

全球高纯石英原料矿的资源分布与开发现状

王九一

(自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 高纯石英是集成电路、半导体芯片、光伏、光纤、新型玻璃等产业必不可少的关键原料,但是能够生产高纯石英的矿床极为稀缺。梳理全球高纯石英原料矿床的资源分布和开发现状,发现矿床分布于美国、澳大利亚、挪威、俄罗斯、中国、毛里塔尼亚、加拿大等国家,除中国外,共有14处矿床,美国和澳大利亚的资源量最大。矿床类型包括白岗岩型、伟晶岩型、热液脉石英型、风化残积型、尾矿型,其中热液脉石英型分布最广。优质矿石多产于太古宙-元古宙黑云母片麻岩、花岗片麻岩、片岩等古老变质岩系中,受古生代-中生代花岗岩岩浆活动控制,经历了长期而缓慢的变质过程。我国高纯石英原料矿床尤为紧缺,在当前国际政治经济环境下,作为战略性矿产资源,高纯石英的资源安全形势尤其严峻。一方面,我国应立足国内石英资源,大力加强境内太古宙-元古宙变质岩系中纯度较高的玻璃用脉石英、伟晶岩、白岗岩的地质调查和质量评价,关注花岗闪长岩、伟晶岩和高岭土矿开采后残留尾矿中的石英,开展选矿实验,评估资源潜力;另一方面,应打破高纯石英砂进口渠道多年来依赖美国的境况,加大挪威、俄罗斯、毛里塔尼亚等国的进口力度,拓展高纯石英的来源渠道,维护国家战略安全。

关键词: 高纯石英原料矿; 资源分布; 开发现状; 全球

中图分类号: P619.23⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)01-0131-11

Global high purity quartz deposits: Resources distribution and exploitation status

WANG Jiu-yi

(MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: High purity quartz, a strategical material that is indispensable for producing integrated circuit, semiconductor, photovoltaics, optical fiber and novel glass, has seen growing demand worldwide. Ore deposits from which high purity quartz is extracted, however, are extremely rare throughout the world. Present ore deposits, including active and inactive, are located in the USA, Australia, Norway, Russia, China, Mauritania, and Canada, with resources in the USA and Australia possessing top reserves. Apart from China, there are 14 ore deposits, and their types include alaskite, pegmatite, hydrothermal quartz vein, tailings, and weathered granitoid. Ore fluids yielding the purest quartz were more likely differentiated from Paleozoic-Mesozoic magmas, and intruded ambient Archaean-Proterozoic metamorphic rocks, such as biotite gneiss, granite gneiss and schist, controlled by long-term multi-stage metamorphism. China is faced with a much more severe difficulty as it barely preserves any high purity quartz deposits, leading to massive import annually for high purity quartz sands, especially from the USA. Under current fluctuating global economic and political environments, China's premier task undoubtedly is to put more effort on geological survey on domestic Archaean-Proterozoic metamorphic rocks, and meanwhile intensify quality assessment, aiming to identify hydrothermal veins, pegmatite, and alaskite that possess potential for extracting high purity

收稿日期: 2020-08-12; 接受日期: 2020-09-09; 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(KK1703, KK2005); 中国地质调查局地质矿产调查评价专项项目(DD20190817, DD20190816, DD20190606)

作者简介: 王九一(1983-), 男, 副研究员, 从事非金属矿床成矿规律研究, E-mail: wjyhx@163.com。

quartz. Attentions should be paid to quartz in tailings from granodiorite, pegmatite, kaolin ores, and beneficiation trails should be implemented to evaluate their resource potentiality. In addition, China should build diversified pipelines for importing high purity quartz sands and products, and shift from sole reliance on the USA to other countries, such as Norway, Russia and Mauritania, thus providing safe and stable resource supply for national security.

Key words: high purity quartz deposits; resources distribution; exploitation status; global

Fund support: Central Welfare Basic Scientific Research Business Expenses (KK1703, KK2005); Project of China Geological Survey (DD20190817, DD20190816, DD20190606)

石英是自然界中最常见的矿物之一,是水晶、玛瑙、河沙、硅石等的主要矿物成分,广泛应用在玻璃、建筑、宝玉石装饰等传统行业。20世纪60年代以来,计算机、新材料、新能源等新兴技术对石英产品的纯度提出更高要求,诞生了高纯石英的概念(Harben, 2002; Schlanz, 2009; Haus *et al.*, 2012)。高纯石英指SiO₂纯度极高、杂质元素含量极低的石英及其产品,是半导体、光伏、光纤、精密光学、照明设备、新型玻璃等产业不可缺少的重要功能材料。严格而言,高纯石英不是一种矿产,而是由水晶、脉石英、石英岩、花岗伟晶岩等矿石作为原料经提纯后的一种产品,因此,将能够提纯生产高纯石英的矿床称为高纯石英原料矿更为适宜。

石英在结晶过程中常掺杂微量的杂质,包括晶体间隙的脉石矿物、包裹体和晶格杂质3种类型(Götze, 2009; 张德贤等, 2011; Müller *et al.*, 2012)。不同杂质元素对石英性能的影响不同,如Al影响石英中的光传导速率,Fe、Mn等金属元素降低石英的光透过率,P和B含量过高的石英不能用于光伏产业,因此在生产高纯石英时,必须对原料矿石进行提纯,尽可能降低Al、K、Na、Li、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Cr、Ni、B、P等杂质的含量。一般而言,石英原料矿石需要经过研磨、分级、重选、磁选、浮选、酸浸、高温氯化焙烧等工序(岳丽琴, 2014),逐次去除石英晶体中的包裹体、脉石矿物,尽可能地降低杂质的含量,提高SiO₂的纯度,最终才能制得满足不同行业质量要求的高纯石英砂。

但是,由于不同产业需要不同质量的石英,使得高纯石英质量没有统一的标准。为评价高纯石英原料矿,国内外学者多年来努力寻找具有普适性的质量评价指标。早期的研究认为,高纯石英的杂质含量应小于 50×10^{-6} ,即SiO₂纯度应大于99.995%(Harben, 2002)。我国学者认为SiO₂纯度大于99.9%的石英即为高纯石英(汪灵等, 2014)。挪威地质调查局汇总了该国高纯石英资源的测试数据,

提出更详细的指标,要求在杂质总含量小于 50×10^{-6} 的前提下,Al含量应小于 30×10^{-6} ,Ti含量小于 10×10^{-6} ,Na和K含量均小于 8×10^{-6} ,Li、Ca含量均小于 5×10^{-6} ,Fe含量小于 3×10^{-6} ,P含量小于 2×10^{-6} ,B含量小于 1×10^{-6} (Müller *et al.*, 2012)。2014年,Flook根据市场产业需求,提出更可靠的质量指标,认为SiO₂纯度在99.95%、总杂质含量小于 500×10^{-6} 的石英即为高纯石英,纯度99.5%~99.8%的石英可满足半导体填料、光纤、液晶屏生产行业的要求,纯度小于99.5%的石英可用在透明玻璃行业(Vatalis *et al.*, 2015)。近年来,新兴起的光伏玻璃、Low-E玻璃、超白浮法玻璃等新型玻璃产业,降低了SiO₂的纯度要求(汪灵, 2019)。因此,综合这些指标体系,在考虑原料矿石质量、测试手段、现有提纯工艺和行业质量要求的情况下,将SiO₂纯度大于99.9%的石英视为高纯石英是合理的。

由于高纯石英原料矿床极为稀缺,21世纪初以来世界各国加大找矿勘查和矿石可利用性评价,发现了十多处高纯石英原料矿床,但尚未有对其进行综述性的研究。我国硅质资源丰富,但大部分矿床被作为普通硅石矿,用于普通玻璃、石材、建筑用砂等。此外,由于缺少可利用性评价,从严格意义上我国没有专门生产高纯石英原料的矿山,每年需从他国进口大量高纯石英砂、原料矿石及高端石英制品。他山之石,可以攻玉,本研究根据国内外已有报道和研究成果,对全球高纯石英原料矿的分布和开发现状进行梳理,涵盖矿床地理位置、类型、资源量规模、开发历史及开采现状等,以期对我国高纯石英原料矿的找矿方向、矿山企业的海外布局及贸易政策提供指导性建议。

1 资源分布与开发现状概况

根据现有资料,全球高纯石英原料矿床分布于美国、挪威、澳大利亚、俄罗斯、毛里塔尼亚、中国、加

拿大等 7 个国家(图 1)。除中国外,共有 14 处矿床,其中,有生产矿山的 7 处,尚未开采生产的 7 处。美国斯普鲁斯派恩(Spruce Pine)矿的高纯石英原料资

源规模最大,超过 1 000 万吨;资源量最小的是挪威德拉格(Drag)矿,仅有 26.7 万吨(表 1)。

世界地图



审图号: GS(2016)1666号

自然资源部 监制

图 1 全球高纯石英原料矿床分布

Fig. 1 Resource distribution of high purity quartz deposits in the world

表 1 全球高纯石英原料矿床的资源分布与开发现状

Table 1 Resources distribution and exploitation status of global high purity quartz deposits

国家/地区	矿床	类型	矿业公司	资源量/万吨	开发利用现状
美国北卡罗来纳州	斯普鲁斯派恩	白岗岩型	挪威石英股份公司 (The Quartz Corp.)	> 1000	生产
			矽比科北美公司 (Sibelco North America, Inc.)	—	生产
美国爱达荷州	博维尔	风化残积型	艾矿产股份公司 (I-Minerals, Inc.)	探明: 437.8; 推断: 885.7	勘探
挪威诺兰郡	德拉格	伟晶岩型	挪威石英股份公司 (The Quartz Corp.)	26.7	生产
挪威霍达兰郡	内索登	热液脉石英型	挪威北欧石英股份公司 (Nordic Quartz AS)	控制: 189.9; 推断: 89.3	勘探
俄罗斯车里雅宾斯克州	克什特姆	热液脉石英型	俄罗斯石英有限责任公司 (Russia Quartz LLC)	储量: 136	生产
俄罗斯汉特-曼西自治区	萨兰保尔	热液脉石英型	极地石英股份公司 (JSC Polar Quartz)	33	生产
		白泉	热液脉石英型	石墨烯与太阳能技术有限公司 (Graphene & Solar Technologies Ltd)	推断: 150
澳大利亚昆士兰州	石英山	热液脉石英型	石墨烯与太阳能技术有限公司 (Graphene & Solar Technologies Ltd)	预测: 1400	勘探
	糖袋山	热液脉石英型	高纯石英有限公司(Ultra HPQ)	探明+控制: 120 (<70 m)	勘探
	灯塔	热液脉石英型	亨特贝二氧化硅有限公司 (Hunter Bay Silica Pty. Ltd.)	探明+推断: 183.4; 预测: 500	生产
澳大利亚维多利亚州	克雷西克	金矿尾矿型	佩特拉矿产有限公司 (Petra Minerals Pty. Ltd.)	地表推断: 100; 地下预测: 100?	勘探
加拿大魁北克省	约翰比兹	热液脉石英型	PAL 公司 (Placements Appalache (1966) Ltée)	控制: 225	勘探
毛里塔尼亚努瓦迪布湾省	查米	热液脉石英型	毛里塔尼亚石英股份公司 (Quartz Inc. SA Mauritania)	探明: 72.5	生产
	乌姆阿奎尼纳	热液脉石英型	毛里塔尼亚矿产公司 (The Mauritanian Minerals Co.)	预测: 500~1000	停产?
中国湖北蕲春	灵虬山	热液脉石英型	湖北省蕲春县灵虬山石英矿	控制: 391.5; 推断: 11.4	生产

2 全球重要矿床分述

2.1 美国

2.1.1 斯普鲁斯派恩矿床

斯普鲁斯派恩高纯石英原料矿坐落于美国北卡罗来纳州西部米切尔县(Mitchell County)的斯普鲁斯派恩镇(图1),其西南距阿什维尔市85 km,东南距夏洛特市180 km。该矿供给了全球90%以上的高纯石英砂需求量,在相当长时间内甚至是唯一的来源地。2009年BBC称此地为“地球上最具战略价值的平方英尺”(Nelson, 2009)。

矿床位于阿巴拉契亚山系的蓝岭构造区,分布在斯普鲁斯派恩深成岩系的花岗伟晶岩带中(Swanson and Veal, 2010),为白岗岩型高纯石英矿,由泥盆纪3.8亿年前花岗质岩浆侵入前寒武纪Ashe组的云母和角闪石片麻岩、片岩中缓慢结晶而成矿(Brobst, 1962; Glover, 2006; Miller *et al.*, 2006)。矿石的主要造岩矿物为斜长石、钾长石、石英、白云母,几乎不含镁铁质矿物。石英的杂质元素含量极低,经机械和化学提纯后,制得的高纯和超纯石英主要用于半导体晶圆、精密光学玻璃以及光伏、照明等产业。

斯普鲁斯派恩采矿区有超过100年的悠久采矿历史。二战前,当地主要开采云母片岩、伟晶岩中的云母和长石(Broadhurst and Hash, 1953);1949年,位于阿什维尔市的北卡罗来纳州矿物研究实验室(MRL)与区内2家采矿公司合作,发明了化学浮选工艺,能够从花岗岩、伟晶岩、白岗岩中分选出石英、长石、云母、石榴石等矿物(Glover, 2006)。1970年后,国际市场对高纯石英砂的需求快速增长,MRL实验室改进浮选工艺,对矿区的云母长石矿尾矿开展选矿实验(Groppo, 1980),最终建成一套成熟的高纯石英提纯流程,成为流行世界的标准提纯工艺。

截至2020年8月,矿床矿业权由挪威的石英股份公司(The Quartz Corp., TQC)和比利时的矽比科全资子公司矽比科北美公司(Sibelco North America, Inc.)持有,开采白岗岩和伟晶岩中的石英、长石、云母。其中,TQC公司拥有的高纯石英原料资源量大于1000万吨(The Quartz Corp., 2020)。矽比科北

美公司的保有资源量可满足数十年的矿山服务年限,该公司前身为众所周知的尤尼明公司(Unimin Corp.)。尤尼明公司自1970年起即在该矿区采矿,其后整合其他公司的石英部门,采用MRL改进的提纯工艺生产高纯石英砂,并建立了超纯石英的IOTA标准,一度垄断了世界高纯石英砂市场。TQC公司由挪威微晶公司(Norwegian Crystallites AS)与斯普鲁斯派恩的KT长石公司(K-T Feldspar Corp.)、长石公司(The Feldspar Corp.)于2011年合并而成,将开采的矿石在当地进行碎磨、分选和初次浮选,然后将半成品海运至挪威的深加工厂,经二次浮选、磁选、酸浸、高温焙烧后,制得质量类似于矽比科高纯石英砂的产品(The Quartz Corp., 2020)。

2.1.2 博维尔矿床

博维尔矿位于爱达荷州北部拉塔县博维尔镇(Bovill, Latah County),西南距莫斯科市28英里,距刘易斯顿市33英里(图1)。矿床由WBL尾矿(WBL Tailings)、凯利丘(Kelly's Hump)、中岭(Middle Ridge)3处矿体组成,为高岭土尾矿型和风化残积型石英矿(I-Minerals, 2014)。区内白垩纪花岗岩侵入体——塔图纳(Thatuna)岩基的花岗闪长岩风化后,形成高岭石、埃洛石、钾长石和石英的风化型复合矿床。经电子探针分析,矿石中石英晶体的纯度大于99.9%, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 含量均低于 40×10^{-6} (I-Minerals, 2014)^①。

1960~1974年,矿区主要开采高岭土矿,废弃的钾长石和石英形成了WBL尾矿。2000年至今,艾矿产股份公司(I-Minerals, Inc.)获得矿业权,对3个矿体开展了大比例尺地质调查,施工了332口钻孔。2010年,公司完成预可行性研究,研发出 SiO_2 纯度为99.9%~99.997%的高纯石英砂产品。矿床钾长石和石英的探明资源量437.8万吨,控制资源量885.7万吨,共计1323.5万吨(I-Minerals, 2020a)。

近年来,由于美国光伏产业逐渐移至他国,对钾长石和高纯低铁石英的需求下降,艾矿产公司在最新的预研报告中,将埃洛石和高岭石作为采矿重心,暂无开采钾长石和高纯石英的计划(I-Minerals, 2020b)。但是,博维尔高纯石英资源量巨大,采用传统、类似斯普鲁斯派恩矿的浮选提纯工艺,即可生产高纯石英砂,矿石的提纯加工难度较低。

① I-Minerals. 2014. NI 43-101 Updated Prefeasibility Technical Report Bovill Kaolin Project Latah County, Idaho. 171.

2.2 挪威

作为南北狭长的山地之国,挪威的石英资源非常丰富,涵盖热液脉石英、石英岩、伟晶岩等多种类型,并且拥有TQC、埃肯股份(Elkem ASA)等全球石英产业巨头。挪威地质调查局根据境内石英矿石的LA-ICP-MS测试数据,还提出一套基于晶格杂质元素含量的高纯石英质量评价指标(Müller *et al.*, 2007; Müller *et al.*, 2012)。当前,北部的德拉格矿床和南部的内索登(Nesodden)矿床是挪威主要的高纯石英原料产地(图1)。

2.2.1 德拉格矿床

德拉格矿区地处挪威北部诺尔兰郡廷斯菲尤尔峡湾(Tysfjord)西侧的德拉格村附近(图1),由分布在方圆5 km²的数十个伟晶岩型的石英矿体组成。伟晶岩以垂直筒状产于年龄为17.5亿年的古太古代花岗片麻岩中,具环带构造;高纯石英矿体以垂直雪茄状处在伟晶岩体核部,其环状围岩的造岩矿物常见斜长石、钾长石和云母(Müller *et al.*, 2012)。石英晶体纯净,粒径平均6 mm,流体和固体包裹体非常稀少,Al、Ti、Li、B等晶格杂质元素均达到高纯石英原料的质量要求(Müller *et al.*, 2012)。

德拉格矿区的开采始于1907年。早期的矿山以露天方式开采伟晶岩中的钾长石。20世纪70年代,挪威地调局对德拉格矿区的伟晶岩矿坑进行石英勘查,在部分矿坑中发现优质石英矿石,其质量非常适用于光纤、光学仪器、半导体等高端产业领域。其中,内德伊沃伦(Nedre Øyvollen)、伊特伊沃伦(Ytre Øyvollen)和哈康哈尔斯(Håkonhals)3处伟晶岩体的石英资源最为丰富,探明的高纯石英储量合计26.7万吨(Wanvik, 2001)^①。

1986年,埃肯公司(Elkem)和诺森公司(Norcem)成立米诺公司(JV Minnor),开采内德伊沃伦矿坑的高纯石英,但公司因经营不善于1988年破产,矿山生产停顿。1996年,挪威微晶公司成立,接管了内德伊沃伦矿的开采,在德拉格村建成深加工厂,生产用于光学、照明设备、光伏的高纯石英砂。2011年,新成立的TQC公司获得矿区的采矿权。随着德拉格矿区的石英资源逐渐衰竭,TQC公司已将斯普鲁斯派恩矿区作为高纯石英原料来源地,该区不再

是重要原料来源地。

2.2.2 内索登矿床

内索登矿位于挪威西南部的霍达兰郡的克文赫拉德市(Kvinnherad),西北距卑尔根53 km,出露于哈当厄峡湾(Hardangerfjord)南侧的山脊上(图1)。矿床为热液脉石英型,其围岩为中元古代(1.5 Ga)的花岗片麻岩(Ihlen and Müller, 2011)^②。矿体呈北东-南西向,充填在加里东期380 Ma前形成的哈当拉张断裂带中。矿石中的石英晶体较大,大小介于1 μm~3 cm之间,平均3 mm;由于受加里东期之后构造运动影响,石英晶体普遍强烈重结晶,流体包裹体广泛发育,白云母、钾长石、方解石等固体包裹体也较为常见。LA-ICP-MS原位测试数据显示,石英晶体中的Al、Ti、Ge等杂质含量较低,但Li、B含量较高,且因包裹体含量高,致使晶体中K、Na、Mg等碱金属杂质含量过高(Müller *et al.*, 2012)。

20世纪60年代,挪威地质调查局在克文赫拉德市地区勘探冶金用石英矿时,发现了内索登石英矿,推断资源量50万吨(Geis, 1964)。由于德拉格矿区伟晶岩型高纯石英矿后备资源严重不足,挪威地质调查局对境内其他可能的高纯石英原料资源展开调查和评价。2007~2011年,新实施的地质调查填图成果揭示,内索登石英矿体长约580 m,宽15 m,延伸150 m,推断资源量达270万吨(Ihlen and Müller, 2011)^③。

当前,挪威北欧矿业股份公司(Nordic Mining ASA)的全资子公司北欧石英股份公司(Nordic Quartz AS)拥有内索登矿的探矿权和采矿权。2012年,安扎普兰公司(Anzaplan Dorfner)基于矿区已有地调、勘探、测试等成果对矿床进行概略研究,按JORC(澳大利亚矿产储量联合委员会)标准,推断的石英资源量345万吨。同时,为评估内索登的高纯石英原料潜力,安扎普兰公司改进传统的提纯工艺,对0.25~1吨矿石进行提纯和选矿实验,结果表明提纯后的高纯石英能够满足IOTA 4和IOTA 6的产品标准(Nordic Mining ASA, 2019)^④。2015年,北欧石英公司对矿体实施6口钻孔,估算了高纯石英原料矿的资源量,其中,控制资源量189.9万吨,推断

① Wanvik J E. 2001. Kvartsressurser i Nordland. Trondheim, Norway. NGU Rapport 2001. 020. 103.

② Ihlen P M and Müller A. 2011. Forekomster av høyren kvarts langs Hardangerfjorden. Trondheim, Norway. NGU Rapport 2009. 024. 69.

③ Nordic Mining ASA. 2019. Annual report 2019 on Nordic Mining's mineral deposits: Exploration results, mineral resources and mineral reserves. Oslo, Norway. 20190910-annual- mineral-report-2019, 8.

资源量 89.3 万吨,共计 279.2 万吨(Camitz, 2016)。

截至目前,北欧石英公司尚未开采内索登高纯石英矿。但是,该矿对高纯石英砂及制品行业具有相当大的影响。首先,矿床的资源量大,作为高纯石英原料的潜力也已为大样品量的提纯和选矿实验所证明。其次,矿区高纯石英的后备资源相当丰富。2007~2011 年的地质调查在哈当断裂带北段也发现了克瓦维克(Kvalvik)热液脉石英矿,推断资源量 70 万吨,其矿石质量与内索登矿类似,可用作高纯石英原料(Müller *et al.*, 2012)。

2.3 澳大利亚

相较于挪威,澳大利亚的石英资源也非常丰富,包含热液脉石英、尾矿、海砂等类型,分布于昆士兰州北部、维多利亚州和西澳大利亚州。其中,昆士兰州北部为主要的石英原料矿来源地,已发现灯塔(Lighthouse)、糖袋山(Sugarbag Hill)、白泉(White Springs)、石英山(Quartz Hill)等多处矿床(图 1)。

2.3.1 灯塔矿床

矿床位于昆士兰州北部的乔治敦区,东北距离凯恩斯市约 250 km,艾恩斯利(Einasleigh)镇在矿区西南 16 km,是最近的城镇。矿床为热液脉石英型,由东、西两座状似灯塔、高出地表约 440 m 的石英山峰组成,因而得名灯塔矿床。矿石纯净、半透明或乳白色、块状,近直立状充填于逆断层中。其上盘围岩为元古宙艾恩斯利变质岩系的黑云母片麻岩、白云母片岩;下盘围岩为风化状的志留纪-泥盆纪中细粒花岗岩闪长岩(Sennitt, 2007)^①。经 ICP-OES 测试,东、西矿体的矿石纯度 >99.90%,主要杂质元素 Al、Ti、Fe、P、Ca 等含量均较低,经简单机械提纯后,纯度即可达 99.95% 以上,证明灯塔矿床为优质的高纯石英原料矿。根据 2007 年经地表测量和钻孔验证的高纯石英勘探评估报告,东矿体的高纯石英探明资源量 69 万吨,推断资源量 45.1 万吨;西矿体推断资源量 49.7 万吨,地表矿体推断资源量 19.6 万吨,资源量共计 183.4 万吨,预测的资源量约 500 万吨(Sennitt, 2007)^①。

灯塔矿的开发经历了不同的阶段,矿业权持有人也多次变更。2006 年,卡西法非金属矿有限公司

(Calcifer Industrial Minerals Pty. Ltd.) 获得灯塔矿区的矿权,实施大比例尺地质填图和钻孔验证,并对矿石开展了简单机械的选矿实验,发现了灯塔高纯石英原料矿。2012 年,新加坡太阳能硅资源集团有限公司(Solar Silicon Resources Group Pte Ltd, SSRG) 获得灯塔矿业权,并委托安扎普兰公司设计系统的提纯流程,结果表明采用传统提纯工艺即可生产高纯石英砂,可用于生产太阳能级石英坩埚、卤素灯泡、光纤及半导体封装材料。基于此,SSRG 公司于 2013~2014 年开始建设矿区,采矿生产高纯石英砂。2014 年,SSRG 公司与美国木兰太阳能(Magnolia Solar)合并后,将矿业权归属于 SSRG 母公司奥兹矿产资源集团(Auzminerals Resource Group)。2016 年,澳大利亚亨特贝二氧化硅有限公司(Hunter Bay Silica Pty. Ltd.) 获得灯塔矿的矿业权,对矿床外围进行了后续勘探。目前,由该公司开采矿石生产高纯石英砂。

2.3.2 糖袋山矿床

矿床位于乔治敦区,西北距离乔治敦镇约 25 km,东距灯塔矿 60 km。矿床为热液脉石英型,呈北西-南东向充填在古元古代变质岩系断裂带。矿石质量极为优质,原位 SiO₂ 纯度可达 99.99% 以上。

目前,澳大利亚的高纯石英有限公司(High Purity Quartz Ltd) 拥有矿床的矿业权。该公司成立于 2015 年,于 2016 年对矿床进行了普查,实施了 16 口钻孔(HPQ Materials, 2017)。普查结果表明,矿体长约 600 m,平均厚度 20 m,钻孔揭示矿体深度 60~80 m(Alper, 2019)。经取样测试和选矿提纯实验,制得的高纯石英砂纯度达 99.995%~99.999%,满足太阳能和半导体产业的质量要求。2019 年 10 月,HPQ 公司与采矿加有限公司(Mining Plus Pty Ltd) 签订合作协议,由其负责矿床后续的勘探、资源量估算、可行性研究和采矿生产(HPQ Materials, 2017)。截至 2020 年 8 月,采矿加公司完成第一期 12 口钻孔任务,按 JORC 标准估算,深度小于 70 m 的探明和控制资源量达 120 万吨(Ultra HPQ, 2020)。

目前,糖袋山矿床尚未开采和生产高纯石英砂,但其探明和控制的资源量规模可观,可露天开采;矿石原料 SiO₂ 纯度达 99.99% 以上,使其开采和提纯

① Sennitt C M. 2007. EPM 13602 Lighthouse Quartz Project Annual & Final Report for the Period ending 5th June 2007. Bellbowrie, Australia: Calcifer Industrial Minerals Pty. Ltd. cr 49 273, 65.

成本大大降低。

2.3.3 白泉和石英山矿床

从乔治敦镇到惊喜山镇(Mt. Surprise)的1号公路沿线分布着白泉和石英山矿。白泉矿东南距汤斯维尔港(Townsville Port)440 km,西距乔治敦镇35 km;石英山矿东南距惊喜山镇10 km,西距白泉矿60 km。矿床均为热液脉石英型,成矿过程与灯塔矿床类似。白泉脉石英产于志留纪-泥盆纪的黑云母花岗岩闪长岩中,石英山脉石英呈垂直筒状产于元古宙艾恩斯利变质岩系的黑云母片麻岩中。白泉矿的矿石质量优异,原料SiO₂纯度达99.99%以上,高纯石英的推断资源量150万吨(Solar Quartz Technologies, 2017)^①;石英山矿石原料纯度大于99.5%,符合JORC标准的预测高纯石英资源量1400万吨(Solar Quartz Technologies, 2016)^②,资源规模巨大。

目前,2018年成立的石墨烯与太阳能技术有限公司(Graphene & Solar Technologies Ltd, GST)拥有白泉矿和石英山矿的采矿权。GST公司在白泉矿拥有南北两处采矿权,露天开采,其资源量满足20~30年矿山服务年限,生产的SQ1~SQ9系列高纯石英砂纯度涵盖99.99%~99.999%,年产高纯石英砂3万吨,应用于光伏和半导体产业领域。目前,石英山矿床尚未进入开采期。GST公司在石英山拥有3处采矿权,2017年曾计划进行预可行性研究(Solar Quartz Technologies, 2016)^③。

在石英山东南2.5 km处,元古宙艾恩斯利变质岩系出露地表,形成圆锥形的伊丽莎山(Mt. Eliza),在其黑云母片麻岩中同样发现了类似石英山的高纯石英原料矿石。目前,澳大利亚硅英有限公司(Australian Silica Quartz Pty Ltd)拥有伊丽莎山的探矿权,计划对该地区进行勘探,详细评估高纯石英资源量,并与安扎普兰公司合作开发提纯工艺流程,采矿生产SiO₂纯度大于99.99%的高纯石英砂(Australian Silica Quartz, 2020)。

2.3.4 克雷西克矿床

矿床位于澳大利亚维多利亚州中南部的克雷西克区,东南距墨尔本130 km,南距巴拉腊特市20 km(图1)。矿床为金矿尾矿型,由19世纪淘金热开采金矿废弃后的尾矿组成(Hughes, 2013)。矿石为

尾矿中6~200 mm的石英砾石,质量优异,杂质元素含量低,尤其是B和P含量很低。经澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)采用传统机械和化学提纯工艺处理后,制得的高纯石英砂SiO₂纯度可达99.995%(Roberts, 2012)。

矿床由克雷西克石英有限公司(Creswick Quartz Pty. Ltd.)的全资子公司佩特拉矿产有限公司(Petra Minerals Pty. Ltd.)持有,地表尾矿预测的高纯石英资源量100万吨。2015年,公司计划建设加工厂,开采尾矿石英,生产SiO₂纯度为99.95%~99.999%的CQL系列高纯石英砂,用于液晶显示器、光伏、半导体、光学玻璃等产业(Creswick Quartz, 2015)。

2.4 俄罗斯

在俄罗斯乌拉尔山脉的东侧,有2处高纯石英矿床,分别是亚极地乌拉尔的萨兰保尔(Saranpaul')矿床和南乌拉尔的克什特姆(Kyshtym)矿床(图1)。其中,克什特姆矿的规模较大,开发程度高,其高纯石英产品质量优,在国际市场占有一定比例。

2.4.1 克什特姆矿床

克什特姆矿床位于俄罗斯车里雅宾斯克州的克什特姆市,东南距离车里雅宾斯克市100 km。矿床为热液脉石英型,赋存于上太古界乌法雷变质杂岩系(Ufalei metamorphic complex)的片麻岩和混合岩中。脉石矿物主要有长石、云母、碳酸盐、锆石、独居石等(Götze *et al.*, 2018)。矿区总长15 km,宽1~3 km,面积20 km²,石英储量136万吨(Russia Quartz LLC, 2019)。用作高纯石英原料的主矿体为175号脉,呈北东-南东向分布在卡拉巴什市(Karabash)西侧。2014年,IMC Montan公司按照JORC标准对175号脉进行储量评估,显示该矿体高纯石英原料矿储量超过50万吨。

矿床开发始于20世纪60~70年代,至今已超过50年。早期采矿主要用于建筑材料、玻璃等传统行业。2011年8月,俄罗斯石英有限责任公司(Russia Quartz LLC)开始采矿生产高纯石英砂。175号脉是俄英公司最重要的高纯石英原料矿体,年产高纯石英砂3500吨,2022年产能预计达6000吨/年,矿山可满足满负荷生产30年服务年限。此外,克什特

① Solar Quartz Technologies. 2017. Information and disclosure statement pursuant to rule 15c2-11(a)(5). Nevada; Solar Quartz Technologies Inc., 13.

② Solar Quartz Technologies. 2016. History & Business overview. Melbourne, Australia; Solar Quartz Technologies Inc., 5.

姆市库兹涅奇欣斯克(Kuznechikhinsk)、维雅索夫卡(Vjasovka)、伊特库尔斯克(Itkulskoe)、博洛特纳亚(Bolotnaya)等地脉石英质量和成因与175号脉相似(Götze *et al.*, 2018),说明该区高纯石英原料资源潜力较大。

俄罗斯石英有限责任公司采用标准的高纯石英砂生产工艺。在矿区对原矿进行粉碎、分级、擦洗等机械分选后,半成品运至克什特姆市加工厂进行重选、磁选、浮选、酸浸、煅烧和氯化焙烧等工艺,进一步提纯后制成RQ系列高纯石英砂。产品杂质元素总量可控制在 12×10^{-6} 以下,其RQ-1K产品的杂质甚至低于 9×10^{-6} ,可广泛用于照明、光伏、半导体业等领域。

2.4.2 萨兰保尔矿床

萨兰保尔矿床地处俄罗斯汉特-曼西自治区(Khanty-Mansi Autonomous Okrug-Ugra)别列佐夫斯基区(Berezovsky District)的西北缘,东南距萨兰保尔村85 km。矿床为热液脉石英型。矿石半透明-透明状,呈玻璃光泽;脉石矿物包含少量云母、方解石、绿泥石、磷灰石以及微量的黄铁矿、榍石。矿床主要由嘟嘟(Dodo)、内斯特舒尔(Nester-Shor)和库斯奥伊卡(Khus-Oika)3个矿区组成。嘟嘟矿区资源量最大。根据2014年3个矿区的勘探报告,可用作高纯石英的资源量为33万吨(Development Corporation JSC, 2017)。此外,在矿区范围外发现有多条尚未勘探的石英脉,远景资源量可能更为可观。

萨兰保尔脉石英矿床的开发经历了复杂的曲折历程。1998年,为开发该矿,汉特-曼西自治区委托北卡罗来纳大学MRL实验室对矿石进行杂质元素分析和选矿实验,结果显示矿床具有生产高纯石英的潜力。2000年,自治区政府成立国有独资极地石英公司(Polar Quartz),开始在嘟嘟矿区采矿,并在尼亚甘(Nyagan)和乌斯季普瓦(Ust-Puyva)建设加工厂和通往矿区的道路等基础设施。极地石英成立后受困于资金不足、管理体制混乱的难题,于2014年才完成一期矿区和加工厂建设。但是,随着公司于2018退市成为股份公司,二期建设至今尚未完成。

公司把矿区采出的原矿运至35 km外的乌斯季普瓦加工厂,进行磨碎、光电分选和擦洗,其半成品运至尼亚甘,进行重选、磁选和浮选后,再转运到克什特姆市的加工车间完成酸浸、煅烧、磁选和纯度测试等流程,获得高纯石英砂。产品涵盖高纯石英砂(99.9%~99.995%)、硅微粉(99.1%~99.9%)和石

英坭坩制品,产量较低(Polar Quartz, 2020)。

2.5 毛里塔尼亚

2.5.1 乌姆阿奎尼纳矿床

矿床位于毛里塔尼亚西部的努瓦迪布湾省(Dakhlet Nouadhibou),西距努瓦迪布港口130 km(图1)。矿床为热液脉石英型,以岩墙脉状侵入太古宙雷吉巴特地盾(Reguibat Shield)的花岗片麻岩和片岩中(Schofield and Gillespie, 2007)。矿石呈浅灰色的半透明状、光滑透明状,部分采样矿石的 SiO_2 含量大于99.8%。地表出露的矿体表现为破碎的大块脉石英砾石,其上覆盖少量红土。石英的推断资源量500~1 000万吨(Feytis, 2010),但因缺少钻孔验证和测试分析以及必备的选矿实验,可用作高纯石英原料的资源量不明。

矿床的探矿权由毛里塔尼亚矿产公司(Mauritanian Minerals Co.)持有。2010年,该公司计划采用露头开采方式,为金属硅行业提供石英原料,并规划生产高纯熔融石英,用于石英坩埚、卤素灯、液晶屏、石英锭等高端领域。然而,虽有报道称2013年该公司开始生产石英砂(Hughes, 2013; Taib, 2017),但实际上由于不明原因,公司没有办理采矿权,截至目前未能进行有效的采矿活动。

2.5.2 查米矿床

查米矿床位于努瓦迪布湾省东部,距乌姆阿奎尼纳矿20 km(图1)。矿床成因、矿石类型、围岩、赋存特征与乌姆阿奎尼纳矿类似,矿石 SiO_2 含量为98%~99.9%。部分矿石样品经安扎普兰公司提纯后检测,纯度和质量可达IOTA 4标准。

当前,毛里塔尼亚石英股份公司(Quartz Inc. SA Mauritania)在查米矿采矿、加工产品。表层2.7 m以上矿体的高纯石英原料探明储量72.5万吨;2.7 m以下矿体可延伸至8 m,探明储量有进一步扩大的空间(Quartz Inc., 2020)。石英砂的生产工艺较为简单,采用直线筛、振动筛、色选机、选振筛、筒式磁选机等设备进行碎磨、分级、磁选,制成粒度0.1~12.5 mm的产品。

2.6 加拿大

在加拿大魁北克省东南部约翰比兹湾(Johan Beetz Bay)的海岸带(图1),10条北东-南西向的热液脉石英矿体出露地表,即约翰比兹高纯石英原料矿。矿区西距圣皮埃尔港(Havre St-Pierre)68 km,距七岛港(Sept-Iles)300 km。区内主要有元古宙石英岩、辉长岩、花岗片麻岩。硅质热液侵入北-北东

向的科斯塔贝尔断层,形成乳白色的石英矿脉(Bathalon, 2014)。

目前,加拿大 PAL 公司(Placements Appalache Ltée)持有矿区的探矿权。2010年,为准确了解矿区的矿石是否能用作高纯石英原料,PAL 公司对矿区的典型矿脉进行采样,并委托安扎普兰公司分析 2 号脉的矿石质量,结果显示矿石的 SiO_2 含量为 98.7%~99.6%,杂质元素 B 和 P 的平均含量分别低于 0.25×10^{-6} 和 0.2×10^{-6} ,可用来生产光伏石英坩埚。在计入采矿损失后,2 号脉和 9 号脉地表矿体的高纯石英控制资源量分别为 174.3 万吨和 50.7 万吨,合计 225 万吨(Bathalon, 2014)。PAL 公司曾于 2015 年 5 月计划开展可行性研究,截至目前没有开展进一步的活动,矿床开发可能陷入停顿。

2.7 中国

近年来,我国一些石英砂矿山企业努力研发高纯石英的提纯工艺,取得了突破性进展,如江苏太平洋石英股份公司可生产 99.99%~99.9994% 的高纯石英砂,2018 年其产能达到 1.13 万吨(贾德龙等, 2019)。湖北蕲春、江苏东海、安徽旌德和太湖等地的优质热液脉石英可能具有高纯石英原料的潜力(焦丽香, 2019)。本文以湖北省蕲春县灵虬山脉石英矿为例,说明我国高纯石英原料矿的特征和开发现状。

灵虬山脉石英矿位于蕲春县西北约 20 km 的横车镇,为热液脉石英型,由硅质热液侵入太古宙大别山群红安组的黑云母斜长片麻岩、花岗片麻岩和角闪岩而形成(陈凌瑾, 2009)。湖北省基本建设委员会 401 队于 1971~1973 年对矿床进行勘探,发现 6 条脉石英矿体,共提交脉石英储量 387.4 万吨(湖北省基本建设委员会四〇一队, 1972)^①。钻孔取样分析结果表明,矿石几乎全由石英组成,晶体粒径 1~2 mm,含微量黄铁矿、白云母、绢云母、绿泥石、辉钼矿等。矿石 SiO_2 纯度 >99.35%, Al_2O_3 <0.22%, Fe_2O_3 <0.02%。目前,湖北省蕲春县灵虬山石英矿持有矿床的采矿权,露天开采,其设计矿山规模为年采 1.5 万吨矿石。

3 讨论和结论

目前,全球经济增长乏力,迫切呼唤新科技革

命,世界经济提振依赖于新能源、新材料等新型产业的发展。以半导体、光伏、光纤、新型玻璃等产业为代表的高端制造业,特别是 5G 产业的高速建设将需要纯度更高、产量更大的高纯石英砂及其制品。综合分析全球高纯石英原料矿的资源分布特征和开发现状,可以得出以下结论:

(1) 高纯石英原料及其产品的供应格局将发生深刻变化

目前,虽然美国斯普鲁斯派恩矿拥有独特的白岗岩型高纯石英原料矿,提供全球 90% 的高纯石英砂,矽比科公司也垄断了 IOTA 超纯石英的生产和销售,其他国家难以发现类似的矿床,但近年来各国加大勘查找矿力度,已发现 10 多处可用作高纯石英原料的矿床,生产 99.9%~99.999% 的低-中档高纯石英砂,逐渐打破斯普鲁斯派恩矿在高纯石英砂产业的垄断格局。

(2) 高纯石英原料矿石类型多样,具有独特的成矿背景

高纯石英原料的矿石类型非常广泛,既有热液脉石英、白岗岩、伟晶岩型,也有花岗闪长岩的风化残积型矿石,更有长石云母矿尾矿、高岭土尾矿、金矿尾矿等尾矿型矿石。虽然矿石类型多样,但大部分高纯石英矿产于太古宙-元古宙黑云母片麻岩、花岗片麻岩、片岩等古老变质岩系中,受古生代-中生代花岗质岩浆活动控制,经历了长期而缓慢的变质过程,形成质量优异的高纯石英。

(3) 对我国的启示

首先,在找矿方向上,应立足国内资源,大力加强对境内太古宙-元古宙变质岩系,特别是苏鲁-大别超高压变质带中纯度较高的玻璃用脉石英、伟晶岩、白岗岩的筛查梳理,加强地质调查和质量评价;同时,应关注花岗闪长岩、伟晶岩和高岭土矿开采后残留尾矿中的石英。在发现可用作高纯石英原料的矿石后,支持地勘单位和矿山企业及时跟进勘查,开展选矿实验,评估资源潜力,估算资源量。其次,为保障新材料新能源等新型创新产业所需的高纯石英资源,我国应打破高纯石英砂进口渠道单一的境况,加大挪威、俄罗斯、澳大利亚等国高纯石英砂及产品的进口力度;此外,应支持鼓励国内矿山企业通过合作,开发毛里塔尼亚等国的高纯石英原料矿,拓展高纯石英的来源渠道,维护国家战略安全。

① 湖北省基本建设委员会四〇一队, 1972. 湖北省蕲春县灵虬山脉石英矿区地质勘探报告。

References

- Alper A. 2019. High-Purity Quartz Ltd (HPQ) Supplying the booming solar PV and semiconductor industries; Interview with Stuart Jones, CEO[EB/OL]. Retrieved August 11 2020. <https://ultrahpq.com/2019/11/11/high-purity-quartz-ltd-hpq-supplying-the-booming-solar-pv-and-semiconductor-industries-interview-with-stuart-jones-ceo/>.
- Australian Silica Quartz. 2020. Research and development projects[EB/OL]. Retrieved August 11 2020. <http://austsilicaquartz.com.au/projects>.
- Bathalon M. 2014. Valuation and Mineral Potential of Johan Beetz Quartz Deposit, QC, Canada Final Report[M]. Québec: Ministère des Ressources Naturelles, Gouvernement du Québec. GM 68455, 13.
- Broadhurst S D and Hash L J. 1953. The Scrap Mica Resources of North Carolina[M]. Raleigh: Department of Conservation and Development, North Carolina, 66.
- Brobst D A. 1962. Geology of the Spruce Pine District Avery, Mitchell, and Yancey Counties, North Carolina[M]. Washington: Geological Survey Bulletin 1122-A, 1~26.
- Camitz J. 2016. Estimation of Mineral Resources at Nesodden hydrothermal Quartz deposit Southwest Norway[M]. MIRAB Mineral Resurser AB, 89.
- Chen Lingjin. 2009. Deposits characterization of siliceous raw materials for glass in China[J]. China Non-Metallic Mining Industry Herald, (Supplement): 7~9(in Chinese).
- Creswick Quartz. 2015. Suppliers of high purity quartz[EB/OL]. Retrieved August 11 2020. http://www.creswickquartz.com.au/info/Creswick_Company.pdf.
- Development Corporation JSC. 2017. Полярный Урал станет поставщиком ресурсов для освоения космоса[EB/OL]. Retrieved August 11 2020. <http://www.cupp.ru/sobytiya/polyarnyj-ural-stanet-postavshhikom-resursov-dlya-osvoeniya-kosmosa/>.
- Feytis A. 2010. Mauritanian quartz[N]. Industrial Minerals. London: Fastmarkets.
- Götze J. 2009. Chemistry, textures and physical properties of quartz-geological interpretation and technical application[J]. Mineralogical Magazine, 73 (4): 645~671.
- Götze J, Pan Y, Müller A, *et al.* 2018. Trace element compositions and defect structures of high-purity quartz from the southern Ural Region, Russia[J/OL]. Minerals, 7 (189). doi:10.3390/min7100189.
- Geis H P. 1964. Befaring av kvartsforekomst Nesodden ved Løvfallstrand, Hardanger[M]. Trondheim, Norway. NGU Rapport BA 7 978, 5.
- Glover A. 2006. The Spruce Pine Mining District: A brief review of the history, geology, and modern uses of the minerals mined in the Spruce Pine Mining District, Mitchell, Avery and Yancey Counties, North Carolina[A]. Reid J C. Proceedings of the 42nd Forum on the Geology of Industrial Minerals: Information Circular 34[C]. Asheville, North Carolina, USA: North Carolina Geological Survey, 269~271.
- Groppo J G. 1980. Recovery of Feldspar and Quartz from Spruce Pine Filter Cake Waste[M]. Asheville, North Carolina, USA. MRL Report No. 80-23-P, 12.
- 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.
- HPQ Materials. 2017. HPQM completes groundworks and preliminary drilling programme[EB/OL]. Retrieved August 11 2020. <http://www.hpquartz.com/2017/02/28/hpqm-completes-groundworks-and-preliminary-drilling-programme/>.
- Hughes E. 2013. High purity quartz; A cut above[N]. Industrial Minerals. London: Fastmarkets.
- I-Minerals. 2020a. I-Minerals commences pre-feasibility study for a halloysite-metakaolin operation[EB/OL]. Retrieved August 11 2020. <https://www.imineralsinc.com/news/i-minerals-commences-pre-feasibility-study-for-a-halloysite-metakaolin-operation>.
- I-Minerals. 2020b. I-Minerals completes pre-feasibility study of its halloysite-metakaolin project NPV 10% US \$ 48 million and IRR 20% (BeforeTAX)[EB/OL]. Retrieved August 11 2020. <https://www.imineralsinc.com/news/i-minerals-completes-pre-feasibility-study-of-its-halloysite-metakaolin-project-npv10-uscad48-million-and-irr-20-before-tax>.
- Jia Delong, Zhang Wanyi, Chen Conglin, *et al.* 2019. Global resource status and China's development suggestions of high purity quartz[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 39 (5): 111~117 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Lixiang. 2019. Current situation and supply demand analysis of the development and utilization of vein quartz resources in China[J]. China Non-Metallic Mining Industry Herald, (2): 11~14 (in Chinese with English abstract).
- Miller B V, Fetter A H and Stewart K G. 2006. Plutonism in three orogenic pulses, Eastern Blue Ridge Province, southern Appalachians[J]. Geological Society of America Bulletin, 118 (1~2): 171~

- 184.
- Müller A, Ihlen P M, Wanvik J E, *et al.* 2007. High-purity quartz mineralisation in kyanite quartzites, Norway[J]. *Mineralium Deposita*, 42: 523~535.
- 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.
- Nelson S. 2009. Silicon Valley's secret recipe[EB/OL]. Retrieved March 11 2020. <https://news.bbc.co.uk/2/hi/technology/8178580.stm>.
- Polar Quartz. 2020. Кварцевый песок специального применения[EB/OL]. Retrieved August 11 2020. <https://polar-quartz.ru/internet-magazin/folder/kvarcevyj-pesok-specialnogo-primeneniya>.
- Quartz Inc. 2020. About Us: Mine Asset[EB/OL]. Retrieved August 11 2020. https://quartzinc.com/about_us.php.
- Roberts J. 2012. High purity quartz: under the spotlight[N]. *Industrial Minerals*. London: Fastmarkets.
- Russia Quartz LLC. 2019. Russian Quartz presentation General 2019 CN[EB/OL]. Retrieved August 11 2020. <http://russianquartz.com/upload/iblock/954/Russian-Quartz-presentation-General-2019-CN.pdf>.
- Schlanz J W. 2009. High Pure and Ultra-High Pure Quartz[A]. Kogel J E. *Industrial Minerals & Rocks: Commodities, Markets, and Uses*[C]. Littleton, Colorado, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 833~837.
- Schofield D I and Gillespie M R. 2007. A tectonic interpretation of "Eburnean terrane" outliers in the Reguibat Shield, Mauritania[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 49: 179~186.
- Swanson S E and Veal W B. 2010. Mineralogy and petrogenesis of pegmatites in the Spruce Pine District, North Carolina, USA[J]. *Journal of Geosciences*, 55: 27~42.
- Taib M. 2017. The mineral industry of Mauritania[A]. U. S. Geological Survey. 2014 Minerals Yearbook[C]. Denver, Colorado, USA: U. S. Geological Survey, 29. 1~29. 7.
- The Quartz Corp. 2020. Founded in Technical Expertise [EB/OL]. Retrieved August 11 2020. <https://thequartzcorp.com>.
- Ultra HPQ. 2020. High Purity Quartz Limited secures JORC resource upgrade[EB/OL]. Retrieved August 15 2020. <https://ultrahpq.com/2020/08/12/high-purity-quartz-limited-secures-jorc-resource-upgrade/>.
- 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 Ling. 2019. Industrial types and application characteristics of quartz ore deposits[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): 267~272(in Chinese with English abstract).
- Yue Liqin. 2014. Review on preparation technology of high purity quartz[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 1: 16~19 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dexian, Dai Tagen and Rusk B G. 2011. Advances in quartz research[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30 (2): 333~341 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈凌瑾. 2009. 我国玻璃硅质原料矿床地质特征[J]. *中国非金属矿工业导刊*, (增刊): 7~9.
- 贾德龙, 张万益, 陈丛林, 等. 2019. 高纯石英全球资源现状与我国发展建议[J]. *矿产保护与利用*, 39 (5): 111~117.
- 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.
- 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): 268~272.
- 岳丽琴. 2014. 高纯石英制备技术评述[J]. *矿产综合利用*, 1: 16~19.
- 张德贤, 戴塔根, Rusk B G. 2011. 石英研究进展[J]. *岩石矿物学杂志*, 30 (2): 333~341.