

季铵盐 Y28 对一水硬铝石与脉石硅酸盐矿物的浮选性能^①

彭磊红, 邓政斌, 唐云, 吴德宝, 李红妍

(贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 研究了捕收剂季铵盐 Y28 对一水硬铝石与脉石硅酸盐矿物高岭石和白云母的浮选行为, 通过吸附量、接触角、Zeta 电位、FTIR 分析和 XPS 分析对 Y28 与矿物表面的作用机理进行了探究。结果表明: 捕收剂 Y28 用量 90 mg/L、矿浆 pH 值为 7 时, 一水硬铝石回收率为 25.63%, 高岭石和白云母回收率分别为 83.21% 和 81.24%; Y28 主要以物理吸附的方式吸附在矿物表面, 吸附强度顺序为: 高岭石 > 白云母 > 一水硬铝石。

关键词: 一水硬铝石; 高岭石; 白云母; 反浮选; 季铵盐; 铝土矿

中图分类号: TD923

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.03.019

文章编号: 0253-6099(2025)03-0115-05

Effect of Quaternary Ammonium Salt Y28 on Flotation Performance of Diaspore and Gangue Silicate Minerals

PENG Leihong, DENG Zhengbin, TANG Yun, WU Debao, LI Hongyan

(Mining College of Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract: Experiments were performed to study the effect of quaternary ammonium salt Y28, as a collector, on the flotation performance of diaspore and gangue silicate minerals of kaolinite and muscovite, and the interaction mechanism between Y28 and the surface of minerals was also explored by analyzing adsorption capacity, contact angle, zeta potential, FTIR analysis and XPS analysis. The results show that with the collector Y28 at a dosage of 90 mg/L and pulp pH of 7, the recoveries of diaspore, kaolinite and muscovite were 25.63%, 83.21% and 81.24%, respectively. The collector Y28 is primarily adsorbed onto the surface of the minerals by physical adsorption, with the adsorption strength in the following descending order: kaolinite > muscovite > diaspore.

Key words: diaspore; kaolinite; muscovite; reverse flotation; quaternary ammonium salt; bauxite

铝土矿中的硅含量过高对拜耳法生产氧化铝过程有很大影响, 硅元素主要赋存于高岭石、伊利石、白云母和石英等硅酸盐矿物中, 其在氧化铝溶出过程产生的硅酸钠会降低产品质量、影响企业经济效益。国内外学者进行了大量的脱硅研究, 如化学法脱硅、生物法脱硅和浮选法脱硅等。化学法脱硅存在能耗高和碱耗量较大等缺点。生物法脱硅存在微生物筛选困难、培养周期长、脱硅效率低和细菌的遗传不稳定等缺点。浮选法脱硅工艺简单、高效环保、成本低廉, 但正浮选脱硅存在药剂用量大、选择性差、泡沫产品量较大等缺点; 反浮选脱硅符合浮选中“浮少抑多”的选矿原则,

具有药剂用量少、节能、泥化程度低等优点, 但反浮选存在传统捕收剂浮选速度慢、选择性差、泡沫黏性强等缺点, 制约了其工业化应用^[1-2]。筛选和研发新型反浮选脱硅药剂具有重要意义。

研究者对反浮选捕收剂做了大量研究, 取得了很好的研究成果^[3], 但仍存在捕收剂水溶性差、对含硅矿物选择性较差、药剂用量大和对矿浆酸碱度要求高等缺点, 导致一水硬铝石与脉石硅酸盐矿物间难以实现有效分离^[4-5]。基于此, 本文采用选择性较好的季铵盐 Y28 为捕收剂, 研究一水硬铝石和脉石硅酸盐矿物的浮选行为, 并通过吸附量、接触角、Zeta 电位、FTIR

① 收稿日期: 2024-12-16

基金项目: 贵州省青年引导项目(黔科合基础-[2024]青年140)

作者简介: 彭磊红(1995—), 男, 贵州遵义人, 硕士研究生, 主要研究方向为矿产综合利用。E-mail: 1850882707@qq.com

通信作者: 邓政斌(1986—), 男, 贵州清镇人, 博士, 讲师, 主要研究方向为浮选理论与矿产综合利用。E-mail: zhdeng@gzu.edu.cn

和 XPS 分析药剂与矿物间的作用机理。

1 试验矿样与研究方法

1.1 试验矿样

试验矿样一水硬铝石、高岭石和白云母均为纯矿物,其中一水硬铝石取自贵州省某铝土矿选矿厂,纯度为 96.10%,高岭石和白云母均购自广西,纯度分别为 96.50%和 99.50%。3 种纯矿物试样均符合纯矿物矿物组成要求。通过手选、细磨、筛分,取-0.074 mm 粒级试样用于试验。

1.2 试剂与主要仪器

试验主要试剂包括 pH 值调整剂 HCl、NaOH,均为化学纯试剂;试验用水为去离子水。捕收剂 Y28 是实验室自制的一种高效、可生物降解的绿色含碳碳键双分子型季铵盐表面活性剂,来源于一种清洁剂中的重要组成成分,其分子结构包括两个离子基、两个不对称的长链烷基和一个连接基团。

试验主要仪器包括 XFGC II 型实验室充气挂槽浮选机、DHG-9045Y 立式干燥箱、SHZ-D(III) 循环水式多用真空泵、希玛 pH 测试笔、FA2004 电子天平、JC2000D3W 型接触角测定仪、TU-1901 紫外分光光度计、Delsa Nano-C Zeta 电位仪、Nicolet 6700 傅里叶红外光谱仪、Thermo Scientific K-Alpha 光电子能谱仪。

1.3 试验方法

每次称取矿样 2.00 g,加入浮选槽中,再加入 30.00 mL 去离子水,打开旋转主轴搅拌,转速 1 992 r/min,依次加入 pH 值调整剂、捕收剂,浮选 2 min,将泡沫产品和槽内产品分别过滤、干燥、称重,计算产率和回收率。

采用 TU-1901 紫外分光光度计测量捕收剂 Y28 在矿物表面的吸附量;采用 JC2000D3W 型接触角测定仪测量矿物表面接触角,每个溶液在不同位置测定 3 次,取平均值;采用 Delsa Nano-C 纳米粒度及电位分析仪测定捕收剂作用前后矿物表面的动电位,每个试样测试 3 次,取平均值作为动电位值;采用 Nicolet 6700 傅里叶红外光谱仪对捕收剂作用前后的矿物颗粒进行官能团变化的分析表征;采用 Thermo Scientific K-Alpha 光电子能谱进行 XPS 测试,并使用 Advantage 软件对测试光谱进行分析。

2 结果与讨论

2.1 单矿物浮选试验

矿浆 pH 值为 7, Y28 用量对矿物回收率的影响如图 1 所示。随着 Y28 用量增加,一水硬铝石和高岭石回收率均增加,但白云母回收率先增加后减少;Y28 用

量从 60 mg/L 增加到 90 mg/L 时,一水硬铝石回收率从 21.06%增加到 25.63%,高岭石回收率从 66.25%增加到 83.21%,白云母回收率从 71.99%增加到 81.24%;Y28 用量大于 90 mg/L 后,一水硬铝石回收率增加幅度加大,高岭石回收率趋于平缓,白云母回收率减少。适宜的 Y28 用量为 90 mg/L。

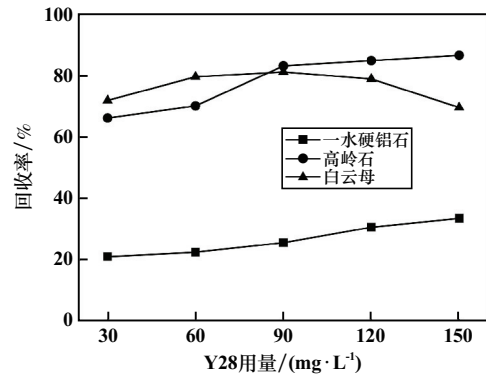


图 1 Y28 用量对矿物回收率的影响

Fig. 1 Influence of Y28 dosage on recoveries of minerals

Y28 用量 90 mg/L,不同矿浆 pH 值条件下的矿物回收率如图 2 所示,随着矿浆 pH 值增加,3 种矿物回收率均先增加后减少;pH = 7 时 3 种矿物回收率均达到峰值:一水硬铝石回收率为 25.63%,高岭石回收率为 83.21%,白云母回收率为 81.24%。在中性环境中可以实现一水硬铝石与高岭石和白云母的分选。

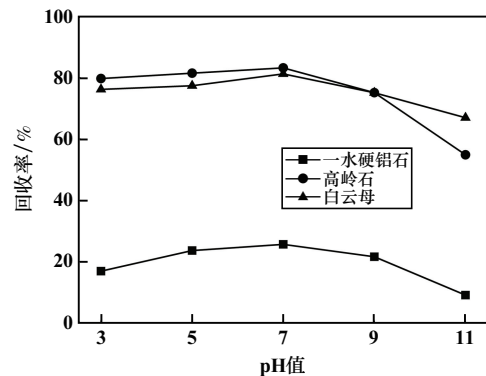


图 2 矿浆 pH 值对矿物回收率的影响

Fig. 2 Influence of pH value on recoveries of minerals

2.2 吸附量试验

矿浆 pH 值为 7,不同 Y28 用量条件下 Y28 在 3 种矿物表面的吸附量如图 3 所示。由图 3 可知,随着 Y28 用量增加,Y28 在一水硬铝石、高岭石表面的吸附量增加,但在白云母表面的吸附量先增加后减少。Y28 在一水硬铝石表面的吸附量远小于在高岭石和白云母表面的吸附量,说明 Y28 对高岭石和白云母的捕收作用强于对一水硬铝石的捕收作用。

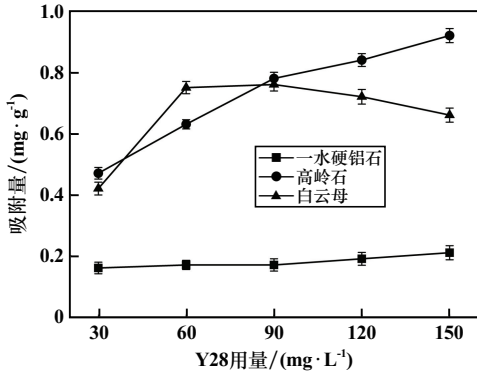


图3 Y28 用量对吸附量的影响

Fig.3 Influence of Y28 dosage on adsorption capacity

Y28 用量 90 mg/L,不同矿浆 pH 值条件下 Y28 在 3 种矿物表面的吸附量见图 4。随着矿浆 pH 值增加, Y28 在一水硬铝石表面的吸附量先增加后减少, Y28 在高岭石表面的吸附量缓慢增加后减少, Y28 在白云母表面的吸附量先减少后增加再减少。这与单矿物浮选试验结果基本一致。

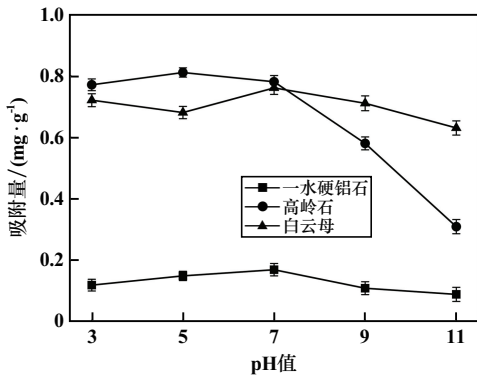


图4 矿浆 pH 值对吸附量的影响

Fig.4 Influence of pulp pH value on adsorption capacity

2.3 接触角测定

矿浆 pH 值为 7,捕收剂 Y28 用量 90 mg/L 条件下, Y28 作用前后矿物表面接触角变化见表 1。经 Y28 作用后, 3 种矿物表面的接触角均有不同程度增大, Y28 大幅增大了高岭石和白云母表面的疏水性, 而对一水硬铝石表面的疏水性影响不大, Y28 对 3 种矿物润湿性改变程度顺序为:高岭石>白云母>一水硬铝石。

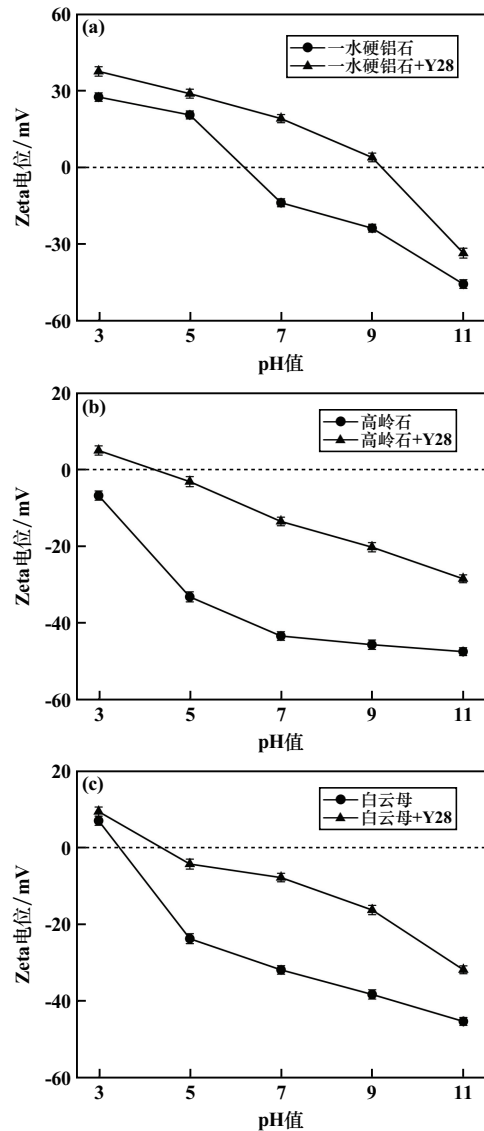
表1 Y28 作用前后矿物表面接触角变化

Table 1 Variations of contact angles of mineral before and after interaction with Y28

矿物名称	接触角/(°)	
	Y28 作用前	Y28 作用后
一水硬铝石	25.66	28.67
高岭石	8.26	68.71
白云母	26.99	66.32

2.4 Zeta 电位分析

捕收剂 Y28 用量 90 mg/L, Y28 对矿物表面 Zeta 电位的影响如图 5 所示。一水硬铝石、高岭石、白云母的零电点分别为 6.0、2.5、3.5。矿浆 pH 值 3~11 范围内, 一水硬铝石、高岭石、白云母的 Zeta 电位均随着矿浆 pH 值增大而减小, 与 Y28 作用后, 3 种矿物表面电位均正移, 这可能是由于 Y28 在矿浆中溶解产生带正电荷的基团吸附在矿物表面上, 改变了矿物表面电位。Y28 与高岭石和白云母表面发生静电吸引力的强度大于其与一水硬铝石表面的作用力, 这与吸附量测试结果一致。



(a) 一水硬铝石; (b) 高岭石; (c) 白云母

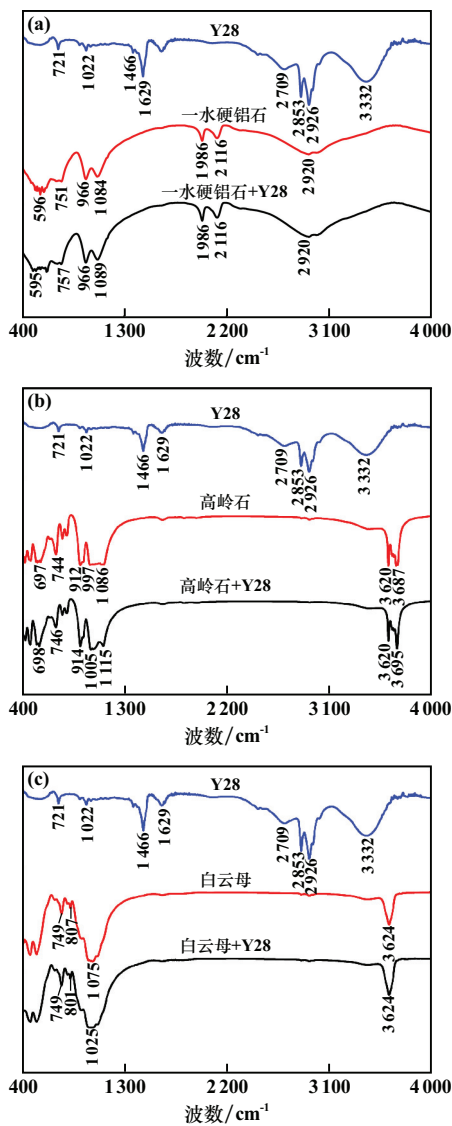
图5 Y28 对矿物表面 Zeta 电位的影响

Fig.5 Influence of Y28 on surface zeta potential of minerals

2.5 FRIT 分析

矿浆 pH 值为 7、捕收剂 Y28 用量 90 mg/L 条件

下, Y28 作用前后矿物表面红外光谱如图 6 所示。从图 6 可以看出, Y28 在 $3\ 332\ \text{cm}^{-1}$ 处出现了 $-\text{NH}_2$ 的对称伸缩振动峰, $2\ 926\ \text{cm}^{-1}$ 处出现了 $-\text{CH}_3$ 的不对称伸缩振动峰, $2\ 853\ \text{cm}^{-1}$ 处为 $-\text{CH}_2-$ 的对称伸缩振动峰, $1\ 466\ \text{cm}^{-1}$ 处出现了 $\text{N}-\text{H}$ 的弯曲振动峰, $1\ 022\ \text{cm}^{-1}$ 处为长链脂肪酸 $\text{C}-\text{N}$ 的伸展振动峰, $721\ \text{cm}^{-1}$ 处为 $-\text{CH}_2-$ 的摇摆振动吸收峰, $1\ 629\ \text{cm}^{-1}$ 处为 $-\text{OH}$ 弯曲振动峰^[6]。一水硬铝石在 $2\ 920\ \text{cm}^{-1}$ 处的峰为 $-\text{OH}$ 的拉伸模式, $2\ 116$ 与 $1\ 986\ \text{cm}^{-1}$ 处为一水硬铝石表面 $\text{O}-\text{H}$ 的伸缩振动吸收峰, $1\ 084$ 、 966 和 $751\ \text{cm}^{-1}$ 处为 $-\text{OH}$ 的弯曲振动峰, $596\ \text{cm}^{-1}$ 处为 $\text{Al}-\text{O}$ 的拉伸和振动^[7], 加入 Y28 未出现新的特征峰, 966 、 $1\ 084\ \text{cm}^{-1}$ 处有明显的特征峰峰宽变化和特征峰加强。



(a) 一水硬铝石; (b) 高岭石; (c) 白云母
图 6 Y28 作用前后矿物表面红外光谱

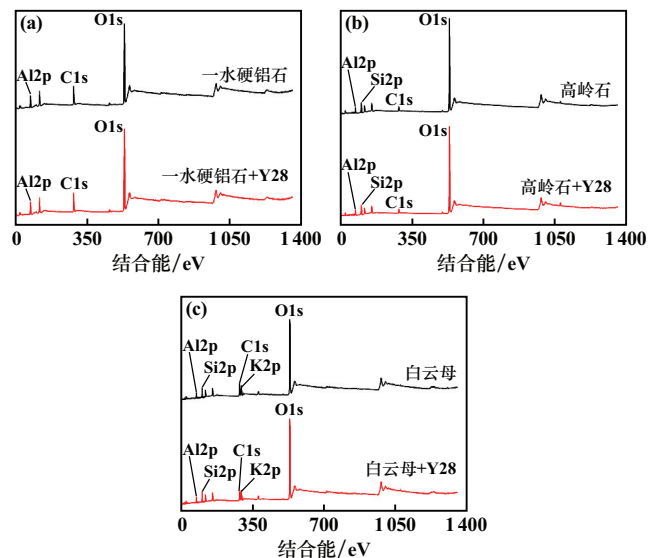
Fig. 6 Infrared spectra of mineral surfaces before and after interaction with Y28

高岭石在 $3\ 687\ \text{cm}^{-1}$ 处有 $-\text{OH}$ 键的吸收峰, $3\ 620\ \text{cm}^{-1}$ 处为高岭石表面上 $-\text{OH}$ 振动引起的吸收峰, $1\ 086\ \text{cm}^{-1}$ 处为 $\text{Si}-\text{O}$ 伸缩振动峰^[8], $912\ \text{cm}^{-1}$ 处出现 $-\text{OH}$ 摆动吸收峰, $997\ \text{cm}^{-1}$ 处为 $\text{Si}-\text{O}-\text{Al}$ 振动吸收峰, 加入 Y28 未出现新的特征峰, 997 和 $1\ 086\ \text{cm}^{-1}$ 处有明显的特征峰峰宽变化和特征峰加强。白云母在 $3\ 624\ \text{cm}^{-1}$ 处为 $\text{Al}-\text{OH}$ 中 $-\text{OH}$ 伸缩振动峰。 $1\ 075\ \text{cm}^{-1}$ 处为白云母中 $\text{Si}-\text{O}$ 拉伸振动峰^[9], $807\ \text{cm}^{-1}$ 处为 $\text{O}-\text{Si}-\text{O}$ 对称振动峰^[10], $749\ \text{cm}^{-1}$ 处为 $\text{Si}-\text{O}$ 对称振动峰, 加入 Y28 未出现新的特征峰, $1\ 075\ \text{cm}^{-1}$ 处有明显的特征峰峰宽变化和特征峰加强。

通过 FTIR 分析发现, 加入 Y28 未出现新的特征峰, 只是在 3 种矿物中出现了明显的峰宽变化和特征峰加强, 一水硬铝石中为 $-\text{OH}$ 的弯曲振动峰, 高岭石中为 $\text{Si}-\text{O}$ 伸缩振动峰和 $\text{Si}-\text{O}-\text{Al}$ 振动吸收峰, 白云母中为 $\text{Si}-\text{O}$ 拉伸振动峰, 可能是 Y28 中的长链脂肪酸 $\text{C}-\text{N}$ 发生了作用所致。

2.6 XPS 分析

药剂吸附在矿物表面后, 会使矿物表面元素相对浓度和原子电子结合能改变, 这可以用于分析和探讨药剂在矿物表面的吸附方式^[11]。Y28 用量 $90\ \text{mg/L}$ 、矿浆 pH 值为 7 条件下, Y28 作用前后矿物表面的 XPS 全谱见图 7, Y28 作用前后矿物表面原子相对浓度变化见表 2。由图 7 和表 2 可知, 与 Y28 作用后, 一水硬铝石、高岭石和白云母矿物表面的 C 元素和 N 元素相对浓度均有所增大, O 元素和 Al 元素相对浓度均有所减小, 在高岭石和白云母表面 Si 元素相对浓度均减小,



(a) 一水硬铝石; (b) 高岭石; (c) 白云母

图 7 Y28 作用前后矿物表面的 XPS 全谱

Fig. 7 XPS spectra of mineral surfaces before and after interaction with Y28

表2 Y28 作用前后矿物表面原子相对浓度变化
Table 2 Variation in relative concentration of atoms on mineral surfaces before and after interaction with Y28

矿物名称	元素	原子相对浓度/%	
		Y28 作用前	Y28 作用后
一水硬铝石	C1s	21.77	22.74
	O1s	53.73	51.57
	Al2p	24.50	23.63
	N1s	0	0.55
高岭石	C1s	8.06	8.92
	O1s	62.95	61.16
	Al2p	13.88	13.29
	Si2p	15.11	14.93
	N1s	0	1.50
白云母	C1s	11.55	15.13
	O1s	55.71	51.29
	Al2p	12.99	12.13
	Si2p	15.48	14.48
	K2p	4.27	3.84
	N1s	0	1.21

白云母表面 K 元素相对浓度减小。Y28 中含有的 N 元素在 3 种矿物表面的相对浓度均增大,在高岭石表面增幅最大,其次是白云母表面,这与吸附量测试结果一致。

Y28 处理前后,一水硬铝石中 O1s 轨道结合能由 531.57 eV 变为 531.59 eV,偏移了+0.02 eV;高岭石中 O1s 轨道结合能由 531.89 eV 变为 532.02 eV,偏移了+0.13 eV, Si2p_{1/2} 轨道结合能由 103.13 eV 变为 103.32 eV,偏移了+0.19 eV, Si2p_{3/2} 轨道结合能由 102.55 eV 变为 102.64 eV,偏移了+0.09 eV;白云母中 O1s 轨道结合能由 531.27 eV 变为 531.30 eV,偏移了+0.03 eV, Si2p_{1/2} 轨道结合能由 102.54 eV 变为 102.48 eV,偏移了+0.06 eV, Si2p_{3/2} 轨道结合能由 101.96 eV 变为 101.99 eV,偏移了+0.03 eV。由此可以发现,Y28 对矿物表面的吸附位点为 O 原子和 Si 原子,对 3 种矿物表面元素的结合能偏移均小于 0.2 eV^[12],即 Y28 在矿物表面的吸附形式为物理吸附。

3 结论

在季铵盐 Y28 浮选体系中,考察了捕收剂 Y28 用量、矿浆 pH 值对一水硬铝石、高岭石、白云母 3 种矿物浮选行为的影响,并通过矿物表面吸附量、接触角、Zeta 电位、润湿性、FTIR 和 XPS 分析,揭示 Y28 对 3 种矿物的吸附机理。结果表明:Y28 对一水硬铝石与脉石硅酸盐矿物的可浮性差异较大,一水硬铝石可浮性明显低于脉石硅酸盐矿物,在 Y28 用量 90 mg/L、pH=7 条件下,一水硬铝石、高岭石、白云母的回收率分别为 25.63%、

83.21%、81.24%;Y28 主要以物理吸附的方式不同程度地吸附在 3 种矿物表面,Y28 能显著改变高岭石和白云母矿物的表面电位和疏水性,而对一水硬铝石的表面电位和疏水性改变甚小;Y28 对硅酸盐矿物具有很好的浮选选择性。

参考文献(References):

- [1] 苏欢欢,康泽双,闫琨,等. 铝土矿中硅酸盐矿物浮选回收试验研究[J]. 轻金属, 2023(5):1-5.
SU Huanhuan, KANG Zeshuang, YAN Kun, et al. Experimental study on recovery of silicate minerals from bauxite by flotation[J]. Light Metals, 2023(5):1-5.
- [2] 杨林,张锦仙,阚赛琼,等. 云南某堆积型高铁铝土矿铝、硅、铁分离工艺试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):75-78.
YANG Lin, ZHANG Jinxian, KAN Saiqiong, et al. Separation and recovering of aluminum, silicon and iron from accumulative high-iron bauxite in Yunnan[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(3):75-78.
- [3] 周杰强,严峥,梅光军,等. 重庆某铝土矿反浮选脱硫脱硅工艺技术研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(1):61-63.
ZHOU Jieqiang, YAN Zheng, MEI Guangjun, et al. Desulfurization and desilicization of bauxite ore from Chongqing by reverse flotation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(1):61-63.
- [4] 霍强,刘晰,谢建平,等. 低品位高铁铝土矿浮选脱硅试验研究[J]. 矿冶工程, 2018,38(6):51-54.
HUO Qiang, LIU Xi, XIE Jianping, et al. Desilicization of low-grade high-iron bauxite by flotation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018,38(6):51-54.
- [5] 刘威,钟宏,王帅. 特戊羟肟酸的合成及其对铝硅矿物的浮选性能研究[J]. 矿冶工程, 2018,38(3):53-57.
LIU Wei, ZHONG Hong, WANG Shuai. Synthesis of pival hydroxamic acid and its flotation properties on aluminosilicate minerals[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018,38(3):53-57.
- [6] CHEN H, ZHU B W, LIANG H, et al. Synthesis and performance analysis of new anionic-nonionic gemini surfactants[J]. Science of Advanced Materials, 2022,14(3):552-559.
- [7] 朱一民,张凜,陈佳丽,等. 铝土矿浮选新型捕收剂的捕收性能及机理研究[J]. 中国矿业, 2018,27(3):121-126.
ZHU Yimin, ZHANG Lin, CHEN Jiali, et al. Flotation performance and mechanism of new bauxite flotation collectors[J]. China Mining Magazine, 2018,27(3):121-126.
- [8] 温彦龙,张素红. 捕收剂 CTAB 对一水硬铝石与高岭石的浮选差异及其分子动力学模拟[J]. 金属矿山, 2021(7):135-141.
WEN Yanlong, ZHANG Suhong. Flotation difference between diaspore and kaolinite with collector CTAB and its molecular dynamics simulation[J]. Metal Mine, 2021(7):135-141.
- [9] WANG L, SUN W, HU Y, et al. Adsorption mechanism of mixed anionic/cationic collectors in muscovite: Quartz flotation system[J]. Minerals Engineering, 2014,64:44-50.

(下转第 124 页)

- application of titanium metal[J]. *Yunnan Metallurgy*, 2010,39(5):58-60.
- [2] 崇霄霄,栾文楼,王丰翔,等. 全球钛资源现状概述及我国钛消费趋势[J]. *矿产保护与利用*, 2020(2):162-170.
CHONG Xiaoxiao, LUAN Wenlou, WANG Fengxiang, et al. Overview of global titanium resources status and titanium consumption trend in China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2020(2):162-170.
- [3] 邹建新,徐国印. 攀西钒钛磁铁矿采选生产技术现状与转型升级策略[J]. *轻金属*, 2020(9):51-55.
ZOU Jianxin, XU Guoyin. Mining & dressing production technology status and transformation & upgrading strategies of Panxi vanadium titanium magnetite[J]. *Light Metals*, 2020(9):51-55.
- [4] 严伟平,李维斯,杨耀辉,等. 攀西地区超微细粒级钛铁矿资源选矿工艺研究[J]. *矿产综合利用*, 2023(4):55-61.
YAN Weiping, LI Weisi, YANG Yaohui, et al. Research on mineral processing technology of ultrafine ilmenite resources in Panzhihua-Xichang area [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023(4):55-61.
- [5] YUAN Z T, ZHAO X, LU J W, et al. Innovative pre-concentration technology for recovering ultrafine ilmenite using superconducting high gradient magnetic separator[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021,31:1043-1052.
- [6] ZHENG X Y, WANG Y H, LU D F. A realistic description of influence of the magnetic field strength on high gradient magnetic separation[J]. *Minerals Engineering*, 2015,79:94-101.
- [7] ZHENG X Y, JING Z H, SUN Z X, et al. Significantly improved separation efficiency of refractory weakly magnetic minerals by pulsating high-gradient magnetic separation coupling with magnetic fluid [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022,10:10105-10118.
- [8] WANG Y H, XUE Z X, ZHENG X Y, et al. Matching relation between matrix aspect ratio and applied magnetic induction for maximum particle capture in transversal high gradient magnetic separation[J]. *Minerals Engineering*, 2020,151:106316.
- [9] XIE J, ZHANG C Q, JIA Y H, et al. Automatic and continuous separation of mixed waste plastics via magneto; Archimedes levitation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022,287:120537.
- [10] 郑霞裕,王毓华,卢东方,等. 一种磁流体耦合高梯度磁选方法; CN113426576A[P].
ZHENG Xiayu, WANG Yuhua, LU Dongfang, et al. A magnetic fluid coupling high-gradient magnetic separation method; CN113426576A[P].
- [11] ZHAO W J, CHENG R, MILLER J R, et al. Label-free microfluidic manipulation of particles and cells in magnetic liquids[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016,26:3916-3932.
- [12] 熊涛,陈禄政,谢美芳,等. 周期式振动脉动高梯度磁选机的研制与试验研究[J]. *金属矿山*, 2023(3):227-233.
XIONG Tao, CHEN Luzheng, XIE Meifang, et al. Development and test research of a periodic vibrating-pulsing high gradient magnetic separator[J]. *Metal Mine*, 2023(3):227-233.
- 引用本文:唐海芬,曙瓦克·赛力克,岳鑫慧,等. 磁流体耦合高梯度磁选高效回收攀西钛铁矿的研究[J]. *矿冶工程*, 2025,45(3):120-124.
TANG Haifen, Shuwake·Sailike, YUE Xinhui, et al. Efficient recovery of Panxi ilmenite by magnetic fluid coupling high-gradient magnetic separation [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025,45(3):120-124.

(上接第 114 页)

- [8] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 通用硅酸盐水泥;GB 175—2023[S]. 北京:中国标准出版社, 2023.
State administration for market regulation, National standardization administration. Common portland cement; GB 175—2023[S]. Beijing: Standards Press for China, 2023.
- [9] 王继蕊,王旭旭,秦育红,等. 烧失量对循环流化床粉煤灰高强陶粒烧结的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2023,54(12):4662-4672.
WANG Jirui, WANG Xuxu, QIN Yuhong, et al. Effect of loss on ignition on sintering of high-strength ceramics made from CFB fly ash [J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2023, 54(12):4662-4672.
- [10] 叶国华,朱思琴,陈子杨,等. 石煤钒矿的选矿预富集研究评述[J]. *稀有金属*, 2022,46(1):120-130.
YE Guohua, ZHU Siqin, CHEN Ziyang, et al. A research review on beneficiation pre-concentration of vanadium-bearing stone coal [J]. *Rare Metals*, 2022,46(1):120-130.
- 引用本文:李鑫源,刘有才,符剑刚,等. 石煤酸浸提钒尾渣资源化利用试验研究[J]. *矿冶工程*, 2025,45(3):110-114.
LI Xinyuan, LIU Youcai, FU Jiangang, et al. Experimental study on resource utilization of residue after vanadium extraction from stone-like coal by acid leaching[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025,45(3):110-114.

(上接第 119 页)

- [10] WANG L, SUN N, LIU J, et al. Effect of chain length compatibility of alcohols on muscovite flotation by dodecyl amine [J]. *Minerals*, 2018,8(4):168.
- [11] CHEN X, GU G H, LI L J, et al. The selective effect of food-grade guar gum on chalcopyrite-monoclinic pyrrhotite separation using mixed aerofloat (CSU11) as collector [J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2018,25(10):1123-1131.
- [12] WANG Y L, HE G C, ABUDUKADE D, et al. Selective inhibition of sodium tripolyphosphate on calcite in the process of magnesite flotation [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022,345:117412.
- 引用本文:彭磊红,邓政斌,唐云,等. 季铵盐 Y28 对一水硬铝石与脉石硅酸盐矿物的浮选性能[J]. *矿冶工程*, 2025,45(3):115-119.
PENG Leihong, DENG Zhengbin, TANG Yun, et al. Effect of quaternary ammonium salt Y28 on flotation performance of diaspore and gangue silicate minerals [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025,45(3):115-119.