

水杨羟肟酸在钛铁矿表面的吸附特性研究

刘明宝^{1,2}, 鱼博^{1,2}, 强旭旭^{1,2}, 樊兴^{1,2}, 魏锐^{1,2}

(1. 陕西省尾矿资源综合利用重点实验室, 陕西 商洛 726000;

2. 商洛学院 化学工程与现代材料学院, 陕西 商洛 726000)

摘要: 目的 从药剂吸附热力学和动力学角度揭示水杨羟肟酸在钛铁矿表面的作用特性。方法 采用水浴振荡法, 通过改变矿浆 pH、药剂浓度、矿浆温度并结合紫外-可见分光光度法, 总结药剂在矿物表面的吸附规律。应用准一级、准二级及粒子扩散模型探索药剂吸附动力学特性, 利用 Langmuir、Freunlich 模型和平均吸附能公式分析药剂吸附的热力学行为。结果 水杨羟肟酸离子在钛铁矿表面的吸附动力学符合准一级动力学方程。酸性及中性条件下, 水杨羟肟酸离子在矿物表膜中的扩散是吸附过程的控制性步骤; 而碱性条件下, 矿物表面活性质点在矿物表膜中的扩散则是吸附过程的控制性步骤。低温下, 药剂吸附符合 Freunlich 模型; 温度升高时, 吸附等温线遵守 Langmuir 单分子层吸附模型。吸附过程的 ΔG^\square 随温度上升而降低, 但随药剂浓度的增加而增加。平均吸附能结果表明, 药剂在温度低时属于离子交换吸附模式, 但在温度升高时属于化学反应吸附模式。结论 水杨羟肟酸在钛铁矿表面的吸附规律受矿浆温度、pH 及药剂浓度的影响较大, 在生产实践中可通过改变上述条件来优化钛铁矿的浮选指标。

关键词: 钛铁矿; 水杨羟肟酸; 表面吸附; 吸附热力学; 吸附动力学

中图分类号: O647.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2018)04-0236-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.04.035

Adsorption Characteristics of Salicylhydroxamic Acid (SHA) on Ilmenite

LIU Ming-bao^{1,2}, YU Bo^{1,2}, QIANG Xu-xu^{1,2}, FAN Xing^{1,2}, WEI Rui^{1,2}

(1. Shaanxi Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Tailings Resources, Shangluo 726000, China;

2. School of Chemical Engineering and Modern Material, Shangluo University, Shangluo 726000, China)

ABSTRACT: The work aims to reveal the adsorption characteristics of salicylhydroxamic acid (SHA) on ilmenite surface in terms of thermodynamic and kinetic properties in the adsorption process. The adsorption rule of reagent was summarized with water bath shaking method and ultraviolet-visible spectrophotometry by changing slurry pH, temperature and reagent concentration. Pseudo-first order model, pseudo-second order model and diffusion model were adopted to explore the kinetics of reagent adsorption. The reagent adsorption thermodynamics were analyzed by Langmuir, Freunlich and Mean-adsorption-energy. The absorption kinetics of SHA ions on ilmenite was in conformity with pseudo-first-order kinetic equation. The diffusion of SHA ions on mineral surface film was the control step in acidic and neutral conditions, while in alkaline condition, the diffusion of active particles of mineral surface on mineral film was the control step during absorption process. Reagent absorption accorded with Freunlich model at low temperature. As the temperature increased, the adsorption isotherm was in conformity with absorp-

收稿日期: 2017-09-19; 修订日期: 2018-03-15

Received: 2017-09-19; Revised: 2018-03-15

基金项目: 陕西省自然科学基金 (2016JQ5059); 陕西省教育厅重点科研项目 (16JS030)

Fund: Shaanxi Natural Science Foundation(2016JQ5059); Key Research Project of Education Department of Shaanxi (16JS030)

作者简介: 刘明宝 (1982—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为共生伴生矿浮选分离技术及理论。

Biography: LIU Ming-bao (1982—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: flotation separation technology and theory of associated ores.

tion model of Langmuir monomolecular layer. ΔG^\ominus during absorption decreased as the temperature increased, but increased as the reagent concentration improved. The reagent was proved to be ion-exchange absorption model at low temperature by mean adsorption energy but was chemical reaction adsorption model at high temperature. The adsorption rule of SHA on ilmenite surface was influenced greatly by the slurry pH、temperature and reagent concentration. The flotation index of ilmenite can be optimized by changing the conditions mentioned above in mill practice.

KEY WORDS: ilmenite; salicylhydroxamic acid; surface adsorption; absorption thermodynamics; absorption kinetics

钛被誉为“21 世纪金属”，其主要来源为钛铁矿和金红石，其中钛铁矿中 TiO_2 储量占全国 TiO_2 总储量的 95% 以上。近年来，随着优质钛铁矿资源的减少，细粒嵌布的钛铁矿资源在入选原料中所占的比重越来越大。钛铁矿选矿生产实践表明，重选、磁选、电选等常规物理选矿法对细粒钛铁矿的选别效率较低，而浮选工艺是回收细粒钛铁矿最具发展前景的工艺^[1-3]。从浮选工艺的发展史来看，浮选工艺的进步往往离不开新型浮选药剂的开发及其作用机理研究的突破，因此，浮选药剂的选择及其作用机理研究已经成为细粒钛铁矿浮选工业中的研究热点之一^[4-5]。

目前常用的细粒钛铁矿捕收剂主要有脂肪酸类、肟酸类等，但脂肪酸类捕收剂存在选择性较差及浮选流程长的弱点，而肟酸类药剂虽浮选性能较好，但具有一定的毒性，上述不足在一定程度上影响了细粒钛铁矿浮选指标的提高^[6]。因此，近年来选择性较好且毒性较低的羟基膦酸类及羟肟酸类螯合捕收剂的合成及研究，已经成为了细粒钛铁矿浮选药剂研究的主要方向之一^[7]。羟肟酸类捕收剂具有“酰胺”和“肟”的双重性质（图 1），这使该类药剂可以以 O·O 配位模式与金属矿物表面晶格中的铁离子或者钛离子螯合，从而让该类药剂具有良好的选择性和捕收能力^[8-9]。图 2 为属于三方晶系的钛铁矿在不同方向上的晶胞视图，可看出晶胞中的铁原子和钛原子大多处在晶胞边界上。因此，当钛铁矿在磨矿过程中解离后，断裂面上会暴露出一定数量的铁离子和钛离子，由此矿浆中的水杨羟肟酸离子便可与钛铁矿表面的铁离子和钛离子相互作用而吸附在钛铁矿表面^[10-11]。

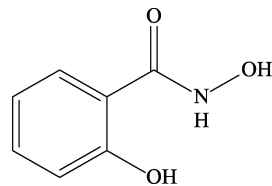
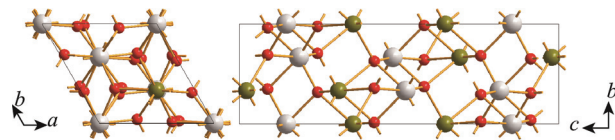


图 1 水杨羟肟酸分子结构
Fig.1 Molecular structure of salicylhydroxamic acid

在羟肟酸类捕收剂与钛铁矿表面作用机理的研究方面，目前选矿工作者多从捕收剂和矿物组成离子

的溶液化学特性和药剂与矿物作用前后红外光谱的变化规律方面着手，尚未发现有从二者相互作用的界面热力学与动力学角度揭示药剂作用机理的报道^[11-14]。因此，本文以钛铁矿单矿物与水杨羟肟酸作用的热力学和动力学特性为切入点，对二者的相互作用进行系统的基础理论研究，以期从热化学角度揭示水杨羟肟酸在钛铁矿表面的吸附行为，为细粒级嵌布的钛铁矿浮选机理的研究提供一定的理论支持。



Notes: green ball represents Ti atom, white ball is Fe atom and red ball is O atom
图 2 钛铁矿晶胞结构
Fig.2 Cell structure of ilmenite

1 试验原料、仪器及试验方法

1.1 试验原料

钛铁矿纯矿物取自海南岛万宁市，矿样纯度大于 96%，XRD 和 XRF 分析分别如图 3 和表 1 所示。

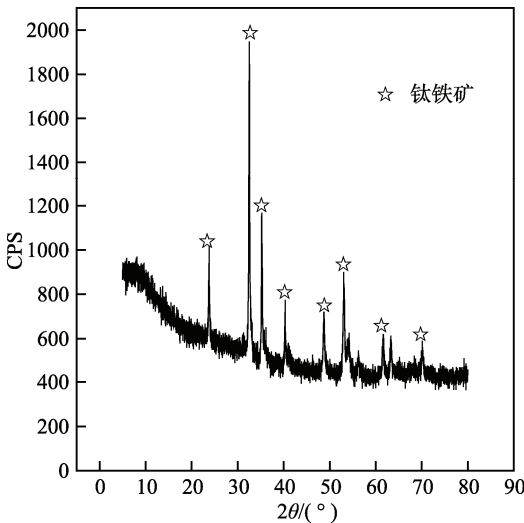


图 3 钛铁矿矿样 XRD 图
Fig.3 XRD pattern of ilmenite

表 1 钛铁矿矿样化学成分表
Tab.1 Chemical analysis of ilmenite

成分	TiO ₂	MgO	SiO ₂	FeO	Nb ₂ O ₅	V ₂ O ₅	SnO ₂	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	P	S
含量/%	51.23	4.31	0.07	40.6	0.45	0.41	0.26	0.06	0.21	0.11	0.06
成分	MnO ₂	W ₂ O ₃	Bi	CuO	NiO	Pd	ZnO	U	Pt	其他	
含量/%	0.04	0.04	0.02	0.02	0.07	0.004	0.003	0.003	0.023	2.0	

1.2 主要仪器及试剂

试验所用仪器主要为 SHA 型水浴振荡器和 Agilent5000 紫外-可见分光光度计。所用试剂主要有氢氧化钠、盐酸、水杨羟肟酸, 纯度均为分析纯。

1.3 试验方法

1.3.1 吸附动力学研究

首先在一系列 50 mL 锥形瓶中分别加入粒度为 $-37\ \mu\text{m}$ 的钛铁矿矿样 2 g, 然后再加入 20 mL 已调整到不同 pH 值的水杨羟肟酸溶液(固定物质的量浓度), 振荡不同时间后过滤, 过滤液再进行离心处理, 最后将离心后的上清液用 Agilent5000 紫外-可见分光光度计测定药剂浓度, 根据初始浓度与剩余浓度的差值计算不同 pH 值下振荡时间与药剂吸附量的关系。

1.3.2 吸附热力学研究

首先在一系列 50 mL 锥形瓶中分别加入粒度为 $-37\ \mu\text{m}$ 的钛铁矿矿样 2 g, 然后在不同温度下加入 20 mL 已调整到不同物质的量浓度的水杨羟肟酸溶液(固定 pH 值), 振荡 1 h 后过滤, 滤液再进行离心处理, 最后将离心后的上清液用 Agilent5000 紫外-可见分光光度计测定药剂浓度, 根据初始浓度与剩余浓度的差值分别计算不同温度时吸附量与药剂浓度的关系。

2 结果与讨论

2.1 吸附动力学试验

2.1.1 测试结果

pH 值对水杨羟肟酸及钛铁矿表面铁离子和钛离子的水解形式有重要影响, 因此, 矿浆酸碱度的变化不可避免地会影响水杨羟肟酸在矿物表面的吸附行为。不同矿浆 pH 值下, 水杨羟肟酸吸附量随时间的变化如图 4 所示。

由图 4 可看出, 不同 pH 下, 吸附量随搅拌时间的变化趋势基本一致, 均呈现出随搅拌时间的延长而逐渐增加的特性。不同 pH 下的动力学试验均表明, 当搅拌时间在 30 min 以上时, 吸附达到平衡。由不同 pH 下的平衡吸附量可看出, 矿浆为中性时的水杨羟肟酸在钛铁矿表面的平衡吸附量最大。

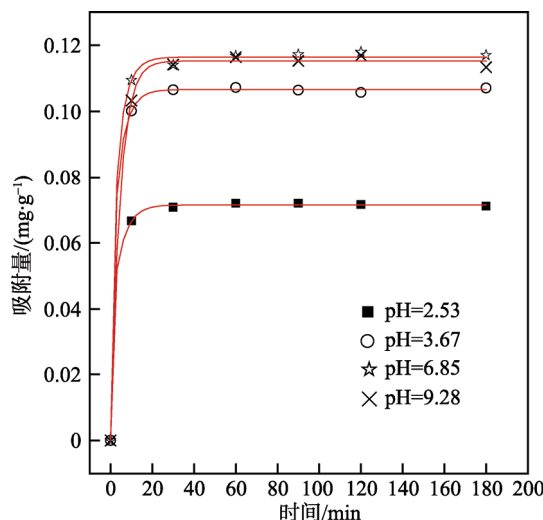


图 4 时间和 pH 对吸附量的影响

Fig.4 Influences of time and pH on adsorption amount

2.1.2 动力学模型拟合

目前动力学中用来描述吸附过程动力学方程的模型主要有准一级动力学模型和准二级动力学模型两种^[15]。准一级动力学方程见式(1), 准二级动力学方程见式(2)。

$$\lg(q_m - q_t) = \lg q_m - k_1 t / 2.303 \quad (1)$$

$$t / q_t = 1 / (k_2 q_m^2) + t / q_m \quad (2)$$

式中: k_1 为一级吸附速率常数 (min^{-1}); k_2 为二级吸附速率常数 ($\text{g}/(\text{min} \cdot \text{mg})$); q_t 为 t 时刻的吸附量 (mg/g); q_m 为平衡吸附量 (mg/g)。不同 pH 值下动力学模型拟合曲线和相关参数如图 5 和表 2 所示。

由图 5 和表 2 结果可以看出, 准一级动力学模型能更好地拟合水杨羟肟酸在钛铁矿表面的吸附动力学行为。由模型拟合所得的理论饱和和吸附量与试验值也更接近, 中性及弱碱性条件下的吸附动力学常数拟合数据要大于酸性条件下的。

2.1.3 扩散模型

浮选过程中水杨羟肟酸离子在矿物表面的吸附主要有两个控制步骤^[16], 一是钛铁矿表面活性质点离子在矿物表膜内的扩散(见(3)式), 二是水杨羟肟酸离子通过表面水化层在矿物表膜中的扩散(见(4)式)。

$$K_d t = -\ln(1 - R) \quad (3)$$

$$A t = -\ln(1 - R) - 0.4977 \quad (4)$$

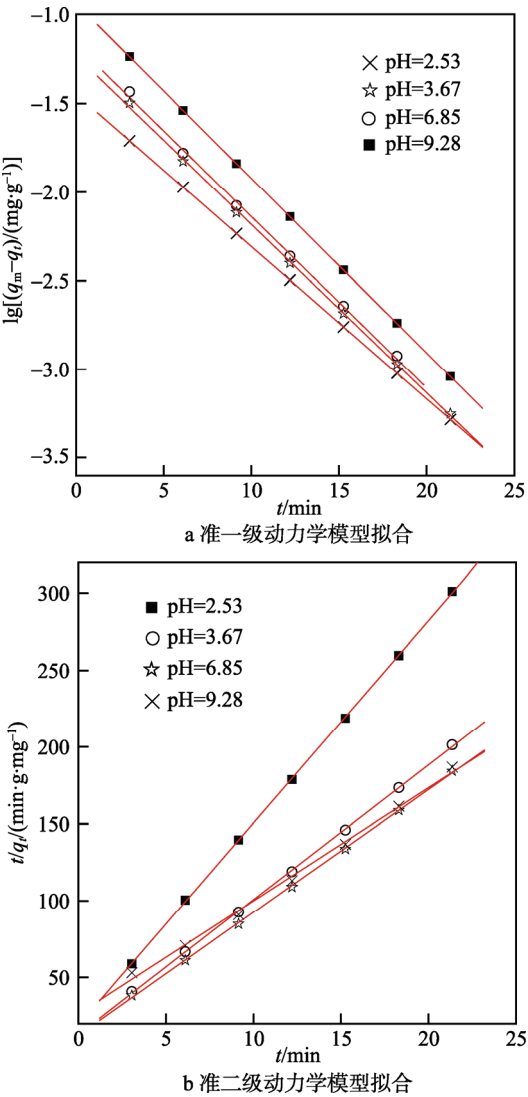


图5 动力学拟合曲线

Fig.5 Kinetic fitting curves: a) curves fitted by pseudo-first order model, b) curves fitted by pseudo-second order model

表 2 水杨羟肟酸吸附动力学参数
Tab.2 Kinetic parameters of SHA adsorption on TiO₂

pH	准一级动力学模型			准二级动力学模型		
	$k_1/$ min^{-1}	$q_1/$ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	r^2	$k_2/$ $(\text{g}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{mg}^{-1})$	$q_2/$ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	r^2
2.53	0.20	0.04	0.9997	9.20	0.08	0.9989
3.6	0.22	0.06	0.9998	5.94	0.11	0.9899
6.85	0.22	0.07	0.9997	5.16	0.13	0.9978
9.28	0.23	0.11	0.9998	2.06	0.14	0.9962

式中： $R = q_t / q_e$ ， q_t 、 q_e 分别为 t 时刻的吸附容量和平衡吸附容量 (mg/g)； K_d 、 A 分别为不同扩散过程中的速率常数。

上述的两种扩散所涉及的界面化学变化对浮选指标改善有重要影响，通过药剂吸附过程中扩散步骤的确定，便可采取有针对性的措施提高浮选过程工艺指标。为了确定浮选动力学的控制步骤。将图 2 中的

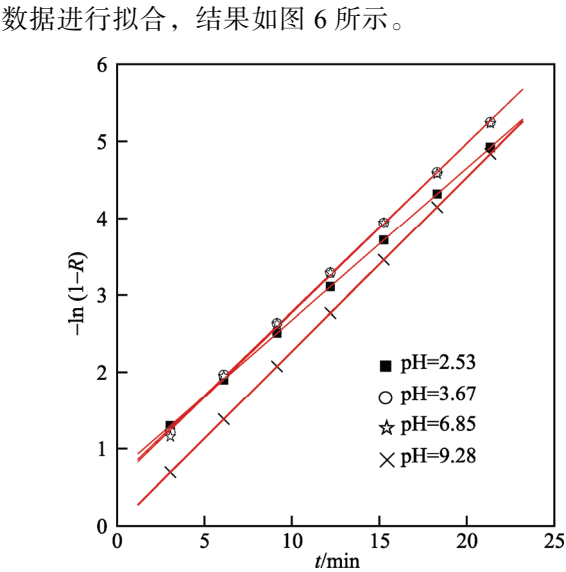


Fig.6 Fitted curves of diffusion process

由图 6 可知，pH 值对药剂及矿物表面活性质点的扩散过程影响较大。当 pH 值位于酸性及中性条件下时，拟合曲线的截距在 0.4977 左右，表明此时水杨羟肟酸离子在矿物表膜中的扩散是吸附过程的控制性步骤。这可能是因为钛铁矿属于离子型化合物且分子体积较大，分子内不同离子之间靠离子键结合，结合力较薄弱。另外，矿物表面活性质点离子在水溶液中的水化能也较大。上述两个原因导致钛铁矿在水溶液中的溶解度较大，从而造成矿物表面活性质点离子的扩散速度大于水杨羟肟酸离子的扩散速度，即水杨羟肟酸离子的扩散成为了吸附过程的控制性步骤。当 pH 值位于碱性条件下时，拟合曲线通过原点，表明此时矿物表面活性质点离子的扩散成为了吸附过程的控制性步骤，这可能是在碱性条件下，矿物表面活性质点离子均生成了相应的氢氧化物沉淀，导致矿物表面变得致密，活性质点离子的扩散受到阻碍所致。

2.2 吸附热力学试验

2.2.1 测试结果

振荡时间为 1 h、pH 值为 6.85，不同温度下吸附平衡后钛铁矿表面药剂吸附量与药剂初始浓度之间的关系如图 7 所示。由图 7 可以看出，在试验范围内，钛铁矿表面药剂吸附量随温度的上升逐渐降低，但随初始浓度的增加呈现出逐渐递增的趋势。

2.2.2 吸附等温模型和吸附容量

Langmuir (式 (5)) 和 Freundlich (式 (6)) 模型分别是表征药剂在矿物表面单分子层及多分子层的吸附方程，根据拟合结果可进一步推断捕收剂在钛铁矿表面的吸附机理，试验分别采用这两种模型对图 7 所示的吸附曲线进行拟合，拟合曲线和参数分别如图 8 和表 3 所示。

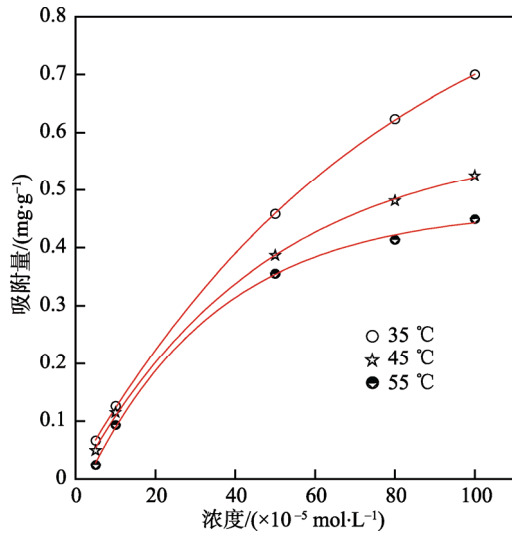


图 7 吸附量与初始浓度和温度的关系曲线
Fig.7 Adsorption amount-vs.-initial concentration at various temperatures

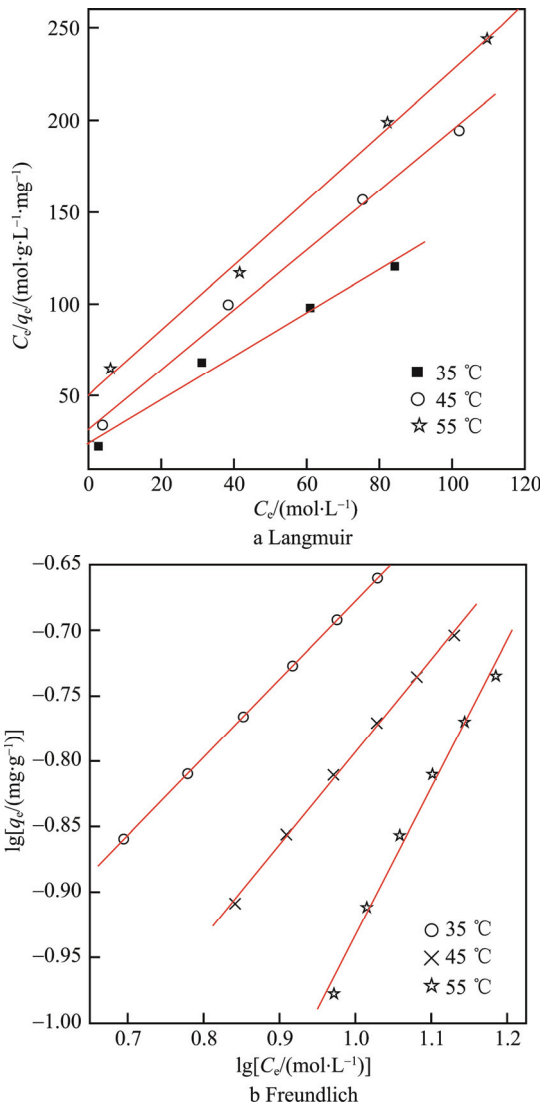


图 8 Langmuir 和 Freundlich 等温模型拟合曲线
Fig.8 Fitted curves of Langmuir (a) and Freundlich(b) models

表 3 Langmuir 和 Freundlich 等温模型拟合参数
Tab.3 Fitted parameters of Langmuir and Freundlich models

$t/^\circ\text{C}$	Langmuir			Freundlich		
	$q_m/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$b/(\text{L}\cdot\text{mg}^{-1})$	r^2	$K_F/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	n	r^2
35	0.84	0.05	0.992	0.06	0.51	0.999
45	0.61	0.05	0.998	0.05	0.48	0.995
55	0.56	0.04	0.998	0.03	0.56	0.983

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{bq_m} \quad (5)$$

$$\lg q_e = \lg K_F + \frac{1}{n} \lg C_e \quad (6)$$

式中： q_e 、 q_m 分别为平衡吸附量和饱和吸附量 (mg/g)； C_e 为吸附平衡后溶液中的药剂浓度 (mol/L)； b 为吸附平衡常数 (L/mg)； K_F 为吸附容量 (mg/g)； n 为吸附常数。

由拟合曲线的相关系数可知，在 35 $^\circ\text{C}$ 时，水杨羟肟酸在钛铁矿表面的吸附符合 Freundlich 吸附模型，说明捕收剂分子或离子在矿物表面发生了多层吸附。当温度升高时，分子热运动剧烈，在药剂表面发生物理吸附的药剂分子发生脱附，此时水杨羟肟酸在钛铁矿表面的吸附模型转变为 Langmuir 型，药剂在矿物表面的吸附为单层吸附。

2.2.3 吸附过程的热力学参数

图 5 所示的水杨羟肟酸在钛铁矿表面的吸附特性可通过吸附过程热力学参数的计算 (式(7)) 加以理解，吸附过程 ΔH^\square 、 ΔS^\square 、 ΔG^\square 的变化规律如表 4 所示。

$$\ln \frac{(C_0 - C_t)V}{\Gamma_t m} = \frac{-\Delta H^\square}{RT} + \frac{\Delta S^\square}{R} \quad (7)$$

式中： C_0 、 C_t 分别为药剂在溶液中的初始浓度和 t 时刻的浓度 (mol/L)； V 为矿浆体积 (L)； m 为矿样质量 (g)。

表 4 水杨羟肟酸吸附过程的表现热力学参数
Tab.4 Apparent thermodynamic parameters of SHA adsorption on ilmenite

$C_0/(\times 10^{-5} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1})$	$\Delta H^\square/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	$\Delta S^\square/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\Delta G^\square/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$		
			35 $^\circ\text{C}$	45 $^\circ\text{C}$	55 $^\circ\text{C}$
50	-2.990	0.030	-13.11	-13.44	-13.76
80	-2.327	0.032	-12.29	-12.61	-12.94
100	-2.330	0.030	-12.44	-12.77	-13.10

由表 4 可以看出，随矿浆温度的升高，水杨羟肟酸在钛铁矿表面吸附的 ΔG^\square 逐渐减小，表明同一药剂浓度下温度升高有利于吸附过程的进行。而在同一温度下，随药剂初始浓度的升高， ΔG^\square 有变大的趋势，其原因可能为随药剂浓度的提高，矿物表面活性质点的数目逐渐降低，从而造成吸附反应逐渐减弱。另外，

由 ΔH^\square 、 ΔS^\square 的变化可以看出, 该吸附过程为焓和熵共同推动过程。

2.2.4 平均吸附能

平均吸附能 E 是判断药剂跟矿物表面作用类型的重要指标^[17], 其表达式如下:

$$E = (-2K)^{-1/2} \quad (8)$$

式中的 K 值由 D-R 模型 (式(9)) 求得, 结果如图 9 所示。

$$\ln q_e = \ln q_m + K \varepsilon^2 \quad (9)$$

$$\varepsilon = RT \ln \frac{1}{1 + C_e} \quad (10)$$

式中: C_e 为吸附平衡后溶液中的药剂浓度 (mol/L)。

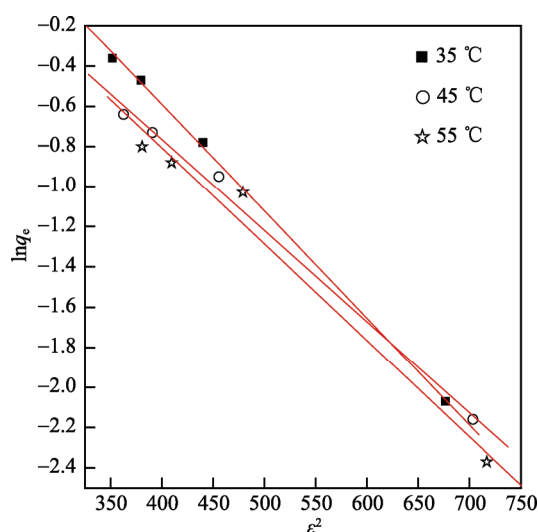


图 9 不同温度下 D-R 等温线

Fig.9 D-R adsorption isotherm at different temperature

由图 9 可以看出, 水杨羟肟酸在 35、45、55 °C 下的平均吸附能分别为 10.0、10.49、10.21 kJ/mol。由文献[17]可知, 水杨羟肟酸在本试验所研究的温度范围内以离子交换吸附模式为主, 据此可推断: 水杨羟肟酸可能是以与在钛铁矿表面吸附的水分子及氢氧根离子发生离子交换的模式吸附到矿物表面。

3 结论

1) 水杨羟肟酸在钛铁矿表面吸附 30 min 后达到平衡, 中性及弱碱性条件下的饱和吸附量大于其余 pH 值下的饱和吸附量。动力学模型拟合结果显示, 水杨羟肟酸在钛铁矿表面的吸附动力学符合准一级动力学模型。吸附过程扩散模型拟合结果显示, 中性及酸性条件下, 水杨羟肟酸离子在矿物表膜中的扩散是吸附过程中的控制性步骤, 而碱性条件下的决速步骤则转变为钛铁矿表面活性点离子在矿物表膜中的扩散。分析结果表明, pH 与矿物溶解度之间的匹

配关系对决速步骤的变化具有重要影响。

2) 等温吸附模型拟合结果显示: 35 °C 时, Freundlich 模型能很好地描述水杨羟肟酸在钛铁矿表面的吸附行为; 而在矿浆温度为 45、55 °C 时, 药剂在矿物表面吸附更符合 Langmuir 模型。吸附过程热力学参数随温度的升高而降低, 随浓度的增大而有增大趋势。水杨羟肟酸在钛铁矿表面的平均吸附能结果显示, 不同温度下的药剂吸附模式属于离子交换模式。

3) 采用水杨羟肟酸作为钛铁矿捕收剂时, 在中性及弱碱性条件下进行浮选并适当延长矿浆搅拌时间会在一定程度上提高选别指标, 而有条件的选厂则可同时采用对矿浆进行加温的措施来增加钛铁矿的回收率。

参考文献:

- [1] 陈名洁, 文书明, 胡天喜. 国内钛铁矿浮选研究的现状与进展[J]. 国外金属矿选矿, 2005, 42(7): 17-19.
CHEN Ming-jie, WEN Shu-ming, HU Tian-xi. Flotation Actuality and Progress of Domestic Ilmenite[J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 2005, 42(7): 17-19.
- [2] 杨晶. 钛铁矿浮选捕收剂的研究及应用状况浅述[J]. 云南冶金, 2010, 39(1): 26-29.
YANG Jing. Research and Application Status of Ilmenite Flotation Collector[J]. Yunnan Metallurgy, 2010, 39(1): 26-29.
- [3] 李振乾, 邹定朝. 磁-浮联合工艺回收某钒钛磁铁矿石中钛铁矿试验[J]. 金属矿山, 2017(1): 67-72.
LI Zhen-qian, ZOU Ding-zhao. Experimental Research on the Recycle of Ilmenite from a Vanadium Titanium Magnetite Ore by the Combined Magnetic-flotation Process[J]. Metal Mine, 2017(1): 67-72.
- [4] 张祥宇, 朱华磊. 钛铁矿选矿技术研究与应用探析[J]. 世界有色金属, 2016(23): 160-161.
ZHANG Xiang-yu, ZHU Hua-lei. Research and Application of Mineral Processing Technology for Ilmenite[J]. World Nonferrous Metal, 2016(23): 160-161.
- [5] 朱建光, 周艳红, 周菁. 2012 年浮选药剂的进展[J]. 矿产综合利用, 2013(3): 1-10.
ZHU Jian-guang, ZHOU Yan-hong, ZHOU Jing. The Development of Flotation Reagent in 2012[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2013(3): 1-10.
- [6] 朱建光, 周菁. 钛铁矿、金红石和稀土选矿技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2009.
ZHU Jian-guang, ZHOU Jing. Beneficiation Technique of Ilmenite, Rutile and Rare Earth[M]. Changsha: Central South University Press, 2009.
- [7] 冯其明, 席振伟, 张国范, 等. 脂肪酸捕收剂浮选钛铁矿性能研究[J]. 金属矿山, 2009(5): 46-49.
FENG Qi-ming, XI Zhen-wei, ZHANG Guo-fan, et al. Collecting Performance of Fatty Acid as Collector for Ilmenite[J]. Metal Mine, 2009(5): 46-49.

- [8] 高颖剑, 林江顺. 国内外羟肟酸的合成及其在浮选中的应用[J]. 国外金属选矿, 1997(6): 54-58.
GAO Ying-jian, LIN Jiang-shun. Synthesis of Hydroxyoxime and Its Application in Flotation[J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 1997(6): 54-58.
- [9] 艾晶, 尚衍波, 李成必, 等. 羟肟酸的合成表征及其在浮选中的应用[J]. 化工矿物与加工, 2015, 44(8): 47-50.
AI Jing, SHANG Yan-bo, LI Bi-cheng, et al. Synthesis and Characterization of Hydroxyomic Acid and Its Application in Flotation[J]. Industrial Minerals & Processing, 2015, 44(8): 47-50.
- [10] 罗溪梅, 童雄. 钛铁矿浮选药剂的研究概况[J]. 矿冶, 2009, 18(2): 13-18.
LUO Xi-mei, TONG Xiong. A Review of Researches on Flotation Reagents of Ilmenite[J]. Mining & Metallurgy, 2009, 18(2): 13-18.
- [11] 董宏军, 陈正学. 水杨羟肟酸浮选细粒钛铁矿的研究[J]. 矿冶工程, 1991(3): 19-22.
DONG Hong-jun, CHEN Zheng-xue. A Study on Flotation of Fine Ilmenite with Salicylhy-droxamic Acid[J]. Mine and Metallurgical Engineering, 1991(3): 19-22.
- [12] 王方平. 羧基羟肟酸类浮选剂的合成、应用及作用机理的理论研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
WANG Fang-ping. Theoretical Research of the Adsorption Mechanism, the Synthesis and the Application of the Carboxyl Hydroxamic Acids[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [13] 孙伟, 柯丽芳, 孙磊. 苯甲羟肟酸在锡石浮选中的应用及作用机理研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013(1): 62-68.
SUN Wei, KE Li-fang, SUN Lei. Study of the Application and Mechanism of Benzohydroxamic Acid in the Flotation of Cassiterite[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013(1): 62-68.
- [14] 戴惠新, 张宗华. 细粒钛铁矿选矿新工艺研究[J]. 国外金属矿选矿, 1998(5): 22-23.
DAI Hui-xin, ZHANG Zong-hua. New Beneficiation Process for Fine Ilmenite[J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 1998(5): 22-23.
- [15] 许光眉, 施周, 邓军. 石英砂负载氧化铁吸附除磷的热动力学研究[J]. 环境工程学报, 2007, 1(6): 15-18.
XU Guang-mei, SHI Zhou, DENG Jun. Thermodynamic and Kinetic Investigation Phosphate Adsorption on Iron-oxide Coated Sand[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2007, 1(6): 15-18.
- [16] 张蕾, 刘雪岩, 姜晓庆, 等. 纳米 TiO_2 对钼(VI)的吸附性能[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(2): 301-307.
ZHANG Lei, LIU Xue-yan, JIANG Xiao-qing, et al. Adsorption Properties of Nano- TiO_2 for Mo(VI)[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(2): 301-307.
- [17] MS E S, NASSIF H A. Retention and Thermodynamic Characteristics of Mercury(II) Complexes onto Polyurethane Foams[J]. Analytica Chimica Acta, 2003, 481(1): 29-39.