

油酸根离子在氟磷灰石和白云石表面吸附动力学与 吸附热力学研究^①

张景奇¹, 张覃^{2,3,4}, 卯松^{1,3,4}

(1. 贵州大学矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州科学院, 贵州 贵阳 550001; 3. 喀斯特地区优势矿产资源高效利用国家地方联合工程实验室, 贵州 贵阳 550025; 4. 贵州省非金属矿产资源综合利用重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 采用 TOC 测量以及分子模拟方法研究了油酸根离子在氟磷灰石和白云石表面的吸附动力学以及吸附热力学。吸附动力学研究表明, 以 HEDP 为抑制剂时, 油酸根离子在氟磷灰石和白云石表面的吸附符合准二级动力学模型, 油酸根离子在氟磷灰石表面的吸附速率大于在白云石表面的吸附速率。吸附热力学研究表明, 油酸根离子在氟磷灰石和白云石孔径内和氟磷灰石(001)面以及白云石(104)面的吸附都接近 Langmuir 模型。相同比表面积条件下, 油酸根离子在白云石表面的吸附量高于在氟磷灰石表面的吸附量, 表明单位表面积内, 白云石表面比氟磷灰石表面具有更多的活性位点。

关键词: 氟磷灰石; 白云石; 吸附动力学; 吸附热力学; 孔隙

中图分类号: TD97

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.01.014

文章编号: 0253-6099(2024)01-0060-08

Kinetics and Thermodynamics of Oleate Ion Adsorption on Fluorapatite and Dolomite

ZHANG Jingqi¹, ZHANG Qin^{2,3,4}, MAO Song^{1,3,4}

(1. Mining College, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. Guizhou Academy of Sciences, Guiyang 550001, Guizhou, China; 3. National & Local Joint Laboratory of Engineering for Effective Utilization of Regional Mineral Resources from Karst Areas, Guiyang 550025, Guizhou, China; 4. Guizhou Key Lab of Comprehensive Utilization of Nonmetallic Mineral Resources, Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract: The kinetics and thermodynamics of oleate ion adsorption on the surface of fluorapatite and dolomite were studied by adopting TOC measurement and molecular simulation. The study on kinetics of adsorption shows that with HEDP as the depressant, the adsorption rate of oleate ions on fluorapatite is greater than on dolomite, and the adsorption on both minerals conforms to the quasi-second-order kinetic model. Furthermore, according to the study on adsorption thermodynamics, the characteristics of oleate ion adsorption on the inner pore surface of both fluorapatite and dolomite, on (001) surface of fluorapatite and (104) surface of dolomite nearly conform to Langmuir model. For identical specific surface area, the adsorption amount of oleate ions on dolomite is higher than that on fluorapatite, indicating that there are more active sites per unit surface area on dolomite than on fluorapatite.

Key words: fluorapatite; dolomite; adsorption kinetics; adsorption thermodynamics; porosity

吸附动力学和吸附热力学是研究浮选过程中捕收剂作用原理的重要内容。准一级动力学模型和准二级动力学模型是常见的动力学模型^[1]。吸附等温线可以代表矿物与捕收剂活性之间的函数关系。吸附等温

线常用模型有 Langmuir、Freundlich 和 Temkin 模型等^[2]。矿物表面的孔隙对浮选有较大影响, 药剂吸附在孔隙中会使浮选药剂用量增加^[3], 同时会降低矿物浮选回收率。吸附动力学和吸附热力学研究有助于了

① 收稿日期: 2023-09-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFE0110300); 贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2020]4105)

作者简介: 张景奇(1998—), 男, 甘肃定西人, 硕士研究生, 主要研究方向为难选矿石的选矿及资源综合利用。E-mail: zjq824824@163.com

通信作者: 张覃(1967—), 女, 贵州毕节人, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为难选矿石的选矿及资源综合利用。E-mail: zq6736@163.com

解捕收剂在氟磷灰石和白云石表面的吸附机理, 构建捕收剂在矿物表面的吸附模型以及吸附形式对改进药剂在矿物表面的作用具有重要意义。本文使用油酸钠作为捕收剂、HEDP 作为抑制剂, 采用 TOC 测量以及分子模拟的方式对药剂在矿物表面的吸附动力学和吸附等温线进行分析, 对氟磷灰石和白云石孔径中的吸附以及磷灰石(001)面和白云石(104)面的吸附进行研究, 进一步了解脂肪酸类捕收剂在氟磷灰石和白云石表面的作用机理。

1 研究方法

1.1 矿浆中油酸根离子含量测定

采用 TOC(总有机碳)测试分析捕收剂油酸钠在氟磷灰石和白云石纯矿物表面的吸附量。经过前期纯矿物浮选条件探索试验, 确定浮选药剂制度为: pH=4.86, HEDP 用量 80 mg/L, 油酸钠用量 150 mg/L。采取与浮选试验相同的调浆顺序, 探索油酸根离子在不同时间的吸附量。

TOC 数值与油酸根离子标准溶液浓度线性拟合结果如图 1 所示。

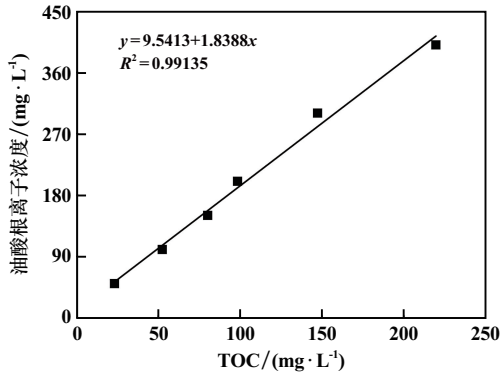


图 1 油酸根离子标准溶液浓度曲线

由图 1 可知, 油酸根离子标准溶液浓度与 TOC 值线性拟合良好, 拟合方程为:

$$y = 9.5413 + 1.8388x \quad (1)$$

式中 x 为 TOC 值; y 为油酸根离子浓度。线性拟合的相关系数为 0.99135, 油酸根离子溶液浓度与 TOC 值线性相关, 此曲线可用作油酸根离子浓度与其 TOC 值的标准曲线。

油酸根离子在矿物表面的吸附量计算公式为:

$$A = n - (9.5413 + 1.8388x) \quad (2)$$

$$Q = AV/m \quad (3)$$

$$C = AV/(sm) \quad (4)$$

式中 A 为吸附浓度, mg/L; n 为捕收剂浓度, mg/L; x 为

测试得到的 TOC 值; Q 为吸附量, mg/g; C 为吸附密度, mg/m²; V 为溶液体积, L; s 为比表面积, m²/g; m 为试样质量, g。

1.2 矿物比表面积测定

本研究需要计算浮选过程中捕收剂在矿物表面的吸附密度, 故选择浮选所采用的试样, 采用麦克 ASAP2460 测定矿物比表面积, 以保证试验结果的准确性。

1.3 分子模拟研究

使用 Sorption 模块分析油酸根离子在氟磷灰石和白云石内部开孔中油酸根离子的吸附等温线。

构建氟磷灰石开孔结构, 使用几何优化后的氟磷灰石晶体构建氟磷灰石超晶胞, 超晶胞参数为: $a = b = 8.50087 \text{ nm}$, $c = 2.76630 \text{ nm}$ 。在超晶胞内部建立一个径向距离 3 nm 的孔, 具体结构如图 2 所示。

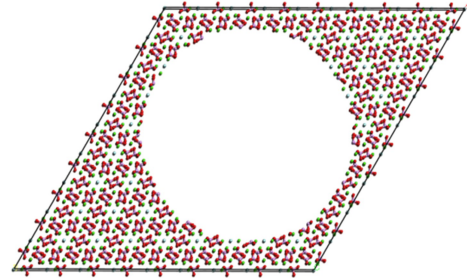


图 2 氟磷灰石孔径结构

计算参数为: 最低和最高逸度分别为 500 kPa 和 20 000 kPa, Fugacity steps 值为 10, 温度 298 K, 使用 COMPASS II 力场。

构建白云石开孔结构, 使用几何优化后的氟磷灰石晶体构建氟磷灰石超晶胞, 超晶胞参数为: $a = b = 8.72966 \text{ nm}$, $c = 3.19567 \text{ nm}$ 。在超晶胞内部建立一个径向距离 3 nm 的孔, 具体结构如图 3 所示。计算参数与氟磷灰石保持一致。

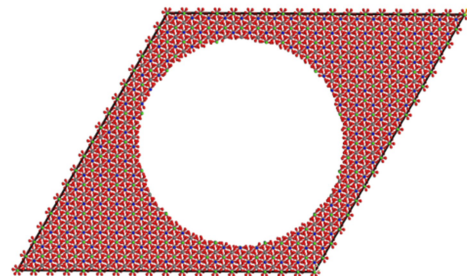
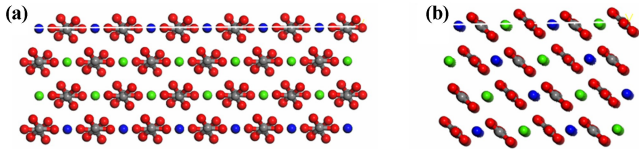


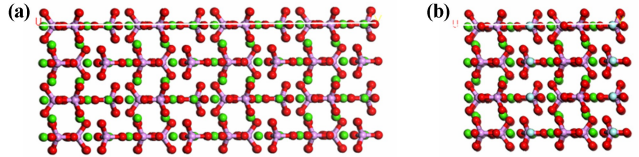
图 3 白云石孔径结构

白云石(104)表面如图 4 所示, 氟磷灰石(001)表面如图 5 所示。



(a) 正视图; (b) 侧视图

图4 白云石(104)表面



(a) 正视图; (b) 侧视图

图5 氟磷灰石(001)表面

2 吸附动力学研究

吸附动力学通过研究药剂在矿物表面的吸附速率判断浮选调浆过程中药剂在矿物表面作用的时长,通过准一级动力学方程、准二级动力学方程以及 Webber-Morris 动力学方程拟合判断药剂在矿物表面吸附的主要控制因素。

准一级动力学方程假定吸附过程受扩散步骤控制^[4]:

$$\lg(Q_e - Q_t) = \lg Q_e - k_1 t / 2.303 \quad (5)$$

式中 k_1 为准一级动力学方程吸附速率常数, $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$; Q_e 为平衡吸附量, mg/g ; Q_t 为 t 时刻的吸附量, mg/g 。

准二级动力学方程认为药剂在矿物表面的吸附速率由矿物表面未被占有的吸附空位数的平方值决定,吸附过程受化学吸附机理控制^[5-6]:

$$t/Q_t = t/Q_e + 1/(k_2 Q_e^2) \quad (6)$$

式中 k_2 为准二级动力学方程吸附速率常数, $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$; Q_e 为平衡吸附量, mg/g ; Q_t 为 t 时刻的吸附量, mg/g 。

Webber-Morris 动力学方程使用 Q_t 与 $t^{0.5}$ 进行线性拟合,如果获得的拟合曲线通过坐标原点,说明其吸附行为属于颗粒内扩散动力学控制过程;如果存在多条拟合曲线不通过坐标原点的情况,说明其吸附行为属于颗粒内扩散和外扩散同时主导的控制过程,分多个步骤进行^[7]:

$$Q_t = K_p t^{0.5} + C \quad (7)$$

式中 Q_t 为 t 时刻的吸附量, mg/g ; K_p 为颗粒内扩散速率常数, $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$; C 为常数。

在 $\text{pH} = 4.86$ 、HEDP 用量 $80 \text{ mg}/\text{L}$ 、油酸钠用量 $150 \text{ mg}/\text{L}$ 条件下,不同吸附时间下氟磷灰石和白云石表面油酸根离子的吸附量如图 6 所示,准一级动力学

方程、准二级动力学方程以及 Webber-Morris 动力学方程拟合结果分别如图 7~9 所示,拟合参数见表 1。

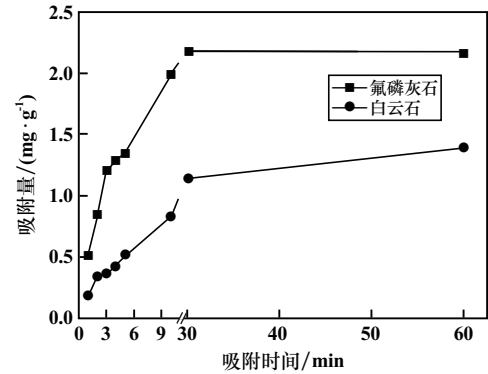
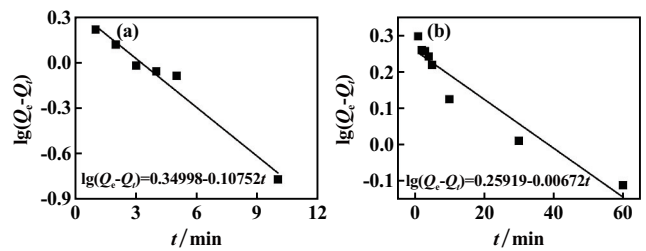
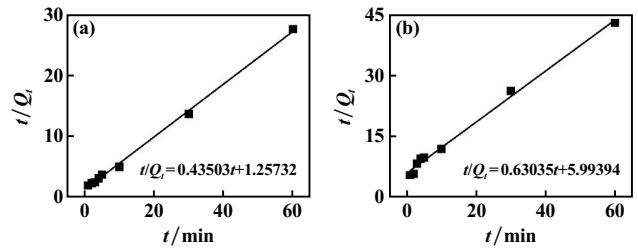


图6 不同吸附时间下矿物表面油酸根离子吸附量



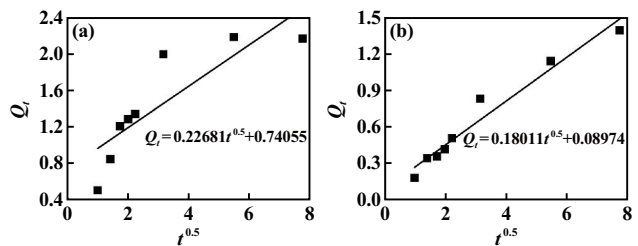
(a) 氟磷灰石; (b) 白云石

图7 准一级动力学方程拟合曲线



(a) 氟磷灰石; (b) 白云石

图8 准二级动力学方程拟合曲线



(a) 氟磷灰石; (b) 白云石

图9 Webber-Morris 动力学方程拟合曲线

由图 6 和表 1 可知,有抑制剂 HEDP 存在时,氟磷灰石和白云石的实测平衡吸附量分别为 $2.1660 \text{ mg}/\text{g}$ 和 $1.3926 \text{ mg}/\text{g}$,氟磷灰石和白云石准二级动力学方程拟合的相关系数分别为 0.9982 和 0.9936 ,计算所得平衡吸附量分别为 $2.2987 \text{ mg}/\text{g}$ 和 $1.5864 \text{ mg}/\text{g}$,由此

表 1 吸附动力学拟合参数

矿物名称	准一级动力学方程			准二级动力学方程			Webber-Morris 方程		
	Q_e	k_1	R^2	Q_e	k_2	R^2	C	K_p	R^2
氟磷灰石	2.238 6	0.247 6	0.973 6	2.298 7	0.150 5	0.998 2	0.740 6	0.226 8	0.733 4
白云石	1.816 3	0.015 5	0.925 4	1.586 4	0.066 3	0.993 6	0.089 7	0.180 1	0.958 6

可以推测,有抑制剂存在时,油酸根离子在氟磷灰石和白云石表面的吸附以化学吸附为主且为单分子层吸附。油酸根离子在氟磷灰石和白云石表面的吸附速率常数分别为 0.150 5 和 0.066 3,有 HEDP 存在时,油酸根离子在氟磷灰石表面的吸附速率大于在白云石表面的吸附速率。

3 吸附热力学研究

吸附等温线可以反映吸附的主要信息以及描述吸附质与吸附剂的相互作用^[8],可以通过吸附等温线的类型判断油酸根离子在氟磷灰石和白云石表面的吸附类型。有机药剂在矿物表面的吸附等温线主要有以下 3 种类型:

Linear 方程:

$$Q = Kc + b \quad (8)$$

Freundlich 方程^[9]:

$$Q = Kc^{\frac{1}{n}} \quad (9)$$

Langmuir 方程^[10]:

$$Q = \frac{Q_e c}{K + c} \quad (10)$$

式中 Q 为平衡浓度下的吸附量,mg/g; Q_e 为极限吸附量,mg/g; c 为平衡吸附浓度,mg/L; K 为平衡吸附系数; b, n 均为常数。

pH=4.86、HEDP 用量 80 mg/L 时,不同平衡浓度下油酸根离子在氟磷灰石和白云石表面的吸附量如图 10 所示,氟磷灰石和白云石 Linear 方程、Freundlich 方程和 Langmuir 方程拟合结果分别如图 11~13 所示,拟合参数见表 2。结果表明,油酸根离子在氟磷灰石以及白云石表面的吸附更接近 Langmuir 方程。Langmuir 方程认为吸附剂在吸附质表面为单分子层吸附,每个吸附位点只允许被一个吸附分子占据并相互独立^[10],因此油酸根离子在氟磷灰石表面的吸附可能为单分子层吸附。氟磷灰石和白云石表面具有一定数量的金属活性位点作为吸附中心,每个吸附中心不会吸附两个及以上的油酸根离子,且油酸根离子在氟磷灰石和白云石表面的吸附呈现吸附、脱附的动态平衡状态。与氟磷灰石相比,白云石 Langmuir 方程拟合的相关系数

较小,可能的原因是白云石表面有 Ca 位点和 Mg 位点作为吸附中心且不具有相等的吸附能。总体而言,Langmuir 方程可以在一定程度上解释在酸性以及 HEDP 存在条件下油酸根离子在氟磷灰石和白云石表面的吸附机理。

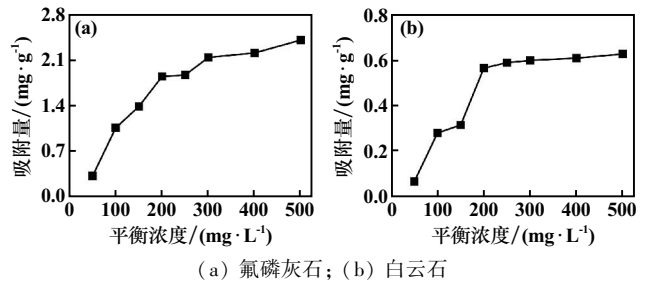


图 10 不同平衡浓度下矿物表面油酸根离子吸附量

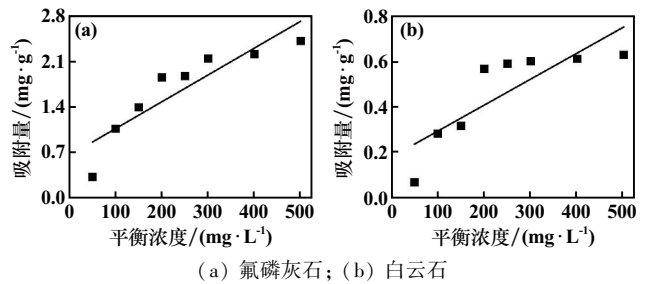


图 11 Linear 方程拟合结果

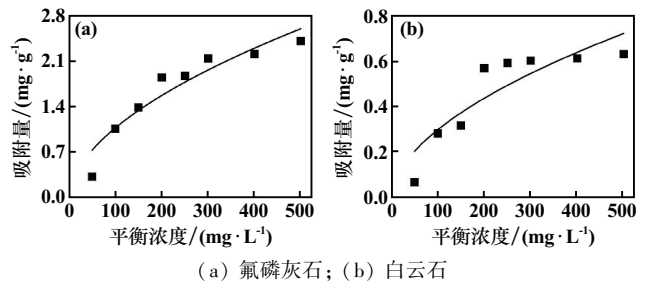


图 12 Freundlich 方程拟合结果

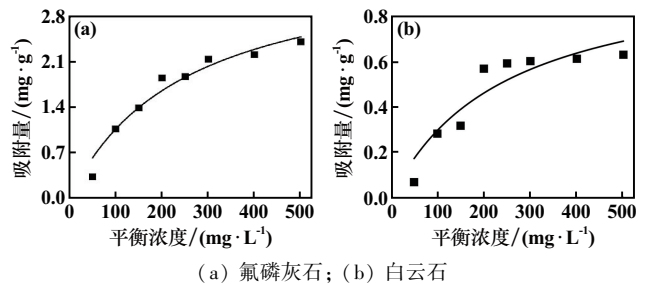


图 13 Langmuir 方程拟合结果

表2 吸附等温线拟合相关参数

矿物名称	Linear 方程			Freundlich 方程			Langmuir 方程		
	b	K	R^2	n	K	R^2	Q_e	K	R^2
氟磷灰石	0.656 1	0.004 1	0.811 1	1.830 6	0.087 0	0.901 9	3.724 7	250.425 6	0.956 0
白云石	0.180 4	0.001 1	0.697 3	1.836 6	0.024 5	0.801 2	1.028 1	245.405 1	0.873 8

4 矿物表面吸附密度研究

4.1 氟磷灰石和白云石比表面积分析

氟磷灰石和白云石 N_2 吸附脱附曲线如图 14 所示,孔径分布如图 15 所示。 N_2 吸附、脱附等温线类型均符合 IUPAC 分类中的 III 型^[11]。氟磷灰石和白云石 BET 比表面积分别为 $9.177 1 \text{ m}^2/\text{g}$ 和 $1.015 6 \text{ m}^2/\text{g}$, 吸附平均孔径分别为 $12.701 7 \text{ nm}$ 和 $22.078 1 \text{ nm}$, 氟磷灰石平均孔径明显小于白云石平均孔径。可知氟磷灰石和白云石都具有孔径结构,且孔径结构对比表面积的影响较大,氟磷灰石具有较小的孔径,较为致密,而白云石孔径较大。药剂在矿浆中与矿物发生作用时,孔径也会影响药剂在矿物表面的吸附。

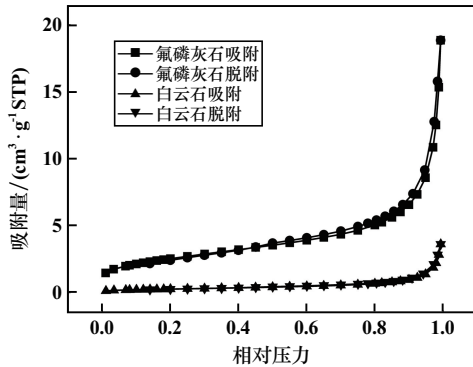
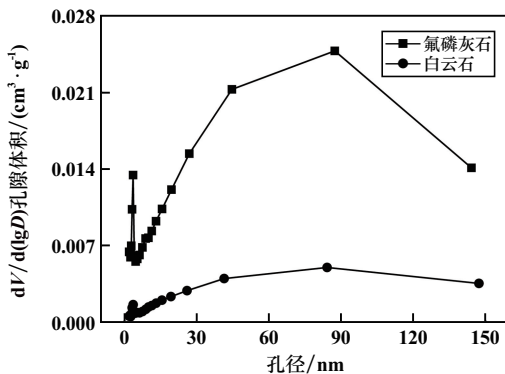
图 14 氟磷灰石和白云石 N_2 吸附脱附等温线

图 15 氟磷灰石和白云石孔径分布

4.2 矿物表面油酸根离子吸附密度分析

$\text{pH}=4.86$ 、HEDP 用量 80 mg/L 时,不同吸附时间下油酸根离子在矿物表面的吸附密度如图 16 所示。结果表明,白云石具有较低的比表面积,油酸根离子在

白云石表面的吸附密度大于在氟磷灰石表面的吸附密度;吸附的前 10 min,油酸根离子在矿物表面的吸附密度随时间增大而增大,特别是白云石;10 min 以后,氟磷灰石表面油酸根离子吸附密度基本趋于平衡,白云石表面油酸根离子吸附仍处于上升趋势,且上升幅度较大。表明白云石表面更易吸附油酸根离子,在相同的比表面积内,白云石表面吸附的油酸根离子高于在氟磷灰石表面吸附的油酸根离子。在试验条件下,油酸根离子在白云石表面的吸附量远大于在氟磷灰石表面的吸附量,因此酸性条件下抑制剂 HEDP 可以实现对氟磷灰石和白云石的选择性分离。

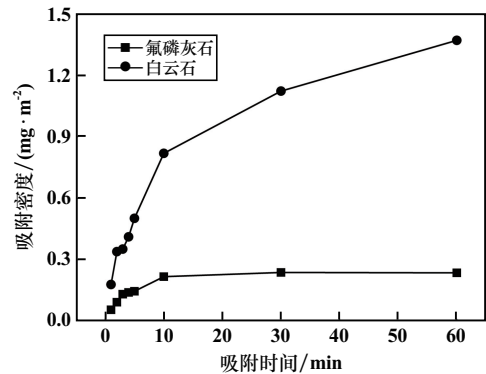


图 16 不同吸附时间下矿物表面吸附密度

$\text{pH}=4.86$ 、HEDP 用量 80 mg/L 时,不同平衡浓度条件下油酸根离子在矿物表面的吸附密度如图 17 所示。随着平衡浓度升高,氟磷灰石和白云石表面油酸根离子吸附密度升高,且油酸根离子在白云石表面的吸附密度上升趋势更明显。平衡浓度 200 mg/L 时氟磷灰石和白云石表面吸附密度趋于平衡,因此在浮选

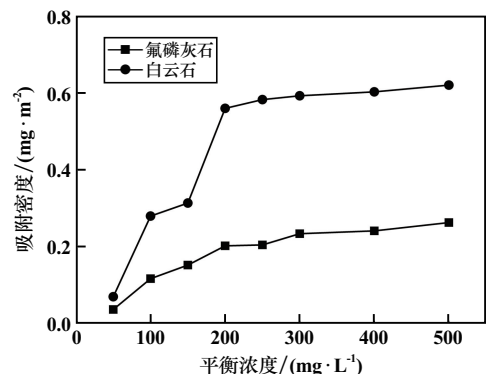


图 17 不同平衡浓度下油酸根离子在氟磷灰石和白云石表面的吸附密度

过程中,考虑到经济成本以及较优的吸附密度差值,油酸根离子适合用量为 200 mg/L。

5 分子动力学研究

比表面积是颗粒所有能够接触空气的表面积之和,是外部表面积和内部开孔的表面积之和。氟磷灰石和白云石具有一定的开孔结构,油酸根离子在溶液中可能吸附在矿物的磷灰石(001)面和白云石(104)面上,也有可能吸附在矿物的孔径内部。使用分子动力学对油酸根离子在氟磷灰石和白云石孔径内以及氟磷灰石(001)面和白云石(104)面的吸附等温线进行研究。

5.1 孔径内吸附等温线

油酸根离子在氟磷灰石及白云石孔径内的吸附平均载量如图 18~19 所示,Linear 方程、Freundlich 方程和 Langmuir 方程拟合结果分别如图 20~21 所示,拟合参数见表 3。氟磷灰石 Linear、Freundlich 和 Langmuir 吸附等温线拟合相关系数分别为 0.459 4、0.779 3 和 0.971 3,白云石 Linear、Freundlich 和 Langmuir 吸附等温线拟合相关系数分别为 0.697 3、0.849 2 和 0.968 0。油酸根离子在氟磷灰石以及白云石表面的吸附更接近 Langmuir 方程,油酸根离子在矿物孔径内的吸附可能为单分子层吸附,孔径内每个吸附中心不会吸附两个

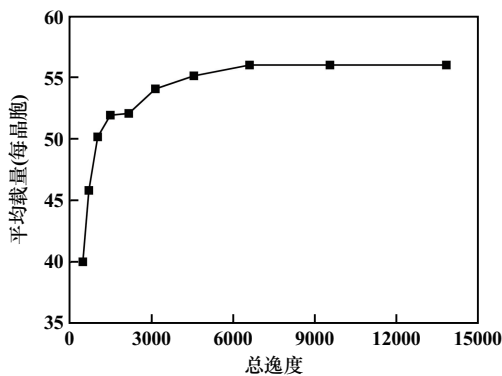


图 18 油酸根离子在氟磷灰石孔径内的吸附平均载量

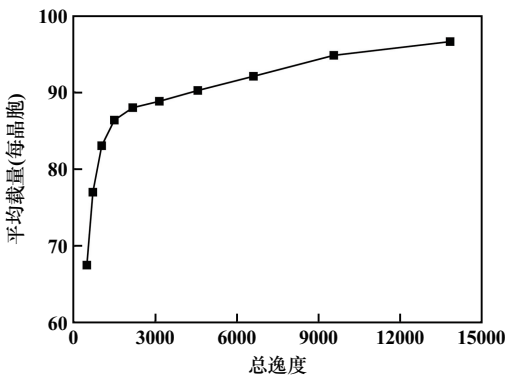
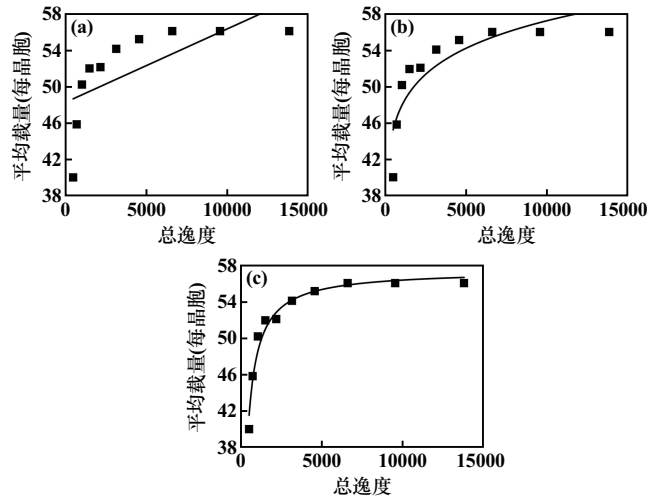
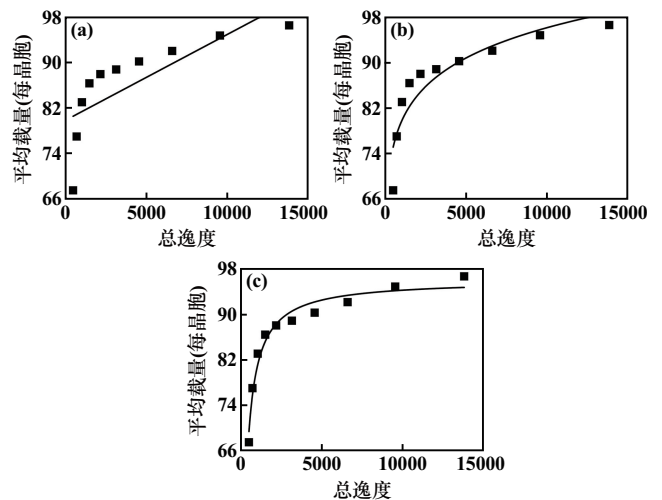


图 19 油酸根离子在白云石孔径内的吸附平均载量



(a) Linear 方程; (b) Freundlich 方程; (c) Langmuir 方程

图 20 油酸根离子在氟磷灰石孔径内的吸附等温线拟合结果



(a) Linear 方程; (b) Freundlich 方程; (c) Langmuir 方程

图 21 油酸根离子在白云石孔径内的吸附等温线拟合结果

及以上的油酸根离子,油酸根离子在矿物孔径内的吸附呈现吸附、脱附的动态平衡状态。

5.2 氟磷灰石(001)面和白云石(104)面吸附等温线

氟磷灰石(001)面和白云石(104)面吸附平均载量分别如图 22~23 所示,对应的 Linear、Freundlich、Langmuir 吸附等温线拟合结果如图 24~25 所示,拟合参数见表 4。氟磷灰石(001)面 Linear、Freundlich、Langmuir 方程拟合相关系数分别为 0.458 3、0.781 3 和 0.965 2,白云石(104)面 Linear、Freundlich 和 Langmuir 方程拟合相关系数分别为 0.411 7、0.775 8 和 0.956 5。油酸根离子在氟磷灰石和白云石表面的吸附与 Langmuir 方程接近,表明油酸根离子在氟磷灰石(001)面和白云石(104)面的吸附与在氟磷灰石和白云石孔径内的吸附特点一致。

表3 油酸根离子在氟磷灰石和白云石孔径内的吸附等温线拟合相关参数

矿物名称	Linear 方程			Freundlich 方程			Langmuir 方程		
	b	K	R^2	n	K	R^2	Q_e	K	R^2
氟磷灰石	48.220 1	$8.019 5 \times 10^{-4}$	0.459 4	12.755 3	27.806 3	0.779 3	57.399 8	190.305 5	0.971 3
白云石	79.798 9	$4.788 0 \times 10^{-4}$	0.697 3	12.157 4	45.048 7	0.849 2	95.927 6	191.120 3	0.968 0

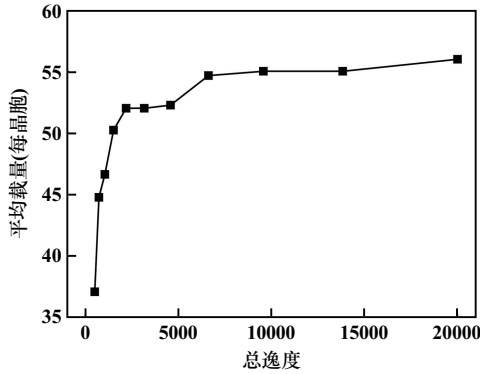


图22 氟磷灰石(001)面吸附平均载量

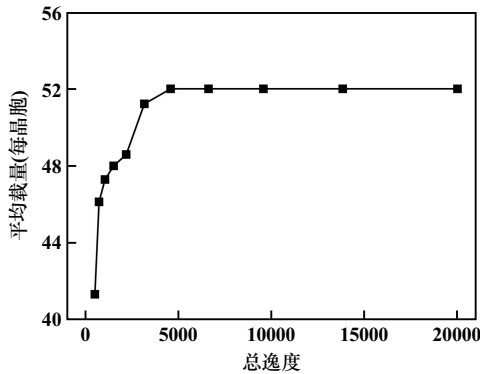
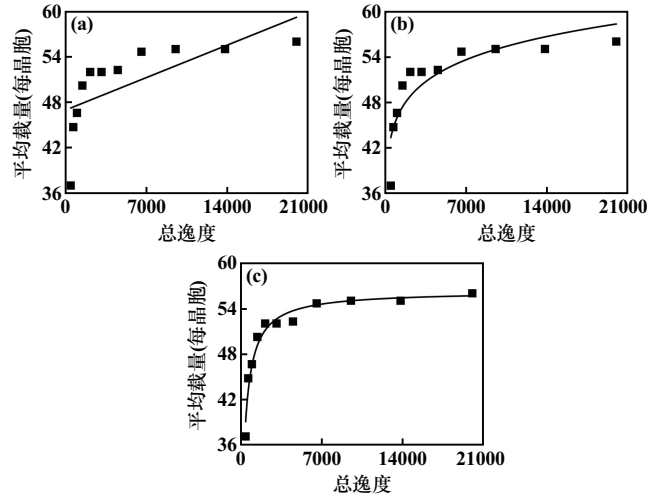


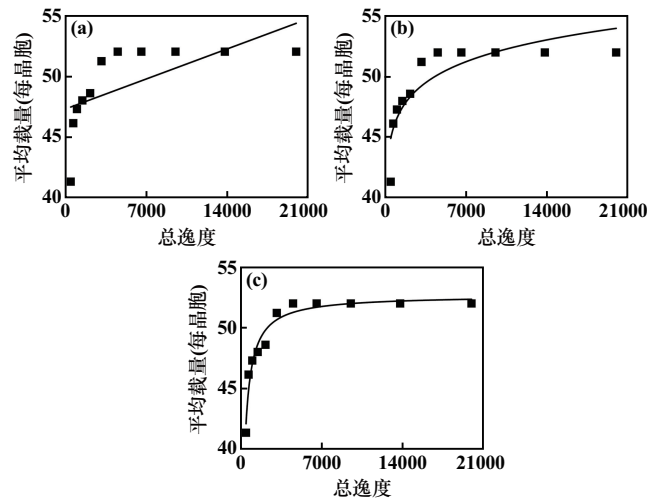
图23 白云石(104)面吸附平均载量

油酸根离子在孔径内吸附时,虽然可以改变矿物疏水性,但在气泡矿化过程中,矿物孔径所占比例较小,而比表面积较大会导致较多的药剂分子被吸附在矿物孔径内,对矿物整体表面润湿性改变不大,反而对气泡矿化造成不利影响,且药剂用量会相对增加。



(a) Linear 方程; (b) Freundlich 方程; (c) Langmuir 方程

图24 油酸根离子在氟磷灰石(001)面的吸附等温线拟合结果



(a) Linear 方程; (b) Freundlich 方程; (c) Langmuir 方程

图25 油酸根离子在白云石(104)面的吸附等温线拟合结果

表4 油酸根离子在氟磷灰石(001)面和白云石(104)面的吸附等温线拟合相关参数

矿物名称	Linear 方程			Freundlich 方程			Langmuir 方程		
	b	K	R^2	n	K	R^2	Q_e	K	R^2
氟磷灰石	46.982 7	$6.095 5 \times 10^{-4}$	0.458 3	12.536 6	26.449 2	0.781 3	56.263 8	219.956 5	0.965 2
白云石	47.283 7	$3.523 4 \times 10^{-4}$	0.411 7	20.031 0	32.931 7	0.775 8	52.677 9	125.884 7	0.956 5

6 结 论

1) 使用 HEDP 为抑制剂时,油酸根离子在氟磷灰石和白云石表面的吸附符合准二级动力学模型;油酸根离子在氟磷灰石和白云石表面的吸附以化学吸附为

主且为单分子层吸附;油酸根离子在氟磷灰石表面的吸附速率大于在白云石表面的吸附速率。

2) 使用 HEDP 为抑制剂时,油酸根离子在氟磷灰石以及白云石表面的吸附接近 Langmuir 方程;油酸根离子在氟磷灰石表面的吸附为单分子层吸附,氟磷灰

石和白云石表面具有一定数量的金属活性位点作为吸附中心,每个吸附中心不会吸附两个及以上的油酸根离子,油酸根离子在氟磷灰石和白云石表面的吸附呈现吸附、脱附的动态平衡状态。

3) 白云石表面更易吸附油酸根离子,比表面积相同时,油酸根离子在白云石表面的吸附量高于在氟磷灰石表面的吸附量,单位表面积内,白云石表面比氟磷灰石具有更多的活性位点。

参考文献:

- [1] LI E, LIANG H, DU Z, et al. Adsorption process of octadecylamine hydrochloride on KCl crystal surface in various salt saturated solutions: kinetics, isotherm model and thermodynamics properties[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2016,221:949-953.
- [2] Nuri O S, Irannajad M, Mehdilo A. Reagent adsorption on modified mineral surfaces: isotherm, kinetic and thermodynamic aspects[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2019,291:111311.
- [3] 曾红久. 低阶煤浮选研究现状与展望[J]. *选煤技术*, 2022,50(5):7-13.
- [4] Lagergren S. About the theory of so-called adsorption of soluble substances[J]. *Sven Vetenskapsakad Handlingar*, 1898,24:1-39.

(上接第59页)

中矿再选后的尾矿+20 μm 粒级铜品位 14.24%,存在部分单质铜。

3) 综合中矿再选后进行分级可减少细泥对浮选指标的影响,铜品位提升至 20.59%,铜精矿回收率 91.75%,综合尾矿铜品位降至 0.26%,获得了良好的技术指标。中矿再选-分级流程可为同类铜冶炼渣选矿提供参考。

参考文献:

- [1] 周松林. 铜冶炼渣选矿[M]. 北京:冶金工业出版社, 2014.
- [2] 舒敏,刘昆,彭康,等. 浅析我国铜冶炼渣资源化利用标准

- [5] HO Y S, MCKAY G. Pseudo-second order model for sorption processes[J]. *Process Biochemistry*, 1999,34(5):451-465.
- [6] Blanchard G, Maunay M, Martin G. Removal of heavy metals from waters by means of natural zeolites[J]. *Water Research*, 1984,18(12):1501-1507.
- [7] Kumar K V, Porkodi K. Mass transfer, kinetics and equilibrium studies for the biosorption of methylene blue using *Paspalum notatum*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007,146(1-2):214-226.
- [8] Rangabhashiyam S, Balasubramanian P. Adsorption behaviors of hazardous methylene blue and hexavalent chromium on novel materials derived from *Pterospermum acerifolium* shells[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2018,254:433-445.
- [9] Freundlich H, Heller W. The adsorption of cis-and trans-azobenzene[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1939,61(8):2228-2230.
- [10] Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1918,40(9):1361-1403.
- [11] SING K S. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984)[J]. *Pure and Applied Chemistry*, 1985,57(4):603-619.

引用本文:张景奇,张章,卯松. 油酸根离子在氟磷灰石和白云石表面吸附动力学与吸附热力学研究[J]. *矿冶工程*, 2024,44(1):60-67.

化现状[J]. *中国标准化*, 2020(8):177-180.

- [3] 中国大宗工业固体废物综合利用产业发展报告编写组. 中国大宗工业固体废物综合利用产业发展报告(2021—2022年度)[M]. 北京:工业固废网,中循环新科环保科技(北京)有限公司, 2022.
- [4] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2022.
- [5] 董莎. QN公司有色金属冶炼废渣的营销渠道优化研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2015.
- [6] 罗仁昆,吴星琳,王俊娥,等. 铜渣高温浮选药剂遴选与药剂制度优化研究[J]. *矿冶工程*, 2021,41(1):33-36.

引用本文:吴海祥,吴维新,岳涛,等. 某铜冶炼渣浮选回收铜工艺试验研究[J]. *矿冶工程*, 2024,44(1):57-59.