

DOI: 10.12401/j.nwg.2023119

中国高纯石英产业链现状及发展建议

李金超, 栗亚芝*, 孔会磊

(中国地质调查局西安地质调查中心, 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710119)

摘要: 高纯石英是世界稀缺、中国短缺资源, 关系到中国的半导体芯片、光伏和航空航天等关键性新兴产业发展。通过对中国目前高纯石英产能不足、加工技术相对落后等现状分析, 揭示缺少高纯石英质量评价标准是制约中国高纯石英产业发展的关键因素, 国内缺少高品质优质原料矿是制约中国高纯石英产业健康发展的“卡脖子”问题。进一步研究指出, 在新一轮找矿突破战略行动中, 加强产学研用相结合, 公益性勘查项目优选一批可供出让的优质高纯石英原料矿的勘查区块, 拉动商业勘查, 提升高品质优质原料矿的供应能力, 切实保障中国高纯石英产业链安全。

关键词: 高纯石英; 高品质优质原料矿; “卡脖子”问题; 勘查区块; 产业链安全

中图分类号: P619.233; TQ127.2 文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)05-0214-09

Current Situation and Development Suggestions of China's High-Purity Quartz Industry Chain

LI Jinchao, LI Yazhi*, KONG Huilei

(Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: As the scarce resource in the world and China, high-purity quartz is related to economic security, national defense security and the security of strategic emerging industries such as semiconductor chips, photo-voltaics and aerospace. This paper analyzes the current situation of high-purity quartz in China, such as the shortage of production capacity and the backward processing technology. The research shows that the lack of high-purity quartz quality evaluation standard is the main factor restricting China's high-purity quartz industry, and the lack of high-quality raw material ore in China is the “bottleneck problem” restricting the healthy development of China's high-purity quartz industry. Therefore, it is proposed that in the new round of prospecting breakthrough action, we should strengthen the industry-university-research cooperation, and select a number of high-quality high-purity quartz raw material ore exploration blocks for sale in public welfare exploration projects, so as to ensure the safety of industry chain in China.

Keywords: high-purity quartz; high-quality raw material ore; bottleneck problem; exploration blocks; safety of industry chain

收稿日期: 2023-04-07; 修回日期: 2023-06-21; 责任编辑: 姜寒冰

基金项目: 中国地质调查局项目“西北地区铜镍钴等战略性矿产资源调查”(DD20230032), “西昆仑-阿尔金成矿带铁锰稀有金属矿产地质调查”(DD20230285)联合资助。

作者简介: 李金超(1976-), 男, 博士, 正高级工程师, 从事区域成矿及成矿规律研究。E-mail: lijinchao0313@163.com。

*通讯作者: 栗亚芝(1979-), 女, 高级工程师, 从事地质勘查及成矿规律研究。E-mail: liyazhi2005@163.com。

高纯石英与国家“十四五”战略性新兴产业中新材料产业、航空航天及新一代信息技术等8大领域密切相关(郝文俊等, 2020)。中国高纯石英研究和开发利用起步晚(汪灵等, 2022), 在加工技术壁垒、设备相对落后和半导体厂商认证难等多种不利因素下, 目前在高纯石英加工工艺、石英玻璃制品等多方面都取得较大进展(汪灵等, 2014; 贾德龙等, 2019), 与国外领先企业差距逐渐缩小。但是, 中国高端高纯石英砂目前存在产能严重不足、对外依赖度高、几乎全部需要进口等问题(王九一, 2021), 解决高端高纯石英“卡脖子”问题首要是找到优质高纯石英原料矿。鉴于高纯石英重要的战略性矿产属性(唐金荣等, 2014; 陈正国等, 2021; 汪灵等, 2022), 亟待开展高纯石英产业链现状研究, 旨在提出中国高纯石英产业健康发展的应对措施, 支撑高纯石英优质原料矿战略安全。

1 全球高纯石英原料矿禀赋特征

1.1 高纯石英是原料矿加工提纯后的矿产品

高纯石英是指以花岗伟晶岩、脉石英和天然水晶为原料经提纯后的一种石英砂产品(汪灵, 2011, 2022; 王自国等, 2021), 能够经加工提纯高纯石英的天然矿产资源称之为高纯石英原料矿(王自国等, 2021)。影响原料矿品质因素主要包括石英晶体伴生的脉石矿

物、流体包裹体杂质和晶体结构杂质。现有的加工提纯技术, 流体包裹体杂质和晶体结构杂质去除难度大(吴道等, 2015; 郭文达等, 2019; 王云月等, 2021; 张海啟等, 2022b; 杨晓勇等, 2022)。目前研究表明, 花岗伟晶岩中石英由高温岩浆缓慢结晶而成, 石英体系中杂质易析出, 气液包裹体极少, 石英纯度极高(王云月等, 2021; 张海啟等, 2022b)。因此, 花岗伟晶岩是中国寻找优质高纯石英原料矿的新方向(张海啟等, 2022d)。

目前, 高纯石英没有明确概念, 国内外学者对高纯石英界定没有形成共识。国外学者认为高纯石英是指 SiO_2 含量大于 99.995%(4N5) 的石英产品(Harben, 1994), 同时对 Al、Ti 等关键有害元素含量提出限定(Müller et al., 2007, 2012)。国内有学者(汪灵等, 2019, 2022; 张海啟等, 2022d)认为: 高纯石英是指 SiO_2 含量 > 99.9%(3N) 的石英产品, 同时将其细化为低端高纯石英(3N)、中端高纯石英(4N)、中高端高纯石英(4N5)、高端高纯石英(4N8)等4类。也有一些学者(张佩聪等, 2012)认为: 高纯石英是指 SiO_2 含量大于 99.99%(4N) 的石英产品。

1.2 全球高纯石英原料矿禀赋特征

截止 2019 年底, 全球高纯石英原料矿资源约为 7300 万 t(王九一, 2021), 主要分布在美国、挪威和澳大利亚等国家(图 1), 主要为花岗伟晶岩型、热液脉石英型和风化残积型等。花岗伟晶岩型原料矿以美国斯

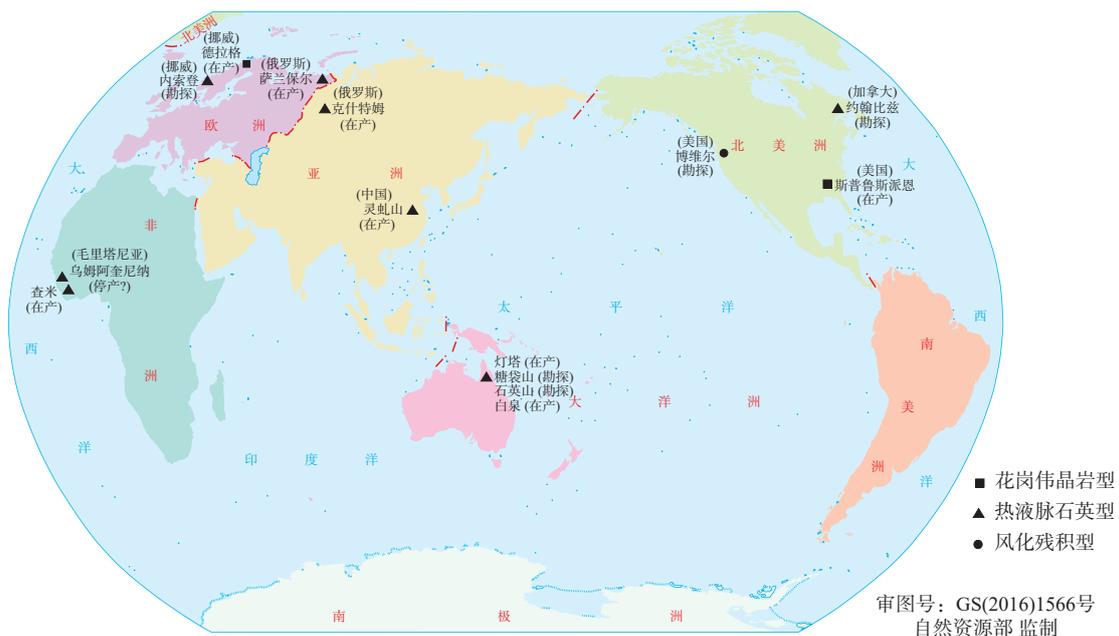


图 1 全球高纯石英原料矿分布图

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

普鲁斯派恩矿最为著名,资源量约为1000万t,该矿床曾供给了全球90%以上高纯石英砂的需求量(王九一,2021)。目前在产的热液脉石英型原料矿以澳大利亚白泉矿最为著名,矿石的SiO₂纯度>99.99%,年产4N及以上高纯石英3万t(王九一,2021)。中国高纯石英原料矿主要产自安徽灵虬山矿,属热液脉石英型,矿石的SiO₂纯度>99.35%。该矿床是20世纪70年代发现,储量为387.4万t。目前露天开采,设计矿山规模为年采1.5万t矿石(王九一,2021)。

2 高纯石英的重要地位

2.1 高纯石英在新兴产业中的应用

高纯石英产品因耐高温、热膨胀系数低、透光性好、电绝缘性好、化学稳定性好、抗激光损伤能力强、光谱特性好和抗热震性能好等性能(田冲等,2022;谢泽丰等,2022),是战略性新兴产业的重要支撑且不可替代的材料。高纯石英产品主要包括石英坩埚、石英管棒、石英舟、石英锭、石英纤维和石英钟罩等。广泛应用到半导体、光纤、光伏、航空航天和武器装备等(颜玲亚等,2020)(图2)。其中,半导体领域、光纤领域、光伏领域分别占高纯石英制品消费量的65%、14%、12%(郝文俊等,2020),且近年来半导体领域消费量逐年增大。航空航天领域和军工领域对高纯石英产品要求更高,如天宫二号、嫦娥五号、高超声速

导弹头罩等,虽然这些领域需求量并不高,但关系到国家尖端领域安全(王自国,2021)。

2.2 高纯石英的重要地位

高纯石英产业链关系到各个国家高新技术产业的发展(Konstantinos et al., 2015),所以高纯石英的加工制备技术和出口一直受严格管控(王云月等,2021)。日本、欧盟等将高纯石英列为关键性矿产(王自国,2021);2020年起,俄罗斯将由国家专门机构确认的高纯石英原料等战略性矿产的储量及生产数据均列为国家机密。2011年,国务院办公厅发布《找矿突破战略行动纲要(2011~2020年)》,明确高纯石英等作为关键性新兴产业所需的矿产。国家统计局发布的《战略性新兴产业分类(2018)》和国家工信部发布的《重点新材料首批次应用示范指导目录(2021年版)》等文件多次提及高纯石英及其制品。因为半导体等新兴产业战略产业急剧扩增,国外垄断企业一直通过减产控制高纯石英砂价格(张海啟等,2022d),严重影响中国高纯石英终端半导体等应用领域的供给稳定。因此,高纯石英原料矿应作为国家战略层面而引起足够重视(汪灵等,2019;王春连等,2022)。

2.3 高纯石英砂对外依赖度高、风险大

中国是高纯石英砂消费大国,也是全球第一大高纯石英砂进口国。近年来,中国高纯石英进口量约占全球进口总量的70%(郝文俊等,2020)。目前,中国高纯石英4N8级别以上原料矿全部依靠进口。

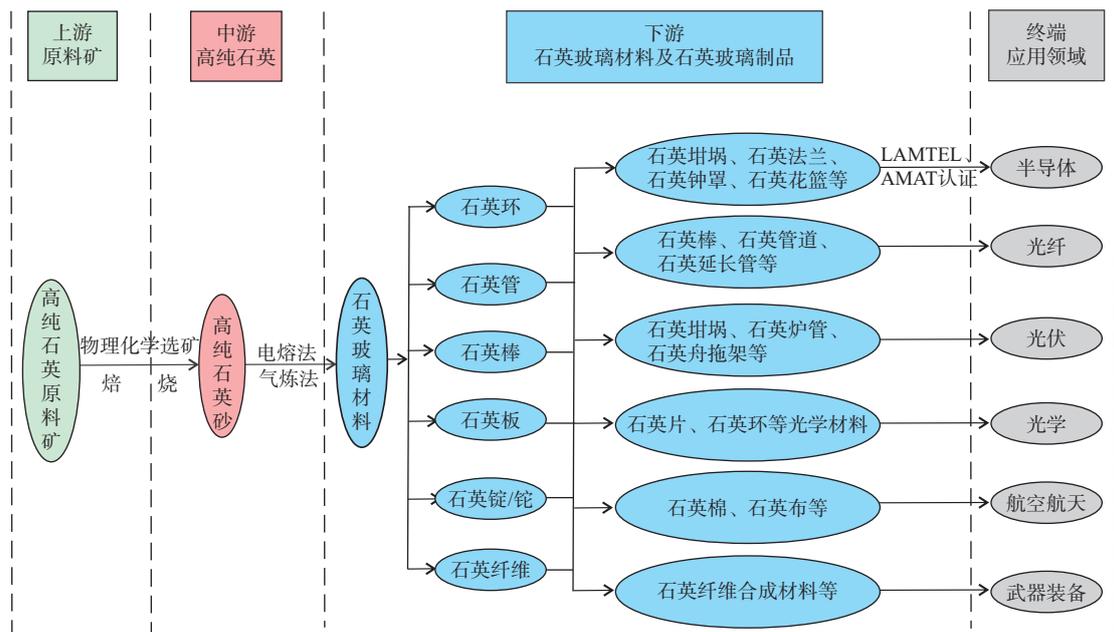


图2 高纯石英产业链简图

Fig. 2 Sketch of high purity quartz industry chain

2015~2022年,中国从国外进口 $\geq 4N$ 高纯石英8.80~15.89万t(图3),贸易额为9.54~26.51亿美元(图4);除2019、2020年外,外贸易额均在20亿美元以上;同期,中国出口 $\geq 4N$ 高纯石英0.02~1.13万t,除2021年和2022年外均在1万t以下。



数据来源于中华人民共和国海关总署《海关统计数据在线查询平台》

图3 2015~2022年中国其他含硅量 $\geq 99.99\%$ 的进出货量柱状图

Fig. 3 Bar chart of import and export volume of other silicon content $\geq 99.99\%$ in China from 2015 to 2022



数据来源于中华人民共和国海关总署《海关统计数据在线查询平台》

图4 2015~2022年中国其他含硅量 $\geq 99.99\%$ 的进出口贸易额柱状图

Fig. 4 Bar chart of import and export trade volume of other silicon content $\geq 99.99\%$ in China from 2015 to 2022

通过近10年高纯石英($\geq 4N$)进出口数据分析可知,目前国内高纯石英对外依赖度高且存在较大风险。一是随着“中国制造2025”不断推进以及中国“双碳减排”的政策等新兴战略产业不断扩展,高纯石英供需矛盾将尤为突出(李光惠等,2020)。二是过度依靠美国、挪威等国外市场进口,市场稳定性易受贸易政策影响,存在较大不确定性(贾德龙等,2019)。因高纯石英在关键性新兴产业的重要地位,这将直接关系到中国的半导体芯片、光伏和硅产业等关键性新兴产业发展。

3 中国高纯石英产业链现状

高纯石英产业链主要包括上游原料矿、中游高纯石英砂、下游高纯石英玻璃材料及高纯石英玻璃制品、终端半导体等应用领域(图2)。

3.1 高纯石英加工技术研究现状

高纯石英的概念诞生于20世纪60年代(马超等,2019),最初以天然水晶为原料。20世纪80年代以来,随着新材料新能源产业不断发展,高纯石英得到广泛应用(汪灵等,2014),欧美国家开始采用脉石英、花岗伟晶岩和变质石英岩等加工高纯石英实验研究。例如,美国尤尼明公司采用Spruce Pine花岗伟晶岩开展了高纯石英加工利用研究,目前已有成熟的花岗伟晶岩型高纯石英原料矿加工提纯技术以及优质原料矿选择标准(汪灵等,2014;张海啟等,2022b)。

由于受高纯石英加工技术壁垒等原因影响,中国高纯石英研究和生产起步较晚(汪灵等,2011),20世纪90年代才有学者开展高纯石英研究(李明伟等,1996;刘理根等,1996;张凌燕等,1996;韩宪景,1998),2010年太平洋石英公司高纯石英砂项目投产,奠定了中国高纯石英砂产业崛起。21世纪以来,中国众多学者针对高纯石英加工技术实验、脉石英和花岗伟晶岩等加工高纯石英可行性研究、综合研究等开展了前瞻性工作(张晔等,2010;吴道等,2015,2017;郭文达等,2019;马超等,2019;李育彪等,2020;魏奎先等,2020;王安书等,2022)。特别是近年来,部分学者对阿尔泰和秦岭等成矿带内的花岗伟晶岩和脉石英开展高纯石英勘查及加工可行性分析,并已取得加工提纯到4N5以上高纯石英的成果(张海啟等,2022a,2022c;田冲等,2022;刘广学等,2022;赵金洲等,2022;赵海波等,2023)。

3.2 上游中国高纯石英原料矿对外依赖度高

中国目前没有严格意义上的高纯石英原料矿储量(张海啟等,2022d)。中国高纯石英原料以水晶和脉石英为主,根据推断能提纯高纯石英(3N)的脉石英资源量共计685万t(王自国等,2021),其中水晶资源量不足7000t(赵维佳,2021)。中国高纯石英产业链上游原料矿严重不足(赵维佳,2021),且已有的脉石英原料矿以中小型为主、加工提纯难度大等问题(汪灵,2014)。因此,国内太平洋石英公司近年来依靠进口解决原料短缺的问题,特别是2019年以来太平洋

石英公司高纯石英原料矿 93%以上需要进口 (图5), 主要为印度和巴西等国家。



数据来源《江苏太平洋石英股份有限公司公开发行可转换公司债券跟踪评级报告》

图5 2017~2021年江苏太平洋石英公司原料采购量柱状图

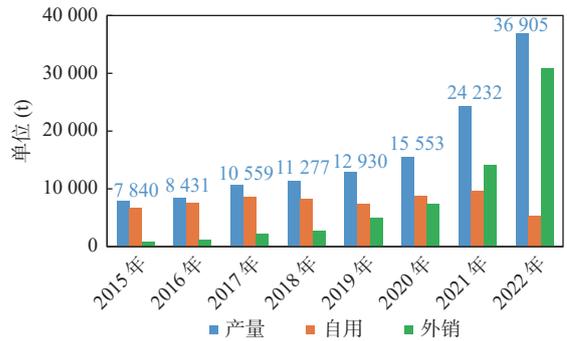
Fig. 5 Bar chart of raw material procurement volume of Jiangsu Pacific Quartz Co., Ltd. from 2017 to 2022

3.3 中游中国高纯石英砂企业与国外垄断企业差距逐渐缩小

高纯石英制备主要有原料物理化学加工提纯和四氯化硅合成等2种技术, 受资源和成本等因素影响, 目前以物理化学加工提纯为主。

目前, 全球仅美国尤尼明公司、挪威 TQC 公司以及太平洋石英公司等3家企业具备量产高纯石英砂的能力。尤尼明公司和 TQC 公司已经具有 5N 高纯石英量产, 中国尚处 4N5 阶段, 多数 4N8 及以上产品依赖进口。美国尤尼明公司和挪威 TQC 公司等2家公司长期处于高端高纯石英市场垄断地位。原因是上述公司拥有矿源充足的斯普鲁斯派恩花岗岩伟晶岩型矿床, 并拥有成熟的加工提纯技术。

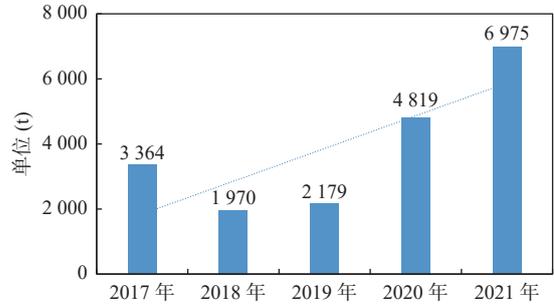
海外高纯石英砂企业高度垄断市场, 随着中国企业快速发展而逐渐缩小差距。太平洋石英公司国内外矿源类型以脉石英型为主。不同地区的矿源因杂质含量、杂质种类等存在较大差异, 提纯工艺存在一定差距。经过近20年的科技攻关, 太平洋石英公司高纯石英砂生产能力逐渐提高(图6), 该公司目前除满足自用于生产石英坩埚等高纯石英砂产品外, 还将部分高纯石英砂外销给国内企业等。但因缺少优质矿源、加工技术相对落后等原因, 目前高端高纯石英砂产能不足, 公司石英坩埚内层用等 4N8 及以上高纯石英砂主要依靠美国、挪威等国家进口(图7)。随着企业加工技术逐渐改进和企业新建高纯石英砂生产线积极扩能, 将逐步解决我国高纯石英砂对外依赖度高的问题。



数据来源于《江苏太平洋石英股份有限公司年度报告》

图6 2015~2022年江苏太平洋石英公司高纯石英砂产销柱状图

Fig. 6 High purity quartz sand production and sales bar chart of Jiangsu Pacific Quartz Co., Ltd from 2015 to 2022



数据来源于《江苏太平洋石英股份有限公司公开发行可转换公司债券跟踪评级报告》

图7 2017~2021年江苏太平洋石英公司高纯石英砂进口量柱状图

Fig. 7 Bar chart of import volume of high-purity quartz sand of Jiangsu Pacific Quartz Co., Ltd. from 2017 to 2021

3.4 中国高纯石英下游制品逐渐实现半导体国际认证

石英玻璃材料一般会以锭、筒、棒、管等形态保存, 高纯石英玻璃制品是以石英玻璃为材料制成的一系列器件, 包括石英坩埚等。石英玻璃质量主要受制备方法、工艺等影响, 国外龙头企业掌握高端玻璃市场。例如, 美国迈图在熔炼法制备石英玻璃处于国际领先地位, 贺利氏掌握气炼法制备石英玻璃技术已有120余年历史。中国的太平洋石英公司和菲利华石英公司已逐渐突破生产工艺制约, 但在高纯度和大尺寸石英玻璃制备等与国外领先企业存在一定差距。

半导体领域是石英制品附加值最高且需求量最大的领域。石英制品应用与半导体行业需要设备厂商认证, 同时存在半导体厂商高度集中、认证难和程序复杂等问题。目前, 太平洋石英公司等国内企业石英制品主要应用在光伏等低附加值领域; 利氏信越

(中国)等外资企业占据着国内高端石英市场的主要份额。随着国内中资石英玻璃制品企业积极扩能、改进加工技术和加速半导体设备厂商认证,如菲利华公司产品已通过了 TEL 扩散环节、TEL 刻蚀环节认证、LAM 认证和 AMAT 认证,太平洋石英公司产品已通过了 TEL 扩散环节、TEL 刻蚀环节认证和 LAM 认证,国内企业在半导体等行业市场占有率逐步提高,半导体等各领域石英玻璃制品将逐步实现国产化。

4 制约高纯石英砂产业的因素分析

随着中国高纯石英产业链中下游企业逐渐改进加工工艺,同时加速半导体厂商认证的步伐等,产业链中下游与国外差距将逐步缩小,石英制品在光伏、半导体等领域将逐渐实现国产化。但上游缺少优质原料矿是制约高纯石英产业健康发展的关键因素。

4.1 缺乏适合现阶段高纯石英统一质量评价标准

因半导体、光伏等不同行业对石英产品需求标准不同,中国目前没有高纯石英的明确定义及符合现阶段的高纯石英质量评价标准。

行业标准《玻璃工业用石英砂的分级》(QB/T 2196-1996)规定: $\text{SiO}_2 \geq 99.98\%$, Fe_2O_3 等杂质含量符合一定要求,定为高纯石英砂-超高纯石英砂级(中国轻工总会,1996)。国家标准《光伏用高纯石英砂》(GB/T 32649-2016)规定:高纯石英砂中二氧化硅含量 $\geq 99.99\%$ (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等,2016)。湖南省地方标准《高纯($\text{SiO}_2 \geq 99.997\%$)的石英砂》(DB43/T 1167-2016)规定: $\text{SiO}_2 \geq 99.997\%$ (湖南省质量技术监督局,2016)。国家海关将其他含硅量 $\geq 99.99\%$ 的硅单独商品编码 HS28046190,以区别石英砂及硅砂(商品编码 25051000)。《矿产资源工业要求参考手册》(2021年修订版)将高纯石英划分为3个等级:低端为 $\text{SiO}_2 \geq 99.9\%$ (3N);中端为 $\text{SiO}_2 \geq 99.99\%$ (4N);高端为 $\text{SiO}_2 \geq 99.998\%$ (4N8)(矿产资源工业要求参考手册编委会,2022)。

高纯石英受经济、技术发展阶段及新兴产业发展等诸多因素决定,随着石英产品 3N 和 4N 已实现国产化(汪灵等,2022),4N5 及以上产品目前远不能满足国内需求。结合国内外研究成果,充分考虑目前中国高纯石英发展需求、应用领域及国内外已有的标准。因此,笔者认为将 4N5 及以上定义为高纯石英为宜,同时对 Al、Ti 等主要杂质含量限定。

4.2 缺乏高纯石英原料的选择标准

行业标准《平板玻璃用硅质原料》(JC/T 529-

2000)和《光伏玻璃用硅质原料》(JC/T 2314-2015),明确了等级划分的标准,但未指出硅质原料的主要来源(国家建筑材料工业局,2000,2015)。《矿产地质勘查规范——硅质原料类》(DZ/T 0207-2020)中指出“本规范所指硅质原料为主要适用于玻璃、冶金、铸型及部分适用于陶瓷和高纯石英的硅质原料,包括石英岩、石英砂岩、石英砂、脉石英和粉石英”(中华人民共和国自然资源部,2020)。该规范明确了硅质原料的勘查评价要求,但对高纯石英用硅质原料来源未完全覆盖,如全球高纯石英最重要的原料矿来源为花岗伟晶岩。

《矿产资源工业要求参考手册》(2021年修订版)指出:原料评价从 SiO_2 含量、嵌布粒度、脉石矿物种类、包裹体特征和晶格杂质等5种指标,当石英原料在5个指标中有3个及以上达到A级时,可以推荐为高纯石英原料;但未明确指出高纯石英的主要原料来源。以往研究认为 $\text{SiO}_2 > 99.9\%$ 石英原料就能加工制备高纯石英砂,国内学者针对花岗伟晶岩、脉石英、天然水晶、石英砂岩、石英岩等开展过高纯石英提纯加工,但截至目前未见有石英砂岩等提纯到高纯石英砂的报道。因此,造成人力、经济和时间等诸多浪费(矿产资源工业要求参考手册编委会,2022)。

结合国内外已有研究成果,笔者认为花岗伟晶岩、脉石英和天然水晶为高纯石英的主要原料来源,特别是花岗伟晶岩。同时,从嵌布粒度、脉石矿物、包裹体种类和晶格杂质含量等矿物学研究,筛选是否具有高纯石英原料的前景。

4.3 重视石英矿的事先审批和事后监管,避免造成稀缺资源的浪费

2019年以来,多数省份将玻璃用石英矿采矿权下放给市级自然资源主管部门审批。高纯石英市场需求量大,近年来石英加工企业剧增;多数石英砂生产厂家为小型企业,设备相对落后且加工工艺存在较大欠缺。因此,存在有望加工为高纯石英的原料仅加工成3N石英产品。此外,还存在部分石英原矿未经提纯加工直接低端产品销售,优质矿物资源价值被低估贱卖等问题。因此,省市自然资源主管部门加强管控玻璃用石英矿勘查开发审批登记,推动矿产资源节约集约利用,避免造成稀缺资源的浪费。

5 发展建议

5.1 国家层面制定符合现阶段的高纯石英评价标准

随着“中国制造2025”及半导体等新兴战略产

业的高速发展,国内对高纯石英的产量更难以满足需求。国家层面出台高纯石英的质量评价标准体系,明确高纯石英的定义及评价标准体系。

5.2 公益性勘查单位发挥高纯石英原料矿勘查主力军

目前,中国在高纯石英加工技术等取得较大进步,但缺少优质高纯石英原料矿,成为制约中国高纯石英取得突破的关键环节。

花岗伟晶岩因规模大、杂质少及品质稳定等优点,是高纯石英的优质原料新领域、新方向。中国阿尔泰、秦岭等地存在大量的花岗伟晶岩带,仅阿尔泰就有十余条花岗伟晶岩(杨富全等,2021)。因此,在新一轮找矿突破战略行动中,公益性勘查单位加大对花岗伟晶岩带综合评价研究(张照伟等,2022)。通过室内预研究圈定成矿远景区,通过矿产地质调查、矿物学研究、加工提纯试验、钻探等工作,圈定高纯石英原料矿靶区。

5.3 加快产学研用相结合, 优选一批优质高纯石英原料矿勘查区块

中国众多科研机构 and 加工生产企业在高纯石英加工提纯和质量检测技术等取得一定的成果,但科研和生产存在一定脱钩。勘查单位、科研机构的可行性实验研究与企业的产业化生产联系不够,造成技术成果仅停留在实验室。

国家级实验室(或国家级研究中心)与国内行业领先的企业强强联合,加强花岗伟晶岩型为主高纯石英加工工艺创新研究,对公益性勘查单位新发现已加工提纯4N5及以上的高纯石英有利地区,发现一处评价一处,尽快优选一批高纯石英有利勘查区块。

6 结语

(1)高纯石英是新兴战略产业的重要支撑,但中国目前高纯石英远远不能满足需要,特别是4N8及以上产品主要依靠美国及挪威等进口,存在较大的风险因素。

(2)中国高纯石英研究和加工工艺等取得较大进步,与国外差距逐渐缩小。但目前未有高纯石英质量评价标准等规范引领行业健康发展,缺少高品质的优质原料矿成为制约中国高纯石英产业链的“卡脖子”问题。

(3)在新一轮找矿突破战略行动中,加大产学研用相结合。公益性勘查单位成为原料矿勘查主力军,国家级实验室和行业领先企业加强花岗伟晶岩型等高纯石英加工工艺技术创新研究,优选原料矿有利勘

查区块,助推“中国制造2025”和新兴战略产业发展。

致谢:匿名审稿专家提出了诸多建设性意见,李侃高级工程师、金谋顺高级工程师对文章素材提供诸多建议,在此一并致谢。

参考文献(References):

- 陈正国,颜玲亚,高树学. 战略性非金属矿产资源形势分析[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2021, 146(2): 1-9.
- CHEN Zhengguo, YAN Lingya, GAO Shuxue. Analysis on the situation of strategic non-metallic mineral resources[J]. *China Non-metallic Minerals Industry*, 2021, 146(2): 1-9.
- 郭文达,韩跃新,朱一民,等. 高纯石英砂资源及加工技术分析[J]. *金属矿山*, 2019, 512(2): 22-28.
- GUO Wenda, HAN Yuexin, ZHU Yimin, et al. Analysis of High-purity Quartz Sand Resources and It's Processing Technologies[J]. *Metal Mine*, 2019, 512(2): 22-28.
- 国家建筑材料工业局.《平板玻璃用硅质原料》JC/T 529-2000[S]. 国家建筑材料工业局, 2000.
- 国家建筑材料工业局.《光伏玻璃用硅质原料》JC/T 2314-2015[S]. 国家建筑材料工业局, 2015.
- 韩宪景. 超高纯石英砂深加工生产[J]. *国外金属矿选矿*, 1998, (7): 31-32.
- 郝文俊,冯书文,詹建华,等. 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*, 2020, 143(5): 15-19.
- HAO Wenjun, FENG Shuwen, ZHAN Jianhua, et al. Current situation, production, consumption and trade pattern of high purity quartz in the World[J]. *China Non-metallic Minerals Industry*, 2020, 143(5): 15-19.
- 湖南省质量技术监督局.《高纯(SiO₂≥99.997%)的石英砂》DB43/T 1167-2016[S]. 湖南省质量技术监督局, 2016.
- 刘理根,高惠民,张凌燕. 高纯石英砂选矿工艺研究[J]. *非金属矿*, 1996, 112(4): 39-41.
- 贾德龙,张万益,陈丛林,等. 等 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*, 2019, (5): 111-117.
- JIA Delong, ZHANG Wanyi, CHEN Conglin, et al. Global Resource Status and China's Development Suggestions of High Purity Quartz[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, (5): 111-117.
- 矿产资源工业要求参考手册编委会.《矿产资源工业要求参考手册》[M]. 北京:地质出版社, 2022.
- 李光惠,王超峰,詹建华,等. 高纯石英原料作为战略性矿产的分析及建议[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2020, 143(5): 20-24.
- 李明伟,韩德安,欧阳葆华. 高纯石英砂代替水晶生产透明石英玻璃[J]. *玻璃与搪瓷*, 1996, 25(2): 13-16.
- LI Mingwei, HAN Dean, OUYang Baohua. Manufacture of transparent quartz glass with high purity silica sand in place of natural crystals[J]. *Glass & Enamel*, 1996, 25(2): 13-16.

- 李育彪,肖蔚航,柯春云,等.一种以伟晶岩石英为原料制备4N高纯石英砂的方法: N202010721757.5[P]. 2020-11-03.
- 刘广学,马亚梦,刘磊,等.新疆阿尔泰地区某花岗伟晶岩型石英深度除杂技术研究[J]. 研究矿产保护与利用, 2022, 42(5): 8-14.
- LIU Guangxue, MA Yameng, LIU Lei, et al. Study on deep impurity removal technology of a granite pegmatite-type high-purity quartz in alтай region of xinjiang[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(5): 8-14.
- 马超,冯安生,刘长森,等.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, 2019, 39(6): 48-57.
- MA Chao, FENG Ansheng, LIU Changmiao, et al. Mineralogical characteristics and progress in processing technology of raw materials of high purity quartz[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(6): 48-57.
- 田冲,寿立永,崔拥军,等.南秦岭安康地区高纯石英用脉石英矿特征及质量影响因素[J]. 岩石矿物学杂志, 2022, 41(6): 1147-1158.
- TIAN Chong, SHOU Liyong, CUI Yongjun, et al. Characteristics and quality influencing factors of vein quartz deposit for high-purity quartz in Ankang area, South Qinling Mountains[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2022, 41(6): 1147-1158.
- 唐金荣,杨宗喜,周平,等.国外关键矿产战略研究进展及其启示[J]. 地质通报, 2014, 33(9): 1445-1453.
- TANG Jinrong, YANG Zongxi, ZHOU Ping, et al. The progress in the strategic study of critical minerals and its implications[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(9): 1445-1453.
- 汪灵,李彩侠,王艳,等.我国高纯石英加工技术现状与发展建议[J]. 矿物岩石, 2011, 31(4): 110-114.
- WANG Ling, LI Caixia, WANG Yan, et al. China technologies present of high purity quartz processing and the development propositions[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2011, 31(4): 110-114.
- 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.
- WANG Ling, DANG Chenping, LI Caixia, et al. Technology of high-purity quartz in China: Status quo and prospect[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(5): 267-273.
- 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.
- WANG Ling. Industrial types and application characteristics of quartz ore deposits[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(6): 39-47.
- 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.
- WANG Ling. Concept of high purity quartz and classification of its raw materials[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(5): 55-63.
- 王安书,张智慧,张亚增,等.花岗伟晶岩制备高纯石英砂可行性研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2022, (2): 81-86.
- WANG Anshu, ZHANG Zhihui, ZHANG Yazeng, et al. Feasibility study on preparation of high purity quartz sand from granite pegmatite[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2022, (2): 81-86.
- 王春连,王九一,游超,等.战略性非金属矿产厘定、关键应用和供需形势研究[J]. 地球学报, 2022, 43(5): 268-277.
- WANG Chunlian, WANG Jiuyi, YOU Chao, et al. A study on strategic non-metallic mineral definition, key applications, and supply and demand situation[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2022, 43(5): 268-277.
- 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, 41(1): 131-141.
- WANG Jiuyi. Global high purity quartz deposits: Resources distribution and exploitation status[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2021, 41(1): 131-141.
- 王云月,邓宇峰,詹建华,等.高纯石英原料特征和矿床成因研究现状综述[J]. 地质论评, 2021, 67(5): 1465-1476.
- WANG Yunyue, DENG Yufeng, ZHAN Jianhua, et al. Review on the research of characteristics and ore deposit genesis of high purity raw quartz[J]. Geological Review, 2021, 67(5): 1465-1476.
- 王自国.我国高纯石英产业战略布局思考[J]. 中国矿业, 2021, 30(2): 1-3.
- WANG Zigu. Thoughts on the strategic layout of China's high purity quartz industry[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(2): 1-3.
- 魏奎先,张洪武,马文会,等.高纯石英砂制备技术研究进展[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2020, 45(6): 9-20.
- WEI Kuixian, ZHANG Hongwu, MA Wenhui, et al. Research progress on preparation technology of high purity quartz sand[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 45(6): 9-20.
- 吴道,孙红娟,彭同江,等.青海某地脉石英矿工艺矿物学研究及可选性试验[J]. 矿冶, 2015, 24(2): 71-77.
- WU Xiao, SUN Hongjuan, PENG Tongjiang, et al. Process mineralogy study and beneficiation test of a vein quartz ore from Qinghai Province[J]. Mining & Metallurgy, 2015, 24(2): 71-77.
- 吴道,孙红娟,彭同江,等.优质石英岩作为高纯石英原料的提纯试验研究[J]. 非金属矿, 2017, 40(1): 68-74.
- WU Xiao, SUN Hongjuan, PENG Tongjiang, et al. Experimental research on purification of high grade quartzite as high purity quartz raw material[J]. Non-Metallic Mines, 2017, 40(1): 68-74.
- 谢泽丰,王九一,彭琰聪,等.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岩石[J]. 矿物学杂志, 2022, 41(6): 1159-1168.
- XIE Zefeng, WANG Jiuyi, PENG Yancong, et al. Impurity characteristics of Fujiashan vein quartz deposit in southeastern Hubei Province and its potential as raw material for high-purity quartz[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2022, 41(6): 1159-1168.

- 颜玲亚, 刘艳飞, 于海军, 等. 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, 2020, (10): 98–103.
- 杨富全, 张忠利, 王蕊, 等. 新疆阿尔泰稀有金属矿地质特征及成矿作用[J]. 大地构造与成矿, 2021, 41(6): 1010–1026.
- YANG Fuquan, ZHANG Zhongli, WANG Rui, et al. Geological characteristics and metallogenesis of rare metal deposits in Altay, Xinjiang[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021, 41(6): 1010–1026.
- 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.
- YANG Xiaoyong, SUN Chao, CAO Jingya, et al. High purity quartz: Research progress and perspective review[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(1): 231–244.
- 张晔, 陈培荣. 美国 Spruce Pine 与新疆阿尔泰地区高纯石英伟晶岩的对比研究[J]. 高校地质学报, 2010, 16(4): 426–435.
- ZHANG Ye, CHEN Peirong. Characteristics of granitic pegmatite with high-purity quartz in Spruce Pine Region, USA and Altay region of Xinjiang, China[J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 16(4): 426–435.
- 赵海波, 王红杰, 张勇, 等. 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, 2023: 1–17. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20230104.1513.001.html>.
- ZHAO Haibo, WANG Hongjie, ZHANG Yong, et al. Geochemistry, zircon U-Pb and Hf Isotopes of the high-purity pegmatite-quartz deposits in the Eastern Qinling: Enlightenment on ore-forming of high-purity pegmatite-quartz prospecting[J/OL]. Geology in China, 2023: 1–17. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20230104.1513.001.html>.
- 赵金洲, 张驰, 张森森, 等. 东秦岭花岗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, 2022, 41(6): 1305–1308.
- ZHAO Jinzhou, ZHANG Chi, ZHANG Sensen, et al. Study on the Availability of High Purity Quartz Mineral in Granite Pegmatite of East Qinling[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2022, 41(6): 1305–1308.
- 赵维佳. 我国高纯石英产业现状及资源保障分析[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2021, 157(1): 11–27.
- ZHAO Weijia. Analysis on the current situation of high-purity quartz industry and its resource guarantee in China[J]. China Non-metallic Minerals Industry, 2021, 157(1): 11–27.
- 张海敏, 朱黎宽, 赵海波, 等. 河南卢氏龙泉坪伟晶岩型高纯石英矿床的首次发现及找矿意义[J]. 矿产保护与利用, 2022a, 42(4): 153–158.
- ZHANG Haiqi, ZHU Likuan, ZHAO Haibo, et al. Longquanping pegmatitic high-purity quartz deposit in the area of Lushi, Henan Province: implications for exploration[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022a, 42(4): 153–158.
- 张海敏, 马亚梦, 谭秀民, 等. 高纯石英中杂质特征及深度化学提纯技术研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2022b, 42(4): 159–165.
- ZHANG Haiqi, MA Yameng, TAN Xiumin, et al. Research progress on impurity characteristics and deep chemical purification technology in high-purity quartz[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022b, 42(4): 159–165.
- 张海敏, 谭秀民, 马亚梦, 等. 新疆阿尔泰伟晶岩型高纯石英矿床地质特征及 4N8 级产品制备技术[J]. 矿产保护与利用, 2022c, 42(5): 1–7.
- ZHANG Haiqi, TAN Xiumin, MA Yameng, et al. Geological characteristics of pegmatite type high-purity quartz in Altai, Xinjiang and preparation technology of 4N8 grade products[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022c, 42(5): 1–7.
- 张海敏, 张亮, 刘磊, 等. 全球高纯石英资源开发利用现状及供需分析[J]. 矿产保护与利用, 2022d, 42(5): 49–54.
- ZHANG Haiqi, ZHANG Liang, LIU Lei, et al. Development, utilization, supply and demand of global high purity quartz resources: a systematic review and meta-analysis[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022d, 42(5): 49–54.
- 张凌燕, 高惠民, 刘理根. 由高品位脉石英岩制取高纯石英粉试验研究[J]. 玻璃, 1996, 22(2): 6–9.
- 张佩聪, 刘岫峰, 李峻峰, 等. 高纯石英矿物资源工程研究[J]. 矿物岩石, 2012, 32(2): 38–44.
- ZHANG Peicong, LIU Youfeng, LI Junfeng, et al. Study on high purity quartz mineral resource engineering[J]. Mineralogy and Petrology, 2012, 32(2): 38–44.
- 张照伟, 谭文娟, 王小红, 等. 西北地质调查与战略性矿产找矿勘查[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 44–63.
- ZHANG Zhaowei, TAN Wenjuan, WANG Xiaohong, et al. Geological Survey and Prospecting of Strategic Minerals in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 44–63.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 《光伏用高纯石英砂》GB/T 32649–2016[S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2016.
- 中华人民共和国自然资源部. 《矿产地质勘查规范—硅质原料类》DZ/T 0207–2020 [S]. 中华人民共和国自然资源部, 2020.
- 中国轻工总会. 《玻璃工业用石英砂的分级》QB/T 2196–1996 [S]. 中国轻工总会, 1996.
- Konstantinos I V, George C, Nikolas P B. Market of high purity quartz innovative applications[J]. Procedia Economics and Finance, 2015, 24(2–4): 734–742.
- Harben P. The industrial minerals handbook: a guide to markets, specifications & prices [M]//Metal Bulletin, Surrey: industrial minerals information. New York: Resources Policy, 1994: 284.
- Müller A, Ihlen P M, Wanvik J E, et al. High-purity quartz mineralisation in kyanite quartzites, Norway[J]. Mineralium Deposita, 2007, 42(5): 523–535.
- Müller A, Wanvik J E, Ihlen P M. Petrological and chemical characterisation of high-purity quartz deposits with examples from Norway[A]. In: Gotze J, Mockel R eds. Quartz: deposits, mineralogy and analytics[M]. Berlin: Springer, 2012: 71–118.