

## 钛辉石对钛铁矿浮选行为的影响

张国范, 王 丽, 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:** 采用浮选实验和 DLVO 理论计算, 研究钛辉石和钛铁矿各自的可浮性以及各粒级钛辉石对钛铁矿可浮性的影响规律及机理。浮选实验结果表明: 钛铁矿具有很好的可浮性, 钛辉石可浮性较差; 粒径小于 10  $\mu\text{m}$  的钛辉石对钛铁矿回收率影响很大。DLVO 理论计算结果表明: 当  $\text{pH}=5.9$  时, 两种矿物颗粒间的总相互作用能为负值, 表现为相互吸引, 微细粒级的钛辉石会在钛铁矿表面上粘附, 使钛铁矿的回收率显著降低; 当  $\text{pH}=8.5$  时, 由于静电排斥能大, 总相互作用能仍表现为较强的排斥力, 微细粒钛辉石不能粘附在钛铁矿表面。

**关键词:** 钛铁矿; 钛辉石; 浮选; DLVO 理论

**中图分类号:** TD 952

**文献标识码:** A

## Effect of titanaugite on flotation behavior of ilmenite

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

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

**Abstract:** The flotability of titanaugite and ilmenite and the effects of different size fractions of titanaugite on the flotability of ilmenite were studied by flotation tests and DLVO theoretical calculations. The flotation results show that ilmenite has good flotability, however, titanaugite has poor flotability, and titanaugite with the grain size bellow 10  $\mu\text{m}$  has serious effect on the recovery of ilmenite. The results of DLVO theoretical calculations indicate that the total acting energy between the titanaugite and ilmenite particles at  $\text{pH} 5.9$  is negative, showing as attraction, which causes the superfine titanaugite particles attach on the surface of ilmenite. At  $\text{pH} 8.5$ , because of large electrostatic repulsion energy, the total acting energy shows as strong repulsion, thus the superfine titanaugite particles can not attach on the surface of ilmenite.

**Key words:** ilmenite; titanaugite; flotation; DLVO

攀枝花—西昌地区钛铁矿储量(按  $\text{TiO}_2$  计)约 1.5 亿 t, 占全国原生钛铁矿储量的 97%, 列国内第一位<sup>[1]</sup>, 是我国重要的钛资源基地。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<sup>[2]</sup>, 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, 致使选钛厂浮选入选原料中粒径小于 74  $\mu\text{m}$  的矿物含量超过 60%<sup>[3]</sup>。微细粒级含量增大, 会造成两个方面的影响: 一是会造成浮选过程中泡沫过分稳定、发粘, 使矿粒不易脱附, 细粒脉石矿物夹带现象严重, 从而严重影响浮选精矿品位<sup>[4]</sup>; 二是原料中粒径小于 19  $\mu\text{m}$

的矿物被分级脱泥作业作为尾矿抛弃。而据检测, 磁尾中粒径小于 19  $\mu\text{m}$  的钛铁矿含量占 35%左右,  $\text{TiO}_2$  含量达 9.24%<sup>[5]</sup>。可见, 大量含钛矿物白白流失。目前现场钛铁矿选别工艺为强磁—浮选联合流程<sup>[6]</sup>, 主要是强化 19~74  $\mu\text{m}$  粒级钛铁矿的回收。关于微细粒级钛铁矿回收方法的研究主要集中在浮选药剂方面, 近年来针对攀枝花细粒钛铁矿研发的浮选药剂主要有攀枝花钢铁研究院矿山分院开发的 R-2<sup>[7]</sup>、朱建光等<sup>[8]</sup>研制的 MOS、谢泽君等<sup>[9]</sup>研制的 XT、ROB<sup>[10]</sup>和 TAO 系列捕收剂<sup>[11]</sup>、沈阳有色金属研究院研制的 H717<sup>[12]</sup>、朱建

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB613602)

**收稿日期:** 2008-11-13; **修订日期:** 2008-02-28

**通讯作者:** 张国范, 副教授, 博士; 电话: 0731-8830913; E-mail: zhangguofan2002@163.com

光等<sup>[13]</sup>最新研制的 MOH 等, 这些药剂的浮选效果各有优劣, 目前只有 MOS 在现场使用, 但并不能有效解决微细粒钛铁矿的回收问题。

考虑到原料中脉石矿物绝大部分为含钛普通辉石, 含量(质量分数)约为 46%<sup>[14]</sup>, 而目前关于钛辉石对钛铁矿浮选影响的研究工作较少, 因此, 本文作者从这一角度出发, 探讨其影响机理, 以期有效回收微细粒钛铁矿提供指导。

# 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、水析分别制得 74~100  $\mu\text{m}$ 、38~74  $\mu\text{m}$ 、10~38  $\mu\text{m}$  3 个粒级试样, 以及粒径小于 74  $\mu\text{m}$  的颗粒含量为 93%(0~100  $\mu\text{m}$ ) 的钛铁矿和钛辉石全粒级试样。粒径小于 10  $\mu\text{m}$  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 浮选实验

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

浮选实验是在槽容积为 40 mL 的 XFG 型挂槽式浮选机进行, 浮选温度为 25  $^{\circ}\text{C}$ 。每次实验称取矿样 2 g(混合矿样为 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 5 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, 计算回收率。

表 1 单矿物样品化学成分分析结果

Table 1 Chemical compositions of samples

Mineral	Mass fraction/%							
	O	Ti	Si	Fe	Ca	Mg	Al	Na
Ilmenite	33.52	30.56	1.16	29.91	0.26	3.07	0.88	
Titanaugite	42.6	1.72	19.93	10.28	12.72	7.697	4.23	0.489

Mineral	Mass fraction/%						
	Mn	S	K	Co	Zn	Sr	Zr
Ilmenite	0.52	0.095		0.012 3			0.009 9
Titanaugite	0.19	0.078 9	0.048	0.005 4	0.009	0.013 6	0.003

## 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 置于烧杯中, 加入 50 mL 的蒸馏水, 按照与浮选实验相同的调浆条件加药剂, 用磁力搅拌器搅拌 5 min 后在 Zetaplus Zeta 分析仪上测量矿物表面  $\zeta$  电位。

# 2 结果与讨论

## 2.1 钛铁矿和钛辉石可浮性

图 1 所示为各粒级钛铁矿回收率与 pH 的关系图。从图 1 可以看出, 总体来说, 钛铁矿各个粒级的可浮性都很好, 且可浮区间宽, 在 pH 值为 4~10 区间内均具有较好的可浮性。相对来说, 粒径小于 10  $\mu\text{m}$  粒级的钛铁矿可浮性较差, 10~38  $\mu\text{m}$  粒级的钛铁矿可浮性最好。当 pH 值大于 10 以后, 74~100  $\mu\text{m}$  粒级和 38~74  $\mu\text{m}$  粒级的钛铁矿回收率随 pH 值增加而显著下降。

图 2 所示为各粒级钛辉石回收率与 pH 值的关系。由图 2 可看出, 钛辉石的可浮性相对较差, 可浮区间也很窄, 仅在 pH 值为 4.5~7.5 区间内可浮性相对较好。就各粒级可浮性来看, 粒径小于 10  $\mu\text{m}$  粒级的钛辉石可浮性最差, 38~74  $\mu\text{m}$  粒级的钛辉石可浮性最好, 当 pH=6.28 时, 钛辉石回收率可达 74.93%。

图 3 所示为捕收剂油酸钠用量对全粒级钛铁矿和钛辉石回收率的影响。从图 3 可看出, 钛铁矿的回收率先随油酸钠用量的增大而升高, 后趋于平缓。当油酸钠用量为  $1\times 10^{-4}\text{mol/L}$  时, 钛铁矿回收率可高达 90% 以上, 具有非常好的可浮性; 油酸钠用量大于  $1\times 10^{-4}\text{mol/L}$  后, 其对钛铁矿回收率影响不大。由图 3 可知, 在实验药剂用量范围内, 油酸钠用量对钛辉石的回收率影响不大, 回收率一直维持在 25%~30% 之间, 可浮性较差。

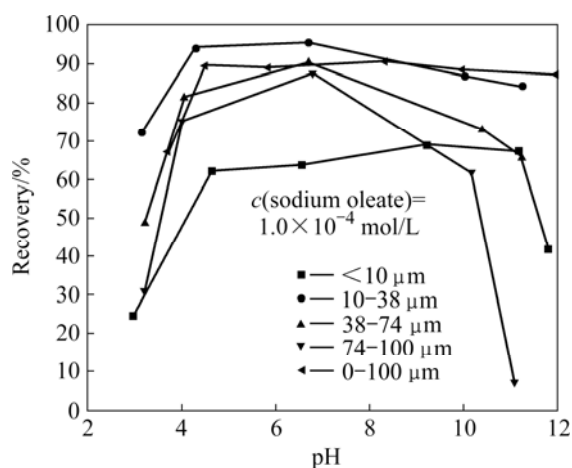


图1 不同粒级钛铁矿可浮性与pH值的关系

Fig.1 Relationship between floatability of different sized ilmenite and pH value

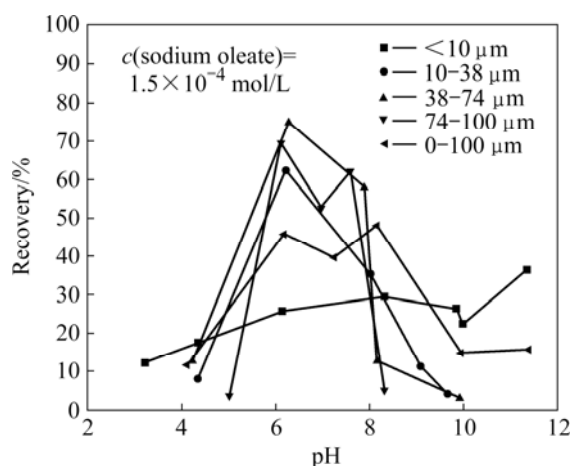


图2 不同粒级钛辉石可浮性与pH值的关系

Fig.2 Relationship between floatability of different sized titanite and pH value

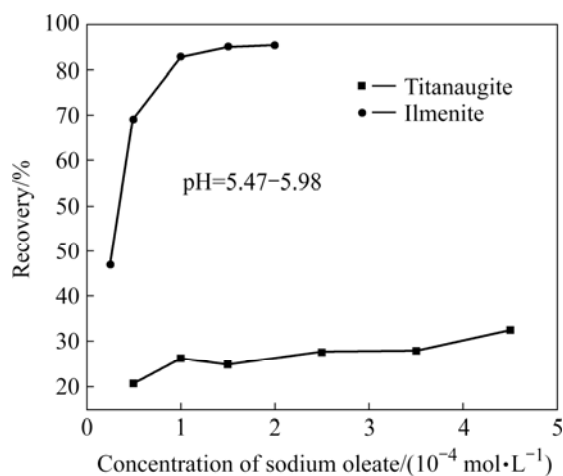


图3 油酸钠用量对全粒级钛铁矿和钛辉石(0~100 μm)回收率的影响

Fig.3 Effect of dosage of sodium oleate on recoveries of ilmenite and titanite (grain size 0~100 μm)

## 2.2 钛铁矿和钛辉石混合体系浮选

从钛铁矿和钛辉石可浮性实验结果可知,钛铁矿可浮性很好,钛辉石可浮性较差,为了研究在实际浮选体系中,钛辉石对钛铁矿浮选回收率影响的原因,分别进行了钛辉石各个粒级同全粒级钛铁矿不同比例人工混合矿浮选实验,实验结果如图4所示。由图4可以看出,对于10~38 μm、38~74 μm和74~100 μm 3个粒级的钛辉石来说,其含量的增加对钛铁矿回收率的影响并不大;而对于粒径小于10 μm的钛辉石来说,其含量低于40%时,对钛铁矿回收率影响不大,但其含量超过40%时,对钛铁矿回收率影响非常显著。随着该粒级钛辉石含量增加,钛铁矿回收率急剧降低,当该粒级钛辉石含量为50%时,钛铁矿的回收率由该粒级钛辉石含量为0时的89%降到63%;该粒级钛辉石含量增大到80%时,钛铁矿的回收率仅为33.6%。

图5所示为全粒级钛铁矿和粒径小于10 μm的钛

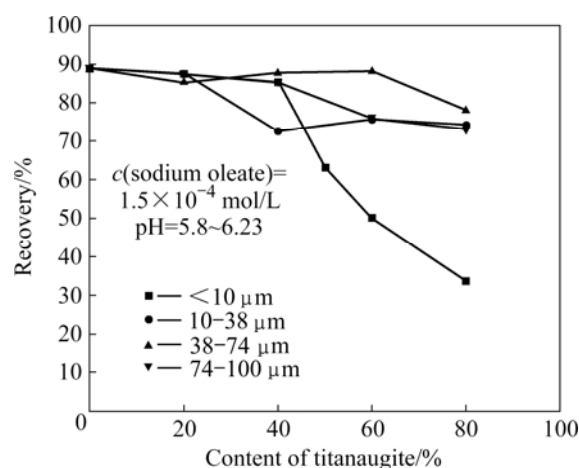


图4 钛辉石含量对钛铁矿回收率的影响

Fig.4 Effect of content of titanite on recovery rate of ilmenite

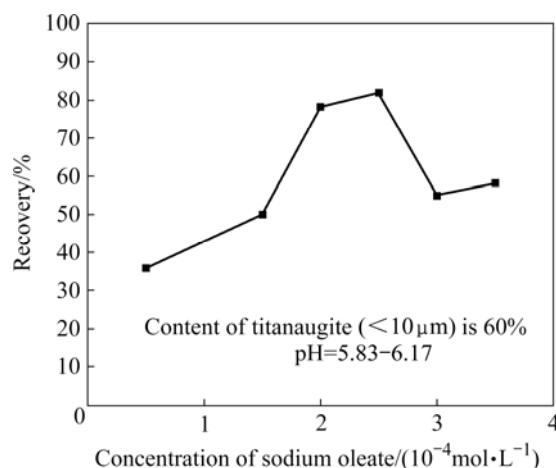


图5 油酸钠用量对混合矿中钛铁矿回收率的影响

Fig.5 Effect of dosage of sodium oleate on recovery of ilmenite in mixed ore

辉石占 60% 的人工混合矿油酸钠用量试验结果。随油酸钠用量在一定范围内的增大, 钛铁矿回收率虽然有明显提高, 但与钛铁矿纯矿物浮选实验结果相比, 在相同的油酸钠用量和 pH 值下, 钛铁矿纯矿物的回收率远大于此混合矿中钛铁矿的回收率。造成这种现象的主要原因可能是微细粒钛辉石在钛铁矿表面发生了罩盖作用, 降低了钛铁矿的可浮性。下面将从 DLVO 理论方面详细讨论微细粒钛辉石与钛铁矿间的相互作用。

### 2.3 DLVO 理论计算

DLVO 理论以胶体粒子间的相互吸引和相互排斥为基础, 当粒子相互接近时, 这两种相反的作用力就决定了胶体分散体系的稳定性。矿粒间的总作用能  $E_D^T$  可用 DLVO 理论的通式表示为<sup>[15]</sup>

$$E_D^T = E_W + E_E \quad (1)$$

式中  $E_W$  为颗粒间范德化相互作用能;  $E_E$  为颗粒间的静电相互作用能。

#### 2.3.1 异类矿物颗粒间的范德华相互作用

由于微细粒的钛辉石对钛铁矿浮选影响较大, 所以本实验室研究  $5 \mu\text{m}$  钛辉石和  $38 \mu\text{m}$  钛铁矿矿物粒子间的相互作用情况。

球形颗粒间范德华作用能的表达式为<sup>[16]</sup>

$$E_W = -\frac{A}{6H} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

式中  $A$  为 Hamake 常数;  $R_1$  和  $R_2$  分别为两种矿物颗粒的半径,  $\mu\text{m}$ ;  $H$  为两种颗粒的间距,  $\text{nm}$ 。各种矿物在真空中的 Hamake 常数为: 钛辉石  $A_{11}=8.6 \times 10^{-20}\text{J}$ ; 钛铁矿  $A_{22}=13.1 \times 10^{-20}\text{J}$ ; 水  $A_{33}=4 \times 10^{-20}\text{J}$ 。钛辉石和钛铁矿在水中相互作用的 Hamaker 常数由下式给出<sup>[17-19]</sup>:

$$A_{132} = (\sqrt{A_{11}} - \sqrt{A_{33}})(\sqrt{A_{22}} - \sqrt{A_{33}}) = 1.51 \times 10^{-20}\text{J} \quad (3)$$

微细粒钛辉石和钛铁矿在水中的范德华相互作用能为

$$E_W = -\frac{1.11 \times 10^{-17}}{H} \quad (4)$$

由计算结果可知, 微细粒钛辉石与钛铁矿之间相互作用的范德华势能为负值, 表现为相互吸引。如图 6 中  $E_W$  曲线所示, 当颗粒间距小于  $3 \text{ nm}$  时, 相互间的引力急剧增加, 当颗粒间距大于  $6 \text{ nm}$  时, 相互间引力较小, 且变化缓慢。

#### 2.3.2 异类矿物颗粒间的静电相互作用

半径分别为  $R_1$  和  $R_2$  的不同粒子间的静电相互作用能如下式所示<sup>[20-21]</sup>:

$$E_E = \frac{\pi \varepsilon_a R_1 R_2}{R_1 + R_2} (\varphi_{01}^2 + \varphi_{02}^2) \left[ \frac{2\varphi_{01}\varphi_{02}}{\varphi_{01}^2 + \varphi_{02}^2} p + q \right] \quad (5)$$

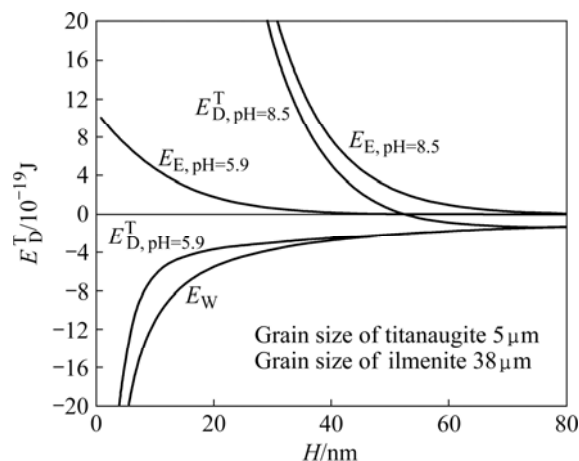


图 6 钛辉石与钛铁矿相互作用势能曲线

Fig.6 Interaction potential energy curves of titanaugite and ilmenite

其中:

$$p = \ln \left[ \frac{1 + \exp(-\kappa H)}{1 - \exp(-\kappa H)} \right] \quad (6)$$

$$q = \ln[1 - \exp(-2\kappa H)] \quad (7)$$

式中  $\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_0$  为真空中绝对介电常数  $8.854 \times 10^{-12} \text{C}^2 \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\varepsilon_r$  为分散介质的绝对介电常数; 水介质的  $\varepsilon_r=78.5$ , 则  $\varepsilon_a=6.95 \times 10^{-10} \text{C}^2 \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ <sup>[22]</sup>;  $\varphi_{01}$  和  $\varphi_{02}$  分别为两种矿物的表面电位, V;  $H$  为两颗粒间距离, nm;  $\kappa^{-1}$  为 Debye 长度, 单位为 nm, 代表双电层厚度, 在 298 K 时, 对于 1:1 型电解质:

$$\kappa^{-1} = 0.304 / \sqrt{c} \quad (\text{nm}) \quad (8)$$

式中  $c$  为离子体积摩尔浓度, mol/L; 假定  $c=10^{-3} \text{mol/L}$ , 则  $\kappa=0.104 \text{ nm}^{-1}$ 。

由实验测得钛铁矿和钛辉石在 pH=5.9 时的  $\zeta$  分别为 -7 和 -5.8 mV, 在 pH=8.5 时的  $\zeta$  分别为 -35.5 和 -37 mV。用  $\zeta$  值近似代替式(5)中的  $\psi_0$  值。由式(5)可得钛铁矿和微细粒钛辉石在不同 pH 下的静电相互作用能分别如下:

1) pH=5.9 时

$$E_E = 7.97 \times 10^{-19} (0.98p + q) \quad (9)$$

2) pH=8.5 时

$$E_E = 2.5 \times 10^{-17} (p + q) \quad (10)$$

钛铁矿和微细粒钛辉石之间的静电相互作用能情况如图6中 $E_E$ 曲线所示,两种pH下均为斥力,随颗粒间距的增大,斥力减小,且从图6可以发现,两种颗粒在碱性条件下的静电相互作用能大于弱酸性条件下的静电相互作用能。

### 2.3.3 异相矿物颗粒间的DLVO相互作用

根据前面计算的两种矿物颗粒间的范德华作用能和静电作用能结果,由式(1)可得它们之间在不同pH下的总相互作用能分别如下:

1) pH=5.9 时

$$E_D^T = -1.11 \times 10^{-17} / H + 7.97 \times 10^{-19} (0.98p + q) \quad (11)$$

2) pH=8.5 时

$$E_D^T = -1.11 \times 10^{-17} / H + 2.5 \times 10^{-17} (p + q) \quad (12)$$

钛铁矿和微细粒钛辉石颗粒间的总相互作用能情况如图6中 $E_D^T$ 曲线所示。在pH=5.9时,两种颗粒的总相互作用能为吸引力,说明微细粒钛辉石在钛铁矿表面会发生罩盖作用。当颗粒间距小于10 nm时,吸引力急剧增大,更有可能发生罩盖。当颗粒间距大于20 nm时,吸引力缓慢减小,随着间距的继续增大,吸引力趋近于0。在pH=8.5时,两种颗粒的总相互作用能随颗粒间距的增大由排斥变为吸引,当颗粒间距小于52.5 nm时,其作用能表现为排斥,当颗粒间距大于52.5 nm时,其作用能表现为吸引,但吸引力很小。由此可见,在pH=8.5时,由于颗粒间存在斥力,微细粒的钛辉石在钛铁矿表面罩盖的可能性较小。

根据浮选实验结果,钛铁矿在pH为4~10区间均具有很好的可浮性,而钛辉石仅在pH为4.5~7.5区间具有一定的可浮性;并且,根据DLVO理论计算结果,在pH=8.5时,发生细粒罩盖可能性较小,有利于消除钛辉石的影响。因此,基于这两个方面的原因,可考虑选择pH为7.5~10的碱性区间来浮选钛铁矿。

## 3 结论

1) 钛铁矿在pH值为4~10区间内各个粒级都具有很好的可浮性,钛辉石仅38~74  $\mu\text{m}$ 粒级在pH值为4.5~7.5区间内具有较好的可浮性。油酸钠用量对钛铁矿回收率影响较大,当油酸钠用量为 $1 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 时,钛铁矿回收率高达90%以上;油酸钠用量对钛辉石的回收率影响不大。

2) 粒径小于10  $\mu\text{m}$ 粒级的钛辉石在其含量超过40%时,会导致钛铁矿回收率急剧降低,其它较粗粒

级的钛辉石对钛铁矿回收率影响较小。

3) 根据DLVO理论计算结果,在pH=5.9时,两种矿物颗粒间的总相互作用能为负值,表现为相互吸引,微细粒级的钛辉石会在钛铁矿表面上粘附,使钛铁矿的回收率显著降低;在pH=8.5时,由于静电排斥能大,使总相互作用能仍为强的斥力,微细粒钛辉石不能在钛铁矿上发生粘附,因此,可以考虑在碱性区间浮选钛铁矿。

## REFERENCES

- [1] 胡克俊,姚娟,席歆.攀枝花钛资源经济价值分析[J].世界有色金属,2008(1): 36-42.  
HU Ke-jun, YAO Juan, XI Xin. Analysis on economic value of titanium resource in Panzhihua[J]. World Nonferrous Metals, 2008(1): 36-42.
- [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] 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, 27.  
ZHOU Jian-xin, YANG Cheng, PENG Fu-chang, ZHOU Jian-guo. Progress in process and technology for titanium extraction from V-bearing titanomagnetite ore in Panzhihua-Xichang region[J]. Metal Mine, 2007(7): 7-9, 27.
- [4] 王淀佐.浮选理论的新进展[M].北京:科学出版社,1992: 217-220.  
WANG Dian-zuo. New development of flotation theory[M]. Beijing: Science Press, 1992: 217-220.
- [5] 陈树民.攀枝花微细粒级(-19  $\mu\text{m}$ )钛铁矿回收探索试验[J].矿产综合利用,2004(5): 7-10.  
CHEN Shu-min. Explorative experiment on recovering ilmenite from Panzhihua microfine size fraction (-19  $\mu\text{m}$ ) material[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2004(5): 7-10.
- [6] 周建国,王洪彬,曾礼国.攀枝花微细粒钛铁矿的回收[J].广东有色金属学报,2006,16(1): 1-5.  
ZHOU Jian-guo, WANG Hong-bin, ZENG Li-guo. The recovery of the fine particle ilmenite in Panzhihua[J]. Journal of Guangdong Non-ferrous Metals, 2006, 16(1): 1-5.
- [7] 袁国红,余德文.R-2捕收剂选别攀枝花微细粒级钛铁矿试验研究[J].金属矿山,2001(9): 37-39.  
YUAN Guo-hong, YU De-wen. Experimental research of using R-2 collector to separate Panzhihua micro-sized ilmenite[J]. Metal Mine, 2001(9): 37-39.
- [8] 朱建光,朱玉霜,王升鹤,陈树民.利用协同效应最佳点配制钛铁矿捕收剂[J].有色金属(选矿部分),2002(4): 39-41.  
ZHU Jian-guang, ZHU Yu-shuang, WANG Sheng-he, CHEN Shu-min. Making up new ilmenite collector by the maximum

- synergisms[J]. *Nonferrous Metals(Mineral Processing Parts)*, 2002(4): 39–41.
- [9] 朱建光. 2004年浮选药剂的进展[J]. *国外金属矿选矿*, 2005(1): 5–12.
- ZHU Jian-guang. Development of flotation reagent in 2004[J]. *Metallic Ore Dressing Abroad*, 2005(1): 5–12.
- [10] 许向阳, 张泾生, 王安五, 谢建国, 陈让怀. 微细粒级钛铁矿浮选捕收剂 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.
- [11] 魏 民. TAO 系列捕收剂选别攀枝花钛铁矿的研究[J]. *广东有色金属学报*, 2006, 16(2): 80–83.
- WEI Min. Research on Panzhihua ilmenite flotation by using TAO collector series[J]. *Journal of Guangdong Non-ferrous Metals*, 2006, 16(2): 80–83.
- [12] 马忠臣. H717 捕收剂选别钛铁矿的试验研究[J]. *有色矿冶*, 2003, 19(8): 18–19, 22.
- MA Zhong-chen. The experimental study on H717 collectors floating ilmenite[J]. *Non-ferrous Mining and Metallurgy*, 2003, 19(8): 18–19, 22.
- [13] 朱建光, 陈树民, 姚晓海, 邓清华, 王升鹤. 用新型捕收剂 MOH 浮选微细粒钛铁矿[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2007(6): 42–44.
- ZHU Jian-guang, CHEN Shu-min, YAO Xiao-hai, DENG Qing-hua, WANG Sheng-he. Flotation of micro-fine ilmenite using new type collector-MOH[J]. *Nonferrous Metals(Mineral Processing Parts)*, 2007(6): 42–44.
- [14] 敖惠玲. Slon 立环脉动高梯度磁选机回收微细粒级钛铁矿的试验研究[J]. *南方冶金学院学报*, 2005, 26(6): 17–20.
- AO Hui-ling. Test research on recovering superfine ilmenite particle with Slon magnetic separator[J]. *Journal of Southern Institute of Metallurgy*, 2005, 26(6): 17–20.
- [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] 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.
- [18] 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.
- [19] von OSS C T, VISSER J, ABSOLON D R. The concept of negative hamaker coefficients( II ) — Thermodynamics, experimental evidence and applications[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 1983, 18: 133–148.
- [20] SIVAMOHAN R. The problem of recovering very fine particles in processing—A review[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1990, 28: 247–288.
- [21] HOGG R, HEALY T W, FUERSTENAU D W. Mutual coagulation of colloidal dispersions[J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1966, 62: 1638.
- [22] 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 Zhao-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.

(编辑 何学锋)