

• 四川大学建校 130 周年特刊约稿 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202600405



本刊网刊

碳纤维增强聚合物复合材料：界面科学、多功能协同与闭环重构

黄子熙, 陈 茗, 史芷丞, 胡沛英, 陈凤翔*, 徐卫林*

(武汉纺织大学 纺织新材料与先进加工全国重点实验室, 湖北 武汉 430200)

摘 要:碳纤维增强聚合物复合材料是实现高端装备结构轻量化的核心材料,然而其高性能化与可持续发展之间始终存在着根本性矛盾:表面化学惰性导致的弱界面结合、极端服役环境下结构-功能协同效应的不足,以及热固性树脂基体不可逆交联网络引发的末端回收困境,严重制约了该类材料的应用拓展与绿色转型。本文立足界面科学、多尺度功能设计与材料基因组视角,系统解构上述瓶颈的深层物理与化学本质。首先,从物理机械互锁至化学共价键合的多尺度界面增强机制出发,批判性评估等离子体处理、化学气相沉积、表面接枝等改性策略在提升界面结合强度与保留纤维本征强度之间的优劣。其次,围绕导热、电磁屏蔽及吸波等特定功能需求,揭示了结构-功能一体化设计中石墨微晶取向、导电网络连通性等微观拓扑结构与宏观性能间的关系。进而,结合空天与新能源领域严苛的服役场景,分析不同基体复合体系在极端工况下的失效机理与性能极限。最后,针对末端回收这一核心挑战,重点论述了基于动态共价键网络(如玻璃体高分子)的可重构树脂设计原理以及机器学习赋能的多级智能回收策略。未来研究应聚焦低损伤界面构筑技术、数据驱动的工艺-结构-性能-寿命逆向设计平台,以及依托再生碳纤维与生物基前驱体构建全生命周期绿色闭环。在界面科学、材料创制与智能制造 3 个维度实现协同,方能推动碳纤维复合材料从传统高性能结构材料向绿色化、智能化复合材料的跃迁。

关键词:碳纤维;界面工程;多功能复合材料;动态共价键;机器学习;可持续发展

中图分类号: TQ327.3

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2026)05-0073-28

碳纤维增强聚合物复合材料(CFRP)凭借其超高比强度、比模量及可设计性^[1-2],已成为航空航天、清洁能源、轨道交通等领域不可替代的轻量化核心材料^[3-4]。然而,经过数十年发展,CFRP在迈向更高性能与可持续发展的道路上,正面临三大环环相扣的科学瓶颈。

1)“界面/强度悖论”。对于碳纤维而言,其表面高度石墨化的化学惰性层导致其与极性树脂基体浸润性差、界面结合弱^[5],尽管等离子体处理、化学氧化、表面接枝等改性策略通过引入表面粗糙度与活性官能团可有效增强界面结合,但剧烈处理往往诱发表面缺陷,显著牺牲纤维本征拉伸强度^[6-7]。如何在强界面结合与高纤维强度保留间取得有效平衡,是界面科学亟待破解的核心难题。

2)“结构-功能”间的矛盾。在导热、电磁屏蔽与吸波

等需求驱动下,CFRP正由单一承载结构向结构-功能一体化演进,但高导电/导热功能相(如碳纳米管(CNT)、石墨烯、磁性纳米粒子)的引入,常导致团聚、界面热阻、阻抗失配或磁导率不协同,进而使力学性能与功能特性此消彼长^[8-9]。更深层的科学问题在于聚丙烯腈基碳纤维(PAN)的一维前驱体拓扑结构与其理想石墨二维微晶之间存在内在的拓扑失配,从根本上制约了轴向热导率的进一步提升^[10]。如何从微观拓扑设计出发,实现力学承载与热、电、磁功能的多尺度协同,是材料科学面临的重大挑战。

3)“生命周期的断裂”。传统热固性树脂(如环氧)固化后形成的不可逆三维交联网络,使退役CFRP中的高价值碳纤维增强体与树脂基体难以有效分离^[11]。现有回收技术(如热解、溶剂解)要么严重损伤纤维性能,要么

收稿日期:2026-05-19 修回日期:2026-06-29 网络出版日期:2026-08-01

基金项目:国家自然科学基金项目(52373085;52573090;U21A2095;52533017);湖北省中央引导地方专项项目(2025CSA001);湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T2024010);山东省自然科学基金重大基础科研项目(ZR2025ZD33);湖北省市场监督管理局技术保障专项项目(Hbscjj-JS2025001)

作者简介:黄子熙(2002—),男,硕士生。研究方向:碳纤维增强聚合物复合材料. E-mail:2515383233@wtu.edu.cn

* 通信作者:陈凤翔,教授, E-mail:fxchen_czx@wtu.edu.cn;徐卫林,中国工程院院士, E-mail:weilin_xu@wtu.edu.cn

成本高昂且会产生二次污染^[12]。“一次性使用”的线性模式不仅造成巨大的资源浪费,也与全球碳中和战略背道而驰^[13]。如何设计兼具优异服役性能与可控降解/重塑能力的新型树脂体系,并建立智能化的回收再制造技术,是打通 CFRP 全生命周期闭环的核心化学与工程问题^[14]。

上述三大瓶颈虽表现各异,但其深层联系均指向同一个物理与化学交汇点:纤维/树脂界面。界面既是应力由基体传递至纤维的必经通道,也是损伤萌生与扩展的首发位置;既是声子与电子跨越两相时必须穿越的势垒区域,也是电磁波在材料内部遭遇的第一道阻抗边界;既是化学降解反应最易触发的活性位点密集区,也是回收过程中纤维与树脂分离时最关键的断键界面。因此,界面科学是解决界面/强度悖论的直接手段,多功能协同是界面功能化设计的具体体现,闭环重构则是界面可逆设计的终极目标与前置约束,三者并非平行的研究方向,而是围绕“界面”这一共轭节点形成的层层递进闭环:结构基础决定功能上限,功能需求反推界面重构,可

逆设计又对界面强度和布局提出新的约束。

基于这一认识,本文第 2 节聚焦界面结合机制与改性策略的力学本质;第 3 节在此基础上,探讨如何在同一界面微区内统筹声子、电子与电磁波的输运以实现力学-功能协同;第 4 节将上述界面设计置于真实服役环境中检验其可靠性与耐久性;第 5 节则进一步追问:当服役结束后,界面能否被选择性解构,从而实现纤维、基体与功能相的高效分离与再制造?全文以此逻辑层层推进,力图揭示三大瓶颈在界面层面的物理化学本质及其协同解决路径。基于上述分析,本文从界面科学、多尺度功能设计与闭环重构 3 个层层递进的维度,系统解析碳纤维复合材料核心瓶颈的物理与化学本质^[15-18](图 1),并提出面向未来的技术路线图,未来重点方向包括:低损伤界面构筑技术、数据驱动的材料基因组方法、数字孪生赋能的智能制造,以及全生命周期绿色闭环。在界面科学、材料创制与智能制造 3 个维度上实现协同,推动 CFRP 从单纯的高性能结构材料向绿色化、智能化复合材料转变。

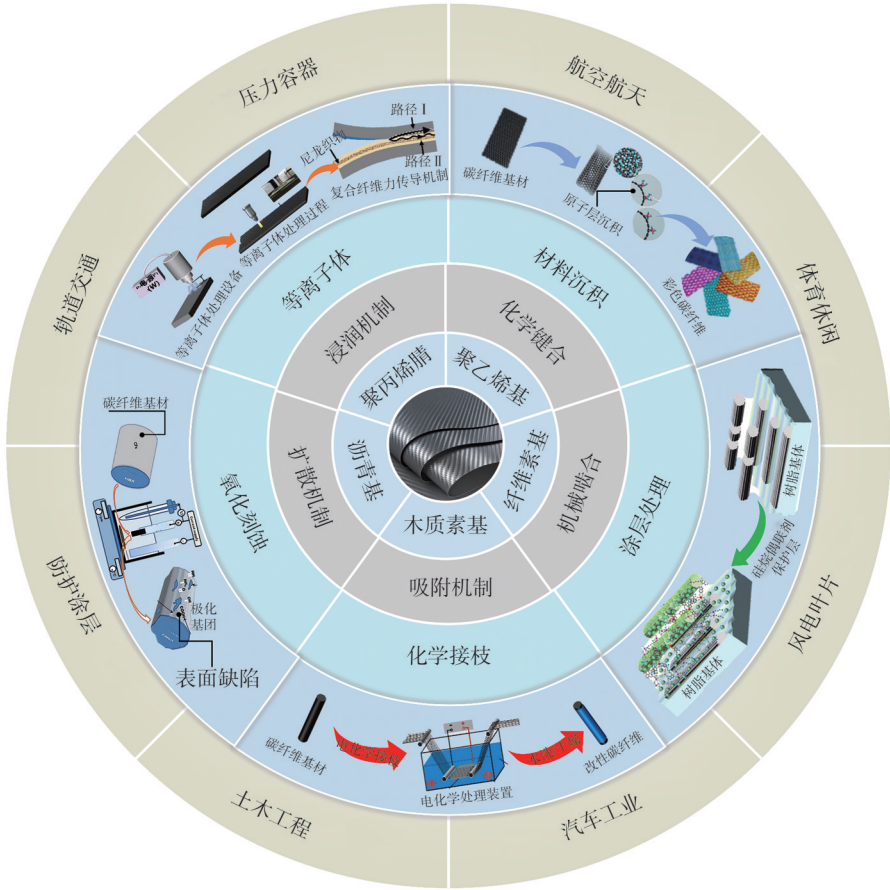


图 1 碳纤维改性种类、改性机制与方式以及典型应用领域^[15-18]

Fig. 1 Types of carbon fiber modification, modification mechanisms and methods and application fields^[15-18]

1 碳纤维的前驱体化学及其本征结构性能

理解不同前驱体体系的本征优势与当前难以超越

的性能边界,是进行界面工程与多功能化设计的前提^[19]。因为任何界面改性手段都无法超越纤维本征强度所决定的极限,任何功能化设计都必须在前驱体所决定

的热导率、电导率等物理极限内展开,而回收价值的高低首先取决于纤维本征性能在服役后的保留程度^[20]。本节从源头揭示碳纤维性能的物理极限,为后续界面调控策略的可行域划定边界。

目前,PAN基碳纤维凭借其优异的综合力学性能占据全球90%以上的碳纤维产能,尽管沥青基、纤维

素基、木质素基及聚乙烯基等替代前驱体在特定性能维度(如模量、导热、成本、可再生性)上各具特色^[21],然而,每种前驱体都有着核心的科学瓶颈,这些局限源于其分子链拓扑结构、热解化学路径及结晶动力学的根本约束。图2为不同前驱体碳纤维材料的微观结构转变^[22-26]。

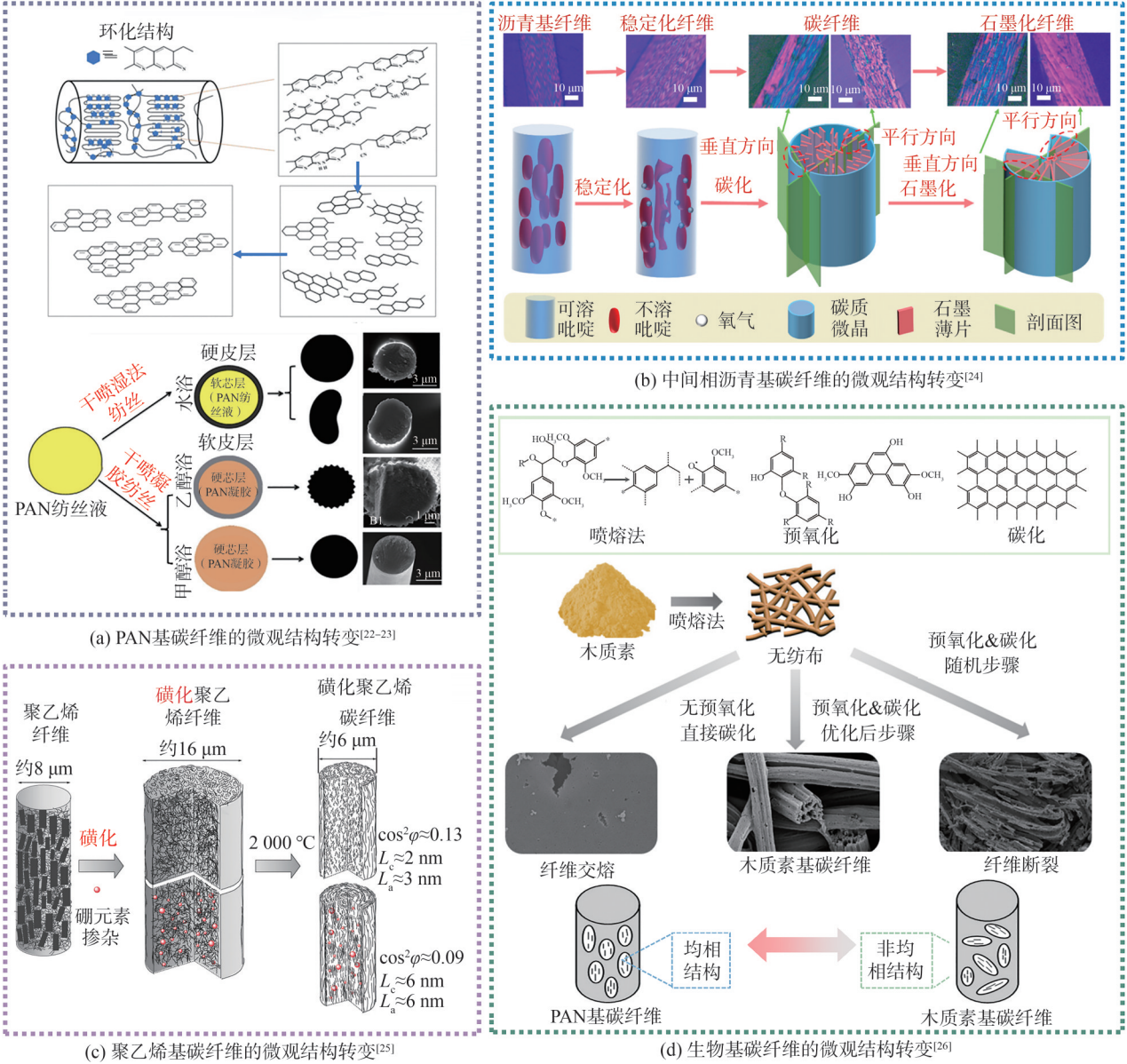


图2 不同前驱体碳纤维材料的微观结构转变^[22-26]

Fig. 2 Microstructural transformations of carbon fiber materials derived from different precursors^[22-26]

1.1 PAN基碳纤维

PAN基碳纤维的核心优势在于其经热稳定化(环化、脱氢、氧化)后形成的耐热梯形结构,该结构能够有效抑制高温碳化过程中的分子链松弛,从而保留高度取向的碳骨架,赋予纤维超高强度(可达7 GPa以上)^[22-23](图2(a))。然而,正是这一梯形结构,成为后续石墨化的障碍。PAN分子链在热解过程中会形成“局部分子取向团簇”,这些团簇尺寸小、取向分散,且

其平移和旋转的活化能极高,即使在3 000℃以上的超高温石墨化处理中,这些无序团簇也难以重排为大尺寸、高取向度的二维石墨微晶。因此,尽管PAN基碳纤维强度卓越,但其石墨微晶尺寸通常仅局限在几纳米,层间距较大,严重制约了轴向热导率和电导率的进一步提升^[27]。换言之,PAN基碳纤维“高强度/低导热”的性能组合并非工艺缺陷,而是由其前驱体化学本性所决定的内在属性^[28]。

1.2 沥青基碳纤维

中间相沥青基碳纤维(MPCF)的前驱体由多环芳烃分子组成,这些分子在熔融状态下已具有高度的 π - π 堆叠预取向^[29]。在碳化和石墨化过程中,这种预取向结构能够直接演变为大尺寸、高有序度的石墨晶粒(层间距接近理想石墨的0.335 4 nm),从而实现极高的弹性模量(>900 GPa)和优异的热导率(可超过800 W·m⁻¹·K⁻¹)^[24](图2(b))。然而,沥青基碳纤维(PF)的拉伸强度(通常为2~4 GPa)显著低于PAN基碳纤维。其根源在于:1)熔融纺丝过程中,纤维截面易形成皮芯结构,皮层因快速冷却而具有较高的分子取向,芯层则取向较低,导致径向性能不均^[30];2)多环芳烃分子间缺乏强共价交联,在热解过程中容易产生微孔和微裂纹等结构缺陷。因此,沥青基碳纤维存在易石墨化(即分子高度预取向)与高力学强度(需要强分子间键合与低缺陷密度)间的本征矛盾^[31]。

1.3 聚乙烯基碳纤维

聚乙烯(PE)纤维可通过强酸(如浓硫酸、发烟硫酸)磺化处理实现热稳定化,再经碳化转化为碳纤维。该路线的优势在于原料廉价、碳收率高(可达75%),且借助高倍牵伸可获得一定的模量(约139 GPa)^[25](图2(c))。图2(c)中: φ 为石墨微晶的C轴(垂直于石墨烯片层的法线方向)与纤维轴向之间的夹角,其越接近0说明石墨片层排布越整齐,用 $\cos^2\varphi$ 描述石墨微晶沿纤维轴向择优取向程度; L_a 为二维平面内石墨层平均尺寸; L_c 为相邻石墨层堆叠在一起的平均数量,即堆叠厚度。然而,其致命缺陷在于磺化工艺本身:强腐蚀性酸液不仅对设备要求苛刻、环境风险高,更关键的是,磺化反应是非均相的,酸液优先渗透纤维表层,形成皮部过度磺化、芯部磺化不足的径向不均匀结构。碳化后,这种不均匀性转化为皮芯差异大的脆性碳纤维,力学性能批次间重复性极差^[32]。由于磺化剂的扩散速率与磺化反应速率难以在全纤维截面上实现匹配,改性深度与均匀性无法精确控制。这一瓶颈迄今尚未被

有效突破,使得聚乙烯基碳纤维始终停留在实验室探索阶段。

1.4 生物基前驱体

生物基前驱体(如纤维素和木质素)作为自然界储量最丰富的可再生高分子,因其低碳足迹和原料廉价性而受到关注^[33]。然而,生物基前驱体的热转化行为与PAN截然不同。纤维素在热解过程中经历剧烈的脱水、脱羰基以及糖苷键断裂,伴随大量挥发性产物(如CO、CO₂、H₂O)的释放,碳收率极低(通常<30%),且形成的碳骨架高度无序^[34]。木质素虽含碳量较高($\geq 60\%$),但其复杂的三维网络结构导致分子量分布宽、熔融流动性差,且热稳定化过程中交联反应难以均匀控制,易产生孔隙和杂质富集^[26](图2(d))。天然高分子的这种化学异质性与热解反应的非均一性,导致碳纤维的力学性能(拉伸强度通常为0.3~1.2 GPa)远低于PAN基碳纤维^[35]。单纯通过工艺优化(如调整纺丝参数、稳定化升温速率)只能有限改善,在当前技术条件下难以从根本上改变其低强度、低模量的本征局限^[36]。因此,生物基碳纤维目前仅适用于对力学载荷要求较低、但对环保性要求高的非承力结构件。

综合上述分析,碳纤维前驱体的选择本质上是在力学性能、导热/导电功能、成本/可持续性三者之间进行权衡。任何单一前驱体体系都难以同时满足这3个维度的极致要求(见表1)。PAN基碳纤维占据绝对主流,但其导热瓶颈亟待突破^[37];沥青基碳纤维在热管理领域不可替代,但强度不足限制了其承载应用^[38];生物基和聚乙烯基路线虽有绿色或成本优势,但性能劣化问题尚未解决^[39]。未来的突破不可能单纯依赖某一前驱体的改性,而需要跨体系的协同策略。例如,将PAN与沥青共混,或在PAN前驱体中引入石墨烯晶种,以缓解拓扑不匹配。同时,对于绿色前驱体,需要从分子设计源头,如木质素的化学改性、纤维素的共聚等,重构其热解路径,而非仅优化现有工艺。

表1 主要碳纤维前驱体的本征性能边界与核心科学瓶颈

Table 1 Intrinsic performance boundaries and core scientific bottlenecks of major carbon fiber precursors					
前驱体类型	拉伸强度/GPa	弹性模量/GPa	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	成本/可持续性	核心科学瓶颈
PAN基	>7.0	230~500	<20.0	中/非可再生	一维链与二维晶格的拓扑不匹配
沥青基	2.0~4.0	>900	>800.0	低/石化副产品	取向-键合矛盾及皮芯结构
纤维素/木质素基	0.3~1.2	25	5.0~15.0	低/可再生	热解的异质性与非均相缺陷
聚乙烯基	1.2~2.4	~139	1.7~2.0	低/石化基	磺化反应的扩散-反应竞争

2 界面科学

前驱体所设定的本征性能极限,必须通过纤维与基体之间的界面才能转化为复合材料的实际承载能力。碳纤维与树脂基体之间的界面是决定CFRP综合

性能的关键,它既是载荷传递的通道,也是损伤萌生的源头^[40-41]。然而,碳纤维表面的石墨化惰性层使其与极性树脂基体的浸润性极差,原生界面仅依赖微弱的范德华力,导致复合材料在受力时界面过早脱黏^[8,42]。因此,界面工程的核心科学目标可概括为:在

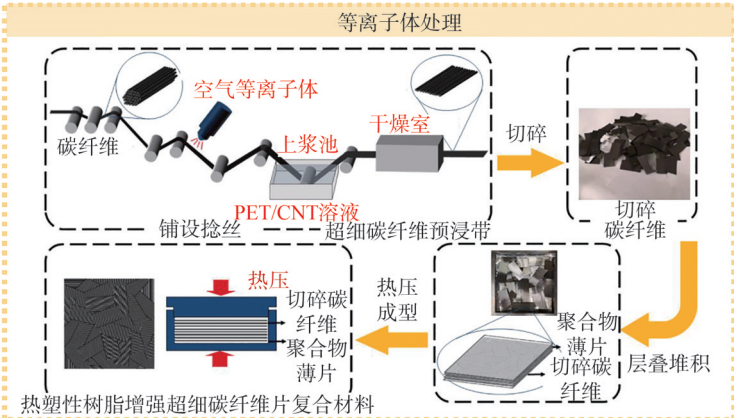
不损害纤维本征强度的前提下,最大化界面结合能,并实现载荷在界面处的平顺传递^[43]。本节从界面结合机制的基本分类出发,系统剖析各类改性的物理化学本质,并批判性评估其效能与代价间的权衡。

2.1 界面结合机制的分类及其力学内涵

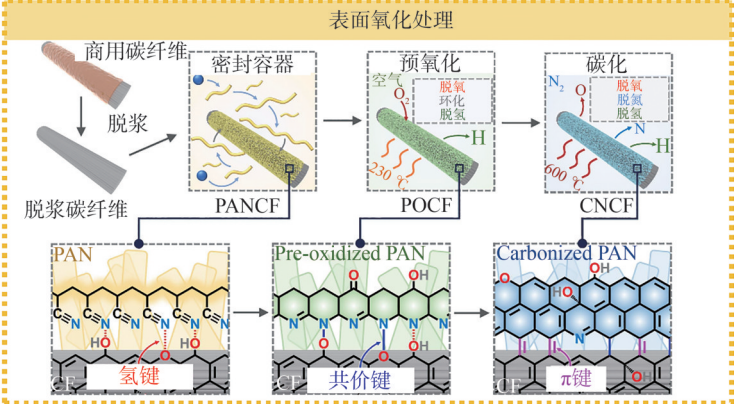
根据主导作用力的尺度与性质,碳纤维/树脂界面结合机制可分为3类:物理锚固(机械互锁与浸润)、分子间作用(吸附与扩散)以及化学键合(共价键)。3类机制的力学贡献不同,且在不同载荷模式下主次关系会发生转换。图3为碳纤维材料不同的表面改性措施^[44-48]。

2.1.1 物理锚固:浸润与机械互锁的增效

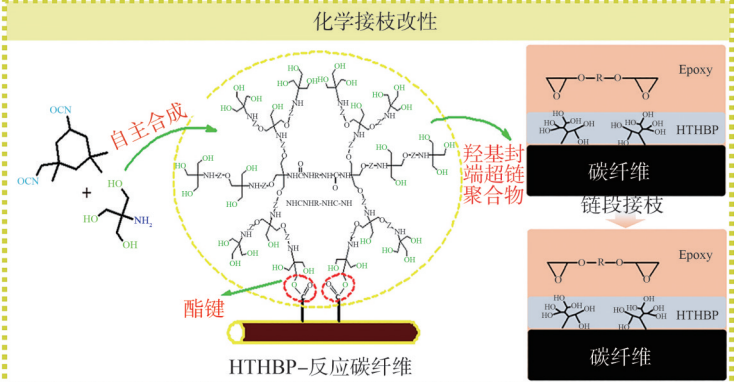
浸润是实现有效复合的前提,只有当树脂能够充分铺展并填充纤维表面的微纳沟槽,才能避免固化收缩产生的界面孔隙^[49]。一般而言,纤维表面与树脂表面张力的匹配程度决定了浸润的优劣^[50]。上浆剂处理是改善浸润性的经典手段,例如,Zhong等^[51]发现,聚醚醚酮(PEEK)上浆剂可引导树脂渗入碳纤维的纵向凹槽,扩大实际接触面积并诱导基体结晶。Yang等^[44]利用等离子体处理和上浆剂处理成功制备了碳纤维增强的聚醚酰亚胺(PEI)复合材料(图3(a)),其层间



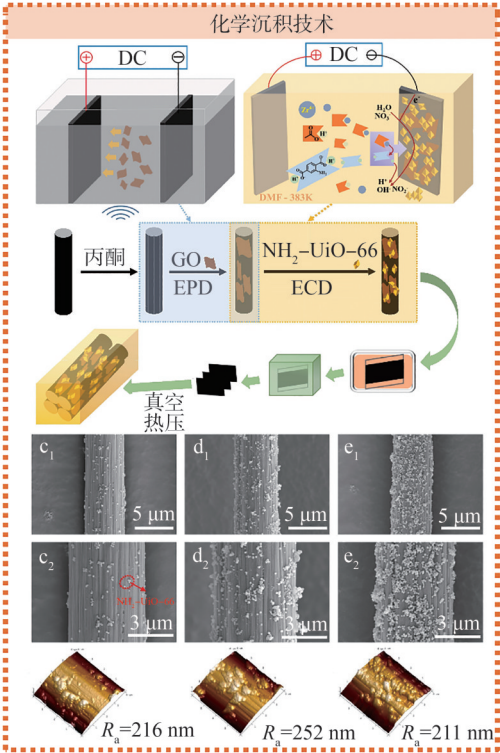
(a) 碳纳米管改性切碎超薄碳纤维增强热塑性PET层压板的制备过程示意图^[44]



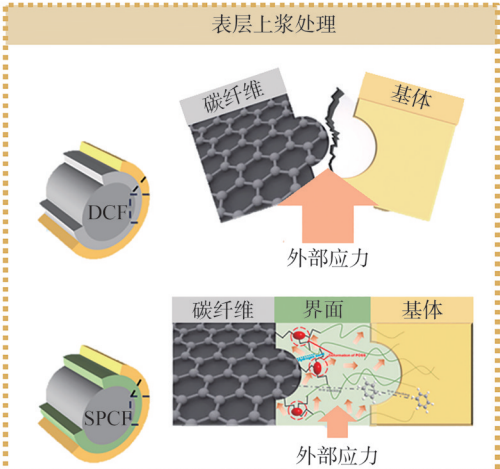
(c) 碳纤维表面垂直纳米片层的制备流程及其分子结构转变^[46]



(d) 碳纤维-HTHBP的制备路线^[47]



(b) 碳纤维表面电化学组装及复合材料制备过程的示意图^[45]



(e) 碳纤维热塑性复合材料的界面增强机理^[48]

图3 碳纤维材料不同的表面改性措施^[44-48]

Fig. 3 Different surface modification measures of carbon fiber materials^[44-48]

剪切强度、拉伸强度和杨氏模量,与未改性的碳纤维/聚对苯二甲酸乙二醇酯(CF/PET)复合材料相比,分别提高了41.9%、40.7%和68.9%。

机械互锁则是通过增加纤维表面粗糙度,使固化后的树脂嵌入微观凸起中,形成锚固结构。在剪切载荷下,这些互锁结构产生的摩擦阻力能有效遏制界面滑移。Hoang等^[52]的精细力学实验揭示了一个重要规律:在法向拉伸载荷下,界面响应主要依赖化学键合;而在剪切载荷下,随着微滑移的发生,主导机制会逐渐从化学键合转变为机械互锁。这意味着,表面粗糙度对剪切性能的贡献可能超过化学官能团的贡献,但过高的粗糙度也会成为应力集中源,诱发纤维表面微裂纹。

2.1.2 分子间作用:吸附与扩散机制的协同

在前述三大界面结合机制中,分子间作用属于介于物理锚固(粗糙度主导的机械互锁)与化学键合(共价键主导的强连接)之间的中间层次。其物理本质在于:纤维表面与树脂分子之间通过非共价键的相互作用(如氢键、 π - π 堆积、静电吸引等)以及分子链段的相互渗透与缠结,在界面区域形成一个具有有限厚度(通常为几纳米至几十纳米)的“分子互穿层”。该互穿层的存在既是化学键合发生的前置条件(只有分子充分接触,共价反应才能有效进行),也独立地贡献着界面结合强度。

具体而言,分子间作用可由两种机制协同承担:吸附机制与扩散机制。

吸附机制主要依赖氢键、 π - π 堆积及静电相互作用等非共价键力,在纤维表面形成初级界面结合。Park等^[53]利用带相反电荷的纳米粒子通过静电吸附实现了逐层自组装,构建了结构可控的界面层。值得注意的是,吸附机制的有效性取决于纤维表面能、树脂的表面张力以及二者之间的极性匹配程度。匹配得越好,则吸附越强、界面结合越致密。

扩散机制则强调树脂分子链向纤维表面微孔中的渗透,形成分子级别的物理缠结。该机制的有效性取决于两个条件:1)树脂分子链的尺寸须小于纤维表面微孔的孔径;2)分子链的运动能力(取决于温度与分子量)须足以在复合过程中完成向微孔内的迁移^[54]。因此,扩散机制在热塑性树脂体系(分子链较长、运动能力受温度影响显著)中尤为重要。

吸附机制与扩散机制在力学贡献上虽远弱于共价键,但二者具有显著的协同效应:吸附作用通过非共价键确保纤维与树脂在分子尺度上紧密接触,为扩散提供热力学驱动力;扩散缠结则通过链段互穿增强界面层的机械嵌合,反过来又增大了吸附作用的有效面积。二者共同构成化学键合的物理基础,只有当树脂分子与纤维表面充分接触并互穿时,后续的共价反应才能有效发

生。也正是基于这一认识,业界普遍将改善浸润性作为界面工程的第一步,浸润不良则吸附不充分,吸附不充分则扩散无通道,扩散无通道则化学键合无从发生。

2.1.3 化学键合:最强界面的分子设计

共价键因键能极高,被认为是最有效的界面连接方式之一。其实现路径是:通过表面改性在碳纤维上引入羟基($-\text{OH}$)、羧基($-\text{COOH}$)、氨基($-\text{NH}_2$)等活性官能团,这些官能团在复合过程中与树脂基体(如环氧的环氧基)发生开环加成或缩合反应,形成共价桥联^[55]。而将二维材料(如氧化石墨烯,GO)与三维金属有机框架(MOF)在纤维表面进行协同组装,是近年来实现多机制界面增强的代表性策略。其核心思路在于二维材料通过 π - π 堆积与纤维基底形成牢固结合,同时其表面丰富的含氧官能团可作为MOF原位生长的成核位点,最终形成的异质涂层可同时提供机械互锁(MOF的粗糙表面)、 π - π 相互作用(GO与纤维之间)以及配位键(MOF金属簇与树脂极性基团之间)三重增强机制。Zhao等^[45]基于这一思路在碳纤维表面构建了GO/铅基金属有机框架($\text{UiO}-66$)复合涂层,使复合材料的层间剪切强度提升超过70%(图3(b))。图3(b)中,DC为直流电源,EPD为电泳沉积,ECD为电化学沉积; c_1 和 c_2 为样品G-N-CF-1(电沉积1 min)在不同尺寸下的SEM图像; d_1 和 d_2 为样品G-N-CF-2(电沉积3 min)在不同尺寸下的SEM图像; e_1 和 e_2 为样品G-N-CF-3(电沉积5 min)在不同尺寸下的SEM图像。 R_a 为样品表面的算术平均粗糙度。然而,需要注意的是,此类异质涂层的长期服役稳定性受限于各组分间热膨胀系数的差异,这一局限性在目前的文献中尚缺乏系统评估。

此外,Sun等^[46]借助气相氧化技术,在碳纤维表面原位构筑了垂直排列的碳纳米片(图3(c))。该碳纳米结构不仅通过 π - π 堆积作用与碳纤维基底实现牢固结合,还依托其表面的活性官能团及纳米级粗糙度,与树脂基体建立起高效的化学键合与机械互锁。图3(c)中,PANCF为垂直聚丙烯腈链碳纤维,POCF为预氧化碳纤维,CNCF为碳化后碳纤维。对于化学键合机制,Demir等^[56]的分子动力学模拟表明,共价接枝密度与界面剪切强度呈正相关,但存在饱和阈值,超过阈值后,过度接枝反而会因界面层过刚而引发脆性断裂。

综合上述3类机制,其力学贡献呈现出清晰的层次性:化学键合提供最高的界面结合强度,但代价是纤维表面石墨层的结构损伤;机械互锁在剪切载荷下贡献显著,但过度粗糙化会造成应力集中;分子间作用(氢键、 π - π 堆积等)虽强度有限,却能在不损伤纤维的前提下改善浸润与界面相容性。三者的协同并非简单的叠加效应:化学键合需要表面活化作为前提,而表面活化又不

可避免地改变纤维的微观形貌,进而影响机械互锁的强度与分子间作用的密度。因此,界面设计的本质是在这 3 类机制之间根据具体应用需求进行权重分配,而非追求单一机制的极致。这一认识构成了第 2.2 节对各改性策略进行批判性评估的理论基础。

表 2 碳纤维表面改性策略的比较分析

Tab. 2 Comparative analysis of carbon fiber surface modification strategies

策略类别	代表技术	主导机制	ILSS 提升率	强度保留率	科学痛点	工业潜力	参考文献 编号
上浆剂工程	水性环氧/聚酰亚胺涂层	浸润改善+应力缓冲	20%~40%	>95%	界面层厚度与载荷传递效率的优化	极高	[57-59]
高能物理法	氧/氩等离子体	化学键合+浸润改善	25%~40%	75%~90%	时效性衰退(表面自由基重组)	中	[60-61]
湿化学氧化	液相/电化学氧化	化学键合+粗糙化	20%~50%	70%~85%	不可逆的纤维强度损失(表面缺陷诱导)	高	[62-63]
化学接枝	聚合物/纳米粒子接枝	共价键+机械互锁	>70%	>90%	反应条件苛刻、接枝密度难控	中	[64]
纳米相沉积	CVD 生长 CNT	纳米机械互锁	>90%	80%~90%	催化剂污染、晶体质量与生长效率矛盾	低	[65-66]

表 2 中,层间剪切强度(ILSS)提升率统一按公式计算:

$$R_{ILSS} = \frac{S_{ILS} - S_{ILS,0}}{S_{ILS,0}} \times 100\%$$

(1)

式中, R_{ILSS} 为 ILSS 提升率, S_{ILS} 为改性后的 ILSS, $S_{ILS,0}$ 为改性前的 ILSS。

各策略的 ILSS 提升率范围为基于本文所引用文献中同类方法的汇总统计,由于各研究采用的碳纤维型号(以 T300、T700、T800 系列为主)、树脂体系(以环氧树脂 E51、E44 系列为主)、测试标准(ASTM D2344 或 ISO 14130)存在差异,所以具体数值在上下限区间内波动。所列范围为各策略的典型可达区间,非精确极值。

纤维强度保留率基于单丝拉伸测试(参照 ASTM D3379)或复丝浸胶纱线测试(参照 ASTM D4018),按改性后单丝拉伸强度与未改性纤维拉伸强度之比计算。测试条件为室温(23±2℃)、相对湿度(50%±5%)。湿化学氧化和等离子体处理因对纤维表层石墨晶格的刻蚀作用,强度保留率相对较低(70%~85%);上浆剂工程因不涉及对纤维本体的化学攻击,强度保留率最高(>95%)。

工业化潜力综合评估有 4 项指标:设备投资成本、工艺窗口宽度(对工艺参数的容忍度)、规模化可行性(能否适配现有产线)以及环境合规性(废液/废气处理难度)。分级标准为:极高表示已大规模工业应用;高表示工艺成熟但存在特定瓶颈;中表示实验室验证可行,中试阶段;低表示实验室阶段,规模化障碍显著。

适用体系说明:表 2 数据主要基于 PAN 基碳纤维(T300-T800 级)与热固性环氧树脂体系。若涉及热塑性基体(如 PEEK、聚酰胺 6(PA6)、PET)或沥青基/生物基纤维,表中数值可能存在显著偏差,需结合具体体系另行评估。例如,PEEK 基体因熔体黏度高(10³~

2.2 关键改性策略评估

基于上述机制,研究者发展了多种表面改性技术。本节不进行技术罗列,而是从界面增强效果与纤维强度保留率两个维度,对主流策略进行批判性评估(表 2)。

10⁴ Pa·s),上浆剂对浸润改善的效果可能低于环氧体系;而沥青基碳纤维表面石墨化程度更高,化学氧化接枝的效率与 PAN 基纤维亦有差异。

需要特别指出的是,表 2 所汇总的各策略 ILSS 提升率和纤维强度保留率,仅供相对趋势参考,不宜作为绝对性能指标进行跨研究直接比较。表 2 的价值在于揭示不同策略在“增强幅度-纤维损伤-工业化可行性”三者之间的相对定位和典型权衡关系,而非提供可直接跨研究引用的精确数值。读者在引用表 2 数据时,建议回溯原始文献,结合具体的纤维型号、树脂体系、测试标准和试样制备条件进行综合判断。

表 2 的数据揭示了一个重要但常被忽视的事实:不存在一种在所有维度上均占优的改性策略。上浆剂工程以最小的纤维损伤代价(强度保留率>95%)实现了可观的界面增强(ILSS 提升 25%~40%),但其增强幅度受限于物理浸润和弱化学作用,难以突破基体与纤维间极性匹配所设定的上限^[67]。当应用场景对界面强度有极致要求(如航空主承力结构)时,共价接枝或碳纳米相沉积成为必要选择,但代价是纤维强度保留率下降,且工艺复杂度和成本大幅攀升^[68]。更值得关注的是各策略的适用边界:等离子体处理的时效性衰退(表面自由基在数小时内重组)使其难以适配需要长时间仓储的预浸料工艺^[69];湿化学氧化的废液处理成本使其在环保法规严格的地区面临产业化障碍;化学气相沉积(CVD)生长的碳纳米管虽能同时赋予界面增强与导电功能^[70],但催化剂残留对复合材料长期湿热老化性能的影响迄今缺乏系统研究。

上述分析表明,界面改性策略的选择本质上是“增强幅度-纤维损伤-工艺复杂度-环境合规性”的四维权衡,而非简单的“哪个效果更好”的线性比较。这一认识贯穿本文后续多功能化设计与回收策略的讨论。

2.3 多尺度界面设计研究进展

单一机制的界面修饰往往顾此失彼。近年来,研究者开始探索多尺度、多机制的协同界面设计,其中最关注的是梯度界面层策略,即在纤维表面从内向外构建模量渐变的过渡区,内层(近纤维)高模量、强化学键合以高效传递应力^[71-72]。外层(近基体)低模量、高韧性以缓冲应力集中、抑制裂纹扩展。Shi等^[47]通过一步共缩聚法在碳纤维表面合成了端羟基超支化聚合物(HTHBP),其丰富的枝化结构提供了大量的共价接枝位点,同时柔性链段缓冲了界面应力(图3(d))。类似的,Wu等^[48]开发的自乳化聚酰亚胺(S-PI)上浆剂中引入八氨基丙基多聚硅氧烷(OA-POSS),成功在碳纤维表面构建了梯度承载结构,使复合材料的冲击强度和弯曲强度分别提升60.8%和43.1%(图3(e))。图3(e)中,DCF为脱浆碳纤维,SPCF为树脂复合碳纤维。

需要指出的是,上述多机制界面设计在提升力学性能的同时,也为多功能协同与闭环回收奠定了基础:功能相(如碳纳米管、磁性纳米粒子)在界面层中的空间定位,本质上依赖于第2.1节所述的共价接枝或物理锚固提供的“锚定位点”。如果将动态共价键引入界面层,则其既能

在服役期间通过键交换提供能量耗散,又能在回收阶段响应外部刺激发生选择性断裂,从而实现纤维/基体的温和分离。换言之,界面结构设计从一开始就应兼顾功能传递通道的预留与可逆断键位点的预设,这是界面科学从“单一力学优化”走向“全生命周期设计”的关键转变。

3 碳纤维复合材料结构/功能一体化

如果说第2节回答了“如何构筑一个强而韧的界面”这一问题,那么本节将追问同一个界面能否同时承担力学载荷传递与热、电、磁功能协同的双重使命,在第2节建立的界面设计原则基础上,本节进一步探讨如何在同一界面微区内统筹声子、电子和电磁波的输运行为,以实现力学-功能协同。

随着碳纤维增强聚合物复合材料从单一承载结构向多功能工程材料演进,赋予其导热、电磁屏蔽及吸波等附加功能已成为前沿研究热点,但功能相的引入往往以牺牲力学完整性或界面相容性为代价^[73-74]。本节立足能量输运(声子与电子)以及电磁波与物质相互作用的物理本质,系统揭示碳纤维复合材料功能化设计的微观机制与多尺度拓扑调控原则。图4为碳纤维多功能化与改性方法^[75-85]。

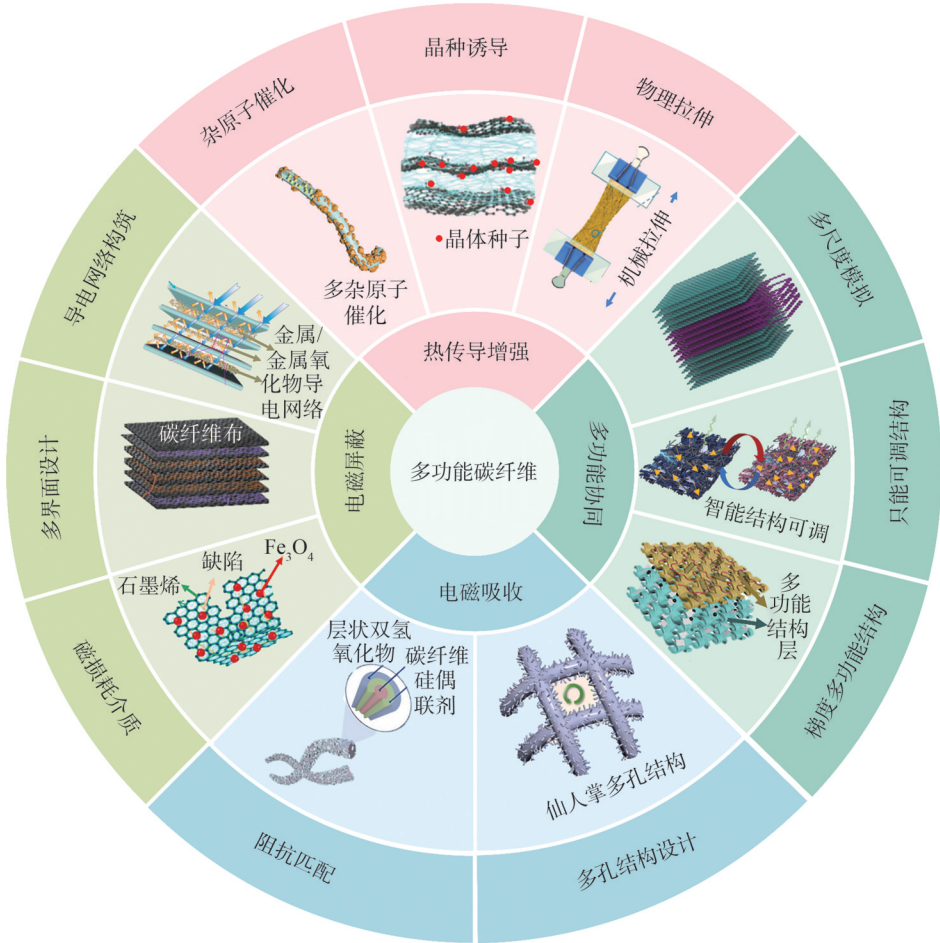


图4 碳纤维多功能化与改性方法^[75-85]

Fig. 4 Methods for functionalization and modification of carbon fibers^[75-85]

3.1 热传导

3.1.1 碳纤维热导率的物理本质

在非金属材料中,热传导主要依赖声子(晶格振动)。碳纤维的轴向热导率对石墨微晶的尺寸和取向度高度敏感,晶粒越大、取向越一致,声子散射越弱,热导率越高。理想石墨的热导率可超过 $2\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [86]。然而,如前所述,PAN基碳纤维中石墨微晶尺寸仅数纳米

且取向分散,导致其轴向热导率通常低于 $20\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,这一“低导热”并非工艺缺陷,而是PAN前驱体一维链状拓扑与二维石墨晶格之间拓扑不匹配的直接结果[87]。相比之下,中间相沥青基碳纤维因前驱体多环芳烃的预取向结构,可直接演化为大尺寸($>50\text{ nm}$)、高取向的石墨晶粒,热导率可达 $500\sim 800\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [54]。图5为碳纤维多功能化改性[85,88-89]。

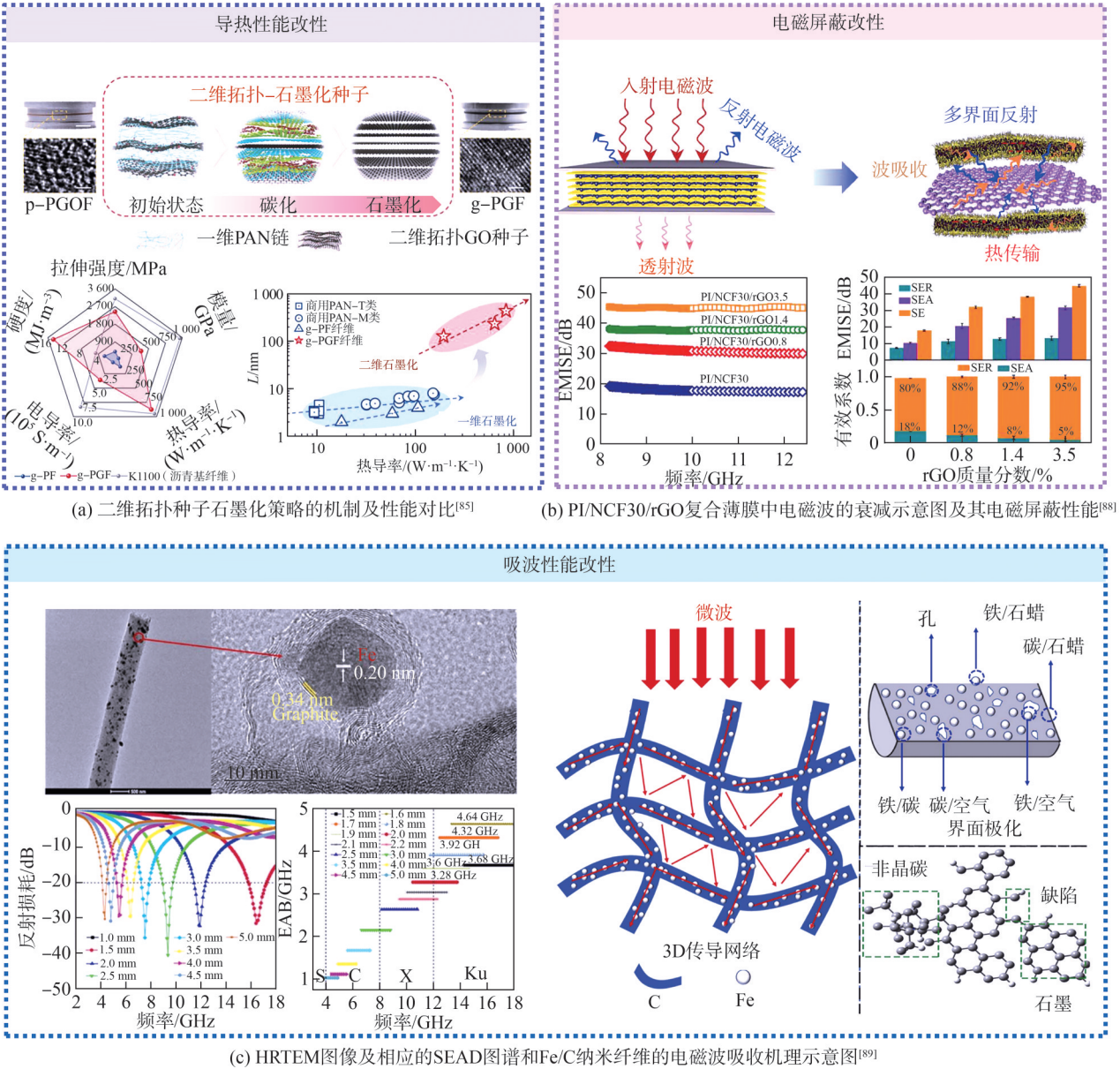


图5 碳纤维多功能化改性^[85,88-89]

Fig. 5 Multifunctional modification of carbon fiber^{85,88-89]}

3.1.2 提升PAN基碳纤维热导率的策略

针对上述瓶颈,研究者已发展出3种主要改性策略,其科学内涵与局限性分述如下。

1)物理拉伸诱导取向。该策略通过在碳化过程中施加轴向张力,促使PAN分子链沿纤维轴向择优排列[90]。然而,物理拉伸难以完全克服PAN在高温下的热松弛

效应及其本征石墨化能力不足的内在缺陷,最终所得石墨微晶的尺寸仍被限制在数纳米量级[91]。此外,取向度的提升存在理论上限,且该手段并未触及前驱体化学结构的本质改造,因而对热导率的改善幅度有限[92]。

2)杂原子催化石墨化。该策略通过在PAN前驱体中掺杂硼、磷等杂原子,降低石墨化过程的活化能垒,

从而促进晶粒生长^[93-94]。然而,杂原子的引入不可避免地诱发晶格畸变,并在碳基体中形成残留杂质相,后者将作为额外的声子散射中心,削弱碳纤维的本征导热能力^[25]。

3) 纳米碳材料“晶种”诱导石墨化。该策略将氧化石墨烯或碳纳米管等二维纳米碳相作为晶种引入 PAN 前驱体,利用其表面外延效应诱导 PAN 热解产物沿晶种边缘有序生长,进而获得更大尺寸与更高取向度的石墨晶粒。Ming 等^[85]提出的“二维拓扑种子石墨化”策略是这一思路的成功范例,氧化石墨烯晶种的引入使 PAN 基碳纤维的石墨晶粒尺寸从约 5 nm 增至 20 nm,轴向热导率相应提升 3~5 倍(图 5(a))。图 5(a)中,p-PGOF 代表 PAN/GO 前驱体原丝;g-PGF 代表石墨化 PAN/GO 碳纤维;g-PF 为石墨化纯 PAN 基碳纤维;L 为碳纤维直径。

上述 3 种策略代表了提升 PAN 基碳纤维热导率的不同技术路径。物理拉伸在不改变前驱体化学本质的前提下仅通过工艺优化挖掘现有体系的极限潜力,但其改善幅度受限于 PAN 分子链热松弛的本征行为。杂原子催化石墨化试图从化学反应动力学入手降低石墨化能垒,但催化元素残留对声子传输的散射效应往往抵消了晶粒长大带来的导热增益,使得该策略的实际效果高度依赖于掺杂浓度与工艺条件的精确控制。纳米碳晶种诱导石墨化通过引入外源性二维模板从根本上缓解前驱体的拓扑失配,其热导率提升幅度(3~5 倍)显著优于前两者。然而,该策略的工业化面临晶种在 PAN 基体中的均匀分散、晶种与基体间的界面结合以及额外工序带来的成本增加等三重挑战。

从适用场景来看:物理拉伸适用于对成本敏感、对导热性能要求不高的通用级碳纤维;杂原子催化适用于中等性能提升且可接受一定杂质残留的场景;纳米碳晶种策略则最适合高端热管理领域,其额外成本可由导热性能的大幅提升所覆盖。3 种策略并非替代关系,而是分别对应于不同的性能/成本区间。

3.1.3 复合体系中的界面热阻问题

在 CFRP 中,纤维-基体界面的热阻问题是热传递的另一个瓶颈。由于聚合物基体的热导率通常低于 $0.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,且界面处存在声子失配和界面缺陷导致的声子散射(例如碳纤维/环氧树脂复合材料中界面热阻可占总热阻的 40% 以上),界面热阻对复合材料整体热导率的制约极为显著。因此,构建连续的、低界面热阻的导热通路至关重要^[95]。

Kumar 等^[96]采用 3 ω 方法对单根碳纤维/环氧树脂界面的热阻进行了直接实验测量,发现裸纤维与环氧之间的平均界面热阻约为 $18 \text{ mm}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$;而通过微

波等离子体化学气相沉积在碳纤维表面生长二维石墨烯纳米花瓣后,界面热阻可降至约 $3 \text{ mm}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$,降幅超过 80%。这一结果直接证明了界面改性在降低热阻方面的巨大潜力。

围绕如何降低界面热阻,近年来的研究主要形成了 3 类策略。其一,引入高导热界面层。Shen 等^[97]以硅烷偶联剂和银纳米颗粒对沥青基碳纤维进行协同改性后填充硅橡胶,在 20% 填充量下(填充后的质量分数),复合材料的热导率达到 $1.624 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,较未改性碳纤维填充的硅橡胶复合材料提升了 1.46 倍。该研究证实,银纳米颗粒在纤维表面形成的“桥接”结构可有效降低纤维-基体间的界面热阻。其二,构筑垂直取向导热结构。Zhang 等^[98]采用辊压法制备了垂直排列碳纤维/聚二甲基硅氧烷(PDMS)复合热界面材料,在 73.68% 填充量(填充后的质量分数)下实现了优异的纵向热导率($51.90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,为 PDMS 基体的 323 倍),通过液态金属改性表面接触层后,总热阻从 0.55 降至 $0.32 \text{ K} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ 。其三,设计液晶聚合物功能界面层。最近,研究者合成了一维棒状和二维盘状液晶高分子,并将其用于构筑 M40X 碳纤维/环氧树脂复合材料的“结构-功能一体化”界面层。实验表明,经二维盘状液晶高分子修饰后,复合材料的实验面外热阻和模拟界面热阻分别降低了 53.1% 和 52.9%,其核心机制在于多维液晶分子提供的多方向声子传输通道有效缓解了纤维与树脂间的声子散射^[99]。

值得注意的是,纤维自身的断裂损伤同样是制约复合材料热导率的重要因素。最新研究表明,单向碳纤维复合材料中纤维断裂所引入的附加热阻,是限制其可达热导率的主导因素。这一发现提示研究者,在追求高导热的同时需兼顾纤维在加工过程中的结构完整性保护。上述研究表明,降低界面热阻的核心在于“声子输运通道的构筑”与“声子散射的抑制”。无论是引入高导热纳米粒子、构筑垂直取向结构,还是设计液晶高分子界面层,其共同物理本质均是在纤维与基体之间建立一个声子谱匹配更好、缺陷密度更低、输运路径更连续的中介层。

热导率的提升必须与界面结合机制进行协同设计。若导热填料与基体之间仅靠弱范德华力结合,虽保留了分子链的运动自由度从而有利于能量耗散,却引入了巨大的界面热阻;而引入共价键等强界面作用,虽能构筑高效的声子输运桥,却会严重限制分子链段的运动与松弛,使界面层失去耗散应变能的韧性机制。这一矛盾的本质在于:界面结构同时控制着力学载荷传递(需要强键合)与声子/电子输运(需要低缺陷、低热阻),而这两者对界面化学键合密度与分子链

运动自由度的要求存在本征冲突。理想的界面设计需要在导热通路的连续性、界面化学键合密度与界面层韧性之间寻求最优平衡,这正是“界面结构”与“功能传递”耦合的具体体现。

3.2 电磁屏蔽性能

3.2.1 电磁屏蔽机制与碳纤维的导电优势

电磁屏蔽效能(SE)由反射损耗(SER)、吸收损耗(SEA)及多次反射损耗(SEM)三部分叠加构成,对于导电材料而言,屏蔽机制以表面反射为主导^[100]。碳纤维中 sp^2 杂化碳原子构成的高度离域 π 电子体系赋予其较高的轴向电导率,因而具备优异的电磁屏蔽潜力^[101]。然而,纯碳纤维复合材料面临两个科学问题:1)阻抗失配,过高的电导率导致电磁波在材料表面被强烈反射,而非进入内部被耗散,这对某些需要“吸收式屏蔽”的场景(如避免二次污染)是不利的^[102];2)单一损耗机制,缺乏磁损耗,难以实现对宽频段电磁波的高效衰减^[103]。

3.2.2 屏蔽效能提升的拓扑设计原则

针对上述局限,屏蔽效能的提升需遵循若干基于物理本质的拓扑设计原则。首先,碳纤维本体电导率有限,且纤维间非连续搭接必然引入接触电阻,因此构建三维连续导电网络成为首要任务^[104]。通过引入碳纳米管^[105]、石墨烯^[106]或MXene^[107-108]等高导电纳米填料,可在纤维间隙形成“导电桥接”结构,有效降低渗流阈值并提升体系整体电导率^[103]。例如,Wu等^[88]采用顺序双向冷冻浇铸结合热压工艺,将碳纳米纤维(NCF)接枝的碳纤维与还原氧化石墨烯(rGO)有序组装到聚酰亚胺(polyimide,PI)基体中,构建了高导电、高导热的三维网络(图5(b))。优化的PI/NCF30/rGO3.5复合薄膜凭借高导电性实现了45 dB的优异电磁干扰(EMI)屏蔽效能(EMISE)。

此外,进一步引入磁损耗介质可拓展电磁波衰减机制。采用化学镀或电沉积等方法在碳纤维表面包覆镍、铁氧体等磁性组分,可同时引入磁滞损耗与涡流损耗,弥补单一介电损耗的不足^[109]。Zhu等^[110]在碳纤维毡表面实施化学镀镍并借助聚多巴胺自聚合强化界面结合,显著提升了复合材料的总屏蔽效能。需要指出的是,磁性颗粒的引入将增加体系密度并可能劣化力学性能,因此,颗粒尺寸、空间分布及含量的系统优化是发挥协同效应的关键。

最后,引入多界面设计增强多次反射。在复合材料中构建多层结构或引入气隙(例如,交替堆叠导电层与绝缘层,或设计蜂窝/泡沫芯结构),可使电磁波在层间发生多次反射和散射,延长传播路径,增加吸收概率^[111-112]。

3.3 吸波性能

3.3.1 吸波物理基础与碳纤维的阻抗失配局限

吸波材料的核心要求在于使电磁波有效进入材料内部并经历充分衰减而不发生表面反射,其性能由复介电常数与复磁导率两个关键参数共同决定^[113-114]。理想吸波体须同时满足阻抗匹配与高衰减能力两项条件:前者要求材料本征波阻抗与自由空间波阻抗尽可能接近以抑制表面反射,后者则要求电磁波进入后通过介电损耗与磁损耗迅速转化为热能^[115-116]。纯碳纤维具有较大的介电常数实部与虚部,但其磁导率实部接近于1、虚部近乎为0,导致阻抗严重失配,电磁波在抵达表面时即被大量反射^[117]。因此,吸波型CFRP的根本挑战在于通过组分调控实现阻抗匹配。

3.3.2 介电-磁损耗双体系协同设计与微观结构工程

在碳纤维基体中引入钴^[117-118]、镍^[119-120]及其合金^[121]等磁性组分以协同调控介电参数与磁导率参数,是当前解决上述挑战的主要策略之一。Dong等^[89]通过静电纺丝结合高温碳化工艺制备的铁/碳复合纳米纤维,在电磁波频率9.36 GHz处的最小反射损耗达-40.47 dB,有效吸收带宽(EAB)达4.64 GHz(图5(c))。Zhang等^[122]采用原位还原法将单质铁沉积于碳纤维表面,亦获得了类似的优异吸波特性。值得注意的是,磁性组分的引入往往同时导致介电损耗的增大与磁损耗的有限提升,二者需在材料设计中实现精细平衡。单质铁虽磁性强却易发生氧化腐蚀,采用抗氧化性与耐腐蚀性更优的镍、钴及其合金替代,或构建多组分合金化与核壳结构,是兼顾磁性能与环境稳定性的可行路径。

3.3.3 微观结构工程:多孔与中空设计

除了组分调控,微观结构设计同样关键。将实心碳纤维替换为多孔碳纳米纤维或中空碳纤维,通过多种结构效应带来性能增益。首先,纤维内部引入的大量空气孔隙可显著降低材料的有效介电常数。根据有效介质理论,空气(介电常数接近1)的低介电特性稀释了碳材料本征的高介电常数,从而使材料表面的输入阻抗与自由空间阻抗更为匹配^[123-124]。阻抗匹配的改善有效抑制了电磁波在材料表面的直接反射,促使更多入射波进入材料内部并被耗散。

其次,多孔或中空结构在孔壁处构筑了丰富的碳-空气异质界面。在外电场作用下,由于两相电导率和介电特性的差异,界面区域会产生显著的电荷积累与空间电荷极化弛豫,从而引入额外的界面极化损耗。同时,大量纳米孔道可被视为微型电容网络,进一步增强介电损耗能力^[125]。

再次,大量孔隙的引入大幅降低了材料的表观密度,赋予其轻质特性,这对于航空航天和便携式电子

设备等对重量敏感的领域具有重要意义。在此基础上,Zuo等^[126]制备的多孔磁性碳纳米纤维结合了多孔骨架与磁性组分,不仅实现了良好的阻抗匹配,还引入了丰富的孔壁界面极化与磁损耗协同机制,最终在低频段展现出优异的吸波性能。此外,多孔/中空结构还能诱发电磁波在纤维内部的多次散射与反射,延长波的传播路径,从而增加被衰减吸收的几率。综上,将实心纤维转变为多孔或中空结构,可在阻抗匹配、极化损耗、轻量化及多重散射等方面协同强化碳纤维材料的电磁屏蔽与吸波能力。

综观上述电磁屏蔽与吸波性能的优化策略,可以归纳出 3 条共性设计原则。

原则 1: 导电网络的三维连续性优先于单一组分的本征电导率。碳纤维本身的轴向电导率固然重要,但复合材料整体的屏蔽效能更依赖于纤维间能否形成有效的导电搭接。碳纳米管、石墨烯等纳米填料的引入价值,主要在于填补纤维间的绝缘空隙而非提升纤维本征电导率,这一认识解释了为何少量纳米填料的添加即可带来屏蔽效能的显著跃升。

原则 2: 阻抗匹配与衰减能力必须协同设计。纯碳纤维的高电导率带来强反射,却因阻抗失配导致进入材料内部的电磁波份额有限。引入磁性组分或构筑多孔结构的目的,首先是改善阻抗匹配,其次才是增强衰减能力。两者之间的平衡点随目标频段和应用场景而变化,低频吸波更侧重磁损耗组分的引入,高频段则可通过介电损耗的优化实现。

原则 3: 多尺度结构设计是破解“屏蔽-吸波”矛盾的关键。高屏蔽(强反射)与高效吸波(低反射)对材料表面的阻抗要求截然相反。梯度结构或层状非均质设计,如表层高导电实现屏蔽、内层阻抗匹配实现吸波是目前应对这一矛盾最有效的策略。其背后的物理逻辑是将“反射”和“吸收”两种功能在空间上分离,而非在单一均质材料中同时实现。

上述 3 条原则的适用性需根据具体频段、厚度约束和力学要求进行调整。例如,在厚度受限的便携式设备中,层状设计的空间可能不足,此时需依赖高熵合金或核壳结构等在更小尺度上实现功能集成。

3.4 多功能协同的挑战与未来展望

同时满足高导热、强电磁屏蔽与高效吸波等多重功能需求面临极大的科学挑战,其根源在于不同功能对材料电子结构与微观拓扑的要求之间存在本征冲突^[127]。高导热依赖于大尺寸、高取向石墨晶粒以降低声子散射,而高效吸波则需引入适度缺陷以增强极化损耗并优化阻抗匹配。电磁屏蔽追求高电导率以增强反射,吸波却要求阻抗匹配以降低反射^[98]。上述矛盾

意味着多功能一体化设计通常难以通过单一均质结构实现,而必须诉诸多尺度、多层次的梯度协同策略^[128],未来应该大力发展以下方向:

1) 梯度/层状多功能结构。设计非均质复合材料,使不同层承担不同功能。例如,表层为高导电层以实现屏蔽,内层为磁性/介电复合层以实现吸波,中间层为导热层,其关键在于层间界面的匹配与低热阻/低电阻连接。

2) 智能可调超结构。借鉴超材料思想,在碳纤维复合材料中周期性排布导电/磁性单元,实现对电磁波响应的主动调控。结合外部刺激(电场、温度),实现屏蔽/吸波模式的切换。

3) 多尺度模拟驱动设计。建立从原子尺度(电子结构、声子谱)到介观尺度(填料分布、界面形貌)再到宏观性能的跨尺度计算模型,结合机器学习加速新材料体系的筛选。

综上所述,碳纤维复合材料的结构-功能一体化正从简单共混走向拓扑设计。未来的突破将依赖于对声子、电子、光子(电磁波)在复杂异质界面处输运行为的深刻理解,以及从原子到宏观的多尺度协同调控能力。

4 碳纤维复合材料的工程应用

第 2 节和第 3 节分别从力学增强与功能协同两个维度阐述了界面设计的基本原理,但实验室尺度所获得的高性能并不直接等同于工程使役条件下的可靠性与耐久性^[129]。界面设计是否真正有效,取决于其与成型工艺、使役环境之间的匹配程度,而这一匹配失效时,首先发生破坏的位置往往正是界面本身。因此,本节聚焦碳纤维增强聚合物复合材料在航空航天、汽车工业、能源装备以及建筑土木等典型场景中的应用现状,并在各领域的具体使役语境中剖析其面临的共性科学挑战,进而探讨从材料筛选向“结构-工艺-性能”一体化设计范式的演进路径。

4.1 航空航天

航空领域对 CFRP 的核心诉求是极限比强度、极端环境稳定性与可预测的长寿命^[130]。碳纤维增强热固性复合材料(CFRTS)已在波音 B787、空客 A350 等机型中应用于机身、机翼等主承力结构,复合材料用量超过 50%^[131]。近年来,碳纤维增强热塑性树脂(CFRTP)凭借其韧性高、成型周期短、可焊接等优势,正加速向航空主承力结构渗透。以 PEEK、聚芳醚酮(PAEK)为代表的高性能热塑性基体,在耐湿热老化、抗疲劳和抗冲击性能上表现出色^[132]。然而,其仍然面临以下挑战:

1) 自动化铺放与原位固结的工艺-性能关联。CFRTP 航空部件的制造多采用激光辅助自动纤维铺

放(AFP),涉及复杂的热-力-流变耦合。工艺窗口的微小偏移也会导致结晶度、孔隙率和残余应力的显著变化,进而影响层间剪切强度与抗疲劳性能,这本质上是界面形成过程中的热历史与微观结构演化问题^[133]。

2)异质材料连接的界面失效。航空结构中存在大量CFRTP与铝合金、钛合金的连接。激光焊接、超声波焊接等新型连接技术虽能避免钻孔损伤,但异质界面处的热膨胀系数失配和界面微观缺陷在循环载荷下会迅速扩展,是疲劳失效的主要诱因^[134-135]。如何在异质界面构建兼具强结合、耐腐蚀、抗疲劳的“梯度过渡层”,是界面科学在航空连接领域的研究重点。

4.2 汽车工业

汽车工业对CFRP的核心诉求是低成本、短周期与可回收性。在电动汽车轻量化和碳排放法规的双重压力下,CFRP因成型速度快、可熔融回收、易与金属混合冲压而备受青睐。聚酰胺(PA)、聚丙烯(PP)等工程塑料基体成为主流^[136]。两大界面相关挑战制约了其大规模推广:

1)连续纤维与复杂几何的成型矛盾。连续CFRTP虽力学性能优异,但难以成型具有深筋、变厚度、曲面复杂的汽车零部件^[137]。短切纤维注塑工艺可成型复杂形状,但纤维在流动中会发生不可控的取向和断裂,导致力学性能分散度高且难以满足承力结构要求^[138]。“高性能”与“可成型性”之间的权衡是汽车CFRP面临的主要挑战之一。产业界发展出碳纤维毡增强或碳纤维纸增强热塑性复合材料,在保留足够纤维长度的同时赋予其模压流动性^[139]。

2)热塑性基体的加工窗口与结晶动力学。半结晶热塑性树脂在快速冷却(如注塑)条件下往往形成不完善的晶体结构,导致热机械性能下降^[140]。Uematsu等^[141]的研究显示,碳纤维表面可诱导PA6的横晶生长,但横晶层的厚度与基体结晶速率、冷却速率之间存在竞争关系。因此,如何通过调控成型工艺(模温、保压压力、冷却速率)与界面设计(成核剂、上浆剂),实现快速成型与理想结晶形态的协同,是亟待解决的关键问题。

4.3 能源装备

风电叶片与高压储氢瓶是碳纤维复合材料在能源领域的两大代表性应用,其使用中的共性特征在于超大尺寸或超高压服役条件、长期交变载荷作用以及腐蚀性或渗透性环境的严苛考验。

1)风电叶片的疲劳与湿热老化。海上风电叶片长度已突破百米,服役期间承受数亿次的风力交变载荷。碳纤维主梁的引入虽显著减轻了叶片重量并提高了刚度,但复合材料的疲劳行为远比金属复杂^[142]。损伤从基体微裂纹开始,扩展至纤维/基体脱黏,最终导

致纤维断裂。这一过程受湿度、温度、紫外线辐射的加速影响尤为显著^[143]。因此,需建立考虑环境老化的多尺度疲劳损伤演化模型,准确预测叶片20 a寿命期内的剩余强度。

2)高压氢环境下树脂的损伤与氢气渗透。70 MPa IV型储氢瓶(储氢瓶标准规定的工作压力为70 MPa)采用碳纤维复合材料全缠绕结构。树脂基体在高压氢气环境中的行为是尚未完全明确的关键问题:氢气分子会渗透进入聚合物自由体积,导致塑化、微裂纹萌生,甚至引发“快速气体减压损伤”^[144]。当压力骤降时,溶解的氢气快速膨胀,造成基体开裂。此外,纤维/基体界面成为氢气渗漏的快速通道^[145]。Li等^[146]对热塑性复合材料压力容器的压力测试发现,循环充放气后,界面脱黏导致的氢气渗透率显著上升。因此,如何设计具有低氢气渗透率、高抗减压损伤能力的树脂体系,并建立可靠的寿命评估标准,是该领域面临的核心挑战。

4.4 建筑与土木:结构健康监测与功能集成

碳纤维增强混凝土通过在水泥基体中掺入短切碳纤维,赋予了混凝土抗裂性、抗渗性及导电性^[147]。其科学价值在于:碳纤维的导电性使混凝土结构本身成为一个“分布式传感器”。通过测量混凝土的电阻率变化,可实现对结构内部应力、裂缝萌生及扩展的实时监测,即“自感知”智能混凝土^[148]。然而,纤维在水泥基体中的均匀分散是长期难题,纤维含量过高会导致团聚,劣化力学性能^[149]。因此,如何通过表面改性(如亲水化处理)和分散工艺(如超声辅助)实现碳纤维在碱性水泥环境中的均匀、稳定分散,并建立电阻率变化与损伤程度的定量标定关系,是该领域的关键科学问题。

综观上述应用领域,一个清晰的范式转变正在发生:CFRP的工程应用不再是“用碳纤维替代金属”的简单材料替换,而是以结构功能需求为牵引,倒推材料选择、界面设计、成型工艺与使役性能的一体化协同优化。这一范式要求研究者回答3个层次的问题:

1)材料层次。给定使役环境(温度、湿度、载荷谱、化学介质),应选择何种纤维/基体/界面体系?

2)工艺层次。如何通过成型工艺(铺放、模压、注塑、缠绕)调控微观结构(纤维取向、结晶度、孔隙率),以实现目标性能?

3)结构层次。如何将材料本构关系与结构力学分析耦合,实现对构件寿命、可靠性及失效模式的精准预测?

未来,数字孪生技术将成为这一范式的核心载体。通过集成材料数据库、工艺仿真、在线监测传感器与机器学习算法,构建一个与物理实体实时交互的虚拟镜像,实现对CFRP构件从制造到退役的全生命周期的性能管控。

5 可持续发展策略

传统碳纤维增强聚合物复合材料遵循“制造—使用—废弃”的线性模式,引言部分提出的三大瓶颈中,“生命周期的断裂”直接源于热固性树脂的不可逆交联网络^[106]。这一化学结构特征导致退役构件中高价值的碳纤维增强体与树脂基体难以有效分离,不仅造成巨大的资源浪费,亦与全球碳中和战略目标背道而驰^[150]。然而,回收问题并非孤立存在,它与前两节讨论的界面强化和多功能化深度耦合:为增强界面结合而引入的共价键合与表面活化,使纤维—树脂的化学分离更加困难;为赋予导热、电磁屏蔽等功能而构建的复杂界面层,增加了回收产物的化学纯度控制难度。三者形成了“强界

面—高功能—难回收”的连锁制约。因此,可回收性不应仅作为末端补救措施,而须与强度、功能并列作为界面设计的前置约束。实现碳纤维复合材料的可持续发展,需要在材料化学与回收工艺两个维度同时突破^[142]。前者赋予树脂基体本征的可降解或可重塑能力,后者提供高效、低成本的分离与再制造技术路径。本节从这一认识出发,系统论述动态共价化学在破解热固性树脂不可逆性方面的基本原理,并进一步探讨如何将动态键设计从树脂本体延伸至纤维/树脂界面,即“动态界面”概念,以及机器学习驱动的智能回收技术,并在此基础上提出面向全生命周期绿色闭环的技术路线图,从而实现服役期增韧与回收期可控解离的统一。图6为碳纤维增强聚合物复合材料发展趋势^[78-79,151-152]。

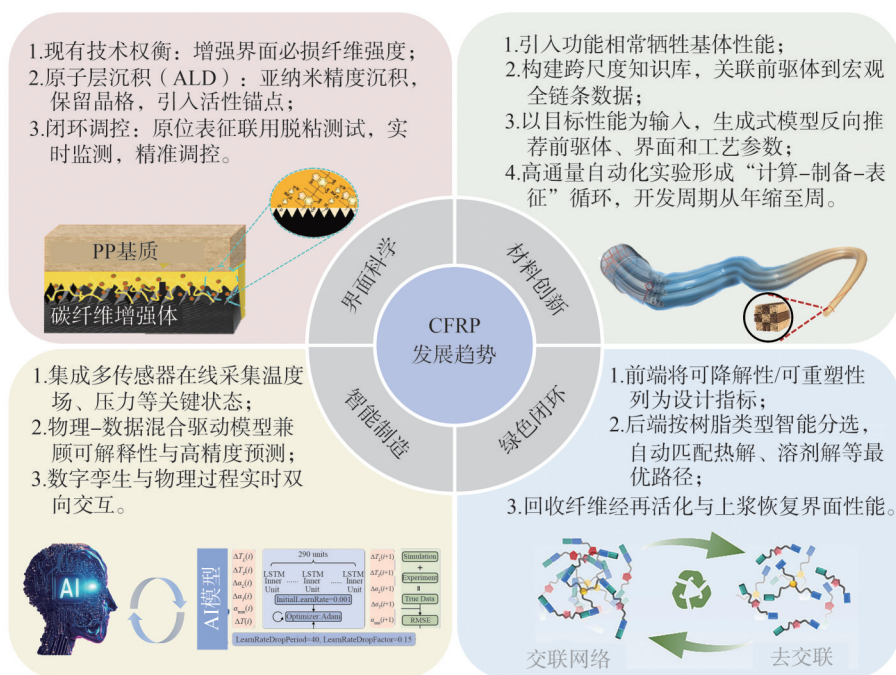


图6 碳纤维增强聚合物复合材料发展趋势^[78-79,151-152]

Fig. 6 Trends in carbon fiber reinforced polymer composites^[78-79,151-152]

5.1 动态共价化学—破解热固性树脂不可逆的分子工具

传统热固性树脂(如环氧、酚醛、不饱和聚酯)在固化后形成永久性共价交联网络,既不溶解亦不熔融,无法通过温和手段实现纤维与基体的分离^[145]。动态共价键的引入从根本上改变了这一局面,这类化学键在特定外部刺激下(热、光、pH、催化剂)可发生可逆断裂与重组,赋予交联网络刺激响应性的拓扑重排能力^[153]。

5.1.1 动态键的类型与网络行为

根据动态键在刺激下的反应机制差异,可将其区分为解离型与缔合型两大类。

1)解离型动态键。在刺激下键完全断裂,网络降解为可溶性小分子或低聚物。典型代表包括缩醛、亚

胺、脲、硼酸酯等。此类体系适用于完全解聚回收,在稀酸、稀碱或温和热解条件下,树脂降解为单体或低聚物,碳纤维得以无损分离^[154]。Yuan等^[155]设计的聚六氢三嗪热固性树脂可在稀盐酸中室温解聚,实现了碳纤维的无损多重回收。

2)缔合型动态键。在刺激下键断裂的同时新键形成,网络始终保持交联状态,仅发生拓扑重排(即“类玻璃体”行为)。典型代表包括酯交换(需催化剂)、二硫键、硅氧烷交换、乙烯基氨基甲酸酯等^[156]。此类体系适用于重塑、自修复与再加工。Röttger等^[157]将二氧杂硼杂环戊烷键引入聚苯乙烯—丁二烯共聚物,制备的玻璃体高分子(vitrimer)在室温下表现为热固性,加热后黏度可逆下降,可实现多次挤出与注塑重塑。

解离型与缔合型动态键代表了两种截然不同的可逆化学设计原理:1)解离型(亚胺、缩醛、硼酸酯等)的优势在于回收条件温和(室温酸解即可实现纤维无损分离),但其代价是网络在使役环境(尤其是湿热条件)下的稳定性不足;2)缔合型(酯交换、二硫键、硅氧烷交换等)的类玻璃体行为使材料在加热状态下可重塑加工,在室温下却保持热固性的尺寸稳定性,这一特性极具工程吸引力,但其依赖金属催化剂(酯交换)或对氧气敏感(二硫键)的局限尚未完全被解决。

两类动态键的选择本质上是在回收便利性与服役稳定性之间做权衡。对于需要长期户外服役的风电叶片或航空结构,缔合型动态键(尤其是无催化剂的版本)更具潜力;对于内饰件或次承力结构等对服役寿命要求较低的场景,解离型动态键的温和回收优势更为突出。值得注意的是,这一权衡并非静态的,通过“隐藏动态键”策略(如将亚胺键嵌入刚性芳环结构),解离型动态键的湿热稳定性已得到显著改善,正在逼近缔合型体系的水平。

5.1.2 动态性与稳定性之间的矛盾

动态键的引入是以牺牲网络的热机械稳定性为代价的。具体表现为:1)玻璃化转变温度 T_g 下降,动态键通常比传统共价键(C—C、C—O)具有更低的键能,其交换反应在高温下会显著增强分子链运动,导致 T_g 降低^[158];2)蠕变与应力松弛加剧,缔合型动态键网络在恒定载荷下会发生持续的重排,导致不可忽略的蠕变变形,这在长期承载应用中是不可接受的^[159];3)环境敏感性,解离型动态键(如亚胺、硼酸酯)对水、酸、碱敏感,在湿热环境下可能发生非预期的降解^[160]。

因此,高性能(高 T_g 、高模量、抗蠕变)与高可持续性(快速降解/重塑)之间存在内在的“动态性-稳定性”权衡关系。应对这一权衡关系的分子设计原则包括:1)刚性-动态双网络,构建一个永久共价键网络提供力学骨架,另一个动态键网络赋予降解/重塑能力,二者互穿可兼顾性能与可持续性;2)隐藏动态键,动态键在使役条件下被物理或化学方式保护,如形成分子内氢键、嵌入刚性芳环结构等,仅在特定刺激下才暴露活性。Zhao团队^[161]报道的含芳香亚胺键环氧树脂,在室温下对水和弱酸稳定,但在80~120℃的中等温度下可发生亚胺交换,实现焊接与修复。

5.1.3 从实验室到应用:可回收CFRP的工程化挑战

尽管动态共价化学已展示出巨大潜力,但其在工程CFRP中的应用仍面临多重障碍,具体包括:

1)催化剂的残留与毒性。许多动态键(如酯交换)依赖金属催化剂,这些催化剂在复合材料中难以被去除,可能影响再生碳纤维的表面活性及再制品的长期稳定性^[162]。

2)回收条件与纤维损伤的博弈。解聚反应需要一定的温度、酸碱或溶剂,这些条件本身可能损伤碳纤维的上浆层或表面化学。需要精细优化回收工艺窗口,在完全解聚与纤维强度保留之间取得平衡^[163]。

3)经济性。动态键单体的合成成本远高于传统环氧,且回收过程涉及溶剂消耗与废液处理。只有当回收-再制造的闭环次数达到一定阈值时,其环境与经济优势才能显现^[164]。

5.1.4 动态界面:从树脂本体到纤维/树脂界面

上述动态共价化学的讨论主要聚焦于树脂基体本体的动态交联网络设计。然而,若动态键仅存在于基体本体中,回收时仍需先破坏纤维/树脂界面的化学键合方能实现纤维分离,则意味着,界面本身才是回收过程中最关键的部分。

将动态共价键引入界面层(即“动态界面”设计),可从3个层面实现突破:

1)服役期间的增韧。界面处的动态键在应力作用下可通过可逆断裂-重组耗散应变能,抑制裂纹沿界面扩展。

2)回收时的可控解离。在特定外部刺激下,界面动态键选择性断裂,实现纤维与基体的温和分离,同时保护纤维表面化学结构与功能相的完整性。

3)再制造时的界面重构。分离后的纤维表面保留活性动态键位点,可在再复合过程中与新鲜树脂重新成键,实现界面的“再生”而非“重建”。

动态界面的分子设计需满足以下原则:动态键在使役条件下具有足够的热力学稳定性,而在回收刺激下具有快速的动力学响应;动态键的引入不显著改变界面层的模量梯度设计;动态键的断裂产物不污染再生纤维表面。目前,基于亚胺键、硼酸酯键等的动态界面已初步展现出可行性,但其在工程化CFRP中的长周期服役稳定性仍有待系统验证。

5.2 智能回收:机器学习驱动的多级分离与再制造

化学回收作为处理退役CFRP的主流技术,其工艺窗口的优化长期依赖经验试错,效率低下且难以泛化至不同树脂体系^[165]。机器学习技术的引入正推动回收工艺从经验驱动向数据驱动转变^[166]:在溶剂解回收中,模型可通过有限实验数据建立溶剂性质参数、反应条件与解聚效率之间的非线性映射,推荐最优溶剂组合^[167];在热解回收中,模型可预测不同工艺条件下再生碳纤维的拉伸强度分布,为反应器设计与工艺参数选择提供指导^[166]。然而,机器学习在回收领域的应用仍面临高质量实验数据匮乏、模型泛化能力不足以及可解释性欠缺等挑战。回收实验成本高昂且周期长,公开数据集稀缺,需借助迁移

学习、主动学习等小样本学习策略予以应对,同时有赖于跨尺度数据库的建立与物理约束神经网络等方法引入。表3为机器学习在碳纤维复合材料回收中的多层次应用。

表3 机器学习在碳纤维复合材料回收中的多层次应用

Tab. 3 Multi-level applications of machine learning in the recycling of carbon fiber composites

回收路线	应用场景	输入特征	预测目标	科学价值	参考文献编号
机械回收	近红外光谱结合图像识别分选	光谱特征、颜色、纹理	树脂类型、纤维含量	实现混合废料的自动分类	[168]
热解回收	工艺参数与产物性能关联建模	温度、升温速率、气氛、停留时间	纤维强度保留率、树脂转化率	突破热解动力学难题,预测最优工艺窗口	[169]
溶剂解回收	溶剂筛选与反应条件优化	溶剂极性、溶解度参数、温度、时间	解聚速率、纤维表面洁净度	加速高性能绿色溶剂的发现,减少成本	[170]
生物回收	酶工程与底物兼容性预测	酶序列、底物结构、反应条件	酶活性、降解率	筛选高活性高稳定性的降解酶突变体	[171]

尽管前景广阔,机器学习在CFRP回收中的应用仍处于起步阶段,面临以下瓶颈:

- 1)小数据问题。CFRP回收实验成本高、周期长,公开数据集稀缺。迁移学习、主动学习和小样本学习是解决这一问题的潜在途径。
- 2)多目标优化。回收过程需要同时最大化纤维强度保留率、树脂去除率和能量效率,三者往往相互冲突。需要发展多目标贝叶斯优化算法,寻找领域前沿。
- 3)可解释性。机器学习模型的“黑箱”特性限制了其对回收机理的揭示。结合SHAP值分析或符号回归,可从数据中提取可解释的物理规律(如关键温度阈值的识别)。

5.3 热塑性复合材料的回收优势与技术挑战

热塑性树脂(如PA、PP、PC、PEEK)因其物理交联(结晶或玻璃态)而非化学交联,本征上具有可熔融重塑的能力。然而,工程级热塑性树脂在CFRP应用中面临两大挑战:

- 1)高熔体黏度。PEEK、PEI等高性能热塑性树脂的熔体黏度极高,可达 $10^3\sim 10^4\text{ Pa}\cdot\text{s}$,难以浸润碳纤维束,导致复合材料孔隙率高、界面结合弱^[172]。
- 2)与碳纤维的界面不相容。多数热塑性树脂为非极性 or 弱极性,与碳纤维表面缺乏化学亲和力^[173]。低熔点聚芳醚酮(LMPAEEK)等新型基体的开发,有效降低了成型温度与能耗。同时,反应性上浆剂(如含PA6接枝链的环氧涂层)可显著改善界面结合。此外,机器学习可加速热塑性树脂的配方优化,通过预测不同添加剂(增容剂、成核剂)对熔体流变学、结晶行为及界面剪切强度的影响,大幅缩短材料开发周期。

综合上述分析,本文提出CFRP可持续发展的“四阶段”技术路线图。

第1阶段(当前至2030年),短期突破:动态键环氧的商业化与热解工艺智能化。

推动基于亚胺、缩醛等动态键的环氧树脂进入中试生产,实现 $T_g>150\text{ }^\circ\text{C}$ 、可室温酸解的产品定型,并在

现有热解工厂中部署机器学习在线控制系统,实现工艺参数的实时自适应优化。

第2阶段(2030—2035年),中期跨越:无催化剂动态网络与绿色溶剂回收体系。

开发无金属催化剂的酯交换或烯烃复分解类玻璃体高分子,消除催化剂残留对再生纤维的影响,建立基于超临界CO₂或离子液体的绿色溶剂回收中试线,实现纤维强度保留率>95%。

第3阶段(2035—2040年),远期愿景:生物基热固性树脂与机器学习驱动的逆向设计。

以木质素、纤维素衍生物为原料,合成全生物基动态共价热固性树脂,建立结构-工艺-性能-可回收性的跨尺度数据库,结合生成式模型(如图神经网络)实现可回收CFRP的逆向设计,实现原料可再生与降解产物环境相容的闭环。

第4阶段(2040以后),远景目标:材料信息数字化与数字孪生驱动的闭环回收每个CFRP构件配备“材料护照”(包含配方、工艺、服役历史),退役后通过数字孪生平台自动生成最优回收方案,在此基础上实现制造—使用—回收—再制造的高效闭环回收体系,单位质量CFRP的碳排放降低80%以上。

6 挑战与展望

经过数十年发展,碳纤维及其复合材料已在航空航天、新能源等战略领域确立了不可替代的地位。然而,前文各章从界面构筑、功能协同到回收重构的层层递进分析表明,该领域正面临三大相互交织的核心瓶颈:一是界面与本征强度间的矛盾,即表面活化以增强界面结合与保留纤维本征拉伸强度之间存在根本性矛盾,现有改性技术在提升界面剪切强度的同时,不可避免地在纤维表层石墨晶格中引入缺陷,导致纤维强度下降;二是结构与功能间的矛盾,力学承载与导热、电磁屏蔽等功能属性对微观拓扑结构的设计提出了相互冲突的要求;三是生命周期断裂,热固

性树脂的不可逆交联网络与可持续发展需求之间形成了尖锐对立。

综观前文各节的论述,可以提炼出贯穿碳纤维复合材料整个研究领域的3条共性规律与两组核心矛盾。

共性规律1:性能的极限由前驱体的化学本性设定。无论是PAN基碳纤维的导热瓶颈(一维链与二维晶格的拓扑失配),还是生物基碳纤维的强度缺陷(热解过程的非均相性),均源于前驱体分子结构的根本约束。任何界面改性或复合策略都无法超越这一本征极限,这一认识要求研究者在追求性能提升的同时,必须清醒地认识到材料的本质局限。

共性规律2:界面的多尺度设计是破解顾此失彼困境的核心抓手。从力学增强到多功能协同再到可回收设计,界面始终是各种矛盾汇聚与化解的节点。梯度模量界面、动态共价界面、功能相梯度分布等策略的共同特征在于,在空间上分离不同甚至相互冲突的功能要求,而非在单一均匀层中同时满足所有需求。

共性规律3:全生命周期视角正在重塑材料设计的范式。传统研究将“制造-服役-回收”视为3个独立的阶段,而动态界面、可逆交联网络等新概念的出现,使“回收”从末端补救转变为前端设计约束,这意味着材料科学家需要在分子设计阶段就考虑30年后的回收路径。

核心矛盾1:“活化-强度”权衡。表面处理越剧烈,界面结合越强,但纤维本征强度损失越大。这一矛盾的本质在于碳纤维表面的“惰性”正是其高强度的来源,任何活化都是对石墨晶格的破坏。

核心矛盾2:“功能-回收”权衡。界面层越复杂、功能集成度越高,回收时分离越困难、产物纯度控制越棘手。这一矛盾的根源在于,功能化追求的是永久性的界面改性,而回收追求的是可逆性的界面解离,两种诉求在同一界面微区内形成矛盾。

上述规律与矛盾的识别,为碳纤维复合材料的突破方向提供了逻辑前提:任何有效的解决方案都必须在承认这些规律和矛盾的基础上,寻找多目标之间的最优权衡,而非追求单一维度的极致。面向未来十年乃至更长远的愿景,碳纤维复合材料研究需要从以下4个维度着手。

6.1 界面科学:从性能增强到低损伤界面构筑技术

现有表面改性技术在增强界面结合的同时,几乎无一例外地以牺牲纤维本征强度为代价,这种增益-代价的权衡构成了界面工程的重要限制。突破这一悖论的关键,在于发展原子/分子尺度的精准界面构筑技

术,在不损伤本征性能的前提下实现界面活化。

原子层沉积技术利用自限性气固反应,在碳纤维表面逐层沉积厚度精确至亚纳米的金属氧化物或有机/无机杂化薄膜^[174]。由于反应过程不涉及等离子体轰击或强氧化刻蚀,该方法能在完全保留纤维石墨晶格完整性的前提下,引入高密度的活性锚点或构建梯度模量界面过渡层^[175]。更进一步,将脱黏力学测试与原位表征技术在线联用,可在改性工艺进程中实时监测界面化学状态与纤维强度的动态演化,从而建立起闭环的控制体系,使界面工程真正迈入精准调控的阶段。

6.2 材料创新:从多功能到材料基因组

功能相(如碳纳米管、石墨烯或磁性纳米粒子)的引入,往往以牺牲基体力学性能或显著增加界面复杂度为代价,而传统材料创新模式效率低下,难以应对多目标性能协同优化的复杂需求^[176]。未来应建立数据驱动的碳纤维复合材料基因组平台,实现从筛选优化到按需设计的转变^[177]。这一平台的基础在于跨尺度知识库的系统构建,需要对从前驱体分子结构、上浆剂化学配方、纤维表面物理化学性质、界面相微观组织到宏观力学/热学/电学性能的多层次数据进行标准化采集与关联^[176]。

在此基础上,以目标性能组合作为输入约束,利用智能神经网络、变分自编码器等生成式机器学习模型,反向推荐最优的前驱体配方、界面改性方案与成型工艺参数。这一逆向设计范式的有效性依赖于高通量实验验证体系予以闭环,即通过自动化配浆、机器人铺放与在线多模式表征等手段,快速制备与测试数百种候选材料方案,形成“计算-制备-表征”的加速迭代循环,将新材料体系的开发周期从年量级压缩至周量级。

6.3 智能制造:从工艺驱动到数字孪生

碳纤维复合材料的制造工艺(包括自动铺丝、模压成型与缠绕成型)长期以来高度依赖工艺师的经验参数,导致产品性能分散度大、废品率偏高,且缺乏对构件服役寿命的精准预测能力^[178]。突破这一困境的路径在于构建工艺、结构、性能、寿命四位一体的数字孪生系统。

在线感知与数据融合是该系统的基础支撑,通过将光栅传感器、超声波相控阵探头以及红外热成像模块直接集成于成型装备,可实时采集温度场演变、树脂压力分布、流动前沿推进位置以及孔隙率等关键状态变量。在此基础上,建立机理与数据混合驱动的工艺仿真模型,将传热学、流变学与损伤力学同数据驱动方法有机融合,使模型兼具物理可解释性与高精度

预测能力。通过数字孪生体与物理成型过程的实时双向交互,系统能够动态调整激光加热功率、辊压压力与铺放速度等工艺参数,自动补偿材料批次间的品质波动或环境扰动,最终迈向“一次成型、低缺陷”的制造模式。

6.4 绿色闭环:从线性消耗到全生命周期再生

即便采用可降解树脂体系,碳纤维复合材料的回收过程仍面临溶剂消耗量大、再生纤维力学性能显著衰减以及经济可行性不足等挑战,闭环循环远未形成产业规模^[142]。未来应构建前端绿色设计嵌入与后端智能回收协同相结合的全生命周期闭环体系。

在前端设计阶段,需将可降解性或可重塑性与力学性能并列为同等量级的设计指标。利用大数据完整记录碳纤维在生产过程中的前驱体类型、树脂化学配方以及界面改性方案。在后端回收阶段,利用智能回收系统按树脂体系类别进行快速精准分选。针对环氧树脂、聚氨酯或动态共价网络等不同基体类型,自动匹配热解、溶剂解或生物酶解等最优解聚路径。对于回收所得的再生碳纤维,通过低温等离子体再活化或降解上浆剂的重新涂覆,恢复其界面结合能力,并根据纤维性能衰减程度定级引入非承力或半承力结构件的再造流程。建立多维度生命周期评估模型,为回收工艺路线的选择与闭环次数的优化提供量化决策依据。

综合上述 4 个维度的讨论,其协同目标并非追求单一性能指标的极致,而是在“强度-功能-可回收性”三维约束空间中,找到满足具体应用场景的最优权衡解。这正是本文从“界面科学”到“多功能协同”再到“闭环重构”这一递进逻辑的最终指向,推动碳纤维复合材料从传统高性能结构材料向绿色化、智能化的范式转变。

参考文献:

- [1] Cui Zhenhai, Song Yan, Yang Tao, et al. A study on ferric chloride multifunctional promotion in pre-oxidation of pitch-based nanofibers[J]. *Chemical Engineering Science*, 2026,330:123873.
- [2] Zhang Ze, Xu Weijun, Kang Hongliang, et al. Thoughts on preparation technology of high performance polyacrylonitrile-based carbon fibers[J]. *Journal of Textile Research*, 2019, 40(12):152–161.[张泽,徐卫军,康宏亮,等.高性能聚丙烯腈基碳纤维制备技术几点思考[J]. *纺织学报*, 2019, 40(12):152–161.]
- [3] Wang Junbo, Sun Yongqi, Jing Xiaotian. Current of interlaminar fracture of fiber reinforced resin matrix composite[J]. *Basic Sciences Journal of Textile Universities*, 1998(2):3–9.[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[J]. *纺织高校基础科学学报*, 1998(2):3–9.]
- [4] Shi Zhicheng, Liang Zihui, Huang Zhiyu, et al. Revolutionizing fiber materials for space: Multi-scale interface engineering unlocks new aerospace frontiers[J]. *Materials Today*, 2025,88:643–704.
- [5] Chen Fengxiang, Yang Huiyu, Li Ke, et al. Facile and effective coloration of dye-inert carbon fiber fabrics with tunable colors and excellent laundering durability[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(10):10330–10336.
- [6] Gao Dongxiao, Wang Mengfan, Hou Weilu, et al. Superior interfacial properties of high modulus carbon fiber reinforced epoxy composites achieved based on efficient electrochemical deposition of polydopamine layer[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2026,316:113566.
- [7] Zhu Jiabao, Dong Yuhong, Chen Zheng, et al. Microwave-assisted activation of high-modulus carbon fibres for interface engineering: Elucidating the distinct roles of electrostatic wetting and van der Waals locking[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2026,315:113479.
- [8] Wu Qing, Li Yating, Zhang Yidi, et al. Generating a stronger and tougher interphase of epoxy composite by constructing an interwoven heterogeneous network-structured coating on carbon fiber[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2026,318:113646.
- [9] He Annan, Luo Yuxin, Wang Mengqi, et al. Pearl-inspired colored carbon fibers with electromagnetic interference and optical camouflage properties[J]. *Energy & Environmental Materials*, 2025,8(2):e12840.
- [10] Jeon C, Hwang S, Han M, et al. Unveiling the graphitization behaviors of highly stiff and thermally conductive graphitic carbon fibers[J]. *Carbon*, 2025,245:120791.
- [11] De Fabritiis V, Matta L, Grifflini G, et al. Optimization of a chemical recycling process for epoxy-amine thermosets and their carbon fiber reinforced composites using a design of experiments approach[J]. *Cleaner Engineering and Technology*, 2025,26:100988.
- [12] He Jun, Wang Binhao, Wang Jiaxin, et al. Advances in efficient sorting, depolymerisation and high-value recycling technologies for waste textile[J/OL]. *Chinese Science Bulletin*, 2025–12–12. <https://www.sciengine.com/CSB/doi/10.1360/CSB-2025-5528>. [何俊,王斌昊,王佳馨,等.废旧纺织品高效分拣、解聚与高值再生技术进展[J/OL]. *科学通报*, 2025–12–12. <https://www.sciengine.com/CSB/doi/10.1360/CSB-2025-5528>.]
- [13] Zhang Shuhan, Yang Zhijun, Wang Yuting, et al. Ambient-temperature depolymerization and closed-loop recycling of waste epoxy thermosets[J]. *Advanced Functional Materials*, 2026,36(44):e75106.
- [14] Liu Lele, Shi Zhicheng, Dong Zhijia, et al. Engineering structural biomimetics in textiles: Toward intelligent and sustain-

- able systems[J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2026, 171: 101246.
- [15] Chen Xusheng, Yang Ye, Si Lina, et al. Significantly enhancing CFRP/titanium joint bonding strength using a novel PDA-Fe organic nanoparticle pre-coating[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 307: 112930.
- [16] Wang Tingting, Gong Bowen, Wang Bowen, et al. Relating the failure modes transition to plasma treatment in adhesively bonded carbon fiber composite joints[J]. *Composites Communications*, 2025, 53: 102210.
- [17] Zhang Xueqin, Sun Tong, Qiu Baowei, et al. Investigation on interlaminar behavior of different morphology GO structured carbon fiber reinforced epoxy composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 230: 109492.
- [18] Andideh M, Esfandeh M. Effect of surface modification of electrochemically oxidized carbon fibers by grafting hydroxyl and amine functionalized hyperbranched polyurethanes on interlaminar shear strength of epoxy composites[J]. *Carbon*, 2017, 123: 233–242.
- [19] Li Tianyu, Shao Ruiqi, Tian Feng, et al. Multiscale hierarchical pore structure evolution in γ -irradiated PAN fibers: Synergistic insights from synchrotron radiation Nano-CT and molecular simulations[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2026, 243: 111737.
- [20] He Annan, Xing Tonghe, Liang Zihui, et al. Advanced aramid fibrous materials: Fundamentals, advances, and beyond[J]. *Advanced Fiber Materials*, 2024, 6(1): 3–35.
- [21] Frank E, Steudle L M, Ingildeev D, et al. Carbon fibers: Precursor systems, processing, structure, and properties[J]. *Ange wandte Chemie International Edition*, 2014, 53(21): 5262 – 5298.
- [22] Wang Bin, Wu Shuai, Li Chenggao, et al. Evolution mechanism of cyclized structure of PAN-based pre-oxidized fiber during low temperature carbonization process[J]. *Materials Research Express*, 2021, 8(11): 115602.
- [23] An Feng, Zhou Pucha, Lu Chunxiang, et al. Tuning the surface grooves of carbon fibers by dry-jet gel-spinning[J]. *Carbon*, 2019, 143: 200–203.
- [24] Li Jingpan, Tang Ximing, Qin Ji, et al. Understanding the molecular arrangement and orientation characteristics of mesophase pitch and its fibers *via* a polarized light microscope[J]. *Polymers*, 2024, 16(8): 1114.
- [25] Barton B E, Behr M J, Patton J T, et al. High-modulus low-cost carbon fibers from polyethylene enabled by boron catalyzed graphitization[J]. *Small*, 2017, 13(36): 1701926.
- [26] Jia Guosheng, Zhou Zhe, Wang Qianqian, et al. Effect of pre-oxidation temperature and heating rate on the microstructure of lignin carbon fibers[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 216: 388–396.
- [27] Ouzilleau P, Gheribi A E, Chartrand P, et al. Why some carbons may or may not graphitize? The point of view of thermodynamics[J]. *Carbon*, 2019, 149: 419–435.
- [28] Sun Zhaoling, Zheng Peixiao, Chen Chaoyu, et al. Mechanical properties of carbon fiber composites with various wear characteristics during knitting process[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 291: 112010.
- [29] Honda H. Carbonaceous mesophase: History and prospects[J]. *Carbon*, 1988, 26(2): 139–156.
- [30] Singleton R W, Sieminski M A, Sprague B S. The effect of radial heterogeneity on fiber Properties 1[J]. *Textile Research Journal*, 1961, 31(11): 917–925.
- [31] Yao Yanbo, Yu Muhuo, Liu Anhua. Control of two-phase pitch precursor and microstructure of cross-section of carbon fibers[J]. *Journal of Textile Research*, 2017, 38(5): 1–7. [姚艳波, 余木火, 刘安华. 两相沥青前驱体及其碳纤维截面结构调控[J]. *纺织学报*, 2017, 38(5): 1–7.]
- [32] Younker J M, Saito T, Hunt M A, et al. Pyrolysis pathways of sulfonated polyethylene, an alternative carbon fiber precursor[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2013, 135(16): 6130–6141.
- [33] Dumanlı A G, Windle A H. Carbon fibres from cellulosic precursors: A review[J]. *Journal of Materials Science*, 2012, 47(10): 4236–4250.
- [34] Fink H P, Weigel P, Purz H J, et al. Structure formation of regenerated cellulose materials from NMMO-solutions[J]. *Progress in Polymer Science*, 2001, 26(9): 1473–1524.
- [35] Norberg I, Nordström Y, Drougge R, et al. A new method for stabilizing softwood kraft lignin fibers for carbon fiber production[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 128(6): 3824–3830.
- [36] Yang Zhi, Liu Chengkun, Wu Hong, et al. Preparation and characterization of lignin/polyacrylonitrile-based carbon fibers[J]. *Journal of Textile Research*, 2021, 42(7): 54–61. [阳智, 刘呈坤, 吴红, 等. 木质素/聚丙烯腈基碳纤维的制备及其表征[J]. *纺织学报*, 2021, 42(7): 54–61.]
- [37] Love–Baker C A, Harrell T M, Vautard F, et al. Analysis of the turbostratic structures in PAN-based carbon fibers with wide-angle X-ray diffraction[J]. *Carbon*, 2024, 224: 119037.
- [38] Jiang Zhanpeng, Zu Shutong, He Jingyi, et al. Lignin-based carbon fibers and nano-fibers enable the conversion of biomass waste into sustainable new materials: A review[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2025, 13(5): 118886.
- [39] Li Juan, Wang Fei, Ning Cuijuan, et al. New fiber materials: The commanding height of global value chain[J]. *Textile Science Research*, 2017(12): 29–32. [李娟, 王菲, 宁翠娟, 等. 纤维新材料: 全球价值链的制高点[J]. *纺织科学研究*, 2017(12): 29–32.]
- [40] Leng Changyu, Zhang Bing, Li Qian, et al. A molecular

- configuration-driven interfacial engineering strategy for constructing high-performance carbon fiber/epoxy composites[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2025, 8(6):456.
- [41] Sun Zhaoling, Luo Yuxin, Chen Chaoyu, et al. Mechanical enhancement of carbon fiber-reinforced polymers: From interfacial regulating strategies to advanced processing technologies[J]. *Progress in Materials Science*, 2024, 142: 101221.
- [42] Luo Yuxin, Zhang Yu, Xing Tonghe, et al. Full-color tunable and highly fire-retardant colored carbon fibers[J]. *Advanced Fiber Materials*, 2023, 5(5):1618–1631.
- [43] Xu Mingtao, Ji Yu, Zhong Yue, et al. Review on toughening modification of carbon fiber/epoxy resin composites[J]. *Journal of Textile Research*, 2022, 43(9):203–210. [徐铭涛, 嵇宇, 仲越, 等. 碳纤维/环氧树脂基复合材料增韧改性研究进展[J]. *纺织学报*, 2022, 43(9):203–210.]
- [44] Yang Guang, Cui Jinze, Zhang Simin, et al. CNT modified chopped ultra-thin CF/PET tapes reinforced PET thermoplastic composite laminates with elevated interfacial properties and ultra-low porosity[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 284:111718.
- [45] Zhao Wenqi, Qiao Yue, Jia Hang, et al. 2D GO and 3D NH₂-UiO-66 assembled on carbon fiber surface by electrodeposition method for enhancing the interfacial performance of CF/PBPESK composite[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 507:160360.
- [46] Sun Na, Lin Bicheng, Cui Quanqing, et al. *In situ* construction of vertical carbon nanosheets on carbon fibers toward high-performance epoxy composites *via* interfacial enhancement[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 524: 169702.
- [47] Shi Longlong, Ma Lichun, Li Peiyao, et al. The effect of self-synthesized hydroxyl-terminated hyperbranched polymer interface layer on the properties of carbon fiber reinforced epoxy composites[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 479: 334–343.
- [48] Wu Yiqi, You Tao, Liu Hailong, et al. The construction of gradient load-bearing structure on CF surface employing novel S-PI sizing agent for interfacial and mechanical properties enhancements of CFRTPs[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 303:112612.
- [49] Xu Peng, Yu Yunhua, Guo Zhenjiang, et al. Evaluation of composite interfacial properties based on carbon fiber surface chemistry and topography: Nanometer-scale wetting analysis using molecular dynamics simulation[J]. *Composites Science and Technology*, 2019, 171:252–260.
- [50] Chen Ming, Shi Zhicheng, Chen Fengxiang, et al. Interfacial engineering strategies empowering advanced fiber-reinforced polymer composites: A review[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2025, 56(12):2246–2261. [陈茗, 史芷丞, 陈凤翔, 等. 界面工程策略赋能纤维增强树脂基复合材料研究进展[J]. *高分子学报*, 2025, 56(12):2246–2261.]
- [51] Zhong Siyu, Dong Zhongxin, Xiao Yanwei, et al. The impact of crystalline PEEK sizing agent on the interfacial crystallization behavior and interfacial properties of carbon fiber reinforced PEEK composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 297:112307.
- [52] Hoang Q N, Lee S, Lee S, et al. Characterization of CFRP interface properties with varying fiber surface roughness using AFM measurements and finite element modeling[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2026, 308:112990.
- [53] Park B, Lee W, Lee E, et al. Highly tunable interfacial adhesion of glass fiber by hybrid multilayers of graphene oxide and aramid nanofiber[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(5):3329–3334.
- [54] Zheng Hao, Zhang Wenjian, Li Bowen, et al. Recent advances of interphases in carbon fiber-reinforced polymer composites: A review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 233: 109639.
- [55] Ma Lichun, Meng Linghui, Wu Guangshun, et al. Effects of bonding types of carbon fibers with branched polyethyleneimine on the interfacial microstructure and mechanical properties of carbon fiber/epoxy resin composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2015, 117:289–297.
- [56] Demir B, Henderson L C, Walsh T R. Design rules for enhanced interfacial shear response in functionalized carbon fiber epoxy composites[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(13):11846–11857.
- [57] Zhao Jian, Ma Xianglin, Zhang Luyao, et al. Effect of waterborne epoxy resin sizing agent on the properties of carbon fiber epoxy resin composites: Interface properties and hygrothermal resistance[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2025, 716:136700.
- [58] Liu Li, Jia Chuyuan, He Jinmei, et al. Interfacial characterization, control and modification of carbon fiber reinforced polymer composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2015, 121:56–72.
- [59] Meng Haichao, Qiu Baowei, Liu Zheng, et al. Wide-temperature-range curing and interfacial strengthening of carbon fiber-reinforced polyimide composites *via* a low-temperature-curable, high-temperature-resistant aqueous poly(amic acid) salt sizing agent[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025:acsami.5c20300.
- [60] Liu Xingda, Wang Zuhao, Zhen Guoqing, et al. Influence of argon plasma treatment on interfacial performance of CFRP at high temperature[J]. *Composite Interfaces*, 2025, 32(1):95–106.
- [61] Weng Panpan, Prasad V, Rao P S, et al. Interfacial properties of carbon fiber-reinforced biobased resin composites by

- single fiber fragmentation, fiber push-out, and interlaminar shear strength[J]. *Polymer Composites*, 2024, 45(4): 3355–3369.
- [62] Huang Chengyu, Zhang Peng, Liu Zhiwei, et al. Effect of electrochemical anodic oxidation modification on the interfacial properties of carbon fiber reinforced polyimide composites[J]. *Polymer Composites*, 2025, 46(3): 2390–2403.
- [63] Duan Ziqi, Li Weidong, Liu Hansong, et al. Synergetic improvement of interfacial performance and impact resistance of carbon fiber-reinforced epoxy composite *via* continuous electrochemical oxidation[J]. *Polymers*, 2025, 17(8): 1007.
- [64] Wang Heng, Zhang Meili, Shao Linwen, et al. Effects of WMCNTs/GO grafted CF on the mechanical properties of CF/PA66 composites and molecular dynamics simulation study[J]. *Composites Communications*, 2026, 61: 102691.
- [65] Song Qiang, Li Kezhi, Zhang Leilei, et al. Increasing mechanical strength retention rate of carbon/carbon composites after graphitization by grafting straight carbon nanotubes radially onto carbon fibers[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 560: 831–836.
- [66] Zhou Zhaofan, Zhang Ruoxi, Cao Yi, et al. Enhancing mechanical properties of 2D carbon/carbon composites *via* ZIF-67@CNTs-modified interfacial Layers: Mechanisms and performance optimization[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 305: 112742.
- [67] Liu Mingyu, Li Zhuyi, Cao Meng, et al. Eco-friendly aqueous sizing and carbon fiber activation: A dual-pronged strategy for synergistic interfacial enhancement and scalable manufacturing of CF/PEEK composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2026, 313: 113432.
- [68] Li Yu, Yang Zhengwei. Interface strengthening of carbon fiber/epoxy resin composites *via* chemical grafting: Mechanisms and applications[J]. *Polymer Composites*, 2026, 47(S2): S9–S28.
- [69] Altun B, Tanışlı M, Uşak A C, et al. Examining paint adhesion performances on fiber-reinforced composites through atmospheric and low-pressure plasma treatments for sustainable aviation developments[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2026, 202: 109492.
- [70] Yao Zhiqiang, Wang Chengguo, Qin Jianjie, et al. Interfacial improvement of carbon fiber/epoxy composites using one-step method for grafting carbon nanotubes on the fibers at ultra-low temperatures[J]. *Carbon*, 2020, 164: 133–142.
- [71] Zeng Yuqin, Feng Haibo, Ling Ling, et al. Design and fabrication of multiscale hierarchical structures of carbon-fiber-reinforced composites with ultrahigh specific damping performance[J]. *Carbon*, 2026, 246: 120873.
- [72] Tan Yongke, Liu Junhui, Li Yujing, et al. Constructing a new multiscale “soft-rigid-soft” interfacial structure at the interphase to improve the interfacial performance of carbon fiber reinforced polymer composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2024, 248: 110458.
- [73] Hu Shaokai, Zhu Bo, Zhang Guodong, et al. Recent developments at the interface of carbon fiber-reinforced polymer composites theory, modification and interfacial properties[J]. *Polymer Composites*, 2026, 47(3): 1995–2023.
- [74] Dong Wenkui, Karalis G, Liebscher M, et al. Multifunctional carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites for sustainable and smart civil infrastructure: A comprehensive review[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2025, 45: e01594.
- [75] Johnston J P, Koo B, Subramanian N, et al. Modeling the molecular structure of the carbon fiber/polymer interphase for multiscale analysis of composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 111: 27–36.
- [76] Hu Wenlong, Cheng Hui, Zhang Kaifu, et al. A novel concurrent multiscale damage analysis method enhanced by physics-informed neural network for composite joint[J]. *Composites Science and Technology*, 2026, 275: 111483.
- [77] Li Chunting, Lu Zhaoqing, Jia Fengfeng, et al. Thermally responsive VO₂-coated carbon fiber paper with dynamically tunable electromagnetic interference shielding performance[J]. *Carbon*, 2026, 247: 121026.
- [78] Yang Huan, Cui Wenqi, Zhou Xinghai, et al. Bionic hierarchical porous carbon fibers with honeycomb-like skeleton and surface cactus-spine-like hollow nanotubes for high-performance electromagnetic wave absorption[J]. *Carbon*, 2026, 248: 121213.
- [79] Wang Sijia, Li Ying, Lei Dongyi, et al. Butterfly wing-inspired carbon fiber with confined growth of wave-trapping architecture for broadband electromagnetic wave absorption[J]. *Advanced Functional Materials*, 2026, 36(29): e26212.
- [80] Shen Xue, Li Xiong, Yang Xiaohui, et al. Lightweight and mechanically strong polyimide/carbon fibre composites with 3D asymmetric conductive network for integrated low-reflection EMI shielding and infrared-stealth capacity[J]. *Composites Science and Technology*, 2026, 273: 111416.
- [81] Luo Jiamei, Xue Yi, Yang Xueqin, et al. Integrating thermal, EMI shielding, and mechanical properties in carbon fiber/epoxy resin composites *via* interface-layup synergistic design[J]. *Advanced Functional Materials*, 2026, 36(8): e13660.
- [82] Zhu Huixin, Fu Kunkun, Huang Tianlin, et al. Highly conductive CFRP composite with Ag-coated T-ZnO interlayers for excellent lightning strike protection, EMI shielding and interlayer toughness[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 279: 111448.
- [83] Li Nan, Zhu Bo, Zhang Ye, et al. Plasticizing stretch strategy for the production of carbon nanofibers with improved

- graphitic structure and mechanical properties[J]. Polymer, 2025,328:128456.
- [84] Xu Shuang, Jia Zirui, Lan Di, et al. Synergistic polarization relaxation in heteroatom-optimized heterointerfaces for electromagnetic wave absorption[J]. Advanced Functional Materials, 2025,35(30):2500304.
- [85] Ming Xin, Wei Anran, Liu Yingjun, et al. 2D-topology-seeded graphitization for highly thermally conductive carbon fibers[J]. Advanced Materials, 2022,34(28):2201867.
- [86] Valavanis A S, Zhigilei L V. Mechanisms and channels of heat transfer in carbon fibers: From atomically resolved heat flux to mesoscopic percolation of heat conducting elements of fiber nanostructure[J]. Carbon, 2026,253:121415.
- [87] Chae Y K, Lee S, Lee J, et al. Decoupling crystallinity from thermal stability: Revisiting thermal resistance of PAN-based high modulus carbon fibers[J]. Carbon Letters, 2026, 36(1):213–226.
- [88] Wu Zhiqiang, Dong Jie, Li Xiuting, et al. Tough polyimide composites synergistically reinforced by carbon nanofiber-grafted carbon fiber and rGO for improved heat dissipation and electromagnetic interference shielding[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023,149:225–236.
- [89] Dong Shixiang, Li Jing, Zhang Shuai, et al. Excellent microwave absorption performance of PAN-based Fe/C nanofibers with low loading fillers[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 655: 130280.
- [90] Chandel N, Sreekumar T V, Rohini R, et al. Enhanced drawability and thermo-oxidative stabilization of polyacrylonitrile fibers *via* oxygenated additive[J]. Journal of Materials Science, 2026,61(10):7155–7170.
- [91] Wang Hongbao, Yi Zonglin, Zhao Zhenbo, et al. Evolution of radial aggregated structure within polyacrylonitrile-based fibers during stretching[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2025,142(33):e57310.
- [92] Xin Guoqing, Yao Tiankai, Sun Hongtao, et al. Highly thermally conductive and mechanically strong graphene fibers[J]. Science, 2015,349(6252):1083–1087.
- [93] Zhang Yuanyuan, Sawut N, Wang Jing, et al. Repairing carbon defects *via* trace phosphorus doping for enhanced sodium-ion storage[J]. ACS Energy Letters, 2026,11(4):3219–3230.
- [94] Long Qian, Zhang Fangyuan, Qu Jiayu, et al. Unraveling synergistic regulation mechanism in nitrogen/sulfur Co-doped biomass-derived hard carbon toward durable sodium-ion battery anodes[J]. Energy & Environmental Materials, 2026: e70276.
- [95] Huang Yanlin, Jiang Zhaohan, Zhao Wanru, et al. Construction of a low-thermal-resistance carbides heterogeneous interface in Cu/carbon fiber/Mo composites for thermal management application[J]. Chemical Engineering Journal, 2025,524:169541.
- [96] Kumar A, Ayyagari N, Fisher T S. Effects of graphene nanosheet outgrowths on internal thermal interface resistance in composites[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(10):6678–6684.
- [97] Shen Jingbo, Feng Yakai. Ag-deposited pitch-based carbon fiber/silicone composites with enhanced thermal conductivity through reducing interfacial thermal resistance[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2025,36(2):e70106.
- [98] Zhang Zhenbang, Yang Rongjie, Wang Yandong, et al. Enhanced thermal conductivity and reduced thermal resistance in carbon fiber-based thermal interface materials with vertically aligned structure[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2024,12(36):24428–24440.
- [99] Yang Peiwen, Kong Weijie, Li Bo, et al. Enhanced thermal conductive and interfacial performance of M40X carbon fiber/epoxy composites with multi-dimensional liquid crystalline interphase: A combined method of experimental analysis and molecular simulation[J]. Composites Part B: Engineering, 2025,307:112866.
- [100] Yang Qian, Gao Yi, Li Tian, et al. Advances in carbon fiber-based electromagnetic shielding materials: Composition, structure, and application[J]. Carbon, 2024,226:119203.
- [101] Fei Yifan, Zhang Qiyue, Chen Haoliang, et al. Preparation and photocatalytic properties of PDA@TiO₂@carbon cloth composites[J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2025, 38(1): 73–81. [费一帆, 张绮月, 陈昊良, 等. PDA@TiO₂@碳布复合材料的制备及其光催化性能[J]. 纺织高校基础科学学报, 2025,38(1):73–81.]
- [102] Luo Yang, Guo Huangying, Wan Wenyu, et al. Core-shell structured Fe₃O₄@SnO₂-reinforced self-healing polyurethane composite films with enhanced electromagnetic shielding performance[J]. Journal of Materials Science, 2025,60(30):12783–12802.
- [103] Tang Zenghua, Li Hongjie, Bi Siyi, et al. Effect of reinforced structure on electromagnetic shielding properties of carbon fiber/thermoplastic polyurethane flexible composites[J]. Journal of Textile Research, 2025,46(10):111–119. [唐曾华, 李宏杰, 毕思伊, 等. 增强结构对碳纤维/热塑性聚氨酯柔性复合材料电磁屏蔽性能的影响[J]. 纺织学报, 2025,46(10): 111–119.]
- [104] Tang Kehao, Yang Zhuoyuan, Cheng Meng, et al. 3D-printed multi-stage helical continuous carbon fiber based supercapacitors with enhanced mechanical performance[J]. Journal of Energy Storage, 2026,148:120354.
- [105] Yang Xueqin, Luo Jiamei, Xue Yi, et al. MWCNT function-

- alized CF/PEKK composites with optimized EMI shielding and mechanical properties[J]. *Composites Communications*, 2023, 42: 101679.
- [106] Su Xiaolei, Wang Penghui, Jia Yan. Preparation and performance of nickel-coated graphite/silicone rubber electromagnetic shielding composites[J]. *Basic Sciences Journal of Textile Universities*, 2024, 37(2): 33–39. [苏晓磊, 王鹏辉, 贾艳. 镀镍石墨导电硅橡胶电磁屏蔽复合材料的制备及性能[J]. *纺织高校基础科学学报*, 2024, 37(2): 33–39.]
- [107] Wang Nan, Li Xiong, Cao Wenjing, et al. Lightweight polyimide nanocomposites with 3D cocarbonized MXene/carbon fiber networks for electromagnetic interference shielding and high-temperature stability[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2025, 8(14): 7347–7359.
- [108] Duan Hongji, Zhu Huixin, Yang Jianming, et al. Effect of carbon nanofiller dimension on synergistic EMI shielding network of epoxy/metal conductive foams[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 118: 41–48.
- [109] Li Minghao, Jiang Ziyang, Shao Huiqi, et al. A flexible electromagnetic metamaterial absorber with the characteristics of textile textured meta-surface and dielectric lossy layer[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2026, 200: 109282.
- [110] Zhu Shu, Shi Rujing, Qu Mingcheng, et al. Simultaneously improved mechanical and electromagnetic interference shielding properties of carbon fiber fabrics/epoxy composites *via* interface engineering[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 207: 108696.
- [111] Wang Yuna, Liang Caiyun, Lin Chuanwei, et al. Flexible, ultra-strong, and recyclable polymer/CNT/carbon fiber fabric composites for high-performance electromagnetic interference shielding[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2026, 535: 175759.
- [112] Wan Xinyi, Zhang Leilei, Wang Tiantian, et al. Synergistic optimization of multifunctional properties in carbon fiber/phenolic composites by designing array carbon nanotubes structures on the surface of carbon fibers[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2025, 215: 233–243.
- [113] Qiao Sijie, Shi Zhicheng, He Annan, et al. Collaborative optimization of electromagnetic interference shielding, adaptive multi-color, and thermal camouflage of basalt fibers by temperature-induced gradient structure control[J]. *Exploration*, 2026, 6(2): 70135.
- [114] Qiao Sijie, Shi Zhicheng, Tong Aixin, et al. Inorganic high-performance fiber-based materials for electromagnetic interference shielding: Fundamentals, fabrications, and emerging applications[J]. *Nano-Micro Letters*, 2026, 18(1): 229.
- [115] Wang Yuanshuai, Han Haotian, Zhang Mingye, et al. Biomass-derived carbon-based SiC coral-like nanostructures for electromagnetic wave absorption[J]. *Nano Research*, 2025, 18(9): 94907790.
- [116] Bai Mingqi, Zhao Donglin, Zhang Qing, et al. Advances in structural design and high-temperature resistance of electromagnetic absorbing materials: A comprehensive review[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2026, 202: 109464.
- [117] Chen Jiaxin, Chen Pingan, Zhu Yingli, et al. Modulation of carbon atom hybridization structure and electromagnetic absorption properties in carbon fiber composites[J]. *Carbon*, 2025, 245: 120823.
- [118] Wang Lixi, Guan Yongkang, Qiu Xu, et al. Efficient ferrite/Co-porous carbon microwave absorbing material based on ferrite@metal-organic framework[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 326: 945–955.
- [119] Xu Xuefei, Wang Guizhen, Wan Gengping, et al. Magnetic Ni/graphene connected with conductive carbon nano-onions or nanotubes by atomic layer deposition for lightweight and low-frequency microwave absorption[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 382: 122980.
- [120] Cheng Haoran, Pan Yamin, Wang Xin, et al. Ni flower/MXene-melamine foam derived 3D magnetic/conductive networks for ultra-efficient microwave absorption and infrared stealth[J]. *Nano-Micro Letters*, 2022, 14(1): 63.
- [121] Guo Shennan, Zhang Yuqing, Chen Jiabin, et al. The excellent electromagnetic wave absorbing properties of carbon fiber composites: The effect of metal content[J]. *Inorganic Chemistry Frontiers*, 2022, 9(13): 3244–3250.
- [122] Zhang Xuecong, Qi Song, Zhao Yi, et al. Synthesis and microwave absorption properties of Fe@carbon fibers[J]. *RSC Advances*, 2020, 10(54): 32561–32568.
- [123] Zhang Zhe, Shan Zicheng, Huang Jianguang, et al. Construction of Co-hollow carbon nanofibers with tunable inner pore diameters *via* coaxial electrospinning toward highly efficient microwave absorption[J]. *Carbon*, 2026, 247: 121085.
- [124] Deng Yu, Yang Minghang, Liu Qiongxia, et al. Biologically inspired nanoporous PAN/PMMA/ β -CD carbon fibers for efficient microwave absorption[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2024, 7(3): 3199–3209.
- [125] Wang Yifan, Zhou Xinghai, Han Lu, et al. *In-situ* growth of magnetic nanoparticles on honeycomb-like porous carbon nanofibers as lightweight and efficient microwave absorbers[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(22): 35476–35487.
- [126] Zuo Xiaodan, Xu Pan, Zhang Chongyang, et al. Porous magnetic carbon nanofibers (P-CNF/Fe) for low-frequency electromagnetic wave absorption synthesized by electrospinning[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(4): 4474–4481.

- [127] Wang Sihan, Liu Xin, Qiu Junfeng, et al. Construction of 1D porous MOF-derived ZnO/C fibers anchored by 0D cobalt nanoparticles for enhanced microwave absorption and thermal conductivity[J]. Carbon, 2025, 243: 120527.
- [128] Li Zhuoyang, Zhang Feng, Zong Ze, et al. Bifunctional structural regulation of polymer composites for high-efficiency electromagnetic wave absorption and heat dissipation[J]. Small, 2026, 22(29): e73337.
- [129] Zhang Yu, Luo Yuxin, Huang Ya, et al. Desired color diversity of carbon fiber with excellent environmental superdurability and remarkable flame retardancy[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, 17(5): 8340–8348.
- [130] Shi Zhicheng, Chen Fengxiang, Wang Mengyun, et al. Current status and development trends of high-performance inorganic fibers and their products for aerospace and aeronautical applications[J]. Journal of Textile Research, 2025, 46(12): 233–242. [史芷丞, 陈凤翔, 王梦云, 等. 面向空天应用的高性能无机纤维及制品发展现状及趋势[J]. 纺织学报, 2025, 46(12): 233–242.]
- [131] Zhang Jin, Lin Gang, Vaidya U, et al. Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications[J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 250: 110463.
- [132] Chen Hongliang, Zhang Weining, Ren Shizhao, et al. Temperature-triggered supramolecular assembly of organic semiconductors[J]. Advanced Materials, 2022, 34(22): 2101487.
- [133] Fang Houcheng, Xi Li, Huang Yixing, et al. Fiber-reinforced composites: A comprehensive review of traditional and additive manufacturing processes and material architectures[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2026, 205: 109684.
- [134] Zhao Jingjing, Zhao Haibin, Guo Yu, et al. Enhanced interfacial bonding strength of hot-pressed titanium Alloy/CFRTP joint *via* laser ablation and interfacial adhesive[J]. Composites Communications, 2024, 48: 101901.
- [135] Bi Xiaoyang, Li Jiachen, Li Peng, et al. A multiscale interfacial engineering to enhance the strength of CFRTP/aluminum FSpJ hybrid joints[J]. Composites Part B: Engineering, 2025, 302: 112560.
- [136] Min Junying, Hu Jiahao, Sun Chengcheng, et al. Fabrication processes of metal-fiber reinforced polymer hybrid components: A review[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2022, 5(2): 651–678.
- [137] Deng Ying, Li Zefu, Zhi Jie, et al. Spatio-temporal prediction of curing-induced deformation for composite structures using a hybrid CNN-LSTM and finite element approach[J]. Composites Science and Technology, 2025, 268: 111225.
- [138] Verville M, Theriault D. High-performance and geometrically complex parts *via* co-extrusion additive manufacturing of multi-scale continuous carbon fiber-reinforced thermoplastic composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2026, 310: 113179.
- [139] Harper L T, Qian C, Turner T A, et al. Representative volume elements for discontinuous carbon fibre composites-Part 1: Boundary conditions[J]. Composites Science and Technology, 2012, 72(2): 225–234.
- [140] Deshpande A M, Stepanova T, Park T, et al. Investigation of the effect of cooling rates on the mechanical behavior of thermoformed continuous fiber reinforced semi-crystalline thermoplastic composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2026, 309: 113100.
- [141] Uematsu H, Oishi R, Betsuku Y, et al. Strategic control of polyamide 6 crystals for enhanced mechanical performance in carbon-fiber-reinforced polyamide 6 using a nucleating agent[J]. Composites Part B: Engineering, 2026, 316: 113560.
- [142] Ruan Fangtao, Shi Jian, Xu Zhenzhen, et al. Research progress in recycling and reuse of carbon fiber reinforced resin composites[J]. Journal of Textile Research, 2019, 40(6): 152–157. [阮芳涛, 施建, 徐珍珍, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料的回收及其再利用研究进展[J]. 纺织学报, 2019, 40(6): 152–157.]
- [143] Ding Huajun, Sun Baozhong, Gu Bohong. Deep learning-driven study of low-velocity impact crack network and damage evolution in angle interlock woven composites[J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2026, 39(1): 93–100. [丁骅骏, 孙宝忠, 顾伯洪. 深度学习驱动的角联锁机织复合材料低速冲击裂纹网络与损伤演化研究[J]. 纺织高校基础科学学报, 2026, 39(1): 93–100.]
- [144] Air A, Shamsuddoha M, Prusty B G. A review of Type V composite pressure vessels and automated fibre placement based manufacturing[J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 253: 110573.
- [145] Zhang Jie, Li Wenya, Xu Anchang, et al. Knotted carbon nanotube fibers and its interfacial properties with epoxy resin[J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2020, 33(4): 11–16. [张洁, 李文雅, 徐安长, 等. 碳纳米管纤维纽结设计及其与环氧树脂界面性能[J]. 纺织高校基础科学学报, 2020, 33(4): 11–16.]
- [146] Li Jun, Lv Rongrong, Gu Chunlin, et al. An ageing test standards analysis on thermoplastic liners of type IV composite hydrogen storage tanks[J]. Energies, 2023, 16(6): 2818.
- [147] Zhao Chenggong, Zhu Zhenyu, Guo Qiuyu, et al. Research on fiber reinforced concrete and its performance predic-

- tion method and mix design method[J]. Construction and Building Materials,2023,365:130033.
- [148] Yang Tao, Ma Yuwei, Li Zongjin, et al. Self-sensing concrete with enhanced linearity and conductivity prepared by alkali-activated materials and polyacrylamide-modified carbon fibers[J]. Cement and Concrete Composites, 2026, 167: 106453.
- [149] Chen Qingyu, Lu Chunhong, Zhang Bin, et al. Preparation and performance study of carbon fiber reinforced cement-based grouting material[J]. Journal of Textile Research, 2025, 46(8): 120–126. [陈晴宇, 陆春红, 张斌, 等. 碳纤维增强水泥基灌浆料的制备及其性能[J]. 纺织学报, 2025, 46(8): 120–126.]
- [150] Fan Xiaotong, Zheng Jie, Yeo J C C, et al. Dynamic covalent bonds enabled carbon fiber reinforced polymers recyclability and material circularity[J]. Angewandte Chemie, 2024, 136(40): e202408969.
- [151] Yuan Xiaomin, Zhang Yueyi, Qin Rongman, et al. A nature-inspired interfacial design strategy of carbon fiber composites by constructing ‘rigid–flexible’ ANFs/PDA nanostructures[J]. Composites Communications, 2026, 62: 102721.
- [152] Li Peng, Wang Ziqiu, Cai Gangfeng, et al. High-performance graphene-based carbon fibres prepared at room temperature *via* domain folding[J]. Nature Materials, 2026, 25(2): 191–198.
- [153] Lorenz N, Simonetto M, Wisniewsk V, et al. Exploring the repairing capabilities of high-performance glass fiber reinforced vitrimer composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2026, 312: 113314.
- [154] Jin Sebin, Oh D X, Park J. Dynamic disulfide chemistry for functional polymers: Self-healing, vitrimer behavior, and biochemical/electronic applications[J]. ChemSusChem, 2026, 19(1): e202501023.
- [155] Yuan Yanchao, Sun Yanxiao, Yan Shijing, et al. Multiply fully recyclable carbon fibre reinforced heat-resistant covalent thermosetting advanced composites[J]. Nature Communications, 2017, 8: 14657.
- [156] Li Bo, Fan Wei, Gao Xingzhong, et al. Carbon fiber reinforced epoxy based vitrimer composite material closed-loop recycling[J]. Journal of Textile Research, 2022, 43(1): 15–20. [李博, 樊威, 高兴忠, 等. 碳纤维增强类玻璃环氧高分子复合材料闭环回收利用[J]. 纺织学报, 2022, 43(1): 15–20.]
- [157] Röttger M, Domenech T, van der Weegen R, et al. High-performance vitrimers from commodity thermoplastics through dioxaborolane metathesis[J]. Science, 2017, 356(6333): 62–65.
- [158] Lee D, Kim J H, Yang S B, et al. Development of reprocessable structural adhesives based on covalent adaptable networks for wind turbine blade[J]. Composites Part B: Engineering, 2025, 301: 112519.
- [159] Lee H, Kim J, et al. Dynamic bond chemistry in soft materials: Bridging adaptability and mechanical robustness[J]. Chemical Reviews, 2025, 125(23): 11379–11425.
- [160] Li Xinyu, Li Zixin, Zhang Zhiqi, et al. Control on viscoelasticity of recyclable elastomer *via* orthogonal dynamic bonds to realize extrusion reprocessing[J]. Macromolecules, 2026, 59(9): 5471–5479.
- [161] Zhao Shou, Abu-Omar M M. Recyclable and malleable epoxy thermoset bearing aromatic imine bonds[J]. Macromolecules, 2018, 51(23): 9816–9824.
- [162] Kim S, Felsenthal L M, Sala O, et al. Reprocessing thermoset polyurethane foams using their residual polymerization catalysts[J]. Journal of the American Chemical Society, 2025, 147(39): 35655–35663.
- [163] Lahive C W, Dempsey S H, Reiber S E, et al. Acetolysis for epoxy-amine carbon fibre-reinforced polymer recycling[J]. Nature, 2025, 642(8068): 605–612.
- [164] Liu Xingyu, Wang Yi, Liu Wei, et al. Overcoming rigidity through flexibility: Epoxy vitrimer integrates ultrahigh strength, excellent network dynamicity and closed-loop recyclability[J]. Advanced Functional Materials, 2026, 36(47): e75558.
- [165] Liang Zihui, Deng Yun, Shi Zhicheng, et al. AI-driven design of powder-based nanomaterials for smart textiles: From data intelligence to system integration[J]. Advanced Powder Materials, 2026, 5(1): 100356.
- [166] Ge Jia, Zhang Jiduo, Xu Moran, et al. Data-driven CFRP machining performance prediction and optimization: Advances, challenges and future prospects[J]. Thin-Walled Structures, 2025, 216: 113721.
- [167] Huang Zhiyu, Xing Tonghe, He Annan, et al. Research progress on resource recycling and reusing of waste textiles[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(S1): 188–203. [黄智宇, 邢桐贺, 何安南, 等. 废旧纺织品的资源化循环再生利用研究进展[J]. 科学通报, 2023, 68(S1): 188–203.]
- [168] Xu Jun. Research and application of new functional macromolecule material[J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2002, 15(3): 258–263. [徐军. 新型功能高分子材料的研究与应用[J]. 纺织高校基础科学学报, 2002, 15(3): 258–263.]
- [169] Guo Xiang, Li Tian, Liu Chunting, et al. Machine learning based prediction of mechanical properties in carbon fiber recovered through pyrolysis[J]. Waste Management, 2026, 212: 115347.
- [170] Rijo B, Dias A P S, Santos Carvalho J P. Recovery of carbon fibers from aviation epoxy composites by acid sol-

volysis[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2023, 35:e00545.

[171] Coser M, Rigotti D, Pegoretti A. Fused filament fabrication and recycling of bio-based polyamide 11 reinforced with recycled short carbon fibers[J]. Polymer Composites, 2026, 47(9):7909–7923.

[172] Cui Jinze, Luo Yutai, Kong Lingcong, et al. Simultaneous improvement in-plane mechanical performance and impact resistance of CF/PEEK composites *via* constructing a gradient modulus interphase[J]. Chemical Engineering Journal, 2026, 529:172690.

[173] Ma Mingyuan, Wang Yining, Pang Guoxin, et al. Interphase construction *via* rigid–flexible segment modulation: Poly (amic acid) sizing for strengthening carbon fiber/thermoplastic resin composites[J]. Composites Science and Technology, 2026, 279:111612.

[174] Qiao Sijie, Shi Zhicheng, Tong Aixin, et al. Atomic layer deposition paves the way for next-generation smart and functional textiles[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2025, 341:103500.

[175] Zhang Yu, Luo Yuxin, Wang Mengqi, et al. Advances in colored carbon-based fiber materials and their emerging applications[J]. SusMat, 2024, 4(6):e243.

[176] Luo Yuxin, Shi Zhicheng, Qiao Sijie, et al. Advances in nanomaterials as exceptional fillers to reinforce carbon fiber-reinforced polymers composites and their emerging applications[J]. Polymer Composites, 2025, 46(1):54–80.

[177] Zhai Lisha, Guo Yizhu, Chen Fengxiang, et al. Progress on high performance and multi-functionalization of fiber materials[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(1):300–306. [翟丽莎, 郭一竹, 陈凤翔, 等. 纤维材料的高性能化和多功能化研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(1):300–306.]

[178] Lyu Jixiang, Wang Xiaoxu, Zhu Hongye. Research on com-

pression deformation behavior of two-dimensional fiber fabric in CRTM process[J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2025, 38(4):59–67. [吕吉祥, 王晓旭, 朱洪业. CRTM 工艺中二维纤维织物压缩变形行为研究[J]. 纺织高校基础科学学报, 2025, 38(4):59–67.]

【校友简介】



徐卫林, 第十四届全国人大代表, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士。国家杰出青年基金获得者, 教育部高层次人才奖励计划特聘教授, “万人计划”首批科技创新领军人才, 国家“百千万人才工程”首批国家级人选。主要从事纺织材料等方向研究, 主持和参与国家重点

研发计划、国家科技支撑计划、973 国家高新技术基础研究、国家自然科学基金等科研项目 30 余项。在国内外发表 SCI 收录论文 140 篇, 已授权发明专利 5 项及中国发明专利 80 余项。获国家技术发明二等奖、国家科技进步奖一等奖、湖北省技术发明一等奖。荣获中国纺织创新年度人物、美国纤维协会杰出成就奖、中国第十一届青年科技奖、湖北省科学技术突出贡献奖、何梁何利基金科学与技术创新奖、中国纺织学术大奖、桑麻学者、改革开放 40 年纺织行业突出贡献人物, 湖北省政府专项津贴、湖北五四青年奖章、湖北省十大杰出青年、湖北省五一劳动奖章、湖北省优秀共产党员和国务院政府特殊津贴、全国师德先进个人、全国五一劳动奖章、全国先进工作者。任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、湖北省科学技术协会副主席、湖北省人民政府咨询专家。

Carbon Fiber-reinforced Polymer Composites: Interface Science, Multifunctional Synergy, and Closed-loop Reconfiguration

HUANG Zixi, CHEN Ming, SHI Zhicheng, HU Peiying, CHEN Fengxiang*, XU Weilin*

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

Abstract:

Significance Carbon fiber-reinforced polymer composites (CFRPs) are enabling materials for the production of lightweight high-end equipment; however, their further advancement is hindered by three interconnected bottlenecks: The “interface/strength paradox” between surface activation and fiber strength retention, the “structure-function” trade-off between mechanical load-bearing capacity and thermal/electromagnetic functionalities, and the “lifecycle fragmentation” caused by the irreversible crosslinked networks of thermosetting resins. Although these challenges manifest differently, they converge at the fiber-matrix interphase, which is the critical site for stress transfer and damage initiation, a barrier region for phonon and electron transport across phases, and a decisive site for bond breaking during recycling.

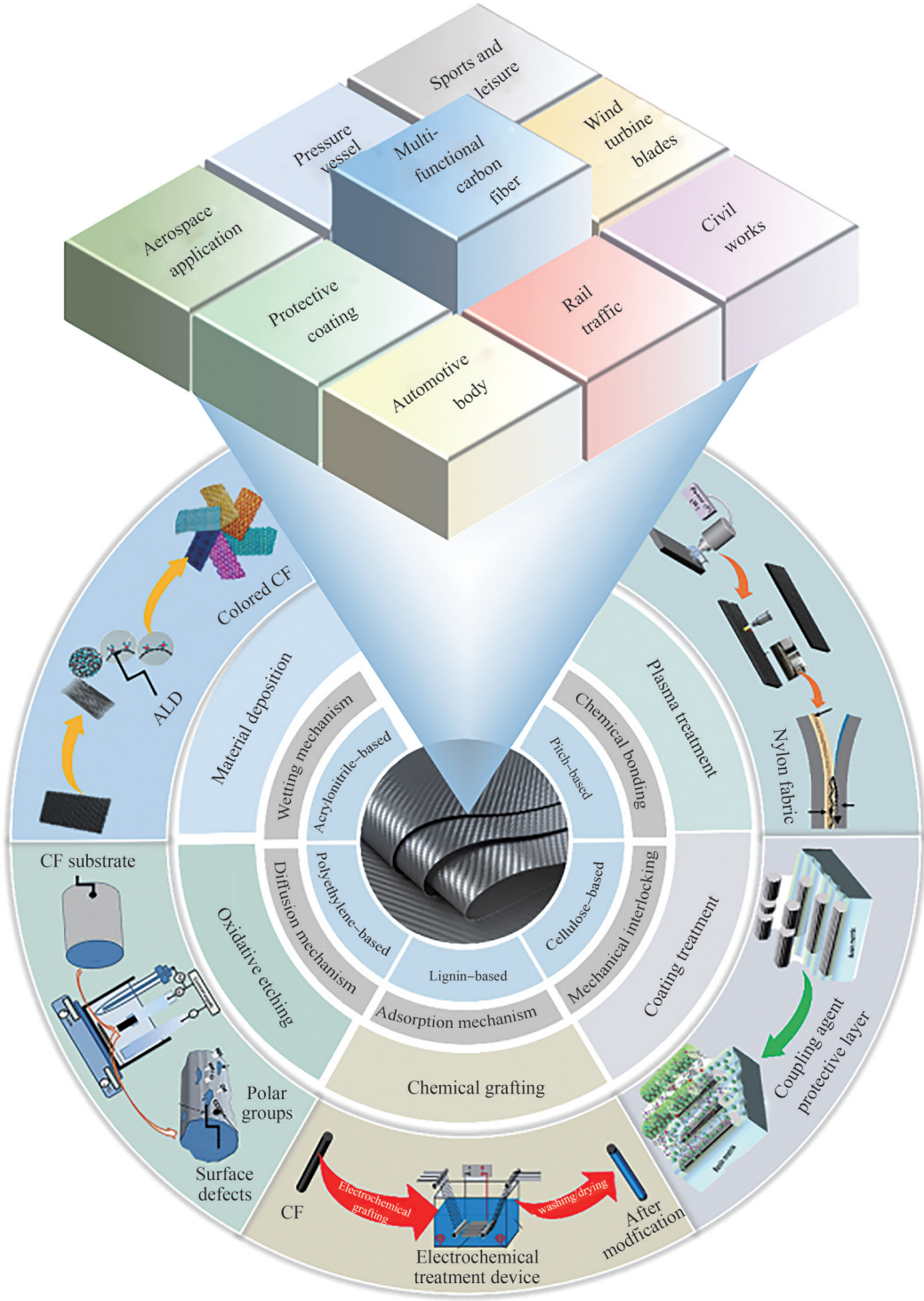
This review systematically deconstructs the physicochemical origins of these bottlenecks from the perspectives of precursor chemistry, interface science, and materials genomics.

Process The intrinsic performance of carbon fibers is fundamentally constrained by precursor chemistry: Polyacrylonitrile (PAN) based fibers generally exhibit limited thermal conductivity ($<20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) because of the topological mismatch between one-dimensional polymer chains and two-dimensional graphite lattices. Mesophase pitch-based fibers can achieve thermal conductivities of up to $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ but typically exhibit tensile strengths of only 2–4 GPa owing to the inherent trade-off between molecular orientation and interchain bonding. Biobased and polyethylene-derived precursors are, respectively, challenged by the heterogeneity of pyrolysis and the competition between diffusion and reaction during sulfonation, resulting in mechanical properties inferior to those of PAN-based systems. Interfacial modification cannot overcome these intrinsic limitations, which therefore define the feasible domain for subsequent tailoring strategies. At the interface science level, we examine the mechanical contributions of three bonding mechanisms, physical/mechanical interlocking, intermolecular interactions, and covalent bonding, and their evolution under different loading modes. A critical assessment of mainstream modification strategies, including sizing, plasma treatment, wet chemical oxidation, chemical grafting, and nanophase deposition, reveals a four-dimensional trade-off among enhancement magnitude, fiber damage, process complexity, and environmental compliance, with no universally optimal solution. A promising pathway to overcome this trade-off lies in multiscale synergistic design, such as gradient modulus interphases that combine a high-modulus inner layer for efficient stress transfer with a low-modulus outer layer for stress buffering and crack suppression, thereby reconciling strength and toughness. In the context of structure-function integration, this review elucidates the transport of phonons, electrons, and electromagnetic waves across heterogeneous interfaces. Enhanced thermal conductivity requires nanocarbon “seeding” to promote graphitization and alleviate topological mismatch, whereas electromagnetic interference shielding and microwave absorption require three design principles: continuous three-dimensional conductive networks, synergistic optimization of impedance matching and attenuation capability, and gradient or layered architectures that spatially decouple reflection and absorption. An inherent conflict exists between thermal functionality and mechanical performance: high thermal conductivity requires large, well-ordered graphite crystallites, whereas efficient microwave absorption generally requires a moderate density of defects to enhance polarization loss. This contradiction necessitates gradient or layered heterogeneous strategies rather than homogeneous designs. In engineering applications spanning aerospace, automotive, energy equipment, and civil infrastructure, CFRPs face specific challenges, including process-property correlations in automated fiber placement, interfacial failure in dissimilar material joints, conflicts between rapid molding and crystallization kinetics, and hydrogen-induced damage in high-pressure storage vessels. These practical demands are driving a paradigm shift from simple material substitution toward integrated “structure-process-performance” co-design. To address sustainability, this review focuses on dynamic covalent chemistry as a molecular strategy for rendering thermosetting networks reversible. The trade-off between recycling convenience and service stability is compared for dissociative and associative dynamic bonds. Extending dynamic bond design from the bulk resin to the interphase, we propose the concept of a “dynamic interphase”, in which reversible bonds dissipate strain energy during service through reversible bond breaking and reformation, undergo selective cleavage under external stimuli to enable mild fiber separation during recycling, and retain active sites to facilitate interphase “regeneration” during remanufacturing. Furthermore, we review the multilevel applications of machine learning in optimizing pyrolysis and solvolysis processes while identifying current bottlenecks, including limited data availability and poor model interpretability.

Conclusions and Prospects This review establishes that the long-standing trade-offs between interfacial strength and fiber integrity, structural and functional performance, and service durability and end-of-life recyclability all originate from the same interphase region. Its multiscale engineering, particularly through gradient modulus and dynamic covalent designs, provides a unified strategy for addressing these seemingly irreconcilable demands. Looking forward, four strategic directions are outlined: 1) the development of low-damage, precision interphase construction techniques, such as atomic layer deposition; 2) the establishment of data-driven materials genome platforms for inverse design to shorten development cycles; 3) the construction of digital twin systems integrating process, structure, performance, and lifetime for intelligent manufacturing; and 4) the implementation of full-lifecycle, green, closed-loop systems based on “material passports” and intelligent recycling strategies. Only through synergistic advances in interface science, materials innovation, and smart manufacturing can CFRPs be transformed into greener and smarter composites.

Key words: carbon fiber; interfacial engineering; multifunctional composites; dynamic covalent bonds; machine learning; sustainability

Graphical abstract:



(编辑 吴芝明)

引用格式: Huang Zixi, Chen Ming, Shi Zhicheng, et al. Carbon fiber-reinforced polymer composites: Interface science, multifunctional synergy, and closed-loop reconfiguration[J]. Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(5): 73–100. [黄子熙, 陈茗, 史芷丞, 等. 碳纤维增强聚合物复合材料: 界面科学、多功能协同与闭环重构[J]. 工程科学与技术, 2026, 58(5): 73–100.]