

文章编号: 1004-0609(2004)10-1770-06

氯化钠对铝硅矿物浮选的影响及其作用机理

陈湘清, 胡岳华, 王毓华

(中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

摘要: 采用季铵盐 DTAL 作捕收剂, 研究了氯化钠对一水硬铝石和叶蜡石浮选的影响及其作用机理。随着氯化钠浓度的增加, 叶蜡石的浮选回收率显著提高, 而一水硬铝石的可浮性受其影响很小。机理研究表明: 氯化钠对一水硬铝石的 zeta-电位没有影响, 而能显著降低叶蜡石的 zeta-电位, 增强捕收剂与叶蜡石的静电作用, 促进捕收剂的吸附而活化其浮选; 叶蜡石表面电位的降低是因为氯离子对叶蜡石存在选择性吸附作用并对其结构进行插层, 使得叶蜡石的层间距从 0.93 nm 增大至 1.40 nm。溶液化学计算表明: 氯化钠改变溶液的离子强度, 显著降低了季铵盐阳离子表面活性剂的临界胶束浓度, 使得吸附了捕收剂的矿物表面更容易疏水上浮。

关键词: 氯化钠; 插层作用; 特性吸附; 临界胶束浓度; 浮选

中图分类号: TD 923

文献标识码: A

Effects of sodium chloride on flotation of alumina-silicates minerals and its mechanism

CHEN Xiang-qing, HU Yue-hua, WANG Yu-hua

(School of Resource Processing and Bio-engineering,

Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The effects and mechanisms of sodium chloride on the flotation of diaspor and pyrophyllite with the cationic quaternary ammonium DTAL as a collector were studied. The presence of sodium chloride was determined to activate the flotation of pyrophyllite, leaving diaspor flotation unaffected. Zeta potential measurements corresponded to the flotation tests. It is indicated that sodium chloride decreases marked by the zeta potential of pyrophyllite, leaving the zeta potential of diaspor unaffected. The decline of zeta potential can increase the electrostatic interaction between collectors and pyrophyllite, accordingly prompting the adsorption of the collector and activated the flotation of pyrophyllite. Chloride ion can be selectively adsorbed on the pyrophyllite and the intercalation in the layers of pyrophyllite which resulted in the swell of the d space from 0.93 nm to 1.40 nm. Solution chemistry demonstrates that electrolytical ion would decrease the critical micelle concentration and increase the hydrophobicity of the collector, which have benefits on the separation of diaspor and pyrophyllite.

Key words: sodium chloride; special adsorption; intercalation; critical micelle concentration; flotation

选矿-拜尔法是处理高硅铝土矿生产氧化铝的较好途径^[1], 根据目的矿物-一水硬铝石的流向, 可以将铝土矿的浮选分为正浮选和反浮选工艺。中南工业大学等^[2]在铝土矿的正浮选脱硅工艺上已经取得重大突破, 铝硅比为 5.9 的原矿通过浮选可以达

到铝硅比 11.39、 Al_2O_3 回收率 86.45% 的指标。由于正浮选的精矿产率大, 不符合选矿上浮少抑多的原则, 且精矿脱水困难, 从而提出了反浮选工艺。铝土矿的反浮选常用阳离子捕收剂, 如十二胺^[3,4]、吡啶盐^[5]等。曹等^[6]合成了新型捕收剂 N-

① 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(973)(G1999064901)

收稿日期: 2004-04-28; 修订日期: 2004-06-21

作者简介: 陈湘清(1976-), 男, 博士研究生。

通讯作者: 陈湘清; E-mail: xiangqingchen@tom.com

十二烷基-1, 3 丙二胺, 并考察了其 对铝硅酸盐的浮选性能。在十二胺捕收剂的作用下, 一水硬铝石具有较好的可浮性, 而硅酸盐矿物的可浮性相对较差^[7], 因此, 一水硬铝石的选择性抑制和硅酸盐矿物的强化捕收成为铝土矿反浮选脱硅的两个技术关键。李等^[7, 8]研究了变性淀粉对一水硬铝石的抑制作用, 胡岳华等^[7]发现六偏磷酸钠对一水硬铝石有较好的抑制作用。在硅酸盐矿物的活化浮选研究中所广泛采用的活化剂是氟化物, 但是氟化物的使用对环境造成了一定的影响, 已被逐渐限制使用^[9, 10]。除氟化物之外, 而关于对硅酸盐矿物具有一定活化作用的其他浮选药剂的文献报道很少。

本文作者通过实验发现, 氯化钠对硅酸盐矿物的浮选具有较好的活化作用, 而对一水硬铝石的浮选没有明显的影响。用氯化钠作为矿物浮选的调整剂的报道很少, Moudgil 等^[11]曾将氯化钠用作磷灰石浮选的抑制剂, 而氯化钠对白云石的浮选没有影响, 从而可选择性地将其分离。以往常用的铝土矿浮选用的调整剂有六偏磷酸钠、氟化物等, 它们对环境的影响都较大。作为氯化钠的同系物氯化钾, 对环境没有负面的影响, 若能应用到铝硅矿物的浮选分离中, 不仅对于提高铝土矿的铝硅比有非常重要的作用, 而且对矿山的环境保护也有非常积极的意义。

1 实验

1.1 矿样与试剂

一水硬铝石和叶蜡石分别取自河南小关和河南郑县。块矿经手碎手选后用瓷球磨细筛分至小于 98 μm, 化学分析与 X 射线分析表明其纯度均在 90% 以上。

主要试剂有: NaCl, 广东汕头市西陇化工厂, 分析纯; NaOH 和 HCl 为分析纯, 水为一次蒸馏水; DTAL 为实验室自制。

1.2 浮选实验

浮选实验在挂槽式浮选机中进行。称取 3 g 粒径小于 98 μm 的矿样置于 25 mL 的浮选槽中, 加入给定浓度的氯化钠溶液, 调整 pH 值并搅拌 3 min, 加入捕收剂, 搅拌 2 min, 测定矿浆 pH 值, 浮选 3 min。泡沫产品与槽内产品分别过滤烘干, 称量, 计算回收率。

1.3 动电位测试

用玛瑙研钵将一水硬铝石和叶蜡石样品磨细至粒径小于 5 μm, 将其配成一定浓度的矿浆, 每次吸取 1 mL 矿浆溶液至 50 mL 的蒸馏水中稀释, 在磁力搅拌器上搅拌, 分别与相应的浮选药剂作用 3 min 后, 在 delsa440sx zeta 电位仪上测定矿物的 zeta 电位。

1.4 粉末 X 射线衍射测试

将一水硬铝石和叶蜡石纯矿物样, 分别与不同浓度的氯化钠作用后, 过滤、低温真空干燥, 在 D500 衍射仪上检测分析。

2 结果与分析

用季铵盐 DTAL 作捕收剂, 不同浓度的氯化钠对一水硬铝石和叶蜡石的浮选回收率影响与 pH 值的关系分别见图 1 和图 2。

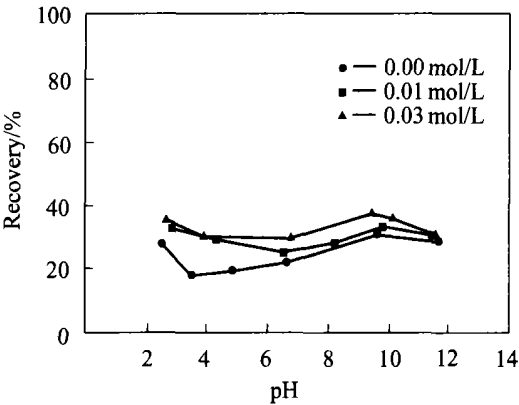


图 1 用 4×10^{-4} mol/L 季铵盐 DTAL 作捕收剂及溶液中含不同浓度氯化钠时一水硬铝石的浮选回收率与溶液 pH 值的关系

Fig. 1 Flotation recoveries of diasporite as function of pH in different concentration of sodium chloride with quaternary ammonium DTAL(4×10^{-4} mol/L) as collector

从图 1 可以看出: 用 DTAL 作捕收剂, 一水硬铝石的可浮性较差, 随着 pH 增加, 一水硬铝石的浮选回收率略有增加, 说明随着 pH 值的增加, 一水硬铝石与阳离子捕收剂的静电作用增强; NaCl 浓度的增加对一水硬铝石的浮选回收率没有明显的影响。图 2 表明, NaCl 能显著改善叶蜡石的可浮性。用 DTAL 作捕收剂, 叶蜡石在酸性条件下具有一定的可浮性, 并且随着 pH 值增大, 其浮选回收率下降。随着 NaCl 浓度增大, 叶蜡石的回收率在实验 pH 值范围内均显著上升, 浮选回收率随着 pH 值

的增加而下降。

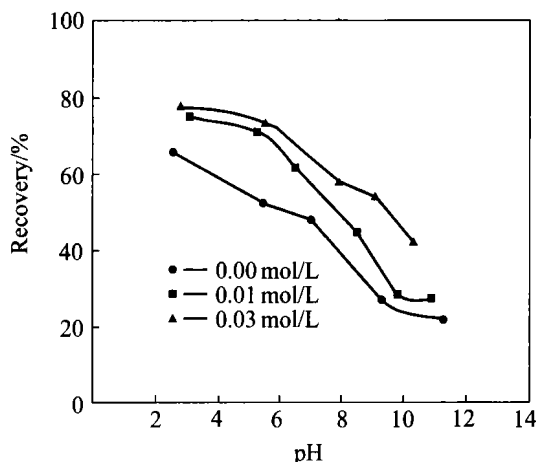


图 2 用季铵盐 DTAL(4×10^{-4} mol/L)作捕收剂和溶液中含不同浓度的氯化钠时叶蜡石的可浮性与溶液 pH 值的关系

Fig. 2 Flotation recoveries of pyrophyllite as function of pH in different concentration of sodium chloride with quaternary ammonium DTAL(4×10^{-4} mol/L) as collector

比较图 1 和 2 可以看出, 在没有 NaCl 作用时, DTAL 对一水硬铝石的捕收能力比较弱, 而对叶蜡石在酸性条件下有较强的捕收能力, 表现出一定的选择性; 在一定浓度的氯化钠存在下, 叶蜡石的回收率进一步增加, 而一水硬铝石的可浮性没有受到明显的影响, 使得一水硬铝石和叶蜡石的可浮性差距加大。因此, 氯化钠可作为一水硬铝石和叶蜡石浮选分离的有效调整剂。

3 氯化钠的作用机理

3.1 氯化钠和 DTAL 对一水硬铝石和叶蜡石 zeta-电位的影响

氧化矿浮选用的阳离子捕收剂与矿物之间的相互作用一般为静电作用。实验测得氯化钠或 DTAL 对一水硬铝石和叶蜡石 zeta-电位的影响分别见图 3 和 4。

从图 3 看出, 氯化钠和季铵盐 DTAL 对一水硬铝石的 zeta-电位没有明显的影响。图 4 表明: 季铵盐在整个 pH 范围内提高了叶蜡石的电位。说明季铵盐在叶蜡石表面有一定的吸附作用, 而在一水硬铝石表面吸附较弱, 这是用季铵盐作捕收剂浮选分离一水硬铝石和叶蜡石的基础。图 4 也表明, 氯化钠在整个 pH 值范围内显著降低了叶蜡石的 zeta-电

位, 并随着 pH 值增加, zeta-电位降低较快; 与氯化钠作用后的叶蜡石再与阳离子捕收剂 DTAL 作用, 叶蜡石的 zeta-电位在实验 pH 范围内又出现较大程度的回升。上述结果表明, 氯离子对一水硬铝石的动电位几乎没有影响而显著降低叶蜡石的动电位, 从而氯化钠对季铵盐在一水硬铝石表面的吸附没有影响, 而能增强捕收剂与叶蜡石表面的静电作用, 活化捕收剂在叶蜡石表面的吸附, 使得叶蜡石的浮选回收率上升。

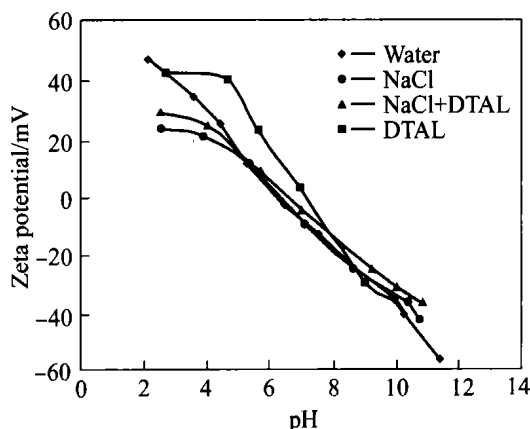


图 3 氯化钠和 DTAL 对一水硬铝石 zeta-电位的影响

Fig. 3 Effects of sodium chloride and DTAL on the zeta potential of diaspore

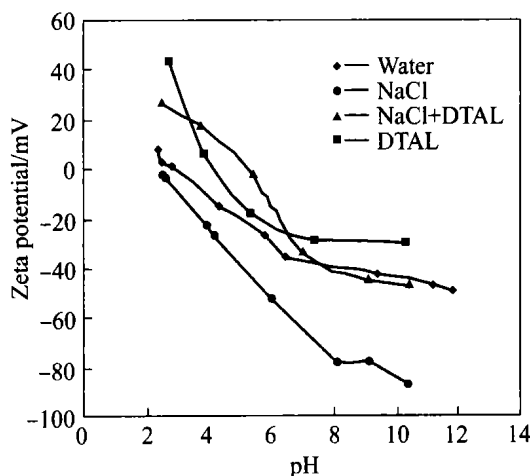


图 4 氯化钠和 DTAL 对叶蜡石 zeta-电位的影响

Fig. 4 Effects of sodium chloride and DTAL on zeta potential of pyrophyllite

3.2 粉末 X 射线衍射分析

由于 X 射线衍射不能检测到低浓度物质的存在或者物质在结构上的较小变化, 实验中采用了适当提高氯化钠作用浓度的办法。与不同浓度的氯化钠溶液作用前后的一水硬铝石和叶蜡石的 XRD 图分别见图 5 和 6。从图中可以看出, 与氯化钠作用

前后, 一水硬铝石的 XRD 曲线没有变化; 而与 4.0 mol/L 的氯化钠作用后的叶蜡石的 XRD 曲线中, 在 $d=1.40\text{ nm}$ ($2\theta=6.30^\circ$) 处明显出现了一个强度不太高的宽衍射峰, 与 0.05 mol/L 的氯化钠作用后叶蜡石的 XRD 曲线的变化相对较小, 这可能与仪器的检测能力有关。叶蜡石的层间距为 0.93 nm ^[13], 与高浓度的氯化钠作用后, 层间距有所增大, 一般被认为是因为氯离子对硅酸盐类矿物有特性吸附作用^[13]或者是氯化钠对层状硅酸盐矿物存在一定的插层作用^[14-17], 本实验结果也说明了氯化钠对层状结构的叶蜡石存在插层作用。

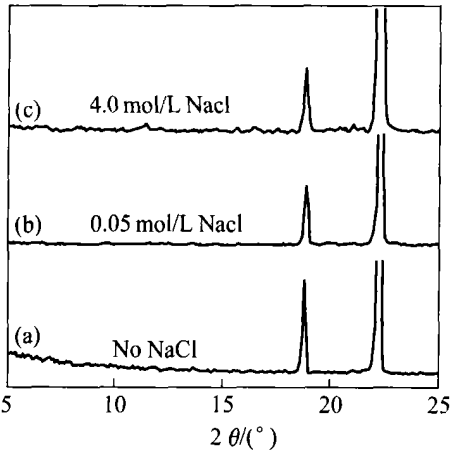


图 5 与不同浓度的氯化钠作用后的一水硬铝石的 XRD 谱

Fig. 5 X-ray diffraction patterns of diasporite in absence or presence of sodium chloride

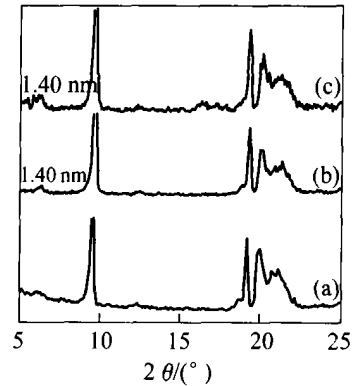


图 6 与不同浓度的氯化钠作用后叶蜡石的 XRD 谱

Fig. 6 X-ray diffraction patterns of pyrophyllite in absence or presence of sodium chloride

(a)—No NaCl; (b)— $0.05\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{ NaCl}$;
(c)— $4.0\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{ NaCl}$

一水硬铝石属斜方晶系, 其结构中 O^{2-} 和 OH^- 共同呈六方最紧密堆积 (堆积层垂直 a 轴), Al^{3+} 充填其 $1/2$ 的八面体空隙。[$\text{AlO}_3(\text{OH})_3$] 八面体以共棱的方式联结成平行于 c 轴的八面体双链; 双链间以共用八面体角顶 (此角顶为 O^{2-} 占据) 的方式相联。具有平行 {010} 的完全解理和平行 {100} 的中等解理^[18]。叶蜡石是三层型层状硅酸盐矿物, 由硅氧四面体/氢氧化铝八面体/硅氧四面体 3 层组成, 单元层与层之间由较弱的范德华力连结在一起。矿物破碎磨细时, 沿层间断裂, 表面残余键以范德华力为主。在叶蜡石的层面上存在铝对硅的同位取代作用, 使层面带上永久的负电荷, 阳离子填充在层间平衡晶格的电荷。当与氯化钠发生作用时, 氯离子通过特性吸附作用力^[13]在叶蜡石表面发生吸附, 由于叶蜡石的晶体结构层有一定的间距, 使得氯离子能够在层间发生扩散作用, 进入叶蜡石的晶体结构层中, 扩大了其层间距, 使得 {001} 面层间距 $d=0.93\text{ nm}$ 增大至 1.40 nm , 并导致矿物带上过剩的负电荷, 与 zeta 电位测试以及 XRD 结果一致。由于一水硬铝石的致密结构, 氯化钠不能发生扩散作用。

氯离子对层状叶蜡石的插层作用显著降低了矿物表面的电位, 加强了矿物对阳离子捕收剂的吸附, 从而改善了叶蜡石的可浮性。

3.3 捕收剂溶液化学

无机离子电解质溶液压缩了表面活性剂离子扩散双电层的厚度, 减少它们之间的排斥作用而明显促进其缔合^[19], 从而降低表面活性剂的临界胶束浓度, 提高表面活性剂的疏水性, 降低了捕收剂用量。临界胶束浓度与溶液中反离子浓度的关系可表示为^[20]

$$\ln c(\text{CM}) = A' - \frac{n_i \phi}{kT} - K_0 \ln c_i \tag{1}$$

式中 A' 为常数, ϕ 为每一个 CH_2 的内聚能, n_i 为直链碳氢链中的碳原子数, c_i 为反离子浓度, k 为 Boltzmann 常数, K_0 是与反离子结合度相关的常数, 可看做是组成胶团的单个离子的电荷分数。

当无外加盐时, $c_i = c_i' = c(\text{CM})$, 于是式 (1) 变为:

$$\log c(\text{CM}) = \frac{A'}{2.303} - \frac{n \phi}{(1 + K_0) 2.303 kT} \tag{2}$$

当加入浓度为 $c(\text{anion})$ 的反离子时, 式 (1) 变为:

$$\ln c(\text{CM}) = A' - \frac{n_i \phi}{kT} -$$

$$K_0 \ln [c(\text{CM}) + c(\text{anion})] \tag{3}$$

根据经验式:

$$\log c(\text{CM}) = A - Bn \tag{4}$$

试验测得在 298 K 时的 $A = 1.64$, $B = 0.286$, 以及疏水缔合能为 $\phi = -0.76 RT$, 根据式(2), 可知:

$$A' = 2.303A \tag{5}$$

$$B = \frac{\phi}{(1 + K_0)2.303k} \tag{6}$$

解以上方程可得到在不同浓度的反离子作用下表面活性剂的临界胶束浓度值, 结果列于表 1。由表 1 可以看出, 即使加入极其少量的反离子, 也可显著降低捕收剂的临界胶束浓度, 使得捕收剂在较低的浓度下就在矿物表面形成胶束, 这种作用称为“盐效应”。临界胶束浓度值越小, 捕收剂的疏水性越大, 捕收性越强。因此, 当采用离子型表面活性剂作捕收剂时, 加入一定量的无机盐可以提高捕收剂的捕收性能, 提高矿物的浮选回收率。

表 1 不同浓度的反离子对表面活性剂的
临界胶束浓度的影响

Table 1 Effect of content of anion on critical micell concentration of surface active agent

| $c(\text{anion})/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$ | $-\log c(\text{CM}_{\text{anion}})$ | $c(\text{anion})/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$ | $-\log c(\text{CM}_{\text{anion}})$ |
|--|-------------------------------------|--|-------------------------------------|
| 0 | 1.792 | 0.01 | 2.054 |
| 0.0001 | 2.0101 | 0.03 | 2.102 |
| 0.001 | 2.012 | 0.06 | 2.140 |
| 0.005 | 2.033 | 0.1 | 2.171 |

对于叶蜡石的浮选来说, 随着 pH 值的下降, 盐酸用量增加, 也就是说, 氯离子在体系中的浓度增加。根据捕收剂的溶液化学原理和氯离子对叶蜡石的特性吸附插层作用^[13], 氯离子不仅降低捕收剂的临界胶束浓度值, 而且显著降低叶蜡石的 zeta 电位促进捕收剂的吸附。因此, pH 值的下降, 也就相当于溶液中的氯离子浓度的增加, 从而使得氯离子一方面在叶蜡石表面发生插层吸附, 另一方面降低捕收剂的临界胶束浓度, 因此, 叶蜡石的浮选回收率上升(见图 2)。

4 结论

1) 氯离子特性吸附至叶蜡石表面并发生扩散和插层作用, 扩大叶蜡石晶体结构层间距。氯离子的特性吸附显著降低叶蜡石的 zeta 电位, 促进阳离

子捕收剂的吸附, 从而活化叶蜡石的浮选, 而氯离子对一水硬铝石的电位影响不明显, 不能促进捕收剂的吸附, 因而对一水硬铝石的浮选没有明显的影响。

2) 氯离子是一种无机盐离子, 在水溶液中对阳离子表面活性剂型的捕收剂有显著降低其临界胶束浓度的作用。使得捕收剂的疏水性能提高, 捕收性能增强。

3) 叶蜡石的浮选回收率随着溶液 pH 值的下降而上升的原因是氯离子浓度增加的结果。

REFERENCES

[1] 王恩浮, 马朝建, 陆钦芳, 等. 选矿一拜耳法处理中国高硅铝土矿生产氧化铝的探讨[J]. 轻金属, 1996(7): 3-6, 20.
WANG En-fu, MA Chao-jian, LU Qin-fang, et al. Discussion of producing alumina by mineral processing Bayer process of the China silicious bauxite[J]. Light Metals, 1996(7): 3-6, 20.
[2] 中南工业大学, 北京矿冶研究总院, 沈阳铝镁设计研究院, 郑州轻金属研究院, 中国长城铝业公司, 铝土矿浮选脱硅药剂研究与工业试验研究报告[R]. 1999, 10.
Central South University, General Institute of Beijing Mining and Metallurgy, Shenyang Alumina-Magni Design Institute, et al. The research report of bauxite flotation desilication agents and it's plant experimen[R]. 1999, 10.
[3] 郭键, 任爱军, 方启学. 一水硬铝石与高岭石反浮选分离研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2003(3): 1-5.
GUO Jian, REN Ai-jun, FANG Qi-xue. A study on separation diasporé and kaolinite by reverse flotation[J]. Nonferrous Metals(Minerals Processing Part), 2003(3): 1-5.
[4] 刘广义, 卢毅屏, 戴塔根. 阳离子聚丙烯酰胺反浮洗分离一水硬铝石和高岭石[J]. 金属矿山, 2003(2): 48-51.
LIU Guang-yi, LU Yi-ping, DAI Ta-gen. Reverse flotation with cationic polyacryamide (CPAM) polymers to separate kaolinite from diasporé[J]. Metal Mine, 2003(2): 48-51.
[5] Sillag S C. Enrichmeng of bauxites by selective agglomeration [J]. ICSOBA, 1976, 13: 271-284.
[6] 曹学锋, 胡岳华, 蒋玉仁, 等. 新型捕收剂 N 十二烷基 1, 3 丙二胺浮选铝硅酸盐类矿物的机理[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(4): 693-696.
CAO Xue-feng, HU Yue-hua, JIANG Yu-ren. Flotation mechanism of aluminium silicate minerals N-dodecyl-1, 3-diaminopropané [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals

- 2001, 11(4): 693-696.
- [7] 胡岳华, 陈湘清, 王毓华. 磷酸盐对一水硬铝石和高岭石浮选的选择性作用[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(1): 222-228.
- HU Yue-hua, CHEN Xiang-qing, WANG Yu-hua. Influence of phosphates on diaspore and kaolinite flotation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(1): 222-228.
- [8] 李海普, 蒋玉仁, 曹学锋, 等. 变性淀粉的合成及其性能[J]. 矿冶工程, 2001, 21(4): 29-32.
- LI Hai-pu, JIANG Yu-ren, CAO Xue-feng, et al. Synthesis of modified starch and its performance[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2001, 21(4): 29-32.
- [9] 李海普, 蒋玉仁, 胡岳华, 等. 变性淀粉在铝硅矿物浮选分离中的作用机理[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(4): 697-702.
- LI Hai-pu, JIANG Yu-ren, HU Yue-hua, et al. Interaction mechanism between modified starches and aluminum silicate minerals[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(4): 697-702.
- [10] 孙传尧, 印万忠. 硅酸盐矿物浮选原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 90-101.
- SUN Chuan-yao, YIN Wan-zhong. Flotation Principles of Silicates[M]. Beijing: Science Press, 2001. 90-101.
- [11] Moudgil B M, Ince D. Effect of sodium chloride on flotation of dolomite from apatite[J]. Minerals & Metallurgical Processing, 1991, 8(3): 139-143.
- [12] 胡岳华, 刘晓文, 邱冠周, 等. 一水硬铝石型铝土矿铝硅浮选分离溶液化学I—晶体结构与可浮性[J]. 矿冶工程, 2000, 20(2): 11-14.
- HU Yue-hua, LIU Xiao-wen, QIU Guan-zhou, et al. Solution chemistry of flotation separation of diaspore type bauxite (I)—crystal structure and flotability[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2000, 20(2): 11-14.
- [13] Calvert C S. Simplified complete CsCl—hydrazine—dimethylsulfoxide intercalation of kaolinite[J]. Clays and Clay Minerals, 1984, 32: 125-130.
- [14] John G Thompson, Philippa J R Uwins, Andrew K Whittaker, Ian D R Mackinnon. Structural characterisation of kaolinite: NaCl intercalate and its derivatives[J]. Clays and Clay Minerals, 1992, 40(4): 369-380.
- [15] Jackson M L, Abdel-Kader F H. Kaolinite intercalation procedure for all size and types with X-ray spacing distinctive from other phyllosilicates[J]. Clays and Clay Minerals, 1978, 17: 157-167.
- [16] SU Chun-ming, Harsh J B, Bertsch P M. Sodium and chloride sorption by imogolite and allophanes[J]. Clays and Clay Minerals, 1992, 40(3): 280-286.
- [17] John G Thompson, Neil Gabbitts, Philippa J R Uwins. The intercalation of kaolinite by alkali halides in the solid state: a systematic study of the intercalates and their derivatives[J]. Clays and Clay Minerals, 1993, 41(1): 73-86.
- [18] 潘兆鲁. 结晶学与矿物学(下册)[M]. 北京: 地质出版社, 1994. 23-31.
- PAN Zhao-lu. Crystallography and Mineralogy[M]. Beijing: Geological Press, 1994. 23-31.
- [19] 梁梦兰. 表面活性剂和洗涤剂——制备性质应用[M]. 科学技术文献出版社, 1990. 8.
- LIANG Meng-lan. Surfactants and Scours—Preparation Properties and Application[M]. 1990. 8.
- [20] 王淀佐, 胡岳华. 浮选溶液化学[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1988. 11.
- WANG Dian-zuo, HU Yue-hua. Solution Chemistry of Flotation[M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1988. 11.

(编辑 龙怀中)