

## 湖北省恩施某光伏玻璃用石英砂提纯制备实验

曾牧源, 马博华, 赵李欣然, 李克尧, 包申旭, 杨思原

(武汉理工大学资源与环境工程学院, 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)

**摘要:** 这是一篇关于矿物加工工程领域的文章。光伏玻璃用石英砂是支撑新能源行业发展必不可少的原料之一, 其供应安全保障事关我国双碳政策的成功实施。本文以湖北省恩施州某大型石英砂矿为研究对象, 开展了工艺矿物学与除杂提纯实验研究, 发现该石英砂矿的主要杂质为斜长石、云母、褐铁矿和金红石, 采用了“分级-重选-磁选-酸浸”选矿工艺流程, 最终获得符合粒度要求 (0.106 ~ 0.500 mm) 的石英砂精矿产率为 67.61%, 其  $\text{SiO}_2$  含量由 97.36% 提高至 99.79%, 有害元素  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量则分别降低至 75、80、630 g/t, 石英精矿产品各项指标达到了光伏玻璃用硅质原料的生产要求, 实现了该石英砂矿的有效利用。

**关键词:** 矿物加工工程; 光伏用玻璃砂; 石英提纯; 重选; 磁选; 酸浸

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.02.024

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 02-0144-07

**引用格式:** 曾牧源, 马博华, 赵李欣然, 等. 湖北省恩施某光伏玻璃用石英砂提纯制备实验[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(2): 144-150.

ZENG Muyuan, MA Bohua, ZHAOLI Xinran, et al. Purification and preparation of quartz sand for photovoltaic glass in enshi of hubei province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(2): 144-150.

石英是大陆地壳数量第二多的矿石, 仅次于长石<sup>[1]</sup>, 其易于开采、物理化学性质稳定, 在玻璃、化工、冶金、建材、电子等领域被广泛应用, 是工业发展必不可少的原料之一<sup>[2-3]</sup>。我国石英矿产资源丰富, 目前已探明的石英矿物包括 23.1 亿 t 的石英岩、15.5 亿 t 石英砂岩以及 0.5 亿 t 脉石英。高品质石英砂一个重要的用途是作为光伏玻璃的原料。光伏玻璃是光伏组件中最外层的部分, 近年来我国随着光伏产业的快速发展, 对光伏玻璃的需求迅速增加<sup>[4]</sup>, 而光伏玻璃的生产必须使用含硅纯度高、杂质含量低的石英原料, 以达到高透光率。我国现有的石英矿, 其品位与杂质含量常无法满足工业上生产光伏玻璃的要求。

石英中的杂质众多, 其中以 Al、Fe 和 Ti 含量最高, 这些离子易替代石英晶格中的  $\text{Si}^{4+}$ , 形成新

的铝氧四面体、铁氧四面体与钛氧四面体<sup>[2,5-6]</sup>, 造成晶格内部电荷缺陷, 从而引入  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Li}^+$ 、 $\text{H}^+$  等电荷补偿杂质<sup>[2,7]</sup>, 造成石英砂中杂质含量进一步上升。这些杂质会影响玻璃的着色, 降低光伏玻璃的透光性与光学性能, 并且在石英砂熔炼过程中会影响玻璃液对流, 增大熔制与澄清难度, 对工业生产光伏玻璃危害极大。

石英砂中的伴生杂质往往嵌布粒度较细, 多以零星分布在石英砂屑间隙中, 单一选矿手段难以将脉石矿物分离, 需配合多种选矿方式进行提纯除杂。由于其杂质的复杂情况, 研究人员开展了大量关于石英砂的提纯的研究, 针对不同杂质所对应脉石矿物的性质, 采取针对性强的选矿方法去除, 并通过多种选矿方法的组合以达到较佳提纯效果<sup>[5,8-12]</sup>。

收稿日期: 2023-09-08

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFE0126800); 国家自然科学基金 (52281240408)

作者简介: 曾牧源 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向为矿物加工工程。

通信作者: 杨思原 (1990-), 男, 教授, 博士, 博士研究生导师, 研究方向为矿物加工工程。

本研究以湖北恩施某地石英砂为实验原料，采用“分级-重选-磁选-浸出”流程，提纯后获得高品质石英产品，达到光伏玻璃用硅质原料标准。

## 1 原矿性质

### 1.1 原矿化学组成

本次试样取自湖北省恩施州某石英砂矿，通过电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）和化学分析检测该石英矿中各主要元素含量，结果见表1。根据光伏玻璃用硅质原料行业标准（JC/T2314-2015），该石英砂矿主要的问题为SiO<sub>2</sub>含量不足，且Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>含量超标。

表1 石英砂原矿中主要矿物及杂质含量/%  
Table 1 Main useful minerals and impurities of quartz samples

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *
0.25	1.12	97.36	0.073	0.100	1.95

\*单位为g/t

### 1.2 矿物组成分析

矿样的X射线衍射（XRD）结果见图1，与矿物标准图谱对比，特征峰均表现为石英峰，该石英衍射峰强高、峰形尖锐，表明矿样中石英含量高，这与化学组成检测结果一致，其余矿物由于含量较低未在XRD图谱中检出。

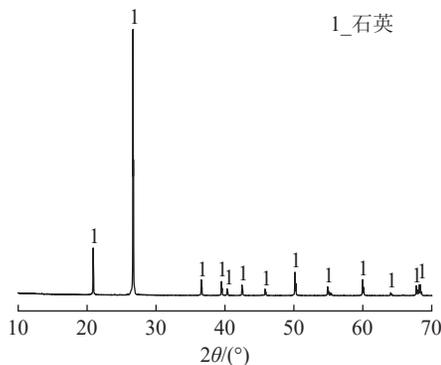


图1 石英砂矿样 XRD  
Fig.1 XRD patterns of quartz sand samples

### 1.3 矿物相嵌特征分析

由于矿样SiO<sub>2</sub>占比高，其他矿物难以通过XRD检测出来，故进行偏光显微镜观测。将砂样用环氧树脂胶固结，固结后磨制成砂光薄片，在显微镜下进行观察。结果见图2。结果表明该石英矿中主要矿物为石英，其中石英大多以零散均匀分布在细砂岩和粉砂岩碎屑中，部分则以独立碎屑零

散分布，个别晶粒沿内部裂纹发育。而脉石矿物均以斜长石、云母、褐铁矿和金红石及铁泥质胶结物为主，其中斜长石、云母是Al元素的主要来源矿物，褐铁矿及其他铁质是Fe元素的主要来源矿物，金红石为Ti元素的主要来源矿物。各主要脉石矿物基本以零星分布在石英砂屑间隙中的方式存在，且大多堪布粒径较细。对于已单体解离，且与石英砂物理性质差异较大的褐铁矿、铁泥质胶结物以及金红石等矿物，可采用物理选矿法去除一部分。其中，褐铁矿以及铁泥质胶结物呈弱磁性，可通过磁选去除；金红石由于与石英密度差异较大（金红石密度为4.2~4.3 g/cm<sup>3</sup>，石英砂密度为2.65 g/cm<sup>3</sup>），可考虑使用重选法去除。另一方面，对于分散在石英间隙中的微细脉石矿物以及与石英砂物理性质接近的斜长石与云母等，则需要进一步配合化学浸出来达到较好的除杂效果。

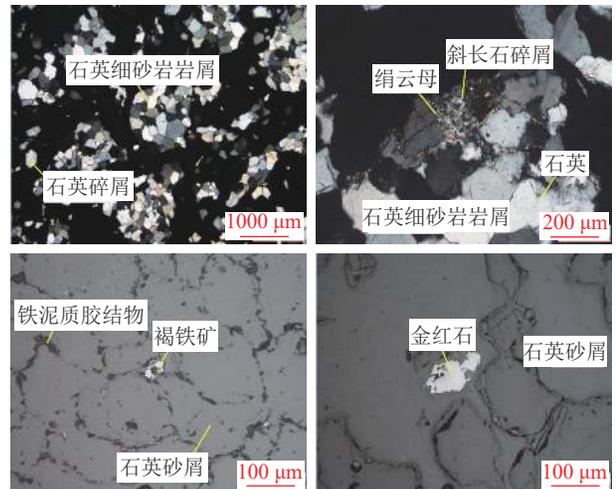


图2 石英砂主要矿物偏光显微镜  
Fig.2 Polarizing microscope of major minerals in the quartz sand samples

## 2 选矿实验

### 2.1 磨矿实验

粒度是石英砂在工业应用上非常重要的指标，目前浮法玻璃和光伏玻璃制造领域对石英原料的要求大多为0.106~0.500 mm<sup>[13]</sup>，而破碎后的产物中+0.500 mm的粗颗粒含量较多，因而在选矿作业前需对原矿进行磨矿分级。为避免过磨以尽可能得到符合粒度要求的石英砂产品，需探究磨矿时间与磨矿细度之间的关系。棒磨机处理量大，产品粒度均匀，且不容易发生过磨，常被用

于石英砂磨矿作业，故本次选矿实验采用棒磨机（型号为：HLXMB-Φ200 mm×240 mm）开展磨矿实验，磨矿浓度设定为 50 %、磨矿介质为钢棒。由于直接一段磨矿会导致细粒级过多，故采用分段磨矿制度进行磨矿作业，以上一段磨矿的+0.500 mm 粒级作为下一段磨矿的给料，设置三段磨矿实验。为便于讨论单独一段磨矿不同磨矿时间下的磨矿效果，记每一段磨矿中合格粒级质量与上一段磨矿+0.500 mm 粒级质量的百分比为作业产率<sup>[13]</sup>。磨矿时间与合格粒度石英作业产率的关系见图 3。图 3 结果表明，不同磨矿时间对 0.106 ~ 0.500 mm 粒级的石英产率影响较大，适当的磨矿时间可以增加目标粒级的产率，而过长的磨矿时间将导致过磨，使得目标粒级产率降低，三段磨矿的较佳磨矿时间分别为 30、60、90 s，各阶段对应的 0.106 ~ 0.500 mm 粒级产率见表 2。

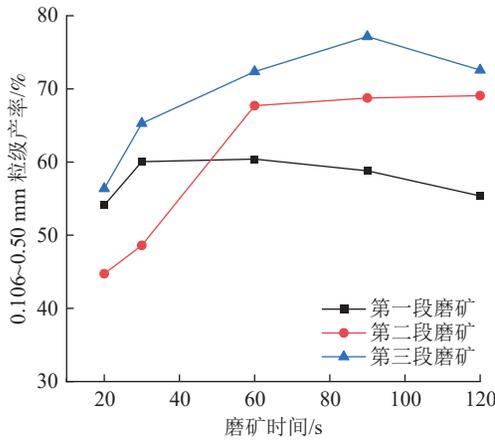


图 3 不同磨矿时间下 0.106 ~ 0.500 mm 粒级石英产率  
Fig.3 Yields of 0.106 ~ 0.500 mm quartz under different grinding time

表 2 较佳磨矿时间的各阶段 0.106 ~ 0.500 mm 粒级石英产率

Table 2 Yields of 0.106 ~ 0.500 mm quartz for each stage of grinding under the optimum grinding time of quartz samples

作业名称	对作业产率/%	对原矿产率/%
原矿分级	34.11	34.11
一段磨矿	60.04	31.30
二段磨矿	67.72	8.98
三段磨矿	76.82	1.16
两段磨矿总产率	-	74.39
三段磨矿总产率	-	75.55

由表 2 可知，原矿破碎筛分后即可获得 34.11% 的 0.106 ~ 0.500 mm 粒级石英砂，随后三段棒磨的单独作业产率分别为 60.04%、67.72% 和 76.82%，

单独作业产率与上一段作业中+0.500 mm 粒级产率相乘，得到对原矿的产率分别为 31.30%、8.98% 和 1.16%。由于第三段磨矿得到适宜粒级石英的占比较少，而增加一段磨矿会增加选矿成本，故确定磨矿制度为两段磨矿，各阶段对应的磨矿时间分别为 30 s 和 60 s，最终可获得 74.39% 产率符合粒度要求的石英砂，下列研究均采用此磨矿条件对应的石英砂开展选别实验。

### 2.2 磁场强度实验

杂质元素中 Fe 所对应的褐铁矿为弱磁性矿物，故采取磁选的方式去除。由于不同磁场强度对选矿指标有较大影响，采用 ZQS-1500 型磁选机以不同磁场强度为变量条件进行实验，设置范围为 1.0 ~ 2.0 T，结果见图 4、5。图 4 实验结果表明了磁场强度的提升可提高 SiO<sub>2</sub> 品位，同时仅造成小部分的回收率损失，证明磁选对该石英矿的除杂富集是有效的。

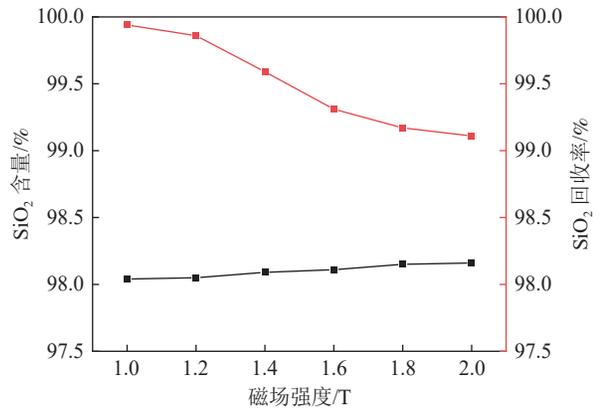


图 4 磁场强度对石英磁选精矿品位与回收率的影响  
Fig.4 Effect of magnetic field strength on the grade and recovery of quartz magnetic separation concentrate

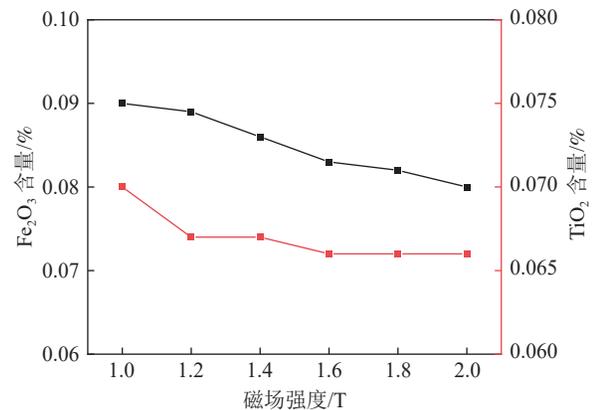


图 5 磁场强度对石英磁选精矿 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 TiO<sub>2</sub> 含量的影响

Fig.5 Effect of magnetic field strength on the Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub> contents of quartz magnetic separation concentrate

图5则发现磁场强度的提高会降低石英磁选精矿中Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和TiO<sub>2</sub>含量。当磁场强度达2.0 T时，磁选对石英中杂质铁的去除率最高，此时Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为0.082%。但当磁场强度高于1.2 T后，TiO<sub>2</sub>含量并不会进一步减少，仍高达0.066%，说明磁选对TiO<sub>2</sub>去除效果有限，综合考虑除杂效果，选定2.0 T为该石英砂磁选强度。

### 2.3 重磁联合实验

TiO<sub>2</sub>所对应的脉石矿物金红石密度相对较大，可采用重选与石英分离，在磁选前通过重选预先去除部分金红石，不仅可以降低磁选的压力，还可以使重磁联合精矿中Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>与TiO<sub>2</sub>含量进一步降低。因此，本文分别采用摇床与高梯度磁选机进行重磁联合实验，以分步除去石英砂中的钛与铁。重选条件为：粗砂区1.5°倾斜、细砂区1.0°、矿泥区无坡度、大冲程和小冲次水流。所得结果见表3。从表3可知，磁选作业产率为通过磁选后石英砂质量与入料质量百分比<sup>[14]</sup>，对石英砂进行重选后磁选，得到磁选作业的精矿产率为95.22%，重磁联合工艺对原矿的产率为69.35%，其Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量可减少到0.067%，同时TiO<sub>2</sub>含量降至0.019%，说明重选和磁选联用对该石英砂的选别效果更好。

### 2.4 酸浸实验

由于该石英砂大部分脉石矿物粒径较细，且

以零星分布在石英砂屑间隙中的方式存在，用重选与磁选等物理方法除去的杂质有限，必须要进一步采用化学浸出法才能达到深度除杂效果，以获得高品质光伏玻璃用硅质原料<sup>[14]</sup>。

表3 石英砂重磁联合选别实验结果

Table 3 Combined gravity separation and magnetic separation results of quartz sand

产品	产率/%		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含量/%	TiO <sub>2</sub> 含量/%
	作业产率	原矿产率		
重选尾矿	2.10	1.56	1.280	1.950
一段磁选尾矿	4.78	3.48	0.660	0.032
一段磁选精矿	95.22	69.35	0.067	0.019
给矿	100.00	74.39	0.120	0.060

#### 2.4.1 盐酸酸浸实验

由于石英不溶于盐酸，而长石、云母等脉石矿物可以被盐酸等酸溶解，故以重磁联合选矿精矿为酸浸原矿，初步选定盐酸作为浸出酸，在盐酸溶液浓度为20%的条件下，探究酸浸时间、液固比、温度等三个因素对杂质去除的影响，各个因素设置三个水平。一般浸出反应过程较为缓慢，故以3、6、9 h开展浸出实验；浸出温度考查25℃常温、50℃中温以及75℃高温下的浸出效果；液固比考查在不同量浸出液下的浸出效果，故设置1:1、2:1以及3:1三个固液比。所得各酸浸结果及显著性分析分别见表4。

表4 石英砂盐酸酸浸正交实验结果

Table 4 Orthogonal results of quartz sand leaching tests using hydrochloric acid as the leaching reagent

实验组号	正交序列	时间A/h	温度B/℃	液固比C	精矿含量/%			
					Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
1	111	3.0	25	1:1	0.29	0.0230	99.26	0.010
2	123	3.0	50	3:1	0.42	0.0241	99.08	0.016
3	132	3.0	75	2:1	0.42	0.0210	99.12	0.016
4	213	6.0	25	3:1	0.22	0.0233	99.25	0.008
5	222	6.0	50	2:1	0.36	0.0200	99.15	0.015
6	231	6.0	75	1:1	0.33	0.0214	99.20	0.015
7	312	9.0	25	2:1	0.29	0.0220	99.14	0.012
8	321	9.0	50	1:1	0.25	0.0172	99.22	0.009
9	333	9.0	75	3:1	0.38	0.0202	99.15	0.014
	极差	0.05	0.07	0.09				

由表4可以看出，盐酸单酸浸出实验的石英精矿中SiO<sub>2</sub>含量均高于99.08%，其Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量则分别低于0.42%和0.0241%，而TiO<sub>2</sub>含量为0.008%~0.016%。根据极差分析可知，各

因素对浸出实验结果的影响顺序为： $R_C > R_B > R_A$ ，即液固比>温度>时间。其中，石英砂在9 h浸出时间、50℃温度和液固比1:1的浸出条件时，其Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>的含量分别为0.25%、

0.0172%、99.22%、0.009%，还未完全达到各项品位要求。考虑该条件盐酸浓度和浸出时间均已较高，继续提高液固比也会增大酸用量从而增加酸浸作业成本，故需采用混合酸开展进一步实验研究。

### 2.4.2 盐酸-氢氟酸混酸酸浸实验

由于盐酸单酸对该石英砂提纯能力有限，选

用盐酸-氢氟酸混酸进行酸浸实验，其中盐酸、氢氟酸浓度分别为 15%、5%，液固比为 1:1。通过对矿样进行正交实验，探究酸配比、浸出时间、浸出温度等三个因素对杂质去除的影响，各个因素设置三个水平，所得各酸浸结果及显著性分析见表 5。

表 5 盐酸-氢氟酸正交实验结果  
Table 5 Results of hydrochloric acid-hydrofluoric acid orthogonal test

实验组号	正交序列	酸配比A (HCl 15%- HF 5%)	时间B/h	温度C/°C	精矿含量/%			
					Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
1	111	1:1	3.0	25	0.140	0.0300	99.67	0.009
2	123	1:1	6.0	75	0.063	0.0075	99.79	0.008
3	132	1:1	9.0	50	0.068	0.0099	99.79	0.009
4	213	2:1	3.0	75	0.066	0.0092	99.77	0.008
5	222	2:1	6.0	50	0.092	0.0100	99.69	0.009
6	231	2:1	9.0	25	0.130	0.0200	99.70	0.010
7	312	3:1	3.0	50	0.130	0.0210	99.64	0.009
8	321	3:1	6.0	25	0.160	0.0270	99.59	0.010
9	333	3:1	9.0	70	0.071	0.0099	99.71	0.009
	极差	0.10	0.04	0.10				

由表 5 可以看出，石英浸出精矿中 SiO<sub>2</sub> 含量均高于 99.59%，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 含量则分别为 0.063%~0.160%、0.0075%~0.030% 和 0.008%~0.016%。极差 R<sub>C</sub> 和 R<sub>A</sub> 最大，而 R<sub>B</sub> 最小，故酸配比和浸出温度对该石英砂提纯的影响较大，即温度=酸配比>时间。其中，石英砂矿样在 6 h 浸出时间、75 °C 浸出温度和 1:1 酸配比时，SiO<sub>2</sub> 含量达到 99.79%，而三种主要杂质 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub> 分别为 0.063%、0.0075%、0.008%。相较于盐酸单酸浸出实验，石英砂中的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 被深度去除，各项指标均达到行业标准要求。

### 2.5 工艺流程及分析

本研究的最终目的是使湖北恩施石英砂中的 Al、Fe 和 Ti 含量达标，通过“分级-重选-磁选-浸出”总体选别流程，将斜长石、云母、金红石和褐铁矿等脉石矿物去除，具体工艺流程见图 6。经过该选别工艺处理，最终可获得产率为 67.61% 的高品质石英砂精矿，其 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub> 含量分别为 99.79%、0.063%、0.0075%、0.008%，精矿产品各项指标达到 JC/T 2314-2015《光伏玻璃用硅质原料》合格品的要求。与原矿相比，石英砂的杂质含量从 2.64% 降低至 0.21%，总杂质去除率为 92.05%，其中主要杂质元素 Al 的去除率为

94.38%，Fe 杂质的去除率为 97.00%，Ti 杂质的去除率为 89.04%，而 SiO<sub>2</sub> 的纯度从 97.36% 增至 99.79%。因此，可以使用本流程作为该石英矿除杂提质的选别流程。

## 3 结 论

(1) 湖北恩施某石英矿原矿的 SiO<sub>2</sub> 含量为 97.36%，其主要杂质 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub> 的含量分别为 0.25%、1.12%、0.073%。主要有价矿物为石英，含少量斜长石、云母、褐铁矿与金红石等杂质矿物。其中，石英零散均匀分布在细砂岩和粉砂岩碎屑中，而脉石矿物粒径较细，以零星分布在石英砂屑间隙的方式存在。

(2) 阶段磨矿实验表明，通过第一段 30 s，第二段 60 s 的阶段磨矿，可在避免过磨的同时，使得矿样中符合 0.106 ~ 0.500 mm 粒度要求的产率为 74.39%，可为后续选矿提供适宜粒度的给料。重-磁联合实验表明，对摇床重选尾矿进行磁场强度为 2.0 T 的磁选，可以将石英中的杂质 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 含量分别降至 0.067%、0.019%。酸浸正交条件实验表明，使用盐酸和氢氟酸配比的混酸对该石英砂进一步提纯可获得符合行业要求

的产品，其影响因素排列为：温度=酸配比>时间，较佳酸浸条件为浸出时间 6 h、浸出温度

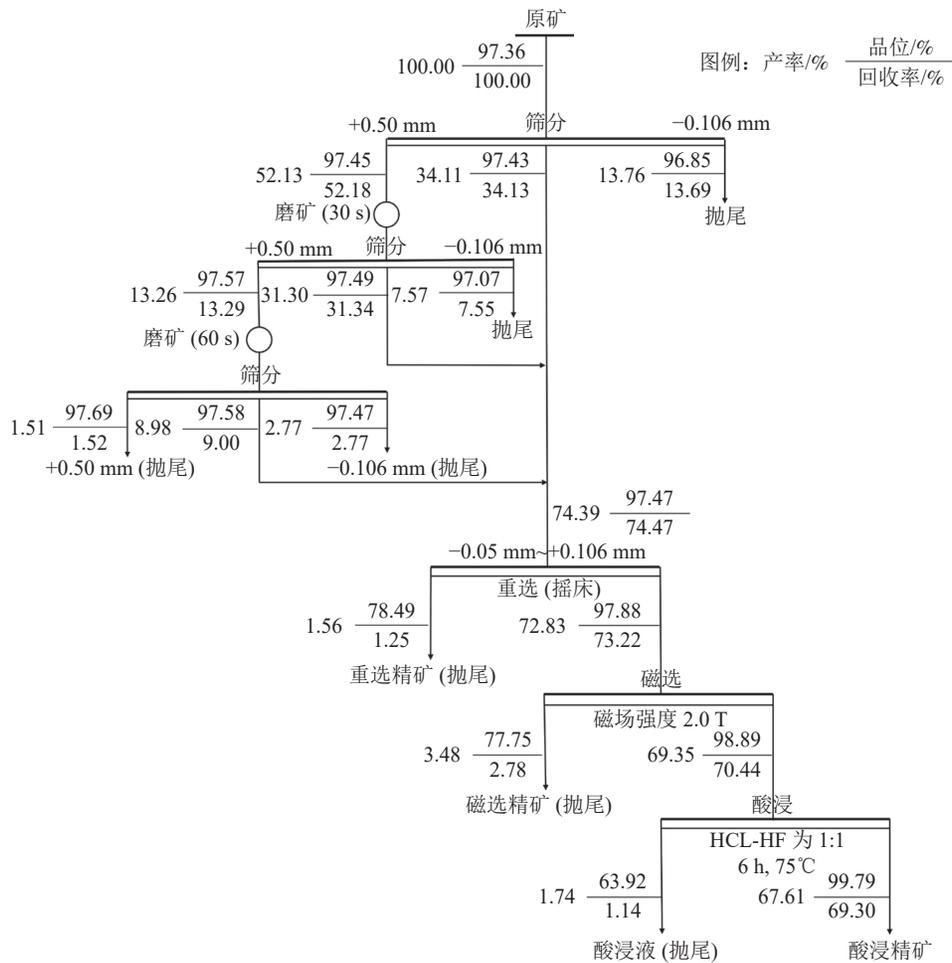


图 6 湖北恩施某石英砂选矿工艺流程

Fig.6 Beneficiation flowsheet of quartz sand ore from Enshi of Hubei Province

(3) 通过“分级-重选-磁选-浸出”工艺，最终可以得到 SiO<sub>2</sub> 含量为 99.79%，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 TiO<sub>2</sub> 含量为 0.063%、0.0075%、0.008% 的高品质石英砂，满足 JC/T 2314-2015《光伏玻璃用硅质原料》合格品的规范要求。该选矿工艺对湖北恩施某石英砂的铁、铝、钛等杂质的去除率高达 92.05%，除杂效果显著，可用于工业生产。

参考文献：

[1] 杨晓勇, 孙超, 曹荆亚, 等. 高纯石英的研究进展及发展趋势[J]. 地学前缘, 2022, 29(1):231-244.  
YANG X Y, SUN C, CAO J Y, et al. High purity quartz: Research progress and perspective review[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(1):231-244.  
[2] 汪灵, 李彩侠, 王艳, 等. 我国高纯石英加工技术现状与发展建议[J]. 矿物岩石, 2011, 31(4): 110-114.

WANG L, LI C X, WANG Y, et al. China technologies present of high-purity quartz processing and the development propositions[J]. Mineral Petrol, 2011, 31: 110-114.  
[3] 林敏, 徐顺秋, 刘子源, 等. 高纯石英 (SiO<sub>2</sub>) 评述 (一): 微量、微细粒铝硅酸盐矿物的活化与分离[J]. 矿产综合利用, 2022(6): 17-20+25.  
LIN M, XU S Q, LIU Z Y, et al. Review for high-purity quartz (SiO<sub>2</sub>) (Part I): activation and separation of trace, fine-grain alumino silicate gangue[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(6): 17-20+25.  
[4] 肖蕲航, 李育彪, 汤启宙. 陕西某石英砂工艺矿物学及可选性实验[J]. 矿产综合利用, 2022(3):167-171.  
XIAO Q H, LI Y B, TANG Q Z. Study on process mineralogy and selectivity of a quartz sand in Shaanxi Province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(3):167-171.  
[5] 李育彪, 雷绍民, 魏桢伦, 等. 高纯石英砂制备技术与原理[M]. 北京: 科学出版社, 2023.  
LI Y B, LEI S M, WEI Z L, et al. Preparation technology and

principle of high purity quartz sand[M]. Beijing: Science Press, 2023.

[6] 林敏, 贾倩, 刘子源, 等. 高纯石英 ( $\text{SiO}_2$ ) 评述 (二): 晶格杂质的活化与分离技术[J]. *矿产综合利用*, 2022(6):21-25.

LIN M, JIA Q, LIU Z Y, et al. Review for high-purity quartz ( $\text{SiO}_2$ ) (Part II): activation and separation of lattice impurities[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(6):21-25.

[7] 雷绍民, 裴振宇, 钟乐乐, 等. 脉石英砂无氟反浮选热压浸出技术与机理研究[J]. *非金属矿*, 2014, 37(2):40-43.

LEI S M, PEI Z Y, ZHONG L L, et al. Study on the technology and mechanism of reverse flotation and hot pressing leaching with vein quartz[J]. *Non-Metallic Mines*, 2014, 37(2):40-43.

[8] 张晋, 胡修权, 张立, 等. 某优质脉石英制备超高纯石英砂工艺实验研究[J]. *非金属矿*, 2023, 46(2):65-69.

ZHANG J, HU X Q, ZHANG L, et al. Experimental study on preparation of ultra-high purity quartz sand from a high quality gangue[J]. *Non-Metallic Mines*, 2023, 46(2):65-69.

[9] 陈坤, 李育彪, 王志杰, 等. 内蒙古某脉石英提纯实验研究[J]. *非金属矿*, 2022, 45(1):59-62.

CHEN K, LI Y B, WANG Z J, et al. Experimental study on purification of a vein quartz from Inner Mongolia[J]. *Non-Metallic Mines*, 2022, 45(1):59-62.

[10] 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.

[11] 林敏, 徐顺秋, 刘子源, 等. 高纯石英 ( $\text{SiO}_2$ ) 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 ( $\text{SiO}_2$ ) (Part III): Analysis, activation and separation of fluid inclusions[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(6):26-29.

[12] 张立, 胡修权, 彭兴华, 等. 高纯石英砂原料矿中流体包裹体研究[J]. *矿产综合利用*, 2022(3):188-192.

ZHANG L, HU X Q, PENG X H, et al. Research on fluid inclusions in vein quartz as higher purity quartz sand[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(3):188-192.

[13] Platias S, Vatalis K I, Charalampides G. Suitability of quartz sands for different industrial applications[J]. *Procedia Economics and Finance*, 2014, 14:491-498.

[14] ZHANG Z, LI J, LI X, et al. High efficiency iron removal from quartz sand using phosphoric acid[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2012, 114-117:30-34.

## Purification and Preparation of Quartz Sand for Photovoltaic Glass in Enshi of Hubei Province

ZENG Muyuan, MA Bohua, ZHAOLI Xinran, LI Keyao, BAO Shenxu, YANG Siyuan  
(School of Resources and Environmental Engineering, Key Laboratory of Green Utilization of Key Non-metallic Mineral Resources, Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

**Abstract:** This is an article in the field of mining processing engineering. Quartz sand for photovoltaic glass is one of the essential raw materials to support the development of the new energy industry, and its supply security is related to the successful implementation of China's two-carbon policy. In this paper, one of the essential raw materials for development, its supply security is related to the successful implementation of China's two-carbon policy. In this paper, a large quartz sand mine in Enshi Prefecture of Hubei Province was studied, and process mineralogy and purification were carried out. It was found that the main impurities of this quartz sand mine were plagioclase, mica, limonite and rutile. The mineral processing of "fractionation-gravity separation-magnetic separation-acid leaching" was adopted, and the yields of quartz sand that met the particle size requirements (0.106 ~ 0.500 mm) were 67.61%, the content of  $\text{SiO}_2$  was increased from 97.36% to 99.79%, and the contents of harmful elements  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  were separately reduced to 75, 80 and 630 g/t. The quartz concentrates meet the production requirements of siliceous raw materials for photovoltaic glass, realizing the effective utilization of the quartz sand ore.

**Keywords:** Mining processing engineering; Photovoltaic glass sand; Quartz beneficiation; Gravity separation; Magnetic separation; Acid leaching