

# 组合捕收剂浮选去除脉石英中富流体包裹体颗粒及其机理分析

何宇豪<sup>1</sup>, 宋昱晗<sup>1,2,3</sup>, 樊婷<sup>1</sup>, 邓祺<sup>1</sup>, 管俊芳<sup>1,2</sup>, 任子杰<sup>1,2,3</sup>

1. 武汉理工大学 关键非金属矿产资源绿色利用教育部重点实验室, 湖北 武汉 430070;
2. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070;
3. 矿物资源加工与环境湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070

中图分类号: TD923; TD973<sup>+</sup>.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2025)03-0097-07  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2025.03.008

**摘要** 高纯石英砂中的流体包裹体限制了其应用领域。以非洲某地区脉石英为研究对象, 开展了浮选富流体包裹体石英颗粒研究。通过 DECA(双极端对比)检测法进行流体包裹体定量分析, 发现不同粒级石英砂通透石英颗粒占比不同, 故仅针对 -0.20+0.106 mm 粒级石英砂进行浮选实验。结果表明: 在 pH 为 9.5, BQY+HQY 组合捕收剂用量为 80+160 g/t 时, 精矿石英中通透颗粒占比为 65.46%, 较原矿提升 20.46 百分点, 扫选精矿中通透颗粒占比较原矿提升 10.08 百分点, 并且精矿中 Al、Fe、K、Ca 元素含量与原矿相比, 分别降低了 9.74%、13.68%、18.63% 以及 18.96%。由红外光谱与能谱分析可知, BQY 与 HQY 药剂之间的协同作用使得通透石英更易浮出。此外, 浮选精矿制备的玻璃体气泡含量较原矿显著减少, 证明浮选对富流体包裹体石英颗粒实现有效去除。

**关键词** 脉石英; 浮选; 流体包裹体; 组合捕收剂; 石英玻璃体

## 引言

高纯石英广泛运用于光伏、电子信息、光通信和电光源等行业, 在信息技术、新能源、新材料等战略性新兴产业有着巨大需求<sup>[1]</sup>。20 世纪 70 年代以来, 随着天然水晶的匮乏, 脉石英和伟晶岩作为潜力的高纯石英原料被广泛研究<sup>[2]</sup>。

流体包裹体广泛存在于矿物中, 在石英晶体中的存在形式更是多样化<sup>[3]</sup>, 不同类型以及不同成因的石英中包裹体含量存在差异。流体包裹体中存在微量元素, 一般被认为是脉石英的非结构性杂质<sup>[3]</sup>, 高纯石英砂中的流体包裹体会导致石英制品中的气泡缺陷、羟基杂质<sup>[4-5]</sup>。石英砂在高温融化时, 流体包裹体的脱除会在其原本位置形成“蚀坑”, 这就导致无论流体包裹体是否去除, 环境中的空气都会进入蚀坑进而形成气泡<sup>[6-7]</sup>。因此, 高纯石英砂中的流体包裹体含量需要尽可能保持低水平, 才能确

保高纯石英材料/制品的质量。

近几年来, 流体包裹体的去除技术研究较多。最常用的技术为高温爆裂法<sup>[8-9]</sup>, 其主要是通过高温促使石英晶体发生缺陷, 为流体包裹体气化膨胀提供通道和能量, 利用水淬使膨胀的流体包裹体瞬时爆裂, 去除部分粒径较大的流体包裹体。也有研究表明, 通过多次热震(急热, 空气中急冷)的处理方式, 可以将部分微小流体包裹体成分从微裂纹逸出<sup>[10]</sup>。此外, 微波加热技术被广泛应用于高温爆裂法去除流体包裹体研究中<sup>[11-12]</sup>。但以上方法均只能去除部分流体包裹体, 且无法对所有高纯石英原料有效。

浮选是矿物分选的最有效方法, 如石英与云母、石英与长石的分离, 均采用浮选法进行去除<sup>[13-15]</sup>。本团队研究发现, 含有流体包裹体的石英颗粒与不含流体包裹体的石英颗粒物理化学性质存在细微差别, 尤其是其表面结构存在差别。因此, 本文以非洲某地区脉石英为原料, 对其原矿流体包裹体含量

收稿日期: 2024-07-29

作者简介: 何宇豪(1998—), 男, 河南安阳人, 博士研究生, 主要从事高纯石英、石墨等非金属矿提纯等方面的研究工作, E-mail: 1807099935@qq.com。

通信作者: 任子杰(1987—), 男, 山西孝义人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事非金属矿提纯与深加工、矿物材料等方面的研究工作, E-mail: renzijie@whut.edu.cn。

进行定量分析,通过系统的浮选实验研究,将含有富流体包裹体的石英颗粒与贫流体包裹体的石英颗粒进行分离,并将不同流体包裹体含量的浮选产物进行玻璃体制备,以反映浮选对于富流体包裹体石英颗粒的去除效果,为流体包裹体去除与表征提供了新方法。

### 1 实验

#### 1.1 实验原料

本次实验所用药剂为团队自行配制的 BQY 与 HQY 组合捕收剂,其中 BQY 药剂主要成分为含钙无机化合物, HQY 主要成分为含钠有机化合物。本次实验所用原料来自非洲某矿区脉石英, X 射线衍射(XRD)结果见图 1。将具有代表性的块矿挑选进行切片,借助偏光显微镜对薄片进行工艺矿物学分析,显微镜结果见图 2,通过等离子发射光谱(ICP)进行化学成分分析,结果见表 1。

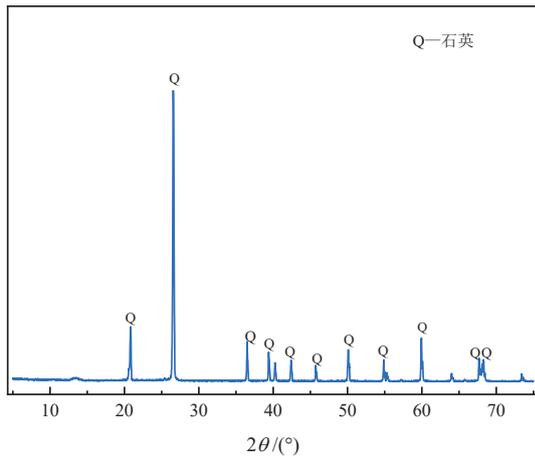


图1 原矿 XRD 分析  
Fig. 1 XRD analysis of the raw ore

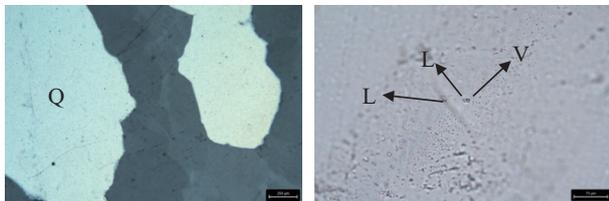


图2 原矿显微镜照片  
Fig. 2 Microscopic photo of the raw ore

表 1 原矿化学成分分析  
Table 1 Chemical composition analysis of raw ore

元素	Al	Ca	Cu	Fe	K	Li	Mg
含量	154.12	32.22	0.43	44.34	61.40	1.53	26.2
元素	Ni	Mn	Na	B	Ti	合计	SiO <sub>2</sub>
含量	0.01	0.82	13.70	0.33	7.40	342.57	99.96*

注: \*代表百分含量。

由表 1、图 1 和图 2 可知,该矿样主要矿物是石英,其粒度均>0.5 mm,石英含量>99%, SiO<sub>2</sub> 含量为 99.96%, 杂质元素中 Al 元素含量最多,为 154.12 μg/g, 其次为 K 元素, 含量为 61.40 μg/g, 其余杂质元素含量均小于 50 μg/g。石英中流体包裹体较多,为气液两相或单相流体包裹体,呈串珠状或条带状排列,粒度较小,一般<5 μm,可见最大流体包裹体为 30 μm,气泡 12 μm。

#### 1.2 实验仪器与设备

使用武汉探矿机械厂颚式破碎机粗碎、对辊破碎机进行破碎,使用武汉洛克三辊四筒棒磨机进行磨矿,使用吉林探矿 XFD-0.25L 型单槽浮选机进行浮选,使用晶驰科技(武汉)有限公司 QY 型高纯石英砂质量检测仪进行流体包裹体含量检测。

#### 1.3 流体包裹体定量分析

通过新型高纯石英砂气液包裹体 DECA(双极端对比)检测法对石英中流体包裹体进行定量分析。研究发现,将药剂浸湿的石英砂样品置于显微镜下观察,石英颗粒呈透明状,而气液包裹体以黑点的形式出现。因此,根据气液包裹体含量及其分布状态,将通透颗粒(T)定义为石英颗粒完全透明或黑点极少且比较分散;不透透颗粒(NT)定义为黑点占整个颗粒面积的 50% 以上且黑点相对集中;半通透颗粒定义为黑点面积占据较少或相对分散(图 3)。以极端好的石英砂 T 和极端差的石英砂 NT 占比作为根本依据,研究出高纯石英砂气液包裹体 DECA 检测法(双极端对比法)对石英砂气液包裹体进行检测。

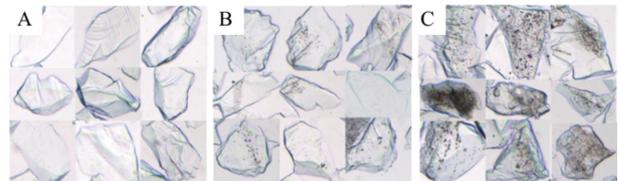


图3 不同类型石英颗粒显微镜照片 (A—通透石英颗粒; B—半通透石英颗粒; C—不透透石英颗粒)  
Fig.3 Microscopic photos of different types of quartz particles (A—Transparent quartz particles; B—Semitransparent quartz particles; C—Impermeable quartz particles)

## 2 结果与讨论

### 2.1 磨矿细度的确定

流体包裹体在破碎、磨矿时会发生破裂<sup>[16-17]</sup>,对

于不同的磨矿细度,其石英砂的流体包裹体含量可能会存在差别。除此之外,不同粒度组成的矿物其浮选行为一般不同<sup>[18]</sup>。因此,为确定最佳分离效果,对不同磨矿细度的石英砂进行流体包裹体检测以及浮选实验研究。

根据高纯石英砂标准,将石英砂分为 $-0.425+0.30$  mm、 $-0.30+0.20$  mm、 $-0.20+0.15$ 、 $-0.15+0.106$  mm 以及 $-0.106$  mm 5个粒度,其中 $-0.106$  mm 细粒度不作为研究对象进行研究。对不同粒度产物进行流体包裹体检测,结果见图4。

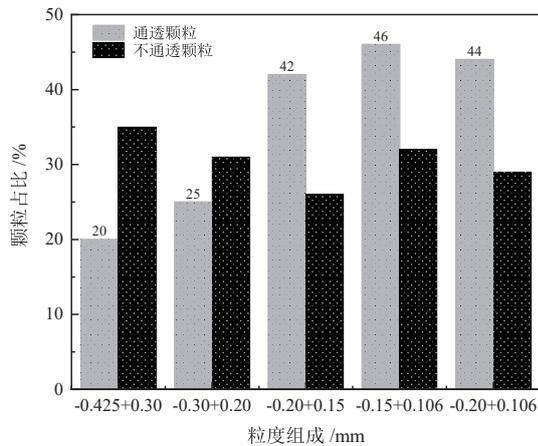


图4 不同粒度组成流体包裹体占比  
Fig. 4 Proportion of fluid inclusions with different particle sizes

由图4可知,  $-0.20+0.15$  mm 以及  $-0.15+0.106$  mm 粒度产物中通透颗粒在40%以上,综合粒度 $-0.20+0.106$  mm 粒度通透石英颗粒44%,不通透石英颗粒29%。而 $-0.425+0.30$  mm、 $-0.30+0.20$  mm 粒度产物中通透石英颗粒仅占比在30%以下。因此,将磨矿细度控制在 $-0.20+0.106$  mm 粒度占比90%以上。

## 2.2 浮选捕收剂的确定

石英的正浮选一般在碱性条件下进行,一般选择油酸钠+十二胺捕收剂<sup>[18-19]</sup>。故选择自有药剂BQY+HQY同油酸钠+十二胺体系进对比,分析不同捕收剂组合下通透石英颗粒与不通透石英颗粒的分离效果差异,选择最佳捕收剂组合。

固定条件矿浆pH为9,浮选质量浓度30%,调整剂为碳酸钠。在捕收剂油酸钠+十二胺用量 $160+80$  g/t条件下,石英几乎全部上浮,不存在分离效果;而在捕收剂为BQY+HQY,药剂用量 $160+80$  g/t条件下,浮选存在分离现象,其泡沫与槽内石英显微镜照片见图5。

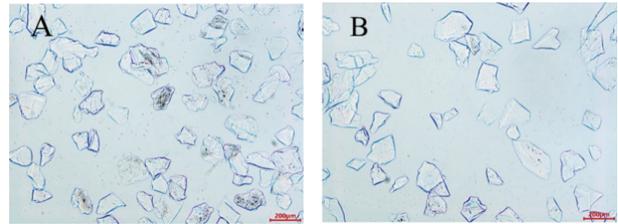


图5 浮选显微镜照片(A—BQY+HQY槽内;B—BQY+HQY精矿)  
Fig. 5 Flotation microscope photo (A—Inside BQY+HQY tank; B—BQY+HQY concentrates)

由图5可知,浮选精矿(图5A)中富流体包裹体石英颗粒的占比明显较槽内(图5B)少。因此,通过BQY+HQY体系进行浮选可以降低石英砂中不通透石英颗粒占比,即可以降低其石英中流体包裹体含量。

## 2.3 浮选体系优化

### 2.3.1 矿浆pH

在矿物浮选过程中,矿浆的pH值对于捕收剂药剂在矿物表面的吸附存在影响<sup>[20-21]</sup>。因此,控制捕收剂用量为 $160+80$  g/t,浮选浓度保持在30%,通过计算浮选泡沫的产率变化与通透石英颗粒占比,确定BQY+HQY体系下最佳矿浆pH,结果见图6。

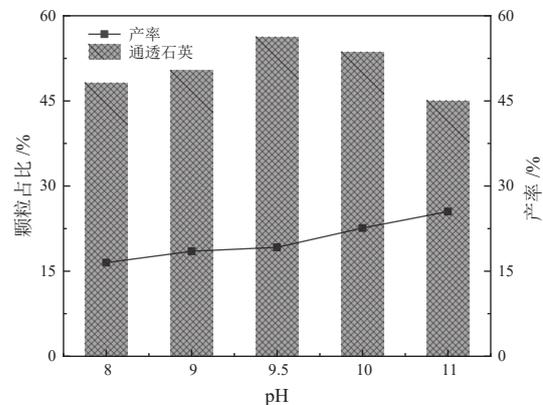


图6 不同pH条件下的精矿产率与通透颗粒占比  
Fig. 6 Concentrates yield and percentage of transparent particles under different pH

由图6可知,随着pH值的提高,精矿产率呈现逐渐增加趋势,但整体变化不大;而通透颗粒占比呈现先增后减的趋势。BQY+HQY体系下的最佳pH值为9.5,在此条件下,精矿石英中通透颗粒占比可以达到56.30%,较原矿提升10个百分点,产率19.20%。

### 2.3.2 药剂用量与配比

对BQY+HQY体系进行药剂用量优化实验,研究BQY与HQY的药剂用量以及配比对浮选效果的影响,结果见表2。

表 2 不同药剂用量下的精矿产率与通透颗粒占比  
 Table 2 Concentrates yield and percentage of transparent particles under different

总用量/(g·t <sup>-1</sup> )	精矿产率/%	通透颗粒占比/%
BQY+HQY =80+160	10.50	65.21
BQY+HQY =160+160	28.20	50.38
BQY+HQY =240+160	34.30	48.30
BQY+HQY =160+80	20.57	57.65

由表 2 数据可知, BQY+HQY 的最佳药剂用量与配比为 BQY+HQY=80+160 g/t。在此药剂条件下, 精矿石英中通透颗粒占比可以达到 65.21%, 较原矿提升了 20.21 百分点, 产率 10.50%。

### 2.3.3 扫选次数

综上可知, 最佳 pH=9.5, 最佳药剂用量为 80+160 g/t。在此条件下进行扫选次数实验, 确定最佳扫选次数。结果见图 7、图 8。

由图 7、图 8 可知, 经过优化后, 精矿(图 8A)中通透颗粒占比明显增加, 占比达到 65.46%, 较原矿提升 20.46 百分点, 其产率为 9.58%; 扫选精矿

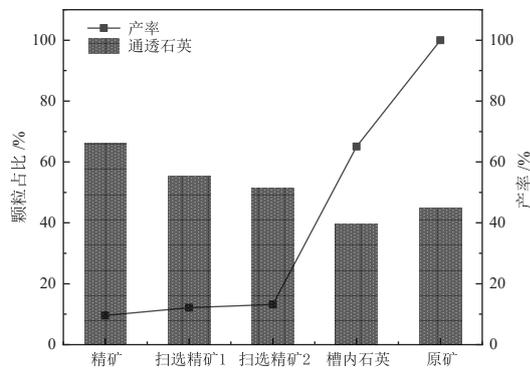


图7 分段浮选产率与流体包裹体占比  
 Fig. 7 Segmented flotation yield and proportion of fluid inclusions

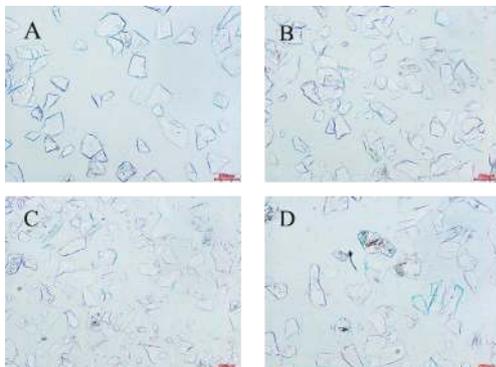


图8 各阶段产物显微镜照片(A—精矿; B—扫选精矿 1; C—扫选精矿 2; D—槽内石英)  
 Fig. 8 Microscopic photos of products at each stage (A—Concentrates; B—Scan concentrates 1; C—Scan concentrates 2; D—Quartz in the tank)

1+2(图 8B、8C)中通透颗粒综合占比为 55.08%, 较原矿提升 10.08 百分点, 其综合产率为 25.36%; 而槽内石英(图 6D)中通透石英颗粒占比比较原矿降低 5.25 百分点。

以上结果表明: 在碱性条件下的 BQY+HQY 体系浮选中, 低药剂用量以及合适的配比下, 流体包裹体含量多的石英不容易吸附药剂, 而流体包裹体少的石英颗粒吸附药剂上浮, 从而通过优先浮选不含流体包裹体或流体包裹体含量少的石英颗粒, 以达到降低石英样品中流体包裹体含量的目的。

### 2.4 石英玻璃体实验

高纯石英砂中的流体包裹体在石英融化过程中不易排出, 易造成玻璃制品中的气泡与气线<sup>[4-7]</sup>。为证明浮选实验效果, 将浮选前原矿、精矿、扫选精矿以及浮选槽内石英加入玻璃试管中, 通过 1 700 °C 高温灼烧制备出玻璃体, 结果见图 9。同时对浮选产物进行等离子发射光谱分析其原矿中主要杂质元素(Al, K, Ca, Fe), 结果见图 10。

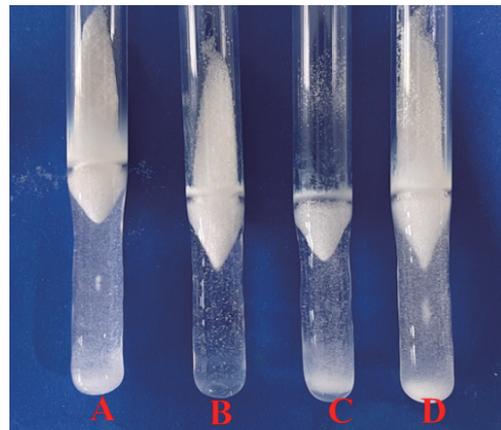


图9 不同浮选产物玻璃体(A—原矿; B—精矿; C—扫选精矿; D—浮选槽内)  
 Fig. 9 Shows different flotation products of vitreous (A—raw ore; B—Concentrates; C—Scan concentrates; D—Quartz in the tank)

由图 9 可知, 原矿制备的玻璃体(图 9A)中含有大量气泡, 整体透明度低, 呈乳白色; 通过浮选精矿制备的熔融玻璃体(图 9B)中气泡较原矿显著减少, 而扫选精矿制备的熔融玻璃体(图 9C)中气泡虽较泡沫 1 制备玻璃体(图 9B)多, 但较原矿依旧减少; 而通过槽内石英制备的熔融玻璃体(图 9D)中气泡较原矿气泡明显增加且整体透明度降低。

由图 10 可知, 经过浮选后, 精矿中 Al、Fe、K、Ca 元素均略低于原矿, 分别降低了 9.74%、13.68%、18.63% 以及 18.96%。

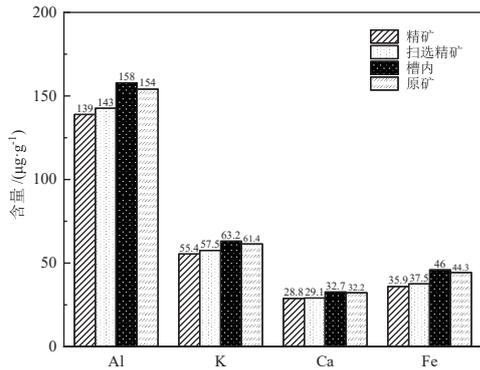


图10 浮选产物化学成分分析  
Fig. 10 Chemical composition analysis of flotation products

综上, 浮选精矿、槽内石英与原矿之间杂质元素含量变化不明显, 但由精矿制备的玻璃体气泡含量明显较原矿减少, 证明了该原矿经过浮选得到的泡沫石英中流体包裹体含量降低, 即通过浮选实现了对矿样中富流体包裹体石英颗粒的去除, 且去除效果显著。

### 2.5 捕收剂作用机理分析

为探究药剂在石英表面的作用机理, 对浮选精矿以及槽内石英进行红外光谱与能谱分析, 红外光谱见图 11, 能谱分析结果见图 12、表 3。

由图 11 可知, 精矿在 2922、2855 cm<sup>-1</sup> 处存在 -CH<sub>2</sub>-、-CH<sub>3</sub> 吸收峰<sup>[19,21]</sup>, 与 BQY 药剂中的有机物组分结构对应, 而槽内石英并无此吸收峰, 说明

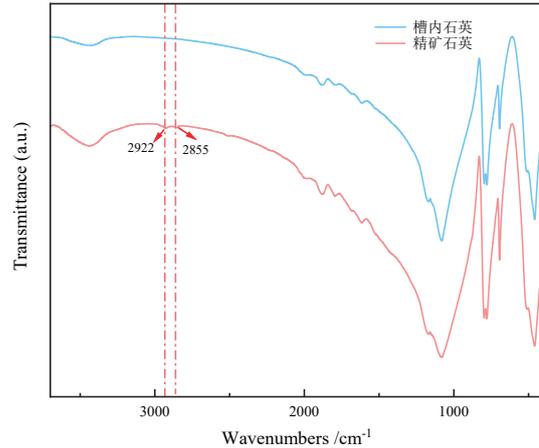


图11 不同浮选产物的红外光谱  
Fig. 11 Infrared spectra of different flotation products

BQY 仅在泡沫石英表面存在吸附。

由图 12 与表 3 可知, 浮选精矿表面除 Si、O 元素外存在较多的 Ca、Na、Cl 等元素, 这些元素均为 BQY 与 HQY 药剂所含元素; 而浮选槽内石英除 Si、O 元素外, 仅含有微量 Ca 元素。结合红外光谱图, 说明流体包裹体含量少的石英表面可以同时吸附 BQY 与 HQY 药剂, 而富流体包裹体石英表面仅能够微量吸附 HQY 药剂。因此, 浮选是通过 BQY 与 HQY 药剂的协同作用使得流体包裹体含量较少的石英浮出, 从而实现不同流体包裹体含量石英间的分离。

### 3 结论

(1)非洲某脉石英 SiO<sub>2</sub> 含量为 99.96%, 杂质元

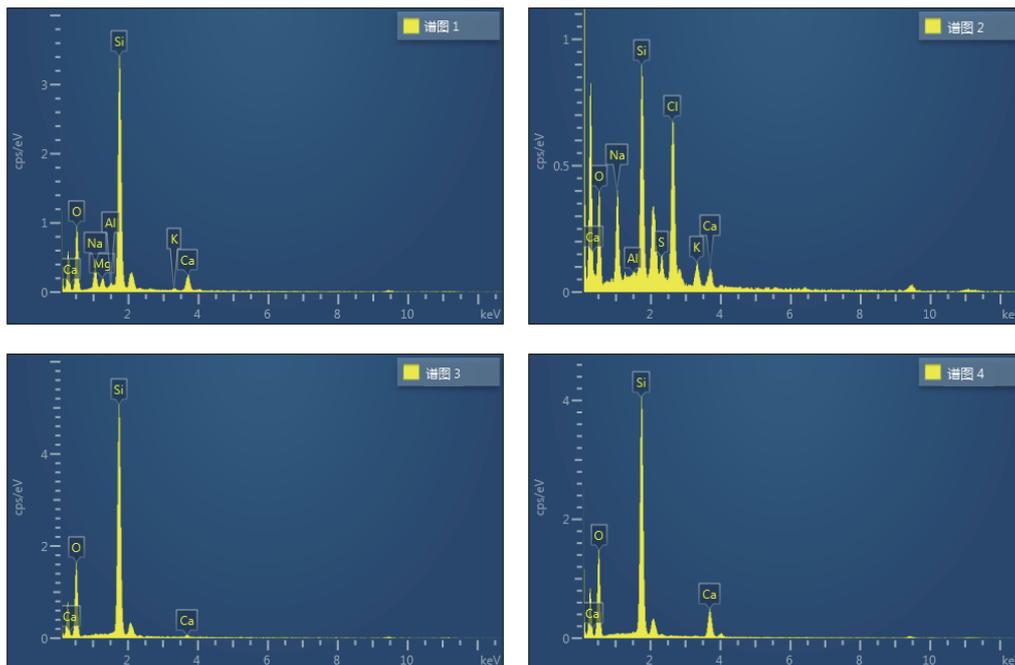


图12 同浮选产物能谱分析(精矿—谱图 1、2; 槽内石英—谱图 3、4)  
Fig. 12 Energy spectrum analysis of different flotation products (Concentrates: spectrogram 1-2; Quartz in the tank: spectrogram 3-4)

表 3 不同浮选产物表面原子占比

Table 3 Surface atomic percentage of different flotation products

/%

样品	Si	O	Al	Ca	Na	Cl	K	S	总量
谱图1(浮选精矿)	27.37	61.99	0.55	2.32	5.73	-	0.28	-	100
谱图2(浮选精矿)	13.22	58.67	0.38	1.59	11.73	11.02	1.75	1.65	100
谱图3(浮选槽内)	28.47	71.21	-	0.32	-	-	-	-	100
谱图4(浮选槽内)	22.57	73.96	-	3.47	-	-	-	-	100

素含量除 Al、K 外,均小于 50 μg/g,石英中含有大量流体包裹体,且不同粒径石英砂中通透石英颗粒占比不同,其中-0.20+0.106 mm 粒径石英砂通透石英颗粒占比较高,流体包裹体较少。

(2)矿浆 pH 为 9.5, BQY+HQY 组合捕收剂用量最佳为 80+160 g/t,扫选次数为 2 时,精矿中通透颗粒占比由 45% 提升至 65.46%,扫选精矿中通透颗粒综合占比由 45% 提升至 55.08%,精矿制备的石英玻璃体中气泡含量明显减少,证明浮选对于富流体包裹体石英颗粒实现有效去除,精矿中 Al、Fe、K、Ca 元素均略低于原矿,分别降低了 9.74%、13.68%、18.63% 以及 18.96%。

(3)红外光谱与能谱分析结果表明,流体包裹体含量少的石英表面可以同时吸附 BQY 与 HQY 药剂,而含流体包裹体较多石英表面仅能够微量吸附 HQY 药剂, BQY 与 HQY 药剂之间的协同作用使得流体包裹体含量较少的石英浮出。

### 参考文献:

[1] 张海啟,张亮,刘磊,等.全球高纯石英资源开发利用现状 & 供需分析[J].矿产保护与利用,2022(5): 49-54.  
ZHANG H Q, ZHANG L, LIU L, et al. Development, utilization, supply and demand of global high purity quartz resources: a systematic review and meta-analysis[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022(5): 49-54.

[2] 施娅颖,王小强,张会,等.高纯石英的杂质类型及深度提纯技术研究进展[J].矿产保护与利用,2023(6): 76-78.  
SHI Y Y, WANG X Q, ZHANG H, et al. Research progress on impurity characteristics and deep chemical purification technology in high-purity quartz[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023(6): 76-78.

[3] 贺贤举,管俊芳,张冲,等.TFT-LCD 玻璃基板用脉石英工艺矿物学研究[J].矿产综合利用,2019(2): 79-82.  
HE X J, GUAN J F, ZHANG C, et al. Study on mineralogy of vein quartz for TFT-LCD glass substrate[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(2): 79-82.

[4] 张立,胡修权,张晋,等.鄂西地区某脉石英中流体包裹体特征分析[J].矿产综合利用,2023(3): 205-210.  
ZHANG L, HU X Q, ZHANG J, et al. Characteristic

analysis on fluid inclusions of vein quartz in western Hubei Province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(3): 205-210.

[5] 林敏,徐顺秋,刘子源,等.高纯石英(SiO<sub>2</sub>)评述(三):流体包裹体的分析、活化与分离[J].矿产综合利用,2022(6): 26-29.  
LIN M, XU S Q, LIU Z Y, et al. Review for high-purity quartz (SiO<sub>2</sub>) (part III): Analysis, activation and separation of fluid inclusions[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(6): 26-29.

[6] WINICK J A, MCINTOSH W C, DUNBAR N W. Melt-inclusion-hosted excess Ar-40 in quartz crystals of the Bishop and Bandelier magma systems[J]. Geology, 2001, 29(3): 275-278.

[7] 武志超,张海啟,谭秀民,等.高纯石英应用及化学提纯技术研究进展[J].化工矿物与加工,2023, 52(9): 72-80.  
WU Z C, ZHANG H Q, TAN X M, et al. Research progress on the application of high-purity quartz and its chemical refinement technology[J]. Industrial Minerals & Processing, 2023, 52(9): 72-80.

[8] YIN R, JING L, HOU Q, et al. Study on optimization quartz mine for removal gas-liquid inclusions in quartz sand under microwave and acid corrosion[J]. Advanced Materials Research, 2013, 800: 3-7.

[9] 马超,冯安生,刘长森,等.高纯石英原料矿物学特征与加工技术进展[J].矿产保护与利用,2019, 39(6): 48-57.  
MA C, FENG A S, LIU C M, et al. Mineralogical characteristics and progress in processing technology of raw materials of high purity quartz[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(6): 48-57.

[10] 侯清麟,王迎霞,侯熠徽.剔除硅石矿中气液包裹体方法的研究[J].包装学报,2019, 11(6): 38-42.  
HOU Q L, WANG Y X, HOU Y H, et al. Study on gas-liquid inclusion methods for removing silica ores[J]. Packaging Journal, 2019, 11(6): 38-42.

[11] 赵动.去除微小流体包裹体制备高纯石英砂的研究[D].广州:华南理工大学,2014.  
ZHAO D. Research on removing tiny fluid inclusions for preparation of high purity quartz sand[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.

[12] BUTTRESS A, RODRIGUEZ J, URE A, et al. Production of high purity silica by microfluidic-inclusion fracture using microwave pre-treatment[J]. Minerals Engineering, 2019, 131: 407-419.

[13] 马亚梦,张海啟,谭秀民,等.某矿区高纯石英化学深度提纯技术研究[J].矿产保护与利用,2022, 42(5): 22-27.  
MA Y M, ZHANG H Q, TAN X M, et al. Research on chemical deep purification technology of high-purity

- quartz in a mining area[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(5): 22–27.
- [14] 刘广学, 马亚梦, 刘磊, 等. 新疆阿尔泰地区某花岗岩伟晶岩型石英深度除杂技术研究[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(5): 8–14.  
LIU G X, MA Y M, LIU L, et al. Study on deep impurity removal technology of a granite pegmatite-type high-purity quartz in Altay region of Xinjiang[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(5): 8–14.
- [15] 刘孟浩, 管俊芳, 任子杰, 等. 两地石英岩矿的选矿提纯差异研究[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(2): 99–105.  
LIU M H, GUAN J F, REN Z J, et al. Beneficiation difference of quartzite mines in two places[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(2): 99–105.
- [16] 刘泰荣. 酸浸辅助微波场去除石英砂中气液包裹体的研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2015.  
LIU T R. Research on Removal of fluid inclusions from quartz sand through acid leaching-aided microwave field[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2015.
- [17] 郑仁基. 不同缺陷类型萤石浮选行为与机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.  
ZHENG R J. Study on the flotation behavior and mechanism of the fluorites with different defect type[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.
- [18] 伍红强, 邱廷省. 不同粒度赤铁矿和石英的浮选行为研究[J]. 金属矿山, 2021(4): 101–105.  
WU H Q, QIU T S. Study on flotation behavior of hematite and quartz with different particle sizes[J]. Metal Mine, 2021(4): 101–105.
- [19] SHEN L F, SUN N, XU R, et al. Adsorption mechanisms of activated surface of quartz and feldspar with mixed NaOL/DDA[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 314: 123501.
- [20] 贾蓓繁, 罗溪梅, 王云帆, 等. 阴阳离子组合捕收剂对微细粒赤铁矿与石英浮选分离的研究[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(1): 33–39.  
JIA L F, LUO X M, WANG Y F, et al. Research on the flotation separation of fine-grained hematite and quartz by combined cation-anion collectors[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(1): 33–39.
- [21] 唐劭禹, 张凌燕, 张冲, 等. Fe<sup>3+</sup>对十二烷基磺酸钠捕收石英的活化作用研究[J]. 非金属矿, 2017, 40(5): 79–81.  
TANG S Y, ZHANG L Y, ZHANG C, et al. Study on activation of sodium dodecyl sulfonate collecting quartz by Fe<sup>3+</sup>[J]. Non-Metallic Mines, 2017, 40(5): 79–81.

## Removal of Rich Fluid Inclusions in Vein Quartz by Combined Collector Flotation and Its Mechanism Analysis

HE Yuhao<sup>1</sup>, SONG Yuhan<sup>1,2,3</sup>, FAN Ting<sup>1</sup>, DENG Qi<sup>1</sup>, GUAN Junfang<sup>1,2</sup>, REN Zijie<sup>1,2,3</sup>

1. Wuhan University of Technology, Key Laboratory of Green Utilization of Critical Non-metallic Mineral Resources, Ministry of Education, Wuhan 430070, Hubei, China;

2. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;

3. Hubei Key Laboratory of Mineral Resources Processing and Environment, Wuhan 430070, Hubei, China

**Abstract:** The fluid inclusions in high purity quartz sand limit its application. Quartz veins from a certain region in Africa as the research object, and flotation experiments were conducted on quartz particles with rich fluid inclusions. Quantitative analysis of fluid inclusions was conducted using DECA (Double Extreme Case Analysis) method, and it was found that the proportion of transparent quartz particles varied among different particle sizes of quartz sand. Flotation experiments were conducted on quartz sand with particle sizes of  $-0.20+0.106$  mm. The results showed that when the pH was 9.5, the combined collector of BQY+HQY were  $80+160$  g·t<sup>-1</sup>, the proportion of transparent particles in the quartz concentrate was 65.46%, with an increase of 20.46 percentage points compared to the original ore. The proportion of transparent particles in the scanned concentrate increased by 10.08 percentage points compared to the original ore. Moreover, the content of Al, Fe, K, Ca elements in the concentrate decreased by 9.74%, 13.68%, 18.63%, and 18.96% compared to the original ore. According to infrared spectrum and energy spectrum analysis, the synergistic effect between BQY and HQY agents makes it easier for transparent quartz to float out. In addition, the bubble content in the quartz glass prepared before and after flotation had changed. It also further proves that flotation had the significant removal effect on rich fluid inclusion quartz particles.

**Keywords:** vein quartz; flotation; fluid inclusions; combination collector; quartz vitreous body

**引用格式:**何宇豪, 宋昱晗, 樊婷, 邓祺, 管俊芳, 任子杰. 组合捕收剂浮选去除脉石英中富流体包裹体颗粒及其机理分析[J]. 矿产保护与利用, 2025, 45(3): 97–103.  
HE Yuhao, SONG Yuhan, FAN Ting, DENG Qi, GUAN Junfang, REN Zijie. Removal of rich fluid inclusions in vein quartz by combined collector flotation and its mechanism analysis[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2025, 45(3): 97–103.