组合捕收剂与表面活性剂强化高硅铝土矿浮选及其机理研究①

郭吉东[1]，翟益庆[1]，庹必阳[1]，郑平[1]，黎双浪[1]，王志杰[1,2]
（1.贵州大学 矿业学院，贵州 贵阳 550025；2.攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司，四川 攀枝花 617099）

摘　要：为了实现高硅铝土矿的提质脱硅，以油酸钠为主体，分别与苯甲羟肟酸、十二烷基磺酸钠、十二烷基硫酸钠和正辛醇复配成二元、三元组合捕收剂，研究了单一捕收剂、二元组合捕收剂以及三元组合捕收剂对高硅铝土矿浮选效果的影响。通过接触角、Zeta 电位、红外光谱和药剂吸附量测试等探究了铝土矿中一水硬铝石和高岭石分别与组合捕收剂的作用机理。结果表明，二元组合捕收剂的浮选效果明显优于单一捕收剂，油酸钠与苯甲羟肟酸组合，总用量 800 g/t 时，精矿 Al_2O_3 品位 56.49%、回收率 64.85%、铝硅比为 2.96；油酸钠、苯甲羟肟酸与十二烷基磺酸钠三元组合，总用量 1 200 g/t 时，精矿 Al_2O_3 品位 61.17%、回收率 79.84%、铝硅比为 3.80。接触角、Zeta 电位、红外光谱及药剂吸附量测试结果表明，组合捕收剂对一水硬铝石的作用大于对高岭石的作用，表明组合捕收剂对一水硬铝石有着更强的选择捕收性。

关键词：铝土矿；捕收剂；表面活性剂；组合捕收剂；浮选；脱硅；一水硬铝石；高岭石
中图分类号：TD923　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.017
文章编号：0253-6099(2026)04-0120-07

Enhanced Flotation of High-Silicon Bauxite with Combined Collectors and Surfactants and Its Mechanism

GUO Jidong[1], ZHAI Yiqing[1], TUO Biyang[1], ZHENG Ping[1], LI Shuanglang[1], WANG Zhijie[1,2]
(1.*School of Mining, Guizhou University, Guiyang* 550025, *Guizhou, China*; 2.*Pangang Group Panzhihua Iron & Steel Research Institute Co., Ltd., Panzhihua* 617099, *Sichuan, China*)

Abstract: To realize quality improvement and desiliconization of high-silicon bauxite, binary and ternary collectors were prepared with sodium oleate as the main component, compounded with benzohydroxamic acid, sodium dodecyl sulfonate, sodium dodecyl sulfate and n-octanol, respectively. The effects of single collector, binary collector and ternary collector on the flotation of high-silicon bauxite were systematically investigated. The interaction mechanisms between diaspore and kaolinite in bauxite and the collectors were revealed via contact angle measurement, zeta potential test, Fourier transform infrared spectroscopy and reagent adsorption capacity analysis. The results indicate that flotation performance of binary collectors is obvious superior to that of single collector. Flotation with sodium oleate combined with benzohydroxamic acid at a total dosage of 800 g/t can produce the concentrate with an Al_2O_3 grade of 56.49% at a recovery of 64.85% and an alumina-to-silica ratio of 2.96. While with a ternary collector composed of sodium oleate, benzohydroxamic acid and sodium dodecyl sulfonate at a total dosage of 1 200 g/t, the flotation can yield the concentrate with an Al_2O_3 grade of 61.17% at a recovery of 79.84% and an alumina-to-silica ratio of 3.80. The contact angle, zeta potential, infrared spectroscopy and adsorption capacity results demonstrate that both the binary collector and the ternary collector interact more strongly with diaspore than with kaolinite, suggesting that the collectors possess better selective collection of diaspore.

Key words: bauxite; collector; surfactant; combined collector; flotation; desiliconization; diaspore; kaolinite

① **收稿日期**：2026-02-05
基金项目：贵州省研究生科研基金项目(2024YJSKYJJ136)；贵州省科技计划项目(〔2021〕一般 482)
作者简介：郭吉东(2000—)，男，贵州安顺人，硕士研究生，主要研究方向为高硅铝土矿分选。E-mail：2990402502@qq.com
通信作者：庹必阳(1979—)，男，云南镇雄人，教授，博士研究生导师，主要从事矿石分选和矿物材料方面的教学与科研工作。E-mail：bytuo@gzu.edu.cn

铝主要用于航天、建筑、交通等领域[1]。铝土矿是一种重要的战略性矿产资源,全球约 92%的铝土矿用于金属铝制备[2-3]。我国铝土矿储量约为 10 亿吨,仅占世界储量的 3%,且铝土矿资源大部分为高铝高硅的一水硬铝石型铝土矿[4-5]。随着国内高品质铝土矿的巨量开采,当前我国铝土矿普遍呈“贫、细、杂”特征,分选难度增大,高硅铝土矿的分选难题尤为突出[6]。铝土矿脱硅方法研究尤为重要。提高铝硅比可降低铝土矿原料损耗及生产成本[7]。铝土矿中硅主要以硅酸盐形式存在,将硅酸盐矿物分离脱出可提高铝土矿的铝硅比[8]。浮选是一种经济、高效的铝土矿脱硅方法[9]。影响铝土矿浮选效果的核心因素为浮选药剂和浮选工艺流程,其中浮选药剂对浮选效果的调控作用更为显著。

针对高硅铝土矿“贫、细、杂”的特点,使用组合捕收剂比单一捕收剂能获得更好的浮选指标[10-11]。组合捕收剂依托两种及以上药剂间的协同效应强化自身捕收性能,其对目标矿物的捕收效果优于单一捕收剂,在改善生产指标、控制生产成本等方面具有显著潜力。

贵州省蕴藏丰富的铝土矿资源,开发前景广阔[12]。本文对贵州省某高硅铝土矿开展浮选试验,研究了单一捕收剂和组合捕收剂对浮选指标的影响,并分析了作用机理。

1　矿样性质

矿样来自贵州省宝鑫矿业有限公司。矿样经中碎、细碎后进行混匀缩分,最终得到-2 mm 试样。对试样进行磨矿,并对磨矿后的试样进行 X 射线衍射(XRD)分析及化学多元素分析,结果分别见图 1 和表 1~2。由图 1 及表 1~2 可知,原矿主要由一水硬铝石、高岭石、石英、锐钛矿、菱铁矿等矿物组成,其中含铝矿物主要为一水硬铝石,含硅矿物主要为高岭石以及少量石英。铝土矿中氧化铝和二氧化硅品位分别为

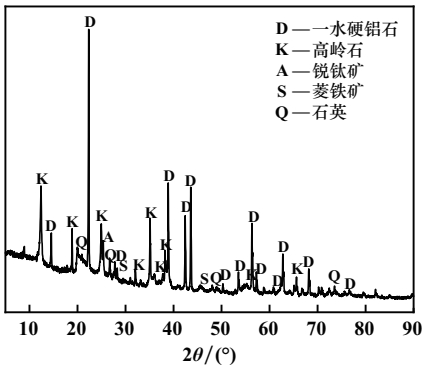


图 1　铝土矿原矿 XRD 分析结果

Fig. 1　XRD analysis of bauxite raw ore

表 1　原矿矿物组成(质量分数)

Table 1　Mineral composition of raw ore　%

一水硬铝石	高岭石	石英	锐钛矿	菱铁矿	其他
60.6	30.2	1.5	2.4	1.9	3.4

表 2　铝土矿原矿化学成分分析结果(质量分数)

Table 2　Chemical composition analysis of bauxite raw ore　%

Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	K_2O	MgO	SO_3	CaO
53.17	23.45	3.64	4.14	0.91	0.90	0.33	1.03

53.17%和 23.45%,铝硅比为 2.27,属于低铝硅比铝土矿。

对-2 mm 原矿进行了筛分分析,结果如表 3 所示。由表 3 可知,原矿中 Al_2O_3 主要分布在+0.125 mm 粒级,分布率为 69.63%;19.84%的 Al_2O_3 分布于-0.045 mm 粒级中,嵌布粒度较细,磨矿过程中较难实现该部分 Al_2O_3 的单体解离,这也是造成该矿石较难分选的部分原因。

表 3　-2 mm 原矿筛分分析结果

Table 3　Sieve analysis results of raw ore (-2 mm)

粒级/mm	产率/%	品位/%		铝硅比	分布率/%	
		Al_2O_3	SiO_2		Al_2O_3	SiO_2
+0.88	44.23	56.14	23.82	2.36	46.40	42.58
-0.88+0.125	21.51	57.78	22.95	2.52	23.23	21.11
-0.125+0.075	7.42	54.67	24.00	2.28	7.58	7.61
-0.075+0.045	3.27	48.33	26.07	1.85	2.95	3.64
-0.045	23.57	45.05	23.86	1.89	19.84	25.06

2　试验方法

每次取 300 g 矿样(-2 mm)放入球磨机内,加入 180 mL 自来水,磨矿 12 min 后,按图 2 所示流程进行浮选试验。试验药剂包括碳酸钠、盐酸、六偏磷酸钠、油酸钠(NaOl)、苯甲羟肟酸(BHA)、妥尔油、氧化石蜡皂、十二烷基磺酸钠(SDS)、十二烷基硫酸钠(SAS)、正辛醇等。试验设备包括 RK/FD Ⅱ 1.0 单槽浮选机、XMQ-240×90 锥形球磨机、pHS-3C 精密 pH 仪等。

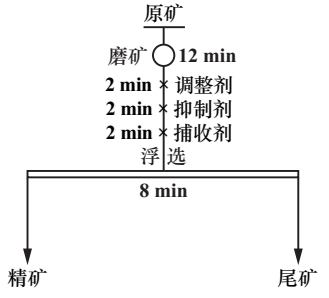


图 2　浮选试验流程

Fig. 2　Flowchart for flotation test

采用 Dataphysics OCA20 接触角测量仪测试试样接触角,每个试样测量 3 次后取平均值;采用 Malvern Zetasizer Nano ZS90 Zeta 电位分析仪测试试样表面电位,每组样品测量 3 次后取平均值。

3 浮选试验

3.1 单一捕收剂浮选试验

pH 值为 10,抑制剂六偏磷酸钠用量 150 g/t,按照图 2 所示流程,选择工业上较常用的妥尔油、SDS、氧化石蜡皂、BHA 以及 NaOl 为捕收剂,捕收剂用量均为 800 g/t,对铝土矿进行单一捕收剂浮选试验,结果如图 3 所示。结果表明,以氧化石蜡皂、BHA 和 NaOl 为捕收剂时,精矿铝硅比介于 2.62~2.69,这 3 种捕收剂的脱硅效果明显高于其他 2 种捕收剂,其中 BHA 作捕收剂时精矿 Al_2O_3 铝硅比为 2.69,但 Al_2O_3 回收率仅 47.21%;NaOl 作捕收剂时精矿铝硅比为 2.66、Al_2O_3 回收率为 54.45%。后续以 NaOl 为主体进行二元组合捕收剂浮选试验。

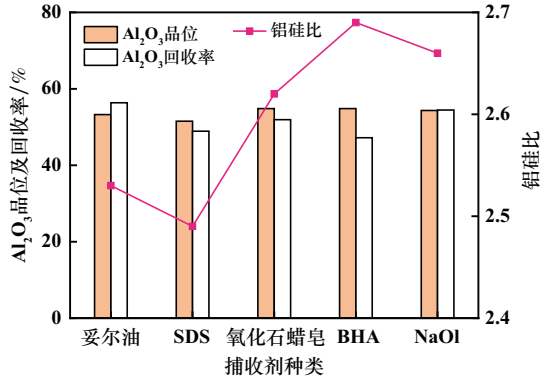


图 3 单一捕收剂浮选试验结果

Fig. 3 Flotation test results with single collector

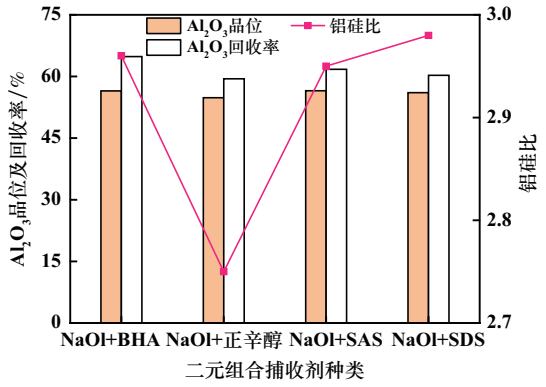


图 4 二元组合捕收剂种类试验结果

Fig. 4 Test results with binary collectors

矿进行浮选试验,三元组合捕收剂种类试验结果如图 5 所示。结果显示,三元组合捕收剂的精矿 Al_2O_3 回收率及铝硅比均显著提升,复配效果排序为:SDS > 正辛醇 > SAS,其中 SDS 复配体系的 Al_2O_3 回收率(68.84%)和铝硅比(3.37)比 NaOl+BHA 的二元组合捕收剂体系相应值分别提高了3.99百分点和 0.41。

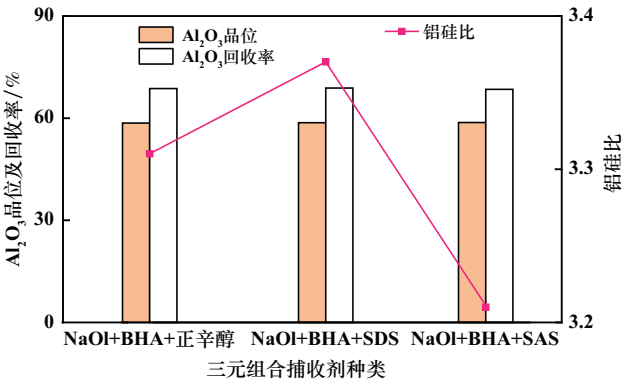


图 5 三元组合捕收剂种类试验结果

Fig. 5 Test results with ternary collectors

3.2 二元组合捕收剂浮选试验

将 NaOl 分别与 BHA、正辛醇、SAS、SDS 按物质的量比 8∶2组合,总用量为 800 g/t,其他条件不变,进行了二元组合捕收剂种类试验,结果如图 4 所示。结果表明,二元组合捕收剂的浮选效果均优于单一捕收剂;NaOl 与 BHA、SAS、SDS 组合时,精矿铝硅比差异较小(2.95~2.98),NaOl 与正辛醇组合时精矿铝硅比只有 2.75;NaOl 与 BHA 组合所得 Al_2O_3 回收率为64.85%,高于其他组合捕收剂。

3.3 三元组合捕收剂浮选试验

3.3.1 三元组合捕收剂种类试验

将 NaOl 和 BHA 按物质的量比 8∶2组合,总用量为 800 g/t,然后再分别与 SAS、SDS 及正辛醇以相同物质的量比(8∶2∶3)组合,获得三元组合捕收剂,对铝土

SAS 和 SDS 不仅可作为捕收剂使用,同时也具有表面活性剂性质。表面活性剂因具有疏水非极性基团与亲水极性基团构成的双亲不对称分子结构,可在不同界面吸附并改变界面状态[13],与捕收剂复配可以达到增强浮选效果的目的。

3.3.2 SDS 配比试验

为探究三元组合捕收剂中 SDS 的最佳配比,固定 NaOl+BHA 用量为 800 g/t,在 NaOl、BHA 和 SDS 物质的量比分别为 8∶2∶1、8∶2∶2、8∶2∶3、8∶2∶4、8∶2∶5条件下对铝土矿进行浮选试验,SDS 配比试验结果如图 6 所示。图 6 结果表明,随着 SDS 配比增加,精矿铝硅比和 Al_2O_3 回收率均先增大再减小,当 NaOl、BHA 和 SDS 物质的量比为 8∶2∶3时,精矿铝硅比可达 3.62,Al_2O_3 品位为 59.62%,回收率可达到 72.86%。继续增

大 SDS 配比,浮选效果变差。确定 NaOl、BHA 和 SDS 适宜的物质的量比为 8∶2∶3。

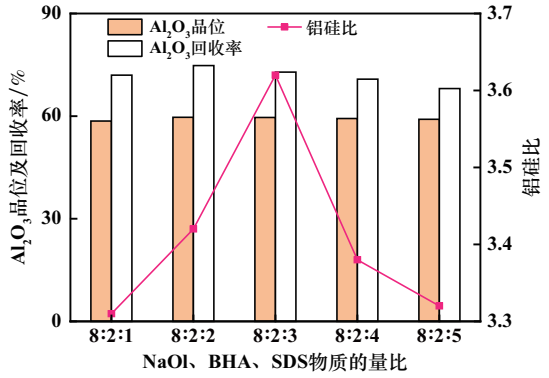


图 6　SDS 配比试验结果

Fig. 6　Test results with different SDS ratio

3.3.3　三元组合捕收剂用量试验

NaOl、BHA、SDS 物质的量比为 8∶2∶3,其他条件不变,进行了三元组合捕收剂用量试验,结果如图 7 所示。结果表明,随着三元组合捕收剂用量增加,精矿铝硅比先增大后减小,Al_2O_3 回收率一直增加,Al_2O_3 品位 59.42%~61.17%,变化不大。三元组合捕收剂用量 1 200 g/t 时,精矿铝硅比为 3.80,Al_2O_3 回收率为 79.84%,浮选效果好。

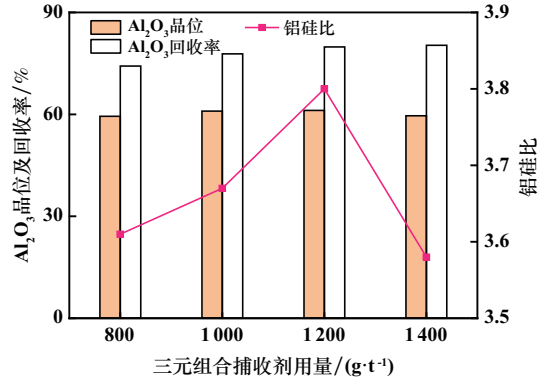


图 7　三元组合捕收剂用量试验结果

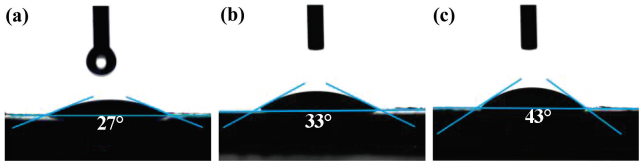
Fig. 7　Test results with ternary collectors at different dosage

3.4　作用机理研究

3.4.1　接触角试验

矿物表面润湿性是反映矿物可浮性的一项重要指标,它可以通过测量液体与矿物表面接触角进行分析。矿物表面润湿性越好,则矿物表面接触角越小,矿物越亲水,其可浮性也就越差,反之亦然。

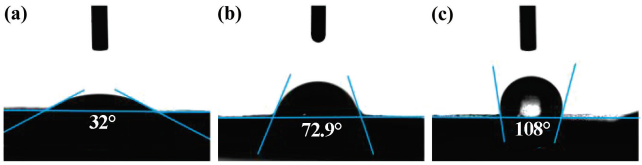
抑制剂六偏磷酸钠用量 150 g/t,NaOl+BHA 用量 800 g/t、NaOl+BHA+SDS 用量 1 200 g/t 条件下,高岭石和一水硬铝石与不同组合捕收剂作用前后的接触角变化分别如图 8 和图 9 所示。



(a) 高岭石;(b) 高岭石+NaOl+BHA;(c) 高岭石+NaOl+BHA+SDS

图 8　高岭石与不同组合捕收剂作用前后接触角变化

Fig. 8　Variation in contact angle of kaolinite before and after interaction with different combined collectors



(a) 一水硬铝石;(b) 一水硬铝石+NaOl+BHA;(c) 一水硬铝石+NaOl+BHA+SDS

图 9　一水硬铝石与不同组合捕收剂作用前后接触角变化

Fig. 9　Variation in contact angle of diaspore before and after interaction with different combined collectors

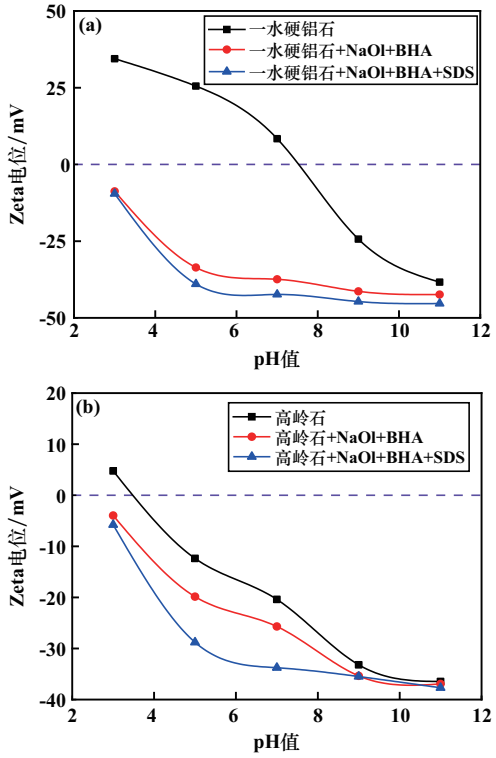
高岭石空白样接触角为 27°,与 NaOl+BHA 作用后其接触角提升至 33°,继续复配 SDS 后,其接触角提升至 43°,较空白样增大了 16°;两类组合捕收剂均通过增大高岭石表面接触角提升其可浮性。一水硬铝石空白样接触角为 32°,与 NaOl+BHA 作用后其接触角提升至 72.9°,继续复配 SDS 后,其接触角提升至 108°,较空白样增大了 76°;两类组合捕收剂均通过显著提升一水硬铝石表面接触角增强其可浮性。对比高岭石和一水硬铝石与组合捕收剂作用前后接触角的变化情况可知,组合捕收剂的加入虽然同时增加了 2 种矿物的表面润湿性,但各组合捕收剂对高岭石表面接触角的提升值远小于对一水硬铝石表面接触角的提升值,说明组合捕收剂对一水硬铝石的选择性更强于对高岭石的选择性。这与浮选结果一致。

3.4.2　Zeta 电位测试

Zeta 电位可反映矿物颗粒表面电荷密度:负值对应表面带负电,正值对应带正电;其绝对值与颗粒表面电荷量呈正相关,绝对值越大,矿物颗粒间的静电排斥作用越显著。

NaOl+BHA 用量 800 g/t、NaOl+BHA+SDS 用量 1 200 g/t条件下,一水硬铝石和高岭石与不同组合捕收剂作用前后的 Zeta 电位如图 10 所示。随着 pH 值升高,与药剂作用前后的一水硬铝石 Zeta 电位均呈负向偏移趋势;pH 值大于 5 后,与组合捕收剂作用后一水硬铝石 Zeta 电位绝对值显著增大,表明捕收剂在矿

物表面吸附后不仅增强了矿物颗粒表面电性以及颗粒间的静电排斥作用,还提升了矿物分选性能;三元组合捕收剂体系下,一水硬铝石表面电荷强度高于 NaOl+BHA 的二元组合捕收剂体系。无论是否加入药剂,随着 pH 值增大,高岭石 Zeta 电位均负移,且其绝对值增大;加入 SDS 后,高岭石 Zeta 电位绝对值更大了。对比高岭石和一水硬铝石与不同药剂作用前后 Zeta 电位变化情况,发现捕收剂的加入使得高岭石和一水硬铝石 Zeta 电位都负移,Zeta 电位绝对值增大,即矿物颗粒间的静电斥力增大,颗粒间更加分散,但组合捕收剂对一水硬铝石 Zeta 电位的作用明显强于对高岭石的作用。这与浮选结果一致。



(a) 一水硬铝石;(b) 高岭石

图 10 矿物与不同组合捕收剂作用前后 Zeta 电位变化

Fig. 10 Variation in zeta potential of minerals before and after interaction with different combined collectors

3.4.3 吸附量测试

吸附量测试是矿物加工领域吸附分离研究的核心表征手段,其数据直接量化捕收剂对目标矿物的吸附能力,是评判捕收剂吸附性能的关键指标。

NaOl+BHA 用量 800 g/t、NaOl+BHA+SDS 用量 1 200 g/t条件下,一水硬铝石与高岭石表面吸附量随 pH 值的变化关系如图 11 所示。各组合捕收剂在一水硬铝石表面的吸附量远大于在高岭石表面的吸附量;pH<4 时,各组合捕收剂在 2 种矿物表面的吸附量变化不大;随着 pH 值升高,各组合捕收剂在一水硬铝石表面的吸附量均呈先增加后减少的趋势,pH 值为 10 时,2 种组合捕收剂在一水硬铝石表面的吸附量达到峰值;随着 pH 值升高,各组合捕收剂在高岭石矿物表面的吸附量变化不大。

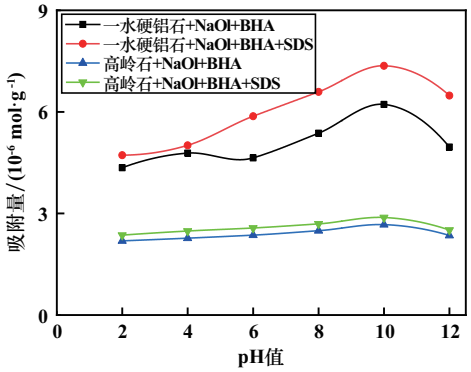


图 11 一水硬铝石与高岭石表面吸附量随 pH 值的变化

Fig. 11 Variation in surface adsorption capacity of diaspore and kaolinite with pH value

总之,加入 SDS 后,药剂在一水硬铝石和高岭石表面的吸附量均得到了提升,且组合捕收剂在 2 种矿物表面的吸附量存在明显差距:组合捕收剂对一水硬铝石有一定选择性,达到了增加铝硅矿物间可浮性差异的目的,更有利于一水硬铝石和高岭石的浮选分离。

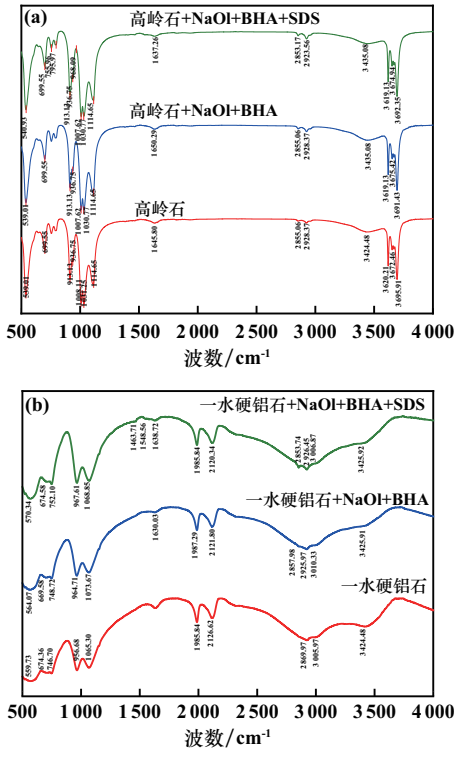
3.4.4 红外光谱分析

NaOl+BHA 用量 800 g/t、NaOl+BHA+SDS 用量 1 200 g/t 条件下,矿物与不同组合捕收剂作用前后的红外光谱如图 12 所示。

高岭石红外光谱图中,3 620.21、3 672.46、3 695.91 cm^{-1} 处为其羟基特征振动吸收峰,其中3 695.91 cm^{-1} 处为外羟基伸缩振动吸收峰,3 620.21 cm^{-1} 处为内羟基伸缩振动吸收峰,两者之间还有 2 个中等强度吸收带也是由外羟基伸缩振动产生的,913.13 cm^{-1} 处为外羟基摆动吸收产生。高岭石的 Si—O 伸缩振动峰位于1 008.11、1 031.25、1 114.65 cm^{-1} 处;600~800 cm^{-1} 范围内的几个峰为 Si—O—Si 对称伸缩振动峰和 Si—O—Al 的不对称伸缩振动峰。高岭石与组合捕收剂作用后的红外光谱变化不大,并没有出现新的吸收峰,说明组合捕收剂在高岭石表面的吸附有限。

一水硬铝石为两性氧化物,有大量羟基存在于其晶体结构中,且一水硬铝石晶体各晶面间的氢键较短,等价羟基间没有直接键合,故在 2 800~3 100 cm^{-1} 处的宽谱带为—OH 的伸缩振动峰。3 424.48 cm^{-1} 处为 H_2O 分子及—OH 伸缩振动峰。2 126.62、1 985.84 cm^{-1} 处为 AlO_4

基团中的 Al—O 结构所吸收的内外摆动峰。746.70、956.68 和1 065.30 cm^{-1}处为—OH 弯曲振动峰,674.36 cm^{-1}处谱带可能由一水硬铝石额外振动引起。559.73 cm^{-1}处为 Al—O 键的拉伸和振动峰。经 NaOl+BHA 作用后,一水硬铝石在 2 857.98、2 925.97 和 3 010.33 cm^{-1}处出现 NaOl 的吸收特征峰,分别为甲基和亚甲基的 C—H 伸缩振动峰以及双氢键的伸缩振动峰。一水硬铝石的额外振动峰由 674.36 cm^{-1}处移至 669.58 cm^{-1}处,说明 NaOl+BHA 在一水硬铝石上有吸附。继续加入 SDS 后,红外光谱大致相似,在 1 638.72 和 1 463.71 cm^{-1}处出现新的特征峰,同时一水硬铝石的额外振动峰从 674.36 cm^{-1}处移至 674.58 cm^{-1}处,且2 926.45、3 006.87、2 853.74 cm^{-1}处油酸钠的特征峰略有加强,这些峰的移动和出现均说明加入的 SDS 同样吸附在了一水硬铝石表面,同时也说明 SDS 的加入加强了油酸钠对一水硬铝石表面的吸附。这与浮选结果一致。



(a) 高岭石; (b) 一水硬铝石

图 12　矿物与组合捕收剂作用前后的红外光谱

Fig. 12　IR spectra of minerals before and after interaction with combined collectors

对比不同组合捕收剂对一水硬铝石和高岭石作用前后的红外光谱图可以发现,组合捕收剂对一水硬铝石表面的吸附强于对高岭石表面的吸附,说明组合捕收剂对一水硬铝石有着更好的选择性。这与浮选结果也是一致的。

4　结论

1) 浮选试验结果表明,以油酸钠为单一捕收剂,获得了 Al_2O_3 回收率 54.45%、铝硅比 2.66 的铝精矿;二元组合捕收剂浮选效果均优于单一捕收剂,其中 NaOl+BHA 二元组合捕收剂获得了 Al_2O_3 品位 56.49%、回收率 64.85%、铝硅比 2.96 的铝精矿;NaOl、BHA、SDS 物质的量比 8∶2∶3,总用量 1 200 g/t 的三元组合捕收剂体系获得了 Al_2O_3 品位 61.17%、回收率 79.84%、铝硅比 3.80 的铝精矿。

2) 接触角、Zeta 电位、吸附量测试以及红外光谱分析结果表明,组合捕收剂对铝土矿中一水硬铝石的作用明显强于对高岭石的作用,即组合捕收剂对一水硬铝石有更强的选择性,这与浮选结果一致。

参考文献(References):

[1] 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 desiliconization of bauxite ore from Chongqing by reverse flotation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(1):61-63.

[2] 朱尤青,陈旭,达伟,等. 贵州清镇蔡家坝铝土矿床地球化学特征[J]. 科学技术与工程, 2025,25(10):3996-4005.
Zhu Youqing, Chen Xu, Da Wei, et al. Geochemical characteristics of Caijiaba bauxite deposit in Qingzhen, Guizhou province and their implication for the ore-forming process[J]. Science Technology and Engineering, 2025,25(10):3996-4005.

[3] 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. Desilication of low-grade high-iron bauxite by flotation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018,38(6):51-54.

[4] 韩跃新,柳晓,何发钰,等. 我国铝土矿资源及其选矿技术进展[J]. 矿产保护与利用, 2019,39(4):151-158.
Han Yuexin, Liu Xiao, He Fayu, et al. Current situation of bauxite resource and its beneficiation technology in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019,39(4):151-158.

[5] 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.

[6] 吴国亮,马俊伟,杜五星,等. 铝土矿选矿脱硅和脱硫技术现状及进展[J]. 矿产勘查, 2024,15(12):2351-2358.
Wu Guoliang, Ma Junwei, Du Wuxing, et al. Current status and progress of desilication and desulfurization technology in bauxite beneficiation[J]. Mineral Exploration, 2024,15(12):2351-2358.

[7] 黎建宏,薛清远,王桂芳,等. 高硅铝土矿的脱硅研究现状与进

展[J]. 现代矿业, 2023,39(5):5-8.
Li Jianhong, Xue Qingyuan, Wang Guifang, et al. Research status and progress on desilication of bauxite with high silica[J]. Modern Mining, 2023,39(5):5-8.

[8] 蓝柳佳,王丽,孙伟,等. 某高铝高硅铝土矿提质试验研究[J]. 非金属矿, 2022,45(2):59-62.
Lan Liujia, Wang Li, Sun Wei, et al. Study on upgrading of a high-alumina and high-silicon bauxite ore[J]. Non-Metallic Mines, 2022, 45(2):59-62.

[9] 任锦婷,张素红,邵秀峰. Gemini 12-3-12 浮选分离一水硬铝石与高岭石的机理研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(5):153-161.
Ren Jinting, Zhang Suhong, Shao Xiufeng. Mechanism of flotation separation of diaspore and kaolinite by using Gemini 12-3-12[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2023(5):153-161.

[10] 罗溪梅,姜伯昭,黄仁杰,等. 阴阳离子组合捕收剂在非硫化矿浮选及其泡沫调控中的研究进展[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2025,42(3):1-13.
Luo Ximei, Jiang Bozhao, Huang Renjie, et al. Research progress of the use of cation-anion combined collectors in non-sulfide ore flotation and foam control[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2025,42(3):1-13.

[11] 施雨航,宋宝旭,王帅,等. 新型组合捕收剂浮选回收某铜尾矿中的微细粒锡石[J]. 矿产保护与利用, 2025,45(2):102-107.
Shi Yuhang, Song Baoxu, Wang Shuai, et al. Flotation recovery of fine-grained cassiterite from a copper tailings using a novel combined collector[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2025,45(2):102-107.

[12] 刘安荣,彭伟,王振杰,等. 贵州某低铝硅比铝土矿石浮选脱硅试验研究[J]. 现代矿业, 2020,36(7):131-133.
Liu Anrong, Peng Wei, Wang Zhenjie, et al. Experimental study on flotation desilication of a low alumina silica ratio bauxite in Guizhou[J]. Modern Mining, 2020,36(7):131-133.

[13] 孔春朋,王军,侯玉茂,等. 表面活性剂提高尾煤泥脱水效率的研究与应用[J]. 煤炭加工与综合利用, 2023(3):34-36.
Kong Chunpeng, Wang Jun, Hou Yumao, et al. Research and application of surfactant to improve the dewatering efficiency of tailing slime[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2023(3): 34-36.

引用本文: 郭吉东,翟益庆,庹必阳,等. 组合捕收剂与表面活性剂强化高硅铝土矿浮选及其机理研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):120-126.
Guo Jidong, Zhai Yiqing, Tuo Biyang, et al. Enhanced flotation of high-silicon bauxite with combined collectors and surfactants and its mechanism[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):120-126.

(上接第119页)

[7] 郭灵敏. 缅甸某铅锌银多金属氧硫混合矿选矿技术开发研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(5):81-85.
Guo Lingmin. Development of mineral processing technology for Pb-Zn-Ag polymetallic ore from Myanmar[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(5):81-85.

[8] 唐攀科,王春艳,梅友松,等. 中国铅锌矿产资源成矿特征与资源潜力评价[J]. 地学前缘, 2018,25(3):31-49.
Tang Panke, Wang Chunyan, Mei Yousong, et al. Characteristics and potential evaluation of lead zinc mineral resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 2018,25(3):31-49.

[9] 叶家笋,曾茂青,王世涛,等. 云南某地铅锌银多金属硫化矿的浮选试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(1):31-37.
Ye Jiasun, Zeng Maoqing, Wang Shitao, et al. Flotation test for lead-zinc-silver polymetallic sulfide ore of Yunnan[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(1):31-37.

[10] 谭欣,王中明,肖巧斌,等. 银铅无碱混选工艺分选含银低品位铅锌硫化矿石[J]. 矿产保护与利用, 2021,41(2):89-98.
Tan Xin, Wang Zhongming, Xiao Qiaobin, et al. Separation of Ag-Pb alkali-free bulk flotation process on a silver-bearing low-grade lead & zinc sulfide ore[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021,41(2):89-98.

[11] 昆明理工大学,豫光(成都)科技有限公司,甘洛县尔呷地吉铅锌矿业有限公司,等. 一种难选混合铅锌矿的浮选分离方法: CN119456213B[P]. 2025-11-11.
Kunming University of Science and Technology, Yuguang (Chengdu) Technology Co., Ltd., Ganluo County Erxia Diji Lead-Zinc Mining Co., Ltd., et al. A flotation separation method for refractory mixed lead-zinc ore: CN119456213B[P]. 2025-11-11.

[12] 湖南有色金属研究院. 一种用于铅精矿浮选工艺中的组合抑制剂: CN201710566505.8[P]. 2017-11-24.
Hunan Research Institute for Nonferrous Metals. A combined inhibitor used in the flotation process of lead concentrate: CN201710566505.8[P]. 2017-11-24.

引用本文: 刘忠荣,赵俊峰,肖金雄,等. 国外某铅锌矿伴生银在铅精矿中的强化回收试验研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):116-119.
Liu Zhongrong, Zhao Junfeng, Xiao Jinxiong, et al. Experimental study on enhanced recovery of associated silver from lead concentrate in an overseas lead-zinc ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):116-119.