

# 广东某高岭土矿中石英选矿提纯试验研究

张玉梅<sup>1</sup>, 任子杰<sup>1,2,3</sup>, 高惠民<sup>1,2,3</sup>, 印航<sup>4</sup>, 谢俊<sup>3,4,5</sup>, 郝文华<sup>6</sup>

1. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070;
2. 矿物资源加工与环境湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070;
3. 合浦县硅材料产业技术研究中心, 广西 北海 536000;
4. 中能建绿色建材有限公司, 湖北 武汉 430015;
5. 武汉理工大学硅酸盐建筑材料国家重点实验室, 湖北 武汉 430070;
6. 中硅工业集团有限公司, 北京 100194

中图分类号: TD973.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)04-0068-05

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.04.007

**摘要** 对广东某伴生有石英的高岭土矿进行选矿试验研究, 以期获得符合要求的石英砂产品。高岭土原矿捣浆、分级分离出-0.045 mm 粒级高岭土产品后得到尾砂, 尾砂中占比 99.13% 的+0.1 mm 粒级物料可用作玻璃用石英原料。对可用作玻璃原料的+0.6 mm 粒级进行了“拣选—磨矿—磁选”与“磨矿—磁选”两种工艺对比试验, 结果表明, 拣选对最终选别指标影响较小, 采用磨矿—磁选即可; +0.6 mm 粒级经磁选后均可获得 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量小于 120 μg/g 的石英精矿, -0.60+0.10 mm 粒级产品经磨矿—磁选可获得 SiO<sub>2</sub> 含量为 99.04%、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 104.46 μg/g 的石英精矿, 可达到光伏玻璃用石英砂的标准。该研究有助于高岭石伴生石英砂的综合利用, 可提升伴生石英砂的价值。

**关键词** 高岭土; 石英砂; 选矿提纯; 光伏玻璃; 磁选

## 引言

高岭土是一种由长石风化而来的黏土类矿物原料, 主要矿物成分为高岭石和多水高岭石, 还存在其他伴生矿物, 如石英、长石、云母和伊利石等<sup>[1]</sup>。作为一种重要的非金属矿物原料, 高岭土具有良好的可塑性、较高的耐火性、可烧结性以及白度高、易于加工等特点, 广泛应用于陶瓷、造纸、橡胶、塑料、涂料、化工、石油和建材等领域<sup>[2-4]</sup>。我国是高岭土消费大国, 且高岭土资源丰富<sup>[5]</sup>, 但高岭土加工过程中产生的大量尾矿回收利用较少, 大多被露天堆弃, 不仅侵占土地、破坏生态环境<sup>[6-7]</sup>, 而且造成不可再生资源的浪费。在高岭土尾矿中含有大量的石英资源, 随着优质石英砂资源紧缺<sup>[8-9]</sup>, 寻求更多样的石英资源具有重大的意义。

胡廷海等<sup>[10]</sup>对广西某高岭土尾矿进行擦洗、磨矿、分级、强磁选和浮选获得 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 74 μg/g、SiO<sub>2</sub> 品位为 99.89%、SiO<sub>2</sub> 回收率为 94.61% 的石英砂。谢恩俊等<sup>[11]</sup>采用“磨矿—水力分级—磁选—浮选”选矿工艺流程对福建高岭土尾矿进行选矿提纯试验研究, 获得 0.6~0.125 mm 粒级含量大于 95%、SiO<sub>2</sub> 含

量 99.62%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 0.065%、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 92 μg/g 的石英精矿, 满足光伏玻璃用低铁石英砂的质量要求。尚德兴等<sup>[12]</sup>采用“磨矿—分级—重选—磁选—擦洗—浮选”工艺对福建某高岭土尾矿中的石英进行选矿提纯, 获得的石英精矿 SiO<sub>2</sub> 含量为 99.29%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 0.27%、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 0.002 9%, 满足太阳能光伏、光热超白玻璃用低铁石英砂质量要求。

本文以广东某高岭土伴生石英砂为对象进行选矿试验研究, 以期获得符合光伏玻璃要求的低铁 (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><120 μg/g) 石英原料, 以实现伴生资源综合回收。

## 1 试样性质

### 1.1 试样粒度特征

采用筛析法测定了试样粒度组成。试样中+0.6 mm 粒级产率最高, 为 68.9%, -0.6+0.1 mm 粒级产率次之, 为 30.23%; -0.10 mm 粒级产率为 0.87%; 该伴生石英砂中可用作玻璃原料的粒级 (+0.6 mm 及 -0.6+0.10 mm) 产率为 99.13%, 其中符合玻璃砂粒级 (-0.6+0.10 mm) 的石英砂占 30.23%。

收稿日期: 2022-10-04

作者简介: 张玉梅 (1997—), 女, 贵州毕节人, 硕士研究生, 主要从事非金属矿选矿与矿物材料研究, E-mail: 2698747239@qq.com。

通信作者: 任子杰 (1987—), 男, 山西孝义人, 博士, 副教授, 博导, 主要从事非金属矿选矿与矿物材料研究, E-mail: renzizjie@whut.edu.cn。

### 1.2 试样化学成分

样品来自广东某伴生有石英的高岭土尾砂, 试样的化学成分如表 1 所示。

表 1 试样化学成分分析结果 /%

成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>2</sub>	MgO
含量	94.96	3.36	0.19	0.17	0.21	0.15	0.04	0.07	0.07

由表 1 化学成分分析可知, 试样中主要杂质成分为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O。

### 1.3 试样各粒级矿物组成

将该高岭土伴生石英砂+0.01 mm 以上粒级产品进行 XRD 测试, 结果如图 1 和图 2。

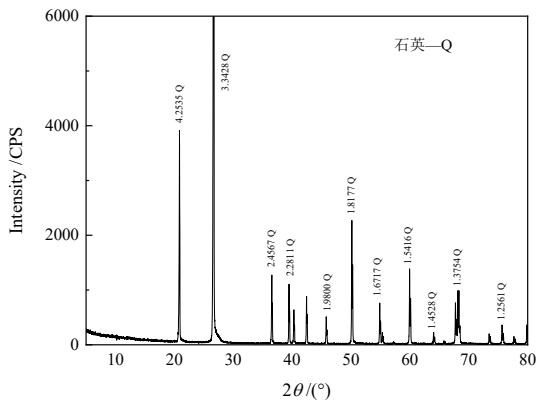


图 1 +0.6 mm 粒级伴生石英砂 XRD 图谱  
Fig. 1 XRD patterns of +0.6mm associated quartz sand

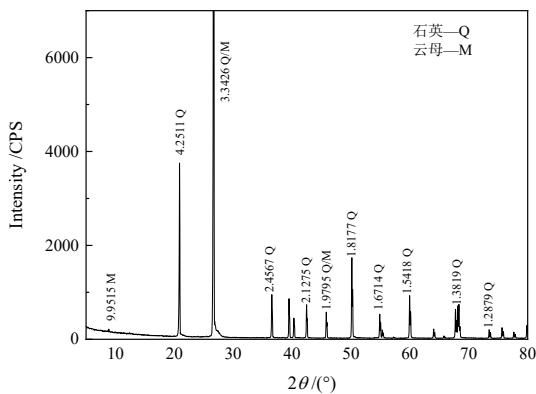


图 2 -0.6+0.10 mm 粒级伴生石英 XRD 图谱  
Fig. 2 XRD patterns of -0.6+0.10 mm associated quartz sand

结合各粒级 XRD 图谱及体视显微镜照片可知, 高岭土伴生石英砂的主要矿物为石英, 含有少量白云母。对于+0.6 mm 粒级石英砂, 主要矿物组成为石英, 部分石英表面含有长石, 应进行磨矿使其单体解离<sup>[13]</sup>。对于-0.60+0.10 mm 粒级, 主要矿物组成为石英和云母, 主要以集合体形式存在, 部分石英包含黄色和黑色杂质矿物, 可见明显的暗色矿物, 观察推测为褐铁矿或磁铁矿。

## 2 选矿试验

### 2.1 +0.6 mm 粒级石英砂筛分试验

+0.6 mm 粒级石英砂较粗, 对此粒级石英砂进行筛分分级。考察+2.36 mm、-2.36+1.70 mm、-1.70+0.6 mm 三个粒级产率, 结果见表 2。

由表 2 可知, +1.70 mm 粒级产率为 33.40%, -1.70+0.60 mm 粒级产率为 35.49%, 两个粒级产率相当, 因而对+1.70 mm 粒级及-1.70+0.60 mm 粒级石英砂进行磨矿—磁选流程试验, 探究其磁选精矿 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量是否能达到光伏玻璃用石英砂标准。筛分后可见+1.70 mm 粒级和-1.70+0.60 mm 粒级石英砂均有较多的红褐色和黑色杂质矿物, 为探究其对其磁选的影响, 对其拣选出来的产品和未拣选原矿试样分别进行磨矿—磁选的对比试验。

表 2 +0.6 mm 粒级石英砂筛分结果  
Table 2 Screening results of +0.6 mm particle class quartz sand

粒级/mm	+2.36	-2.36+1.70	-1.70+0.60
产率/%	23.97	9.43	35.49

### 2.2 +0.6 mm 粒级拣选样与原矿试样磨矿—磁选对比试验

对+1.70 mm 粒级石英砂样品采用型号为 XMB-7 三辊四筒球磨机进行磨矿试验。磨矿条件为矿浆质量浓度 60%、磨矿时间 3 min、转速 150 r/min。-1.70+0.60 mm 粒级石英砂颗粒较细, 硬度较低, 用高铝球磨矿效果较好, 磨矿条件同+1.70 mm 粒级, 磨矿—磁选流程如图 3 所示, 所得选矿产品的产率和石英精矿 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量见表 3。

试样中的主要磁性矿物为赤铁矿和钛铁矿, 这部分含铁矿物可经高梯度磁选去除<sup>[14-15]</sup>。将手拣选样和原矿试样的+1.70 mm 和-1.70+0.60 mm 粒级石英砂分别进行磁选, 磁选流程为一次粗选两次精选, 每一段磁选的磁场磁感应强度均为 1.4 T, 矿浆流速 1.0 cm/s, 脉动频率 200 r/min。各试样磁选石英精矿 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量结果见表 3。

由表 3 可知, 无论是否经过拣选+1.70 mm 粒级和-1.70+0.60 mm 粒级经磨矿后对应的各粒级磨矿作业产率接近, 磁选石英精矿作业产率接近; +1.70 mm 粒级和-1.70+0.60 mm 粒级经磁选都可达到光伏玻璃用石英砂的标准(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><120 μg/g), +1.70 mm 粒级和-1.70+0.60 mm 粒级石英砂中红褐色、黑色杂质矿物虽对产品质量有影响, 但均可达到相应要求。因此对类似伴生石英砂中+0.60 mm 粒级进行选矿提纯时无需进行拣选。

表 3 各试样磨矿、磁选产率及磁选精矿 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量

Table 3 The grinding, magnetic separation yield of each sample and the content of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in magnetic separation concentrate

试样	磨矿产品各粒级产率/%			石英精矿产率/%	石英精矿 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含量/( μg·g <sup>-1</sup> )
	+0.60 mm	-0.60+0.10 mm	-0.10 mm		
拣选试样+1.70 mm	9.82	56.24	33.94	99.37	74.97
未拣选原矿试样+1.70 mm	9.83	59.44	30.73	99.79	117.34
拣选试样-1.70+0.60mm	3.07	80.10	16.83	99.80	109.79
未拣选原矿试样-1.70+0.60 mm	11.76	74.92	13.32	99.85	119.39

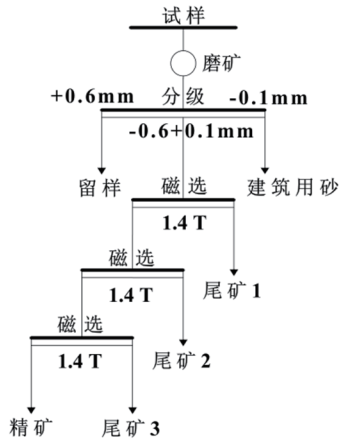


图 3 拣选试样和原矿试样磨矿—磁选流程  
Fig. 3 Schematic diagram of grinding-magnetic separation process of picking sample and raw ore sample

### 2.3 -0.6+0.1 mm 粒级细砂磁选试验

磨矿能够使得物料在细化的过程中尽量实现有用矿物与脉石矿物的单体解离<sup>[6]</sup>, 为后续的选别作业提供合适的入选物料。对于试样分级出来的-0.60+0.10 mm 粒级细砂, 其磁选所得石英精矿产率为 98.83%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 242.59 μg/g, 不能满足光伏玻璃用石英砂 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的要求。因而对原试样中-0.60+0.10 mm 粒级进行磨矿—磁选试验, 控制过磨量 (-0.60+0.10 mm 粒级进行磨矿后产生的-0.10 mm 粒级产率小于 20%), 探究在不同磨矿细度下, 磁选精矿 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量是否能达到光伏玻璃用石英砂标准, 磨矿—磁选流程图见图 4, 磨矿时间对磁选精矿 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的影响见图 5。

由图 5 可知, 随着磨矿时间的增加, 磁选石英精矿 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量不断降低, 过磨量随之增加。当磨矿时间为 5 min 时, 过磨量为 18.87%, 磁选精矿 SiO<sub>2</sub> 含量提高到 99.04%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量从 242.59 μg/g 降低至 104.46 μg/g, 满足光伏玻璃用石英砂要求。

## 3 结论

(1) 广东某伴生有石英的高岭土矿主要矿物为石英、含少量云母, 有较多的红褐色、黑色杂质矿物(赤铁矿、褐铁矿等)。

(2) 由选矿试验结果可知, 该伴生有石英的高岭土矿+0.60 mm 粒级经过磨矿至合格粒级(-0.60+0.10 mm)

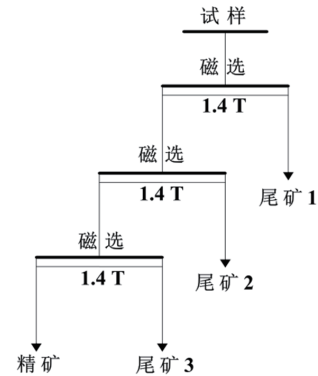


图 4 原试样-0.60+0.10 mm 粒级磨矿—磁选流程  
Fig. 4 Schematic diagram of grinding-magnetic separation process in the original sample -0.60+0.10 mm class

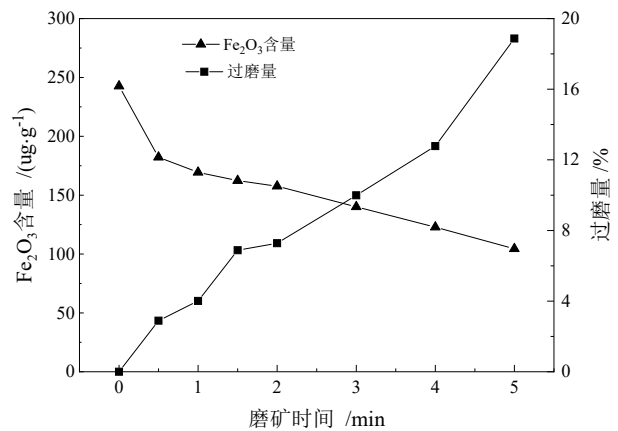


图 5 不同磨矿时间对磁选石英精矿 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的影响  
Fig. 5 Effect of grinding time on Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content of magnetic quartz separation concentrate

后无论是否经过拣选, 磁选后获得的石英精矿 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量均小于 120 μg/g, SiO<sub>2</sub> 含量可提高到 99.45%, 可达到光伏玻璃用石英砂标准, 因此利用+0.6 mm 粒级石英砂加工光伏玻璃用石英砂无需进行拣选。

(3) 由选矿试验结果可知, 该伴生有石英的高岭土矿-0.60+0.10 mm 粒级磨矿—磁选获得的石英精矿 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量随着磨矿时间增加而降低, 当磨矿时间为 5 min 时, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量降低为 104.46 μg/g, SiO<sub>2</sub> 含量提高到 99.04%, 满足光伏玻璃用石英砂的标准。

## 参考文献:

[1] 郑水林, 袁继祖. 非金属矿加工技术与应用手册[M]. 北京: 冶金工

- 业出版社, 2005: 433-447.
- ZHENG S L, YUAN J Z. Technical and application manual for non-metal mine processing[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 418-424.
- [2] 程德明, 杜泰康, 陈志雄. 选矿手册: 第八卷第四分册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990.
- CHENG D M, DU T K, CHEN Z X. Mineral processing manual: Volume 8, Section 4[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990.
- [3] 张凌燕, 张丹萍, 王浩, 等. 广东砂质高岭土除铁增白试验研究[J]. 非金属矿, 2013, 36(1): 33-35+49.
- ZHANG L Y, ZHANG D P, WANG H, et al. Study on iron removal and whitening of sandy kaolin from Guangdong[J]. Non-Metallic Mines, 2013, 36(1): 33-35+49.
- [4] 管俊芳, 杨慧群, 高惠民, 等. 淮北煤系高岭土增白试验研究[J]. 非金属矿, 2010, 33(2): 1-3+10.
- GUAN J F, YANG H Q, GAO H M, et al. Experimental study on whitening of coal series kaolin from Huaibei[J]. Non-Metallic Mines, 2010, 33(2): 1-3+10.
- [5] 汪先三. 我国高岭土开发利用现状及应用前景[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2016(2): 8-9+19.
- WANG X S. Exploitation and application prospects of kaolin in China[J]. China Non-Metallic Minerals Industry, 2016(2): 8-9+19.
- [6] 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(6): 161-164.
- LIU S, GAO H M, HU T H, et al. Separation experiment of kaolin tailing quartz sand in Beihai[J]. Metal Mine, 2013(6): 161-164.
- [7] 杨志明, 陈向荣, 陈霖. 高岭土尾矿综合开发利用前景探讨[J]. 河南建材, 2014(1): 63-65.
- YANG Z M, CHEN X R, CHEN L. Discussion on the prospect of comprehensive development and utilization of kaolin tailings[J]. He'nan Building Materials, 2014(1): 63-65.
- [8] 刘国库, 张文军, 马正先, 等. 硅石选矿提纯工艺研究现状[J]. 有色矿冶, 2007(6): 26-30.
- LIU G K, ZHANG W J, MA Z X, et al. Present situation of researching on purifying silica by mineral processing[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2007(6): 26-30.
- [9] 王九一. 全球高纯石英原料矿的资源分布与开发现状[J]. 岩石矿物学杂志, 2021, 40(1): 131-141.
- WANG J Y. Global high purity quartz deposits: Resources distribution and exploitation status[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2021, 40(1): 131-141.
- [10] 胡廷海, 高惠民, 管俊芳, 等. 广西某高岭土尾矿石英砂浮选除铁试验[J]. 金属矿山, 2012(8): 164-167.
- HU T H, GAO H M, GUAN J F, et al. Experiment of iron removal by flotation from the quartz sand produced by the slag of kaolin in Guangxi[J]. Metal Mine, 2012(8): 164-167.
- [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] 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(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(12): 188-191.
- [13] 呼振峰, 孙传尧. 磨矿介质对长石和石英浮选行为的影响及机理分析[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(3): 62-66.
- HU Z F, SUN C Y. Effect and mechanism of different grinding mediums on the flotation behavior of feldspar and quartz[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2018(3): 62-66.
- [14] 吴飞达, 高惠民, 任子杰, 等. 合浦某高岭土尾矿的提纯与利用[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.
- [15] 彭欣苓, 冉红想, 魏红港, 等. 强磁选机在石英砂除杂提纯中的应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2017(1): 93-98.
- PENG X L, RAN H X, WEI H G, et al. Application of high intensity magnetic separator in the purification of quartz sand[J]. 2017:93-98. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2017(1): 93-98.
- [16] 杨琳琳, 文书明, 程坤. 磨矿过程中矿物的解离行为分析及提高单体解离度的方法[J]. 矿冶, 2006, 15(2): 13-16.
- YANG L L, WEN S M, CHENG K. Analysis of the course of mineral dissociation and method to enhance the grade of monomial dissociation in the grinding process[J]. Mining & Metallurgy, 2006, 15(2): 13-16.

## Experimental Study on Beneficiation of Kaolinite Associated Quartz in Guangdong

ZHANG Yumei<sup>1</sup>, REN Zijie<sup>1,2,3</sup>, GAO Huimin<sup>1,2,3</sup>, YIN Hang<sup>4</sup>, XIE Jun<sup>3,4,5</sup>, HAO Wenhua<sup>6</sup>

1. School of Resources and Environment Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;

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

3. Hepu County Silicon Material Industry Technology Research Center, Beihai 536000, Guangxi, China;

4. China energy green building material Co., Ltd., Wuhan 430015, Hubei, China;

5. State Key Laboratory of Silicate Building Materials, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;

6. China Silicon Industry Group Co., Ltd., Beijing 100194, China

**Abstract:** The experimental study on mineral processing of kaolinite accompanied by quartz in Guangdong was carried out in order to obtain quartz sand products meeting the requirements. The tailings were obtained after the kaolin raw ore was mashed and graded to separate the  $-0.045$  mm particle size kaolin product. The  $+0.1$  mm grain size material accounting for 99.13% of the tailings can be used as quartz raw material for glass. Two kinds of process comparison tests of "color sorting-grinding-magnetic separation" and "grinding-magnetic separation" were conducted on the  $+0.6$  mm particle size. Results indicated that, color sorting had a relatively small impact on the final separation index, so grinding-magnetic separation was sufficient; Quartz concentrate with  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  content less than  $120 \mu\text{g/g}$  and quartz concentrate with  $\text{SiO}_2$  content of 99.04%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  content of  $104.46 \mu\text{g/g}$  were obtained by magnetic separation from  $+0.6$  mm particle size and grinding-magnetic separation from  $-0.60$   $+0.10$  mm particle size, respectively, which can meet the standard of quartz sand for photovoltaic glass. This study is helpful to the comprehensive utilization of kaolinite associated quartz sand, and can enhance the value of associated quartz sand.

**Keywords:** Kaolin; purification of quartz sands; photovoltaic glass; magnetic separation

引用格式: 张玉梅, 任子杰, 高惠民, 印航, 谢俊, 郝文华. 广东某高岭土矿中石英选矿提纯试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(4): 68-72.  
ZHANG Yumei, REN Zijie, GAO Huimin, YIN Hang, XIE Jun, HAO Wenhua. Experimental study on beneficiation of kaolinite associated quartz in Guangdong[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(4): 68-72.

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

E-mail: [kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)