文章编号：1674－2869(2026)02－0133－07

花岗岩中石英多次反浮选分离探索试验

钟锦棒，程清蓉*，周　红，潘志权
武汉工程大学化学与环境工程学院，湖北 武汉 430205

摘　要：湖北某地磁选后花岗岩矿物的主要成分含量为：石英30.22%、钾长石28.59%、钠长石39.14%、其他矿物2.05%。采用十二胺与草酸混合液GDDA、油酸钠NaOL为捕收剂，航空煤油MY辅助下的分子自组装浮选体系，探讨了药剂与矿物作用后zeta电位的变化、矿物团聚情况，通过响应面优化得到最佳浮选条件。结果表明，煤油的选择团聚作用使得石英和长石得以有效分离，石英长石分离最佳条件为：在矿浆pH为3时，GDDA用量700 g/t、NaOL用量20 g/t、MY用量24 L/t，在该条件下长石和石英分离率可达85.18%。实际矿物经优化的一粗二精反浮选工艺处理后，可获得相对回收率92.26%，SiO_2含量99.32%的石英精矿。

关键词：花岗岩矿；反浮选；分子自组装；石英
中图分类号：TD923　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202303036

Separation of quartz from granite via multiple reverse flotations

ZHONG Jinbang, *CHENG Qingrong**, *ZHOU Hong*, *PAN Zhiquan*
School of Chemistry and Environmental Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: After magnetic separation, the main mineral composition of granite ore from a location in Hubei Province was determined as follows: quartz 30.22%, potassium feldspar 28.59%, albite 39.14%, and other minerals 2.05%. A molecular self-assembly flotation system was established using a mixture of dodecylamine and oxalic acid (GDDA) as the collector, sodium oleate (NaOL) as the auxiliary collector, and aviation kerosene (MY) as the agglomeration promoter. The variations in zeta potential and mineral agglomeration behavior due to reagent-mineral interactions were investigated, and the optimal flotation conditions were determined through response surface methodology. Results indicated that the selective agglomeration effect of kerosene effectively facilitated the separation of quartz from feldspar. Optimum separation conditions were achieved at a pulp pH of 3, with a GDDA dosage of 700 g/t, NaOL dosage of 20 g/t, and MY dosage of 24 L/t, under which the separation efficiency of quartz and feldspar reached 85.18%. After processing the actual ore through a reverse flotation flowsheet consisting of one roughing and two cleaning stages, a quartz concentrate with a relative recovery of 92.26% and SiO_2 content of 99.32% was achieved.

Keywords: granite ore; reverse flotation; molecular self-assembly; quartz

石英是地球表面分布最广的造岩矿物之一[1-2]，具有耐高温与腐蚀、热膨胀系数小、绝缘程度高、光学特性独特等特点，可应用于耐火材料、光伏、半导体等领域[3-4]，特别是高纯石英作为一种战略性非金属矿产资源，越来越受到关注[5]。高纯石英是由水晶、脉石英、花岗伟晶岩等矿石作为原料经提纯后的一种矿产品[6]。我国已查明晶体储量仅为29.2万t，储量小，矿区分散、开采难度

收稿日期：2023-03-31
基金项目：武汉工程大学研究生教育创新基金(CX2022414)
作者简介：钟锦棒，硕士研究生。Email：56704737@qq.com
***通信作者**：程清蓉，博士，教授。Email：chengqr383121@sina.com
引文格式：钟锦棒，程清蓉，周红，等. 花岗岩中石英多次反浮选分离探索试验[J]. 武汉工程大学学报，2026，48(2)：133－139.

高[7]。脉石英矿体又呈不规则脉状，矿床规模小[8-9]。据我国《2021全国矿产资源储量统计表》，我国脉石英储量约为7 927.7万t，花岗岩储量大约为100亿t，相较于脉石英，花岗岩总量大，开采方便。

浮选是利用和处理复杂矿物最主要的方法[10]，是目前长石和石英分离最有效、最普遍的方法[11-12]，而一直以来石英与长石有效浮选分离也是非金属浮选领域的研究热点和难点[13]。浮选主要为有氟有酸法、无氟有酸法、无氟无酸法三种[14]，有氟有酸法即氢氟酸法，因其高污染性、无价格优势已不被工业生产采用。无氟有酸法是目前使用最为广泛，工业应用较为成熟的分离方法，目前主要集中在调整剂与阴阳离子组合捕收剂的合理搭配等方面[15-16]。胺类是长石与石英分离过程中常用的阳离子捕收剂，阴离子的捕收剂一般有石油磺酸钠、十二烷基磺酸钠、十二烷基硫酸钠、油酸钠等，在组合捕收剂中，若直接采用胺类捕收剂为阳离子捕收剂浮选分离长石与石英，由于二者的晶体结构和化学组成相似，捕收剂在捕收长石的同时也会捕收石英，造成长石与石英的浮选分离困难[13]。煤油在煤矿、钛铁矿浮选中应用较多，在石英与长石浮选中鲜有报道。本文从大体量的花岗岩入手，采用无氟有酸法、以非极性油配合阴阳离子捕收剂，经多次反浮选联用对花岗岩中长石和石英的分离进行了探索实验，为高纯石英砂原料的获取与普通石英砂的供应提供一些思路。

1 实验部分

1.1 矿 样

石英纯矿物取至湖北某石英矿区，长石纯矿物购于兴泰长石粉厂，花岗岩矿物获取于湖北某花岗岩矿区。矿物进行X射线衍射(X-ray diffraction，XRD)分析，如图1所示。花岗岩矿物XRD、X射线荧光光谱法(X-ray fluorescence，XRF)、光学显微镜(optical microscope，OM)分析结果如图2，表1所示。

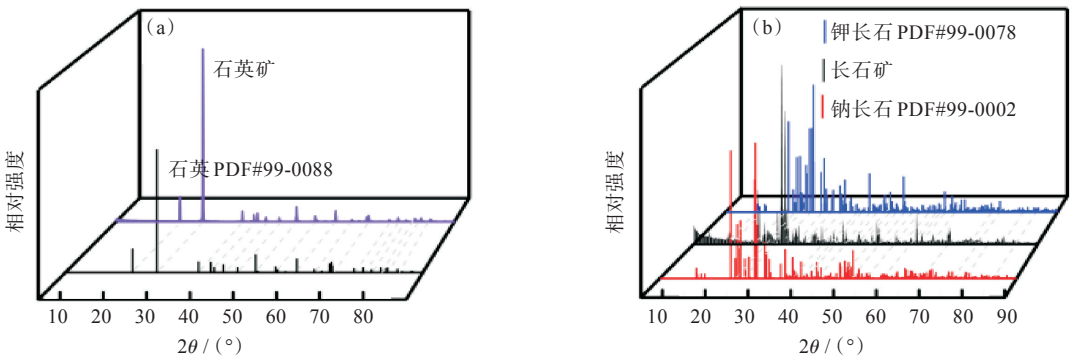

图1 纯矿物XRD：(a)石英矿，(b)长石矿

Fig. 1 XRD patterns of pure minerals：(a) quartz，(b) feldspar

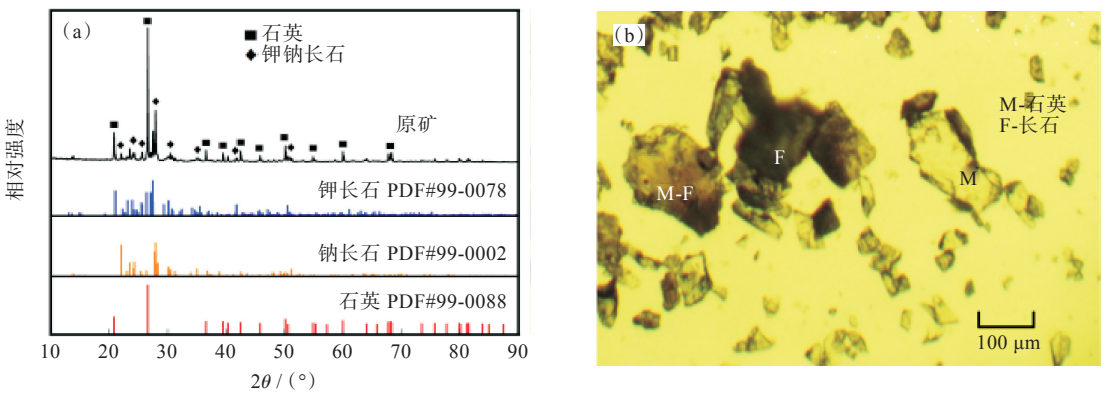

图2 花岗岩矿物：(a)XRD图，(b)显微镜图

Fig. 2 (a) XRD pattern，(b) micrograph of granite minerals

表1 花岗岩矿物XRF分析结果

Table 1 XRF analysis results of granite mineral %

成分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	MgO	P_2O_5	SO_3	CaO	Ti_2O
质量分数	75.595	14.083	0.147	4.830	4.603	0.064	0.094	0.038	0.412	0.032

由图1可知，纯矿物较为纯净，说明用这2种矿物能代表纯石英和纯长石矿物。由图2与表1可得，该花岗岩中主要有石英和长石两种矿物，且二氧化硅含量仅75.595%，结合该矿XRD分析可得原矿的物质组成及其含量：石英30.22%、钾长石28.59%、钠长石39.14%、其他2.05%。

1.2　药　剂

盐酸（化学纯）、草酸（化学纯）、油酸钠（化学纯）、十二胺（化学纯）、航空煤油（工业品）。

1.3　仪　器

XRF实验室单槽浮选机（吉林省探矿机械厂）、XFG实验室用挂槽浮选机（绍兴伟邦矿机制造有限公司）。

1.4　十二胺草酸混合液（GDDA）的制备

将1.0 g十二胺、0.2 g盐酸加入至98.8 g pH为3的草酸溶液中，制成质量分数为1%的十二胺和草酸混合液。

1.5　方　法

1.5.1　*纯矿物浮选试验*　在分析天平上准确称取（5.00±0.05）g的矿样倒入装有20 mL蒸馏水的浮选槽中，用草酸调节矿浆pH，再加入药剂，浮选机转速为1 800 r/min，持续搅拌30 s，充气浮选，刮泡2 min，将槽底产品烘干，称量，计算回收率。

1.5.2　*花岗岩矿物浮选试验*　在分析天平上准确称取（100±1）g的矿样倒入装有400 mL蒸馏水的浮选槽中，用草酸溶液调节矿浆pH，再加入药剂，浮选机转速为1 800 r/min，持续搅拌30 s，充气浮选，刮泡2 min，将槽底产品烘干，称量，计算回收率。

2　结果与讨论

2.1　回归模型的建立与响应面分析

2.1.1　*回归模型的建立*　单因素试验法无法全面地进行优选[17]，故根据前期单因素试验结果中给出的GDDA用量、NaOL用量、MY用量三因素的三水平取值为自变量，石英与长石分离率为评价指标，由设计专家软件中BBD模型进行响应面试验，试验方案及响应值见表2。

通过设计专家软件对试验结果进行多元回归拟合，得到三元二次响应面方程为：

$$E = 3\,110A - 75\,437AB - 20\,445A^2 + 27.55AC + 915B + 2\,020BC - 355\,056B^2 + 12.51C - 3.87C^2 - 39.03$$

式中：A为GDDA添加量（g/t）、B为NaOL添加量（g/t）、C为MY添加量（L/t），Y为石英长与石纯矿物二者的分离率，见图3。

表2　试验设计方案及响应值

Table 2　Experimental design and corresponding response values

编号	因素			石英回收率/%	长石回收率/%	分离率/%
	A/(g/t)	B/(g/t)	C/(L/t)			
1	600	50	24	89.31	4.31	85.00
2	600	50	24	88.55	9.54	79.01
3	600	20	36	92.13	8.54	83.59
4	600	50	24	91.05	4.06	86.99
5	600	20	12	93.47	16.36	77.12
6	600	80	36	92.21	6.29	85.92
7	600	50	24	89.28	6.22	83.08
8	600	50	24	88.45	7.45	81.00
9	600	80	12	62.34	11.99	50.35
10	1 000	20	24	87.79	9.60	78.19
11	1 000	50	12	73.42	19.72	53.70
12	1 000	80	24	52.79	8.22	44.57
13	1 000	50	36	69.63	7.03	62.60
14	200	50	12	95.69	66.19	29.5
15	200	80	24	94.84	60.71	34.13
16	200	50	36	94.29	61.18	33.11
17	200	20	24	95.28	63.74	31.54

2.1.2　*模型可行性分析*　所得三元二次回归模型方差分析结果见表3。

对表3中数据结果进行分析及模型显著性检验。纯矿物分离率多元回归模型P值<0.001，表明所建模型极显著；失拟项为0.112 4，失拟项不显著，说明模型拟合程度较优[18-19]。模型校正相关系数R^2_{adj}为95.46%，说明响应值有95.46%变化源于试验变量，故用此模型分析和预测分离率的方法是可行的。

一次项方差A、B、C反映各因素对分离率的影响效应，A、B、C的P值分别为<0.000 1、0.004 3、0.004 6，表明GDDA用量是对二者分离率最主要的影响因素，NaOL、MY用量的影响次之，且影响程度由大到小依次为GDDA、NaOL、MY。AB、BC、AC代表因素两两交互的影响，交互影响的比较为$AB>BC>AC$。

2.1.3　*响应面3D模型图分析*　GDDA、NaOL和MY的用量对响应值影响效应及因素间交互作用的情况如图3所示。从图3可知，在因素水平范围内，分离率随着GDDA、NaOL和MY用量的增加先增加后减少。由图3（a）可知，GDDA用量为700 g/t时，NaOL用量为20 g/t时，分离率处于最大值附近。由图3（b，c）可知，控制NaOL与GDDA用量一定，增大MY用量可以提高分离率，当MY

表3 回归模型方差分析结果

Table 3 Analysis of variance (ANOVA) for the regression model

来源	平方和	f值	均方	F值	P值
模型	7 687.77	9	854.20	38.36	<0.000 1
A-GDDA	1 534.03	1	1534.03	68.89	<0.000 1
B-NaOL	384.62	1	384.62	17.27	0.004 3
C-MY	371.96	1	371.96	16.70	0.004 6
AB	327.79	1	327.79	14.72	0.006 4
AC	7.00	1	7.00	0.31	0.592 6
BC	211.70	1	211.70	9.51	0.017 7
A^2	4 505.85	1	4505.95	202.34	<0.000 1
B^2	42.99	1	42.99	1.93	0.207 3
C^2	130.89	1	130.89	5.88	0.045 8
残值	155.88	7	22.27		
失拟值	115.88	3	38.63	3.86	0.112 4
纯误差	40.01	4	10.00		
总和	7 843.65	16			

用量达到一定程度后,继续添加对分离率的影响不大,故MY用量在24 L/t左右比较合适。

2.1.4 响应面优化结果分析及验证实验 利用设计专家(Optimization)功能,通过约束MY用量为24 L/t,200 g/t<GDDA用量<1 000 g/t,20 g/t<NaOL用量<80 g/t,以最大分离率为目标,选择优化方案为:GDDA添加量为700 g/t,NaOL添加量为20 g/t,MY添加量为24 L/t,此时理论分离率达89.998%。以该条件对石英长石纯矿物进行浮选重复试验3次,计算分离率为85.18%,验证结果与预测值相差较小,因此判断响应面优化方案结果准确可靠。

2.2 花岗岩矿开路实验

2.2.1 响应面最优条件下实际矿物反浮选 在响应面分析法得到的最优条件下,对实际矿物花岗岩进行S1浮选试验,浮选流程见图4(a),试验结果见表4、6,S1尾矿是指S1尾矿1、2、3的混合矿。

前期测试已知原矿总体上是石英与长石的混合物,经反浮选后,从表6中可知,精矿SiO_2 98.19%与尾矿SiO_2 67.36%。由表6可知尾矿的成分属于质量较高的长石精矿,说明该试验对花岗岩中石英、长石的分离有效。表5中1上尾矿的回收率明显低于2上、3上尾矿,3上尾矿的回收率减少与槽中长石矿量的减少有关,1上尾矿的低回收率可能与矿石中的细泥物质有关,为了减少药剂用量,进一步提高长石石英品质,除该浮选流程外增加超声波清洗处理。

按照图4(b)流程进行S2浮选试验,S2试验结果如表5和表6所示,S1、S2石英精矿XRD分析如图5所示。

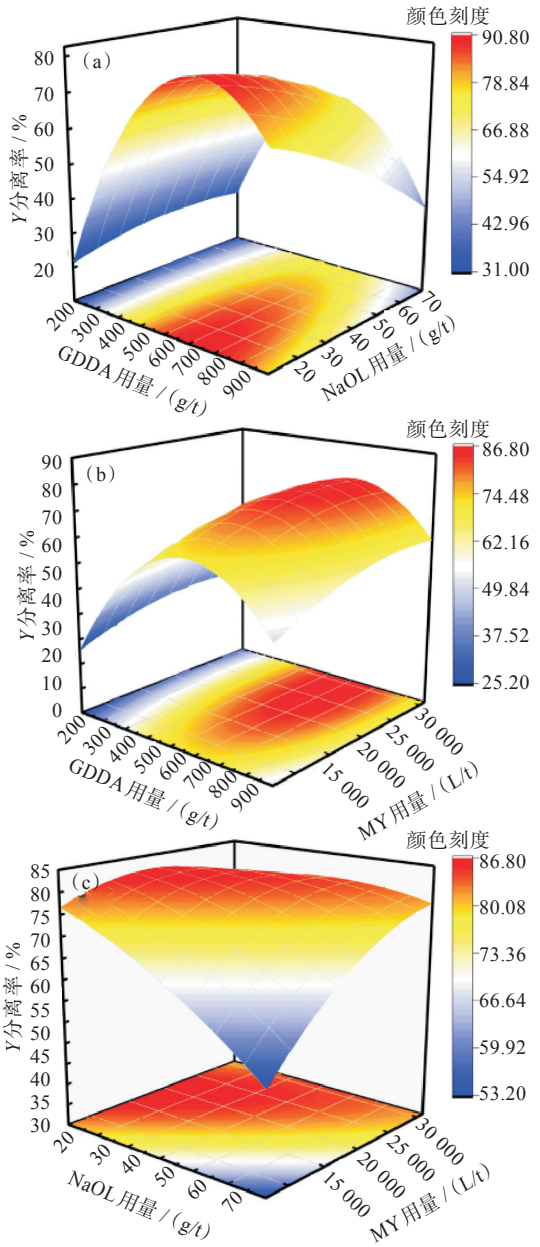

图3 GDDA、NaOL、MY两两交互响应面模型:(a) GDDA-NaOL,(b) GDDA-MY,(c) NaOL-MY

Fig. 3 Response surface plots for pairwise interactions of GDDA, NaOL, and MY: (a) GDDA-NaOL, (b) GDDA-MY, (c) NaOL-MY

由表5和表6可知,1尾矿中的SiO_2含量由64.65%上升至68.27%,回收率由12.29%上升至28.48%,可以看出在除泥后,捕收剂对长石的捕收能力变强。S2试验中3尾矿的SiO_2含量为81.07%,且回收率为6.11%,说明除泥后,花岗岩中长石去除得更彻底,精矿中SiO_2含量为99.32%。由图5可知,经过除泥后,S2精矿中看不到杂峰,而未除泥试验的S1精矿可以看到有长石的杂峰,说明除泥对石英精矿质量的提升有着重要的作用。

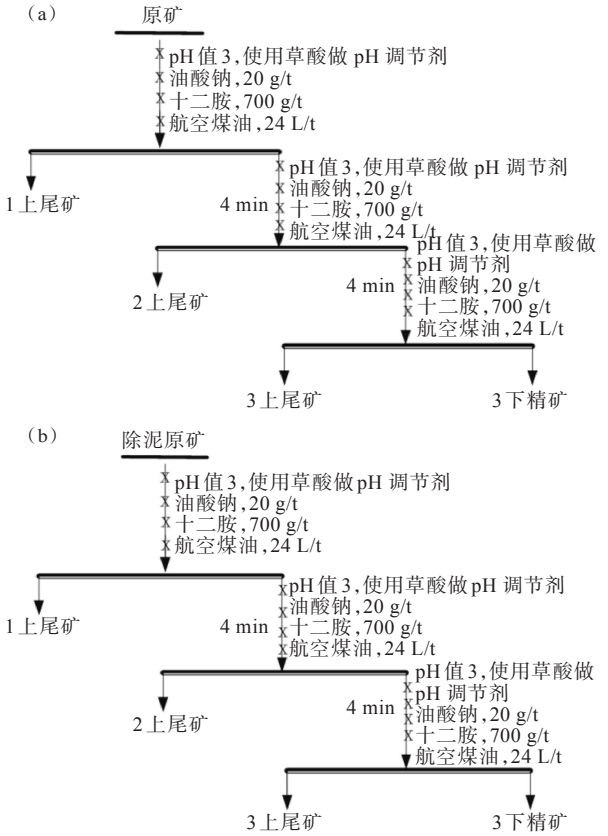

图4　实际矿物浮选流程：(a)S1浮选流程，(b)S2浮选流程

Fig. 4　Flotation processes for actual ore: (a) S1, (b) S2

表4　S1浮选结果

Table 4　Results of S1 flotation process　%

矿物	SiO_2质量分数	矿物回收率
花岗岩原矿	75.60	100.00
1上尾矿	64.65	12.29
2上尾矿	67.97	31.69
3上尾矿	68.30	19.06
石英精矿	98.19	34.67

表5　S2浮选结果

Table 5　Results of S2 flotation process　%

矿物	SiO_2质量分数	矿物回收率
原矿	75.60	100.00
1尾矿	68.27	28.48
2尾矿	68.33	32.32
3尾矿	81.07	6.11
3精矿	99.32	27.88

表6　S1、S2浮选流程的检测结果

Table 6　The detection results of S1 and S2 flotation processes　%

组别	精矿回收率	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	TiO_2
S1石英	34.67	98.19	0.99	0.011	0.39	0.30	0.004 3
S2石英	27.88	99.320 0	0.340 0	0.006 6	0.140 0	0.100 0	0.004 2
S1尾矿	63.04	67.36	15.00	0.15	6.29	5.42	0.024

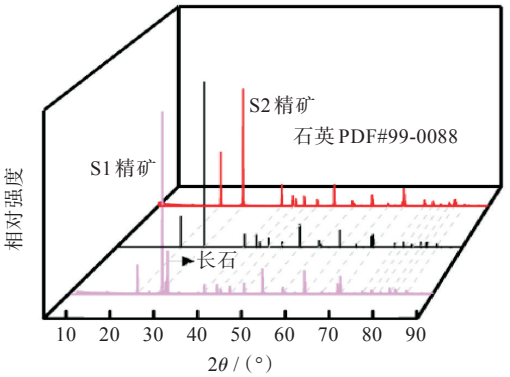

图5　S1和S2浮选流程的石英精矿XRD

Fig. 5　XRD patterns of quartz concentrates from S1 and S2 flotation processes

2.3　机理分析

2.3.1　zeta电位分析　以Zeta电位分析方法，研究了石英与长石中GDDA(700 g/t)、NaOL(20 g/t)、MY(24 L/t)之间静电相互作用的差异。不同pH值下纯物质的zeta电位测量值如图6所示，其中ALL代表3种组分同时加入。

由图6(a)可知，NaOL与MY对石英的电位位移影响不大，NaOL为阴离子捕收剂，石英带负电，负负相斥，而MY本身不带电，无论有无与石英作用，理论上都不会对电位变化产生较大影响。GDDA的加入可以使石英的电位产生明显的正移，这是因为在该实验条件下石英表面带负电，GDDA在酸性条件下以阳离子形式存在，通过静电吸附力被石英捕获。在3种物质同时加入时，石英电位的正移明显高于单独加入GDDA，并且能在很大pH区间都保持很大的正移，甚至随着pH的增大，正移程度越明显，说明在3种物质加入后，石英因为某种情况而导致吸附了更多的GDDA。由图6(b)中可知长石与3种物质作用的情况与石英非常相似，在3种物质的共同作用下，长石在静电力的作用下吸附了大量的GDDA，说明在该实验条件下，长石能够有效被捕收剂吸附，而这种吸附是长石得以被气泡带出的原因。

2.3.2　MY-石英相互作用分析　在NaOL(20 g/t)、GDDA(700 g/t)添加量下，矿浆浓度质量分数为5%的石英悬浊液中，图7(a,b,c)分别为未添加MY，图7(d,e,f)为额外添加MY(24 L/t)，在1 800 r/min的转速搅拌30 s后，石英在显微镜下观察结果如图7所示。

从图7可知，(d)相比于(a)有非常明显的团聚效果，(e)、(f)与(b)、(c)相比颗粒之间相连得更为紧密。说明MY加入后，能够起到很好的团聚作用。单因素浮选结果表明MY有很好的抑制石英

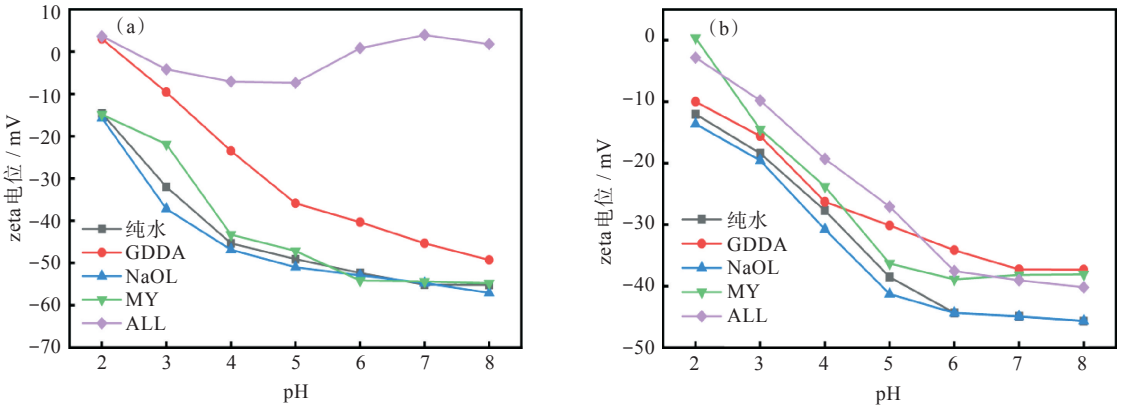

图6 纯矿物在不同条件下zeta电位随pH值变化的影响:(a)石英,(b)长石

Fig. 6 Zeta potential of pure minerals as a function of pH under different conditions: (a)quartz, (b)feldspar

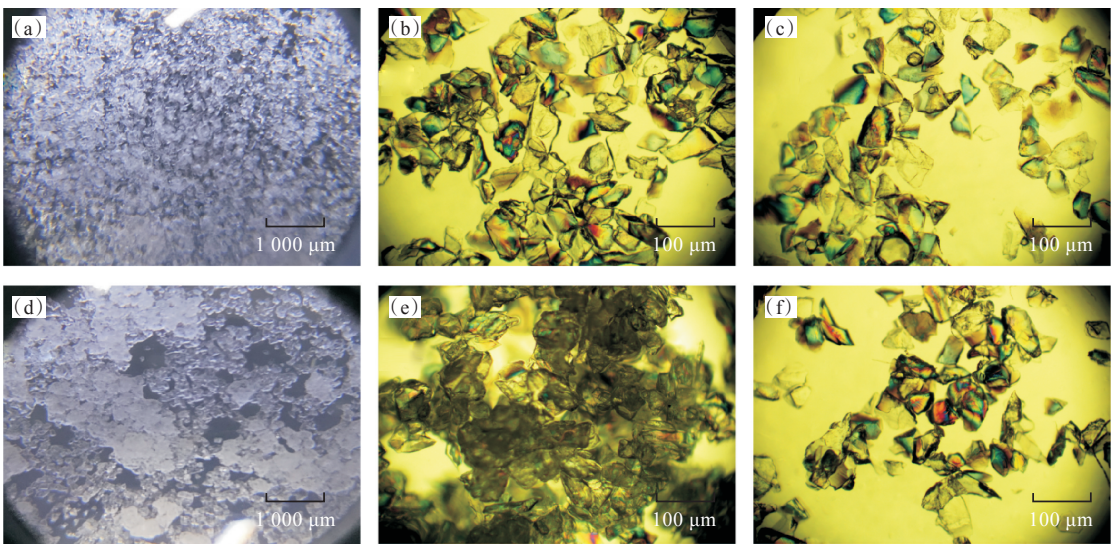

图7 MY-石英相互作用下石英团聚显微镜图:(a-c)未添加MY,(d-f)添加MY

Fig. 7 Microscopic images of quartz agglomeration with and without MY addition: (a-c) without MY, (d-f) with MY

上浮效果,推测可能是由于MY使得石英团聚,石英发生团聚后,裸露的表面积减少,吸附在裸露表面的捕收剂量变少,而自重不变,从而导致石英自重大于气泡的浮力,或者导致气泡破裂,从而使石英无法随着气泡上升至泡沫层,从而实现抑制石英上浮的作用。MY、GDDA与石英和捕收剂的作用机理简图如图8所示[20]。

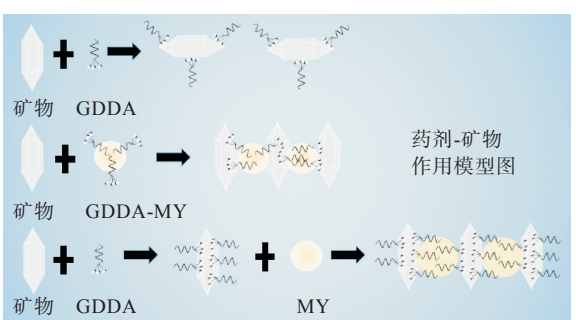

图8 石英与GDDA、MY作用模型

Fig. 8 Interaction mechanism between quartz and collectors (GDDA and MY)

3 结 论

(1)响应面结果显示,反浮选石英最佳条件为:GDDA用量为700 g/t,NaOL用量为20 g/t,MY用量为24 L/t,此时纯石英的回收率为89.45%,纯长石回收率为4.27%,此时石英与长石的分离率为85.18%。-

(2)花岗岩矿物浮选表明,细泥类物质的存在会影响长石矿物的质量以及增大药剂的添加量,在浮选前应对实际矿物进行清洗除泥。在响应面给出的最优条件下浮选可以得到:回收率60.8%,SiO_2含量68.30%的长石精矿;回收率27.88%,石英相对回收率92.26%,SiO_2质量分数99.32%的石英精矿。

(3)Zeta电位分析表明,GDDA是引起长石与石英电位变化的主要物质,NaOL对长石和石英电位的贡献很少,单独使用MY不能够对矿物电位

造成影响。3种试剂共同作用下，由于MY的桥连作用使得石英对GDDA的捕收能力变得非常强，使得石英的电位一直处于高点。

（4）石英团聚显微图表明，MY使得石英团聚。石英团聚后裸露的表面积减少，吸附在裸露表面的捕收剂量变少，而自重不变，从而导致石英自重大于气泡的浮力，或者导致气泡破裂，从而使石英无法随着气泡上升至泡沫层，从而实现抑制石英上浮的作用。

参考文献

[1] 彭寿，陈志强. 我国硅质原料产业现状及发展趋势[J]. 国外建材科技，2008，29(2)：40-46.

[2] 丁亚卓. 低品位石英矿提纯制备高纯度石英的研究[D]. 沈阳：东北大学，2010.

[3] XIA M，SUN C，YANG X Y，et al. Assessment of gold-bearing quartz vein as a potential high-purity quartz resource：evidence from mineralogy，geochemistry，and technological purification [J]. Minerals，2023，13(2)：261.

[4] 贾德龙，张万益，陈丛林，等. 高纯石英全球资源现状与我国发展建议[J]. 矿产保护与利用，2019，39(5)：111-117.

[5] 赵维佳. 我国高纯石英产业现状及资源保障分析[J]. 中国非金属矿工业导刊，2023(1)：11-13，27.

[6] 王自国. 我国高纯石英产业战略布局思考[J]. 中国矿业，2021，30(增刊2)：1-3.

[7] 金达表，张兄明，邹蔚蔚. 高纯石英的加工工艺研究[J]. 中国非金属矿工业导刊，2004(4)：44-46，48.

[8] 白家缘，潘威武，李桥，等. 广西百色地区脉石英矿床地质特征及矿床成因[J]. 中国非金属矿工业导刊，2023(1)：61-64.

[9] 詹建华，王依，陈正国，等. 我国脉石英资源现状分析[J]. 中国非金属矿工业导刊，2020(5)：1-4.

[10] 高跃升，高志勇，孙伟. 金属离子对矿物浮选行为的影响及机理研究进展[J]. 中国有色金属学报，2017，27(4)：859-868.

[11] 黄雯. 长石与石英浮选分离试验研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2012.

[12] 于福顺，王毓华，黄传兵. 石英-长石无氟浮选分离工艺研究现状[J]. 中国非金属矿工业导刊，2005(2)：41-43.

[13] 李爱民. 我国石英与长石浮选分离的研究进展[J]. 矿产保护与利用，2021，41(6)：27-34.

[14] 聂轶苗，刘淑贤，王森，等. 石英长石无氟浮选分离的研究现状及进展[J]. 化工矿物与加工，2015，44(7)：51-54.

[15] WANG L，SUN W，HU Y H，et al. Adsorption mechanism of mixed anionic/cationic collectors in Muscovite-Quartz flotation system [J]. Minerals Engineering，2014，64：44-50.

[16] WANG L，LIU R Q，HU Y H，et al. Adsorption behavior of mixed cationic/anionic surfactants and their depression mechanism on the flotation of quartz [J]. Powder Technology，2016，302：15-20.

[17] 杨素琴，范亚，黄玉莹，等. 基于响应面法优选消炎抗菌颗粒的成型工艺[J]. 武汉工程大学学报，2021，43(3)：260-265.

[18] 程雷，李梓欣，刘传富，等. Box-Behnken响应面法优化蒲公英中菊苣酸的超声提取工艺[J]. 化学与生物工程，2022，39(9)：41-46.

[19] 侯敏娜，侯少平，王泽坤，等. 响应面法优化红薯叶多酚超声辅助提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. 化学与生物工程，2022，39(4)：33-39.

[20] LIU A，FAN M Q，FAN P P. Interaction mechanism of miscible DDA – Kerosene and fine quartz and its effect on the reverse flotation of magnetic separation concentrate [J]. Minerals Engineering，2014，65：41-50.

本文编辑：张　瑞