

稀土矿浮选中 Ce^{3+} 离子对方解石的活化作用机理研究^{*}

屈奇奇, 曹钊, 张文博, 胡轶文, 黄英豪, 许杰

(内蒙古科技大学 矿业研究院, 内蒙古 包头 014010)

摘要:通过单矿物浮选试验、红外光谱分析和 Zeta 电位测试等方法,研究了以辛基羟肟酸(OHA)为捕收剂浮选稀土矿浆中 Ce^{3+} 离子对脉石矿物方解石的活化作用机理。浮选结果表明,当辛基羟肟酸 OHA 浓度为 $2.5 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$,矿浆中 Ce^{3+} 离子浓度小于 $1 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 时,在 pH 6~11 之间 Ce^{3+} 对方解石有活化作用。机理分析结果表明, Ce^{3+} 离子在方解石表面作用后形成活性位点,能与辛基羟肟酸根作用生成稳定的五元环螯合物,从而促进了捕收剂羟肟酸在方解石表面的吸附作用,使方解石浮选被活化。

关键词:方解石;氟碳铈矿; Ce^{3+} 离子;活化

中图分类号:TD923⁺.14 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-0076(2018)03-0071-06

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2018.03.013

Research on Activation Mechanism of Ce^{3+} Ions on Calcite in Rare Earth Ore Flotation

QU Qiqi, CAO Zhao, ZHANG Wenbo, HU Yiwen, HUANG Yinghao, XU Jie

(Institute of Mining Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: The activation mechanism of Ce^{3+} ions on calcite in rare earth ore flotation using octanohydroxamic acid as collector was studied by single mineral flotation experiment, IR spectroscopy and Zeta potential measurement. The flotation results show that Ce^{3+} ions could activate the flotation of calcite at pH 6~11 when the Ce^{3+} concentration was less than $1 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ and OHA concentration was $2.5 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$. The mechanism results show that Ce^{3+} ions could act as the active site on calcite surface, which reacted with OHA ions to form stable five-membered ring chelate. Therefore, the adsorption of collector OHA on calcite was promoted and thus calcite flotation was activated.

Key words: calcite; bastnaesite; Ce^{3+} ions; activation

稀土作为一种重要的国家战略储备,其资源的开发利用在世界各国均受到了广泛关注。在稀土矿浮选过程中,含 Ca 脉石矿物(方解石)难被抑制一直是其浮选生产所面临的主要技术难题,主要原因是稀土矿物和含 Ca 脉石矿物均为半可溶性盐类矿

物,在磨矿中易溶解产生大量的难溶金属离子,难免金属离子在方解石等含 Ca 脉石矿物表面吸附会使其浮选受到活化^[1-4]。目前已有研究表明, Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Ce^{3+} 等离子会活化这类含 Ca 脉石矿物的浮选^[5]。

* 收稿日期:2018-04-26

基金项目:国家自然科学基金(51764045);内蒙古自治区研究生科研创新项目(S20171012703)

作者简介:屈奇奇(1992-),男,硕士,研究方向为稀土矿浮选综合利用。

通信作者:曹钊(1985-),男,副教授,博士,研究方向为金属矿选矿。

矿物浮选过程中,难免金属离子对矿物浮选的影响国内外学者已进行了大量研究。董宏军等^[6]研究了 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 四种金属离子对蓝晶石浮选的影响,结果表明 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 离子对蓝晶石的活化起主要作用。高玉德^[7]等采用浮选和多种分析测试手段研究证明 Pb^{2+} 可促进苯甲羟肟酸在黑钨矿表面的吸附,在 pH 为 9 时,苯甲羟肟酸易与黑钨矿表面作用的 Pb^{2+} 离子发生“O,O”螯合生成羟肟酸盐,使其浮选收到活化。邹志雄等^[8]通过 Zeta 电位测试得到常见金属离子作为白云母和石英矿物的活性位点,可提高两种矿物的浮选回收率。贺智明等^[9]研究发现 Pb^{2+} 离子能显著提高金红石表面钛质点的活性,活化金红石浮选。FORNASIERO 等^[10]研究表明 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 离子能够活化蛇纹石、绿泥石和石英浮选。稀土矿浮选中由于氟碳铈矿和独居石等稀土矿物溶解产生大量的 Ce^{3+} 离子,矿浆中 Ce^{3+} 离子对含钙脉石矿物浮选会产生意外活化,然而其活化机理研究却鲜有报道。

本文采用单矿物浮选研究矿浆中 Ce^{3+} 离子对方解石浮选的活化规律,并结合红外光谱分析、溶液化学计算和 Zeta 电位测试等方法研究 Ce^{3+} 离子对方解石浮选的活化,研究结果可对稀土矿浮选生产实践提供一定的理论指导。

1 试验

1.1 试验试样与试剂

(1) 试样

氟碳铈矿和方解石均取自山东某稀土选矿厂,矿石经人工手选除杂、破碎后,再经陶瓷球磨机磨矿,筛选出 $-0.074 \sim +0.038 \text{ mm}$ 粒级作为单矿物试验用纯矿物,化学分析表明其纯度在 99% 以上。

(2) 试剂

辛基异羟肟酸(OHA)作为稀土矿的捕收剂,试验所需氯化铈、氯化铁、氯化钙、氯化铝以及 pH 调整剂(盐酸、氢氧化钠)等试剂均为分析纯。试验用水为去离子水。

1.2 试验方法

(1) 单矿物浮选试验

单矿物浮选采用 XFGC II-35 型挂槽浮选机,浮选转速固定为 1 992 r/min,浮选温度保持在室温。试验流程如下图 1,每次试验称取矿样 2.000 g

(误差 $\pm 0.002 \text{ g}$),加入 30 mL 的去离子水,调浆后按照一定浓度和加药顺序依次加入浮选药剂,每次加药剂之间调整 2 min,浮选手工刮泡 4 min,将泡沫产物进行烘干、称重,并计算浮选指标。

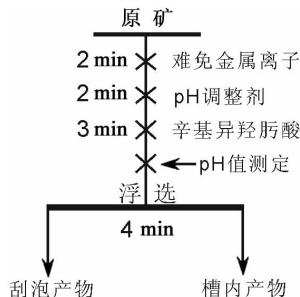


图 1 方解石浮选试验流程

Fig. 1 The flowsheet of calcite flotation experiment

(2) 红外光谱分析(FTIR)

矿样红外光谱采用 Bruker VERTEX 70 型傅里叶转换红外光谱仪进行测试。先将纯矿物样品研磨至粒径 $-5 \mu\text{m}$,称取 1 g 置于烧杯中,加入一定浓度的药剂后调节 pH 至 9 左右,在磁力搅拌器上充分搅拌 10 min 后进行过滤,过滤样品再经真空干燥箱烘干,之后将处理好的样品与溴化钾混匀、压片,最后放置在红外光谱仪上进行测试(分辨率为 $2 \sim 4 \text{ cm}^{-1}$)待测样品的红外光谱。

(3) Zeta 电位测试

矿样 Zeta 电位采用布鲁克海文 ZetaPlus 电位仪进行测试。将少量方解石单矿物研磨至粒径 $-5 \mu\text{m}$,称取 5 mg 置于烧杯中,按照浮选加药顺序加入一定浓度的药剂后采用 HCl 或 NaOH 调节 pH,在搅拌器上搅拌 5 min 后,吸取少量样品置于样品槽中进行测试,测得 3 次 Zeta 电位值并计算出平均值。

2 结果与讨论

2.1 捕收剂 OHA 对氟碳铈矿浮选的影响

为确定主要稀土矿物氟碳铈矿浮选最佳的 pH 值和捕收剂 OHA 用量,首先固定矿浆 pH 为 9,考察不同用量 OHA 对氟碳铈矿浮选回收率的影响,结果如图 2 所示。由图 2 可知,氟碳铈矿浮选回收率随着 OHA 用量的增加而增大,当 OHA 用量为 $2.5 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 时,氟碳铈矿达到最大浮选回收率 90% 并趋于稳定,由此,确定氟碳铈矿浮选 OHA 最佳用量为 $2.5 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 。

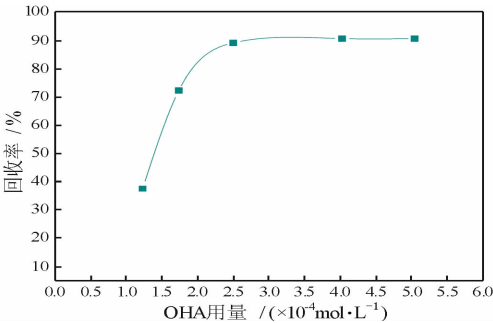
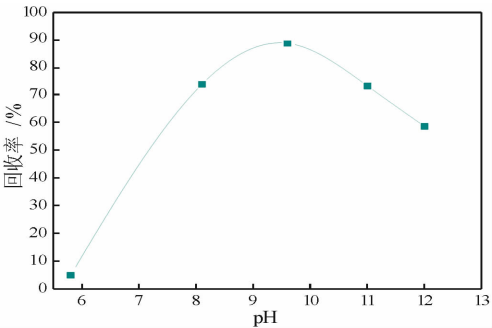


图2 OHA 用量对氟碳铈矿回收率的影响 (pH =9)
Fig.2 The effect of OHA dosage on the recovery of bastnaesite (pH =9)

固定 OHA 用量为 2.5×10^{-4} mol/L,考察不同 pH 对氟碳铈矿浮选回收率的影响,结果如图 3 所示。氟碳铈矿浮选回收率先随 pH 升高而增大,直至 pH 为 9 左右取得最大回收率,之后随着 pH 继续增大氟碳铈矿浮选回收率随之减小,由此,确定氟碳铈矿浮选的最佳 pH 为 9 左右。

2.2 难免金属离子对方解石活化影响

在固定 OHA 用量为 2.5×10^{-4} mol/L,考察不



(OHA 用量 2.5×10^{-4} mol/L)
图3 不同 pH 值对氟碳铈矿浮选回收率的影响
Fig.3 The effect of pH on the recovery of bastnaesite

同 pH 下以及不同 Ce^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 及 Ca^{2+} 离子对方解石浮选回收率的影响,结果如表 1 所示。结果表明这四种金属离子中 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 及 Ca^{2+} 离子对方解石浮选均无活化作用,而 Ce^{3+} 离子对方解石浮选有较强的活化效果,pH 为 9 时, Ce^{3+} 离子浓度为 5×10^{-5} mol/L 时可将方解石回收率由 78% 提高至 88.4%, Ce^{3+} 离子浓度为 1×10^{-4} mol/L 时可将方解石浮选回收率提高至 94.5%。

表 1 不同 pH 值下难免金属离子对方解石回收率的影响

Table 1 The effect of inevitable metal ions on calcite recovery under different pH values									
pH	无离子	Ce^{3+} 离子 (mol/L)		Fe^{3+} 离子 (mol/L)		Al^{3+} 离子 (mol/L)		Ca^{2+} 离子 (mol/L)	
		5×10^{-5}	1×10^{-4}	5×10^{-5}	1×10^{-4}	5×10^{-5}	1×10^{-4}	5×10^{-5}	1×10^{-4}
6.6	38%	44%	49%	35.5%	33%	35%	32%	31%	34%
8	59%	68.5%	80%	57.5%	56%	53%	50%	46.5%	55%
9.2	78%	88.4%	94.5%	72.8%	70%	73.2%	69%	60%	73.5%
10	81%	94.5%	96%	77.1%	74.5%	78%	72%	62%	79%
11.5	55%	55.5%	58%	39.5%	38%	50%	46.5%	53.5%	62%

图 4 为 pH =9、OHA 浓度 2.5×10^{-4} mol/L 时,不同用量 Ce^{3+} 离子对方解石回收率的影响。

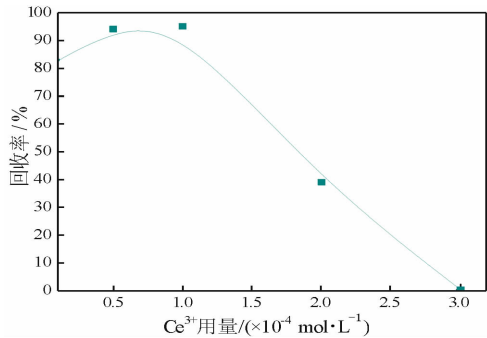


图4 Ce^{3+} 离子用量对方解石回收率的影响
Fig.4 The effect of Ce^{3+} ion dosage on calcite recovery

由图 4 可知,随着 Ce^{3+} 离子用量的增加,方解

石的回收率呈现先增大后减小的趋势,当 Ce^{3+} 离子的浓度为 1×10^{-4} mol/L 时,方解石的回收率达到了最大值 94.5%;继续增大 Ce^{3+} 离子浓度,方解石回收率迅速下降。从上述结果上可以看出, Ce^{3+} 离子在一定浓度范围内对方解石浮选具有活化作用,当 Ce^{3+} 离子浓度小于 1×10^{-4} mol/L, Ce^{3+} 离子能显著活化方解石的浮选,大于该浓度值后 Ce^{3+} 离子对方解石的浮选产生抑制,其主要原因为当矿浆中存在过量 Ce^{3+} 离子时,大部分 Ce^{3+} 离子没有吸附于方解石表面,矿浆中游离的 Ce^{3+} 离子会快速消耗捕收剂 OHA,从而抑制方解石浮选。

图 5 为 Ce^{3+} 离子浓度分别在 0 、 0.25×10^{-4} 、 0.5×10^{-4} 和 1×10^{-4} mol/L 时 pH 值对方解石回收率的影响。

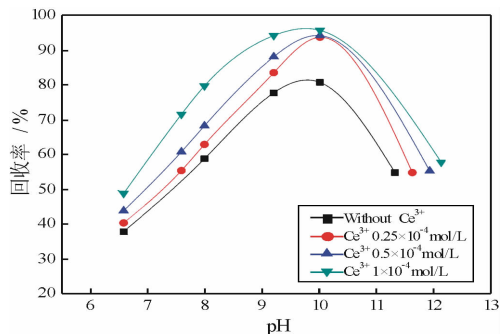


图5 不同 Ce^{3+} 离子浓度下 pH 值对方解石回收率的影响
Fig. 5 The effect of pH value on calcite recovery at different Ce^{3+} concentration

由图5可知,在任一浓度条件下,方解石回收率都随着pH值的增加而呈现先增大后减小的趋势,在pH为9左右达到最大浮选回收率;相同pH条件下,方解石回收率随 Ce^{3+} 离子浓度增加而增大,当浓度为 $1 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 时浮选回收率达到最大值。

上述结果表明,OHA用量为 $2.5 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 时, Ce^{3+} 离子在一定浓度范围内对方解石浮选具有较强的活化作用,以下结合溶液化学计算、红外光谱和Zeta电位测试研究 Ce^{3+} 离子对方解石浮选的活化机理。

2.3 Ce^{3+} 离子对方解石活化机理

2.3.1 溶液化学计算

浮选过程中,矿浆溶液中金属离子的赋存状态及主要组分对矿物浮选会有显著影响。 Ce^{3+} 离子从氟碳铈矿表面溶解水化后主要组分有 Ce^{3+} 离子、羟基络合物以及 $\text{Ce}(\text{OH})_3$ 沉淀,图6所示为 Ce^{3+} 离子浓度为 $1 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 时的优势组分 $\text{LogC} - \text{pH}$ 图。

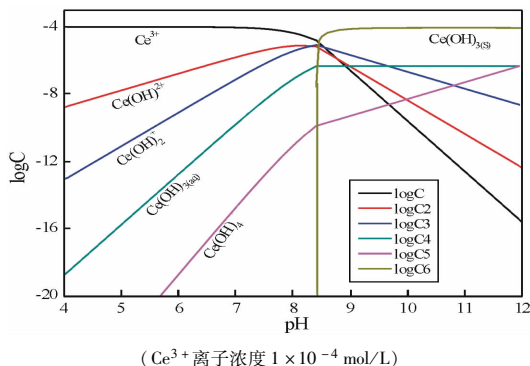


图6 Ce^{3+} 离子溶液的 $\text{logC} - \text{pH}$ 图
Fig. 6 $\text{LogC} - \text{pH}$ diagram of Ce^{3+} solution

由图6可知,在pH小于4.0的矿浆溶液中,离

子主要以 Ce^{3+} 形式存在;pH在4.0~5.7的范围内主要以 Ce^{3+} 、 $\text{Ce}(\text{OH})^{2+}$ 离子为主,同时有少量的 $\text{Ce}(\text{OH})_2^+$ 离子出现;pH在5.7~8.4范围内 Ce^{3+} 、 $\text{Ce}(\text{OH})^{2+}$ 、 $\text{Ce}(\text{OH})_2^+$ 三种离子共存, $\text{Ce}(\text{OH})_4^-$ 阴离子以微量形式存在;大于8.4后会有 $\text{Ce}(\text{OH})_{3(\text{aq})}$ 生成;在pH大于11后,溶液中主要以 $\text{Ce}(\text{OH})_4^-$ 阴离子存在。pH值在8到10的范围内,羟基络合物 $\text{Ce}(\text{OH})^{2+}$ 、 $\text{Ce}(\text{OH})_2^+$ 为主要优势组分,该pH范围内 Ce^{3+} 离子对方解石浮选的活化作用最强,故 $\text{Ce}(\text{OH})^{2+}$ 和 $\text{Ce}(\text{OH})_2^+$ 是活化方解石的主要组分^[11]。

2.3.2 红外光谱分析

图7所示为辛基羟肟酸OHA及OHA与pH=9时 Ce^{3+} 离子与OHA按摩尔比1:3混合生成的 $\text{Ce}^{3+} - \text{OHA}$ 沉淀的红外光谱图。

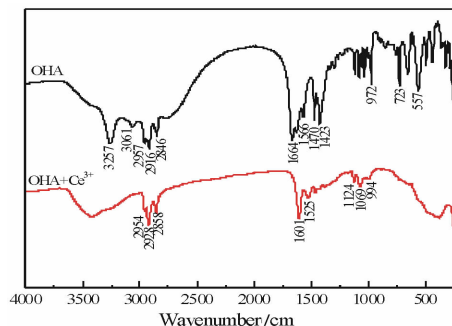


图7 辛基羟肟酸及辛基羟肟酸- Ce^{3+} 沉淀的红外光谱
Fig. 7 Infrared spectra of OHA and OHA- Ce^{3+} precipitates

由图7可知,OHA红外光谱中 1664 、 1625 cm^{-1} 处为 $-\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动峰, 2957 、 2916 、 2846 cm^{-1} 处为 $\text{CH}_2 - / - \text{CH}_3$ 伸缩振动峰, 3257 cm^{-1} 处为 $-\text{N}-\text{H}$ 和 $-\text{O}-\text{H}$ 叠加伸缩振动峰; $\text{Ce}^{3+} - \text{OHA}$ 沉淀红外光谱中 $-\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动峰红移至 1601 cm^{-1} 处,偏移量达到了 63 cm^{-1} ,主要是因为羟肟酸OHA与 Ce^{3+} 络合造成 $-\text{C}=\text{O}$ 双键上电子云密度向 Ce^{3+} 离子偏移,使得双键键能减弱,从而红外吸收峰波数降低。

图8中所示分别为方解石、OHA、方解石直接与OHA作用以及方解石被 Ce^{3+} 活化后再与OHA作用的红外光谱。

由图8可知,在方解石红外光谱中, 1430 、 879 、 710 cm^{-1} 处皆为方解石的特征吸收峰,分别对应为 $-\text{C}-\text{O}$ 反对称伸缩振动峰, CO_3^{2-} 面外变形振动和

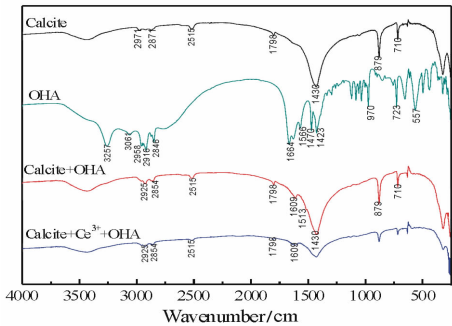


图 8 方解石、OHA、方解石与 OHA 作用及方解石被 Ce^{3+} 活化后与 OHA 的红外光谱

Fig. 8 Infrared spectra of calcite, OHA, calcite and OHA, and OHA after activated by Ce^{3+}

O - C - O 面内变形振动吸收峰^[12];OHA 直接作用于方解石表面时,在 $2\,925$ 、 $2\,854\text{ cm}^{-1}$ 处出现两个新的峰值,是 OHA 分子中 $CH_2 - / - CH_3$ 的 C - H 振动吸收分裂形成的;同时在 $1\,609\text{ cm}^{-1}$ 处出现了 - C = O 伸缩振动峰,表明 OHA 在方解石表面发生了化学吸附^[13]。OHA 在 Ce^{3+} 离子活化后方解石表面作用时,在 $1\,609\text{ cm}^{-1}$ 处出现了较强的 - C = O 伸缩振动峰,且相对图 7 中未吸附 OHA 的 - C = O 峰位产生红移(55 cm^{-1}),其原因为 OHA 与方解石表面 Ce^{3+} 离子作用后,OHA 分子中 - C = O 双键上电子云密度向 Ce^{3+} 离子发生偏移,使得双键键能减弱,红外吸收峰波数降低,这一结果充分表明捕收剂 OHA 分子中 - C = O 双键与 Ce^{3+} 离子产生配位作用,生成稳定螯合物而吸附于方解石矿物表面,进而对方解石浮选产生活化。饶金山等^[14]通过 XPS 能谱分析及朱玉霜等^[15]采用原子净电荷计算同样验证了辛基羟肟酸 OHA 能与矿物表面稀土金属离子反应生成一种稳定的 - C = O - Ce - O - N - 五元环螯合物。

2.3.3 Zeta 电位测试

为进一步研究 Ce^{3+} 离子对方解石表面电性的作用,测试了 Ce^{3+} 离子和 OHA 单独作用或共同作用前后方解石的 Zeta 电位,结果如图 9 所示。未与 Ce^{3+} 离子和 OHA 作用时,方解石 Zeta 电位随 pH 值的增大而减小,等电点为 $pH = 7.2$;当矿浆中加入浓度 $2.5 \times 10^{-4}\text{ mol/L}$ OHA 时,方解石 Zeta 电位发生负移,等电点由 $pH = 7.2$ 变化为 $pH = 6.5$,表明带负电的羟肟酸根离子可以吸附在方解石矿物表面,增加其表面负电性;当溶液中加入浓度 $1 \times 10^{-4}\text{ mol/L}$ Ce^{3+} 离子后,方解石 Zeta 电位发生正移,其等

电点向右偏移,由 $pH = 7.2$ 变化至 $pH = 8.6$,表明 Ce^{3+} 离子吸附在方解石表面,增强了解石表面的正电性;当溶液中依次加入浓度 $1 \times 10^{-4}\text{ mol/L}$ Ce^{3+} 离子和 $2.5 \times 10^{-4}\text{ mol/L}$ OHA 后,方解石 Zeta 电位在只与 Ce^{3+} 离子作用后的基础上发生了负移,等电点变化至 $pH = 7.8$,表明 OHA 可在 Ce^{3+} 离子作用后的方解石表面产生吸附,从而相对 Ce^{3+} 离子作用后降低了方解石的 Zeta 电位。

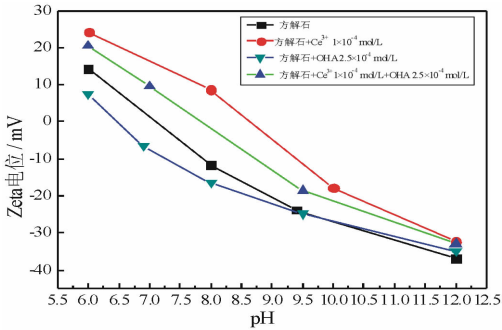


图 9 不同 pH 值下 Ce^{3+} 离子对方解石 Zeta 电位的影响

Fig. 9 The effect of Ce^{3+} ions on zeta potential of calcite at different pH values

3 结论

(1) 当辛基异羟肟酸 OHA 浓度为 $2.5 \times 10^{-4}\text{ mol/L}$,矿浆中 Ce^{3+} 离子浓度小于 $1 \times 10^{-4}\text{ mol/L}$ 时,在 $pH\ 6 \sim 11$ 之间 Ce^{3+} 对方解石有显著活化作用。当 Ce^{3+} 离子超过该浓度范围,矿浆中过量的 Ce^{3+} 离子会快速消耗 OHA,降低方解石回收率。

(2) Ce^{3+} 离子在方解石表面作用后形成活性位点,辛基羟肟酸可在方解石表面的 Ce^{3+} 离子活性位点产生络合吸附,从而增大辛基羟肟酸捕收剂在方解石表面吸附力,使其浮选受到活化。

参考文献:

[1] Zhang X, Du H, Wang X, et al. Surface chemistry considerations in the flotation of rare - earth and other semisoluble salt minerals [J]. Mineral & Metallurgical Processing, 2013, 30(1):1 - 9.

[2] Hu Y, Xu Z. Interactions of amphoteric amino phosphoric acids with calcium - containing minerals and selective salt minerals[J]. International Journal of Mineral Processing, 2003, 72(1):87 - 94.

[3] Filippove I, Filippove L, Duverger A, et al. Synergetic effect of a mixture of anionic and nonionic reagent; Ca mineral contrast separation by flotation at neutral pH[J]. Min-

- erals Engineering, 2014(66):135-144.
- [4] 卢烁十,孙传尧. 盐类矿物浮选现状[J]. 矿冶,2007,16(3):1-4.
- [5] 张波,李解,张雪峰,等. Cu^{2+} , Fe^{3+} 对萤石浮选的活化作用机制[J]. 稀有金属,2016,40(9):963-968.
- [6] 董宏军,陈彦. 金属离子对蓝晶石可浮性的影响及机理研究[J]. 非金属矿,1996,109(1):27-29.
- [7] 高玉德,邱显扬,韩兆元. 羟肟酸浮选白钨矿的机理[J]. 中国有色金属学报,2015,25(5):1339-1344.
- [8] 邹志雄,罗惠华,汤家焰. 常见金属离子对白云母和石英浮选特性的影响[J]. 矿产保护与利用,2018(1):66-71.
- [9] 贺智明,董雍赓,孙笈. 铅离子对水杨羟肟酸浮选金红石的活化作用研究[J]. 有色金属,1994,12(6):1-6.
- [10] Shackleton N J, Malysiak V, Oconnoy C T. The use of amine complexes in managing in advertent activation of pyroxene in a pentlandite - pyroxene flotation system[J]. Minerals Engineering, 2003, 16(9):849-856.
- [11] Zhang W, Honaker R Q, Groppo J G. Flotation of monazite in the presence of calcite part I: calcium ion effects on the adsorption of hydroxamic acid[J]. Minerals Engineering, 2017(100):40-48.
- [12] 冯其明,周清波,张国范,等. 六偏磷酸钠对方解石的抑制机理[J]. 中国有色金属学报,2011,21(2):436-441.
- [13] 高志勇,宋韶博,孙伟,等. 瓜尔胶和黄原胶对方解石浮选的抑制行为差异及机理[J]. 中南大学学报,2016,47(5):1460-1464.
- [14] 饶金山,何晓娟,罗传胜,等. 辛基羟肟酸浮选氟碳铈矿机制研究[J]. 中国稀土学报,2015,33(3):370-377.
- [15] 朱玉霜,朱建光. 浮选药剂的化学原理[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1996:117.

引用格式:屈奇奇,曹钊,张文博,等. 稀土矿浮选中 Ce^{3+} 离子对方解石的活化作用机理研究[J]. 矿产保护与利用,2018(3):71-76.

QU Qiqi, CAO Zhao, ZHANG Wenbo, et al. Research on activation mechanism of Ce^{3+} ions on calcite in rare earth ore flotation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018(3):71-76.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn

(上接第70页)

- [8] 黄西平,张琦,郭淑元,等. 我国镁资源利用现状及开发前景[J]. 海湖盐与化工,2004,33(6):1-6.
- [9] 李志峰. 辽宁低品位菱镁矿的综合利用研究[J]. 国土资源,2008(S1):78-79.
- [10] 朱阳戈,谭欣,闫志刚,等. 低品位菱镁矿浮选试验研究[J]. 轻金属,2014(2):1-4.
- [11] 吴浩. 高硅高钙型菱镁矿矿石浮选工艺研究[D]. 沈阳:东北大学,2013:13-18.
- [12] 胡晓星,朱阳戈,郑桂兵,等. BK434 在某低品位菱镁矿正浮选降钙中的应用[J]. 矿业研究与开发,2016(9):24-26.
- [13] 刘国晨. 六偏磷酸钠在菱镁矿-白云石体系中的抑制效果及机理研究[J]. 现代矿业,2016(9):97-99.
- [14] 李晓安,陈公伦,王绍艳,等. 十二烷基磷酸酯作为捕收剂浮选分离菱镁矿与白云石的探索[J]. 中国矿业,1997,6(3):78-81.
- [15] 罗娜,魏德洲,李明阳,等. 白云石对菱镁矿浮选行为的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版),2017,38(7):1007-1011.

引用格式:刘文刚,姚广铮,卢位,等. 十二胺体系中金属离子对菱镁矿和白云石浮选行为的影响[J]. 矿产保护与利用,2018(3):67-70,76.

LIU Wengang, YAO Guangzheng, LU Wei, et al. Metal ion effect on flotation of magnesite and dolomite in dodecylamine system[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018(3):67-70, 76.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn