DOI:10.11918/202512118

碳纤维水性上浆剂研究进展

何志超[1,2],尤 涛[3],苑成策[4],李迎春[1,2],刘 丽[3],黄玉东[3]

(1. 中北大学 材料科学与工程学院,太原 030051; 2. 山西省聚酰胺材料技术创新中心(中北大学),太原 030051;
3. 哈尔滨工业大学 化工与化学学院,哈尔滨 150001; 4. 沈阳飞机工业(集团)有限公司,沈阳 110850)

摘 要:碳纤维增强树脂基复合材料在航空航天、船舶制造等关键领域的应用日益广泛,而作为其关键界面的上浆剂,对保护纤维、集束单丝及优化纤维与树脂基体间的界面性能至关重要。尽管国产碳纤维产业已取得长足进步,但高性能碳纤维上浆剂的核心技术仍落后于国外企业,成为制约产业链自主可控的"卡脖子"难题。本文概括了碳纤维上浆剂提升复合材料界面性能的两种核心机理,为上浆剂的设计制备提供理论基础;总结了溶剂型、乳液型和水性上浆剂的各自特点,对比了不同种类上浆剂组成、制备方法、界面性能、环保以及成本等方面的区别,认为绿色环保、成本低廉的水性上浆剂是未来的发展方向,并对其目前的研究现状进行了详细综述;指出目前碳纤维水性上浆剂面临的挑战,既有普遍存在的稳定性问题,也缺乏适用于高性能热塑性树脂体系的专用高端产品;最后对碳纤维水性上浆剂未来研究方向进行了展望,旨在为中国高性能碳纤维上浆剂的自主研发提供理论参考与技术思路。

关键词:碳纤维增强树脂基复合材料;碳纤维水性上浆剂;高性能热塑性树脂;界面性能

中图分类号:TB332 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)08-0001-09

Research progress on aqueous sizing agents for carbon fibers

He Zhichao[1,2], You Tao[3], Yuan Chengce[4], Li Yingchun[1,2], Liu Li[3], Huang Yudong[3]

(1. School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Shanxi Center of Technology Innovation for Polyamide Materials (North University of China), Taiyuan 030051, China;
3. School of Chemistry and Chemical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
4. Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110850, China)

Abstract: Carbon fiber reinforced polymer composites are increasingly utilized in critical fields such as aerospace and ship building. As a key interface material, the sizing agent is crucial for protecting fibers, bundling filaments, and optimizing the interfacial performance between fibers and resin matrices. Although the Chinese carbon fiber industry has made significant progress, core technologies for high-performance sizing agents still lag behind international counterparts, becoming a "bottleneck" problem restricting the independent control of the industrial chain. This paper summarized two core mechanisms by which sizing agents for carbon fibers enhance the interfacial performance of composites, providing a theoretical basis for the design and preparation of sizing agents. The characteristics of solvent-based, emulsion-type, and aqueous sizing agents were summarized. The differences in composition, preparation methods, interfacial performance, environmental protection, and cost among different sizing agents were compared. It is considered that eco-friendly and low-cost aqueous sizing agents represent the future direction, and their current research status is reviewed in detail. Meanwhile, the challenges currently faced by aqueous sizing agents for carbon fibers are pointed out, including the prevalent stability issues and the lack of specialized high-end products suitable for high-performance thermoplastic resin systems. Finally, the future research directions are prospected, aiming to provide theoretical references and technical ideas for the independent research and development of high-performance sizing agents for carbon fibers in China.

Keywords: carbon fiber reinforced polymer composite; aqueous sizing agent for carbon fiber; high-performance thermoplastic resin; interfacial performance

碳纤维(CF)具有高比强度、低膨胀系数、耐化学腐蚀和耐高温等优异性能,因此碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)在航空航天、风力发电设备等高端领域应用广泛[1]。近年来,通过中复神鹰、光

收稿日期:2025-12-23;**录用日期**:2026-01-10;**网络首发日期**:2026-02-10
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20260209.1707.006
基金项目:国家自然科学基金青年基金C类(52503117)
作者简介:何志超(1992—),男,博士,讲师;黄玉东(1965—),男,教授,博士生导师,中国工程院院士
通信作者:黄玉东,ydhuang.hit1@aliyun.com

威复材、吉林化纤等国内企业的技术创新[2-3]，碳纤维的国产化进程取得了显著突破，逐步打破了国外的长期垄断。然而，作为 CFRP 关键组成部分的碳纤维上浆剂，其发展仍面临严峻挑战。碳纤维本身呈化学惰性，与树脂基体界面相容性差，且在生产和加工过程中易起毛、断丝，因此上浆剂对于碳纤维的生产、储存、运输及复合材料的界面性能至关重要[4-6]。目前，碳纤维增强高性能热塑性树脂用高性能上浆剂的技术仍落后于国外企业，这严重制约了中国碳纤维在高精尖领域尤其是高温应用场景下的发展。高端上浆剂的“卡脖子”问题，已成为制约产业链自主可控的紧迫难题[7-8]。

本文旨在围绕碳纤维水性上浆剂的国内外研究进展进行综述。首先介绍了碳纤维上浆剂的作用机理以及不同类型上浆剂的特点，并从性能、成本及环保角度进行对比分析；重点阐述碳纤维水性上浆剂主浆料聚合物的分子结构设计原理，及其对上浆剂制备工艺与 CFRP 最终性能的影响机制。最后，对未来碳纤维水性上浆剂在合成与制备方面的研究方向进行展望，以期为该领域的后续研究提供思路。

1　碳纤维上浆剂的作用及机理

碳纤维性能卓越，应用领域正持续拓展。国产碳纤维产业的蓬勃发展，有力推动了碳纤维复合材料的技术进步与规模化应用。面对不同应用场景与复杂工况条件，如何设计与之匹配的高性能上浆剂，成为保障复合材料具备稳定优异性能的关键所在。上浆剂一般由溶剂、乳化剂等助剂和主浆料组成，主浆料作为有效成分，直接决定着复合材料的界面性能，因此，深入理解上浆剂的作用机制与相关机理，是科学设计主浆料分子结构、合理开发上浆剂制备方法、以及精准优化上浆工艺的重要理论基础与核心依据[9-10]。

碳纤维表面的上浆剂层一般不超过几百纳米[11-12]，质量在整体的 CFRP 中更是可以忽略不计，但在碳纤维和 CFRP 的整个生命周期中起着关键性作用，主要体现在以下两方面。一是保护纤维，同时提升工艺操作性。目前碳纤维主要通过聚丙烯腈(PAN)纤维在高温条件下经过预氧化、碳化和石墨化等处理工序制备而成，得到的是由数千根直径仅 5 ~ 10 μm 的单丝组成的松散脆弱丝束，且在保存、运输和加工过程中易相互摩擦而起毛断丝。上浆剂在纤维表面能形成一层保护膜，从而有效避免此类损伤，维持碳纤维的原始力学性能[13]，如图 1 所示。上浆剂的另一个核心作用是改善 CFRP 微观界面性能，进而提升复合材料的宏观力学表现，对最终复合材料的力学性能和耐久性至关重要[14]。这对上浆剂与基体树脂之间的性能匹配提出了明确要求。比如热塑性树脂的分解温度较高，普通的环氧树脂上浆剂热稳定性差，因此需要选择耐热性与基体树脂结构类似的上浆剂主浆料[15-16]。同时，碳纤维表面为化学惰性的全碳结构，与树脂基体的结合能力较弱，上浆剂的引入可有效修饰纤维表面，显著增强纤维与树脂的界面结合力[17-19]。如图 1 所示，根据作用机制的不同，其结合机理主要可分为“相似相容”与“化学键合”两类。

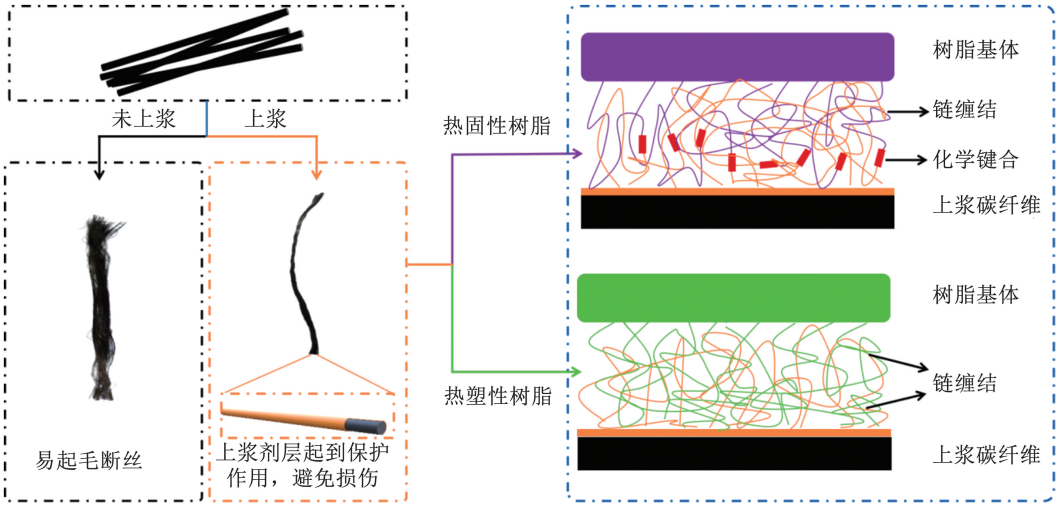


图 1　上浆剂效用及界面作用机理

Fig. 1　Efficacy of sizing agents and interfacial interaction mechanisms

相似相容机理指的是上浆剂主浆料聚合物分子与树脂基体分子结构相同或相近，良好的相容性促使二者在界面处发生分子链的相互渗透、扩散与缠结，从而强化界面结合[20-21]。例如，文献[22]为了增强 CF/PEEK 复合材料的界面性能，选择与聚醚醚酮(PEEK)结构类似的聚醚酰亚胺(PEI)作为主

浆料,溶于溶剂中制备成上浆剂,研究结果表明,经上浆处理后,由于 PEI 和 PEEK 分子之间的相互扩散、缠结和机械互锁,CF/PEEK 复合材料的界面剪切强度显著提高了 44%。相似相容机理仅涉及分子链缠结等物理作用,且上浆剂主浆料与基体树脂相似,较难通过官能团以及元素组成的变化进行表征,但可通过引入标记物质,直观研究上浆纤维和复合材料的相互作用。例如,文献[11]通过在商用上浆剂中引入荧光物质 $NaYF_4$,对碳纤维进行上浆并制备了复合材料,对制备的上浆碳纤维和复合材料进行荧光表征发现,上浆碳纤维的上浆剂层厚度为 115 nm,而带有荧光信号的复合材料界面层厚度达到了1.2 μm,表明上浆剂层和基体树脂之间由于结构相似,发生了明显相互渗透、扩散与缠结。模拟计算同样是种有效表征方法,文献[23]通过分子动力学模拟详细探索了上浆剂的界面作用,发现上浆剂层与纤维和树脂之间存在着层级结构,第一层为上浆剂与碳纤维的界面层,第二层主要为上浆剂分子与基体树脂分子之间的物理缠结和化学作用,第三层则是上浆剂分子渗透扩散到树脂基体相中。

化学键合机理则依赖于上浆剂主浆料与树脂基体之间发生化学反应以增强界面结合。因热塑性树脂基体通常缺乏可反应的活性基团,所以该机理主要应用在碳纤维增强热固性树脂复合材料体系,如最常见的是环氧树脂体系。例如,文献[24]研制了一种含亲/疏水基团的环氧类上浆剂,用于增强碳纤维/环氧树脂复合材料的界面性能。研究发现,该上浆剂的引入大幅提高了复合材料的界面剪切性能,并通过调节亲/疏水基团比例,可进一步调控上浆剂在碳纤维表面的润湿行为,从而优化界面性能。化学键合机理由于涉及到化学反应的发生,可以通过简单的官能团变化进行研究。例如,文献[25]利用 FT - IR 研究了上浆剂和基体树脂反应前后官能团的变化,证明了两者之间的化学反应。密度泛函理论可以计算吸附能,也被用来证明上浆剂分子和基体树脂之间的化学键合[26]。

2　碳纤维上浆剂的分类

为确保上浆剂在碳纤维表面形成均匀、稳定的功能性界面层,工业生产中普遍采用浸渍法进行涂覆。该方法要求上浆剂必须以液态形式存在,依据其分散介质与制备路径的不同,主要可分为溶剂型、乳液型及水性上浆剂三大类别,见图 2。这三类上浆剂在组成、性能及应用层面各有侧重,共同构成了当前碳纤维上浆的技术体系。

溶剂型上浆剂通常由聚合物主浆料溶解于特定有机溶剂中构成。常用的溶剂包括 N - 甲基吡咯烷酮、邻二氯苯、丙酮、N,N - 二甲基乙酰胺(DMAc)等[27-29],该体系得益于有机溶剂对聚合物的良好溶解性,能够形成均一、稳定的溶液,使其在碳纤维表面具有优异的成膜性与保护性[30]。但缺点也十分明显,在成本方面,考虑到主浆料在上浆剂中质量分数较低,需要使用大量的有机溶剂,导致成本高昂;在环保方面,上浆后的干燥过程会导致有机溶剂挥发,污染环境,危害操作人员健康,不符合绿色环保的政策引导和发展趋势[24,31]。因此,溶剂型上浆剂在实际生产中的应用已日趋减少。



图 2　碳纤维上浆剂分类、组成和优缺点

Fig. 2　Classification, composition, and advantages/disadvantages of sizing agents for carbon fibers

针对溶剂型上浆剂有机溶剂使用量大的问题,以水为主要分散介质的乳液型上浆剂应运而生,乳液型上浆剂由主浆料、少量有机溶剂、乳化剂和水等组分组成。其中,利用水替代大部分的有机溶剂,有效缓解了溶剂型上浆剂的问题[32]。该种上浆剂的制备方法通常是将主浆料聚合物溶于少量有机溶剂中后,使有机相在乳化剂的作用下稳定分散在水相中形成乳液[33]。乳液型上浆剂虽然减少了有机溶剂的使用,但引入了乳化剂等助剂组分,尤其是对于主浆料溶解性差的热塑性树脂基体用上浆剂,需要使用的有机溶剂或者乳化剂量较大。因此,水性上浆剂逐渐被开发出来,其核心优势在于上浆剂主浆料可通过化学改性获得自乳化性能或可直接溶解于水中,从而直接以水为介质形成稳定分散体系,避免了乳化剂等小分子的引入,保护环境的同时还规避了乳化剂对复合材料性能的不利影响,是碳纤维上浆剂未来主流研究方向。

3 水性上浆剂

3.1 热固性树脂用碳纤维水性上浆剂

对于热固性树脂或通用热塑性树脂基体用上浆剂,其主浆料选择范围宽,容易找到溶解性很好或易于改性的主浆料,水性化相对容易[34]。例如,文献[35]制备了水性聚碳酸酯和水性聚氨酯碳纤维上浆剂,并用表面功能化的碳纳米管进一步改性,来增强碳纤维/聚碳酸酯的界面性能。研究发现,水性聚氨酯相较于聚碳酸酯,能在碳纤维表面形成更均匀的薄膜,成膜性更好;同时,碳纳米管的引入进一步提升了界面强度,当碳纳米管的质量分数为1 %时,水性聚氨酯和水性聚碳酸酯上浆过的复合材料界面性能较未上浆的复合材料分别提升了97.60%和87.93%。分析认为,上浆剂和碳纳米管的引入提高了碳纤维的表面能,改善了碳纤维与基体树脂的润湿性和相容性,同时碳纳米管的加入有效提升了界面处的应力传递效率,为两种不同性能的材料提供了应力传递和缓冲层,进而大幅提升了复合材料的界面性能。对于环氧树脂等本身水溶性差的聚合物,可通过接枝亲水链段进行改性。文献[36]利用亲水性材料聚乙二醇对环氧树脂主链的端基进行接枝改性,并通过调节聚乙二醇的分子量来控制环氧树脂的亲水性,合成了具有不同乳化能力的亲水性环氧树脂,进而制备成上浆剂,使用这种上浆剂后,碳纤维/环氧树脂复合材料的单丝拉伸强度最高提高了0.16 GPa,层间剪切强度提高了10.50%。这种方法制备的上浆剂虽然明显提升了复合材料的界面性能,但主链端基上引入的聚乙二醇链段亲水性较强且难以调节,自乳化后容易破乳,导致制备的乳化剂在室温下储存时间较短,约为两个月。文献[37]针对这种情况在环氧树脂的侧链上引入了亲水性不同的聚乙二醇和聚丙二醇,并通过控制聚丙二醇的分子量来调节整体分子链的亲水性。结果发现,未接枝聚丙二醇的环氧树脂制备的上浆剂稳定性很差,只能稳定储存7 d,而接枝聚丙二醇后,稳定储存6个月后未发生乳液粒径变化,而且得益于良好的浸润性,环氧树脂基上浆剂对碳纤维/环氧树脂复合材料性能提升显著,上浆后复合材料的层间剪切强度和界面剪切强度分别提升了17.41%和42.33%。

在热固性树脂用碳纤维上浆剂领域,经过长期发展,国产产品与进口产品之间的性能差距逐渐变小,但在多项指标上仍存在差距。文献[38]对比分析了国产和进口热固性树脂用环氧类碳纤维上浆剂的研究,结果表明,在上浆剂本身性质方面,两者的pH值相近,但进口上浆剂表现出更低的黏度和更小的表面张力,从应用角度看,黏度高有利于碳纤维表面较厚上浆剂层的形成,但实际上浆剂层一般厚度较低,且较低的黏度有利于上浆剂对纤维束的充分浸润;进口上浆剂较低的表面张力有利于与碳纤维表面的浸润并提升成膜性;同时,进口上浆剂的粒径较大,这可能会对其进入纤维束内部产生不利影响,但极窄的粒径分布是产品质量稳定性和乳液长期储存稳定性的重要体现。在上浆后的碳纤维方面,两种上浆剂均能显著改善纤维的亲水性与表面极性,然而,经进口上浆剂处理的碳纤维表现出更高的极性、更优异的耐磨性,且起毛现象更少,这表明国产上浆剂在配方优化方面仍有提升空间。在最终复合材料性能上,使用进口上浆剂制备的碳纤维增强复合材料展现出更高的拉伸强度,且测试数据离散性更小,说明其性能重现性更优。以上分析表明,国产产品虽然已经取得了长足进步,但在很多性能上仍有差距,导致最终的复材性能及稳定性较差,改进方向可重点关注以下两方面:一是配方设计优化,侧重上浆剂的黏度、表面张力以及主浆料极性等方面;二是制备工艺革新,借鉴引入高速剪切、微流控等先进技术,提升上浆剂的均一性和稳定性。

3.2 高性能热塑性树脂用碳纤维水性上浆剂

对于高性能热塑性树脂用上浆剂,其主浆料聚合物选择性小,一般为聚酰亚胺(PI)、PEI、PEEK、聚醚砜(PES)等,分子链刚性强,极性弱,实现水性化面临巨大挑战[39]。目前主要有以下几种技术路径:

1)主链化学改性法。类似于上述热固性树脂用水性上浆剂的制备,需在主浆料聚合物分子链上引入大量极性或离子基团[40],此种方法较难操作,原因是PEEK等主浆料聚合物分子的弱极性和低反应活性,常见的方法有磺酸化,制备过程需要用到浓硫酸等试剂。文献[41]利用浓硫酸磺化PEEK,然后将得到的改性PEEK直接溶解于水中制备得到主浆料的质量分数为0.3 %的上浆剂,然后对碳纤维织物进行上浆,引入磺化PEEK界面层,通过相似相容机理实现界面分子链缠结,提高碳纤维与PEEK树脂的界面性能,对制备的复合材料进行表征发现,相较于未上浆的材料,层间剪切强度IFSS提高了60.07%,界面剪切强度ILSS则提高了26.80%,力学性能提升显著。不可忽略的是,磺酸基的引入对PEEK的耐热性能产生了不利影响,对制备的磺化PEEK研究发现,起始分解温度为347 ℃,低于复合材料的成型温度(370 ℃),但在温度高达425 ℃时,热失重仅为1.11%,能够满足使用需求。该方法步骤简易,但主链化学改性需要使用浓硫酸等溶剂,不符合绿色发展趋势。

2)乳液-溶剂蒸发技术。该种方法是首先制备乳液型上浆剂,然后体系中的有机溶剂在高速剪切等作用下被打碎成尺寸很小的液滴而蒸发,得到聚合物水分散体。例如,为了保证主浆料聚合物在低沸点溶剂中的良好溶解,文献[42]合成了 PEEK 寡聚物,溶解在氯仿中后,利用“乳液/溶剂蒸发技术”除去氯仿得到稳定分散的乳液。文献[31]先是合成了磷酸化 PEEK,然后溶解于二氯甲烷中,在表面活性剂的作用下通过该技术去除二氯甲烷,得到了不同质量分数的 PEEK 主浆料上浆剂,使用质量分数为 0.5% 的上浆剂制备的复合材料力学性能最优,ILSS 提升了 64.5%,且储存 1 个月无明显沉淀产生,稳定性也较好。同时,磷酸基团的引入对 PEEK 的耐热性有一定的影响,300 ℃时磷酸基团就开始分解,但在磷酸化 PEEK 的加工温度 370 ℃时,失重为 3.3%,尚能适用于碳纤维的上浆改性。由以上研究可以发现,该方法并没有避免有机溶剂的使用,同时要求使用的有机溶剂沸点要足够低,才能在高速剪切下去除,因此需要对主浆料聚合物进行改性,或者限制其分子量,这在影响性能的同时还会增加工序,提高成本。

3)前驱体法。首先制备可溶于水的主浆料聚合物前驱体,制备成上浆剂,上浆后再进行后续反应,该方法进一步限制了主浆料聚合物的选择,目前仅 PI 与其前驱体聚酰胺酸(PAA)有相关研究。文献[43]通过电解 PAA 得到其水溶液,并通过加入 Fe_3O_4 和石墨烯进一步改性后制备得到复合上浆剂,上浆后经过高温亚胺化即可与基体树脂 PI 制备成复合材料。文献[10]利用二酸酐和二胺单体合成聚酰胺酸,然后通过计算羧基的摩尔量加入一定量的三乙胺来完全离子化聚酰胺酸,进而加入大量水稀释得到聚酰胺酸质量分数为 1 % 的碳纤维水性上浆剂,研究发现,制备的上浆剂溶液具有较高的 Zeta 电位,说明稳定性较好;然后对碳纤维进行上浆,发现上浆后碳纤维表面能提高,润湿性变好,并且经过上浆处理过的 CF/PES 复合材料的界面性能提升明显,IFSS 提高了 47.9%。该方法缺点是上浆剂主浆料选择十分受限,目前仅有 PI 和 PAA 有一定的研究,而且碳纤维在上浆后需要经过高温亚胺化,导致能耗变高,大幅增加了成本。

4)亲水单体设计合成法。从分子设计出发,直接合成具有亲水侧基或链段的主浆料聚合物,然后通过自乳化制备高性能热塑性树脂用上浆剂。由于该方法涉及的主浆料本身具有乳化作用,因此显著减少了有机溶剂和乳化剂的使用。文献[44]设计合成了含有亲水性多乙氧基的二酸单体,然后与二胺单体聚合制备了 PI。结果表明,制备的 PI 结晶性降低,溶解性远高于普通结构的 PI,利用多乙氧基侧基的亲水性作用,自乳化制备了不含表面活性剂的上浆剂,且能够稳定储存 12 个月以上。利用该上浆剂制备了 CF/PEI 复合材料,与购买的东丽 T300 制备的 CF/PEI 进行性能对比,发现复合材料的层间剪切强度、弯曲强度、冲击强度等都提升明显,且在湿热老化后性能稳定。在此基础上,又设计合成了含有季铵盐和酚羟基的二酸单体,进而制备了含亲水性侧基的 PI,研究表明,制备的 PI 在 370 ℃无失重,达到了复合材料的成型加工要求;然后通过 PI 的自乳化作用制备成上浆剂,不仅完全避免了乳化剂的使用,同时极大地降低了有机溶剂使用量(质量分数为 1.2%)。结果表明,上浆后改善了润湿性,表面能提高明显,而且制备的复合材料性能与使用商业环氧上浆剂的对比显著提升,层间剪切强度、弯曲强度和冲击强度分别提高了 56.84%、47.24% 和 48.84%,在湿热老化后,性能保持率达到 96%[45]。

含有亲水性基团的水性上浆剂避免了乳化剂和有机溶剂的大量使用,保护环境的同时还规避了乳化剂对复合材料性能的不利影响,但水性上浆剂的缺点是亲水基团的引入会增加上浆剂的吸水性,进而影响界面性能[46-47]。针对一般水性上浆剂的溶解性和亲水性难以兼顾的问题,一种新兴的水性上浆剂 - 悬浊液型上浆剂,逐渐引起关注,此种上浆剂特点是未在主浆料聚合物分子链上引入亲水基团,避免因吸水性和热稳定性差对复合材料界面性能造成不利影响。文献[48]选择含有柔性醚键的二酐单体与柔性脂肪族二胺聚合制备了聚酰亚胺,柔性结构的引入提高了聚合物在有机溶剂中的溶解性,因此将其溶于少量 DMAc 中后直接加入大量的水制备得到悬浊液上浆剂。上浆后制备的 CF/PEI 复合材料相较于上浆前层间剪切强度和弯曲强度分别提升了 17.30% 和 25.20%,同时也改善了复合材料的耐湿热老化性能。悬浊液上浆剂的制备类似于乳液型上浆剂,区别在于避免了小分子乳化剂的使用,相较于水性上浆剂则避免了吸水性对复合材料界面性能的影响。缺点是上浆剂稳定性较差,配制后需尽快使用,且含有少量的有机溶剂。此外,体系中上浆剂颗粒较大,如果按照现有热固性上浆剂的上浆过程使用,即通过上浆槽后烘干水分,会产生纤维表面凹凸不平或集束效果不佳的问题,未来可引入新的制备工艺减小上浆剂粒径,同时可借鉴激光快速均匀加热等新技术来解决其涂覆均匀性问题。

将热固性和高性能热塑性树脂用碳纤维水性上浆剂以及高性能碳纤维水性上浆剂的典型案例进行了组分和性能的直观对比,见表 1。

表1 碳纤维水性上浆剂组分及性能对比

Tab.1 Comparison of components and performance of aqueous sizing agents for carbon fibers

用途分类	主浆料	溶剂	主浆料质量分数/%	界面性能	分解温度	储存稳定性	参考文献
热固性树脂用碳纤维水性上浆剂	二乙醇胺扩链环氧树脂	水	2.0	IFSS 提高 34.5%；ILSS 提高 75.7%	250 ℃开始分解		文献[5]
	聚氨酯和碳纳米管	水	3.0	IFSS 提高 97.6%			文献[35]
	环氧树脂端基接枝聚乙二醇	水	24.3	ILSS 提高 10.5%		2 个月仍稳定	文献[36]
	环氧树脂侧链接枝聚丙二醇	水	30.0	IFSS 提高 42.3%；ILSS 提高 17.4%		6 个月无粒径变化	文献[37]
高性能热塑性树脂用碳纤维水性上浆剂	磺化 PEEK	水	0.3	IFSS 提高 60.1%；ILSS 提高 26.8%	425℃失重 1.1%		文献[41]
	磷酸化 PEEK	水、二氯甲烷	0.5	ILSS 提高 64.5%	370℃失重 3.3%	1 个月无明显沉淀	文献[31]
	聚酰胺酸	水、三乙胺	1.0	IFSS 提高 47.9%			文献[10]
	亲水单体合成的聚酰胺	水、DMF	0.3	ILSS 提高 45.5%	370℃无失重	6 个月无明显沉淀	文献[45]

由上述分析及表1可知,热固性树脂用碳纤维水性上浆剂的主浆料一般为环氧树脂、聚氨酯等与树脂基体可以发生化学反应的聚合物,在上浆剂组分上,由于该类聚合物可反应基团多且极性较大,其制备思路较为简单,一般为将上浆剂主浆料直接或通过改性分散在水中。该类上浆剂优势有:1)能够化学改性接枝官能团,进而通过自乳化作用将主浆料直接分散在水中,因此可以完全避免有机溶剂的使用;2)能够制备主浆料质量分数较高的上浆剂,利于产业化生产、运输及保存;3)上浆剂较稳定,能够较长时间储存。在上浆剂及复合材料性能上,主浆料与树脂基体的作用包括化学键合和相似相容,因此对复合材料界面性能提升的上限更高,但主浆料聚合物的耐热性较差,分解温度较低,吸水性较强,导致其应用于碳纤维增强高性能热塑性树脂复合材料时效果较差,且国产产品的稳定性较差,还需进一步发展。对于高性能热塑性树脂用碳纤维水性上浆剂,由于基体树脂分子的弱极性、低反应活性和很高的加工温度,上浆剂主浆料一般只能选择与基体树脂结构相似的聚合物,依靠相似相容机理相互作用,虽然也能明显提升界面性能,但化学键合的缺失导致其提升上限低于热固性体系。此外,该类上浆剂主浆料疏水性极强,导致目前的研究主要集中在如何水性化,但与热固性体系相比,工程化进程仍困难重重,主要包括有机溶剂使用量多、上浆剂稳定性较差等问题。而通过亲水单体设计合成的方法虽然明显提升了上浆剂的稳定性,但单体与主浆料聚合物的设计和合成成本高昂。

总结而言,碳纤维上浆剂的发展紧密围绕性能优化、绿色环保、成本考量三大主线推进。从溶剂型到乳液型,再到水性及悬浊液型,技术的迭代在不断提升界面性能的同时,也致力于减少乃至消除有机溶剂和有害助剂的使用。深入理解各类上浆剂的组成、特性与适用边界,是面向不同树脂基体、加工条件与应用环境,进行精准选择与创新开发的关键基础。

4 现存的挑战

对于以环氧树脂为代表的热固性树脂体系,其上浆剂主浆料通常采用与之化学兼容的环氧类聚合物,通过共价交联反应在碳纤维与树脂基体间构建强韧的界面层[49-50]。尽管此类上浆剂的技术路径相对成熟,但国产产品仍严重依赖进口[12],与进口产品仍存在一定差距,具体表现为[38]:1)上浆剂本征性能:国产产品粒径分布宽,导致乳液稳定性差,同时在黏度、表面张力等多项性能上存在差距,导致上浆后碳纤维的极性、耐磨性等较差;2)复合材料性能离散度大:受上述因素影响,使用国产上浆剂制备的复合材料,其关键力学性能较差,且数据离散性较大。因此,国产热固性树脂用上浆剂的挑战在于,如何通过精准的配方设计与优化的制备工艺,实现从储存、主浆料质量分数到最终复合材料性能的全链条稳定。

由于热固性上浆剂发展较早,常被尝试直接应用于热塑性树脂体系。然而,热塑性树脂本身缺乏可反应的活性官能团,与上浆剂的结合主要依赖

“相似相容”原理下的物理作用,传统的热固性上浆剂主浆料与多数热塑性树脂的化学相容性不佳[51]。对于通用工程塑料等性能要求不高的应用场景,尚可满足基本需求[52],但这与碳纤维高昂的成本及其所追求的高附加值应用定位并不匹配。而对于 PEI、PEEK 等高性能热塑性树脂,该类上浆剂则暴露出两个严峻问题:一是弱界面作用严重制约了复合材料力学性能的上限;二是耐热性不足(通常低于 250 ℃)[53-54],无法承受 PEI、PEEK 超过 300 ℃ 的加工温度,会在成型过程中发生热分解,反而成为界面缺陷的来源,导致性能降低[55-56]。针对上述问题,高性能热塑性树脂本身被视为该类上浆剂主浆料的理想材料,但仍面临诸多挑战,包括以下几点:1)溶解与加工性:PEI、PEEK 等聚合物分子链刚性大、无活泼可反应基团、疏水性强,水性化十分困难;2)分子结构设计与合成:为改善溶解性,需对聚合物进行分子结构设计,但高性能热塑性树脂种类少,单体选择范围窄,合成路径复杂,这极大地增加了上浆剂研发的难度与周期;3)界面作用难以兼顾:理想的上浆剂应优先与碳纤维表面形成强有力结合,其次再与基体树脂相容,但高性能热塑性聚合物主浆料与自身树脂基体的亲和力,远强于与惰性碳纤维表面的结合力,这可能导致上浆层在纤维表面附着力不足,从而限制整体性能的提升。

5　结论和展望

随着碳纤维国产化进程的不断深入,碳纤维增强树脂基复合材料在航空航天、船舶制造及高端装备等关键领域的应用前景将愈加广阔。作为决定复合材料最终性能的核心环节,开发性能卓越、批次稳定、环境友好且成本可控的高性能碳纤维水性上浆剂,已成为当前产业链中亟待突破的“卡脖子”技术瓶颈。本文综述了近年来国内外在碳纤维水性上浆剂领域的研究进展,详细梳理并对比了水性上浆剂的制备方法、性能特点及其对复合材料界面性能的影响。通过深入剖析上浆剂制备工艺与主浆料分子结构之间的内在关联,探讨了其界面增强的作用机制,以期为未来设计针对性强、综合性能优的水性上浆剂体系提供理论依据与技术参考。根据近年来的国内外研究现状,水性上浆剂制备所面临的问题和挑战可以通过以下方面进一步改进和优化:

1)短期可实现改进:聚酰亚胺基水性上浆剂的工艺优化

聚酰亚胺因前驱体聚酰胺酸优于其他热塑性树脂的溶解性,以及亚胺化后产物固有的低亲水性,是制备高性能水性上浆剂较为理想的材料。然而,当前该体系仍面临聚酰胺酸溶解性不足的挑战,直接导致上浆剂分散稳定性差、主浆料粒径较大且分布不均,最终影响上浆效果。针对此问题,短期内可通过以下协同策略进行有效改进:在分子层面,选用含醚键等柔性结构单元的单体合成聚酰胺酸,以提升其溶解性;在制备工艺层面,采用高速剪切或微流控等先进分散技术,旨在制备出粒径细小且分布均匀的稳定上浆剂体系。上述方法均基于现有技术,具备较高的工程化可行性。

2)长期基础研究:单体分子与聚合物结构设计

从根本上解决水性上浆剂的溶解性、稳定性及其与复合材料界面的兼容性问题,需要持续深入的长期基础研究。这主要集中在以下两个方面。一是单体结构设计:通过在单体分子中同时引入亲水与疏水基团,并通过比例控制,实现对主浆料聚合物亲/疏水性的调控,优化其在水中的溶解行为与最终上浆剂层的界面特性;二是聚合物结构设计:突破传统单一功能主浆料的局限,致力于设计具有明确功能分区的复杂聚合物结构,例如嵌段或接枝共聚物,使聚合物的不同链段可分别用于锚定碳纤维表面和缠结树脂基体,从而构建强且稳定的多层次界面,解决界面作用难以协同优化的关键难题。

参考文献

[1] 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. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.109639

[2] 李业宏, 姚丽谦, 刘畅, 等. T-700 级国产碳纤维性能评价[J]. 科技与创新, 2025(20): 16
Li Yehong, Yao Liqian, Liu Chang, et al. Performance evaluation of domestic T-700 grade carbon fiber[J]. Science and Technology & Innovation, 2025(20): 16. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2025.20.004

[3] 张壮, 肖军杰, 刘宝胜. 碳纤维复合材料在航空航天领域的应用进展及趋势分析[J]. 安阳工学院学报, 2025, 24(6): 18
Zhang Zhuang, Xiao Junjie, Liu Baosheng. Application progress and trend analysis of carbon fiber composites in aerospace field[J]. Journal of Anyang Institute of Technology, 2025, 24(6): 18. DOI: 10.19329/j.cnki.1673-2928.2025.06.004

[4] Wu Qing, Deng Hao, Li Yating, et al. Synergistic interfacial effects of sizing agent containing gradient curing agent and pre-heating treated carbon fibers[J]. Composites Science and Technology, 2024, 247: 110415. DOI: 10.1016/j.compscitech.2023.110415

[5] Qiu Baowei, Ling Youquan, Gu Xiwen, et al. Adjusting the pH of sizing agents to achieve superior interfacial and mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 283: 111574. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111574

[6] Ge Heyi, Ma Xiaolong, Liu Huashi. Preparation of emulsion-type thermotolerant sizing agent for carbon fiber and the interfacial properties of carbon fiber/epoxy resin composite[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(16): 41882. DOI: 10.1002/app.41882

[7] 李武胜, 胡玉霞, 乔蕊. 上浆剂存放时间对国产碳纤维及其复合材料性能影响[J]. 材料工程, 2025, 53(9): 182

Li Wusheng, Hu Yuxia, Qiao Rui. Effect of sizing agent storage time on properties of domestic carbon fiber and its composite[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(9): 182. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2023.000644

[8]邢宇, 张代军, 王成博, 等. PEEK复合材料用碳纤维上浆剂研究进展[J]. 材料工程, 2022, 50(8): 70
Xing Yu, Zhang Daijun, Wang Chengbo, et al. Research progress in carbon fiber sizing agents for PEEK composites[J]. Journal of materials engineering, 2022, 50(8): 70

[9]Yan Fei, Yan Tianwen, Wang Gaosong, et al. A novel thermoplastic water-soluble sizing agent for the interfacial enhancement of carbon fiber/polyether ether ketone composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 272: 111205. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111205

[10]Yuan Haojie, Zhang Shouchun, Lu Chunxiang, et al. Improved interfacial adhesion in carbon fiber/polyether sulfone composites through an organic solvent-free polyamic acid sizing[J]. Applied Surface Science, 2013, 279: 279. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.04.085

[11]Liu Dawei, Li Bo, Li Gang, et al. Tagged and enhanced interface of carbon fiber/epoxy by doping sizing agent with upconversion luminescent nanoparticles[J]. Materials Letters, 2017, 196: 37. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.02.132

[12]王博, 贺辛亥, 张婷, 等. 碳纤维用上浆剂的研究进展[J]. 棉纺织技术, 2022, 50(增刊1): 57
Wang Bo, He Xinhai, Zhang Ting, et al. Research progress of sizing agent for carbon fiber[J]. Cotton Textile Technology, 2022, 50(Sup.1): 57

[13]Shang Chunhang, Nan Hongwei, Bai Chengying, et al. The PEEK sizing agents modified by different dimensions nanomaterials of MXene and CNTs for enhancing the interfacial and mechanical properties of carbon fiber composites[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2025, 726: 137997. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2025.137997

[14]Dang Jing, Sun Jiayi, Liu Zheng. Interfacial strengthening and processing of carbon fibers reinforced poly(ether-ether-ketone) composites: A mini-review[J]. Polymer Composites, 2024, 45(8): 6788. DOI: 10.1002/pc.28289

[15]张凤翻. 先进热塑性树脂预浸料用原材料[J]. 高科技纤维与应用, 2014, 39(3): 1
Zhang Fengfan. Raw materials for advanced thermoplastic resin prepreg[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2014, 39(3): 1

[16]Li Yingze, Xu Nuo, Lyu Hanxiong, et al. Enhanced mechanical and tribological properties of carbon fiber/PEEK composites by hydroxylated boron nitride nanosheets and polyetherimide sizing agents[J]. Composites Science and Technology, 2023, 232: 109851. DOI: 10.1016/j.compscitech.2022.109851

[17]Peng Xingcai, Wu Yifan, Wei Ziming. Research progress on the surface modification of carbon fiber[J]. RSC Advances, 2024, 14(6): 4043. DOI:10.1039/D3RA08577E

[18]Yao Shanshan, Jin Fanlong, Rhee K Y, et al. Recent advances in carbon-fiber-reinforced thermoplastic composites: A review[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 142: 241. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.12.007

[19]Pawar S S, Hutchinson S A, Eyckens D J, et al. Carbon fiber sizing agents based on renewable terpenes[J]. Composites Science and Technology, 2022, 220: 109280. DOI: 10.1016/j.compscitech.2022.109280

[20]Wang Heming, Cheng Shan, Feng Jingyao, et al. Preparation of a water-based carboxylated Poly(phthalazione ether nitrile) sizing agent for interfacial reinforcement of CF/PPESK composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2024, 180: 108091. DOI: 10.1016/j.compositesa.2024.108091

[21]Hu Jiaoli, Yan Fei, Liu Hao, et al. Water-based PEKC-COOH sizing agent for enhancing the interfacial adhesion of carbon fiber/polyether-ether-ketone composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 225: 109279. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109279

[22]Chen Junlin, Wang Kai, Zhao Yan. Enhanced interfacial interactions of carbon fiber reinforced PEEK composites by regulating PEI and graphene oxide complex sizing at the interface[J]. Composites Science and Technology, 2018, 154: 175. DOI: 10.1016/j.compscitech.2017.11.005

[23]Ma Yuanyuan, Lu Kuan, Wang Jiangtao, et al. Mechanism of the impact of the sizing agent chain length on the interfacial mechanical properties of carbon/epoxy composites[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 675: 131997. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2023.131997

[24]Yao Jiawei, Fang Quantao, Zhang Guoliang, et al. Effect of hydrophilic-hydrophobic ratio in self-emulsifying amphiphilic epoxy sizing agent on interfacial properties of carbon fibre/epoxy composites[J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 143: 105621. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2020.105621

[25]Wu Qing, Zhao Ruyi, Zhu Jianfeng, et al. Interfacial improvement of carbon fiber reinforced epoxy composites by tuning the content of curing agent in sizing agent[J]. Applied Surface Science, 2020, 504: 144384. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.144384

[26]Li Qiong, Yang Xiaohui, Li Xiong, et al. Cross-scale optimization of interfacial adhesion and thermal-mechanical performance in carbon fiber-reinforced polyimide composites through sizing agent evolution[J]. Composites Science and Technology, 2025, 266: 111174. DOI: 10.1016/j.compscitech.2025.111174

[27]Liu Hansong, Zhao Yan, Li Na, et al. Enhanced interfacial strength of carbon fiber/PEEK composites using a facile approach via PEI&ZIF-67 synergistic modification[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(6): 6289. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.10.022

[28]Han S H, Oh H J, Kim S S. Evaluation of the impregnation characteristics of carbon fiber-reinforced composites using dissolved polypropylene[J]. Composites Science and Technology, 2014, 91: 55. DOI: 10.1016/j.compscitech.2013.11.021

[29]刘杰, 周秀燕, 梁节英. 磺化聚醚砜上浆剂对碳纤维/聚醚砜复合材料界面性能的影响[J]. 复合材料学报,2015, 32(2): 420
Liu Jie, Zhou Xiuyan, Liang Jieying. Effect of sulfonated poly(ether sulfone) sizing agent on interfacial properties for carbon fibers/poly(ether sulfone) composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 420. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20140617.001

[30]Ma Wei, Wang Xiang, Chen Weiping, et al. Improved the surface properties of carbon fiber through hyperbranched polyaryletherketone sizing[J]. Polymer Composites, 2022, 43(4): 1948. DOI:10.1002/pc.26510

[31]Lü Hanxiong, Jiang Naiyu, Hu Jiqiang, et al. Preparing water-based phosphorylated PEEK sizing agent for CF/PEEK interface enhancement[J]. Composites Science and Technology, 2022, 217: 109096. DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.109096

[32]Feng Jingyao, Wang Danhui, Li Nan, et al. Preparation of an environmentally friendly water-soluble sizing agent and its application in CF/PPESK composites[J]. Polymer, 2024, 312: 127666. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.127666

[33]Zhang Tao, Zhao Yueqing, Li Hongfu, et al. Effect of polyurethane sizing on carbon fibers surface and interfacial adhesion of fiber/polyamide 6 composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 135(16): 46111. DOI: 10.1002/app.46111

[34]Li Chengsen, Dong Yuqing, Yuan Xiaomin, et al. Waterborne polyurethane sizing agent with excellent water resistance and thermal stability for improving the interfacial performance of carbon fibers/epoxy resin composites[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 681: 132817. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2023.132817

[35]Liu Yuting, Li Lu, Wang Jiapei, et al. Effect of carbon nanotube

addition in two sizing agents on interfacial properties of carbon fiber/polycarbonate composites[J]. New Carbon Materials, 2021, 36(3): 639. DOI: 10.1016/S1872-5805(21)60035-5

[36] Yuan Xiaomin, Zhu Bo, Cai Xun, et al. Improved interfacial adhesion in carbon fiber/epoxy composites through a waterborne epoxy resin sizing agent[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134(17): 44757. DOI: 10.1002/app.44757

[37] Chen Yifan, Ding Lei, Cui Chao, et al. A simple way to synthesize a nano-scale stable epoxy emulsion for sizing CF/epoxy composites[J]. New Journal of Chemistry, 2021, 45(48): 22860. DOI: 10.1039/D1NJ04623C

[38] 赵德明, 迟军科, 王丹, 等. 两种碳纤维上浆剂的比较[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(3): 145
Zhao Deming, Chi Junke, Wang Dan, et al. Comparison on two kinds of carbon fiber sizing agents[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(3): 145. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3539.2021.03.027

[39] Wang Shengdao, Yang Yanchao, Mu Yongfeng, et al. Synergy of electrochemical grafting and crosslinkable crystalline sizing agent to enhance the interfacial strength of carbon fiber/PEEK composites[J]. Composites Science and Technology, 2021, 203: 108562. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108562

[40] Yuan Chengce, Li Dazhi, Yuan Xueyu, et al. Preparation of semi-aliphatic polyimide for organic-solvent-free sizing agent in CF/PEEK composites[J]. Composites Science and Technology, 2021, 201: 108490. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108490

[41] Su Yanan, Liu Peipei, Jing Deqi, et al. Improved interfacial adhesion in carbon fiber/poly(ether ether ketone) composites with the sulfonated poly(ether ether ketone) sizing treatment[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138(45): 51326. DOI: 10.1002/app.51326

[42] Giraud I, Franceschi S, Perez E, et al. Original Preparation of PEKK Dispersion for Coating by Transfer from a Chloroform Stable Dispersion to an Aqueous Stable Dispersion, by Emulsion/Solvent Evaporation[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2016, 37(3): 360. DOI: 10.1080/01932691.2015.1025136

[43] Hao Ruiting, Jiao Xiangwei, Zhang Xuejun, et al. Fe_3O_4/graphene modified waterborne polyimide sizing agent for high modulus carbon fiber[J]. Applied Surface Science, 2019, 485: 304. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.04.184

[44] Ma Zhenyu, Pu Yinchuan, Huang Yudong, et al. Preparation of self-emulsifying waterborne polyamide-imide sizing for carbon fiber and improvement on mechanical performances of carbon fiber reinforced thermoplastic polymer[J]. Polymer Composites, 2022, 43(9): 6560. DOI: 10.1002/pc.26969

[45] Ma Zhenyu, Pu Yinchuan, Huang Yudong, et al. Ionic aqueous quaternized Poly(amide-imide) sizing on CF for improving interface and mechanical performance of CFRTP[J]. Composites Communications, 2022, 33: 101233. DOI: 10.1016/j.coco.2022.101233

[46] 苑成策. 碳纤维用水性聚酰亚胺上浆剂的设计合成及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021
Yuan Chengce. Design, synthesis and performance of water-based polyimide sizing for carbon fiber[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2021.005088

[47] Wang Shengdao, Wang Tianjiao, Zhang Shuwen, et al. Enhancing fiber-matrix interface in carbon fiber/poly ether ether ketone (CF/PEEK) composites by carbon nanotube reinforcement of crystalline PEEK sizing[J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 251: 110470. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.110470

[48] Yuan Chengce, Ma Zhenyu, Pu Yinchuan, et al. Soluble semi-aliphatic polyimide sizing in CF/PEI composites for improving mechanical performance and hydrothermal aging resistance[J]. Composites Communications, 2021, 28: 100982. DOI: 10.1016/j.coco.2021.100982

[49] Chen Yifan, Ding Lei, Cui Chao, et al. High-epoxy value bio-based epoxy emulsion reinforced interfacial properties of carbon fiber/epoxy composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139(13): 51855. DOI: 10.1002/app.51855

[50] Liu Hailong, Chen Yifan, Chai Mingzhuo, et al. High-performance carbon fiber-reinforced epoxy resin composites based on novel, environmentally friendly, stability, and heat-moisture resistant nano emulsion encapsulated POSS sizing agent interface modification[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 284: 111697. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111697

[51] Kiss P, Glinz J, Stadlbauer W, et al. The effect of thermally desized carbon fibre reinforcement on the flexural and impact properties of PA6, PPS and PEEK composite laminates: A comparative study[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 215: 108844. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.108844

[52] Li Shengxia, Yang Changling, Yao Lili, et al. Use a polyurethane sizing agent to improve the interfacial properties of carbon fiber-reinforced polyurethane composites[J]. New Carbon Materials, 2023, 38(2): 385. DOI: 10.1016/S1872-5805(23)60705-X

[53] Duchoslav J, Unterweger C, Steinberger R, et al. Investigation on the thermo-oxidative stability of carbon fiber sizings for application in thermoplastic composites[J]. Polymer Degradation and Stability, 2016, 125: 33. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2015.12.016

[54] Qiu Baowei, Ling Youquan, Gu Xiwen, et al. Fabrication of a high-temperature resistant and water-soluble sizing agent to significantly improve the interfacial properties of carbon fiber reinforced epoxy composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2024, 185: 108344. DOI: 10.1016/j.compositesa.2024.108344

[55] Sun Zheng, Guo Fangliang, Wu Xiaopeng, et al. Experimental and simulation investigations of the effect of hybrid GO-thermoplastic polyimide sizing on the temperature-dependent tensile behavior of short carbon fiber/polyetherimide composites[J]. Composites Science and Technology, 2022, 218: 109166. DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.109166

[56] Liu Hansong, Zhao Yan, Li Na, et al. Effect of polyetherimide sizing on surface properties of carbon fiber and interfacial strength of carbon fiber/polyetheretherketone composites[J]. Polymer Composites, 2021, 42(2): 931. DOI: 10.1002/pc.25876

(编辑　赵丽莹)