

功能玻璃关键材料体系发展战略研究

彭寿^{1,2*}, 秦旭升³, 洪伟³, 吴波³, 黄毅³

(1. 中国建材集团有限公司, 北京 100036; 2. 玻璃新材料创新中心(安徽)有限公司, 安徽蚌埠 233000;
3. 中建材玻璃新材料研究院集团有限公司, 安徽蚌埠 233000)

摘要: 功能玻璃材料是无机非金属材料的重要组成部分, 主要包括电子信息玻璃、新能源玻璃、特种玻璃等, 是信息显示、半导体、新能源、深海、深空等战略性新兴产业的基础性支撑性材料, 已成为我国建设智能社会、低碳社会的重要基石。我国近年来在功能玻璃领域取得一系列重大成就, 但仍存在关键材料短板环节突出、跟踪研发、创新资源分散、体系化发展不足等问题。本文按照主干化、体系化研究思路, 围绕电子信息玻璃、新能源玻璃、特种玻璃等关键材料的技术、产业、支撑等体系化发展要素, 梳理了国外功能玻璃领域先进国家的发展现状, 结合我国的发展现状, 凝练了我国功能玻璃关键材料发展面临的主要问题, 提出了我国功能玻璃关键材料的发展思路与近期、中期、远期的发展目标, 凝练了我国功能玻璃关键材料领域的重点技术发展方向。研究建议: 增强关键原材料保障能力, 为产业安全发展提供有力支撑; 加速启动功能玻璃关键材料创新滚动规划; 强化功能玻璃关键材料政策支撑; 完善功能玻璃关键材料的绿色低碳与数字化发展。

关键词: 无机非金属材料; 功能玻璃; 电子信息玻璃; 新能源玻璃; 特种玻璃
中图分类号: TN204 **文献标识码:** A

Development Strategy of Key Functional Glass Material System

Peng Shou^{1,2*}, Qin Xusheng³, Hong Wei³, Wu Bo³, Huang Yi³

(1. China National Building Material Group Co., Ltd., Beijing 100036, China; 2. Innovation Center for Advanced Glass Materials (Anhui) Co., Ltd., Bengbu 233000, Anhui, China; 3. CNBM Research Institute for Advanced Glass Materials Group Co., Ltd., Bengbu 233000, Anhui, China)

Abstract: As an important component of inorganic non-metallic materials, functional glass materials mainly include electronic information glass, new energy glass, and special glass. They are the basic supporting materials for strategic emerging industries such as information display, semiconductors, new energy, deep sea, and deep space, and have become the cornerstone for the construction of an intelligent and low-carbon society in China. In recent years, China has made a series of major achievements in the field of functional glass. However, there are still problems such as prominent shortcomings of key materials, tracking research and development, decentralized innovation resources, and insufficient systematic development. In a systematic way, this study focuses on the key material technologies, industry, supports, and other systematic development elements in the field of electronic information glass, new energy glass, and special glass, and summarizes the development status of functional glass in leading countries worldwide. Considering the basic development condition of China, this study summarizes the major challenges, explores the near-, medium-, and long-term development goals, and proposes the key development directions of key functional glass materials in China. Specific

收稿日期: 2024-04-18; 修回日期: 2024-05-20

通讯作者: *彭寿, 中国建材集团有限公司教授级高级工程师, 中国工程院院士, 研究方向为玻璃新材料; E-mail: cgc001@ctiee.net

资助项目: 中国工程院咨询项目“关键材料体系自立自强战略研究”(2022-PP-02)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

suggestions include: (1) strengthening the capability to guarantee key raw materials, forming a strong support for the sustainable development of the industry; (2) accelerating the rolling planning of innovations in key functional glass materials; (3) enhancing policy support; and (4) promoting the low-carbon and digital development of key functional glass materials.

Keywords: inorganic nonmetallic materials; functional glass materials; electronic information glass; new energy glass; special glass

一、前言

随着玻璃组分体系、流程工艺、应用场景等的加速创新，功能玻璃材料已经成为按需求设计，集高强、高韧、耐蚀、耐高温、抗辐射、表面活性等优异性能于一体的先进材料，主要包括电子信息玻璃材料、新能源玻璃材料、特种玻璃材料等，是国民经济重要领域与国防工业建设不可或缺的关键材料，广泛应用于信息显示、半导体、新能源、深海、深空等战略性新兴产业^[1]，成为新材料的重要细分方向。

功能玻璃材料的研发与生产水平是衡量一个国家新材料发展水平的关键标志之一。以美国、德国、日本为代表的全球先进国家高度重视功能玻璃材料的创新研究和应用发展，已形成较为完备的功能玻璃材料技术体系、产业体系和支撑体系，重点增强和完善了全产业链建设，依托美国康宁公司、德国肖特集团、日本旭硝子玻璃股份有限公司、日本电气硝子株式会社等全球领军企业的先进产品与产业规模优势，推行功能玻璃材料领域的全球化战略，在掌握全球市场绝对份额和引领行业发展方向的同时，着力提升本国功能玻璃材料的全球竞争力，谋求行业的“全球主导”地位。

近年来，随着信息显示、半导体、新能源等领域创新技术的不断涌现^[2,3]，功能玻璃材料的应用场景不断延展，产业发展加速以实现颠覆式跨越。在下游产业发展对功能玻璃材料旺盛的需求推动下，我国功能玻璃材料产业呈现快速发展态势，取得了关键材料核心技术水平显著提升、产业规模不断壮大、支撑能力建设逐步完善的显著成果。我国高度重视功能玻璃材料产业发展，发布了多项推动产业发展的政策措施^[4-6]，强调功能玻璃材料的战略地位，以关键短板材料攻关以及全产业链体系化、自主化建设为发展思路，推进功能玻璃关键材料自立自强发展，力求实现我国功能玻璃关键材料体系全球引领的重要目标。

本文重点围绕功能玻璃关键材料开展战略研究，系统梳理国内外产业体系化发展现状，研判关

键技术发展需求，对比分析存在的问题与不足，结合材料技术与产业发展经验、现状、实际应用需求和我国自身资源条件，运用主干化、系列化研究思路，提出与我国国情相适应的功能玻璃关键材料体系自立自强发展目标与技术发展方向，针对性提出政策建议。

二、国外功能玻璃关键材料的发展现状与趋势

从全球体系化发展的综合水平来看，美国、德国、日本在电子信息玻璃、特种玻璃材料领域处于领先地位。其中，美国秉持产品创新研发与全球化布局为主要发展思路，依托领先的核心工艺技术与知识产权布局，同时通过在具有大消费市场的国家和地区设置本地化生产线，以提升市场主导力和占据行业发展高地；德国重点布局技术创新与绿色发展模式，在新材料、新工艺、新设备等方面进行长期的创新研发，相关产品的性能与可靠性优异，在全球保持领先优势；日本具备深厚的研发实力，鉴于国情和资源禀赋，高度重视全产业链发展，全面布局产业链全流程及各环节的同步发展，在提升原始研发能力的同时，通过产业合作、推广应用等方式促进功能玻璃材料产业的发展。

（一）电子信息玻璃材料

电子信息玻璃材料主要包括应用于显示领域的薄膜晶体管液晶显示（TFT-LCD）玻璃基板、有机发光二极管（OLED）玻璃基板、高强盖板玻璃、超薄柔性玻璃^[7]以及应用在半导体领域中的高性能石英玻璃、光刻胶玻璃瓶等。当前，全球在电子信息玻璃材料领域呈现高度集中态势，以美国、德国、日本的领军企业依靠先进技术与产品优势，掌握着高端市场的主动权。

在显示玻璃材料领域，全球仅有少数企业如康宁公司、日本旭硝子玻璃股份有限公司等能够生产满足 OLED 面板制程要求的玻璃基板。康宁公司采用溢流法研发出 Lotus-NXT 系列产品，再热收缩率

约为 12 μm (600 $^{\circ}\text{C}$, 10 min), 杨氏模量为 83 GPa, 应变点为 752 $^{\circ}\text{C}$, 产品稳定性优异; 但因溢流工艺再热收缩率高的限制, 产品多应用于 OLED 显示载板。日本旭硝子玻璃股份有限公司采用浮法工艺生产的超低热收缩玻璃基板 AN-Wizus 系列产品, 其再热收缩率约为 7 μm (600 $^{\circ}\text{C}$, 10 min), 杨氏模量为 81 GPa, 应变点为 730 $^{\circ}\text{C}$, 可同时满足 OLED 显示基板和载板的功能要求。少数优势企业在 TFT-LCD 玻璃基板、OLED 玻璃基板、高强盖板玻璃等领域的市场份额合计占比达到全球的 90% 以上, 其中康宁公司的大猩猩玻璃 Gorilla Vitus 系列盖板玻璃产品处于当前该领域的全球领先水平, 可实现 2 m 高度的跌落测试。柔性玻璃基板制造工艺繁琐复杂, 行业进入门槛高, 其一次成型法等核心技术主要被德国肖特集团、康宁公司、日本电气硝子株式会社等企业所掌握, 现已成功研发并生产厚度小于 100 μm 的超薄柔性玻璃基板产品。

在半导体玻璃材料领域, 高性能石英玻璃是半导体光刻和精密光学器件的关键材料, 德国贺利氏集团、康宁公司已经成熟掌握并封锁大尺寸高性能石英玻璃的批量制备技术, 可生产出直径为 1600 mm 的石英玻璃材料, 满足高能激光器和深紫外光刻机 (DUV) 领域的应用, 并已实现高性能石英玻璃材料的全产业链发展。光刻胶玻璃瓶因具有不透 100~400 nm 波段光线、水汽不易进入、抽取中不易产生气泡、不引入金属离子和颗粒杂质等极为苛刻的条件限制, 技术水平要求极高, 目前全球只有日本东洋玻璃株式会社具备产品生产能力。

(二) 新能源玻璃材料

新能源玻璃材料主要有薄膜发电玻璃和光伏玻璃两种, 是薄膜太阳能电池、晶硅太阳能电池的核心材料。近年来, 随着全球能源危机不断加剧, 绿色低碳发展已成为全球共识, 太阳能电池成为全球热点研究领域。

薄膜发电玻璃指在玻璃表面沉积多层化合物半导体材料薄膜, 可通过光伏效应将太阳能转化为电能的新能源玻璃材料, 主要包括碲化镉薄膜发电玻璃、铜铟镓硒发电玻璃等。美国第一太阳能公司在碲化镉发电玻璃领域拥有绝对优势, 量产组件平均转换效率达 19.7%, 实验室最高转换效率达 22.1%, 量产组件最高功率达到 540 W; 产品质量国际领

先, 产能占全球 95% 以上, 独家掌握气相运输沉积先进技术, 并以申请专利保护手段严格禁止其他企业采用。在铜铟镓硒发电玻璃领域, 国外仅日本太阳能前沿公司实现了产业化, 量产组件的转换效率为 17.5%, 实验室最高转换效率为 23.4%, 产能约为 1.1 GW。

在光伏玻璃领域, 国外生产企业主要有日本旭硝子玻璃股份有限公司、法国圣戈班集团、英国皮尔金顿公司、印度博罗西勒公司等, 截至 2023 年年初, 合计光伏玻璃的产能约为 9000 t/d, 全球占比不足 10%; 光伏组件产能和产量分别约为 104 GW、52.8 GW, 全球占比约为 15.2%。国外的光伏玻璃领域核心技术以及产业规模已不具比较优势。

(三) 特种玻璃材料

特种玻璃主要包括节能安全玻璃、生物医药玻璃、国防军工玻璃等^[8], 在众多战略性领域发挥关键作用。总体来看, 国外部分先进玻璃企业通过长期且高额研发投入, 在特种玻璃方面已经形成了相对深厚的技术积累, 并通过技术壁垒在特定细分特种玻璃材料领域形成了一定的技术垄断, 致使特种玻璃产业发展呈现出极不平衡的状态。

航空玻璃与轨道交通玻璃是节能安全玻璃领域中的代表性材料。① 航空玻璃为满足航空器对安全性的特殊要求, 在配方、原片制造工艺、深加工工艺等方面的技术难度远高于传统玻璃。目前, 美国匹兹堡平板玻璃公司、法国圣戈班集团和英国吉凯恩公司可为大型飞机配套生产风挡玻璃, 上述公司的航空玻璃产品已经通过美国联邦航空管理局、欧洲航空安全局认证, 应用于干线客机、喷气飞机、支线客机、直升机、战斗机等航空器, 成为波音公司、空中客车公司、伊尔库特科学生产集团、中国商用飞机有限责任公司等全球航空器制造公司的主要供应商。② 轨道交通前窗玻璃以带电加热层的多层夹层玻璃为主, 侧窗玻璃以低辐射玻璃等有各种功能层的中空玻璃为主。法国圣戈班集团因其掌握关键核心技术在全球前挡玻璃领域占据优势地位, 其产品供应意大利高铁车用玻璃、巴黎地铁新线列车玻璃、中国中车股份有限公司的高铁门窗玻璃、阿塞拜疆和卡扎特斯塔火车专用玻璃等。

中性硼硅玻璃是采用特殊配方和工艺生产的一类玻璃材料, 具有良好的化学稳定性和热稳定性,

可以满足高端药品对包装材料在水、酸、碱的长期浸泡下对硅、铝成分和有害杂质的浸出以及玻璃屑脱落条件的特殊要求，也是目前市场公认最为理想的医药产品包装材料，但因其特殊的性能要求致使生产工艺制程中存在难熔化、难澄清、难成型等问题。德国肖特集团、康宁公司、日本电气硝子株式会社是全球中性硼硅药用玻璃的领军企业，已拥有较为成熟的工艺方案，其产品线热膨胀系数分别为 $5.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、 $4.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、 $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ；3家企业的产品被全球大多数医药企业所采用，合计约占全球90%的市场份额，年产能合计达到 4.7×10^5 t。

硫系红外玻璃是红外热成像系统中的关键光学元件，在红外成像制导、夜视瞄准、车辆夜视辅助驾驶、安防监控等国防和民用领域应用广阔。国外硫系红外玻璃的生产企业主要有德国肖特集团和瑞肯公司、比利时优美科集团、美国非晶体材料公司，其中优美科集团是全球唯一一家同时掌握硫系玻璃制备技术和精密模压技术的企业。出于对红外材料在军事领域应用的敏感性和产品市场的垄断性考虑，国外企业在制备工艺技术上加以封锁。

空心玻璃微珠是一种用途广泛、性能优异的新型轻质材料，被誉为“空间时代材料”，可应用于浮体材料的填料、电子工业轻质封装材料功能填充剂、乳化炸药的优良敏化剂和稳定剂、油气田开采中的低密度钻井液和低密度固井水泥浆的高效减轻剂等领域。美国明尼苏达矿业及机器制造（3M）公司是全球规模最大的空心玻璃微珠生产商，采用玻璃粉末法制备了高性能空心玻璃微珠，技术水平处于国际领先地位，其产品的全球市场占有率约为17%；3M公司与美国普特斯公司、爱玛森康明公司、比利时格拉威伯尔公司、匹兹堡康宁公司合计占据全球空心玻璃微珠90%以上的市场份额。

三、我国功能玻璃关键材料的发展现状

我国功能玻璃关键材料的发展注重顶层规划与市场需求双轮驱动。近年来，国际形势继续发生深刻复杂变化，世界动荡变革加剧，作为诸多重要产业的关键上游支撑，功能玻璃材料领域成为国际技术和产业竞争的前沿阵地。目前，我国部分功能玻璃材料、关键核心技术因国际封锁存在受制于人的问题，威胁着我国下游战略性新兴产业的健康稳定

发展。我国高度重视短板材料攻关以及全产业链自主化建设，搭建了一批高能级产业创新平台，开展了一系列重点材料科技攻关，推动了多项应用示范项目建设，在功能玻璃关键材料领域取得了一系列成果，但在产业结构、前沿技术研发、引领能力等方面仍存在不足。

（一）部分领域达到全球先进水平，实现从自立向自强跨越

在高强盖板玻璃领域，以四川旭虹光电科技有限公司、凯盛科技集团有限公司、中国南玻集团股份有限公司等企业为代表，近年来成功突破了二次强化工艺并实现高强盖板玻璃量产，产品性能已经达到国际先进水平，并稳定供应于下游终端产品。玻璃通孔（TGV）^[9]的整体技术水平与全球先进水平保持同步，相关技术和产品的应用主要涉及人工智能算力、叠层芯片先进封装、射频、光通信、系统级玻璃基封装载板、次毫米/微米发光二极管玻璃基封装载板、微流控等领域，国内应用市场尚处于起势阶段，已有部分企业开始进行小批量生产认证。

我国碲化镉薄膜发电玻璃的基础研发技术和产业化水平处于全球领先地位，已实现单线规模为100 MW、300 MW的生产线建设，具备单线规模为600 MW的生产线产业化能力，但组件转化效率仍有较大提升空间，产品竞争力有待提升。

在硫系红外玻璃材料领域，我国相关企业均已成熟掌握并采用真空熔融-淬冷关键生产技术实现量产，年产能约为 $3 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5$ t，产品已具备稳定供应能力。

在柔性玻璃领域，我国率先开发出厚度为30~70 μm 的超薄柔性玻璃，可实现连续弯折 4×10^5 次不破损和30 μm 弯折半径小于1 mm，全流程柔性技术环节处于世界领先水平。我国的超薄柔性玻璃加工生产企业的年规划产能超过 5.42×10^7 片，可以满足国内终端市场的材料供应需求，全产业链实现自立发展。

在轨道交通用玻璃领域，国产产品的主要指标达到或超过了国外同行业水平，相关企业的产品占据国内90%市场份额。我国在时速200~300千米级的电加热前挡风玻璃领域处于领先地位，并开发出汽车天窗总成、轨道交通车辆车窗总成、船用玻

璃、飞机玻璃等高端特种玻璃产品。

光伏玻璃产业是我国为数不多的在核心技术与产业规模方面具备全球绝对领先优势的产业，已实现从原片到深加工全套工艺技术和关键装备的自主化，率先实现了 1.5 mm 超薄、高透、超白压延玻璃原片的稳定量产，引领全球发展方向。2022 年建设的最大光伏玻璃生产窑炉产能达到 1500 t/d，良率达到 85% 以上。我国光伏玻璃领域的主要企业包括信义光能控股有限公司、福莱特玻璃集团有限公司和凯盛科技集团有限公司等（见表 1）。截至 2023 年 12 月底，我国光伏玻璃在产窑炉有 138 座，合计产能超过 115 969 t/d，是全球最大的光伏玻璃生产国和出口国，全球市场份额占比多年稳定在 90% 以上。2023 年，我国光伏玻璃出口量超 3.55×10^6 t，主要出口越南、印度、泰国、美国等国家。

（二）产业生态逐步完善，体系化建设加速推进

近年来，为推动功能玻璃产业的高质量发展，我国以政策规划引领与国家级平台建设为支撑，实现对关键产业、关键技术、核心原材料的自主可控。“十三五”时期以来，我国围绕高端制造、新材料等方向，在功能玻璃领域发布了一系列促进产业结构优化、加速国产化替代、推动产业高质量发展的政策规划，对功能玻璃产业发展形成了关键支撑与引领。《“十三五”国家科技创新规划》（2016 年）提出，以特种玻璃等战略新材料为重点，大力提升功能材料在重大工程中的保障能力；《“十四五”原材料工业发展规划》（2021 年）提出，推进特种玻璃熔化成型技术，攻克高性能功能玻璃等一批关键材料等；《质量强国建设纲要》（2023 年）提出，加快高强度高耐久、可循环利用、绿色环保等新型建材研

发与应用，推动钢材、玻璃、陶瓷等传统建材升级换代以提升材料性能和品质。

在国家级平台建设方面，我国在功能玻璃材料领域已建设了国家玻璃新材料创新中心、浮法玻璃新技术国家重点实验室、玻璃工业节能技术国家地方联合工程研究中心、彩虹集团国家级企业技术中心、中国玻璃发展中心等多个国家级平台，以重点企业为主体、市场需求为导向、“产学研”深度融合的发展体系初步显现；以围绕产业链开展协同创新为路径，推动全行业技术水平、创新能力、产业规模稳步提升，先后攻克了 8.5 代 TFT-LCD 玻璃基板、中性硼硅玻璃、空心玻璃微珠等一批关键短板材料，并形成了稳定的工业化量产产品，实现了多项国内重点材料“零”的突破；在持续增强自主保障能力的同时，我国功能玻璃产业生态体系也进一步得到完善。

（三）中低端产品竞争力持续显现，高端产品技术与产业优势尚未形成

我国在 6 代及以下 TFT-LCD/OLED 玻璃基板、石英玻璃、航空玻璃、生物医药玻璃、空心玻璃微珠等功能玻璃关键材料领域已实现中低端产品的全产业链自主化发展，基本满足了国内中低端产品的应用需求，但高端产品的关键技术与性能仍与国外先进水平存在一定差距，自主供应能力薄弱，存在受制于人现象。例如，在 TFT-LCD 玻璃基板领域，2022 年，我国 TFT-LCD 面板生产线对 8.5 代及以上玻璃基板的需求量约为 3.5×10^8 m²，占全球整体需求总量的 60% 以上。国外相关企业在我国投产及在建的 TFT-LCD 面板生产线共有 23 条，产能为 1.5×10^8 m²，拥有我国的绝对市场份额；国内企业近年来虽然实现了 8.5 代 TFT-LCD 玻璃基板的核心技术突破，但自主建设与在建的 8.5 代生产线仅有 4 条，产能不足 2×10^7 m²。我国高世代 OLED 玻璃基板目前仍停留在试验线阶段，相关企业已开展高世代 OLED 基板玻璃示范生产线建设，尚不具备自主生产能力，市场供应仍主要由美国、日本、德国等国家的领军企业来提供。

在石英玻璃领域，我国在高纯度和大尺寸石英玻璃制备、熔制设备及节能控制方面，与国外先进水平还存在较大差距。当前国内最高水平的超纯石英玻璃产品可实现金属杂质含量低于 4×10^{-7} μg/g、

表 1 我国主要企业的光伏玻璃产能统计情况
(截至 2023 年 12 月底)

序号	企业名称	现有产能/ (t·d ⁻¹)
1	信义光能控股有限公司	27 800
2	福莱特玻璃集团有限公司	21 800
3	凯盛科技集团有限公司	11 940
4	中国南玻集团股份有限公司	8500
5	彩虹集团有限公司	6150
6	河南安彩高科股份有限公司	2400
7	常州亚玛顿股份有限公司	1950
8	唐山金信新能源科技有限公司	1900

折射率均匀性为 4×10^{-6} （口径为230 mm）、羟基含量小于 1×10^{-6} $\mu\text{g/g}$ 、气泡及杂点为1类指标，但仍未达到光刻级产品的指标需求。面对国外企业相关产品的限售和技术封锁，我国在半导体高端设备领域亟需进一步实现高性能石英玻璃材料的突破。

我国以光刻胶玻璃瓶、透明导电（TCO）玻璃材料为代表的功能玻璃关键材料对外依存度偏高，自主化产品供应占比较低。其中，光刻胶玻璃瓶主要依赖进口，对我国半导体与显示行业造成潜在威胁。为此，我国相关企业及研制单位针对干式光刻胶包装瓶，开展了内壁脱碱、镀膜技术的中试验证，正在加速推进产业化进程。我国在线TCO玻璃材料尚未完全进入下游应用，相关产品供应主要来自日本等少数国家的进口，但国内少数企业已开展相关核心技术攻关。总体来看，与国外相比，我国功能玻璃关键材料的高端产品竞争力水平显著不足，面对日趋复杂的国际环境，存在一定的产业安全风险。

四、我国功能玻璃关键材料发展面临的主要问题

（一）关键高纯石英原料供应能力不足

石英原料是生产功能玻璃的最主要原材料^[10]，包括石英矿产资源提纯和人工合成两种工艺路径。目前，光刻机玻璃等石英玻璃材料主要采用人工合成石英原料，但受成本、工艺等因素影响，未来将逐步实现石英矿产提纯石英原料对合成石英原料的替代。从石英矿产中提纯的石英原料与矿产资源禀赋深度相关，我国中低端石英资源储量充足，基本可满足光伏玻璃等功能玻璃材料生产的自主供应；但在生产4N8及以上纯度级别的高纯石英原料矿产领域，当前我国现已探明、初步具备加工为高纯石英产品条件的脉石英资源储量约为 7×10^6 t，伟晶花岗岩资源储量严重缺乏，致使我国尚不具备高纯石英原料大规模自主化供应能力，纯度4N8及以上高纯石英原料完全依赖进口（年进口量为 8.8×10^4 t，约占全球年生产总量的70%）。我国高纯石英资源自主保障能力短板问题凸显。美国、德国、印度尼西亚等国家是我国主要的高纯石英原料进口国，但已实行或正在通过行政手段，封锁、限制高纯石英原料及其制品对我国的出口，对我国先进半导体材

料等关键功能材料供应形成重大威胁。

（二）行业原始创新能力偏弱

国外领先企业得益于先发优势，在料方体系、工艺机理、生产工艺控制等方面的创新积累显著多于我国，其新产品开发、工艺升级等创新活动周期短，研发成功效率高，具有持续的产业竞争优势。

我国功能玻璃材料行业已初步形成由高校、科研院所、企业组成的多元化及多路径创新发展模式。但我国玻璃行业创新研发活动较为封闭，缺乏跨行业、跨领域、全球化的合作模式；创新资源分散，缺乏统一的规划与引领，多数创新活动仍然停留在生产工艺升级方面；基础理论研究、产业共性技术研究薄弱，原创技术、原创产品仍然缺乏。目前，我国的功能玻璃材料研发多为跟随创新，尚未出现独创或原创的功能玻璃产品以及独有的功能玻璃技术储备。以信息显示玻璃、生物医药玻璃、红外光学玻璃等新型材料为例，核心技术策源地均来自美国、日本、德国等国家，我国尚不具备行业引领能力与话语权，产业发展处于被动地位。

（三）产业支撑体系尚不完善

目前，我国功能玻璃关键材料行业已培育了一批具有国际竞争力的重点企业，建设了多个具备行业影响力的创新平台，已经建成相对完善的创新链条，但仍然缺乏产业链条支撑能力，具体表现为行业公共服务体系尚不健全，产业跨领域、跨环节协同机制还不完善等。我国的检验检测平台数量不足，评价认证标准体系不完善，导致创新成果、新型产品验证周期长，推广应用较慢，同时存在新产品与中下游应用企业的需求适配度不足等问题，在生物医药玻璃、显示玻璃材料领域表现尤为明显，给我国创新研发带来不利影响。

五、我国功能玻璃关键材料的发展目标及思路

（一）发展目标

功能玻璃材料是我国建设材料强国的重要组成部分，为加强功能玻璃材料领域的顶层设计与战略规划部署，推进关键材料自立自强体系化发展，本研究设置了“三步走”的战略目标。

1. 2030年目标

解决功能玻璃关键材料的重点短板环节, 加快8.5代TFT-LCD玻璃基板生产线的国内布局和产品推广应用; 掌握10.5/11代TFT-LCD玻璃基板核心技术及产业化应用, 高世代TFT-LCD玻璃基板自给率实现50%; 掌握8.5代、10.5/11代、大尺寸OLED玻璃基板核心技术与产业化能力, 实现本土化供应能力; 掌握一次成形70 μm 及以下柔性玻璃产业化核心技术, 形成稳定产业化供应能力; 智能制造关键技术及装备成熟并广泛应用, 玻璃智能制造标准体系完善, 全流程制造仿真技术成熟, 新产品研发周期显著缩短等。在电子信息玻璃领域培育2~3家全球领军企业, 组建1~2个具有国际影响力的研发机构。在特种玻璃材料领域, 实现全产业链的自主供应能力。总之, 要在功能玻璃材料领域形成完整的技术和产业化体系, 大幅提升原始创新能力, 推动部分领域达到国际先进水平, 实现自立发展。

2. 2035年目标

功能玻璃关键材料生态体系全面建成, 突破跨学科智能感知功能玻璃材料、智能功能玻璃关键技术及装备; 形成低碳原料替代方案, 实现玻璃熔窑氢燃料100%纯度替代技术及关键装备突破并成功开展规模化示范应用。培育5家以上全球领军企业, 市场份额达到全球领先, 整体关键技术水平、原始创新能力达到国际先进水平, 引领重点领域功能玻璃材料前沿发展方向, 解决全产业链短板材料问题, 实现自强发展。

3. 2050年目标

原始创新能力达到全球领先, 成为国际功能玻璃材料领域的创新策源地。在关键领域稳定占据行业发展高地, 重点领域占领全球市场份额的60%以上, 形成完备的材料发展体系, 实现我国功能玻璃材料技术与产业的全球“领跑”地位。

(二) 发展思路

1. 深化关键技术研发布局

针对我国功能玻璃关键材料原始创新、共性技术研发的重点短板问题, 开展创新能力提升与创新规划布局。以高能级创新平台为依托, 不断提升创新资源集聚水平, 实现创新能力提升。加快生物医药玻璃、半导体玻璃材料等细分领域创新的跨领域、跨专业合作, 推动重点技术与产品突破。围绕

创新规划, 瞄准下游光刻机、大飞机等重点装备的发展需求, 完善创新路线与计划, 制定完善的创新路线图与重点研发计划项目清单。鼓励创新主体开展基础共性技术、材料机理等研究, 为下一步研发工作奠定理论基础。

2. 加强行业关键人才培养

在规划产业发展要素中, 重点关注人才支撑, 鼓励各级产业平台加强关键功能玻璃材料科研人才、管理人才的引进和培养, 出台专项政策引领企业、高校及科研院所联合开展人才协同培养, 壮大人才规模, 提升人才素质。以企业为主体引进一批“高精尖缺”的领军人才和创新团队。围绕“产学研用”协同, 不断创新和探索各级人才认证与激励机制, 从政府、企业多角度对自主培养和引进的关键人才进行激励, 保障高端人才能力的充分发挥。

3. 加速培养行业重点企业

加快建设一批产品卓越、品牌卓著、创新领先、治理现代的世界一流企业。面对复杂的国际形势和日益激烈的产业竞争态势, 我国亟需立足现有创新优势、产业优势、市场优势, 对标国际领先企业, 培育一批能够跻身国际一流梯队、具有生态主导力的产业链“链主”企业, 打造引导产业高质量发展和参与国际竞争的“排头兵”。同时, 针对生物医药玻璃、空心玻璃微珠、红外玻璃等市场规模较小但影响较大的关键材料, 通过资金、政策的重点支持, 建成一批“专精特新”重点企业。

4. 强化产业支撑能力建设

以行业龙头企业为引领, 推动产业链各环节企业联合, 利用产业平台、产业联盟等形式, 不断完善链式融合发展机制, 开展前瞻技术研发、成果转化与推广应用合作, 构建产业链协同发展的行业生态。加速完善材料公共服务体系, 重点推进材料表征能力、测试评价方法和标准体系建设, 建立行业测试评价大数据中心, 为我国功能玻璃关键材料国际化和现代化发展提供保障。加强材料与终端企业的“点对点”精准对接, 以专项政策扶持构建全链条式创新机制, 持续扩大OLED玻璃、光刻机高性能石英玻璃、TGV玻璃、生物医药玻璃等材料“首批次”保险补偿机制, 解决“好材不敢用”的后顾之忧。

六、我国功能玻璃关键材料的技术发展方向

当前，新一轮科技革命与产业变革加速演进，以数字技术和数字产品为代表的数字化时代加速推进，持续推动传统行业转型升级，功能玻璃关键材料作为战略性新兴产业和未来产业的重要基础支撑，亟需满足新技术、新工艺、新装备制造的创新需求以及自立自强的产业基础能力需求。

（一）信息显示与半导体领域终端对功能玻璃材料的关键技术方向

① 开发新型半导体显示用铟镓锌氧化物薄膜晶体管（IGZO-TFT）玻璃基板料方。开发8.5代TFT-LCD玻璃基板产业化抛光核心装备；开发10.5代TFT-LCD玻璃基板澄清、均化、展薄等关键制备技术，突破大流量贵金属通道澄清均化、高温非线性梯级展薄、微应力紧密调控等核心技术；研发高世代（G8.6+、G11/10.5）TFT-LCD玻璃基板生产的铂金通道、锡槽等核心热工装备。② 开发适用于浮法成形工艺的OLED玻璃基板核心料方。开发OLED基板玻璃低残余应力和低再热收缩退火技术及装备；开展OLED基板玻璃关键热工过程的数字化研究；研发OLED基板玻璃高效熔化、澄清均化与精密展薄浮法成形技术；建设浮法8.5代OLED显示用玻璃基板生产示范线，建立OLED显示玻璃材料评价体系与标准规范。③ 开发超薄柔性玻璃一次成型技术和装备；开发柔性盖板玻璃“展平-下拉”快速稳定一次成型、高效激光切割、化学强化增韧、无损传输等精密加工技术；开展柔性玻璃应力层分布技术控制与优化。④ 开展DUV光刻机石英玻璃关键技术及产业化研究；研制193 nm光刻机用高纯石英玻璃材料，在DUV光刻系统中完成实验验证并实现国产化替代等。

（二）新能源领域产品对功能玻璃材料转换效率提升的关键技术方向

① 开发设计高强度压延玻璃组分，研究超薄压延玻璃表面结构化处理技术；开发超薄压延玻璃快速 Fe^{2+}/Fe^{3+} 测试技术，研究降低 Fe^{2+} 含量的控制性技术，开展光伏压延玻璃纳米减反膜材料研究。② 重点突破渐变带隙碲化镉吸收层在线掺杂和高效活化技术，推动连续由上往下近距离蒸发镀膜技术

和装备，高效率碲化镉电池组件在线激活技术，碲化镉小死区、大宽幅高速激光切割技术开发。③ 开展双面铜铟镓硒小尺寸组件技术研发，开发便携式远程控制设备，磁控溅射镀膜及物理、化学沉积装备；研究高效、低成本的钙钛矿叠层多结太阳能电池关键制备技术等。

（三）特种领域对功能玻璃材料极限化性能的关键技术方向

① 完成高耐冲击玻璃组成结构性能基础研究，高耐冲击器件结构设计，高耐冲击玻璃量产及深加工技术开发，高耐冲击玻璃在航空、汽车、轨道交通等领域的测试与验证。② 研究中性硼硅玻璃管配料、熔化、澄清、成型关键技术，中性硼硅玻璃管成型冷端装备和预灌封针筒成型装备及工艺控制技术，开发预灌封注射器针筒成型装备并实现批量生产等。③ 研究红外光学玻璃材料提纯、玻璃中微纳散射缺陷控制、硫系玻璃材料提纯、玻璃中微纳散射缺陷控制等技术。

七、对策建议

（一）提高关键原材料保障能力，为产业安全发展形成有力支撑

建议将高纯石英原料列入找矿突破行动与战略性矿产目录。推进石英资源找矿、选矿关键技术重点领域实现突破，梳理短板环节，解决我国当前面临的优质石英资源匮乏难题；重点强化我国在成矿机理、勘探找矿技术、矿产评价标准建设、深加工提纯技术等关键领域的研究能力，着力提升我国高纯石英矿产资源自主保障能力。同时，充分利用国际国内两种资源，通过国际产业合作和税收协定等方式，增强高纯石英原料引进力度，提升国际资源供应保障能力。

（二）加速启动功能玻璃关键材料创新滚动规划

瞄准下游关键领域新技术、新应用快速迭代的发展趋势，厘清国内外功能玻璃关键材料的发展现状，在推动实现行业发展战略目标的基础上，建议行业主管部门和创新引领单位，联合功能玻璃材料领域的人才力量，进一步优化、细化并形成3年一循环的功能玻璃关键材料行业创新滚动规

划机制, 及时对重点研发方向、研发目标、前沿研发布局、重大研发项目、重点成果转化项目进行更新, 保障行业创新工作的精准性和对下游领域的支撑性。

(三) 强化功能玻璃关键材料政策支持

目前, 我国对关键功能玻璃材料研发及产业化政策支持的系统性和针对性不足, 产业发展、创新发展、节能环保、要素支持等政策之间的协调性不强, 难以对行业发展发挥全面有力的推动作用, 在高性能石英玻璃、生物医药玻璃等相对规模较小的细分行业中表现尤为明显。未来, 亟需从顶层规划层面开展政策间的互通互联, 围绕重点发展目标和方向, 开展创新引导、产业支持、行业监管、要素支持等政策的同步制定, 保障政策之间的一致与协调, 实现相关政策对行业发展的全面支撑和引导。

(四) 完善功能玻璃关键材料绿色低碳与数字化发展

结合功能玻璃关键材料产业的生产特点, 我国碳达峰、碳中和与数字化发展的现实要求, 编制形成适宜功能玻璃关键材料领域的绿色低碳与数字化发展引导规划, 在绿色低碳端引导形成源头减碳、过程降碳、末端固碳、流程管碳的全面低碳转型发展路径。在数字化端, 围绕高质量发展, 强化与大数据、互联网、云计算、人工智能等新一代信息技术的深度融合, 推进形成有效的行业减碳降碳与数字化技术、研发路线、应用推广机制等。

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: April 18, 2024; **Revised date:** May 20, 2024

Corresponding author: Peng Shou is a professor-level senior engineer from China National Building Material Group Co., Ltd., and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research field is new glass materials. E-mail: cgc001@ctiec.net

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “The Strategy of Self-Reliance and Self-Improvement of Key Material Systems” (2022-PP-02)

参考文献

[1] 中国工程科技发展战略研究院. 中国战略性新兴产业发展报告(2022) [R]. 北京: 科学出版社, 2021.
Chinese Academy of Science and Technology for Development.

- Report on the development of China's strategic emerging industries 2022 [R]. Beijing: Science Press, 2021.
- [2] Zhao Y, Ma F, Qu Z H, et al. Inactive $(\text{PbI}_2)_2$ RbCl stabilizes perovskite films for efficient solar cells [J]. *Science*, 2022, 377(6605): 531–534.
- [3] Joo W J, Kyoung J, Esfandyarpour M, et al. Metasurface-driven OLED displays beyond 10, 000 pixels per inch [J]. *Science*, 2020, 370(6515): 459–463.
- [4] 国家制造强国建设战略咨询委员会, 中国工程院战略咨询中心. 《中国制造 2025》重点领域技术创新绿皮书: 技术路线图 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
National manufacturing Strategy Advisory Committee, Center for Strategic Studies of Chinese Academy of Engineering. *China Manufacturing 2025 key field technology roadmap* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.
- [5] 国家发展和改革委员会. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要 [M]. 北京: 人民出版社, 2021.
National Development and Reform Commission. The outline of the 14th Five Year Plan for economic and social development and long-rance objectives through the year 2035 of the People's Republic of China [M]. Beijing: People's Publishing House, 2021.
- [6] 中华人民共和国工业和信息化部. 重点新材料首批次应用示范指导目录(2021 年版) [EB/OL]. (2022-01-01)[2024-03-25]. https://www.miit.gov.cn/cms_files/filemanager/1226211233/attach/20235/9e202e91cdd44f1788e16df4ecdc53a6.pdf.
Mistry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Key new materials first application demonstration guide catalogue 2021 [EB/OL]. (2022-01-01)[2024-03-25]. https://www.miit.gov.cn/cms_files/filemanager/1226211233/attach/20235/9e202e91cdd44f1788e16df4ecdc53a6.pdf.
- [7] 彭寿, 洪伟, 秦旭升, 等. 我国信息显示关键材料发展战略研究 [J]. *中国工程科学*, 2022, 24(4): 85–93.
Peng S, Hong W, Qin X S, et al. Development strategy of key materials for information display in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(4): 85–93.
- [8] 中国工程院化工、冶金与材料工程学部, 中国材料研究学会. 中国新材料产业发展报告(2020) [R]. 北京: 化学工业出版社, 2020.
Department of Chemical Engineering, Metallurgy and Materials Engineering of Chinese Academy of Engineering, Chinese Materials Research Society. Report on the development of China's new materials industry 2020 [R]. Beijing: Chemical Industry Press, 2020.
- [9] Kant Bajpai V, Kumar Mishra D, Dixit P. Fabrication of through-glass vias (TGV) based 3D microstructures in glass substrate by a lithography-free process for MEMS applications [J]. *Applied Surface Science*, 2022, 584: 152494.
- [10] 顾真安, 同继锋, 崔源声, 等. 建材非金属矿产资源强国战略研究 [J]. *中国工程科学*, 2019, 21(1): 104–112.
Gu Z A, Tong J F, Cui Y S, et al. Strategic research on nonmetallic mineral resources for building materials in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2019, 21(1): 104–112.