贵州高硫高硅铝土矿反浮选脱硫脱硅研究*

彭磊红[1,2]，邓政斌[1]，唐云[1]，李红妍[1]

（1.贵州大学 矿业学院， 贵州 贵阳 550025；
2.浙江友山新材料科技有限公司长沙研究院， 湖南 长沙 410221）

摘要：贵州某高硫高硅铝土矿采用反浮选进行脱硫脱硅，分析了磨矿细度、pH调整剂、活化剂、捕收剂、起泡剂和抑制剂等对浮选脱硫脱硅效果的影响，确定了该铝土矿浮选脱硫脱硅的最佳试验条件。研究结果表明：原矿在磨矿细度－0.074 mm占比为75.00%、碳酸钠用量为1 500 g/t、硫酸铜用量为100 g/t、混合捕收剂用量为300 g/t、起泡剂用量为84 g/t时，原矿经过“一粗一精两扫”的反浮选脱硫闭路试验处理，得到产率为79.27%、脱硫率为85.58%、含硫量为0.31%的脱硫铝精矿；脱硫铝精矿在磨矿细度－0.074 mm占比为88.00%、碳酸钠用量为600 g/t、可溶性淀粉用量为200 g/t、捕收剂Y28用量为525 g/t时，经过“一粗一精两扫”的反浮选脱硅闭路试验处理，得到的铝精矿产率为64.21%、Al_2O_3回收率为68.46%、Al_2O_3品位为59.37%、铝硅比为5.83、含硫量为0.32%。

关键词：高硫高硅铝土矿；反浮选；脱硫；脱硅

中图分类号：TD923　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2025)04-0257-09

Study on Desulphurization and Desilication of High-Sulfur and High-Silicon Bauxite Mine by Reverse Flotation in Guizhou

PENG Leihong[1,2], *DENG Zhengbin*[1], *TANG Yun*[1], *LI Hongyan*[1]

(1.Mining College of Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China;
2.Changsha Research Institute, Zhejiang Youshan New Material Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410221, China)

Abstract: A high-sulfur and high-silicon bauxite mine in Guizhou was treated with reverse flotation for desulphurization and desilication. The effects of grinding fineness, pH adjuster, activator, collector, foaming agent and inhibitor on flotation desulphurization and desilication were analyzed, and the optimal experimental conditions for flotation desulphurization and desilication of the bauxite mine were determined. The research results show that when the grinding fineness of the raw ore is －0.074 mm accounting for 75.00%, the dosage of sodium carbonate is 1 500 g/t, the dosage of copper sulfate is 100 g/t, the dosage of mixed collector is 300 g/t, and the dosage of foaming agent is 84 g/t, the raw ore is subjected to a closed-circuit test of reverse flotation desulphurization with “one coarse, one fine and two sweeps”, and the desulphurized aluminum concentrate with a yield of 79.27%, a desulphurization rate of 85.58% and a sulfur content of 0.31% is obtained. When the grinding fineness of desulphurized aluminum concentrate is －0.074 mm accounting for 88.00%, the dosage of sodium carbonate is 600 g/t, the dosage of soluble starch is 200 g/t, and the dosage of Y28 collector is 525 g/t, the reverse flotation desilication closed-circuit test of “one coarse, one fine and two sweeps” is carried out, and the aluminum concentrate yield is 64.21%, the Al_2O_3 recovery rate is 68.46%, the Al_2O_3 grade is 59.37%, the aluminum silicon ratio is 5.83, and the sulfur content is 0.32%.

Key words: High-sulfur and high-silicon bauxite mine, Reverse flotation, Desulphurization, Desilication

0 引言

我国铝土矿储量占世界铝土矿储量的3%，属于铝资源相对缺乏的国家[1-2]，对外依存度较高[3-4]。我国铝土矿主要分布在山西、广西、贵州、河南，主要特点为储量少、质量差、加工难度大。铝土矿硫含量和硅含量过高会降低氧化铝产品质量，增加碱耗[5]，缩短设备寿命，堵塞管道，以及降低赤泥沉降性能[6-9]。高硫高硅铝土矿生产氧化铝时需要进行脱硫脱硅处理。

目前，铝土矿脱硫技术主要有焙烧法脱硫[10]、添加脱硫剂法脱硫[11]、微生物法脱硫[12]、浮选法脱硫[13]。焙烧法脱硫存在能耗高和产生污染气体的缺点，添加脱硫剂会增大生产成本，同时影响产品质量；

* **收稿日期**：2024-05-11
基金项目：贵州省科技计划项目(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:zbdeng@gzu.edu.cn

微生物法脱硫存在选择菌株困难、驯化时间长、浸出脱硫效率低等问题。铝土矿脱硅方法主要有化学法脱硅[14]、生物法脱硅[15]和浮选法脱硅[16],化学法脱硅能耗高、碱耗量较大,生物法脱硅菌株筛选困难、培养周期长。浮选法脱硫脱硅具有工艺简单、高效环保、成本低廉的特点[17-18]。在铝土矿浮选脱硫和脱硅研究中,以浮选工艺和药剂的研究为重点。铝土矿中的含硫矿物主要是黄铁矿,黄铁矿的天然可浮性较好,所以浮选法脱硫的浮选工艺以反浮选法为主,捕收剂主要是黄药,同时研发出了较多效果良好的新型脱硫药剂,如 ZBD[6]、BKS-1[19]、NCs[20]、PG-20[21]、BA-1[22]。在浮选脱硅研究中主要采用正浮选,捕收剂主要包括油酸、塔尔油、中性油、十二烷基苯磺酸钠等[23],反浮选捕收剂主要有伯胺、酰胺和季胺等[24]。正浮选脱硅时浮选药剂用量大、选择性差,精矿上浮量较大,后期压滤脱水困难,不符合浮选中"浮少抑多"的选矿原则,高硫高硅铝土矿采用反浮选脱硫脱硅的研究较少。本文针对贵州某高硫高硅铝土矿采用反浮选进行脱硫脱硅,并对影响浮选脱硫脱硅效果的各因素进行优化,确定了适合该铝土矿的浮选脱硫脱硅条件,为实现高硫高硅铝土矿资源利用提供参考。

1 矿石性质及试验方法

1.1 矿石性质

对原矿进行化学多元素分析和主要矿物组成分析,分析结果分别见表 1 和表 2。

表 1 原矿化学多元素分析结果

Table 1 Results of chemical multi-element analysis of raw ore %

Al_2O_3	SiO_2	S	K_2O	MgO	TiO_2	CaO	BaO	Na_2O	Fe_2O_3	灼减
55.69	14.27	1.71	2.34	1.69	2.75	2.00	0.18	0.07	5.68	13.62

表 2 原矿主要矿物组成分析结果

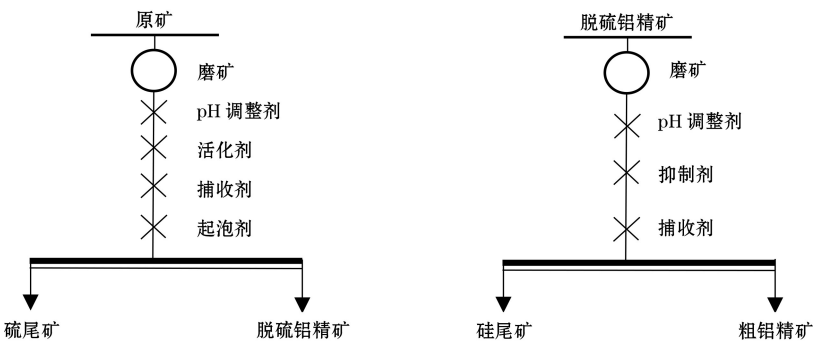
Table 2 Analysis results of mineral composition of raw ore %

一水硬铝石	白云母	高岭石	白云石	锐钛矿	金红石	黄铁矿
54.00	22.26	6.50	9.60	2.20	0.70	3.64

由表 1 结果可知,原矿中的主要成分 Al_2O_3 含量为 55.69%、SiO_2 含量为 14.27%,铝硅比为 3.90,S 含量为 1.71%,属于高硫高硅铝土矿。由表 2 结果可知,原矿中的主要矿物成分有一水硬铝石、白云母、白云石、高岭石和黄铁矿,同时还有少量的锐钛矿和金红石。其中主要的含铝矿物为一水硬铝石,硫矿物为黄铁矿,含硅矿物为白云母和高岭石。

1.2 试验方法

取矿样 200.00 g,磨矿后使用浮选机进行浮选,浮选流程见图 1。矿浆加入浮选槽后依次加入调整剂、捕收剂、起泡剂,浮选脱硫脱硅的泡沫产品分别为硫尾矿和硅尾矿,将浮选产品压滤、烘干、称量、制样后分析其含量,计算浮选产品的回收率和品位。



(a) 脱硫试验流程 (b) 脱硅试验流程

图 1 浮选试验流程

Fig.1 Flow of floatation test

2 结果与讨论

2.1 脱硫条件试验

2.1.1 磨矿细度对浮选脱硫的影响

磨矿细度直接影响矿物之间的单体解离度,矿物的单体解离是实现矿物分离的重要条件,故磨矿细度直接决定矿物分离效果[25]。为了探索出最佳的磨矿细度,进行磨矿细度试验,试验条件:捕收剂丁基黄药用量为 300 g/t,活化剂硫酸铜用量为 200 g/t,起泡剂松醇油用量为 84 g/t,考察磨矿细度对

脱硫效果的影响,结果见图 2。

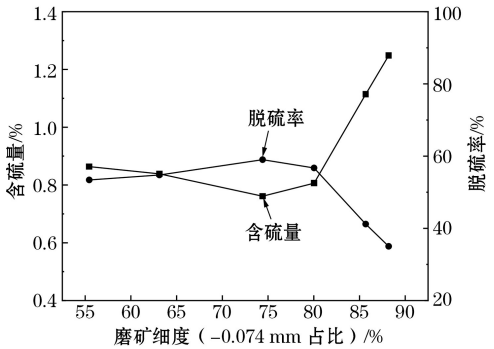


图 2 磨矿细度对浮选脱硫的影响

Fig.2 Effect of grinding fineness on flotation desulphurization

随着磨矿细度(-0.074 mm 含量)的增加,脱硫铝精矿中的含硫量变化趋势是先减小后增大,脱硫率先增大后减小。其主要原因是在磨矿细度较粗时,一水硬铝石与黄铁矿单体解离度不断增加,矿物比表面积较大,有利于捕收剂与矿浆中的黄铁矿发生吸附,这对于黄铁矿的浮选有利;磨矿细度较细时,细粒级含量增加,矿泥会吸附在黄铁矿表面,导致浮选药剂很难捕捉到黄铁矿,从而造成脱硫效果差。综上所述,磨矿细度-0.074 mm 占比为 75.00% 时脱硫效果最佳,此时脱硫铝精矿脱硫率为 59.03%,含硫量为 0.75%。

2.1.2 pH 调整剂用量对浮选脱硫的影响

试验中采用碳酸钠为矿浆 pH 调整剂,设置磨矿细度-0.074 mm 占比为 75.00%,捕收剂丁基黄药用量为 300 g/t,活化剂硫酸铜用量为 200 g/t,起泡剂松醇油用量为 84 g/t,考察了碳酸钠用量对浮选脱硫的影响,结果见图 3。

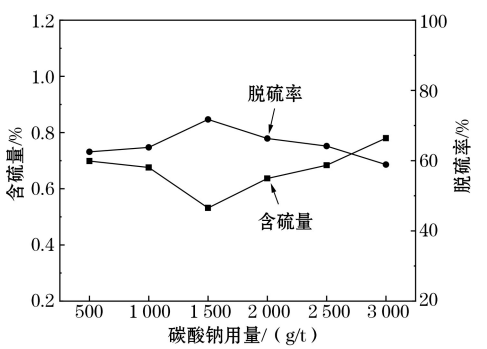


图 3 碳酸钠用量对浮选脱硫的影响

Fig.3 Effect of sodium carbonate dosage on flotation desulfurization

随着碳酸钠用量增加,含硫量变化趋势是先降低后升高,脱硫率则先升高后降低,其原因可能为:碳酸钠可以为铝土矿脱硫提供碱性的选矿环境,对矿泥有分散作用[26],减小矿石中高岭石、白云母等黏土矿物对脱硫的影响。综合考虑,确定碳酸钠用量为 1 500 g/t,此时矿浆溶液 pH 为 9.12,脱硫铝精矿脱硫率为 71.74%,含硫量为 0.53%。

2.1.3 活化剂用量对浮选脱硫的影响

设置磨矿细度-0.074 mm 占比为 75.00%,pH 调整剂碳酸钠用量为 1 500 g/t,捕收剂丁基黄药用量为 300 g/t,起泡剂松醇油用量为 84 g/t,考察了活化剂硫酸铜用量对浮选脱硫的影响,结果见图 4。

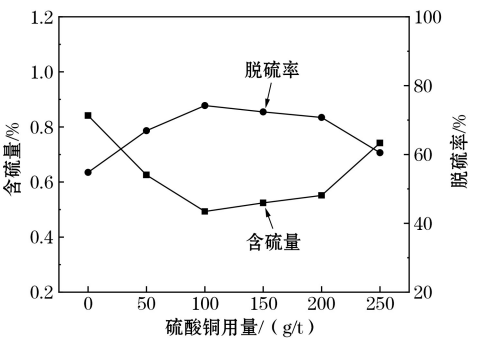


图 4 硫酸铜用量对浮选脱硫的影响

Fig.4 Effect of copper sulfate dosage on flotation desulphurization

随着硫酸铜用量的增加,脱硫铝精矿含硫量先降低后升高,脱硫率先升高后降低。随着硫酸铜用量逐渐增加,黄铁矿表面活性不断增强,从而强化捕收剂对黄铁矿的捕收能力;但是当硫酸铜用量过高时,会消耗大量的捕收剂,导致黄铁矿脱出率降低[27]。综合考虑,确定硫酸铜用量为 100 g/t 时脱硫效果最佳,脱硫铝精矿脱硫率为 74.20%,含硫量为 0.49%。

2.1.4 捕收剂种类及用量对浮选脱硫的影响

设置磨矿细度-0.074 mm 占比为 75.00%,pH 调整剂碳酸钠用量为 1 500 g/t,活化剂硫酸铜用量为 100 g/t,起泡剂松醇油用量为 84 g/t,分别以乙基黄药、丁基黄药、戊基黄药、丁铵黑药、丁基黄药与丁铵黑药(8∶2)的混合捕收剂为脱硫捕收剂开展试验,考察捕收剂种类及用量对浮选脱硫的影响,试验结果见表 3。

根据表 3 可知,丁基黄药与丁铵黑药的混合捕收剂相较于 4 种单一捕收剂的脱硫效果更好,这是

因为不同捕收剂在矿物表面的吸附位点不同,而混合捕收剂可以增加其吸附位点,加强矿物的上浮率[28]。随着混合捕收剂的用量不断增加,脱硫铝精矿的含硫量变化趋势是先减少后增加,脱硫率先增加再减少,综上,混合捕收剂的用量为 300 g/t 时脱硫效果最好。此时脱硫铝精矿的脱硫率为 79.23%,含硫量为 0.42%。

表 3 捕收剂种类及用量对浮选脱硫的影响

Table 3 Effect of collector type and dosage on flotation desulphurization

捕收剂种类	用量/(g/t)	含硫量/%	脱硫率/%
乙基黄药	300	0.68	63.90
丁基黄药	300	0.49	74.20
戊基黄药	300	0.81	56.58
丁铵黑药	300	0.47	77.36
丁基黄药+丁铵黑药	225	0.51	74.45
丁基黄药+丁铵黑药	300	0.42	79.23
丁基黄药+丁铵黑药	375	0.51	74.77

2.1.5 起泡剂用量对浮选脱硫的影响

设置磨矿细度-0.074 mm 占比为 75.00%,pH 调整剂碳酸钠用量为 1 500 g/t,活化剂硫酸铜用量为 100 g/t,混合捕收剂用量为 300 g/t,探究起泡剂松醇油用量对脱硫效果的影响,试验结果见图 5。

由图 5 可知,松醇油的用量超过 84 g/t 后,脱硫铝精矿的含硫量和脱硫率变化较小。其原因为:随着松醇油的用量不断增加,矿浆中产生的泡沫也在不断增加,气泡夹带作用增强,同时还会增加矿物的疏水性,导致脱硫铝精矿的产率不断下降,含硫量增加,脱硫率减小。综合考虑,起泡剂松醇油的用量为 84 g/t 时脱硫效果最佳,此时脱硫铝精矿的脱硫率为 79.23%,含硫量为 0.42%。

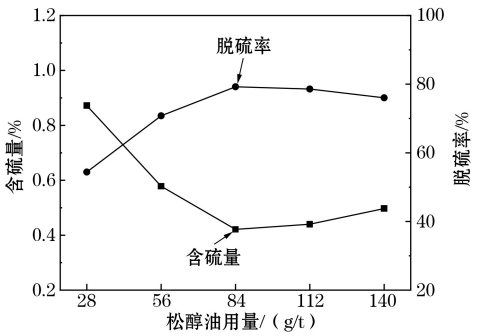


图 5 松醇油用量对浮选脱硫的影响

Fig.5 Effect of terpineol oil dosage on flotation desulfurization

2.1.6 脱硫开路试验

在脱硫的最佳试验条件下进行开路试验,试验流程及药剂制度见图 6,结果见表 4。由表 4 可知,经过"一粗一精两扫"的开路试验得到的脱硫铝精矿产率为 79.27%,脱硫率为 85.58%,含硫量为 0.31%,脱硫效果显著。

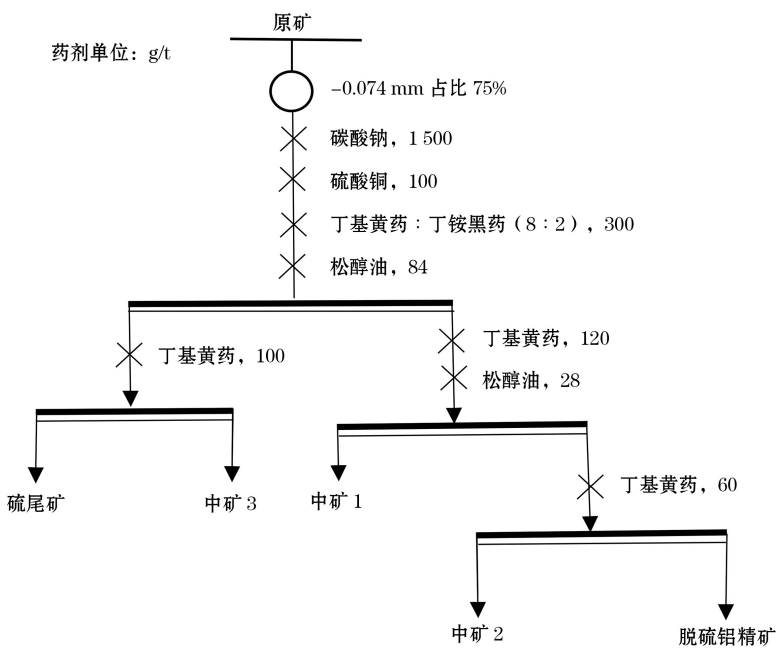


图 6 脱硫开路试验流程

Fig.6 Flow of desulphurization open circuit test

表 4 脱硫开路试验结果

Table 4 Results of desulphurization open circuit test

产品	产率/%	品位/%			铝硅比	回收率/%		
		Al_2O_3	S	SiO_2		Al_2O_3	S	SiO_2
脱硫铝精矿	79.27	57.53	0.31	12.89	4.46	81.90	14.42	71.61
中矿 1	4.77	53.28	2.08	18.81	2.83	4.42	5.80	6.28
中矿 2	1.65	51.68	1.68	15.62	3.31	1.58	1.62	1.81
中矿 3	5.52	51.69	1.52	32.79	1.58	5.12	14.63	12.68
硫尾矿	8.79	44.25	14.25	12.36	3.58	6.98	63.53	7.62
原矿	100.00	55.69	1.71	14.27	3.90	100.00	100.00	100.00

2.2 脱硫铝精矿脱硅试验

2.2.1 磨矿细度对浮选脱硅的影响

为探究脱硫铝精矿在浮选时的磨矿细度对浮选脱硅的影响,进行磨矿细度试验,设置胺类捕收剂 Y28 为 250 g/t,试验结果见图 7。

由图 7 可知,随着磨矿细度的不断增加,粗铝精矿的 Al_2O_3 回收率逐渐减小,铝硅比先增加后减小。综合考虑,磨矿细度−0.074 mm 占比为 88.00% 最适宜,在此条件下粗铝精矿的铝硅比为 4.92,Al_2O_3 的回收率为 61.38%。

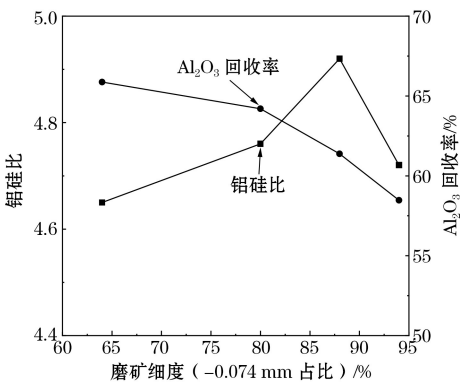


图 7 磨矿细度对浮选脱硅的影响

Fig.7 Effect of grinding fineness on flotation desilication

2.2.2 pH 调整剂用量对浮选脱硅的影响

为探索矿浆 pH 对浮选效果的影响,进行矿浆 pH 调整剂用量试验,试验条件:磨矿细度−0.074 mm 占比为 88.00%、捕收剂 Y28 为 250 g/t,考察了碳酸钠用量对浮选脱硅效果的影响,结果见图 8。

由图 8 可知,随着碳酸钠用量不断增加,粗铝精矿的产率和 Al_2O_3 回收率不断增加,铝硅比先增加后减小。综合考虑,碳酸钠的用量为 600 g/t 时最适宜,在此条件下粗铝精矿的铝硅比为 5.00,Al_2O_3 的回收率为 65.55%。

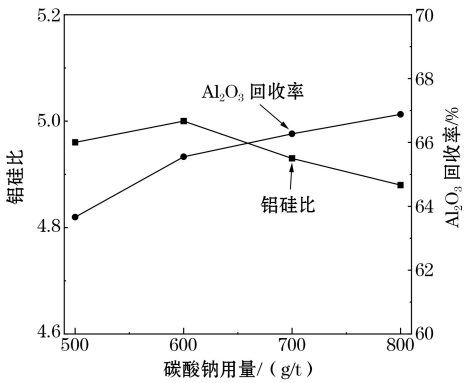


图 8 碳酸钠用量对浮选脱硅的影响

Fig.8 Effect of sodium carbonate dosage on flotation desilication

2.2.3 抑制剂用量对浮选脱硅的影响

在试验中发现,丁基黄药与丁铵黑药混合捕收剂在选矿过程中具有较好的起泡性能,用量大时选择性较差,同时脱硫过程中加入松醇油带来的夹带影响和矿浆泥化导致 Al_2O_3 的回收率降低。试验中通过添加抑制剂来减轻这种情况,进行抑制剂(可溶性淀粉)用量试验,试验条件:磨矿细度−0.074 mm 占比为 88.00%、碳酸钠用量为 600 g/t、捕收剂用量为 250 g/t,结果见图 9。

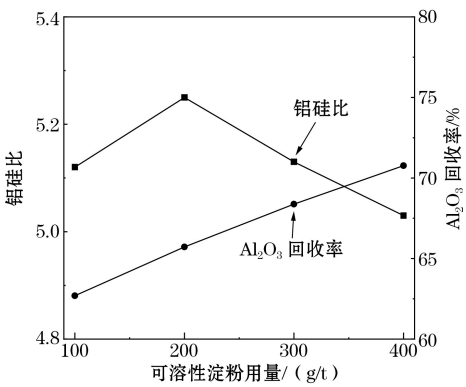


图 9 可溶性淀粉用量对浮选脱硅的影响

Fig.9 Effect of soluble starch dosage on flotation desilication

由图 9 可知,随着可溶性淀粉用量的不断增加,粗铝精矿的产率和 Al_2O_3 回收率不断增加,铝硅比先增加后减小。综合考虑,可溶性淀粉的用量为 200 g/t 时最适宜,在此条件下粗铝精矿的铝硅比为 5.25,Al_2O_3 的回收率为 65.72%。

2.2.4 捕收剂用量对浮选脱硅的影响

为考察捕收剂(Y28)用量对浮选脱硅效果的影响,进行捕收剂用量试验,试验条件:磨矿细度 −0.074 mm 占比为 88.00%、碳酸钠用量为 600 g/t,可溶性淀粉用量为 200 g/t,结果见图 10。

由图 10 可知,随着捕收剂用量的不断增加,粗铝精矿的产率和 Al_2O_3 回收率不断减小,铝硅比先增加后减小。因而捕收剂的用量为 375 g/t 时最适宜,在此条件下粗铝精矿的铝硅比为 5.35,Al_2O_3 的回收率为 64.60%。

2.2.5 脱硅开路试验

经过前期的条件试验可知,该药剂对于矿石的脱硅效果较为显著。在脱硅的最佳试验条件下进行开路试验,试验流程及药剂制度见图 11,结果见表 5。

对脱硫铝精矿进行如图 11 所示的开路试验,可以得到产率为 48.52%、含硫量为 0.32%、Al_2O_3 品位为 62.04%、铝硅比为 6.29、Al_2O_3 回收率为 54.07%的铝精矿,浮选效果较好。

2.3 闭路试验

脱硫和脱硅的浮选方法均为反浮选,对原矿进行如图 12 所示的闭路流程试验,试验结果见表 6。

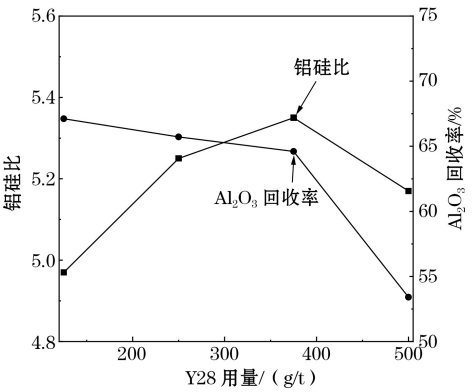


图 10 Y28 用量对浮选脱硅的影响

Fig.10 Effect of Y28 dosage on flotation desilication

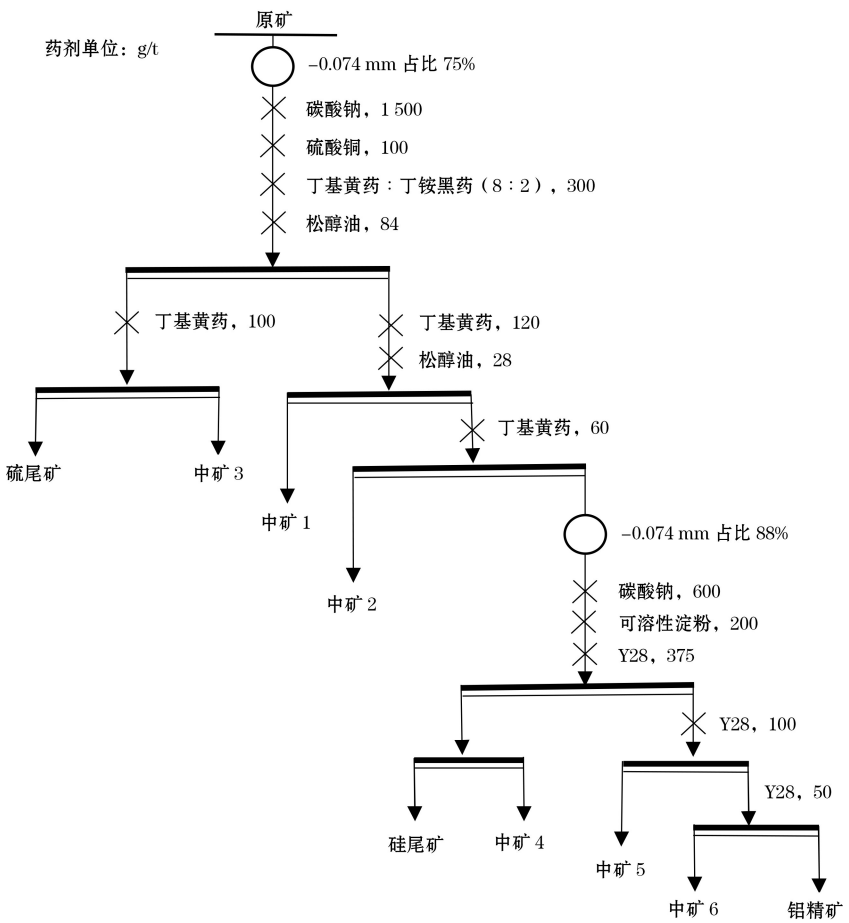


图 11 脱硅开路试验流程

Fig.11 Flow of desilication open circuit test

表 5　脱硅开路试验结果

Table 5　Results of desilication open circuit test

产品	产率/%	品位/%			铝硅比	回收率/%		
		Al_2O_3	S	SiO_2		Al_2O_3	S	SiO_2
铝精矿	48.52	62.04	0.32	9.86	6.29	54.07	9.07	33.55
中矿 1	4.77	53.28	2.08	18.81	2.83	4.42	5.80	6.28
中矿 2	1.65	51.68	1.68	15.62	3.31	1.58	1.62	1.81
中矿 3	5.52	51.69	1.52	32.79	1.58	5.12	14.63	12.68
中矿 4	9.67	52.12	0.03	9.06	5.75	9.07	0.15	6.14
中矿 5	9.33	49.28	0.32	16.84	2.93	8.25	1.75	11.00
中矿 6	2.62	48.59	0.27	14.23	3.41	2.28	0.41	2.61
硫尾矿	8.79	44.25	14.25	12.36	3.58	6.98	63.53	7.62
硅尾矿	9.13	50.24	0.57	28.64	1.75	8.23	3.04	18.31
原矿	100.00	55.69	1.71	14.27	3.90	100.00	100.00	100.00

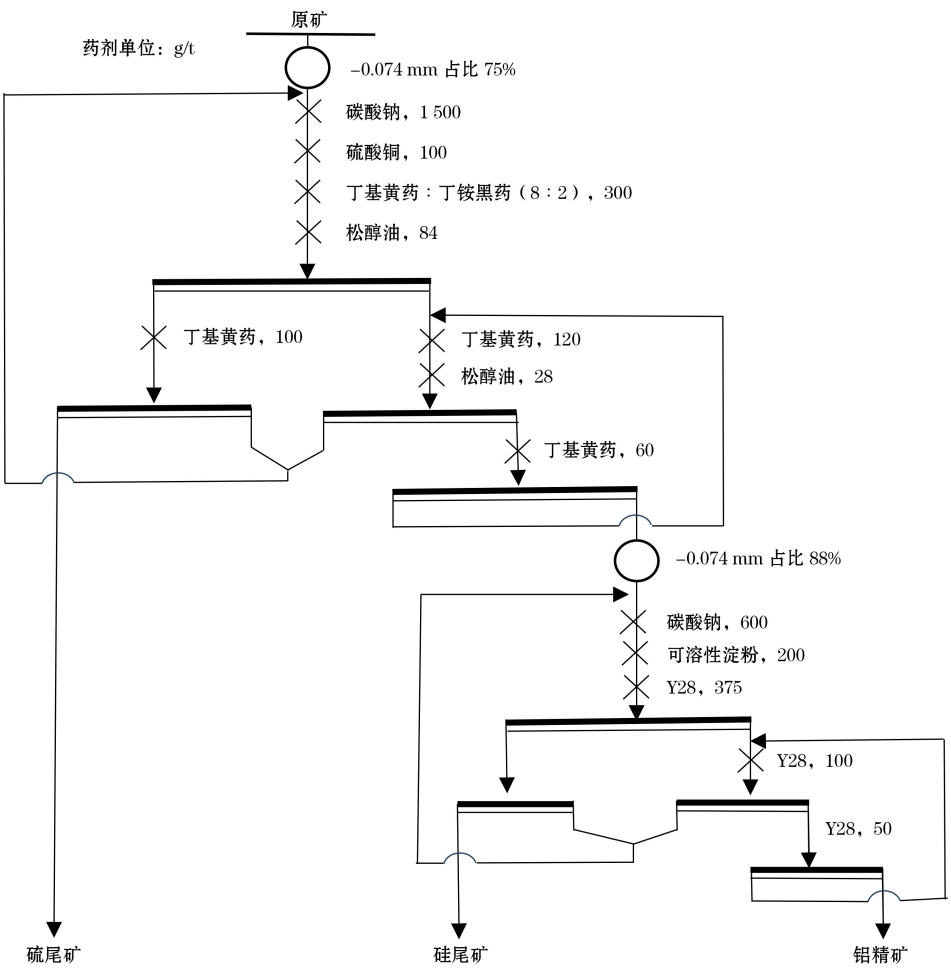


图 12　闭路试验流程

Fig.12　Flow of closed circuit test

表 6　闭路试验结果

Table 6　Results of closed circuit test

产品	产率/%	品位/%			铝硅比	回收率/%		
		Al_2O_3	S	SiO_2		Al_2O_3	S	SiO_2
铝精矿	64.21	59.37	0.32	10.19	5.83	68.46	11.91	45.85
硫尾矿	11.14	46.83	11.89	14.88	3.15	9.36	77.42	11.61
硅尾矿	24.65	50.10	0.74	24.62	1.03	22.18	10.67	42.54
合计	100.00	55.69	1.71	14.27	3.90	100.00	100.00	100.00

由图 12 和表 6 可知,原矿在磨矿细度－0.074 mm 占比为 75.00%、碳酸钠用量为 1 500 g/t、活化剂硫酸铜用量为 100 g/t、混合捕收剂用量为 300 g/t、起泡剂用量为 84 g/t 时,在“一粗一精两扫”的闭路流程条件下得到脱硫铝精矿;对脱硫铝精矿再磨至－0.074 mm 占比 88.00%、碳酸钠用量为 600 g/t、可溶性淀粉用量为 200 g/t、捕收剂 Y28 用量为 525 g/t 时,在“一粗一精两扫”的闭路流程条件下,得到的铝精矿产率为 64.21%、Al_2O_3 回收率为 68.46%、Al_2O_3 品位为 59.37%、铝硅比为 5.83、含硫量为 0.32%。

3 结论

本文考察了浮选脱硫过程中磨矿细度、碳酸钠和硫酸铜用量、捕收剂种类和用量、起泡剂用量及脱硫工艺流程对铝土矿脱硫的影响。在浮选脱硅过程中考察了磨矿细度、碳酸钠用量、抑制剂用量、捕收剂用量及脱硅工艺流程对铝土矿脱硅的影响。

(1) 原矿在磨矿细度－0.074 mm 占比为 75.00%、碳酸钠用量为 1 500 g/t、活化剂硫酸铜用量为 100 g/t、混合捕收剂丁基黄药∶丁铵黑药(8∶2)用量为 300 g/t、起泡剂用量为 84 g/t 时,采用“一粗一精两扫”的闭路流程,可得到产率为 79.27%、脱硫率为 85.58%、含硫量为 0.31%的脱硫铝精矿。

(2) 脱硫铝精矿在磨矿细度－0.074 mm 占比为 88.00%、碳酸钠用量为 600 g/t、可溶性淀粉用量为 200 g/t、捕收剂 Y28 用量为 525 g/t 时,采用“一粗一精两扫”的闭路流程,得到的铝精矿产率为 64.21%、Al_2O_3 回收率为 68.46%、Al_2O_3 品位为 59.37%、铝硅比为 5.83、含硫量为 0.32%。

参考文献(References):

[1] 刘玉林,程宏伟.我国铝土矿资源特征及综合利用技术研究进展[J].矿产保护与利用,2022,42(6):106-114.
LIU Yulin, CHENG Hongwei. Research progress on characteristics and comprehensive utilization of bauxite resource in China [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2022,42(6):106-114.

[2] 陈喜峰.中国铝土矿资源勘查开发现状及可持续发展建议[J].资源与产业,2016,18(3):16-22.
CHEN Xifeng. Exploration and sustainable development suggestions for China's bauxite resource[J]. Resources & Industries,2016,18(3):16-22.

[3] 魏力.提高铝资源保障能力的战略思考[J].矿产勘查,2023,14(10):1825-1830.
WEI Li. Strategic thinking on improving the ability of aluminum resource security[J]. Mineral Exploration,2023,14(10):1825-1830.

[4] 杨卓,刘如明,张治华,等.贵州某高硫铝土矿反浮选脱硫试验[J].金属矿山,2018(2):89-93.
YANG Zhuo, LIU Ruming, ZHANG Zhihua, et al. Experiment on reverse flotation desulfurization of a high sulfur bauxite from Guizhou[J]. Metal Mine, 2018(2): 89-93.

[5] 姜元军,万明.氧化铝生产工艺研究[J].世界有色金属,2021(17):175-176.
JIANG Yuanjun, WAN Ming. Study on alumina production process[J]. World Nonferrous Metals,2021(17):175-176.

[6] 姚杰,张建强,张站云,等.重庆高硫铝土矿反浮选脱硫试验研究[J].轻金属,2021(3):1-4.
YAO Jie, ZHANG Jianqiang, ZHANG Zhanyun, et al. Experimental study on reverse flotation desulfurization of high-sulfur bauxite in Chongqing[J]. Light Metals, 2021(3):1-4.

[7] 彭磊红,邓政斌,唐云,等.高硫铝土矿脱硫技术研究进展[J].湿法冶金,2023,42(5):443-449.
PENG Leihong, DENG Zhengbin, TANG Yun, et al. Research progress on desulfurization technology of high sulfur bauxite[J]. Hydrometallurgy of China,2023,42(5): 443-449.

[8] 姚杰,张建强,马俊伟,等.贵州某高硫铝土矿浮选脱硫提质试验研究[J].轻金属,2024(3):1-4.
YAO Jie, ZHANG Jianqiang, MA Junwei, et al. Experimental study on flotation desulfurization and quality improvement of a high-sulfur bauxite in Guizhou province [J]. Light Metals,2024(3):1-4.

[9] 刘中原,张站云,马俊伟,等.河南某地区煤下高硫铝土矿浮选试验研究[J].轻金属,2023(11):8-13.
LIU Zhongyuan, ZHANG Zhanyun, MA Junwei, et al. Experimental study on flotation of high-sulfur bauxite under coal in Henan[J]. Light Metals,2023(11):8-13.

[10] 王明明,酒少武,杨爱武,等.高硫铝土矿悬浮态焙烧脱硫试验研究[J].非金属矿,2022,45(5):6-9.
WANG Mingming, JIU Shaowu, YANG Aiwu, et al. Experimental study on desulphurization of high sulfur bauxite by suspension roasting[J]. Non-Metallic Mines, 2022,45(5):6-9.

[11] 刘永轶.化学氧化法处理高硫铝土矿生产氧化铝实践[J].有色金属(冶炼部分),2022(8):51-58.
LIU Yongyi. Plant practice of producing alumina from high sulfur bauxite by chemical oxidation method[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy),2022(8):51-58.

[12] 李寿朋,王瑞,郭玉婷,等.中等嗜热菌群协同脱除高硫铝土矿中的硫[J].中国有色金属学报,2016,26(11):2393-2402.
LI Shoupeng, WANG Rui, GUO Yuting, et al. Bio-desulfurization of high-sulfur bauxite by designed moderately thermophilic consortia[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2016,26(11):2393-2402.

[13] CHENG Gan, ZHANG Jianqiang, SU Huanhuan, et al. Synthesis and characterization of a novel collector for the desulfurization of fine high-sulfur bauxite via reverse flotation[J]. Particuology,2023,79(1):64-77.

[14] 高威,张强,李莎.高硫高硅铝土矿的焙烧脱硫—碱浸脱硅[J].湿法冶金,2021,40(3):202-206.
GAO Wei, ZHANG Qiang, LI Sha. Roasting desulfurization-alkaline leaching desilication of high-sulfur and high-silicon bauxite[J]. Hydrometallurgy of China, 2021,40(3):202-206.

[15] WANG Qi, SHENG Xiafang, HE Linyan, et al. Improving bio-desilication of a high silica bauxite by two highly effective silica-solubilizing bacteria [J]. Minerals Engineering, 2018,128:179-186.

[16] CHANG Ziyong, SUN Chunbao, KOU Jue, et al. Experimental and molecular dynamics simulation study on the effect of polyacrylamide on bauxite flotation [J]. Minerals Engineering,2021,164(3):106810.

[17] 张站云,张建强,姚杰,等.山西古县某低品位铝土矿浮选脱硅实验研究[J].矿产综合利用,2021(3):88-92.
ZHANG Zhanyun, ZHANG Jianqiang, YAO Jie, et al. Experimental study on flotation desilication of a low-grade bauxite in Guxian, Shanxi[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2021(3):88-92.

[18] 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.

[19] 吴国亮,张建强,苏欢欢.煤下高硫铝土矿浮选脱硫工业试验研究[J].轻金属,2019(7):8-12.
WU Guoliang, ZHANG Jianqiang, SU Huanhuan. Industrial experimental study on desulfurization of high-sulfur bauxite under coal mines[J]. Light Metals,2019(7):8-12.

[20] CHENG Gan, ZHANG Jianqiang, SU Huanhuan, et al. A novel collector for high-sulfur bauxite flotation desulfurization [J]. Separation Science and Technology, 2023,58(1):86-100.

[21] 刘安荣,彭伟,刘洪波,等.贵州某铝土矿浮选脱硫脱硅试验研究[J].金属矿山,2020(8):102-106.
LIU Anrong, PENG Wei, LIU Hongbo, et al. Experimental study on flotation desulfurization and desilication of a bauxite in Guizhou[J]. Metal Mine,2020(8):102-106.

[22] 吴国亮,张建强,杜五星.西南某铝土矿同步脱硫脱硅浮选试验研究[J].矿产保护与利用,2020,40(1):93-98.
WU Guoliang, ZHANG Jianqiang, DU Wuxing. The experimental study on synchronous desulfurization and desilication flotation for the bauxite in southwest China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2020,40(1):93-98.

[23] 窦增文.西南地区某高泥堆积型铝土矿选矿试验研究[J].金属矿山,2022(7):193-197.
DOU Zengwen. Experimental study on beneficiation of a high mud accumulation type bauxite in southwestern district [J]. Metal Mine,2022(7):193-197.

[24] ZHANG Suhong, REN Jinting, WEN Yanlong, et al. Flotation separation of diaspore and kaolinite by using dodecanamide and cetyltrimethylammonium bromide as an effective mixed collector[J]. Minerals Engineering, 2022, 179:107434.

[25] 李绍英,赵留成,马晓东.贵州某高硫铝土矿浮选脱硫试验研究[J].轻金属,2020(11):1-3.
LI Shaoying, ZHAO Liucheng, MA Xiaodong. Experimental study on flotation desulfurization of a high-sulfur bauxite in Guizhou[J]. Light Metals,2020(11):1-3.

[26] 王鹏,王宝奎,石建军,等.低品位铝土矿选矿技术的优化[J].轻金属,2011(9):8-10.
WANG Peng, WANG Baokui, SHI Jianjun, et al. Technic optimizing of low-grade bauxite by ore dressing[J]. Light Metals,2011(9):8-10.

[27] 宋国君,邓久帅,先永骏,等.黄铁矿解抑活化机理研究现状及进展[J].矿物学报,2017,37(3):328-332.
SONG Guojun, DENG Jiushuai, XIAN Yongjun, et al. Derepression and activation of pyrite: a review[J]. Acta Mineralogica Sinica,2017,37(3):328-332.

[28] 杨帆,龙思思.捕收剂混合使用的协同效应综述[J].有色金属(选矿部分),2020(5):112-116.
YANG Fan, LONG Sisi. A review of synergy effect of using mixed collectors in flotation[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2020(5):112-116.