

我国硅能源材料产业高质量发展研究

李菲^{1,2}, 喇培清^{2,3*}, 易欣^{1,2}, 王海鹰^{4,5,6}, 郑月红^{2,3}, 贺颖捷^{4,5,6}, 杨军⁷, 柴立元^{4,5,6}

(1. 兰州理工大学冶金与环境学院, 兰州 730050; 2. 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050; 3. 兰州理工大学材料科学与工程学院, 兰州 730050; 4. 中南大学冶金与环境学院, 长沙 410083; 5. 有色金属强化冶金新技术全国重点实验室, 长沙 410083; 6. 国家重金属污染防治工程技术研究中心, 长沙 410083; 7. 中国科学院兰州物理化学研究所, 兰州 730000)

摘要: 硅能源是以硅材料为基础支撑、半导体技术为核心驱动的新型能源形态, 硅能源材料是促进绿色低碳转型、高端制造业跃升的战略性基础材料, 相关产业成为重塑全球能源与材料格局的重要力量。本文在全面梳理我国硅能源材料产业发展现状的基础上, 从资源端、冶炼端、材料端、循环端出发精准识别了我国硅能源材料产业技术发展态势, 进而剖析了我国硅能源材料产业发展的新形势与面临的新问题。研究认为, 我国硅能源材料产业拥有可观的发展潜力, 表现在资源禀赋雄厚、产业基础支撑牢固, 产业布局优化、协同集聚效应显现, 应用场景拓展、需求增长潜力良好; 可针对性采取强化原料保障、构建多极支撑格局, 协同“产学研用”、精准攻关行业关键技术, 发挥绿色低碳引领、构建绿电循环体系, 加快智能转型步伐、筑牢制造核心优势等产业提升路径。相关内容可为构建具有全球引领性的硅能源材料产业体系提供理论支撑, 促进能源体系重构、制造体系升级和核心竞争力跃升。

关键词: 硅能源材料; 能源转型; 硅基智能; 产业协同; 价值链重塑

中图分类号: TB3 **文献标识码:** A

High-Quality Development of Silicon-Based Energy Materials Industry of China

Li Fei^{1,2}, La Peiqing^{2,3*}, Yi Xin^{1,2}, Wang Haiying^{4,5,6}, Zheng Yuehong^{2,3},
He Yingjie^{4,5,6}, Yang Jun⁷, Chai Liyuan^{4,5,6}

(1. School of Metallurgy and Environment, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou 730050, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 4. School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China; 5. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy for Non-ferrous Metals, Changsha 410083, China; 6. Chinese National Engineering Research Center for Control and Treatment of Heavy Metal Pollution, Changsha 410083, China; 7. Lanzhou Institute of Physical Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Silicon energy is a new form of energy based on silicon materials and driven by semiconductor technology at its core. Silicon energy materials are strategic basic materials that support the green and low-carbon transformation of industries and the leap of high-end

收稿日期: 2025-07-05; 修回日期: 2025-08-06

通讯作者: *喇培清, 兰州理工大学材料科学与工程学院研究员, 研究方向为纳米陶瓷材料和金属间化合物; E-mail: pqla@lut.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“甘肃省光伏新能源材料产业绿色高效发展战略研究”(2023-DZ-09); 甘肃省自然科学基金项目(25ZDLA002); 甘肃省科技重大专项(25JRRA063)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

manufacturing. The related industries have become an important force in reshaping the global energy and materials landscape. Based on a comprehensive review of the current development status of China's silicon energy materials industry, this study identifies the technological development trend of the industry from the aspects of resource, smelting, material, and recycling ends, and analyzes the new situation and problems faced by the industry. Research suggests that China's silicon energy materials industry has considerable development potentials, reflected in its abundant resource endowment, solid industrial foundation support, optimized industrial layout, emerging synergy and agglomeration effects, expanded application scenarios, and good potential for demand growth. The industrial upgrading paths include (1) strengthening raw material guarantee to build a multi-pole support pattern; (2) coordinating industry, education, research, and application to achieve breakthroughs in key technologies; (3) further promoting green and low-carbon development to build a green power circulation system; and (4) accelerating the pace of intelligent transformation to consolidate the core advantages of manufacturing. This study is expected to provide a theoretical support for building a globally leading industrial system of silicon energy materials, and promoting the reconstruction of the energy system, upgrading of the manufacturing system, and leap in core competitiveness of China.

Keywords: silicon energy materials; energy transition; silicon-based intelligence; industrial synergy; value chain reshaping

一、前言

硅能源是以硅材料为基础支撑、半导体技术为核心驱动的新型能源形态，狭义上以晶硅光伏为代表，通过硅半导体材料将太阳能高效转化为电能，广义上涵盖高纯硅提纯、晶圆制造、电池组件、电力电子、储能、终端用电等，成为构建“生产-传输-存储-利用”能源体系的“硅化”“半导体化”系统^[1,2]。相较于以燃烧为基础的传统能源，硅能源体系实现从光子激发到电流输出的跨越，多以电子器件、电力电子技术替代热机、机械传动，既可显著提升转换效率，也利于实施智能调控与多能融合^[3]。以硅为核心的新能源体系，逐步成为绿色低碳转型、新型电力系统的关键支撑^[4]。硅能源材料产业覆盖硅矿开采、高纯硅冶炼、晶圆与组件制造、储能器件、硅基配套材料等环节，构成光伏、新型储能、功率半导体等行业的重要基础^[5]。硅材料因其优异的光电性能和化学稳定性，被视为清洁能源与先进电子技术的关键原料，在全球能源转型中地位凸显^[6]。

硅能源材料产业作为战略性新兴产业，成为推动绿色低碳发展、重塑全球能源与材料格局的重要力量，相关价值主要体现在三方面。① 重构能源体系支柱。在“双碳”目标引导下，硅基光伏成为全球光伏新增装机主力，硅基锂电负极材料具有高容量优势，可显著提升动力电池性能^[7]。② 成为科技自立引擎。硅能源材料集成度高、技术复杂，是战略新材料的重要构成，高纯硅及关键工艺持续突破支撑半导体、储能、电子信息等领域的技术进步^[8]。③ 筑牢资源安全根基。我国硅资源丰富、产业链完整，具备构建自主可控体系的基础条件。面对全球原材料市场博弈、资源供应“卡脖子”风险，加快

从资源驱动转向技术引领、从产能扩张转向价值主导，是保障相关产业安全发展的关键路径^[9]。

硅能源材料在推动能源结构转型、支撑科技发展方面发挥了重要作用，相关基础研究与技术突破持续涌现。在矿产资源开发与利用方面，不断优化浸出工艺与提纯方法，探索成本效益更高、综合能耗更低的高效提纯路线，提出绿色低碳的工艺优化策略，助力高效开发与可持续发展^[10-12]。工业硅、多晶硅、SiC等关键材料制备技术趋于成熟，生产工艺水平不断提升，带动光伏、电力电子、半导体、新能源等下游应用市场的快速扩张^[13-18]。有机硅、SiC半导体、硅基气凝胶等新兴产品开始扩大应用，丰富了硅能源材料的产品体系，提升了产业附加值与综合竞争力^[19-24]。

为精准认识硅能源材料在我国能源转型与高端制造升级过程中的关键作用，本文梳理全球相关产业发展现状及趋势，分析我国产业发展基础与突出问题，提出中长期发展路径；侧重资源禀赋、技术创新、产业协同、绿色发展等研究视角，以构建兼具前瞻性、系统性、可操作性的产业发展体系。相关内容可为构建新型能源与智能制造体系提供理论支撑与实践参考。

二、我国硅能源材料产业发展现状

（一）产量需求攀升，成为能源转型支柱

我国硅石总产量占据全球市场的60%~70%^[25]，为硅能源材料产业发展提供了雄厚基础。光伏、半导体作为硅能源材料最核心和最成熟的应用领域，近年来市场规模高速增长。在2024年全球新增可再生能源装机量中，硅基光伏的占比超过75%^[26]。发射极和背面钝化电池（PERC）、隧穿氧化层钝

化接触电池 (TOPCon)、异质结电池 (HJT) 等先进晶硅电池技术快速迭代, 光电转换效率与系统可靠性进一步提高。在半导体领域, 受第五代移动通信 (5G)、人工智能 (AI)、物联网 (IoT) 的驱动, 2024 年全球市场销售额为 6267 亿美元, 同比增长 19.1%^[27]。硅材料在功率器件、集成电路制造等方面应用广泛, 成为数字经济发展和电气化转型的关键支撑。我国拥有完整的产业链和制造规模优势, 在硅片、电池片、组件等光伏核心环节保持领先, 2024 年总产量为 1170 GW·h, 同比增长 24%^[28]。此外, 西部富硅地区光伏基地建设加速, 新疆、甘肃、青海等省份成为绿电发展优势地区, 为我国能源转型提供了良好支撑。

(二) 技术引领升级, 促进硅基智能布局

硅能源材料逐步从新能源支撑平台向多产业融合枢纽转型。在储能领域, 硅基负极材料以高比容量优势替代石墨, 广泛应用于动力电池和分布式储能系统, 支持电力系统的高能量密度、长寿命发展。硅材料功能进一步拓展, 开始应用于光通信、生物医药、第三代半导体, 促成跨界融合的新场景。有机硅、高纯石英、硅基气凝胶等材料发展更为系统, 开始应用于建筑节能、航空航天装备、智能装备^[29,30]。推动硅材料与先进制造业融合, 筑牢制造链基础。随着 AI、工业互联网、IoT 的发展, 硅半导体和功率器件成为智能基础设施的核心支撑, 硅基传感器、功率芯片、集成电路广泛应用于智慧城市和智能制造, 支持形成“材料-器件-系统”协同创新生态^[31]。硅材料的作用已由资源支撑转向平台支撑, 成为能源与信息体系革新的关键。可发展海洋能、核能等清洁能源, 在沿海地区协同推进海水淡化与氢能制取, 在西部地区布局小型模块化核反应堆, 以完善多元化的绿电体系, 助力实现“零碳硅”发展愿景。

(三) 材料全链协同, 驱动循环高效发展

硅能源材料产业链具有贯穿“资源-基础原料-功能材料-终端应用-循环利用”全生命周期的立体结构。上游环节包括硅矿勘探、工业硅冶炼、高纯硅 (如太阳能级硅、电子级硅) 提纯, 为中下游提供原料。中游环节涵盖单晶硅棒/硅片制造、硅基负极材料、高性能硅合金、器件级

材料开发及表面改性等, 具有较高的附加值, 是提升产品性能与产业价值的关键^[32,33]。下游环节涉及光伏组件、高比能硅基电池、功率半导体等应用, 促进硅材料在新能源发电、储能、智能用能等方面的价值转化。整体来看, 硅能源材料产业链由传统的线性结构升级为资源保障、技术创新、终端应用、循环利用一体化的协同生态体系 (见图 1)。

(四) 政策体系协同, 引导产业快速发展

我国硅能源材料产业加速进入高端化、智能化、绿色化发展阶段, 在全球新能源技术变革过程中占据战略高地。国家发布《关于推动能源电子产业发展的指导意见》(2023 年)、《光伏制造行业规范条件 (2024 年本)》《战略性矿产国内找矿行动纲要 (2021—2035 年)》《“十四五”原材料工业发展规划》(2021 年) 等政策文件, 加快推进硅能源材料产业发展, 针对多晶硅、单晶硅、高纯石英砂等关键材料, 提升生产标准、资源保障、技术研发、产业集聚等方面的能力。广东、江苏等省份发布地方性政策, 强化区域内硅材料产业链协同与高端产能布局。得益于政策引导, PERC、TOPCon、HJT 等高效电池用硅片实现规模化生产, 部分 N 型 TOPCon 组件的效率超过 24.5%^[34]。硅基负极材料逐步替代石墨负极, 商业化产品的比容量超过 500 mA·h/g。高纯 (4N8 级) 石英砂生产技术实现国产化, 关键原料自主保障能力获得提升。在全球有机硅授权专利中, 2021 年中国企业仅占 13%, 2024 年则提高至 28.3%^[35]。此外, 绿色低碳成为行业发展主线, 单位硅料能耗持续下降, 清洁能源与智能制造深度结合, 加快行业“双碳”进程。整体上, 硅能源材料产业的战略地位持续提升, 形成“多元驱动、全链协同、高端引领”的新发展格局, 为构建自主、安全、绿色的现代产业体系提供了坚实支撑^[36,37]。

三、我国硅能源材料产业技术发展态势

随着“双碳”目标推进、信息技术革新、新能源产业发展, 硅能源材料技术体系持续演进, 逐步形成了“资源端-冶炼端-材料端-循环端”为核心框架的全生命周期产业体系。然而, 对比国际

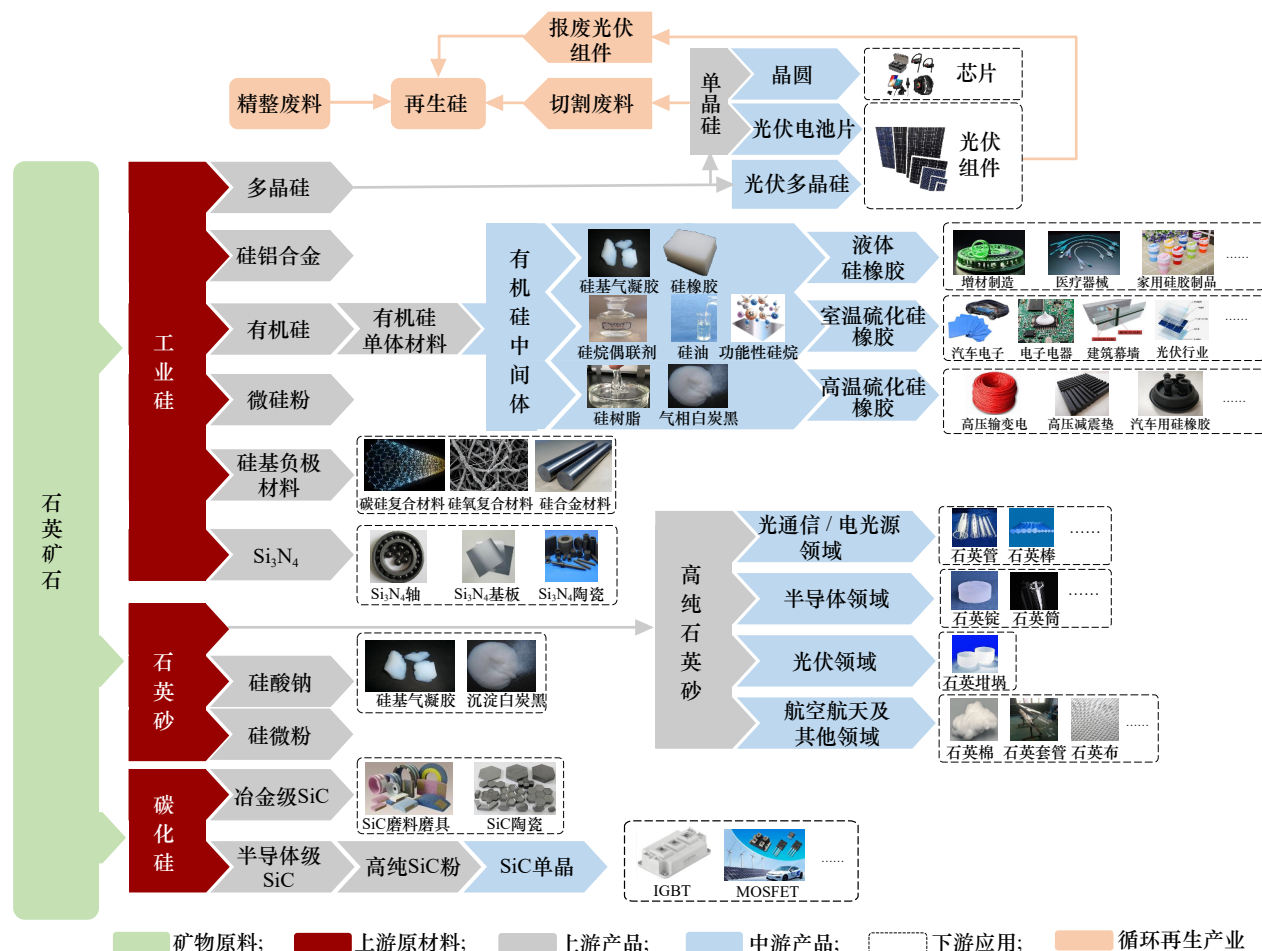


图1 硅能源材料产业链构成

注：IGBT表示绝缘栅双极晶体管；MOSFET表示金属-氧化物-半导体晶体管。

先进水平来看，部分关键领域仍存在差距，亟需在高端制备工艺、绿色循环技术、系统集成能力等方面取得突破。我国硅能源材料产业正处于制造主导型转向高端集成型、循环驱动型的关键时期，也需把握资源、冶炼、材料、循环等主要环节的技术发展态势（见表1），通过技术、政策、产业协同来提升各环节技术能力，进而增强市场竞争力和系统韧性。

（一）资源端——技术存在短板，关键环节亟待突破

1. 技术现状

我国高纯石英砂的主要来源有四川、福建、江苏、内蒙古等省份的石英岩、石英砂岩（以及少量的天然水晶）。国内企业普遍采用“破碎→磁选→浮选→酸洗→高温焙烧”多级联合工艺进行初步提纯，

以去除石英原矿中的杂质成分；其中，磁选、浮选用于剔除铁钛等伴生矿物，酸洗通过化学反应进一步溶解杂质，高温焙烧有助于改善晶体结构、促进杂质析出。尽管整体提纯效率有所提升，但Fe₂O₃、Al₂O₃、TiO₂等微量工业杂质的彻底去除仍面临技术挑战，成为制约石英砂高端化应用的瓶颈因素。

我国高纯石英砂提纯工艺主要包括机械选矿、化学提纯、热处理、辅助技术集成。在机械选矿过程中，通过重力、磁选、浮选等方法去除大粒径杂质，为后续提纯确立良好的基础条件。在化学提纯过程中，以盐酸、氢氟酸等酸洗去除Fe、Al、Ti等微量杂质是实现高纯度的关键环节。热处理在800~1200℃条件下进行，以改善晶体结构、促进杂质析出。以半导体为代表的高端应用对硅材料的纯度、一致性、能耗控制要求极高，而国内企业在将杂质降至百万分之一级别以下方

表1 我国硅能源材料产业主要环节的技术发展态势

维度	技术成熟度	核心优势	面临挑战
资源端	中等	储量丰富，部分提纯技术具备产业化基础	超高纯石英提纯、电子级硅材仍依赖进口
冶炼端	中高	工艺体系成熟、具备全球最大工业硅产能和产量	单位能耗偏高，冶炼绿色化、智能化不足
材料端	较高	高纯硅料、光伏与半导体产业链健全，新兴材料快速发展	高端晶圆、SiC/IGBT等方面的核心设备与技术仍待突破
循环端	初期	具备初步回收能力，技术路线清晰	法规滞后、技术经济性不足、回收标准不统一

面存在技术瓶颈。目前，4N级石英砂能够自主稳定供应，5N级产品逐步实现国产替代，但6N级及以上的电子级硅材料产品在纯度控制、掺杂均匀性、关键工艺适用等方面仍存在不足，没有摆脱进口依赖。

2. 未来发展方向

引入无人驾驶矿卡、在线品位监测等“智慧采矿”技术，优化爆破与运输效率。推动伴生矿综合利用，减少弃石和废石，提高资源综合利用效率。攻关超高纯硅原料提纯关键工艺，突破 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 TiO_2 等微杂质超低含量去除技术，发展高效选择性酸洗、低温等离子处理、微波焙烧等新型提纯手段，提升半导体级高纯石英砂、电子级硅材料的自主保障能力。开发环保浸出剂、高效分选工艺，提高提纯效率。探索溶胶凝胶法制备6N石英砂的合成技术，加快超高纯石英砂的国产化进程。建立在线监测和智能控制能力，保证产品质量稳定可控。

(二) 冶炼端——技术迭代推进，绿色智能深入发展

1. 技术现状

在我国，工业硅主要采用矿热炉碳热还原法制备，即以石英石为硅源、无烟煤和木炭为还原剂，在高温下将 SiO_2 还原为硅单质。该工艺路线技术成熟、体系完善，仍是工业硅的最主要生产方式。随着“双碳”行动深化、高耗能行业能效监管强化，工业硅冶炼技术朝着大型化、自动化、清洁化方向升级，主流设备由6300 kVA及以下向22 500 kVA、33 000 kVA及以上的大容量矿热炉演进。智能控制系统的集成应用逐步展开，具备电耗、料耗、炉况等关键指标的在线监测与动态调控能力。工业硅主流的电耗水平为11 500~13 500 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ ，部分企业应用炉况优化与能量回收装置将电耗降低至11 000 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ 。

工业硅产品中，硅含量超过99%，Fe、Al等杂质含量不足0.5%，材料满足多晶硅级原料要求。副产硅微粉的收集率、品质稳定性有待提高，为下游高值化利用创造条件。

相较一些发达国家的先进技术，国内在节能降碳、炉况稳定控制、过程智能化方面仍存在技术瓶颈，能耗水平整体仍偏高，尤其是中小产能的矿热炉普遍存在电耗波动、热能利用效率低下的问题。尽管冶炼智能化控制、绿色制造等已在部分企业获得了探索应用，但全面推广仍待进一步的技术突破。针对微硅粉、硅炉渣、废电极糊等冶炼固废的回收体系尚不完善，资源浪费与二次污染隐患并存。全行业仍需在绿色低碳工艺创新、冶炼系统智能化方面加快技术研发，特别是在矿热炉能耗降低、自动化控制、大宗固废高值化利用等方面逐步缩小与国际先进水平的差距。

2. 未来发展方向

围绕高效、绿色、智能三大方向，系统开展硅能源材料冶炼端关键技术攻关。一体化推进冶炼端的装备升级、智能控制、循环利用，加快从高能耗主体转型为绿色制造核心，充分保障高端硅材料的原料需求。① 推进大型密闭矿热炉绿色升级，开发33 000 kVA及以上封闭式电炉，配置智能投料系统、捣炉、多功能电极控制装置，提升工作能效与炉况稳定性；推广炉气综合回收，实现富CO尾气资源化利用。② 加快智能化转型，构建基于工业互联网、AI、大数据的智能控制平台，开展能耗优化、设备预测性维护、工艺动态调度；与5G结合，精确控制炉内温度与配料，提升产出效率与产品一致性；构建数字孪生系统，支持工艺仿真与风险预警。③ 构建绿色冶炼循环体系，推广应用可再生能源电力与生物质还原剂，推动余热、余气用于发电和供热；制定能效与碳排放标准，建立碳足迹核算与激励机制，引导产

业低碳转型。

（三）材料端——技术升级加速，新兴材料快速涌现

1. 技术现状

在高纯硅料制备方面，多晶硅以改良西门子法为主，硅烷流化床法完成小规模试点并正在扩大产能；年产能超过 5×10^5 t，约占全球总产能的80%，单位能耗持续下降。单晶硅以直拉单晶制造法（CZ法）为主，大尺寸产能快速增长，应用金刚线切割、薄片工艺以提升成品良率。

在光伏材料技术方面，建立了以P型PERC为主、N型TOPCon快速发展的多元化技术体系，推动硅片加工工艺的持续突破。P型PERC技术具有工艺成熟、成本较低的优势，实现产业化，转换效率普遍为21.5%~22.2%^[38]。2022年起，N型TOPCon技术快速推广，2024年的市场占有率超过30%，成为高效电池的主流类型^[39]。HJT、背接触（IBC）电池被视为新一代高效电池结构，正在加速开展中试验证，最高效率达到26.5%^[40]。IBC电池采用电极背置设计，具备更高的理论效率，是发展叠层电池的关键路径之一。

在半导体材料方面，8 in（1 in \approx 25.4 mm）抛光硅片基本实现国产化，12 in硅片仍处于技术爬坡阶段。CZ法仍需优化以提升缺陷密度、氧碳含量的控制性能，硅外延片、绝缘体上硅（SOI）晶圆、功率器件用硅片是重点攻关方向。在第三代半导体方面，SiC、Si₃N₄初步实现国产替代，但外延均匀性、缺陷控制仍有不足。在新能源材料方面，硅基负极特别是Si/C复合材料具有高比容量的应用优势，包覆、掺杂等改性策略也在深入研究。针对包括硅橡胶、硅树脂在内的有机硅材料，聚合控制、氢硅加成反应路径等工艺不断优化，形成较成熟的产业。此外，硅气凝胶材料作为新兴的绝热材料，在航空装备、建筑物上应用时具有良好的阻燃和隔热性能，进入了初期产业化阶段，但成本控制、规模化制备等技术仍需着力攻关。

2. 未来发展方向

推广硅烷流化床制备工艺的应用，实现电耗小于25 kW·h/kg。发展直径为210 mm及以上的超大面积单晶制备技术。强化先进光伏硅材料技术攻关，重点推动N型TOPCon、HJT、IBC等高效太阳

能电池技术的产业化，突破光电转换效率瓶颈，优化硅片超薄化、掺杂控制与钝化工艺，支撑光伏产业的高效率、低能耗、集成化发展。在半导体硅材料领域，聚焦12 in及以上硅片、低缺陷CZ单晶、SOI衬底与外延硅片等关键方向，着力推进高端晶圆材料的国产化。在新型硅基材料方面，提升Si/C负极、有机硅功能材料、硅气凝胶的导电性、热稳定性、力学性能，推动新能源汽车、储能、电子封装、高端建筑上的工程化应用。在工艺端，研发高效催化剂，提升硅粉转化率，推广大型流化床连续反应技术，提高单体收率并减少副产物。研发高端有机硅产品，拓展特种硅橡胶、硅树脂、硅烷偶联剂等品类，推动副产物（如甲基三氯硅烷）向气相SiO₂的高值转化，提升资源利用率和环保效益。完善有机硅绿色制造体系，配置尾气焚烧与HCl回收装置，构建SiCl₄废气全闭路回收能力，降低能耗与污染排放。在硅气凝胶方向，优化常压干燥替代超临界干燥工艺，提升力学强度与耐湿热性能，降低制备成本，推动建筑保温、电池热管理、高端装备上的广泛应用。探索以工业硅副产品制备气凝胶的新路径，推动废弃资源的高值循环利用。

（四）循环端——技术有待突破，循环体系仅显“雏形”

1. 技术现状

循环经济成为硅能源材料发展的重要方向，多个回收技术路径取得初步进展，但整体处于绿色闭环体系构建的早期阶段。硅材料回收方面取得初步进展，尤其是在光伏组件、半导体废料、硅基电池负极、有机硅材料等环节形成了相对明确的技术路径。

在光伏组件回收方面，尽管回收体系尚不完善，但部分企业试点建设了自动化解构生产线。主流工艺多为热处理结合机械分离，以回收硅片、玻璃、银片、铝框等，总回收率可超过90%；其中，玻璃基本可以完全回收，电池片中的银回收率可达85%，硅材料回收纯度可达99.999%（酸浸提纯后重新制备多晶硅）。将回收硅材料用于再制造晶圆或经提纯后作为多晶硅原料，是高附加值回收的主要路径，但分离效率、能耗控制、污染物管理等均待提升。在半导体材料回收方面，通过湿法冶金、气相提纯等方式，部分实现废晶圆、抛光液、硅粉

等副产物的资源再生。然而，回收高端半导体材料仍面临技术门槛高、工艺复杂、经济性差等难题，需优化工艺集成、建立产业协同机制。

2. 未来发展方向

加快热解、机械分离、化学提纯等工艺的集成技术研发，着力提升硅片、银、玻璃等核心材料的回收率与再利用品质，逐步建立覆盖重点产区的区域性光伏回收利用中心。在半导体与电池材料回收方面，优化废晶圆、硅粉、硅基负极材料等复杂废弃物的回收路径，攻克结构稳定性差、杂质干扰强、处理成本高等技术难点，支持回收高纯硅废料并实现纯度 $\geq 99.999\%$ 。开发高效的低温拆解技术，优化封装胶膜软化分离工艺，在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下分离玻璃与电池片，避免有害物质挥发；应用超临界流体萃取银、化学法溶解乙烯-醋酸乙烯共聚物胶膜，提高银、硅等高价值组分提取工艺的经济性。建立光伏组件回收利用产业链，完善回收标准和补贴机制，到2030年实现退役组件的资源化率超过95%。引导在组件生产阶段即采用易拆解设计，方便后续回收。

四、我国硅能源材料产业发展的新形势与面临的新问题

当前，我国绿色低碳转型全面提速，硅能源材料产业在技术创新、绿色转型的双重驱动下迎来了发展机遇期，初步构建了覆盖“资源保障-高端制造-多元应用-循环利用”全生命周期的产业格局。然而，硅能源材料产业面临高端技术存在短板、结构性供需失衡、国际市场面临壁垒、资源配置不协调等制约性因素，需要突破关键技术、优化产业结构、推进绿色制造，提升产业链的竞争力与可持续性，力争在全球价值链中占据更有利的地位。

（一）我国硅能源材料产业发展的新形势

1. 产业技术突破，推动行业快速升级

在全球硅能源材料需求快速增长的背景下，我国在产业技术层面取得突破，成为行业发展的核心驱动力。以光伏、半导体领域为代表，技术创新加速了产业的高端化、高效化发展趋势。^①国内企业的高纯硅材料提纯技术取得重要进展，尤其是在超高纯石英提纯领域，通过自主研发与技术引进的方

式缩小了与国际先进水平的差距，进而减少了对国外技术和原料的依赖，增强了产业链的自主可控能力。随着光伏技术的更新换代，PERC、TOPCon、HJT等新型高效电池技术快速成熟，推动光电转换效率的稳步提升，加速光伏产业的降本增效，促进硅基材料的多元化应用。硅基负极材料的突破，为动力电池的高能量密度发展提供了直接支持。^②在半导体领域，SiC、 Si_3N_4 等第三代半导体材料具有优异的高频、高温、高压特性，迅速应用于新能源汽车和电力电子。硅基功率器件、SiC器件的自主研发进展显著，支撑高端制造业的快速升级。

2. 技术赋能升级，区域市场需求上升

光伏、半导体作为硅能源材料核心应用领域，市场需求得益于新兴技术推动而持续增长，成为硅能源材料产业升级的主导类型。PERC凭借成本优势保持主流地位，TOPCon、HJT、IBC等高效电池技术加快成熟，带动光电转换效率提升、度电成本下降，促成全球光伏新增装机量再创新高，如2024年超过600 GW^[41]。在半导体领域，硅材料作为芯片、功率器件的基础材料广泛应用于晶圆制造、电力电子等领域，SiC、 Si_3N_4 等第三代半导体材料在新能源汽车、轨道交通等领域加快应用^[42]，硅基IGBT、MOSFET等器件受AI、新能源汽车的带动而显供不应求。例如，江苏、浙江、上海、广东等省份的相关产业链完善、技术先进，相关产品的市场需求保持快速增长。

3. 新兴产品拓展，绿色闭环体系形成

硅能源材料应用领域不断拓展，相关产业逐步由单一体系转向多元融合，形成了涵盖能源生成、储能传输、智能终端的高端产品谱系。有机硅材料凭借优异的柔性、耐高温、绝缘特性，广泛应用于电子电气、汽车制造、建筑领域。硅基气凝胶在隔热、防火、航空航天装备等领域显现出应用潜力。硅基负极材料支持新一代高能量密度电池发展^[43,44]，2028年全球市场需求可达 9×10^4 t，在动力电池领域中的占比将超过85%^[45]。硅材料回收与再利用加速推进，发达国家率先发布光伏组件回收法规，我国启动相关技术与产业体系建设。硅再生朝着规模化、高纯化、绿色化方向发展，标志着硅能源材料产业体系由线性制造向闭环循环转型，将成为提升资源利用效率、降低全生命周期碳排放、增强产业链绿色韧性的重要支撑^[46]。

4. 政策体系引导，加速产业发展

国家发布了硅能源材料产业的支持性政策，优化产业链布局，推动国内市场稳步发展，增强国际市场的竞争力。将硅能源材料列为战略性新兴产业，提出新能源产业发展目标，明确对光伏、半导体等产业的发展支持；提供光伏产业补贴、硅材料生产激励等政策，促进产业快速发展。加大绿色制造技术的支持力度，推动行业在节能减排、资源回收方面进行技术革新。鼓励企业优化光伏组件的回收利用、绿色制造工艺，有效降低能耗和碳排放，提升产业的可持续发展能力。推动跨行业、跨领域的协同创新，重点在高端硅材料研发和生产方面支持各层次合作，形成“产学研”创新体系，解决产业链上下游发展不均衡的问题。

（二）我国硅能源材料产业发展面临的新问题

1. 国际环境趋于复杂，国际市场拓展面临阻力

全球高纯硅矿资源集中在美国、挪威、中国，具有一定的市场垄断性。美国科维亚公司、挪威TQC公司等具有先进提纯技术优势，主导了国际市场^[47]。在光伏、半导体产业对高纯硅需求激增的背景下，资源紧缺、环保压力、技术壁垒加剧，全球市场竞争增强，如美国限制石英砂出口并支持本土开发，欧盟发布了原料自给政策。我国石英资源丰富，但高纯硅提纯技术和产能不足，关键原料依赖进口，需要加强高纯石英资源勘探、突破超高纯硅提纯技术，提高产业链安全发展水平；开拓国际市场面临新增挑战，对产业链韧性和绿色可持续发展提出了更高的要求。一方面，发达国家频繁对我国产品发起反倾销、反补贴调查，如美国通过《通胀削减法案》构建贸易壁垒；不断提升技术标准和绿色门槛，如欧盟碳边境调节机制等增加我国产品的出口成本。另一方面，美国、德国、日本、韩国等加速布局高端硅材料产业，印度、马来西亚等也在积极发展相关产业，国际市场竞争更为激烈，导致我国企业的国际市场份额流失。此外，地缘竞争风险上升，供应链碎片化趋势加剧，部分国家推行原材料供应多元化策略，都加大了我国硅能源材料产业拓展国际市场的不确定性。

2. 体系协同存在不足，核心环节受制于人

我国硅能源材料产业的一些关键领域仍存在发展瓶颈，部分高端技术、关键专利受制于国外企

业，加之基础创新能力不足，导致高端产品的质量稳定性滞后于国际先进水平。例如，硅基负极材料在电动汽车、高端储能领域应用时存在体积膨胀率高（300%~350%）、循环寿命短（ ≤ 500 次）的情况。在高纯石英提纯、高端硅基功能材料、高效器件设计等方面，核心技术自给率偏低，需要加强基础研究和原始创新才能弥补“源头技术”短板。我国硅矿资源丰富，但高端产品的自主供应占比较低，产业链的关键节点存在结构性短板。例如，8 in及以下芯片用电子级多晶硅的国产化率约为60%，12 in规格的国产化率不足10%，进口依赖度居高不下。对于SiC材料，国内企业仅能进行中低端替代，而高端产品生产技术尚未突破。晶体生长炉、超纯工艺设备等高端制造装备以及相应的核心零部件仍被国外企业垄断，国产替代尚未完成。此外，产业链上下游衔接不紧密、攻关协作机制缺失，高端应用场景难以快速落地，硅材料产业优势未能转化为实际应用价值；区域产业布局和配套有待优化，原料、材料、应用方面出现重复建设和资源错配的情况，不利于增强整体竞争力。

3. 产品供需结构失衡，高端需求难以满足

我国硅能源材料产业具有“低端过剩、高端不足”的结构性矛盾，即低附加值产品的产能过剩，高端领域供给能力不足，导致供需错位、价值链断层。初级工业硅、普通硅材料制品等中低端产品的占比偏高，而国内高端应用市场仍依赖进口。以有机硅为例，发达国家人均使用量接近2 kg/年，而我国仅为0.7 kg/年，国内需求潜力未能得到有效释放^[48]。高端材料供给不足致使下游先进制造业发展受制于人，国内市场的“先进需求”无法得到满足。多方面因素共同造成我国硅材料产业价值贡献度不高，不利于向价值链高端攀升。亟需优化产业结构，尽快从低端粗放转向高附加值供给，培育精细化、定制化产品的供给能力；提升终端用户认知，加强国产替代导向，提高国产高端硅材料的人均使用量，推动产业整体利润上行。

4. 能耗水平偏高，绿色转型任务艰巨

硅能源材料产业的高能耗、高排放特征依然突出，绿色制造体系尚未形成，资源环境压力未能缓解。以多晶硅生产为例，国内企业平均电耗为60~80 kW·h/kg，显著高于40 kW·h/kg的国际先进水平，单位产品的碳排放强度亦处于较高水平。在下

游制造环节，硅片切割废料、废旧硅片的回收利用率偏低，资源浪费现象较为突出。整体上，硅材料产业链在能耗、物耗方面仍然较高，而清洁生产、循环利用体系建设进展滞后；亟需实施关键技术攻关、优化主要工艺流程，加快应用节能降碳与绿色制造模式，提高全行业的可持续发展能力。

5. 资源配置失衡，高端供给明显滞后

我国硅能源材料产业处于由大变强的发展过程，相关企业面临国际国内市场的双重压力。一方面，少数技术壁垒高、品牌溢价能力强的国际企业主导了国际高端市场，而国内企业多参与中低端产品竞争，毛利率、研发投入强度明显低于国际主流水平，导致创新能力与意愿不强。另一方面，长期以来政策、投资的重心位于上游的资源与产能，而中下游的技术与应用得不到应有的关注。例如，2022年专项资金中仅有12%投向中下游的高端材料研发，2023年的基础研究经费占比不足10%^[49]，大量投资仍集中于上游的冶炼与扩产。高端产品方向投入不足，导致核心技术攻关和成果转化进度缓慢、高附加值产品供给滞后；上游初级环节因门槛低、补贴驱动，出现了重复建设和产能过剩的情况，进一步压低行业利润、削弱企业研发投入能力。资源配置失衡导致硅能源材料产业链两端“空心”，不利于我国企业在全全球硅材料产业链上掌握议价权与主导权。

五、我国硅能源材料产业的发展潜力与提升路径

（一）我国硅能源材料产业的发展潜力

1. 资源禀赋雄厚，产业基础支撑牢固

我国拥有世界上最丰富的硅矿资源、庞大的工业硅产能，在原料端具备持续的竞争优势。经过数十年的积累，我国构建了覆盖“硅矿勘探开采—工业硅冶炼—高纯硅提纯—硅片制造—下游应用”全流程的产业链体系。特别是太阳能级多晶硅、单晶硅等关键基础材料，相应的总产量、整体技术水平均稳居世界前列，如2024年硅片产量为753 GW，成为全球光伏供应链中不可替代的核心节点^[50,51]。相关资源禀赋与产业体系的双重优势，为我国硅能源材料产业链的纵深拓展提供了坚实支撑，也为建立自主可控的高端技术体系筑牢了

基础。我国还储备了丰富的硅材料副产资源，如工业硅冶炼产生的大量硅渣微粉等，加强综合利用后可转化为有价值的材料（如高性能混凝土掺合料）。强大的资源禀赋为我国硅能源材料产业筑牢了稳固根基。

2. 产业布局优化，协同集聚效应显现

在单晶硅、多晶硅、有机硅、硅基负极、硅气凝胶、SiC等关键方向，国内均已形成完整的产业链，涵盖“原料—材料—器件—系统”层级。光伏、储能、电子信息三大应用板块牵引了硅材料产业发展，促进上下游协同和跨领域融合。硅基负极材料在动力电池、储能电池中应用前景广阔，新能源汽车、分布式储能、电网建设等高潜力市场将提供持续增长的需求。5G、新能源汽车带动功率半导体器件的需求增长，进而激励高纯硅片、SiC单晶的供应，也驱动上游高纯硅材料和关联装备技术的提升。硅能源材料产业的各个环节保持良性互动，激励形成区域性的产业集群，如长江三角洲地区、珠江三角洲地区建立了光伏和半导体制造优势，西北地区依托资源积极发展基础硅料、光伏组件制造，有利于技术、人才、资本等要素的高效汇聚，提升产业整体竞争力。

3. 应用场景拓展，需求增长潜力良好

下游应用朝着多元化方向拓展，硅能源材料应用从传统的光伏、半导体领域迅速延伸至航空航天装备、高端制造、电子信息、生物医药等战略性新兴产业，市场需求增长态势鲜明。硅基气凝胶材料在建筑保温、电池热管理、航天器等高价值场景中获得应用，我国气凝胶材料市场规模有望从2022年的27.9亿元增长至2028年的357.5亿元^[52]。新能源汽车高压绝缘、先进制造润滑、医疗器械植入等对有机硅新材料的需求旺盛，硅基半导体材料开始应用于5G、高性能计算、生物芯片等。多场景牵引下的硅能源材料产业增长极正在形成，为硅能源材料拓展了更广阔的市场空间，同步提出了更高性能、更高可靠性的材料需求，驱动相关产业的技术攻关和能力提升。

（二）硅能源材料产业提升路径

1. 强化原料保障，构建多极支撑格局

针对高纯硅石、高纯硅料、电子级多晶硅等关键原料供应受限的问题，加快突破高端原材料自主

可控技术，构建稳定安全的原料供应体系。加强新疆、内蒙古、江西、甘肃等省份的高品位石英矿勘探与提纯，提高4N、5N级石英砂的批量供应能力；攻克电子级多晶硅、区熔单晶硅等提纯技术，提升纯度和良品率，减少进口依赖；同步建立国家战略硅材料的储备机制。优化产业区域布局，在华东、华北、西南等地区构建“原料-制造-应用”一体化的产业集群，因地制宜发展电子级硅材料、绿色制造、基础硅料供应能力。成立跨区域协同创新与产业联盟，避免低层次重复建设。完善产业园区配套，建设能力共享的实验室、中试基地、检测中心，推动创新资源的高效集聚与全面辐射，提升产业自主可控能力和市场竞争力。

2. 协同“产学研用”，精准攻关行业关键技术

围绕硅气凝胶、SiC功率器件、硅基新型电池等重点前沿方向，构建以龙头企业为核心、上下游协同的“产学研用”创新平台，形成攻关导向、应用牵引的创新联合体。结合超低密度硅基气凝胶的隔热和储能应用，高效SiC MOSFET、肖特基二极管器件在新能源汽车、高压输电等领域的规模化应用，发展硅基负极、固态电池、钠离子电池等新型储能技术。采用“揭榜挂帅”机制，鼓励企业掌握高纯石英提纯、高密度硅负极、电力电子芯片等关键工艺，突破PERC、TOPCon、HJT、叠层电池的高效技术路线，提升光电转换效率和产品良率。加强政策引导、提供资金支持，成立硅冶金和硅材料领域的国家级重点实验室，激励高校和科研院所积极开展原创创新，同步完善成果转化机制，贯通基础研究到应用转化的全链条，形成企业主导、市场驱动的创新生态。推动硅能源材料产业由原材料供应向“高端器件+系统解决方案”供应转型，形成以高性能硅基材料、电子器件为代表的高附加值产品体系。培育技术领先、品牌卓越的世界级企业集群，构建“中国硅”品牌，提升国际市场竞争力。

3. 发挥绿色低碳引领，构建绿电循环体系

坚持生态优先、绿色发展理念，面向硅能源材料的全生命周期，开展绿色制造与循环经济建设。在生产环节，优化工业硅、多晶硅、单晶硅等低耗清洁制备工艺，改善高纯硅的余热利用效率，提高能源利用效率和清洁水平。开展硅材料基地、可再生能源基地的协同布局，建设绿电直连、“源网荷储”一体化项目，提升行业的绿电使用占比；配套

绿电竞价机制、微电网建设，构建新能源就地消纳、直供硅产业的能源体系。在使用和回收环节，构建硅材料循环利用体系，提升再生利用的效率及附加值；发展专业化回收企业，完善回收网络，加大政策支持力度，促成废旧硅资源“应收尽收”。在产业链层面，引导企业建立涵盖原料、制造、绿电供应、回收等环节的绿色管理机制，尽快由工厂减排向全链条低碳转型。构建全生命周期内的绿色循环体系，加快实现“近零排放”“零碳硅”发展目标，提升硅能源材料产业的可持续发展能力、国际市场绿色竞争力。

4. 加快智能转型步伐，筑牢制造核心优势

在硅能源材料领域系统部署智能制造技术，支持制造模式重构与核心竞争力提升。以关键工艺智能化改造为突破口，开展核心装备的数字化升级和流程控制智能优化，提升工艺稳定性、产品一致性、能源利用效率。以智能工厂、数字化产线为依托，构建覆盖原料加工、主体制造、产品检测、回收利用全流程的智能制造体系，提升柔性生产能力和系统协同水平。培育智能制造平台型企业，推动产业链上下游的数据互联、资源共享、智能协同，形成数据驱动、算法决策、系统执行的智慧制造生态。可依托“东数西算”枢纽，在西部地区重点省份建设产业园区，采取“园区+基金+政策”协同机制，集聚8 in、12 in晶圆制造和特色芯片项目，探索“东数西算+西部造芯”的新发展路径。在制造逻辑层面实施重大转型，促进我国硅能源材料产业塑造国际市场引领优势。

六、结语

硅能源材料产业是重塑能源体系、推动制造业智能化升级的重要支撑，我国已基本形成涵盖资源获取、材料制备、器件制造、系统集成、智能应用的全产业链生态。依托丰富的硅矿资源、完善的产业体系、庞大的工业产能，我国硅能源材料产业具有显著的战略优势，但高端供给不足、核心技术自主化水平不高、产业链协同效率较低等问题依然存在。可实施“基础保障-技术引领-价值跃升-生态重构”四位一体战略，增强高端原材料自主供给能力，构建开放协同的行业技术创新体系，发展高附加值产品矩阵，优化区域产业集群协同布局，建设

绿色全生命周期循环体系；同步提供政策保障和金融支持，促进由产业要素驱动转向体系和标准优势驱动，加快形成国家级战略产业集群，全面提升国际市场竞争能力。随着硅能源材料产业的不断发展，进一步完善并筑牢我国硅能源产业基础，为“双碳”目标推进、能源结构优化、制造业高质量发展提供有力支撑。

当前，国际贸易和地缘竞争衍生出进出口限制、技术封锁、供应链重构等形势，成为我国硅能源材料产业发展的外部挑战性因素。需要加快推进硅能源材料产业链的自主可控和核心技术突破，全面提升从原料到高端器件的国产化水平，增强产业韧性和安全性。国际贸易压力也驱动国内产业升级，应注重技术创新、价值跃升、绿色转型，巩固硅能源材料产业在国家能源安全和科技自立、构建全球竞争优势方面的战略地位。未来，硅能源材料研究可聚焦高纯硅提纯技术、硅基负极材料性能优化、高性能硅基功能材料开发，拓展在航空航天装备、生物医药、先进传感、新一代信息技术等领域的创新应用，适应高端化的应用场景需求；提升废旧光伏组件、电子废弃物中硅资源的高效回收与再利用水平，构建绿色闭环产业链，顺应全球循环经济发展趋势；实施智能制造、全流程数字化管理，全面提升产业核心竞争力。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: July 5, 2025; **Revised date:** August 6, 2025

Corresponding author: La Peiqing is a research fellow from the School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology. His major research fields include nano-ceramic materials and intermetallic compounds. E-mail: pqla@lut.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Study on Strategies for the Green and Efficient Development of the Photovoltaic New-Energy Materials Industry for Gansu Province” (2023-DZ-09); Project of Natural Science Foundation of Gansu Province (25ZDLA002); Major Science and Technology Project of Gansu Province (25JRRA063)

参考文献

- [1] 赵家生. “硅能源”视角下我国硅产业面临的机遇和挑战 [J]. 中国有色金属, 2023 (16): 38–41.
Zhao J S. Opportunities and challenges faced by China’s silicon industry from the perspective of “silicon energy” [J]. China Nonferrous Metals, 2023 (16): 38–41.
- [2] Iacono S T, Clarson S J. Silicon and energy [J]. Silicon, 2014, 6(4): 211–213.
- [3] 李松, 李振国. 全球正由碳能源转向硅能源 [J]. 瞭望, 2022 (23): 17–19.
Li S, Li Z G. The world is shifting from carbon energy to silicon energy [J]. Outlook, 2022 (23): 17–19.
- [4] “十四五”现代能源体系规划 [EB/OL]. [2025-07-15]. http://www.nea.gov.cn/1310524241_16479412513081n.pdf.
The 14th Five-Year Plan for modern energy system [EB/OL]. [2025-07-15]. http://www.nea.gov.cn/1310524241_16479412513081n.pdf.
- [5] 2023 年中国硅产业链图谱研究分析 [EB/OL]. [2025-07-15]. <https://www.seccw.com/document/detail/id/26709.html>.
2023 China Silicon Materials Industry Chain Map Research and Analysis [EB/OL]. [2025-07-15]. <https://www.seccw.com/document/detail/id/26709.html>.
- [6] Zhang K. 1.1 semiconductor industry: Present & future [R]. San Francisco: 2024 IEEE International Solid-State Circuits Conference, 2024.
- [7] 韩蕊珊, 赵丽娜, 孙洁. 硅及硅基负极材料的研究进展 [J]. 高等学校化学学报, 2021, 42(12): 3547–3560.
Han M Y, Zhao L N, Sun J. Advances in silicon and silicon-based anode materials [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2021, 12: 3547–3560.
- [8] 阙端麟. 硅材料科学与技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2000.
Que D L. Silicon materials science and technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2000.
- [9] 中国矿产资源报告 2023 [EB/OL]. (2023-10-27)[2025-07-15]. https://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202310/t20231027_2804635.html.
China mineral resources report 2023 [EB/OL]. (2023-10-27)[2025-07-15]. https://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202310/t20231027_2804635.html.
- [10] Zhu M Y, Yue S Y, Tang K, et al. New insights into silicon purification by alloying–leaching refining: A comparative study of Mg-Si, Ca-Si, and Ca-Mg-Si systems [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(42): 15953–15966.
- [11] Hosseinpour A, Tafaghodi K L. Slag refining of silicon and silicon alloys: A review [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2018, 39(5): 308–318.
- [12] 王登红, 王岩, 陈郑辉, 等. 试论高纯石英原料矿的找矿方向 [J]. 地球学报, 2025, 46(1): 8–14.
Wang D H, Wang Y, Chen Z H, et al. Discussion on the prospecting direction of high-purity quartz deposit [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2025, 46(1): 8–14.
- [13] 戴静. 当前我国工业硅市场现状及发展前景 [J]. 世界有色金属, 2024 (18): 207–209.
Dai J. The current situation and development prospects of China’s industrial silicon market [J]. World Nonferrous Metals, 2024 (18): 207–209.
- [14] 郑小宁, 陈蓉, 吕钧, 等. 我国工业硅行业的难题及发展方向研判 [J]. 云南冶金, 2024, 53(2): 75–81.
Zheng X N, Chen R, Lyu J, et al. Challenge and development direction of industrial silicon industry in China [J]. Yunnan Metallurgy, 2024, 53(2): 75–81.
- [15] 吕锦标. 多晶硅产业技术与市场(2023/2024) [R]. 西安: 第十九

- 届中国太阳级硅及光伏发电研讨会, 2023.
- Lyu J B. Technology and market of the polysilicon industry (2023/2024) [R]. Xi'an: The 19th China Solar-Grade Silicon and Photovoltaic Power Generation Conference, 2023.
- [16] 赵帅, 张松. 我国多晶硅市场现状及发展建议 [J]. 石油石化绿色低碳, 2024, 9(6): 16–21, 32.
- Zhao S, Zhang S. Current status and development suggestions for China's polysilicon market [J]. Green Petroleum & Petrochemicals, 2024, 9(6): 16–21, 32.
- [17] Lenz C, Ziesche S, Reinhardt K, et al. Development and characterization of a monolithic ceramic pre-package for SiC-semiconductor devices based on LTCC technology [R]. Sibiu: 2022 IEEE 9th Electronics System-Integration Technology Conference, 2022.
- [18] Shim J S, Cui C Y, Go D H, et al. Structural phase transition of double-walled silicon carbide nanotubes under uniaxial compression: A molecular dynamics analysis [J]. Silicon, 2024, 16(1): 383–395.
- [19] 杨晓勇. 中国有机硅行业现状及可持续发展 [J]. 有机硅材料, 2010, 24(1): 5–8.
- Yang X Y. Current situation and sustainable development of silicone industry in China [J]. Silicone Material, 2010, 24(1): 5–8.
- [20] Wang Y W, Liang Y T. Analysis of the development trend of organosilicon industry [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2022 (5): 33–40.
- [21] Jawahar J G, Sravani K, Ganesh L, et al. An experimental study on mechanical properties of concrete by partial replacement of cement with rice husk ash and silica fume [J]. Advanced Materials Research, 2024, 1182: 81–86.
- [22] Song Z H, Liu W Q, Huang L J, et al. Novel atmospheric pressure drying method for silica-based aerogel insulation: Inspired with the adult process of damselflies [J]. Ceramics International, 2024, 50(18): 34205–34217.
- [23] Marszewski M, King S C, Galy T, et al. Transparent silica aerogel slabs synthesized from nanoparticle colloidal suspensions at near ambient conditions on omniphobic liquid substrates [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2022, 606: 884–897.
- [24] Xiao Q Y, Xue J Y, Meng Y L, et al. Lightweight and hydrophobic silica aerogel/glass fiber composites with hierarchical networks for outstanding thermal and acoustic insulation [J]. Ceramics International, 2024, 50(24): 54473–54481.
- [25] U. S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2024 [EB/OL]. (2024-04-31)[2025-07-15]. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024.pdf>.
- [26] Renewable energy statistics 2025 [EB/OL]. [2025-07-15]. <https://www.irena.org/Publications/2025/Jul/Renewable-energy-statistics-2025>.
- [27] Semiconductor Industry Association. Global semiconductor sales increase 19.1% in 2024, double-digit growth projected in 2025 [EB/OL]. (2025-02-07)[2025-07-15]. <https://www.semiconductors.org/global-semiconductor-sales-increase-19-1-in-2024-double-digit-growth-projected-in-2025/>.
- [28] 锂电池及光伏产业2024年多项指标实现两位数增长 [EB/OL]. (2025-02-27)[2025-07-15]. https://www.gov.cn/yaowen/shipin/202502/content_7007793.htm.
- In 2024, the lithium battery and photovoltaic industries recorded double-digit growth across multiple key indicators [EB/OL]. (2025-02-27)[2025-07-15]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202403/content_6939497.htm.
- [29] 杨斌. 先进电子材料领域“卡脖子”技术的研判与对策分析 [J]. 科技管理研究, 2021, 41(23): 115–123.
- Yang B. Research, judgement and countermeasure analysis of “containment” technology in the field of advanced electronic materials [J]. Science and Technology Management Research, 2021, 41(23): 115–123.
- [30] 赵鸿滨, 周旗钢, 李志辉, 等. 面向新兴产业和未来产业的新材料发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(1): 23–34.
- Zhao H B, Zhou Q G, Li Z H, et al. Development strategies of new materials for emerging industries and future industries [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(1): 23–34.
- [31] 智研咨询. 中国硅材料行业市场动态分析及发展前景研判报告 [R]. 北京: 智研咨询, 2024.
- Zhiyan Consulting. Analysis of market dynamics and development prospects of China's silicon materials industry [R]. Beijing: Zhiyan Consulting, 2024.
- [32] 北京国化新材料技术研究院. 中国高端无机硅产业发展蓝皮书 [R]. 北京: 北京国化新材料技术研究院, 2023.
- Beijing Guohua New Materials Technology Research Institute. Blue book on the development of China's high-end inorganic silicon industry [R]. Beijing: Beijing Guohua New Materials Technology Research Institute, 2023.
- [33] 孔慧玲, 顾卫华, 彭圣娟, 等. 废旧光伏组件回收及高值化利用研究进展 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2023 (9): 22–29.
- Kong H L, Gu W H, Peng S J, et al. Research progress on recycling and high value utilization of waste photovoltaic modules [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023 (9): 22–29.
- [34] Kopecek R. Why TBC will follow shortly after TOPCon [EB/OL]. (2023-09-11)[2025-07-15]. <https://www.pv-tech.org/why-tbc-will-follow-shortly-after-topcon/>.
- [35] 中国氟硅有机材料工业协会. 2021年全球有机硅专利分析 [R]. 北京: 中国氟硅有机材料工业协会, 2022.
- China Association of Fluorine and Silicone Industry. Analysis of global organosilicon patents in 2021 [R]. Beijing: China Association of Fluorine and Silicone Industry, 2022.
- [36] 新材料产业发展指南 [EB/OL]. (2017-01-23)[2025-07-15]. https://www.miit.gov.cn/ztzl/rdzt/xclcyfz/zcgh/art/2020/art_e27ba0ba54304c1b933c3cb32ecce94c.html.
- New materials industry development guidelines [EB/OL]. (2017-01-23)[2025-07-15]. https://www.miit.gov.cn/ztzl/rdzt/xclcyfz/zcgh/art/2020/art_e27ba0ba54304c1b933c3cb32ecce94c.html.
- [37] 2025年能源工作指导意见 [EB/OL]. (2025-02-27)[2025-07-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202502/content_7007276.htm.
- Guiding opinions on energy work in 2025 [EB/OL]. (2025-02-27)[2025-07-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202502/content_7007276.htm.
- [38] 中国光伏行业协会. 中国光伏产业发展路线图(2024—2025年) [R]. 北京: 中国光伏行业协会 2025.
- China Photovoltaic Industry Association. China's photovoltaic in-

- dustry development roadmap (2024—2025) [R]. Beijing: China Photovoltaic Industry Association, 2025.
- [39] 深企投产业研究院. 2024 光伏行业研究报告 [R]. 深圳: 深企投产业研究院, 2024.
- Shenzhen Enterprise Investment Industry Research Institute. 2024 photovoltaic industry research report [R]. Shenzhen: Shenzhen Enterprise Investment Industry Research Institute, 2024.
- [40] 26.5%!隆基再次刷新 HJT 电池效率世界纪录 [EB/OL]. (2022-06-25)[2025-07-15]. <https://stm.las.ac.cn/choiceiness/getChoiceinessDetail.htm?serverId=109&uuiid=8d501eb9b7387f1927eff1782c94a575&recommendId=68554&controlType=>.
- 26.5%! LONGi breaks HJT cell efficiency world record again [EB/OL]. (2022-06-25)[2025-07-15]. <https://stm.las.ac.cn/choiceiness/getChoiceinessDetail.htm?serverId=109&uuiid=8d501eb9b7387f1927eff1782c94a575&recommendId=68554&controlType=>.
- [41] International Energy Agency. IEA photovoltaic power systems programme [EB/OL]. [2025-07-15]. <https://iea-pvps.org/ch/>.
- [42] Balkas E. Revolutionizing power electronics with silicon carbide to pioneer sustainable solutions [R]. San Francisco: 2024 IEEE International Electron Devices Meeting, 2024.
- [43] 胡娟, 肖楠, 李文强, 等. 2023 年国内有机硅进展 [J]. 有机硅材料, 2024, 38(3): 73–90.
- Hu J, Xiao N, Li W Q, et al. Progress of silicone in China in 2023 [J]. *Silicone Material*, 2024, 38(3): 73–90.
- [44] 董少星, 高筠. 锂离子电池硅基负极材料研究进展 [J]. 化学工程师, 2023, 37(2): 58–61, 88.
- Dong S X, Gao Y. Research progress of silicon based anode materials for lithium ion batteries [J]. *Chemical Engineer*, 2023, 37(2): 58–61, 88.
- [45] 中信证券: 预计 2028 年硅碳负极用量将达到 9 万吨 [EB/OL]. (2025-03-26)[2025-07-15]. <https://caifuhao.eastmoney.com/news/20250326184452560621970>.
- CITIC Securities: The consumption of silicon-carbon anodes is expected to reach 90 000 tons by 2028 [EB/OL]. (2025-03-26) [2025-07-15]. <https://caifuhao.eastmoney.com/news/20250326184452560621970>.
- [46] 成润婷, 张勇军, 李立涅, 等. 碳边境调节机制下近零碳制造体系建设研究 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(1): 68–79.
- Cheng R T, Zhang Y J, Li L C, et al. Construction of near-zero-carbon manufacturing system under the carbon border adjustment mechanism [J]. *Strategic Study of CAE*, 2024, 26(1): 68–79.
- [47] 中国石英砂行业发展现状分析与投资前景预测报告(2024—2031 年) [EB/OL]. [2025-07-15]. <https://www.chinabaogao.com/baogao/202411/734874.html>.
- Analysis of the current development status and investment prospect forecast of China's quartz sand industry (2024—2031) [EB/OL]. [2025-07-15]. <https://www.chinabaogao.com/baogao/202411/734874.html>.
- [48] 2025—2030 年全球及中国有机硅行业市场现状调研及发展前景分析报告 [EB/OL]. [2025-07-15]. <https://www.chinairn.com/userfiles/20250801/20250801174202109.pdf>.
- Global and China organosilicon industry market status survey and development prospect analysis report (2025—2030) [EB/OL]. [2025-07-15]. <https://www.chinairn.com/userfiles/20250801/20250801174202109.pdf>.
- [49] 2023 年全国科技经费投入统计公报 [EB/OL]. (2024-10-02)[2025-07-15]. https://www.most.gov.cn/xxgk/xinxifenlei/fdzgk-nr/kjtjbg/kjtj2024/202410/t20241015_192157.html.
- 2023 national statistical bulletin on science and technology expenditures [EB/OL]. (2024-10-02)[2025-07-15]. https://www.most.gov.cn/xxgk/xinxifenlei/fdzgk-nr/kjtjbg/kjtj2024/202410/t20241015_192157.html.
- [50] 中国光伏行业协会. 中国硅片生产能力分析报告(2023) [R]. 北京: 中国光伏行业协会, 2023.
- China Photovoltaic Industry Association. Analysis report on China's silicon wafer production capacity (2023) [R]. Beijing: China Photovoltaic Industry Association, 2023.
- [51] 2024 年中国光伏产业链主要环节产量持续增长 [EB/OL]. (2025-02-27)[2025-07-15]. <https://capital.huanqiu.com/article/4Lfr1t3rTrn>.
- China's photovoltaic industry Chain: Continued growth in key segment output in 2024 [EB/OL]. (2025-02-27)[2025-07-15]. <https://capital.huanqiu.com/article/4Lfr1t3rTrn>.
- [52] 2024—2029 年中国气凝胶行业运营态势与投资前景调查研究报告 [EB/OL]. (2024-06-02)[2025-07-15]. <https://www.chinabgao.com/report/14689343.html>.
- Report on the operating conditions and investment prospects of China's aerogel industry (2024—2029) [EB/OL]. (2024-06-02)[2025-07-15]. <https://www.chinabgao.com/report/14689343.html>.