

高纯石英

二氧化硅中的“大熊猫”

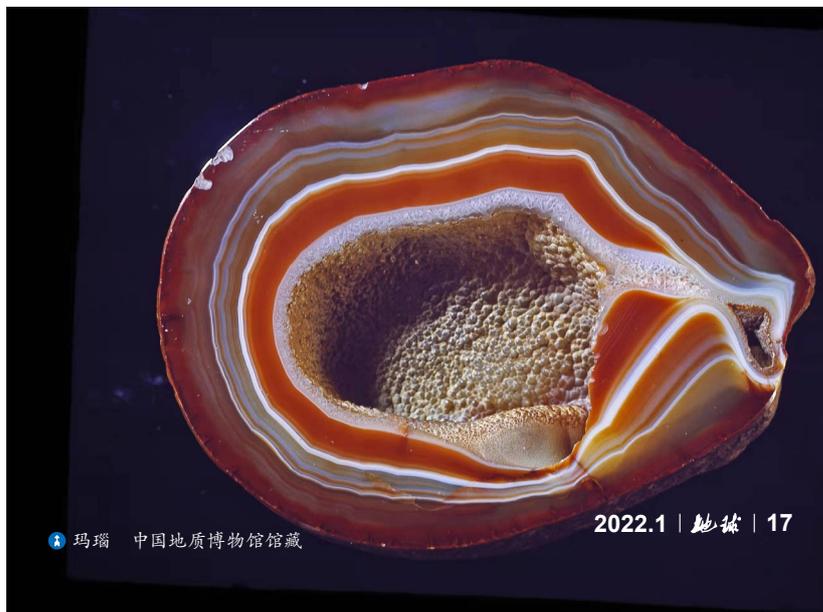
文 | 王九一

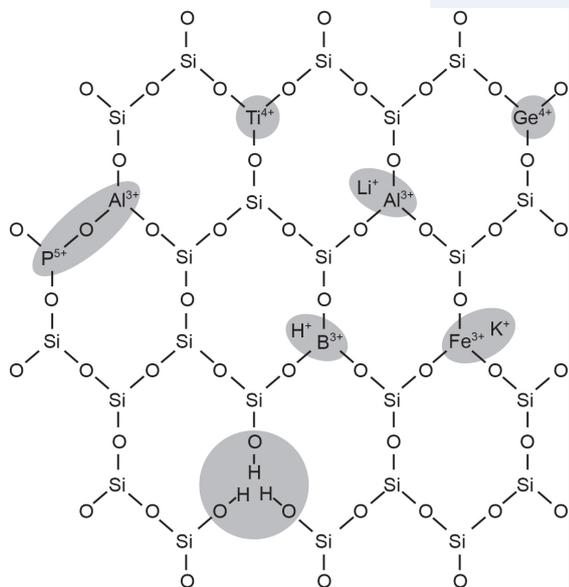
石英是一种非金属矿物，在大自然中随处可见。人类目光所及之处，都可以发现石英。如家里装修所用砂浆里面的沙子，厨房的石英石台面，外出游玩时看到河道中的沙子和洁白的鹅卵石，还有漂亮的水晶、玛瑙等都是石英。

在自然界中，虽然石英的分布非常广泛，但纯度很高的高纯石英却很稀有。高纯石英是半导体芯片、太阳能光伏、光纤通信、航空航天、精密光学和特种玻璃等高新技术产业不可缺少且无法替代的重要功能性材料，是真正“卡脖子”的矿物资源，保障我国高纯石英的供应对维护经济、军事、科技、网络等领域的国家安全具有极其重要的战略意义；对发展光伏新能源产业、助力国家实现“碳达峰”“碳中和”的目标也具有重要的战略价值。

石英的形成

石英可以形成于岩浆冷却结晶过程中，也可以由富含二氧化硅的热液冷却后形成。由于石英结晶时的温度和压力条件不同，因此也就形成了低温石英（ α -石英）、高温石英（ β -石英）和柯石英等不同的石英族矿物。其中，自然界分布最广的是低温石英（ α -石英）。石英是一种矿物，





石英晶格结构和晶格杂质元素示意图

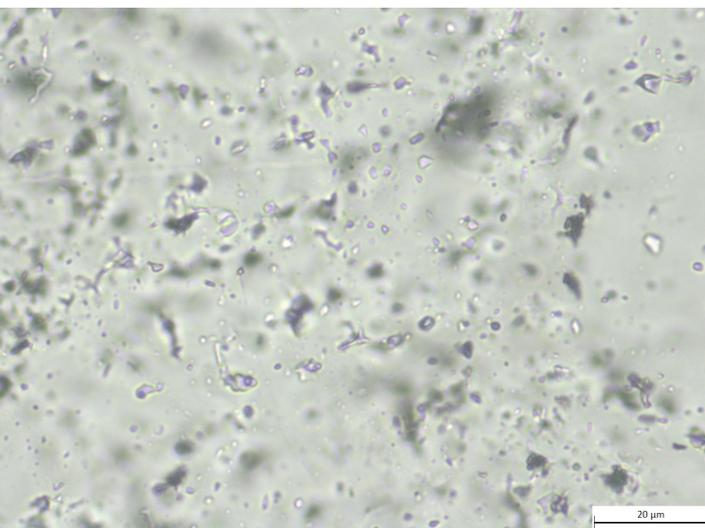
石英中的杂质及其危害

石英是硅元素的氧化物，分子式是 SiO_2 ，由一个硅原子和四个氧原子组成硅氧四面体晶体结构。石英晶体在结晶过程中以及后来经历的变质作用下，经常掺杂一些杂质元素。这些杂质元素有三种来源。第一种来源是晶格杂质，例如：铝、铁、钛、锆、磷、硼等三价、四价或五价离子常常会替代硅原子，占据硅原子所在的位置，而锂、钾、钠等单价离子常与铝、铁、钛、锆、磷、硼离子结合在一起，“漂浮”在硅氧键上，来达到晶体电荷平衡。替代硅原子或处在“漂浮”态的这些杂质元素被称为石英晶格杂质元素。

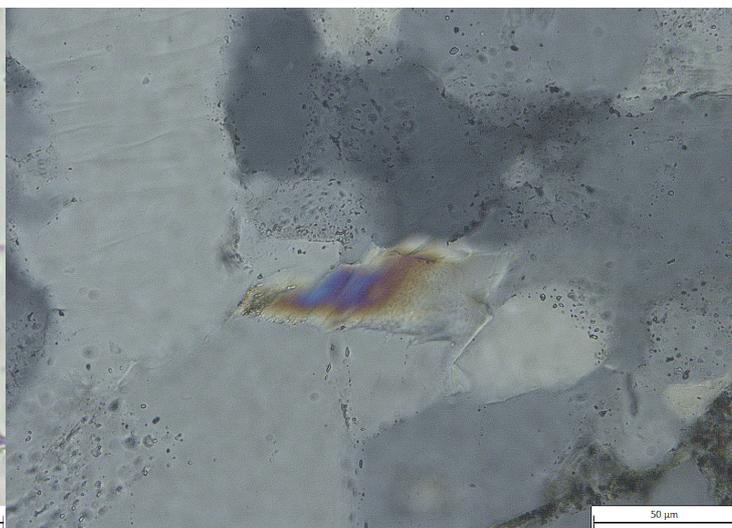
第二种是包裹体。石英的包裹体究竟是什么？石英晶体在结晶的过程中，由于种种原因，会将一些液体、气体和固体包裹在晶体中，从而就形成了固、气、液三种类型的包裹体。这些包裹体中含有的元素不是硅元素，而是钾、镁、钙、钠等元素，从而也成为石英的杂质来源。

第三种杂质来源是其他的矿物。因为石英晶体在形成时，石英晶体之间也常常伴生一些其他

与其他矿物一起组成集合体就形成了各种岩石。以石英作为单矿物的岩石包括：水晶、玛瑙、蛋白石、脉石英、石英岩、石英砂岩、深海放射虫硅质岩，等等。在这类岩石中，具有经济开采利用价值的就成为石英矿石。一些含有石英矿物的岩浆岩，如花岗伟晶岩、白岗岩等，所含的石英如果具有经济开采利用价值，也会作为一种石英的来源矿石。



石英晶体中的包裹体



脉石英矿石中的白云母

矿物,例如长石、云母等。这些矿物包含了钾、铝、铁等各种杂质元素。

一般来说,石英的纯度越高,杂质元素含量越低,质量就越好。这是因为,纯度高的石英具有更好的耐高温、耐腐蚀、低热膨胀性、高绝缘性和透光性等特性,才能满足半导体芯片、太阳能光伏、精密光学等高科技产业的质量要求。

不过,不同的杂质元素对这些产业的影响不同。例如:用作半导体和电光源产业的石英玻璃,铝、钠、钾、钙、镁和重金属元素含量要尽可能低,否则就会影响到这些材料的耐高温和高绝缘性能;用在光伏行业的石英坩埚,则要求硼和磷的含量要尽可能低。石英坩埚是控制大直径单晶硅必不可少的基础材料,用于半导体和太阳能光伏产业;而用在精密光学中的石英,则要求铁、铬、镍、钛等金属元素含量不能过高,否则就会影响透光性。

石英中的“大熊猫”——高纯石英

由于不同产业对石英的质量要求千差万别,所以,时至今日全世界也没有统一的高纯石英质量标准。不过,国内外的学者根据石英在高新技术产业的应用情况,归纳出了一些标准。例如,挪威和美国一些学者依据用在半导体和光伏产业的石英玻璃的质量要求,认为石英的杂质总含量要小于百万分之50,也就是说 SiO_2 的纯度要达到99.995%以上,才能称为高纯石英。我国一些学者认为 SiO_2 纯度达到99.9%或者99.99%以上的石英,就是高纯石英。我国海关总署在统计进口货物分类时,也把“其他含硅量超过99.99%的硅”单独归为一类,而把低于此数值的石英归入“硅砂

及石英砂”类。

既然高纯石英只是指纯度很高的石英,那么严格来说,可以从天然矿石中提取,或者通过人工合成的方式制得高纯石英。不过,从经济成本和社会消费量的角度,人工合成高纯石英难以满足工业需求。因此,绝大多数高纯石英还是要从天然矿石中制得。根据当前技术水平,人们可以从脉石英、石英岩、粉石英和伟晶岩等矿产资源中,甚至是一些金属矿的尾矿中提纯出高纯石英。

但是,自然界中的高纯石英原料矿却极为稀缺。目前,能够生产高纯石英的矿山主要分布在美国、俄罗斯、挪威和澳大利亚等国。其中,美国北卡罗来纳州的斯普鲁斯派恩矿山,通过一系列提纯流程,从花岗伟晶岩中提纯出纯度很高的高纯/超纯石英砂,一度供应了全世界100%的半导体级高纯石英砂。近些年,各国都在抓紧研究本国的



① 湖北咸宁脉石英的矿床和岩石



④ 安徽凤阳石英岩的矿床和岩石

石英矿产资源，开发先进的提纯工艺。

我国对高纯石英砂的需求增长迅猛，但绝大部分需要从国外进口，每年需花费15亿美元左右外汇。原因包含多个方面，一方面，国内多年来没有重视石英矿产资源，许多优质且具有高纯石英原料潜力的石英矿，本可以用来生产半导体和光伏产业等高精尖端产业所需的零件，却被用来为玻璃、冶金、建筑装饰、铺路等传统产业提供服务，资源浪费情况极其严重。第二，近年来我国光伏产业发展极为迅速，需要大量的高纯石英砂用来生产石英坩埚等必需的石英消耗品。第三，我国的石英提纯工艺相对落后，目前使用的传统提纯工艺，通常只能将原料的含硅量提高到99.9%—99.995%，仅能达到一些中低端高新产业要求，

难以满足芯片、光伏等高端产业的需求。一些新型提纯工艺尚处在实验室阶段，无法投入商业应用。

“超级硅”的大本事

高纯石英一般应用在高新技术产业，包括并不限于以下行业。

半导体业。半导体业对石英纯度的要求极高。在半导体生产过程中，无论是提拉法生产单晶硅，还是清洗单晶硅和印制集成电路，都需要用到高纯石英砂、硅微粉、多晶硅、石英坩埚和石英玻璃等。可见，半导体工业的原料和生产过程离不开高纯石英及其制品。

④ 用于通信行业的光纤

④ 用于半导体业的计算机芯片





精密光学

太阳能光伏

照明行业。高纯石英具有高透射性、耐高温、热膨胀系数小等特性，是生产耐高温石英灯管的基础原料，常用来生产耐高温、性能好的灯具，如：卤素灯、紫外灯、高温汞灯和氙灯等。

通信行业。在通信行业中，石英玻璃广泛用于光纤和其他光电设备。在微电子工业中，其主要应用是用作电子部件的环氧模塑化合物（EMC）中的填料。

光学领域。在光学领域，高纯石英可满足许多需求，可用于高性能的光学仪器，如：高清晰度、高透光率的光学透镜；高精度显微光学仪器；准分子激光光学系统、投影仪和其他特殊设备等。

光伏行业。作为一种新能源，太阳能光伏产业的发展有助于减少使用化石燃料，降低人类活动产生的二氧化碳排放量，对助力国家实现“碳达峰”“碳中和”的目标具有重要的战略价值。光伏产业需要消耗大量的高纯石英，生产1公斤适合制造太阳能电池的硅，需要约15公斤高纯石英。

在单晶硅的生产过程中高纯石英砂的消耗要高出单晶硅产量的5%左右。

通过上述的介绍，相信读者朋友们能够看出，虽然石英是一种非常普通且常见的矿物，但高纯石英却是一种稀缺的矿物原料，是新能源、新材料等新兴产业领域不可缺少的矿物资源。保障高纯石英供应渠道、建立自主供应链，对国家安全和经济社会运行，以及国与国之间的竞争都具有至关重要的战略价值。因此，我国需要加大对高纯石英原料矿石的质量评价和潜力评估，对优质石英原料进行保护性开采，并且研发先进的提纯工艺技术方案，力争早日实现高纯石英砂和超纯石英砂的规模性商业生产，保障国家高纯石英供应安全。

项目支持：中国地质调查局地质调查项目“全国矿产资源国情调查与综合评价（DD20190606）”“东部地区脉石英叶蜡石等特种非金属矿调查评价（DD20190817）”。

作者单位/中国地质科学院矿产资源研究所

责任编辑：李彦伟