

综合评述

我国石英资源的开发利用特点及应用进展

李作敏^{1,2,3}, 谭秀民^{1,2,3}, 张亮^{1,2,3}, 李建国^{1,2,3}, 郭敏^{1,2,3}, 刘航涛^{1,2,3}, 刘磊^{1,2,3}, 吕振福^{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: TD985 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2024)02-0115-09
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.02.016

摘要 石英资源是重要的基础性非金属矿产资源, 广泛用于玻璃、机械铸造、电子电工、冶金、耐火材料、化工、陶瓷等领域, 不同行业对石英砂的技术要求和用量各不相同, 宏观了解石英资源的开发利用特点和市场应用对石英资源的高效合理利用意义重大。介绍了我国各类石英资源的资源现状、不同类型矿石的开发利用特点及主要应用方向, 详细总结了玻璃、高纯石英、机械、电子电工、冶金、耐火材料、化工、陶瓷、石油、板材等不同领域对石英原料的标准技术要求和产品特点; 从石英资源开发利用全领域角度出发, 系统梳理了不同领域石英资源的用量及产值, 详细分析了高纯石英市场现状及供需发展趋势。结合石英资源开发利用现状, 提出了在石英资源的开发利用过程中应分类评价、分级利用等对策建议, 以期进一步提高我国石英资源开发利用水平和保障能力。

关键词 石英资源; 石英砂; 技术特点; 市场现状; 高纯石英

引言

石英是自然界最常见的造岩矿物之一, 是由硅原子(Si)和氧原子(O)组成的、具有架状结构的氧化物矿物, 广泛存在于岩浆岩、变质岩、沉积岩及热液脉体中。石英有两种存在形式: 一种为高温变体 β -石英(六方晶系, 一轴晶), 一种为低温变体 α -石英(三方晶系, 一轴晶)。常压下, 二者转变温度为 573 °C, 通常所说的石英是指在地表环境下能够稳定存在的低温变体 α -石英, 此外, 常见的石英及 SiO_2 变体还有鳞石英、方石英、柯石英、斯石英等^[1]。可以工业开发利用的石英主要为 α -石英。天然石英矿物化学性质稳定, 质地坚硬(硬度为 7), 耐磨, 半透明~透明, 熔融温度 1 710~1 756 °C, 具有优异的光学、电学、热学和力学性质, 是一种重要的非金属矿资源, 是玻璃、机械铸造、电子电工、冶金、石油、耐火材料、化工、陶瓷、光伏、半导体等多个领域上百种工业产品的基础性原料, 对于经济社会的可持续发展具有重要意义。不同的工业产品利用石英的物理化学性质不同(如硬度、透光性、绝缘性等), 对石英原料和资源的要求和用量也不

同。本文系统梳理了石英资源的开发利用特点, 总结了不同行业主要石英原料技术指标和参考标准、市场现状等, 以期全方位了解我国石英产业概况、提高我国石英资源开发利用水平提供参考。

1 石英的开发利用特点

1.1 石英的储量及分布

目前可以利用的硅质原料的矿石类型主要有脉石英、石英砂岩、石英岩、天然石英砂、粉石英、水晶以及花岗伟晶岩(主要用于加工高纯石英)等^[2-4]。石英岩多分布于四川、安徽、湖南、江苏、浙江及山东等地; 石英砂岩和天然石英砂广泛分布于四川、福建、广东、新疆以及广西的南部和海南西北部及山东北部这些沿海地带; 脉石英分布于四川、黑龙江、湖北、江苏等地的变质岩区。2022 年全国石英岩储量约 13.64 亿 t, 石英砂岩 13.62 亿 t, 脉石英 7 927 万 t, 水晶约 541 t, 粉石英 631 万 t, 花岗伟晶岩型高纯石英国内尚未发现相关矿床, 目前没有专门的储量统计。按照目前 1 亿 t/a 的消耗量, 玻璃、冶金、铸造等大宗硅质原料

收稿日期: 2023-11-20

基金项目: 中国地质调查局地质矿产调查评价项目(DD20221698; DD20230038)

作者简介: 李作敏(1988—), 女, 河南商丘人, 硕士, 助理研究员, 主要从事矿产资源综合利用研究。

通信作者: 谭秀民(1979—), 男, 山东菏泽人, 研究员, 主要从事矿产资源综合利用研究工作, E-mail: tanxiumin@mail.cgs.gov.cn。

供应充足,但优质的脉石英、水晶资源相对匮乏^[2]。

1.2 石英矿石类型及主要应用方向

不同成因岩石类型的石英矿石特点和应用方向并不一样:(1)脉石英主要由富硅的岩浆热液或变质热液充填于裂隙中形成,通常脉石英原矿 SiO₂ 品位高,可达 98% 以上,Fe 等杂质含量低,矿物组成简单,矿石可加工性强,部分脉石英提纯加工后可以达到高纯石英原料要求,但脉石英硬度大,矿体规模相对较小,因此脉石英多用作生产高端玻璃、硅微粉、工业硅、高纯石英等高附加值产品的原料。(2)石英砂岩是由各类源岩(如花岗岩、花岗伟晶岩、脉石英等)经过风化剥蚀、搬运、沉积、胶结后形成的一类沉积岩。石英砂岩剥蚀搬运过程中,大多数易风化矿物会被天然风化、剥蚀掉,因此石英砂岩整体原矿 SiO₂ 品位较高,通常>90%。石英砂岩中,石英为岩石主要矿物,云母、长石、金红石、黏土矿物等为次要矿物,由于石英砂岩是由不同品质的源岩剥蚀搬运混合而成,因此不同品质石英颗粒被“混合”到一起,并且在胶结成岩过程中,黏土矿物等也容易被胶结或存在于石英裂隙或凹陷处,不易去除,因此石英砂岩整体加工提纯上有限很难加工为高纯石英,但其原矿品位高、规模大、易开采,被广泛用于玻璃、陶瓷、冶金、耐火材料、板材等大宗应用行业。(3)石英岩是石英砂岩或硅质

岩经变质重结晶后形成,石英岩原矿 SiO₂ 品位>85%。石英岩中长石、云母、绿泥石、角闪石、红柱石等不同变质级别的矿物常与石英矿物共伴生或包裹于石英矿物中。石英岩硬度往往比石英砂岩更高,具有原矿品位高、规模大、易开采等特点,被广泛用于玻璃、陶瓷、冶金、石油压裂砂、化工、机械铸造等行业。(4)天然石英砂是海相(或河相、湖相)搬运形成的、未胶结的石英砂粒,原矿 SiO₂ 品位>90%,含少量长石、云母、电气石、岩屑等。天然石英砂具有易开采、粒度适中、角形因数好等特点,主要应用于冶金、陶瓷、铸造砂、石油压裂砂等行业。(5)粉石英是硅质灰岩或硅质岩等风化残积形成的细粒石英,原矿 SiO₂ 品位>95%。粉石英具有原矿品位高、易粉碎、品质稳定等特点,主要用作耐磨材料、硅微粉、耐火材料、陶瓷、板材等领域。(6)水晶是一种以 SiO₂ 结晶体形式产出的石英,水晶中往往因含不同离子呈现出不同的颜色(如水晶晶格中 Si⁴⁺被 Fe³⁺等替代,会呈现出紫色等颜色^[5-6]),水晶矿规模小、开采难度大、矿物成分不稳定,目前主要用作压电水晶、光学、天然装饰品等领域。(7)花岗伟晶岩主要由岩浆演化晚期富含挥发分的花岗质岩浆形成,由于伟晶岩的开采、破碎加工成本远高于其余硅质原料,目前主要利用特殊条件下形成的伟晶岩中的石英矿物制作高纯石英,是目前全球最重要的高纯石英矿石类型(见表 1)。

表 1 石英的矿石类型及主要应用

Table 1 Ore types and main applications of quartz

序号	矿石类型	成因	应用
1	脉石英	热液成因(变质热液、岩浆热液、伟晶岩)	中高端产品:主要用于高端玻璃、硅微粉、工业硅、高纯石英等
2	石英砂岩	沉积成因	低端-中端产品:整体加工提纯上限有限,主要用于玻璃、陶瓷、冶金、耐火材料、板材等大宗产品行业
3	石英岩	变质成因	低端-中端产品:主要用于玻璃、陶瓷、冶金、石油压裂砂、化工、机械铸造等
4	天然石英砂	沉积成因	低端-中端产品:冶金、陶瓷、铸造砂、石油压裂砂等
5	粉石英	风化残积	中端-中高端:耐磨材料、硅微粉、耐火材料、陶瓷、板材等
6	水晶	热液成因	高端产品:压电水晶、光学、天然装饰品等
7	花岗伟晶岩	岩浆热液成因	高端产品:高纯石英

1.3 石英的开发利用特点

不同行业对石英砂的成分、粒度、球度等理化指标要求各不相同。根据石英资源的开发利用特点,石英的主要应用领域、产品类型、产品用途、原料要求相关标准^[3,7-22]、产品特点见表 2。整体上, SiO₂ 含量 99.99% 以上的石英砂主要用于高纯石英玻璃、高纯硅微粉等产品领域,这些领域对石英砂中 Al、Ti、K、Na、Li 等各项杂质含量、粒度、包裹体等有严格要求,

杂质含量要求通常为 10⁻⁶ 级别,石英砂产品供应受原料矿石原始禀赋条件和加工技术制约,目前原料矿石较为稀缺,供不应求; SiO₂ 含量 99.9%~99.99% 的石英砂主要用于高端硅微粉、硅酸钠、光伏玻璃、高档玻璃等领域,这些产品通常仅对 Fe、Al 等关键元素和粒度有一定要求,石英砂产品供应受原料矿石加工技术条件、加工成本、运距等多重因素影响,目前市场处于“紧平衡”状态; SiO₂ 含量 99.9% 以下的石英砂

则用于平板玻璃、铸造、冶金、耐火材料、陶瓷、压裂砂、水处理以及建筑材料等大宗领域,这类产品多对粒度、球度、硬度、颜色、耐火度等物理特性有一定要求,对石英原料矿石和技工技术条件要求低,但原料供应受运距影响突出,目前市场供应充足。

2 石英资源市场

2.1 不同领域石英消费量及产值

2021 年,我国消费石英砂总量约为 1.17 亿 t(不含砂石骨料),矿石初步加工而成的石英砂原料总产值约 390 亿元(不含下游产业延伸),其中 4N5 级以上高纯石英砂产量 8 万 t,产值约 32~40 亿元,约占整个

石英产业总产值的 8.4%。在石英的各个应用领域中,石英砂消费量较大的领域有玻璃(约 3 400 万 t)、铸造(约 3 300 万 t)、硅铁冶炼(约 1 050 万 t)、压裂砂(超过 1 500 万 t)、工业硅(约 582 万 t)以及陶瓷(约 500 万 t)等,累计消耗量超过了整体用量的 88%,见图 1。石英砂产值较大的消费领域有玻璃用石英砂(约 114 亿元)、高纯石英砂(32 亿元)、铸造石英砂(约 49.5 亿元)、压裂砂(约 45 亿元)、工业硅用石英砂(约 34.92 亿元)以及硅铁冶炼用石英砂(约 31.47 亿元)等,累计产值超过整体产值的 80%,见图 2。其中,高纯石英砂在整个石英产业中,产量占比不到 1%,产值却达到了 14.9%,高纯石英砂体现出产量小、产值大、附加值高的特点。

表 2 不同领域对石英原料要求和产品主要技术特点^[2-4,8-22]
Table 2 Requirements for quartz raw materials and main technical characteristics of products in different fields^[2-4,8-22]

行业领域	主要产品类型	产品应用	原料或产品部分技术要求	产品特点
玻璃行业	平板玻璃	常用平板玻璃及其衍生品,如夹丝玻璃、压花玻璃、玻璃砖、空心玻璃等	SiO ₂ ≥90.50%, Al ₂ O ₃ ≤4.50%, Fe ₂ O ₃ ≤0.30%, 水分<5%	/
	玻璃纤维	复合材料中的增强材料,电绝缘材料和绝热保温材料等	根据用途 P ₂ O ₅ 和 Fe ₂ O ₃ 等有不同要求,粒度通常<0.04 mm	绝缘性好、耐热性强、抗腐蚀性好、机械强度高
	器皿玻璃	制作瓶罐、玻璃仪器、药用玻璃器皿等,如啤酒瓶、玻璃杯及装饰品,玻璃药瓶等	一般器皿, SiO ₂ ≥90%, Al ₂ O ₃ ≤4%, Fe ₂ O ₃ ≤0.3%	药用硅硼玻璃要求耐热性和化学稳定性好
	钢化玻璃	建筑玻璃外墙、汽车玻璃等	要求同平板玻璃,制作工艺和技术不同	强度高,不易碎
	光伏玻璃	超白玻璃,用于太阳能光伏发电系统的盖板玻璃、高档建筑外墙玻璃等	SiO ₂ ≥99%, Al ₂ O ₃ ≤0.50%, Fe ₂ O ₃ ≤80 μg/g,等,粒度 0.1~1mm	透光率高、自爆率低、透明度高
		光伏薄膜电池基板玻璃(非晶硅电池玻璃基板)	SiO ₂ ≥98.50%, Al ₂ O ₃ ≤1.00%,等,粒度 0.1~0.6 mm	绝缘性好,机械强度高
		信息显示基板玻璃	SiO ₂ ≥98.80%, Al ₂ O ₃ ≤0.50%,等,产品性能主要体现在后期加工技术上	热稳定性好、机械强度高、分辨率高
高纯石英行业	电子玻璃	高强盖板玻璃、超薄触摸屏玻璃等,如手机盖板、触摸屏、平板电脑等	目前市场上主流的触摸屏盖板玻璃主要为高铝硅酸盐玻璃,通常 SiO ₂ 含量>99.6%,铁钠钾有相关要求	高透光性、高耐划伤性、高抗冲击性、良好加工性等
	电光源级	汽车疝气灯、医用紫外线杀菌灯、高压汞灯、金属卤化物灯、特种光源用石英管棒等	不同领域对杂质要求不同目,如美国尤尼明公司 IOTA-6 可做 UHP 光源玻璃; IOTA-CG, STD 可做金属卤化物灯,粒度 40~200 目	耐高温、透光度高
	光纤级	通信光纤等	纤芯多为人造高纯石英;包层通常为低碱,超高纯,如挪威 TQC 公司 NC4XF 系列产品	利用纤芯和包层折射率差实现光传导;纤芯加少量氧化锗,增强折射率;包层玻璃加入少量 B,降低折射率
	半导体级	半导体管、外层料等	通常低以低铁含量、低碱金属含量、低羟基含量,如江苏太平洋 PQE 系列;粒度 100~400 μm	纯度高,有好的抗析晶性,耐高温、强度高
	光学级	光学镀膜、高端镜头、光学仪器、航空玻璃等	人造高纯石英与天然高纯石英均有利用,如挪威 TQC 公司 NC4A 系列产品	透光率高、热膨胀系数低、高强度
	光伏级	光伏管、棒,光伏坩埚外层料等	总杂质含量≤25 μg/g,其中 K、Li、Na 含量和≤2.5 μg/g;粒度 70~350 μm	有好的抗析晶性,耐高温、强度高
	半导体坩埚、光伏坩埚级	半导体坩埚、光伏坩埚内层料等	低碱,低包裹体,超高纯,粒度 70~350 μm,如美国尤尼明公司 IOTA-8	有好的抗析晶性,耐高温、强度高
机械行业	铸造用砂	造型用砂,铸造生产中用来配制型砂和芯砂的一种造型材料	不同型号要求不同,通常 SiO ₂ ≥80%, Al ₂ O ₃ ≤10%,等;含泥量<1%;主要对粒度>0.15 mm;适宜的颗粒形状粒度	耐火度高、热稳定性好、透气性好、化学性质稳定
		3D 打印砂	SiO ₂ ≥90%, Al ₂ O ₃ ≤10%, CaO+MgO<0.6%,等,含泥量≤0.2%,粒度 0.053~0.3 mm	强度高,粒度适中

续表 2

行业领域	主要产品类型	产品应用	原料或产品部分技术要求	产品特点
电子、电工行业	工业硅	金属硅、有机硅、单晶硅、多晶硅等	通常 $\text{SiO}_2 > 99.0\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 < 0.25\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0.15\%$, 等	低纯度可以用于硅铝合金、有机硅等 ($\geq 98.5\%$); 高纯度 ($\geq 99\%$) 用于多晶硅、单晶硅
	硅微粉	普通硅微粉, 用于耐火材料、低端涂料、水泥等	$\text{SiO}_2 \geq 90\%$, $\text{Fe} < 100 \mu\text{g/g}$	耐高温, 不易腐蚀, 强度高
		结晶硅微粉, 低端覆铜板 (如冰箱、洗衣机用)、环氧塑封料 (如充电器、插排)、电工绝缘材料、胶黏剂、涂料等	硅微粉中 $\text{SiO}_2 \geq 99.6\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 20 \mu\text{g/g}$, 等	绝缘性好
		熔融硅微粉, 中端覆铜板 (如汽车、手机、电脑等)、环氧塑封料 (如洗衣机、冰箱、光伏组件等集成电路封装)、胶黏剂、涂料等	硅微粉中 $\text{SiO}_2 \geq 99.8\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 8 \mu\text{g/g}$, 石英原料中气液包裹体较少	绝缘性好
冶金行业	冶金辅料	作冶炼添加剂、熔剂以及各种硅铁合金	通常用 $\text{SiO}_2 > 97\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 < 1\%$, 等	炼钢时加入硅铁合金, 能够节能、去氧等
	碳化硅	黑碳化硅、绿碳化硅, 主要用于磨料、磨具、高级耐火材料, 精细陶瓷等	通常 $\text{SiO}_2 > 99.3\%$, 粒度 $0.5 \sim 3 \text{ mm}$	硬度高、化学性能稳定、导热系数高、热膨胀系数小
耐火材料行业	耐火硅砖	炉窑用高硅砖、普通砖等	$\text{SiO}_2 > 96\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 < 1.3\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 1.3\%$	耐高温
化工行业	硅酸钠	硅酸钠是橡胶、塑料的填料 (提高耐磨性)、白炭黑、硅胶、干燥剂及无定形二氧化硅等原材料	通常硅酸钠对石英砂要求至少达到容器玻璃用砂标准, $\text{SiO}_2 \geq 99.5\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 0.01\%$, 等	化学性质稳定
石油钻井	压裂砂	石油压裂砂	粒度根据地层孔隙度确定, 粒径相对均一, 球度好, 酸溶度低	强度高, 性质稳定, 球度好
陶瓷行业	陶瓷	日用陶瓷、无线电陶瓷器件, 是配制配料和釉料的良好原料	日用陶瓷 $\text{SiO}_2 \geq 98.5\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0.15\%$; 电陶瓷 $\text{SiO}_2 \geq 98.5\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 1\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0.05\%$, 等	石英在高温下可以转变成莫来石晶体, 使得瓷器具有较高的机械强度和化学稳定性
板材	板材砂	人造石材	耐水度 $\leq 0.2\%$, 耐酸度 $> 99\%$, 无杂色	硬度高、耐腐蚀、耐磨损
水处理	石英滤料	水处理用石英滤料	$\text{SiO}_2 > 98\%$, 含泥量 $< 1\%$, 破碎料磨损率之和 $< 2\%$, 盐酸可溶率 $< 3.5\%$	化学性质稳定, 无毒无害

2.2 主要应用领域产业现状分析

2.2.1 玻璃行业

玻璃行业是石英资源消费量最大的领域, 广泛应

用于建筑、汽车、新能源等领域, 2021 年我国玻璃产量为 101 665 万重量箱, 合计石英砂消耗约 3 406 万 t。玻璃行业主要产品类型有平板玻璃、器皿玻璃、钢化玻璃、光伏玻璃、电子玻璃等。目前我国制造平板玻

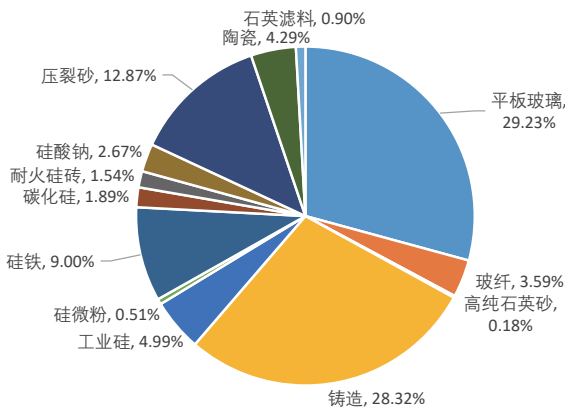


图 1 2021 年中国不同领域石英砂产量分布
Fig. 1 Distribution of quartz sand production in different fields of China in 2021

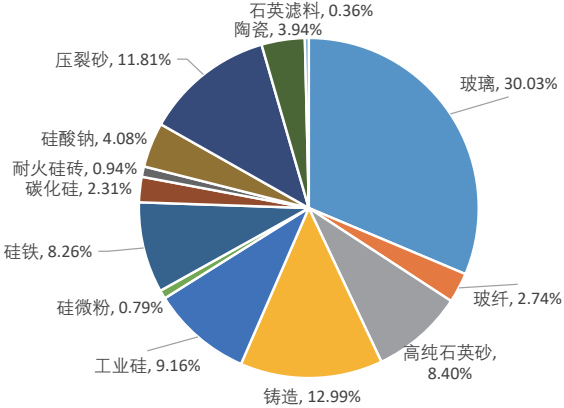


图 2 2021 年中国不同领域石英砂产值分布
Fig. 2 Distribution of arenaceous quartz production value in different fields of China in 2021

璃、钢化玻璃等常规玻璃所用石英资源要求较低,可从规模大易开采加工的石英砂岩、石英岩等资源中获得,不同用途玻璃用砂价格并不一致,目前整体砂的价格在200~300元/t。制作光伏玻璃等低铁超白玻璃的石英砂要求较常规玻璃稍高(见表1),可以通过对部分优质的石英砂岩、脉石英、石英岩、天然石英砂等资源加工获取,光伏玻璃用砂价格500~700元/t。玻璃下游需求主要来自于房地产、汽车、家电、光伏、日用器皿和电子等行业,其中地产以及与地产相关的需求占到了玻璃下游需求的75%,受房地产等行业需求不振的影响,未来常规玻璃需求增长缓慢;在“双碳”目标推动下,我国光伏产业快速发展,新增装机量不断提升,新增装机量年复合增长率为23%,未来光伏玻璃将持续高速增长。

2.2.2 铸造

铸造砂是除玻璃外石英资源的第二大消费领域,石英砂年消耗约3300万t,主要资源来源为石英砂岩、天然石英砂等。铸造用石英砂要求价廉易得、铸型制造简便、具有高的耐火度和热稳定性,通常要求铸造

砂中含泥量低, SiO_2 含量在90%以上(较大的铸钢件则要求 SiO_2 含量在97%以上),适宜的颗粒形状和颗粒组成,不易被液态金属润湿。2021年我国铸造砂产量达到3300万t,铸造砂价格在100~200元/t之间。3D打印砂为铸造型砂中较为特殊的型砂,随着3D打印技术快速发展,是目前铸造砂中用量增长较快的新类型,3D打印砂通常要求石英颗粒强度高, $\text{SiO}_2 \geq 90\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 10\%$, $\text{CaO}+\text{MgO} < 0.6\%$, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} < 0.4\%$,含泥量 $\leq 0.2\%$,粒度0.053~0.3mm。

2.2.3 工业硅

工业硅是由硅石和碳质还原剂在矿热炉内冶炼而成的产品,位于硅基新材料产业链的初始端,通过工业硅可以加工制造单晶硅、多晶硅、有机硅、铝合金等基础材料,是光伏、半导体、有机硅、硅合金等下游产业的重要原料(图3)。由于利用化学冶炼方法获得,因此工业硅可以从各类品质石英资源获得,2021年我国工业硅产量达到261万t,消耗石英砂580万t,主要从石英砂岩、石英岩、石英砂、脉石英等资源获取。

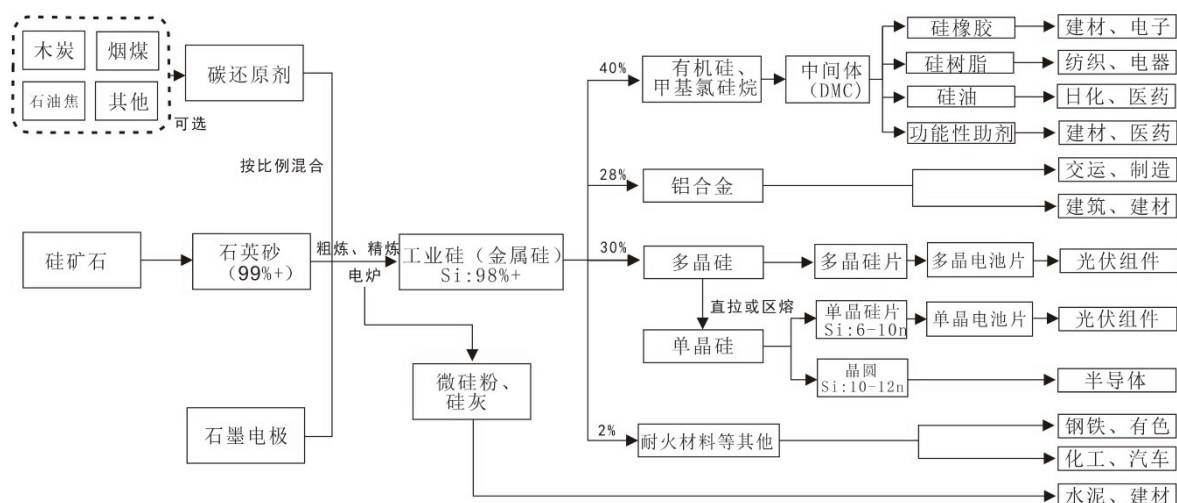


图3 工业硅产业链示意图

Fig. 3 Schematic diagram for industrial silicon industry chain

2.2.4 硅微粉

硅微粉是由天然石英或熔融石英经破碎、球磨、浮选、酸洗提纯、高纯水处理等工序加工而成的微粉,具有硬度大、导热系数低、耐高温、绝缘和化学性能稳定等优点,广泛用于覆铜板、环氧塑封料、涂料、建筑、电路板、陶瓷等领域。大部分硅微粉可以利用石英砂岩、石英岩、脉石英、天然石英砂以及粉石英等资源加工制得;优质的高纯球形硅微粉多用于半导体、电子等封装材料,这些产品要求纯度高、放射性低、绝缘等特点,通常需要利用纯度 $>99.99\%$ 的高纯石英加工制备,并且对Th、U等要求严格,通常利用优质

的脉石英加工制得。2021年我国各类型硅微粉产量达到60万t(含混凝土、耐火材料等领域用硅微粉),结晶硅微粉、熔融硅微粉、球形硅微粉等中高端产品也达到了近30万t。

2.2.5 冶金行业

冶金行业是石英的主要消费领域,石英可以作冶炼添加剂、熔剂炼制各种硅铁合金,炼钢时加入硅铁合金,能够节能、去氧等,2021年冶金行业消耗石英砂约1049万t。炼铁用硅石通常要求 $\text{SiO}_2 > 97\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 < 1\%$, $\text{P}_2\text{O}_5 < 0.03\%$, $\text{CaO} < 0.8\%$,各类杂质中,磷含量是最重要的指标,会对后期钢铁冶炼产生影响,特

级硅铁除 P 外, TiO_2 也为必检项目。此外, 利用石英制造的碳化硅具有硬度高、化学性能稳定、导热系数高、热膨胀系数小、耐磨性能好等特点, 广泛用于磨料、耐磨剂、磨具、高级耐火材料等领域。

2.2.6 化工行业

化工领域主要利用纯碱和石英砂为原料制作硅酸钠。硅酸钠又称水玻璃, 是制造硅胶、白炭黑、沸石分子筛、偏硅酸钠、硅酸钾钠等各种硅酸盐类产品的重要原料, 广泛应用于轻工业、机械、建筑、石油催化等领域。目前, 在硅酸钠各应用领域中, 洗涤剂及制皂工业的用量最高, 约占 33%; 其次是白炭黑, 用量约为 25%; 造纸业用量约为 13%, 黏合剂约占 10% (见图 4)。生产硅酸钠对石英砂要求纯度较高, 至少达到容器玻璃级石英砂标准, 通常硅酸钠要求 $\text{SiO}_2 \geq 99.5\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 0.01\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0.03\%$ 、 $\text{ZrO}_2 \leq 0.01\%$ 。2021 年中国硅酸钠产量约为 464 万 t, 消耗石英 311 万 t。

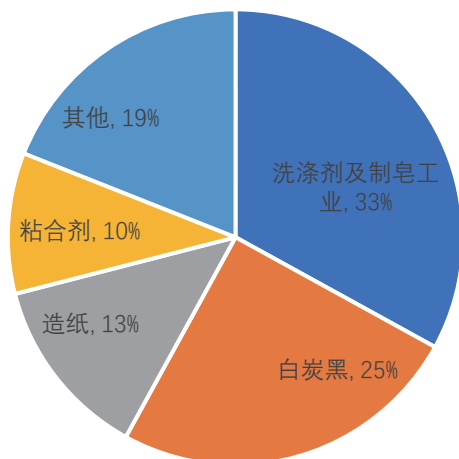


图 4 硅酸钠下游市场应用占比

Fig. 4 Proportion for downstream market applications of sodium silicate

石油压裂砂支撑剂是随同高压溶液进入到地层中, 充填在岩层裂隙中, 以起到支撑裂隙作用的材料, 填充支撑剂后油气通道通畅, 能够增加油气产量。目前国内外使用的石油压裂支撑剂主要有石英砂、陶粒支撑剂和覆膜支撑剂。与传统的陶粒支撑剂和覆膜支撑剂相比, 石英压裂砂具有化学性质稳定、强度高、密度适中、价格低廉、环保等优点, 但受运距影响较大。压裂砂支撑剂对石英要求通常为: 粒度 (各种规格 106~3 350 μm , 各规格压裂砂粒径要求相对均一)、球度 (不低于 0.6)、酸溶解度 ($\leq 5\%$)、抗破碎度等; 石英纯度无要求。中国目前已投入开发的压裂用石英砂主要分布于宁夏青铜峡、河北围场、内蒙古赤峰和通辽等地区, 国内重大油田气田附近压裂砂市场供不应求, 2021 年, 我国压裂砂产量约 1 500 万 t, 预计

2024 年全球压裂砂需求将达到 1.81 亿 t, 2019—2024 年年均增长 8% (复合年增长率, CAGR), 市场前景广阔。

3 高纯石英

3.1 高纯石英的应用

高纯石英是指 SiO_2 含量达到 99.99%, 杂质元素、包裹体、粒度等达到半导体、光纤通信、光伏、光学、电光源等领域要求的石英产品^[12,13-15]。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^[4], 利用高纯石英制成的光伏半导体级坩埚、半导体晶圆石英隔热锭、超高功率光源玻璃、光纤、汽车光源玻璃、特种光源玻璃、精密光学仪器、航空玻璃等高技术产品, 是新一代信息技术、新能源、新材料、高端装备、新能源汽车、绿色环保及航空航天、海洋装备等战略性新兴产业不可或缺的关键基础材料, 对于战略性新兴产业健康发展具有重要意义。

不同应用领域对高纯石英的纯度、杂质元素配比、粒度、力学性能、热学性能等要求和用量不同, 需要综合各个要素进行综合判断。目前全球各高纯石英生产公司均有自己相应的高纯石英产品标准, 如美国矽比科公司的 IOTA 系列标准、挪威天阔石公司的 NW 标准、俄罗斯石英公司的 RQ 系列标准、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矽比科公司的 IOTA-STANDARD 等级石英砂, 该产品是以美国 Spruce Pine 地区花岗岩伟晶岩中天然石英为原料加工制得, 高纯石英中各项杂质元素指标被当作高纯石英砂的“国际标准纯度”^[4]。IOTA 系列其他产品也是目前全球生产石英玻璃的最优质原料, 如 IOTA STD、IOTA CG 等“低等级”石英砂可以作为低膨胀系数、高透光度的电光源、照明设备的主要原料, 用来生产高压汞灯、卤素灯、紫外线杀菌灯以及特种光源用石英管棒等; IOTA-4、IOTA-6 等石英砂中 B 元素和过渡金属元素含量低, 可以减少析晶和杂质扩散现象, 保证单晶硅提拉及后续加工过程中维持较高的纯度环境, 主要用来生产小尺寸半导体级石英坩埚、CZ 坩埚、半导体扩散管以及 UHP 光源玻璃等; IOTA 8 石英砂产品纯度高、性质稳定、羟基及包裹体等含量极少, 为 IOTA 系列产品的高端产品, 是生产大尺寸光伏或半导体坩埚 (32 英寸或更大) 内层涂料的必备原料。当前全球半导体坩埚和大尺寸光伏坩埚内层高纯石英砂基本由美国矽比科公司垄断。

3.2 全球高纯石英市场供需

随着战略性新兴产业的快速发展, 全球高纯石英需求量快速增长, 2022 年, 全球 4N5 级及以上高纯石

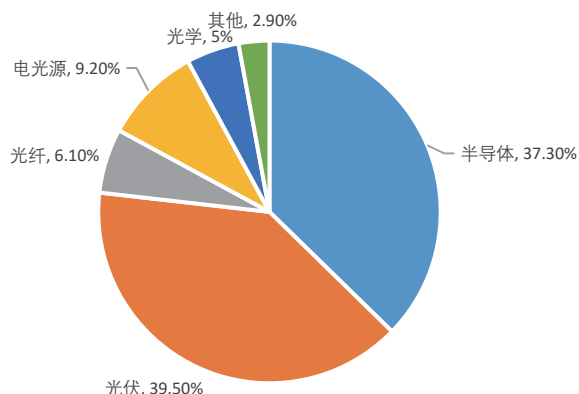


图5 2022年全球不同领域高纯石英用量分布

Fig. 5 Consumption distribution of high purity quartz in different fields worldwide in 2022

英需求量约25万t(不含高纯硅微粉),较2019年15万t增长了近一倍,其中半导体领域用量占比37.3%、光伏领域用量占比39.5%、电光源领域用量占比9.2%、光纤通信领域用量占比6.1%、光学玻璃领域用量占比5%、其他领域用量占比2.9%(见图5)。目前应用

于光伏、半导体等领域的天然高纯石英没有替代材料,资源的安全保障直接影响我国相关产业的产业安全。

矿石中石英矿物天然禀赋特征(如流体包裹体、矿物包裹体、晶格杂质含量等)是影响高纯石英可加工性的最主要因素^[16-17],全球可加工4N5级及以上质量的高纯石英矿床极为稀少、分布不均,主要分布于美国、挪威、俄罗斯、印度等国家,目前全球开发利用的高纯石英矿床类型主要包括花岗伟晶岩型(包括伟晶状花岗岩)、热液脉型以及水晶等^[18-20],其中花岗伟晶岩型石英资源品质好、规模大,是目前最重要的矿床类型。

全球高纯石英产能集中,供应有限。2022年全球高纯石英产量约23万t,主要生产企业有美国矽比科、挪威天阔石、中国石英股份、俄罗斯石英等。2022年全球高纯石英市场需求量约25万t,高纯石英市场尤其是高端产品供不应求,国内高纯石英砂价格一路飞涨,例如用于光伏坩埚的内层砂由2023年初的15万元/t暴涨至2023年8月的40万元/t(见图6)。

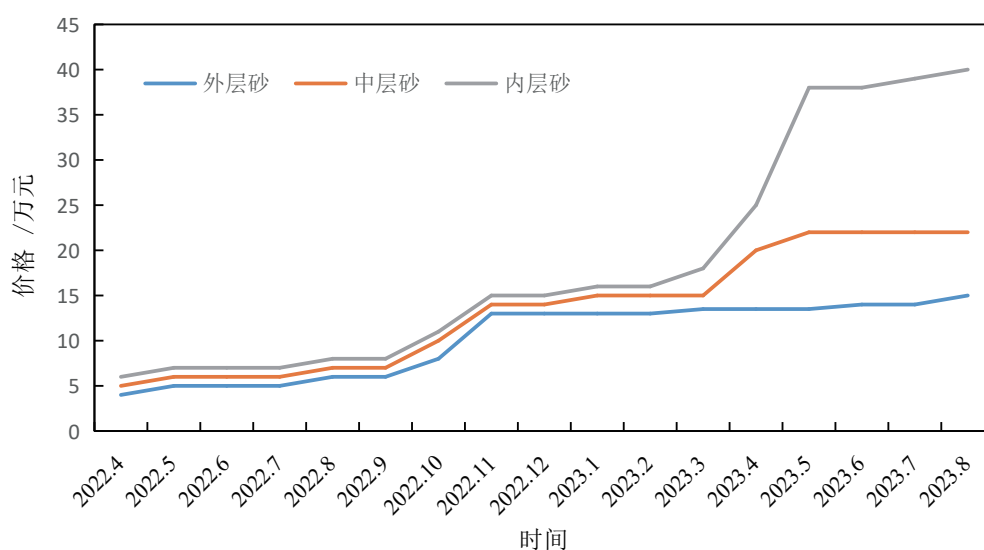


图6 光伏坩埚用砂价格走势

Fig. 6 Price trend of high purity quartz for photovoltaic crucibles

3.3 我国高纯石英市场现状及预测

我国是全球高纯石英最大消费国,2022年市场需求量约为15万t,约占全球总消费量的60%,但国内高纯石英产量有限,2021年仅为8万t,2022年大约9~10万t。国内高纯石英生产企业主要集中在江苏连云港等地区,虽然我国企业能够生产部分高纯石英砂和高纯石英产品,且近年来国内新上较多高纯石英生产项目,但国内高纯石英生产企业所用原料矿石基本依赖进口,资源对外依存度达到95%以上,如石英股份和福东正佑作为国内最大的两家生产企业,其所用石英原料主要为印度、安哥拉等国家的脉石英资源,

大尺寸石英坩埚(>32英寸)所用高纯石英原料全部来自美国Sibelco公司的Spruce Pine花岗伟晶岩型矿床。高纯石英资源已经成为世界稀缺、我国短缺的急需战略性资源,高纯石英资源安全供给迫在眉睫。

我国石英资源储量丰富,优质的石英砂岩、石英岩、脉石英等分布广泛^[22],但是高品质、有规模的高纯石英资源匮乏,严重影响后续高纯石英产业安全。随着信息技术、人工智能、新能源等战略性新兴产业的发展,我国高纯石英需求量将持续增加,光伏和半导体领域将是带动高纯石英消费的最大增长点。未来全球光伏发电将进入规模化发展新阶段,根据中国光伏行业协会预测,2022—2027年全球年均新增光伏

装机规模将达到 400 GW, 2027 年全球累计光伏装机量将超过煤炭, 领先的硅片制造企业纷纷布局新建产能, 应快速匹配上下游原材料满足装机需求; “十四五”期间全国许多地方都制定了相关集成电路产业规划, 并提出了 2025 年产业规模目标。预估到 2025 年, 我国集成电路产业规模(设计、制造、封测、设备、材料)将高达 4 万亿元, 随着电子信息行业的不断发展, 半导体行业对高端石英产品的需求量有望继续保持较高的增长势头。

预计到 2025 年我国 4N5 级及以上高纯石英用量将超过 25 万 t, 年复合增长率约 20%, 国内高纯石英供需缺口将超过 10 万 t, 资源安全保障问题亟待解决, 国内针对高纯石英调查评价研究工作正越来越被重视, 相关评价方法也正积极推进^[4,22]。

4 结论及建议

(1) 石英资源广泛应用于玻璃、机械、电子电工、冶金、石油、耐火材料、化工等多个领域, 是重要的基础性非金属矿产资源。随着战略性新兴产业的快速发展, 石英在半导体、光伏、光纤、新材料等领域作用越来越突出。

(2) 玻璃、铸造、冶金、压裂砂、工业硅、陶瓷等领域是石英最大消耗领域, 合计消耗超过石英砂消耗量的 88%, 高纯石英砂在整个石英产业中, 产量占比不到 1%, 产值却达到了 14.9%, 高纯石英砂体现出产量小、产值大、附加值高的特点。

(3) 不同应用领域所利用石英砂指标各不相同, 其价值差异巨大, 在石英资源开发利用过程中应充分考虑市场需求、资源禀赋、交通运距等条件, 分类评价, 分级利用, 充分发挥出石英资源的最大价值。

参考文献:

- [1] 常丽华, 陈曼云, 金巍, 等. 透明矿物薄片鉴定手册[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 30-36.
CHANG L H, CHEN M Y, JIN W, et al. Manual for the identification of thin sections of transparent minerals[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 30-36.
- [2] 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.
- [3] 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]. 北京: 地质出版社, 2020: 1-15.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Specification for silicon material exploration: DZ/T 0207—2020[S]. Beijing: Geological Publishing House, 2020: 1-15.
- [4] 张海啟, 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, 2022, 42(5): 49-54.
ZHANG H Q, ZHANG L, LIU L, et al. Study on the general situation and analysis of supply and demand of high purity quartz[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(5): 49-54.
- [5] PERNY B, EBERHARDT P, RAMSEYER K. Microdistribution of aluminum, lithium, and sodium in α -quartz: Possible causes and correlation with short lived cathodoluminescence[J]. American Mineralogist, 1992, 77: 534-544.
- [6] 李胜荣, 许虹, 申俊峰. 结晶学与矿物学[M]. 北京: 地质出版社, 2008, 1-50.
LI S R, XU H, SHEN J F. Crystallography and mineralogy[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008, 1-50.
- [7] 国家建筑材料工业局. 平板玻璃用硅质原料: JC/T 529—2000[S]. 北京: 国家建筑材料工业局标准化研究所, 2000: 1-4.
State Bureau of Building Materials Industry. Sand for making flat glass: JC/T 529—2000[S]. Beijing: Standardization Research Institute of State Bureau of Building Materials Industry, 2000: 1-4.
- [8] 褚强, 张明. 石英产品的市场开发与应用[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2010(1): 17-21.
CHU Q, ZHANG M. The market development and application of quartz products[J]. China Non-Metallic Minerals Industry, 2010(1): 17-21.
- [9] 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]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-5.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. High purity arenaceous quartz used in photovoltaic applications: GB/T 32649—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1-5.
- [10] 中华人民共和国信息产业部. 电子及电器工业用二氧化硅微粉: SJ/T 10675—2002[S]. 北京: 信息产业部, 2002: 1-8.
Ministry of Information Industry of the People's Republic of China. Silicon dioxide micropowder for electronic and electrical equipment industry: SJ/T 10675—2002[S]. Beijing: Ministry of Information Industry, 2002: 1-8.
- [11] 李勇. 人造石英石生产原料、加工、应用及未来展望(一)[J]. 石材, 2022(8): 44-48.
LI Y. Raw materials, processing, application, and future prospects for the production of artificial quartz stone[J]. Stone, 2022(8): 44-48.
- [12] 中华人民共和国自然资源部. 高纯石英用硅质原料评价工作指南(报批稿)[S]. 北京: 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 2020: 1-15.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Guidelines for the evaluation of siliceous material for high-purity quartz(Draft)[S]. Beijing: Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, 2020: 1-15.
- [13] HARBEN P W. The industrial mineral handybook: a guide to markets, specifications and prices (4th edit)[M]. London: Industrial Mineral Information, 2002, 412.
- [14] 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.
- [15] AL-ANI T, GRÖNHOLM S. High purity quartz (HPQ): mineralogical, geochemical and their potential occurrences in Finland. Kuopio. Kuopio: Geological Survey of Finland[R]. 2019: 1-24.
- [16] RUSK B, LOWERS H A, REED M H. Trace elements in hydrothermal quartz: Relationships to cathodoluminescent textures and insights into vein formation[J]. Geology, 2008, 36(7): 547-550.
- [17] ROTTIER B, CASANOVA V. Trace element composition of quartz from porphyry systems: A tracer of the mineralizing fluid evolution[J]. Mineralium Deposita, 2021, 56(5): 843-862.

- [18] GÖTZE J, PAN YM, MÜLLER A, et al. Trace element compositions and defect structures of High-purity quartz from the Southern Ural region[J]. *Russia Minerals*, 2017, 7(189): 2–19.
- [19] ZHOU HY, MÜLLER A, BERNDT J. Quartz chemistry fingerprints melt evolution and metamorphic modifications in high-purity quartz deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2023, 356: 179–195.
- [20] XIA M, SUN C, YANG X Y, et al. Assessment of gold-bearing quartz vein as a potential high-purity quartz resource: evidence from mineralogy, geochemistry, and technological purification[J]. *Minerals*, 2023, 13: 261.
- [21] 颜玲亚, 高树学, 陈正国, 等. 我国脉石英矿床类型及成矿规律[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2020(5): 10–14.
- YAN L Y, GAO S X, CHEN Z G, et al. Types and metallogenic regularity of vein quartz deposit in China[J]. *China Non-Metallic Minerals Industry*, 2020(5): 10–14.
- [22] 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): 1465–1477.
- WANG Y Y, DENG Y F, ZHAN J H, et al. Review on the research of characteristics and ore deposit genesis of high purity raw quartz[J]. *Geological Review*, 2021, 67(5): 1465–1477.

Utilization Characteristics and Application Progress of Quartz Resources

LI Zuomin^{1,2,3}, TAN Xiumin^{1,2,3}, ZHANG Liang^{1,2,3}, LI Jianguo^{1,2,3}, GUO Min^{1,2,3}, LIU Hangtao^{1,2,3}, LIU Lei^{1,2,3}, LV Zhenfu^{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: Quartz resources are important fundamental non-metallic mineral resources, widely used in glass, mechanical casting, electronics and electrical engineering, metallurgy, refractory materials, chemical engineering, ceramic bodies, etc. The technical requirements and consumption of arenaceous quartz for different industries are different. The macro summary of the utilization characteristics and current application status of quartz resources is of great significance for the quartz resources' rational utilization. The quartz resources' current reserves situation, different types of quartz ores' utilization characteristics and the main application directions in China are introduced. The technical requirements and main utilization characteristics of quartz raw materials in different fields such as glass, mechanical casting, electronics and electrical engineering, metallurgy, refractory materials, chemical engineering, ceramic bodies, etc are summarized. From the perspective of the entire industry of quartz resources' utilization, the usage and output value of quartz resources in each field are systematically reviewed. The current market situation and development trend for high purity quartz are detailed analysed. In order to improve the utilization level and guarantee capacity of quartz resources in China, some suggestions of the classified evaluation and graded utilization in the process of quartz resources's utilization are proposed.

Keywords: quartz resources; arenaceous quartz; technical characteristics; market situation; high purity quartz

引用格式: 李作敏, 谭秀民, 张亮, 李建国, 郭敏, 刘航涛, 刘磊, 吕振福, 曹飞. 我国石英资源的开发利用特点及应用进展[J]. *矿产保护与利用*, 2024, 44(2): 115–123.

LI Zuomin, TAN Xiumin, ZHANG Liang, LI Jianguo, GUO Min, LIU Hangtao, LIU Lei, LV Zhenfu, CAO Fei. Utilization characteristics and application progress of quartz resources[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2024, 44(2): 115–123.