

陕西某石英砂工艺矿物学及可选性实验

肖蕪航¹, 李育彪¹, 汤启宙²

(1. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070;
2. 武钢资源集团程潮矿业有限公司, 湖北 鄂州 436051)

摘要: 陕西某地石英资源丰富, 开展矿物学研究有利于其高值高效利用。基于偏光显微镜、ICP、XRD、EPMA 等现代测试技术分析石英砂化学成分、矿物组成、粒度分布及杂质元素赋存状态等工艺矿物学特征, 确定“重选-磁选-擦洗-浮选-酸浸”提纯实验工艺流程, 并进行了可选性实验研究。该石英砂原料经提纯除杂, SiO₂ 含量由 99.64% 提高到 99.90%, 杂质总含量由 3395.80 μg/g 下降至 909.85 μg/g, 可作为高质量石英砂用于光伏玻璃原料。

关键词: 石英砂; 工艺矿物学; 可选性实验; 提纯

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.03.030

中图分类号: TD95 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 03-0167-05

近年来, 光伏产业发展迅猛, 光伏玻璃需求量急剧增加, 2020 年下半年以来, 光伏玻璃价格一度接近翻倍。而光伏玻璃作为光伏产业的重要组成部分, 要求石英砂原料中有色杂质含量低, 透明、透光性能好。为增加光伏玻璃透光性, 石英砂原料中 Fe₂O₃ 含量需低于 0.0080%^[1]。中国光伏新增装机容量连续多年稳居全球第一, 每年新增装机容量均保持在 10% 以上的增长速度, 市场前景广阔。因此, 对石英砂进行纯化是制备光伏玻璃的必经之路, 在应对能源危机及环境保护方面都具有十分重要的现实意义。

研究人员开展了大量关于石英砂提纯的研究工作, 主要集中于原料选择技术、性质分析技术、提纯加工技术和质量检测技术四个方面, 但目前为止, 针对石英原料性质分析的研究报道较少, 阻碍了我国石英资源的高效开发与利用, 甚至严重制约了下游高新技术产业的发展。

陕西某地石英岩矿带规模较大, 石英砂资源储量丰富, 高值高效利用该地石英砂资源将有助

于当地经济发展。本文针对石英原矿的化学成分、矿物组成、粒度分布及杂质元素赋存状态等进行了详细研究, 并进行了可选性实验, 对其作为生产加工光伏玻璃石英砂的可行性做出评价, 取得了较好的结果。

1 工艺矿物学研究

通过工艺矿物学研究石英原矿矿物组成、矿物粒度、元素赋存状态、矿物之间的嵌布特征等^[2-3], 以期揭示各矿物之间的相互依存关系, 有利于分选及实验流程设计^[4-5]。

1.1 化学成分分析

本文以陕西某石英砂为实验原料, 采用电感耦合等离子体光谱仪 (ICP-OES) 对其化学成分进行测试, 将测试结果换算为金属氧化物质量分数, 结果见表 1。由结果可知, 该石英砂 SiO₂ 含量为 99.64%, 质地较纯净, 但杂质元素含量较高, 主要为 Al₂O₃、Fe₂O₃、TiO₂、K₂O、Na₂O 等, 是提纯的主要目标。

收稿日期: 2021-10-12

基金项目: 国家自然科学基金 (51974215, 51774223); 湖北省重点研发计划项目 (2021BCA127); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2021CG006, 2022CG032)

作者简介: 肖蕪航 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为非金属矿物综合利用。

通信作者: 李育彪 (1985-), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事矿产综合利用研究。

表 1 石英砂提纯实验样品主要元素分析结果/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
 Table 1 Analysis results of main elements of quartz sand purification experimental samples

名称	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	合计	SiO ₂ /%
原矿	2021.09	92.86	607.29	44.01	77.87	377.65	136.23	38.80	3395.80	99.64
重选	1905.70	79.47	387.85	34.85	60.51	357.11	130.89	34.21	2990.48	99.70
磁选	1621.09	62.66	273.20	32.63	43.04	346.33	121.83	30.27	2531.05	99.74
擦洗	1581.68	57.15	265.64	32.12	33.41	324.64	119.70	26.31	2440.65	99.75
浮选	862.43	54.74	262.06	31.05	27.96	195.62	101.41	23.21	1558.48	99.84
酸浸	369.49	41.58	244.35	27.32	11.66	121.87	90.31	3.27	909.85	99.90

1.2 矿物组成分析

原矿石英砂 XRD 图谱见图 1，与矿物标准图谱进行比对，样品中矿物峰与石英特征峰相吻合，且衍射峰强度较高，未见其他杂质矿物特征衍射峰，说明该石英砂原矿纯度较高，与 ICP 测试结果一致。

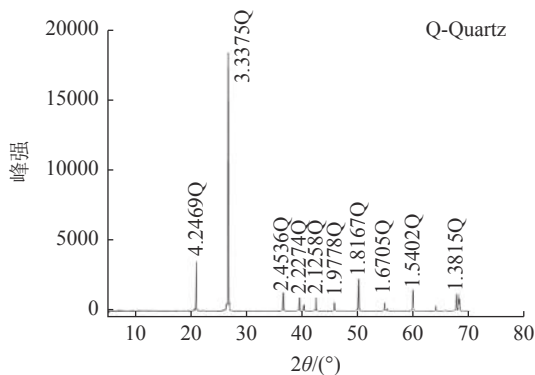


图 1 石英砂 X 射线衍射
 Fig.1 X-ray diffraction of quartz sand

为进一步观察石英砂颗粒聚集状态、粒度大小及分布、杂质矿物的组成及嵌布特征等，将石英砂原矿样品磨制光学薄片后，利用莱卡公司 DMLP 型光学显微镜进行研究分析，结果见图 2。

图中石英砂颗粒 (Q) 在光学显微镜表现为无色透明，形状呈不规则多边形，视域范围内呈离散杂乱分布，石英颗粒表面偶见微裂纹，杂质矿物组成及嵌布特征复杂，主要以包裹体形式或与石英颗粒形成集合体分布在石英边界和空隙处。可见鳞片状粒度较大不透明黑云母 (B)，金红石 (R) 分布在部分石英颗粒表面。

1.3 粒度分布特征

图 3 为石英砂粒度分布曲线。由图可以看出原矿石英砂粒度分布范围较广，石英砂粒度主要集中在分布于 150~300 μm 范围内，占总量 60% 以上。其中粒度分布为 $D_{10}=121.462 \mu\text{m}$ ， $D_{50}=223.646$

μm ， $D_{90}=399.528 \mu\text{m}$ ，石英晶粒单体粒径最大为 722 μm ，最小为 74 μm ，粒度分布特征表现为粗细粒分布不均匀。

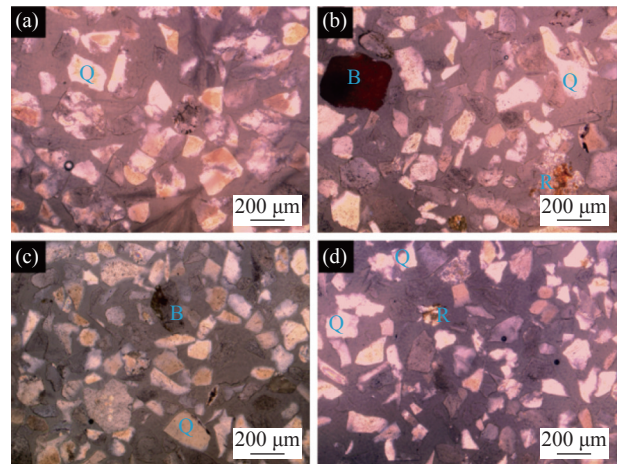


图 2 石英砂矿光学显微镜照片
 Fig.2 Optical microscope photo of quartz sand ore

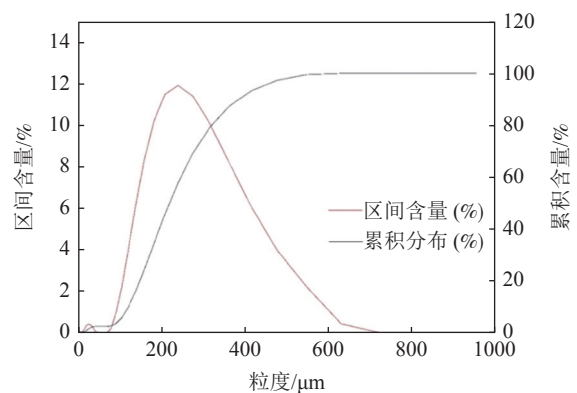


图 3 石英砂粒度分布曲线
 Fig.3 Quartz sand particle size distribution curve

1.4 杂质元素赋存状态

采用电子探针 X 射线微区分析仪 (EPMA) 对石英砂原矿薄片进行杂质赋存状态分析，得到了 Si、O、Al、Na、K、Mg、Fe、Ca 七种元素及其含量，三个不同视域内微区形貌与能谱图见

图4, 结果见表2。结果表明：石英砂原矿中主要杂质矿物包裹体为：斜长石、（钾）长石、云母、粘土矿物、金红石、钛铁矿等，其中Al元素存在于云母、长石、高岭土和粘土矿物中；Na元素存于与长石、粘土矿物中；K元素存在于云

母、钾长石、粘土矿物中；Ca元素存在于长石、云母、粘土矿物中；Mg元素存在于长石、黑云母、粘土矿物中；Fe元素存在于氧化铁、钛铁矿中；Ti元素存在于金红石、钛铁矿中。

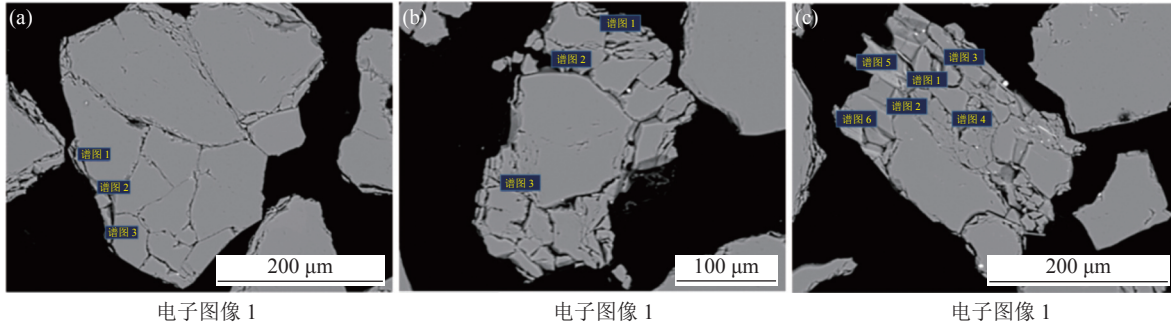


图4 三个不同视域内石英砂电子探针能谱
Fig.4 Electron probe energy spectrum of quartz sand in three different fields of view

表2 电子探针能谱分析结果/%
Table 2 Electron probe energy spectrum analysis results

视域	谱图	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	SiO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	分析
(a)	1	25.05	2.64	6.03	0.00	65.90	0.38	0.00	0.00	长石、氧化铁、石英
	2	7.49	0.75	0.00	0.73	88.59	0.00	0.00	2.44	斜长石、硫化矿、石英
	3	10.78	0.54	4.26	0.00	84.42	0.00	0.00	0.00	长石、石英
(b)	1	2.27	0.00	0.00	0.00	97.73	0.00	0.00	0.00	高岭石、石英
	2	5.97	0.50	1.57	0.00	91.96	0.00	0.00	0.00	钾长石、云母、石英
	3	23.42	1.06	8.46	0.00	65.35	0.00	0.44	1.27	长石、云母、粘土矿物、氧化铁、石英
(c)	1	26.02	1.59	6.85	0.00	63.80	0.42	0.39	0.93	长石、粘土矿物、钛铁矿、金红石、氧化铁、石英
	2	17.69	1.09	6.88	0.00	73.28	0.70	0.36	0.00	长石、钛铁矿、金红石、氧化铁、石英
	3	18.61	1.32	5.99	0.00	73.18	0.00	0.23	0.67	长石、粘土矿物、氧化铁、石英
	4	22.96	1.20	9.10	0.00	67.67	0.46	0.51	1.10	长石、粘土矿物、钛铁矿、金红石、氧化铁、石英
	5	26.71	1.48	7.33	0.00	63.21	0.00	0.36	0.91	长石、云母、粘土矿物、氧化铁、石英
	6	25.37	1.78	6.77	0.00	64.41	0.00	0.30	1.37	长石、云母、粘土矿物、氧化铁、石英

图5是采用电子探针对图4中三个视域石英砂中杂质元素分布状态进行能谱面扫描的分析结果。结果表明，Si、O元素均匀分布于石英内部区域，而杂质元素零星分散分布于石英晶体中，但在边缘断裂面处有部分富集，不同杂质元素在石英晶体中分布量存在差异，表明杂质元素在石英晶格中可能以类质同象的形式取代Si，分布在石英颗粒内部。

2 可选性实验

结合石英砂矿样性质，对钛铁矿、金红石等比重较大的脉石矿物，可通过重选方法进行选

别，对含Fe杂质矿物如磁铁矿、氧化铁等可以通过磁选去除，而石英砂表面的氧化铁薄膜则可以借助擦洗去除，长石、云母等粘土类矿物可采用浮选方法进行分离。由于石英砂颗粒中Al、K、Fe等元素可能以杂质矿物包裹体形式赋存于石英颗粒表面及裂隙处，可采用化学酸浸去除此类杂质矿物。

通过分析，采取重选-磁选-擦洗-浮选-酸浸的提纯工艺路线进行可选性实验研究，流程见图6。

表1为石英砂原样在提纯实验各阶段的化学元素分析。原矿经重选、磁选、擦洗、浮选、酸浸工艺提纯后，最终制得的石英砂精矿中SiO₂含

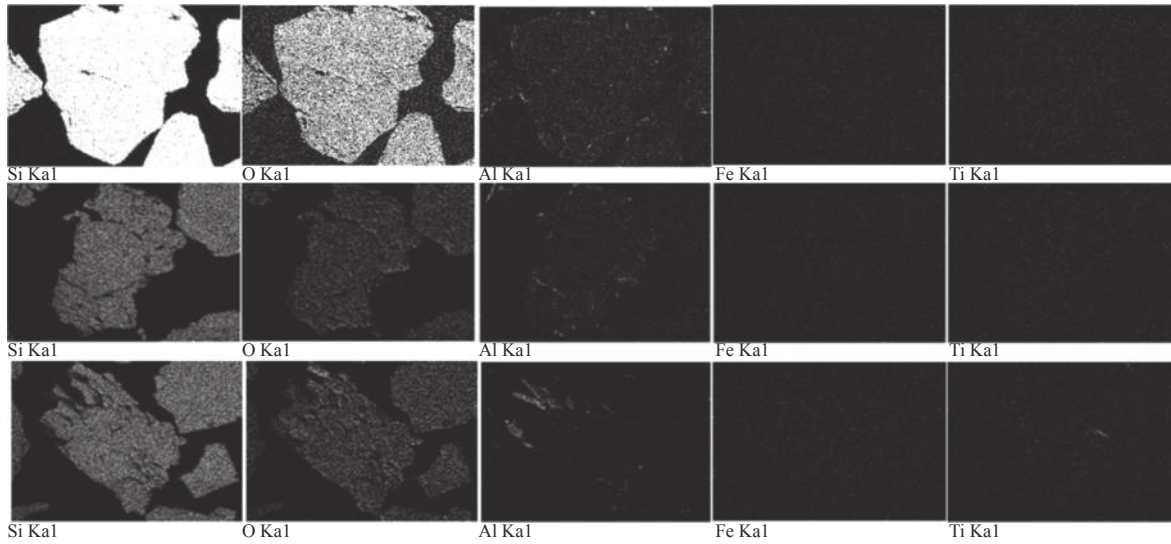


图 5 石英砂面扫描分析结果

Fig.5 Scanning analyses of quartz sand surface

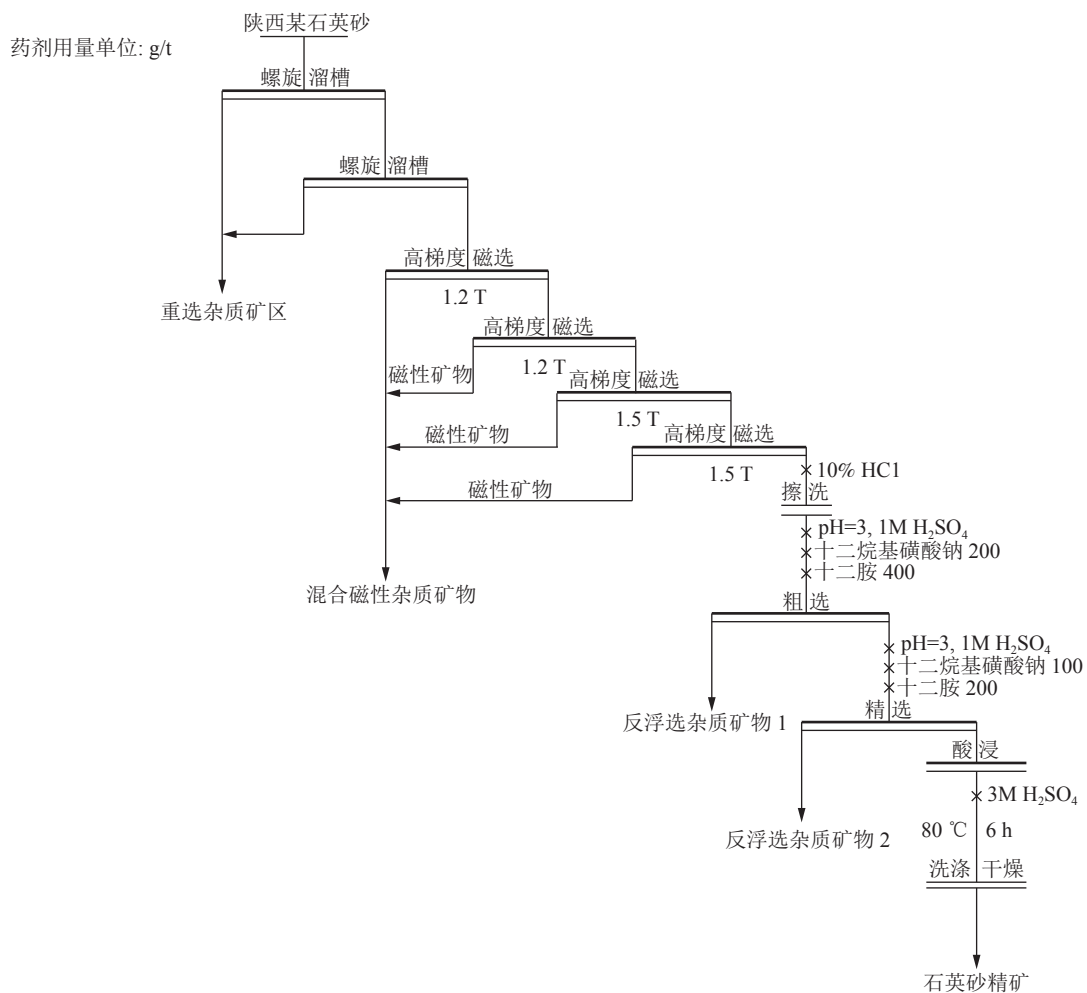


图 6 石英砂选矿提纯实验流程

Fig.6 Test flow of quartz sand beneficiation and purification

量可达 99.90%，总回收率为 91.27%，总杂质元素含量降至 909.85 $\mu\text{g/g}$ ，残余 Al、K、Na 及 Ti 等杂

质元素赋存状态可能为晶格取代或以类质同象形式存在于石英晶体中。后续工艺需在有效暴露矿

物包裹体及去除晶格间杂质元素方面进行改进和提升。

3 结 论

(1) 石英砂原矿 SiO_2 含量为 99.64%，杂质元素主要存在于伴生脉石矿物、杂质矿物包裹体和晶格内部。Al 元素主要赋存于云母、长石、高岭土和粘土矿物中；Na 元素主要赋存于与长石、粘土矿物中；K 元素主要赋存于云母、钾长石、粘土矿物中；Ca 元素主要赋存于长石、云母、粘土矿物中；Mg 元素主要赋存于长石、黑云母、粘土矿物中；Fe 元素主要赋存于氧化铁、钛铁矿中；Ti 元素主要赋存于金红石、钛铁矿中。

(2) 通过重选—磁选—擦洗—浮选—酸浸除杂提纯工艺后处理后 SiO_2 含量达 99.90%、 Fe_2O_3 含量为 $41.58 \times 10^{-6} \mu\text{g/g}$ ，产品质量得到明显提升，最终石英砂精矿符合高端光伏石英砂原料标准，在太阳能利用领域展现出广阔的市场应用前景，具有巨大的经济效益。

参考文献：

[1] 马菊英, 金成彬, 彭春艳. 太阳能光伏玻璃原料用砂的提纯试验研究[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2014(6):18-20.

MA J Y, JIN C B, PENG C Y. Study on purification of sand for solar photovoltaic glass feedstock[J]. *China Non-Metallic Mining Industry Herald*, 2014(6):18-20.

[2] 王玲, 赵战锋. 工艺矿物学在地质冶金学中的应用及问题[J]. *矿产综合利用*, 2020(2):37-43.

WANG L, ZHAO Z F. Application and difficulties of process mineralogy in geometallurgy modeling[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(2):37-43.

[3] 聂铁苗, 牛福生, 张悦. 工艺矿物学在矿物加工中的应用及发展趋势[J]. *中国矿业*, 2011, 20(4):121-123.

NIE Y M, NIU F S, ZHANG Y. Application of mineralogy in ore dressing and its trend[J]. *China Mining Magazine*, 2011, 20(4):121-123.

[4] 杨凡燕, 李科, 李黎明, 等. 宁夏某地石英砂岩工艺矿物学研究[J]. *宁夏大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(3): 303-308.

YANG F Y, LI K, LI L M, et al. Investigation on quartz sandstone process mineralogy in somewhere of Ningxia[J]. *Journal of Ningxia University (Natural Science Edition)*, 2020, 41(3): 303-308.

[5] 张志刚, 潘自维, 宫在阳, 等. 工艺矿物学在难处理金矿矿物加工中的应用[J]. *黄金*, 2017, 38(6):56-59.

ZHANG Z G, PAN Z W, GONG Z Y, et al. Application of process mineralogy in refractory gold ore processing[J]. *Gold*, 2017, 38(6):56-59.

Study on Process Mineralogy and Selectivity of a Quartz Sand in Shaanxi Province

Xiao Qihang¹, Li Yubiao¹, Tang Qizhou²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Hubei, Wuhan, China; 2. Wugang Resources Group Chengchao Mining Co., Ltd, Ezhou, Hubei, China)

Abstract: It is beneficial to conduct mineralogy research on the abundant quartz sand resources located in Shaanxi Province, thereby providing high value and efficient utilization methods. Base on modern testing techniques such as polarizing microscope, ICP, XRD, EPMA, etc., the mineralogical characteristics of quartz sand, such as the chemical composition, mineral composition, particle size distribution, and the presence of impurity elements, were analyzed. A technological process of gravity separation-magnetic separation-scrubbing floating-acid leaching for purification was proposed, followed by experimental study on selectivity. The raw quartz sand was purified with the SiO_2 being increased from 99.64% to 99.90%, while the total content of impurities being decreased from 3395.80 $\mu\text{g/g}$ to 909.85 $\mu\text{g/g}$, which can be used as a high quality quartz sand source for photovoltaic glass.

Keywords: Quartz sand; Process mineralogy; Beneficiation test; Purification