

鄂东南付家山脉石英矿杂质特征及其用作高纯石英原料的潜力

谢泽丰^{1,2}, 王九一², 彭琰聪^{2,3}, 胡宇飞²

(1. 长江大学 地球物理与石油资源学院, 湖北 武汉 430100; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3. 长江大学 资源与环境学院, 湖北 武汉 430100)

摘要: 作为战略性矿产资源之一, 高纯石英已广泛应用于集成电路、半导体芯片、太阳能等高新技术产业中, 但是能够生产高纯石英的原料矿床极为稀缺, 我国尤为紧缺高纯石英原料矿。鄂东南地区是湖北省脉石英矿床的主要分布区。本文针对鄂东南付家山脉石英矿床, 通过光学显微镜、扫描电子显微镜观察了脉石英的脉石矿物类型和包裹体特征, 采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)对原矿进行了微量元素分析, 旨在获得付家山脉石英矿床的杂质元素特征, 进而评价矿床用作高纯石英原料的潜力。结果表明, 付家山脉石英矿石 SiO_2 含量大于 99.95%, 杂质元素主要为 Al、K、Fe、Ti、Ca 等, 脉石矿物主要有白云母、钾长石、铁氧化物等, 流体包裹体较为发育。杂质元素分析结果表明, 付家山脉石英原矿质量达到低端高纯石英标准, 经传统工艺提纯后, 可能具有生产中高端高纯石英的潜力。

关键词: 高纯石英; 付家山; 脉石英; 元素分析; ICP-OES

中图分类号: P619.23+3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)06-1159-10

Impurity characteristics of Fujiashan vein quartz deposit in southeastern Hubei Province and its potential as raw material for high-purity quartz

XIE Ze-feng^{1,2}, WANG Jiu-yi², PENG Yan-cong^{2,3} and HU Yu-fei²

(1. College of Geophysics and Petroleum Resources, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China)

Abstract: As one of the strategic mineral material, high-purity quartz has been widely used in integrated circuits, semiconductor chips, solar energy and other high-tech industries. However, raw material deposits that can be used to produce high-purity quartz are extremely scarce, especially in China. Southeastern Hubei is the main distribution area of vein quartz deposits in Hubei Province. In this paper, the gangue mineral types and inclusion characteristics of vein quartz from the Fujiashan quartz deposit in southeastern Hubei are observed by optical microscope and scanning electron microscope. The trace element concentrations of the raw quartz material are analyzed by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-OES) to obtain the impurity element characteristics of Fujiashan quartz deposit and evaluate the potential of the deposit as a raw material for high-purity quartz. The results show that the average content of SiO_2 of the raw quartz is more than 99.95%, and the impurity elements (Al, K, Fe, Ti, Ca, etc.) mainly occur in gangue minerals such as muscovite, potassium feldspar and iron oxide, lattice-bound form

收稿日期: 2022-03-18; 接受日期: 2022-08-24; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(KK2110, KK2005)

作者简介: 谢泽丰(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事高纯石英原料矿产研究, E-mail: xiezefeng2022@163.com; 通讯作者: 王九一(1983-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事非金属矿床成矿规律研究, E-mail: wjyhlx@163.com。

and fluid inclusions. The results show that the quality of Fujiashan quartz raw ore reaches the standard of low-end high-purity quartz, and it may have the potential to produce middle-to-high end high-purity quartz after traditional purification.

Key words: high-purity quartz; Fujiashan; quartz vein; elemental analysis; ICP-OES

Fund support: CAGS Research Fund (KK2110, KK2005)

高纯石英具有耐高温、耐腐蚀、低热膨胀性、高度绝缘性和透光性等优异的物理化学性质,广泛应用于半导体、电子信息、光伏新能源等高新技术产业(Harben, 2002; Schlantz, 2009; Haus *et al.*, 2012; 陈军元等, 2021)。随着战略性新兴产业在我国的发展,高纯石英在其中的重要地位和作用是其他材料无法替代的(马超等, 2019; 颜玲亚等, 2020)。

天然石英矿石在结晶和变质过程中会掺杂 Al、Ti、Fe、B、P、Ge、K、Na、Ca、Mg 等杂质元素,这些杂质元素赋存于脉石矿物、包裹体和晶格中(Götze, 2009; 张德贤等, 2011; Müller *et al.*, 2012; 王九一, 2021; 杨晓勇等, 2022)。目前,高纯石英制备方法主要有粉磨加工天然水晶、深度提纯石英矿物和用含硅化合物化学合成。天然水晶资源有限且因大量开采而逐渐枯竭,化学合成高纯石英只适合少量制备且价格昂贵而难以大规模工业化应用,因此深度加工脉石英、花岗伟晶岩、石英岩和石英砂岩中的石英矿物是当前及未来替代水晶生产高纯石英的主要方法,尤其脉石英具有成分单一、SiO₂ 含量高、杂质含量低的特点,相对于石英岩、石英砂岩等石英矿产资源是高纯石英制备的理想原料之一(Nesbitt and Young, 1984; 汪灵等, 2011; 林敏, 2018; 郭文达等, 2019; 焦丽香, 2019; 郝文俊等, 2020; 李爱民等, 2021)。

不同产业对石英的质量要求不一致,因此没有统一的高纯石英质量标准。对高纯石英质量的评价,国内外学者提出了不同的普适性评价质量标准。Harben(2002)的研究认为,高纯石英中 SiO₂ 的含量应高于 99.995%,即总的杂质含量低于 50×10^{-6} ;挪威地质调查局综合该国高纯石英的测试数据,提出了更详细的评价标准,即要求在杂质总含量低于 50×10^{-6} 的前提下,Al 含量要低于 30×10^{-6} ,Ti 含量低于 10×10^{-6} ,Na 和 K 含量均低于 8×10^{-6} ,Li、Ca 含量均低于 5×10^{-6} ,Fe 含量低于 3×10^{-6} ,P 含量低于 2×10^{-6} ,B 含量低于 1×10^{-6} (Müller *et al.*, 2012);汪灵等(2014)根据 SiO₂ 含量将高纯石英划分为 3 个等级,分别是低端高纯石英($99.93\% \leq$

SiO₂ $\leq 99.99\%$)、中端高纯石英($99.99\% \leq$ SiO₂ $\leq 99.998\%$)和高端高纯石英($99.998\% \leq$ SiO₂);Flook 在 2014 年根据石英的不同市场需求提出的质量指标认为石英中 SiO₂ 含量高于 99.95%、总杂质含量低于 500×10^{-6} 即为高纯石英,半导体填料、光纤和液晶屏生产行业要求石英中 SiO₂ 含量在 99.5%~99.8% 即可,透明玻璃行业可使用石英中 SiO₂ 含量小于 99.5% 的石英(Vatalis *et al.*, 2015);近年新兴的新型玻璃行业降低了 SiO₂ 纯度要求,如光伏玻璃、超白浮法玻璃和 Low-E 玻璃等(汪灵, 2019)。综合这些评价体系,结合我国高纯石英原料的市场应用情况,本文仍以 SiO₂ 含量高于 99.9% 的石英视为高纯石英的最低质量标准。

严格而言,高纯石英不是一种矿产资源,而是一种经硅石矿物作为原料经提纯加工后的一种产品,因此,将满足提纯生产高纯石英的矿床称为高纯石英原料矿更为合适(王九一, 2021)。目前仅部分学者概略了解高纯石英原料矿的矿石性质,高纯石英原料的研究工作总体较少,一般可以根据杂质赋存状态的去除难度作为判断其质量的依据。色选、擦洗、重选、磁选和浮选等技术是目前最有效的从石英中分选出共生独立矿物的方法,尤其浮选对于长石、云母等不溶酸脉石矿物比较有效。对于不同类型的包裹体可使用不同的方法,对有效暴露的固相包裹体可使用混合酸溶解,而对流体包裹体使用高温爆裂使内部杂质得以释放,再辅以酸洗去除。晶格杂质含量极低但除去难度大,一般使用氯化焙烧方法去除,而且不能完全去除,因而成为制约高纯石英质量的最关键性因素(钟乐乐, 2015; 马超等, 2019)。总之,能达到高纯石英原料矿的矿石要求有脉石矿物易于分选、流体包裹体含量极少或无流体包裹体、晶格杂质低等。

鄂东南通山县付家山脉石英矿床矿石资源储量查明 484.3 万吨(王翔等, 2020),属中型规模矿床,矿石质量好,成分单一,有害杂质含量较低(周贤荣等, 2011)。目前,付家山脉石英矿床的杂质特征及其是否具有用作高纯石英原料的潜力尚未得知。本

文从矿产地质视角出发,通过扫描电子显微镜和光学显微镜镜下观察脉石英的脉石矿物类型、包裹体特征,利用 ICP-OES 对该矿床脉石英进行元素分析,以获得矿石的杂质元素赋存状态、 SiO_2 含量以及各种杂质元素含量,初步对矿石质量进行评价,这为该矿床提纯实验及周边地区脉石英矿的找矿具有

一定的指示意义。

1 矿床地质特征

付家山脉石英矿位于湖北省咸宁市通山县南东约 28 km (图 1),大地构造位置属于下扬子陆块江南

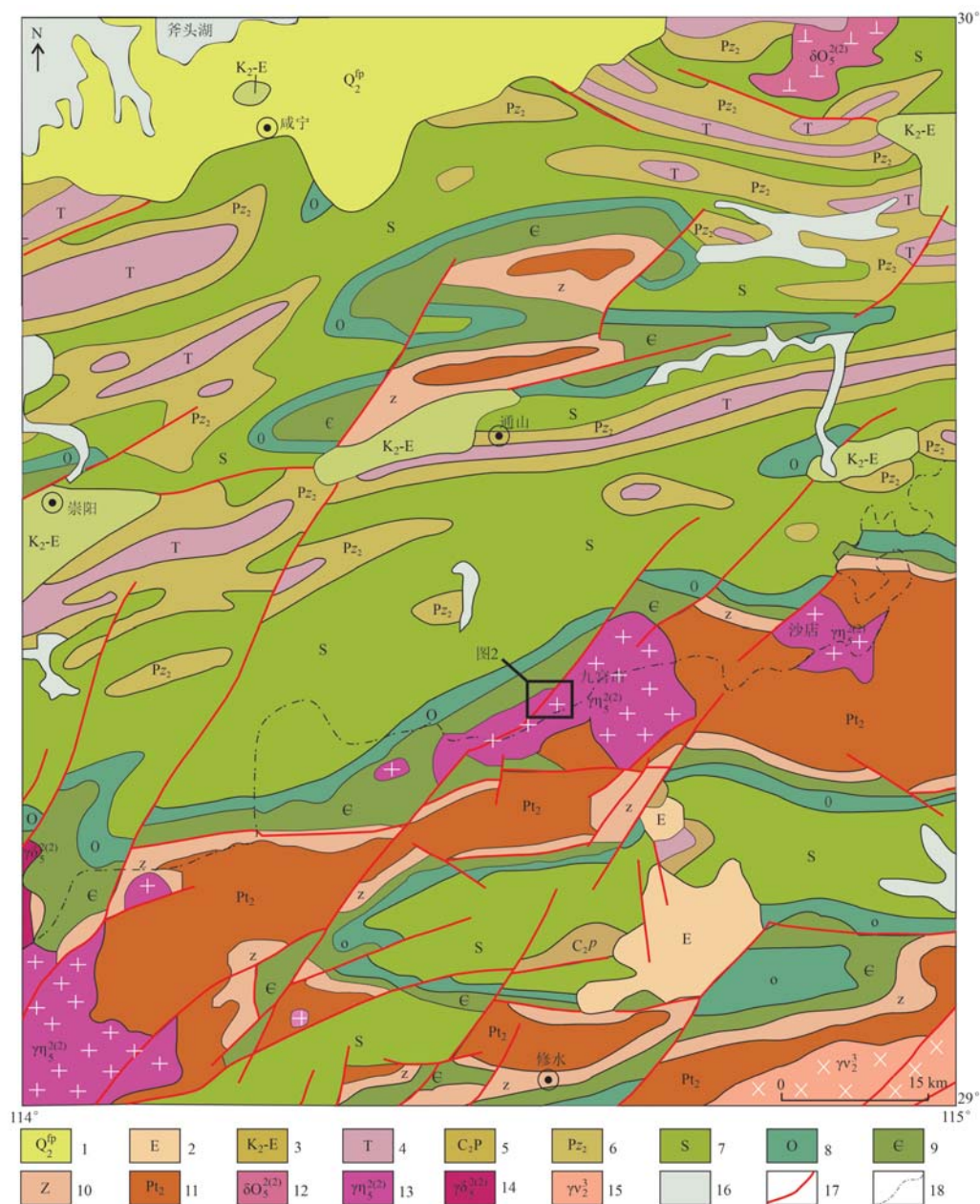


图 1 鄂东南九宫山地区地质简图(据江西省地质矿产局, 1984; 湖北省地质矿产局, 1990)

Fig. 1 Geological sketch map of Jiugongshan area in southeastern Hubei(modified after Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources, 1984; Hubei Bureau of Geology and Mineral Resources, 1990)

- 1—第四系; 2—古近系; 3—上白垩统与古近系并层; 4—三叠系; 5—上石炭统与二叠系并层; 6—上古生界并层; 7—志留系; 8—奥陶系; 9—寒武系; 10—震旦系; 11—中元古界; 12—石英闪长岩; 13—二长花岗岩; 14—花岗闪长岩; 15—富斜花岗岩; 16—湖泊; 17—断层; 18—省界
- 1—Quaternary; 2—Paleogene; 3—Upper Cretaceous and Paleogene; 4—Triassic; 5—Upper Carboniferous and Permian; 6—Upper Paleozoic; 7—Silurian; 8—Ordovician; 9—Cambrian; 10—Sinian; 11—Mesoproterozoic; 12—quartz diorite; 13—monzogranite; 14—granodiorite; 15—plagiogranite; 16—lake; 17—fault; 18—provincial boundaries

古弧盆系南段,地处扬子板块和华夏板块的交界处。区内出露地层主要有中元古界冷家溪群、震旦系、寒武系、奥陶系、志留系及三叠系(图1),花岗岩发育,活动期次频繁。区内断裂发育,主要是北东向、近东西向和北西向的断裂构造,以北东向断裂为主(王孝磊等,2017;王艳等,2018;王翔等,2020)。

区域内岩浆岩有早新元古代形成的九宫山岩体、燕山晚期形成的小九宫和沙店三大岩体,属于中酸性岩类,为该区域内的脉石英和脉岩成矿提供

物质来源(王艳等,2018,2020)。九宫山岩体岩性以片麻状中粒含斑黑云二长花岗岩为主,其次与冷家溪群交界边缘部分为片麻状细粒含斑黑云母二长花岗岩,局部见片麻状中粗粒少斑黑云母二长花岗岩(周贤荣等,2011)。

付家山矿区位于九宫山岩体西部中黄鹤尖-田铺断层的南西段,面积约20 km²,出露地层主要有中元古界冷家溪群(Pt₂)、寒武系(ε)及第四系(Q)(图2)。

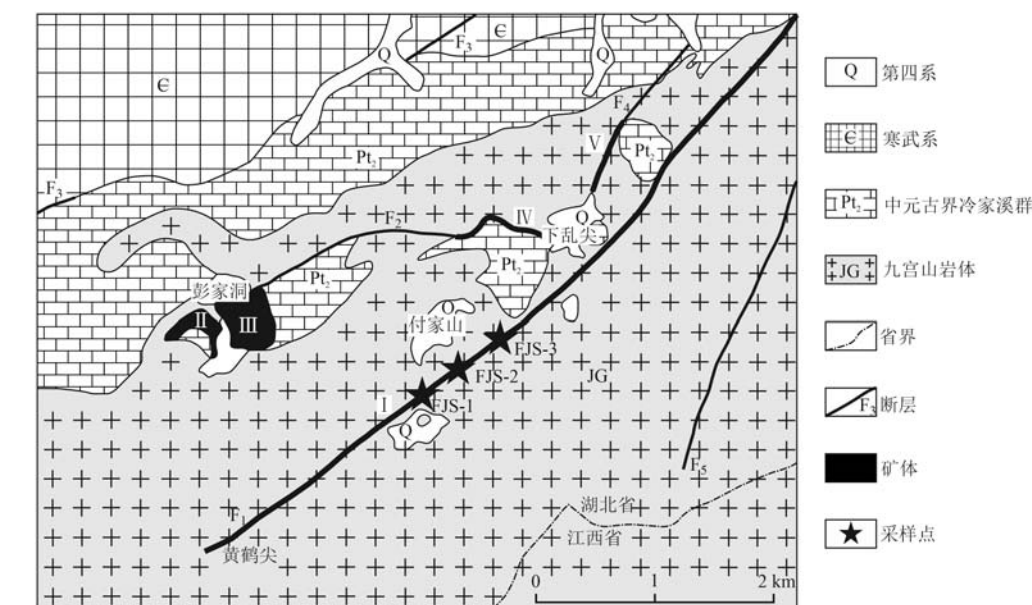


图2 鄂东南付家山矿区地质简图和采样点位置[据周贤荣等(2011)修改]

Fig. 2 Geological sketch map and sampling location of Fujiaoshan quartz deposit from southeastern Hubei (modified after Zhou Xianrong et al., 2011)

区内主要发育断裂构造,褶皱构造不明显。断裂构造主要为北东向断裂,包括黄鹤尖-高湖断层(F₁)、彭家洞断层(F₂)、下乱尖断层(F₄)以及F₅断层、北东东向的西圩岭-高湖断层(F₃)(图2)。其中,黄鹤尖-高湖断层位于区域张性断裂黄鹤尖-田铺的西南端,北东走向,倾向北西,倾角69°~82°,矿区内长度约6 km,宽3~10 m,被后期结晶分异的脉石英充填,与两侧岩体均有伴硅化蚀变现象,两侧围岩中裂隙亦伴有网状石英细脉产出,该断裂控制着付家山矿体的形成及分布(周贤荣等,2011)。

矿区内共圈定5条脉石英矿体,分别是付家山矿体(I)、彭家洞西矿体(II)、彭家洞东矿体(III)、下乱尖西矿体(IV)和下乱尖北矿体(V)。其中,付家山矿体(I)规模最大(图2)。另外,区内矿床的分布、延伸和产状与矿区区域构造线分布、方向基本

相同,主要为中酸性岩浆热液沿岩体的断裂、裂隙结晶分异充填而形成,所以区内断裂构造和裂隙既是控矿构造又是容矿构造。

付家山矿体(I)总体沿黄鹤尖-高湖断层分布,具有相似的产状,呈脉状产出,走向南西-北东,倾向北西,倾角68°~82°,南西起于黄鹤尖,北东止于高湖,矿体长度约4 930 m,平均宽厚8.00 m,最宽可达18 m(图3a)。

2 采样和实验

2.1 样品采集

脉石英矿床不同部位的石英样品质量存在差异,评价矿床是否具有用作高纯石英原料的潜力,需要采集质量最优且最有代表性的石英样品。如果



图3 付家山脉石英矿床野外特征

Fig. 3 Outcrops of Fujiashan vein quartz deposit

矿床质量最优的样品质量达到高纯石英质量要求,则代表该矿床具有用作高纯石英原料的潜力。因此,本次研究尽可能避免污染,在付家山矿体中部、远离围岩及硅化带的部位采集了具有代表性的脉石英矿石,以确保矿石代表矿床的最优质量。沿脉石英矿体延伸走向,在不同地点共采集3件样品,编号分别为FJS-1、FJS-2和FJS-3(图2)。采集的脉石英块样外观特征明显,多呈白色或乳白色半透明状,颗粒状,具有较强的玻璃光泽(图3b)。

2.2 实验方法

(1) 显微镜观察

将采集的样品分别磨制光薄片,使用Leica DM 4500P偏光显微镜观察石英晶体大小、脉石矿物类型、包裹体类型及分布特征。圈出光学显微镜不易判定的脉石矿物,以备扫描电镜进一步确定矿物种类。将薄片喷涂碳膜后,用加装Oxford能谱仪的FEI Versa 3D双束电镜观察脉石英晶体形貌,并鉴定脉石矿物种类。

(2) 杂质元素测试

使用玛瑙研磨机将脉石英样品研磨粉碎,并用尼龙筛筛分出40~80目和80~120目的石英砂,分别称取0.3 g置于消解罐中,加入经酸纯化器处理后的4 mL HF和1 mL HNO₃(纯化酸杂质含量 $<1 \times 10^{-9}$)(汪灵等,2013),然后在CEM Mars 6微波消解仪中进行消解。消解完成后,将消解罐置于电热板上,加去离子水赶酸,定容备测。

采用由德国斯派克公司(SPECTRO ARCOS SOP)生产的电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测试样品中的杂质元素,仪器的等离子体功率1 400 W,冷却气体流量14 L/min,辅助气体流量和

雾化器流量0.8 L/min,泵转速30 r/min,冲洗时间35 s。

3 分析结果与讨论

3.1 脉石矿物和包裹体特征

光学显微镜和扫描电子显微镜观察分析发现,付家山脉石英矿石的主要矿物为石英、钾长石、白云母,并含有各类流体包裹体(图4、图5)。在单偏光显微镜下,白云母主要呈片状或板状,正交偏光镜下具有鲜艳的二至三级干涉色等,与石英的一级黄白干涉色区别明显。此外,前人研究还发现付家山脉石英矿石中包含少量的玉髓、长石、黄铁矿、褐铁矿、绢云母、绿泥石等脉石矿物(周贤荣等,2011)。

脉石英中的包裹体可分为原生包裹体和次生包裹体,前者为被石英捕获于石英晶体生长时形成,后者为后期流体沿石英微裂隙渗透、石英晶体愈合时形成(卢焕章等,2004;杨晓勇等,2022)。付家山脉石英晶体中存在大量孤立或成群云雾状分布的原生流体包裹体(图4c、4d),同时也发现沿脉石英微裂隙发育的次生流体包裹体(图4b、4c)。包裹体主要为单一液相流体包裹体和少量气液两相包裹体,大小一般小于5 μm ,具有体积小、数量多、广泛分布等特征。

SEM镜下观察和分析发现,付家山脉石英中含有大量的钾长石。钾长石晶体较大,0.1~3 mm,呈孤立、连片或侵染状嵌于石英晶体间(图5)。

3.2 杂质元素特征

付家山脉石英中杂质元素的ICP-OES测试结果列于表1。

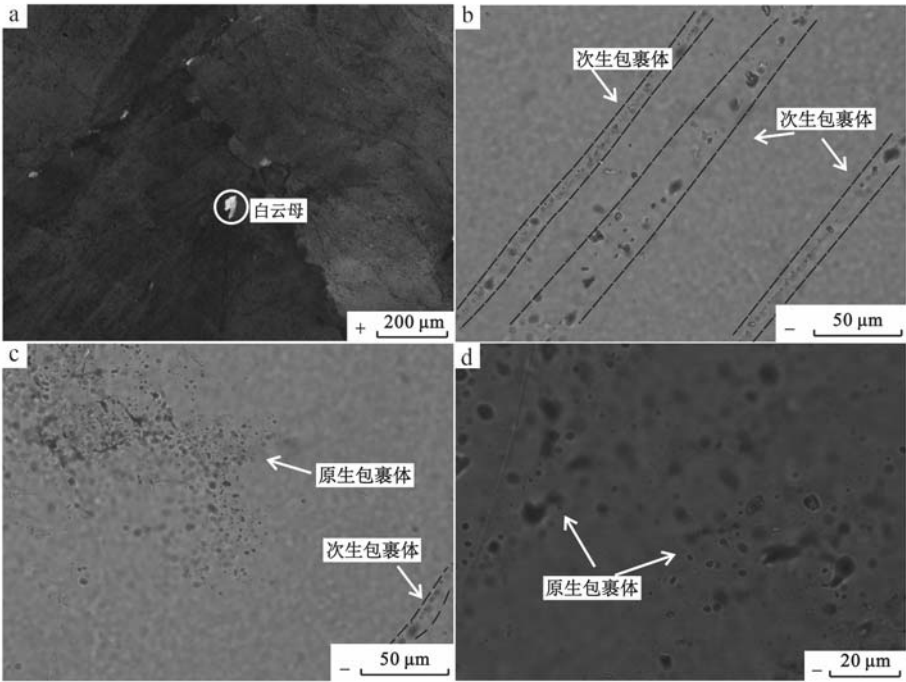


图 4 付家山脉石英矿石流体包裹体与脉石矿物特征

Fig. 4 Characteristics of fluid inclusions and gangue minerals in Fujiashan vein quartz

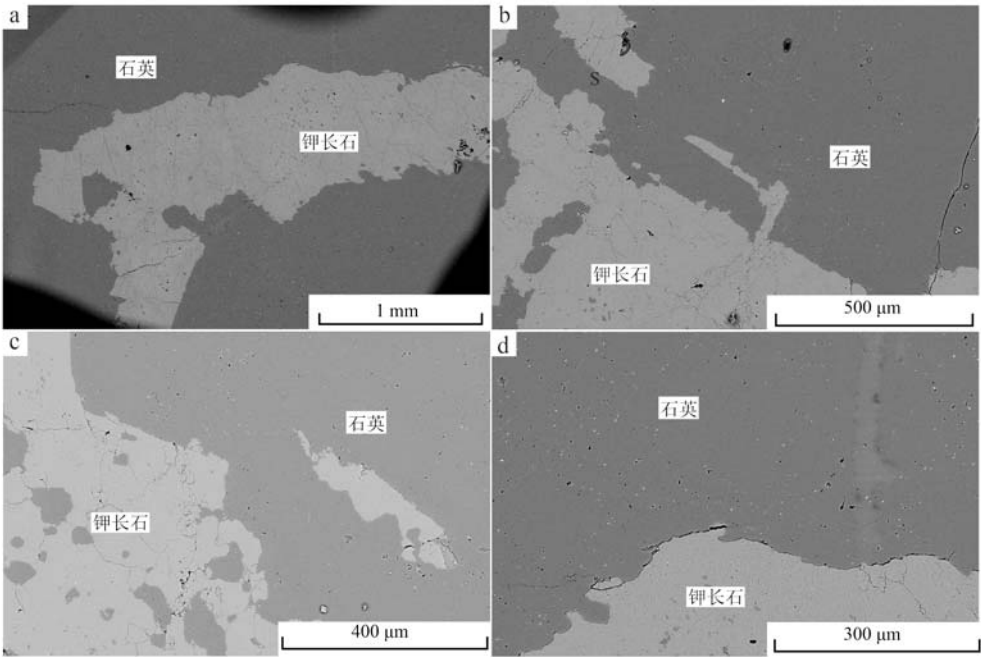


图 5 付家山脉石英矿石 SEM 背散射图

Fig. 5 SEM BSE image of Fujiashan vein quartz

通过分析结果可知(表 1), 付家山脉石英中 Al、K、Fe、Ca、Li、Ti 和 Mg 等主要杂质元素含量较高, P、B、Na、Zn、Ba、Mn、Cr、Cu、Ni、Na、Co 等杂质元素含量较低, SiO₂ 含量变化于 99.937 3%~99.962 1%之

间,平均 99.948 4%。根据高纯石英的划分标准(汪灵等, 2014; Vatalis *et al.*, 2015), 付家山脉石英原矿达到了低端高纯石英的质量要求。

付家山脉石英杂质元素总含量为 $379.22 \times 10^{-6} \sim$

表1 付家山脉石英矿石杂质元素含量

 $w_B/10^{-6}$

Table 1 Trace elemental concentrations of impurities in Fujiashan vein quartz

样品号	Al	K	Fe	Ca	Li	Ti	Mg	P	B	Zn	Ba	Mn	Cr	Cu	Ni	Na	Co	Σ	SiO ₂ (%)
FJS-1A	324.13	109.75	11.49	7.81	11.99	9.25	4.23	2.89	1.04	0.95	0.55	0.25	0.10	0.05	<0.20	<0.15	<0.05	484.48	99.951 6
FJS-1B	366.16	134.37	19.17	38.50	12.23	10.19	13.83	2.25	2.80	1.40	0.55	0.45	0.40	0.05	<0.20	<0.15	<0.05	602.35	99.939 8
FJS-2A	265.47	91.05	10.76	12.21	10.51	10.22	5.53	1.74	4.39	5.38	3.24	0.60	0.15	0.05	<0.20	<0.15	<0.05	421.30	99.957 9
FJS-2B	236.16	74.38	27.57	5.29	9.94	8.04	4.15	2.65	3.45	2.50	0.90	0.55	3.55	0.10	<0.20	<0.15	<0.05	379.22	99.962 1
FJS-3A	355.83	139.81	15.78	22.77	9.14	10.34	6.49	2.20	1.85	1.90	16.23	0.35	0.20	0.05	<0.20	<0.15	<0.05	582.92	99.941 7
FJS-3B	386.48	138.27	31.36	27.41	8.89	8.59	10.14	3.40	<0.05	3.35	6.89	0.75	1.50	0.35	<0.20	<0.15	<0.05	627.36	99.937 3
平均	322.37	114.61	19.36	19.00	10.45	9.44	7.40	2.52	2.26	2.58	4.73	0.49	0.98	0.11	<0.20	<0.15	<0.05	516.27	99.948 4

注:样品号中A代表样品为40~80目,B代表样品为80~120目。

627.36×10^{-6} , 平均为 516.27×10^{-6} , 其中 Al 和 K 元素含量之和占总杂质含量的 84.64%; Al 含量最高, 为 $236.16 \times 10^{-6} \sim 386.48 \times 10^{-6}$, 平均 322.37×10^{-6} ; 其次为 K, 含量为 $74.38 \times 10^{-6} \sim 139.81 \times 10^{-6}$, 平均 114.61×10^{-6} ; Fe 含量为 $10.76 \times 10^{-6} \sim 31.36 \times 10^{-6}$, 平均 19.36×10^{-6} ; Ca 含量为 $5.29 \times 10^{-6} \sim 38.50 \times 10^{-6}$, 平均 19.00×10^{-6} ; Li 含量为 $8.89 \times 10^{-6} \sim 12.23 \times 10^{-6}$, 平均 10.45×10^{-6} ; Ti 含量为 $8.59 \times 10^{-6} \sim 10.34 \times 10^{-6}$, 平均为 9.44×10^{-6} ; Mg 含量为 $4.15 \times 10^{-6} \sim 13.83 \times 10^{-6}$, 平均为 7.40×10^{-6} ; 其他元素含量极少。

3.3 杂质元素赋存状态

石英在地表环境下是一种稳定存在的矿物,但在结晶过程和后期变质作用下,常掺杂不同类型的杂质元素,这些杂质元素的赋存状态包括晶格杂质、流体包裹体和脉石矿物 3 种类型(Götze, 2009; Müller *et al.*, 2012; 汪灵, 2019; 王九一, 2021; Götze *et al.*, 2021; 杨晓勇等, 2022), 因此自然界中并不存在纯石英。在石英原矿中一般存在多种杂质赋存状态,十分复杂。

在杂质元素的 3 种赋存类型中,晶格杂质是石英中最普遍存在的杂质(Götze, 2009; Müller *et al.*, 2003, 2007, 2010, 2012, 2018; Rusk *et al.*, 2008; Beurlen *et al.*, 2011; Breiter *et al.*, 2012; Monnier *et al.*, 2018; Götze *et al.*, 2021)。前人的研究表明,晶格杂质的存在与石英晶格的点缺陷密切相关,石英晶格的点缺陷能引入包括置换离子和间隙离子在内的杂质元素(Nesbitt and Young, 1984; Götze *et al.*, 2001; Götze, 2009; Müller *et al.*, 2012; Götze *et al.*, 2017, 2020, 2021)。在石英的晶格杂质元素中, Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 B^{3+} 可以类质同像的方式替代 Si^{4+} , 成为置换离子;而 Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 和 P^{5+} 则以间隙离子的形式充当补偿离子。理论上讲,石英晶格中 Al^{3+} 、

Fe^{3+} 和 B^{3+} 的离子数之和与 Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 和 P^{5+} 离子数之和的比值应为 1:1 (Nesbitt and Young, 1984; Weil, 1984; Götze, 2009; Müller and Koch-Müller, 2009; Beurlen *et al.*, 2011; Müller *et al.*, 2012; 杨晓勇等, 2022), 因此,如果石英矿石的 $(\text{Al}^{3+} + \text{Fe}^{3+} + \text{B}^{3+})/(\text{Li}^+ + \text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{P}^{5+})$ 大于 1, 则表明矿石的杂质元素除晶格杂质外,还含有脉石矿物和包裹体等杂质元素赋存类型。付家山脉石英 6 个样品的 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 B^{3+} 的离子数之和与 Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 P^{5+} 的离子数之和的比值分别为 2.66、2.69、2.68、2.80、2.75 和 3.03, 均大于 1, 表明其杂质元素含量还有除晶格杂质外的脉石矿物和流体包裹体的贡献。矿石中的 Al 和 K 杂质元素含量最高,印证了显微镜观察分析发现的 Al、K 含量较高的钾长石和白云母等脉石矿物(图 4、图 5)。

目前的研究表明石英流体包裹体中主要杂质是 Na、K、Ca、Mg 等碱土和碱金属元素(Haus *et al.*, 2012; Müller *et al.*, 2012)。石英矿石中还常见到各类脉石矿物,例如,在岩浆活动中形成的石英中常见长石、云母、金红石、锆石、磷灰石、铁氧化物等;受变质作用影响的石英中,可见绿泥石、白云母、角闪石以及蓝晶石、十字石、石榴石等(Müller *et al.*, 2012; Götze *et al.*, 2021), 这些脉石矿物包含有 Al、Ti、K、Na、Ca 等多种杂质元素。

Fe、Ti 既可以进入晶格,也可存在于脉石矿物中,如金红石、钛铁矿、黑云母、赤铁矿、褐铁矿等(Götze, 2009; Haus *et al.*, 2012; Müller *et al.*, 2012)。付家山脉石英原矿含有一定量的 Fe、Ti 杂质元素(表 1), 表明其可能来源于晶格杂质或脉石矿物。虽然此次光学显微镜和 SEM 能谱分析没有发现金红石、黑云母、黄铁矿、褐铁矿等含 Fe、Ti 矿物,但是不能排除存在这些脉石矿物的可能性(周贤荣等, 2011)。此外,脉石英原矿中也含有 Na、

Ca、Mg 杂质元素,则可能来自流体包裹体(Müller *et al.*, 2012)或含 Ca、Mg 的脉石矿物,如钙长石、绿泥石等(周贤荣等, 2011)。同时,含有这些 Ca、Mg 离子的脉石矿物,大都含有 Al 元素,可能从另一方面增加了 Al 元素含量。

结合光学显微镜和扫描电子显微镜观察分析以及杂质元素的离子数比值数据可知,付家山脉石英杂质主要有晶格杂质、脉石矿物和流体包裹体 3 种类型。

3.4 高纯石英原料潜力分析

将脉石英深度提纯为高纯石英的过程就是尽可能分离出脉石英中各种杂质的过程。首先,粉碎和分级使石英矿物与脉石矿物单体解离和包裹体破裂并得到相应粒级的石英颗粒,之后依据脉石英中杂质元素赋存状态有针对性地选择加工技术使脉石矿物杂质、包裹体杂质和晶格杂质有效分离。

通过上述研究发现,付家山脉石英原矿 SiO₂ 含量达 99.95%,其中杂质主要赋存于钾长石和白云母等脉石矿物中。通过传统的浮选工艺,即可去除钾长石和白云母,辅以煅烧、水淬和酸浸工序,进一步去除脉石矿物和石英晶体中的包裹体,有望将提纯石英砂的 SiO₂ 纯度提高到 99.995% 以上,满足中高端高纯石英的质量要求。

4 结论

(1) 付家山脉石英杂质包括晶格杂质、脉石矿物和流体包裹体 3 种类型。流体包裹体以云雾状成群分布的原生流体包裹体为主,含有部分次生流体包裹体,小于 5 μm,主要为单一液相流体包裹体和气液二相流体包裹体。脉石矿物主要为白云母、钾长石、含铁矿物等。

(2) 付家山脉石英原矿 SiO₂ 含量可达 99.95%,主要杂质元素为 Al、K、Fe、Ca、Li、Ti、Mg,其中 Al 和 K 元素含量最高,在总杂质含量中占比超过 80%。

(3) 按照现有高纯石英质量标准,付家山脉石英原矿优质部位的质量达到低端高纯石英标准,未来采用传统浮选工艺去除钾长石、白云母后,提纯后的石英砂质量有望达到中高端高纯石英要求。

References

Beurlen H, Müller A, Silva D, *et al.* 2011. Petrogenetic significance of LA-ICP-MS trace-element data on quartz from the Borborema Pegma-

tite Province, northeast Brazil[J]. *Mineralogical Magazine*, 75(5): 2 703~2 719.

Breiter K, Svojtka M, Ackerman L, *et al.* 2012. Trace element composition of quartz from the Variscan Altenberg-Teplice caldera (Krušné hory/Erzgebirge Mts, Czech Republic/Germany): Insights into the volcano-plutonic complex evolution[J]. *Chemical Geology*, 326~327: 36~50.

Chen Junyuan, Liu Yanfei, Yan Lingya, *et al.* 2021. Research on development trend of strategic nonmetallic minerals such as graphite and fluorite[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(2): 287~296(in Chinese with English abstract).

Götze J. 2009. Chemistry, textures and physical properties of quartz—geological interpretation and technical application[J]. *Mineralogical Magazine*, 73(4): 645~671.

Götze J, Möckel R and Pan Y. 2020. Mineralogy, geochemistry and genesis of agate—A review[J]. *Minerals*, 10(11): 1 037.

Götze J, Pan Y and Müller A. 2021. Mineralogy and mineral chemistry of quartz: A review[J]. *Mineralogical Magazine*, 85: 639~664.

Götze J, Pan Y, Müller A, *et al.* 2017. Trace element compositions and defect structures of high-purity quartz from the southern Ural Region, Russia[J]. *Minerals*, 7(10): 189.

Götze J, Plötze M and Habermann D. 2001. Origin, spectral characteristics and practical applications of the cathodoluminescence (CL) of quartz—A review[J]. *Mineralogy and Petrology*, 71: 225~250.

Guo Wenda, Han Yuexin, Zhu Yimin, *et al.* 2019. Analysis of high-purity quartz sand resources and its processing technologies[J]. *Metal Mine*, (2): 22~28(in Chinese with English abstract).

Hao Wenjun, Feng Shuwen, Zhan Jianhua, *et al.* 2020. Current situation, production, consumption and trade pattern of high purity quartz in the world[J]. *China Nonmetallic Minerals Industry*, (5): 15~19 (in Chinese with English abstract).

Harben P W. 2002. The Industrial Mineral Handy Book—A Guide to Markets, Specifications and Prices(4th edition)[M]. London, UK: Industrial Mineral Information.

Haus R, Prinz S and Priess C. 2012. Assessment of high purity quartz resources[A]. Götze J and Möckel R. Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics[C]. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 29~52.

Hubei Bureau of Geology and Mineral Resources. 1990. Regional geology of Hubei Province[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources. 1984. Regional Geology of Jiangxi Province[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Jiao Lixiang. 2019. Current situation and supply demand analysis of the

- development and utilization of vein quartz resources in China[J]. China Nonmetallic Minerals Industry, (2): 11~14(in Chinese with English abstract).
- Li Aimin, Wan Ye, Chang Xin, *et al.* 2021. Preparation technology and application of high purity synthetic quartz[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 35(6): 62~65(in Chinese with English abstract).
- Lin Min. 2018. Mechanism of Removing Muscovite and Lattice Impurity Elements from Vein Quartz[D]. Wuhan University of Technology(in Chinese with English abstract).
- Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, *et al.* 2004. Fluid Inclusion[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Ma Chao, Feng Ansheng, Liu Changmiao, *et al.* 2019. Mineralogical characteristics and processing technology progress of high purity quartz raw materials[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 39(6): 48~57 (in Chinese with English abstract).
- Monnier L, Lach P, Salvi S, *et al.* 2018. Quartz trace-element composition by LA-ICP-MS as proxy for granite differentiation, hydrothermal episodes, and related mineralization: The Beauvoir Granite (Echassières district), France[J]. Lithos, 320: 355~377.
- Müller A, Ganerød M, Wiedenbeck M, *et al.* 2018. The hydrothermal breccia of Berglia-Glassberget, Trøndelag, Norway: Snapshot of a Triassic earthquake[J]. Minerals, 8(5): 175.
- Müller A, Herrington R, Armstrong R, *et al.* 2010. Trace elements and cathodoluminescence of quartz in stockwork veins of Mongolian porphyry-style deposits[J]. Mineralium Deposita, 45(7): 707~727.
- Müller A, Ihlen P M, Wanvik J E, *et al.* 2007. High-purity quartz mineralisation in kyanite quartzites, Norway[J]. Mineralium Deposita, 42(5): 523~535.
- Müller A and Koch-Müller M. 2009. Hydrogen speciation and trace element contents of igneous, hydrothermal and metamorphic quartz from Norway[J]. Mineralogical Magazine, 73(4): 569~583.
- Müller A, Wanvik J E and Ihlen P M. 2012. Petrological and chemical characterisation of high-purity quartz deposits with examples from Norway[A]. Götze J and Möckel R. Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics[C]. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 71~118.
- Müller A, Wiedenbeck M and Alfons M *et al.* 2003. Trace elements in quartz: A combined electron microprobe, secondary ion mass spectrometry, laser-ablation ICP-MS, and cathodoluminescence study [J]. European Journal of Mineralogy, 15(4): 747~763.
- Nesbitt H W and Young G M. 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 48(7): 1 523~1 534.
- Rusk B G, Lowers H A and Reed M H. 2008. Trace elements in hydrothermal quartz: Relationships to cathodoluminescent textures and insights into vein formation[J]. Geology, 36(7): 547~550.
- Schlanz J W. 2009. Silica: High pure and ultra-high pure quartz[A]. Kogel J E, Trivedi N C, Barker J M, *et al.* Industrial Minerals & Rocks: Commodities, Markets, and Uses (7th Edition) [C]. Littleton, Colorado, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 833~837.
- Vatalis K I, Charalambides G and Benetis N P. 2015. Market of high purity quartz innovative applications [J]. Procedia Economics and Finance, 24: 734~742.
- Wang Jiuyi. 2021. Global high purity quartz deposits: Resources distribution and exploitation status[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 40(1): 131~141(in Chinese with English abstract).
- Wang Ling. 2019. Industrial types and application characteristics of deposits in quartz[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 39(6): 39~47(in Chinese with English abstract).
- Wang Ling, Dang Chenping, Li Caixia, *et al.* 2014. Technology of high-purity quartz in China: Status quo and prospect[J]. Earth Science Frontiers, 21(5): 267~273(in Chinese with English abstract).
- Wang Ling, Li Caixia, Wang Yan, *et al.* 2011. Present situation and development suggestion of processing technology of high purity quartz in China[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 31(4): 110~114(in Chinese with English abstract).
- Wang Ling, Li Caixia, Wang Yan, *et al.* 2013. Research on and application of the ICP detection technology for the quality of high purity quartz[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 33(6): 1 684~1 688(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiang, Yi Chengsheng, Tu Bingfeng, *et al.* 2020. Geological characteristics and metallogenic regularity of vein quartz deposit in Hubei Province[J]. China Nonmetallic Minerals Industry, (5): 46~50(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaolei, Zhou Jincheng, Chen Xin, *et al.* 2017. Formation and evolution of the Jiangnan Orogen[J]. Bulletin of Mineralogy Geochemistry, 36(5): 714~735(in Chinese with English abstract).
- Wang Yan, Ma Changqian, Wang Lianxun, *et al.* 2018. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes of the Neoproterozoic granites on the southeastern margin of the Yangtze Block: Constraint on crustal growth[J]. Earth Science, 43(3): 635~654(in Chinese with English abstract).
- Wang Yan, Ma Changqian, Wang Lianxun, *et al.* 2020. Petrogenesis and tectonic implications of the Cretaceous granites from Xiaojiugong-Shadian, Northwest Jiangxi Province[J]. Earth Science, 45(4): 1 115~1 135(in Chinese with English abstract).
- Weil J A. 1984. A review of electron spin spectroscopy and its application

- to the study of paramagnetic defects in crystalline quartz[J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 10: 149~165.
- Yan Lingya, Liu Yanfei, Yu Haijun, *et al.* 2020. Development and utilization status and supply and demand situation of high purity quartz resources in China[J]. *Land and Resources Information*, 10: 98~103 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaoyong, Sun Chao, Cao Jingya, *et al.* 2022. High purity quartz: Research progress and perspective review[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(1): 231~244 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dexian, Dai Tagen and Rusk Brian G. 2011. Advances in quartz research[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(2): 333~341 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Lele. 2015. Study on Purifying Preparation and Mechanism of Ultra-pure Quartz[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology (in Chinese).
- Zhou Xianrong, Xu Xingkuan and Huang Shiyao. 2011. Geological characteristics of silica deposits in Fujiashan area, Tongshan County, Hubei Province, China, and prospecting Indicators [J]. *Western Resources*, (4): 60~62 (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 陈军元, 刘艳飞, 颜玲亚, 等. 2021. 石墨、萤石等战略非金属矿产发展趋势研究[J]. *地球学报*, 42(2): 287~296.
- 郭文达, 韩跃新, 朱一民, 等. 2019. 高纯石英砂资源及加工技术分析[J]. *金属矿山*, (2): 22~28.
- 郝文俊, 冯书文, 詹建华, 等. 2020. 全球高纯石英资源现状、生产、消费及贸易格局[J]. *中国非金属矿工业导刊*, (5): 15~19.
- 湖北省地质矿产局. 1990. 湖北省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 江西省地质矿产局. 1984. 江西省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 焦丽香. 2019. 我国脉石英资源开发利用现状及供需分析[J]. *中国非金属矿工业导刊*, (2): 11~14.
- 李爱民, 万 烨, 常 欣, 等. 2021. 高纯合成石英的制备技术和应用[J]. *有色设备*, 35(6): 62~65.
- 林 敏. 2018. 脉石英中白云母、晶格杂质分离及机理[D]. 武汉理工大学.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪 培, 等. 2004. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社.
- 马 超, 冯安生, 刘长森, 等. 2019. 高纯石英原料矿物学特征与加工技术进展[J]. *矿产保护与利用*, 39(6): 48~57.
- 王九一. 2021. 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*, 40(1): 131~141.
- 汪 灵. 2019. 石英的矿床工业类型与应用特点[J]. *矿产保护与利用*, 39(6): 39~47.
- 汪 灵, 党陈萍, 李彩侠, 等. 2014. 中国高纯石英技术现状与发展前景[J]. *地学前缘*, 21(5): 267~273.
- 汪 灵, 李彩侠, 王 艳, 等. 2011. 我国高纯石英加工技术现状与发展建议[J]. *矿物岩石*, 31(4): 110~114.
- 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[J]. *光谱学与光谱分析*, 33(6): 1 684~1 688.
- 王 翔, 易承生, 涂秉峰, 等. 2020. 湖北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*, (5): 46~50.
- 王孝磊, 周金城, 陈 昕, 等. 2017. 江南造山带的形成与演化[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 36(5): 714~735.
- 王 艳, 马昌前, 王连训, 等. 2018. 扬子东南缘新元古代花岗岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素: 对地壳生长的约束[J]. *地球科学*, 43(3): 635~654.
- 王 艳, 马昌前, 王连训, 等. 2020. 赣西北小九宫-沙店白垩纪花岗岩的岩石成因及构造意义[J]. *地球科学*, 45(4): 1 115~1 135.
- 颜玲亚, 刘艳飞, 于海军, 等. 2020. 中国高纯石英资源开发利用现状及供需形势[J]. *国土资源情报*, (10): 98~103.
- 杨晓勇, 孙 超, 曹荆亚, 等. 2022. 高纯石英的研究进展及发展趋势[J]. *地学前缘*, 29(1): 231~244.
- 张德贤, 戴塔根, Rusk Brian G. 2011. 石英研究进展[J]. *岩石矿物学杂志*, 30(2): 333~341.
- 钟乐乐. 2015. 超高纯石英纯化制备及机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学.
- 周贤荣, 徐兴宽, 黄世尧. 2011. 湖北省通山县付家山矿区硅石矿地质特征及找矿标志[J]. *西部资源*, (4): 60~62.