

# 攀西某微细粒钛磁铁矿强化 分散—磁选试验

刘才鹏<sup>1</sup>, 王维清<sup>1,2\*</sup>, 孙晋睿<sup>1</sup>, 熊惠明<sup>1</sup>, 刘 柳<sup>1</sup>

(1. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 2. 固体废物处理与资源化教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010)

**摘 要:**攀西某微细粒钛磁铁矿混合粗精矿因微细粒脉石矿物与钛磁铁矿异相凝聚, 常规弱磁选提铁降杂指标较差, 采用强化分散—磁选可有效改善选别效果、提高分选指标。为了强化分选矿样中的微细粒铁矿物, 对强化分散—磁选工艺条件开展试验研究, 考察了分散剂种类、分散剂用量、矿浆 pH 值、磁场强度等因素对分选效果的影响。试验结果表明: 在矿浆浓度 20%、机械搅拌速度 1 992 r/min、搅拌时间 3 min、六偏磷酸钠用量 1 000 g/t、矿浆 pH 值 10、磁场强度 300 kA/m 的条件下, 获得了精矿铁品位 57.69%, 铁回收率 98.10% 的良好指标。与直接磁选结果相比, 铁品位提高了 1.26 个百分点。DLVO 理论分析表明, 六偏磷酸钠通过降低钛磁铁矿和钛辉石表面电位, 增大了二者异相之间的静电斥力, 从而削弱微细粒脉石矿物与钛磁铁矿异相凝聚。

**关键词:**微细粒级钛磁铁矿; 选铁; 分散剂; DLVO 理论

中图分类号: TD95

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)03-0114-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.03.016

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听  
语  
音  
与  
作  
者  
互  
动  
聊  
科  
研

## Enhanced dispersion-magnetic separation tests for micro-fine titanomagnetite in Panxi area

Liu Caipeng<sup>1</sup>, Wang Weiqing<sup>1,2\*</sup>, Sun Jinrui<sup>1</sup>, Xiong Huiming<sup>1</sup>, Liu Liu<sup>1</sup>

(1. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China;

2. Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Recycling, Ministry of Education, Mianyang 621010, Sichuan, China)

**Abstract:** Due to the heterogeneous coagulation of fine-grained gangue minerals and titanomagnetite in the mixed rough concentrate of a fine-grained titanomagnetite in Panxi area, the iron extraction and impurity reduction index of conventional low-intensity magnetic separation is poor. The enhanced dispersion-magnetic separation can effectively improve the separation effect and improve the separation index. In order to strengthen the separation of fine-grained iron minerals in the ore samples, the experimental study on the process conditions of enhanced dispersion-magnetic separation was carried out to investigate the effects of dispersant type, dispersant dosage, slurry pH, magnetic field strength and other factors on the separation effect. The test results show that under the conditions of 20% slurry concentration, mechanical stirring speed of 1 992 r/min, stirring time of 3 min, dosage of SHMP of 1 000 g/t, slurry pH of 10 and magnetic field strength of 300 kA/m, a good index of 57.69% iron grade in concentrate and 98.10% iron recovery was obtained. Compared with the results of direct magnetic separation, the iron grade increased by 1.26%. DLVO theoretical analysis shows that sodium hexametaphosphate increases the electrostatic repulsion between titanomagnetite and titanite by reducing the surface po-

收稿日期: 2024-02-27

作者简介: 刘才鹏, 1999 年出生, 男, 四川成都人, 硕士研究生, 研究方向为矿业工程, E-mail: 1481267028@qq.com; \* 通讯作者: 王维清, 教授, 博士生导师, E-mail: wangweiqing@swust.edu.cn。

tential of titanomagnetite and titaugite, thus weakening the heterogeneous coagulation of fine gangue minerals and titanomagnetite.

**Key words:** fine-grained titanium magnetite, titanium concentration, dispersant, DLVO theory

0 引言

我国铁矿石资源丰富, 储量巨大, 全国储量超过 160 亿 t, 但大部分属于复杂难选铁矿<sup>[1-2]</sup>。其中, 攀西地区微细粒钛磁铁矿选别难, 一直是矿物加工领域研究的难点问题<sup>[3-5]</sup>。在攀西钛磁铁矿“阶段磨矿, 阶段选别”的选铁工艺中, 细磨作业过程为使矿物充分单体解离, 产生了大量微细粒矿物, 由于矿料较细, 其比表面积大、表面能高, 细颗粒很容易发生无选择性吸附和聚团, 导致钛磁铁矿与脉石矿物异相凝聚, 很大程度上影响了微细粒钛磁铁矿的选别效率<sup>[6]</sup>。因此, 开展有效回收微细粒钛磁铁矿的试验研究为炼铁提供更优质的原料, 降低炼铁成本具有重要意义。

微细粒钛磁铁矿与脉石矿物异相凝聚是选别难的主要原因, 分散剂可以强化矿浆分散, 削弱异相凝聚, 进而强化微细粒矿物的选别<sup>[7-11]</sup>。苏涛等<sup>[12]</sup>采用分散—絮凝弱磁精选精矿铁品位和铁回收率比直接弱磁精选精矿铁品位和铁回收率分别提高 1.28 和 5.08 个百分点。许鹏云等<sup>[13]</sup>采用分散磁选弱磁

选铁矿物, 在分散剂 WPVP 用量为 1 mg/L 时, 精矿铁品位比直接弱磁选精矿铁品位和回收率分别提高了 2.33 个百分点和 1.25 个百分点。因此, 削弱微细粒钛磁铁矿粗精矿的无选择性吸附, 提高磁选矿浆的分散性是改善此类难选铁矿石提铁降杂效果的根本手段。

笔者以攀西钛磁铁矿粗精矿为研究对象, 六偏磷酸钠为分散剂, 采用强化分散—磁选工艺, 强化回收了攀西某选矿厂混合磁选精矿中的微细粒钛磁铁矿, 详细考察了分散剂种类、分散剂用量、矿浆 pH 值、磁场强度对分选效果的影响。研究结果对微细粒难选钛磁铁矿的产线磁选提铁降杂具有重要意义。

1 试验原料和方法

1.1 原料与试剂

试验矿样来自攀西地区钛磁铁矿经弱磁选后的混合粗精矿。矿样化学多元素分析结果见表 1, 物相分析结果如图 1 所示, 扫描电镜分析结果见图 2。

表 1 矿样化学多元素分析结果  
Table 1 Chemical multi-element analysis of the sample

| TFe   | TiO <sub>2</sub> | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | % |
|-------|------------------|------------------|--------------------------------|------|------|-------------------------------|--------------------------------|---|
| 55.61 | 11.50            | 2.70             | 3.51                           | 1.97 | 1.46 | 0.57                          | 0.29                           |   |

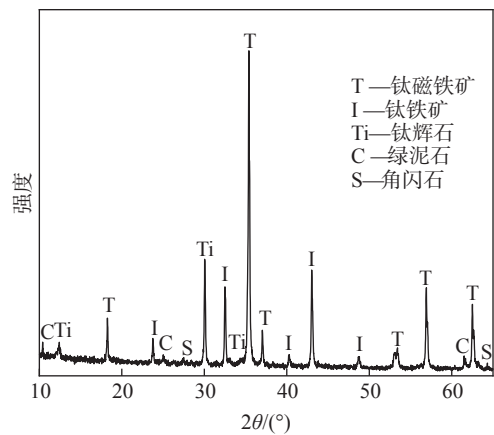


图 1 矿样的 XRD 谱  
Fig. 1 XRD spectra analysis results of the sample

从表 1 可见, 矿样铁品位为 55.61%, 试样中的杂质主要为 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 CaO, 其含量分别为 2.70%、3.51% 和 1.97%。

从图 1 可见, 试样中的铁主要以钛磁铁矿的形式存在, 少部分以钛铁矿的形式存在; 主要脉石矿物为钛辉石, 另外还有少量的角闪石、绿泥石等硅酸盐矿物, 这与表 1 化学多元素分析结果基本一致。从图 2 可见, 原料粒度较细, 且颗粒粗细不均, 大颗粒表面无选择性粘附相当数量的小颗粒; 粗颗粒点 A 处含有大量 Fe 和 O 元素, 细颗粒 B 处含有大量 O、Fe、Si、Al 元素, 表明原料中有用铁矿物表面无选择性粘附部分细的硅酸盐脉石矿物。

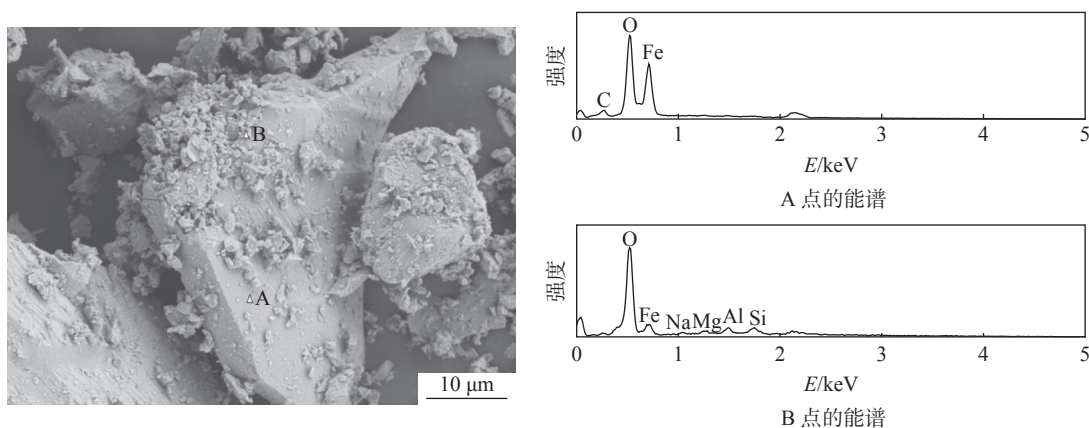


图 2 矿样 SEM 形貌及 A、B 点的 EDS 能谱分析结果

Fig. 2 SEM of sample and EDS patterns of points A and B shown in Fig.2

本试样取自现场磁选作业的混合粗精矿。对试样采用筛分法进行粒度分析,结果见表 2。由表 2 可知,随着粒度降低,TFe 品位呈先增加后降低。结合扫描电镜分析结果可知,部分细粒级钛磁铁矿和脉石矿物相互团聚,导致细粒级钛磁铁矿 TFe 品位偏低,因此强化细粒级铁矿物的回收,是提高选矿作业铁品位的关键。

表 2 矿样筛析试验结果

Table 2 The sieve analysis results of the sample

| 粒级/ $\mu\text{m}$ | 产率/%   | TFe品位/% | TFe分布率/% |
|-------------------|--------|---------|----------|
| -74 ~ +48         | 20.45  | 54.18   | 19.92    |
| -48 ~ +38         | 11.27  | 54.69   | 11.08    |
| -38 ~ +30         | 12.82  | 55.03   | 12.69    |
| -30 ~ +23         | 51.27  | 57.25   | 52.78    |
| -23 ~ +18         | 2.99   | 48.75   | 2.62     |
| -18               | 1.20   | 41.83   | 0.91     |
| 合计                | 100.00 | 55.61   | 100.00   |

选取对钛磁铁矿分散效果较强的分散剂,是进行细粒级钛磁铁矿与脉石矿物有效分离的必要条件。试验所用的分散剂有焦磷酸钠( $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ , 分析纯)、水玻璃( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , 模数 2.4, 工业级)和六偏磷酸钠( $(\text{NaPO}_3)_6$ , 分析纯),pH 调整剂氢氧化钠( $\text{NaOH}$ )和盐酸( $\text{HCl}$ )均为分析纯。所有试验用水均为去离子水。

## 1.2 试验方法

分散效果试验:称取 2.00 g 试验矿样,矿浆浓度调至 2%,加入分散剂,用 pH 调整剂调节 pH 值后置于数显高速搅拌机中机械搅拌分散 5 min (转速 1 992 r/min),迅速将矿浆转移至 100 mL 量筒中,摇匀后静置沉降一定时间(沉降时间根据斯托克斯沉

降公式计算出矿物的中粒径  $D_{50}$  自由沉降 50 mL 所需时间为 3 min),再吸取其上清液,在浊度仪(HACH—1900C)上进行悬浮液的浊度测量,每个试验条件测量 3 次后取平均值,测量所得浊度越大,分散剂对矿粒的分散效果越好。

强化分散—磁选试验:试验矿样经混匀、缩分、装袋后,称取 20 g 试验矿样,矿浆浓度调至 20%,加入一定量分散剂,用 pH 调整剂调节 pH 值后经过数显高速搅拌机(1 992 r/min)搅拌 5 min,使矿物颗粒充分分散;然后置于 GMT-6 型高效脉冲脱磁器中脱磁后,放入 XCGS74-φ50 型磁选管中进行磁选,最后将磁选的最终精矿和尾矿进行烘干、称重、化验,根据其品位和回收率衡量分选效果。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 分散剂种类与用量对分选指标的影响

分别考察不同分散剂种类和用量对矿浆分散度的影响,以水玻璃、六偏磷酸钠和焦磷酸钠为分散剂时的矿浆 pH=10,试验结果如图 3 所示。

由图 3 可知,在相同条件下,无论是何种分散剂,随着分散剂用量的增加,矿浆的分散度先显著提高再趋于稳定。综合比较 3 种药剂,六偏磷酸钠分散效果最好。因此,选用六偏磷酸钠为该微细粒钛磁铁矿强化分散—磁选试验的分散剂。

为了进一步优化强化分散—磁选药剂制度,对分散剂用量进行了试验,试验所用的分散剂为六偏磷酸钠,磁场强度为 200 kA/m,矿浆浓度为 20%,搅拌速度 1 992 r/min、搅拌时间 3 min、矿浆 pH=10,考察了分散剂用量对磁选指标的影响,试验结果如图 4 所示。

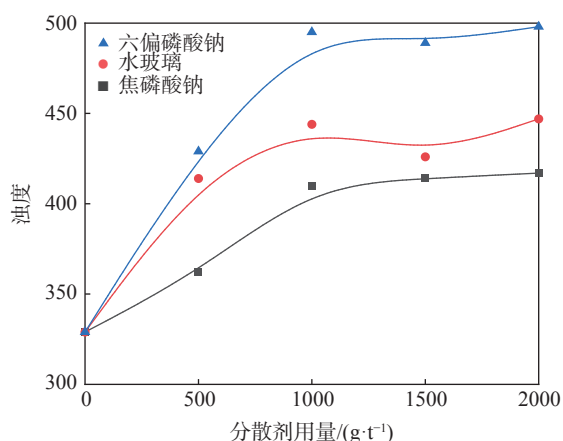


图3 分散剂种类和用量对分散度的影响

Fig. 3 Effect of types and dosage of dispersant on dispersity

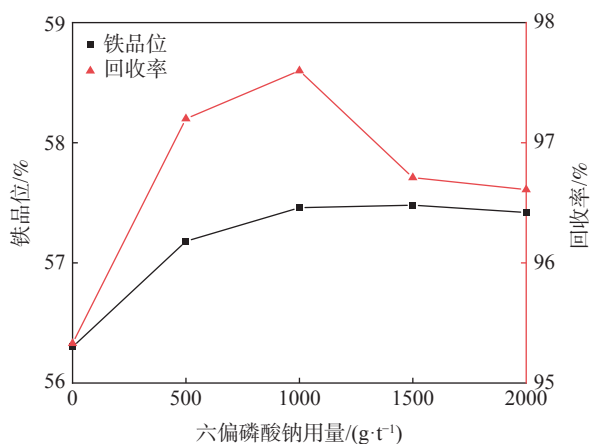


图4 分散剂用量对磁选指标的影响

Fig. 4 Effect of dispersant dosage on magnetic separation index

由图4可知,随着六偏磷酸钠用量的增加,钛磁铁矿铁品位先提高再趋于稳定,磁选精矿铁品位保持在57.46%;精矿铁回收率整体呈先提高后降低趋势,在六偏磷酸钠用量在1000 g/t时,铁回收率达96.6%。综合考虑,六偏磷酸钠用量为1000 g/t时选别指标较好。

品位提升是因为钛磁铁矿中铁主要富集在 $-0.037\text{ mm} \sim +0.015\text{ mm}$  粒级中,这部分矿料粒度较细,比表面积大、表面能高,容易发生无选择性吸附和聚团。通过加入无机分散剂,溶液中分散剂电离出的离子覆盖于矿物颗粒表面,增大了颗粒之间表面电位的绝对值,提高颗粒相互之间的静电排斥作用力,使得矿浆的分散度提高。回收率下降是因为 $-0.015\text{ mm}$  粒级中,微细粒级铁矿物因为分散作用使得颗粒粒度减小,不利于形成铁矿物磁团聚,因此需

要更强的磁场强度才能回收<sup>[14]</sup>,从而增加了这一部分微细粒级钛磁铁矿的流失。

## 2.2 pH 值对分选指标的影响

矿浆 pH 值影响矿物表面的电性和药剂在矿浆中水解组分的浓度,因而影响矿物表面对药剂的吸附。在六偏磷酸钠用量 1000 g/t、搅拌速度 1992 r/min、搅拌时间 3 min、磁场强度 200 kA/m 条件下,探究 pH 值对分选效果的影响,结果如图5所示。

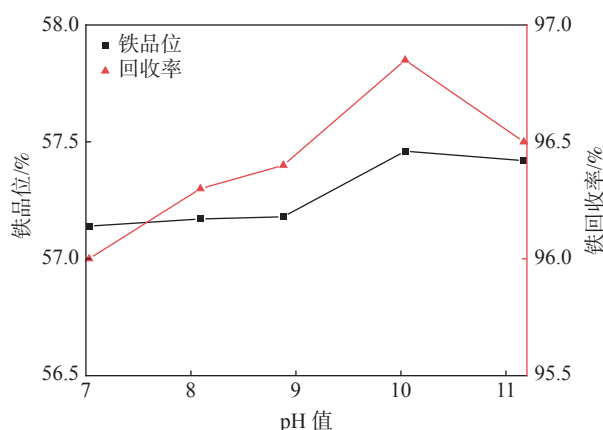


图5 矿浆 pH 值对磁选粗精矿指标的结果

Fig. 5 Effect of pH value on magnetic separation index

从图5可以看出随着矿浆 pH 值由7增加至10时,磁选精矿铁品位逐渐上升,继续提高矿浆 pH 值,磁选精矿铁品位基本保持不变,保持在57.46%,铁回收先上升至96.85%,然后有所降低。综合考虑,确定适宜的 pH 值为10。

## 2.3 磁场强度对分选指标的影响

为了确定适宜分选的磁场强度,在六偏磷酸钠用量 1000 g/t、搅拌速度 1992 r/min、搅拌时间 3 min、pH 值=10 条件下,考查了磁场强度对预先脱磁后的微细粒钛铁矿铁品位和回收率的影响,并与脱磁—直接磁选工艺分选结果进行了对比,试验结果如图6所示。

由图6直接磁选分选指标可知,随着磁场强度的增强,精矿铁品位逐渐降低,铁回收率呈先上升后下降趋势,当磁感应强度为 150 kA/m 时,可获得精矿铁品位 56.5%,铁回收率 94.48% 的分选指标,精矿铁品位仅提高了 0.89 个百分点,这是因为微细粒钛磁铁矿矿料较细,其比表面积大、表面能高,细颗粒很容易发生无选择性吸附和聚团,微细粒钛磁铁矿在磁场中磁团聚时,很容易发生夹杂现象影响精矿铁品位。因此仅通过单一磁选,分选指标较差。

由图6强化分散—磁选分选指标可知,随着磁场强度的增强,精矿铁品位呈先下降后上升的趋势,铁回收率逐渐上升,当磁场强度为300 kA/m时,可获得精矿铁品位57.69%、铁回收率98.1%的较优分选指标。这是因为钛磁铁矿属于强磁性矿物,在弱磁场中能够取得较高的品位,但产率较低;随着磁场强度由100 kA/m提高到200 kA/m,夹杂现象也随之加重,使得精矿铁品位逐渐降低,当磁场强度由200 kA/m提高到300 kA/m,精矿铁品位逐渐上升,这是因为-0.015 mm粒级中,微细粒级铁矿物因为分散作用使得颗粒粒度减小,不利于形成铁矿物磁团聚,因此需要更强的磁场强度才能回收。

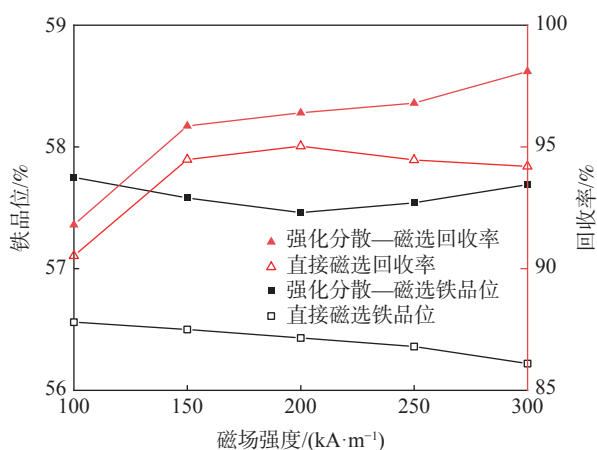


图6 磁场强度对磁选指标效果的影响

Fig. 6 Effect of magnetic field intensity on magnetic separation index

## 2.4 最终精矿筛析试验结果

将在矿浆浓度20%、机械搅拌速度1 992 r/min、搅拌时间3 min、六偏磷酸钠用量1 000 g/t、矿浆pH值10、磁场强度3 010 kA/m条件下获得的最终精矿进行筛析试验,结果见表3。

表3 最终精矿筛析试验结果

Table 3 The sieve analysis results of the final concentrate

| 粒级/ $\mu\text{m}$ | 产率/%   | TFe品位/% | TFe分布率/% |
|-------------------|--------|---------|----------|
| -74 ~ +48         | 19.41  | 56.08   | 18.88    |
| -48 ~ +38         | 14.96  | 56.46   | 14.65    |
| -38 ~ +30         | 17.08  | 58.08   | 17.21    |
| -30 ~ +23         | 38.25  | 59.02   | 39.15    |
| -23 ~ +18         | 6.87   | 56.83   | 6.77     |
| -18               | 3.43   | 56.23   | 3.34     |
| 合计                | 100.00 | 57.65   | 100.00   |

由表3可知,最终精矿各粒级TFe均有提高,-23  $\mu\text{m}$ 粒级的TFe品位显著提高,说明六偏磷酸钠的加入,能够有效削弱微细粒钛磁铁矿与脉石矿物间的异相凝聚,从而有效的分选微细粒钛磁铁矿。

## 2.5 分散机理分析

根据DLVO经典理论,悬浮液中微细粒矿物颗粒之间的存在状态是基于颗粒间的静电力( $V_E$ )和范德华力( $V_W$ )的加和,利用经典DLVO理论分析六偏磷酸钠对钛磁铁矿分散的影响机理。

DLVO理论模型为:

$$V_T = V_W + V_E \quad (1)$$

式中, $V_W$ 为范德华相互作用能,J; $V_E$ 为静电相互作用能,J。

范德华相互作用能 $V_W$ 为:

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

$$A_{132} = (\sqrt{A_{11}} - \sqrt{A_{33}})(\sqrt{A_{22}} - \sqrt{A_{33}}) \quad (3)$$

式中, $H$ 为颗粒间相互作用距离,nm; $A$ 为颗粒在真空中的Hamaker常数, $A_{11}$ , $A_{22}$ 分别代表物质1和2在真空中的相互作用的Hamaker常数, $A_{33}$ 代表水在真空中相互作用的Hamaker常数, $A_{132}$ :物质1和2在水溶液中相互作用的Hamaker常数, $A_{11}=21.5 \times 10^{-20}$  J,  $A_{22}=8.6 \times 10^{-20}$  J,  $A_{33}=4.0 \times 10^{-20}$  J; $R$ 为颗粒半径,这里取 $R_1=R_2=5 \times 10^{-6}$  m<sup>[15]</sup>。

静电相互作用能 $V_E$ 为:

$$V_E = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r R_1 R_2}{(R_1 + R_2)} (\psi_1^2 + \psi_2^2) \cdot \left\{ \frac{2\psi_1 \psi_2}{(\psi_1^2 + \psi_2^2)} p + q \right\}$$

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

$$q = \ln [1 - \exp(-2\kappa H)] \quad (4)$$

式中, $\epsilon_0$ 为真空中绝对介电常数, $\epsilon_0=8.854 \times 10^{-12}$  C<sup>-2</sup>·J<sup>-1</sup>·m<sup>-1</sup>;  $\epsilon_r$ 为水介质的绝对介电常数, $\epsilon_r=78.5$  C<sup>-2</sup>·J<sup>-1</sup>·m<sup>-1</sup>;  $\psi$ 为矿物的表面电位, $\psi_1$ 代表钛磁铁矿的表面电位, $\psi_2$ 代表钛辉石的表面电位,V; $\kappa^{-1}$ 为Debye长度,nm,代表双电层厚度<sup>[16]</sup>。

根据DLVO理论公式,计算出pH=10时,强化分散前后矿物颗粒间相互作用总势能和颗粒间距的关系。绘制出两颗粒之间相互作用能和间距的关系如图7所示。

根据强化分散前的静电作用能和范德华作用能

曲线(图7(a))发现:钛磁铁矿和钛辉石颗粒间的相互作用能始终为负值,颗粒之间存在较强的吸引作用,很容易发生异相凝聚。加入六偏磷酸钠强化分

散后,有助于提高矿物颗粒的表面电位,从而加大颗粒间的静电排斥力,最终使钛磁铁矿和钛辉石趋于稳定的分散状态。

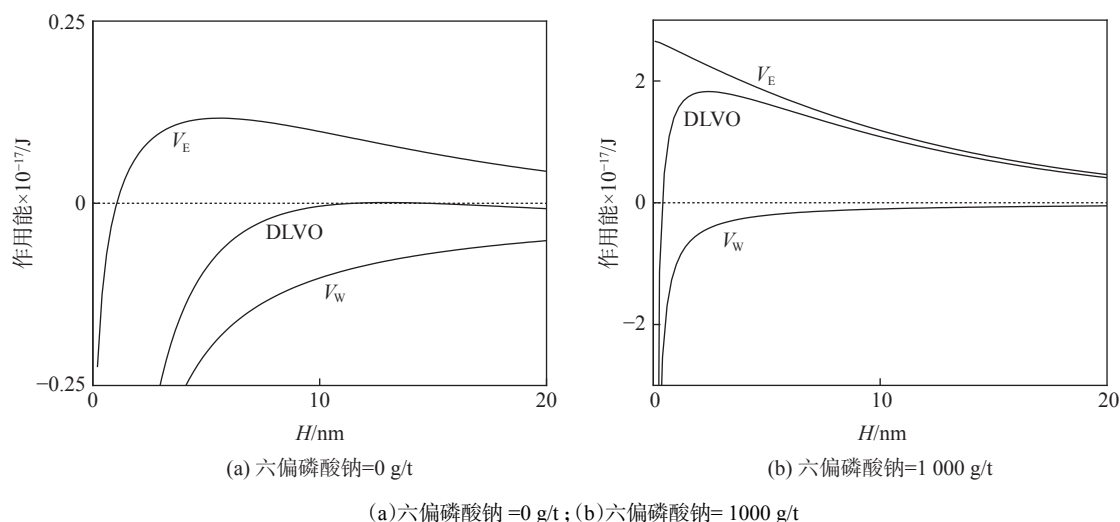


图7 钛磁铁矿与钛辉石相互作用势能曲线

Fig. 7 Potential energy curve for the interaction of titanomagnetite with titanite

### 3 结论

1)攀西某微细粒钛磁铁矿粗精矿品位为55.61%,粒度较细,主要铁矿物有钛磁铁矿和钛铁矿,脉石矿物主要是钛辉石,其次是角闪石和绿泥石。扫描电镜下观察发现,原料粒度较细,且颗粒粗细不均,有用铁矿物表面无选择性粘附部分细的硅酸盐脉石矿物,大量的有用铁矿物颗粒和脉石颗粒异相凝聚,是造成微细粒钛磁铁矿粗精矿提铁降杂困难的主要原因。

2)采用强化分散—磁选后,在六偏磷酸钠用量

1 000 g/t、磁场强度300 kA/m、搅拌速度1 992 r/min、搅拌时间3 min、矿浆浓度20%、pH值=10时可获得TFe品位57.69%、TFe回收率98.1%的铁精矿。相较于微细粒钛磁铁矿粗精矿TFe品位提高了2.08个百分点。因此,建议先对微细粒钛磁铁矿进行脱磁处理,然后再加入分散剂进行强化分散。这样可以有效提高钛磁铁矿的选别效果。

3)DLVO理论分析表明,当六偏磷酸钠加入时,钛磁铁矿与钛辉石之间的相互作用能由吸引变为排斥,从而促进它们的分散。

### 参考文献

- [1] Zhang Xiang. The present situation and countermeasures of iron ore resource safety in China[J]. Fujian Metallurgy, 2021, 50(3): 3.  
(张翔. 浅谈我国铁矿资源安全的现状和对策[J]. 福建冶金, 2021, 50(3): 3.)
- [2] Cheng Xiangyu, Qian Gongming, Cai Xianyan. The research progress of pretreatment technology for complex refractory iron ore[J]. Metal Mine, 2020(12): 1-11.  
(程翔宇, 钱功明, 蔡先炎, 等. 复杂难选铁矿石预处理方法的研究进展[J]. 金属矿山, 2020(12): 1-11.)
- [3] Chen Chao, Zhang Yushu, Li Xiaoyu, *et al.* Research progress in titanium-magnetite beneficiation technology[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(3): 7.  
(陈超, 张裕书, 李潇雨, 等. 钛磁铁矿选矿技术研究进展[J]. 矿产综合利用, 2021(3): 7.)
- [4] Wang Xun, Han Yuexin, Li Yanjun, *et al.* Research status on comprehensive development and utilization of vanadium-titanium magnetite[J]. Metal Mine, 2019(6): 33-37.

- (王勋, 韩跃新, 李艳军, 等. 钒钛磁铁矿综合利用研究现状 [J]. 金属矿山, 2019(6): 33–37.)
- [5] Ku Jiangang, Zhang Wenbin. Experimental study on -45  $\mu\text{m}$  part of Panzhihua vanadium and titanium bearing magnetic ore to improve the concentrate[J]. China Mining Magazine, 2005, 14(11): 3.  
(库建刚, 张文彬. 提高攀枝花钒钛磁铁矿-45 $\mu\text{m}$ 精矿指标的试验研究 [J]. 中国矿业, 2005, 14(11): 3.)
- [6] Chen Bi, Li Weiwei, Wang Yong. Study on the difficulties of improving the quality of Panzhihua and Baima vanadium titanium magnetite iron concentrates[J]. Modern Mining, 2022, 38(10): 258–261.  
(陈碧, 李韦韦, 王勇. 攀枝花白马钒钛磁铁矿铁精矿提质的难点研究 [J]. 现代矿业, 2022, 38(10): 258–261.)
- [7] Su Youshun, Zeng Haipeng, Huang Hongjun. Dispersion mechanism of sodium hexametaphosphate on potassium feldspar and hematite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(2): 61–65.  
(舒有顺, 曾海鹏, 黄红军. 六偏磷酸钠对钾长石和赤铁矿的分散作用机理 [J]. 矿冶工程, 2023, 43(2): 61–65.)
- [8] Lu Yiping, Zhang Mingqiang, Feng Qiming, *et al.* Effect of sodium hexametaphosphate on separation of serpentine from pyrite[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(1): 208–213.  
(卢毅屏, 张明强, 冯其明, 等. 六偏磷酸钠在蛇纹石与黄铁矿分离中的作用 [J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(1): 208–213.)
- [9] Li Dong, Zhong Hedong, Yin Wanzhong, *et al.* Classification-dispersion flotation of fine mixed magnetic concentrate[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2021, 42(12): 1761–1767.  
(李东, 钟河东, 印万忠, 等. 微细粒混合磁选精矿分级——分散浮选试验研究 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(12): 1761–1767.)
- [10] Deng Chuanhong, Ma Juner, Zhang Guofan, *et al.* Effect of water glass on floatation of ilmenite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(3): 6.  
(邓传宏, 马军二, 张国范, 等. 水玻璃在钛铁矿浮选中的作用 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(3): 6.)
- [11] Wang Yuhua, Chen Xinghua, Hu Yeming, *et al.* Influences of phosphates on dispersion of fine alumin-silicate minerals[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2007, 38(2): 7.  
(王毓华, 陈兴华, 胡业民, 等. 磷酸盐对细粒铝硅酸盐矿物分散行为的影响 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(2): 7.)
- [12] Su Tao, Chen Tiejun, Zhang Yimin, *et al.* Influence of dispersion-flocculation on micro-fine magnetite low intensity magnetic separation[J]. Metal Mine, 2016(9): 83–87.  
(苏涛, 陈铁军, 张一敏, 等. 分散—絮凝对某微细粒磁铁矿弱磁精选效果的影响 [J]. 金属矿山, 2016(9): 83–87.)
- [13] Xu Pengyun. Study on dispersion-magnetic separation of finely-grained weakly-magnetic iron minerals[D]. Changsha: Central South University, 2013.  
(许鹏云. 细粒级弱磁性铁矿物分散—磁选研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2013.)
- [14] Li Lixia, Shen Shuaiping, Yuan Zhitao, *et al.* Loss mechanism of fine-grained ilmenite in magnetic separation[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(11): 138–144.  
(李丽匣, 申帅平, 袁致涛, 等. 微细粒钛铁矿磁选回收率低原因分析 [J]. 中国矿业, 2018, 27(11): 138–144.)
- [15] Seno Manabu. Handbook of chemical formulas[M]. Li Xuefen, Cao Yong, Translator. Beijing: Science Press, 1987.  
(妹尾学. 化学公式手册 [M]. 李学芬, 曹镛, 译. 北京: 科学出版社, 1987.)
- [16] Zhu Yangge. Research on theory and technology of micro-fine ilmenite flotation[D]. Changsha: Central South University, 2013.  
(朱阳戈. 微细粒钛铁矿浮选理论与技术研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2013.)

编辑 杨冬梅