

高纯石英制备工艺研究进展

李新雨¹, 韩洪波²

- (1. 国创硅基新材料科技(广西)有限公司, 广西北海 536000;
2. 攀枝花学院生物与化学工程学院(农学院), 四川攀枝花 617000)

[摘要]高纯石英是半导体、光伏、光纤通信及深紫外光学等战略性新兴产业不可替代的关键基础材料,其制备技术长期由少数国外企业垄断。本文系统评述了近五年(2020—2026 年)高纯石英制备的两条根本技术路线及其研究进展。天然矿物提纯路线以脉石英、花岗伟晶岩石英等为原料,经物理选矿(磁选、浮选、电选)与化学提纯(酸浸、氯化焙烧、煅烧水淬、微波/超声/真空辅助)逐级脱除共伴生矿物、气液包裹体和晶格杂质;化学合成路线以四氯化硅气相水解、正硅酸乙酯溶胶-凝胶及水玻璃沉淀为代表,可制备 6N 及以上超高纯石英,专用于光纤预制棒与深紫外光学等极端场景。分析表明,气液包裹体与晶格铝的脱除是制约深度提纯($\geq 4N8$)的两大瓶颈,真空焙烧、微波致裂及“偏析剥蚀法”等新技术展现出突破潜力。结合下游应用对杂质元素(Al、Fe、Ti、Na、K、Li 等)的 ppm/ppb 级严苛要求,梳理了半导体、光伏、光纤等领域的纯度分级标准,并评述了以斯普鲁斯派恩矿为核心的全球产业格局与中国国产替代的最新突破。最后对绿色低碳提纯、晶格杂质定向脱除及国产化攻关方向进行了展望。

[关键词]高纯石英;提纯工艺;化学合成;气液包裹体;晶格杂质

[作者简介]李新雨(1995—),男,内蒙古赤峰人,国创硅基新材料科技(广西)有限公司,研究方向:无机非金属材料。韩洪波(1981—),男,四川攀枝花人,攀枝花学院生物与化学工程学院(农学院),硕士。

[DOI] <https://doi.org/10.62662/kjxk0204002>

[中图分类号] TD97

[本刊网址] www.oacj.net

[投稿邮箱] kjxk999@163.com

引言

高纯石英(High-purity Quartz, HPQ)是以 SiO_2 为唯一成分、杂质元素总量极低的石英材料,凭借耐高温、低热膨胀、高透光、高绝缘和优异的化学稳定性,成为半导体、光伏、光纤通信、光学与电光源等战略性新兴产业不可替代的关键基础材料。早在 2018 年,中国国家统计局便在《战略性新兴产业分类》中确认了高纯石英矿产品的战略地位;欧盟于 2010 年将其列为高科技产业关键原料,美国地质调查局(USGS)已将其纳入关键矿产清单,欧盟《关键原材料法案》亦将其列入战略原材料。长期以来,高纯石英原料与深度提纯技术被国外少数企业垄断,成为制约中国半导体与光伏产业发展的“卡脖子”环节之一。

关于高纯石英目前尚无统一的国家标准定义,但学术界与产业界已形成大致共识的分级体系。按 SiO_2 纯度,通常分为标准纯度 3N($\geq 99.9\%$)、中

纯 4N($\geq 99.99\%$)、高纯 4N5($\geq 99.995\%$)和超高纯 4N8($\geq 99.998\%$)。国际上最早由 Müller 等人提出以微量杂质元素含量分类,建议高纯石英应满足(ppm): Al<30、B<1、Ca<5、Fe<3、K<8、Li<5、Na<8、Ti<10、P<2,且杂质总量小于 50 ppm。中国《重点新材料首批次应用示范指导目录(2018 年版)》则要求 Fe、Mg、Cr、Ni、Cu、Mn、Ca、Al、Na、Li、K、B 共 12 种杂质元素总含量小于 6 ppm。美国尤尼明(Unimin,现属矽比科 Sibelco)公司的 IOTA 系列产品长期被视为“世界标准纯度”:其中坩埚级 IOTA-CG(4N8)15 种杂质元素总量为 19×10^{-6} ,除 Al(约 14×10^{-6})和 Ti(约 1.2×10^{-6})外,其余元素均小于 1×10^{-6} ,构成行业事实标准。

本文围绕天然矿物提纯与化学合成两条根本技术路线,系统评述近五年(2020—2026 年)高纯石英制备的工艺进展、关键科学瓶颈与产业动态,并结合下游应用的纯度要求,对未来发展方向进行展望。

一、天然矿物提纯路线

(一)原料矿物类型与杂质赋存状态

天然石英矿物按成因可分为岩浆型、变质型和水热生长型三大类。工业上主要利用的原料包括:天然水晶(纯度高但储量稀少,已基本退出主流);花岗伟晶岩/白岗岩石英(当前4N8级超高纯石英最重要的原料,以美国斯普鲁斯派恩矿为代表);脉石英(晶粒粗大、质地较纯,但常含较多气液包裹体);以及石英岩与石英砂岩(成因复杂,多用于中低端产品)。研究发现,暗色矿物含量低的白岗岩不仅杂质元素含量低且稳定,是4N8型超高纯石英的主要原料;中国河南东秦岭漂池白岗岩-伟晶岩与斯普鲁斯派恩同属经历适度结晶分异的高分异花岗岩,具有侵位深度大、钛含量低的特点。

石英原料中的杂质按赋存状态可分为三类,其去除难度依次递增:①共伴生独立矿物杂质(长石、云母、赤铁矿、金红石、黏土矿物等,是Al、K、Na、Fe、Ti的主要载体,可通过物理选矿去除);②包裹体杂质(含矿物包裹体与气液包裹体,流体包裹体每立方厘米可达 $10^2 \sim 10^9$ 个,是石英制品产生气泡的主要原因);③晶格杂质(微量元素以类质同象替代硅进入晶格,主要有等价替代、离子团替代和电荷补偿替代三种方式,其中Al因离子半径与 Si^{4+} 接近、键合强度大而极难去除,其含量决定了高纯石英的品质上限)。研究表明,包裹体往往比晶格外的杂质元素更难去除,且高纯石英应满足单颗粒流体包裹体面积比率 $<1\%$ 、含流体包裹体颗粒数 $<1\%$ 、热失重 $<15 \text{ ppm}$ 的严苛要求。

(二)物理选矿与预处理

物理选矿旨在分离共伴生独立矿物,主要工序包括破碎、磨矿、分级(使石英单体解离并获得 $0.1 \sim 0.45 \text{ mm}$ 目标粒级,先进产线趋向采用电脉冲等无金属污染破碎技术)、擦洗与脱泥(去除表面黏土和薄膜铁)、磁选(去除磁性矿物,超导磁选可有效脱除微细弱磁性杂质)、重选、浮选(分离与石英物化性质相近的长石、云母,是关键工序,近年“无氟浮选”成为热点)、电选(干法作业、无废水的绿色除杂技术)及光电拣选等。雷绍民等人采用油酸钠反浮选除次生铁、混合胺加煤油浮选长石云母,将 SiO_2 由 98.6% 提纯至 99.97% 。

(三)化学提纯

物理选矿只能去除独立矿物,颗粒表面覆盖和内部包裹的杂质须靠化学法去除,其中酸浸是核心工艺。利用酸对金属氧化物杂质的溶解作用(且杂质在微裂缝中的溶解速率快于石英本体),常用热

的混合酸——HCl溶解铁等金属、HF溶解硅酸盐矿物、 H_2SO_4 和 HNO_3 提供强酸环境、草酸/柠檬酸等作络合还原剂高效除铁。赵雪淞等人以东海石英砂为原料,常压下经 $4.5 \text{ mol/L HCl} + 0.05 \text{ mol/L 草酸} + 0.01 \text{ mol/L 柠檬酸}$ 于 80°C 浸出 6 h ,除铁率达 73.67% , SiO_2 达 99.97% 。

酸浸动力学是深度提纯的理论基础。安徽凤阳石英矿经 900°C 煅烧淬火后再用 $\text{HNO}_3\text{-HCl-HF}$ 三元混酸浸出,Al含量从 1148 g/t 降至 45.89 g/t (去除率 96.0%), SiO_2 从 99.6% 升至 99.95% 。动力学分析采用多相未反应芯模型,发现酸浸反应速率的控制步骤是反应产物内扩散,且煅烧使反应活化能降低 69% ——处理后颗粒内部产生大量连通型裂纹和表面腐蚀坑,有利于酸液渗入。

氯化焙烧(氯化脱气)是深度提纯的关键工艺。将石英加热至 $1000 \sim 1500^\circ\text{C}$ 并通入 Cl_2 、HCl或混合气体,颗粒表层的碱金属、碱土金属残余包裹体与氯气反应生成挥发性氯化物被高温气流带走,对难溶于酸的Ti(利用 TiCl_2 挥发性)和碱金属Na、K去除显著。该工艺对进料要求高(一般需 SiO_2 已达 99.99% 、杂质总量小于 100×10^2),成本高、有危险性,是达到4N8及以上必不可少的技术。

热处理(煅烧-水淬)利用晶格缺陷原理:石英高温焙烧时晶格发生 $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow$ 方石英转型, Si-O 键角变化导致晶格失稳、杂质金属扩散至表面,快速水淬产生的热应力使颗粒开裂,暴露内部杂质便于后续酸浸,同时高温使气液包裹体受热膨胀爆裂。

近年兴起的强化技术还包括:微波辅助浸出/焙烧,利用石英与包裹体介电常数差异实现选择性加热,李飞飞等人对凤阳脉石英采用先微波(400°C 、 30 min)后破碎、再以 HNO_3 浸出并辅以超声,铁含量由 285 ppmw 降至 0.167 ppmw 以下,最大去除率达 99.94% ;超声波辅助(利用空化效应冲击颗粒表面);以及生物浸出(利用黑曲霉等微生物分泌有机酸溶解薄膜铁,能耗低、污染小,但反应慢,尚处研究阶段)。

(四)气液包裹体的去除

气液包裹体的去除是高纯石英提纯公认的关键难点,尤其是富气相、微小尺寸包裹体。主要技术手段包括:高温爆裂(当包裹体内压超过石英束缚压力即爆裂,但富气相包裹体可保持更高温度不爆裂);高温真空焙烧(1000°C 以上、真空条件下形成巨大内外压力差,据Guo等人的研究,真空焙烧使脉石英羟基含量由 $226.8 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 降至 $88.2 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,显著优于同条件常压焙烧的 $172.2 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$);微波

焙烧(可在低温下高效致裂包裹体)。相关退火-浸出工艺还可使石英中 H_2O 由 $165.9 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 降至 $37.8 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,并使 Al 的扩散距离由 $15.8 \mu\text{m}$ 缩短至 $6.1 \mu\text{m}$,有利于后续 Al 的偏析去除。

(五)深度提纯:晶格杂质的活化与分离

晶格杂质,尤其是 Al 的脱除是 2020 年以来的研究焦点,也是决定能否突破 4N8 的关键。常规焙烧水淬、磁选、酸浸可大幅降低 Fe、Cr、Ni、Na、K、Ca、Mg、Cu,氯化焙烧可降低碱金属 Na、K,但对 Al 几乎无效。

最新的代表性突破是武汉理工大学裴振宇等人提出的“偏析剥蚀法”。该工艺基于“扩散—偏析—剥蚀”三步机制:晶格杂质在石英体相中分布均匀,须先改变其分布使之富集才能分离。具体流程为:①用盐酸浸出清除表面界面杂质;②用氢氧化钠侵蚀活化石英表面、增加焙烧中空位生成量;③通过焙烧促使晶格杂质由内部向表面扩散并在表层偏析富集;④再用氢氧化钠剥蚀表层、溶解去除富集的杂质。经该工艺处理后,石英中 Al 含量由 $62.79 \mu\text{g/g}$ 降至 $7.8 \mu\text{g/g}$ (降幅约 88%),杂质元素总含量由 $241.77 \mu\text{g/g}$ 降至 $38.2 \mu\text{g/g}$,硅氧总含量达 99.994%,对填隙杂质 Na、K 也有明显分离效果。

在综述层面,Wei 等人系统评述了 4N8 级高纯石英提纯的关键方法与创新,明确指出微包裹体和晶格杂质仍是深度提纯的两大主要瓶颈,并重点评价了新兴分离工艺、强化酸浸、先进氯化焙烧,以及真空、超声、微波辅助等前沿强化技术。配套研究还表明,分段氯化焙烧可使 Fe 由 $2081.22 \mu\text{g/g}$ 降至 $20.20 \mu\text{g/g}$ (去除率 99.03%)。此外,“掺杂提纯”工艺(向石英中掺入 NaNO_3 、 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 并于 900°C 煅烧,使掺入元素与杂质反应生成易溶物再经水/酸洗)可将杂质总量降至 25×10^2 以下,达 IOTA-Std 标准。

二、化学合成路线

当天然矿物无法满足纯度或对包裹体、羟基有极端要求时,采用化学合成路线。合成法理论纯度可达 6N(99.9999%)甚至 9N,但因制造成本高,尚未用于大规模坩埚砂生产。

(一)四氯化硅气相水解/沉积法

这是合成高纯石英玻璃与光纤预制棒的主流工艺。以高纯 SiCl_4 为硅源,在氢氧焰中发生高温水解: $\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + 4\text{HCl}$,生成高纯 SiO_2 玻璃微粒并逐层沉积烧结成玻璃体。工业级 SiCl_4 多来自多晶硅改良西门子法副产,再经多级精馏、分子筛吸附提纯,按纯度分为工业级(3~5N)、光纤级(6~

9N)、电子级(10N+)。

在光纤预制棒制造中,气相沉积分为三大工艺:OVD(管外气相沉积),火焰水解机理,产品纯度极高(杂质 ppb 级)、沉积速率高,但流程长、原料利用率低;VAD(气相轴向沉积),沉积速率高、掺杂控制灵活,适合大尺寸单模光纤芯棒;PCVD/MCVD(等离子体/改进化学气相沉积),折射率分布控制精确,对原料要求最高(超低损耗光纤需 9N 级 SiCl_4)。光纤级四氯化硅是“卡脖子”核心材料之一,9N 级纯度要求金属杂质控制在 1 ppb 以内,约占光纤预制棒成本的 16%~25%且无替代材料。

(二)硅醇盐溶胶-凝胶法与水玻璃沉淀法

以正硅酸乙酯(TEOS)等有机硅醇盐为前驱体,在酸或碱催化下水解缩聚形成 SiO_2 溶胶,经凝胶化、老化、干燥和煅烧得到高纯 SiO_2 : $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + 4\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 。该法有机硅源纯度高、成型时间短、产品透明度高,可精确控制颗粒尺寸和孔结构,广泛用于制备单分散二氧化硅微球、气凝胶及特种石英玻璃,但价格昂贵、微毒。水玻璃化学沉淀法由天然硅矿石粉与 NaOH 反应制得硅酸钠,再经化学沉淀、偏析提纯、水解与煅烧合成石英砂,化学试剂用量少、污染较小,且因生产中经历熔体状态、适度掺杂反而有利于光伏拉晶,被认为更适用于光伏坩埚领域。

(三)合成石英玻璃熔制工艺

石英玻璃熔制分两大类:天然石英玻璃(物理熔制),含电熔法(羟基可控制在 10 ppm 以下但金属杂质高,耐高温性好、成本低)、气炼法(因氢渗入导致羟基含量高,用于低温工序)和等离子体熔制法;合成石英玻璃(化学合成),以 SiCl_4 等为原料通过 CVD、火焰水解沉积、溶胶-凝胶法合成,纯度更高(6~9N)、羟基和金属杂质可控,但成本昂贵、能耗高。国际上贺利氏、迈图、东曹等在不同细分领域领先,中国在高纯度、大尺寸石英玻璃制备和熔制设备节能方面仍有较大差距。

三、下游应用及纯度要求

半导体行业是纯度要求最高的领域。直拉法(CZ 法)生长单晶硅的石英坩埚须承受约 1410°C 硅熔体, SiO_2 纯度须达 99.999%以上,金属杂质控制在 ppm 甚至 ppb 级。半导体级电弧石英坩埚要求内层所有金属杂质含量 $<12 \text{ ppm}$ 、 1500°C 高温变形率 $<2\%$;晶圆制造用石英扩散管、石英舟等人对 Na、K 等碱金属要求尤为苛刻,通常要求 $<1 \text{ ppm}$ 甚至 $<0.5 \text{ ppm}$ 。

光伏行业中,光伏级石英坩埚采用内、中、外三

层结构(常见比例3:4:3);内层砂直接接触硅液,要求最高,纯度须达4N8,对Al、碱金属、抗析晶要求极高;中层砂4N8级;外层砂4N5级即可。光伏级高纯石英砂通常要求 $\text{SiO}_2 \geq 99.99\%$ 、杂质总含量 $< 25 \text{ ppm}$,其中K、Li、Na $< 2.5 \text{ ppm}$ 。相关标准包括GB/T 32649—2016《光伏用高纯石英砂》和SJ/T 3328—2016。

光纤通信对纯度要求达ppb级,超低损耗光纤需9N级 SiCl_2 。紫外/深紫外光学元件要求宽光谱透过和极低羟基,合成石英玻璃是深紫外光刻和激光光学的首选。电光源与石英玻璃管属中端应用,要求 $\text{SiO}_2 > 99.99\%$ 。不同应用的价格差异显著:电光源用石英历史上约600~1500美元/吨,坩埚与光纤用石英约5500~8500美元/吨,半导体级超高纯石英玻璃达12000~15000美元/吨。

四、产业现状与近五年动态(2020—2026年)

(一)全球格局

全球高纯石英原料高度集中。据BloombergNEF报告,美国北卡罗来纳州斯普鲁斯派恩(Spruce Pine)两家运营商合计占全球商用高纯石英供应的80%以上,每年产出约2万吨极高纯石英。该矿区由矽比科(Sibelco)旗下的Unimin(IOTA品牌)和The Quartz Corp(TQC,法国Imerys与挪威Norsk Mineral的50/50合资企业)两家运营。矽比科于2023年宣布投资约2亿美元扩产,并规划2024—2027年追加约5亿美元。该矿区供应链高度脆弱:2008年一场工厂火灾曾几乎切断全球供应,2024年飓风Helene重创该地区,引发芯片供应链警觉。据USGS截至2019年底数据,全球高纯石英原料资源约7300万吨,巴西(占28.97%,天然水晶型)、美国(占25.0%,花岗伟晶岩型)、加拿大(占13.72%,脉石英型)位居前三。

(二)中国产业现状与国产替代

石英股份(603688)是国内龙头,也是国内唯一规模化量产高纯石英砂的企业,截至2024年底已完成年产10万吨产能布局,是全球三家、国内唯一通过半导体扩散用石英管TEL认证的企业。行业其他重要企业包括菲利华、凯盛科技(合成砂纯度可达4N8以上)、江瀚新材、安彩高科等。据前瞻产业研究院,截至2023年底中国高纯石英砂建成产能已达13万吨以上(同比增长127.3%)。光纤级四氯化硅领域,三孚股份是国内龙头、亚洲少数能规模化供应9N级产品的企业;合成石英砂方面,国内仍主要依靠康宁、贺利氏、东曹进口。

2025年4月10日,自然资源部将“高纯石英

矿”设立为中国第174号新矿种,定义为经选矿、提纯可获得 SiO_2 纯度不低于99.995%(4N5)、满足高新领域应用要求的岩石。在新一轮找矿突破战略行动中,中国地质调查局等单位在河南东秦岭、新疆阿勒泰等地发现了与美国类型相似的高纯石英矿产资源,成功获得4N5级以上中试产品、部分样品达到4N8级,在调查评价、深度提纯、定向除杂等方面取得重要突破。国家已启动重点研发计划项目“高纯石英原料矿床成矿机制与提纯关键技术”(2024YFC2910100)。广西石英矿产(石英砂、硅砂)资源极为丰富,尤以北海市合浦县和铁山港区最为集中,探明储量超24亿吨,远景储量近40亿吨。矿石品质优良,二氧化硅(SiO_2)含量普遍在99.5%以上,是全国重要的优质硅质玻璃原料基地。

(三)价格波动与供需再平衡

高纯石英砂近五年经历了剧烈的价格周期。2022年初进口砂约4.5万元/吨;2023年光伏爆发式增长叠加供给缺口,内层砂价格2023年9月飙升至约41.5万元/吨。随后大规模产能扩张叠加光伏去库存,价格于2024年腰斩,至2025年10月底内、中、外层坩埚砂价格分别降至约6.05万元、2.75万元、1.9万元/吨。当前行业呈明显结构性分化:光伏领域阶段性供需失衡、利润承压;半导体和光纤通信领域需求旺盛,成为盈利核心支撑。

五、结论与展望

(1)天然矿物提纯凭借成本和规模优势将长期主导光伏与半导体坩埚砂市场,且其保留的适度天然掺杂对拉晶有益;化学合成路线在光纤预制棒、深紫外光学、半导体最内层等极端纯度场景不可替代。合成砂纯度过高反而缺少有益微量元素、导致坩埚过脆、寿命不足,是其进入光伏坩埚内层的现实障碍。

(2)气液包裹体(尤其富气相、微小尺寸)和晶格Al的去除仍是理论与工艺瓶颈。真空焙烧、微波辅助致裂、偏析剥蚀法、定向除杂等新技术已展现出突破4N8的潜力,其“扩散—偏析—剥蚀”、微裂纹强化酸浸、氯化脱气等机理研究是未来重点。

(3)无氟浮选、无氟浸出、生物浸出、超导磁选、电选等绿色技术,以及降低氯化焙烧和高温熔制高能耗(高纯石英生产电耗接近1MW·h/吨),是可持续发展的关键。

(4)第174号新矿种设立、东秦岭与阿勒泰找矿突破、国产4N8中试产品问世标志着资源与技术双重瓶颈开始松动;但半导体级最内层砂稳定量产、合成石英玻璃与高纯四氯化硅的国产化,以及

严苛的下游认证壁垒,仍需持续攻关。资源勘查标准体系、矿床工业指标、快速筛选检测技术的建立同样迫切。

参考文献:

- [1] Müller A., Wanvik J. E., Ihlen P. M. Petrological and Chemical Characterisation of High-purity Quartz Deposits with Examples from Norway [A]. Götze J., Möckel R. *Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics* [C]. Berlin: Springer, 2012: 71-118.
- [2] Wei J. Y., Liu H. Y., Li X. Y., Fan X. H., Zhang C., Gan M., Liu W., Ji Z. Y., Sun Z. Q. Key Methods and Innovations in Purification of 4N8 Grade High-purity Quartz [J]. *Results in Engineering*, 2026, 30.
- [3] Shao H. L., Zhang X. L., Li W. B., Han Y. X., Li Z. H. Review of Advanced Purification Technologies for High-purity Quartz Materials [J/OL]. *Materials Chemistry and Physics*, 2025.
- [4] Guo S. J., Ai G. T., Zhao J. J., Yang S. C., Wei K. X., Ma W. H. Removal of Hydroxyl Impurities in Vein Quartz by Vacuum Roasting [J]. *Vacuum*, 2024, 222.
- [5] Gui Y., Chen X., Zhu X., Fu H., Jiang X., Sun J., Wang L., Ban B., Chen J. Quartz Lattice Al Impurity Removal: A Simple Annealing-leaching Process and Analysis [J]. *Materials Letters*, 2025, 391.
- [6] Wei J. Y., Liu H. Y., Sun Z. Q., Li X. Y., Fan X. H., Gan M., Ji Z. Y. Molecular Mechanism Study on the Chlorination Removal of Lattice Impurities from High-purity Quartz Sand [J/OL]. *Minerals Engineering*, 2025.
- [7] 裴振宇. 偏析剥蚀法纯化石英晶格杂质及机理研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2024.
- [8] Li F. F., Jiang X. S., Zuo Q. X., Li J. W., Ban B. Y., Chen J. Purification Mechanism of Quartz Sand by Combination of Microwave Heating and Ultrasound Assisted Acid Leaching Treatment [J]. *Silicon*, 2021, 13(2): 531-541.
- [9] 马超, 冯安生, 刘长森, 邵伟华, 赵平. 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.
- [10] 吴福元, 刘小驰, 王佳敏, 陈厚彬, 胡方洪, 刘志超. 高分异花岗岩与高纯石英 [J]. *岩石学报*, 2025, 41(10): 3243-3277.
- [11] 中华人民共和国自然资源部. 新发现矿种公告 (2025年第22号) [Z]. 2025-4-10.
- [12] 全国半导体设备和材料标准化技术委员会. GB/T 32649—2016 光伏用高纯石英砂 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [13] Conway E. *Material World: The Six Raw Materials That Shape Modern Civilization* [M]. London: WH Allen, 2023.

Research Progress in the Preparation of High-purity Quartz: From Natural Mineral Purification to Chemical Synthesis

LI Xin-yu¹, HAN Hong-bo²

(1. Guochuang Silicon-based New Materials Technology (Guangxi) Co., Ltd., Beihai Guangxi 536000; 2. School of Biological and Chemical Engineering (School of Agriculture), Panzhihua University, Panzhihua Sichuan 617000, China)

Abstract: High-purity quartz (HPQ) is an irreplaceable key raw material for strategic emerging industries such as semiconductors, photovoltaics, optical-fiber communication and deep-ultraviolet optics, and its preparation technology has long been monopolized by a few foreign enterprises. This paper systematically reviews the two fundamental technical routes for HPQ preparation and their research progress over the past five years (2020—2026). The natural-mineral purification route uses vein quartz and granitic-pegmatite quartz as raw materials, and removes associated minerals, fluid inclusions and lattice impurities step by step through physical beneficiation (magnetic separation, flotation, electrostatic separation) and chemical purification (acid leaching, chlorination roasting, calcination-water quenching, microwave/ultrasound/vacuum-assisted leaching). The chemical-synthesis route, represented by vapor-phase hydrolysis of SiCl_2 , sol-gel processing of tetraethyl orthosilicate and precipitation from water glass, can produce ultra-high-purity quartz of 6N and above for extreme applications such as optical-fiber preforms and deep-UV optics. The removal of fluid inclusions and lattice aluminum constitutes the two major bottlenecks restricting deep purification ($\geq 4\text{N}8$); emerging technologies including vacuum roasting, microwave-induced cracking and the “segregation-ablation” method show breakthrough potential. Combined with the stringent ppm/ppb-level impurity requirements of downstream applications, the purity-grading standards and the global industrial landscape are reviewed, together with the latest progress of China’s domestic substitution.

Key words: high-purity quartz; purification process; chemical synthesis; fluid inclusion; lattice impurity