

酸蚀对白云石可浮性的影响及其作用机理

郭俊¹, 印万忠¹, 杨斌², 朱张磊³

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221116;

3. 西安科技大学 化学与化工学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 在油酸钠体系下,通过浮选试验、浮选动力学拟合、表面粗糙度表征、比表面积分析、XPS分析、吸附性能分析和润湿性分析,研究了酸蚀对白云石可浮性的影响及其作用机理. 研究表明:酸蚀后,白云石表面粗糙度和比表面积增大,这暴露出更多的活性位点,强化了与油酸钠的吸附,增强了白云石的疏水性,进而改善了白云石的浮选性能. 此外,在浮选动力学拟合中,经典一级动力学模型、一级矩阵分布模型、二级动力学模型的 R^2 均高于95%. 相比于其他模型,经典一级动力学拟合效果较好. 其中在油酸钠质量浓度为60 mg/L时,酸蚀后白云石经典一级动力学 k 最大值为 1.88 min^{-1} ,与此同时,酸蚀前白云石经典一级动力学 $k=1.15 \text{ min}^{-1}$,表明酸蚀可以提高白云石浮选速率. 本研究为白云石浮选提供了新的研究方向,具有一定的理论和现实意义.

关键词: 白云石;粗糙度;酸蚀;可浮性;浮选动力学

中图分类号: TU 45 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)01-0093-08

Effect of Acid Etching on the Floatability of Dolomite and Its Mechanism of Action

GUO Jun¹, YIN Wan-zhong¹, YANG Bin², ZHU Zhang-lei³

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Chemical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China. Corresponding author: YIN Wan-zhong, E-mail: yinwanzhong@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The effect of acid etching on the floatability of dolomite and its mechanism of action were investigated by flotation tests, flotation kinetic fitting, surface roughness characterization, specific surface area analysis, XPS analysis, adsorption performance analysis and wettability analysis under sodium oleate system. The research results showed that acid etching increased the surface roughness and specific surface area of dolomite, exposing more active sites, strengthened the adsorption sodium oleate, enhanced the hydrophobic of dolomite, and thus improved the performance of dolomite. Moreover, regarding flotation kinetic fitting, the classical first-order model, first-order model with rectangular distribution of floatability, and the second-order kinetic model all displayed the R^2 values higher than 95%. Compare with other models, the classical first-order model exhibited the best fit. At a sodium oleate mass concentration of 60 mg/L, the k value of classical first-order for dolomite reached a maximum value of 1.88 min^{-1} . However, in this case, before acid etching, the k value of classical first-order model for dolomite was only 1.15 min^{-1} . These results further confirmed that acid etching could improve the flotation rate of dolomite. In summary, this study can provide a new research perspective for dolomite flotation, with a certain theoretical and practical significance.

Key words: dolomite; roughness; acid etching; floatability; flotation kinetics

收稿日期: 2022-08-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174239, 51874072, 52204284); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2101025).

作者简介: 郭俊(1993-),男,内蒙古包头人,东北大学硕士研究生; 印万忠(1970-),男,浙江临安人,东北大学教授,博士生导师.

我国白云石矿产资源丰富、储量巨大,是炼镁、耐火材料、建材、化工等行业的主要原料,浮选是富集白云石的有效手段. 由于浮选过程受到上百个变量的影响,使其成为一个复杂的过程,其中浮选进料的物理和化学特性对浮选过程的影响较大. 化学成分和表面的几何微观或纳米结构直接决定矿物的润湿性,进而决定矿物的可浮性,矿物表面性质的研究一直是浮选领域研究的热点.

已有学者^[1-5]开展了粗糙表面对重晶石、滑石、玻璃珠、煤等颗粒可浮性影响的研究. Hassas等^[6]发现矿物表面粗糙度的改变,能够影响矿物颗粒的浮选行为. 目前,改变矿物表面粗糙度的方法包括酸蚀^[5]、磨矿^[7]、超声^[8]等. 此外,少量研究^[9-10]表明酸蚀可以使矿物表面发生变化,有利于增强捕收剂的吸附,从而提高矿物的浮选回收率. 例如,Zhu等^[11]研究发现草酸预处理增强了油酸钠的吸附能力,显著提高了铝土矿的 Al_2O_3 回收率,降低了 SiO_2 回收率. Zhang等^[9]报道了酸处理后高岭土表面的Al/Si原子比降低,抑制剂六偏磷酸钠的吸附量降低,而对捕收剂盐酸十二胺的吸附能力增强. 然而,现有研究对矿物的表面性质的分析并不充分,矿物的表面性质分为表面化学、表面物理和表面微观结构,三者之间的联系不明确,特别是,粗糙度影响矿物表面性质,进而改变矿物性能的研究相对薄弱. 因此,迫切需要开展如何通过改变粗糙度来调控矿物浮选行为的研究工作.

基于此,本文在油酸钠体系下,研究了酸蚀对白云石可浮性的影响. 在此基础上,通过润湿性分析、吸附性能分析以及粗糙度表征揭示了酸蚀对白云石浮选行为作用机理,揭示了粗糙度在白云石浮选中的作用. 研究成果能够为粗糙度在表面化学和矿物浮选中的作用提供合理的解释,并对白云石的浮选回收提供新的研究视角.

1 试验原料和试验方法

1.1 试验原料

试验中所用白云石为 $-74+38\mu\text{m}$ 粒级的单矿物. 图1为白云石X射线衍射(XRD)图谱,化学多元素分析表明白云石中 MgO 、 CaO 质量分数分别为20.95%和29.92%,根据纯矿物理论含量计算其纯度为98.42%. 试验所用油酸钠、盐酸和氢氧化钠均为化学纯,分别购于国药集团化学试剂有限公司和天津科密欧化学试剂有限公司,试验用水为去离子水.

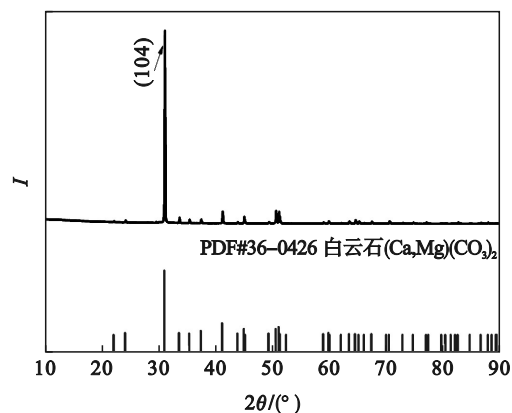


图1 白云石 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of dolomite

1.2 试验方法

浮选试验为吉林省探矿机械厂生产的XFG II型挂槽式浮选机. 浮选机转速设置为1992 r/min,每次先取2.0 g矿样置于浮选槽内并加入20 mL去离子水,调浆2 min后调节矿浆pH再搅拌3 min,随后加入油酸钠继续搅拌3 min,然后按浮选动力学时间间隔(0~0.2, 0.2~0.4, 0.4~0.6, 0.6~1, 1~2, 2~4, 4~6, 6~8 min)分别刮取泡沫产品,浮选试验示意图如图2所示.

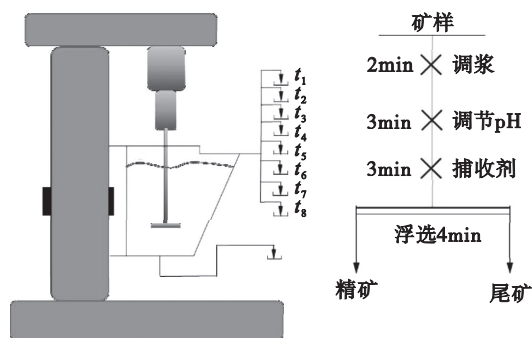


图2 浮选试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of flotation tests

1.3 润湿性分析

利用接触角测定仪(JC2000,上海中辰数码科技设备有限公司,中国)测量接触角,每次测量用微量注射器产生的 $4\mu\text{L}$ 液滴(去离子水)滴落在矿样表面,用高速摄影机(CCD)记录液滴在矿样上的接触角,每个样品测量3次,取平均值作为样品的最终接触角.

1.4 酸蚀试验、表面粗糙度表征及比表面积分析

本文通过酸蚀制备不同粗糙度的白云石,条件为固液质量比1:4,酸蚀液浓度为0.1 mol/L,通过机械搅拌使矿物分散均匀,搅拌15 min后用去离子水反复清洗后抽滤,低温干燥后作为浮选入料.

采用原子力显微镜(AFM, MultiMode8,

Bruker, 美国) 表征矿物的表面粗糙度, 得到的 AFM 图像用 NanoScope Analysis 软件进行分析. 取酸蚀前后的白云石分散后洒落在以云母为基底的圆片上, 云母下方粘有直径比云母略大的铁片. 采用 AFM 测量矿物的表面粗糙度时, 每个样品随机选择 3~5 个点进行测量. 均方根粗糙度 (R_q) 和算术粗糙度 (R_a) 计算公式为

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i^2}, \quad (1)$$

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Z_i - \bar{Z}|. \quad (2)$$

其中: Z_i 是给定像素 i 的高度; N 是图像中像素的总数; \bar{Z} 是整个图像的平均高度.

比表面积分析仪 (QUADRASORB SI, Quantachrome, 美国) 表征比表面积, 得到的数据用 QuadraWin 软件进行分析.

1.5 X 射线光电子 (XPS) 能谱

采用 ESCALAB 250Xi 光谱仪 (Thermo Fisher, 美国) 150 W 产生的单色 Al $K\alpha$ X 射线 (光电子能量为 1 486.6 eV) 阳极靶分析样品表面元素组成. 测试结果利用 Avantage 软件进行处理, 结合能用 C1s (284.8 eV) 荷电校准. 测试区域一般是样品表面 100 μm , 深度 10 nm, 每个样品测试 3 次, 取平均值作为样品的最终结果.

1.6 吸附性能分析

利用紫外分光光度计对油酸钠在矿物表面的吸附密度进行测定. 油酸钠的特征吸收峰^[12]为波长 231 nm, 分别测定油酸钠质量浓度为 20, 40, 60, 80 和 100 mg/L 时的吸光度, 获得油酸钠吸附等温线, 如图 3 所示. 样品的制备与浮选过程相似, 采用残余浓度法 (式 (3)) 来确定油酸钠在白云石表面的吸附密度:

$$\Gamma = \frac{(\rho_0 - \rho_1)V}{m}. \quad (3)$$

其中: Γ 是油酸钠的吸附密度 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$); ρ_0 和 ρ_1 分别是油酸钠溶液的初始质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和残余质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); V 是油酸钠溶液的体积 (忽略吸附前后的体积变化, L); m 是白云石样品的质量 (g).

2 试验结果与讨论

2.1 浮选结果

2.1.1 油酸钠质量浓度以及矿浆 pH 对白云石浮选回收率的影响

矿浆 pH 调节为 10.00^[13-14], 考察了捕收剂油

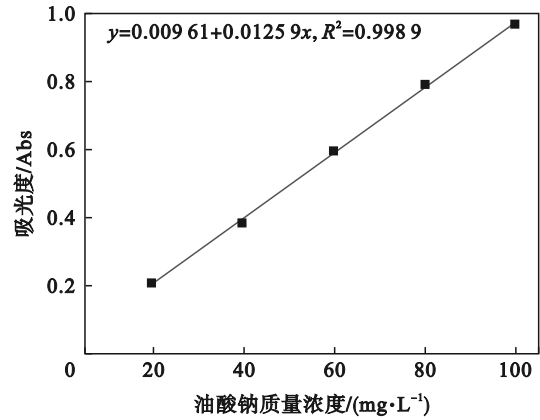


图 3 油酸钠吸附等温线

Fig. 3 Sodium oleate adsorption isotherm

酸钠质量浓度对酸蚀前后白云石浮选回收率的影响, 结果如图 4 所示.

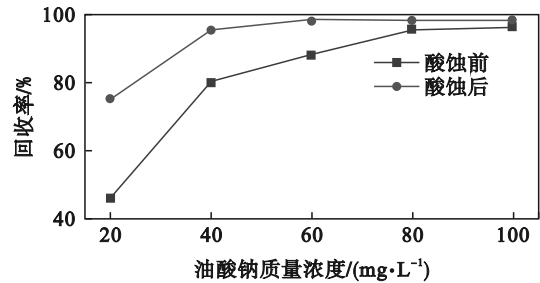


图 4 油酸钠质量浓度对酸蚀前后白云石浮选回收率的影响

Fig. 4 Effect of sodium oleate concentration on the flotation recovery of dolomite before and after acid etching

由图 4 可知, 随着油酸钠质量浓度的增加, 酸蚀前后, 白云石的回收率先快速增加, 后趋于稳定. 在油酸钠质量浓度为 60 mg/L 时, 酸蚀后的白云石回收率达到最大值 98.15%. 而酸蚀前的白云石回收率在油酸钠质量浓度为 80 mg/L 时才达到最大值 95.65%. 这表明相比于酸蚀前, 酸蚀后白云石回收率更高, 且所需捕收剂油酸钠用量更低. 考虑到酸蚀后白云石达到最大回收率, 后续试验油酸钠质量浓度设定为 60 mg/L.

固定油酸钠质量浓度 60 mg/L, 探究 pH 对酸蚀前后白云石可浮性的影响, 结果如图 5 所示.

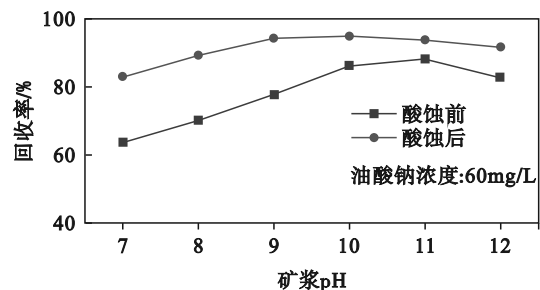


图 5 矿浆 pH 对酸蚀前后白云石浮选回收率的影响

Fig. 5 Effect of pulp pH on the flotation recovery of dolomite before and after acid etching

由图 5 可知,矿浆 pH 对酸蚀前后白云石影响较小,白云石回收率总体趋势为先增大后减小,酸蚀后白云石在 pH 为 7~12 时具有良好的可浮性,而酸蚀前白云石在 pH 为 7~9 时可浮性较差,在 pH 为 10~12 时可浮性良好,但是低于酸蚀后的白云石浮选回收率.此外,酸蚀后的白云石在 pH 为 10 时达到最大浮选回收率 94.85%;而酸蚀前白云石则是在 pH 为 11 时达到最大回收率 88.10%,pH 为 10 时浮选回收率为 86.25%,表明酸蚀能够提高白云石浮选回收率.

2.1.2 浮选动力学研究

研究人员^[15-18]已经提出了浮选动力学的经验模型,一般认为经典一级模型^[19-21]可以很好地描述矿物的浮选动力学特征.具体表达式如表 1 所示.其中, t 是累计浮选时间, R 是时间 t 后的累计回收率, R_{∞} 是理论最大回收率, k 为动力学常数 (min^{-1}).

表 1 浮选动力学模型		
Table 1 Flotation kinetic models		
序号	浮选动力学模型	公式
模型 1	经典一级模型 ^[15]	$R = R_{\infty} [1 - \exp(-k_1 t)]$
模型 2	一级矩阵分布模型 ^[16]	$R = R_{\infty} \left\{ 1 - \frac{1}{k_2 t} [1 - \exp(-k_2 t)] \right\}$
模型 3	二级动力学模型 ^[17]	$R = R_{\infty}^2 k_3 t / (1 + R_{\infty} k_3 t)$
模型 4	二级矩阵分布模型 ^[18]	$R = R_{\infty} \left\{ 1 - \frac{1}{k_4 t} [\ln(1 + k_4 t)] \right\}$

固定油酸钠质量浓度分别为 20, 40, 60, 80 和 100 mg/L, 采用浮选动力学模型对白云石的浮选累积回收率进行拟合, 结果如图 6 所示(图中实线为酸蚀前, 虚线为酸蚀后).

由图 6 可知, 经典一级动力学模型、一级矩阵分布模型和二级动力学模型拟合相关性系数 R^2

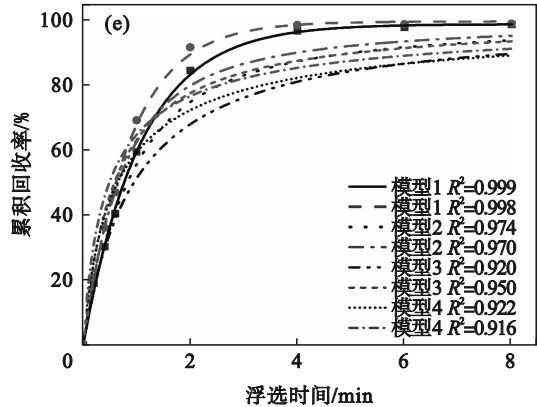
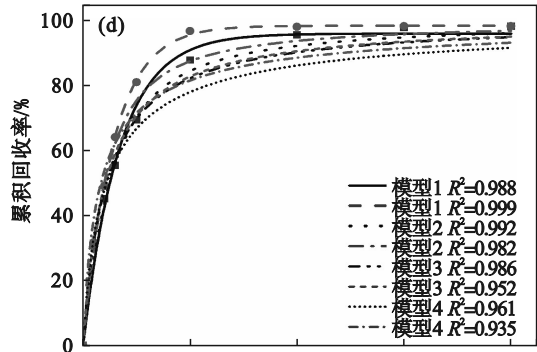
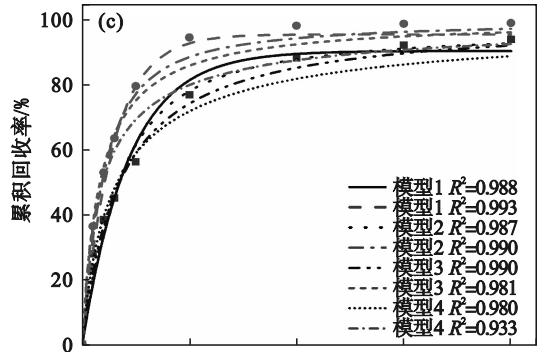
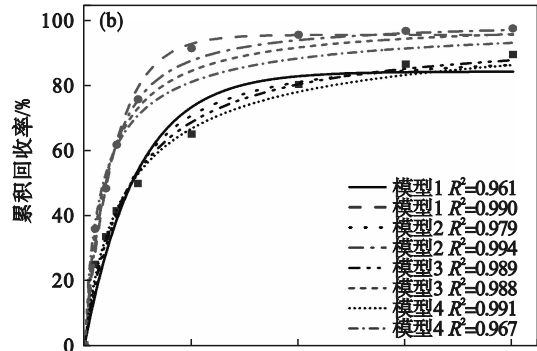
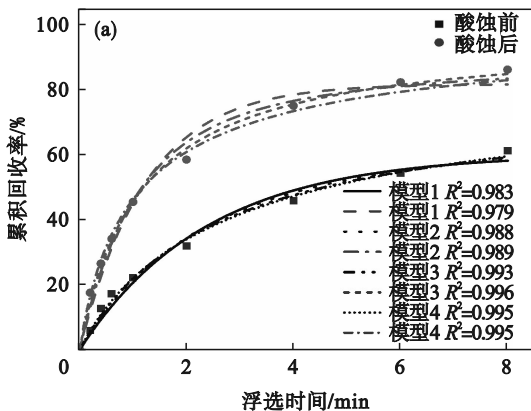


图 6 酸蚀前后白云石浮选动力学非线性拟合
Fig. 6 Non-linear fitting of flotation kinetics before and after acid etching
(a)—20 mg/L; (b)—40 mg/L; (c)—60 mg/L;
(d)—80 mg/L; (e)—100 mg/L.

均高于 95%. 二级矩阵分布模型在低油酸钠用量下拟合情况较好, 当油酸钠质量浓度大于 60 mg/L 时相关性系数 R^2 低于 95%. 与此同时, 酸蚀后白云石达到最大回收率的时间较酸蚀前短, 且酸蚀

后白云石最大回收率均高于酸蚀前,但是随着油酸钠质量浓度的增加,二者的最大回收率差值变小.当浮选时间为 8 min,油酸钠质量浓度为 20 mg/L 时,酸蚀前后白云石的浮选累积回收率分别达到 61.20% 和 86.20%;油酸钠质量浓度为 40 mg/L 时,酸蚀前后白云石的浮选累积回收率分别达到 89.35% 和 97.30%;油酸钠质量浓度为 60 mg/L 时,酸蚀前后白云石的浮选累积回收率分别达到 93.85% 和 98.85%;油酸钠质量浓度为 80 mg/L 时,酸蚀前后白云石的浮选累积回收率均为 98.30%;油酸钠质量浓度为 100 mg/L 时,酸蚀前后白云石的浮选累积回收率分别达到

98.25% 和 98.60%.

浮选速率常数 k 是浮选动力学中的重要参数,用于评定矿物上浮速率快慢,其数值越大,表明矿物上浮速度越快.图 7 为酸蚀前后油酸钠质量浓度对白云石浮选速率常数的影响.由图 7 可知,随着油酸钠质量浓度的增加,浮选速率常数 k 先增大后减小,且酸蚀后的白云石的浮选速率常数 k 均高于酸蚀前白云石的.结合图 6 可知,在油酸钠质量浓度为 60 mg/L 时,经典一级动力学模型拟合 k 最大为 1.88 min^{-1} ,而酸蚀前白云石则在 80 mg/L 时达到最大为 1.47 min^{-1} ,其他模型也呈现出同样的趋势.

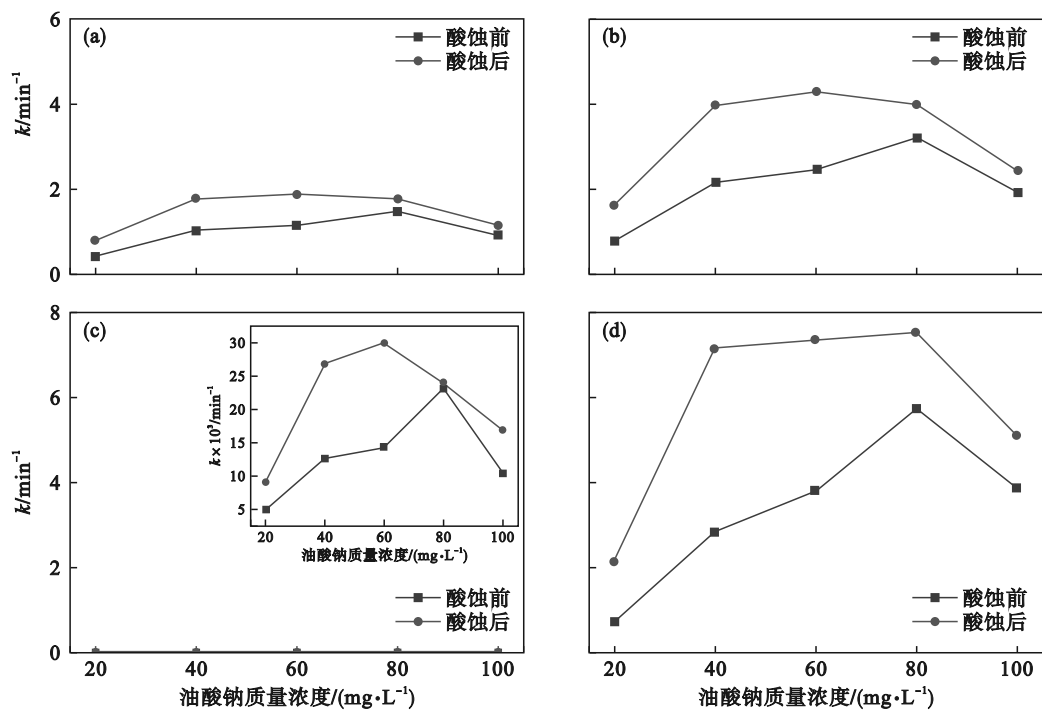


图 7 油酸钠质量浓度对酸蚀前后白云石浮选速率常数的影响

Fig. 7 Effect of sodium oleate concentrations on the flotation rate constant of dolomite before and after acid etching (a)—模型 1; (b)—模型 2; (c)—模型 3; (d)—模型 4.

2.2 酸蚀对白云石比表面积及表面粗糙度的影响

通过 AFM 和 BET (Brunauer-Emmett-Teller) 量化表征酸蚀前后白云石表面粗糙度和比表面积的变化,结果如图 8 和表 2 所示.由图 8 和表 2 可知,酸蚀后白云石的表面粗糙度高于酸蚀前,结合比表面积分析可知,表面粗糙度的增加有利于增大白云石的比表面积,这有利于增加白云石表面与油酸钠作用的活性位点,从而能够提高浮选回收率和增加浮选速率常数,这与浮选试验结果相符.

2.3 XPS 分析

为了研究酸蚀对白云石表面元素的影响,对酸蚀前后的白云石进行 XPS 分析,其表面元素相

表 2 酸蚀前后白云石的表面粗糙度以及比表面积

Table 2 Surface roughness and specific surface area of dolomite before and after acid etching

试样	R_a/nm	R_q/nm	粗糙度	比表面积
			nm	$\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$
酸蚀前	0.163	0.268	0.2 ~ 1.3	0.324
酸蚀后	0.216	0.370	0.5 ~ 2.2	0.386

对含量如表 3 所示,XPS 能谱如图 9 所示.

由表 3 可知,酸蚀后白云石表面钙镁含量大于酸蚀前,矿物表面可以提供更多与油酸钠作用的活性位点,而表面活性位点密度的增大可能会提高白云石的吸附概率,此外,由图 9 可知,酸蚀后白云石表面无新物质形成.

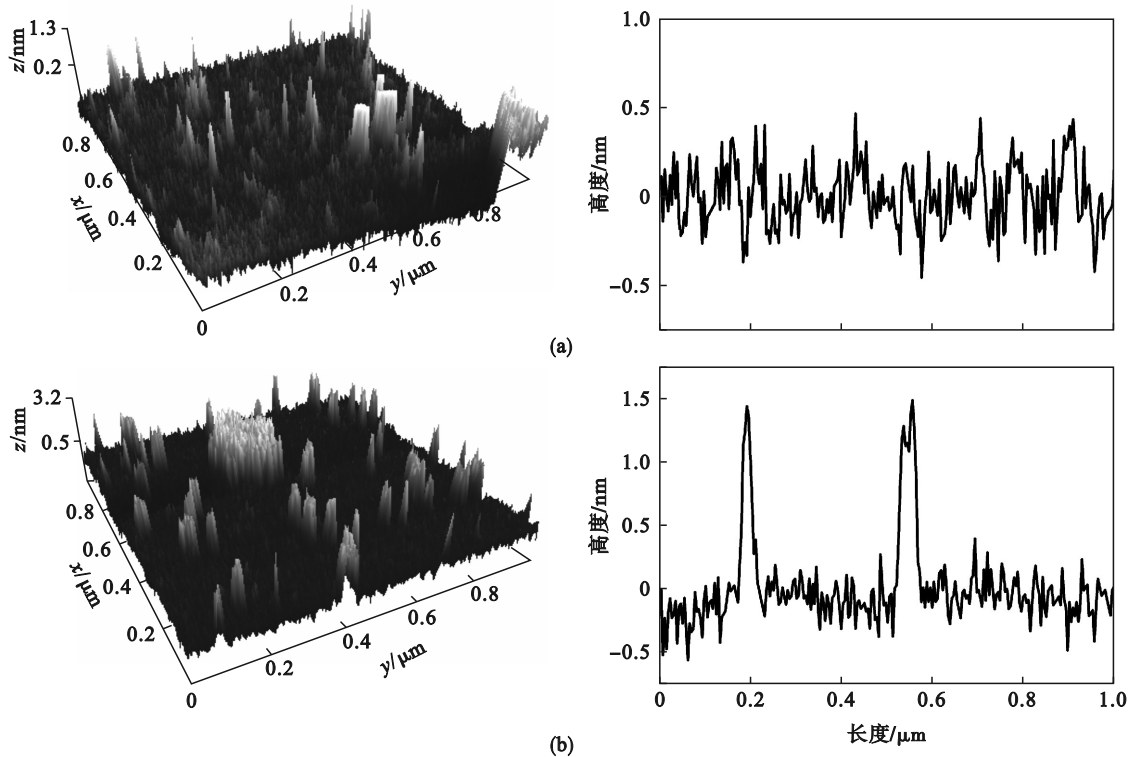


图8 酸蚀前后白云石 AFM 图像

Fig. 8 AFM images of dolomite before and after acid etching
(a)—酸蚀前; (b)—酸蚀后.

表3 白云石的XPS分析结果
Table 3 XPS analysis results of dolomite %

试样	Ca2p	Mg1s	C1s	O1s
酸蚀前	6.71	1.97	36.61	54.71
酸蚀后	9.60	4.22	38.24	47.94

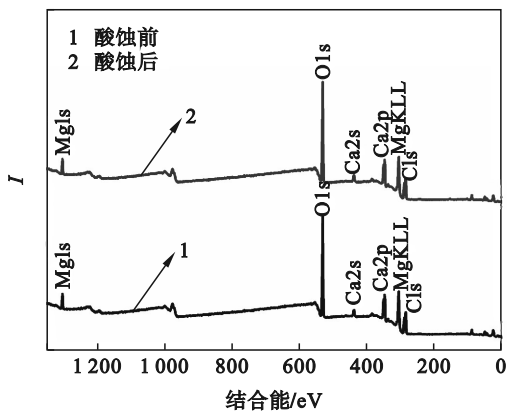


图9 酸蚀前后白云石 XPS 能谱

Fig. 9 XPS energy spectrum of dolomite before and after acid etching

2.4 吸附性能分析

矿浆 pH 为 10.00、测定酸蚀前后白云石与质量浓度分别为 20, 40, 60, 80 和 100 mg/L 油酸钠作用后, 离心过滤得到上清液, 测量其吸光度, 通过油酸钠吸附等温线(图 3) 获得残余质量浓度, 如图 10 所示. 利用式(3) 计算得到白云石吸附,

结果如图 11 所示.

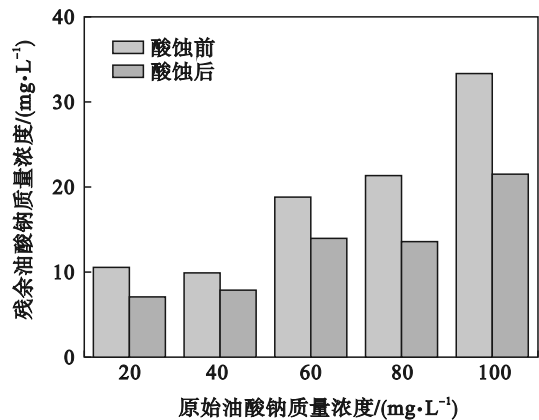


图10 油酸钠吸附于白云石后上清液油酸钠残余质量浓度
Fig. 10 Residual sodium oleate concentration in supernatant after sodium oleate adsorbed on dolomite

由图 10 可得, 随着油酸钠原始质量浓度增加, 上清液残留油酸钠质量浓度也随之增加. 酸蚀后白云石与油酸钠作用后的上清液残余质量浓度均小于酸蚀前. 由图 11 可知, 随着油酸钠质量浓度的增加, 白云石吸附密度也增大, 这可能增强白云石表面的疏水性.

2.5 润湿性分析

固定矿浆 pH 为 10.00 和油酸钠质量浓度为 60 mg/L, 测试了酸蚀前后白云石的接触角, 结果

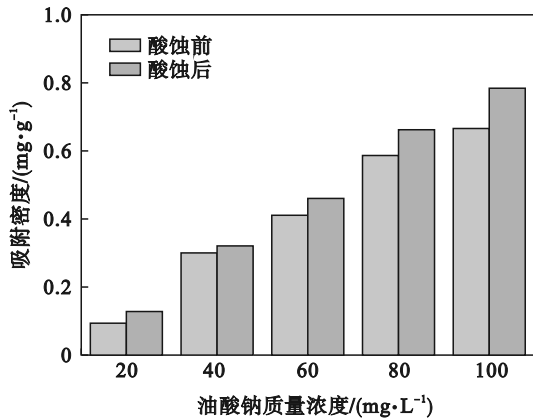


图 11 酸蚀前后白云石油酸钠吸附密度

Fig. 11 Adsorption density of sodium oleate on dolomite before and after acid etching

如表 4 所示.

由表 4 可知白云石为天然亲水型矿物,经过酸蚀后,增大了其粗糙度和比表面积,白云石表面变得更亲水. XPS 分析则表明酸蚀后的钙镁活性位点密度大于酸蚀前,而与油酸钠作用后,结

表 4 酸蚀前后白云石的接触角

Table 4 Contact angle of dolomite before and after acid etching (°)

酸蚀前	酸蚀后	酸蚀前+油酸钠	酸蚀后+油酸钠
32.18	25.71	72.67	88.35

合吸附量测试,酸蚀后白云石的吸附量增大,使得酸蚀后白云石表面变得更疏水,与 Zhu 等^[22-23]的研究结果相符.

2.6 机理分析

基于 XPS、吸附量、接触角以及浮选动力学研究,提出了关于粗糙度对浮选回收率以及浮选速率常数的机理模型(见图 12).由图 12 可知,酸蚀能够改变白云石的表面形貌,增加了白云石表面粗糙和比表面积,促使白云石表面暴露了更多的捕收剂吸附的活性位点,这增强了油酸钠在白云石表面的吸附,强化了白云石表面的疏水性,进而提高了白云石上浮速率并改善了白云石浮选回收率.

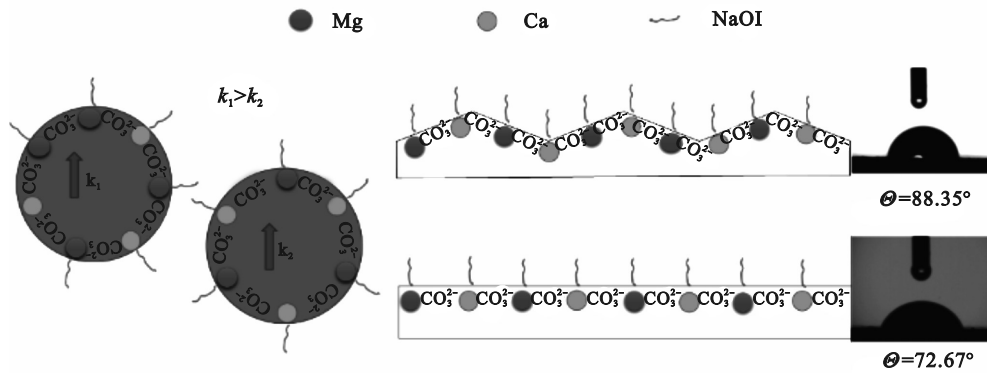


图 12 粗糙度在润湿性及浮选动力学中可能的机理模型

Fig. 12 Possible mechanistic model of roughness in wettability and flotation kinetics

3 结 论

1) 酸蚀后白云石浮选回收率较酸蚀前有大幅度提升,在低油酸钠质量浓度下,二者差别明显,随着油酸钠质量浓度的增加,二者差别逐渐变小.

2) 在 4 种模型拟合中,经典一级动力学模型、一级矩阵分布模型、二级矩阵模型拟合相关率均高于 95%,相对于其他模型,经典一级动力学拟合度较高.

3) 酸蚀可以增大白云石的粗糙度和比表面积,这促使白云石表面暴露出更多的活性位点,强化了油酸钠的吸附,增强白云石表面的疏水性,进而提高了白云石的浮选速率和浮选累积回收率.

参考文献:

- [1] Yekeler M, Ulusoy U. Characterisation of surface roughness and wettability of salt-type minerals: calcite and barite [J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 2004, 113 (3): 145-152.
- [2] Ulusoy U, Yekeler M. Correlation of the surface roughness of some industrial minerals with their wettability parameters [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2005, 44(5): 555-563.
- [3] Yekeler M, Ulusoy U, Hiçiyılmaz C. Effect of particle shape and roughness of talc mineral ground by different mills on the wettability and floatability [J]. *Powder Technology*, 2004, 140(1/2): 68-78.
- [4] Xia W C, Ni C, Xie G Y. The influence of surface roughness on wettability of natural/gold-coated ultra-low ash coal particles [J]. *Powder Technology*, 2016, 288: 286-290.
- [5] Xing Y W, Zhang Y F, Ding S H, et al. Effect of surface roughness on the detachment between bubble and glass beads with different contact angles [J]. *Powder Technology*,

- 2020, 361: 812-816.
- [6] Hassas V B, Caliskan H, Guven O, et al. Effect of roughness and shape factor on flotation characteristics of glass beads [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2016, 492: 88-99.
- [7] Tong Z Y, Liu L, Yuan Z T, et al. The effect of comminution on surface roughness and wettability of graphite particles and their relation with flotation [J]. *Minerals Engineering*, 2021, 169: 106959.
- [8] Wu H Q, Fang S, Shu K Q, et al. Selective flotation and adsorption of ilmenite from titanite by a novel method: ultrasonic treatment [J]. *Powder Technology*, 2020, 363: 38-47.
- [9] Zhang N N, Ejtemaei M, Nguyen A V, et al. XPS analysis of the surface chemistry of sulfuric acid-treated kaolinite and diaspore minerals with flotation reagents [J]. *Minerals Engineering*, 2019, 136: 1-7.
- [10] Li H X, Chai W C, Cao Y J, et al. Flotation enhancement of low-grade bauxite using oxalic acid as surface pretreatment agent [J]. *Applied Surface Science*, 2022, 577: 151964.
- [11] Zhu G L, Zhao Y H, Zheng X Y, et al. Surface features and flotation behaviors of spodumene as influenced by acid and alkali treatments [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 507: 145058.
- [12] Cao S H, Yin W Z, Yang B, et al. Insights into the influence of temperature on the adsorption behavior of sodium oleate and its response to flotation of quartz [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 32 (2): 399-409.
- [13] 付亚峰, 杨晓峰, 印万忠, 等. 木质素磺酸钙对水镁石浮选中蛇纹石的抑制机理 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(2): 371-378.
(Fu Ya-feng, Yang Xiao-feng, Yin Wan-zhong, et al. Inhibitory role of calcium lignosulfonate on serpentine during brucite flotation [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53 (2): 371-378.)
- [14] 姚金, 印万忠, 王余莲, 等. 油酸钠浮选体系中菱镁矿与白云石和石英的交互影响 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(9): 1330-1334.
(Yao Jin, Yin Wan-zhong, Wang Yu-lian, et al. Interactive effect of dolomite and quartz on the floatability of magnesite in sodium oleate flotation system [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2013, 34 (9): 1330-1334.)
- [15] Hassanzadeh A, Huu H D, Brockmann M. Assessment of flotation kinetics modeling using information criteria; case studies of elevated-pyritic copper sulfide and high-grade carbonaceous sedimentary apatite ores [J]. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2020, 41 (7): 1083-1094.
- [16] Zhang H J, Liu J T, Cao Y J, et al. Effects of particle size on lignite reverse flotation kinetics in the presence of sodium chloride [J]. *Powder Technology*, 2013, 246: 658-663.
- [17] Stanojlović R D, Sokolović J M. A study of the optimal model of the flotation kinetics of copper slag from copper mine BOR [J]. *Archives of Mining Sciences*, 2014, 59 (3): 821-834.
- [18] Ruiz-Cabello F M, Trefalt G, Csendes Z, et al. Predicting aggregation rates of colloidal particles from direct force measurements [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2013, 117(39): 11853-11862.
- [19] Xu M Q. Modified flotation rate constant and selectivity index [J]. *Minerals Engineering*, 1998, 11(3): 271-278.
- [20] Polat M, Chander S. First-order flotation kinetics models and methods for estimation of the true distribution of flotation rate constants [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2000, 58(1/2/3/4): 145-166.
- [21] Azizi A. A study on the modified flotation parameters and selectivity index in copper flotation [J]. *Particulate Science and Technology*, 2017, 35(1): 38-44.
- [22] Zhu Z L, Wang D H, Yang B, et al. Water droplets and air bubbles at magnesite nano-rough surfaces: analysis of induction time, adhesion and detachment using a dynamic microbalance [J]. *Minerals Engineering*, 2020, 155: 106449.
- [23] Zhu Z L, Yin W Z, Wang D H, et al. The role of surface roughness in the wettability and floatability of quartz particles [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 527: 146799.