

# 玻璃纤维应用的现状与未来潜力探索

丁欢 李涵

重庆市计量质量检测研究院, 重庆 401123

**摘要:** 玻璃纤维作为关键增强材料, 在国家战略新兴产业中扮演着重要角色。系统概述了玻璃纤维的分类、特性及应用现状, 重点分析了行业最新动态与发展趋势。指出, 基于成分设计与工艺创新, 玻璃纤维正向高性能化、多功能化和绿色化方向快速发展, 尤其在低介电、高强高模等特种纤维领域取得了显著突破。未来, 行业将更加聚焦技术迭代与高端应用场景的深度绑定, 为复合材料产业提供关键支撑。

**关键词:** 玻璃纤维; 复合材料; 应用技术; 研究进展

中图分类号: TQ 171

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2026)02-0022-06

## Exploring the current status and future potential of glass fiber applications

Ding Huan, Li Han

Chongqing Academy of Metrology and Quality Inspection, Chongqing 401123, China

**Abstract:** Glass fiber, as a key reinforcement material, plays a significant role in national strategic emerging industries. The classification, characteristics, and current application status of glass fiber were systematically summarized, with a focus on analyzing the latest industry trends and development. It was noted that through component design and process innovation, glass fiber was rapidly developing towards high performance, multifunctionality, greenification, and significant breakthroughs were particularly achieved in specialty fiber areas such as low dielectric, high strength, and high modulus. In the future, the industry will focus more on deep integration of technological iteration with high-end application scenarios, providing crucial support for the composite materials industry.

**Keywords:** glass fiber; composite material; applied technology; research progress

玻璃纤维由美国欧文斯科宁公司于1938年率先实现工业化生产。中国玻璃纤维行业起步相对较晚, 但近年在“双碳”战略的引领下, 凭借新能源汽车、节能建筑、电子电器、风电等行业对玻璃纤维需

求的持续增长, 实现了“后发先至”的跨越式发展。2007年, 中国玻璃纤维产能已跃居世界第一。至2023年, 全国玻纤纱总产量进一步提升至723.0万t, 其中高性能及特种纱产量达9.8万t, 出口量为

收稿日期: 2025-07-28

作者简介: 丁欢, 女, 1988年生, 高级工程师, 主要从事纺织及皮革产品的研究和检验工作, zhiyunjia@yeah.net

179.7 万 t,产业规模与综合竞争力稳居全球首位。2024 年,中国玻纤及制品直接出口量增至 202.0 万 t,约占国内总产量的 26.7%。2025 年上半年,受风电、电子等行业需求拉动,玻璃纤维行业呈现明显回暖态势,龙头企业市场优势进一步扩大<sup>[1]</sup>。

当前,中国玻纤行业正加速向智能化、绿色化、复合化方向转型升级。在智能制造方面,通过引入数字孪生、AI 质检、全流程制造执行系统(MES)等先进技术,对传统窑炉与拉丝工艺进行改造,有效提升了生产效率和产品一致性。在材料创新方面,积极推进玻纤与碳纤维、生物基树脂、气凝胶等新材料的多维复合,设计出更轻量化、更高强度、更低碳排放的新型解决方案,逐步实现了对钢、木、石等传统材料的替代,为国家战略性新兴产业和经济高质量转型提供了关键支撑。

## 1 玻璃纤维的分类与特性

玻璃纤维有多种分类依据,但按玻璃成分中碱金属氧化物质量分数分类是目前最科学且普遍的方法。碱金属氧化物(主要指氧化钠和氧化钾)作为助熔剂,能将二氧化硅的熔点从 1 700 °C 降低到 1 000 °C 左右,能源成本显著降低。然而,碱金属氧化物质量分数升高,玻璃的化学稳定性、电绝缘性能和强度均会降低。依据不同应用场景的性能需求,玻璃纤维可分为以下几种主要类型:无碱玻璃纤维(E 玻纤,E-glass)、中碱玻璃纤维(C 玻纤,C-glass)、高碱玻璃纤维(A 玻纤,A-glass)及高性能玻璃纤维(high-performance glass fiber)。表 1 详述了 4 种类型玻璃纤维的基本特性和市场应用情况<sup>[2-3]</sup>。

表 1 4 种类型玻璃纤维的基本特性和市场应用

Tab. 1 Basic characteristics and market applications of four types of glass fibers

特性维度	无碱玻璃纤维	中碱玻璃纤维	高碱玻璃纤维	高性能玻璃纤维
化学组成	铝硼硅酸盐玻璃,碱金属氧化物质量分数<0.8%	钠钙硅酸盐玻璃,碱金属氧化物质量分数 11.6%~12.4%	钠钙硅酸盐玻璃,碱金属氧化物质量分数≥15.0%	成分多样,可根据性能要求调整(如高锆、无硼、高强等)
主要特性	电绝缘性极佳、力学强度高、耐水性好、化学稳定性好	耐酸性优异、价格较低	成本最低、强度低、化学稳定性和耐水性差	专有特性突出(如耐腐蚀、高强高模、低介电、耐碱等)
关键优势	通用型增强材料,综合性能最佳,应用最广泛	对酸性介质有良好的抵抗能力	原料成本低,熔点低	针对特定苛刻环境,性能远超普通玻璃纤维
主要劣势	易被无机酸腐蚀,硼元素可能对环境有影响	电绝缘性差,力学强度比 E 玻纤低 10%~20%	耐水性差,易析碱,强度低,应用受限	生产成本高昂,工艺复杂,多用于高端领域
典型应用	印刷电路板(PCB)、风电叶片、汽车轻量化部件、体育器材、航空航天复合材料	耐酸滤材、防腐格栅、表面毡、电池隔板等防腐领域	仅用于低档隔热、防水材料(如沥青基卷材)	E-CR 玻纤(化工防腐管道、储罐);AR 玻纤(水泥增强建材);S/R 玻纤(航空航天、军工);D 玻纤(高速电路板)
市场占比	主流产品,占全球玻璃纤维产量的 90.0%以上	占比较小,用于特定领域	已基本被淘汰,产量极少	占比小(<5.0%),但增长快,附加值高

注:E-CR 玻纤指无碱耐腐蚀玻璃纤维,AR 玻纤指耐碱玻璃纤维,S/R 玻纤指高强玻璃纤维,D 玻纤指低介电玻璃纤维。

### 1.1 无碱玻璃纤维

无碱玻璃纤维是一种铝硼硅酸盐玻璃,其碱金属氧化物质量分数<0.8%。该类玻璃属于难熔型玻璃,其质量要求接近光学玻璃水平,生产工艺难度较高,目前已有多种成熟的国家标准配方(表 2)。E 玻纤电绝缘性优异、力学强度高、耐高温和耐候性好、质量轻、绝缘强度高、介电常数和导热系数低、化学稳定性良好且抗疲劳;主要缺点是不耐无机酸,这限制了其在酸性环境中的应用。E 玻纤广泛应用于电子电气、交通轻量

化、新能源、电力设备、建筑建材、工业与消费品等领域。随着 5G 通信、人工智能服务器、消费电子等产业的快速发展,高频高速 PCB 及先进封装基板对材料性能提出了更高要求,进而推动了低介电常数和低热膨胀系数等特种 E 玻纤的开发。

作为一种重要的高性能无机非金属材料,无碱玻璃纤维凭借卓越的电绝缘性、高力学强度以及良好的化学与热稳定性,在现代工业中扮演着重要角色。肖守讷等<sup>[4]</sup>指出,玻璃纤维复合材料因技术成

表 2 无碱玻璃纤维化学成分(质量分数)

Tab. 2 Chemical composition of E-glass (mass fraction)

单位: %

品名	产品代号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	R <sub>2</sub> O	T <sub>Fe</sub> (以 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 计)
无碱 1 号	E1	54.1±0.5	14.6±0.4	16.6±0.3	4.6±0.3	≤0.8	<0.50 (其中 FeO≤0.15)
无碱 2 号	E2	55.4±0.5	14.6±0.4	19.5±0.3	3.0±0.3		
无碱 3 号	E3	55.4±0.5	14.6±0.4	22.5±0.3 (其中 MgO<0.5)			

注: R<sub>2</sub>O 指碱金属氧化物; T<sub>Fe</sub> 指玻璃化学成分中总铁质量分数的简写, 它通常以三氧化二铁(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 的形式来表示和计算。

熟、经济、性能均衡等特点, 已成为轨道交通车辆大型构件(如车体、司机室)实现轻量化的关键材料。它能在保证结构刚强度和承载能力的同时有效降低车辆质量, 从而提升能效和运行速度。与碳纤维相比, 其成本优势显著, 在对极致性能要求不严的大型结构中应用广泛; 与金属材料相比, 其具备耐腐蚀、绝缘、抗冲击和设计灵活等优势。在阻燃性能提升方面, Yin 等<sup>[5]</sup>以 9, 10-二氢-9-氧杂-10-磷杂菲-10-氧化物(DOPO) 衍生酸与 1-乙烯基咪唑(VI) 为原料, 通过中和反应合成了含 DOPO 的 1-乙烯基咪唑盐(VIDOP), 用于制备本征阻燃乙烯基树脂(VER) 及其 E 玻纤复合材料。研究显示, 当引入质量分数为 25.0% 的 VIDOP 时, VER 及其 E 玻纤复合材料防火等级可达 UL 94 V-0 级别, 极限氧指数(LOI) 分别提高至 32.2% 和 38.3%。与纯 VER 相比在锥形量热测试中, 改性后的 VER 及其 E 玻纤复合材料热释放峰值分别降低 52.4% 和 31.4%, 总烟释放量分别降低 22.2% 和 10.9%。同时, E 玻纤复合材料的弯曲强度、冲击强度和层间剪切强度分别提升了 11%、27% 和 30%。吴海宏等<sup>[6]</sup>在系统分析玻璃纤维增强树脂透明复合材料的设计原则后, 采用无碱玻纤展纱单向织物、展纱平纹织物、常规网格布和电子布等 4 种不同构型的玻璃纤维织物作为增强体, 经预浸料制备及热压固化工艺后成功制得环氧树脂基透明复合材料。研究揭示了纤维织物构型对材料光学透明性影响显著。进一步地, 该研究将高透明性特征拓展至电磁波领域, 并研制出了透明

阵列格栅微波复合材料。该材料透波与吸波性能优异(透波率>98%, 反射率<-8 dB), 为航空航天、通信与军事等领域的高性能电磁功能器件(如雷达罩、电磁窗与隐身材料) 提供了新的选择材料与思路。

在先进封装领域, 中国科学院合肥物质科学研究院团队针对高密度、轻量化与小型化需求, 攻克了高均一性无碱玻璃微孔阵列制造、玻璃致密回流及微孔金属高致密填充等关键技术, 开发出面向 3D 先进封装的玻璃金属穿孔(TGV) 工艺。由该工艺制备的玻璃金属穿孔晶圆具备高均一性、高致密性和高深宽比特性, 并展现出优良的电学、热学与力学性能, 具备超低漏率和超低信号损耗优势。该技术是下一代 5G/6G 高频芯片(如环形谐振器、波导缝隙天线、毫米波天线) 3D 封装的优选方案, 也适用于微机电系统(MEMS) 陀螺仪、加速度计等高端传感器的 3D 封装, 在半导体先进封装、射频芯片封装、MEMS 传感器制造及玻璃基微流控芯片等多个领域具有广阔应用前景<sup>[7]</sup>。

### 1.2 中碱玻璃纤维

中碱玻璃纤维是一种钠钙硅酸盐玻璃, 根据国家标准, 其碱金属氧化物质量分数规定在 11.6%~12.4%, 具体化学成分见表 3。由于含碱量较高, 该类玻璃纤维不适用于电绝缘领域, 其化学稳定性较好, 尤其在耐酸性方面优于 E 玻纤, 不过对碱性环境的耐受性较弱, 力学强度较 E 玻纤低 10%~20%。

表 3 中碱玻璃纤维化学成分(质量分数)

Tab. 3 Chemical composition of C-glass (mass fraction)

单位: %

SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	R <sub>2</sub> O	T <sub>Fe</sub> (以 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 计)
67.0±0.5	—	6.2±0.4	9.5±0.3	4.2±0.3	11.6~12.4 (其中 K <sub>2</sub> O≤0.5)	≤0.40 (其中 FeO≤0.15)

20 世纪 80 至 90 年代,中国玻璃纤维行业整体技术水平较低,产能结构以中碱玻璃纤维为主,其占比高达 60.0%。当时主要采用坩埚法拉丝工艺生产,能耗高、效率低,产品一致性差,行业倾向于“小、

散、弱”的发展趋势,产品应用见表 4。受限于性能,中碱玻璃纤维多用于建筑保温网格布、化工防腐蚀包扎布、普通玻璃钢及防水卷材等中低端领域,无法满足电子电气、航空航天等高端应用领域的需求。

表 4 中碱玻璃纤维在 20 世纪 80—90 年代的主要应用场景

Tab. 4 The main application areas of C-glass in the 1980s and 1990s

应用场景	具体用途
建筑与外墙保温	网格布用于抹灰层、石膏板接缝、防水卷材胎基及外墙抗裂网
酸腐蚀环境	实验室滤酸布、化工管道包扎布、酸性废气除尘袋
普通玻璃钢 (FRP)	冷却塔、小船艇、农用贮罐、常温管道等对电性能和强度要求不高的制品
屋面与防水材料	增强沥青油毡、苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物 (SBS) 卷材胎基、聚氯乙烯 (PVC) 涂层织物骨架等
早期玻璃纤维增强混凝土 (GRC) 制品	轻质墙板、通风道等 (后因水泥碱侵蚀问题被逐渐淘汰)

中碱玻璃纤维用量持续下降的核心原因在于其性能短板日益凸显,且传统性价比优势逐步丧失。具体包括:耐久性不足,尤其在潮湿或碱性环境中力学性能衰减快;力学强度、电绝缘性等关键指标全面落后于无碱玻璃纤维;国家政策限制,其池窑法拉丝生产线被列为限制类项目<sup>[8]</sup>;市场需求结构变化,传统建筑市场需求收缩,风电、新能源汽车、5G 通信等高端领域多采用高性能纤维;无碱玻璃纤维成本下降及替代材料涌现,市场空间进一步被挤压。

目前,中碱玻璃纤维在国内产量中的占比已低于 15.0%<sup>[9]</sup>,且呈持续下滑趋势,仅应用于低端防水、酸过滤及临时性玻璃钢制品等边缘应用场景,整体处于被淘汰阶段。未来,其发展将向高端化与专业化转型,如开发耐腐蚀、低介电等特种型号产品,并面临绿色生产、能耗双控和行业整合的压力。预计年产 8 万 t 以下的生产线将被削减,优势资源将进一步向头部企业集中。

### 1.3 高碱玻璃纤维

高碱玻璃纤维是一种碱金属氧化物 ( $R_2O$ ) 质量分数不低于 15.0% 的钠钙硅酸盐玻璃纤维。其因力学强度低、耐水性差等固有缺陷而在主流应用场景中被逐渐淘汰。早期, A 玻纤曾用于生产玻璃纤维薄毡、玻璃棉等产品,应用范畴涵盖蓄电池隔离片、管道包扎布及防水毡片等对性能要求相对较低的领域。与 E 玻纤和 C 玻纤相比, A 玻纤的力学性能显著偏低,且耐水侵蚀能力极差,在潮湿环境中易发生水解反应导致强度急剧下降,严重影响制品耐

久性。随着行业技术标准的提升,特别是陶土坩埚拉丝工艺生产的“陶土玻璃纤维”因品质低劣且污染严重,已被国家明令淘汰。

高碱玻璃纤维过去主要应用于 2 个“主战场”。第一个为低端保温/吸声材料。20 世纪 70—80 年代,部分小厂将碎玻璃熔融吹成玻璃棉,用于临时建筑、管道包扎等一次性保温场景,价格为无碱玻璃棉的 60% 左右。另一个为低档墙体网格布与沥青油毡胎基。它们在对强度、耐碱性要求不高的农村自建房抹灰层和单层沥青油毡中曾被大量使用。其被淘汰的核心原因包括:政策明令淘汰,2012 年《玻璃纤维行业准入条件》将高碱玻璃纤维列为淘汰类产品,2021 年起严禁新建废玻璃拉丝产能;性能缺陷突出,耐水、耐碱性极差,在水泥基体中 3 个月就可能粉化,力学强度比无碱玻璃纤维低 25%~30%;环保成本劣势,生产过程中重金属杂质多,纤维渣属于危险废物,处置成本高,加之无碱玻璃纤维成本持续下降,使高碱玻璃纤维失去价格优势<sup>[8,10]</sup>。

### 1.4 高性能玻璃纤维

高性能玻璃纤维对玻璃组分与工艺进行协同设计,最终在力学强度、弹性模量、耐高温性、耐化学腐蚀性、介电性能等关键指标上显著优于传统 E 玻纤。随着风电、航空航天、电子通信等高端应用领域对材料性能要求的不断提高,高性能玻璃纤维已成为战略新兴行业中不可或缺的关键基础材料。

#### 1.4.1 高强玻璃纤维

S-glass 以卓越的强度、模量和抗冲击性著称,

表 5 高性能玻璃纤维主要类型概览

Tab. 5 Overview of main types of high-performance glass fiber

名称	核心特点	主要优势	典型应用领域
高强玻璃纤维(S-glass)	极高的拉伸强度与耐温性	比强度高,抗疲劳性能优异	航空航天结构件、国防装备、高性能体育器材
高强高模玻璃纤维(R-glass)	高强度、高模量、优良耐疲劳性	刚性突出,形变小,综合性能平衡	航空结构件、高端工业部件、运动器材
高模量玻璃纤维(HME-glass)	极高的弹性模量	刚度极佳,适用于高刚性需求结构	风电叶片、高压管道、航空航天结构件
低介电玻璃纤维(D-glass)	极低的介电常数和介电损耗	高频信号传输损耗小,速度快	5G/6G 电路板、雷达罩、芯片封装、透波结构
无硼无氟无碱玻璃纤维(Advantex®)	耐酸性优异,成分环保	性能接近 E-glass,无硼氟污染	环保设施、化工防腐、交通运输、电气绝缘
耐碱玻璃纤维(AR-glass)	可抵抗水泥碱环境腐蚀	专用于水泥基复合材料,耐久性好	GRC 制品、建筑外墙、预制构件、地坪系统

其拉伸强度比 E-glass 提高 30%~40%,弹性模量提高 16%~20%,耐温性提高 100~150 °C<sup>[11]</sup>。这些特性使其成为航空航天、国防装备等高性能领域的优选材料。近年来,通过引入碳纳米管作为二级增强体,进一步提升了 S-glass/环氧树脂层压材料的层间韧性和抗分层能力,为航空航天和汽车工业应用提供了新的材料选择。

#### 1.4.2 高强高模玻璃纤维

R-glass 在强度、模量与耐热性方面实现了良好平衡,是许多高性能复合材料制品优选的增强纤维。与 S-glass 类似,R-glass 也表现出优异的耐疲劳特性,其增强复合材料的耐疲劳性能比 E-glass 增强复合材料提高近 10 倍。这种综合性能优势使得 R-glass 特别适用于追求轻量化、高刚性及耐久性的结构,如航空结构件、高端工业部件和运动器材<sup>[12]</sup>。

#### 1.4.3 高模量玻璃纤维

HME-glass 基于成分创新与工艺优化,实现了弹性模量的显著提升。例如,早期的 M2 高模量玻璃纤维(以 SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO 系统为基础,加入 CeO<sub>2</sub>、La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ZrO<sub>2</sub> 等提高模量),弹性模量达到 93 GPa,比 E-glass 提高约 30%。这类纤维是长尺寸风电叶片、耐腐蚀压力容器等的关键材料<sup>[13]</sup>。

在风电叶片大型化的趋势下,HME-glass 成为制造百米级风机叶片主梁的关键材料。国内企业如山东玻纤集团开发的“超高模风电纱”已被批量应用,其经超过 150 万次的疲劳测试后,仍能满足叶片对材料可靠性的苛刻要求。

市场研究数据显示,全球纤维增强热塑性塑料(FRTP)用高模量玻璃纤维市场预计将以 5.3% 的年复合增长率保持增长态势,至 2031 年市场规模预计达到 12.31 亿美元,这体现出该材料在风电、汽车轻量化等领域应用需求旺盛。

#### 1.4.4 低介电玻璃纤维

D-glass 具有极低的介电常数和介电损耗,是高频电子应用的理想材料。随着 5G/6G、人工智能计算和卫星通信技术的发展,其市场需求呈持续增长态势。国内龙头企业正积极推进相关产品的国产化与技术迭代。例如,云天化国际复材已开发出超低介电(LDK 二代)电子级玻璃纤维纱和布,能满足 6G 通信、AI 服务器及低轨卫星等高阶高速高频覆铜板的要求。

在政策支持方面,工业和信息化部等 6 个部门在《建材行业稳增长工作方案(2025—2026 年)》中明确提出,要推动低介电玻璃纤维制品在新型显示、集成电路等领域的应用。这为其发展提供了明确的政策指引,并拓展了市场空间。

#### 1.4.5 无硼无氟无碱玻璃纤维

Advantex® 在保持 E-glass 基本性能的基础上,通过去除硼、氟等有害成分,显著提升了自身的耐腐蚀性与环保效益。这一特性使其适配于苛刻工业环境和注重可持续性的应用场景,如环保设施(烟气脱硫系统)、化工防腐管道及交通运输等领域。

#### 1.4.6 耐碱玻璃纤维

AR-glass 通过特殊的成分设计能有效抵抗水

泥高碱环境,是玻璃纤维增强混凝土等水泥基材料实现轻质、高强、复杂造型的关键增强材料。这类纤维专门用于制造轻质墙板、建筑外墙挂板、预制构件等,能有效抵抗水泥水化产物的高碱环境,并维持长期耐久性,推动了现代建筑技术的发展。

高性能玻璃纤维通过针对性组成与工艺优化,满足了特定高端应用场景对材料性能的严苛要求。随着技术的持续进步与应用领域的逐步拓展,高性能玻璃纤维在推动产业升级与可持续发展方面将发挥越来越重要的作用。其未来发展趋势包括:风电叶片大型化带动高模量玻璃纤维的需求增长;5G/6G 通信技术推动低介电玻璃纤维创新;环保政策促进无硼无氟等环境友好型玻璃纤维发展;智能制造助力高性能玻璃纤维生产工艺优化。

高性能玻璃纤维作为新材料的重要组成部分,正引领复合材料行业向更高性能、更环保可持续发展的方向发展,为现代工业技术进步提供关键材料支撑。

## 2 结论与展望

本研究系统分析了玻璃纤维产业的现状与未来潜力。目前,中国玻璃纤维产业的规模全球领先,在需求拉动下发展态势持续向好。行业正加速向高性能化(高强高模、低介电等)、绿色化(环保配方、循环回收)和智能化(智能制造、数据赋能)这 3 大方向转型升级,发展动力从规模扩张转向与风电、电子、交通等高端应用领域的深度技术融合。

展望未来,行业机遇与挑战并存。行业的发展离不开风电叶片大型化、6G/人工智能、交通轻量化等高端应用领域不断增长的需求,驱动跨代技术创新。同时,绿色发展需贯穿全产业链,构建循环生态。智能制造与数据赋能将重塑研发、生产与服务模式,推动产业格局深刻变革。

综上所述,中国玻璃纤维行业正处于从“产量领先”向“技术引领”转变的关键阶段。唯有紧扣高性能化、绿色化、智能化主线,深化产业链协同创新,才能在全球化竞争中占据核心地位,为国家现代产业体系提供关键材料支撑。



期刊采编平台



中国知网下载

## 参考文献

- [ 1 ] 中国玻璃纤维工业协会. 中国玻璃纤维及制品行业 2023 年度发展报告[R]. 北京:中国玻璃纤维工业协会, 2024.
- [ 2 ] 我国特种玻璃纤维核心技术打破国外垄断[J]. 网印工业, 2020(10): 61.
- [ 3 ] SOMAIAH A, ANJANEYA PRASAD B, KISHORE NATH N. A comprehensive review: characterization of glass fiber reinforced polymer composites with fillers from a thermo-mechanical perspective [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 62: 3226-3232.
- [ 4 ] 肖守讷, 江兰馨, 蒋维, 等. 复合材料在轨道交通车辆中的应用与展望[J]. *交通运输工程学报*, 2021, 21(1): 154-176.
- [ 5 ] YIN Y Y, ZHAO Y Z, JIA X W, et al. Flame-retardant vinyl ester resins enabled by phosphorus-containing 1-vinylimidazole salts with different phosphorus oxidation states[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2025, 205: 79-88.
- [ 6 ] 吴海宏, 张竹青. 玻璃纤维织物构型对增强透明复合材料性能影响研究[J]. *玻璃纤维*, 2025(2): 12-18.
- [ 7 ] YU C, WU S C, ZHONG Y, et al. Application of through glass via (TGV) technology for sensors manufacturing and packaging [J]. *Sensors*, 2024, 24(1): 171.
- [ 8 ] 产业结构调整指导目录(2024 年本)[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2024, (7): 7-77.
- [ 9 ] 中经智盛研究院. 2025 年全球及中国中碱玻璃纤维行业头部企业市场占有率及排名调研报告[R]. 北京:中经智盛研究院, 2025: 1-114.
- [ 10 ] 张耀明, 李巨白, 姜肇中. 玻璃纤维与矿物棉全书[M]. 北京:化学工业出版社, 2001.
- [ 11 ] TSAI H J, LIN Y S, LIU C H, et al. Experimental study of crack diversion, bridging mechanisms and enhanced delamination strength by dispersed carbon nanotubes in glass fibers composite laminates [J]. *Materials & Design*, 2025, 258: 114594.

(下转第 34 页)