

羧甲基壳聚糖在氟碳铈矿浮选中对萤石的抑制机理研究*

时景阳^{1,2,3}, 吕婧^{1,2}, 王介良^{1,2,3}, 曹钊^{1,2,3}, 曹永丹^{1,2}, 王晓平^{1,2}

(1. 内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 内蒙古自治区矿业工程重点实验室, 内蒙古 包头 014010; 3. 内蒙古科技大学 轻稀土资源绿色提取与高效利用教育部重点实验室, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 采用浮选试验、接触角分析、气泡与颗粒附着角(θ)分析、Zeta 电位分析、XPS 分析等测试手段, 研究了羧甲基壳聚糖(CTS)对萤石的抑制作用机理。结果表明: 在 pH 为 9.8, $C_{CTS} = 20$ mg/L 时, 萤石浮选回收率为 12.5%, 而氟碳铈矿回收率仍保持在 86.7%; XPS 结果表明: 在 348.18 eV 和 351.73 eV 处出现了 2 个属于 Ca(COOR) 的拟合峰, 主要是由于 CTS 分子中的—COOH 组分与萤石表面的 Ca 位点发生化学吸附导致的。而 CTS 在氟碳铈矿表面吸附较弱, 不影响捕收剂辛基羟肟酸(OHA)在的吸附, 其表面仍保持较好的可浮性。因此, CTS 作为一种绿色易降解、选择性强的抑制剂, 可以实现对氟碳铈矿与萤石的高效分离。

关键词: 氟碳铈矿; 萤石; 气泡-颗粒附着角; 选择性吸附

中图分类号: TD97

文献标识码: A

文章编号: 2095-2295(2026)01-0096-07

DOI: 10.16559/j.cnki.2095-2295.2026.01.013

Study on the depression mechanism of carboxymethyl chitosan on fluorite in the flotation of bastnaesite

SHI Jingyang^{1,2,3}, LYV Jing^{1,2}, WANG Jieliang^{1,2,3}, CAO Zhao^{1,2,3}, CAO Yongdan^{1,2}, WANG Xiaoping^{1,2}

(1. School of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Mining Engineering, Baotou 014010, China; 3. Key Laboratory of Green Extraction & Efficient Utilization of Light Rare-Earth Resources (Inner Mongolia University of Science & Technology), Ministry of Education, Baotou 014010, China)

Abstract: The depression mechanism of CTS on fluorite was investigated through flotation tests, contact angle analysis, bubble-particle attachment angle (θ) analysis, Zeta potential analysis, XPS analysis, and other measurement techniques. The results indicate that at pH 9.8 and $C_{CTS} = 20$ mg/L, the flotation recovery of fluorite was 12.5%, while the recovery of bastnaesite remained at 86.7%. XPS results show two fitted peaks at 348.18 eV and 351.73 eV, belonging to Ca(COOR), primarily due to the chemical adsorption between the —COOH groups in CTS molecules and the Ca sites on the fluorite surface. In contrast, the adsorption of CTS on the bastnaesite surface is weak and does not interfere with the adsorption of the collector octyl hydroxamic acid (OHA), allowing the surface to maintain good floatability. Therefore, as a green, easily degradable, and highly selective depressant, CTS enables efficient separation of bastnaesite and fluorite.

Key words: bastnaesite; fluorite; bubble-particle attachment angle; selective adsorption

* 基金项目: 国家自然科学基金(52364034、52264033、U24A20057、52574318); 国家重点研发计划(2021YFC2901000、2022YFC2905302); 内蒙古自治区自然科学基金(2024QN05057、2024QN05021); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费(2024QNJS077、2023RCTD013); 内蒙古自治区杰出青年科学基金(2024JQ02); 内蒙古自治区研究生科研创新基金(KC2024051B); 内蒙古科技大学大学生“科炬青苗计划”(QM2025036、QM2025185)。

作者简介: 时景阳, 女, 讲师。

通信作者: 曹钊, 男, 教授, E-mail: caozhao1217@163.com。

收稿日期: 2025-10-20

中国稀土资源分布总体呈“北轻南重”特征,轻稀土储量占比超过90%^[1-2]。白云鄂博矿床的主要稀土矿物为氟碳铈矿,是轻稀土资源的主要来源^[3-4]。稀土功能材料的应用已由传统的冶金工业、石化化工,发展到电子信息、新能源、航空航天等战略性新兴产业中^[5-6]。内蒙古自治区白云鄂博稀土矿稀土资源工业储量4 350万t(以REO计),居世界首位,其稀土资源的高效开发利用具有重大意义^[9]。目前,白云鄂博矿稀土浮选采用水玻璃、羟肟酸分别为脉石矿物抑制剂和稀土矿物捕收剂,由于大量萤石、方解石等含钙脉石矿物的存在,药剂用量大、成本高。稀土精矿REO品位仅为55%左右,品位低、杂质多,造成后续稀土冶炼分离过程中“三废”污染排放超标,制约稀土工业链绿色低碳发展^[9]。因此,稀土矿浮选过程中,含钙脉石矿物难以选择性高效抑制是当前白云鄂博矿稀土浮选生产中急需解决的难题。

浮选是分离氟碳铈矿和含钙脉石矿物的重要方法,尤其对表面性质与钙矿物相似的氟碳钙铈矿,是提高稀土回收率的首选^[10-11]。然而,氟碳铈矿与萤石均为微溶盐类矿物,离子迁移转化导致其表面性质和可浮性相似,常用捕收剂同时吸附于这些矿物表面,无法有效实现氟碳铈矿与含钙脉石矿物的分离^[12-13]。传统上用于稀土矿浮选的抑制剂主要包括无机抑制剂和有机抑制剂两大类。目前,硅酸钠是稀土矿浮选中最常用的脉石矿物无机抑制剂,对萤石、方解石和重晶石等具有较强的抑制作用,但其选择性较差。当溶液中存在 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 时,硅酸钠会同时抑制氟碳铈矿的浮选^[14]。有机抑制剂常用的有木质素磺酸钠、柠檬酸、黄原胶和EDTA。Cao等^[15]研究表明,EDTA对氟碳铈矿的浮选行为影响相对较小,但是对萤石具有强烈的选择性抑制作用。这主要是由于EDTA与 Ca^{2+} 的化学作用强于OHA,它可以与萤石表面的钙—OHA沉淀发生反应,将其转化为可溶的Ca-EDTA,从而阻碍OHA在萤石表面的吸附,使其浮选被抑制。吴旭等^[16]发现水玻璃与EDTA组合抑制剂可以有效抑制捕收剂在萤石表面的吸附,而对氟碳铈矿的影响较弱,从而提高氟碳铈矿与萤石的分选效率。Wang等^[17]将黄原胶对氟碳铈矿与方解石浮行为的影响归因于其能与方解石表面钙离子发生化学吸附,优先占据其表面活性位点,进而阻碍NaOL在其表面的吸附,而对氟碳铈矿则影响较小,最终实现对方解石的选择性抑

制。总的来说,硅酸钠等无机抑制剂选择性差,抑制含钙矿物的同时对氟碳铈矿也有一定抑制效果^[18]。有机抑制剂在氟碳铈矿浮选中具有一定优势,但仍存在用量大、成本高、分选效果欠佳和环境污染等问题。因此,开发高效、环境友好且高选择性的抑制剂,是实现氟碳铈矿与萤石高效分离的关键。CTS是一种水溶性壳聚糖衍生物,具有绿色环保、无毒、选择性螯合能力强、用量少等特点^[19]。

论文以OHA为捕收剂,CTS为抑制剂对萤石的选择性抑制作用及机理。研究综合采用单矿物浮选试验、接触角测定、气泡-颗粒附着角、zeta电位测定、XPS分析等手段,揭示了CTS对萤石的选择性抑制机理。该结论为含钙稀土矿物的高效富集回收提供了理论依据。

1 研究方法

1.1 样品准备

氟碳铈矿取自四川牦牛坪稀土矿,萤石购自中国广西。所用到的纯矿物样品经手选、破碎、磨矿、磁选等提纯。图1、图2分别为氟碳铈矿和萤石的X射线衍射图,表1为氟碳铈矿和萤石的化学组分分析,可以看出氟碳铈矿和萤石纯度均高于98%,满足试验要求。将2种矿物筛分为 $-74+38\ \mu\text{m}$ 粒级,用于微浮选、接触角及气泡-颗粒附着角测试;其余样品进一步磨至约 $5\ \mu\text{m}$,用于Zeta电位分析。

捕收剂辛基羟肟酸(OHA)与抑制剂羧甲基壳聚糖(CTS)均购自阿拉丁化学试剂有限公司;实验用NaOH与HCl溶液调节矿浆pH,全程使用电导率为 $18.2\ \text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ 的去离子水。

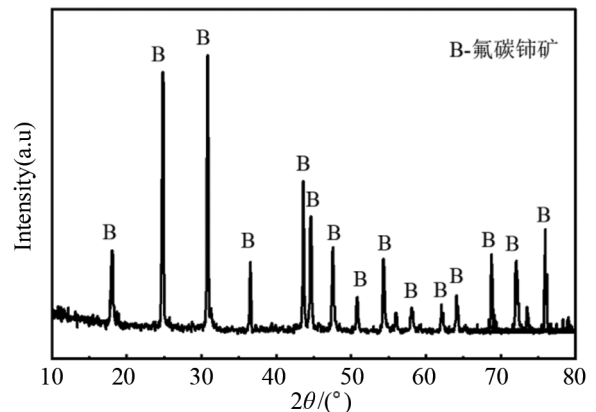


图1 氟碳铈矿的XRD图谱

Fig. 1 The XRD pattern of bast naesite

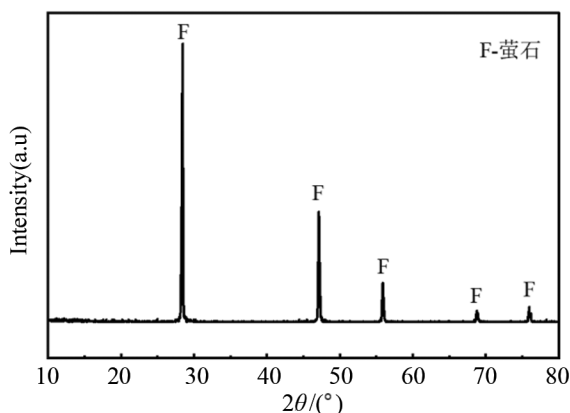


图2 萤石的 XRD 图谱

Fig. 2 The XRD pattern of fluorite

1.2 浮选试验

在 XFGCII-35 型浮选机上,以 1 992 r/min 的转速,取 2 g 样品和 30 mL 去离子水加入浮选槽中,调浆 1 min。用 HCl 或 NaOH 调矿浆 pH,搅拌 3 min,然后加入 CTS 和 OHA,每种试剂搅拌 3 min。最后进行浮选 3 min。每组浮选试验做 3 次,最终浮选结果取平均值。

1.3 接触角分析

在 ES-103HA 接触角仪(德国 KRUSS Tester Co., Ltd)检测氟碳铈矿和萤石在添加 CTS 或 OHA 下的接触角。每次测量前,均按浮选试验的相同条件与方法,使用浮选药剂对矿物样品进行预处理。随后,矿物样品被洗涤、过滤、干燥,然后压入圆形板中进行实验。

1.4 气泡与颗粒附着角测量

气泡-颗粒附着角(θ)与矿物颗粒的可浮性成正比^[20]。图3是测量 θ 的示意图。将 1 g 矿物样品放入装有 30 mL 去离子水的容器中,然后用注射器在 1 cm 深度处产生直径约 3 mm 的气泡。用磁力搅拌器控制浆液搅拌 10、20、60、120、200 s,搅拌速率 150 r/min,完成溶液沉淀。最后,利用相机系统对附着在气泡表面的颗粒进行拍照,并计算涂层角度,每组测试重复 3 次,结果取平均值。

1.4 Zeta 电位测量

Zeta 电位测量采用 Nanbrook 90 Plus Zeta 分析仪。将氟碳铈矿,萤石样品(20 mg)加入 30 mL 的 1×10^{-4} mol/L KCl 背景电解质溶液中。用 HCl 或 NaOH 调节悬浮液 pH,测试前用磁力搅拌器搅拌均匀,用上清液测量 zeta 电位。试验在相同条件下进

行 3 次,结果取平均值。

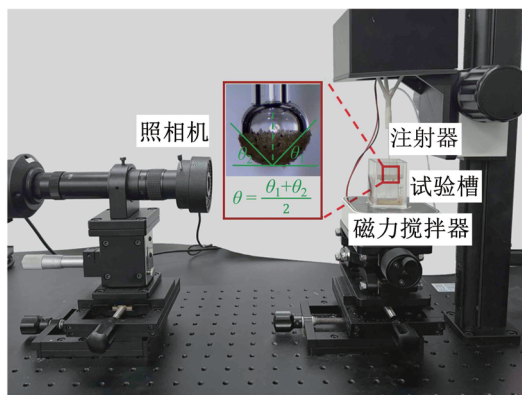


图3 气泡-颗粒附着角测量示意图

Fig. 3 Schematic diagram for bubble-particle attachment angle

1.5 XPS 分析

ESCALAB 250XI 型光谱仪被用来进行氟碳铈矿和萤石的 XPS 测试。分别称取 2 g 氟碳铈矿和萤石与浮选药剂相互作用,其中药剂制度与浮选试验相同。制备完成的样品经过滤、洗涤、干燥等处理后用于测试。所得到的光谱数据以结合能为 284.8 eV 的 C 1S 为参照峰进行校正。

表 1 矿物化学组成(质量分数,%)

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

样品	REO	CaO	F	TFe
氟碳铈矿	74.03	0.68	7.64	0.53
萤石	-	60.37	46.9	-

2 结果与讨论

2.1 浮选试验

研究了氟碳铈矿、萤石在不同 pH 值下的单矿物浮选效果。结果如图 4、5 所示。

如图 4 所示,当 OHA 用量为 1×10^{-4} mol/L, CTS 用量为 20 mg/L 时,在整个 pH 范围内,氟碳铈矿浮选回收率均高于萤石,在 pH 为 9.8 时,氟碳铈矿回收率为 86.7%,而萤石浮选回收率为 12.5%。结果表明,CTS 在整个 pH 范围内对萤石具有选择性抑制作用,且在碱性条件下抑制作用更强。因此,为了实现氟碳铈与萤石的高效分离,应在碱性条件下进行浮选试验。

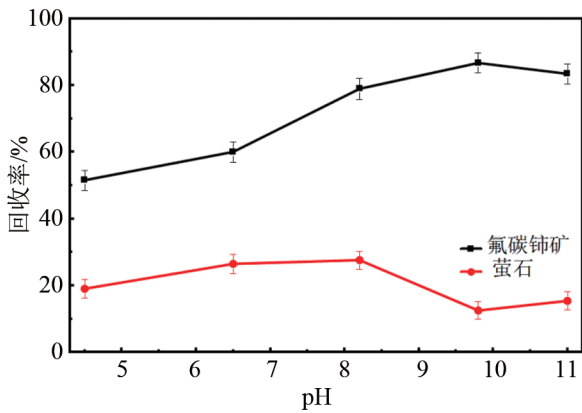


图4 pH对矿物浮选回收率的影响

Fig.4 Effect of pH on flotation recovery

图5给出了在OHA用量为 1×10^{-4} mol/L、pH值为9.8的条件下,不同CTS浓度对2种矿物浮选分离效率的影响。由图5可知,不添加CTS时,氟碳铈矿、萤石的回收率分别为95.64%、86.24%。结果表明,当只存在捕收剂时,2种矿物均表现出良好的可浮性,不能有效地选择性抑制萤石,实现氟碳铈矿和萤石的浮选分离。当CTS从5 mg/L增加到30 mg/L时,氟碳铈矿的浮选回收率保持在80%以上,但萤石的浮选回收率迅速下降至10.4%,说明CTS的加入可以选择性抑制萤石,而不影响氟碳铈矿的浮选。

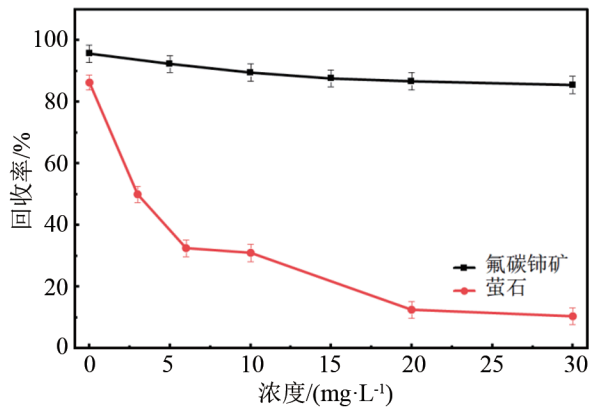


图5 CTS浓度对矿物浮选回收率的影响

Fig.5 Effect of CTS concentration on flotation recovery

2.2 接触角分析

图6、7显示了氟碳铈矿和萤石在添加CTS和OHA前后的接触角结果。纯天然氟碳铈矿和萤石的接触角分别为 29.15° 和 27.25° ,结果表明氟碳铈矿和萤石均具有天然亲水性,不添加任何药剂时很

难浮选。添加OHA处理后,氟碳铈矿、萤石接触角分别增加到 89.45° 和 67.00° ,表明OHA在2种矿物表面具有较强的非选择性吸附^[21]。CTS和OHA连续处理后,氟碳铈石表面的接触角为 75.93° ,其表面仍保持良好的疏水性,但萤石的接触角下降到 29.75° ,表明萤石表面亲水性强。综上所述,CTS对氟碳铈矿的浮选影响较小,但对萤石有选择性抑制作用,试验结果与浮选行为吻合较好。

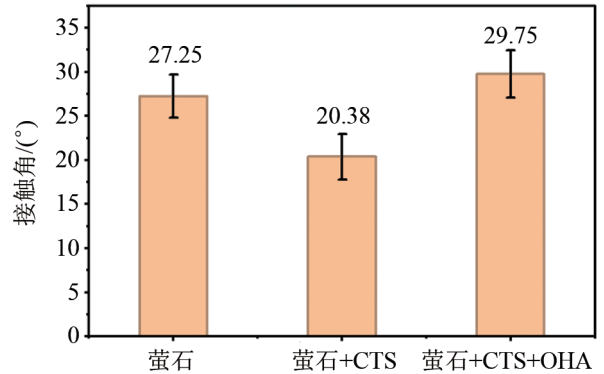


图6 CTS和OHA对氟碳铈矿接触角的影响

Fig.6 Effect of CTS and OHA on contact angle of bastnaesite

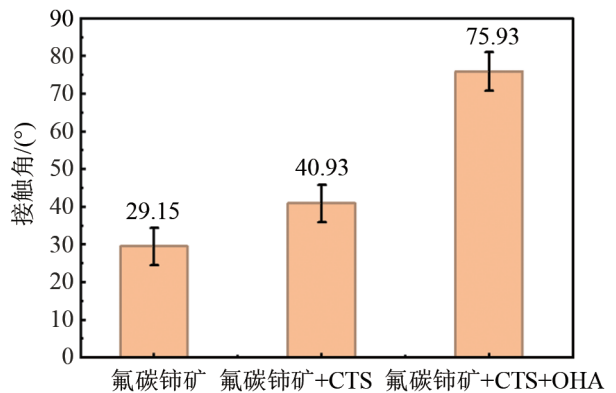


图7 CTS和OHA对萤石接触角的影响

Fig.7 Effect of CTS and OHA on contact angle of fluorite

2.3 气泡与颗粒附着角分析

不同时间条件下CTS和OHA对氟碳铈矿和萤石气泡-颗粒附着角的影响如图8、9所示。由图8、图9可知,气泡-颗粒附着角随时间的增加而增大。如图8所示,对于氟碳铈矿,单独添加CTS时,在200 s左右气泡颗粒附着角分别为 68° ,与未处理的原矿相当。气泡基本上完全被氟碳铈矿颗粒覆盖。CTS的存在对气泡与颗粒的附着角没有影响。然

而,连续添加 CTS 和 OHA 时,气泡颗粒的附着角比单独添加 CTS 显著增加,说明 CTS 预处理并不妨碍 OHA 在氟碳铈矿表面的吸附。由图 9 可知,在萤石在 200 s 时,气泡-颗粒附着角为 77.4°,而在萤石-CTS 体系中仅为 61.3°,下降了 16.1°。由于 CTS 吸附在萤石表面,降低了萤石的气泡-颗粒附着角,导致萤石颗粒的亲水性增加,可浮性降低。当连续添加 CTS 和 OHA 作用时,气泡颗粒附着角与单独添加 CTS 作用后萤石表面的结果相似,均远小于不添加任何药剂的萤石表面,结果表明 CTS 选择性抑制了 OHA 在萤石表面的吸附。

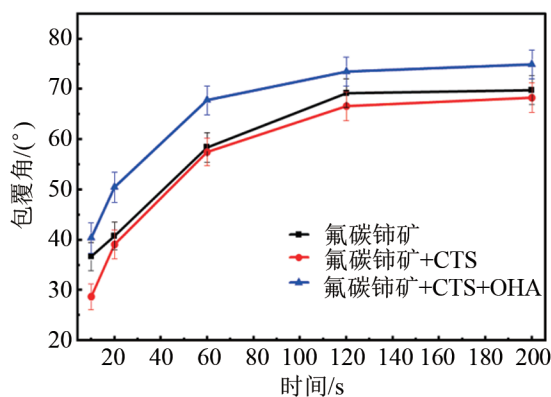


图 8 不同时间 CTS 和 OHA 对氟碳铈矿气泡-颗粒附着角的影响

Fig. 8 Effect of CTS and OHA on bubble-particle attachment angle of bastnaesite at different time

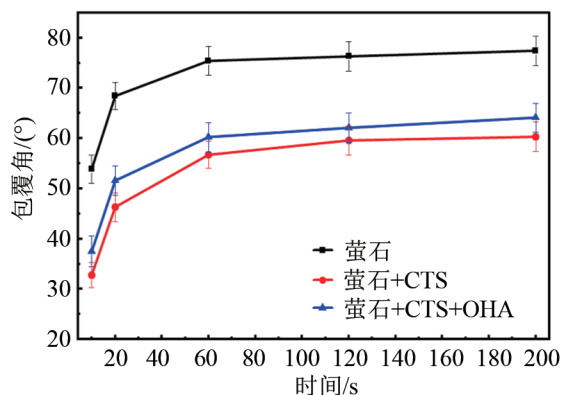


图 9 不同时间 CTS 和 OHA 对萤石气泡-颗粒附着角的影响

Fig. 9 Effect of CTS and OHA on bubble-particle attachment angle of fluorite at different time

2.4 Zeta 电位分析

CTS 和 OHA 作用前后对 2 种矿物表面的 zeta

影响结果如图 10、图 11 所示。由图 10、图 11 可知,纯氟碳铈矿和萤石的零电点分别为 7.18、7.11。

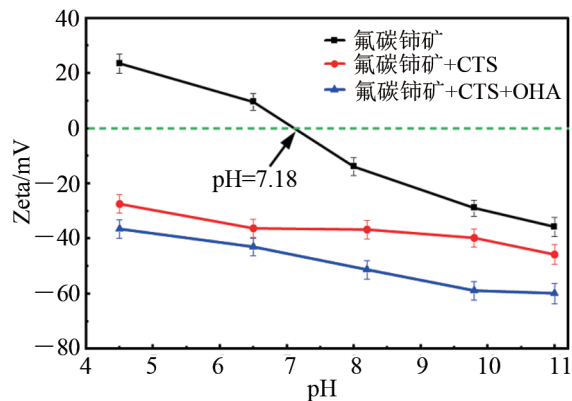


图 10 CTS 对氟碳铈矿 zeta 电位的影响

Fig. 10 Effect of CTS on zeta potential of bastnaesite

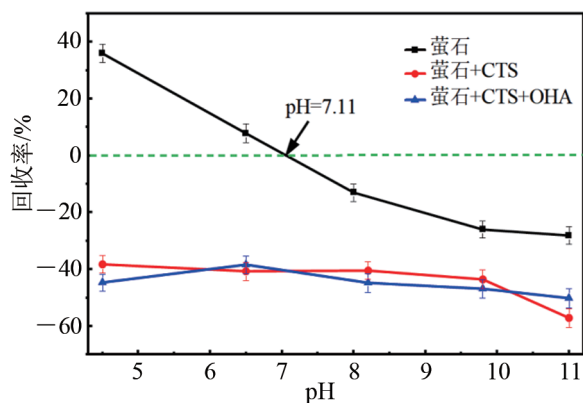


图 11 CTS 对萤石 zeta 电位的影响

Fig. 11 Effect of CTS on zeta potential of fluorite

测试结果与前人研究一致^[22]。然而,萤石的 zeta 电位测定值低于文献报道。上述差异可能源于矿物样品在制备方法、化学组成及其他物理化学性质上的不同所导致的。当添加 CTS 作用后,pH 在 8~11 范围内,氟碳铈矿表面的 zeta 电位向负方向移动较小,说明 CTS 对氟碳铈矿表面的吸附作用相对较弱。然而,在整个 pH 范围内,萤石表面的 zeta 电位有很强的负移,表明 CTS 在萤石表面发生了强烈的吸附^[23]。添加 CTS 后,相对比不添加任何药剂的矿物表面,在 pH 值为 9.8 时,氟碳铈矿的表面电位为 -43.53 mV,位移为 17.5 mV,萤石表面电位为 -43.53 mV,移动了 -17.5 mV。当加入 CTS 和 OHA 作用后,与仅加入 CTS 相比,在 pH = 9.8 条件下,氟碳铈矿表面 zeta 电位从 -39.74 mV 移动到 -58.87 mV,向负方向变化了 19.13 mV。而在相同

的条件下,萤石表面的 zeta 电位仅变化了 3.31 mV (从 -43.53 mV 到 -46.84 mV)。结果表明,在 CTS 存在的情况下,OHA 仍能对氟碳铈矿表面进行强烈吸附,说明 CTS 对这 2 种矿物的吸附能力弱于 OHA。因此,在 CTS 存在下,氟碳铈矿仍具有良好的可浮性。然而,经过 CTS 和 OHA 连续处理后,萤石表面的 zeta 电位几乎与单独使用 CTS 处理后的 zeta 电位相同,表明 CTS 比 OHA 在萤石表面的吸附更强。因此,CTS 强烈吸附在萤石表面,而对氟碳铈的吸附较弱。

2.5 XPS 分析

CTS 作用前后氟碳铈矿、萤石表面的 XPS 光谱分别如图 12、图 13 所示。图 12 为添加 CTS 前后氟碳铈表面 Ce 3d 5/2 的高分辨率 XPS 光谱。在纯氟碳铈矿中,Ce 3d 5/2 拟合峰分别位于结合能为 881.80 eV、886.02 eV、883.98 eV、887.98 eV 处。当加入 CTS 处理后,其表面的 Ce 3d 5/2 的拟合峰分别为 881.73 eV、883.89 eV、885.94 eV、887.90 eV^[21]。与纯氟碳铈相比,Ce 3d 5/2 的结合能均向负方向移动了 0.07 ~ 0.08 eV。结果表明,CTS 在氟碳铈矿表面吸附较弱,对其浮选回收率几乎没有影响。

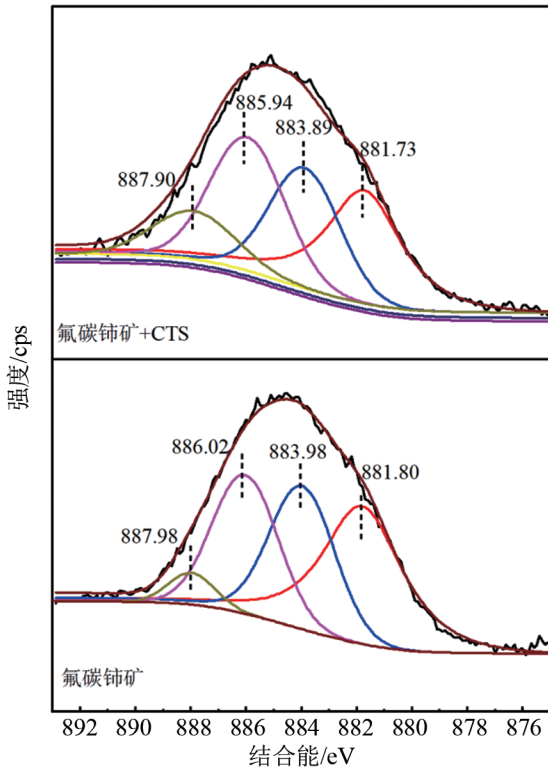


图 12 CTS 对氟碳铈矿表面 XPS 的影响

Fig. 12 Effect of CTS on XPS of bastnaesite surface

图 13 给出了 CTS 作用前后萤石表面 Ca 2p 的高分辨率 XPS 光谱。在纯萤石表面可以观察到 Ca 2p 3/2(347.82 eV)和 Ca 2p 1/2(351.36 eV)2 个拟合峰。单独加入 CTS 后,萤石表面 Ca 2p 3/2 和 Ca 2p 1/2 的两个拟合峰分别为 347.65 eV 和 351.14 eV,负移分别为 0.17 eV 和 0.22 eV^[21]。同时在 348.18 eV 和 351.73 eV 处增加了 2 个属于 Ca (COOR)的拟合峰^[24]。结果表明,萤石表面 Ca 的化学环境发生了较大的变化,主要是由于 CTS 在萤石表面的 Ca 位点发生了强烈的吸附作用,导致萤石浮选被抑制。

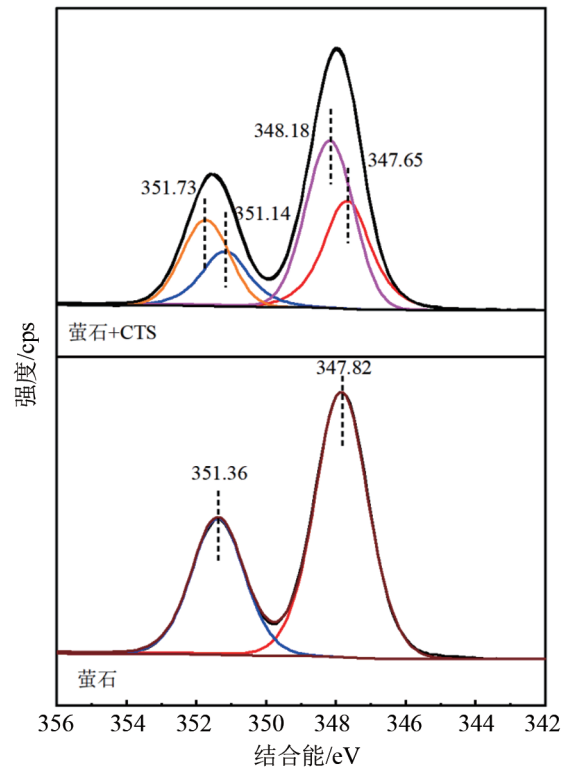


图 13 CTS 对萤石表面 XPS 的影响

Fig. 13 Effect of CTS on XPS on fluorite surface

3 结论

1) 单矿物浮选试验表明,在 pH = 9.8、 $C_{OHA} = 1 \times 10^{-4}$ mol/L、 $C_{CTS} = 20$ mg/L 的条件下,CTS 对萤石有较强的选择性抑制作用,使萤石回收率降至 12.5%。氟碳铈矿的回收率为 86.7%,对其浮选影响较小。

2) 接触角测量、气泡-颗粒附着角、zeta 电位、XPS 测试等分析结果均表明,CTS 在氟碳铈矿表面仅发生弱吸附,而 OHA 的后续吸附不受影响。因

此,氟碳矿表面保持强疏水性,并表现出较好的可浮性。相比之下,CTS 通过其—COOR 与萤石表面的 Ca^{2+} 发生螯合作用,生成亲水性的 $\text{Ca}(\text{COOR})$, 阻断了后续 OHA 的继续吸附,显著降低其可浮性,对萤石具有明显抑制作用。

参考文献:

- [1] XU H, ZHANG L, PANG Z, et al. The study on extraction behavior of [N1888] [P507] and TRPO for heavy rare earths[J]. *Minerals Engineering*,2022,176:107339.
- [2] FILIPPOV L O, DEHAINE Q, FILIPPOVA I V, et al. Rare earths (La,Ce,Nd) and rare metals (Sn, Nb, W) as by-products of kaolin production-Part 3: Processing of fines using gravity and flotation[J]. *Minerals Engineering*,2016,95:96.
- [3] DAN Z O U, JI C, DEQIAN L I. Separation chemistry and clean technique of cerium (IV): A review[J]. *Journal of Rare Earths*,2014,32(8):681.
- [4] FANG Z, LOUXIANG W, ZHENGHE X U, et al. Interaction of reactive oily bubble in flotation of bastnaesite [J]. *Journal of Rare Earths*,2014,32(8):772.
- [5] 李旭清,张运迎,邓义楠,等. 深海稀土富集机制与资源开发利用研究现状[J]. *岩石矿物学杂志*,2025,44(03):697.
- [6] 何琪光. 稀土在新能源汽车中的应用和前景分析[J]. *中国有色金属*,2024,(S2):224.
- [7] 王炫力,刘爽,谢敏,等. 稀土氧化物掺杂对 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 热障涂层材料热膨胀性能的影响[J]. *内蒙古科技大学学报*,2023,42(1):58.
- [8] 孟祥辉,郭瑞华,安胜利,等. 稀土氧化物的掺杂对 Pt 基催化剂性能的影响[J]. *内蒙古科技大学学报*,2025,44(2):119.
- [9] 王猛,黄小卫,冯宗玉,等. 包头混合型稀土矿冶炼分离过程的绿色工艺进展及趋势[J]. *稀有金属*,2019,43(11):1131.
- [10] JORDENS A, MARION C, KUZMINA O, et al. Surface chemistry considerations in the flotation of bastnaesite[J]. *Minerals Engineering*,2014,66:119.
- [11] LU Y, LIU W, WANG X, et al. Lauryl phosphate flotation chemistry in barite flotation[J]. *Minerals*,2020,10(3):280.
- [12] ZHANG W, HONAKER R Q, GROPPA 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.
- [13] ESPIRITU E R L, DA SILVA G R, AZIZI D, et al. Flotation behavior and electronic simulations of rare earth minerals in the presence of dolomite supernatant using sodium oleate collector[J]. *Journal of Rare Earths*,2019,37(1):101.
- [14] 郭泽航,申培伦,何海洋,等. 氟碳铈矿与含钙矿物浮选分离药剂研究进展[J]. *中国稀土学报*,2025,43(4):716.
- [15] CAO Z, CAO Y, QU Q, et al. Separation of bastnaesite from fluorite using ethylenediamine tetraacetic acid as depressant[J]. *Minerals Engineering*,2019,134:134.
- [16] 吴旭,王介良,曹钊. 组合药剂对微细粒氟碳铈矿与萤石的浮选分离效率的影响[J]. *中国稀土学报*,2023,41(2):313.
- [17] WANG Z, WU H, YANG J, et al. Selective flotation separation of bastnaesite from calcite using xanthan gum as a depressant [J]. *Applied Surface Science*,2020,512:145714.
- [18] 吴旭,曹永丹,王丽明,等. 复合捕收剂对白云鄂博稀土矿浮选分离效果的影响研究[J]. *中国稀土学报*,2023,41(5):1022.
- [19] UPADHYAYA L, SINGH J, AGARWAL V, et al. Bio-medical applications of carboxymethyl chitosans [J]. *Carbohydrate polymers*,2013,91(1):452.
- [20] XING Y W, XU M D, GUO F Y, et al. Role of different types of clay in the floatability of coal:Induction time and bubble-particle attachment kinetics analysis [J]. *Pow-der Technology*,2019,344:814.
- [21] 时景阳,吕婧,王介良,等. 氟碳铈矿浮选中羧甲基壳聚糖对含钙脉石矿物的选择性抑制机理[J]. *中国有色金属学报*,2025,35(8):2845.
- [22] GAO Z, BAI D, SUN W, et al. Selective flotation of scheelite from calcite and fluorite using a collector mixture[J]. *Minerals Engineering*,2015,72:23.
- [23] MENG Q, FENG Q, SHI Q, et al. Studies on interaction mechanism of fine wolframite with octyl hydroxamic acid[J]. *Minerals Engineering*,2015,79:133.
- [24] FENG B, PENG J, GUO W, et al. The depression behavior and mechanism of carboxymethyl chitosan on calcite flotation [J]. *Journal of Materials Research and Technology*,2019,8(1):1036.

(责任编辑:师宝萍)