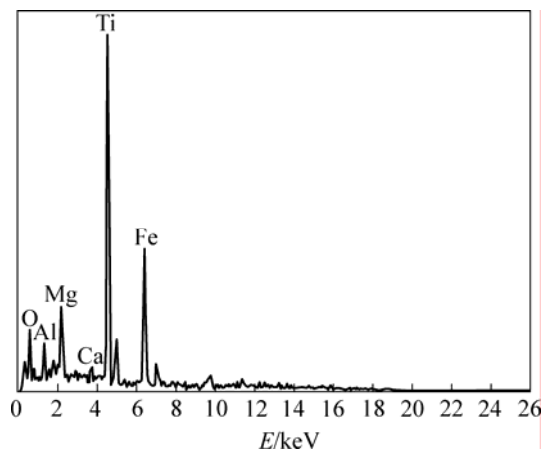


图 7 钛铁矿的 EDS 谱

Fig.7 EDS spectrum of ilmenite

元素(见图 8)。由图 6~8 可知, 微细颗粒的钛辉石在较粗颗粒的钛铁矿上发生了罩盖。

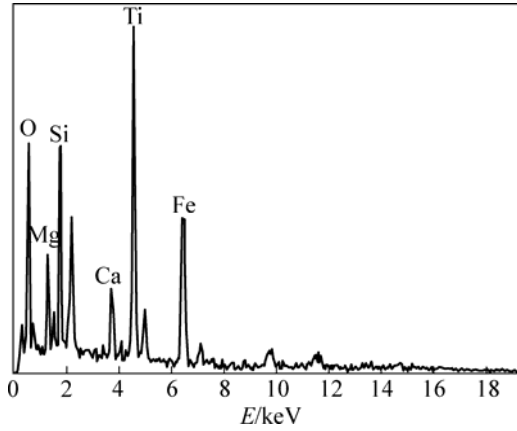


图 8 钛辉石的 EDS 谱

Fig.8 EDS spectrum of titanite

2.3 表面润湿性

捕收剂油酸钠的加入, 改变了矿物表面的润湿性, 而润湿性的改变对矿粒间的相互作用能有着巨大的影响。因此本文根据扩展的 DLVO 理论考察钛铁矿和钛辉石表面润湿性的改变对两者之间相互作用能的影响。由于粒径 < 10 μm 的钛辉石对钛铁矿的可浮性影响最大, 因此这里只研究粒径 < 10 μm 的钛辉石和钛铁矿之间的总作用能。

矿物润湿性的改变对矿粒间总作用能的影响体现在极性界面相互作用能 V_H 的变化。因此根据所测矿物接触角和相应参数, 计算了两种矿物加油酸钠前后的 V_H 相应值。

对于半径分别为 R_1 和 R_2 的不同粒子间的极性界面相互作用能表达式为^[19]

$$V_H = \frac{2\pi R_1 R_2}{R_1 + R_2} h_0 V_H^0 \exp\left(\frac{H_0 - H}{h_0}\right) \quad (7)$$

式中: H_0 为两颗粒接触间距; h_0 为衰减长度, 一般为 1~10 nm; V_H^0 为界面极性相互作用能量常数, 由下式确定:

$$V_H^0 = 2[\sqrt{r_3^+}(\sqrt{r_1^-} + \sqrt{r_2^-} - \sqrt{r_3^-}) + \sqrt{r_3^-}(\sqrt{r_1^+} + \sqrt{r_2^+} - \sqrt{r_3^+}) - \sqrt{r_1^+ r_2^-} - \sqrt{r_1^- r_2^+}] \quad (8)$$

式中: r_1^+ 、 r_2^+ 、 r_3^+ 分别为颗粒 1、2 和介质 3 表面能的电子接受体分量, r_1^- 、 r_2^- 、 r_3^- 分别为颗粒 1 和颗粒 2 及介质 3 表面能的电子给予体分量。对于水介质,

$r_3^+ = r_3^- = 25.5 \text{ mJ/m}^2$ 。 r_1^+ 、 r_1^- 、 r_2^+ 、 r_2^- 可利用下式求出:

$$(1 + \cos\theta)r_L = 2(\sqrt{r_S^d r_L^d} + \sqrt{r_S^+ r_L^+} + \sqrt{r_S^- r_L^-}) \quad (9)$$

式中: θ 为液体与固体表面的接触角; r_L 、 r_L^d 、 r_L^+ 、 r_L^- 分别为液体的表面能、表面能的色散分量、电子接受体及给予体分量; r_S^d 、 r_S^+ 、 r_S^- 分别为固体颗粒 1 或 2 表面能的色散分量、电子接受体及给予体分量。对于单极性表面, $r_S^+ \approx 0$, 只体现 r_S^- , 则式(9)变为

$$(1 + \cos\theta)r_L = 2(\sqrt{r_S^d r_L^d} + \sqrt{r_S^- r_L^-}) \quad (10)$$

r_S^d 可由下式确定^[19]:

$$A = 1.51 \times 10^{-21} r_S^d \quad (11)$$

在粉末润湿角测定中, 假设 pH 为 5.3~5.6 的蒸馏水是使两种矿物润湿性更好的溶液, 因此, 钛铁矿和钛辉石在水中的接触角均为 0° , 根据试验所测和相应计算, 钛铁矿和钛辉石在油酸钠浓度 $1.5 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 、pH 为 5.3~5.6 的溶液中的接触角分别为 68.9° 和 63.45° ; 已知水的 r_L 、 r_L^d 、 r_L^+ 、 r_L^- 分别为 72.8、21.8、25.5、25.5 mJ/m^2 ; 式(7)中, 取 $H_0 = 0.2 \text{ nm}$, $h_0 = 1 \text{ nm}$, 将相应数值代入式(7)至式(11)中, 如果 $V_H > 0$, 即相互作用为斥力, 以 V_{HR} 表示; 如果 $V_H^0 < 0$, 即相互作用为引力, 以 V_{HA} 表示。于是当未添加油酸时,

$$V_{HR} = 88 \times 10^{-17} \exp(0.2 - H) \quad (12)$$

当添加油酸钠时,

$$V_{HA} = -153 \times 10^{-17} \exp(0.2 - H) \quad (13)$$

由此可见, 在 pH 值为 5.3~5.6 的水溶液体系中, 5 μm 粒级的钛辉石与 38 μm 粒级的钛铁矿之间的界面极性相互作用为水化相互作用排斥能; 在同等 pH 值条件下的浓度为 $1.5 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 的油酸钠溶液中, 两者之间的界面极性相互作用为疏水相互作用吸引能。

对于本论文所研究的体系, 粒子间的相互作用总能量为

$$V_T^{\text{ED}} = V_T^{\text{D}} + V_H \quad (14)$$

因此, 根据前面所计算的结果可得粒子间的总相互作用能如下:

当未加油酸钠时,

$$V_T^{ED} = 0.05 \times 10^{-17} (0.97p + q) - \frac{1.11 \times 10^{-17}}{H} + 88 \times 10^{-17} \exp(0.2 - H) \quad (15)$$

当加入油酸钠时,

$$V_T^{ED} = 2.17 \times 10^{-17} (0.68p + q) - \frac{1.11 \times 10^{-17}}{H} - 153 \times 10^{-17} \exp(0.2 - H) \quad (16)$$

钛辉石 (< 10 μm) 与钛铁矿 (0~100 μm) 之间的总作用能与 pH 值的关系如图 9 所示。在弱酸性水溶液中, 两者之间的总作用力为斥力, 随间距变大而减弱, 当间距大于 6 nm 时, 斥力几乎消失; 加入油酸钠后, 由于钛辉石和钛铁矿表面润湿性的改变, 形成了较大的疏水相互作用吸引能, 使得两者间的总作用力在间距小于 5 nm 时表现为引力, 随间距增大引力逐渐减弱, 当颗粒间距大于 5 nm 时转为斥力, 但斥力值很小, 整体仍以吸引力为主。

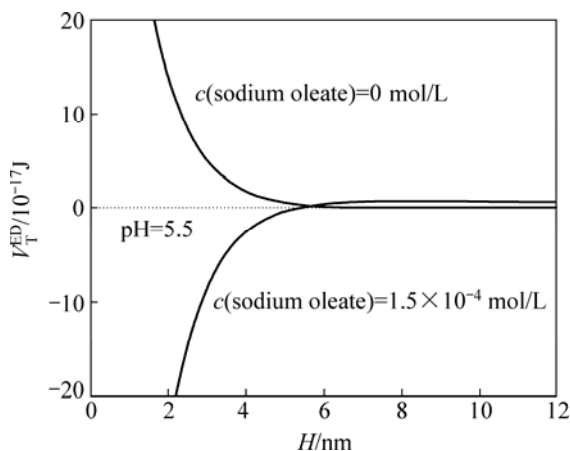


图 9 油酸钠与钛辉石和钛铁矿之间总作用能的关系

Fig.9 Relationship between sodium oleate and interaction potential energy between titanite (<10 μm) and ilmenite (0-100 μm)

3 结论

1) 表面电性、颗粒粒径和表面润湿性是影响钛辉石和钛铁矿颗粒间相互作用的 3 个主要因素。随着矿物表面电负性降低、润湿性减弱及矿物颗粒的粒径减小, 两种矿物之间的引力增大。

2) 在弱酸性条件下以油酸钠为捕收剂, 粒径 < 10 μm 的钛辉石严重影响钛铁矿的可浮性。根据 DLVO 理论计算, 钛铁矿表面的总作用力总体表现为引力,

扫描电镜检测表明, 此条件下微细粒钛辉石在钛铁矿表面发生了遮盖现象。

3) 增大矿物表面电负性、润湿性及颗粒粒径, 可使两种矿物颗粒之间的斥能增大, 有利于浮选分离。

REFERENCES

- [1] 文孝廉, 郭明彬, 冉定伟. 攀枝花地区钛资源利用现状、存在的问题及对策[J]. 金属矿山, 2008(8): 5-8.
WEN Xiao-lian, GUO Ming-bin, RAN Ding-wei. Status quo, problems and countermeasures of titanium resource utilization in Panzhihua region[J]. Metal Mine, 2008(8): 5-8.
- [2] 朱俊士. 中国钒钛磁铁矿选矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995: 280-281.
ZHU Jun-shi. China vanadic titanomagnetite mineral processing[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995: 280-281.
- [3] 王洪彬, 张红先. MOH 捕收剂浮选攀枝花微细粒级钛铁矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2007, 27(5): 27-30.
WANG Hong-bin, ZHANG Hong-xian. Experimental study on the flotation of the micro-fine ilmenite in Panzhihua using MOH collectors[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2007, 27(5): 27-30.
- [4] 熊涛, 熊大和, 钱枝花. SLon 磁选机在攀钢选钛厂扩能改造细粒级钛铁矿中的应用[J]. 矿冶工程, 2008, 28(6): 48-53.
XIONG Tao, XIONG Da-he, QIAN Zhi-hua. Application of SLon magnetic separator in capacity expansion and technical reconstruction of fine ilmenite processing[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2008, 28(6): 48-53.
- [5] 张国范, 王丽, 冯其明, 卢毅屏, 欧乐明. 钛辉石对钛铁矿浮选行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(6): 1124-1129.
ZHANG Guo-fan, WANG Li, FENG Qi-ming. Study on influence factors of interaction between titanite and ilmenite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(6): 1125-1129.
- [6] 邹建新, 杨成, 彭富昌, 周建国. 攀西地区钒钛磁铁矿提钛工艺与技术进展[J]. 金属矿山, 2007(7): 7-9.
ZOU Jian-xin, YANG Cheng, PENG Fu-chang, ZHOU Jian-guo. Progress in process and technology for titanium extraction from V-bearing titanium magnetite ore in Panzhihua-Xichang region[J]. Metal Mine, 2007(7): 7-9.
- [7] 张国范, 朱阳戈, 冯其明. 油酸钠对微细粒钛铁矿捕收机理[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(2): 372-376.
ZHANG Guo-fan, ZHU Yang-ge, FENG Qi-ming. Flotation mechanism of fine ilmenite by sodium oleate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(2): 372-376.
- [8] 朱阳戈, 张国范, 冯其明, 卢毅屏, 欧乐明. 微细粒钛铁矿的自载体浮选[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(3): 554-560.

- ZHU Yang-ge, ZHANG Guo-fan, FENG Qi-ming, LU Yi-ping, OU Le-ming. Autogenous-carrier flotation of fine ilmenite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(3): 554-560.
- [9] 冯其明, 席振伟, 张国范. 脂肪酸捕收剂浮选钛铁矿性能研究[J]. 金属矿山, 2009(5): 46-48.
- FENG Qi-ming, XI Zhen-wei, ZHANG Guo-fan. Collecting performance of fatty acid as collector for ilmenite[J]. Metal Mine, 2009(5): 46-48.
- [10] 魏红. 粉体接触角方法研究固体的表面性质[D]. 上海: 华东师范大学, 2005: 16-19.
- WEI Hong. Research on the surface character of the solid powder with the contact angle method[D]. Shanghai: East China Normal University, 2005: 16-19.
- [11] 孙传尧, 印万忠. 硅酸盐矿物浮选原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 80-81.
- SUN Chuan-rao, YIN Wan-zhong. Principles of silicate minerals flotation[M]. Beijing: Science Press, 2001: 80-81.
- [12] 妹尾学. 化学公式手册[M]. 李学芬, 曹镛, 译. 北京: 科学出版社, 1987: 85-88.
- MEI Wei-xue. Chemical formulas manual[M]. LI Xue-fen, CAO Yong, transl. Beijing: Science Press, 1987: 85-88.
- [13] USUI S, BAROUCH E. Effect of adsorbed layers on the van der Waals interaction between particles and bubbles in aqueous media[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1990, 137(1): 281-288.
- [14] 骆兆军, 胡岳华, 王毓华, 邱冠周. 铝土矿反浮选体系分散与凝聚理论[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(8): 680-683.
- LUO Zhou-jun, HU Yue-hua, WANG Yu-hua, QIU Guan-zhou. Mechanism of dispersion and aggregation in reverse flotation for bauxite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(8): 680-683.
- [15] HIEMENZ P C. Principles of colloid and surface chemistry[M]. Beijing: Beijing University Press, 1986: 251-306.
- [16] ISRAELACHVILI J N. Intermolecular and surface forces[M]. London: Academic Press, 1985: 294-295.
- [17] SIVAMOHAN R. The problem of recovering very fine particles in processing—A review[J]. International Journal of Mineral Processing, 1990(28): 247-288.
- [18] HOGG R, HEALY T W, FUERSTENAU D W. Mutual coagulation of colloidal dispersions[J]. Transactions of the Faraday Society, 1966(62): 1638.
- [19] 邱冠周, 胡岳华, 王淀佐. 颗粒间相互作用与细粒浮选[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1993: 129-131.
- QIU Guan-zhou, HU Yue-hua, WANG Dian-zuo. Interactions between particles and flotation of fine particles[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1993: 129-131.

(编辑 何学锋)