

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.11.028

碳纤维上浆剂研究进展

张娅¹,熊一鸣^{1,2},刘长城¹,龙雪彬²,何敏¹,刘玉飞¹

(1. 贵州大学材料与冶金学院, 贵阳 550025; 2. 贵州省材料产业技术研究院, 贵阳 550014)

摘要: 碳纤维增强复合材料凭借其卓越的力学性能在工业领域广泛应用,其核心优势在于纤维与树脂界面通过应力传递机制实现性能互补,界面相作为应力传递的核心媒介,其构筑技术是突破性能瓶颈的关键。表面涂覆改性技术凭借高效工艺与灵活调控优势,成为优化碳纤维/树脂界面的研究焦点。该研究聚焦碳纤维上浆剂的创新体系,系统梳理了溶液型、乳液型及水溶型上浆剂的特性,指出乳液型与水溶型在环保性、界面强化方面的潜力,并结合其与环氧树脂、聚酰胺、聚醚醚酮等基体之间的界面增强机制,阐明了上浆剂组分与基体化学相容性的协同规律。针对未来提升上浆剂的界面功能集成与环境适应能力提出展望,并给出发展建议。

关键词: 碳纤维;复合材料;上浆剂;界面相;增强机制

中图分类号: TQ327.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)11-0208-05

Research progress of carbon fiber sizing agents

ZHANG Ya¹, XIONG Yiming^{1,2}, LIU Changcheng¹, LONG Xuebin², HE Min¹, LIU Yufei¹

(1. College of Materials and Metallurgy, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Provincial Institute of Materials Industry Technology, Guiyang 550014, China)

Abstract : Carbon fiber-reinforced composites are widely used in industrial applications due to their superior mechanical properties. Their core advantage lies in the stress transfer mechanism at fiber-resin interfaces, where interphase construction determines performance breakthroughs. Surface coating modification has been emerged as a key research area for optimizing carbon fiber-reinforced polymers interfaces, because of efficient processing and tunable properties. focusing on innovative sizing agents for carbon fibers, it compared solution-based, emulsion-based, and water-soluble sizing agents, revealed the environmental advantages and interface reinforcement potential of emulsion and water-soluble types. The analysis demonstrates how sizing components synergize with epoxy resin, polyamide, and polyetheretherketone matrices through chemical compatibility. Prospects are proposed with a focus on enhancing the interfacial functionality integration and environmental adaptability of sizing agents, along with corresponding development recommendations.

Keywords : carbon fiber ; composite ; sizing agent ; interphase ; reinforcement mechanism

碳纤维(CF)增强复合材料(CFRP)作为当代材料科学领域的革命性成果,其凭借卓越的比强度、比模量及轻量化特性,在航空航天、新能源装备、轨道交通等高端制造领域得到了广泛应用^[1]。与传统金属材料相比,CFRP能够减重20%~50%^[2],显著提升结构的承载效率。不过CFRP的宏观力学性能并不是只取决于CF与树脂基体本身的特性,作为应力传递的“桥梁”,纤维与基体间的界面相容性也是决定复合材料整体性能的主要因素。复合材料的界面缺陷可能导致复合材料层间剪切强度下降40%^[3],并引发渐进式分层失效,所

以突破CFRP性能瓶颈的关键是界面相的高效构筑。

CF表面惰性强、化学活性低,导致了其与树脂基体间的界面相容性不足。为攻克此难题,现有化学改性、物理改性和表面涂覆改性这三种改性方法,如图1所示。其中化学改性通过在纤维表面引入含氧官能团或活性分子,增强纤维与基体的化学键合作用,如杨至高等^[4]通过在CF接枝一种新型二维纳米片状材料,使得复合材料的弯曲强度与层间剪切强度分别提高了26.04%,38.6%;物理改性则通过调控纤维表面形貌,构建微纳级沟槽结构以提升机械锁合力,如曹鹏宇

基金项目: 贵州省科技创新人才团队项目(黔科合平台人才-CXTD[2023]012)

通信作者: 何敏,教授,博士生导师,研究方向为碳纤维及其高分子复合材料

收稿日期: 2025-08-19

引用格式: 张娅,熊一鸣,刘长城,等.碳纤维上浆剂研究进展[J].工程塑料应用,2025,53(11):208-212.

ZHANG Ya, XIONG Yiming, LIU Changcheng, et al. Research progress of carbon fiber sizing agents[J]. Engineering Plastics Application, 2025,53(11):208-212.

等^[5]用O₂等离子体对CF进行处理,经处理后CF表面粗糙度显著提高,复合材料的界面剪切强度提高了23.58%。然而,上述方法虽然有效,但工艺复杂、成本高,还可能损伤纤维本身。相比之下,表面涂覆改性技术操作简单、适用性强且易于工业化集成^[6],它是当前界面优化领域最具工程应用潜力的研究方向。

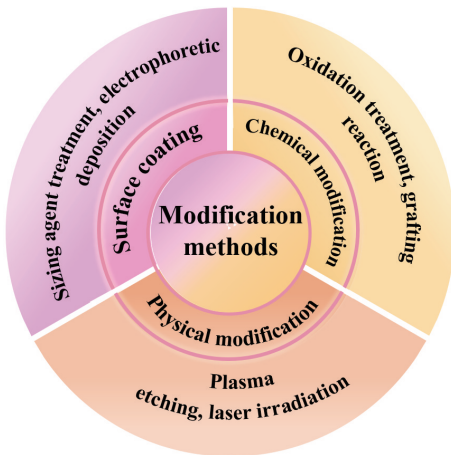


图1 CF表面改性方法^[4-8]

Fig. 1 CF surface modification methods^[4-8]

作为表面涂覆改性的核心技术载体,CF上浆剂的研发是影响界面相性能的关键。然而,目前广泛应用的环氧、聚氨酯等传统上浆剂功能单一,已难以满足日益复杂的工程环境需求^[9]。如对于航空航天领域的极端环境(如高低温交变、湿热老化),需要界面相有长期的热氧稳定性,而传统环氧体系已逼近性能极限;再者多元树脂基体的推广也要求上浆剂具备更加广泛的界面适配性^[10-11]。为应对这些挑战,新型上浆剂的研发正朝着多功能化与高性能化的方向飞速发展,如研究开发纳米复合上浆剂^[12]、热塑性上浆剂^[13]和生物基上浆剂^[14]等这几类新型技术。

基于此,笔者系统综述了CFRP界面相构筑技术的研究进展,并聚焦于上浆剂这一关键领域。首先解析上浆剂的作用机理与分类体系,进而详细阐述其在不同复合材料体系中的应用,最后针对多功能集成、环境适应性提升等挑战提出技术展望,为我国高性能CFRP的自主研发与产业升级提供理论参考。

1 上浆剂的作用与分类

1.1 上浆剂的作用

上浆剂通常具有与树脂基体相似的化学结构,可在CF表面形成均匀薄膜,改善纤维表面能并增强其与树脂的浸润性,从而有效提高复合材料的界面剪切强度与层间剪切强度^[15]。此外,上浆剂还能有效减少CF在加工和使用过程中产生的毛丝和断丝现象,有助于维持纤维集束性,降低因纤维损伤引起的孔隙缺陷,保障复合材料力学性能^[16-17]。

上浆剂的选择和设计对复合材料的界面性能有着直接影响。不同类型的树脂基体需要匹配不同的上浆剂,以确保上浆剂与树脂基体之间的相容性和界面结合强度。

1.2 上浆剂的分类

CF上浆剂根据分散介质及制备方式可分为溶液型、乳液型和水溶型三类,如图2所示。溶液型上浆剂通过将树脂溶解于有机溶剂(如乙醇、丙酮)中制备而成,其优势在于成膜均匀、工艺成熟。然而,此类上浆剂需依赖大量有机溶剂,成本高且会导致环境污染,目前工业应用已渐减少。相比之下,乳液型上浆剂以水为介质,通过乳化剂分散树脂,具有环保、安全等优点,但乳化剂可能影响成膜质量并增加纤维吸水性,现在的工作主要聚焦于如何在保证乳液稳定性的同时减少乳化剂用量^[18]。相关研究表明,通过优化乳化剂分子结构或引入自乳化树脂体系^[19],可有效解决这一问题。



图2 上浆剂的分类^[18-21]

Fig. 2 Classification of sizing agents^[18-21]

水溶型上浆剂作为乳液型技术的迭代升级产品,其主要是通过引入亲水基团或离子化实现自溶解,避免了乳化剂的使用^[20]。然而,水溶型上浆剂面临两大挑战:一是可水溶树脂种类有限;二是溶液稳定性较差,易受pH、温度等因素影响。针对种类有限的问题,目前是通过化学改性(如磺化、羧基化^[22-23])扩展其适用范围,针对溶液稳定性较差的问题,则通常借助调节pH或添加稳定剂^[24]等方法予以改善。尽管存在上述挑战,水溶型上浆剂符合清洁生产工艺要求,其凭借环保优势,已成为CFRP领域重点攻关方向。

2 上浆剂对不同树脂基体复合材料界面性能的影响

上浆剂在CFRP中起着至关重要的作用,其作用核心是通过调整纤维表面性质来提升和树脂的结合力,一般通过化学键合、物理啮合及表面能调控三重机制及协同作用优化界面性能。

2.1 环氧树脂基复合材料

环氧树脂是具有高黏结强度、耐化学腐蚀性和低收缩率的热固性材料,并且固化前黏度较低,易浸润于CF中。但由于CF增强环氧树脂复合材料界面相容性差,限制了复合材料的力学性能。基于环氧树脂中的环氧官能团,通常在上浆剂中引入具有亲核性的羟基或胺基类官能团^[25-26],通过开环反应使树脂基体与上浆剂界面产生共价键连结,达到提升界面相容性的目的。

Qiu等^[25]通过乙二醇胺改性E51环氧树脂,制备了耐高温水溶性上浆剂。与无上浆剂的处理相比,复合材料的层间剪切强度和界面剪切强度分别提高了约25%,且在300℃下处理4h后仍保持优异的界面性能。Chen等^[27]通过将环氧树脂与含有羟基的超支化结构反应,制备了水性环氧树脂上浆剂。处理后的复合材料的界面剪切强度提高了40%,层间剪切强度提高了12.5%。Qiu等^[28]利用了聚乙二醇和顺丁烯二酸酐对环氧树脂进行化学改性,制备了三种不同的高环氧值水性环氧上浆剂,分别为P1,P2,P3。其中经P2上浆后的复合材料其层间剪切强度最好,比未上浆的复合材料提高了11.22%。这些研究共同表明,通过上浆层中的活性官能团与基体形成共价键,是提高复合材料界面性能的有效路径。

化学键合虽能有效提升界面强度,但在复杂应力或极端环境下,单一的化学作用可能无法应对界面失效,因此需要结合物理互锁机制实现协同增强。通过引入纳米材料,可增强纤维与树脂的机械锚定作用。Liu等^[12]将三硅氧基苯基纳米颗粒与环氧树脂混合,制备了纳米乳液封装上浆剂(POE)。POE不仅提高了CF的表面能和粗糙度,还显著增强了层间剪切强度、弯曲强度及冲击强度,分别提高了24.9%,37.8%和45.6%,展现出多尺度增强效果。类似地,Cheng等^[29]开发了GO@Fe₃O₄纳米流体杂化上浆剂,利用其在纤维表面的均匀分布,增强了应力传递效率并抑制裂纹扩展。结果表明,上浆后复合材料的层间剪切强度和弯曲强度分别比未上浆的提高了15%和43.6%。这些研究表明,引入纳米材料构建物理锚定结构,可作为化学键合之外的重要补充,共同构筑更为牢固的界面。

另外,在追求高性能的同时,绿色环保和多功能集成已成为上浆剂设计的重要方向,生物基材料与动态交联技术的结合为此提供了新思路。Song等^[14]以蓖麻油为软段,合成了具有交联网络结构的生物基水性聚氨酯上浆剂。结果表明,复合材料的弯曲模量、层间剪切强度和界面剪切强度分别比未上浆的提高了54.8%,36.6%和58.9%,在实现高界面增强的同时兼顾可再生特性。Pawar等^[30]合成了可再生萜类化合物的双功能反应性上浆剂,所含的双丙烯酸酯结构能同时与CF表面和环氧树脂发生化学反应形成化学键,从而复合材料的界面剪切强度提高了92%。Liu等^[31]使用鞣花酸和二氧化碳合成五元环碳酸酯化合物,然后与二胺反应制备了水性非异氰酸酯聚氨酯上浆剂,通过氢键与 π - π 堆叠等非共价作用协同增强界面,该上浆剂使复合材料的界面剪切强度和层间剪切强度分别提高了112.05%和42.05%,这不仅显著增强了CF与环氧树脂的相容性,同时还避免了传统异氰酸酯的毒性问题。这些研究反映出上浆剂设计正从单一性能追求向高性能、绿色化、多功能一体化的综合目标演进。

2.2 聚酰胺(PA)基复合材料

PA是常用的热塑性工程塑料,其分子链中丰富的酰胺键赋予材料优异的力学性能与加工性,但同时也带来显著的吸湿性问题,在CF增强PA复合材料中,吸湿行为会因界面

区域存在的毛细作用而加剧,限制了复合材料的应用^[32]。因此,上浆剂的设计常基于与PA基体相似的氢键作用机制,通过在CF表面引入可形成氢键的官能团(如羟基、羧基、胺基^[13]等),增强纤维与树脂之间的界面结合力。此外,上浆剂还可通过构建多层次界面结构等方式,进一步提升复合材料的力学性能。

Dai等^[33]用没食子酸、L-赖氨酸二异氰酸酯和支链淀粉合成了一种聚氨酯上浆剂(HWPU),并用单宁酸(TA)对CF进行改性。该设计不仅借助TA引入高密度氢键位点,还通过HWPU构建了跨越纤维与树脂的氢键桥接结构,在质量分数0.6%的低添加量下实现了层间剪切强度、弯曲强度与界面剪切强度超过60%的大幅提升,这一成果揭示了氢键网络在增强界面应力传递中的核心作用。这种生物基体系的设计思路在后续研究中得到延续——Dai等^[34]进一步使用环氧化大豆油、柠檬酸等可再生原料,开发出全生物基超支化HWPU体系,在1.5%质量分数下实现了66.1%的界面剪切强度提升,展示了生物基材料在绿色制造中的潜力。

除聚氨酯体系外,其他类型的上浆剂设计也展现出多样化的界面增强机制。Cai等^[35]通过将PA6分子链接枝到氧化石墨烯片上,制备了功能化氧化石墨烯改性的PA6上浆剂。经过上浆处理后,复合材料的界面剪切强度提升至69.7MPa,比未处理的提高了54.5%,该设计融合了纳米材料的高比表面积与基体相似链段的结构相容性,实现了物理吸附与化学键合的双重增强。Yan等^[13]通过缩合反应合成了一种水基氨基乙基哌嗪-PA上浆剂,经处理后,复合材料的界面剪切强度、层间剪切强度、拉伸和弯曲强度分别提高了29.3%,14.2%,10.5%和20.0%,反映出水基上浆剂在实际应用中的可行性。Kim等^[36]通过己内酰胺与甲苯二异氰酸酯反应,再与苯氧树脂接枝,制备了一种苯氧基上浆剂,该上浆剂不仅提高CF与PA6的化学亲和性,还可作为聚合引发剂,使PA6从纤维表面生长,与基体形成机械互锁结构,显著增强界面结合力,对比未上浆组复合材料的层间剪切强度提高了33.8%,体现了多层次界面结构对材料性能的增强效果。

在上浆剂结构优化方面,多组分与自乳化技术展现出独特的优势。Xu等^[37]开发的自乳化环氧树脂上浆剂,通过对氨基苯甲酸的引入和三乙醇胺中和处理,在实现稳定乳液制备的同时,与PA6基体形成强氢键作用,使复合材料拉伸强度提升25.6%,缺口冲击强度增幅达77.9%,表明界面韧性的同步改善。此外,Liu等^[38]合成了一种双组分聚氨酯上浆剂,通过端羧基聚氨酯与封端异氰酸酯的协同作用,使复合材料界面剪切强度提升了47%,体现了多组分体系在精细调控界面化学与结构方面的灵活性。

可见,通过上浆剂在CF表面引入可与PA形成氢键的活性官能团,并构建多层次界面结构,不仅显著提升复合材料的界面结合强度与力学性能,也为其在苛刻环境下的可靠应用奠定基础。

2.3 聚醚醚酮(PEEK)基复合材料

PEEK因其优异的耐热性和较高的结晶度,在先进复合材料中应用广泛,但界面惰性强,上浆剂需具有良好的耐热性且与PEEK链段相容。所以常选用聚醚酮类等耐高温树脂作为上浆剂主体,同时引入羧基和磺酸基团等极性结构^[39],提升纤维表面能,促进熔融PEEK的浸润,并通过分子链缠绕和 π - π 堆积形成物理锚定,从而在高温或湿热等严苛环境下抑制界面性能退化。

近年来,研究者通过分子结构设计进一步提升上浆剂的综合性能。Guo等^[40]开发的水性PEEK上浆剂通过引入巯基实现了界面性能的协同增强,复合材料多项力学性能显著提升,并在溶剂老化后保持稳定,显示出良好的耐久性。Zhou等^[39]则结合磺化PEEK与羧基化碳纳米管,不仅利用磺酸基团增强界面化学作用,还借助碳纳米管提高表面粗糙度,从而使复合材料的弯曲强度和层间剪切强度分别提升了74.2%和84.2%。Yan等^[41]的研究也表明,通过合成含磺酸基团的PEEK上浆剂,引入磺酸钠基团,形成氢键和阳离子 π 相互作用,同时通过分子链段扩散和应力传递优化界面性能,进一步提高复合材料的综合力学性能。

此外,功能化与复合化成为上浆剂设计的新趋势。Li等^[42]将氧化硼化氮纳米片与聚醚醚酮亚胺复合制备的混合上浆剂,不仅使弯曲强度提升60%,同时赋予其更高导热性和更低摩擦系数,拓展了材料在多功能场景下的应用潜力。Wang等^[43]制备了碳纳米管增强PEEK上浆剂,使复合材料的界面剪切强度和层间剪切强度分别提高了137.5%和66.8%,反映出纳米复合上浆剂在增强界面结合方面的显著优势。

针对湿热、溶剂等严苛环境,交联策略成为提升耐久性的关键。Guo等^[44]采用厚朴酚和癸二酸衍生物合成的可交联S-PEEK上浆剂在溶剂老化后性能保持率高达约95%,表明交联结构可有效抑制界面破坏。Pei等^[45]通过在PEEK链端引入苯并恶唑基团,合成了一种水性可交联聚苯并恶唑(PN-PFEK)上浆剂。PN-PFEK上浆剂不仅提高了纤维表面能和润湿性,还保持了良好的热稳定性,进一步证明交联策略在严苛条件下维持界面完整性的有效性。

从当前研究工作中可看出,PEEK基复合材料用上浆剂的研究已从单一浸润改善向多功能、交联设计方向发展。通过在分子链中引入极性基团、构建纳米增强体系以及实施可控交联,不仅显著增强了纤维与树脂的界面黏结,还提升了复合材料在复杂工况下的长期服役性能。

2.4 乙烯基酯复合材料

乙烯基酯树脂凭借其高反应活性和优异的耐腐蚀性,在CF复合材料中受到广泛关注,其固化依赖不饱和和双键的自由基聚合反应^[46]。在上浆剂中引入不饱和结构,可与树脂基体发生共聚交联,形成共价键界面,大幅提升CF与基体化学键合强度,从而提升复合材料整体性能。

Geng等^[47]利用己二酸、新戊二醇和顺丁烯二酸酐合成了一种不饱和自乳化聚酯上浆剂。其与CF表面及乙烯基酯

树脂之间通过不饱和键反应,实现了界面化学键合,使复合材料的层间剪切强度和界面剪切强度分别提高了18.8%和43.4%。此外,他们还通过合成5种分子量的自乳化阴离子聚酯上浆剂,揭示了分子量对界面性能的“火山型曲线”规律。当上浆剂分子量为8000时,CF表面能和界面性能达到最佳,复合材料的层间剪切强度和界面剪切强度分别提高了22.7%和14.2%^[48]。这一结果不仅验证了化学键合机制的有效性,也提示上浆剂分子结构设计需兼顾反应活性与相容性,过高或过低的分子量均可能导致界面结合效果下降。

Jiao等^[49]针对CF表面含氧官能团特性,设计出适用于含氧官能团的环氧丙烯酸酯上浆剂,采用相反转法实现均匀涂覆,使复合材料的界面剪切强度和层间剪切强度分别比未上浆的复合材料提高了96.56%和66.07%,展现出针对纤维表面化学特性进行上浆剂定制设计的潜力。Zhou等^[50]利用反相乳化技术制备了具有C=C官能团的乙烯基乳化上浆剂。经上浆后,复合材料的层间剪切强度与弯曲强度分别达到了62.44 MPa和805.65 MPa,比未上浆的材料提高了69.31%和22.06%,这也证实了乳化工艺在实现均匀上浆与界面强化方面的优势。

这些研究可表明,通过在上浆剂中合理地引入不饱和官能团,可有效促进其与树脂基体的共聚反应,构建强韧的共价键界面层。这种化学键合机制显著增强了纤维与基体的应力传递效率,为提升复合材料的力学性能与耐久性提供了关键途径,展现出重要的应用前景。

2.5 其他树脂基复合材料

除了上述几种材料外,还有以聚醚亚胺,聚芳醚酮,聚氨酯,聚丙烯和氰酸酯等作为基体的复合材料,其上浆剂也被相继报道,用于增强其界面性能,这些工作体现出上浆剂设计正从通用型向体系专用型发展的趋势。

Huang等^[51]通过在聚醚亚胺酸中引入乙炔基团,合成了一种水溶性热塑性聚醚亚胺酸上浆剂,使复合材料的界面剪切强度提升了32.33%,这得益于乙炔基在固化中与聚醚亚胺基体形成共价键,实现了界面强度的显著增强,反映出反应性官能团设计在热固性体系中的有效性。Gao等^[52]合成了一种水溶性聚醚亚胺寡聚物上浆剂,其特点在于不在纤维表面形成连续膜,从而兼顾柔性 with 层间性能。该上浆剂使聚芳醚酮复合材料在不同成型压力下层间剪切强度提升最高达222%,其成功关键在于聚醚亚胺与聚芳醚酮在化学结构上的高度相似性,说明物理相容与化学键合的协同作用对界面性能的积极影响。

在热塑性聚氨酯体系中,Li等^[53]采用了一种脂肪族阻聚异氰酸酯乳液作为上浆剂,实现了层间剪切强度17.5%的提高。该策略利用异氰酸酯与基体间的反应活性,显示出乳液型上浆剂在柔性树脂体系中的适用潜力。面向聚丙烯体系,Zhou等^[54]以氯化聚丙烯(CPP)为基体,通过自由基聚合将丙烯酸酯单体接枝到CPP上合成改性CPP,再采用突变型相转化法,制备了改性丙烯酸酯纳米乳液,使复合材料的层间剪

切强度提高了48.5%,显示出纳米尺度改性与非极性树脂体系界面强化的可行性。Xu等^[55]的工作进一步拓展了功能化上浆剂的设计思路,通过在环氧树脂中引入四丁基钛酸酯,不仅提高了CF/氰酸酯复合材料的界面剪切强度,还显著降低了吸水率,表明上浆剂在改善湿热性能方面具有多重作用。

通过针对性的上浆剂结构设计,可有效改善多种树脂基体与CF的界面相容性,这是提升先进复合材料综合性能的关键手段。

3 结语

CFRP的性能优化高度依赖界面相设计,上浆剂技术作为界面改性的核心手段,通过构建过渡层实现力学性能与工艺特性的协同提升。尽管水性上浆体系凭借其环境友好特性正逐步替代传统溶剂型技术,并通过粒径控制与官能团设计在一定程度上优化了界面性能,但当前上浆剂技术仍面临功能单一、极端环境适应能力不足等严峻挑战。

面向未来CFRP的高性能化需求,提升上浆剂的界面功能集成与环境适应能力已成为技术攻关的核心方向。未来需着力发展梯度化多尺度界面调控策略,通过分子设计赋予上浆剂导电、导热和自修复等协同功能,开发碳纳米管/石墨烯杂化乳液体系以增强界面载荷传递效率。同时,基于动态共价键和光热响应机制构建环境自适应界面,赋予湿度与温度变化下的界面自调节能力,从而提升极端环境中的结构稳定性。通过智能化界面设计与跨尺度协同创新,推动CFRP在航空航天、新能源等尖端领域的应用。

参考文献

- [1] LI M, et al. COMPOSITES PART A-APPLIED SCIENCE AND MANUFACTURING, 2023, 169. DOI: 10.1016/j.compositesa.2023.107511.
- [2] CAO L, et al. Applied Sciences, 2024. DOI:10.3390/app14114361.
- [3] GANGINENI P K, et al. Polymer Composites, 2022, 43(7):4 126–4 164.
- [4] 杨至高,等.材料导报. DOI: 10.11896/cldb.25040063. YANG Zhigao, et al. Materials Reports. DOI: 10.11896/cldb.25040063.
- [5] 曹鹏宇,等.现代化工,2025,45(S1):245–250. CAO Pengyu, et al. Modern Chemical Industry, 2025, 45(S1): 245–250.
- [6] ZHANG Z, et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, 137(3):1 047–1 087.
- [7] HUANG C, et al. Materials (Basel, Switzerland), 2024, 17 (23): 5 962–5 962.
- [8] OUYANG X, et al. Frontiers in Materials, 2024. DOI: 10.3389/fmats.2024.1437104.
- [9] YUAN X, et al. Polymer Composites, 2025, 46(4):2 911–2 932.
- [10] LI J, et al. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30:2 817–2 825.
- [11] HAN X, et al. Engineering Fracture Mechanics, 2025, 313. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2024.110653.
- [12] LIU H, et al. Composites Part B:Engineering, 2024, 284. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111697.
- [13] YAN C, et al. COMPOSITES PART B-ENGINEERING, 2023, 258. DOI: 10.1016/j.compositesb.2023.110675.
- [14] SONG X, et al. Polymer, 2024, 315. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.12 7852.
- [15] CHEN Y, et al. Composite Interfaces, 2024, 31(6):729–758.
- [16] JABER A A, et al. Polymers, 2023. DOI: 10.3390/polym15244678.
- [17] YAO L, et al. Textile Research Journal, 2021, 91(21/22):2 476–2 486.
- [18] CHEN F, et al. High Performance Polymers, 2022, 34(3):292–309.
- [19] YAO J, et al. Progress in Organic Coatings, 2020, 143. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2020.105621.
- [20] 高丽红,等.化工新型材料, 2025:1–6. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2026.01.04. GAO Lihong, et al. New Chemical Materials, 2025: 1–6. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2026.01.04.
- [21] LI Y, et al. Composites Part B:Engineering, 2024, 287. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111825.
- [22] SONG X, et al. Progress in Organic Coatings, 2024, 196. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2024.108691.
- [23] CHEN W, et al. Composites Part B:Engineering, 2025, 298. DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.112388.
- [24] QIU B, et al. Composites Part B:Engineering, 2024, 283. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111574.
- [25] QIU B, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2024, 185. DOI: 10.1016/j.compositesa.2024.108344.
- [26] PAWAR S S, et al. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2023, 62 (7):3 157–3 164.
- [27] CHEN Y, et al. Polymer Composites, 2021, 42(4):1 741–1 751.
- [28] QIU Z, et al. Surfaces and Interfaces, 2023, 36. DOI: 10.1016/j.surfin.2022.102394.
- [29] CHENG C, et al. Composites Science and Technology, 2021, 209. DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.108788.
- [30] PAWAR S S, et al. Composites Science and Technology, 2022, 220. DOI: 10.1016/j.compscitech.2022.109280.
- [31] LIU H, et al. Journal of Colloid and Interface Science, 2025, 681: 269–280.
- [32] 舒礼伟,等.工程塑料应用,2023,51(8):178–183. SHU Liwei, et al. Engineering Plastics Application, 2023, 51 (8): 178–183.
- [33] DAI S, et al. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 276. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.1338 77.
- [34] DAI S, et al. Green Chemistry, 2024, 26(7):4 127–4 134.
- [35] CAI G, et al. Polymer Composites, 2022, 43(11):8 483–8 498.
- [36] KIM S W, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2020, 139. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.106104.
- [37] XU R, et al. Polymer Composites, 2019, 40(2):514–522.