

某金矿尾矿提纯石英应用对比实验研究

王杨¹, 陈留慧²

(1. 辽宁万隆科技研发有限公司长沙分公司, 湖南 长沙 410002; 2. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 针对某金矿, 在回收金银的基础上, 对金银浮选尾矿进行云母和长石浮选, 以及提纯石英实验, 最终获得 SiO₂ 品位 99.91% 的石英产品。提纯石英产品与比利时矽比科矿业有限公司石英产品进行对比实验, 通过化学成分、粒度组成、熔制、粘度和热膨胀系数测试对比实验, 得出金矿提纯石英达到甚至超过矽比科进口石英产品的各项技术指标。

关键词: 金矿尾矿; 石英; 玻璃; 对比

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2021.02.027

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2021) 02-0159-04

石英砂、石英砂岩、石英岩、脉石英等统称硅质原料, 不仅可作为玻璃原料、耐火材料、绝缘填料, 还可以用作金属铸件造型、油井岩层压裂支撑等领域; 而高纯石英砂更是盖板玻璃、基板玻璃、太阳能玻璃、光电和半导体器件等产品最基本的原料^[1-3]。目前大部分的石英原料均从石英原矿中提取, 石英原矿一般 SiO₂ 含量大于 98%, 且杂质含量较少, Fe₂O₃ 含量在 1% 以下, 提取相对容易。而选矿尾矿, 诸如铁尾矿或金尾矿, SiO₂ 含量一般在 60%~90%, Fe₂O₃ 含量在 1%~15%, 杂质含量较高, 石英与其他矿物嵌布关系复杂, 因此造成提取回收困难, 开发利用率低。目前常用提取石

英的方法有磁选^[4]、浮选^[5-8]、酸洗^[9]等。

某金矿含金 4.6 g/t, 银 45 g/t, 回收金银后的尾矿产率达到 92%, 尾矿中主要矿物为石英。回收金银后, 对石英进行了回收和提纯实验, 并将提纯石英与比利时矽比科矿业有限公司石英产品在化学性质、粒度组成及玻璃相关参数进行了对比实验研究。

1 实验

1.1 试样性质

原矿的多元素分析结果见表 1, 矿物组成及含量见表 2。

表 1 金原矿多元素分析结果 /%

Table 1 Analysis results of multi-elements of the gold raw ore

Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Na ₂ O	Zn.	S	Cu	Pb	Au*	Ag*	TiO ₂
5.12	87.80	0.037	4.51	0.37	0.69	1.23	0.04	0.134	0.65	1.65	0.08	0.43	4.6	45	0.079

表 2 主要矿物组成及相对含量

Table 2 Main mineral composition and relative content

矿物	石英	长石	白云母 绢云母	方解石	闪锌矿 方铅矿	黄铁矿	其他
含量 /%	78.1	5.6	8.2	1.6	3.9	1.2	1.4

从表 1 可以看出, 有用元素为 Au、Ag、SiO₂ 和 K₂O, 含量分别为 4.6 g/t、45 g/t、87.80% 和 1.23%。从表 2 可以看出, 矿石的主要金属矿物为自然金、闪锌矿、方铅矿、黄铁矿; 主要非金属矿物有石

收稿日期: 2019-12-24; 改回日期: 2020-01-24

作者简介: 王杨 (1982-), 硕士, 工程师, 主要从事矿产资源综合利用技术工作。

英、钾长石、白云母，含少量方解石、绢云母等，矿样中石英含量较高，达到 78.1%，有回收价值。

1.2 实验流程

1.2.1 提取石英流程

磨矿细度 -0.074 mm 65.86% 时，首先采用强磁选得磁选精矿；磁选尾矿浓缩后给入浮选机，采用碳酸钠调整 pH 值 8.0，用丁黄药和 2# 油浮选得金银精矿；浮选尾矿利用环烷酸皂和十二胺浮选云母，得云母精矿；再利用氢氟酸活化长石，用十二胺作捕收剂，浮选得钾长石精矿，继续利用十二胺进行反浮选除杂提纯，得石英精矿，实验流程见图 1。

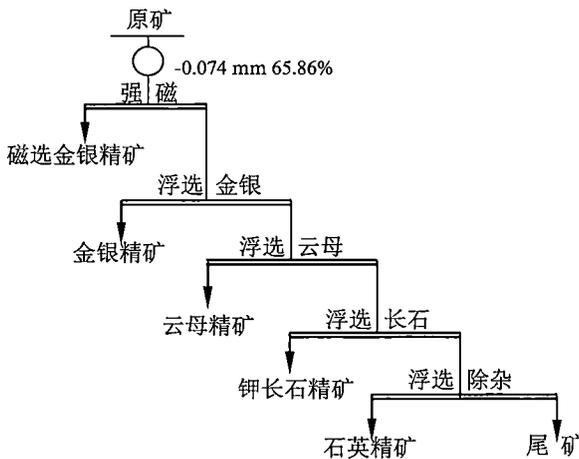


图 1 金矿提纯石英原则工艺流程

Fig. 1 Process flow chart of quartz purification principle for the gold ore

对石英精矿进行酸洗处理，可得到 SiO₂ 品位为 99.91% 的石英产品，取气流分级的 -0.104 mm ~ +0.045 mm 产品用于对比实验产品，以下简称金矿提纯石英。

1.2.2 对比实验流程

对比实验对象为比利时矽比科矿业有限公司生产的石英粉（此石英粉是美国康宁公司溢流下拉法生产手机盖板玻璃指定原料，以下简称矽比科石英粉）。主要在化学成分、粒度组成、玻璃熔制实验与结构、性能测试等方面进行对比。

2 结果与讨论

2.1 化学成分对比

多元素分析结果见表 3。

表 3 石英精矿多元素分析结果 /%

Table 3 Multi-element analysis results of the quartz concentrate

名称	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O
金矿提纯	0.03	99.91	21ppm	0.007	0.01	0.01	0.006	0.004
矽比科	0.06	99.85	0.01	0.012	0.01	0.01	0.008	0.008

从表 3 中可以看出，最重要的 SiO₂、Fe₂O₃ 含量，矽比科进口石英砂为 99.85%、0.012%，金矿提纯石英砂为 99.91%、0.007%。两者化学成分相差不大。金矿提纯石英 SiO₂ 含量略高，Fe₂O₃ 稍低，说明金矿提纯石英化学成分较矽比科产品略好。

2.2 粒度组成对比

粒度组成结果见表 4。

表 4 石英产品粒度组成结果

Table 4 Results of quartz product particle size composition

粒级 / mm	产率 / %	
	金矿提纯	矽比科
+0.18	0	0
-0.18+0.15	0.02	0.01
-0.15+0.106	3.35	2.63
-0.106+0.045	75.46	79.82
-0.045	21.19	17.54
合计	100.00	100.00

由表 4 可知，两者粒度组成相差不大，金矿提纯石英 -0.045 mm 含量略多，粒度稍细。

2.3 玻璃熔制对比实验

2.3.1 配方设计

实验设计了液晶显示用高碱高铝玻璃化学组成见表 5。

表 5 对比实验用玻璃化学组成

Table 5 Chemical composition of glass used for comparative test

名称	含量 / %	名称	含量 / %
石英砂	63.80	Al ₂ O ₃	14.84
R ₂ O	17.42	其他	3.94

配方中只有石英砂来源不一样，其他配方原料完全相同。

2.3.2 熔制对比实验

在同一德国产纳博热高温炉中对以上两种石英砂配制的玻璃料进行熔制对比实验。

采用刚玉坩埚熔化、澄清玻璃配料，然后浇注和退火，得到玻璃样品见图 2。

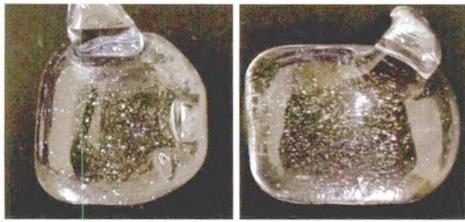


图 2 矽比科 (左)、金尾矿提纯石英砂 (右) 熔制玻璃试样
Fig. 2 Melted glass samples made from silica picot (left) and gold tailings purified quartz sand (right)

图 2 样品可见小白点是浇注模具所带石英砂颗粒及少量微气泡。

由图 2 可以看出，矽比科石英砂和金矿提纯石英砂所熔制的玻璃均表现为清澈透明，宏观效果一致。

2.3.3 玻璃黏度对比实验

玻璃的黏度与温度的关系属于连续渐变的过程，玻璃黏度与温度的关系对玻璃的制造和加工过程起着决定性作用。在玻璃的加工制造过程中，必须严格遵守玻璃的黏度 - 温度特性曲线。

采用玻璃 SRV-1600 高温旋转黏度计，对以上两种石英砂所熔制的玻璃料进行了高温黏度测试，黏度与温度对应数据见表 6。

表 6 石英粘性与温度

Table 6 Corresponding table of quartz viscosity and temperature

粘度 / (PaS)	金矿提纯		矽比科	
	温度 / (°C)	拟合计算值 / (°C)	温度 / (°C)	拟合计算值 / (°C)
102	1509.5	1512.8	1535.2	1535.2
102.5	1375.7	1372.5	1402.2	1402.2
103	1263.4	1260.6	1289.8	1289.8

将其玻璃的典型特征黏度测量出来，绘制形成基础玻璃的温度 - 黏度曲线见图 3。

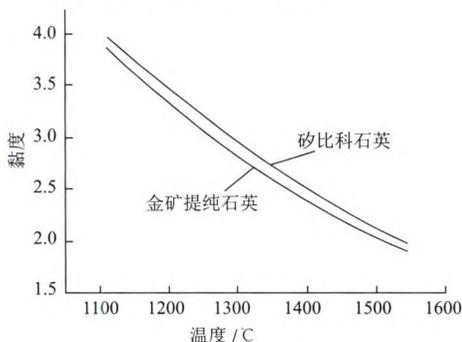


图 3 金矿提纯石英和矽比科石英熔制玻璃黏度曲线对比
Fig. 3 Comparison of viscosity curves between purified quartz and silica bico quartz fused glass in the gold ore

金矿提纯石英和矽比科石英拟合公式分别为：
 $\eta = -2.0 + 5050.7 / (T - 250.2)$, $\eta = -3.616 + 9179.5 / (T + 98)$

η : 特征黏度 T: 对应温度 (作为参考)

由于设备只能测到 1550°C，高温无法测量，从黏度曲线看，玻璃的熔化温度 10 PaS 对应温度很高，根据计算公式计算分别高达 1933.5°C 和 1890.6°C。表 6 中给出的是黏度曲线上测得黏度对应的温度，与拟合计算公式较吻合，低温的部分需要根据膨胀曲线上的 T_g 和 T_s 对应的温度来拟合，可以计算得到玻璃的软化温度。

从图 3 可见，两种玻璃的温度 - 黏度曲线有所区别，在相同温度下，金矿提纯石英的高温黏度低于矽比科石英，说明金矿提纯石英在高温下易于熔制，易于澄清和排除气泡。

2.3.4 玻璃热膨胀系数测试对比实验

玻璃的热膨胀系数对玻璃的成形、退火、钢化以及玻璃的热稳定性等都有重要意义。实验采用德国耐驰卧式膨胀仪，对金矿提纯石英和矽比科石英所熔制玻璃进行热膨胀系数测试，其结果见图 4。

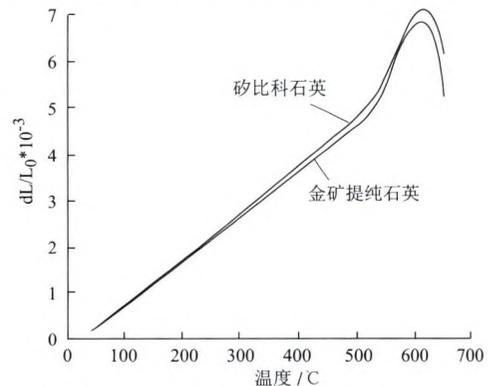


图 4 金矿提纯石英和矽比科石英熔制玻璃的热膨胀曲线对比

Fig. 4 Comparison of thermal expansion curves of purified quartz and silica bico quartz fused glass in the gold ore

图 4 中，金矿提纯石英和矽比科石英的膨胀转化温度 (软化点) 分别为 614.0°C 和 618.8°C，退火温度 (退火点) 分别为 563.7°C 和 562.6°C，转变温度 (转变点) 分别为 540.2°C 和 538.1°C，应变温度 (应变点) 分别为 495.8°C 和 491.9°C，玻璃的线性热膨胀系数分别为 9.3363E-06 和 9.6246E-06。从测试结

果可以看出,金矿提纯石英和矽比科石英所熔制玻璃的软化点、退火点、转变点及应变点相差无几,二者的热膨胀曲线几乎重合。

玻璃的组成、结构决定玻璃的性能,因此在玻璃组成、熔制工艺一致的情况下,玻璃的关键工作温度与玻璃的黏度及热膨胀系数紧密相关,而玻璃的黏度及热膨胀系数已在实验中检测与分析,至于玻璃的其他性能,如强度、透光度、耐磨性能等,还与后期玻璃的化学钢化工艺相关,在本实验中就不一一检测与赘述。

3 结 论

(1) 该矿样石英含量较高,达到 78.1%,有回收价值;石英结晶较好,通过提纯可以得到 SiO₂ 品位 99.91% 的石英产品。

(2) 通过化学成分、粒度组成、熔制、粘度和热膨胀系数测试对比实验,得出金矿提纯石英各项技术指标达到甚至超过矽比科进口石英产品,说明该提纯工艺是可行的。

参考文献:

- [1] 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(4):73-75.
SHI Y, ZHANG L, ZHOU D Z, et al. Research progress on preparation and application of high purity quartz sand [J]. China Building Materials Science and Technology, 2019 (4) : 73-75.
[2] 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(2):146-151.
ZHONG S L, CHEN J M, ZHANG C D, et al. Application of ZQS magnetic separator in quaternary sand factory for

photovoltaic glass [J]. Materials Research and Application, 2019 (2) : 146-151.

- [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 process mineralogy of gangue quartz for TFT-LCD glass substrate [J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2019 (2) : 79-82.
[4] 周鹏,高惠民,任子杰.湖北某石英矿提纯实验研究[J].金属矿山,2015(12):104-108.
ZHOU P, GAO H M, REN Z J. Experimental study on purification of a quartz ore in Hubei [J]. Metal Mine, 2015 (12) : 104-108.
[5] 于福家,黄杰,陈晓龙,等.某石英矿阴离子混合捕收剂浮选提纯研究[J].非金属矿,2015(5):57-59.
YU F J, HUANG J, CHEN X L, et al. Flotation purification of a quartz ore with anionic and anionic mixed collector [J]. Nonmetallic Ore, 2015 (5) : 57-59.
[6] 罗立群,孙伟,温欣宇,等.不同磨矿分级方式对长石矿分选效果的影响[J].中国矿业,2016(9):105-110.
LUO L Q, SUN W, WEN X Y, et al. Influence of different grinding classification methods on feldspar separation effect [J]. China Mining Industry, 2016 (9) : 105-110.
[7] 张鑫,张凌燕,洪微,等.山东某长石矿石除铁增白选矿实验[J].金属矿山,2014(8):74-78.
ZHANG X, ZHANG L Y, HONG W, et al. Experiment of Beneficiation of Iron Removal and Whitening of a Feldspar Ore in Shandong [J]. Metal Mine, 2014 (8) : 74-78.
[8] 王杨.某金矿回收金银及尾矿综合利用实验研究[J].湖南有色金属,2019(1):5-9.
WANG Y. Experimental study on recovery of gold and silver and comprehensive utilization of tailings in a gold mine [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2019(1): 5-9.
[9] 吴飞达,高惠民,任子杰,等.含浦某高岭土尾砂的提纯与利用[J].非金属矿,2019(5):62-66.
WU F D, GAO H M, REN Z J, et al. Purification and utilization of kaolin tailings from Hanpu [J]. Nonmetallic Ore, 2019 (5) : 62-66.

Study on Comparative Test for the Application of Purified Quartz from a Gold Ore Tailing

Wang Yang¹, Chen Liuhui²

(1. Liaoning WanLong Technology Research and Development Co., Ltd., Changsha Branch, Changsha, Hunan, China;
2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha, Hunan, China)

Abstract: On the basis of recovering gold and silver from a gold deposit, the MICA and feldspar flotation of gold and silver flotation tailings and the test of purifying quartz were carried out, and the silica grade of 99.91% was finally obtained. The purified quartz products were compared with the quartz products produced by the Belgian mining company Silbiko. Through chemical composition, particle size composition, melting, viscosity test and coefficient of thermal expansion test, it is concluded that the purified quartz from gold mine can reach or even exceed the technical indexes of imported quartz products.

Keywords: Gold mine tailings; Quartz; Glass; Contrast