

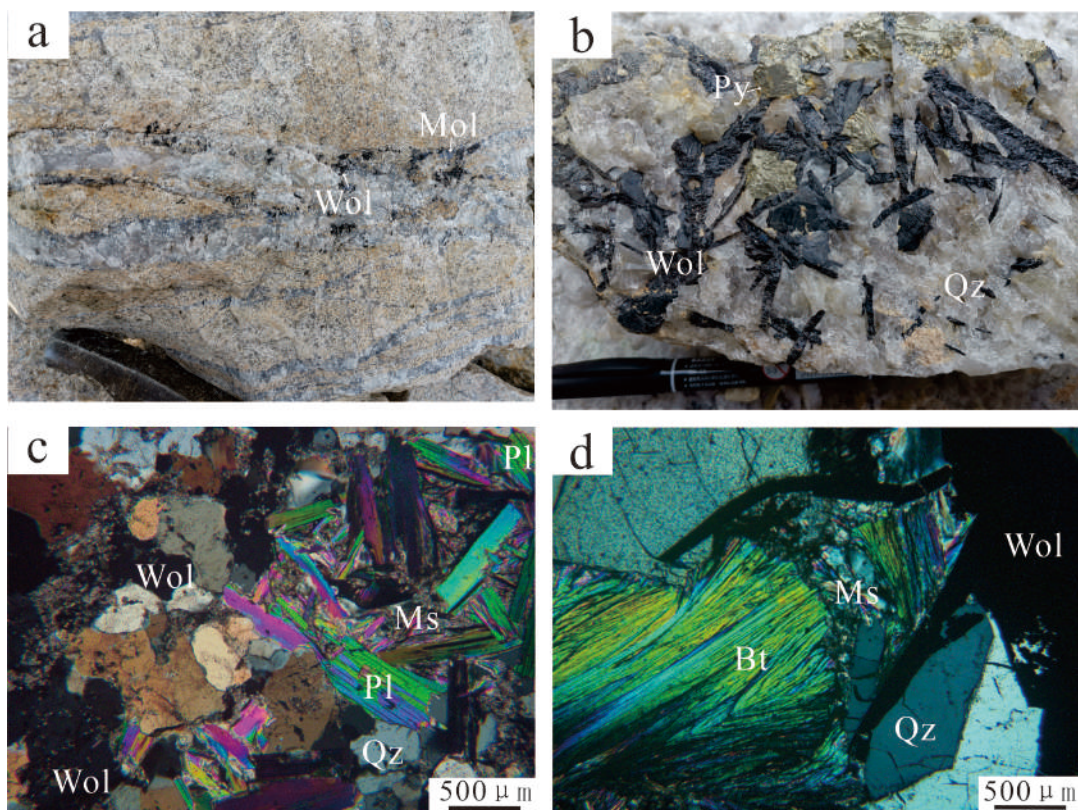
# 赣西地区下桐岭钨钼矿成矿岩体、磷灰石地球化学对钨钼成矿作用的指示意义

陈一铭<sup>1</sup>, 孙建东<sup>1,2\*</sup>, 杨晓勇<sup>1</sup>, 李海立<sup>2</sup>

(中国科学技术大学 地球与空间科学学院 壳幔物质与环境重点实验室, 安徽 合肥 230026)

下桐岭钨钼矿区位于华南加里东褶皱系之武功山隆起区(易先奎等, 2015)。由元古界变质岩系组成褶皱基底, 区域上出露地层主要为前震旦系板溪群、震旦系松山群(张敏等, 2017)。区内岩浆活动频繁, 有多期岩浆侵入。各期岩浆活动又以酸性侵入岩分布最为广泛, 规模最大, 以花岗岩和花岗闪长岩为主, 尤其以燕山早期第二阶段侵入最为发育(张垚垚等, 2023), 基性、超基性岩零星出露(江西省分宜县下桐岭矿区 2 号岩体钨矿补充详查地质报告, 2012)。

下桐岭钨钼矿与浒坑大型钨矿等同为赣中武功山钨、钼、铋多金属成矿带的重要组成部分, 为一产于中细粒花岗岩体内外接触带的细网脉型及石英大脉型钨钼矿床。下桐岭矿床形成了独特的钨钼共生现象, 是研究壳幔作用中钨、钼成矿、沉淀的理想场所(Li *et al.*, 2018; 徐喆等, 2018)。本次通过对成矿岩体黑云母二长花岗岩及其锆石、磷灰石的研究, 探讨对钨、钼成矿作用的指示意义。



Wol—黑钨矿; Qz—石英; Pl—斜长石; Ms—白云母; Bt—黑云母

a. 钾化黑云母二长花岗岩野外照片; b. 穿插钾化黑云母二长花岗岩的石英脉中发育大量板状黑钨矿及自形黄铁矿; c、d. 钾化黑云母二长花岗岩镜下特征

图 1 下桐岭岩体野外及镜下特征

**基金项目:** 国家重点研发计划(2021YFC2901804)、地质调查项目(DD20221688; DD20240066)

**作者简介:** 陈一铭, 男, 1999 年生, 硕士研究生, 主要从事矿床学研究

\* 通讯作者, E-mail: njsunjiandong@163.com

成矿岩体钾化黑云母二长花岗岩具有  $\text{SiO}_2$  含量为 75.49%~76.34%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 12.98%~13.55%, 全碱 ( $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ ) 含量为 8.58%~8.92%,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值平均值为 0.98~1.01,  $\text{MgO}$ (0.041%~0.046%) 等特征。属亚碱性系列, 铝饱和指数均在 1.1 以上。稀土配分曲线呈平坦的海鸥型, 具有显著的 Eu 负异常, 与典型赣南钨矿成矿岩体具有相同特征, 锆石 Hf 同位素  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  为 -6.7 ~ -13.2, 二阶段模式年龄 ( $t_{\text{DM}2}$ ) 为 2055~2831 Ma, 综上所述显示下桐岭岩体为高钾钙碱性强过铝质 S 型花岗岩, 暗示岩浆源区主要为地壳物质。岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年显示其成岩时代为  $160.1 \pm 3.4$  Ma, 属晚侏罗世, 与燕山中期华南大规模钨成矿有关的花岗岩年龄一致, 是华南地区 150~165 Ma 大规模花岗岩岩浆活动的产物, 矿区岩浆岩主要为燕山早期第二阶段第三次侵入的花岗岩体。

下桐岭黑云母二长花岗岩中磷灰石的主要成分为  $\text{CaO}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  和 F, 岩体磷灰石中  $\text{CaO}$  和  $\text{P}_2\text{O}_5$  分布比较均一,  $\text{CaO}$  含量分布在 53.37%~54.60% 之间, 平均值为 53.93%,  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量分布在 40.51%~41.18% 之间, 平均值为 40.68%,  $\text{SiO}_2$  含量为 0.172%~0.238%,  $\text{FeO}$  含量为 0.005%~0.058%, 为典型的岩浆磷灰石, 能够较好的记录初始岩浆信息。样品中 F 含量较高, 分布在 4.72%~5.17% 之间, 平均值为 4.91%; Cl 含量极低, 最高值为 0.06%, 大部分低于检出限, 样品的 F/Cl 比值极高, 为典型的氟磷灰石, F/Cl 比值的变化可能是由于岩浆分异过程中卤素的损失, 这也同时影响着全岩的 F/Cl 比值。在岩浆结晶分异过程中磷灰石的 F 和 Cl 含量会同时增加, 而 F 的加入会延长岩浆演化过程, 这给包括石英、磷灰石和锆石等矿物的多元素结晶分异以充足时间。前人认为 Cl 的损失很可能是在源沉积岩风化过程中发生的。在样品的岩相学中, 发现存在萤石, 证明母岩浆中富含 F。富含萤石的花岗岩是高度结晶分异和有丰富流体的, 且认为磷灰石是在挥发-过饱和阶段形成的。长英质岩浆富 F 会使得岩浆的固相线温度 (450~550 °C) 和黏度降低, 从而延长岩浆的演化过程, 这也是岩浆发生高度结晶分异的原因之一 (Irber, 1999)。此外, 高 F/Cl 相矿物往往受到强流体作用或高温影响, 因此认为下桐岭花岗岩可能在岩浆结晶分异后期与流体发生强烈作用。下桐岭磷灰石球粒陨石标准化稀土元素配分模型呈 M 型与岩体稀土元素配分图具有较好的一致性, 具有明显的 Eu 负异常。Ce 和 Eu 这两个具有相反的配分行为的磷灰石元素, 对说明母岩浆氧化状态具有重要意义, 根据本次测试结果, 下桐岭成矿岩体中磷灰石具有明显 Eu 负异常和几乎没有的 Ce 异常, 指示成岩成矿岩浆较低的氧逸度, 与锆石微量计算结果一致。

综上所述, 结合所处构造背景 (武功山隆起带) 及辉钼矿 Re-Os 年龄认为, 下桐岭矿床成矿过程为壳源岩浆萃取基地底层分异形成的低 pH、低 Eh (酸性、还原环境) 且富含 F-和/或  $\text{PO}_4^{3-}$  离子的热液流体侵入下桐岭岩体首先形成黑钨矿, 并伴随形成辉钼矿, 后随着萤石等矿物及金属硫化物的晶出, 流体中的等酸性组分大量消耗, 从而使流体逐渐变成弱碱性或碱性, 流体沿裂隙与围岩作用发生云英岩化和矽卡岩化, 流体中剩余的  $\text{WO}_4^{2-}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  结合形成白钨矿。

## 参考文献:

- 徐喆, 王迪文, 黄新曙等. 2018. 江西浒坑—分宜地区矿产地质调查成果报告. 江西省地质调查研究院, 22~373.
- 张焱焱, 刘凯, 何庆成等. 江西武功山早古生代花岗岩的岩石学、锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素地球化学特征及其地质意义[J]. 地质论评, 2023, 69(03): 1004-1020.
- 张敏, 肖剑. 江西省分宜县下桐岭二号岩体特征及其与钨矿化关系[J]. 世界有色金属, 2017, (16): 168-170.
- 易先奎, 李晓峰, 王翠云等. 江西雅山和下桐岭钨矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 华南地质与矿产, 2015, 31(04): 384-390.
- Li, X., Yi, X., Huang, C., Wang, C., Wei, X., Zhu, Y., & Xu, J. 2018. Zircon U-Pb, molybdenite Re-Os and muscovite Ar-Ar geochronology of the Yashan W-Mo and Xiatongling W-Mo-Be deposits: Insights for the duration and cooling history of magmatism and mineralization in the Wugongshan district, Jiangxi, South China. *Ore Geology Reviews*, 102, 1-17.
- Irber W. 1999. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu\*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 63(3-4): 489-508.

# 东秦岭双龙一带花岗伟晶岩地质特征及 高纯石英原料找矿意义

贺承广\*, 翟文建, 王艳慧, 张诗启

(河南省地质研究院, 地质过程与矿产资源国家重点实验室河南技术联合研发和示范中心, 河南 郑州 450016)

河南西峡双龙一带位于东秦岭造山带内部的高压—超高压变质岩带内, 其前寒武纪中深变质岩内发育有不同类型的花岗伟晶岩, 是东秦岭花岗伟晶岩带的重要组成部分。近年来, 在邻区西侧卢氏龙泉坪一带花岗伟晶岩中发现了 4N 级以上的高纯度石英自然矿物(Zhang et al, 2021; 赵金洲等, 2022; 赵海波等, 2023), 表明该地区在寻找花岗伟晶岩型高纯石英原料方面具有较大的找矿潜力。

区内主要发育加里东期强烈的构造—岩浆活动和(超)高压变质作用, 并叠加了燕山期岩浆作用; 以秦岭岩群为代表的中深部变质岩系均遭受了多期变质变形作用, 并在这些中深变质岩系内发育大量花岗伟晶岩脉、变质深熔脉体以及石英脉体。其中, 区内花岗伟晶岩主要岩石类型分别为黑云母二长伟晶岩、二云母二长伟晶岩、黑云母钾长伟晶岩以及深熔淡色伟晶岩等, 不同类型伟晶岩具有不同的产出地质背景和岩石学特征, 石英矿物学特征亦各有特色, 对区内高纯石英原料调查和找矿具有不同的指示意义。

黑云母二长伟晶岩: 主要产于古元古代秦岭岩群之内, 但不同区域或岩性段内产出特征和出露规模差异较大。郭庄岩组(以黑云斜长片麻岩为主, 局部夹基性麻粒岩、榴闪岩、大理岩)内的黑云母二长伟晶岩规模相对较小, 出露宽度多在 2~5m, 局部在褶皱转折端发育规模相对较大的黑云母二长伟晶岩, 规模可达 10m±; 郭庄岩组与雁岭沟岩组(主要为含石墨大理岩)界面附近的黑云母二长伟晶岩规模相对较大, 出露宽度一般多大于 10m, 局部在褶皱转折端黑云母二长伟晶岩规模可达 20m±。黑云母二长伟晶岩分带特征明显, 在与围岩接触边界多发育宽约 0.5~1.0m 的似斑状中细粒二长花岗岩, 内部则以发育粗大的长石、黑云母晶体, 局部发育多条宽约 10~50cm 的块状石英核; 钾长石、斜长石晶体一般多在 3~5cm, 局部大者可达 15cm; 黑云母多沿长石晶体间的空隙或裂隙充填, 黑云母片径多在 2~4cm; 石英多呈它形粒状, 具有不同的产出特征和粒径, 一部分与长石交互生长, 形成文象结构, 粒径大小约 1~3cm, 另一部分则与黑云母交互共生, 粒度大小约 1~5mm, 表明石英晶体经历了不同的生长/结晶过程。局部可见石榴石、电气石等副矿物。

二云母二长伟晶岩: 主要产沿古元古代秦岭岩群与中新元古代峡河岩群的接触界线附近产出, 出露宽度多在 10~20m, 局部可见韧性剪切变形组构。二云母二长伟晶岩分带特征明显, 在与围岩接触边界多发育宽约 1.0~3.0m 的糜棱岩化二长花岗岩(S-C 组构, 长石旋斑等较为发育), 内部则以发育粗大的长石、二云母晶体, 偶见宽约 10~30cm 的块状石英核; 钾长石、斜长石晶体一般多在 2~5cm, 局部大者可达 10cm; 黑云母、白云母多沿长石晶体间的空隙或裂隙充填, 黑云母片径相对较大, 多在 2~4cm, 白云母片径略小, 多在 0.5~2.0cm; 石英多呈它形粒状, 具有不同的产出特征和粒径, 一部分与长石交互生长, 形成文象结构, 粒径大小约 1~3cm, 另一部分则与二云母交互共生, 粒度大小约 1~3mm, 局部可见石英晶体的亚颗粒化特征, 表明石英晶体经历了不同的生长/结晶过程, 以及遭受后期韧性剪切过程。局部可见石榴石等副矿物。

黑云母钾长伟晶岩: 主要产于志留纪黑云母闪长岩内部及周边的黑云母钾长花岗岩内, 伟晶岩多以规模不等的脉体穿插于似斑状中细粒钾长花岗岩内, 出露宽度 1~10m 不等。黑云母钾长伟晶岩分带特征相对不明显, 与寄主母岩接触边界多发育宽约 0.5~2.0m 的混染带, 内部则以发育粗大的钾长石、黑云母晶体, 块状石英核基本不可见; 钾长石晶体一般多在 2~4cm, 局部大者可达 8cm; 黑云母多沿长石晶体间的空隙

**基金项目:** 河南省西峡县肿潭高纯石英原料调查示范(批准号: 豫自然资函[2023]580号)

**作者简介:** 贺承广, 男, 1985年生, 硕士, 主要从事高纯石英相关的岩石矿物学、区域构造学研究。

\* 通讯作者, E-mail: 2692624526@qq.com

或裂隙充填，黑云母片径多在 1~4cm；石英多呈它形粒状，具有不同的产出特征和粒径，一部分与长石交互生长，形成文象结构，粒径大小约 1cm±，另一部分则与黑云母交互共生，粒度大小约 1~2mm，表明石英晶体经历了不同的生长/结晶过程。局部可见石榴石等副矿物。

深熔淡色伟晶岩：主要产于古元古代秦岭岩群的郭庄岩组黑云斜长片麻岩和基性麻粒岩内，脉体规模相对较小，出露宽度多在 0.5~3.0m，与围岩接触界面渐变过渡，边部发育黑云母等暗色矿物残影，内部发育较多的石榴石（局部富集呈条带）、电气石（多呈团块状集合体）。伟晶岩亦有一定程度的分带特征，边部与围岩呈混染渐变过渡变形，矿物粒度相对较细，多发育定向排列的黑云母残影；中部以则粒度明显变大的二长伟晶岩为主，长石晶体粒度 1~3cm，局部可见较大的钾长石/微斜长石晶体（晶体大小 5~10cm），暗色矿物以黑云母为主（含量<2%）；核部与中部带逐步过渡，发育宽约 0.1~0.3m 的块状石英体。该类型淡色伟晶岩深熔特征明显，石榴石发育不同的成分环带，核部多见黑云母、斜长石、石英的包裹体，边部局部可见“白眼圈”构造。

研究区内伟晶岩类型丰富，产出地质背景、结构分带和岩石矿物学特征各有千秋，深入研究各类伟晶岩内石英矿物的化学组成、嵌布粒度、生成世代以及内部包裹体特征，进而揭示不同地质过程下的成岩/成矿作用，可以为区内高纯石英原料的成矿理论和找矿突破提供一定的指导意义。

### 参考文献：

- Zhang Y, Zhao H B, Liu L, et al. 2021. Timing of granite pegmatite-type high-purity quartz deposit in the Eastern Qinling, China: constraints from in-situ LA-ICP-MS trace analyses of quartz and monazite U-Pb dating[J]. *Acta Geochim*, 41: 197-207.
- 赵金洲,张驰,张森森,等. 2022. 东秦岭花岗岩伟晶岩中高纯石英矿物的可利用性研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 41(06):1305-1308.
- 赵海波,王红杰,张勇,等. 2023. 东秦岭伟晶岩型高纯石英矿地球化学、锆石 U-Pb 及 Hf 同位素研究：对高纯石英找矿方向的探讨[J/OL]. *中国地质*:1-17. [2023-11-15].

# 电感耦合等离子体质谱法分析高纯石英中 14 种杂质元素

侯振辉\*, 康晓宁, 杨晓勇

(中国科学技术大学 地球与空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

高纯度石英是光纤通讯、光伏和半导体产业不可或缺的原料, 是一种不可再生的重要战略资源。高纯石英一般指纯度大于 99.995% 的石英, 即杂质含量小于 50ppm, 而超高纯石英则纯度优于 99.999%。对这些石英中杂质元素的分析, 有助于对石英原料的准确评价, 可以指导优化石英原料的提纯工艺, 也利于准确评估高纯石英产品的商业价值。

高纯石英中杂质元素一般指 Li、B、Na、Mg、Al、K、Ca、Ti、Cr、Mn、Fe、Ni 和 Cu 等 14 种元素。传统的测试方法一般采用电子探针、直流辉光放电质谱法和电感耦合等离子体光谱仪 (ICP-OES) 等方法, 电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 测试高纯石英的研究并不多。相比较其他方法, ICP-MS 方法测定高纯石英杂质元素有天然的优越性: ICP-MS 灵敏度高, 检出限低, 动态线性范围宽以及分析速度快等优点。这使得测试石英样品溶解所需的样品量极少, 一般为 50-100 毫克, 测试时即可以达到较高的信号强度。而 ICP-OES 方法测试需要溶解 1-5 克石英样品。但是 ICP-MS 以氩气作为工作气体, 以及多原子离子的形成, 在测 Mg、K、Ca、Cr 和 Fe 等元素时, 有较强的背景信号干扰。例如  $^{38}\text{Ar}^+\text{H}^+$  的分析信号背景较高, 对  $^{39}\text{K}^+$  测试有较强的干扰。因此在 ICP-MS 测试时, 可以采用碰撞池技术, 通入 He 气作为碰撞气体, 有效去除氩气和多原子离子带来的严重干扰, 使背景信号大幅降低。

高纯石英的化学溶解采用提纯后的氟化氢铵, 可以减少操作时间和降低实验风险。提纯后的氟化氢铵纯度非常高, 除 Al 和 Fe 含量低于 0.1ppm, 其余元素均低于 0.02ppm, 即使对于超高纯石英样品的分析, 也不会对元素测试结果带来明显的干扰。氟化氢铵为固体粉末, 在取样过程中不会有散落或挥发的风险。此外在实验过程中不需要使用高纯氢氟酸溶液, 节省了大量氢氟酸试剂。氟化氢铵和石英反应后, 生成氟硅酸铵, 加热后即可分解除去硅。而普通的氢氟酸溶样方法每个样品需要消耗 10-15ml, 较多的用酸量也会带来背景的干扰。

具体实验流程如下, 取氟化氢铵和 50mg 石英样品一起放入 PFA 溶样杯中, 加盖密封后放入烘箱 230°C 加热 3 小时; 冷却后加入 2ml 硝酸, 在电热板上 160°C 加热 1 小时, 然后打开杯盖, 蒸发至近干以除硅; 再加入 1ml 硝酸和 1ml 纯水, 加盖密封, 在电热板上 140°C 加热 2 小时, 最后将溶液转移至 PET 瓶, 用 2% 硝酸溶液稀释至 40 克上机待测。溶液测试所用的 ICP-MS 为安捷伦 7700 型, 碰撞池中通入 He 气, 流速为 4ml/分钟, 每个样品测试时间约为 80 秒。对样品空白溶液的测试结果表明, 十四种元素的检出限均低于 0.5ppb。对国家标准物质 GBW07837 石英标准的十四种元素测试结果表明, 准确度误差均优于 5%。

因此, 采用氟化氢铵密闭酸溶方法溶解石英, 溶样量少并且溶解速度快。结合 ICP-MS 碰撞池技术测试高纯石英样品中杂质元素, 具有背景干扰低和准确度高等特点, 能够完全满足高纯石英的杂质元素测试要求。

## 参考文献:

- 汪灵, 李彩侠, 王艳, 等. 2013. 高纯石英质量的 ICP 检测技术研究与应用. 光谱学与光谱分析, 33(6): 1684-1688.  
杨晓勇, 孙超, 曹荆亚, 等. 2022. 高纯石英的研究进展及发展趋势. 地学前缘, 29(1): 231-244.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: 42073021)

作者简介: 侯振辉, 男, 1976 年生, 博士, 主要从事微量元素地球化学、矿床学研究。

\* 通讯作者, E-mail: zhenhui@ustc.edu.cn

# Analyzing impurities and trace element distributions in quartz: Insight from the gneiss and pegmatite

Jamuna Thapa Magar, XIA Mei, HOU Zhenhui, YANG Xiaoyong\*

(CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

## 1 Introduction

Quartz, a widely occurring mineral found in diverse geological settings, plays a vital role as a source of silica, facilitating a wide range of applications including glass production, ceramics, refractory materials among other traditional uses. According to Müller et al., 2012, High-purity quartz (HPQ) has a total impurity content of less than  $5\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  with  $\text{Al} < 30\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,  $\text{Ti} < 10\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,  $\text{Na} < 8\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,  $\text{K} < 8\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,  $\text{Li} < 5\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,  $\text{Ca} < 5\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,  $\text{Fe} < 3\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,  $\text{P} < 2\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , and  $\text{B} < 1\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ . HPQ is the primary raw material in manufacturing microelectronics, optical fiber communication, aerospace, and other high-tech industries. As a result, high-purity quartz has emerged as a strategically important mineral in high-tech sectors. However, only a few deposits possess the volume, quality, and suitability for the specialized refining methods required for high-purity applications. Quartz does not exist in the pure  $\text{SiO}_2$  state, as it invariably contains impurities introduced during crystal growth. These impurities included lattice impurities, interstitial impurities, and inclusions. Understanding the presence of these impurities and defects is of significant significance, especially when delving into the origins of minerals, as they profoundly affect the overall quality of quartz. Distinct geological conditions influence the composition of trace elements in quartz. The trace elements within quartz serve as valuable markers for explaining the origins of geological materials (Götze, 2009).

This study comprehensively examines gneiss (FD-1) and pegmatite (LS-1) samples obtained from the Feidong and Lushi deposits in China, primarily focusing on evaluating impurities and trace element distribution characteristics within the quartz.

## 2 Hand specimen and inclusion Characteristics

The Gneiss (FD-1) hand specimen collected from the Feidong region is characterized by its white color and gneiss-like structure, displaying a coarse granular metamorphic pattern, which is shown in Fig. 1 (a). Its primary minerals consist of quartzalkaline feldspar, and plagioclase. Quartz constitutes approximately 30-40% of the composition, appearing colorless with a relatively clean surface. Alkaline feldspar comprises around 25-35% of the minerals, encompassing orthoclase, striped feldspar, and microcline feldspar. Secondary minerals include biotite, hornblende, opaque dark minerals, and others. Conversely, the pegmatite (LS-1) from Lushi showcases a coarse-grained texture, with crystals appearing tightly interlocked, as depicted in Fig. 1 (b). The main constituent minerals of pegmatite are quartz, feldspar, and muscovite, with a pegmatite structure and coarse mineral particle crystallization. The crystal surface has a sub-glass luster and an earthy luster.

Funded project: Supported by Key projects of the National Natural Science Foundation of China (No: 42030801).

Author Introduction: Jamuna Thapa Magar, Female, 1997, M.Sc., Student, mainly engaged in the research of High purity quartz.

E-mail: jamunathapamagar8@mail.ustc.edu.cn

\*e-mail: xyyang@ustc.edu.cn

The presence of gas-liquid inclusions in both FD-1 and LS-1 samples is shown in Fig.1. The FD-1 sample exhibits numerous gas-liquid inclusions arranged throughout the quartz. These inclusions are distributed on the grain surfaces and are predominantly concentrated in specific regions. In contrast, the LS-1 sample contains many tiny liquid inclusions within the grains, particularly at the junctions, forming various line patterns, as illustrated in Fig. 1(b).

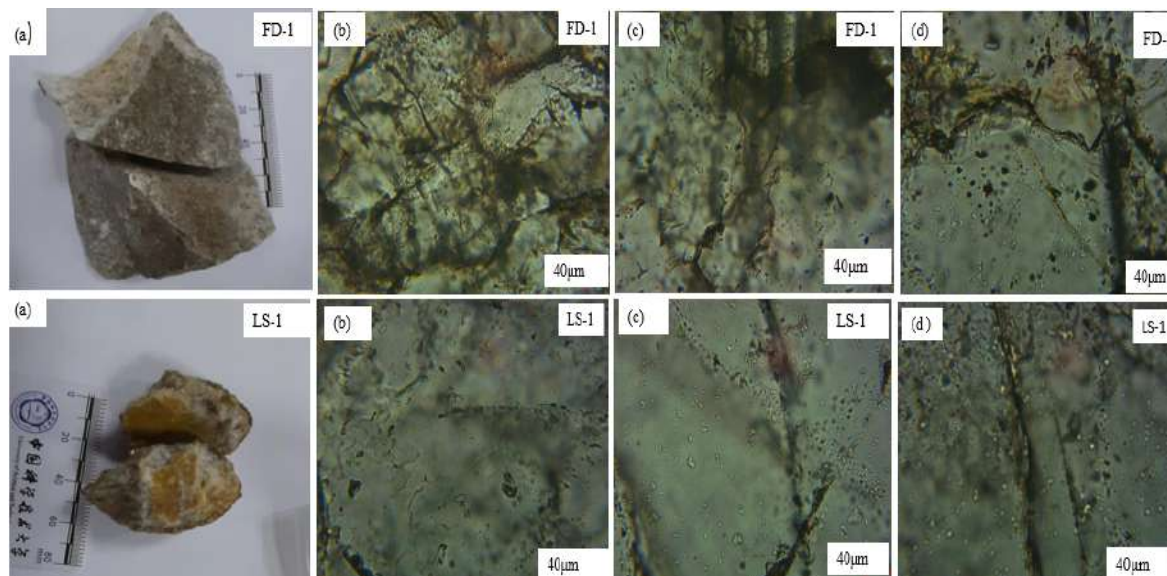


Fig. 1. Displays the hand specimens of the raw ore for both FD-1 and LS-1, accompanied by microphotographs that highlight the presence of liquid and gas inclusions.

### 3 Purification experiment

Both samples underwent an extensive purification process involving a meticulously executed sequence of steps, including calcination, water quenching, grinding, flotation, and acid leaching. Following these initial treatments, the quartz sand proceeds through magnetic separation and acid-leaching procedures to produce refined quartz sand. Table 1. shows the analysis involved quantifying primary trace elements in refined quartz sand derived from two distinct types.

Sample	w (SiO <sub>2</sub> )	Impurity element content	Impurity element
FD-1	99.220	7794.30	Na, Mg, Al, K, Ca, Ti
LS-1	99.997	24.41	Li, Al, Ti

Note: The content of impurity elements is the total amount of 13 trace impurity elements such as Al, B, Li, Na, K, Ca, Mg, Ti, Fe, Mn, Cu, Cr, Ni.

Following the purification process, the total impurity element content of FD-1 is 7794.30 µg. g<sup>-1</sup>, while the LS-1 sample has a lower content of 24.41 µg. g<sup>-1</sup>. The SiO<sub>2</sub> contents are 99.220 wt. % and 99.997 wt.%, respectively of FD-1 and LS-1 as shown in Table 1. Regarding trace elements, FD-1 exhibited higher Al, Mg, Na, K, Ti, Ca, and Ti concentrations than LS-1, with Li content somewhat similar in both cases. Acid leaching effectively reduced the trace element content of Li, B, Cr, Mn, Fe, Ni, and Cu in both samples, except for Al, Na, K, Ti, Ca, Fe, and Ti in the FD-1 suggesting that the experimental method did not successfully remove the significant impurities of Al, Na, K, Ti, Ca, Fe, and Ti from the Gneiss sample in FD-1. In contrast, LS-1 exhibited relatively lower Al, K, and Ti contents, indicating that mineral impurities were effectively removed during the purification process.

### 4 Conclusion

In general, both quartz ores exhibit a significant proportion of liquid-gas inclusions primarily found at the interface between the surface and the grains. Fortunately, these surface-related fluid inclusions are relatively easy to eliminate during the later stages of processing and purification. The SiO<sub>2</sub> content of the refined quartz sand

obtained from both samples reached approximately 99 wt.%. It is evident that both samples have the potential to serve as suitable raw material sources for high-purity quartz production. Hence, Future research will involve additional purification experiments to enhance the quality of quartz.

### References:

- Götze, J. (2009). Chemistry, textures and physical properties of quartz—Geological interpretation and technical application. *Mineralogical Magazine*, 73(4), 645–671. <https://doi.org/10.1180/minmag.2009.073.4.645>
- Müller, A., Wanvik, J. E., & Ihlen, P. M. (2012). Petrological and Chemical Characterizations of High-Purity Quartz Deposits with Examples from Norway. In J. Götze & R. Möckel (Eds.), *Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics* (pp. 71–118). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22161-3-4>.



# 河南省花岗伟晶岩地质特征及对高纯石英资源的制约

李开文\*, 方怀宾, 李晓宇, 张正伟

(河南省地质研究院, 河南 郑州 450016)

河南省地质构造复杂多样, 岩浆活动十分频繁, 在漫长的地质发展历史中, 经历了多期次的强烈的地壳构造运动, 各主要构造期均伴有规模不等的岩浆侵入活动, 形成了遍布全省的不同类型、大小不一的侵入体, 尤以东秦岭地区出露最多, 并显示多期活动的特征。在空间上岩浆活动明显受区域断构造制约, 时间上, 岩浆侵入活动始于中太古代, 经历了元古宙、古生代、中生代直至新近纪中新世仍有岩浆侵入活动。侵入岩绝大多数为酸性岩类, 在岩浆作用的后期多伴随有花岗伟晶岩发育。本文主要通过对花岗伟晶岩地质特征分析, 并与国内已发现的其他高纯石英花岗伟晶岩对比, 以为东秦岭地区寻找高纯石英资源提供依据。

## 1 新太古代花岗伟晶岩

新太古代花岗伟晶岩零星分布于济源新太古界林山岩群和新太古代侵入岩内, 走向基本与区域片麻理或片理主体一致, 个别切割区域区域面理或脉体间相互穿插。岩石呈灰白色、浅肉红色, 主要矿物组成为微斜长石, 含量 60~65%; 石英呈灰白—乳白色, 中粗粒他形粒状结构, 含量 20~25%; 副矿物主要包括白云母、方解石、电气石等, 含量约 10%。

岩石化学显示富硅、富铝、富钾特点, 轻稀土富集, 重稀土亏损, 具明显负 Eu 异常, 富集大离子亲石元素 K、Rb、Ba、Th, 亏损高场强元素 Nb、Ta、P、Ti 的特征, 与围岩花岗质片麻岩具有相似特点, 说明花岗伟晶岩与花岗质片麻岩之间可能具有相同的物质来源。河南省地质调查院 (2016) 获得济源地区花岗伟晶岩锆石 U-Pb 年龄  $2474 \pm 12\text{Ma}$ 。

## 2 古元古代花岗伟晶岩

古元古代花岗伟晶岩主要分布于小秦岭太峪岭顶南部, 为小河花岗岩晚期残余岩浆活动的产物, 多呈脉状或不规则状岩株形式侵位于小河花岗岩中。岩石呈深红色, 具等粒花岗结构、文象结构, 块状构造。主要矿物包括钾长石 50~55%, 斜长石 20~25%, 石英 25~30%。岩石以不含暗色矿物、粒度均匀及深红色色调为特征, 成因与小河岩体的肉红色黑云二长花岗岩密切相关, 表明这些花岗伟晶岩为小河花岗岩体岩浆演化晚期产物。

岩石化学具有高硅、高铝、高钾的特征, 属富钾过铝质花岗岩特点。微量元素为富 Ba、Rb 和 Sr, 贫 Ta 和 U, 以及稀土元素表现出正异常的特征。李春麟 (2011) 获得小秦岭太峪岭顶南部花岗伟晶岩锆石 U-Pb 年龄为  $1881 \pm 24\text{Ma}$ 。

## 3 中元古代花岗伟晶岩

中元古代花岗伟晶岩以登封一带为代表, 呈岩脉状侵入于新太古界郭家窑岩组和新太古代片麻状闪长岩中。岩脉长多具分带现象, 由边缘到中心大致可划分为石英-长石带、文象-似文象带、块状长石带石英核带, 各带之间多为渐变过渡关系。石英-长石带具中细粒结构, 由石英、钠长石或微斜长石组成; 文象-似文象带主要矿物成分为石英、微斜长石、更钠长石; 块状长石带由微斜长石、条纹长石组成, 与其他带界线清楚; 石英核带位于脉体中心, 由乳白色石英组成。形成构造为结基底地壳完全固结之后的拉张环境产物。

基金项目: 2023 年度河南省地质研究院地质科技攻关“揭榜挂帅”项目 (批准号: 2023-331-XM021-KT01)

作者简介: 李开文, 男, 1984 年生, 博士, 主要从事区域地质矿产勘查及研究。

\* 通讯作者, E-mail: likaiwen0502@163.com

#### 4 古生代花岗伟晶岩

古生代花岗伟晶岩广泛发育, 在东秦岭 800km<sup>2</sup> 的范围内已发现伟晶岩脉 6913 条, 平均密度约为 8.6 条/km<sup>2</sup>, 主要分布于古元古界秦岭岩群片麻岩地层之中, 少部分出露于秦岭岩群各类镁铁质变质体及古生代花岗岩中。花岗伟晶岩主要组成矿物为更长石、微斜长石、石英、黑云母、白云母、电气石、锂辉石、绿柱石、石榴子石等。岩脉主要由岩浆作用、热液交代作用形成(卢欣祥等, 2010)。

高纯石英矿物主要赋存于卢氏县龙泉坪伟晶岩密集区, 伟晶岩脉长度多为 100~1000m, 厚 1~5m。近年来, 河南省地质研究院研究团队对该区石英矿物进行选冶提纯, 得到高纯石英砂的 SiO<sub>2</sub> 含量最高可达 99.9983%。该区伟晶岩分带性较为明显, 从内向外表现为: 内核(以块体石英带产出)、中间带(表现为细粒、中粒、粗粒伟晶状石英长石带)、外侧带(呈现花岗结构的石英长石带)、边缘带(表现出与围岩接触且含石榴石、电气石、绿柱石等花岗伟晶岩带)。岩石具有富硅、富碱特征, 在微量元素和稀土元素标准化蛛网图中均与灰池子花岗岩体分布型式表现出一定的相似性, 显示了二者在成因上的相关性。花岗伟晶岩锆石 U-Pb 年龄为 420.2±2.2~406.8±0.8 Ma(赵海波等, 2023)。

#### 5 中生代花岗伟晶岩

中生代花岗伟晶岩广泛分布于中生代二长花岗岩体中, 主要的伟晶岩类型主要以简单伟晶岩为主, 组成矿物为钾长石和石英, 分带性一般不明显, 局部地段石英产于伟晶岩核部。

#### 6 结论

河南省不同时代花岗伟晶岩出露齐全, 且呈现不同的地球化学特征。其中, 前寒武纪花岗伟晶岩一般为古老岩浆作用晚期产物, 一般经历了后期变质作用, 构造变质带及糜棱岩化带中花岗伟晶岩石英可能较为纯净; 古生代花岗伟晶岩经历了加里东造山带改造作用, 岩石类型复杂, 包括简单伟晶岩、复杂伟晶岩及与变晶作用有关的伟晶岩, 尤其是产于古老变质地质体中的伟晶岩, 由于经历了强烈的后期变质作用, 石英发生重结晶而得到了纯化; 对于中生代伟晶岩, 形成作用以高温为主, 且基本未经历后期变质作用, 石英纯度可能相对较差。

#### 参考文献:

- 河南省地质调查院. 2016. 1:50000 西承留幅、济源幅、北马屯幅、冶成镇幅区域地质矿产调查报告.
- 李春麟. 2011. 小秦岭太华群花岗片麻岩与小河花岗岩形成时代及构造意义. 中国地质大学(北京).
- 卢欣祥, 祝朝辉, 谷德敏, 等. 2010. 东秦岭花岗伟晶岩的基本地质矿化特征. 地质论评, 56(1): 21-30.
- 赵海波, 王红杰, 张勇, 等. 2023. 东秦岭伟晶岩型高纯石英矿地球化学、锆石 U-Pb 及 Hf 同位素研究: 对高纯石英找矿方向的探讨[J/OL]. 中国地质. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20230104.1513.001.html>.

# 安徽宣城地区寒武纪荷塘组含碳角岩中晶质石墨的发现及意义

李小东, 查琦, 余有林

(安徽省地质调查院(安徽省地质科学研究所), 安徽 合肥 230001)

安徽宣城地区位于扬子陆块江南地块皖南褶断带(安徽省区域地质志, 1988), 北西部边缘为下扬子地块南缘褶断带, 南东部边缘为浙西地块昌化褶断带。寒武纪荷塘组地层广泛分布于该区东南部的绩溪县临溪-宁国市宁墩-中溪一带, 旌德县碧云庵-版书、泾县云岭西南与池州交界一带也有少量分布, 地层总体呈北东向展布, 周边岩体发育, 自南西-北东主要有旌德岩体、伏岭岩体及仙霞岩体, 强烈的岩浆活动使得荷塘组的碳质泥岩多已角岩化蚀变为含碳角岩, 同时, 热液活动也使碳质成份发生变质重结晶并最终形成晶质石墨, 其成矿过程表现出典型的接触变质成因。

本次工作围绕寒武纪荷塘组层位展开, 在荷塘组含碳角岩中首次明确了晶质石墨矿物的存在。探针片镜下(图 1a)观察, 晶质石墨矿物呈长条状、板状、细柳叶状(图 1a), 反射光下呈钢灰色, 具明暗变

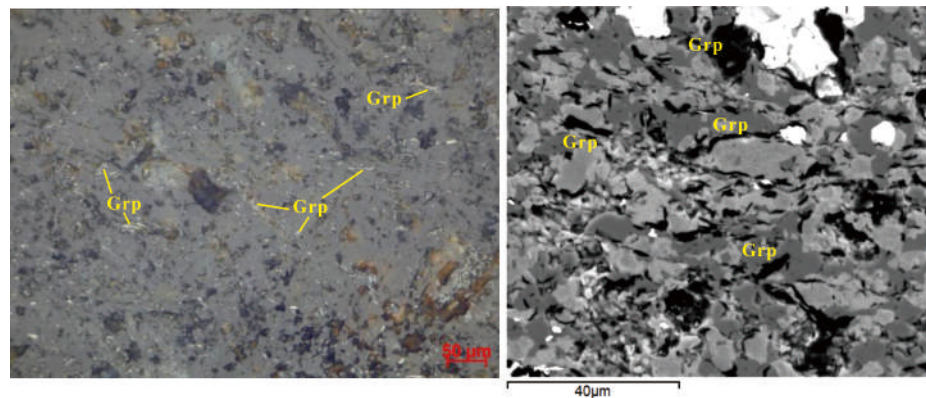


图 1 安徽宣城地区荷塘组含碳角岩中晶质石墨的探针片镜下(反射光)特征(a)及扫描电镜特征(b)

化, 粒径 5-40 $\mu\text{m}$  左右不等; 扫描电镜显示(图 1b), 晶质石墨全消光, 呈鳞片状堆叠, 多呈长条状形态, 表现出一定的定向排列性, 局部可见呈椭球状的鳞片状集合体; EDS 分析结果显示, 石墨中碳原子含量多在 90%以上, 个别可达 100%, 表明晶质石墨已具较好的结晶度。

宣城地区荷塘组含碳角岩中晶质石墨的发现具有一定的地质意义及潜在的工业价值。我国的接触变质型石墨矿多为隐晶质石墨矿, 其含矿地层集中在二叠纪和侏罗纪, 占隐晶质石墨资源量的 94.31% (高树学等, 2019)。而宣城地区新发现的石墨矿化则为寒武系荷塘组赋矿, 为细鳞片状晶质石墨, 矿石类型为含晶质石墨角岩。这一发现进一步补充了我国接触变质型石墨矿的赋矿层位及矿石类型。同时, 区内采集的含碳角岩样品的固定碳(C%)分析结果多在 2.5%以上, 达到最低工业品位, 且含碳角岩表现出相同的镜下特征, 即细小的晶质石墨矿物十分发育, 目估含量在 15-20%左右。荷塘组的含晶质石墨角岩在宣城地区广泛发育, 其成矿及找矿前景较大, 下一步计划开展晶质石墨的可选择性探索实验, 为后续勘查及工业利用开发提供依据。若宣城地区荷塘组含碳角岩中的晶质石墨取得突破, 则可为我国华南地区相同层位的晶质石墨找矿提供有价值的参考。

## 参考文献:

- 姚仲伯, 毕志国, 李自堃, 等. 1988. 中华人民共和国安徽省区域地质志.  
高树学, 颜亚玲, 陈正国, 等. 2019. 中国石墨矿床类型、成矿区带划分及成矿规律. 中国非金属矿工业导刊, 增刊1(138): 18-24.

项目来源: 安徽省公益性地质工作项目(项目编号: 2022-g-1-6)

作者简介: 李小东, 男, 1983 年生, 副高级工程师, 主要从事地质矿产勘查及研究工作. E-mail: echinas@126.com

# 伟晶岩中石英的原位微量元素特征及石英纯度评价——以东秦岭某花岗伟晶岩为例

李晓宇\*, 李开文, 张森森, 方怀宾, 张正伟

(河南省地质研究院, 河南 郑州 450016)

近些年来, 在东秦岭地区发现了具有产出高纯石英潜力的花岗伟晶岩(赵金洲等, 2021)。选择某花岗伟晶岩作为研究对象, 在岩石学研究基础上选择不同期次的石英开展原位 LA-ICP-MS 微量元素分析, 探讨石英中微量元素的影响因素及其对石英纯度评价的启示。

按矿物组合可分为四类: 第一类主要由长石和石英组成, 石英(Qtz-I)呈文象状分布在长石中; 第二类由长石+石英+黑云母+白云母+石榴子石+电气石组成, 石英(Qtz-II-a)以不规则粒状集合体, 与云母和石榴子石、电气石伴生, 白云母常以镶边状, 交代黑云母; 第三类由石英+白云母+长石+电气石+石榴子石组成, 白云母呈巨晶状, 石英(Qtz-II-b)与白云母和电气石伴生; 第四类为石英核, 主要由石英(Qtz-III)组成, 见细小鳞片状白云母。

分别选择上述四种岩石类型中干净透明的石英颗粒, 进行原位微量元素分析。石英中的微量元素含量均低于 100ppm, 其中 Qtz-I 为 40.7~91.5ppm (平均值 68.1ppm, n=20), Qtz-II-a 为 38.5~97.1ppm (平均值 64.0 ppm, n=18), Qtz-II-b 为 41.4~88.2ppm (平均值 57.3 ppm, n=14), Qtz-III 为 38.5~89.2ppm (平均值 58.3ppm, n=29), 总体变化不大。Qtz-I 中 Li、Ti、Al、Na、B 含量分别为 0.13~9.62ppm, 7.32~10.9ppm, 24.8~57.4 ppm, 0.26~1.62ppm, 0.68~1.44ppm; Qtz-II-a 中为 0.02~8.90ppm, 4.58~10.2ppm, 22.1~50.2 ppm, 0.35~2.19ppm, 0.53~1.34 ppm; Qtz-II-b 中为 0.00~5.16ppm, 5.15~9.07ppm, 22.6~26.4 ppm, 0.39~1.59 ppm, 0.70~2.12 ppm; Qtz-III 中为 3.02~5.52 ppm, 4.56~7.81ppm, 19.7~25.9 ppm, 0.00~1.15ppm, 0.40~1.52 ppm。

石英中 Ti 含量与其温度正相关(Hayden & Watson, 2007)。从 Qtz-I 到 Qtz-III, Ti 含量逐渐降低, 指示它们是在连续降温的过程中形成的。石英中 Al 和 Li 含量正相, 表明  $Al^{3+}$  主要通过  $Li^+$  配位替换  $Si^{4+}$  进入其晶格。在石英的结晶过程中, 伴随云母的结晶, Li 优先进入到云母中, 导致 Li 逐渐降低, 结晶出的石英逐渐贫 Li。因为缺失配位离子, 进入石英中的 Al 也逐渐减少。B 元素倾向于在分异晚期富集(David London, 2016)。早期结晶的 Qtz-I 具有相对较低的 B 含量, 从 Qtz-I 到 Qtz-II, B 含量逐渐升高, 显示随着分异, B 逐渐富集。Qtz-II 阶段有较多的电气石的结晶, B 逐渐亏损, 结晶出的 Qtz-III 含有相对较低的 B。本研究表明确明结晶分异对石英的微量元素含量具有显著的影响, 如云母的结晶会显著降低石英中的 Li 和 Al 含量, 而电气石的结晶会降低 B 含量。在进行石英纯度评价时, 矿物组合也是需要关注的方面。

## 参考文献:

- 赵金洲, 张驰, 张森森, 等. 2021. 东秦岭花岗伟晶岩中高纯石英矿物的可利用性研究. 矿物岩石地球化学通报, 41(6): 1305-1308.  
Hayden, L A, Watson, E B. 2007. Rutile saturation in hydrous siliceous melts and its bearing on Ti-thermometry of quartz and zircon. Earth Planet. Sci. Lett. 258 (3-4), 561-568  
David London. 2016. Reading Pegmatites—Part 2: What Tourmaline Says, Rocks & Minerals, 91(2): 132-149.

基金项目: 2023 年度河南省地质研究院地质科技攻关“揭榜挂帅”项目(批准号: 2023-331-XM021-KT01)

作者简介: 李晓宇, 男, 1992 年生, 博士, 主要从事花岗岩成因与成矿研究。

\* 通讯作者, E-mail: 963438647@qq.com

# 高纯石英提纯应用研究：以内蒙古巴彦淖尔乌拉特前旗石英矿与老挝水晶矿为例

屈少奕卿，侯振辉，夏梅，杨晓勇\*

(中国科学技术大学 地球与空间科学学院，安徽 合肥 230026)

## 1 高纯石英的概念

石英( $\text{SiO}_2$ )在地壳中的质量分数高达 60~65%，这就决定着石英是一种非常重要且常见的造岩矿物。自 20 世纪 60 年代以来，随着新兴产业的发展，这些产业对石英原材料产品的纯度提出了更高要求，由此产生了高纯石英的概念。高纯石英是以天然石英矿为原料，经过比较复杂的提纯工艺加工获得的  $\text{SiO}_2$  纯度极高的石英砂产品。同时，高纯石英产品还对产品粒度和矿物相等都有严格的要求。关于高纯石英的概念，应同时具备纯度、粒度、物相三个特征(汪灵, 2022)。

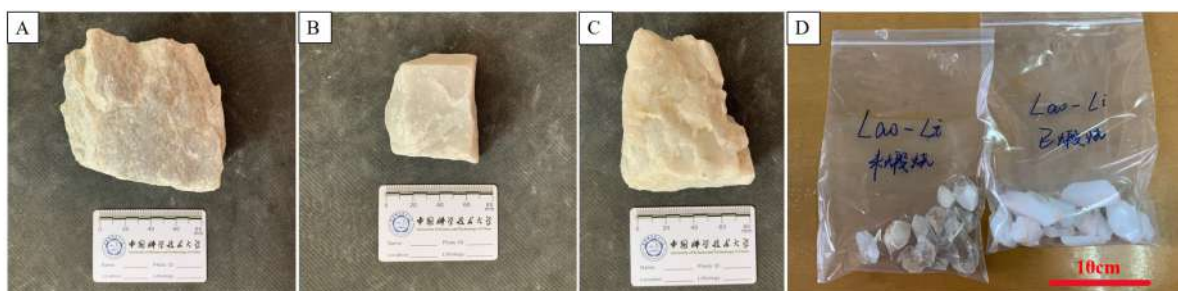
高纯石英的第一个也是其最显著的特征是它们的  $\text{SiO}_2$  纯度高，根据石英的  $\text{SiO}_2$  纯度及其工业应用的特点，汪灵(2021)将石英及相关产品归纳为三大类： $w(\text{SiO}_2)99\% \pm$  产品， $w(\text{SiO}_2)99\% \sim 99.9\%$  产品， $w(\text{SiO}_2) > 99.9\%$  产品，在这三大类石英及相关产品中，高纯石英是  $\text{SiO}_2$  纯度大于 99.9% 的石英砂系列产品的总称(汪灵, 2019)。

高纯石英产品的第二个特征是它们的粒度要求，即加工的产品是砂，是具有一定粒度组成的产品。粒度作为高纯石英一个重要指标，其粒度范围一般是 40~150 目，具体粒度应根据工业应用确定(汪灵, 2022)。

高纯石英的最后一个特征是它们的物相为晶相，由于所有高纯石英原料均来自于天然石英矿，而人工合成的纯度更高的石英玻璃(宋学富等, 2008)主要被应用于光纤制造，若被运用在其他工业领域，人工合成的石英玻璃不仅没有价格优势，而且由于制备工艺的问题，也会限制它在一些领域的应用(汪灵, 2022)。

## 2 样品描述

经过实地考察调研内蒙古巴彦淖尔市乌拉特前旗的包钢矿业增隆昌矿区(图 1A)、蓬欣矿业矿区(图 1B)以及华拓矿业芙蓉沟矿区(图 1C)，在此处采集石英样品进行研究(表 1)，并与老挝的石英水晶矿(图 1D)进行对比，以探究内蒙古乌拉特前旗此处几个矿区的石英矿品质及不同矿区石英矿的应用前景。



A.BG-1; B.PX-1; C.HT-1; D.Lao-Li

图 1 内蒙古石英矿与老挝水晶石英矿

表 1 内蒙古巴彦淖尔市乌拉特前旗及老挝样品采集表

样品编号	采样地点	样品描述
BG-1	内蒙古乌拉特前旗华拓矿业芙蓉沟矿区	块状构造，粗粒结构，烟灰白色，晶粒大小多为 5~10mm，具少量的白云母
PX-1	内蒙古乌拉特前旗蓬欣矿业矿区	块状构造，细粒结构，烟灰白色，晶粒大小多为 0.2~2mm
HT-1	内蒙古乌拉特前旗增隆昌矿区	块状构造，伟晶结构，烟灰白色，具油脂光泽，无伴生矿物
Lao-Li	老挝	具少量伴生矿物，煅烧前通体多透明，煅烧后呈乳白色，易破碎

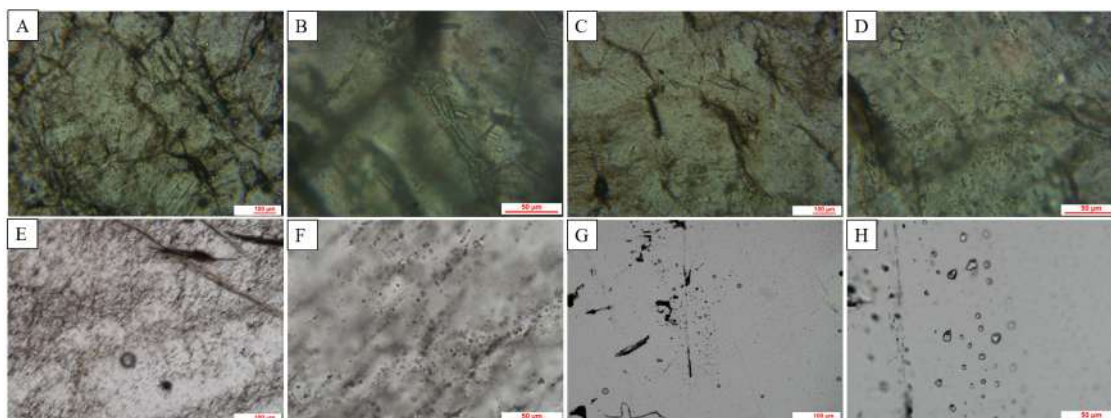
基金项目：国家自然科学基金重点项目资助(批准号：42030801)

作者简介：屈少奕卿，男，2001 年生，硕士研究生，主要从事高纯石英领域研究。E-mail: shaoyiqing.qu@mail.ustc.edu.cn

通讯作者，E-mail: xyyang@ustc.edu.cn

### 3 包裹体特征

在显微镜下对各个样品进行包裹体观察（图 2），可观察到 BG-1 在晶粒交界处具有较多的固体包裹体，晶粒的内部也含有不少的气液包裹体；PX-1 晶内与晶粒交界处有较多的微小液体包裹体；HT-1 晶内有较多的微小气体包裹体；Lao-Li 晶内较干净，只含有少量的气液包裹体。气液包裹体成分均为  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ 。



A 和 B:BG-1; C 和 D:PX-1; E 和 F:HT-1; G 和 H:Lao-Li

图 2 石英原矿包裹体物相特征

### 4 提纯后微量元素特征

后续对样品进行提纯与  $\text{SiO}_2$  和杂质元素含量检测，以此来查看提纯后的石英品质，酸浸后  $\text{SiO}_2$  和杂质元素含量结果（表 2）。具体提纯实验流程如下：包裹体特征观察←包裹体切片←送样←原矿→水洗擦洗脱泥→烘干→高温焙烧→破碎→磁选（伟晶岩）→浮选→酸浸→烘干。从表 2 可以看出：4 件样品除 BG-1 外制得的酸浸后石英砂  $\text{SiO}_2$  含量基本达到 3N8。其中，老挝 Lao-Li 水晶石英矿  $\text{SiO}_2$  含量最高，为 99.99 wt.%，包钢矿业 BG-1 石英矿  $\text{SiO}_2$  含量最低，为 99.28 wt.%，主要杂质元素为 Li、Al、Ca、Ti。

### 5 结论和展望

1) 通过酸浸后测试的结果可知于内蒙古所采的三个石英矿样品整体品质低于老挝的水晶石英矿，而在内蒙古所采的三个样品中

又属 BG-1 品质最低；通过包裹体观察可知 BG-1 中含有较多的固体包裹体，且 BG-1 原矿表面附着有较多的白云母，通过测试也发现 BG-1 中的 Al 值极高，而 HT-1 与 PX-1 的品质相近，通过观察也只是含有一些气液包裹体，Lao-Li 品质最好，晶内并没有固体包裹体，只是含有一些微小的气液包裹体。

2) 后续将进一步提纯以查看比对四者品质，以及对各个未处理的原矿进行  $\text{SiO}_2$  和杂质元素含量检测，以对比提纯过程中每个步骤对样品品质的提纯效果；通过实验可知，BG-1 并不适合做高纯石英，由于其原矿颜色较白，后期可通过测白度来查看是否能够适用于做板材砂；HT-1 与 PX-1 的品质相近，仅含有一些气液包裹体，可以通过后期煅烧水淬去除，通过进一步的提纯，有望达到更高一级的品质。Lao-Li 通过初步的酸浸处理已近 4N5 品质，属高纯石英中的中高端产品，通过后续的进一步提纯，有望达到高纯石英中的 4N8 高端产品级。

### 参考文献:

- 汪灵. 高纯石英的概念及其原料品级划分[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(05): 55-63.  
汪灵. 矿物材料学原理[M]. 北京: 地质出版社, 2021: 660.  
汪灵. 石英的矿床工业类型与应用特点[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(6): 39-47.  
宋学富, 孙元成, 钟海, 等. 等离子体化学气相沉积法合成石英玻璃(英文)[J]. 硅酸盐学报, 2008(4): 531-534.

表 2 石英样品酸浸后的  $\text{SiO}_2$  含量 (wt.%) 和杂质元素含量 ( $\times 10^{-6}$ ) 的检测结果

样品编号	采样地点	w ( $\text{SiO}_2$ )	杂质元素含量
BG-1	内蒙古巴彦淖尔	99.28637	7136.33
PX-1	内蒙古巴彦淖尔	99.98944	105.57
HT-1	内蒙古巴彦淖尔	99.98616	138.38
Lao-Li	老挝	99.99485	51.46

注: 杂质元素含量为 Al、B、Li、Na、K、Ca、Mg、Ti、Fe、Mn、Cu、Cr、Ni 等 13 种痕量杂质元素总量

# 高纯石英提纯应用研究：以新疆阿尔泰伟晶岩与安徽霍邱群太古代绿岩为例

孙李婷，邱月，夏梅，侯振辉，杨晓勇\*

(中国科学技术大学 地球与空间科学学院，安徽 合肥 230026)

## 1 高纯石英概况

高纯石英是指  $\text{SiO}_2$  质量分数高于 99.9% 的石英砂统称。此外，外国学者 Müller 等从石英杂质的角度出发，制定了一套更为详细的评判标准，即石英中主要的 9 种有害成分含量上限分别为  $\text{Al} < 30 \mu\text{g/g}$ 、 $\text{Ti} < 10 \mu\text{g/g}$ 、 $\text{Na} < 8 \mu\text{g/g}$ 、 $\text{K} < 8 \mu\text{g/g}$ 、 $\text{Li} < 5 \mu\text{g/g}$ 、 $\text{Ca} < 5 \mu\text{g/g}$ 、 $\text{Fe} < 3 \mu\text{g/g}$ 、 $\text{P} < 2 \mu\text{g/g}$ 、 $\text{B} < 1 \mu\text{g/g}$ 、且总和小于  $50 \mu\text{g/g}$ ，只有达到这样标准的石英才可称为高纯石英<sup>[1]</sup>。

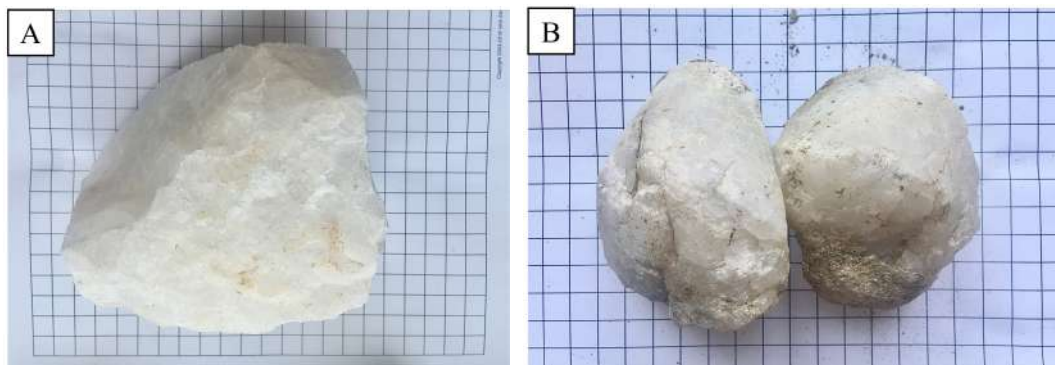
由于  $\text{SiO}_2$  独特的晶体结构和晶格特征，高纯石英具有优异的光学特性、耐腐蚀性、耐高温性、高绝缘性，是高新技术产业（如半导体、高温灯管、通讯、精密光学、微电子、太阳能等）必不可少的原料。且随着高新技术产业的快速发展，我国对纯净高品质高纯石英的需求量愈来愈大。如此重要的战略资源，我国却对进口表现出高依赖性。据统计， $\text{SiO}_2$  含量  $\geq 99.99\%$  的高纯石英进口率达 91%，用于制造芯片的  $\text{SiO}_2$  含量  $\geq 99.998\%$  的高纯石英进口率为 100%<sup>[2-4]</sup>，因此，对于高纯石英提纯技术的研究当刻不容缓。

目前，能够作为高纯石英原料的矿床工业类型只有天然水晶，脉石英，花岗伟晶岩石英三种<sup>[5]</sup>。天然水晶  $\text{SiO}_2$  含量较高，但其储量小，价格昂贵，不适合大规模工业生产。脉石英矿物成分单一，几乎全部为石英，但矿物中普遍存在气液包裹体，存在于晶体内部的包裹体提纯工艺难度较大。花岗伟晶岩石英虽然没有天然水晶，脉石英的纯度高，但也具备一定的提纯潜力，张海啟等人就针对新疆阿尔泰地区花岗伟晶岩采取适当提纯工艺，成功制出 4N8 级高纯石英砂<sup>[6]</sup>。

我们采集了新疆阿尔泰花岗伟晶岩及安徽霍邱群太古代绿岩样品，选取两块具有代表性的原矿进行实验，分别编号为 XJ-1，HQ-2，以探究不同种类石英矿提纯方法及不同矿区石英矿的应用前景。

## 2 样品岩石矿物学特征

新疆阿尔泰样品 XJ-1 为块状构造，粒状变晶结构，呈晶质集合体，乳白色，无肉眼可见共生矿物。安徽霍邱样品 HQ-2 为块状构造，粒状变晶结构，烟灰白色。



A. XJ-1; B. HQ-2

图 1 新疆阿尔泰伟晶岩样品 XJ-1 与安徽霍邱群太古代绿岩 HQ-2 手标本照片

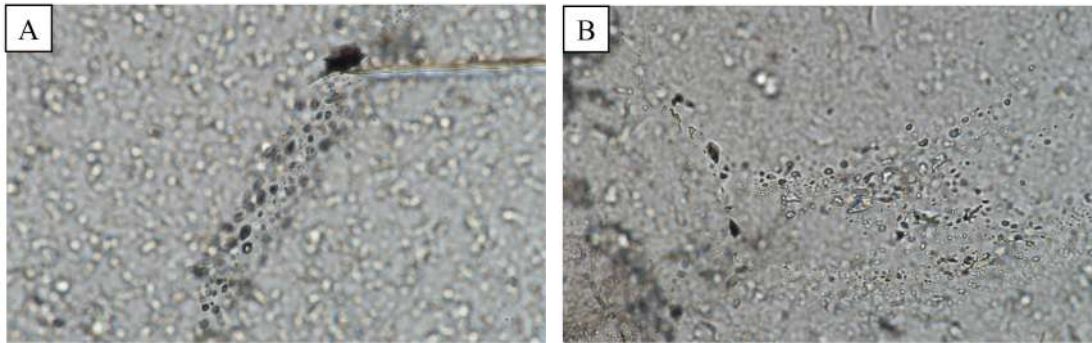
**基金项目：**国家自然科学基金重点项目资助（批准号：42030801）

**作者简介：**孙李婷，女，2000 年生，硕士研究生，主要从事高纯石英领域研究. E-mail: slt@mail.ustc.edu.cn

通讯作者，E-mail: xyang@ustc.edu.cn

### 3 包裹体特征

将岩石样品以加厚 100 微米的标准切片制样，并于显微镜下观察。镜下结果显示，样品 XJ-1 部分晶粒内部比较干净，不含包裹体，部分晶粒内部含固体包裹体及流体包裹体，流体包裹体内部为重烃+H<sub>2</sub>O；样品 HQ-2 晶体内部含较多流体包裹体，部分流体包裹体呈定向排列，流体包裹体内部为重烃+H<sub>2</sub>O 及 CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O。



A. XJ-1; B. HQ-2

图 2 新疆阿尔泰伟晶岩样品 XJ-1 与安徽霍邱群太古代绿岩 HQ-2 包裹体特征

### 4 提纯前后微量元素特征

对样品进行提纯，实验流程如下：包裹体特征观察←包裹体切片←送样←原矿→水洗擦洗脱泥→烘干→高温焙烧→破碎→磁选→浮选→酸浸→烘干→氯化，并通过溶样等实验检测杂质元素含量，结果如表 1 所示。

表 1 石英样品提纯后 SiO<sub>2</sub> 含量与杂质元素检测结果

样品编号	提纯前		提纯后		杂质元素去除率
	w(SiO <sub>2</sub> )/%	杂质元素总量	w(SiO <sub>2</sub> )/%	杂质元素总量	
XJ-1	99.7988	1210.262	99.9980	22.001	98.18%
HQ-2	99.8982	684.231	99.9978	19.624	97.13%

注：杂质元素含量为 Al、B、Li、Na、K、Ca、Mg、Ti、Fe、Mn、Cu、Cr、Ni 等 13 种痕量杂质元素总量，单位 10<sup>-6</sup>

从杂质元素去除率来看，该提纯过程效果显著，杂质去除率达 97% 以上，样品 XJ-1 提纯至 4N8，样品 HQ-2 提纯至 4N7。提纯前，样品 HQ-2 的含量高于样品 XJ-1，而提纯后，样品 HQ-2 的 SiO<sub>2</sub> 含量却低于样品 XJ-1；这表明，不能简单依靠原矿元素特征判断其应用性好坏，而要通过具体的实验去验证。

### 5 结论和展望

(1) 不同石英原矿 SiO<sub>2</sub> 含量差距并不明显，原矿纯度高并不代表其能够作为优质高纯石英的原料。

(2) 包裹体特征对于高纯石英提纯效果有着决定性影响，如何有效去除晶内包裹体，改善提纯工艺，或建立晶内包裹体含量与提纯后 SiO<sub>2</sub> 含量的数学模型，以达到初步筛选高纯石英原矿的目的，是高纯石英提纯应用十分重要的一环，也是我们需要努力探究的方向。同时，提纯过程的每个步骤，都应该精益求精，致力打造出一套更为系统、稳定、绿色的工业提纯工艺。

### 参考文献：

- [1] 姚瑶,况守英,张莉.新疆某热液脉型石英矿物的矿物组成特征研究[J]. 现代矿业, 2023, 39(08):
- [2] 申士富.高纯石英砂研究与生产现状[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2006, 57(5): 13-16.
- [3] HAUS R, PRINZ S, PRIESS C. Assessment of high purity quartz resources[M]//Quartz: deposits, mineralogy and analytics. Berlin: Springer, 2012: 29-51.
- [4] 汪灵,党陈萍,李彩侠,等.中国高纯石英技术现状与发展前景[J]. 地学前缘, 2014, 21(5): 267-273.
- [5] 汪灵.高纯石英的概念及其原料品级划分[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(05): 55-63.
- [6] 王振轩,刘波,孙红娟等.江西花岗伟晶岩制备 4N 级高纯石英工艺研究[J]. 非金属矿, 2023, 46(04): 58-66.



# 脉石英提纯制备高纯石英砂及其特性研究：以南非、津巴布韦、老挝和巴基斯坦脉石英矿为例

夏梅, 侯振辉, 杨晓勇\*

(中国科学技术大学 地球与空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

## 1 高纯石英的研究意义

高纯石英是由自然界天然存在的含石英岩石中较高纯度石英作为原料矿石经工业上破碎、煅烧、水淬、筛分、磁选色选、浮选、酸洗等提纯工艺生产而成的高品质石英(杨晓勇等, 2021)。汪灵(2023)制定了国内高纯石英的质量标准, 将  $\text{SiO}_2 \geq 99.9 \text{ wt.}\%$  的石英视为高纯石英。经过工业提纯后的高纯石英广泛应用于半导体、高温灯管、电信和光学、太阳能硅、微电子等行业(Müller et al., 2007; Haus, 2005)。

近年来, 随着半导体、光通讯、光伏等领域市场的快速发展, 作为原材料的高纯石英资源却相对稀缺(Haus, 2005)。因此, 立足国内外石英资源, 根据石英原矿的包裹体特征和提纯前后微量元素特征, 对各类石英原料矿石进行高纯石英资源可利用性评价, 可以发掘石英更大的经济价值, 实现矿产资源的高效利用。其中, 热液脉体中结晶出来的石英因晶粒结晶粒度粗大, 易于解离,  $\text{SiO}_2$  含量高, 是替代天然水晶作为加工高纯石英的理想原料矿石(汪灵, 2019; 杨晓勇等, 2021)。

## 2 脉石英样品手标本

从手标本看(图 1): 老挝 LW-1、津巴布韦 JBBW-1、南非 NF-1 和巴基斯坦 BJST-1 脉石英样品的透明度依次降低。南非 NF-1 呈乳白色, 巴基斯坦 BJST-1 呈灰白色, 4 件脉石英样品均为粗粒, 呈油脂光泽, 无明显肉眼可见的共生矿物。

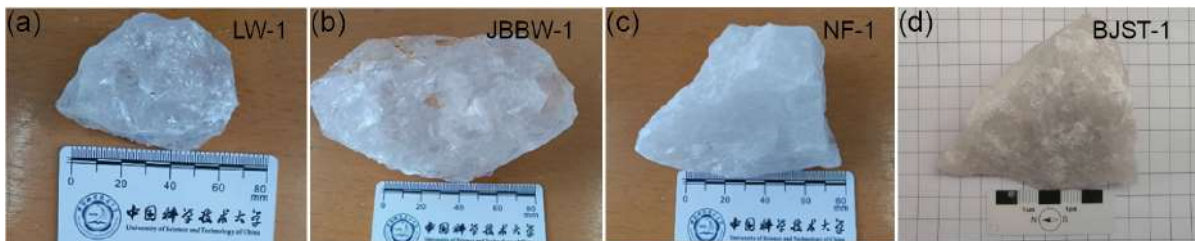


图 1 脉石英原矿手标本

## 3 脉石英样品包裹体特征

在石英晶体生长过程中, 残余的热液组分或副矿物易混入形成包裹体。对于高纯石英原料来说, 包裹体类型和含量都对高纯石英砂的品质有显著影响, 是杂质元素的主要来源之一。当石英中包裹体以微细粒矿物包裹体( $< 10 \mu\text{m}$ )为主且视域内流体包裹体面积广泛分布时, 即较难加工成高纯石英。

老挝 LW-1 与津巴布韦 JBBW-1 脉石英大面积晶粒内部干净, 裂隙少, 石英表面定向排列气液两相包裹体。南非 NF-1 和巴基斯坦 BJST-1 脉石英样品包裹体相对较丰富, 裂隙更发育, 但部分晶粒内部干净, 晶粒交界处分布大量微小的流体包裹体(图 2)。4 件脉石英样品仅巴基斯坦 BJST-1 伴生少量钾长石, 气液包裹体成分均为  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ 。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(批准号: 42030801)

作者简介: 夏梅, 女, 1984 年生, 博士研究生, 主要从事高纯石英领域研究. E-mail: xm851102@ustc.edu.cn

通讯作者, E-mail: xyang@ustc.edu.cn

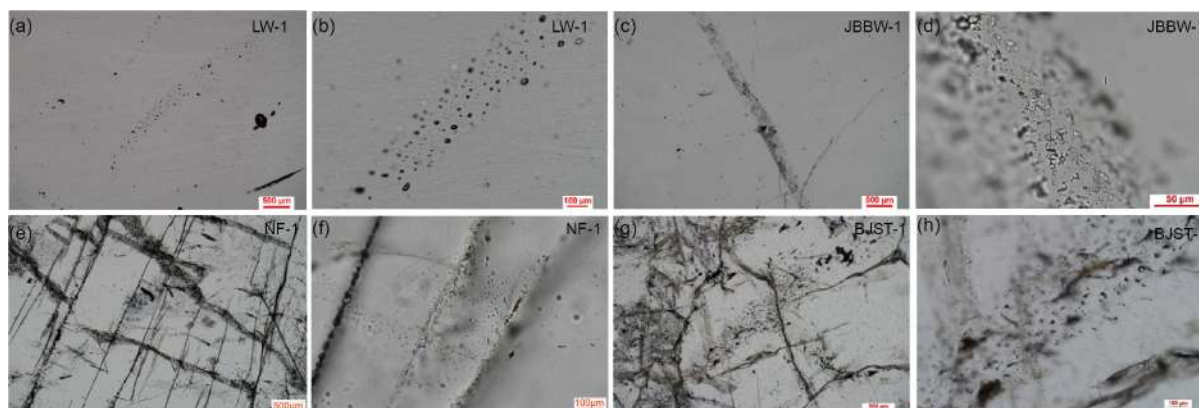


图 2 脉石英原矿包裹体特征

#### 4 提纯工艺研究

将 4 件脉石英原矿进行擦洗除泥, 去除表面杂质后, 进行提纯工艺研究。具体提纯实验包括: 一次煅烧-破碎-浮选-二次煅烧-酸浸-烘干得到粒径为 75~380  $\mu\text{m}$  的石英精砂, 其  $\text{SiO}_2$  百分含量、杂质元素种类和含量见表 1 所示。

4 件脉石英原矿制得的精制石英砂  $\text{SiO}_2$  含量基本达到 4N9。其中, 巴基斯坦 BJST-1 脉石英  $\text{SiO}_2$  含量最高为 99.99 wt.%, 津巴布韦 JBBW-1 脉石英  $\text{SiO}_2$  含量最低为 99.989 wt.%, 主要杂质元素为 Li、Al、Ca 和 Ti。

#### 5 精制石英砂内部包裹体特征

对 4 件脉石英原矿制得的精制石英砂进行显微观察 (图 3), 经过提纯后的精制石英砂, 内部包裹体较少, 较纯净, 但部分石英砂样品仍残留一定包裹体, 可能是精制石英砂中杂质元素 Na 和 Ca 的主要来源。

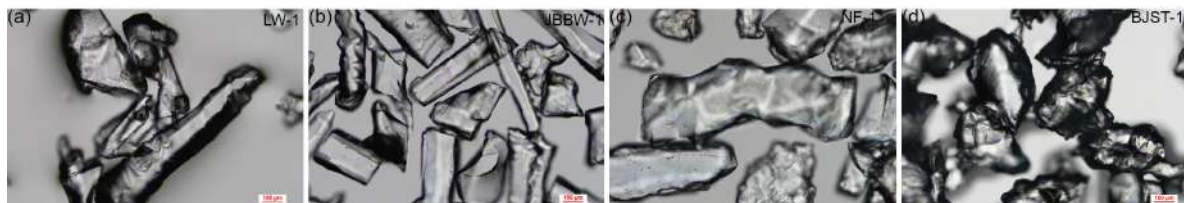


图 3 精制石英砂内部包裹体特征

#### 6 结论

4 种脉石英原矿粒径均为粗粒, 老挝 LW-1 与津巴布韦 JBBW-1 脉石英气液流体包裹体含量极低, 所有样品包裹体均主要以表面和晶粒交界处的流体包裹体为主, 主要成分为  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ , 这类流体包裹体后期比较容易通过加工提纯去除。提纯后的精制石英砂内部包裹体较少, 较纯净。4 种脉石英原矿制得的精制石英砂的  $\text{SiO}_2$  含量均基本达到 99.99 wt.%, 主要杂质元素为 Li、Al、Ca 和 Ti, 后期可以进一步通过高温氯化进行去除。

#### 参考文献:

- 杨晓勇, 孙超, 曹荆亚, 施建斌, 2021. 高纯石英的研究进展及发展趋势. 地球科学, 29, 231-244.  
 Müller, A., Ihlen, P.M., Wanvik, J.E., 2007. High-purity quartz mineralisation in kyanite quartzites, Norway. Mineralium Deposita 42(5), 523-535.  
 Haus, R., 2005. High demands on high purity. International journal of mineral processing 10, 62-67.  
 汪灵, 2019. 石英的矿床工业类型与应用特点. 矿产保护与利用 6, 39-47.  
 汪灵, 2023. 高纯石英的概念及其原料品级划分. 矿产保护与利用 5, 57-63.

表 1 石英样品酸浸后的  $\text{SiO}_2$  含量 (wt.)、杂质元素种类和含量 ( $\times 10^{-6}$ ) 的检测结果

样品编号	w ( $\text{SiO}_2$ )	杂质元素含量	主要杂质元素
LW-1	99.992	80.74	Li、Al、Ca
JBBW-1	99.989	109.25	Li、Al、Ca、Ti
NF-1	99.995	52.53	Li、Al、Ti
BJST-1	99.996	44.54	Li、Al、Na、K、Ca、Ti

注: 杂质元素含量为 Al、B、Li、Na、K、Ca、Mg、Ti、Fe、Mn、Cu、Cr、Ni 等 13 种痕量杂质元素总量

# 皖南地区石英岩型高纯石英原料矿的发现及其意义

徐波, 蔡晓兵, 魏国辉

(安徽省地质调查院(安徽省地质科学研究所), 安徽 合肥 230001)

高纯石英是  $\text{SiO}_2$  纯度大于 99.9% 的石英砂系列产品的总称, 广泛应用于电子信息、光伏、光通信和光源等行业, 在新材料、新能源战略性新兴产业中具有重要地位和作用(汪灵, 2022)。高纯石英原料矿指能被现有成熟的矿物加工技术将其提纯为高纯石英砂产品的天然石英矿物资源, 岩浆岩中的伟晶岩和热液脉、变质岩中的石英岩和变质脉体, 以及沉积成因的石英岩和石英砂是提纯高纯石英相对较好的选择(杨晓勇等, 2022)。

皖南地区石英岩调查区位于扬子板块东段北中部, 包括江南过渡带、江南隆起带和钱塘凹陷带 3 个次级构造单元, 北以周王断裂、东以三阳坑断裂、南以祁门—潜口断裂、西以葛公镇断裂所围限的安徽省南部地区(图 1)。北西侧为沿江褶皱带, 是我国重要的成矿带—长江中下游成矿带, 南侧为障公山隆起, 是钦杭成矿带重要组成部分, 与赣东北、浙西组成钦杭成矿带北段。区内广泛发育水晶、脉石英、石英岩、花岗伟晶岩等, 且针对性的开展过大量的地质工作, 但将其作为高纯石英原料矿进行探索的则十分有限, 且以脉石英为主, 对于石英岩鲜有工作开展。

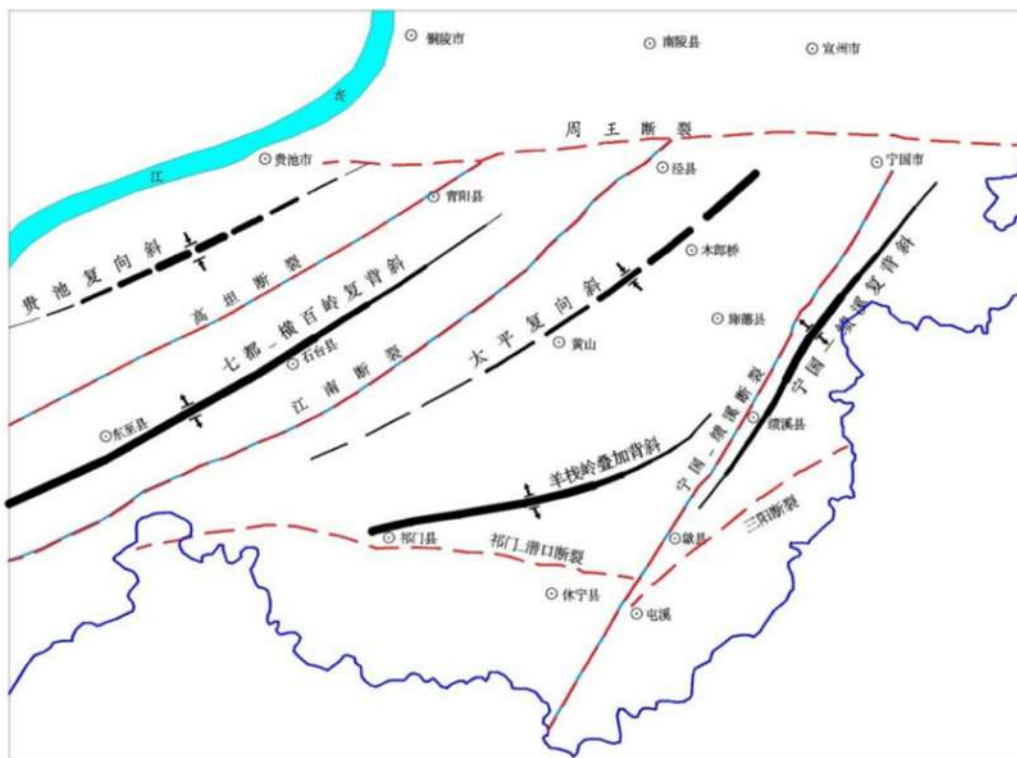


图 1 皖南地区构造略图

石英岩是一种由石英砂岩或其他硅质岩经区域变质作用、热接触变质作用, 或者岩浆热液蚀变而形成的变质岩石, 主要伴生矿物有长石、云母和黏土矿物等。于皖南地区局部产出, 如宁国诸佛堂、黄山贤村等,

项目来源: 安徽省公益性地质工作项目(项目编号: 2022-g-1-9)

作者简介: 徐波, 男, 1987 年生, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查及研究工作。E-mail: xb482280@163.com

较之水晶、脉石英，次生石英岩具有资源规模大，质量稳定的特征。本次工作针对皖南地区发育较为广泛的皮园村组石英岩开展工作。通过地质测量、槽探、物探等方法，初步圈定具有一定规模石英岩矿体多个。

皮园村组石英岩原岩为硅质岩，经热液长期反复作用形成次生石英岩型脉状矿体。矿石呈乳白色，粒状变晶结构—隐晶质结构，块状构造，矿石矿物为石英，可见次生加大现象，局部可见残余层理。脉石矿物主要有萤石、绢云母、斜长石、黑云母、黄铁矿、磁铁矿、褐铁矿等。

单偏光镜下呈灰白色，不等粒半自形镶嵌结构，粒径 0.1~0.5mm 不等。干涉色为一级黄白，正低突起，石英颗粒边部未见明显的溶蚀现象（图 2a）。

晶体中见大量的富液相包体，不规则状，粒径 5~20 $\mu\text{m}$ ，占包裹体总含量的约 90%，在晶体内分布较为均匀；局部见气液两相包体，5~10 $\mu\text{m}$ ，多呈短柱状，局部见固体包体，粒径 5 $\mu\text{m}$  左右，主要为原生包裹体（图 2b）。拉曼测试结果显示气液相成分均为  $\text{H}_2\text{O}$ 。原矿石中  $\text{SiO}_2$  含量 99.08%，有害元素  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 0.36%， $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量为 0.09%。

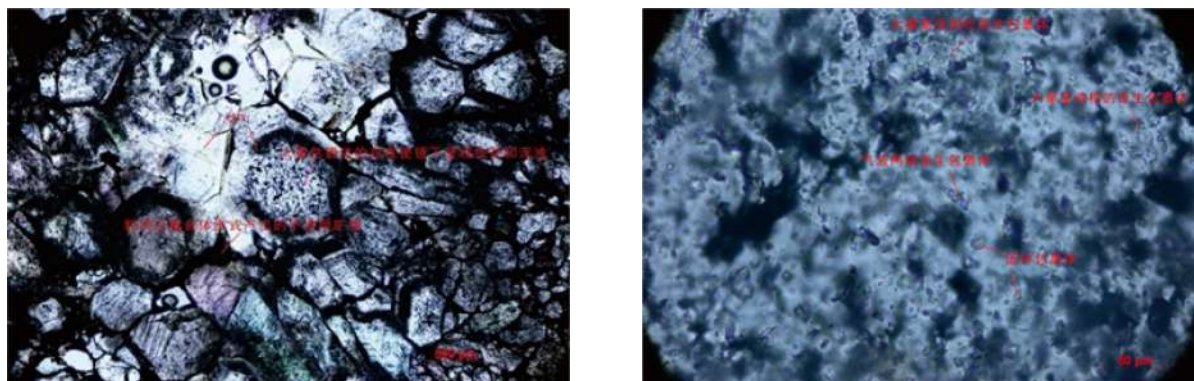


图 2 皖南地区皮园村组石英岩镜下（单偏光）特征（a）及包裹体特征（b）

通过对原矿进行破碎-预先分级-磨矿-擦洗脱泥-强磁选-浮选-煅烧-水淬-热压酸浸的提纯工艺处理后， $\text{SiO}_2$  含量 99.9263%，杂质含量 736.67ppm，达到低端高纯石英砂产品标准。通过本次工作表明皖南地区皮园村组石英岩具有提纯为高纯石英的潜力，后期有望通过优化提纯方案，得到质量更为优良的高纯石英产品。极大的拓宽了区域内开展高纯石英原料矿调查的方向，可以为本区找矿工作提供一定的借鉴。

### 参考文献：

汪灵. 2022. 高纯石英的概念及其原料品级划分. 矿产保护与利用, 42(05): 55-63.

杨晓勇, 孙超, 曹荆亚, 等. 2022. 高纯石英的研究进展及发展趋势. 地学前缘, 29(01): 231-244