

十二烷基三甲基溴化铵在磷灰石与钾长石浮选分离中的捕收作用与机理

俞豪勇, 朱阳戈, 李松清, 胡晓星

北京矿冶研究总院 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 102628

中图分类号: TD971⁺.3; TD923⁺.13 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2022)02-0074-06
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.02.009

摘要 为了有效去除磷灰石中的长石矿物, 考察了季铵盐十二烷基三甲基溴化铵(DTAB)为捕收剂时磷灰石与钾长石的浮选行为, 并采用 Zeta 电位、微量热、XPS、红外光谱和分子模拟等方法研究了药剂在矿物表面的选择性吸附机理。试验结果表明, 在矿浆 pH 值为 5~11 区间, DTAB 对钾长石具有优异的捕收性能, 而磷灰石可浮性较差。在 DTAB 用量为 3×10^{-5} mol/L、pH = 9.0 时单独浮选钾长石与磷灰石, 二者的回收率分别为 93% 和 2%。针对磷灰石与钾长石质量比 3:1 的人工混合矿, 利用 DTAB 可以获得 P₂O₅ 品位 34.85%、回收率 91.46% 的磷精矿, 其中 Al₂O₃ 含量为 1.52%, 表明 DTAB 可以实现钾长石和磷灰石的选择性分离。机理分析表明, DTAB 可以通过静电作用的方式选择性吸附在钾长石表面, 其在钾长石表面的吸附能力和作用强度明显高于在磷灰石表面, 从而实现了二者的浮选分离。

关键词 磷灰石; 钾长石; 浮选; 作用机理; 捕收剂; 十二烷基三甲基溴化铵

引言

由于世界总人口的不断增长, 食品生产的迫切需求加剧了土地的高强度利用, 进而促进了对化肥需求的长期增长^[1-2]。作为磷肥的主要原料, 磷矿资源开发利用受到了广泛关注。磷灰石是一种具有六方晶系结构的磷酸盐矿物, 是富磷沉积岩矿床中的重要经济矿物。沉积岩中常含有长石、石英等共伴生硅酸盐杂质矿物, 严重降低了磷矿石中磷灰石品位, 使其无法直接用作化肥生产, 因此通常需要对磷灰石进行选矿以提高磷矿品质^[3-4]。随着磷矿矿石性质的日益复杂, 如何将磷灰石从硅酸盐等脉石矿物中高效分离成为亟待解决的关键问题^[5-7]。

为了实现硅质磷灰石的浮选分离, 通常采用阴离子捕收剂正浮选法实现磷灰石与硅酸盐脉石的分离^[8-10], 其中脂肪酸类捕收剂在磷矿正浮选中应用较为普遍。但脂肪酸捕收剂一般不耐硬水, 在低温条件下需升温乳化导致选别成本升高, 限制了其应用。与正浮选相比, 使用阳离子捕收剂的反浮选更符合浮少抑多的原则^[11], 因而引起广泛关注^[12-14]。黄志强等^[15]

针对磷灰石反浮选合成了新型捕收剂 N,N'-双(十二烷基二甲基)-1,4-丁烷二溴化二铵(BDBD)作为硅酸盐的捕收剂, 结果表明, 相较于常规胺类捕收剂, 新型捕收剂具有更好的选择性, 精矿指标更好。刘鸣等人^[16]采用醚多胺 T609 作捕收剂, 通过反浮选工艺最终获得了精矿 P₂O₅ 品位 33.64%、回收率为 72.73% 的良好指标。Pawlik M 等^[17]通过研究发现, 季铵盐捕收剂相较于传统捕收剂选择性更好, 可以降低磷尾矿中 P₂O₅ 品位。为深入研究硅质磷矿反浮选脱硅过程, 本文考察了季铵盐捕收剂十二烷基三甲基溴化铵(DTAB)对磷灰石和钾长石的捕收性能与机理, 以期对硅质低品位磷矿的开发提供借鉴。

1 样品、药剂与试验方法

1.1 样品与药剂

磷灰石和钾长石的单矿物样品采自湖北宜昌, 经过粉碎、研磨和筛分后获得粒径为 $-0.074 + 0.038$ mm 的粉末样品, 用于微浮选试验和微量热研究。用于 FTIR 分析、Zeta 电位测量和 XPS 分析的样品研磨至约

-20 μm 。

磷灰石和钾长石的化学成分如表 1 所示。结果表明,所制备的磷灰石和钾长石矿物样品纯度较高,满足试验要求。

表 1 磷灰石和钾长石的化学成分 /%

Table 1 Chemical composition of apatite and potassium feldspar

矿样	MgO	CaO	P ₂ O ₅	F	Al ₂ O ₃	K ₂ O	SiO ₂
磷灰石	0.11	47.98	40.39	1.21	0.043	0.012	1.10
钾长石	—	—	—	—	18.00	14.37	63.70

捕收剂 DTAB[$\text{C}_{12}\text{H}_{25}(\text{CH}_3)_3\text{NBr}$]为化学纯,化学结构如图 1 所示。 H_3PO_4 和 NaOH 为 pH 值调整剂,试验用水为去离子水($\rho = 18.3 \mu\text{S}/\text{cm}$)。

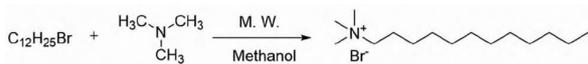


图 1 DTAB 的化学结构

Fig. 1 Chemical structure of DTAB

1.2 试验方法

1.2.1 单矿物及人工混合矿浮选

使用 XFG 型(中国长春)浮选机(叶轮转速为 1 500 r/min)对单矿物样品进行了浮选试验。首先,将 2 g 矿物样品置于 40 mL 浮选槽内;加入去离子水后搅拌 1 min,向矿浆中添加 pH 调整剂(NaOH 或 H_3PO_4)以达到所需的 pH 值;随后加入捕收剂搅拌 3 min。每次浮选试验进行 5 min。浮选完成后,对获得的泡沫与底流产品经过滤、干燥和称重,计算回收率。对于人工混合矿浮选中,首先将磷灰石和钾长石按照质量比 3 : 1 混合得到人工混合矿样品,后续浮选过程与单矿物相同。

1.2.2 Zeta 电位测定

采用显微电泳法测量悬浮液中矿物表面的 Zeta 电位。试验方法为:将矿物磨至粒径小于 2 μm ,每次称样 30 mg 置于烧杯中,加入 50 mL 的蒸馏水并调节溶液 pH 值,按照与浮选试验相同的调浆条件加药剂,用磁力搅拌器搅拌 3 min 后在 Zetasizer Nano Zs90 分析仪上进行矿物表面 ζ 电位测量。测量重复三次取平均值。

1.2.3 微量热测定

微量热测定可通过矿物与捕收剂作用的净反应热量化其反应程度。在 30 $^{\circ}\text{C}$ 恒温环境中,使用 SETARAM C80 量热计进行微量热测量。每次测量前,100 mg 矿物样品和 3.6×10^{-5} mol/L DTAB 分别放入量热计

池的两个隔间中,两个隔间由圆形聚四氟乙烯(PTFE)薄膜隔开。待量热计基线完全稳定后,用可移动杆打破矿物颗粒与捕收剂之间的隔膜。测量过程中,在温度稳定性为 $\pm 0.0001 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的基础上保持 $\pm 0.12 \mu\text{W}$ 的基线。

1.2.4 红外光谱分析

红外光谱测试在 Spectrum one 傅立叶变换红外光谱仪上进行测定。采用 KBr 压片,测量范围 4 000 ~ 400 cm^{-1} 。红外分析样品制备过程如下:每次称取 2 g 矿样给入浮选槽,调节矿浆 pH 值后加入适量的药剂,充分搅拌后固液分离,用相同 pH 值的蒸馏水溶液洗涤矿物两次,所得样品在真空干燥箱内 60 $^{\circ}\text{C}$ 以下烘干,进行红外光谱检测。

1.2.5 X 射线光电子能谱分析

每次称取矿样 2 g,按照测试要求,根据相应单矿物浮选试验一致的药剂条件调浆、加药,用离心机在 3 500 r/min 转速下离心 10 min 后进行固液分离,并将离心后的固体矿物用蒸馏水反复清洗、搅拌再分离两次,最后于真空干燥箱内 60 $^{\circ}\text{C}$ 以下烘干,采用 Thermo-ESCALAB 250XI 型 X 射线光电子能谱仪检测。

1.2.6 分子动力学模拟

为了比较十二烷基三甲基溴化铵在磷灰石和钾长石表面浮选吸附过程中的异同,采用 DFT 计算的方法,初步构建了十二烷基三甲基溴化铵在磷灰石表面和钾长石表面的吸附模型。在 Material Studio 软件中,使用 DMol3 模块,采用 GGA-PW91 泛函,几何优化收敛标准如下:能量的收敛阈值为 1.0×10^{-4} Ha;原子位移的最大值为 0.05 \AA (1 $\text{\AA} = 0.1 \text{ nm}$);原子间作用力的收敛阈值为 0.02 Ha/ \AA ;SCF 阈值为 1.0×10^{-4} Ha;电子处理方式为 DSPP;DIIS size 为 6;smearing 值为 0.005 Ha。

2 磷灰石与钾长石的浮选行为

2.1 DTAB 作用下磷灰石与钾长石的可浮性

2.1.1 pH 值对矿物可浮性的影响

在十二烷基三甲基溴化铵(DTAB)用量设定为 3.0×10^{-5} mol/L 的条件下,考察了矿浆 pH 值对矿物可浮性的影响,试验结果见图 2。从图中可以看出,在弱酸性环境中,随着 pH 值的上升,钾长石回收率逐渐增大,在 pH 值 6 ~ 11 的区间里钾长石回收率均在 80% 以上;而磷灰石则在 2 ~ 12 的 pH 范围内几乎不上浮。可见在 pH 值区间为 5 ~ 11 的弱酸性至碱性范围中,DTAB 对两种矿物体现出良好的选择性捕收作用。

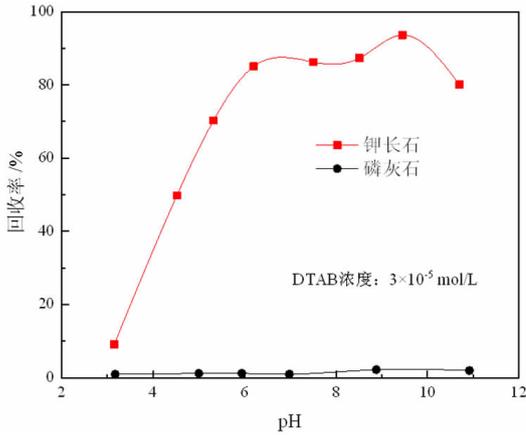


图2 pH 值对钾长石与磷灰石浮选的影响

Fig. 2 Effect of pH value on floatability of potassium feldspar and apatite

2.1.2 DTAB 用量对矿物可浮性的影响

在矿浆 pH 值为 9.0 时,DTAB 用量对矿物的可浮性见图 3。由图 3 可以看出,随着用量的上升,钾长石回收率逐渐上升,而磷灰石则几乎无法上浮,当 DTAB 用量达到 $3.0 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ 以上时,二者可浮性差异较大。

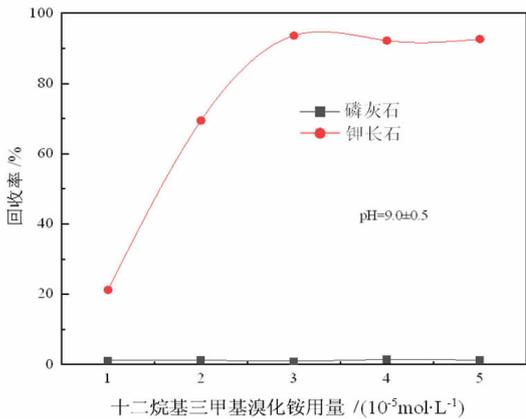


图3 DTAB 用量对钾长石与磷灰石浮选回收率的影响

Fig. 3 Effect of DTAB dosage on floatability of potassium feldspar and apatite

2.2 人工混合矿浮选

单矿物浮选试验结果表明,DTAB 为捕收剂时,磷灰石和钾长石的可浮性差异较大,为进一步考察 DTAB 对二者的选择性分离作用,进行了人工混合矿浮选试验,试验结果见表 2。试验过程中 DTAB 用量为 $3 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$,矿浆 pH 值为 9.0。人工混合矿浮选试验最终获得 P_2O_5 品位和回收率分别为 34.85% 和 91.46% 的磷精矿,精矿中 Al_2O_3 的含量为 1.52%,表明 DTAB 具有良好的选择性,可以实现钾长石和磷灰石的选择性分离。

表 2 人工混合矿浮选试验结果

/%

Table 2 Flotation test results of artificial mixed ore

产品	产率	品位		回收率	
		P_2O_5	Al_2O_3	P_2O_5	Al_2O_3
尾矿	20.35	12.74	16.54	8.54	73.49
精矿	79.65	34.85	1.52	91.46	26.51
原矿	100.00	30.35	4.58	100.00	100.00

3 作用机理

3.1 Zeta 电位分析

在 DTAB 用量为 $3.0 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ 的条件下,通过 Zeta 电位测量考察了磷灰石和钾长石在不同 pH 值环境中的药剂吸附情况,试验结果见图 4。如图 4 所示,在试验 pH 值区间,DTAB 作用前后磷灰石的 Zeta 电位变化较小,表明在该 pH 值区间内,DTAB 的吸附较弱;而对于钾长石,其 Zeta 电位在试验 pH 区间表面均荷负电,DTAB 作用后 Zeta 电位明显升高,表明阳离子捕收剂 DTAB 在钾长石表面可通过静电作用吸附在钾长石表面,这与浮选结果吻合。

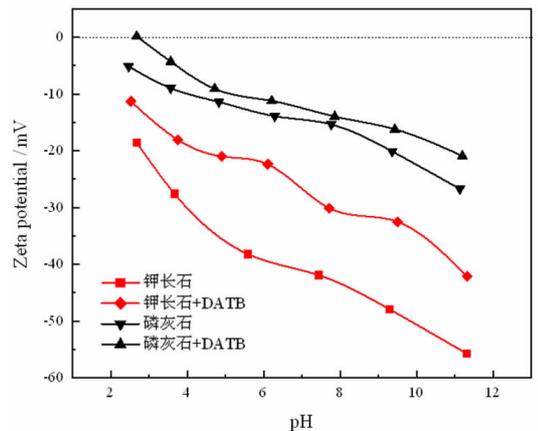


图4 pH 值对钾长石与磷灰石 Zeta 电位的影响

Fig. 4 Zeta potentials of potassium feldspar and apatite as a function of pH value before and after adding DTAB

3.2 微量热测定

物理与化学反应的进行都伴随着热量的交换,而通过比不同反应间热量交换的差异可以表征反应的强弱^[18-20]。在本节中,我们使用微量热分析来比较 DTAB 在磷灰石和钾长石表面的吸附程度。

如图 5 所示,两种矿物与 DTAB 作用的反应热差异较大,磷灰石的净反应热 Q_{DTAB} (0.617 J/g) 远小于钾长石的净反应热 Q_{DTAB} (15.674 J/g),表明 DTAB 与钾长石的反应剧烈程度远大于磷灰石,这与浮选结果相吻合。

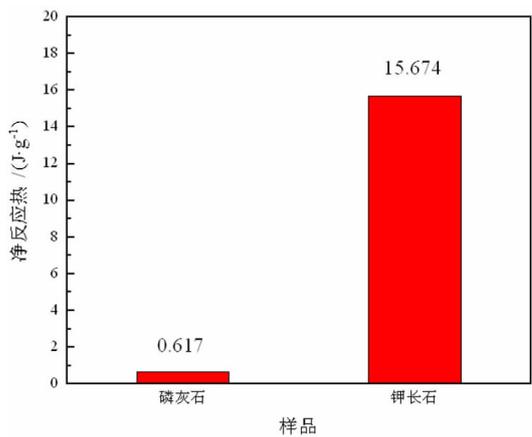


图5 钾长石与磷灰石的微量热结果

Fig. 5 Microcalorimetric atlas of potassium feldspar and apatite

3.3 红外光谱分析

通过对 DTAB 作用前、后的磷灰石和钾长石进行红外光谱分析,研究其吸附机理。在图 6(a) DTAB 的 FTIR 光谱中,2 923 cm^{-1} 和 2 848 cm^{-1} 处为 $-\text{CH}_2$ 对称和不对称拉伸频率,在 1654 cm^{-1} 处的特征峰归属于

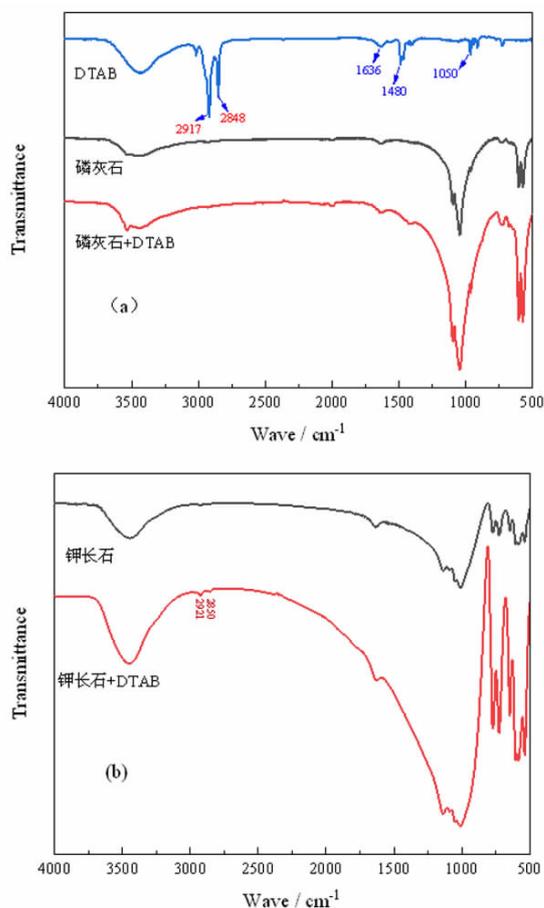


图6 磷灰石(a)和钾长石(b)与 DTAB 作用前后红外光谱

Fig. 6 Infrared spectra of apatite (a) and potassium feldspar (b) before and after interaction with DTAB

$\nu\text{R}_2\text{NH}$, 而 1 050 cm^{-1} 处归属于 C - N 的伸缩振动^[21]。

如图 6(b) 所示,在与 DTAB 作用后,磷灰石表面未检测到 DTAB 的特征吸收峰,表明 DTAB 在磷灰石表面的吸附较弱,这一结果与浮选试验结果一致。在钾长石表面,DTAB 处理后钾长石的光谱中在 2 923 cm^{-1} 和 2 848 cm^{-1} 处出现 $-\text{CH}$ 特征峰,表明 DTAB 在钾长石表面发生物理吸附。

3.4 X 射线光电子能谱分析

表 3 为 DTAB 处理前后的磷灰石和钾长石表面上各种元素的相对含量。如表 3 所示,与 DTAB 作用后,磷灰石和钾长石表面元素的分布密度发生不同程度的变化。与 DTAB 作用后,磷灰石表面 N 原子相对含量较低(0.12%)明显低于钾长石表面 N 原子相对含量(0.31%),证明 DTAB 在钾长石表面的吸附量显著大于磷灰石。

表 3 与 DTAB 作用前后钾长石和磷灰石表面的相对原子含量 /%

Table 3 Relative atomic concentration of potassium feldspar and apatite surface before and after adding DTAB

样品	相对原子含量						
	Al	Si	P	C	N	O	Ca
磷灰石			5.57	9.74		76.47	8.72
磷灰石 + DATB			6.14	8.4	0.12	76.81	8.61
钾长石	3.12	8.95		17.67		70.39	
钾长石 + DATB	3.08	9.07		16.92	0.31	70.43	

3.5 分子动力学模拟

采用分子动力学模拟分析了 DTAB 在两种矿物表面的吸附。构建矿物表面模型过程中,磷灰石与钾长石均取(001)面为实际解理面^[22-23];十二烷基三甲基溴化铵溶液中,溴离子易解离,长链离子作为主要的作用单元,但长链离子作用基团中的核心 N 原子被 3 个 $-\text{CH}_3$ 基团包裹在中间,使长链离子与两种矿物表面均存在较为明显的空间位阻效果(位阻情况见图 7)。实际上,十二烷基三甲基溴化铵很难以两个核心作用原子 N - O 之间的常态原子半径之和 1.36 Å 为距离尺度,直接形成较强的化学吸附。

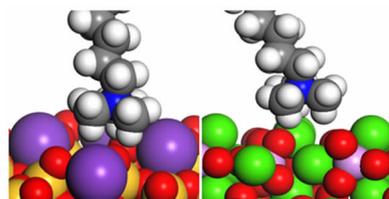


图7 十二烷基三甲基溴化铵在钾长石(001)面(左)和磷灰石(001)面(右)的空间位阻情况

Fig. 7 The steric hindrance of dodecyl trimethyl ammonium bromide on the surface of potassium feldspar (001) (left) and collophane (001) (right)

为了验证目标药剂与不同矿物的吸附效果与吸附类型,测试了十二烷基三甲基溴化铵在磷灰石和钾长石表面,在近、中、远三种距离模式下的吸附结果,构建的基础模型见图 8,数据见表 4。

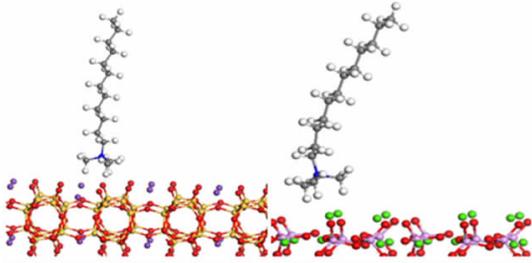


图 8 十二烷基三甲基溴化铵在钾长石(001)面(左)和磷灰石(001)面(右)的基础吸附模型

Fig. 8 Basic adsorption model of dodecyl trimethyl ammonium bromide on potassium feldspar (001) surface (left) and collophane (001) surface (right)

表 4 十二烷基三甲基溴化铵在不同表面、不同距离条件下的吸附结果

Table 4 Adsorption results of dodecyl trimethyl ammonium bromide on different surfaces and distances

吸附表面	初始间距/Å	作用后间距/Å
钾长石	近:2.213	3.548
	中:3.609	3.614
	远:3.809	3.74
磷灰石	近:2.724	4.108
	中:3.853	4.09
	远:4.322	4.13

如表 4 所示,十二烷基三甲基溴化铵在磷灰石和钾长石表面的吸附计算说明,在近间距条件下,十二烷基三甲基溴化铵明显受空间位阻和非极性基的排斥作用影响,长链离子均被明显排斥较远;在中间距条件下,排斥距离较短;在远间距条件下,相比于常态原子半径之和 $N-O$ 1.36 Å,作用后间距较大,已超出化学吸附作用范畴,但在静电作用的吸引下,拉近了有限的距离。这组数据证明了在近、中、远作用间距上,DTAB 在矿物表面均存在静电作用。在磷灰石表面,十二烷基三甲基溴化铵被排斥的效果更加突出,在钾长石表面的吸附距离要明显低于在磷灰石表面的吸附距离,这说明十二烷基三甲基溴化铵在钾长石表面的吸附效果明显强于在磷灰石表面的吸附效果。

4 结论

(1) 季铵盐捕收剂十二烷基三甲基溴化铵(DTAB)作捕收剂时,在 pH 值区间 5~11 范围内钾长石与磷灰石可浮性差异较大,人工混合矿浮选试验可以获得 P_2O_5 品位 34.85%、回收率 91.46% 的磷精矿,精矿中 Al_2O_3 的含量为 1.52%,表明 DTAB 可以实现

钾长石和磷灰石的选择性分离。

(2) Zeta 电位、微量热分析、XPS 测定、红外光谱及分子模拟结果表明,DTAB 在钾长石和磷灰石表面吸附存在较大差异,DTAB 可通过静电作用在钾长石表面吸附,而在磷灰石表面难以发生吸附。

参考文献:

- [1] 陈卫东,张玉霞,丛百明,等.不同磷肥处理下苜蓿根颈抗寒性及在低温胁迫下糖类物质变化[J].中国农业科技导报,2022,24(2):210-217.
CHEN W D, ZHANG Y X, CONG B M, et al. Cold resistance of alfalfa root neck under different phosphate fertilizer treatments and changes of carbohydrate under low temperature stress [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022, 24(2): 210-217.
- [2] Anđelković IB, Kabiri S, Tavakkoli E, et al. Graphene oxide-Fe(III) composite containing phosphate-A novel slow release fertilizer for improved agriculture management [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 185: 97-104.
- [3] 汤家焰,何嘉宁,张少杰,等.磷矿浮选中磷灰石和石英的交互行为[J].非金属矿,2021,44(6):69-73.
TANG J Y, HE J N, ZHANG S J, et al. Interaction between apatite and quartz in phosphate ore flotation [J]. Non-Metallic Mines, 2021, 44(6): 69-73.
- [4] 易雕,王雪.几种羟肟酸捕收剂与氟磷灰石作用机理研究[J].贵州科学,2020,38(5):85-88.
YI D, WANG X. Mechanism of the interaction between hydroxamic acid collectors and fluorapatite [J]. Guizhou Science, 2020, 38(5): 85-88.
- [5] 郭萧轲,葛英勇,郭文宾,等.金属离子对磷矿醚胺反浮选脱硅的影响[J].化工矿物与加工,2019,48(2):33-36+40.
GUO X K, GE Y Y, GUO W B, et al. Effect of metal ions on desilicization of apatite by reverse flotation with ether amine as a collector [J]. Industrial Minerals & Processing, 2019, 48(2): 33-36+40.
- [6] 李丰,田鹏杰.某钙质胶磷矿反浮选试验及机理研究[J].化工矿物与加工,2016,45(10):8-10.
LI F, TIAN P J. Research on reverse flotation test and mechanism of a siliceous colophonite [J]. Industrial Minerals & Processing, 2016, 45(10): 8-10.
- [7] 李宁,付磊,王涛,等.硅酸盐型胶磷矿单一反浮选工艺研究及工业化应用[J].有色金属(选矿部分),2019(5):90-94.
LI N, FU L, WANG T, et al. Study on SLR flotation technology of silicate type phosphate ore and its industrial application [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(5): 90-94.
- [8] 邓坤,葛英勇,郭萧轲,等.某硅质胶磷矿正-反浮选试验研究[J].矿冶工程,2020,40(4):42-44.
DENG K, GE Y Y, GUO X K, et al. Direct and reverse flotation of silicon magnesium colophonite [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(4): 42-44.
- [9] 杨稳权,张华,赵凤婷.云南硅质胶磷矿正浮选浮磷脱硅研究[J].化工矿物与加工,2020,49(5):25-27.
YANG W Q, ZHANG H, ZHAO F G. Study on desilication of direct flotation of siliceous phosphate rock in Yunan [J]. Industrial Minerals & Processing, 2020, 49(5): 25-27.
- [10] 朱一民,陈通,闫啸,等.新型磷灰石常温捕收剂的浮选试验研究[J].矿产综合利用,2017(6):39-43.
ZHU Y M, CHEN T, YAN X, et al. Collecting performance of new collectors on apatite at room temperature [J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2017(6): 39-43.
- [11] WANG Y, HU Y, HE P, et al. Reverse flotation for removal of silicates from diasporic-bauxite [J]. Minerals Engineering, 2004, 17(5): 63-68.
- [12] 徐伟,秦红,田言,等.WFC-01反浮选贵州某硅钙质胶磷矿及作用

- 机理研究[J]. 化工矿物与加工, 2018, 47(3): 9-11+27.
- XU W, QIN H, TIAN Y, et al. Study on reverse flotation test of WFC-01 for a siliceous and calcareous phosphate ore from Guizhou and its mechanism[J]. Industrial Minerals & Processing, 2018, 47(3): 9-11+27.
- [13] 郭芳,李军,等.反浮选法提高细粒径硅钙质磷矿品位[J].北京科技大学学报,2010,32(11):1388-1392.
- GUO F, LI J, et al. Improving the grade of asiliceous-calcareous phosphate ore with fine size by Reverse flotation method[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(11): 1388-1392.
- [14] 凌石生,刘四清.铝土矿反浮选脱硅药剂评述[J].矿产保护与利用, 2008(3):49-54.
- LIN S S, LIU S Q. A review of reagents on desilication of bauxite ores by reverse flotation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2008(3): 49-54.
- [15] 黄志强. Gemini 有机硅捕收剂的合成及其对铝硅酸盐矿物的浮选性能研究[D].长沙:中南大学,2010:1-85.
- HUANG Z Q. Synthesis of Gemini silicone collector and its flotation performance for aluminosilicate minerals[D]. Changsha: Central South University, 2010: 1-85.
- [16] 刘鸣,葛英勇,孟雨,等.湖北某磷矿反浮选钾长石试验研究[J].硅酸盐通报,2018,37(2):644-648.
- LIU M, GE Y Y, MENG Y, et al. Experimental study on reverse flotation of potassium feldspar from phosphate ore in Hubei[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(2): 644-648.
- [17] PAWLK M, LASKOWSKI JS. Coal reverse flotation. part I. adsorption of dodecyltrimethyl ammonium bromide and humic acids onto coal and silica[J]. Coal Preparation, 2003, 23: 91-112.
- [18] 匡敬忠,马强,刘鹏飞,等.微量热法研究白钨矿在 NaOH 溶液中的溶解及其与油酸钠作用的热力学[J].稀有金属,2021,45(3): 322-332.
- KUANG J Z, MA Q, LIU P F, et al. Microcalorimetric study on the dissolution of scheelite in NaOH solution and the thermokinetics of its interaction with sodium oleate[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021, 45(3): 322-332.
- [19] 刘鹏飞.白钨矿、萤石、方解石的溶解特性及微量热动力学研究[D].赣州:江西理工大学,2018:1-69.
- LIU P F. Study on the dissolution characteristic and microcalorimetry kinetics of scheelite, fluorite and calcite[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2018: 1-69.
- [20] 蓝丽红,陈建华.含杂质方铅矿吸附黄药的微量热动力学研究(英文)[J].Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2016,26(1):272-281.
- LAN L H, CHEN J H. Microthermokinetic study of xanthate adsorption on impurity-doped galena[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(1): 272-281.
- [21] 徐花兰,郭瑞光,唐长斌.镀锌钢表面氟锆酸盐/十二烷基三甲基溴化铵转化膜制备与耐蚀性研究[J].材料保护,2020,53(12):49-54+71.
- XU H L, GUO R G, TANG C B. Preparation and corrosion resistance of fluorozirconate/DTAB conversion coatings on galvanized steels surface[J]. Materials Protection | Mater Protec, 2020, 53(12): 49-54+71.
- [22] LIU C, ZHU L, FU W, et al. Investigations of amino trimethylene phosphonic acid as a green and efficient depressant for the flotation separation of apatite from calcite[J]. Minerals Engineering, 2022, 181: 107552.
- [23] SONI A, PATEY G N. Simulations of water structure and the possibility of ice nucleation on selected crystal planes of K-feldspar[J]. The Journal of Chemical Physics, 2019, 150(21): 214501.

Effect and Mechanism of Dodecyl Trimethylammonium Bromide in Flotation Separation of Apatite and Potassium Feldspar

YU Haoyong, ZHU Yangge, LI Songqing, HU Xiaoxing

Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy, State Key Laboratory of Mineral Processing Science and Technology, Beijing 102628, China

Abstract: In this paper, quaternary ammonium salt dodecyl trimethyl ammonium bromide (DTAB) was used as collector, and the flotation behavior and mechanism of potassium feldspar and apatite in DTAB system were comparatively investigated. The flotation test results of pure minerals show that DTAB has excellent collecting performance for potassium feldspar in the range of pulp pH value from 6 to 11, while apatite has poor floatability. When the dosage of DTAB is 3×10^{-5} mol/L and the pH is 9.45, the flotation recoveries of potassium feldspar and apatite are 93% and 2% respectively. From the artificial mixed ore with potassium feldspar and apatite in the mass ratio of 3:1, the apatite concentrate with P_2O_5 content of 34.85%, Al_2O_3 content of 1.52%, P_2O_5 recovery of 91.46% can be obtained, indicating that DTAB can realize the selective separation of potassium feldspar and apatite. The flotation test results of artificial mixed ore show that DTAB can realize the selective separation of potassium feldspar and apatite. The results of Zeta potential, XPS and FTIR results show that DTAB is selectively adsorbed on the surface of potassium feldspar through physical adsorption, but less on the surface of apatite. Microcalorimetric results show that the reaction between DTAB and potassium feldspar is more intense than that of apatite. The molecular simulation results show that the adsorption effect of dodecyl trimethyl ammonium bromide on potassium feldspar surface is obviously stronger than that on apatite.

Keywords: apatite; potassium feldspar; flotation; mechanism; collector; dodecyl trimethyl ammonium bromide

引用格式:俞豪勇,朱阳戈,李松清,胡晓星.十二烷基三甲基溴化铵在磷灰石与钾长石浮选分离中的捕收作用与机理[J].矿产保护与利用,2022,42(2):74-79.

YU Haoyong, ZHU Yangge, LI Songqing, HU Xiaoxing. Effect and mechanism of dodecyl trimethylammonium bromide in flotation separation of apatite and potassium feldspar[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(2): 74-79.