

· 综述 ·

界面工程策略赋能纤维增强树脂基复合材料研究进展

陈茗 史芷丞 陈凤翔* 徐卫林*

(武汉纺织大学 纺织新材料及先进加工全国重点实验室 武汉 430200)

摘要 纤维增强树脂基复合材料因其轻质高强、耐腐蚀性强、热稳定性与绝缘性高、可设计性与加工灵活等优势,已成为航空航天、国防军工、汽车和轨道交通、能源、基础设施等领域的关键材料.本综述首先从纤维的结构特点、性能优势和应用领域出发,系统总结了代表性高性能无机纤维和有机纤维的优势,通过分析其差异,凝练出共性问题,即高表面化学惰性所导致的与树脂界面相容性差.针对上述难题,本文探讨了界面调控机制及相应解决策略,综述了先进的界面处理技术及其国内外研究进展,并从新型树脂材料的开发、发展低成本和智能化制造技术、结构-功能一体化设计与应用、发展循环回收再利用新技术、人工智能与复合材料的深度耦合等几个方面展望了纤维增强树脂基复合材料未来的发展趋势,以期为推动该材料体系的进一步发展提供新思路.

关键词 高性能纤维, 界面调控策略, 纤维增强树脂基复合材料, 结构功能一体化

引用: 陈茗, 史芷丞, 陈凤翔, 徐卫林. 界面工程策略赋能纤维增强树脂基复合材料研究进展. 高分子学报, 2025, 56(12), 2246–2261

Citation: Chen, M.; Shi, Z. C.; Chen, F. X.; Xu, W. L. Interfacial engineering strategies empowering advanced fiber-reinforced polymer composites: a review. *Acta Polymerica Sinica*, 2025, 56(12), 2246–2261

纤维增强树脂基复合材料(fiber reinforced polymer composites, FRP)^[1]是指由纤维材料作为增强体,树脂材料(如聚酰亚胺^[2]、环氧树脂等,含量在35%以上)作为基体,通过层压、模压或挤压成型等工艺制成的高分子复合材料^[3].FRP材料集合了纤维与树脂的优异性能,不仅具有纤维材料高强度、高模量、耐高温等,还具有树脂材料固有的可加工性和韧性,是不可多得的兼具轻质高强、刚韧并存、耐腐蚀、热稳定和高绝缘、抗疲劳且可设计性与加工灵活的高性能功能材料^[4],广泛应用于航空航天、国防军工、汽车与轨道交通、能源、土木工程以及体育休闲等领域,是关乎国家安全的关键战略材料^[5–7].

常见的特种纤维包括高性能无机纤维,如碳

纤维^[8]、石英纤维、玄武岩纤维和高性能有机纤维,如芳纶纤维^[9]、超高分子量聚乙烯纤维等.除了少量的纤维通过编织成缆绳直接使用外,更多的特种纤维则是通过编织形成3D织物进而复合成FRP^[10].对于FRP而言,界面很大程度上决定其结构强度和功能性的实现.然而,纤维材料,尤其是高性能无机纤维和部分高性能有机纤维都表现出高的化学惰性,低的表面能,使增强体纤维与树脂基体在界面的物理/化学相容性差,导致纤维与基体之间的应力传递效率降低在长期负载或环境作用下易产生微裂纹扩展^[11],从而显著削弱复合材料的整体强度和刚度,最终导致材料整体性能退化^[12].为解决纤维增强材料与树脂基体的界面问题,研究人员开发了系列方法,包

高分子复合材料与自修复材料专辑; 2025-08-30收稿, 2025-10-11录用, 2025-11-28网络出版; 国家自然科学基金(基金号 52373058, 52573090, U21A2095)、湖北省中央引导地方专项(项目号 2025CSA001)和湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划(项目号 T2024010)资助.

*通信联系人, E-mail: fxchen_czx@wtu.edu.cn; weilin_xu@wtu.edu.cn

doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2025.25224; CSTR: 32057.14.GFZXB.2025.7495

括物理法，如臭氧处理^[14]、等离子体处理^[15]和化学法，如酸碱刻蚀^[16]、接枝改性^[15]、偶联剂处理^[13]等，通过引入活性基团，提升纤维表面的极性基团含量，增强纤维与树脂间的界面结合力，使其能够更有效地传递载荷，赋予复合材料更加优异的综合性能^[13-16]。

随着空天等新兴领域的快速发展，对材料性能提出越来越高的要求，如轻质高强、柔韧性、导电导热性能、多功能化、智能化，通过界面设计以及多级/多尺度增韧增强方法学创新实现

FRP的进一步高性能化和多功能化成为广大学者孜孜以求的目标^[17]。本文首先简要介绍了常见的高性能有机纤维和高性能无机纤维材料，凝练出共性问题：即界面相容性不足导致载荷传递受限与层间失效；基于其共性问题，综述了界面调控策略赋能纤维增强树脂基复合材料最新研究进展(图1)，并从专用树脂开发、低成本化和智能化制造、结构和功能一体化^[18,19]、回收与循环利用^[20,21]、AI与复合材料的深度耦合等方面对其未来发展趋势进行展望。

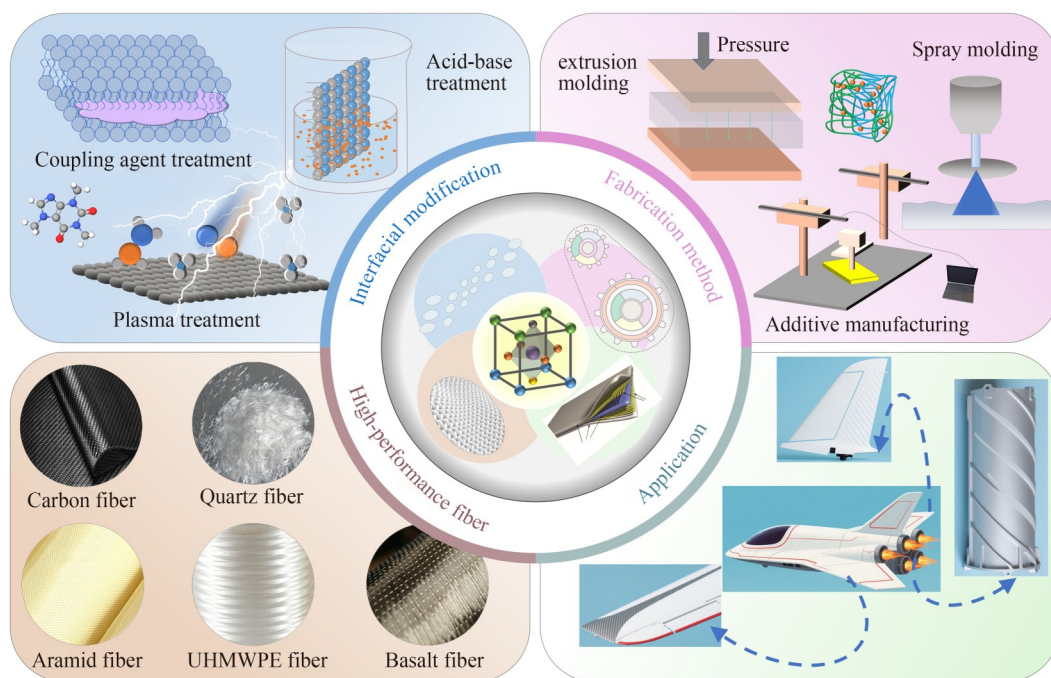


Fig. 1 Overview of the research on interface engineering strategies empowering fiber-reinforced resin matrix composites.

1 典型的高性能纤维材料

高性能纤维材料是指对外界的物理和化学作用具有特殊耐受能力的一类特种纤维，作为FRP的核心承载骨架，纤维材料的性能迭代直接推动了纤维增强树脂基复合材料从单纯的结构替代到复杂的功能增强，其演进始终与复合材料技术的创新交织共生，共同拓展了航空航天、建筑材料等领域的材料应用版图^[22]。

高性能纤维按化学组成可分为无机高性能纤维和有机高性能纤维^[23]，不同类型纤维的特殊结构，直接决定了其独特的性能和应用领域，因此，本小节将从纤维的结构特点、性能优势和应用领域出发，通过分析其差异，凝练出共性问题。

1.1 无机高性能纤维

无机高性能纤维主要包括碳纤维、玄武岩纤维、玻璃纤维、石英纤维、氧化铝纤维、氧化锆纤维、硼纤维、碳化硅纤维、硅硼氮纤维^[24]等，其核心特性包括高强高模、优异热稳定性^[25]及化学惰性，是极端环境的关键材料。其中，碳纤维、石英纤维和玄武岩纤维凭借其各自独特的结构和性能优势，占据着至关重要的战略地位，广泛应用于国防军工、航空航天及高端民用领域。

碳纤维(carbon fiber, CF)^[26]是由聚丙烯腈纤维、黏胶纤维、沥青纤维和木质素纤维等前驱体纤维在高温环境下裂解碳化形成的^[27]含碳量在95%以上且具有高比强度、高比模量、耐高温、耐腐蚀、抗疲劳等优异性能的纤维材料^[28]。作为先进复合材料最重要的增强体，它不仅具有碳材

料的各种优异性能,还具有纤维材料的柔软可加工性,广泛应用于航空航天、风力发电、汽车制造建筑工程、体育休闲等领域。

石英纤维(quartz fiber, QF)^[29]以超高纯度非晶态二氧化硅($\text{SiO}_2 > 99.95\%$)为主体,凭借三维无规网络结构赋予其耐高温($> 1200\text{ }^\circ\text{C}$)^[30]、近零热膨胀系数($0.54 \times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)^[31]、优异介电稳定性(介电常数3.78)^[32],是航空航天高温透波部件(雷达罩、天线窗)等不可替代的战略性增强材料。

玄武岩纤维(basalt fiber, BF)^[33]是以天然玄武岩矿石熔融拉丝制成,凭借微晶-玻璃态复合结构赋予其高耐腐蚀性(耐酸碱性 $> 95\%$)、优异力学性能(强度3000~4800 MPa)^[34]、低导热系数($0.03\sim 0.04\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)^[35]及环保特性,广泛应用于土木工程增强筋(替代钢筋)、船舶防腐涂层及高温过滤材料。

尽管碳纤维、石英纤维与玄武岩纤维等纤维共同构成了高性能无机纤维材料体系的核心支柱,但都面临着以下共性问题:

(1) 脆性大、柔韧性差、可编织性与加工难度大.虽然高性能无机纤维凭借其性能优势在空天等领域占据了一席之地,但其普遍存在高模量且低断裂伸长率的缺陷,在动态载荷或弯折条件下易脆断,使其在编制过程中出现大量的断头,极大地破坏纤维的完整性,不仅加工损耗率高,而且限制其在复合材料中优异性能的发挥。

(2) 高化学表面惰性.无机纤维最大的缺陷是高化学惰性表面使其表面能低,与有机树脂界面相容性差,在载荷环境下易出现分层或应力集中.例如,碳纤维表面惰性主要源于其类石墨层状结构,碳原子之间以稳定的 sp^2 杂化共价键形成键能高的六元环网状平面,表现出固有的化学惰性;石英纤维的微观三维网络结构是由 $\text{Si}-\text{O}$ 键结合在一起的,十分稳定而不易断裂,其表面主要的官能团是硅羟基和桥氧键,难以形成强力的化学键合;玄武岩纤维形成了以硅氧键和铝氧键为骨架的三维网络结构,且表面通常光滑致密,不易与外界物质发生反应,赋予其本征的化学惰性.因此,突破上述制约瓶颈,是提升无机纤维材料综合性能、拓展其高端应用的关键所在.为突破脆性断裂与界面弱结合的固有限制,必须从纤维表面特性调控与复合界面增强两方面协同入手,方能真正释放高性能纤维作为增强体

的全部潜能,推动纤维增强树脂基复合材料向更多功能、更广应用的方向持续发展.基于此,本文将围绕上述关键问题,重点探讨纤维表面改性及复合界面增强等协同创新策略赋能高性能纤维进一步高性能化和多功能化。

1.2 有机高性能纤维

有机高性能纤维主要包括芳纶纤维、超高分子量聚乙烯纤维、聚酰亚胺纤维等,其核心特性包括超高强度与模量、耐高温/阻燃及耐腐蚀、抗水解^[36],凭借其卓越的力学性能和独特的化学结构,成为轻量化防护与极端环境应用的关键材料。

芳纶纤维是20世纪人类材料史上最具跨时代意义的发明之一,又称“聚对苯二甲酰对苯二胺(*p*-phenylene terephthalamide, PPTA)”,由刚性棒状聚对苯二甲酰对苯二胺经液晶纺丝制成^[37,38],其高度取向的氢键网络与径向原纤结构^[39]赋予其超高比强度^[40]、抗冲击韧性(断裂能 $80\text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$)^[41]、优异的阻燃性及低热膨胀特性($-2 \times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)^[42],是防弹装甲(军用头盔)、航空航天部件(机舱隔板)等的核心材料。

超高分子量聚乙烯(ultrahigh molecular weight polyethylene, UHMWPE)纤维^[43]是继碳纤维和芳纶纤维之后的第三大工业化高性能纤维,100万以上的UHMWPE通过凝胶纺丝法制备而成,其高度取向(大分子取向 $> 95\%$)的伸直链结晶结构(结晶度 $> 85\%$)^[44]赋予其超高比强度($3.5\text{ GPa}\cdot\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$)^[45]、低吸水性($< 0.1\%$)及化学惰性(耐强酸碱)^[46],是防弹装甲(轻质插板)、深海系缆(耐腐蚀)及人工关节增强体的关键材料,且在热管理复合材料等新兴方向表现出巨大的潜力和应用前景。

聚酰亚胺纤维是主链含有亚酰胺环^[47]的聚合物经纺丝而成的具有高强高模、优异的热稳定性(长期使用温度 $> 300\text{ }^\circ\text{C}$)和耐低温性、良好的耐辐照性能、介电性能以及生物相容性的新型纤维材料^[2],由于用于合成聚酰亚胺的二酐(超过400种)和二胺(超过1000种)的种类很多,因此,目前已报道的具有不同结构的聚酰亚胺数目很多,性能相差很大,可基于应用需求设计具有不同结构的聚酰亚胺。

虽然有机高性能纤维材料易编织^[48],强度高,在个体防护、航天航空和交通汽车等领域应用

广泛,但也存在着较为明显的缺陷,例如,有机高性能纤维耐极端环境,尤其是空天环境性能差^[49]。众所周知,空天环境是一个复杂且极端的多场耦合系统,具体包括:极端温度场与剧烈热冲击、高能粒子与空间辐射、超高真空环境、复杂的力学场、特殊的化学环境。几乎所有的有机纤维都不耐原子氧,部分有机纤维,如芳纶则耐紫外辐照性能差。在上述极端环境中,有机高性能纤维极易因外界环境作用会快速的失效,进而影响航空航天器的正常运转。

此外,像无机纤维一样,部分有机纤维,如UHMWPE,聚四氟乙烯纤维也表面出高化学惰性,再加上其光滑的表面导致黏结性能弱,难以与树脂形成有效耦合。

为充分发挥有机纤维的综合性能优势,必须着力研究针对性的表面改性技术与界面增强方法。通过发展高效的纤维表面调控技术,改善其与树脂基体的界面相容性与黏结强度,为实现下一代高性能有机纤维树脂基复合材料的突破性应用奠定基础。

Table 1 Structural, performance and application of high-performance fiber.

		Structural feature	Core performance	Typical application	Ref.
Inorganic high-performance fibers	Carbon fiber	Pyrolysis and carbonization of polyacrylonitrile and pitch	High strength、modulus Corrosion and high-temperature resistance	Military ballistic protection Blast/impact-resistant components Lightweight Structures	[28]
	Quartz fiber	Ultra-high purity silica (SiO ₂) 3D random network structure	High-temperature resistance (>1200 °C) Near-zero thermal expansion (0.54×10 ⁻⁶ °C) Excellent dielectric stability (ε=3.78)	High-temperature wave-transparent component Heat-resistant component	[30–32]
	Basalt fiber	microcrystal-glassy composite structure	high corrosion resistance (acid and alkali resistance >95%) strength of 3000~4800 MPa low thermal conductivity (0.03~0.04 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Building reinforcement material Building flame-retardant material	[34,35]
Organic high-performance fibers	Aramid fiber	Highly oriented hydrogen bond network Radial fibril structure	Ultra-high specific strength Impact resistance toughness flame retardancy	Electrical insulation Heat insulation and sound absorption	[39–40, 42]
	UHMWPE fiber	highly oriented extended-chain crystalline structure	Ultra-high specific strength (3.5 GPa·cm ³ ·g ⁻¹) Low water absorption (<0.1%) chemical inertness	Lightweight thermal management High chemical resistance	[45,46]
	Polyimide fiber	Stable imide ring structure	Thermal stability (long-term service temperature >300 °C) Radiation resistance	Flame retardancy and protection Industrial high-temperature filtration	[47]

2 纤维表面调控机理和方法

纤维-树脂界面作为复合材料性能的薄弱环节,其失效行为直接影响整体材料的力学性能。纤维表面活化是提升复合材料界面性能的核心策略,其本质在于通过重构纤维-树脂的界面结合方式^[50]。当前主流调控机理聚焦4大核心理论:

浸润性理论通过调控表面能降低树脂接触角,保障充分铺展;吸附理论借助范德华力与氢键实现物理锚固;化学键合理论依靠共价/离子键构建强相互作用网络;过渡层理论则通过梯度模量缓解二者表面差异。

2.1 浸润性理论

树脂基体与纤维增强体结合时需实现充分浸

润,即树脂完全覆盖纤维表面以构建连续应力传递路径.浸润程度通常采用接触角进行表征,接触角越小,浸润性越好;若浸润不充分,界面处将产生空隙等缺陷,会显著削弱复合材料综合性能^[51,52].根据 Young-Wenzel 模型可知,可以通过增大纤维表面粗糙度来提升比表面积,通过毛细作用促进树脂铺展,从而改善浸润效果^[52,53].

2.2 吸附理论

吸附理论阐释的是非共价键协同作用机制.吸附理论认为,纤维增强体与树脂基体的界面结合不仅仅依赖化学键合,非共价相互作用同样重要,范德华力、氢键与静电作用等弱相互作用可通过协同效应,增强界面黏结强度,其贡献占比可达总结合能的30%~50%^[54].该机制有效弥补了纯化学键合界面脆性高、耐久性差的缺陷.Li等使“砖泥”结构界面相复合材料在湿热老化条件70天后仍保留92.8%以上原始强度,由于其界面湿润性提高、附着力增强,显著提升了高温耐久性,优于单一化学键合体系(保留率<60%)^[55].因此,是设计兼具高黏结强度、优异韧性与长期环境耐久性复合材料界面的关键科学基础.

2.3 化学键合理论

化学键合理论的核心在于:当树脂基体与纤维增强体表面的活性官能团(如羟基、氨基)可直接反应时,界面通过共价键实现结合;若二者官能团无法反应,则需引入双官能团偶联剂作为“分子桥”,其一端与增强体成键,另一端与树脂基体连接^[56,57].但该理论存在局限性,即偶联剂处理会降低纤维表面能.Hu等^[58]研究各种偶联剂对玻璃纤维表面自由能的影响,经硅烷偶联剂处理后,玻璃纤维的表面能下降.然而,材料表面高表面能通常表现出良好的浸润性,有利于改善材料与树脂的物理/化学相容性.化学键理论与实际情况的矛盾反映了单一理论的不足,未来需进一步结合浸润-化学键协同模型改善界面条件.

2.4 过渡层理论

过渡层理论指出:在纤维增强体(高模量)与树脂基体(低模量)之间构建模量梯度界面层,如化学镀过渡层,可有效协调二者刚度差异,缓解界面应力集中.Hua等^[59]在碳纤维表面化学镀镍使界面韧性提升150%(临界能量释放率从80 J·m⁻²增至200 J·m⁻²).上述化学镀金属镀层进一步证实了构建界面过渡层对缓解应力集中的有效性.为

了实现对界面层结构与性能更精确的调控,有研究者进一步探索了有机-无机杂化过渡层设计.Zhou等^[60]通过在碳纤维表面原位生长不同粒径的氨基功能化金属有机骨架材料,构建具有不同厚度(500、800、1100和1600 nm)界面过渡层,改性的复合材料的界面剪切、层间剪切和弯曲性能分别提高了115.0%、18.7%和26.7%,应力集中度分别降低了16.7%、33.3%、58.3%和66.7%.由此可见,无论是传统的金属镀层还是新兴的金属-有机框架(metal-organic framework, MOF)杂化层,其核心目的均在于通过构建梯度界面相,优化应力传递路径,提升复合材料的界面韧性、剪切性能并降低应力集中.

综上,纤维表面调控的4大理论(浸润性、吸附、化学键合与过渡层)分别从能量匹配、弱相互作用、强键合构建及模量缓冲维度等4个方面,为提升纤维增强树脂基复合材料的界面性能提供了坚实的理论基础和多元化的解决方案.然而,单一理论往往存在局限性(如化学键合可能降低浸润性),实际应用中需根据纤维-树脂体系的特性,灵活组合并协同运用这些理论,如构建兼具良好浸润性、强化学键合与模量梯度的界面相,方能实现界面黏结强度、韧性与耐久性的综合提升,为高性能复合材料的应用提供关键支撑.

3 纤维表面处理方法

基于浸润性、吸附、化学键合及过渡层等界面调控理论,纤维表面活化已成为破解复合材料界面弱结合难题的核心手段,其目标在于定向调控纤维表面特性,以此提升界面浸润性、化学活性与机械互锁效应,最终实现界面粘结强度、韧性与耐久性的综合优化^[61].当前主流方法围绕物理活化、化学修饰及微纳结构3个维度展开.因此,本部分将系统解析主流表面活化技术的反应机制、典型应用成效及其适配的纤维-树脂体系场景,以期指导高性能纤维增强树脂基复合材料界面设计.

3.1 等离子体处理

等离子体处理方法是利用等离子体中的高活性粒子,在纤维表面引发物理刻蚀与化学改性,形成活化基团,实现“表面活化且不损伤本体”的作用.Jiang等^[62]利用等离子气相处理芳纶纤维3 min后,其表面张力提高了37%,达

到 63.2 mN/m, 极性分数由 58% 提升至 67.2%, 经处理后的纤维单丝强度并没有明显变化, 证明等离子处理不影响纤维本征机械性能. 除了芳纶纤维外, 等离子体处理对无机玄武岩纤维的界面改性同样成效显著. Kurniawan 等^[63]采用等离子体表面处理玄武岩纤维, 发现随着等离子体处理时间延长, BF 表面趋于光滑. 随后将其与聚乳酸 (poly(lactic acid), PLA) 进行复合, 通过对其复合材料的 DSC 数据分析得知: 处理后的 BF/PLA 复合材料的熔融温度的变化趋势与复合材料的力学性能的变化一致, 说明 BF/PLA 复合材料的力学性能主要受 BF 和 PLA 基体之间界面状态的影响, 等离子处理可显著改善 BF 与 PLA 的界面相容性. 所制备的复合材料强度和刚度与未经等离子体处理的复合材料相比分别增加了 45% 和 18%, 显著提升了 BF/PLA 复合材料的综合机械性能. 进一步地, Xiao 等^[64]采用大气等离子体处理 PAN 基碳纤维, 等离子体处理后 CFs 的表面形貌并没有明显的变化, 所制备的复合材料的层间剪切强度 (interlaminar shear strength, ILSS) 从 64.9 MPa 提高到 80.0 MPa. 尽管等离子体处理是一种普适性强、效果显著且高效的纤维表面活化技术, 能有效提升高性能纤维表面自由能和极性, 显著改善其与不同树脂的界面相容性与结合强度, 但依旧面临着能耗高, 难以精准调控纤维界面, 最主要的是其时效性受限.

3.2 酸碱刻蚀

与等离子体利用气相活性粒子对材料表面活化不同, 酸碱刻蚀法则是通过可控的化学溶解, 在纤维表面构建微米级沟槽与纳米孔洞, 以提升比表面积, 增强机械互锁效应, 进而改善纤维增强体与树脂间界面相容性. Galvantto 等^[65]和 Cao 等^[66]将 UHMWPE 纤维用铬酸进行处理, 然后使 PE/甲苯复合溶液在纤维表面进行结晶, 处理后的样品再使用环氧树脂进行复合. 结果表明, 酸碱刻蚀并未改变纤维的本征机械性能, 且可有效提高纤维与树脂的界面粘结性能. 酸碱刻蚀处理对无机纤维体系也具有同样的效果. Lee 等^[67]将 H₂SO₄ 或 KOH 溶液对玄武岩纤维表面进行处理, 再将酸碱刻蚀后的玄武岩纤维和环氧树脂复合成复合材料. 从 AFM 图像可看出, 在合适浓度下, 酸碱处理可以有效增加纤维表面的粗糙结构, H₂SO₄ 处理后的样品的 ILSS 最高可达 62 MPa,

KOH 处理后最高可达 52 MPa. 然而在高浓度下, 过度的腐蚀会导致表面剥离, 影响表面粗糙程度, 且牺牲纤维原有的力学性能. 虽然酸碱刻蚀作为一种普适的表面改性技术, 能有效在多种纤维 (如 UHMWPE、玄武岩) 表面构建增强机械互锁的微纳结构, 显著提升其与树脂基体的界面粘结性能, 但其很难精确控制刻蚀程度, 极易损伤纤维本体, 且刻蚀环境具有一定的风险. 从经济性角度看, 酸碱刻蚀法虽试剂成本相对较低, 但工艺过程中需精确控制浓度、温度与时间, 且对设备耐腐蚀性要求高, 增加了维护成本. 在环境安全方面, 使用大量强酸、强碱及重金属试剂 (如铬酸), 易产生高腐蚀性、高毒性废液, 后续处理难度大、成本高昂, 若处置不当会对环境及人员安全构成威胁, 与绿色化工和可持续发展要求存在较大差距.

3.3 化学接枝改性

相较于酸碱刻蚀调控纤维的表面形貌, 接枝改性则是通过化学或物理手段在纤维表面定向引入功能性分子链或基团, 构建具有强极性界面, 以精准调控其界面性能 (如润湿性、粘附性、生物活性等). Li 等^[68]通过空气辅助热预处理和溶液浸渍, 对对位芳纶纤维 (aramid fiber, AFs) 表面进行接枝缩水甘油 (polyhedral oligomeric silsesquioxane, POSS), 制备得改性的芳纶纤维. 当纤维表面嵌入 5 wt% POSS 后, 改性 AF 表现出最佳的拉伸强度, 其拉伸强度从 23.8 cN/dtex 提高到 25.8 cN/dtex, 平均抗拉强度从 23.8 MPa 下降到 22.7 MPa (下降了 4.6%); 纤维表面接枝层厚度在 30~40 nm 时, 剪切强度 (interfacial shear strength, IFSS) 提高了 62.55% 至 26.22 MPa, 为芳纶纤维增强环氧树脂复合材料的界面改性提供了一种可行的策略. 除在有机芳纶纤维表面接枝 POSS 外, 通过化学接枝在无机碳纤维表面引入特定官能团同样是提升界面性能的有效途径. Li 等^[69]通过电化学手段用 *N*-β-氨基乙基-γ-氨基丙基三甲氧基硅烷偶联剂 (KH-792) 对碳纤维进行接枝. 通电情况下, 碳纤维表面被氧化和刻蚀, 引入大量的活性官能团 (-NH₂、-OH), 而 KH-792 被水解活化形成长链大分子, 在电场作用下与碳纤维表面的基团反应. 当电流密度低于 3 mA/cm² 时, 电流激发下 KH-792 的水解活化量太少, 不利于接枝; 当电流密度超过 3 mA/cm² 时, CF 表面发

生过度氧化,大量羟基转化为羰基和羧基,不利于碳纤维与KH-792的接枝反应.接枝后,CF表面的O/C、Si/C和N/C含量显著增加,在不影响其力学性能的情况下显著提高了碳纤维的亲水性.由于改性后的CF表面富集了大量的活性氢原子,可以与环氧树脂内的环氧基团发生开环反应,显著增强CF与环氧树脂界面之间的结合强度,其IFSS较未处理状态提高了56%.上述研究充分证明,接枝改性通过在纤维表面精准构筑活性官能团,能有效提升纤维亲水性并建立与树脂基体的强化学键合网络,从而实现IFSS的显著跃升,是提升复合材料界面结合强度的核心化学策略.值得注意的是,接枝改性通常涉及专用试剂,且对生产设备、反应条件(如温度、电场、气氛)的控制要求极为严格,导致其工艺成本和设备投资显著高于其他方法,且接枝工艺和反应路径复杂且不可控,很难规模化应用.

3.4 偶联剂涂层处理

作为构建纤维-树脂间“分子桥”的另一重要化学手段,偶联剂涂层则通过预先合成的双官能团分子以在纤维表面形成高效连接层,进而提升湿热环境下的界面耐久性.偶联剂涂层处理是利用偶联剂的双功能分子结构(如硅烷Y-R-SiX₃)在纤维与树脂间构建“分子桥”,即偶联剂的X端水解键合无机表面,Y端与树脂共价交联,通过这种策略可显著提升界面黏结强度及湿热耐久性.Dogan等^[70]使用3种不同的硅烷偶联剂,(3-氨基丙基)三乙氧基硅烷(AP)、(3-缩水甘油氧基丙基)三甲氧基硅烷(GP)和(3-三甲氧基甲硅烷基)甲基丙烯酸丙酯(MA)对玄武岩纤维表面进行改性,研究BF增强聚丁二酸酯(PBT)复合材料的拉伸、弯曲、冲击和热力学性能.由于偶联剂提高了纤维与基体之间的界面附着力,使得复合材料的机械性能都得到了提升,AP、GP和MA改性的玄武岩纤维增强复合材料的弯曲强度分别提高了约5%、12%和3%,且硅烷偶联剂的有效性GP>AP>MA.Yu等^[71]选择2种类型的反应性烷氧基硅烷对玄武岩纤维进行改性处理,并用于增强PA66.与纯PA66相比,经过硅烷化处理的玄武岩纤维增强PA66复合材料的杨氏模量约为4.36 GPa,抗拉强度约为115~117 MPa,抗弯强度约为148.21 MPa.尽管偶联剂涂层处理能通过简便高效的“分子桥”机制(如硅烷类)提升复合材料

界面粘结强度和刚度,并有效改善湿热环境下的界面耐久性,但其效果受偶联剂类型及其与树脂反应活性的显著影响.从经济性角度来看,偶联剂涂层处理工艺相对简单,操作条件温和,无需复杂昂贵的设备,虽然部分专用或高纯度硅烷试剂成本较高,但试剂用量较少,有助于降低初始投资和单体处理成本.在环境安全方面,尽管该工艺通常在室温或较低温度下进行,能耗相对较低,但许多硅烷偶联剂本身具有一定的挥发性和生物毒性,其水解和缩合过程可能释放醇类等挥发性有机物(VOCs),存在吸入暴露和环境污染的风险,因此需在密闭或通风良好的系统中操作,并对废液进行妥善处理.

3.5 纳米材料沉积

相较于等离子体处理和化学接枝从分子水平上提高纤维表面活性基团比例进而改善复合材料界面活性,纳米材料策略则是通过物理/化学方法(如溶胶-凝胶、电泳、喷涂、磁控溅射等)等方法将纳米粒子附着于基体表面,形成纳米级粗糙结构或功能薄膜,利用机械互锁与表面效应协同提升复合材料耐磨性、电磁屏蔽性或催化活性.Li等^[72]利用芳纶纳米纤维溶液(ANF)分别处理AF织物和CF织物,再将改性后的织物与环氧树脂聚合固化制备复合层压板,改性后的AF表面粗糙度由56.7 nm增加到80.2 nm,表面自由能则由36.0 mJ·m⁻²提升至38.2 mJ·m⁻²,而CF的表面自由能由32.7 mJ·m⁻²增加至37.4 mJ·m⁻²,表面粗糙度则从74.3 nm减少到63.4 nm,这是由于CF表面沟槽被纳米纤维填充,使其深度和粗糙度降低.AF增强树脂基复合材料的ILSS和I型断裂韧性分别增加到41.6 MPa和800 J·m⁻²,而CF增强树脂基复合材料则分别增加到57.5 MPa和686 J·m⁻²,显示出优异的界面黏附性.除了使用ANF纳米纤维进行改性,采用碳纳米管(CNT)构建纳米复合涂层也是一种有效提升纤维单壁或多壁的碳纳米管混合制备复合涂层,用于耐碱玻璃纤维(ARG)和E-玻璃纤维表面改性,由于碳纳米管界面增韧机制,纳米复合涂层使得纤维和基体间界面结合力增强,该复合涂层导致纤维强度、腐蚀抗性和界面性能得到有效改善^[73].

相较于传统的CNT和石墨烯,纤维素纳米晶体(CNC)凭借其可再生、生物相容、高比强度且表面富含可修饰羟基等独特优势,成为极具吸

引力的绿色纳米增强体, 为打造高性能且可持续的复合材料界面提供了新的解决方案. Vakili-Tahami等^[74]使用纤维素纳米晶须(CNC)调控玻璃纤维环氧树脂基体的界面结合力, 进而增强材料的力学性能. 一方面, CNC通过表面羟基与环氧树脂形成强化学键合, 显著提升了基体本身的力学性能; 另一方面, CNC在界面区形成了坚固的纳米互锁网络, 有效地将载荷从基体传递到玻璃纤维, 从而抑制了界面脱黏现象. 当CNC的添加量为1 wt%时其拉伸强度提高了24%, 硬度和弹性模量分别提高了36.7%和30.2%, 且在拉伸过程中未观察到界面失效现象, 为实现复合材料的高性能化与环境友好指明了方向.

尽管纳米材料用于构建功能界面层方面取得了极大进展, 然而, 纳米材料与纤维表面间的界面牢固度问题始终困扰着学术界和产业界, 如何使纳米材料和纤维形成牢固界面持续是一个巨大挑战. 除此以外, 纳米材料潜在的生物毒性和环境持久性风险以及分散问题也是亟待解决的难题^[75-77].

因此, 在实际制备过程中, 需根据纤维类型、树脂体系及目标性能要求(强度、韧性、耐候、功能等), 灵活选择或组合上述方法, 并紧密结合浸润性、吸附、化学键合与过渡层等基础理论进行界面设计与调控, 才能最大化释放复合材料的应用潜力. 未来研究也将进一步探索多方法协同、智能化调控及环境友好型表面处理技术.

4 纤维增强树脂基复合材料的研究现状

4.1 无机纤维增强树脂基复合材料国内外研究现状

空天等复杂环境对复合材料提出了更高的要求. 在无机纤维增强树脂基复合材料的发展浪潮中, 研究焦点已从单一的力学性能提升, 转向结构-功能一体化和智能复合材料的开发, 特别是在阻燃与智能预警领域, 通过将多种功能性填料与树脂基体复合, 已成为实现材料性能跨越式发展的前沿方向. Xu等^[78]基于天然生物材料的设计, 制备了棉纤维增强的壳聚糖(chitosan, CS)/碳纳米纤维(carbon nanofiber, CNF)/环氧树脂(epoxy resin, EP)复合材料, 该材料以CS作为交联剂和成炭剂, CNF作为阻燃剂和导电成分. CS的韧性结构与EP的刚性结构产生协同增韧增强作用, 且借助CS的成炭性和

CNF的导电性, 具备灵敏的火灾预警功能, EP含量为35%的CS/CNF/EP复合材料(CS/CNF/EP-35)的拉伸强度为7.09 MPa, 断裂伸长率达129.05%, LOI为32.3%, UL-94评级为V-0, 火灾预警响应时间约1 s, 火焰暴露下可维持263 s预警, 移除火焰后预警时间超35 min, 在160 °C时, 热响应预警可在1 s内触发. 该研究的CS/CNF/EP复合材料不仅克服了传统阻燃材料力学性能的瓶颈, 更因其核心组分(CS、棉纤维)的生物物质来源, 体现了绿色、可持续的材料设计理念, 为新一代智能防火安全材料的设计与开发, 特别是在对重量敏感且需实时监控的航空航天、交通运输等领域提供了重要的技术路径和理论依据.

制备技术的革新是推动纤维增强树脂基复合材料性能突破与应用拓展的核心驱动力, 随着增材制造、精密预浸等先进成形工艺的成熟, 研究已从传统的“经验试错”迈向主动的“结构-性能”一体化设计. Shang等^[79]利用基于材料挤出的3D打印工艺, 设计了将双向正弦结构与梯度分层配置相结合的仿生梯度正弦碳纤维增强树脂基复合材料, 不仅可以高效控制材料每层的形状、不同正弦层的数量, 还能控制基体材料的分布. 所制备的材料边缘冲击强度可达61.65 kJ·m⁻², 平均冲击强度达到55.48 kJ·m⁻²的峰值, 且BGS-CFRPs的纤维体积分数仅为4.5%~6.5%, 可以减少55%~65%的纤维使用量, 为纤维增强树脂基复合材料提供了更大、更高维的设计空间. 制备技术的先进性同样体现在对传统工艺, 如生物医疗的优化. Qiu等^[80]将单向石英纤维(UD)平行排布于流动树脂基底, 由于单向纤维含量最高, 且树脂的流动性减少了黏附界面处的微空隙形成, 提高了材料的均匀性, 使弯曲强度从116 MPa提升至(459.69±46.61) MPa, 且成功应用于牙科修复材料. 上述研究表明, 未来的新型复合材料及其制备技术发展必将更加侧重于“设计-制造-性能”的深度融合, 从而定制化地满足不同极端工况下的应用需求.

除了结构-功能一体化外, 通过引入功能性纳米粒子构建智能界面, 开发自修复复合材料已成为界面工程领域的前沿热点, 这类研究旨在使界面不仅承担传递载荷的单一功能, 更能主动响应外部环境变化, 赋予材料自修复、自感知等智能化特性. Qi等^[81]通过水热法、溶剂热法、氨催

化法在碳纤维(CF)表面原位生长了纳米 Fe_3O_4 颗粒后,再将其与酚醛树脂聚合得到具有自修复的碳纤维复合材料.改性后复合材料界面结合强度显著增强,其拉伸强度和弯曲强度分别提高了39.4%和27.7%.除了力学性能增强外,该复合材料同时具备摩擦自修复和优异的耐磨功能,摩擦系数稳定性提升,磨损率降低65.4%.由于摩擦过程中纳米 Fe_3O_4 产生的磁性磨屑可吸附到摩擦表面或填充表面孔隙,促进摩擦膜持续形成,从而实现自修复并显著提升耐磨性.该工作成功地将被动界面转变为主动功能性界面,不仅通过强化化学键合显著增强了界面结合强度,更关键的是赋予了复合材料优异的自修复能力,为其在高性能制动系统、耐磨轴承等关键运动部件中应用长寿命、高可靠性的复合材料提供了重要的理论与技术基础.

实际上,在纤维增强树脂基复合材料领域,材料开发已超越对单一高性能的追求,转而聚焦于多材料体系协同设计与可持续性的融合.通过将高性能合成纤维与低成本、可再生的天然纤维进行复合用于增强树脂基复合材料,在不过度牺牲力学性能的前提下,显著降低材料的环境污染与成本,已成为全球绿色复合材料发展的主流趋势之一.Palanivendhan等^[82]使用不同重量分数的红麻/玄武岩纤维与环氧树脂复合以评估材料稳定性和纤维-基体相互作用.随着玄武岩纤维含量的增加,红麻/玄武岩纤维增强树脂基复合材料的拉伸强度逐渐增加,其最大拉伸强度为94.85 MPa,最大弯曲强度为97.28 MPa,最高冲击强度为29.97 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 和最高导热系数为0.35 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,这一结果表明了玄武岩纤维优异的强度和刚度与红麻纤维的轻质和环保协同改善了复合材料的综合性能,也进一步证明了“天然纤维-无机纤维”混杂策略的可行性与巨大潜力.

对于纤维增强树脂基复合材料而言,实现智能化精准控制是提升复合材料性能一致性与生产效率的关键,其在线监测与精准预测已成为研究的焦点.开发能够实时反馈并指导工艺调整的先进监测技术,具有至关重要的意义.Nitin等^[83]聚焦复合材料的固化过程监测技术,研究树脂基体与纤维增强材料的固化行为.研究发现表观活化能曲线 $E_a(\alpha)$ 能准确表征固化动力学,并可用于精确预测50~100 $^{\circ}\text{C}$ 范围内任何等温固化温度下

固化转化率的时间进程;介电分析法与DSC相结合可有效实时监测固化过程,不仅揭示了纤维的存在对固化行为的独特影响,而且能够预报任意等温工艺下的固化进程,极大地提升了制造的可靠性和效率.

综上所述,当前无机纤维增强树脂基复合材料的研究已呈现出多维融合、协同创新的发展态势,研究重点从单纯的力学性能提升转向赋予材料阻燃、导电、预警等多功能特性,通过增材制造等先进工艺推动材料微观结构和宏观性能的精准、高效调控,致力于构建具有自修复、自感知等主动响应能力的智能界面,未来复合材料的发展正朝着“设计—制造—性能—功能—环境”深度协同的方向演进.

4.2 有机纤维增强树脂基复合材料国内外研究现状

在纤维增强树脂基复合材料的研究中,界面调控技术一直是提升复合性能的关键环节.Ma等^[84]通过对UHMWPE纤维进行加捻和 SiO_2 纳米颗粒改性,提高其与树脂的界面结合强度.改性后的样品的最终氧化温度从478.8 $^{\circ}\text{C}$ 增加至483.1 $^{\circ}\text{C}$,且表面自由能增加到42.47 $\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}$; SiO_2 的引入显著改善了纤维的IFSS,相较于未改性的纤维,其IFSS提高了218%.这种结合扭曲和界面调控的新策略对提高复合材料的界面抗裂性有重要的参考价值.Amin等^[85]采用TOFA改性木质素、柠檬酸酯化PVA对纤维素纤维进行改性,TOFA改性木质素与柠檬酸交联PVA结合时,形成稳定且相容的基质,不仅在拉伸强度和耐热性方面均取得了显著的改善,其拉伸强度为8.7 MPa,拉伸模量为59.3 MPa,断裂伸长率最高为14.8%,还为复合材料赋予了抗菌等新功能,体现出界面工程从“单一增强”向“多功能化”发展的趋势.Raja等^[86]将不同含量的花岗岩粉末(0、3、6、9、12和15 g)掺入环氧树脂基体中,再将其与大麻纤维复合制备成一种新型复合材料,其拉伸强度提高了11.4%,弯曲强度提高了12.3%,冲击强度提高了29%,硬度提高了17.5%,且分解温度由125 $^{\circ}\text{C}$ 提升到330 $^{\circ}\text{C}$,重量保持率在350 $^{\circ}\text{C}$ 时提高了90%,显著提高了热稳定性.与纯聚合物基质相比,黄麻纤维复合材料的金黄色葡萄球菌和大肠杆菌细菌菌落减少了约70%~80%,且没有细菌耐药性的风险,可用

于医疗保健领域等需要抗菌表面的应用. 总之, 界面设计的创新是推动高性能环保复合材料发展的重要动力, 为未来开发多功能集成体系提供了关键技术支持.

对于防护专家而言, 开发兼具高强度与高韧性的轻质防护复合材料是孜孜以求的目标. Chen等^[87]通过多级增强与增韧设计(脲基嘧啶酮UPy化合物+聚对苯撑苯并二噁唑(poly(*p*-phenylene benzobisthiazole, PBO)纤维+ CNT), 成功提升了复合材料的层间剪切强度与冲击韧性, 实现了防护性能的协同优化. 具体为: 在环氧树脂(EP)基体中引入含四氢键的UPy化合物增韧, 并用碳纳米管(CNT)改性树脂以提升强度与刚度, 改性后的树脂的抗冲击性提高了34%, 断裂韧性从 $0.47 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 提高至 $0.74 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. 再将改性的树脂与等离子处理的PBO纤维进行层压复合, 制备出高性能防弹复合材料, 其ILSS达到 10.94 MPa , 冲击强度、模量和能量吸收值分别达到 541.2 MPa 、 7478.2 MPa 和 129.2 MJ/m^3 .

制备技术的创新是提升材料性能和生产效率的关键. 近年来, 研究者在树脂灌注和固化工艺的优化方面取得了显著进展. Tucci等^[88]通过改进树脂预热过程, 从而改善树脂的流动性, 提高树脂灌注的速率. 为了克服纤维和树脂在浸渍和固化时所产生的缺陷, 该研究甚至开发了增强液体复合材料成型技术(LCM)中纤维瓶胚浸渍的工艺以优化固化过程, 不仅提高了树脂的流动性和浸渍效率, 还通过精确的固化参数控制, 确保了复合材料的高性能, 有助于提升该类材料制备过程的可控性和产品性能稳定性, 推动其在相关领域的可持续应用.

随着复合材料的广泛使用, 传统纤维增强树脂基复合材料也往往难以回收或降解而对环境造成沉重的负担. 有机纤维增强树脂基复合材料的开发进程中, 通过开发新型树脂基体与优化纤维-基体界面同时, 也在应对回收难题等重大挑战方面取得了显著进展. 为了解决传统热固性复合材料回收难的问题, Gopi等^[89]提出采用竹纤维作为增强基制备出聚乳酸(PLA)基复合材料, 其断裂伸长率值随竹纤维比例的增加而减小, 而硬度值在含有40%竹纤维的样品中达到最大的88.5(较纯PLA的82.5提高了7.66%), 且竹纤维增强树脂复合材料的最大抗拉强度可达到18.07

MPa. 竹纤维的引入不仅显著提升了PLA基复合材料的力学性能和刚性, 并在一定程度上改善了材料的可持续性. 这一研究表明天然纤维在替代传统合成纤维方面具有巨大潜力, 为环保型复合材料的开发提供了重要参考, 体现了学界对材料全生命周期环境效益的重视.

综上所述, 有机纤维增强树脂基复合材料的研究在界面设计、性能增强、制备工艺及环境友好性等多个维度取得了显著进展, 展现出多学科交叉、多目标协同的鲜明特征^[90]. 总体而言, 未来纤维增强树脂基复合材料的发展将继续朝着“界面功能化、结构智能化、制造精密化、体系绿色化”的方向深化, 通过“材料-结构-工艺-性能”一体化创新, 不断拓展其在航空航天、国防防护、生物医疗及绿色建筑等领域的应用边界.

5 总结与展望

纤维增强树脂基复合材料作为现代工业的“骨骼系统”, 正经历从结构材料向功能智能体的革命性转变, FRP的发展史本质是突破纤维性能极限、深化界面性能与制造技术革新的过程. 本文系统梳理了从纤维材料、表面调控机制到FRP最新研究进展及应用场景的全方面体系, 并深入探讨了界面调控策略对于高性能复合材料的重要性, 在此基础上凝练出亟待解决的共性难题.

展望未来, 纤维增强树脂基复合材料的研究应聚焦于以下5个方向:

(1) 新型树脂材料的开发. 随着FRP材料的发展, 通用树脂体系已难以满足多样化的尖端应用需求, 未来树脂研发将向高性能化(具有较宽黏度范围、高强韧、高耐热)、专用化、功能化、智能化等方向发展. 一方面, 针对航空航天、深空探测等领域, 需要开发更高强度和韧性、更优异耐温性的新型树脂, 如高性能聚酰亚胺、氰酸酯、聚醚醚酮、生物基环氧树脂. 另一方面, 对于汽车、风电等大规模应用的领域, 则将重点发展固化速度快、工艺窗口宽、适用于低温低压成型(如高压树脂传递模塑HP-RTM、湿法模压)的快速固化树脂(如环状聚丁二烯(CBT)、聚氨酯丙烯酸酯(PUA)等)和可循环利用树脂, 以实现高效和绿色化制造.

(2) 发展低成本和智能化制造技术. 当前FRP

因原材料价格昂贵、制备工艺复杂、设计成本高,致使复合材料成本居高不下,限制了其在汽车、轨道交通等民用领域的普及.未来应大力发展大丝束碳纤维的应用、低温快速固化树脂体系的开发、低成本预浸料技术、液态成型技术、高性能热塑性复合材料的低成本先进制造技术.通过全产业链的成本控制,推动复合材料从“贵族材料”走向“民用普及”应用.除此以外,由于传统制备工艺存在高度依赖经验的问题,未来复合材料制造应深度结合工业互联网、大数据和数字孪生技术,通过嵌入传感器,实时监测预浸料裁剪、铺放、固化过程中的温度、压力、粘度变化,对制造全过程进行仿真、预测与精准控制,形成“数字孪生体”;同时,开发自动化装备,如机器人自动铺丝、3D打印连续纤维,实现生产全过程的机器人化,提升产品的一致性和生产效率.

(3) 结构-功能一体化设计与应用.复合材料不仅是承力结构,更是功能的载体,未来材料设计将打破“结构”与“功能”的界限,向结构-功能一体化方向发展.例如,将导电纳米材料(碳纳米管、石墨烯)融入树脂基体,制造出具有自感知(监测内部应变、损伤)、自诊断(报告损伤位置)、甚至自愈合(裂纹修复)功能的智能材料,此外,还将发展兼具承载、电磁屏蔽、热管理等多功能于一身的复合材料,为未来飞行器、新能源汽车提供解决方案.

(4) 发展循环回收再利用新技术.当前FRP(尤其是占比70%的热固性FRP)因树脂交联结构稳定,回收难度大,不仅带来了巨大的资源浪费,而且造成了严重的环境问题,急需从源头设计,通过动态交联等前沿技术设计新型可循环利用的新型树脂,除此以外,发展先进的回收再利用技术,建立高效、经济、绿色的回收产业链,实现复合材料的循环利用,有效降低碳排放,推动产业向绿色、可持续发展转型.

(5) 人工智能(AI)与复合材料的深度耦合.尽管高性能FRP复合材料具有出色的性能,但其复杂的制备过程和特殊的材料结构使得工业生产变得极具挑战.随着AI技术的蓬勃兴起,特别是机器学习、深度学习以及高通量计算等方法的成熟,再加上AI强大的数据处理能力,可在材料开发和选择、工艺建模和优化、材料性能预测以及损伤诊断和预测等方面提供了新的思路.AI技术能够融合第一性原理计算、分子动力学模拟与海量实验数据,构建从化学组分(树脂基体、纤维表面处理剂、固化剂等)到微观结构(界面相特性、孔隙率)再到宏观性能(模量、强度、韧性)的定量映射模型,快速筛选数以万计的纤维-树脂组合方案,设计出满足特定性能需求的新型复合材料体系.除此之外,可以利用深度学习网络(如卷积神经网络CNN、循环神经网络RNN)对大量的无损检测数据(如超声C扫描、X射线CT)、服役监测数据(如光纤光栅、声发射)以及破坏性实验数据进行分析,建立高精度的强度、刚度、损伤演化及疲劳寿命预测模型.

未来,应大力发展AI并将其贯穿于复合材料研发、生产、应用的全过程,通过机器学习和高通量计算,快速筛选纤维-树脂组合方案、预测性能、设计最优纤维铺层序列,自主优化固化过程,建立性能预测模型,实现零缺陷制造,推动FRP复合材料领域迈向数据驱动的新模式.

总之,纤维增强树脂基复合材料的未来,将是一个多学科交叉融合、协同创新的新图景,它不再局限于单一性能的提升,而是向绿色化、智能化、多功能化、可持续化方向全面演进,从传统材料的“替代”材料,演进为引领发展的“主导”材料和“智能”材料,在高端装备、绿色建筑、智能防护、新能源等领域发挥更为关键的作用,为人类社会的科技进步和可持续发展提供更强大的支撑.



作者简介:陈凤翔,男,1985年生,武汉纺织大学纺织新材料与先进加工全国重点实验室教授.2011年于长江大学获学士学位,2014年于武汉纺织大学获硕士学位,2017年于湖北大学获博士学位.主要研究方向:先进功能纤维材料及器件.迄今以第一/通讯作者在*Science Advances*、*Progress in Materials Science*、*Advanced Functional Materials*等学术期刊上发表学术论文60余篇.



作者简介: 徐卫林, 男, 1969年生, 中国工程院院士, 纺织与高分子材料学家. 1992年于武汉纺织大学获学士学位、1994年于西安工程大学获硕士学位, 1997年于东华大学获博士学位. 长期从事先进纺纱技术与纺织品研究. 现任武汉纺织大学党委书记、纺织新材料与先进加工全国重点实验室主任、中国纺织工程学会副理事长.

REFERENCES

- 1 丁辛. 树脂基纤维增强复合材料. *纺织学报*, **1995**, 16(6), 56-58.
- 2 Kausar, A. Holistic insights on polyimide nanocomposite nanofiber. *Polym. Plast. Technol. Mater.*, **2020**, 59(15), 1621-1639.
- 3 Parvizi, P.; Jalilian, M.; Dearn, K. D. Epoxy composites reinforced with nanomaterials and fibres: manufacturing, properties, and applications. *Polym. Test.*, **2025**, 146, 108761.
- 4 Soutis, C. Fibre reinforced composites in aircraft construction. *Prog. Aerosp. Sci.*, **2005**, 41(2), 143-151.
- 5 戴春晖, 刘钧, 曾竟成, 边力平. 复合材料风电叶片的发展现状及若干问题的对策. *玻璃钢/复合材料*, **2008**, (1), 53-56.
- 6 杨霜, 孙康, 吴人洁. 混杂纤维复合材料参数设计与力学性能的关系. *纤维复合材料*, **2001**, 18(4), 14-18.
- 7 宋传江, 王虎. 玻璃纤维增强复合材料工程化应用进展. *中国塑料*, **2015**, 29(3), 9-15.
- 8 陈雯娜. 短切碳纤维增强热塑性复合材料性能影响因素. *纺织科学研究*, **2021**, 197(5), 58-63.
- 9 张利平, 郭羽晴, 丁博, 孙洁. 芳纶纳米纤维/热塑性聚氨酯复合微孔膜与可呼吸覆膜织物制备及其性能. *纺织学报*, **2025**, 46(7), 19-27.
- 10 Xue, D. B.; He, L.; Tan, S.; Xue, P.; Cheng, X.; Yang, X. H.; Dong, L. Effect of carbon fiber layers on braiding properties during three-dimensional weaving. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, **2023**, 237(7), 1692-1705.
- 11 王俊勃, 孙永奇, 井晓天. 纤维增强树脂基复合材料分层断裂的研究现状. *纺织高校基础科学学报*, **1998**, 11(2): 95-101.
- 12 Sun, Z. L.; Luo, Y. X.; Chen, C. Y.; Dong, Z. J.; Jiang, G. M.; Chen, F. X.; Ma, P. B. Mechanical enhancement of carbon fiber-reinforced polymers: from interfacial regulating strategies to advanced processing technologies. *Prog. Mater. Sci.*, **2024**, 142, 101221.
- 13 孙文强, 牛兰刚, 顾有伟. 耐高温复合材料用玻璃纤维表面处理的研究(2)高温偶联剂处理的研究. *玻璃钢/复合材料*, **2000**(3), 13-15.
- 14 Li, J. Interfacial studies on the ozone and air-oxidation-modified carbon fiber reinforced PEEK composites. *Surf. Interface Anal.*, **2009**, 41(4), 310-315.
- 15 Chen, Y. Z.; Xu, D. W.; Zeng, Q.; Liu, S. Y.; Chen, P. Influence of DBD-grafted multi-carboxyl polyurethane on interfacial properties of PBO fibre-reinforced BMI resin composites. *Appl. Surf. Sci.*, **2020**, 512, 145662.
- 16 孙文强, 曾辉, 牛兰刚, 顾有伟. 耐高温复合材料用玻璃纤维表面处理研究(1): 酸碱刻蚀处理的研究. *玻璃钢/复合材料*, **2000**(1), 33-35.
- 17 Arulvel, S.; Mallikarjuna Reddy, D.; Dsilva Winfred Rufuss, D.; Akinaga, T. A comprehensive review on mechanical and surface characteristics of composites reinforced with coated fibres. *Surf. Interfaces*, **2021**, 27, 101449.
- 18 钱晨, 黄博翔, 李永强, 万军民, 傅雅琴. 增强纤维用上浆剂的耐高温改性研究进展. *纺织学报*, **2023**, 44(9), 232-242.
- 19 徐铭涛, 嵇宇, 仲越, 张岩, 王萍, 睦建华, 李媛媛. 碳纤维/环氧树脂基复合材料增韧改性研究进展. *纺织学报*, **2022**, 43(9), 203-210.
- 20 郭伟娜. 植物纤维增强可降解复合材料的研究现状. *国外丝绸*, **2009**, 24(1), 25-29.
- 21 阮芳涛, 施建, 徐珍珍, 邢剑. 碳纤维增强树脂基复合材料的回收及其再利用研究进展. *纺织学报*, **2019**, 40(6), 153-158.
- 22 Baye, B.; Tesfaye, T. The new generation fibers: a review of high performance and specialty fibers. *Polym. Bull.*, **2022**, 79(11), 9221-9235.

- 23 Liu, Z. Z.; Wang, Y.; Yu, J. R.; Chen, Y. J.; Zhu, M. F. The past, present and future of high-performance fibers. *Natl. Sci. Rev.*, **2024**, 11(10), nwae310.
- 24 Cooke, T. F. Inorganic fibers: a literature review. *J. Am. Ceram. Soc.*, **1991**, 74(12), 2959–2978.
- 25 Liu, T. J.; Chen, M. Y.; Dong, J.; Sun, R. J.; Yao, M. Numerical simulation and experiment verified for heat transfer processes of high-property inorganic fiber woven fabrics. *Text. Res. J.*, **2022**, 92(13–14), 2368–2378.
- 26 Li, Y. F.; Li, J. Y.; Ramanathan, G. K.; Chang, S. M.; Shen, M. Y.; Tsai, Y. K.; Huang, C. H. An experimental study on mechanical behaviors of carbon fiber and microwave-assisted pyrolysis recycled carbon fiber-reinforced concrete. *Sustainability*, **2021**, 13(12), 6829.
- 27 Noh, Y. D.; Nam, Y. W.; Kwak, B. S. Enhanced thermal and mechanical properties of PAN-based carbon/epoxy composites reinforced with graphite sheets and stitched pitch-based carbon fibers. *Polym. Test.*, **2025**, 149, 108856.
- 28 Brown, K. R.; Harrell, T. M.; Skrzypczak, L.; Scherschel, A.; Wu, H. F.; Li, X. D. Carbon fibers derived from commodity polymers: a review. *Carbon*, **2022**, 196, 422–439.
- 29 Lu, X. D.; Wei, Y. Q.; Wang, Q.; Liu, R. X.; Chen, J. Y.; Ding, J. Effect of polycarbosilane (PCS) on the high-temperature properties of phenolic resin (phen) films and quartz fiber/phen-PCS composites. *J. Macromol. Sci. Part B*, **2025**, 64(9), 1101–1121.
- 30 郭建业, 赵英民, 吴朝军, 李文静, 杨洁颖, 张丽娟, 苏力军. 温度对石英纤维毡隔热性能的影响. *材料导报*, **2020**, 34(24), 24019–24022.
- 31 彭星玲, 茶映鹏, 张华, 李玉龙. 单模光纤宏弯损耗的温度响应特性. *光子学报*, **2018**, 47(11), 1106006.
- 32 刘含洋, 赵伟栋, 潘玲英, 崔超, 孙宝岗, 蒋文革. 结构、耐热、透波功能一体化石英/聚酰亚胺研究. *航空材料学报*, **2015**, 35(4), 34–38.
- 33 Bozkurt, Ö. Y.; Gökdemir, M. E. Effect of basalt fiber hybridization on the vibration-damping behavior of carbon fiber/epoxy composites. *Polym. Compos.*, **2018**, 39(S4), E2274–E2282.
- 34 Khandelwal, S.; Rhee, K. Y. Recent advances in basalt-fiber-reinforced composites: tailoring the fiber-matrix interface. *Compos. Part B Eng.*, **2020**, 192, 108011.
- 35 Cheng, L. L.; Kong, D. W.; Huang, Y. Y.; Wang, Y. F.; Liu, P.; Zhang, Y. J. Research on the strength and thermal conductivity of basalt fiber reinforced phosphogypsum-based composite cementitious materials. *Mech. Compos. Mater.*, **2025**, 61(1), 129–144.
- 36 Wang, X. Y.; Li, P. F.; Xiang, D.; Wang, B.; Zhang, Z.; Zhang, J.; Zhao, C. X.; Li, H.; Tan, W.; Wang, J. J.; Li, Y. T. Influence of high-temperature, high-pressure, and acidic conditions on the structure and properties of high-performance organic fibers. *Mater. Test.*, **2022**, 64(5), 623–635.
- 37 Chen, F. X.; Zhai, L. S.; Yang, H. Y.; Zhao, S. C.; Wang, Z. L.; Gao, C.; Zhou, J. Y.; Liu, X.; Yu, Z. W.; Qin, Y.; Xu, W. L. Unparalleled armour for aramid fiber with excellent UV resistance in extreme environment. *Adv. Sci.*, **2021**, 8(12), 2004171.
- 38 Zhang, Z. Y.; Wang, Y. H.; Zhou, H.; Dai, H. B.; Luo, J. J.; Chen, Y. Z.; Li, Z. L.; Li, M. D.; Li, C.; Gao, E. L.; Jiao, K.; Zhang, J. Fabricating aramid fibers with ultrahigh tensile and compressive strength. *Adv. Fiber Mater.*, **2025**, 7(3), 774–783.
- 39 Hu, Y. H.; Yang, G.; Zhou, J. T.; Li, H. Y.; Shi, L.; Xu, X. L.; Cheng, B. W.; Zhuang, X. P. Proton donor-regulated mechanically robust aramid nanofiber aerogel membranes for high-temperature thermal insulation. *ACS Nano*, **2022**, 16(4), 5984–5993.
- 40 Yin, L. P.; Zhou, Z. T.; Luo, Z.; Zhong, J. C.; Li, P.; Yang, B.; Yang, L. Reinforcing effect of aramid fibers on fatigue behavior of SBR/aramid fiber composites. *Polym. Test.*, **2019**, 80, 106092.
- 41 Li, Q. H.; Yin, X.; Huang, B. T.; Luo, A. M.; Lyu, Y.; Sun, C. J.; Xu, S. L. Shear interfacial fracture of strain-hardening fiber-reinforced cementitious composites and concrete: a novel approach. *Eng. Fract. Mech.*, **2021**, 253, 107849.
- 42 Liu, C. X.; Ma, Y. N.; Xie, Y. M.; Zou, J. J.; Wu, H.; Peng, S. H.; Qian, W.; He, D. P.; Zhang, X.; Li, B. W.; Nan, C. W. Enhanced electromagnetic shielding and thermal management properties in MXene/aramid nanofiber films fabricated by intermittent filtration. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2023**, 15(3), 4516–4526.
- 43 Liu, B. G.; Kandan, K.; Wadley, H. N. G.; Deshpande, V. S. High strain rate compressive response of ultra-high molecular weight polyethylene fibre composites. *Int. J. Plast.*, **2019**, 122, 115–134.
- 44 Han, L.; Cai, H. F.; Chen, X.; Zheng, C.; Guo, W. H. Study of UHMWPE fiber surface modification and the properties of UHMWPE/epoxy composite. *Polymers*, **2020**, 12(3), 521.

- 45 Huang, W.; Wang, Y.; Xia, Y. M. Statistical dynamic tensile strength of UHMWPE-fibers. *Polymer*, **2004**, 45(11), 3729–3734.
- 46 Yeh, J. T.; Lin, S. C.; Tu, C. W.; Hsie, K. H.; Chang, F. C. Investigation of the drawing mechanism of UHMWPE fibers. *J. Mater. Sci.*, **2008**, 43(14), 4892–4900.
- 47 Ding, Y. C.; Hou, H. Q.; Zhao, Y.; Zhu, Z. T.; Fong, H. Electrospun polyimide nanofibers and their applications. *Prog. Polym. Sci.*, **2016**, 61, 67–103.
- 48 Sherif, A.; Faaborg, M. W.; Zeng, C.; Brenner, M. P.; Manoharan, V. N. Braiding, twisting, and weaving microscale fibers with capillary forces. *Soft Matter*, **2024**, 20(15), 3337–3348.
- 49 Kim, J.; Jia, X. T. From space to battlefield: a new breed of multifunctional fiber sheets for extreme environments. *Matter*, **2020**, 3(3), 602–604.
- 50 Li, Z. X.; Chen, W. D.; Seveno, D.; Jiang, D. Z. Modeling and mechanism of the mechanical interlocking for the carbon fiber/epoxy interphase. *Carbon*, **2025**, 233, 119861.
- 51 Sun, T. L.; Feng, L.; Gao, X. F.; Jiang, L. Bioinspired surfaces with special wettability. *Acc. Chem. Res.*, **2005**, 38(8), 644–652.
- 52 Zhu, P. G.; Wang, L. Q. Microfluidics-enabled soft manufacture of materials with tailorable wettability. *Chem. Rev.*, **2022**, 122(7), 7010–7060.
- 53 Huerre, A.; Jossierand, C.; Séon, T. Freezing and capillarity. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **2025**, 57, 257–284.
- 54 赵睿祺. 含弱相互作用的弹性体材料力学性能及其微观机制研究. 中国科学技术大学博士学位论文, **2022**.
- 55 Li, H. F.; Liu, C.; Zhu, J. B.; Huan, X. H.; Qi, P. F.; Xu, K.; Geng, H. B.; Guo, X. D.; Wu, H. M.; Zu, L.; Ge, L.; Jia, X. L.; Yang, X. P.; Wang, H. Bio-inspired fabrication of “brick-and-mortar” interphase in carbon fiber/epoxy composites with significantly improved high-temperature durability. *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, **2024**, 7(2), 72.
- 56 Zou, X.; Chen, K.; Yao, H. N.; Chen, C.; Lu, X. P.; Ding, P.; Wang, M.; Hua, X. M.; Shan, A. D. Chemical reaction and bonding mechanism at the polymer-metal interface. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2022**, 14(23), 27383–27396.
- 57 Zhan, L. Q.; Zhang, S.; Gao, W. Q.; Zheng, W. Z.; Li, Z. H.; Jiang, X. Y.; Ning, Z. J.; Han, L. Y.; Li, Z.; Stolterfoht, M.; Zhu, W. H.; Wu, Y. Z. Reinforced perovskite-substrate interfaces via multi-sited and dual-sided anchoring. *Adv. Mater.*, **2025**, 37(30), 2506048.
- 58 胡福增, 柴田健一, 堤和男. 硅烷偶联剂对玻璃纤维表面性能的影响. 复合材料学报, **1989**, 6(1), 7–13.
- 59 华中胜, 姚广春, 马佳, 张志刚, 梁李斯. 碳纤维表面镀镍层的XPS分析. 中国有色金属学报, **2011**, 21(1), 165–170.
- 60 Zhou, X. K.; Liu, S. K.; Siddique, A.; Min, C. Y.; Pei, X. Y.; Liu, S. Q.; Yin, Y.; Song, K.; Xu, Z. W. Construction of nanocomposite interphase with controllable thickness to relieve stress concentration and boost stress transfer from carbon fiber/epoxy resin interface. *Chem. Eng. J.*, **2025**, 505, 159542.
- 61 Mylsamy, B.; Shanmugam, S. K. M.; Aruchamy, K.; Palanisamy, S.; Nagarajan, R.; Ayrilmis, N. A review on natural fiber composites: polymer matrices, fiber surface treatments, fabrication methods, properties, and applications. *Polym. Eng. Sci.*, **2024**, 64(6), 2345–2373.
- 62 蒋向, 邓剑如. 等离子体处理对芳纶性能的影响. 合成纤维, **2006**, 35(12), 26–29.
- 63 Kurniawan, D.; Kim, B. S.; Lee, H. Y.; Lim, J. Y. Atmospheric pressure glow discharge plasma polymerization for surface treatment on sized basalt fiber/poly(lactic acid) composites. *Compos. Part B Eng.*, **2012**, 43(3), 1010–1014.
- 64 Xiao, J. Q.; Zhang, X. J.; Zhao, Z. H.; Liu, J.; Chen, Q. F.; Wang, X. X. Rapid and continuous atmospheric plasma surface modification of PAN-based carbon fibers. *ACS Omega*, **2022**, 7(13), 10963–10969.
- 65 Galvanetto, E.; Caporali, S.; Zonfrillo, G.; Gulino, M. S.; Pugliese, L.; Vangi, D. Increased interaction between Ultra-High Molecular Weight Polyethylene fibres and epoxy matrices for advanced composite materials. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, **2023**, 1275(1), 012007.
- 66 Wei, B.; Cao, H. L.; Song, S. H. Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment. *Mater. Des.*, **2010**, 31(9), 4244–4250.
- 67 Lee, S. O.; Rhee, K. Y.; Park, S. J. Influence of chemical surface treatment of basalt fibers on interlaminar shear strength and fracture toughness of epoxy-based composites. *J. Ind. Eng. Chem.*, **2015**, 32, 153–156.
- 68 Li, Y.; Shi, C. W.; Pan, X. L.; Wang, Z. Y.; Yang, L. Construction of an interfacial layer of aramid fibers grafted with glycidyl POSS assisted by heat treatment and evaluation of interfacial adhesion properties with epoxy resin. *ACS Omega*, **2024**, 9(23), 24489–24499.

- 69 Li, Y. L.; Ma, C. P.; Sun, X. L.; Lou, Q. H.; Tong, Y. J.; Wang, Y. The effect of *in situ* electrochemical grafting of KH-792 onto carbon fibers on surface properties. *Carbon Trends*, **2025**, 20, 100542.
- 70 Arslan, C.; Dogan, M. The effects of silane coupling agents on the mechanical properties of basalt fiber reinforced poly(butylene terephthalate) composites. *Compos. Part B Eng.*, **2018**, 146, 145–154.
- 71 Yu, S.; Oh, K. H.; Hong, S. H. Effects of silanization and modification treatments on the stiffness and toughness of BF/SEBS/PA6, 6 hybrid composites. *Compos. Part B Eng.*, **2019**, 173, 106922.
- 72 Li, T.; Wang, Z. X.; Zhang, H.; Hu, Z. M.; Yu, J. R.; Wang, Y. Effect of aramid nanofibers on interfacial properties of high performance fiber reinforced composites. *Compos. Interfaces*, **2022**, 29(3), 312–326.
- 73 Gao, S.; Mader, E.; Plonka, R. Nanocomposite coatings for healing surface defects of glass fibers and improving interfacial adhesion. *Compos. Sci. Technol.*, **2008**, 68(14), 2892–2901.
- 74 Salih, A. M.; Vakili-Tahami, F.; Biglari, H. Cellulose nanocrystals effect to improve mechanical properties of epoxy-based glass fiber-reinforced composites. *Iran. Polym. J.*, **2025**, 34(10), 1707–1720.
- 75 Lee, S.; Hoang, Q. N.; Lee, H. S.; Chung, Y. S.; Park, H.; Lee, S. Effect of plasma modification on the anisotropic surface structure of PAN-based graphitic carbon fiber. *Carbon*, **2025**, 242, 120429.
- 76 Cadavid, J.; Larrañaga, A.; Lizundia, E. Structure and nanotoxicity of fungal chitin-glucan nanofibrils with gradient acid and alkaline treatments. *Carbohydr. Polym.*, **2025**, 357, 123484.
- 77 Xu, Z. Q.; Huang, J.; Liu, Z. X.; Chen, Z. Y.; Yuan, G. M. Magnetic nanoparticles deposition based on the peculiar pore structure of nanocellulose: preparation and properties of efficient thin-layer wave-absorbing materials. *Carbohydr. Polym.*, **2025**, 362, 123679.
- 78 Xu, Y.; Liu, S. L.; Xu, S. M.; Liu, G.; Li, G. H. Flexible and flame retardant cotton fiber-reinforced CS/CNF/EP composites for a sensitive fire warning. *Chem. Eng. J.*, **2024**, 500, 156960.
- 79 Shang, J. F.; Liu, F.; Zhang, J. R.; Chang, B. N.; Zhu, C. K.; Zhang, W. X.; Zhu, Y. D.; Ding, X. L. Impact resistance of biomimetic gradient sinusoidal composites by 3printingD: tunable structural stiffness and damage tolerance. *Compos. Part B Eng.*, **2025**, 291, 112016.
- 80 Qiu, S. Q.; Zhou, Y. C.; Tang, M. L.; Jiang, L. P.; Sano, H.; Carvalho, R. M.; Fu, J. L. The impact of using two fiber-reinforced composites with different placement methods on the flexural strength of two resin materials: an *in vitro* study. *BMC Oral Health*, **2025**, 25(1), 1006.
- 81 Li, C.; Fei, J.; Yan, J. F.; Zhang, T. Y.; Qi, L. H. Nano-Fe₃O₄ modified carbon fiber reinforced polymer composites with friction self-healing and excellent wear resistant functionalities. *Compos. Part B Eng.*, **2025**, 306, 112812.
- 82 Murugadoss, P.; Verma, A.; Ballal, S.; Upadhye, V. J.; Shukla, K. K.; Das, P.; Kamakshi Priya, K. Kenaf/basalt fiber-reinforced epoxy matrix hybrid composites: current trends, challenges, and future prospects in advanced material development. *Results Eng.*, **2025**, 26, 104816.
- 83 Gupta, N.; Wuzella, G.; Mahendran, A. R.; Kaltenbrunner, M. Real-time cure monitoring of bio-based resin composites reinforced with natural and glass fibers. *Polymer*, **2025**, 332, 128563.
- 84 Zhao, Z. Y.; Dong, Z. J.; Chen, C. Y.; Peng, J. J.; Ma, P. B. Synergistically improving interface behavior by designing physical twisting structure and “rigid-flexible” interface layer on ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fiber surface. *Thin Walled Struct.*, **2024**, 199, 111805.
- 85 Rahmani, A.; Abdulkhani, A.; Ashori, A.; Hosseinzadeh, J. Development of high-performance biocomposites through lignin modification and fiber reinforcement. *Sci. Rep.*, **2024**, 14(1), 28932.
- 86 Thandavamoorthy, R.; Alagarasan, J. K.; Mohanavel, V.; Velmurugan, P.; Al-Otibi, F. O.; Hossain, I.; Mohammad Soudagar, M. E.; Lee, M. Fabrication of green composite made by Cannabis sativa fiber reinforced granite filler blended epoxy matrix composite—Antimicrobial and structural analysis. *J. Mater. Res. Technol.*, **2024**, 32, 2474–2481.
- 87 He, H. W.; Liu, Y. L.; Peng, X. J.; Ma, M.; Shi, Y. Q.; Zhu, Y. L.; Chen, S.; Wang, X. Design of high impact-resistant PBO fiber/epoxy vitrimer composites: multi-scale energy dissipation strategy. *Chem. Eng. J.*, **2025**, 505, 159215.
- 88 Esperto, V.; Tucci, F.; Carlone, P. Impregnation and saturation analysis of microwave-preheated reactive resin in liquid composite molding. *Polym. Compos.*, **2025**, 46(S1), S159–S170.
- 89 Lokesh, P.; Surya Kumari, T. S. A.; Gopi, R.; Babu Loganathan, G. A study on mechanical properties of bamboo fiber reinforced polymer composite. *Mater. Today Proc.*, **2020**, 22, 897–903.
- 90 Yan, S. N.; Abidin, Y. Fatigue behavior of Elium®-based thermoplastic composites fabricated by liquid composite molding: a review. *Compos. Part B Eng.*, **2025**, 295, 112159.

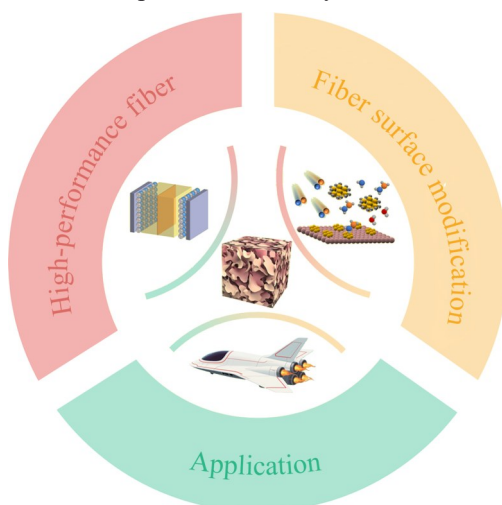
Review

Interfacial Engineering Strategies Empowering Advanced Fiber-reinforced Polymer Composites: A Review

Ming Chen, Zhi-cheng Shi, Feng-xiang Chen*, Wei-lin Xu*

(State Key Laboratory of New Textile Materials and Advanced Processing, Wuhan Textile University, Wuhan 430200)

Abstract Fiber-reinforced polymer composites (FRP) have become key materials in aerospace, defense and military, automotive and rail transportation, energy, infrastructure and other fields due to the light weight, high-strength, excellent corrosion resistance, thermal stability and insulation, as well as flexible design and processing. This review first systematically summarizes the advantages of representative high-performance inorganic and organic fibers from structural characteristics, performance and application fields, points out the common problem of poor compatibility with the resin interface caused by high surface chemical inertness. In response to the above challenges, the interface regulation mechanism and corresponding solutions are discussed. Advanced interface treatment technologies and research progress are reviewed. The future development trends of FRP are prospected from several aspects, including the development of new resin materials, low-cost and intelligent manufacturing technologies, the design and application of structure-function integration, the development of new recycling and reuse technologies, and the deep coupling of artificial intelligence and composite materials, to provide new ideas for promoting the further development of composites material system.



Keywords High-performance fibers, Interface regulation strategies, Fiber-reinforced resin matrix composites, Structure-function integration

*Corresponding authors: Feng-xiang Chen, E-mail: fxchen_czx@wtu.edu.cn

Wei-lin Xu, E-mail: weilin_xu@wtu.edu.cn