

抑制剂腐植酸钠选择性分离磷灰石与碳酸盐矿物^①

宋江伟^{1,2}, 崔瑞^{1,2}, 李茂林^{1,2,3}, 姚伟^{1,2}

(1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081; 2. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081; 3. 长沙矿冶研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012)

摘要: 通过单矿物浮选试验、吸附量测试、Zeta 电位测试、红外光谱分析和 X 射线光电子能谱分析探究油酸钠体系下抑制剂腐植酸钠对磷灰石、白云石、方解石浮选的影响及作用机理。结果表明: pH=7 时, 腐植酸钠可强烈抑制白云石和方解石, 而对磷灰石可浮性影响较小; 腐植酸钠通过化学键合吸附在白云石表面上, 通过氢键和化学吸附作用在方解石表面, 但在磷灰石表面的吸附较弱, 腐植酸钠在磷灰石、白云石和方解石表面的吸附差异导致其选择性抑制白云石和方解石。

关键词: 磷灰石; 白云石; 方解石; 腐植酸钠; 浮选; 抑制剂; 碳酸盐矿物; 油酸钠

中图分类号: TD923

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.02.015

文章编号: 0253-6099(2025)02-0085-05

Selective Separation of Apatite from Carbonate Minerals with Sodium Humate as Depressant

SONG Jiangwei^{1,2}, CUI Rui^{1,2}, LI Maolin^{1,2,3}, YAO Wei^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 2. Hubei Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgical Mineral Resources, Wuhan 430081, Hubei, China; 3. Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., Changsha 410012, Hunan, China)

Abstract: The influence and reaction mechanism of sodium humate as a depressant on the flotation of apatite, dolomite and calcite in sodium oleate system were investigated by performing single-mineral flotation test, adsorption test, Zeta potential measurement, infrared spectroscopy analysis and X-ray photoelectron spectroscopy analysis. The results show that sodium humate can strongly depress dolomite and calcite at pH of 7, but has less effect on apatite flotation. Sodium humate is weakly adsorbed onto apatite, but it can be adsorbed onto dolomite via chemical bonding, and also adsorbed onto calcite by the combined effect of hydrogen bonding and chemisorption. As a result, the variation in adsorption of sodium humate onto apatite, dolomite and calcite leads to its selective depression of the latter two minerals.

Key words: apatite; dolomite; calcite; sodium humate; flotation; depressant; carbonate mineral; sodium oleate

磷灰石(即氟磷灰石、羟基磷灰石和氯磷灰石)是自然界常见的含磷矿物,是提取磷的重要资源。一般来说,天然磷灰石主要以氟磷灰石形式存在于磷酸盐矿床中,通常伴生石英、白云石和方解石等硅酸盐或碳酸盐矿物^[1-2]。磷灰石浮选的主要问题是与碳酸盐矿物的分离,因为碳酸盐矿物和磷酸盐矿物表面含有相同的 Ca 位点,表面性质相似,难以实现分离^[3-4]。传统的磷矿浮选一般采用反浮选法,即氟磷灰石在酸性

条件下被抑制,通过添加脂肪酸捕收剂浮起碳酸盐矿物,从而实现磷灰石与脉石矿物的分离。然而,反浮选需要添加大量无机酸如 H₂SO₄、H₃PO₄ 或两者的混合物以降低矿浆 pH 值。在酸性环境下浮选,设备容易被腐蚀,含磷的酸性废水如果不加以处理也会污染环境^[5]。开发选择性好、无毒环保的碳酸盐矿物抑制剂对加强我国中低品位磷矿资源的利用具有重要意义。

腐植酸钠是从褐煤中提取的一种多羧基大分子有

① 收稿日期: 2024-11-08

基金项目: 武汉市科技局知识创新项目(2023020201020411); 湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20231111); 武汉科技大学“十四五”湖北省优势特色学科(群)项目(2023A0401)

作者简介: 宋江伟(1999—),男,吉林通化人,硕士研究生,主要从事矿物浮选分离研究。E-mail: 2684337245@qq.com

通信作者: 崔瑞(1984—),男,湖北襄阳人,副教授,硕士研究生导师,主要从事矿物分选原理及工艺研究。E-mail: cuirui_1984@foxmail.com

机物,极易溶于水,水溶液呈弱碱性,中间产物和最终产物无毒,不会对环境造成影响。腐植酸钠具有羧基亲水性基团,具有离子交换、吸附、络合、高分散性等良好特性^[6],但腐植酸钠对碳酸盐矿物的抑制机理却鲜有报道。本文以腐植酸钠为抑制剂,通过单矿物浮选试验、吸附量测试、Zeta 电位测试、红外光谱分析和 X 射线光电子能谱(XPS)分析阐释腐植酸钠对磷灰石、白云石、方解石的选择性抑制机理。

1 试验矿样及试验方法

1.1 试验矿样

试验所用磷灰石、方解石购自广州市叶氏矿石标本店,白云石购自山麟石语矿产品淘宝店。试验矿样经橡胶锤敲碎后再经陶瓷球磨机磨细,通过套筛筛分得到 38~74 μm 粒级矿样用于单矿物浮选。

浮选试验以氢氧化钠(NaOH)为调整剂、腐植酸钠为抑制剂、油酸钠为捕收剂,所有药剂均为分析纯。试验用水为去离子水。

1.2 试验方法

浮选设备为 XFG 型挂槽浮选机,主轴转速为 1 680 r/min。每次称取 2 g 样品置于浮选机槽内,用 NaOH 调节矿浆 pH 值,pH 值稳定后搅拌 2 min,加入抑制剂腐植酸钠搅拌 4 min,随后加入油酸钠搅拌 3 min,加入挡板待泡沫稳定后刮泡 5 min,将所得精矿、尾矿烘干、称量并计算浮选回收率。

使用日本岛津 UV2550 紫外分光光度计测定腐植酸钠最佳波长,在最佳波长条件下测定不同浓度腐植酸钠溶液的吸光度变化,绘制其标准曲线。取上层清液测量其吸光度,通过药剂的标准曲线计算矿物表面吸附腐植酸钠含量。

通过 Zetasizer Nano ZS90 电位仪测定药剂作用前后矿物表面的 Zeta 电位,每个样品重复测定表面电位 3 次,取平均值。使用 Nicolet iS20 光谱仪测试矿物与药剂作用前后的红外光谱。使用 ESCALAB 250Xi 型 X 射线光电子能谱仪测试样品 XPS,每个样品测量 3 次,取平均值。

2 试验结果与讨论

2.1 浮选试验

pH=7、仅添加油酸钠条件下,油酸钠浓度对矿物浮选回收率的影响见图 1。随着油酸钠用量增加,3 种矿物浮选回收率均增加。油酸钠浓度 2×10^{-4} mol/L 时,磷灰石回收率达到 90% 以上且与方解石回收率相近,此时白云石回收率也超过了 60%。在仅添加油酸

钠的情况下无法实现 3 种矿物的分离。

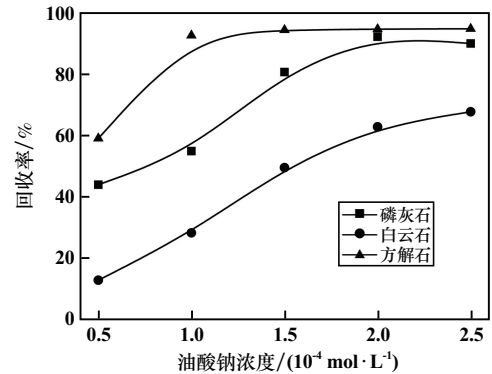


图 1 油酸钠浓度对矿物浮选回收率的影响

Fig.1 Effect of sodium oleate concentration on mineral flotation recovery

油酸钠浓度 2×10^{-4} mol/L 条件下,矿浆 pH 值对矿物浮选回收率的影响见图 2。在 pH=7~11 范围内,3 种矿物浮选回收率较为稳定,油酸钠体系下适宜的矿浆 pH 值为 7。

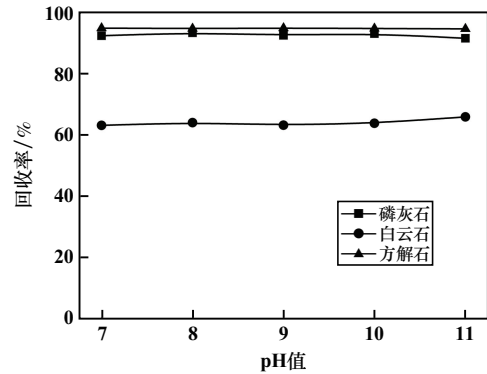


图 2 矿浆 pH 值对矿物浮选回收率的影响

Fig.2 Effect of pulp pH value on mineral flotation recovery

pH=7、油酸钠浓度 2×10^{-4} mol/L 条件下,腐植酸钠质量浓度对矿物浮选回收率的影响见图 3。随着腐

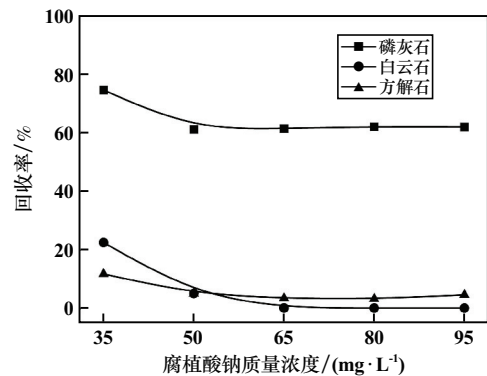


图 3 腐植酸钠质量浓度对矿物浮选回收率的影响

Fig.3 Effect of mass concentration of sodium humate on mineral flotation recovery

植酸钠质量浓度增加,白云石和方解石受到明显抑制,腐植酸钠质量浓度 65 mg/L 时,白云石和方解石回收率分别为 0.42% 和 6.88%,均低于 10%。而磷灰石浮选回收率受腐植酸钠的影响较小,腐植酸钠质量浓度 65 mg/L 时,磷灰石回收率为 62.77%。可见以腐植酸钠为抑制剂可以选择性分离磷灰石与碳酸盐矿物。

2.2 腐植酸钠吸附量测试

腐植酸钠质量浓度对矿物表面吸附量的影响见图 4。腐植酸钠在磷灰石、白云石和方解石表面均发生了吸附,随着腐植酸钠质量浓度增加,白云石和方解石表面吸附量明显增加,磷灰石表面吸附量变化较小。腐植酸钠质量浓度 65 mg/L 时磷灰石表面吸附量达到峰值,但明显低于白云石、方解石表面吸附量。可见腐植酸钠对白云石和方解石具有明显的抑制效果。

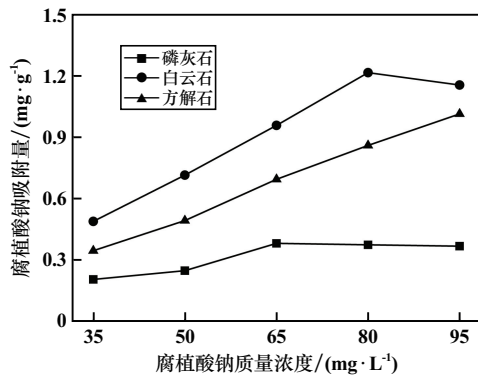


图 4 腐植酸钠质量浓度对矿物表面吸附量的影响

Fig. 4 Effect of mass concentration of sodium humate on adsorption capacity on surface of minerals

2.3 Zeta 电位测试

矿物与药剂作用前后的 Zeta 电位变化情况见图 5。由图 5 可知:加入腐植酸钠后,磷灰石 Zeta 电位负移,证明有部分腐植酸钠吸附在磷灰石表面;加入腐植酸钠和油酸钠后,磷灰石 Zeta 电位进一步发生较大负移,证明腐植酸钠在磷灰石表面的吸附不会影响油酸钠在其表面的吸附。白云石和方解石在加入腐植酸钠后电位均发生负移,表明腐植酸钠吸附在白云石和方解石表面;继续加入油酸钠,2 种矿物 Zeta 电位变化不明显,证明腐植酸钠会影响油酸钠在白云石和方解石表面的吸附。

2.4 红外光谱分析

图 6 为药剂作用前后矿物的红外光谱。腐植酸钠 1 383.49 和 1 577.09 cm^{-1} 处的峰分别为 COO⁻ 的不对称和对称伸缩振动峰,1 033.42 cm^{-1} 处的峰为 C—O—C 的伸缩振动峰^[7]。腐植酸钠处理前后磷灰石红外光谱

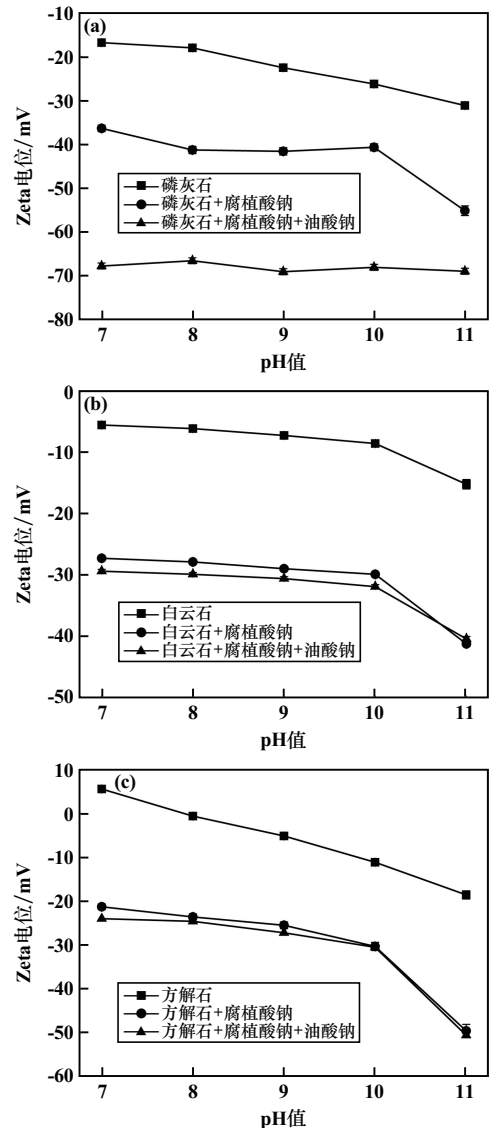


图 5 药剂作用前后矿物表面 Zeta 电位变化情况

Fig. 5 Zeta potential on surface of minerals before and after interaction with reagents

特征峰相似,并未出现新峰,但发生了微弱偏移,可认为磷灰石表面出现了腐植酸钠的弱吸附。白云石的特征峰在 1 445.76、881.22 以及 728.59 cm^{-1} 处^[8]。白云石与腐植酸钠作用后在 1 386.52 cm^{-1} 处生成了新的特征吸收峰,说明腐植酸钠在白云石表面发生了强烈的化学吸附。方解石的特征峰在 1 423.87、875.66、711.81 cm^{-1} 处^[9]。方解石经腐植酸钠处理后,3 443.84 cm^{-1} 处的 O—H 振动峰强度减弱,表明二者之间形成了氢键;同时在 1 561.07 cm^{-1} 处生成了新的特征峰,说明腐植酸钠在方解石表面发生了强烈的化学吸附,即腐植酸钠在方解石表面发生了强烈的化学吸附和氢键作用。

2.5 XPS 分析

65 mg/L 腐植酸钠作用前后矿物表面 Ca2p、Mg1s

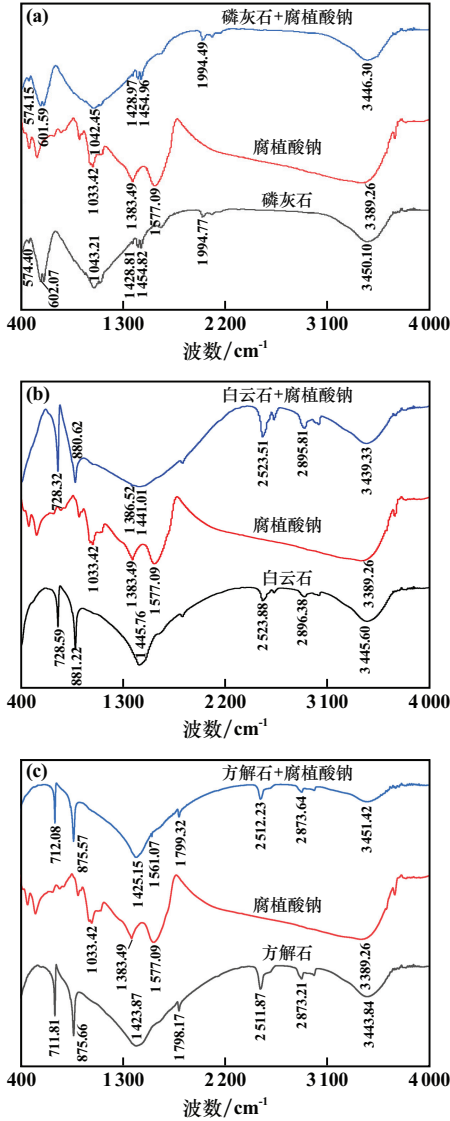


图6 药剂作用前后矿物的红外光谱

Fig.6 Infrared spectra of minerals before and after interaction with reagents

光谱如图7所示。未经处理的磷灰石表面Ca2p光谱中的峰位于347.46和350.96 eV处,经腐植酸钠处理后,磷灰石表面的Ca2p光谱中的峰位于347.37和350.94 eV处^[10],药剂处理前后,磷灰石Ca2p轨道上的结合能几乎未发生偏移,表明磷灰石表面的Ca位点与腐植酸间的相互作用较弱,磷灰石中Ca²⁺所处的化学环境基本没有变化。白云石和方解石的结合能发生了显著变化,表明腐植酸钠与白云石、方解石表面Ca位点的相互作用比其与磷灰石表面Ca位点的相互作用更强烈,同时白云石Mg1s轨道上的结合能由1303.72 eV偏移至1304.23 eV,表明腐植酸钠通过化学吸附方式吸附在白云石表面Ca、Mg位点、方解石表面Ca位点上,占据了白云石、方解石上油酸钠的吸附位点。

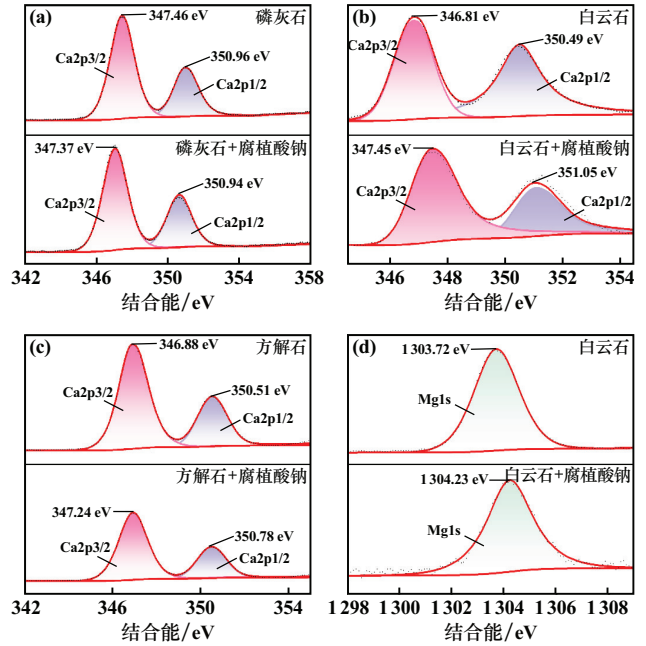


图7 腐植酸钠作用前后矿物表面Ca2p、Mg1s光谱

Fig.7 Ca2p and Mg1s peaks in spectra of minerals before and after treatment with sodium humate

65 mg/L 腐植酸钠作用前后矿物表面O1s光谱如图8所示。531.44和532.64 eV处的峰分别归因于磷灰石中的P—O和CO₂^[11]。添加腐植酸钠后,磷灰石O1s轨道并没有出现新的峰,表明腐植酸钠在磷灰石表面吸附较弱。白云石表面在531.36和532.99 eV处的2个峰分别配给C—O和CO₂^[12],经腐植酸钠处理

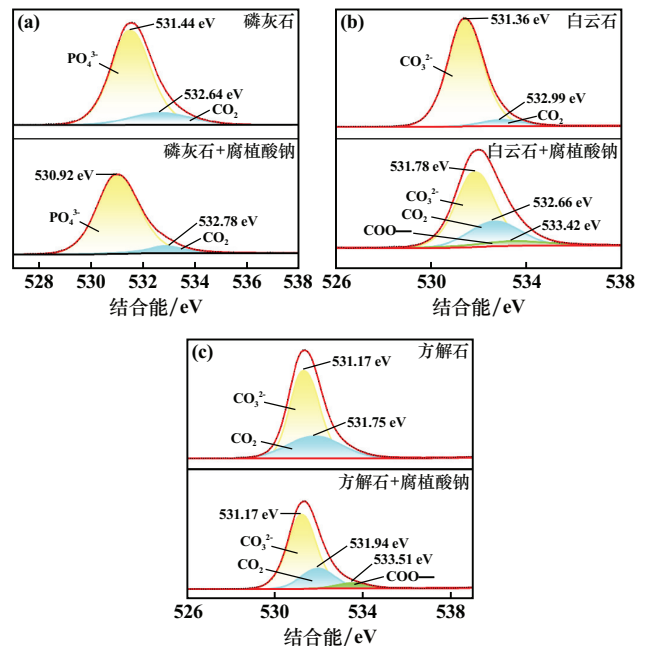


图8 腐植酸钠作用前后矿物表面O1s光谱

Fig.8 O1s peaks in spectra of minerals before and after treatment of sodium humate

后,在 533.42 eV 处生成了新的氧峰,推测白云石表面的 Ca 及 Mg 与腐植酸钠的羧基发生了化学反应。方解石在 531.17 和 531.75 eV 处的峰归因于 C—O 和 CO₂^[13],经腐植酸钠处理后,在 533.51 eV 处出现了新的峰值,归因于腐植酸钠中的 COO—^[14],表明腐植酸钠的羧基与方解石表面 Ca 位点发生了化学反应,吸附在方解石表面。

2.6 抑制机理讨论

晶体结构差异和表面电荷差异是吸附机理不同的原因。磷灰石表面的主要离子为带负电荷的 PO₄³⁻,离子体积大且负电荷高,白云石和方解石表面的主要离子则为带正电荷的 Ca²⁺^[15]。由图 5 可知,pH=7 时,裸磷灰石的 Zeta 电位(-14.8 mV)小于裸白云石、裸方解石的 Zeta 电位(-5.58,5.85 mV),因此磷灰石可能通过较强的静电斥力和空间位阻效应阻碍腐植酸钠在矿物表面的吸附,而油酸钠分子结构为直链,性质较活泼,受空间位阻效应影响较小,可以吸附在矿物表面。另外,磷灰石、白云石和方解石与腐植酸钠的表面位点匹配度不同也导致了腐植酸钠在其表面吸附行为的差异。腐植酸钠 COOH 基团 O—O 的距离为 0.486 7 nm。然而,(001)磷灰石、(104)白云石和(104)方解石的纵向距离分别为 0.546 1、0.482 4 和 0.500 4 nm。COOH 基团 O—O 的距离与白云石和方解石中 Ca—Ca 距离相似,促进了腐植酸钠中 COOH 基团与方解石表面活化 Ca 位点间的反应。因此,大量的腐植酸钠通过化学键合吸附在白云石和方解石表面,严重阻碍了后续油酸钠在矿物表面的吸附。

3 结论

1) pH=7、腐植酸钠质量浓度 65 mg/L、油酸钠浓度 2.0×10^{-4} mol/L 条件下,磷灰石、白云石、方解石的浮选回收率分别为 62.77%、0.42%、6.88%,该条件下可实现磷灰石与白云石及方解石的浮选分离。

2) 吸附量和 Zeta 电位测试结果表明,腐植酸钠在磷灰石、白云石、方解石表面上均有吸附,但在磷灰石表面吸附较少,对其可浮性影响不大,在白云石和方解石表面吸附较多,抑制效果较强,会影响后续油酸钠的吸附。

3) 红外光谱和 XPS 分析结果表明,腐植酸钠与白云石表面的 Ca、Mg 发生强烈的化学吸附,通过氢键和化学吸附作用在方解石表面,而在磷灰石表面的吸附较弱。

4) 腐植酸钠与磷灰石的弱吸附归因于腐植酸钠与磷灰石表面间的静电排斥和空间位阻。腐植酸钠的

COOH 基团与(104)方解石、(104)白云石平面吻合良好,吸附结构稳定。使用腐植酸钠作抑制剂可以实现磷灰石与白云石及方解石的浮选分离。

参考文献(References):

- [1] WANG X, SONG Q, XIE R, et al. Selective flotation separation of scheelite from apatite by application of ATMP as an efficient depressant [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2023,378:121604.
- [2] 赵芳,汤家焰,罗惠华,等. 羟肟酸类药剂对氟磷灰石和白云石浮选的影响[J]. *矿冶工程*, 2024,44(3):48-52.
ZHAO Fang, TANG Jiayan, LUO Huihua, et al. Effect of hydroxamic acids on floatation of fluorapatite and dolomite[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2024,44(3):48-52.
- [3] 钟春晖,冯博,张文谱,等. 抑制剂海藻酸钠浮选分离磷灰石和方解石的作用及机理[J]. *中国有色金属学报*, 2021,31(2):490-498.
ZHONG Chunhui, FENG Bo, ZHANG Wenpu, et al. Effect and mechanism of depressant sodium alginate on flotation separation of apatite and calcite [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021,31(2):490-498.
- [4] 高文鑫,李显波. 溶解离子对白云石和氟磷灰石浮选及表面性质的影响研究[J]. *矿冶工程*, 2023,43(6):79-82.
GAO Wenxin, LI Xianbo. Effect of dissolved ions on floatation and surface properties of dolomite and fluorapatite [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2023,43(6):79-82.
- [5] JING L, XU L, XUE K, et al. Selective depression by using environment-friendly depressant pectin in apatite and dolomite flotation system [J]. *Minerals Engineering*, 2023,203:108373.
- [6] 董振海,程福超,施建军,等. 腐植酸钠对铁矿物和石英可浮性的影响[J]. *金属矿山*, 2022(12):85-91.
DONG Zhenhai, CHENG Fuchao, SHI Jianjun, et al. Effect of sodium humate on floatability of iron minerals and quartz [J]. *Metal Mine*, 2022(12):85-91.
- [7] AI G, LIU C, ZHANG W J, et al. Utilization of sodium humate as selective depressants for calcite on the floatation of scheelite [J]. *Separation Science and Technology*, 2018,53(13):2136-2143.
- [8] 范宛惠,姬志杰,杨帆,等. 羧甲基纤维素对磷灰石与白云石浮选分离的影响及机理研究[J]. *矿产保护与利用*, 2024,44(1):61-66.
FAN Wanhui, JI Zhijie, YANG Fan, et al. Effect and mechanism of carboxymethyl cellulose on flotation separation of apatite against dolomite [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2024,44(1):61-66.
- [9] JIAO F, DONG L, QIN W, et al. Flotation separation of scheelite from calcite using pectin as depressant [J]. *Minerals Engineering*, 2019,136:120-128.
- [10] ZHONG C, WANG H, FENG B, et al. Flotation separation of scheelite and apatite by polysaccharide depressant xanthan gum [J]. *Minerals Engineering*, 2021,170:107045.
- [11] WEI Z, ZHANG Q, WANG X. New insights on depressive mechanism of citric acid in the selective floatation of dolomite from apatite [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022,653:130075.

- 国科学:技术科学, 2017,47(1):13-31.
- RAO Juan, ZHANG Pan, HE Shuai, et al. Utilization status of natural graphite and review of graphite products[J]. Science in China; Technical Sciences, 2017,47(1):13-31.
- [3] 康健,黄鹏,刘爽,等. 从磨矿性能角度解决大鳞片石墨的保护问题[J]. 矿冶工程, 2020,40(2):55-59.
- KANG Jian, HUANG Peng, LIU Shuang, et al. Protection of large-scale graphite by optimizing grinding performance[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(2):55-59.
- [4] 邱杨率. 鳞片石墨浮选行为及新工艺研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2016.
- QIU Yangshuai. Research of flotation behaviors and new technology on flaky graphite[D]. Wuhan; Wuhan University of Technology, 2016.
- [5] 李荣改,徐靖,孙景敏,等. 立式搅拌磨在豫西南某微细粒晶质石墨矿中的应用[J]. 矿冶工程, 2021,41(2):55-58.
- LI Ronggai, XU Jing, SUN Jingmin, et al. Application of vertical agitator mill in fine crystalline graphite ore from Southwest Henan[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(2):55-58.
- [6] 车丽萍,余永富,庞金兴,等. 羟肟酸类捕收剂的合成、性质及在稀土矿物浮选中的作用机理[J]. 稀土, 2004(6):74-79.
- CHE Liping, YU Yongfu, PANG Jinxing, et al. Synthesis, properties and role mechanism of hydroxamic acid as collectors of RE mineral flotation[J]. Chinese Rare Earths, 2004(6):74-79.
- [7] MARTIN RUDOLPH, URS ALEXANDER PEUKER. Hydrophobicity of minerals determined by atomic force microscopy: A tool for flotation research[J]. Chemie Ingenieur Technik, 2014,86(6):865-873.
- [8] 张凌燕,李向益,邱杨率,等. 四川某难选石墨矿选矿试验研究[J]. 金属矿山, 2012(7):95-98.
- ZHANG Lingyan, LI Xiangyi, QIU Yangshuai, et al. Experimental research on beneficiation of a refractory graphite ore from Sichuan[J]. Metal Mine, 2012(7):95-98.
- [9] SHI Q, LIANG X, FENG Q, et al. The relationship between the stability of emulsified diesel and flotation of graphite[J]. Minerals Engineering, 2015,78:89-92.
- [10] 李恒,赵丽丽,龚岩,等. 表面活性剂复配对气化细渣浮选影响的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2022,42(13):4924-4933.
- LI Heng, ZHAO Lili, GONG Yan, et al. Experimental study on the performance of surfactant compound on the flotation of gasification fine slag[J]. Proceedings of the CSEE, 2022,42(13):4924-4933.
- [11] RAHAMAN S M, CHAKRABORTY M, MANDAL T, et al. Mechanically tuned lanthanum carbonate nanorods in water-in-oil microemulsion scaffolds[J]. Journal of Molecular Liquids, 2023,372:121204.
- [12] 黄波,徐宏祥,李旭林. 微乳型捕收剂的稳定性和浮选性能的试验研究[J]. 煤炭学报, 2019,44(9):2878-2885.
- HUANG Bo, XU Hongxiang, LI Xulin. Experimental study on stability and flotation performance of micro-emulsion collector[J]. Journal of China Coal Society, 2019,44(9):2878-2885.
- [13] 郭美玲,朱书全,贺兰鸿,等. 柴油微乳液在煤泥浮选中的应用[J]. 选煤技术, 2011(2):24-27.
- GUO Meiling, ZHU Shuquan, HE Lanhong, et al. Application of diesel microemulsion in coal slime flotation[J]. Coal Preparation Technology, 2011(2):24-27.
- [14] HAN X, LU M, FAN Y X, et al. Recent developments on surfactants for enhanced oil recovery[J]. Tenside Surfactants Detergents, 2021,58(3):164-176.
- 引用本文: 闫俊慧, 邱杨率, 张凌燕, 等. 柴油微乳液制备及其在石墨浮选中作用机理的研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):90-96.
- YAN Junhui, QIU Yangshuai, ZHANG Lingyan, et al. Preparation of diesel microemulsion and its mechanism in graphite flotation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):90-96.

(上接第89页)

- [12] WANG L, LI Z, ZHANG H, et al. Flotation separation of magnesite from dolomite with gellan gum as depressant and its depression mechanism[J]. Minerals Engineering, 2024,212:108718.
- [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(自然科学版), 2016,47(5):1459-1464.
- GAO Zhiyong, SONG Shaobo, SUN Wei, et al. Depressant behavior and mechanism of guar and xanthan gums on calcite flotation[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016,47(5):1459-1464.
- [14] DONG L, JIAO F, QIN W, et al. Selective flotation of scheelite from calcite using xanthan gum as depressant[J]. Minerals Engineering, 2019,138:14-23.
- [15] 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.
- 引用本文: 宋江伟,崔瑞,李茂林,等. 抑制剂腐植酸钠选择性分离磷灰石与碳酸盐矿物[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):85-89.
- SONG Jiangwei, CUI Rui, LI Maolin, et al. Selective separation of apatite from carbonate minerals with sodium humate as depressant[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):85-89.