

海南文昌某石英砂矿提纯实验研究

周迎春¹, 彭程¹, 黄蓉², 李国杰¹, 吉榆师¹

1. 海南国际资源(集团)股份有限公司, 海南海口 570206;
2. 海南省地质调查院, 海南海口 570206

中图分类号: TD973.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)04-0073-08
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.08.004

摘要 为了提高海南文昌某石英砂矿生产光伏玻璃用砂产品质量, 采用 MLA、电子显微镜等分析手段查明矿物性质和赋存状态, 进行了石英砂提纯实验研究。结果表明, 石英砂原矿含 SiO₂ 96.67%、Al₂O₃ 1.67%、Fe₂O₃ 0.14%、TiO₂ 0.12%、ZrO₂ 0.01%, 有害组分主要以泥质和含铁质矿物形式附着于石英颗粒的凹凸面、裂隙或酸性油质薄膜中。将传统的重选—磁选—酸浸工艺改造为擦洗—分级—螺旋溜槽重选—湿式磁选—碱浸的选别流程后, 石英砂产品中 SiO₂ 回收率从 89.60% 提升至 95.57%, SiO₂ 含量从 99.42% 提升至 99.74%, Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 含量从 0.18% 和 0.04% 分别降至 0.05% 和 0.008%, 满足光伏玻璃用砂的需求; 螺旋溜槽重选产品提纯获得 ZrO₂ 含量 5.18%、TiO₂ 含量 23.78% 的锆钛粗精矿; 石英尾砂经烘干分级后, 可用作铸造或压裂用的烘干砂, 实现了该石英砂矿的综合利用。

关键词 石英; 滨海砂矿; 光伏玻璃用砂; 浮法玻璃用砂; 提纯; 锆钛矿

石英砂具有热稳定性、透光性以及耐高温、耐腐蚀等良好的特点, 广泛应用于玻璃、铸造、陶瓷及耐火材料和石油压裂等领域^[1-2], 其中玻璃原料用砂需求量较大, 是其主要用途^[3]。随着太阳能光伏清洁能源成为各国战略能源, 光伏玻璃用石英砂的发展空间更广^[4]。

我国石英砂资源丰富, 但原矿整体质量不高, 多数需要提纯后才能使用^[5], 海南和广东等地滨海石英砂主要用作生产浮法玻璃用砂, 产品很难达到光伏玻璃用砂的要求^[6]。海南文昌地区是我国滨海石英砂矿资源的重要产地, 该地石英砂矿资源储量大、品位高、易采易选^[7-8], 当地的石英砂生产企业中航、凯盛、信义、三箭、丰源和福耀等均采用擦洗—重选—磁选—酸洗等传统工艺流程^[9]的产品主要作为浮法玻璃用砂(又称低铁砂, Fe₂O₃<0.04%、TiO₂<0.08%、-0.1mm<5%)^[10], 仅地表少量的低铁原矿砂可作为生产光伏玻璃用砂(又称超白砂, Fe₂O₃<0.012%、TiO₂<0.05%、-0.1mm<5%)^[11]。随着资源形势的发展和变化, 石英砂深加工迫在眉睫。

1 矿石性质

1.1 矿物组成

样品来自海南文昌地区的石英砂原矿砂, 其化学

分析结果见表 1。结果表明, 样品中 SiO₂、TiO₂ 和 ZrO₂ 含量分别为 96.67%、0.12% 和 0.01%, Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 是主要有害物质^[9], 含量分别为 1.67% 和 0.14%。

表 1 原矿化学成分分析结果 /%

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂
96.67	1.67	0.14	0.05	0.12
ZrO ₂	MgO	Na ₂ O	CaO	Cr ₂ O ₃
0.009 8	0.011 8	0.008 5	0.008 2	0.002 6

原矿砂的微量元素光谱半定量分析结果见表 2。结果表明除 Ti 元素含量略高外, 其他微量元素含量极低, 总量小于 100 μg/g。

表 2 原矿砂的微量元素光谱半定量分析结果 /(μg·g⁻¹)

Ti	Mn	V	Pb	Cr	Ni	Cu	Co
2010	18	11	9	8	6	6	2
Sn	Mo	Ag	As	Sb	Zn	W	Bi
1.5	0.1	<1	<30	<10	<10	<2	<0.3

原矿砂的矿物组成结果见表 3。结果表明, 原矿砂主要矿物为石英, 其次是泥质、铁质和其他重矿物。

收稿日期: 2023-03-25

作者简介: 周迎春(1979—), 男, 湖南邵阳人, 高级工程师, 本科, 主要从事地质矿产勘查工作, Email: 32287696@qq.com。

通信作者: 彭程(1988—), 男, 湖北应城人, 工程师, 本科, 主要从事砂矿的勘查与开发工作, Email: 352496100@qq.com。

表 3 原矿砂矿物组成分析结果
Table 3 Analysis results of mineral composition of raw ore

石英	黏土	云母	钛铁矿	电气石
95.62	3.75	0.16	0.16	0.084
锆英石	白钛石	石榴石	金红石	磁铁矿
0.019	0.003	0.003	0.003	0.003

1.2 粒度特征

样品筛析结果见表 4。结果表明,矿样粒度主要分布在 0.10~0.50 mm 之间,累积分布率为 91.86%;0.30~0.70 mm 粒级样品 SiO₂ 含量最高、Fe₂O₃ 含量最低;-0.30 mm 或+0.70 mm 粒级样品的 SiO₂ 含量降低、Fe₂O₃ 含量增加。

表 4 原矿砂筛析及其化学分析结果
Table 4 Sieve analysis and chemical analysis results of raw ore

粒级/mm	粒级含量/%	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	Fe ₂ O ₃ /%
+1.00	0.35	92.96	1.28	0.22
0.70~1.00	0.85	96.29	0.73	0.28
0.60~0.70	1.62	98.23	0.54	0.19
0.50~0.60	1.47	98.49	0.50	0.11
0.40~0.50	10.81	98.31	0.67	0.10
0.30~0.40	18.10			
0.20~0.30	28.24	97.69	0.95	0.19
0.10~0.20	34.71			
-0.10	3.86	86.19	6.47	0.78

1.3 矿物赋存特征

工艺矿物学研究表明,文昌地区石英砂主要矿物组成为三类:一类是主要有用矿物,即含量最高的石英;第二类是可综合回收利用的重矿物,以电气石、钛铁矿、白钛石、锆英石和金红石等矿物为主;第三类是泥质矿物,以含钾铝质矿物为主。

1.3.1 石英

石英密度为 2.10~2.65 g/cm³,比磁化系数-0.50~-1.00×10⁻⁶ cm³/g,大多数颗粒以单体形式存在,内部纯净度较高,颗粒凹凸面或裂隙中附着黏土矿物和铁质矿物^[2];少量石英颗粒与锆英石或金红石等重矿物形成连生体或包裹体结构^[7],同时,石英晶体表面存在少量的酸性油状薄膜,薄膜可能含有微量的 Fe₂O₃、Al₂O₃、TiO₂ 和 C 等物质。

1.3.2 重矿物

利用 MLA 和扫描电镜观察分析石英砂中重矿物(分析质量为 2 148.3 g),其含量见表 5。结果表明重矿物主要为赤(褐)铁矿、电气石、钛铁矿、锆英石、

红柱石和磷灰石等矿物,其中电气石、磷灰石、红柱石、十字石、蓝晶石和黄玉等重矿物密度相对较低,在 3.0~4.0 g/cm³ 之间。重矿物整体与马拉维^[13]和莫桑比克^[14]等大多数滨海重矿物粒度和分布特征一致,重矿物粒度主要集中在<0.20 mm 范围内,随着矿物粒度增大,重矿物含量减少。

表 5 原矿砂中重矿物鉴定结果
Table 5 Identification results of heavy minerals in raw ore sand

粒级/mm	赤褐铁矿/个	电气石/个	钛铁矿/个	白钛石/个	锆英石/个
+0.40	7 913	2 793	0	0	0
0.30~0.40	28 860	225 760	3 724	0	0
0.20~0.30	148 950	1 952 707	17 688	14 895	14 430
-0.20	大量	大量	大量	大量	大量
粒级/mm	红柱石/个	磷灰石/个	十字石/个	蓝晶石/个	黄玉/个
+0.40	0	0	0	0	0
0.30~0.40	6 982	3 258	1 396	0	0
0.20~0.30	81 460	32 584	20 481	10 706	8 379
-0.20	少量	少量	少量	少量	少量

说明:-0.20 mm 的重矿物粒度小、数量多,仅定性评价。

钛铁矿粒度主要集中在-0.20 mm 范围内,其含量大于电气石含量,密度为 4.72 g/cm³,比磁化系数 0.220~1.170×10⁻³ cm³/g。大部分钛铁矿以单体产出,部分钛铁矿发生富钛或富铁化,少量钛铁矿与石英或铁质矿物形成镶嵌或包裹结构^[13,15],文昌地区钛铁矿中 TiO₂ 含量一般在 50.50%~52.50% 之间^[16],可获得品质较高的钛铁矿精矿产品。

锆英石密度为 4.40~4.70 g/cm³,比磁化系数 0.60~1.10×10⁻⁶ cm³/g。大部分锆英石以单体状态存在,部分锆英石表面或裂隙中浸染铁或充填黏土,部分锆英石与石英颗粒或其他重矿物之间形成镶嵌结构。文昌地区锆英石矿中 ZrO₂ 含量一般在 64.20%~67.50% 之间^[17],可获得品质较高的锆英石精矿产品。

金红石密度为 4.20~4.40 g/cm³,比磁化系数 1.11~1.45×10⁻⁵ cm³/g。以原生、单体的金红石为主,部分与石英颗粒以包裹或镶嵌结构存在,该地区金红石中 TiO₂ 含量不低于 93.00%,可获得品质较高的金红石精矿产品。

赤铁矿、褐铁矿和磁铁矿主要以单体产出,部分以铁质薄膜产出。赤铁矿和磁铁矿密度为 4.90 g/cm³,褐铁矿密度约为 5.20 g/cm³,磁铁矿比磁化系数为 9.2×10⁻² cm³/g,赤铁矿和褐铁矿磁性与钛铁矿相似。

1.3.3 泥质

可从海南等多地砂质高岭土中综合回收利用高岭土精泥和石英砂等产品^[11,18-20],文昌地区原石英砂中黏土矿物含量也较多,主要为高岭土和蒙脱石,多覆

盖在石英砂表面, 黏土矿物中富含微细粒的铁质等重矿物。

2 选矿实验研究

在工艺矿物学研究的基础上, 结合石英砂提纯的研究成果^[2,6,21]制订实验研究方案: 首先利用擦洗的磨剥力除去-0.71 mm 石英砂表面的薄膜铁和泥质及附着在黏土矿物中的粉微粒赤(褐)铁矿和钛铁矿, 同时, 石英颗粒碰撞一定程度上提升其单体解离度, 在擦洗基础上采用分级去除较粗和较细的石英颗粒; 采用重选分选擦洗后石英砂, 主要分离出-0.30 mm 粒级中的铁、钛和锆等重矿物, 初步获取浮法玻璃用砂; 使用磁选去除浮法玻璃用砂中裂隙含铁质的石英和单体存在的磁性矿物; 最后利用碱性介质擦洗降低浮法玻璃用砂表面的酸性油脂薄膜中铁质, 获取光伏玻璃用砂; 同时, 对重选尾砂进行两次重选获得锆钛粗精矿, 对石英尾砂进行深加工获取铸造和石油压裂用的烘干砂。

2.1 光伏玻璃用砂提纯实验

2.1.1 擦洗和分级实验

采用擦洗机对-0.71 mm、矿浆质量浓度为 50%~60%、固体质量 600 g 的石英砂样品^[6,22](SiO₂、Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 含量分别为 96.67%、1.67% 和 0.14%)进行擦洗, 降低石英颗粒表面的黏土矿物及黏土矿物中粉微粒的重矿物含量, 实验先擦洗, 再沉降脱泥, 共 5 次、每次 15 s, 采用虹吸方式脱泥分级, 工艺流程见图 1, 结果见表 6。

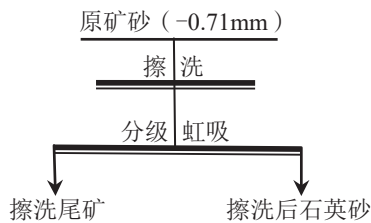


图 1 擦洗脱泥实验流程

Fig. 1 Scrubbing and desliming test flow

表 6 擦洗脱泥实验结果

Table 6 Scrubbing and desliming test results

序号	擦洗时间/min	石英砂 Fe ₂ O ₃ 含量/%	石英砂产率/%
1	5	0.063	94.33
2	10	0.050	93.53
3	15	0.050	93.43
4	20	0.050	92.82

结果表明, 擦洗可将原矿中 Fe₂O₃ 含量从 0.14% 降低至 0.050%; 其中在擦洗 10 min 内, Fe₂O₃ 含量随擦洗时间延长而降低, 超过 10 min 后石英砂 Fe₂O₃ 含量

变化不大, 但产率会降低, 故擦洗时间以 10 min 为宜。

2.1.2 重选实验

重选是利用石英和重矿物的密度差异进行分选, 将擦洗后石英砂(Fe₂O₃ 含量为 0.050%)固体浓度稀释至 30%~40%^[9], 采用外径为 600 mm 螺旋溜槽进行两次重选, 获得重选精砂和重选尾砂, 重选实验流程见图 2, 实验结果见表 7。

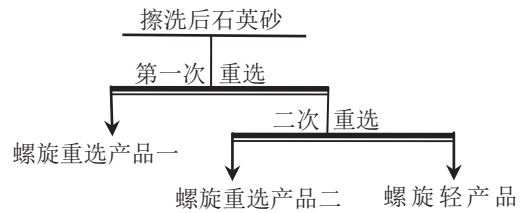


图 2 擦洗石英砂的重选实验流程

Fig. 2 Gravity concentration test flow of quartz sand after scrubbing

表 7 擦洗后石英砂的重选实验结果

Table 7 Results of gravity concentration test of quartz sand after scrubbing

序号	重选产品	Fe ₂ O ₃ 含量	产率
1	螺旋重选产品一	0.035	95.40
2	螺旋重选产品二	0.033	89.93

结果表明重选可将擦洗后的石英砂 Fe₂O₃ 含量降低, 一次重选轻产品 Fe₂O₃ 含量可降低至 0.035%, 二次重选轻产品可降低至 0.033%, 但二次重选的石英砂产率降低明显, 因此采用一次重选即可。

对一次螺旋重选轻产品进行镜下观察, 见表 8。

表 8 一次重选轻产品中重矿物鉴定结果

Table 8 Identification results of heavy minerals in the first heavy selection of light products

粒级/mm	赤褐铁矿/%	电气石/%	钛铁矿/%	白钛石/%	锆英石/%
+0.4	15.03	76.58	0	0	0
0.3~0.4	10.30	81.09	15.95	0	0
0.2~0.3	27.93	略少	43.68	79.81	61.79
-0.2	较少	略少	较少	略少	略少

粒级/mm	红柱石/%	磷灰石/%	十字石/%	蓝晶石/%	黄玉/%
+0.4	0	0	0	0	0
0.3~0.4	42.57	0	0	0	0
0.2~0.3	17.51	29.19	0	38.87	35.47
-0.20	较少	较少	较少	较少	较少

结果表明, 一次重选可将+0.20 mm 石英砂中重矿物含量降低 20%~90%, 平均降低 58.88%; 将-0.20 mm 石英砂中赤铁矿和钛铁矿矿物含量大幅度降低, 但对-0.20 mm 其他重矿物降低幅度有限。

2.1.3 擦洗—重选联合实验

在擦洗和重选单独实验的基础上,将实验原样均分为 8 份(每份 600 g),留 1 份备样,剩余 7 个石英砂样品采取擦洗(擦洗时间 10 min、浓度 50%)—重选(螺旋溜槽外径 600 mm、矿浆固体浓度 30%~40%)联合实验,实验流程见图 3,实验结果见表 9,重选轻产品的粒度特征见表 10。

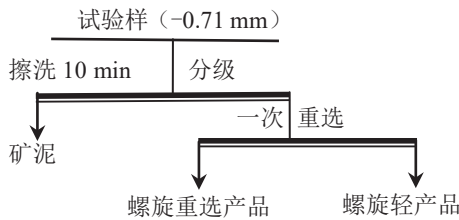


图 3 擦洗—重选联合实验流程
Fig. 3 Test flow of scrubbing-gravity combined test

表 9 擦洗—重选联合实验流程螺旋轻产品指标 /%
Table 9 Spiral light product indicators for the combined process of scrubbing and gravity separation

产品序号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	产率
第 1 组	99.25	0.31	0.040	0.029	91.13
第 2 组	99.29	0.30	0.034	0.037	90.71
第 3 组	99.41	0.21	0.032	0.029	90.69
第 4 组	99.33	0.36	0.039	0.035	90.82
第 5 组	99.34	0.20	0.029	0.032	90.65
第 6 组	99.13	0.29	0.075	0.035	90.97
第 7 组	99.19	0.26	0.034	0.031	90.50
平均值	99.28	0.28	0.040	0.033	90.78

表 10 螺旋轻产品粒度分布特征
Table 10 Particle size distribution characteristics of spiral light products

粒级/mm	0.71~0.60	0.60~0.40	0.40~0.30	0.30~0.20	0.20~0.106	~0.106
产率/%	0.67	5.77	19.12	25.87	43.61	4.96

结果表明,经一次擦洗和一次螺旋重选后螺旋轻产品产率为 90.78%, SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 平均含量分别为 99.28%、0.28%和 0.040%, 0.106~0.60 mm 粒度分布率为 94.37%, 满足低铁石英砂产品要求。

2.1.4 螺旋轻产品的补充除铁实验

擦洗—重选后部分螺旋轻产品不能满足浮法玻璃用砂 Fe₂O₃ 含量要求。对 Fe₂O₃ 含量高的螺旋轻产品采用螺旋重选和磁选两种方案除铁^[3,6,23], 以获得浮法玻璃用砂。将第 6 组产品分成两份, 分别开展螺旋重选和磁选对比实验, 实验流程见图 4, 实验结果见表 11。

结果表明,磁选法比重选法对降低重选精砂中 Fe₂O₃ 含量更有效, 不能满足浮法玻璃用砂的重选精砂经重选后 Fe₂O₃ 含量从 0.075% 降至 0.074%, 而磁选

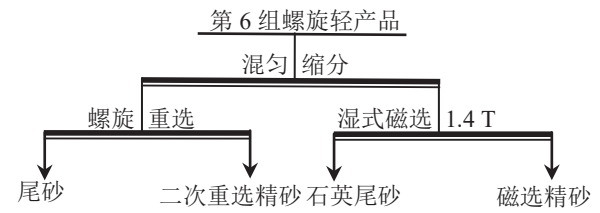


图 4 螺旋轻产品的补充实验流程
Fig. 4 Supplementary test process for spiral light products

表 11 除铁实验产物主要成分含量 /%
Table 11 Main component content of the iron removal test product

产品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
二次重选精砂	99.13	0.31	0.074
磁选精砂	99.24	0.29	0.035
给矿	99.13	0.29	0.075

可将 Fe₂O₃ 含量降低至 0.035%, 满足浮法玻璃用砂要求。

2.1.5 螺旋重选产品提纯实验

为了富集螺旋重选产品中锆钛矿物, 提升资源综合利用率, 对擦洗—重选的螺旋重选产品采用外径 600 mm 的螺旋溜槽进行两次重选, 以降低石英、电气石、磷灰石、红柱石、十字石、蓝晶石和黄玉等矿物含量, 重选实验流程见图 5, 实验结果见表 12。

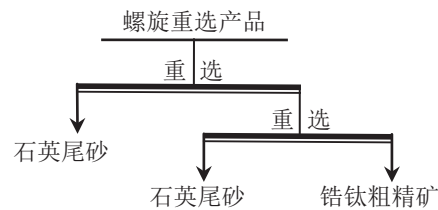


图 5 螺旋重选产品的再重选实验流程
Fig. 5 Repetitive gravity separation test process of spiral heavy product

表 12 螺旋重选产品的再重选实验结果 /%
Table 12 Repeated gravity concentration results of spiral heavy product

产品	ZrO ₂	TiO ₂	产率	ZrO ₂ 回收率	TiO ₂ 回收率
锆钛粗精矿	5.18	23.78	4.12	92.78	77.76
给矿	0.23	1.26	100	/	/

结果表明,两次螺旋重选后获得的重产品锆钛粗精矿中 ZrO₂ 和 TiO₂ 含量分别为 5.18% 和 23.78%、回收率分别为 92.78% 和 77.76%, 其经济价值较高。

2.1.6 浮法玻璃用砂提纯实验

为了去除石英晶体表面酸性油状生物膜, 对螺旋轻产品和磁选精砂中浮法玻璃用砂分别采用酸性介质(0.5 mol/L 的 HCl)和碱性介质(0.5 mol/L 的 NaOH)擦洗, 获取光伏玻璃用砂, 实验流程见图 6, 实验结果见表 13。

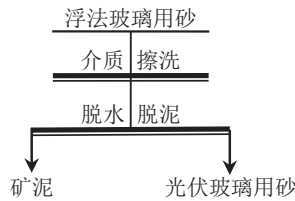


图 6 浮法玻璃用砂的介质擦洗实验流程
Fig. 6 Medium scrubbing test flow of sand for float glass

表 13 浮法玻璃用砂的介质擦洗实验产品质量对比 /%
Table 13 Comparison of product quality in medium scrubbing test of sand for float glass

擦洗介质	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
酸性介质	99.63	0.045	0.009 1
碱性介质	99.75	0.050	0.008 3

结果表明, 酸性和碱性介质擦洗均可将浮法玻璃用砂中 Fe₂O₃ 含量降至 0.012 0% 以内、Al₂O₃ 含量降至 0.050% 以内, 满足光伏玻璃用砂的要求, 其中碱性介质擦洗降低石英表面的酸性油状生物膜效果更好, 有效中和石英颗粒表面的酸性物质, 降低铁离子的吸附, 碱性介质擦洗后 Fe₂O₃ 含量降至 0.008 3%, 比酸性介质擦洗后的 Fe₂O₃ 含量更低。

2.1.7 石英尾砂的深加工

石英尾砂以石英为主, 有极少量的重矿物和泥质组分, 为了提升资源的综合利用效率, 对获得的石英尾砂进行烘干和筛分, 获取不同粒度的铸造用砂或石油压裂用砂, 实验流程见图 7。

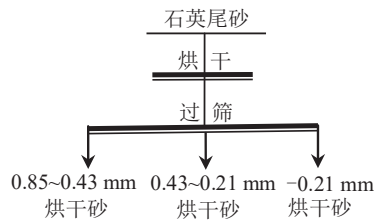


图 7 石英尾砂深加工流程
Fig. 7 Deep processing process of quartz sand

石英尾砂深加工产品以 0.85~0.43 mm 和 0.43~0.21 mm 的烘干砂产品为主, 不同批次产率变化较大, 但产品物理化学性质稳定, 主要可用于铸造和石油压裂领域, 产品主要物理性质分析结果见表 14, 渗透性能分析结果见表 15。

2.1.8 全流程实验

根据上述流程实验及其结果, 最终确定海南文昌某石英砂的全流程实验流程(见图 8), 结果见表 16。

说明: 烘干砂产品按粒度分为 0.85~0.43 mm、0.43~0.21 mm 和 -0.21 mm 三种, 由于产率差异较大, 暂未统计。

表 14 烘干砂物理性质分析结果

Table 14 Analysis results of physical properties of drying quartz sand

粒度/mm	破碎度/%		密度/g·cm ⁻³			圆度	球度	浊度
	14 MPa	28 MPa	体积密度	视密度	绝对密度			
0.85~0.43	12.20	42.50	1.44	2.62	2.65	0.7	0.7	109
0.43~0.21	4.00	17.40	1.50	2.63	2.66	0.7	0.7	235

表 15 不同闭合压力下烘干砂的导流能力和渗透率

Table 15 The conductivity and permeability of dried sand under different closure pressures

闭合压力 /MPa	0.85~0.43 mm 粒级烘干砂		0.43~0.21 mm 粒级烘干砂	
	导流能力 /μm ² ·cm	渗透率/μm ²	导流能力 /μm ² ·cm	渗透率/μm ²
10	27.6	76.94	54.34	152.05
20	15.81	45.61	25.57	75.49
30	10.8	31.9	13.64	41.61
40	7.57	22.93	7.37	22.78
50	6.22	19.04	4.38	13.76
60	5.67	17.58	2.64	8.42

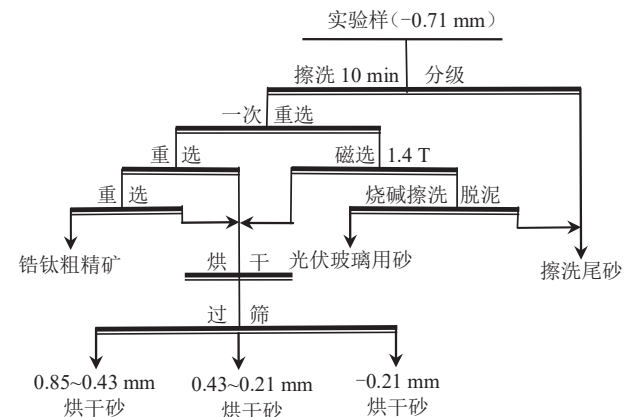


图 8 全流程实验流程
Fig. 8 Full process tests

表 16 全流程实验结果 /%

Table 16 Full process test results

产品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	ZrO ₂	产率
光伏玻璃用砂	99.74	0.05	0.008	0.023	/	83.63
锆钛粗精矿	/	/	/	23.78	5.18	0.18
烘干砂	99.24	0.68	0.04	/	/	9.04
擦洗尾矿	51.09	21.81	/	/	/	7.15
给矿	96.67	1.67	0.14	0.120	0.01	100.00

2.2 传统工艺流程

石英砂传统生产工艺为擦洗—重选—磁选—酸洗流程, 工艺流程见图 9, 实验结果见表 17。

结果表明石英砂按传统工艺流程, 获得的石英砂

Fe₂O₃ 含量为 0.04%，能满足浮法玻璃用砂要求，但不能满足光伏玻璃用砂的要求。

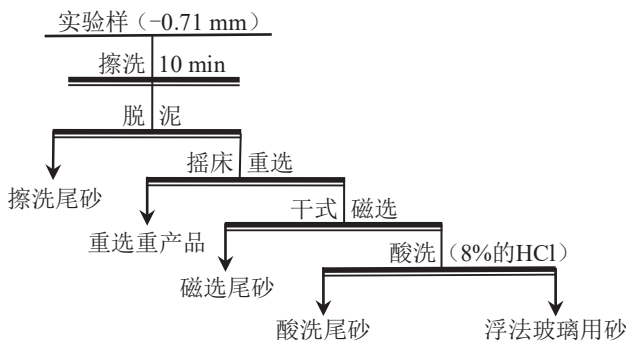


图 9 石英砂传统工艺实验流程

Fig. 9 Traditional process test flow of quartz sand

表 17 石英砂传统工艺试验结果 /%
Table 17 Results of traditional process flow for quartz sand

产品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	产率
擦洗后的石英砂	98.94	0.31	0.09	94.81
重选后的石英砂	99.18	0.31	0.07	91.41
磁选后的石英砂	99.22	0.30	0.05	89.47
浮法玻璃用砂	99.42	0.18	0.04	87.73
给矿	97.34	1.31	0.16	100

说明：擦洗、重选和磁选后的石英砂直接进入下一步流程。

3 结论

(1) 石英砂原矿中 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、TiO₂ 和 ZrO₂ 含量分别为 96.67%、1.67%、0.14%、0.12% 和 0.01%，主要矿物为石英、泥质和锆钛等重矿物组成，矿物粒度在 0.1~0.50 mm 粒级分布率高达 91.86%，在 0.30~0.70 mm 粒级 Fe₂O₃ 含量最低，-0.30 mm 或 +0.70 mm 粒级 Fe₂O₃ 含量增加。

(2) 石英砂中石英矿物晶体主要以单体形式存在，内部纯净，颗粒凹凸面或裂隙中附着黏土矿物和铁质矿物，少量石英颗粒与锆英石或金红石等重矿物形成连生体或包裹体结构，石英晶体表面酸性油状薄膜中含微量铁质；重矿物集中在 -0.30 mm 粒级中，铁质矿物主要为钛铁矿、磁铁矿和赤(褐)铁矿等磁性矿物，通过重选和磁选易选出；微粉粒的重矿物被泥质吸附较为普遍，可通过擦洗等方式去除，石英矿物晶体表面的酸性油状薄膜可通过碱性介质擦洗去除。

(3) 石英砂采用擦洗—摇床重选—干式磁选—酸洗的传统生产工艺，获得产率为 87.73.11%，SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 含量分别为 99.42%、0.18% 和 0.04% 的浮法玻璃用砂，达不到光伏玻璃用砂的要求。

(4) 石英砂经擦洗—分级—螺旋重选—湿式磁选—碱介质擦洗的改造工艺后，SiO₂ 回收率提升至 95.57%，其中光伏玻璃用砂产率为 83.63%，含 SiO₂ 99.74%、

Al₂O₃ 0.05%、Fe₂O₃ 0.008%、TiO₂ 0.023%；同时，螺旋重选产品提纯获得 ZrO₂ 含量 5.18%、TiO₂ 含量 23.78% 的锆钛粗精矿，石英尾砂经烘干分级可获得烘干砂，烘干砂都可以满足铸造用砂要求，其中两种烘干砂的体积密度为 1.44 g/cm³ 和 1.50 g/cm³、视密度为 2.62 g/cm³ 和 2.63 g/cm³、绝对密度为 2.65 g/cm³ 和 2.65 g/cm³、圆度为 0.7、球度为 0.7、浊度为 109 和 235，相关指标基本可以满足石油压裂用砂的要求。

(5) 经过对传统选矿工艺改造，石英砂产品品级从浮法玻璃用砂提升至光伏玻璃用砂，并综合回收利用获得了高附加值的锆钛矿物产品和铸造或石油压裂用的烘干砂，产品综合利用率得到大幅度提升。

参考文献:

[1] 钟森林, 陈俊明, 张超达, 等. ZQS磁选机在光伏玻璃用石英砂厂中的应用[J]. *材料研究与应用*, 2019, 13(2): 146-151.
ZHONG S L, CHEN J M, ZHANG C D, et al. Application of ZQS magnetic separator in silica sand plant for photovoltaic glass[J]. *Materials Research And Application*, 2019, 13(2): 146-151.

[2] 郭文达, 韩跃新, 朱一民, 等. 高纯石英砂资源及加工技术分析[J]. *金属矿山*, 2019, 48(2): 22-28.
GUO W D, HAN Y X, ZHU Y M, et al. Analysis of high-purity quartz sand resources and its processing technologies[J]. *Metal Mine*, 2019, 48(2): 22-28.

[3] 钟森林, 谢宝华, 袁祥奕, 等. 东南亚某石英砂选矿试验研究[J]. *中国矿业*, 2019, 28(S1): 259-262.
ZHONG S L, XIE B H, YUAN X Y, et al. Study on the beneficiation test of silica sand in southeast Asia[J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(S1): 259-262.

[4] 彭寿, 吴建新, 谷翠红, 等. PPM级低铁石英砂的浮选技术及规模化生产实践[J]. *建材世界*, 2010, 31(1): 49-52.
PENG S, WU J X, GU C H, et al. Flotation process and formalization production practice of PPM grade low iron quartz sand[J]. *The World of Building Materials*, 2010, 31(1): 49-52.

[5] 陆玉, 邵辉, 王康, 等. 河北某石英矿工艺矿物学与提纯研究[J]. *非金属矿*, 2021, 44(6): 56-58.
LU Y, SHAO H, WANG K, et al. Process mineralogy and purification of a quartz ore in Hebei province[J]. *Non-Metallic Mines*, 2021, 44(6): 56-58.

[6] 张婷婷, 任东风, 侯军发, 等. 海相沉积型天然石英砂生产超白砂的工艺研究[J]. *建材世界*, 2012, 33(4): 48-51.
ZHANG T T, REN D F, HOU J F, et al. Marine sedimentary natural quartz sand production technology of ultra white sand[J]. *The World of Building Materials*, 2012, 33(4): 48-51.

[7] 王守敬, 邵伟华. 海滨石英砂矿物学研究—以海南文昌石英砂为例[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(6): 58-61.
WANG S J, SHAO W H. Mineralogical study about seashore quartz sand ore—a case study from the seashore quartz sand ore at Wenchang, Hainan province[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, 39(6): 58-61.

[8] 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): 112-117.
JIA D L, ZHANG W Y, CHEN C L, et al. Global resource status and China's development suggestions of high purity quartz[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, 39(5): 112-117.

- [9] 石钰,张磊,周东,等.高纯石英砂的制备及应用研究进展[J].中国建材科技,2019,28(4):73-75.
SHI Y, ZHANG L, ZHOU D Z, et al. Study on preparation and application of higher purity quartz sand[J]. China Building Materials Science & Technology, 2019, 28(4): 73-75.
- [10] 杨文,周迎春,侯军发,等.超白石英砂尾砂除钛和降细粒级砂的试验研究[J].非金属矿,2020,43(6):64-66.
YANG W, ZHOU Y C, HOU J F, et al. Study on titanium removal and fine-grained sand reduction experiment of ultra white quartz sand tailing[J]. Non-Metallic Mines, 2020, 43(6): 64-66.
- [11] 谢恩俊,林江平,甘国超,等.高岭土尾矿制备光伏玻璃用低铁石英砂的提纯试验研究[J].建材世界,2021,42(3):14-17.
XIE E J, LIN J P, GAN G C, et al. Experimental study on purification of low iron quartz sand for photovoltaic glass from kaolin tailings[J]. The World of Building Materials, 2021, 42(3): 14-17.
- [12] 彭程,周迎春,李国杰,等.海南文昌北部地区矿山地质特征及成因探析[J].中国金属通报,2020(6):65-66.
PENG C, ZHOU Y C, LI G J, et al. Geological characteristics and genesis of mines in the north of Wenchang, Hainan province[J]. China Metal Bulletin, 2020(6): 65-66.
- [13] 彭程,周迎春,李国杰,等.马拉维湖滨型钛铁矿选冶分离试验研究[J].矿冶工程,2021,41(4):52-56.
PENG C, ZHOU Y C, LI G J, et al. Study on process mineralogy and separation and enrichment of lakeside ilmenite placer in Malawi[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(4): 52-56.
- [14] 李宁,姚建军.莫桑比克某滨海锆钛砂矿工艺矿物学研究[J].现代矿业,2022,38(11):114-116.
LI N, YAO J J. Study on process mineralogy of a coastal zirconium-titanium placer in mozambique[J]. Modern Mining, 2022, 38(11): 114-116.
- [15] 彭程,周迎春,李国杰,等.还原焙烧—磁选工艺回收马拉维某钛粗精矿中的钛和铁[J].矿产保护与利用,2022,42(1):150-157.
PENG C, ZHOU Y C, LI G J, et al. Recovery of titanium and iron from titanium rough concentrate in Malawi by reduction roasting-magnetic separation process[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resource, 2022, 42(1): 150-157.
- [16] 付标,薛玉龙,曾维特,等.海南岛东南部近岸表层沉积物锆、钛地球化学特征对浅海砂矿的指示[J].中国矿业,2021,30(S1):208-216.
FU B, XUE Y L, ZENG W T, et al. Geochemical characteristics of Zr and Ti in surface sediments indicate the shallow sea placers at southeast off-shore of Hainan island[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(S1): 208-216.
- [17] 宋家伟,伍德明,陈飞,等.海南岛东部浅海表层沉积物锆、钛地球化学特征及资源潜力分析[J].中国矿业,2021,30(S1):217-221.
SONG J W, WU D M, CHEN F, et al. Geochemical characteristics and resource potential of Zr and Ti in shallow sea surface sediments in the east of Hainan island[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(S1): 217-221.
- [18] 曹健,陈小罗,陈铮,等.海南省某砂质高岭土选矿试验研究[J].矿产保护与利用,2013,33(2):44-49.
CAO J, CHEN X L, CHEN Z, et al. Beneficiation study on a sandy Kaolin from Hainan province[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resource, 2013, 33(2): 44-49.
- [19] 尚德兴,周新军,张乾伟,等.高岭土尾矿制备光伏玻璃用低铁石英砂[J].金属矿山,2019,48(12):188-191.
SHANG D X, ZHOU X J, ZHANG Q W, et al. Preparation of low iron quartz sand for photovoltaic glass from kaolin tailings[J]. Metal Mine, 2019, 48(12): 188-191.
- [20] 吴飞达,高惠民,任子杰,等.合浦某高岭土尾砂的提纯与利用[J].非金属矿,2019,42(5):62-66.
WU F D, GAO H M, REN Z J, et al. Purification and utilization of kaolin tailings in Hepu[J]. Non-Metallic Mines, 2019, 42(5): 62-66.
- [21] 豆中磊,郑水林,吴照洋.海南某石英砂矿的选矿提纯试验研究[J].金属矿山,2009,38(1):051-053.
DOU Z L, ZHEN S L, WU Z Y. Study on concentration experiment of silica sand from Hainan province[J]. Metal Mine, 2009, 38(1): 051-053.
- [22] 刘思,高惠民,胡廷海,等.北海某高岭土尾矿中石英砂的选矿提纯试验[J].金属矿山,2013,42(6):161-164.
LIU S, GAO H M, HU T H, et al. Separation experiment of kaolin tailing quartz sand in Guangxi Beihai[J]. Non-Metallic Mines, 2013, 42(6): 161-164.
- [23] 李宇宏.江西某石英砂精矿再除铁试验研究[J].矿冶工程,2016,36(2):41-43.
LI Y H. Further reducing of iron content in quartz sand concentrate from Jiangxi with HGMS technique[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2016, 36(2): 41-43.
- [24] 刘泽伟,邹玄,赵阳,等.某石英砂矿制取高纯石英工艺研究[J].矿产综合利用,2020,41(4):111-115.
LIU Z W, ZOU X, ZHAO Y, et al. Study on the process of producing high-purity quartz from a quartz sand mine[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020, 41(4): 111-115.

Experimental Study on Purification of a Quartz Placer in Wenchang of Hainan

ZHOU Yingchun¹, PENG Cheng¹, HUANG Rong², LI Guojie¹, JI Yushi¹

1. Hainan International Resources Group Co., Ltd., Haikou 570100, Hainan, China;

2. Hainan Institute of Geological Survey. Haikou 570100, Hainan, China

Abstract: In order to improve the quality of photovoltaic glass sand products in a quartz sand mine in Wenchang, Hainan. It used methods such as MLA and electron microscopy to identify the properties and occurrence states of minerals, and conducted purification experiments on quartz sand. The results of experimental show that the content of SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, and ZrO₂ in the raw sand of quartz is 96.67%, 1.67%, 0.14%, 0.12%, and 0.01%, respectively. Harmful components mainly adhere to surfaces, fault and acid oil on quartz particles in the form of argillaceous and Ferruginous. After transforming the traditional process which consists of gravity concentration, magnetic separation and acid leaching into the new technology consists of scrubbing, grading, spiral gravity separation, wet magnetic separation, and alkali leaching. The experiment increased the recovery rate of SiO₂ from 89.60% to 95.57%. The SiO₂ increased from 99.42% to 99.74%, Al₂O₃ and Fe₂O₃ decreased from 0.18% and 0.04% to 0.05% and 0.008% in the products of quartz, which can meet the demand for raw materials of photovoltaic glass. The experiment purified the spiral heavy product to obtain zirconium titanium coarse concentrate that contains 5.18% ZrO₂ and 23.78% TiO₂. At the same time, Quartz tailings can be reprocessed into drying sand for casting or fracturing. This experiment has improved the recovery rate and added value of siliceous products.

Keywords: quartz; beach placer; sand for photovoltaic glass; sand for float glass; purification; zirconium titanium minerals

引用格式: 周迎春, 彭程, 黄蓉, 李国杰, 吉榆师. 海南文昌某石英砂矿提纯实验研究[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(4): 73-80.

ZHOU Yingchun, PENG Cheng, HUANG Rong, LI Guojie, JI Yushi. Experimental study on purification of a quartz placer in wenchang of hainan[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(4): 73-80.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn