

关于脉石英型高纯石英矿提纯前后杂质赋存状态的讨论

郝文俊^{1,2,3}, 董运来^{1,2,3*}, 詹建华^{1,2,3}, 陈军元¹, 王波^{1,2,3}, 张徐^{1,2,3}, 刘玉芹¹

(1. 中国建筑材料工业地质勘查中心, 北京 100035; 2. 中国建筑材料工业地质勘查中心安徽总队, 安徽 合肥 230031; 3. 中建材安徽勘测设计研究院有限公司, 安徽 合肥 230031)

摘要: 脉石英是高纯石英矿的重要原料, 厘清其杂质赋存状态对矿石品质评估至关重要。本文选取全国不同产区 41 件脉石英样品, 研究提纯前后杂质赋存状态变化及矿石表征性能。研究表明, 脉石英中杂质元素分为两类: 一类以 Al、Na、K、Mg、Ca、Fe 为代表, 全岩微量元素含量显著高于石英原位含量, 主要受白云母、长石等脉石矿物的控制; 另一类为 Li、Ti、Mn、Cu, 全岩含量普遍偏低, 且与原位含量高度一致, 受脉石干扰弱, 其中 Li 与流体包裹体演化相关。提纯工艺对两类杂质均有调控效果, 且作用机制与赋存状态密切相关: 可有效剔除脉石矿物, 显著去除 Al、Na、K 等杂质, 但亚显微级白云母、含钛矿物的残留, 导致提纯后全岩 K、Na、Al、Ti 含量仍高于原位水平; 赋存于晶体间隙、晶界及微裂隙中的 Mn、Mg、Fe、Ca 等杂质, 经提纯后全岩含量可低于原位含量; 流体包裹体中的 Li 元素去除效果较好, 提纯后全岩含量接近原位水平。此外, 不同结构脉石英杂质组成差异显著, 乳白色致密状脉石英的全岩、原位杂质总量及关键杂质含量, 均明显高于雪白色砂糖状脉石英。本文提出将粒度 0.1~2 mm、透光率 > 50% 作为脉石英型高纯石英矿的关键表征指标, 为矿石品质评价提供了科学依据。

关键词: 脉石英; 高纯石英矿; 杂质赋存状态; 粒度; 透光率; 石英加工提纯

中图分类号: P619.23; TD985 **文献标志码:** A

第一作者: 郝文俊, 男, 1987 年生, 高级工程师, 主要从事矿产地质勘查工作。E-mail: haowenjun029@163.com。

Discussion on the occurrence states of impurities in the vein quartz-type high-purity quartz ores before and after purification

HAO Wenjun^{1,2,3}, DONG Yunlai^{1,2,3*}, ZHAN Jianhua^{1,2,3}, CHEN Junyuan¹, WANG Bo^{1,2,3},
ZHANG Xu^{1,2,3}, LIU Yuqin¹

(1. China National Geological Exploration Center of Building Materials Industry, Beijing, 100035; 2. Anhui Branch of China National Geological Exploration Center of Building Materials Industry, Hefei Anhui, 230031; 3. China National Building Material Anhui Survey and Design Research Institute Co., Ltd. Hefei Anhui, 230031)

Abstract: The vein quartz is a kind of critical raw materials for the high-purity quartz ore. To clarify the occurrence states of impurities in the vein quartz is of great significance for the ore quality evaluation. In this study, 41 vein quartz samples from different areas across China were selected to investigate the changes of impurity occurrence states and ore

收稿日期: 2025-12-11。

基金项目: 国家重点研发计划项目“高纯石英原料矿床成矿机制与提纯关键技术”(编号: 2024YFC2910100、2024YFC2910103); 中国建筑材料工业地质勘查中心揭榜挂帅项目(建地科(2022)01号)。

*通信作者, E-mail: 1172986742@qq.com。

characterization performances before and after purification. The results show that impurity elements in the vein quartz samples can be classified into two categories. The first category is represented by elements of Al, Na, K, Mg, Ca and Fe. Their total contents of bulk vein quartz samples are significantly higher than those of the quartz samples analyzed by using the in-situ analytical methods. They are mainly caused by gangue minerals such as muscovite and feldspar in the vein quartz samples. The second category includes elements of Li, Ti, Mn and Cu. Their contents of bulk quartz samples are generally low and are highly consistent with those of the quartz samples analyzed by using the in-situ analytical methods. They are weakly disturbed by gangue minerals, among which the content of Li is associated with the evolution of fluid inclusions. Through the purification process, both two types of impurities can be regulated, and the regulation mechanism is closely correlated with the occurrence states of impurities. Through the purification process, gangue minerals can be effectively removed and the impurity elements such as Al, Na and K can be significantly reduced. However, due to the residual submicron muscovite and titanium-bearing minerals, the contents of K, Na, Al and Ti of bulk quartz samples after purification are still higher than those of the vein quartz analyzed by using the in-situ analytical methods. The elemental impurity contents of Mn, Mg, Fe and Ca that occurred in crystal interstices and boundaries and grain microcracks of the bulk quartz samples after purification can be reduced to levels below to those of the vein quartz analyzed by using the in-situ analytical methods. The removal efficiency of Li hosted in fluid inclusions of the vein quartz is relatively high, with contents of the bulk quartz samples after purification close to those of the vein quartz analyzed by using the in-situ analytical methods. In addition, the elemental impurity compositions of vein quartz samples with different structures are significantly different. The total contents of elemental impurities of bulk quartz samples and those of the vein quartz analyzed by using the in-situ analytical methods, as well as contents of key elemental impurities of the milky white compact vein quartz samples are all significantly higher than those of the snow-white granular vein quartz samples. This study proposes that the particle sizes ranging from 0.1 mm to 2 mm and light transmittances greater than 50% should be regarded as the key characterization indicators for vein quartz-type high-purity quartz ore, providing a scientific basis for the quality evaluation of this type of ores.

Keywords: vein quartz, high-purity quartz ore, occurrence state of impurities, particle size; light transmittance, processing and purification of bulk quartz samples

脉石英矿是呈脉状产出的石英矿产资源总称, 由富硅热液交代裂隙围岩及充填岩石构造裂隙形成^[1,2]。我国此前将其主要用作玻璃原料、冶金熔剂及水泥配料, 随着电子信息、新材料、新能源等战略性新兴产业发展, 高纯石英矿已成为相关产业链中关键的核心原料, 受我国资源禀赋特征影响, 脉石英型矿源目前仍是我国主要高纯石英矿生产的主要原料基础^[2,3]。

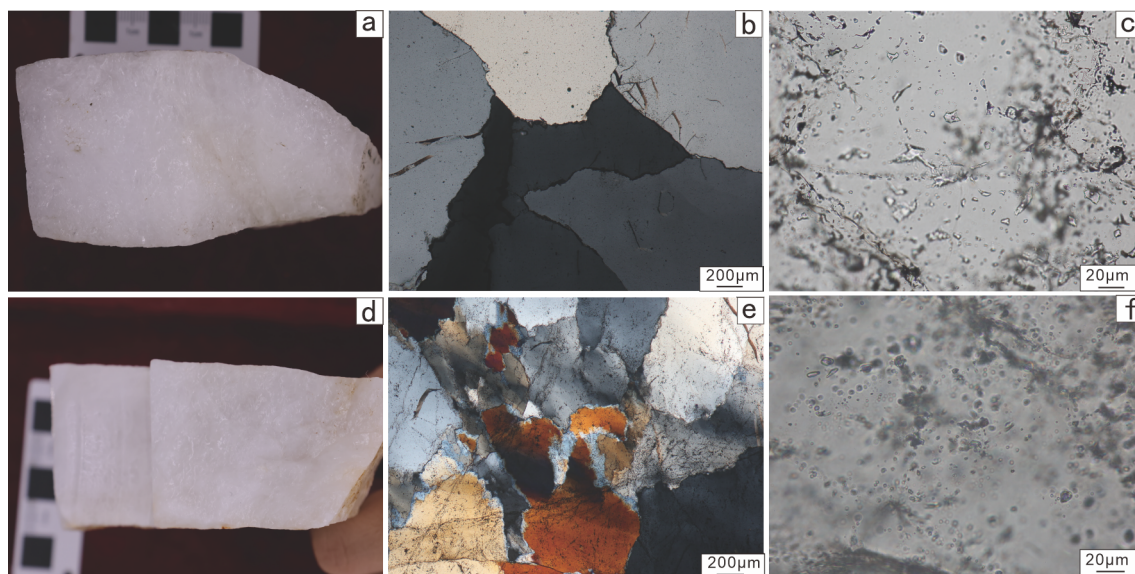
作为高纯石英矿的核心原料来源, 脉石英兼具显著的工业应用价值与技术优势: 其一, 其SiO₂纯度普遍达3N(99.9%)及以上, 杂质基础含量较低, 为后续高纯石英提纯加工提供了优质原料保障; 其二, 相较于天然水晶, 脉石英同一矿体的矿石质量稳定性更强, 可满足矿物原料均一化加工的工艺要求; 其三, 尽管高纯石英砂传统应用场景下规模属“小矿”范畴, 但在适配电子信息等战略性新兴产业需求后, 已成为具备战略意义的“大矿”资源。深入开展脉石英杂质赋存状态研究具有重要现实意义: 一方面, 可精准评估脉石英型高纯石英矿的原料品质等级, 为矿石资源的合理开发、分级利用提供科学依据, 有效规避盲目开采与资源浪费问题; 另一方面, 明确杂质元素的存在形式、赋存状态及分布规律, 是制定高效提纯工艺的核心前提——基于该研究成果, 可针对性选择物理提纯、化学提纯或联合提纯技术路径, 实现杂质的靶向高效去除, 进而提升高纯石英产品的纯度与质量稳定性, 满足高新技术产业对原料的严苛要求, 同时增强我国高纯石英产业链的核心竞争力, 保障相关产业供应链的安全稳定。

截至目前, 脉石英型高纯石英矿资源在全球范围内已有广泛报道, 印度、俄罗斯、挪威、安哥拉、澳大利亚、巴基斯坦、加拿大及中国部分地区均已发现相关矿点^[2-11]。但从产业化实践来看, 脉石英型高纯石英矿资源仍仅集中于俄罗斯、澳大利亚、印度、中国等少数国家^[3,7], 多数已探明资源尚处于

勘探或试验开发阶段。制约高纯石英矿规模化投产的因素呈多元化特征, 其中技术层面的瓶颈是核心症结, 具体体现在原料选择、提纯工艺、加工装备及质量检测等关键环节的技术成熟度不足, 其中脉石英型高纯石英矿的原料选择是核心前提, 其杂质赋存状态及可提纯性直接决定原料筛选的合理性与有效性。

1 岩相分析

本次分析的41件脉石英样品, 依据结构特征可划分为乳白色致密状与雪白色砂糖状两类(图1)。样品宏观上呈乳白色或雪白色, 具半自形-他形粒状或致密状结构, 透明度为半透明至透明, 主要矿物组成为石英, 含少量白云母、长石副矿物, 构造裂隙普遍发育; 石英颗粒无明显解理, 油脂光泽显著, 其中乳白色致密状样品的透明度相对较低。



a~c. 砂糖状脉石英手标本、镜下以及包裹体照片; d~f. 致密状脉石英手标本、镜下以及包裹体照片。

图1 脉石英样品岩相分析图

Fig. 1. Petrographic images of the vein quartz samples

显微镜下观察显示, 石英晶粒洁净度良好, 粒度分布不均一, 部分晶体形态规则且颗粒接触边缘平直, 多数薄片可见石英加大边结构; 石英颗粒粒径介于0.04~5 mm之间, 部分颗粒表现出波状消光现象, 反映其经历了一定的构造应力作用。

流体包裹体研究表明, 样品中包裹体含量较低, 主要类型为液相包裹体与气-液两相包裹体, 其中气-液两相包裹体占比更高, 形态包括长条状、椭圆形、圆形及不规则状。粒径统计结果显示, 1~10 μm包裹体占比70%~95%, 10 μm以上包裹体占比5%~30%, 平均粒径3~10 μm, 偶见11~12 μm的较大个体。包裹体空间分布方向无明显规律性, 次生包裹体规模小于原生包裹体, 粒径约1~3 μm, 呈线状或串珠状分布, 推测与后期流体活动相关; 单位体积内包裹体总体积中等, 在显微镜视域中占比5%~40%。

2 分析方法

本文系统分析了采自东秦岭-大别-苏鲁等不同成矿区带的41件脉石英矿石样品^[12], 重点研究其物理性质与化学成分特征, 具体涵盖透光率等物理参数和主量、微量元素的组成与分布规律。

2.1 透光率

首先将的包裹体片用丙酮溶液泡下后,利用紫外可见近红外分光光度计 carry5000 对样品进行测试,设定紫外可见光区测试范围为(200~800 nm),该波长范围是石英矿石本征吸收、杂质离子显色、结构缺陷及色心影响最显著的波段,能反映石英矿石纯度与光学质量,可见光区(380~800 nm)可决定矿石透明度、外观色泽,紫外区(200~380 nm)对过渡金属杂质、晶格缺陷较敏感,是评价高纯石英品质的重要依据。调试仪器参数至稳定状态后,将处理后的包裹体薄片固定积分球测试位置处进行分析测试,提取可见光波(380~780 nm)的透光率数据并计算平均值,作为样品的最终透光率指标。

2.2 水含量分析

本次水含量测试在中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室完成,采用德国 Bruker 公司 Vertex-70v 傅里叶变换显微红外光谱仪,使用 OPUS 软件进行光谱采集与数据处理。将待测矿石样品磨制成厚度为 150~250 μm 的双面抛光薄片,对样品进行浸泡处理,以去除表面及裂隙中杂质、减少干扰物质,提高测试精度。测试波数范围设定为 2000~4000 cm^{-1} ,采用非偏振光,束斑大小为 50 μm ×50 μm 。每完成一次样品扫描后均采集背景光谱并实时扣除,样品与背景扫描次数均为 256 次,光谱分辨率设置为 4 cm^{-1} 。为保证测试结果的准确度与精密性,在同一样品内部选取 10 个代表性区域进行测试,取平均值作为该样品的水含量表征值;同时使用高精度测高仪对每个样品薄片多点测量,选取 3 个不同位置测定厚度并取平均值,以此对红外吸收光谱进行厚度归一化处理,消除样品厚度差异带来的系统误差。通过多区域重复测试、多点厚度校正及背景实时扣除等质控措施,降低测试偏差,提升数据可靠性与方法稳定性,使不同样品间的水含量对比更具可比性,能够反映矿石内部水含量差异。

2.3 微量元素分析

脉石英样品的全岩微量元素含量测试在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成,采用电感耦合等离子体质谱仪测定。采用石英同心雾化器,雾化器压力为 193 kPa,波长连续覆盖且范围为 180~760 nm,曝光时间 10 s,仪器启动后至少稳定 30 min。

2.4 LA-ICP-MS 分析

本次脉石英样品微量杂质元素含量分析采用 fs-LA-ICP-MS 进行测试,实验在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室完成。由于脉石英中的包裹体通常为矿脉形成过程中被捕获的流体和固体物质,往往含有较高的杂质成分。为了避免包裹体对微量元素分析结果的影响,选点时避开矿物和流体包裹体的区域。采用的是 NWR femto 257 飞秒激光剥蚀器和 PE NexION 1000 电感耦合等离子体质谱仪。每测试 10 个样品点后测试标准样品(NIST610、NIST612、NIST614),每个分析点气体背景采集时间为 25 s,信号采集时间为 40 s。分析数据的处理使用 Iolite 软件完成。

2.5 石英加工提纯

本次脉石英矿石的加工提纯试验在咸阳非金属矿研究设计院有限公司完成。由于脉石英矿中杂质含量较低,原料采用“粗碎-焙烧水淬-制砂-筛分-光电选-磁选-酸洗”工艺流程。首先将原矿送入马弗炉,在 980 $^{\circ}\text{C}$ 条件下煅烧 2 h,水淬后的矿石依次粗碎和细碎。破碎产物经筛分分级,获得特定粒度区

间的矿砂。将分级后的矿样送入周期式脉动高梯度磁选机, 脱除磁铁矿等铁磁性杂质。通过药剂体系调控矿浆酸碱度与矿物表面性质, 实现石英与长石等非金属杂质矿物的高效分离。向浮选后的矿样中加入盐酸-氢氟酸复合酸体系与去离子水 (液固比 2:1), 在 80 °C 水浴条件下酸洗 2 h。酸洗完成后经过滤、洗涤、烘干处理, 得到石英精砂产品。

3 分析结果

3.1 透光率和水含量

本次研究共测试 41 件脉石英样品, 系统获取了各样品的透光率和水含量数据, 其中 22 件致密状脉石英透光率范围介于 12.73%~72.20% 之间, 均值为 40.03%, 标准差为 20.16%; 19 件砂糖状脉石英样品透光率范围为 36.74%~84.98%, 均值达 65.38%, 标准差为 11.20%。22 件致密状脉石英样品含水量范围为 75.34×10^{-6} ~ 403.79×10^{-6} , 均值为 188.44×10^{-6} , 标准差为 87.92×10^{-6} ; 19 件砂糖状脉石英样品含水量范围为 37.35×10^{-6} ~ 183.60×10^{-6} , 均值为 113.28×10^{-6} , 标准差为 39.99%。

3.2 全岩主量元素和微量元素

为明确脉石英的物质组成特征, 本次研究对 41 件脉石英样品, 重点分析其全岩主量和微量元素含量。其中 19 件致密状脉石英样品 SiO_2 范围为 93.33%~99.94%, 均值为 99.17%, 标准差为 1.42%; Al_2O_3 的含量范围为 0.01%~0.39%, 均值为 0.09%, 标准差为 0.09%; Fe_2O_3 的含量范围为 0.01%~0.16%, 均值为 0.04%, 标准差为 0.03%。19 件砂糖状脉石英 SiO_2 范围为 99.11%~99.90%, 均值为 99.65%, 标准差为 0.27%; Al_2O_3 的含量范围为 0.01%~0.23%, 均值为 0.07%, 标准差为 0.06%; Fe_2O_3 的含量范围为 0.01%~0.13%, 均值为 0.03%, 标准差为 0.03%。

22 件致密状脉石英样品微量元素总量主要介于 334.12×10^{-6} ~ 5767.89×10^{-6} 之间, 均值为 1655.50×10^{-6} , 其标准差为 1428.32×10^{-6} 。样品 B43 出现异常高值 $31\ 777.54 \times 10^{-6}$, 其对应 SiO_2 含量为 93.33%, 这可能是由于样品中含有过多的脉石矿物导致的; 19 个砂糖状脉石英样品微量元素总量介于 174.80×10^{-6} ~ 2975.32×10^{-6} 之间, 均值为 959.62×10^{-6} , 标准差为 750.34×10^{-6} 。

本次加工提纯脉石英样品共 11 件, 其中致密脉石英样品 2 件, 微量元素总量介于 17.12×10^{-6} ~ 52.76×10^{-6} 之间, 均值为 34.95×10^{-6} , 标准差为 17.82×10^{-6} ; 砂糖状脉石英样品 9 件, 微量元素总量在 17.16×10^{-6} ~ 71.64×10^{-6} 之间, 均值为 38.63×10^{-6} , 标准差为 20.36×10^{-6} 。12 样品中共 7 件样品杂质元素少于 50 $\mu\text{g/g}$, 为高纯石英样品。

3.3 石英原位微量元素

本次研究对 20 件脉石英样品开展原位微量元素测试分析。其中, 9 件致密状脉石英样品的原位微量元素总量介于 26.33×10^{-6} ~ 753.35×10^{-6} 之间, 均值为 148.14×10^{-6} , 标准差为 166.13×10^{-6} ; 11 件砂糖状脉石英样品的原位微量元素总量分布于 31.04×10^{-6} ~ 182.48×10^{-6} 之间, 均值为 87.02×10^{-6} , 标准差为 39.93×10^{-6} 。

4 讨论

4.1 脉石英型高纯石英杂质的赋存状态

当前高纯石英矿鉴别中, 需重点关注的特征杂质元素主要包括 Al、Ti、Li、Na、K、Ca、Mg、Fe、Mn、Cr、Ni、Cu、B 共 13 种杂质元素, 这些杂质元素在脉石英型高纯石英矿中的赋存形式多样,

主要以三类形式分布,一是作为脉石矿物的组成部分(含亚显微级矿物包裹体);二是赋存于流体包裹体中;三是通过类质同象替换作用进入石英晶格^[2,13-15]。鉴别这些脉石英高纯石英矿杂质元素赋存状态有利于后期石英提纯方法的设计^[5,16-18],原矿的杂质赋存状态是首先需要探讨的问题。图2展示本次脉石英样品全岩微量元素与原位微量元素的差异,根据该差异可将这些杂质元素分为两类,一类为Al、Na、K、Mg、Ca、Fe,其表现为全岩微量元素含量明显较高,含量差异较大,且高于石英原位微量元素,脉石英中这些晶格杂质分别占全岩杂质的8.65%、6.25%、0.49%、9.79%、51.95%、14.86%。另一类为Li、Ti、Mn、Cu,表现为全岩元素含量较低,且与原位微量相近的含量特征,该类元素中Li、Ti、Mn、Cu的晶格含量分别占全岩含量的83.44%、51.62%、32.63%、46.67%,两类杂质元素在脉石英矿中呈现显著不同的赋存状态。

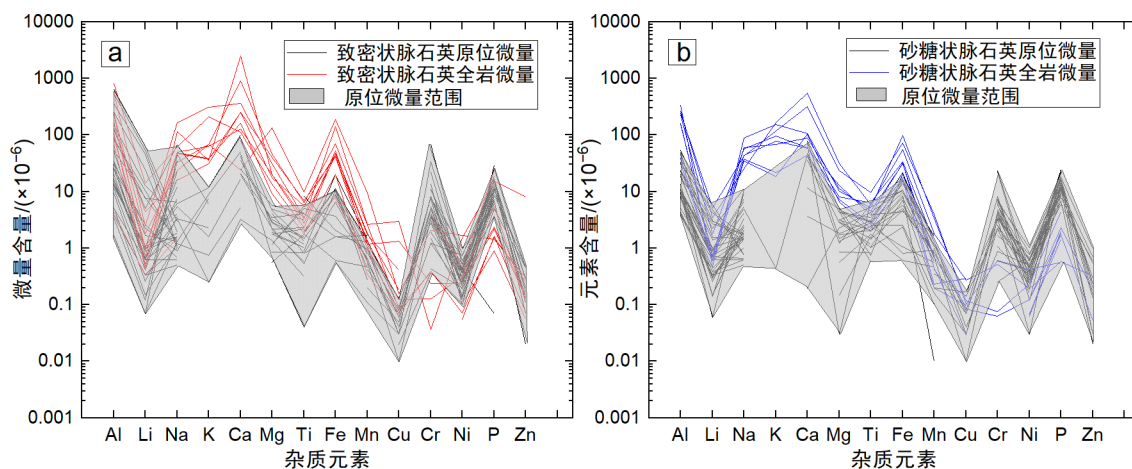


图2 脉石英全岩与原位杂质元素对比图

Fig. 2. Comparison charts for contents of impurity elements of the bulk quartz samples and those of the vein quartz samples analyzed by using the in-situ analytical methods

在激光选点时,已尽可能避免了包裹体和脉石矿物的影响。因此,石英原位微量元素代表石英内部晶格杂质的含量。脉石英中全岩Li、Cu、Ti、Mn杂质元素(1.51×10^{-6} 、 0.15×10^{-6} 、 5.48×10^{-6} 、 2.36×10^{-6})十分接近或者稍高于原位杂质元素含量(1.26×10^{-6} 、 0.07×10^{-6} 、 2.89×10^{-6} 、 0.77×10^{-6}),说明全岩中脉石矿物含Li矿物和金红石等金属矿物极少出现在脉石英样品中,对Li、Cu、Ti、Mn元素影响轻微或者极小。这与镜下几乎没有观察到相应矿物的鉴定结果保持一致。相反,脉石矿物对另外一类杂质元素影响较大。如图3所示,不同于Na、K元素缺乏协同性,石英中原位Al元素与Li元素存在高协同性,说明在石英晶体中Al的电荷补偿离子主要是Li离子。而全岩中K、Na、Mg、Fe、Ca、Al含量相较于原位较高,且Al元素与其他元素之间存在着较高协同性,王云月^[19]在脉石英颗粒中观察到了白云母、长石和方解石等矿物颗粒,这说明脉石英中微观包裹体白云母、长石和方解石是杂质元素Al、K、Na、Ca、Mg、Fe的重要来源。值得注意的是全岩中Ti和Fe元素有着明显的协同关系,说明脉石矿物钛铁矿对Ti和Fe有着一定的影响。

除了脉石矿物、晶格杂质外,流体包裹体也是杂质Na、K的重要来源^[9,20]。图4显示脉石英样品透光率与水含量的强负相关,这一特征成为衡量脉石英流体包裹体及内部杂质的优质指标,核心是水多富集于流体包裹体中且会削弱透光性。然而由图4可知,Na、K全岩含量与水含量并没有明显的协同关系,且在 $70 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ 水含量间表现出较大的波动范围,说明脉石英中流体包裹体中的Na、K元素含量受脉石矿物中的Na、K含量的影响,导致Na、K失去了与水含量的协同性。不同的是,在几乎不受脉石矿物的影响下,含水量与Li之间的有着明显的协变关系(如图4)。Troch等^[21]和Deng等^[22]

研究LCT型花岗伟晶岩时,发现岩浆中 H_2O 迁移规律类似于不相容元素,岩浆结晶末期挥发相(以 H_2O 为主)会指数级富集和迁移Li、水、 CO_2 等。由于部分熔融作用,在高级变质区内的变质热液也会融有大量硅质、Li等碱金属^[23],可以作为脉石英的成矿流体来源。因此,该Li元素和含水量之间的协变关系表明了脉石英流体包裹体对Li等杂质元素的影响。

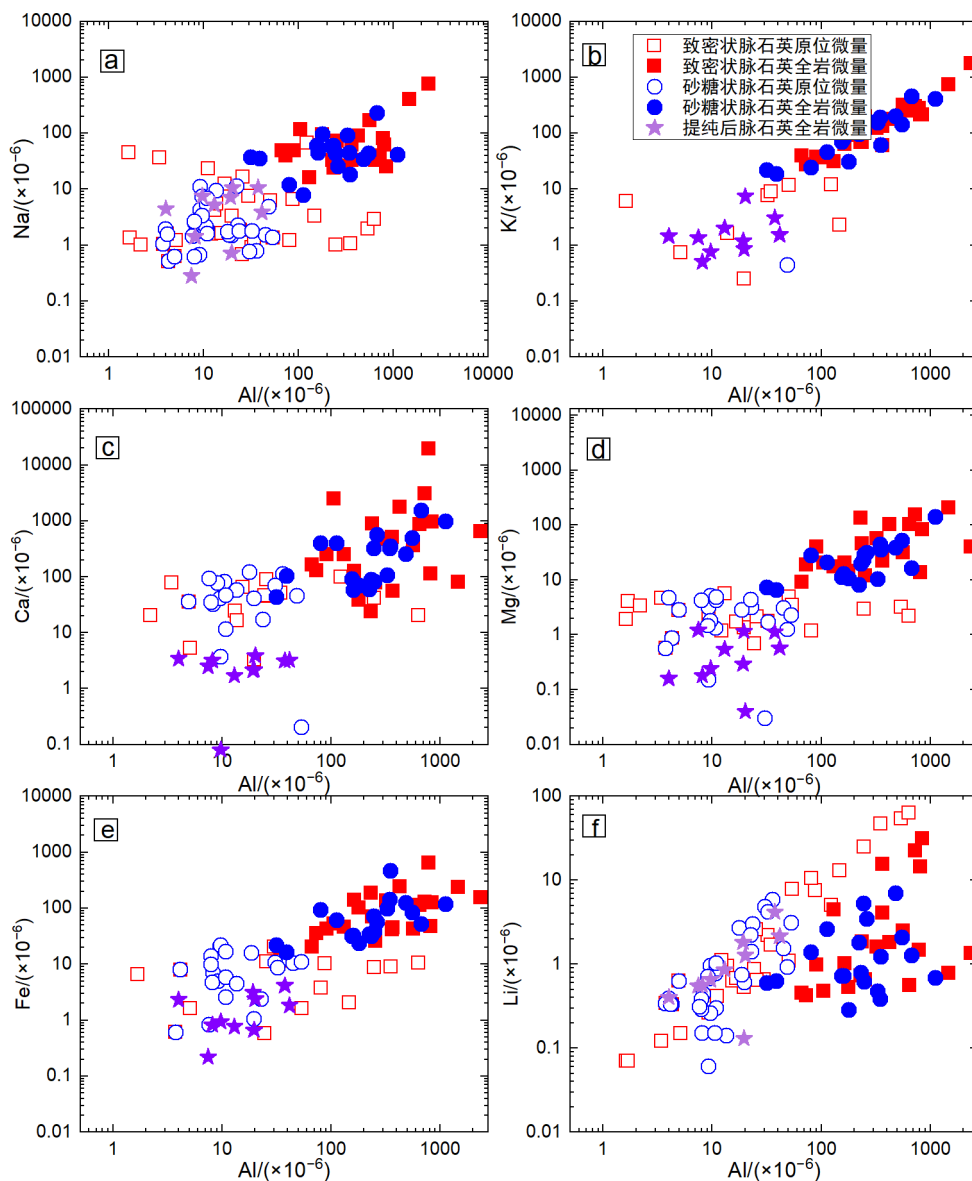


图3 石英提纯前后全岩及原位各杂质元素协变关系图

Fig. 3. Co-variation diagrams for contents of impurity elements of the bulk quartz samples and those of the vein quartz samples analyzed by using the in-situ analytical methods before and after purification

4.2 石英提纯过程对各杂质元素的影响

高纯石英的提纯效果直接决定其工业应用价值,目前针对高纯石英原矿已发展出多种成熟度不同的提纯技术。汪灵^[4]和李文成等^[24]分析研究了磁选、酸浸等多重高纯石英提纯的方法。本文采用“粗碎-焙烧水淬-制砂-筛分-光电选-磁选-酸洗”联合试验流程,并分析研究高纯石英提纯对杂质元素的影响。

两类杂质赋存状态的不同,石英提纯过程对其去除效果也有一定的差异。由图3和5可知,脉石英

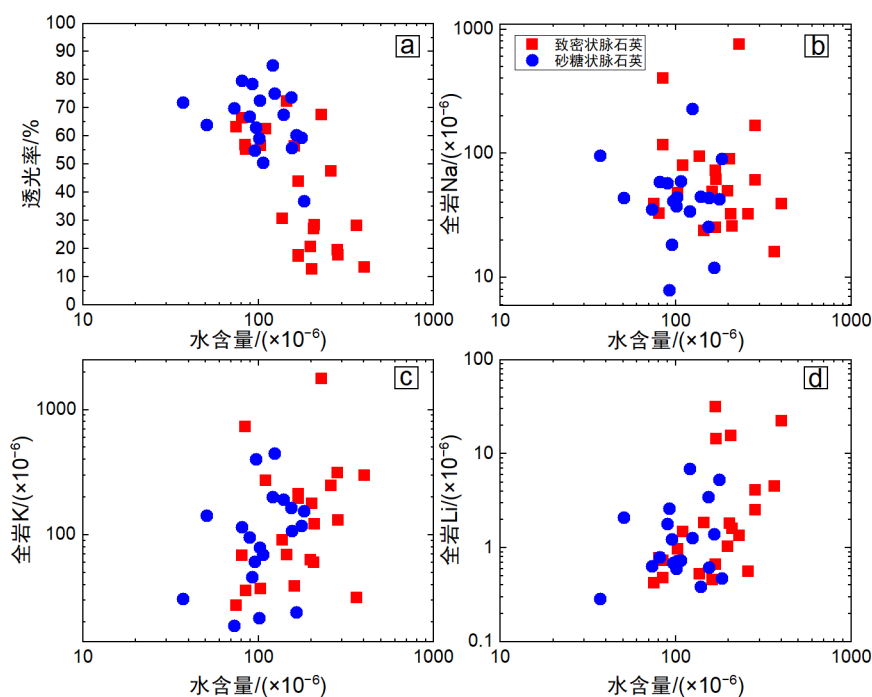


图4 脉石英水含量、透光率与杂质元素含量分析图解

Fig. 4. Graphs of water contents, transmittances and impurity elemental contents of the vein quartz samples

提纯后, 全岩中多数元素其协同性显著丧失, 且全岩杂质元素含量大幅下降。其中脉石英中受脉石矿物影响显著的 Na、K、Al、Ca、Fe、Mg 元素含量 (47.98×10^{-6} 、 89.84×10^{-6} 、 191.94×10^{-6} 、 98.99×10^{-6} 、 57.75×10^{-6} 、 26.34×10^{-6}) 经提纯后显著降低 (5.14×10^{-6} 、 2.01×10^{-6} 、 18.03×10^{-6} 、 2.54×10^{-6} 、 1.72×10^{-6} 、 0.55×10^{-6}), 杂质提纯率在 89%~98%。这一现象表明, 大量脉石矿物如白云母、长石和方解石等已被有效剔除, 其对脉石英全岩杂质元素含量的影响不再显著。不同的是, 脉石英中另外一类元素 Ti、Cu (5.48×10^{-6} 、 0.15×10^{-6}) 经提纯后含量变化有限 (3.04×10^{-6} 、 0.09×10^{-6})。这可能表明了对该类元素轻微影响的脉石矿物如钛铁矿等也得到了较弱的去除效果。

值得注意的是, 原位 K 元素分布极不均匀, 极大多数原位含量都低于检测限, 这与 Müller 等^[25]在石英 CL 成像中观察到的 K 元素不均匀分布的现象相似, 且经过提纯后的脉石英全岩 K 元素 (2.01×10^{-6}) 高于原位 K 元素含量 (0.44×10^{-6}), 这说明可能有亚微米级的白云母包裹体存在于石英矿物中, 且未能在提纯过程中剔除。这也解释了提纯后全岩 Al、Na 元素 (18.03×10^{-6} 、 5.14×10^{-6}) 含量明显高于原位 Al、Na 含量 (16.61×10^{-6} 、 3.00×10^{-6})。类似于白云母的亚微米级包裹体, 提纯后全岩 Ti 元素含量也高于原位 Ti 元素含量, 本文推测是由于有少量含钛铁矿等亚显微级含钛矿物包裹体存在于石英晶体中。

汪灵^[4]明确指出 Ca、Mg 和 Fe 等过渡金属元素受石英晶体的微裂纹, 以及由线缺陷或面缺陷等晶格缺陷内微观包裹体的影响。Ca、Mg (2.54×10^{-6} 、 0.55×10^{-6}) 以及过渡金属元素 Mn、Fe (0.08×10^{-6} 、 1.72×10^{-6}) 提纯后显著低于石英原位含量 (51.43×10^{-6} 、 2.58×10^{-6} 、 0.77×10^{-6} 、 8.58×10^{-6}), 尤其是 Ca 元素变化最大, 达到 95.06%, 这明显不同于提纯后具有较高全岩含量的 K、Na、Al 等元素。因此这类微观包裹体可能是粒度或者分布位置不同于上文白云母等微观包裹体, 石英提纯过程可以使她从晶界或者微裂纹中迁移出来。

除了亚显微级的矿物包裹体外, 我们也应该关注流体包裹体和其杂质元素在提纯后的变化。肖颖

等^[26]观察到提纯后脉石英型高纯石英砂中残留的流体包裹体主要是粒径较小、呈串珠状的次生液相包裹体, 粒径较大的原生包裹体尤其是气液两相包裹体, 已基本被去除。图5表示, 提纯后全岩Li元素(1.25×10^{-6})极为接近原位Li元素(1.26×10^{-6}), 上文讨论中流体包裹体中的Li元素也已经基本被去除, 也意味晶格以外的Li元素可能主要赋存在粒径较大的原生包裹体中。因此本次提纯对原生流体包裹体中Li元素有着较好的去除效果。

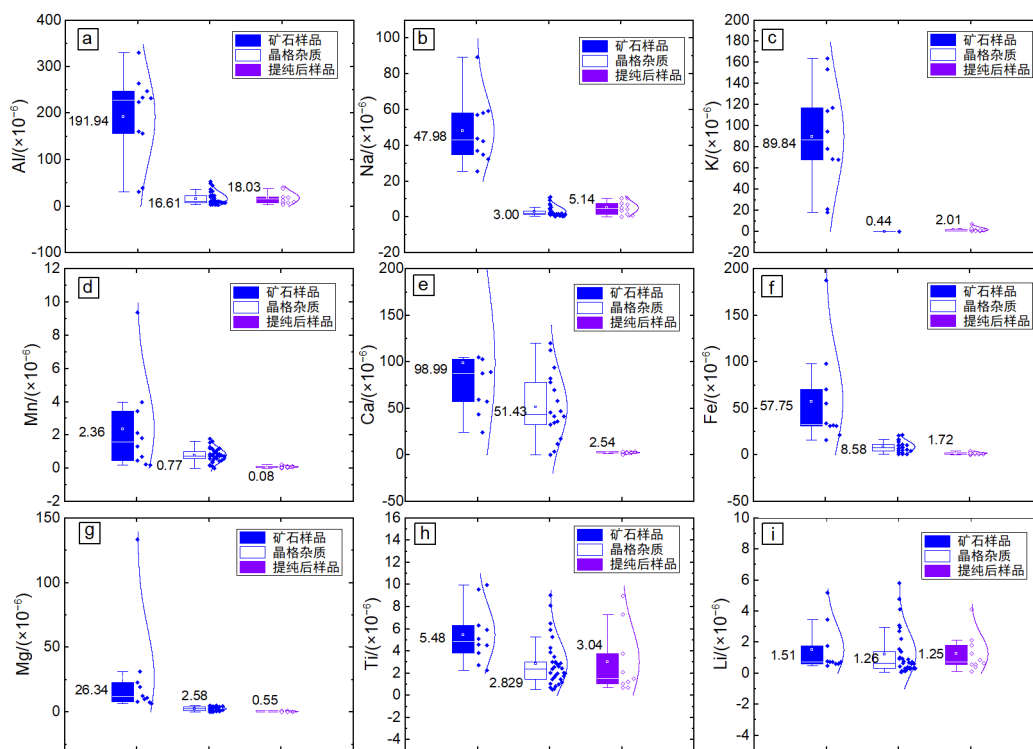


图5 脉石英提纯前后全岩杂质元素与原位杂质含量统计对比图

Fig. 5. Statistical comparison charts of impurity element contents of bulk vein quartz samples and those of the vein quartz samples analyzed by using the in-situ analytical methods before and after purification

4.3 高纯石英的表征

脉石英型高纯石英矿的快速识别技术是其地质调查、勘查与资源潜力评价的核心支撑。然而, 截至目前, 对该类矿床的判别仍多依赖野外地质观察的经验性判断, 缺乏统一、量化的识别标准; 精准判定其石英纯度与工业利用价值, 仍需依赖实验室提纯预处理及后续高精度测试分析, 该过程流程繁琐、耗时较长, 且测试成本较高, 难以满足野外勘查现场快速筛查、高效圈定靶区的实际需求。本文针对脉石英型高纯石英矿杂质可提纯性研究, 从粒度结构及透光率出发, 探讨其作为高纯石英矿快速识别指标的可能性。

经本次分析研究, 致密状脉石英与砂糖状脉石英矿石 SiO_2 含量及杂质元素之间有着明显差异。致密状脉石英样品 SiO_2 含量明显低于砂糖状脉石英 (均值分别为 99.17%、99.65%), 同时致密状脉石英原位杂质元素总量明显 (148.14×10^{-6}) 也高于砂糖状脉石英 (87.02×10^{-6})。而 Al 元素作为最难提纯的杂质元素之一, 致密状脉石英全岩和原位 Al 元素 (512.71×10^{-6} 、 80.12×10^{-6}) 含量较砂糖状脉石英 (308.21×10^{-6} 、 18.32×10^{-6}) 明显较高。致密状脉石英全岩 Na、K、Ca 含量较高且分散的特征 (如图 6), 表明更多的脉石矿物如白云母, 长石等出现在致密状脉石英中。值得注意的是致密状脉石英中拥有较砂糖状脉石英更高的原位 Al、Na、K、Ca, 可能意味着更多的微观包裹体出现在致密状脉石英

中,也可能是受到后期变质作用的影响。考虑到后期变质作用能有效协同影响石英内部Al、Li、Ti等晶格杂质^[3,27],致密状脉石英确实表现出较高的原位Al和Li元素和较低的Ti元素,但是两者之间的原位Al元素差异($>60\times 10^{-6}$)相较Li、Ti元素差异(6.44×10^{-6} 、 0.78×10^{-6})更大,因此本文推测致密状脉石英中原位Al元素可能受矿物微观包体的影响较大,这可能成为限制致密状脉石英后期提纯的重要影响因素。此外致密状和砂糖状脉石英原位Cu、Mn、Fe、Mg元素含量差异不明显。

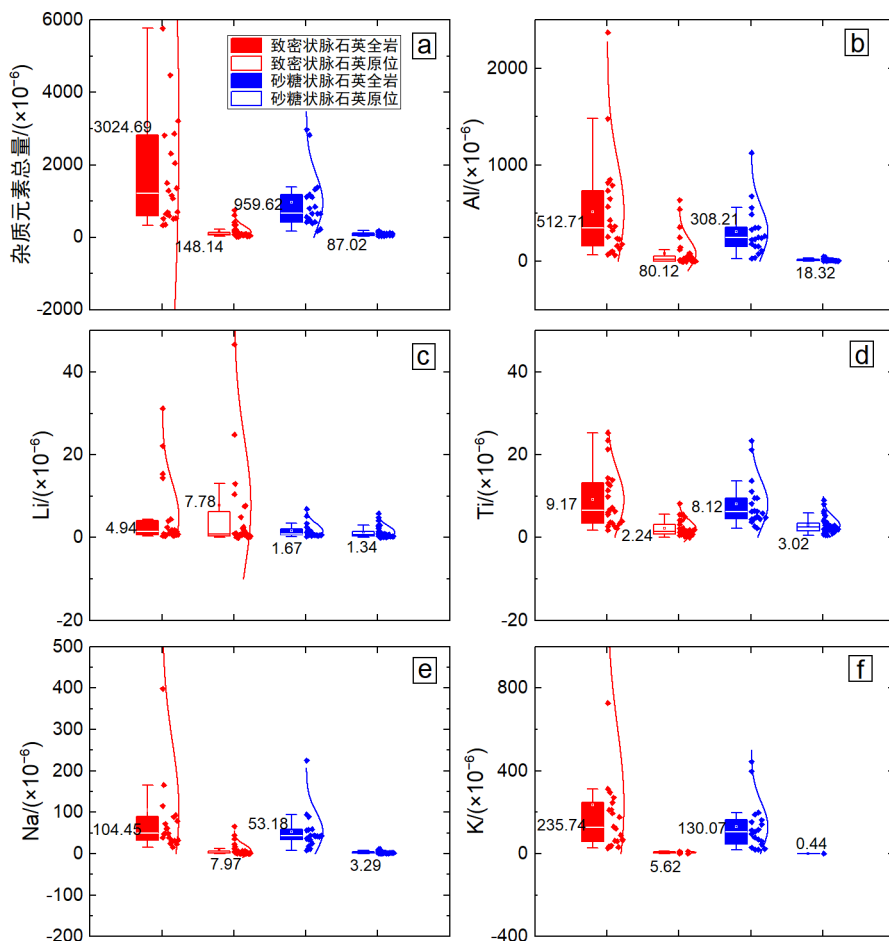


图6 不同结构脉石英全岩与原位杂质元素统计对比图

Fig. 6. Statistical comparison diagrams for contents of impurity elements of bulk samples and those of the in-situ analytical spots for the vein quartz samples with different structures

两者之间的透光率也有着明显的区别,致密状脉石英透光率范围介于12.73%~72.20% (均值为40.03%),砂糖状脉石英样品透光率范围为36.74%~84.98% (均值达65.38%),砂糖状脉石英的透光率明显高于致密状脉石英。砂糖状脉石英的水含量(113.28×10^{-6})也明显少于致密状脉石英(188.44×10^{-6}),这也表明了致密状脉石英作为高纯石英矿使用时将受到更多的羟基影响。鉴于不同粒度结构之间的脉石英存在这些明显的化学成分和物性差异,而且Al含量、水含量和矿物微观包裹体等差异将直接影响其作为高纯石英矿使用。因此,粒度结构应该可以作为高纯石英矿的评判指标之一。本文统计了提纯后纯度达到4N5 (99.995%)以上的脉石英颗粒度大小,如图7可见,其粒径分布范围为-3~6之间,其中80%粒径均分布在-1~3.5之间(约0.1~2 mm),据此推断,该粒径区间的脉石英更易通过提纯工艺获得高纯度产品。

周永恒^[28]指出石英中羟基的红外特征吸收谱带被水分子遮盖,即以红外光谱所测水含量基本反映

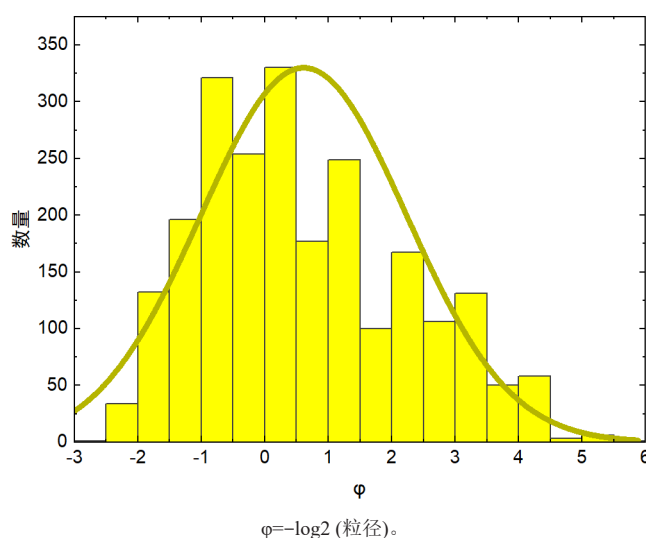


图7 脉石英型高纯石英颗粒大小统计直方图

Fig. 7. Histogram for statistics of the size distribution of quartz grains in the vein quartz-type high-purity quartz ores

的是石英晶体的流体包裹体和水分子纳米簇中水的含量。而相较于水分子纳米簇, 流体包裹体在石英晶体水含量上占有主导地位^[29]。王登红等^[18]指出石英透光程度应成为高纯石英的评判指标之一, 但至今未有相关定量评判指标被报道。如图4所示, 透光率、其水含量、Li元素之间具有明显的负相关, 说明透光率可以定量反馈脉石英内部水含量、流体包裹体及其中Li等杂质元素的含量。同时, 影响高纯石英工业用途的Li等相关杂质元素和羟基可以得到合理的快速评价。但由于缺乏高纯石英砂提纯后透光率的进一步检测以及提纯后不同赋存状态同种元素之间的相互影响, 还难以进一步分析评价。本次加工提纯的7件高纯石英样品中6件样品的透光率大于50%, 水含量基本低于 120×10^{-6} , 反映了内部较少来自流体包裹体的有害杂质含量。据此, 本文建议将透光率高于50%作为高纯石英的表征指标。其中B6表现为低透光率, 高水含量, 提纯后杂质含量低于 50×10^{-6} , 这可能和它较低的晶格杂质和较多的原生流体包裹体有关。该现象表明, 高纯石英矿的品质受控于多种因素, 其评价不应仅依据单一指标, 而应该是结合多项关键指标判断。

5 结论

1) 脉石英型高纯石英中杂质元素可划分为两类, 一类为Al、Na、K、Mg、Ca、Fe, 其全岩微量元素含量显著高于原位含量, 两者差异明显, 白云母、长石等脉石矿物是该类杂质的主要来源。另一类包括Li、Ti、Mn、Cu、Zn, 其全岩含量占比极低, 且与原位微量元素含量特征相近, 受脉石矿物的影响较小, 其中流体包裹体对Li元素含量存在一定影响。

2) 石英加工提纯试验可以剔除多数的脉石矿物, 但提纯后的石英砂中仍有亚显微级白云母和含钛矿物残留, 导致原位K、Na、Al、Ti元素在提纯后高于原位含量。控制石英中Ca、Mg以及Mn、Fe等过渡金属元素杂质的包裹体在石英提纯过程中可以有效剔除。石英提纯加工过程对流体包裹体中的Li元素有较好的去除作用。

3) 脉石英矿透光率与其粒径大小与可作为高纯石英矿制备潜力的关键评判指标。粒径处于-1~3.5区间(对应实际粒径0.1~2 mm)且透光率大于50%的脉石英, 经提纯后更易达到高纯石英品质要求。

致谢: 感谢两位匿名审稿人对本文提出的宝贵修改意见; 感谢合肥工业大学资环学院邓宇峰老师和肖颖同学在研究思

路和实验测试方面提供的帮助。

参考文献:

- [1] 郝文俊, 詹建华, 张徐, 等. 安徽脉石英矿地质特征及成矿规律探讨[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2024(2): 1-5.
- [2] 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(5): 55-63.
- [3] 吴福元, 刘小驰, 王佳敏, 等. 高分异花岗岩与高纯石英[J]. 岩石学报, 2025, 41(10): 3243-3277.
- [4] 汪灵. 石英提纯定律研究[J]. 岩石学报, 2025, 41(10): 3302-3320.
- [5] Ma Y M, Li J G, Wu Z C, et al. Characteristics of high-purity quartz raw materials for crucibles and exploration of key purification technologies[J]. Minerals Engineering, 2025, 231: 109446.
- [6] Xie Y T, Xia M, Yang X Y, et al. Research on 4N8 high-purity quartz purification technology prepared using vein quartz from Pakistan[J]. Minerals, 2024, 14(10): 1049.
- [7] 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.
- [8] 詹建华, 王依, 陈正国, 等. 我国脉石英资源现状分析[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2020(5): 1-4.
- [9] Götze J, Pan Y M, Müller A, et al. Trace element compositions and defect structures of high-purity quartz from the southern Ural Region, Russia[J]. Minerals, 2017, 7(10): 189.
- [10] Müller A, Wanvik J E, Ihlen P M. Petrological and chemical characterisation of high-purity quartz deposits with examples from Norway[M]//Götze J, Möckel R. Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 71-118.
- [11] Khan I, Yang X Y, Xia M, et al. Analyzing petrographic characteristics and trace element distribution of high-purity quartz deposits from the Peshawar Basin, Pakistan: Insights into processing and purification techniques[J]. European Journal of Mineralogy, 2025, 37(2): 151-167.
- [12] 王波, 郝文俊, 詹建华, 等. 中国脉石英成矿特征及成矿区带划分[J]. 岩石矿物学杂志, 2025, 44(2): 415-437.
- [13] 胡欢, 王汝成, 谢磊, 等. 美国 Spruce Pine 白岗岩长石和云母矿物学特征研究: 对高纯石英原料矿的指示意义[J]. 岩石学报, 2025, 41(10): 3453-3468.
- [14] 夏梅, 杨晓勇, 邱月, 等. 印度西北部 Aravalli-Delhi 造山带伟晶岩高纯石英原料矿石矿物学特征及提纯实验研究[J]. 岩石学报, 2025, 41(10): 3415-3431.
- [15] Wang, H, Wang, F, Zhao, Y, et al. Application of Quartz LA-ICP-MS Analysis in the Evaluation of High-Purity Quartz Deposits[J]. Minerals, 2025, 15(4), 400-411.
- [16] 杨晓勇, 孙超, 曹荆亚, 等. 高纯石英的研究进展及发展趋势[J]. 地学前缘, 2022, 29(1): 231-244.
- [17] 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.
- [18] 王登红, 王岩, 陈郑辉, 等. 试论高纯石英原料矿的找矿方向[J]. 地球学报, 2025, 46(1): 8-14.
- [19] 王云月. 皖南地区璜茅矿床高纯石英原料质量评价方法研究[M]. 合肥工业大学, 2022.
- [20] 徐莉. 中国大陆科学钻探(CCSDB)HP-UHP 变质岩中石英脉的地质地球化学及成因[D]. 广州: 中山大学, 2006.
- [21] Troch J, Huber C, Bachmann O. The physical and chemical evolution of magmatic fluids in near-solidus silicic magma reservoirs: Implications for the formation of pegmatites[J]. American Mineralogist, 2022, 107(2): 190-205.
- [22] Deng G, Jiang D, Li G, et al. Barium isotope evidence for a magmatic fluid-dominated petrogenesis of LCT-type pegmatites[J]. Geochemical Perspectives Letters, 2024, 31: 14-20.
- [23] 翟裕生, 姚书振, 蔡克勤. 矿床学[M]. 3 版. 北京: 地质出版社, 2011.
- [24] 李文成, 马志军, 郑云生, 等. 石英杂质元素及提纯技术的研究进展[J]. 现代化工, 2025(8): 74-78.
- [25] Müller A, Lennox P, Trzebski R. Cathodoluminescence and micro-structural evidence for crystallisation and deformation processes of granites in the Eastern Lachlan Fold Belt (SE Australia)[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 143(4): 510-524.
- [26] 肖颖, 邓宇峰, 马进海, 等. 大别山地区典型脉石英矿床质量评价方法[J/OL]. 地质学报, 1-16[2026-04-23]. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024484>.
- [27] 周浩阳. 高纯石英的矿床概念、矿床类型与资源评价[J]. 岩石学报, 2025, 41(10): 3289-3301.
- [28] 周永恒. 石英玻璃及原料中羟基的研究[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究院, 2002.
- [29] Kronenberg A K. hydrogen speciation and chemical weaken of quartz[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 1994, 29: 123-176.