

铝土矿反浮选体系分散与凝聚理论<sup>①</sup>

骆兆军, 胡岳华, 王毓华, 邱冠周

(中南大学 矿物工程系, 长沙 410083)

**[摘 要]** 在铝土矿反浮选脱硅过程中, 矿浆悬浮液的分散和凝聚状态对微细粒一水硬铝石的回收和精矿铝硅比有显著影响。要使各种硅酸盐矿物混合物达到有效的选择性分离, 首先必需使矿浆悬浮液处于最佳分散状态, 避免各种矿物细粒间的相互混杂和矿泥罩盖。针对高硅铝土矿反浮选脱硅过程, 根据经典 DLVO 理论, 从颗粒间的相互作用分析了微细粒一水硬铝石在各种含硅脉石矿物表面的粘附情况。结果表明: 一水硬铝石与含硅脉石矿物颗粒间的范德华相互作用总是吸引; 而它们间的静电相互作用在弱碱性条件下时为排斥, 在弱酸性条件下时为吸引, 一水硬铝石的夹带上浮较为严重, 不利于铝土矿的反浮选。

**[关键词]** 铝土矿; 分散与凝聚; DLVO 理论; 浮选

**[中图分类号]** TD 923

**[文献标识码]** A

颗粒间的相互作用对细粒矿物的选择性凝聚、分散及矿粒与气泡的粘附起着重要作用。同类颗粒间的相互作用影响着自生载体浮选、选择性絮凝、疏水凝聚等过程, 而异类颗粒间的相互作用则影响着异类载体浮选、油团聚及矿粒与气泡的粘附过程<sup>[1, 2]</sup>。异类矿粒与同类颗粒之间的相互作用明显不同, 同类颗粒间范德华力总是引力, 静电力总是斥力, 而异类颗粒间的范德华力及静电力可以是引力, 也可以是斥力, 这取决于体系性质<sup>[3, 4]</sup>。在铝土矿反浮选矿浆体系中, 异类矿物颗粒间会发生相互混杂和矿泥罩盖, 致使一水硬铝石夹带上浮, 严重影响浮选指标。因而矿浆体系良好的分散状态是保证反浮选顺利进行的必要条件。为此, 首先要弄清异类颗粒间的相互作用关系, 以便最大限度地控制矿浆的分散状态, 使其有利于反浮选过程。本文作者依据经典的 DLVO 理论, 从范德华相互作用和静电相互作用入手, 探讨微细粒一水硬铝石在含硅脉石矿物表面的粘附情况。

从前人的研究结果可知, 矿粒间的总作用能  $V_T$  可用 DLVO 理论的通式表示<sup>[5]</sup>:

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

式中  $V_w$  为颗粒间范德华相互作用能,  $V_E$  为颗粒间的静电相互作用能。在铝土矿反浮选矿浆体系中, 有较为复杂的物质组成。所研究的铝土矿其有用矿物为一水硬铝石, 含硅脉石矿物分别为高岭

石、叶蜡石和伊利石, 故对铝土矿矿浆所研究的是—水硬铝石(物质 1)和含硅脉石矿物(物质 2)在水介质(介质 3)中的相互作用情况。

## 1 异类矿物颗粒间的范德华相互作用

由于在铝土矿反浮选过程中, 微细粒一水硬铝石的夹带上浮现象较为明显, 所以这里研究 5  $\mu\text{m}$  一水硬铝石和 45  $\mu\text{m}$  的含硅脉石矿物间的相互作用情况。各种矿粒的 Hamaker 常数为: 一水硬铝石  $A_{11} = 15.5 \times 10^{-20} \text{ J}$ , 含硅脉石矿物  $A_{22} = 8.6 \times 10^{-20} \text{ J}$ , 水  $A_{33} = 4 \times 10^{-20} \text{ J}$ , 则一水硬铝石和含硅脉石矿物在水中相互作用的有效 Hamaker 常数由下式给出<sup>[6, 7]</sup>:

$$A_{132}/J = (\sqrt{A_{11}} - \sqrt{A_{33}}) \cdot (\sqrt{A_{22}} - \sqrt{A_{33}}) = 1.81 \times 10^{-20} \quad (2)$$

若  $r_1$  和  $r_2$  分别为两矿物颗粒半径, 单位为  $\mu\text{m}$ ,  $H$  为矿粒间的距离, 单位为  $\text{nm}$ , 则微细粒一水硬铝石与粗粒含硅脉石矿物颗粒间的范德华相互作用能为<sup>[8-10]</sup>

$$V_w/J = -\frac{A_{132}}{6H} \left( \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \right) = -\frac{1.36 \times 10^{-16}}{H} \quad (3)$$

由计算结果可知: 颗粒间相互作用能为负值, 即—水硬铝石与含硅脉石矿物颗粒间的范德华相互作用总是吸引。如图 1 所示, 颗粒间距超过 30  $\text{nm}$

① [基金项目] 国家重大基础研究发展规划项目(G19999064901-1)  
[作者简介] 骆兆军(1969-), 女, 副教授, 博士。

[收稿日期] 2001-02-20; [修订日期] 2001-03-13

时,相互间的引力减小,且变化较小,颗粒间距小于 20 nm 时,相互间的引力急剧增加。

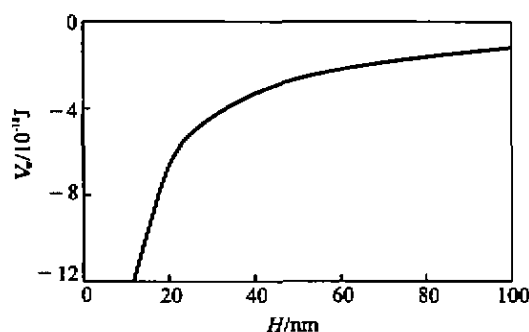


图1 一水硬铝石与含硅脉石矿物间的范德华相互作用能

Fig.1 Van Der Waals interaction between diaspore and silicate minerals

## 2 异类矿物颗粒间的静电相互作用

颗粒半径分别为  $r_1$  和  $r_2$  的两粒子间的静电相互作用能由下式给出:

$$V_E = \frac{\pi \epsilon_a r_1 r_2}{r_1 + r_2} (\varphi_{01}^2 + \varphi_{02}^2) \left[ \frac{2 \varphi_{01} \varphi_{02}}{\varphi_{01}^2 + \varphi_{02}^2} p + q \right] \quad (4)$$

式中  $\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon_r$ ,  $\epsilon_0$  为真空中绝对介电常数,  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{J} \cdot \text{m})$ ,  $\epsilon_r$  为分散介质相对介电常数,水介质的  $\epsilon_r = 78.5$ , 则  $\epsilon_a = 6.95 \times 10^{-10} \text{ C}^2/(\text{J} \cdot \text{m})$ , 且

$$p = \ln \left[ \frac{1 + \exp(-\kappa H)}{1 - \exp(-\kappa H)} \right] \quad (5)$$

$$q = \ln [1 - \exp(-2\kappa H)] \quad (6)$$

式中  $H$  是两颗粒间的距离,  $\kappa^{-1}$  为 Debye 长度, 代表双电层厚度, 在 298 K 时, 对于 1:1 型电解质:

$$\kappa^{-1}/\text{nm} = 0.304/\sqrt{w} \quad (7)$$

式中  $w$  为离子质量分数。假定  $w = 10^{-3}$ , 则

$$\kappa/\text{nm}^{-1} = 0.104$$

由试验分别测得一水硬铝石和各种含硅脉石矿物的  $\zeta$ -电位如表 1 所示。

用  $\zeta$ -电位值近似代替式(4)中的  $\varphi_0$  值, 则由式

表1 各种矿物的  $\zeta$ -电位

Table 1  $\zeta$ -potential value of minerals

pH	Zeta potential/mV			
	Diaspore	Kaolinite	Illite	Pyrophyllite
5.0	+10	-5	-18	-10
8.5	-30	-30	-25	-40

(4)可知,微细粒一水硬铝石与粗粒高岭石间的静电相互作用能:

$$\text{pH}=5.0 \text{ 时}, V_E/J = 1.23 \times 10^{-18} (-0.8p + q) \quad (8)$$

$$\text{pH}=8.5 \text{ 时}, V_E/J = 1.76 \times 10^{-17} (p + q) \quad (9)$$

同理,微细粒一水硬铝石与粗粒伊利石间的静电相互作用能:

$$\text{pH}=5.0 \text{ 时}, V_E/J = 4.16 \times 10^{-18} (-0.85p + q) \quad (10)$$

$$\text{pH}=8.5 \text{ 时}, V_E/J = 1.50 \times 10^{-17} (0.98p + q) \quad (11)$$

微细粒一水硬铝石与粗粒叶蜡石间的静电相互作用能:

$$\text{pH}=5.0 \text{ 时}, V_E/J = 1.96 \times 10^{-18} (-p + q) \quad (12)$$

$$\text{pH}=8.5 \text{ 时}, V_E/J = 2.45 \times 10^{-17} (0.96p + q) \quad (13)$$

由式(8)至(13)作图,可得图2。从图2可以看出,在弱酸性条件下,一水硬铝石与含硅脉石矿物颗粒间静电相互作用是吸引,引力自大而小的顺序依次是:伊利石>叶蜡石>高岭石;而在弱碱性条件下的静电相互作用是排斥,斥力自大而小的顺序依次是:叶蜡石>高岭石>伊利石。在颗粒间距为 2 nm 时,颗粒间的静电相互作用出现一势垒,间距大于或小于 2 nm 时,静电相互作用能急剧减小。

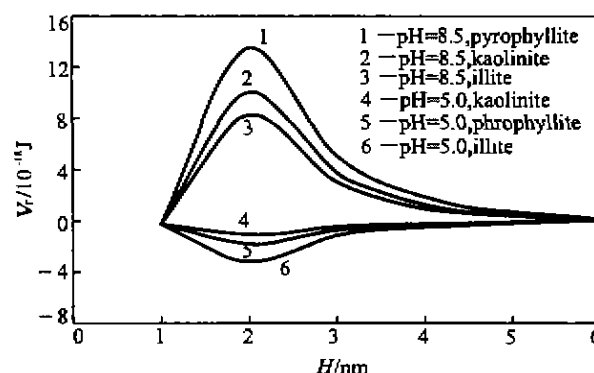


图2 一水硬铝石与含硅脉石矿物间的静电相互作用能

Fig.2 Double layer interaction between diaspore and silicate minerals

## 3 异类颗粒间的 DLVO 相互作用

根据上面的计算结果,并结合式(1)可得出微细粒一水硬铝石与各种粗粒含硅脉石矿物间总的相

互作用能。一水硬铝石与高岭石间总的相互作用能:

$$\text{pH}=5.0 \text{ 时, } V_T/J = -1.36 \times 10^{-16}/H + 1.23 \times 10^{-18}(-0.8p+q) \quad (14)$$

$$\text{pH}=8.5 \text{ 时, } V_T/J = -1.36 \times 10^{-16}/H + 1.76 \times 10^{-17}(p+q) \quad (15)$$

一水硬铝石与伊利石间总的相互作用能:

$$\text{pH}=5.0 \text{ 时, } V_T/J = -1.36 \times 10^{-16}/H + 4.16 \times 10^{-18}(-0.85p+q) \quad (16)$$

$$\text{pH}=8.5 \text{ 时, } V_T/J = -1.36 \times 10^{-16}/H + 1.50 \times 10^{-17}(0.98p+q) \quad (17)$$

一水硬铝石与叶蜡石间总的相互作用能:

$$\text{pH}=5.0 \text{ 时, } V_T/J = -1.36 \times 10^{-16}/H + 1.96 \times 10^{-18}(-p+q) \quad (18)$$

$$\text{pH}=8.5 \text{ 时, } V_T/J = -1.36 \times 10^{-16}/H + 2.45 \times 10^{-17}(0.96p+q) \quad (19)$$

由式(14)至(19)作图,可得图3。从图3可以看出,在弱碱性条件下,颗粒间距在2 nm左右时,一水硬铝石与叶蜡石间的总相互作用能为正值,即相互作用为排斥,其它情况下颗粒间的相互作用均为吸引。在弱酸性条件下,一水硬铝石与叶蜡石、伊利石、高岭石间的吸引力较大,自大而小的顺序依次是伊利石>叶蜡石>高岭石。在弱碱性条件下,颗粒间的吸引力较小,自大而小的顺序依次是伊利石>高岭石>叶蜡石。因此可以得出下述结论:在铝土矿反浮选过程中,弱碱性条件时矿浆的分散状态较好,而在弱酸性条件下,一水硬铝石在含硅脉石矿物表面发生罩盖,引起一水硬铝石的夹带上浮,从而影响浮选指标。表2所列是铝土矿反浮选实验指标,可以看出,加入分散剂能显著改善

表2 分散剂对浮选指标的影响

Table 2 Influence of dispersant on flotation

Dispersant	Al/Si ratio of concentrate	Recovery of $\text{Al}_2\text{O}_3$ / %
None	7.26	71.57
P(1 000 g/t)	7.56	76.58
F(1 000 g/t)	8.67	73.24
F(700 g/t) + J(200 g/t)	9.46	72.55

精矿铝硅比、提高  $\text{Al}_2\text{O}_3$  回收率。

## 4 结论

1) 微细粒一水硬铝石与粗粒含硅脉石矿物颗粒间的范德华相互作用为吸引。

2) 微细粒一水硬铝石与粗粒含硅脉石矿物颗粒间静电相互作用,在弱碱性条件下为排斥,在弱酸性条件下为吸引。

3) 微细粒一水硬铝石与粗粒含硅脉石矿物间总的相互作用,在弱酸性条件时的吸引力远远大于弱碱性条件,所以在弱酸性条件时,一水硬铝石的夹带上浮较为严重,不利于铝土矿的反浮选。

4) 实际矿石的反浮选试验表明,加入分散剂有利于精矿铝硅比和一水硬铝石回收率的提高。

## [REFERENCES]

- [1] Feng D, Aldrich C. Effect of particle size on flotation performance of complex sulphide ores [J]. Minerals Engineers, 1999, 12(7): 721-731.
- [2] FANG Qi-xue(方启学), HUANG Guo-zhi(黄国智), LUO Jia-ke(罗家珂), et al. 分散剂的分散效果与作用方式研究 [J]. Nonferrous Metals(有色金属), 2000 (3): 37-41.
- [3] DAI Shao-tao(戴勺涛), QIU Guan-zhou(邱冠周), Qin Wen-qing(覃文庆), et al. 微细粒锡石的凝聚与分散理论与实践 [J]. Nonferrous Metals(有色金属), 1998 (1): 33-39.
- [4] HE Bo-quan(何伯泉), CHEN Xiang-yong(陈祥涌) transl. Surface Chemistry of Foam Flotation(泡沫浮选表面化学) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1987. 182-255.
- [5] Hiemenz P C. Principles of Colloid and Surface Chemistry [M]. Beijing: Beijing University Press, 1986. 251-306.
- [6] 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 Sci-

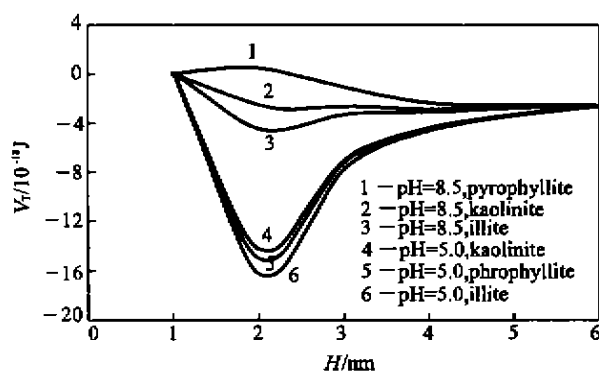


图3 一水硬铝石与含硅脉石矿物间的总相互作用能  
Fig.3 Total interaction between diaspore and silicate minerals

- ence, 1990, 137(1): 281-288.
- [7] 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.
- [8] QIU Guan-zhou (邱冠周), HU Yue-hua (胡岳华), WANG Dian-zuo (王淀佐). Interactions between Particles and Flotation of Fine Particles (颗粒间相互作用与细粒浮选)[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1993. 26-80.
- [9] HU Yue-hua (胡岳华), XU Jing (徐竟), QIU Guan-zhou (邱冠周), et al. 异凝聚理论及应用研究 [J]. *Mining and Metallurgical Engineering (矿冶工程)*, 1994, 14(3): 23-27.
- [10] WANG Dian-zuo (王淀佐). Flotation Reagent Fundamentals and Application (浮选剂作用原理及应用) [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1981. 29-31.

## Mechanism of dispersion and aggregation in reverse flotation for bauxite

LUO Zhao-jun, HU Yue-hua, WANG Yu-hua, QIU Guan-zhou  
(Department of Mineral Engineering, Central South University,  
Changsha 410083, P. R. China)

**[Abstract]** It is required to remove silicate minerals from diasporic bauxite in order to enhance the Al/Si ratio of the bauxite. Flotation, especially reverse flotation, is an effective method for removal of silicate minerals. The particulate state (aggregation/dispersion) of suspension has an evident influence on selective flotation of silicate minerals from diasporic bauxite. The interaction force profiles between diasporic and kaolinite, illite, pyrophyllite have been calculated and the possible heter-aggregation phenomena between diasporic and various silicate minerals has been discussed based on classical DLVO theory. Slime coating and heter-aggregation between aluminium silicate minerals and diasporic should be avoided in order to obtain good flotation separation. It is shown by flotation tests that the use of dispersant plays an important role in improving the reverse flotation process of diasporic-bauxite.

**[Key words]** bauxite; dispersion and aggregation; DLVO theory; flotation

(编辑 吴家泉)