

文章编号: 1004-0609(2006)07-1250-07

# 有机絮凝剂 HSPA 分选一水硬铝石型铝土矿的机理<sup>①</sup>

黄传兵, 王毓华, 兰 叶

(中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

**摘 要:** 采用沉降试验方法, 以碳酸钠为分散剂, 有机物 HSPA 为选择性絮凝剂, 对一水硬铝石、高岭石、伊利石和叶蜡石单矿物, 以及实际矿石进行选择性絮凝分选实验。结果表明, HSPA 体现出良好的铝硅分离选择性。对铝硅比为 5.68 的铝土矿, 在 HSPA 用量 7 g/t,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  用量 5 kg/t 时, 经 3 次絮凝分离, 可获得精矿铝硅比为 8.9, 氧化铝回收率为 86.98% 的良好指标。机理测试结果分析表明, HSPA 主要通过羧基与矿物表面  $\text{Al}^{3+}$  活性点形成化学吸附, 并通过氢键形成桥键作用。

**关键词:** 一水硬铝石; 铝土矿; 选择性絮凝; 絮凝剂; 化学吸附

中图分类号: TD 952

文献标识码: A

## Mechanism of selective flocculation separation of diasporic bauxite with organic flocculant HSPA

HUANG Chuan-bing, WANG Yu-hua, LAN Ye

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

**Abstract:** The flocculation tests of diaspore, kaolinite, illite, pyrophyllite and bauxite ore were carried out by the sedimentation. The sodium carbonate and an organic flocculant HSPA were used as dispersant and flocculant, respectively. The results show that HSPA has a good selectivity for the flocculation separation of diasporic bauxite. The concentrate with Al/Si 8.9 and the recovery of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  86.98% were obtained after triple sedimentation on the bauxite ore with Al/Si 5.68 by using sodium carbonate 5 kg/t and HSPA 7 g/t. The mechanism study shows that there is chemical absorption between HSPA and active  $\text{Al}^{3+}$  sites on the surface of the diaspore with carboxyl. At the same time, bridge-bonds of macromolecule are formed by hydrogen bond.

**Key words:** diaspore; bauxite; selective flocculation; flocculant; chemical absorption

由于硅对氧化铝生产的危害很大, 加之铝土矿资源的日趋贫乏, 因此铝土矿的预脱硅越来越得到人们的重视。从选矿的角度考虑, 预脱硅方法有物理选矿法、化学选矿法和生物选矿法。其中以浮选方法研究得最多, 且已取得较大进展<sup>[1-5]</sup>。但是这些方法都存在不同程度的缺陷, 因此需要不断开发新的工艺。选择性絮凝就是其中一种较有发展前途的方法。

选择性絮凝最初是由英国皇家矿业学院的基钦

纳(Kitchener)博士和华伦斯普林实验室的矿石加工研究小组提出的。里德(Read)曾报道了他对赤铁矿-二氧化硅体系所做的研究工作, 他将强阴离子型聚丙烯酰胺絮凝剂加入赤铁矿-二氧化硅体系(为了防止杂絮凝预先加入了氟化钠和六偏磷酸钠)从而得到相当富集的赤铁矿。在这以后又有许多人对选择性絮凝进行了有关理论和实践的研究。如 Moudgil 等<sup>[6-8]</sup>曾分别对选择性絮凝的原理及其表面化学基础作过评述, 并推导了关于选择性絮凝的

① 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2005CB623701)

收稿日期: 2006-02-20; 修订日期: 2006-05-08

通讯作者: 王毓华, 教授; 电话: 0731-8830545; E-mail: wangyh@mail.csu.edu.cn

一些数学模型。Behl 等<sup>[9, 10]</sup>又提出了 SBA(质点阻塞剂)理论。Pradip 等<sup>[11-13]</sup>提出了基于分子/离子识别的机理。他们提出的方法有的已经进入工业实用阶段。

为实现某种矿物的选择性絮凝, 可以选用对其具有选择性吸附的絮凝剂或者通过界面化学的调节来实现和强化絮凝剂吸附的选择性。理想情况下, 对某种特定矿物表面, 选择性絮凝剂设计和选用原则应是对该表面完全吸附或不吸附<sup>[14]</sup>。絮凝剂的作用机理理论主要有<sup>[15]</sup>: 1) 根据经典胶体化学理论的双电层模型而建立的 DLVO 凝聚物理理论, 以及由 Smoluchowski 提出并由 Camp 和 Stein 加以实用化的絮凝速度梯度理论, 主要强调了压缩颗粒双电层的扩散层, 降低或消除势能峰垒的凝聚作用机理以及层流速度梯度决定着颗粒间的碰撞絮凝作用; 2) 电中和/吸附凝聚、吸附架桥理论以及微涡旋混流动力学理论, 强调了凝聚絮凝过程中的化学作用以及水流紊流微涡旋对絮凝颗粒碰撞结合的贡献; 3) 把表面络合、表面沉淀概念和定量计算方法引入絮凝机理研究之中, 依据吸附/电中和理论和表面络合模式, 提出的“表面覆盖”絮凝模式。

本文作者采用选择性絮凝分选工艺成功地实现了一水硬铝石与三种硅酸盐脉石矿物的良好分离。通过显微照片分析、Zeta 电位测试、红外光谱测试以及 X 射线衍射分析对新型药剂在一水硬铝石表面的吸附作用机理进行了探讨。

## 1 实验

实验采用的 4 种单矿物中, 一水硬铝石和高岭石取自河南, 伊利石和叶蜡石取自浙江瓯海。经手选挑拣、破碎、瓷磨、蒸馏水湿筛制得 < 0.038 mm 的矿样, 低温干燥, 装瓶备用。经激光粒度分析仪检测, 4 种单矿物的平均粒度分别为: 一水硬铝石 13.54 μm, 高岭石 12.70 μm, 伊利石 6.95 μm, 叶蜡石 7.24 μm。虽然矿样均磨至小于 0.038 mm, 但由于矿物间可碎性差别, 导致伊利石和叶蜡石偏细, 而一水硬铝石和高岭石偏粗。4 种单矿物样品的化学分析结果见表 1。

实际矿石样品取自河南郑州, 原矿用颚式破碎机、对辊机破碎至 0~ 3 mm 供实验用。原矿 X 射线粉末衍射分析表明, 一水硬铝石含量为 53.4%~ 53.8%, 叶蜡石含量为 14.7%~ 17.4%, 伊利石含量为 16.5%~ 15.8%, 绿泥石含量为 9.3%~ 12.6%, 高岭石含量为 3%~ 3.5%。原矿化学多元

素分析见表 2。

表 1 矿样化学分析结果

Table 1 Chemical composition of pure minerals (mass fraction, %)

Mineral	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Other elements
Diaspore	79.24	1.77	3.76	1.28	13.95
Kaolinite	41.84	36.31	2.23	0.89	18.73
Illite	37.13	42.44	0.28	0.26	19.89
Pyrophyllite	25.08	62.24	0.17	0.19	12.32

表 2 矿石化学多元分析

Table 2 Chemical composition of feed ores (mass fraction, %)

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO
64.69	11.39	4.93	3.04	0.58
MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	S	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>
0.31	1.10	0.39	0.08	5.68

所用试剂 HCl、NaOH(调节 pH, 浓度均为 0.1 mol/L)、碳酸钠(浓度 5%)、AlCl<sub>3</sub>(浓度 1%)为分析纯, 有机絮凝剂 HSPA(浓度 0.05%)为工业纯。实验用水为一次蒸馏水。

### 1) 絮凝实验

采用沉降实验方法, 在 100 mL 沉降瓶中进行单矿物实验。每次实验矿量为 5 g, 加分散剂或絮凝剂, 并加蒸馏水至刻度处, 先用力摇 100 mL 沉降瓶 10 次, 再上下倒置 20 次, 然后静置沉降 50 s, 虹吸出上部 80 mL 悬浮液, 剩余作为沉降产物烘干称量质量, 计算其产率。实际矿石实验在直径 20 cm, 高度 25 cm 的沉降槽中进行。矿石磨矿细度为 90% < 0.074 mm, 矿浆浓度 10%。矿浆的 pH 值由 pH S-3C 型精密 pH 计测定。

### 2) Zeta 电位

将矿物磨至粒径小于 5 μm, 每次称取 50 mg 置于烧杯中, 加 50 mL 蒸馏水, 用 HCl 或 NaOH 调节 pH 值, 加入药剂, 用磁力搅拌器搅拌 3 min 后在 delsa440sx zeta 电位仪上进行 ζ 电位测量, 测量 3 次取平均值。

### 3) 红外测试

将矿样、絮凝剂配成一定浓度的溶液, 分别在 FTIR-750 型傅里叶变换红外光谱仪上的液体样品池, 测试原矿样、药剂及药剂与矿物相互作用后的红外漫反射光谱。

### 4) XRD 分析

将待测粉末样品在日本 Shimadzu D/MAX-rA 型 X 射线衍射仪上扫描得到矿物的 X 射线衍射图谱。测定条件为：铜靶， $K_{\alpha} = 1.54056 \text{ nm}$ ，滤波片为石墨单色器，管流 100 mA，管压 50 kV，狭缝为 DS1、RS0.30、SS1，扫描速度为  $2(^{\circ})/\text{min}$ ，步宽为  $0.01^{\circ}$ ，扫描范围为： $2\theta = 5^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 。

5) 絮凝图像

将矿物磨至粒径小于  $5 \mu\text{m}$ ，配制矿浆浓度 5%，加入碳酸钠 75 mg/L 搅拌分散，然后加入絮凝剂 2 mg/L 作用 3 min，采用 DM 4000M 数码金相显微镜(德国)拍摄 HSPA 与矿物作用后的絮凝图像。

## 2 结果与分析

### 2.1 pH 对铝硅矿物分散行为的影响

图 1 所示为 pH 对铝硅矿物分散行为的影响结果。酸性条件下，一水硬铝石颗粒间存在显著的凝聚作用，随着 pH 升高，颗粒间凝聚作用减弱，沉降物的产率逐渐降低， $\text{pH} > 9$  的碱性条件下，一水硬铝石处于良好的分散状态。对 3 种铝硅酸盐矿物来说，pH 值对它们的分散行为影响不大。实验过程中，酸性条件下 3 种铝硅酸盐矿物颗粒间虽产生了一定的凝聚作用，但形成的絮团较小，沉降速度较慢，因而抽出的悬浮物的量仍较大。由于氢离子和氢氧离子是铝硅酸盐矿物的定位离子，pH 值的变化将导致矿粒表面电位产生变化，使颗粒间产生分散或凝聚。图 1 的结果还说明，在  $\text{pH} > 9$  的条件

下，4 种矿物才能达到良好的分散状态，为选择性絮凝分选提供了有利条件。

### 2.2 HSPA 对 4 种单矿物的絮凝作用

图 2 所示为 HSPA 在不同 pH 值矿浆中对一水硬铝石及 3 种脉石矿物的絮凝作用。由图可以看出，在实验的 pH 范围内，HSPA 对一水硬铝石有很强的絮凝能力，HSPA 对一水硬铝石表现出很强的絮凝能力，沉降产物产率基本保持在 90% 以上。随 pH 值升高，HSPA 对高岭石的絮凝能力逐渐增强。实验现象表明，高岭石在酸性和碱性条件下均会形成絮团，但由于絮团的大小和沉降速率不同，导致碱性条件下的沉降产率较高。对伊利石和叶蜡石，HSPA 在酸性条件下体现出一定的絮凝能力，当 pH 大于 9 时，HSPA 对二者的分散性能几乎不产生影响。在  $\text{pH} > 9$  的条件下，一水硬铝石与伊利石和叶蜡石二种含硅矿物间的沉降产物产率差值大于 60%，与高岭石沉降产物产率间差值为 20% 左右。这说明 HSPA 在  $\text{pH} > 9$  条件下将有可能实现高岭石含量较低的铝土矿的铝硅选择性分离。

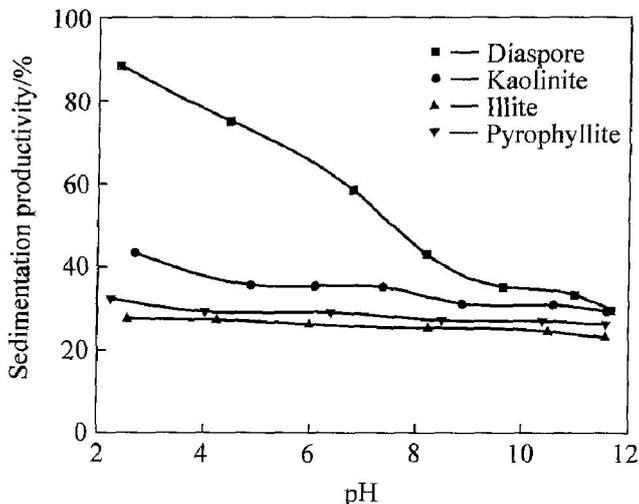


图 1 pH 值对铝硅矿物分散行为的影响

Fig. 1 Effect of pH on dispersion of mineral particles

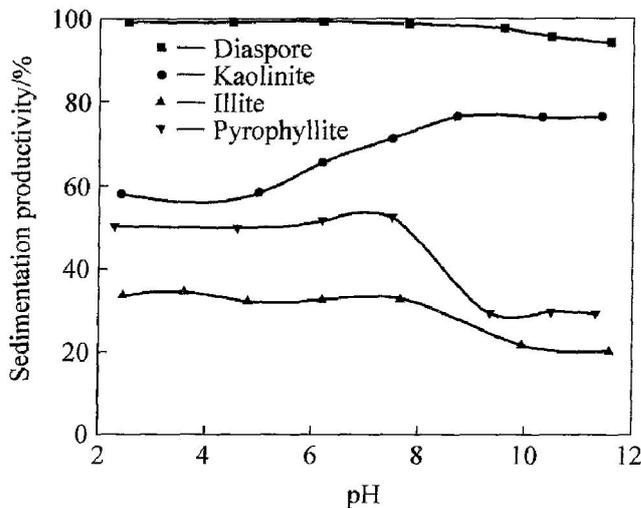


图 2 不同 pH 值下 HSPA 对矿物的絮凝作用(HSPA 用量 2 mg/L)

Fig. 2 Effect of pH on flocculation of mineral particles using HSPA at concentration of 2 mg/L

### 2.3 实际矿物的分离实验

对原矿铝硅比为 5.68 的实际矿石，将碳酸钠 3 kg/t 加入磨机进行磨矿，磨矿细度为  $90\% < 0.074 \text{ mm}$ ，在矿浆浓度为 10% 时进行选择性的絮凝分离，经过多次实验，指标较好的 2 种实际矿石分选实验条件及结果见表 3。

表 3 实际矿石分选指标

Table 3 Separation results of selective flocculation on ores

Experiment	Products	Productivity/ %	Grade/ (mass fraction, %)		A/S	Recovery (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/%
			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>		
HSPA 5 g/t, settle 765 s; Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 1 kg/t+ HSPA 2 g/t, settle 765 s; settle 382 s	Concentrate	82.45	68.07	8.17	8.33	87.03
	Tailings	17.55	48.35	27.78	1.74	12.97
	Feeds	100	64.58	11.37	5.68	100
HSPA 5 g/t, settle 765 s; Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 1 kg/t+ HSPA 2 g/t, settle 765 s; Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 1 kg/t, settle 382 s	Concentrate	82.18	68.48	7.69	8.90	86.98
	Tailings	17.82	47.71	28.98	1.65	13.02
	Feeds	100	64.58	11.37	5.68	100

从表 3 中的实验结果可以看出, 以 HSPA 为铝土矿选择性絮凝剂, 碳酸钠为矿浆分散剂, 在 pH 9.5~10 范围内, HSPA 用量为 7 g/t, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 用量 5 kg/t 时(其中 3 kg/t 用于磨矿, 2 kg/t 用于絮凝分离中), 对 A/S 为 5.68 的实际矿石, 经 3 次选择性絮凝分离, 取得了精矿 A/S 为 8.9, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 回收率 86.98% 的良好指标。

### 3 机理讨论

#### 3.1 显微照片

高分子絮凝剂一般都是线型高分子聚合物, 其特征是具有链状的高分子结构, 在长链分子上含有大量亲固活性基团。这样, 高分子絮凝剂就会像架桥一样, 搭在两个或多个矿粒上, 并以自己的活性基团与矿粒起作用, 从而将矿粒联接形成絮团, 这种作用称为桥键作用<sup>[16]</sup>。如絮凝剂过量, 则各自包住个别粒子, 形成分散状。图 3 所示为一水硬铝石矿物在蒸馏水中不加任何药剂状态下的显微图像。由图可见, 一水硬铝石呈较均匀的分散状态。图 4 所示为一水硬铝石经分散并与 HSPA 作用后

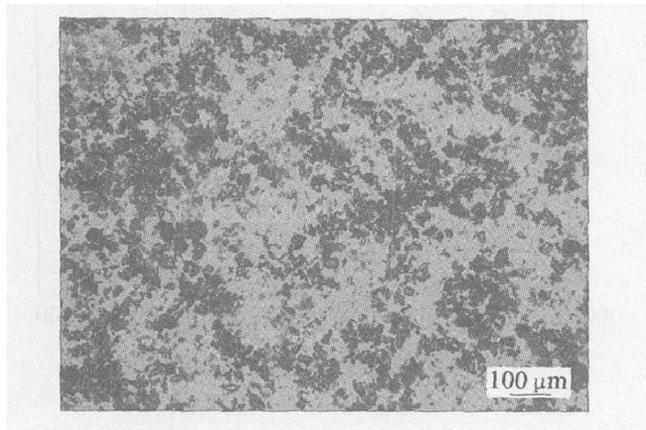
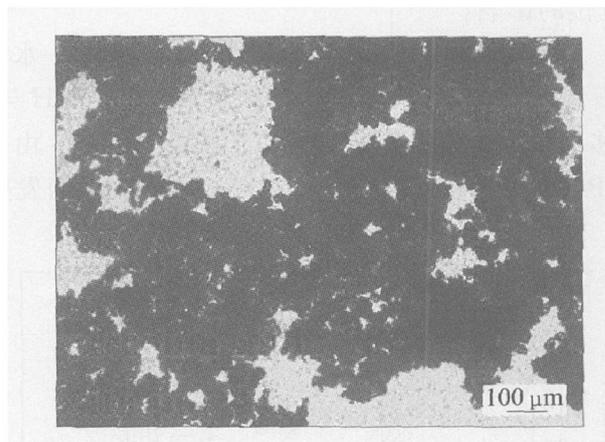


图 3 未加药剂时蒸馏水中的一水硬铝石

Fig. 3 Diaspore in distilled water with no reagent

图 4 加 2 mg/L HSPA 和 75 mg/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 后的一水硬铝石Fig. 4 Diaspore with 2 mg/L HSPA and 75 mg/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

的显微图像。由图可见, 一水硬铝石明显形成了较大絮团, 且较致密, 表明 HSPA 对一水硬铝石能产生良好的絮凝作用, 有利于加速细粒一水硬铝石的沉降。

#### 3.2 HSPA 对 4 种矿物动电位的影响

对于大部分硅酸盐矿物来说, 在水溶液中荷负电, 只有在强酸性条件下表面才荷正电<sup>[17]</sup>。一水硬铝石为典型的氧化矿物, 破碎解离时, 表面暴露的是铝氧键, 在水溶液中与水分子作用形成铝羟基。高岭石为 1:1 型层状硅酸盐矿物, 破碎解离时产生两种不同性质的表面, 底面和端面。这两种表面的荷电性质完全不同<sup>[18]</sup>。底面由于 Al<sup>3+</sup> 和 Fe<sup>3+</sup> 替代部分 Si<sup>4+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 或 Fe<sup>2+</sup> 替代 Al<sup>3+</sup> 而使底面荷永久负电荷。端面在低 pH 值时, 高岭石表面正电荷主要由铝羟基贡献, 而硅羟基荷负电荷, 在高 pH 条件下, 负电荷主要由硅羟基贡献。叶蜡石和伊利石都是 2:1 型层状硅酸盐矿物, 两个硅氧四面体夹心一个铝氧八面体。同高岭石类似, 由于晶格取代底面荷永久负电荷。端面的荷电性同高岭石, 端

面暴露的  $Al^{3+}$ 、 $Si^{4+}$  离子羟基化, 形成铝羟基和硅羟基, 铝羟基能得到或失去电子, 端面的正电荷主要是由铝羟基贡献的。而硅羟基一般得质子而呈阴离子态, 而提供负电荷。此外叶蜡石和伊利石的  $Al-O$  八面体层被  $Si-O$  四面体包裹而没有直接与水溶液接触, 底面只有硅羟基。伊利石晶体中晶格取代较大, 其中  $K^+$  充填于层间,  $K^+$  优先溶解, 可使矿物表面荷一定量的负电荷。

图 5 所示为蒸馏水体系下 pH 对矿物表面  $\zeta$  电位的影响。图 6 所示为 HSPA(1 mg/L) 对矿物表面  $\zeta$  电位的影响。

从图 5 和 6 可以看出, HSPA 作用后的一水硬铝石表面电位产生了较大偏移, 等电点由  $pH = 6$  偏移至  $pH = 4$  附近, 但电位的值变化不大, 由于 HSPA 主要官能团为羧基, 在一水硬铝石表面发生

吸附, 与其表面暴露的活性吸附点  $Al-OH$  的数量较多有关。羧酸根以离子形式吸附在矿物表面, 以氢键形式相连, 同时还存在羧酸根离子直接与铝离子以离子键相互作用的化学吸附。而 3 种硅酸盐矿物等电点及电位值的变化均不大, 表明药剂与 3 种硅酸盐矿物间的作用很微弱, 可能有微弱的静电作用和氢键作用存在。

### 3.3 红外光谱分析

图 7 所示为一水硬铝石及药剂的红外光谱图。图 8 所示为伊利石及药剂的红外光谱图。

图 7 中谱线 3 为一水硬铝石红外光谱线。一水硬铝石为两性氧化矿物, 由于其氢键较短, 且等价的  $OH$  基之间缺少直接键合, 其  $OH$  伸缩振动于  $2800 \sim 3000\text{ cm}^{-1}$  形成一宽峰。 $2106\text{ cm}^{-1}$  和  $1978\text{ cm}^{-1}$  是  $OH$  面外摆动吸收峰。 $957\text{ cm}^{-1}$  和  $1035\text{ cm}^{-1}$  分别为  $OH$  面内弯曲振动和面外弯曲振动吸收峰。 $Al-O$  的伸缩振动峰为  $741\text{ cm}^{-1}$ 。图 7 中谱线 1 为药剂 HSPA 的红外光谱线。 $1440\text{ cm}^{-1}$  为  $COO^-$  对称伸缩振动吸收峰,  $3453\text{ cm}^{-1}$  为自由的  $OH$  伸缩振动吸收峰。图 7 中谱线 2 为药剂 HSPA 与  $AlCl_3$  作用后的红外光谱线, 可以看到两种药剂作用后在  $1624\text{ cm}^{-1}$  处产生一个较强新峰,  $1447\text{ cm}^{-1}$  处峰值减弱, 表明该药剂与  $Al^{3+}$  发生化学反应产生了一种新的物质。图 7 中谱线 4 为 HSPA 与一水硬铝石作用后的红外光谱线。在  $1640\text{ cm}^{-1}$  处产生新峰, 与谱线 2 中的新峰相对应, 表明 HSPA 在一水硬铝石表面发生化学吸附并生成了新的物

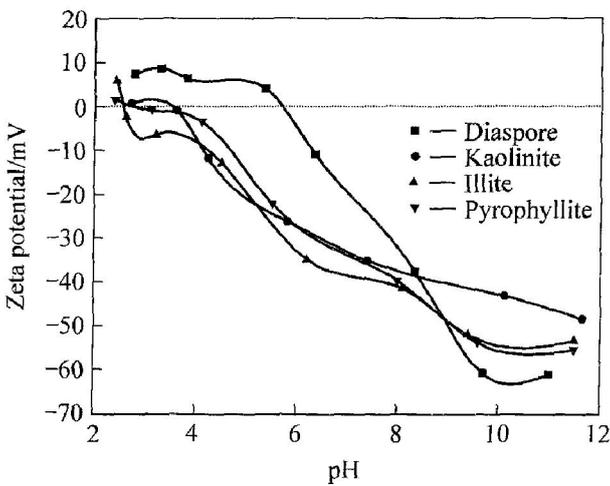


图 5 蒸馏水体系下 pH 对矿物表面  $\zeta$  电位的影响

Fig. 5 Effect of pH on Zeta potential of minerals in distilled water

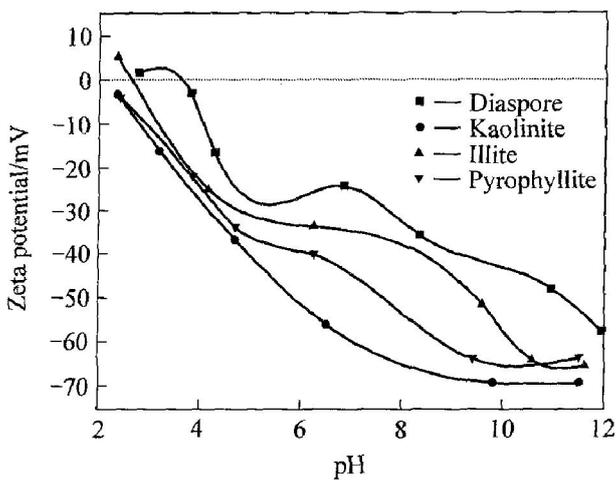


图 6 HSPA(1 mg/L) 对矿物表面  $\zeta$  电位的影响

Fig. 6 Effect of pH on Zeta potential of minerals in presence of HSPA(1 mg/L)

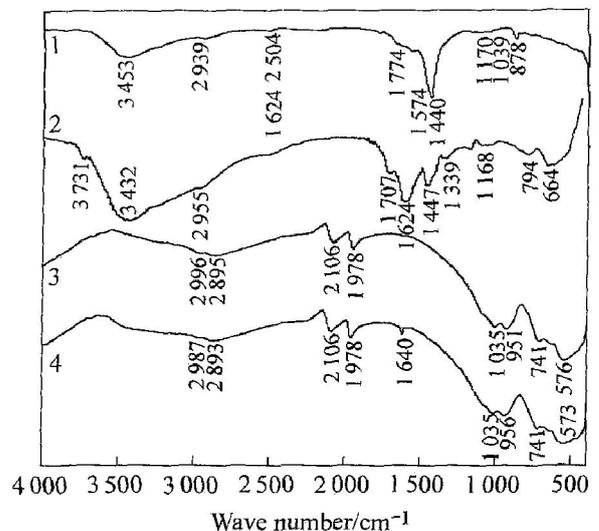


图 7 一水硬铝石及药剂的红外光谱图

Fig. 7 FTIR spectra of diaspore and reagents  
1—HSPA; 2—HSPA+  $Al^{3+}$  ;  
3—Diaspore; 4—Diaspore+ HSPA

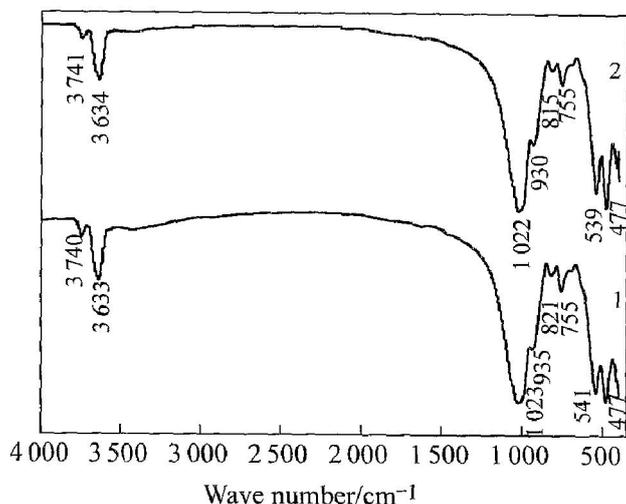


图 8 伊利石及药剂的红外光谱图

Fig. 8 FTIR spectra of illite and reagents

1—Illite+ HSPA; 2—Illite

质。这也就是 HSPA 能选择性絮凝一水硬铝石, 对 3 种硅酸盐矿物几乎不产生作用的主要原因。

图 8 中谱线 1 为伊利石与 HSPA 作用的红外光谱线, 图中谱线 2 为伊利石纯矿物光谱线。两者相比, 没有新峰生成, 也没有峰发生偏移, 表明药剂 HSPA 与伊利石无作用。其它两种硅酸盐矿物高岭石和叶蜡石与此类似。

### 3.4 XRD 分析

图 9 所示为对实际矿石选择性絮凝分离后得到的尾矿(a)和精矿(b)以及原矿(c)的 XRD 分析结果。

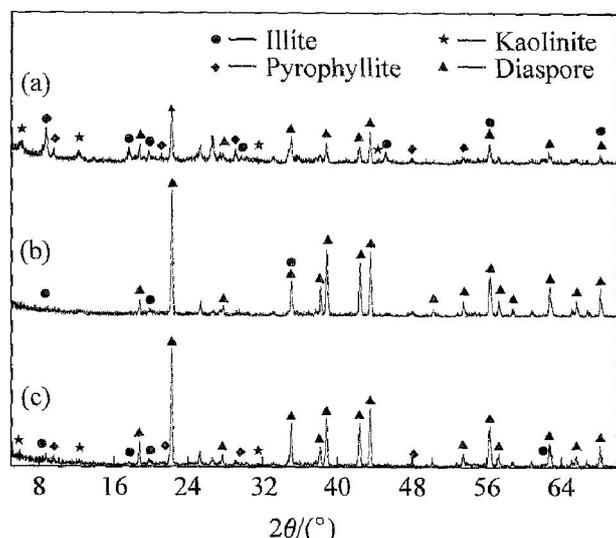


图 9 实际铝土矿矿石的 XRD 分析

Fig. 9 XRD patterns of bauxite ores

(a)—Tailing; (b)—Concentrate; (c)—Feeds

从图 9 的结果可以看出, 得到的精矿产品中主要是一水硬铝石和少量伊利石, 且一水硬铝石峰值有所增加, 相对含量增加, 伊利石的峰值相应减弱, 表明其含量降低。尾矿中一水硬铝石的峰值强度明显降低, 表明其中一水硬铝石的含量显著减少, 而高岭石、叶蜡石、伊利石的峰值则相对增强, 说明这 3 种硅酸盐矿物得到了明显的富集。这一结果证明 HSPA 具有对铝土矿选择性絮凝分离的良好性能。

## 4 结论

1) HSPA 是一水硬铝石型铝土矿选择性絮凝分选的良好药剂。对原矿铝硅比为 5.68 的矿石, 在磨矿细度为  $90\% < 0.074 \text{ mm}$ , 矿浆浓度 10% 时, 采用加  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  5 kg/t 分散矿浆, 加 HSPA 7 g/t 絮凝剂, 经 3 次絮凝分离, 取得精矿铝硅比 8.9, 氧化铝回收率 86.98% 的良好指标。

2) HSPA 主要通过羧基与矿物表面 Al 活性点产生化学吸附, 并通过氢键形成桥键作用。由于一水硬铝石矿物表面暴露的 Al 活性点较多, HSPA 的添加促使微细粒一水硬铝石形成结构致密的絮团, 加速了一水硬铝石的沉降。

## REFERENCES

- [1] 胡岳华, 王毓华, 王淀佐. 铝硅矿物浮选化学与铝土矿脱硅[M]. 北京: 科技出版社, 2004.  
HU Yue-hua, WANG Yu-hua, WANG Dian-zuo. Flotation Chemistry of Aluminum and Silicate and Desilication of Bauxite[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [2] 胡岳华, 蒋昊, 邱冠周, 等. 一水硬铝石型铝土矿铝硅浮选分离的溶液化学[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(1): 125-130.  
HU Yue-hua, JIANG Hao, QIU Guan-zhou, et al. Solution chemistry of flotation separation of diasporic bauxite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(1): 125-130.
- [3] 骆兆军, 胡岳华, 王毓华, 等. 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(4): 680-683.  
LUO Zhao-jun, HU Yue-hua, WANG Yu-hua, et al. Mechanism of dispersion and aggregation in reverse flotation for bauxite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(4): 680-683.
- [4] 黄传兵, 王毓华, 陈兴华, 等. 铝土矿反浮选脱硅研究综述[J]. 金属矿山, 2005(6): 21-24.

- HUANG Chuangbing, WANG Yuhua, CHEN Xinghua, et al. Review of research on desilication of bauxite ores by reverse flotation[J]. *Metal Mine*, 2005(6): 21-24.
- [5] 王毓华, 胡岳华. 物理因素对铝土矿反浮选的影响[J]. *中国矿业*, 2002, 11(6): 37-39.
- WANG Yuhua, HU Yuhua. Influences of physical factors on performance of bauxite reverse flotation[J]. *China Mining*, 2002, 11(6): 37-39.
- [6] Moudgil B M, Behl S, Pradip. Scientific design of a selective flocculation process [J]. *Miner Metall Process*, 1993, 10(2): 62-65.
- [7] Moudgil B M, Behl S. Model of the selective flocculation process [J]. *J Colloid Interface Sci*, 1991, 146(1): 1-8.
- [8] Chen H T, Ravishankar S A, Farinato R S. Rational polymer design for solid-liquid separations in mineral processing applications [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2003, 72: 75-86.
- [9] Behl S, Moudgil B M. Mechanisms of polyethylene oxide interaction with apatite and dolomite [J]. *J Colloid Interface Sci*, 1993, 161: 443-449.
- [10] Behl S, Moudgil B M, Prakash T S. Control of active sites in selective flocculation (Part I): A mathematical model [J]. *J Colloid Interface Sci*, 1993, 161: 414-421.
- [11] Pradip. On the design of selective reagents for mineral processing applications [J]. *Met Mater Processes*, 1991, 31: 15-36.
- [12] Pradip. Design of crystal-structure specific surfactants based on molecular recognition at mineral surfaces [J]. *Curr Sci*, 1992, 63(4): 180-186.
- [13] Pradip. Reagents design and molecular recognition at mineral surfaces [A]. Prasad M, Hancock B A, Eds., *Proceedings: Reagents for Better Metallurgy [C]*. 1994. 245-252.
- [14] 张明旭, 曹 昊. 选择性絮凝技术及其在煤炭分选中的应用 [J]. *东北煤炭技术*, 1998(3): 49-53.
- ZHANG Ming-xu, CAO Jiong. Selectivity flocculation technology and application in coal selective separation [J]. *Coal Technology of Northeast China*, 1998(3): 49-53.
- [15] 袁宗宣, 郑怀礼, 舒型武. 絮凝科学与技术的进展 [J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2001, 24(2): 143.
- YUAN Zong-xuan, ZHENG Huaili, SHU Xing-wu. Advancement of coagulation science and technology [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2001, 24(2): 143.
- [16] 徐初阳, 罗 慧, 聂容春, 等. 聚丙烯酰胺的性质对煤泥水絮凝效果的影响 [J]. *煤炭技术*, 2004, 23(1): 65.
- XU Chuyang, LUO Hui, NIE Rongchun, et al. The effect of the polyacrylamide on flocculation efficiency of coal slurry [J]. *Coal Technology*, 2004, 23(1): 65.
- [17] 王淀佐, 胡岳华. 浮选溶液化学 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1998. 35-38.
- WANG Dian-zuo, HU Yuehua. *Solution Chemistry of Flotation [M]*. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1998. 35-38.
- [18] Yuan J, Pruett R J. Zeta potential and related properties of kaolin clays from georgia [J]. *Minerals and Metallurgical Processing*, 1998, (2): 50-52.

(编辑 何学锋)