

石英矿物资源的分离提纯及材料化应用

全球高纯石英资源开发利用现状及供需分析

张海啟^{1,2,3}, 张亮^{1,2,3}, 刘磊^{1,2,3}, 曹飞^{1,2,3}

1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006;
2. 国家非金属矿资源综合利用工程技术研究中心, 河南 郑州 450006;
3. 自然资源部高纯石英资源开发利用工程技术创新中心, 河南 郑州 450006

中图分类号: TD873⁺.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2022)05-0049-06
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.05.008

摘要 高纯石英物理化学性能优异, 应用广泛, 是新一代信息产业、新能源、新材料等战略性新兴产业必不可少的关键基础材料。全球高纯石英资源稀少, 主要集中在美国、挪威、俄罗斯、印度等国家, 我国 4N5 级(SiO_2 含量 $>99.995\%$)及以上高纯石英矿石原料基本依赖进口。目前国内高端高纯石英产能有限, 供不应求, 未来随着光伏、半导体等领域需求的迅速扩张, 预计到 2025 年我国 4N(SiO_2 含量 $>99.99\%$)级及以上高纯石英需求将快速增长到 38 万 t, 高纯石英资源供给安全问题突出。通过全面分析全球高纯石英资源现状、市场供需现状、主要生产企业以及消费趋势, 结合我国高纯石英产业现状, 提出了将高纯石英矿产列入战略性矿产、加强高纯石英战略研究和科技攻关、建立全链条评价体系等对策建议, 以保障我国高纯石英资源供给安全。

关键词 高纯石英; 资源概况; 开发利用; 供需分析

引言

高纯石英具有耐高温、耐腐蚀、强度高、透光率高、热膨胀系数低等优异的物理化学特性, 广泛应用于半导体、光纤通信、光伏、光学、电光源等领域, 是新一代信息产业、新能源、高端装备、新材料等战略性新兴产业的关键基础材料, 对于战略性新兴产业健康发展具有重要意义。由于高纯石英资源矿床成因的特殊性以及生产技术封闭等原因, 目前高纯石英资源的生产和出口主要集中在世界少数国家和企业, 高纯石英资源已经成为世界稀缺、我国短缺的战略性资源, 在国家能源资源安全保障、中美博弈等方面具有重要地位。本文系统总结全球及我国高纯石英资源现状、应用领域、供给及消费、市场发展趋势, 并提出我国高纯石英产业发展的对策建议, 以保障我国高纯石英资源供给安全、促进我国高纯石英产业高质量发展。

1 高纯石英资源概述

1.1 高纯石英的定义

首先应当明确的是, “高纯石英”是利用相应技

术手段对天然形成的石英矿物进行加工提纯而成的一种矿产品而非资源, 针对高纯石英的概念和界定, 目前行业内还未有共识。Harben^[1]认为高纯石英是指 SiO_2 含量 $>99.995\%$ (4N5)的石英产品; Müller 等^[2]依据石英中有害元素来限定高纯石英, 提出经过加工后, 石英中有害元素总含量不应高于 $50 \mu\text{g/g}$, 且关键元素 Al、Ti、Na、K、Ca、Fe 和 P 等均有限定; Flook 根据市场现状, 定义高纯石英指 $\text{SiO}_2 > 99.95\%$ 、总杂质元素含量小于 $500 \mu\text{g/g}$ 的石英^[3]; 汪灵等人^[4]认为 SiO_2 含量 $>99.9\%$ 的石英产品即可称为高纯石英, 并按 SiO_2 含量将高纯石英分为低端产品(3N)、中端产品(4N)和高端产品(4N8)三个等级; 张佩聪等^[5]认为高纯石英是 SiO_2 含量 $>99.99\%$ 、杂质元素含量 $<20 \mu\text{g/g}$ 的石英; 李光惠等^[6]将 Al、Fe、Li、Ca、Mg、K、Na、Ti、Cu、Mn、Co、Ni 和 B 等 13 种有害元素总含量 $<50 \mu\text{g/g}$ 、 SiO_2 含量 $\geq 99.99\%$ 的石英定义为高纯石英。此外, 高纯石英定义在不同领域的标准规范中也有不同体现, 中国轻工总会行业标准《玻璃用工业石英砂的分级》(QB/T 2196)^[7]中规定高纯石英是指 SiO_2 含量 $\geq 99.98\%$ 、Al $<70 \mu\text{g/g}$ 、Ti $<3 \mu\text{g/g}$ 、Cr $<0.3 \mu\text{g/g}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 4 \mu\text{g/g}$ 的石英砂; 湖南省

收稿日期: 2022-09-24

基金项目: 中国地质调查局地质矿产调查评价项目(DD20221698)

作者简介: 张海啟(1967—), 男, 山东费县人, 博士, 正高级工程师, 主要从事矿产资源综合利用研究工作。

通信作者: 张亮(1987—), 男, 山东潍坊人, 硕士, 助理研究员, 主要从事矿床地质及矿产经济研究工作。

地方标准《高纯($\text{SiO}_2 \geq 99.997\%$)石英砂》(DB43/T 1167)^[8]限定高纯石英砂中 SiO_2 含量 $\geq 99.997\%$, 且 Al、Fe、Li、Ca、Mg、K、Na、Ti、Cu、Mn、Co、Ni 和 B 等杂质元素也有相应规定。

综合前人研究和相关标准规范, 本文认为, 高纯石英是指 SiO_2 含量大于 99.9% 的石英产品, 并且按 SiO_2 纯度可分为: 低端高纯石英($99.99\% > \text{SiO}_2$ 含量 $\geq 99.9\%$)、中端高纯石英($99.995\% > \text{SiO}_2$ 含量 $\geq 99.99\%$) 和高端高纯石英($\geq 99.995\%$), 高端高纯石英除 SiO_2 含量 $\geq 99.995\%$ 外, 石英中有害元素含量 $\text{Al} < 30 \mu\text{g/g}$ 、 $\text{Ti} < 10 \mu\text{g/g}$ 、 $\text{Na} < 8 \mu\text{g/g}$ 、 $\text{K} < 8 \mu\text{g/g}$ 、 $\text{Li} < 5 \mu\text{g/g}$ 、 $\text{Ca} < 5 \mu\text{g/g}$ 、 $\text{Fe} < 3 \mu\text{g/g}$ 、 $\text{P} < 2 \mu\text{g/g}$ 、 $\text{B} < 1 \mu\text{g/g}$, 且流体包裹体含量达到相关应用要求的石英产品。

1.2 资源概况

石英是自然界最常见的造岩矿物之一, 全球石英资源非常丰富, 分布广泛, 是目前人类开发利用的最重要的非金属矿产之一, 其可开发的矿床类型主要有石英砂岩、石英岩、天然石英砂、粉石英、花岗岩石英、天然水晶、脉石英等。虽然全球石英资源丰富, 但可以加工为高纯石英的石英资源却非常稀少, 全球高纯石英矿床主要分布于美国、澳大利亚、挪威、俄罗斯、印度、加拿大、巴西和马达加斯加等国家, 矿床类型包括白岗岩型(花岗伟晶岩型)、热液脉型、水晶岩等。目前, 全球可加工成 3N 级及以上高纯石英资源约 7 000 万 t, 高纯石英资源分布相对集中, 主要分布在巴西(2 111 万 t)、美国(1 822 万 t)、加拿大(1 000 万 t)等国家^[9]。可以加工 4N5 级及以上质量的高端高纯石英资源量约 2 000 万 t, 90% 集中在美国(1 822 万 t), 此外, 挪威、俄罗斯和印度等国的高纯石英资源在全球也占有一定比例, 这些国家高纯石英资源虽然在全球占比不高, 但矿产资源品质很好, 是除美国外生产高端高纯石英原料和产品的重要国家。目前, 全球可以加工成 4N8 级及以上高端高纯石英原料主要来自于美国 Spruce Pine 地区的花岗伟晶岩型石英资源。

我国目前还没有高纯石英资源储量统计, 之前国内制备高纯石英砂主要利用水晶资源和脉石英资源, 但水晶资源接近枯竭(资源量仅为 0.69 万 t), 脉石英是高纯石英加工生产的主要原料。根据自然资源部全国矿产资源储量统计表^[10], 截至 2019 年, 我国玻璃

用脉石英资源储量 3 020.07 万 t, 脉石英矿床的规模小、数量多, 脉石英主要分布在江西(1 681.5 万 t)、四川(561.1 万 t)、湖南(325.9 万 t)、新疆(133.39 万 t)、黑龙江(86.29 万 t)和浙江(168.4 万 t)等省(自治区), 上述六省脉石英资源约占全国总储量的 97% 以上。国内脉石英可以加工为高纯石英产品的比例极低, 品位较高的代表性矿床有湖北省蕲春县灵虬山脉石英矿、江苏省东海县水晶矿区、安徽旌德县龙川脉石英矿等^[11], 经过多年的开发利用, 这些地区资源也基本开采殆尽, 寻找高品质高纯石英替代资源尤为重要。

2 高纯石英主要应用

高纯石英中杂质元素和流体包裹体含量极低, 具有耐高温、耐腐蚀、强度高、透光率高、热膨胀系数低、绝缘性好等优异的物理化学性质, 是制造石英坩埚、石英管、石英法兰、石英钟罩、石英锭、光学器件、光纤等石英玻璃制品、电子级工业硅(多用 3N 级左右石英制造)和电子级硅微粉的重要原料。高纯石英玻璃制品作为原材料或者辅助生产材料广泛用于电光源、光纤通信、光伏、半导体和光学玻璃行业等高新技术领域。电子级工业硅是制造单晶硅、多晶硅的原料, 单晶硅多晶硅被广泛用于电子、半导体等领域。此外, 高纯石英的另一应用方向是生产高纯度球形硅微粉用于高端覆铜板、芯片封装材料等领域, 目前高纯度球形硅微粉生产技术由日本住友、日立、松下等企业垄断。鉴于文章篇幅, 本文重点论述高纯石英玻璃市场情况。

不同应用领域的高纯石英玻璃, 对高纯石英的杂质元素配型、粒度、折射率、力学性能、热学性能等要求不同, 全球各高纯石英生产公司都有自己相应的高纯石英产品标准, 如美国尤尼明的 IOTA 系列标准(表 1)、挪威 TQC 公司的 NW 标准、太平洋石英的 PQ 系列标准等。目前全球公认的高纯石英砂标准产品为美国尤尼明公司的 IOTA-STANDARD 等级石英砂, 该产品各项杂质元素指标被当作高纯石英砂的“国际标准纯度”。IOTA 系列其他产品也是生产石英玻璃的优质原料, 如 IOTA STD、IOTA CG 等石英砂可生产低膨胀系数、高透光度的石英玻璃, 是电光源、照明设备的主要原料, 可以用来生产汽车疝气灯、高压汞灯、卤素灯、高强度气体放电灯、特种光源用

表 1 美国尤尼明 IOTA 系列典型产品标准部分元素含量要求^[12]

($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

Table 1 The impurity element requirements for the IOTA high purity quartz of Unimin

元素种类	Al	B	Ca	K	Na	Ti	Zn	P	Fe	Mg
IOTA CG	14	0.1	0.6	0.7	1	1.2	0.01	0.1	0.3	0.04
IOTA 4	8	0.05	0.7	0.4	1	1.4	0.01	0.1	0.3	0.07
IOTA 6	8	0.05	0.7	0.2	0.1	1.4	0.01	0.1	0.2	0.07
IOTA 8	8	0.05	0.4	0.05	0.05	1.3	0.01	0.05	0.05	0.01

石英管棒等; IOTA CG 等石英砂制成的石英坩埚非常适合长时间拉丝和多锭拉丝; IOTA 4、IOTA 6 等石英砂中 B 元素和过渡金属元素含量低, 可用来生产半导体级石英坩埚、CZ 坩埚、扩散管等, 可以保证晶圆加工过程中维持较高的纯度, 此外 IOTA 6 还可做 UHP 光源玻璃; IOTA 8 石英砂产品纯度高、性质稳定, 是生产大尺寸(12 寸或更大)单晶硅等过程中大尺寸坩埚内层涂料的必备原料。当前全球半导体用高纯石英砂基本由美国尤尼明垄断。

3 全球高纯石英市场供应情况

3.1 市场供应

目前全球可以加工为中高端高纯石英的石英资源主要来自花岗伟晶岩型、热液脉型以及水晶。以往主要利用优质水晶粉磨加工生产高纯石英(如巴西、我国江苏东海等), 随着水晶资源的逐渐枯竭, 各国开始利用花岗伟晶岩、脉石英等资源深度加工提纯生产高纯石英(如美国花岗伟晶岩、俄罗斯脉石英、印度脉石英等)。由于资源限制, 我国可以加工为 4N5 级及以上高纯石英的石英矿石原料基本依赖进口。

随着新能源、信息化、新材料等战略性新兴产业快速发展, 全球高纯石英产量快速增长, 据联合国统计司数据, 2019 年全球 SiO₂ 含量 ≥ 99.9% 的高纯石英产量 123.62 万 t; SiO₂ 含量 ≥ 99.99% 的各类高纯石英 42.58 万 t^[9]; 相较于低端高纯石英产量, 全球高端高纯石英产量更低, SiO₂ 含量 ≥ 99.995% 的高端高纯石英产量约 14 万 t, 仅占所有等级高纯石英产量的 11%; SiO₂ 含量 ≥ 99.998% 的超高纯石英产量仅约 6 万 t。

目前, 国内高纯石英生产企业主要集中在江苏连云港、东海等地区, 产能规模较大的企业主要有石英股份和福东正佑公司, 其余企业产量均小于 1 000 t。近年来, 国内高纯石英生产扩张迅速, 2019 年我国 4N5 级及以上高纯石英产量约 1.6 万 t(图 1), 2020 年 4N5 级及以上高纯石英产量约 3 万 t, 伴随太平洋股份、福东正佑公司的一系列新上项目, 预计 2022 年国内

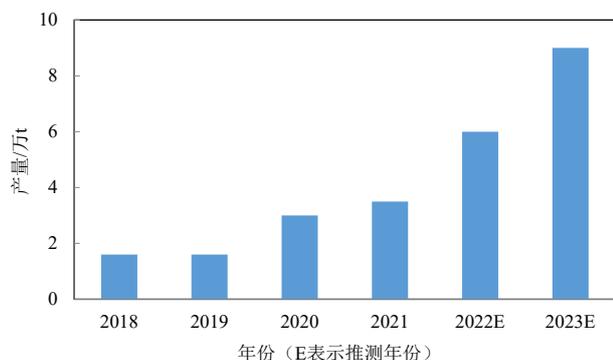


图 1 2018—2023 国内高纯石英生产统计

Fig. 1 High purity quartz production statistics for 2018—2023 in China

4N5 级及以上高纯石英产量将扩张到 6 万 t 以上。

3.2 高纯石英主要生产企业

全球高纯石英产能集中, 主要生产企业有美国尤尼明、挪威 TQC、中国石英股份、俄罗斯 Russian Quartz LLC 等。

3.2.1 美国尤尼明

2018 年美国尤尼明的高纯石英砂业务被整合至比利时 Sibelco 集团, 由 Sibelco 位于美国的公司负责石英矿开发及高纯石英砂生产, 公司高纯石英业务延续了尤尼明公司高纯石英业务。长期以来, 美国尤尼明公司的产品一直垄断着国际高端高纯石英砂市场, 其生产的 IOTA STD、IOTA 4、IOTA 6、IOTA 8 系列产品是优质高纯石英砂, 广泛应用于电光源、光伏、半导体、光纤、光学等各个领域。

尤尼明高纯石英砂原料产自北卡罗来纳州 Spruce Pine 地区的花岗伟晶岩, 该地区内有数百条伟晶岩体, 整个伟晶岩带长约 16 km, 宽 32 km。单个伟晶岩体长度几米~几百米, 宽度 1 米~几十米。围岩为角闪石片岩和片麻岩, 主要矿物为长石和石英, 石英含量 25%~35%, 次要矿物为白云母、石榴石和绿帘石。该矿山最初是用来生产长石和白云母, 少部分品质好的石英砂用作建筑用砂, 大部分石英砂被丢弃, 后来在全球水晶资源枯竭各国寻找水晶替代资源的背景下, 尤尼明公司通过改进技术, 利用花岗质伟晶岩中的石英生产出了高纯石英, 成为全球最重要的高纯石英供应商。目前, 尤尼明公司高纯石英砂产量约 3.5 万 t。

3.2.2 挪威 TQC

挪威 The Quartz Corp (TQC), 是法国 ImerysSAS 公司和挪威 Norsk Mineral AS 公司于 2011 年合资成立的公司, 两家公司各占 50% 股权。公司生产高纯石英砂主要应用于半导体、光伏、光学等领域^[11]。

挪威 TQC 公司高纯石英砂原料主要产自美国的 Spruce Pine 地区的花岗伟晶岩(与美国 Unimin 公司所用石英原料属同一矿带)和挪威的德拉格花岗伟晶岩, 石英资源开采出来后都在挪威加工。挪威德拉格花岗伟晶岩带由数十条伟晶岩矿体组成, 伟晶岩呈垂直筒状产于周边花岗片麻岩中, 伟晶岩中石英颗粒平均粒径约 6 mm^[11], 石英中流体包裹体和矿物包裹体含量极少, 目前探明资源量约 26.7 万 t。在生产过程中, 来自美国的石英资源加工成的高纯石英产品可以达到半导体用砂和光伏用砂要求, 而挪威的产品则更适合光学和电光源领域。2021 年挪威 TQC 公司高纯石英砂产量约为 1.5 万 t。

3.2.3 石英股份

江苏太平洋石英股份有限公司是一家集科研、生

产、销售为一体的高端石英材料深加工企业,是国内第一家、全球第三具备规模化生产高纯石英砂的企业。公司生产的石英材料广泛应用于光源、光伏、光纤、光学及半导体等领域,主导产品有高纯石英砂、石英管(棒)、大口径石英扩散管、石英筒、石英锭和石英板等多种石英器件,除此之外每年仅对外出售少量 4N 级高纯石英砂。石英股份生产高纯石英所用石英资源主要来自印度脉石英。2020 年,石英股份高纯石英砂产量约 1.5 万 t。

3.2.4 俄罗斯 Russian Quartz LLC

俄罗斯 Russian Quartz LLC 成立于 1966 年,公司生产的 RQ 系列产品化学纯度高、透明度高,可以用于生产各种直径的石英管、石英坯和石英坩埚,应用于太阳能和半导体工业^[15]。

俄罗斯 Russian Quartz LLC 公司高纯石英砂原料主要产自俄罗斯斯克什特姆脉石英矿床(Kyshtym),该矿床石英矿体赋存于 Ufalei 变质杂岩中,矿床总长 15 km,宽 1.3 km,矿区面积 20 km²。矿区用作高纯石英原料的主矿体为 Kyshtym 175 号脉,脉体呈 NE-SE 向分布,石英脉中石英晶体流体包裹体含量少,Al 和 Ti 等杂质元素含量低,脉石矿物主要有长石、云母、碳酸盐、锆石、独居石等。矿床石英资源储量超过 100 万 t,可加工为高纯石英的资源储量超过 50 万 t。2021 年 Russian Quartz LLC 公司高纯石英产量约为 3 500 t。

3.2.5 澳大利亚 Creswick Quartz

自 1996 年以来,Creswick Quartz 就一直在开展石英业务,公司可以生产杂质含量<20 μg/g 的高纯石英砂,公司产品可以用于光伏、半导体、光学玻璃等行业。澳大利亚 Creswick Quartz 公司生产高纯石英的原料主要来自澳大利亚 Creswick / Smeaton Victoria 金矿废石,该矿地表尾矿中预测的高纯石英资源量可达 100 万 t,矿石质量优异,杂质元素尤其是 B 和 P 含量低。矿石经选矿加工后,形成 CQL 系列产品,档次最高的产品可以达到粒度约 6 mm,杂质元素含量 Al<128 μg/g、Ti<0.7 μg/g、K<2 μg/g、B<0.5 μg/g、Ca<0.5 μg/g 的规格,目前公司正在向全球一流高纯石英企业迈进。

4 全球高纯石英消费现状及发展趋势

根据笔者调研和统计,中高端高纯石英主要应用于电光源、半导体芯片、光纤通信、光伏、光学等领域,石英砂价格根据产品纯度不同从 1 万元~十几万元不等。2019 年,全球各类高纯石英消费量约 121.44 万 t,其中半导体领域高纯石英用量占比约 65.30%,光纤通信领域用量占比约 14.80%,光伏领域用量占比约 11.93%,电光源用量占比约 3.90%,其他领域用量

占比约 4.04%^[9]。高纯石英砂市场规模(不含下游产品)近 200 亿元,高纯石英消费占比和市场规模分布见图 2 和图 3。用于高纯石英玻璃的 4N5 级及以上高端高纯石英砂消费量约 15 万 t,其中电光源行业用量占比约 9.4%(图 4),光纤通信行业用量占比约 6.3%,光伏行业用量占比约 33.5%,半导体行业用量占比约 43.3%,光学玻璃行业用量占比约 3%(据 PMR 资料整理),高端高纯石英砂市场规模约为 50 亿元。

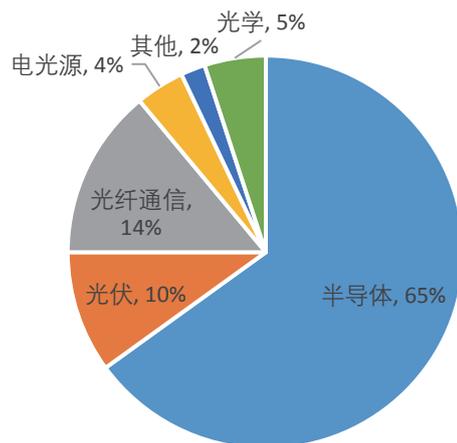


图 2 不同应用领域高纯石英消费占比
Fig. 2 Proportion of high-purity quartz consumption in different application fields

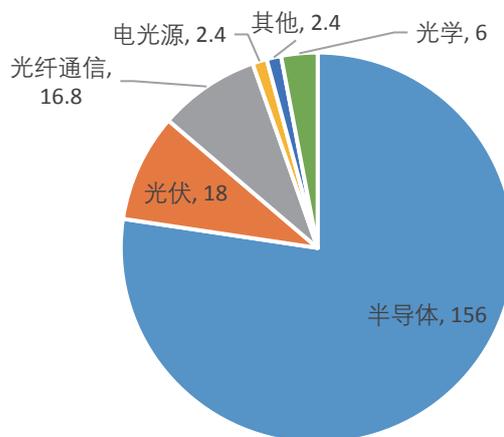


图 3 不同应用领域高纯石英市场规模(单位:亿元)
Fig. 3 Market scale of high purity quartz in different application fields

我国是高纯石英砂的消费大国,2020 年国内中高端高纯石英消费量约为 21 万 t,4N5 级及以上高端高纯石英消费量为 6 万 t,国内高纯石英尤其是高端高纯石英原料供给严重不足,每年需要大量从国外进口,主要进口来源国为美国、挪威、日本以及德国,据报道^[9],2019 年全球高纯石英进口量 20.54 万 t,中国进口量为 14.45 万 t,占全球进口总量的 70.35%,是全球第一大高纯石英进口国。

随着“双碳”目标要求、新能源推广、数字化、5G 通信建设不断完善,未来我国光伏、半导体、光纤通信等领域将继续保持高速发展。伴随着国家大力

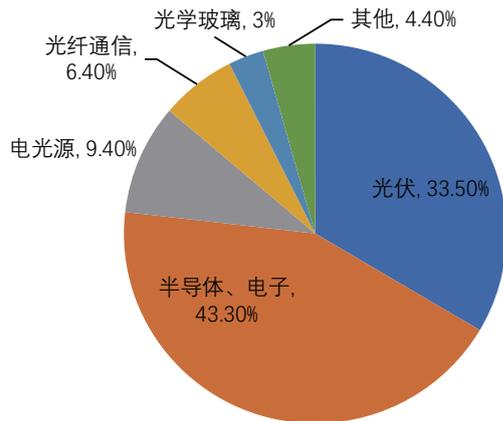


图 4 4N5 级及以上不同应用领域高纯石英砂消费占比
Fig. 4 Proportion of 4N5 high-purity quartz consumption in different application fields

发展太阳能光伏等清洁能源, 光伏产业将继续保持高速增长, 根据中国光伏行业协会数据^[16], 预计到 2025 年全球新增光伏装机 270~330 GW, 年复合增长率约 15%~18%; 半导体领域, 国内数字化产品需求将继续保持高速增长, 随着我国越来越重视芯片半导体国产化生产, 我国半导体行业生产规模也将快速扩大, 根据 CSIA 的数据^[17], 预计到 2025 年, 中国半导体行业规模复合增长率约为 15%; 光纤通信领域, 中国是最大的光纤消费国, 过去几年随着中国 5G 建设等, 光纤消费需求增长迅速, 近几年虽然增速有所下降, 但未来仍将保持稳定增长, 根据 CRU 预测^[18], 到 2025 年中国光纤需求量将达到 2.83 亿芯公里, 年复合平均增长率约为 2.9%; 此外, 除上述领域需求快速增长外, 电光源、光学等领域也将保持相对稳定需求。综合各行业消费增长测算, 预计到 2025 年我国 4N 级及以上高纯石英需求将快速增长到 38.31 万 t, 见图 5, 年复合增长率为 12.8%, 其中 4N5 级及以上高纯石英需求将超过 8 万 t。

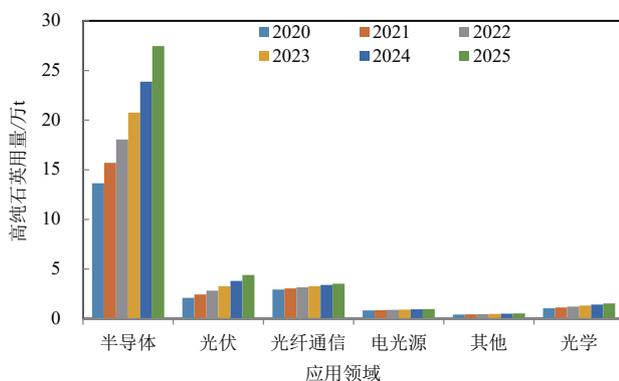


图 5 2020—2025 不同领域高纯石英用量增长趋势
Fig. 5 Increasing trends of high purity quartz consumption in different fields for 2020-2025

5 我国高纯石英产业发展对策建议

(1) 高纯石英由于其特殊的物理化学特性, 广泛

应用于半导体芯片、光纤通信、光伏、光学、电光源等领域, 是新一代信息产业、新能源、高端装备、新材料等战略性新兴产业必不可少的基础材料, 保障高纯石英资源供给安全对于未来确保我国在相关战略性新兴产业获得竞争优势具有重要意义。虽然高纯石英战略意义重大, 但目前高纯石英用石英矿产却仍未纳入我国战略性矿产目录, 因此, 建议尽快将高纯石英矿产列为我国战略矿产, 开展相关研究和管理, 保障我国高纯石英资源的战略供给。

(2) 近年来, 伴随着新能源、信息产业、新材料等产业迅速发展, 国内高纯石英需求增长迅速, 整体而言, 我国低端高纯石英资源供给充足, 但高端高纯石英国内供给有限, 国际上生产主要集中在美国尤尼明等少数企业手中, 供需矛盾突出。未来伴随我国经济高质量发展, 高纯石英消费量将进一步提升, 预计到 2025 年我国 4N 级及以上高纯石英需求将快速增长到 38.31 万 t。下一步应进一步加强高纯石英的市场战略研究, 合理引导国内高纯石英生产企业有序扩产, 鼓励石英股份、福东正佑等高纯石英企业与国内科研院所、高校等进行联合攻关, 突破技术瓶颈, 不断提升企业产品品质。

(3) 高纯石英资源是世界稀缺、我国短缺的资源, 目前国内生产 4N5 级及以上高纯石英矿物原料基本依赖进口, 虽然国内经常有发现高纯石英原料地的报道, 但能够真正用于高端领域的高纯石英却极少, 高纯石英资源保障问题亟待解决。下一步应加大高纯石英资源找矿评价投入, 聚焦花岗伟晶岩型资源, 尽快建立地质找矿—工艺矿物学研究—选冶试验研究—分析测试—产品质量评价的全链条评价体系, 形成高纯石英资源勘查评价行业标准, 真正实现高纯石英资源找矿突破。

参考文献:

- [1] HARBEN P W. The industrial mineral handybook: a guide to markets, specifications and prices (4th edit)[M]. London: Industrial Mineral Information, 2002, 412.
- [2] MÜLLER A, WANVIK J E, IHLEN P M. Petrological and chemical characterisation of high-purity quartz deposits with examples from Norway[M]. Berlin: Springer, 2012: 71-118.
- [3] VATALIS K I, CHARALAMBIDES G, BENETIS N P. Market of high purity quartz innovative applications[J]. Procedia Economics and Finance, 2015, 24: 734-742.
- [4] 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 L. Industrial types and application characteristics of quartz ore deposits[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(6): 39-47.
- [5] 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 P C, LIU Y F, LI J F, et al. Study on high purity quartz mineral resource engineering[J]. Mineralogy and Petrology, 2012, 32(2): 38-44.
- [6] 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(5): 20-24.

- LI G H, WANG C F, ZHAN J H, et al. Analysis and suggestions on high purity quartz raw material as strategic minerals[J]. China Non-metallic Minerals Industry, 2020(5): 20–24.
- [7] 中国轻工总会. 玻璃用工业石英砂的分级: QB/T 2196—1996[S]. 北京: 中国轻工总会质量标准部, 1996: 9.
China National Council of Light Industry. Classification for industrial quartz sand for glass: QB/T 2196—1996[S]. Beijing: Quality Standard Department of China National Council of Light Industry, 1996: 9.
- [8] 湖南省工业和信息化厅. 高纯石英砂: DB43/T 1167—2009[S]. 长沙: 湖南省质量技术监督局, 2016: 5.
Industry and Information Technology Department of Hunan Province. High purity quartz sand: DB43/T 1167—2009[S]. Changsha: Quality and Technical Supervision Bureau for Hunan Province, 2016: 5.
- [9] 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(5): 15–19.
HAO W J, FENG S W, ZHAN J H, et al. Current situation, production, consumption and trade pattern of high purity quartz in the world[J]. China Non-metallic Minerals Industry, 2020(5): 15–19.
- [10] 自然资源部. 全国矿产资源储量统计表[R]. 北京: 自然资源部, 2021.
Ministry of Natural Resources. Statistical table of national mineral resources Reserves[R]. Beijing: Ministry of Natural Resources, 2021.
- [11] 焦丽香. 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, 2019(2): 11–14.
JIAO L X. Current situation and supply demand analysis of the development and utilization of vein quartz resources in China. China Non-metallic Minerals Industry, 2019(2): 11–14.
- [12] 美国矽比科公司. IOTA 石英产品范围和应用[EB/OL]. [2022-9-20]. <https://www.sibelco.com/iota-highpurity-quartz/>.
- [13] TQC. 高纯石英的应用[EB/OL]. [2020-9-20]. <https://www.thequartzcorp.com/>.
- [14] 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.
WANG J Y. Global high purity quartz deposits: resources distribution and exploitation status[J]. Acta petrologica et mineralogical, 2021, 40(1): 131–141.
- [15] Russian Quartz LLC. About us[EB/OL]. [2022-9-20]. <http://russian-quartz.com/cn/>.
- [16] 中国光伏行业协会[EB/OL]. [2022-09-20]. <http://www.chinapv.org.cn/index.html>.
- [17] 中国半导体行业协会[EB/OL]. [2022-09-20]. <http://www.csia.net.cn/Index.asp>.
- [18] Commodity Research Unit[EB/OL]. [2022-09-20]. <https://www.crugroup.com/>.

Development, Utilization, Supply and Demand of Global High Purity Quartz Resources: a Systematic Review and Meta-analysis

ZHANG Haiqi^{1,2,3}, ZHANG Liang^{1,2,3}, LIU Lei^{1,2,3}, CAO Fei^{1,2,3}

1. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Zhengzhou 450006, China;
2. China National Engineering Research Center for Utilization of Industrial Minerals, Zhengzhou 450006, China;
3. Engineering Technology Innovation Center for Development and Utilization of High Purity Quartz, Ministry of Natural Resources, Zhengzhou 450006, China

Abstract: High purity quartz (HPQ), as an indispensable key basic material, has been widely used in strategic emerging industries including the new-generation information industry, new energy, new materials, etc., due to its superior physicochemical properties. However, HPQ resources are scarce and concentrated in countries such as the United States, Norway, Russia, and India. In China, 4N5 grade HPQ (SiO_2 content $\geq 99.995\%$) is primarily dependent on imports. At present, the domestic production capacity of high grade HPQ is limited and the demand exceeds the supply. In the future, it is expected that China's demand for 4N grade HPQ (SiO_2 content $> 99.99\%$) will grow rapidly to 380 000 t by 2025 with the rapid expansion of demand in the photovoltaic and semiconductor industries. As a result, the supply security of HPQ resources will be prominent. The current situation of global HPQ resources, current market supply and demand, major producers as well as consumption trends were comprehensively analysed. Furthermore, the countermeasures were proposed, including HPQ minerals as strategic minerals, strengthening strategic and scientific research on HPQ, and establishing a whole-chain evaluation system, based on the current situation of China's HPQ industry. These would be of great value in ensuring the security of HPQ supply in China.

Keywords: high purity quartz; resource overview; development and utilization; market supply and demand

引用格式: 张海敏, 张亮, 刘磊, 曹飞. 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, 2022, 42(5): 49–54.
ZHANG Haiqi, ZHANG Liang, LIU Lei, CAO Fei. Development, utilization, supply and demand of global high purity quartz resources: a systematic review and meta-analysis[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(5): 49–54.