高 分 子 通 报
POLYMER BULLETIN

综述 / Review DOI: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26360

连续碳纤维增强高性能热塑性预浸带及界面构筑研究进展

殷 康[1,2] 任宏亮[1,2] 刘 嘉[1,2] 史杰文[1,2] 韩克清[1] 王洪恩[3] 张 辉[1,2*] 杨 洋[3*] 俞建勇[2]

(东华大学 [1]先进纤维材料全国重点实验室 材料科学与工程学院 [2]民用航空复合材料协同创新中心 上海 201620)
([3]上海飞机制造有限公司 上海 201324)

摘 要 连续碳纤维增强热塑性复合材料(continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites，CFRTP)兼具高比强度、高比模量、抗冲击、可焊接、可回收及快速成型等特点，在航空航天、新能源汽车、高压储氢容器和高端装备等领域具有重要应用前景。然而，碳纤维表面活性不足以及高性能热塑性树脂熔体黏度较高等因素，增加了纤维/树脂界面调控和连续纤维束充分浸渍的难度。本综述聚焦界面调控与预浸带制备两大关键环节，综述了碳纤维表面改性与热塑性预浸带制备技术的研究进展，重点分析纤维表面状态对树脂润湿、纤维束浸润及界面形成的影响，并讨论预浸带浸渍均匀性和缺陷分布对复合材料界面性能的影响。在界面改性方面，介绍了氧化、等离子体处理、化学接枝与上浆剂等方法对纤维表面化学组成与物理形貌的调控作用；在预浸带制备方面，比较了溶液浸渍、熔融浸渍、粉末浸渍、薄膜叠层、纤维混编与反应链增长浸渍等典型工艺的原理、特点与适用性。最后，对耐高温界面层设计、低缺陷预浸带连续化制备等发展方向进行了展望。

关键词 碳纤维；表面改性；碳纤维增强复合材料；界面调控；预浸带制备工艺

Recent Advances in Continuous Carbon Fiber-reinforced High-performance Thermoplastic Prepregs and Interface Engineering

Kang Yin[1,2], Hong-liang Ren[1,2], Jia Liu[1,2], Jie-wen Shi[1,2], Ke-qing Han[1], Hong-en Wang[3], Hui Zhang[1,2*], Yang Yang[3*], Jian-yong Yu[2]

(*[1] State Key Laboratory of Advanced Fiber Materials, College of Materials Science and Engineering, [2] Center for Civil Aviation Composites, Donghua University, Shanghai 201620*)(*[3] Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324*)

Abstract Continuous carbon fiber-reinforced thermoplastic composites (CFRTP) combine high specific strength, high specific modulus, impact resistance, weldability, recyclability, and rapid prototyping capabilities, offering significant application potential in fields such as aerospace, new energy vehicles, high-pressure hydrogen storage tanks, and high-end equipment. However, inherent challenges—such as the chemical inertness of carbon fiber surfaces and the high viscosity of thermoplastic resin melts—continue to pose significant challenges for CFRTP in terms of interfacial bonding and fiber impregnation. This study focuses on two key processes—interface control and prepreg fabrication—and reviews research progress in carbon fiber surface modification and thermoplastic prepreg fabrication technologies. It specifically examines the influence of fiber surface conditions on resin wetting and interface formation, as well as the intrinsic relationship between prepreg impregnation uniformity, defect characteristics, and interface properties. For interface modification, the review examines how oxidation, plasma treatment, chemical grafting, and sizing-agent treatments regulate the surface chemistry and morphology of carbon fibers. For prepreg fabrication, it compares the principles, characteristics, and applicability of representative processes, including solution

2026-08-09 收稿, 2026-10-16 录用

基金项目: 国家发改委重大项目——中复神鹰碳纤维连云港有限公司年产3万吨高性能碳纤维建设项目; 上海市科委“揭榜挂帅”项目(项目号 YDZX20253100004007); 中国纺织工业联合会纺织之光应用基础研究项目(项目号 J202105)

* 通信联系人: 张辉, E-mail: zhanghui@dhu.edu.cn; 杨洋, E-mail: yangyang1@comac.cc

impregnation, melt impregnation, powder impregnation, film stacking, fiber commingling, and reaction-induced chain-growth impregnation. Finally, the study looks ahead to future development directions, including the design of high-temperature-resistant interface layers and the continuous production of low-defect prepregs.

Keywords Carbon fiber; Surface modification; Carbon fiber-reinforced composites; Interfacial control; Prepreg preparation process

引用: 殷康, 任宏亮, 刘嘉, 史杰文, 韩克清, 王洪恩, 张辉, 杨洋, 俞建勇. 连续碳纤维增强高性能热塑性预浸带及界面构筑研究进展. 高分子通报, doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26360

Citation: Yin, K.; Ren, H. L.; Liu, J.; Shi, J. W.; Han, K. Q.; Wang, H. E.; Zhang, H.; Yang, Y.; Yu, J. Y. Recent advances in continuous carbon fiber-reinforced high-performance thermoplastic prepregs and interface engineering. *Polymer Bulletin* (in Chinese), doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26360

连续碳纤维增强热塑性复合材料(CFRTP)兼具轻质高强、耐冲击和可焊接等特点，并具有再加工与循环利用潜力，是先进树脂基复合材料的重要发展方向之一[1~3]。与传统热固性复合材料相比，CFRTP在成型周期、二次加工、损伤修复和材料循环利用等方面具有明显优势，近年来，随着航空航天、轨道交通及高端装备等领域对轻量化和高效制造需求的增长，CFRTP 材料设计、预浸带制备及成型受到持续关注[1,3~5]。同时，热塑性树脂基体的可重熔特征为复合材料回收与再制造提供了更多可能，使其在绿色制造和可持续轻量化结构中具有进一步发展潜力[6~9]。随着轻量化结构对高承载、低成本和高效率制造需求的提高，CFRTP的材料设计、预浸带制备和成型工艺逐渐成为复合材料领域的研究热点[1~3]。

CFRTP的性能形成涉及纤维表面状态、树脂浸润行为、预浸带质量及后续成型固结等多个环节。碳纤维表面化学惰性与相对光滑的形貌限制了其与热塑性树脂之间的润湿和界面作用，易导致界面载荷传递不足和层间损伤[10,11]。聚醚醚酮(PEEK)、聚醚酮酮(PEKK)、聚芳醚酮(PAEK)和聚苯硫醚(PPS)等高性能热塑性树脂通常具有较高的熔体黏度，在连续纤维束中的充分浸渍较为困难，易引起树脂分布不均、孔隙残留和局部缺胶等缺陷[4,12]。在后续成型过程中，树脂熔融流动、纤维压实、界面接触、分子链扩散、结晶冷却及残余应力演化等多种物理过程会进一步影响制件的结构完整性和力学性能[4]。因此，CFRTP的高性能制造需要综合考虑界面调控、预浸带制备和成型工艺之间的相互关联。

目前，关于 CFRTP 的研究已在界面改性、预浸料制备和构件成型等方面取得了大量进展，但不同技术环节之间并非彼此独立。纤维表面的化学组成、粗糙度和上浆层特征会影响树脂润湿、熔体铺展及界面结合质量，并进一步改变树脂在纤维束中的迁移路径；与此同时，预浸料制备过程中树脂的引入方式、纤维铺展状态和浸渍条件又会影响改性层的完整性、稳定性及其与树脂的接触状态。具体而言，界面改性通过调节纤维表面能、极性基团、粗糙度和界面层厚度，改变树脂在纤维表面的润湿、黏附和分子链扩散行为；预浸料制备则通过树脂分布均匀性、树脂浸润程度、孔隙形成与闭合以及热–力历史，决定上述界面结构能否充分发挥作用。因此，界面改性效果并不能脱离树脂黏度、浸渍温度、压力、剪切及冷却条件单独评价，而预浸料质量也不仅取决于浸渍工艺本身，还受到纤维表面状态和界面层热稳定性的制约。二者通过“纤维表面状态—树脂润湿与浸润—界面层稳定性—孔隙及缺陷演化—层间载荷传递”这一连续过程相互耦合，并共同影响后续成型过程中的层间结合和最终力学性能。

基于界面改性与预浸料制备之间的耦合关系，本文以PEEK、PEKK、PPS等高性能热塑性树脂体系为对象，综述碳纤维表面改性与热塑性预浸料制备的研究进展。鉴于不同热塑性树脂在界面润湿、颗粒分散、纤维浸润及熔融固结等方面具有共性特征，适当引入尼龙6 (polyamide 6，PA6)、尼龙66 (polyamide 66，PA66)等体系的研究结果，以补充说明相关界面调控与浸渍规律。需要指出的是，文中性能数据仅用于反映相应研究体系中的改善效果；受纤维类型、树脂体系、纤维含量、成型条件及测试方法等因素影响，不宜对不同文献的绝对数值进行直接横向比较。在分别梳理界面改性方法和预浸料制备工艺的基础上，重点比较了不同预浸工艺的原理、特点及适用性。最后，对面向高温热塑性树脂的界面层设计、界面改性与预浸工艺的协同优化以及低缺陷预浸料连续化制备等发展方向进行展望，以期为高性能CFRTP材料体系设计与高质量预浸料工艺优化提供参考。

1 碳纤维表面改性与界面适配

在CFRTP中，纤维/树脂界面既是树脂润湿、附着与后续层间固结的重要区域，也承担载荷传递的作用，对于材料性能影响显著[13]。目前，由于碳纤维表面活性官能团含量较低，且传统商用碳纤维表面上浆层通常难以同时满足高温热塑性树脂基体的相容性和耐热性要求，因此需要通过表面改性调节纤维表面化学组成、粗糙度、表面能及界面层结构。与热固性树脂体系相比，PPS、PEEK、PEKK等高性能热塑性树脂在成型过程中主要依赖熔融流动、界面接触和分子链扩散实现界面结合，对纤维表面状态和上浆层适配性提出了更高要求。碳纤维表面改性的作用机制主要包括表面粗糙化、极性官能团引入、弱界面层去除和相容过渡层构筑等。表面粗糙化可通过增加界面接触面积和机械互锁作用改善界面结合；极性官能团的引入有助于调节纤维表面能及树脂润湿行为；相容过渡层则可通过调节界面区域的组成与力学性能，改善纤维与热塑性树脂之间的界面适配性。

1.1 表面氧化法

表面氧化法是碳纤维界面改性中应用较早且较为成熟的方法，其主要通过氧化反应在纤维表面引入羟基、羧基、羰基等含氧极性官能团，同时伴随一定程度的表面刻蚀和粗糙化，从而改善纤维表面能、树脂润湿性及界面结合性能[14]。根据氧化介质和处理方式的不同，表面氧化法通常可分为气相氧化、液相氧化和电化学氧化等类型。气相氧化多采用O_2、O_3等气态氧化剂，在加热条件下对纤维表面进行活化；液相氧化则常采用HNO_3、H_3PO_4等氧化性溶液，以提高纤维表面含氧官能团含量并调节表面粗糙度。相比之下，电化学氧化具有处理条件温和、过程可控性较强和适合连续化处理等特点，是工业碳纤维表面处理中的重要方法。该方法通常以碳纤维为阳极，在一定电解质溶液和电场作用下实现表面氧化，其改性效果与电解质种类、浓度、电流密度、处理时间和温度等因素密切相关。对于CFRTP体系而言，表面氧化还可作为后续上浆、接枝的表面活化步骤，为改善高黏度热塑性上浆剂在纤维表面的铺展、附着和界面结合提供基础。

近年来，表面氧化法在工艺优化和界面增强机制方面仍受到关注。王成博等[14]通过高温气相氧化对碳纤维表面性质及碳纤维增强聚醚醚酮(CF/PEEK)复合材料性能影响的研究发现：适宜的氧化处理有助于提高碳纤维表面活性和表面能，但随着氧化作用增强，纤维本体性能会受到一定影响；氧化后复合材料 0° 拉伸强度下降超过20%，而层间剪切强度变化小于5%，表明碳纤维表面活化与纤维本体损伤之间存在权衡关系。对于 PEEK 等高温热塑性树脂体系，表面氧化参数需要结合纤维损伤程度及后续界面性能进行协同优化。在电化学氧化研究方面，Cao等[15]研究了温和电场处理对不同类型碳纤维性能的影响，研究结果表明：该处理对高强度碳纤维(HSCFs)的性能具有改善作用，但导致高模量碳纤维(HMCFs)的部分性能指标出现下降，说明不同类型碳纤维对电场处理的响应存在差异。

表面氧化法具有工艺成熟、处理方式多样和界面增强效果较明显等优点，可有效改善碳纤维表面活性和树脂润湿性。然而，针对不同高性能热塑性树脂体系，合理的表面处理或界面构筑均可在一定程度上改善碳纤维/树脂界面结合，其具体提升幅度则受到树脂化学结构、纤维表面状态及处理条件等因素影响，过度氧化可能引入表面缺陷并损害纤维本体性能[16]。对于CFRTP而言，表面氧化法更适合作为纤维表面活化和后续界面层构筑的基础手段，需进一步结合热塑性树脂体系的高温加工窗口、上浆剂相容性和预浸带制备工艺进行协同优化。

1.2 等离子体处理

等离子体处理是利用高能活性粒子对碳纤维表面进行刻蚀、活化和官能化改性的物理化学方法。处理过程中，等离子体中的电子、离子、自由基及激发态粒子与纤维表面发生相互作用，一方面可在纤维表面引入含氧、含氮等极性官能团，提高表面能和润湿性；另一方面可通过微区刻蚀增加表面粗糙度，在尽可能减小对纤维本体影响的同时，增强纤维与树脂之间的机械互锁和界面作用[17,18]。不同气氛下的等离子体处理对碳纤维表面具有不同作用。氧等离子体通常可在纤维表面引入羟基、羰基、羧基等含氧官能团，并伴随一定程度的氧化刻蚀和粗糙化；氮气或氨气等离子体可有助于引入含氮极性基团，提高纤维表面极性和反应活性；氩气等惰性气氛主要通过离子轰击、表面清洗和微区刻蚀实现表面活化与粗糙化。因此，等离子体处理既可作为独立表面改性方法，也可作为后续上浆、接枝或复合界面层构筑前的预处理步骤。

Tang等[19]研究发现，采用低压氧等离子体处理活性碳纤维，可在其表面成功引入C－O、C＝O等含氧官能团，并通过等离子体刻蚀作用打开了部分孤

立微孔，纤维的比表面积和微孔体积增加了约10%。该结果表明，氧等离子体处理能够改变碳纤维表面化学组成及孔结构，并可能通过增加含氧官能团和比表面积改善其表面反应活性。Li等[20]采用低压等离子体对碳纤维进行表面改性，并系统分析了处理时间对纤维表面化学组成、形貌及CF/PEEK界面性能的影响。结果表明，适宜的等离子体处理能够增加碳纤维表面含氧官能团并提高表面粗糙度，在最佳处理时间约3 min时，CF/PEEK复合材料的界面剪切强度提高约36.0%；进一步延长处理时间则可能造成过度刻蚀，因此等离子体处理效果与处理时间密切相关。

等离子体处理在快速引入表面官能团方面表现出色，且对环境友好。但随着处理功率的提升，纤维自身强度下降明显，此外，其改性效果受气体种类、放电功率、处理时间、纤维状态以及处理后存放时间等众多因素影响，如何在提高纤维表面活性的同时保持处理均匀性与界面稳定性仍是其在工程化应用中需要解决的重要问题。

1.3 化学接枝

化学接枝法是通过氧化、偶联、缩合或原位聚合等反应，在碳纤维表面接枝小分子、聚合物链段或功能化纳米粒子，从而调控纤维表面化学组成和界面微观结构的方法。化学接枝可通过选择接枝组分、调节链段结构及构筑多尺度增强层，对纤维表面的化学组成和界面微观结构进行定向调控，从而改善纤维/树脂界面结合。其中，偶联剂接枝有助于增强化学连接，聚合物链段接枝可缓解界面应力集中，氧化石墨烯(graphene oxide，GO)、碳纳米管(carbon nanotube，CNT)等功能化纳米粒子则可提高表面粗糙度和界面载荷传递能力。对于CFRTP体系，接枝层还需兼顾热稳定性、树脂相容性及高温加工适配性。

刘高尚等[21]通过化学法将GO接枝到碳纤维表面，并以硅烷偶联剂作为桥接组分，使GO与碳纤维表面形成化学连接。研究表明，GO接枝后可在碳纤维表面形成多尺度增强结构，提高纤维表面粗糙度并改善界面结合性能。该结果表明，纳米材料接枝虽然有利于提高界面作用，但接枝量、分散状态和界面层稳定性仍需合理控制，否则将导致纤维热稳定性下降。Yang等[22]通过聚多巴胺/聚乙烯亚胺(PDA/PEI)共沉积与聚氨酯/支化聚乙烯亚胺(PU-PEI)化学接枝，在碳纤维表面构筑了具有刚柔梯度特征的过渡界面层。该结构中，柔性PU链段可作为应力缓冲层，刚性PEI交联网络则有助于增强界面载荷传递。改性后复合材料的界面剪切强度(interfacial shear strength，IFSS)和层间剪切强度(interlaminar shear strength，ILSS)分别提高49.4%和43.2%，表明通过分子结构设计构筑梯度界面层是提升碳纤维复合材料界面性能的有效方式。

化学接枝改性的优势在于界面结构的可设计性，能够依据树脂体系特性与复合材料服役需求来实现极性界面层、柔性缓冲层与多尺度增强界面的构筑。然而，处理过程中所涉及的多步反应使得改性复杂程度上升，且在反应过程中纳米粒子的引入也极易导致分散不均、团聚以及界面层厚度失控等问题。在实际生产过程中，上述问题会进一步放大；同时，还需兼顾处理效率、界面层耐热稳定性，以及与上浆、浸渍和固结成型等前后工序的兼容。

1.4 上浆剂改性

上浆剂改性法是在碳纤维表面构筑一层具有特定化学组成和界面功能的涂层，以改善纤维集束性、加工稳定性以及纤维/树脂界面结合性能。对于CFRTP体系而言，上浆剂不仅需要提高碳纤维表面润湿性，改善与PAEK、PEEK、PEKK、PPS等高性能热塑性树脂之间的相容性，从而提升界面黏结强度，还应具备优异的耐热性[23]。当前工业碳纤维常用的环氧类上浆剂主要面向热固性树脂体系，其与高性能热塑性树脂的分子相容性和加工窗口并不匹配，在300 °C以上的成型温度下，环氧类上浆剂易发生热分解导致界面劣化，进而削弱复合材料界面结合质量[24]。因此，开发与热塑性树脂基体相容、耐高温且适合连续化处理的上浆剂，是CFRTP界面调控的重要方向。

根据上浆剂分散形式和制备方式的不同，热塑性上浆剂通常可分为溶剂型、乳液型和水溶型等体系。溶剂型上浆剂以有机溶剂为分散介质，将树脂或功能聚合物溶解形成均相溶液，经浸渍、干燥后在碳纤维表面形成与树脂基体相容的聚合物涂层。该类体系具有成膜均匀、组分设计灵活和界面适配性较好的特点，但也存在有机溶剂使用、回收和环保压力等问题。针对碳纤维增强聚醚醚酮(carbon fiber-reinforced polyetheretherketone，CF/PEEK)复合材料界面结合不足的问题，谢雨佳等[25]以含Cardo环的双酚芴(BHPF)替代双酚A (BPA)，合成PAEK树脂并制备系列溶剂型上浆剂。结果表明，PAEK上浆剂可改善CF/PEEK界面结合，使复合材料的ILSS提高31.43%，弯曲强度和弯曲模量也得到提升。王振豪[26]采用亲电取代与亲核取代反应，对PEEK进行接枝改性，分别合成了含磺酸基(S-PEEK)、硝基(N-PEEK)及甲基

(C-PEEK) 3种不同极性侧基的PEEK衍生物。将上述聚合物分别溶于适当溶剂中，配制成上浆剂，用于碳纤维表面处理，进而制备CF/PEEK复合材料。结果表明，在所比较的3种 PEEK 衍生物上浆体系中，C-PEEK 上浆体系表现出较优的综合性能，其IFSS达到93.15 MPa，提升幅度达57.58%。赵乐等[27]采用化学接枝与表面上浆协同改性，通过硅烷偶联剂提高纤维表面粗糙度的同时引入活性基团，后利用酚酞型聚芳醚酮(PEK-C)溶液在纤维表面形成聚合物涂层。相较于未改性复合材料，改性后CF/PPS的弯曲强度及ILSS分别提高34.4%和123.9%。表明化学活化与相容性聚合物涂层的协同作用能够有效改善碳纤维/热塑性树脂界面结合。

乳液型上浆剂是将主体聚合物在乳化剂或分散助剂作用下分散于水相中形成稳定乳液，兼具水性体系的环保优势和聚合物上浆层的界面调控能力。与溶剂型上浆剂相比，乳液型体系可降低有机溶剂使用量，具有较好的工艺安全性和连续化处理潜力。蒋礼正等[28]通过相反转乳化成功制备了高热稳定性、水性环保的聚醚砜(PES)上浆剂，在0.5 wt%最优浓度下，将碳纤维增强聚苯硫醚(CF/PPS)复合材料的界面结合强度提升了50%以上，有效解决了碳纤维与聚苯硫醚因化学惰性导致的界面薄弱瓶颈。Yan等[29]通过亲核取代反应合成氨基封端的胺化PEEK (PEEK-NH_2)，并制备出储存稳定的乳液型上浆剂。该上浆剂凭借与PEEK基体相似的化学结构，促进界面处分子链扩散与缠结，形成范德华力及π-π相互作用，在后续加工过程中，由于基体与上浆层的分子链在温度作用下发生链段运动并跨界面扩散，逐步形成分子链互穿和缠结结构；冷却过程中，聚合物链段的运动能力逐渐降低，界面处形成的互扩散与缠结结构得以保留，有助于提高纤维与树脂之间的界面结合强度。因此，处理后CF/PEEK复合材料的ILSS与弯曲强度分别提升43.1%和62.2%，如图1所示。

水溶型上浆剂通常通过在聚合物主链或侧链中引入羟基、羧基、磺酸基、聚醚链段等亲水结构，使上浆剂无需大量有机溶剂或外加乳化剂即可在水相中形成稳定分散体系。该类体系组分相对简洁、稳定性较好，适合发展环境友好型碳纤维上浆技术，已成为上浆剂技术的主流方向之一。王少飞等[30]以共聚酰胺(COPA)为原料制备了水性上浆剂，通过在碳纤维表面引入羧基与酰胺基团，使得碳纤维表面活性得到提高，CF/PA6复合材料弯曲强度与ILSS分别提升64.4%和97.8%。Liu等[31]提出“磺化位点调控”分子设计策略，通过调控双酚单元含量实现杂萘联苯共聚芳醚砜酮树脂(PPBESK)的可控磺化，开发出耐高温水溶性磺化杂萘联苯共聚芳醚砜酮(SPPBESK)上浆剂，显著提升CF/PPESK复合材料的界面性能。Song等[32]通过分子工程设计混合功能水性聚氨酯(WPU)涂层，引入动态可逆亚胺键、π-π共轭堆积及Si—O—Si交联网络，显著提升涂层热稳定性、力学性能与界面附着力。Bao等[33]基于“相似相容”分子结构设计与“分子桥”键合机制，研究开发了一种水溶性、高耐热、长期稳定的HPPAEN-COOH上浆剂使得碳纤维增强聚酞嗪酮醚酮(CF/PPEK)复合材料磨损系数(ω)降至2.23×10^{-15} $m^3/(N\cdot m)$，较超碳纤维(UCF) (4.68×10^{-15})降低52.3%，并实现在改善磨损性能的同时提升复合材料力学性能。

除聚合物上浆剂外，纳米材料也常作为功能填料引入上浆层，用于构筑多尺度增强界面。CNT、GO、MXene、二硫化钨和氮化硼等纳米材料可通过提高表面粗糙度、增加界面作用位点、增强机械互锁和改善应力传递路径来提升复合材料界面性能[34,35]。针对CF/PEEK复合材料界面，Yang等[36]通过超声辅助浸渍法将MXene纳米片沉积于酸性活化碳纤维表面，研究结果表明：当MXene分散液浓度为1 mg/mL时，复合材料在X波段的电磁屏蔽效能(electromagnetic interference shielding effectiveness，EMI SE)较未改性样品提高103.1%，得益于MXene引入的机械互锁、氢键及范德华力，当分散液浓度为0.1 mg/mL时，弯曲强度、弯曲模量及层间剪切强度的增幅分别为28.5%、9.5%和29.7%。如图2所示，Li等[37]开发了基于羟基化氮化硼接枝碳纳米管(BNO-CNT)与聚醚酰亚胺(PEI)的复合上浆体系，用于提升CF/PEEK复合材料界面性能。该研究通过酯化反应将一维CNT与二维羟基氮化硼(BNO)共价接枝，抑制纳米粒子团聚，并结合溶液浸渍与热压成型实现涂层均匀稳定附着。上浆层通过多重机制协同增强界面性能：BNO与CNT分别提供羟基、羧基等活性官能团，与基体形成氢键及π-π相互作用；纳米结构增加纤维表面粗糙度，提升机械互锁效应。优化涂层后，CF/PEEK复合材料的弯曲强度、弯曲模量及ILSS分别提升约77.71%、59.39%与68.93%，界面失效模式由界面脱黏转变为基体内聚破坏。

在众多改性工艺中，上浆剂改性在CFRTP界面调控中具有较好的工程应用基础[28,38]。与表面氧化、等离子体处理和化学接枝相比，上浆剂不仅能够改善纤维/树脂界面结合，还能兼顾纤维集束、展纱、储

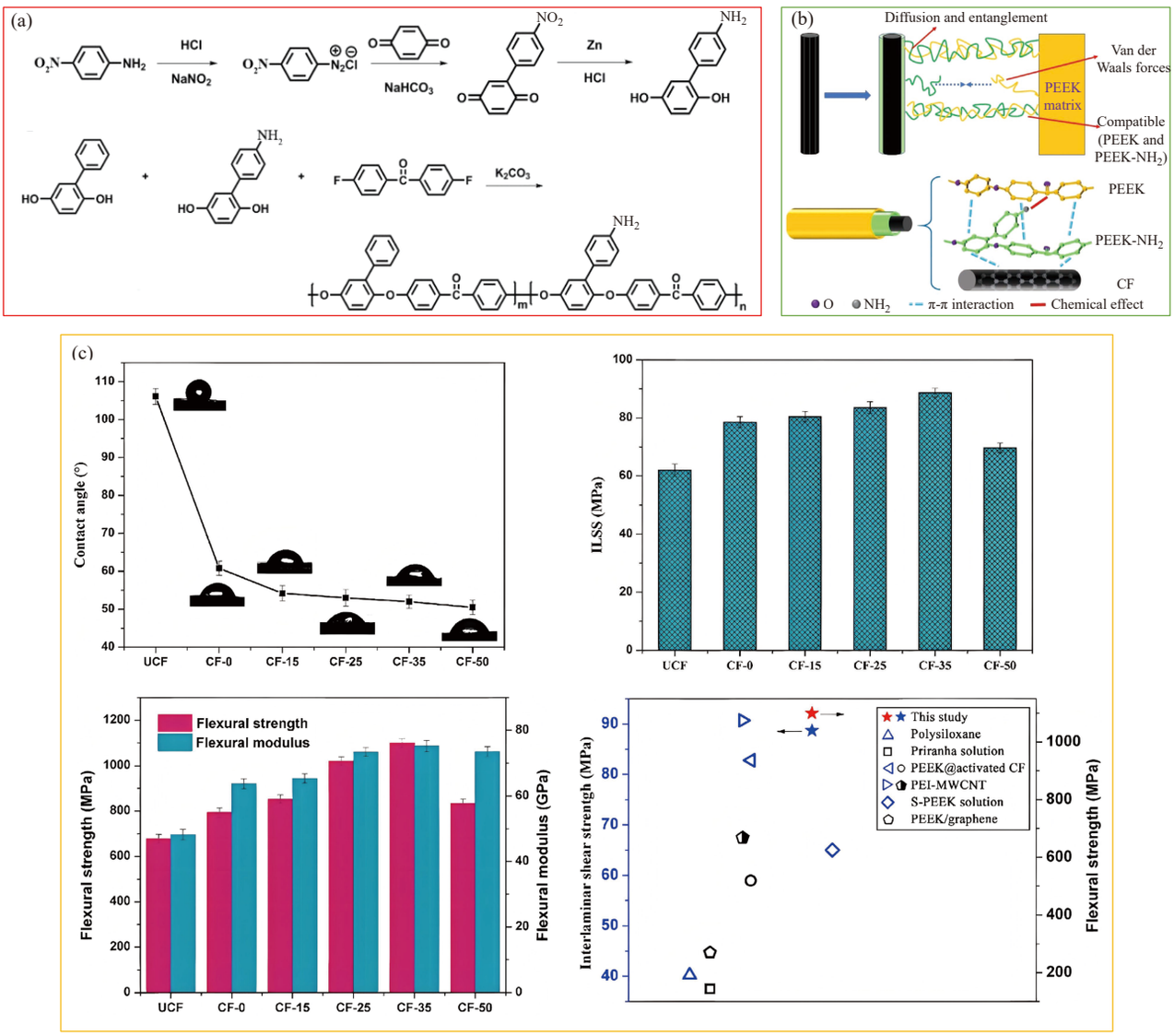

图 1 (a) Am-PH与 PEEK-NH_2 合成路线；(b) PEEK-NH_2上浆剂在CF/PEEK复合材料中界面增强机制；(c)改性碳纤维及复合材料性能测试[29] (2020 Elsevier 版权许可)

Fig. 1 (a) Synthetic routes of Am-PH and PEEK-NH_2; (b) Interfacial enhancement mechanism of the PEEK-NH_2 sizing agent in CF/PEEK composites; (c) Performance tests of modified carbon fibers and their composites (Reproduced with permission from Ref. [29]; Copyright (2020) Elsevier)

存和连续化加工需求。未来热塑性上浆剂的发展重点将集中在高温相容聚合物上浆剂、水性环保体系和纳米复合多功能界面层的协同设计上。

1.5 碳纤维表面改性方法比较及CFRTP适配性

CFRTP 表面改性需在界面增强、纤维本体性能保持及后续工艺适配之间取得平衡。不同改性方法的技术特征不仅体现在界面结合能力，还涉及表面活性调控程度、纤维损伤风险、界面层热稳定性、处理过程可控性及连续化加工能力等方面。因此，表1从作用机制、工艺与连续化特征以及可操作评价指标等维度，对不同表面改性方法进行比较，并结合PEEK、PEKK、PPS 等高性能热塑性树脂的加工特点分析其适用场景。

综上，表面氧化和等离子体处理主要通过调控碳纤维表面化学组成、表面能及微观形貌来改善树脂初始润湿与铺展。通过适度引入极性官能团和表面粗糙度，有利于降低高黏度热塑性树脂在纤维表面的润湿阻力，促进树脂向纤维束内部迁移；化学接枝和上浆剂改性则进一步通过构筑具有特定化学结构和空间尺度的界面层，调节树脂相容性、局部流动状态及界面作用。其中，与基体具有相似结构的聚合物链段还有利于后续熔融过程中界面两侧链段的互扩散与缠结。对于 PEEK、PEKK、PPS 等热塑性体系而言，界面结合并非仅由表面官能团或物理吸附决

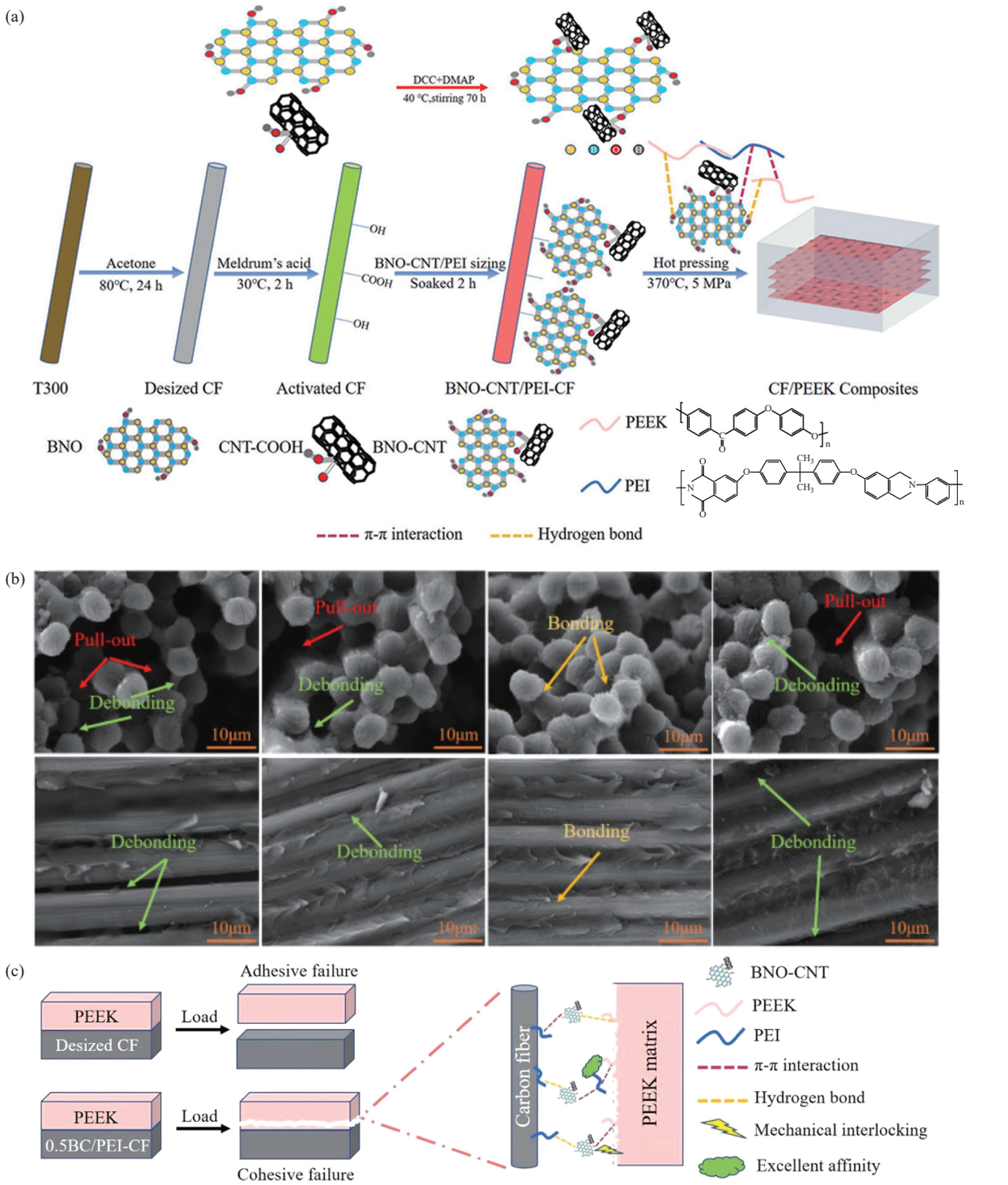

图 2 (a) BNO-CNT/PEI上浆剂作用机理示意图; (b)复合材料弯曲试验和ILSS试验后的断裂形态; (c)失效机理示意图[37] (2023 Elsevier 版权许可)

Fig. 2 (a) Schematic of the working mechanism of the BNO-CNT/PEI sizing agent; (b) Fracture morphologies of composites after flexural and ILSS tests; (c) Schematic of the failure mechanism (Reproduced with permission from Ref. [37]; Copyright (2023) Elsevier)

定，而与高温加工过程中聚合物链段的运动、松弛及跨界面扩散密切相关。随着温度升高和作用时间延长，界面两侧相容链段逐步发生构象重排和互扩散，并通过分子链缠结以及芳香结构间的 π-π 相互作用、范德华作用等共同稳定界面过渡区域。

因此，界面改性对后续预浸过程的影响具有连续性，即由纤维表面状态变化首先作用于树脂润湿与束内浸润，再进一步影响界面链段扩散及缠结，最

表 1 碳纤维表面改性方法及CFRTP适用性比较

Table 1 Comparison of carbon fiber surface modification methods and their applicability to CFRTP

改性方法	主要作用机制	工艺与连续化特征	可操作评价指标	在CFRTP中适用特点
表面氧化	引入含氧官能团、表面刻蚀与粗糙化，提高表面能及润湿性	工艺成熟，可连续化处理；关键在于控制氧化程度	接触角、表面元素组成/官能团含量、表面粗糙度、纤维强度保持率、层间剪切性能	适用于纤维表面活化及后续上浆、接枝前处理
等离子体处理	表面活化、官能团引入及微区刻蚀	处理快速、清洁、参数可调，适合连续表面处理	接触角、表面能、官能团含量、粗糙度、纤维强度保持率、IFSS/ILSS	适用于快速表面活化及上浆/接枝前处理
化学接枝	接枝小分子、聚合物链段或功能纳米材料，构筑相容/梯度界面层	工艺复杂度较高，接枝均匀性及界面层稳定性需控制	接枝率/表面元素组成、界面层厚度、热失重温度、IFSS/ILSS、界面断裂韧性	适用于高温树脂界面增强及梯度/多尺度界面构筑
上浆剂改性	构筑与热塑性树脂相容的聚合物涂层或功能界面层	工艺复杂度较高，接枝均匀性及界面层稳定性需控制	接枝率/表面元素组成、界面层厚度、热失重温度、IFSS/ILSS、界面断裂韧性	适用于PEEK、PEKK、PPS等高温热塑性树脂的连续化预浸及成型

终反映于层间载荷传递和复合材料界面性能。对于高熔体黏度热塑性树脂，这一过程还受到浸渍温度、压力、剪切和有效热作用时间的共同制约。因此，不同表面改性方法的选择不宜仅依据界面强度提升幅度进行评价，还应综合考虑其对树脂润湿与浸润、预浸带内部孔隙及树脂分布，以及界面分子链扩散与缠结行为的影响。因此，CFRTP 中碳纤维表面改性的效果不宜仅依据界面强度的提升幅度进行评价，还应综合考虑表面润湿与纤维束浸润效果、纤维本体性能保持率、界面层热稳定性及其与后续预浸工艺的适配性。

2 碳纤维增强热塑性预浸带制备工艺

热塑性预浸带是连续纤维增强热塑性复合材料制备中的关键中间材料，其质量特性，例如，树脂含量均匀性、纤维浸润程度、孔隙率及纤维展宽状态对后续成型过程中树脂的流动行为、纤维网络重构、孔隙闭合动力学以及层间界面结合强度具有重要影响。与常见低黏度树脂体系相比，PEEK、PEKK、PPS等高性能热塑性树脂在加工温度下仍具有较高的熔体黏度，树脂在纤维束内部的流动与渗透受到较大阻力。因此，需通过改善纤维展宽状态、缩短树脂流动路径并优化温度和压力条件，提高纤维束的浸润程度及孔隙排除效率。由此，热塑性预浸带制备的关键在于根据树脂引入方式和纤维束浸润特征，合理匹配温度、压力与作用时间，在保证树脂含量和纤维铺展均匀性的同时，降低预浸带内部的残余孔隙。

依据树脂引入与纤维浸润发生的先后关系及其主要作用机制，现有连续纤维增强热塑性预浸带制备技术可概分为预浸渍工艺与后浸渍工艺两大类。其中，预浸渍工艺是指在树脂引入纤维的同时完成或基本完成纤维束浸润，即树脂的引入与浸润过程具有同步性，主要包括溶液浸渍法、熔融浸渍法和反应链增长浸渍法等，后浸渍工艺则是先将树脂以粉末、薄膜或树脂纤维等形式预先分布于纤维表面或纤维层之间，再通过后续加热、压实及熔融流动实现进一步浸润与固结，主要包括粉末浸渍法、薄膜叠层法和纤维混编法等[39,40]。为便于系统比较上述工艺的浸润动力学差异与适用尺度范围，本节以树脂引入方式为分类主线，对六种代表性预浸带制备方法的工艺特征、浸润效率及其固有局限进行梳理与评述。

2.1 溶液浸渍法

溶液浸渍法基于高分子溶剂化原理，将热塑性树脂溶解于一种或多种树脂良溶剂中，形成黏度较低、流动性较好的聚合物溶液后，使连续纤维丝束或织物通过浸渍槽，在外部牵引剪切、纤维间毛细管压力及浓度梯度驱动的分子扩散协同作用下，促使树脂溶液沿纤维束内孔隙网络渗流填充；随后经干燥工序脱除溶剂，伴随高分子链构象塌缩与玻璃化转变温度回升，最终固化为纤维-树脂预浸带。溶液浸渍法因设备集成度较低、操作窗口开放且树脂溶液浸润动力学阻力低等特性，对于具备良好溶剂相容性的热塑性树脂体系展现出较强工艺适配性。

溶液浸渍法的工艺流程如图3所示，该工艺通过溶剂降低树脂体系的加工黏度，有利于树脂向纤维束内部渗透。该方法的适用性取决于树脂与溶剂的相容性，以及干燥过程中溶剂扩散、挥发与树脂成膜行为之间的匹配关系。溶液浸渍的效果首先取决于树脂与溶剂的相容性。适宜的溶剂体系有助于形成均匀稳定的树脂溶液，降低浸渍阶段的流动阻力；若溶剂相容性不足，则可能发生链段聚集或相分离，影响树脂在纤维束内的分布。此外，溶液黏度和固含量还

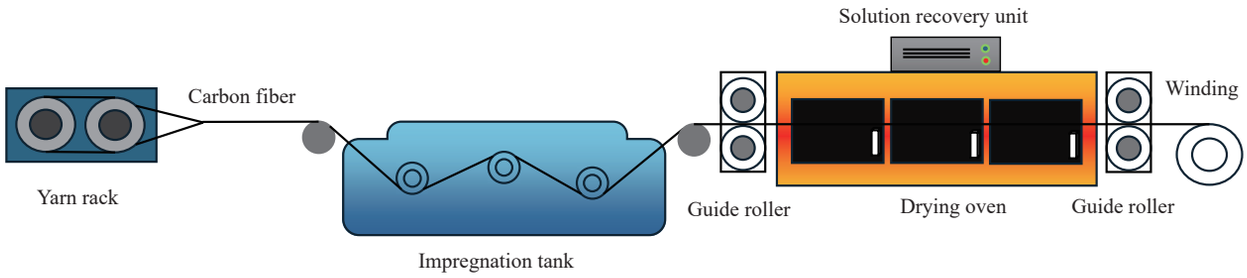

图 3 溶液浸渍工艺流程

Fig. 3 Schematic of the solution impregnation process

需与纤维展宽状态、牵引速度及有效浸渍时间相匹配，以改善树脂在纤维束内的渗透和分布均匀性。目前，溶液浸渍工艺中常用的树脂溶剂有*N*-甲基吡咯烷酮、*N*,*N*-二甲基乙酰胺等[40]，该类溶剂凭借其强极性和对芳杂环聚合物的良好溶解能力，可有效降低溶液黏度并提升树脂在纤维束间的分散与渗透能力。

在聚酰胺(PA)预浸带制备方面，ISHIDA等[41]将氯化钙与甲醇混合作为PA6树脂的溶剂，并用于CF/PA6预浸带的制备。其通过钙离子与酰胺基团间的配位络合作用可有效打断分子链间氢键网络，赋予体系较低的溶液黏度及良好的纤维浸渍性能。该溶剂方案规避了传统PA6溶剂毒性高、成本高的工程瓶颈，为PA6基预浸带的绿色化制备提供了一条具有可操作性的工艺路径，但后续干燥过程中溶剂脱除与络合解离的耦合行为对预浸带残余孔隙率及基体结晶度的影响仍有待系统考察。Sun等[42]则采用无水甲酸作为溶剂，将干燥后的PA6及PA6/PA66共聚物(CoPA)溶解于其中，通过高温回流促进树脂溶解，并在溶液冷却后进行连续纤维浸渍。由于制备过程中溶液黏度和基本性能相对稳定，所得CF/PA预浸带中的纤维质量分数可超过65%，拉伸强度超过1800 MPa，表明合理的溶剂体系和树脂浓度控制有助于提高预浸带质量及复合材料性能。

对于高性能PAEK树脂体系分散性优化，焦梦晓等[43]以三氟乙酸/二氯甲烷混合液作为PEKK的溶剂，利用三氟乙酸的强质子化能力打断PEKK分子链间羰基与醚键的相互作用，配合二氯甲烷调节溶液极性及挥发性，从而实现树脂在温和条件下的充分解离与稳定分散。随后，将碳纤维依次通过浸渍槽和轧辊，并经高温烘箱脱除溶剂后制备CF/PEKK预浸带，所得预浸带树脂质量分数约为32%。在进一步优化层合板成型工艺后，当成型温度为360 °C、预热20 min、保温保压20 min时，所制备的单向复合材料的拉伸强度达到1.61 GPa，拉伸模量达到33.38 GPa。该研究表明，通过选择适宜的强相互作用溶剂，可以在特定条件下实现半结晶热塑性树脂的溶解，并为PEKK体系采用溶液浸渍工艺提供了实验依据。

尽管溶液浸渍法借助溶剂降黏和简单的设备配置，在改善热塑性树脂浸润方面展现出上述优势，但站在工业应用的角度上，该方法仍存在明显局限。一方面在于树脂适应性严格受高分子-溶剂体系溶解热力学支配：溶剂须具备足够的热力学亲和力(如Flory-Huggins参数$\chi < 0.5$)，以解离高分子链间的次价键(如偶极–偶极作用、氢键)及结晶微区的物理交联，形成均相溶液。对于PEEK、PEKK等主链含刚性芳杂环、兼具高度化学惰性与结晶性的聚合物，常规溶剂难以有效破坏其强分子间相互作用，通常难以实现有效溶解。另一方面在于工艺的环保与安全层面，有机溶剂的使用可能增加毒性曝露、燃爆风险及溶剂回收成本。在工艺控制上，溶剂脱除是由扩散动力学支配的非平衡相转化过程：干燥后期，溶剂挥发引发聚合物浓相表面成膜，形成致密皮层，严重阻碍内部溶剂逸出；残留溶剂在后续高温成型中气化或降解，导致预浸带或复合材料内部形成孔隙缺陷，并造成树脂分布梯度与纤维/基体界面脱黏，最终劣化力学性能与湿热耐久性。溶液浸渍法的工业化应用受到树脂溶解特性、溶剂脱除效率、残余溶剂控制及溶剂回收成本等因素制约，其适用范围需结合具体树脂体系和生产要求进行评估。

2.2 熔融浸渍法

熔融浸渍法是将热塑性树脂加热至黏流态温度以上，利用熔体在收敛流道中的剪切流动与压力驱动，使展开的连续碳纤维丝束在牵引作用下通过浸渍模具。在模具型腔或压辊施加的压力场中，树脂熔体克服其高黏度与纤维束内毛细阻力，浸入单丝间的微米级间隙，完成纤维束的微观浸渍；随后经冷却定型，聚合物由黏流态发生结晶或玻璃化转变而固化，最终获得结构致密的热塑性预浸带。熔融浸渍法无需引入有机溶剂，可减少溶剂残留及其引起孔隙缺陷的风险，并避免溶剂回收环节。该工艺适合连续

化生产，但其浸渍效果仍受到树脂熔体黏度、流动路径、温度和压力条件的共同影响。因此，熔融浸渍法是实现高性能热塑性预浸带连续化、规模化生产的重要技术路线之一。

熔融浸渍法的工艺流程如图4所示。其基本过程通常包括纤维展纱、树脂熔融、熔体浸渍、冷却定型和收卷等步骤。该工艺的核心在于降低熔体黏度与缩短树脂流动路径，以强化纤维束内的浸渍程度。连续碳纤维丝束内部单丝间隙处于微米尺度，而PEEK、PPS、PEKK等高性能热塑性树脂的熔体黏度高达数十至数百Pa·s，基于Darcy渗流规律，树脂在有限工艺时间内难以充分渗入纤维束内部。因此，浸渍温度、牵引速度、纤维张力、模具构型、压辊压力及纤维展宽状态等因素协同决定了预浸带的浸渍质量、孔隙率与纤维损伤程度。目前，树脂浸渍主要通过2种方式实现：熔体拉挤法是将表面黏附熔融树脂的碳纤维丝束引入特定几何构型的模具，利用拉挤过程中的压力与流道收敛的剪切作用完成浸渍与成型；熔体注射法则将纤维预制体置于密闭模腔中，通过高压注入熔融树脂，使之在纤维间渗流并实现浸渍。

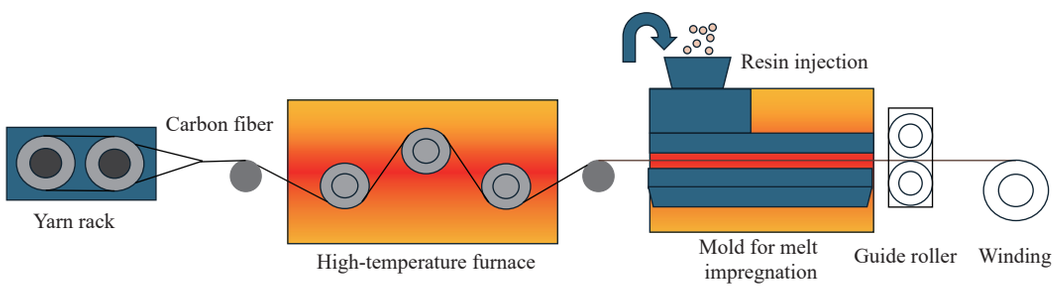

图 4 熔融浸渍工艺流程

Fig. 4 Schematic of the melt impregnation process

热处理条件有利于改善纤维/基体界面润湿与分子链段扩散缠结。Wang等[44]以PEEK为基体，系统考察了树脂在加工温度区间内的熔体黏度–温度依赖关系及热氧老化行为，据此界定了适宜的熔融浸渍工艺窗口，并进一步分析了上浆剂热分解去除对纤维丝束铺展状态及复合材料界面结合强度的影响规律。结果表明，200 °C预热可使预浸带拉伸强度提高25.69%，孔隙率低于1%。申少杰[45]针对CF/PEEK预浸带熔融浸渍工艺，基于牛顿流体理论与Darcy定律构建了浸渍度理论模型，系统阐明了包覆角、树脂黏度、纤维束厚度、浸渍辊数量及张力等关键参数对浸渍度的影响规律。在此基础上，通过单因素试验与Taguchi正交设计，深入揭示了浸渍辊高度、牵引速度、浸渍温度及压光温度对不同性能指标的主导作用，并成功制备出纤维分布均匀、界面结合良好的高性能CF/PEEK热塑性预浸带。该研究建立了浸渍度理论模型，并结合试验分析了关键工艺参数对浸渍效果的影响，为浸渍模具结构设计及工艺参数优化提供了理论依据。Sidim等[46]针对 PPS体系，研究了浸渍模具中销钉角度对纤维浸润效果的影响，发现当销钉角度增至82°时纤维分布更为均匀，复合材料拉伸强度达612.95 MPa。马晓敏等[47]以PA66为基体，研究了纤维含量对力学性能的影响，结果表明，纤维体积体积分数从20%增至55%时，拉伸强度从464.4 MPa提升至1174.0 MPa，但含量超过35%后，强度增长趋缓，主要是由于高纤维体积分数下熔体渗透阻力增大，导致浸润不充分并诱发局部应力集中，偏离了理想的等应变承载状态。上述研究表明，熔融浸渍工艺所制备预浸带及其复合材料的最终性能，并非取决于单一参数的优化，而是依赖于树脂黏温特性的匹配、模具流道构型的合理设计、纤维预处理工艺的有效配合及纤维含量与基体含量的协同平衡等多因素的联合调控。

熔融浸渍法作为热塑性预浸带连续化制备中最具工程代表性的主导性工艺路线，在当前复合材料制备领域占有重要地位。但对于PEEK、PEKK等高熔体黏度树脂而言，其熔体黏度对温度与剪切速率高度敏感，在常规加工条件下，为使树脂获得足够的流动性与纤维浸润驱动力，工艺过程须施加较高的加工温度与外部压力，这对浸渍设备的耐温等级、模具流道的抗热–力耦合变形能力以及熔体在流道内压力传递效率均提出了苛刻的设计要求。在实际操作条件下，若熔体黏度偏高或纤维束在浸渍模具内的停留时间不足，则高黏度熔体在毛细通道内的粘性耗散显著增强，易导致纤维束内部区域树脂渗透不充分，从而诱发孔隙残留、纤维/基体界面润湿不良以及应力传递效率下降等质量问题。进一步地，当预浸带产品面向自动铺放(AFP/ATL)、连续纤维增强热

塑性复合材料3D打印等二次成型工艺时，熔融浸渍法还需对预浸带的厚度一致性、表面粗糙度及初始孔隙率等关键物性指标实施更为严格的工艺过程控制，以满足精密铺放及逐层堆积过程中的尺寸精度与层间结合可靠性要求。

2.3 反应链增长浸渍法

反应链增长浸渍法，又称原位聚合浸渍法，其基本原理是将低黏度的树脂单体或预聚体与增强纤维充分混合，随后在纤维表面或界面处引发聚合反应，使树脂分子链原位增长并包覆纤维，从而实现预浸带的制备。由于单体或预聚体初始黏度远低于热塑性树脂熔融态黏度，该方法可有效避免传统熔融浸渍工艺中因树脂黏度过高导致的纤维浸润不完全问题。同时，浸渍与聚合过程可在同一工艺窗口内完成，具有实现浸渍—成型一体化的潜力。

在原位聚合制备热塑性复合材料的研究中，Irisawa等[48]将碳纤维织物浸渍于ε-己内酰胺与碳纳米纤维(CNFs)的混合液中，通过ε-己内酰胺在碳纤维表面的原位聚合，成功制备了碳纤维体积分数约60%的CF/PA6/CNFs预浸带。仅添加0.1 wt% CNFs时即可显著提高PA6分子量，复合材料弯曲强度较未改性CF/PA6提升30%。Cho等[49]则采用界面聚合法，将酰氯化氧化石墨烯(AGO)与CNT分散于二氯甲烷和己二酰氯的混合有机相中，与含有1,6-己二胺和氢氧化钠的水相溶液形成分层体系，使碳纤维浸渍于两相界面处，通过己二酰氯与己二胺的界面原位聚合制备CF/PA66/AGO-CNT预浸带。当杂化填料浓度为1.5 mg/mL时，复合材料的界面剪切强度、拉伸强度及储能模量较CF/PA66分别提高160%、136%和300%。上述研究表明：反应链增长浸渍与纳米填料增强的结合，可有效调控聚合过程及界面微区结构，进而在纤维/树脂界面区域建立更高效的载荷传递路径，从而显著改善CFRTP的宏观力学性能。此外，原位聚合浸渍也可与复合材料高效制备工艺相结合，提升CFRTP的制备效率与界面性能。Kim等[50]采用热塑性反应传递模塑成型工艺，将阴离子开环聚合与纤维浸渍过程集成，实现了己内酰胺在碳纤维织物中的原位聚合。通过优化聚合温度、催化剂及活化剂含量，将聚合诱导时间控制在20~25 s；同时引入GO、石墨烯微纳米片(xGnP)等纳米材料并结合常压等离子体纤维表面处理，显著改善了树脂分散稳定性、结晶度及界面结合性能。优化后复合材料弯曲强度与模量分别提升30.7%和29.2%。

反应链增长浸渍法在高纤维含量、复杂织物结构和快速成型制备中具有一定潜力。但该工艺同时涉及聚合反应与浸渍过程的协同控制，工艺窗口相对较窄。若反应速率、温度场、压力场或催化体系控制不当，可能导致聚合不完全、残留物难以去除、孔隙率升高、界面结合劣化或热稳定性下降等问题。因此，反应链增长浸渍法目前更适合用于具有成熟反应聚合基础的热塑性体系，其进一步工程化应用仍需围绕反应动力学调控、助剂残留控制、预浸带低孔隙成型和连续化装备开发开展研究。

2.4 粉末浸渍法

粉末浸渍法是将热塑性树脂通过机械粉碎或沉淀聚合等方式制备为微米级聚合物颗粒，借助气流分散、静电吸附、流化床沉积或液相悬浮介质等途径，使颗粒凭借惯性碰撞、静电引力及过滤截留等机制附着于纤维表面或楔入纤维束内间隙，随后经加热熔融和压实固结获得热塑性预浸带的工艺方法。与熔融浸渍法直接依赖树脂熔体流动不同，粉末浸渍法将高黏度树脂的浸润问题前移为粉体分散、迁移、附着与后续熔融固结问题，从而在一定程度上缓解高性能热塑性树脂熔体黏度高、纤维束内部浸润困难的问题。因此，该方法在高性能热塑性复合材料预浸带制备中展现出一定的工艺优势，是高性能热塑性预浸带制备中值得重点关注的技术路线之一。

如图5所示，粉末浸渍法根据树脂粉末引入方式的不同，通常可分为干法粉末浸渍和湿法粉末浸渍。干法粉末浸渍主要借助机械压力、静电场作用或流化床等方式将树脂粉末沉积于纤维表面，随后经热压工序使颗粒熔融并沿纤维束铺展成膜，该路线工艺流程简洁，全程无需引入液体介质及配套的干燥工序。湿法粉末浸渍则先将树脂粉末均匀悬浮于水性或有机液体介质中形成稳定分散体，纤维丝束通过浸渍槽后在压辊压缩作用下借助液体携带效应与机械挤压，使悬浮颗粒渗入纤维束内层及单丝间隙，后续经溶剂蒸发、颗粒熔融与冷却固化，完成预浸带的收卷成型。2种工艺路径的本质差异在于粉末的分散介质与引入方式，其中干法对粉末流变特性与静电荷密度要求较高，湿法则需兼顾悬浮稳定性与干燥工艺的匹配性，二者在粉末粒径分布、纤维铺展状态及浸渍均匀性方面各有侧重。

对于干法粉末浸渍，树脂颗粒在纤维表面的沉积行为主要受粉末粒径、气流速度、静电作用及纤维展宽状态等因素影响。若气流速度过高或颗粒与纤维间的附着作用不足，已沉积粉末易发生脱落，导致树脂含量降低及面密度波动；若粉末粒径过小或团

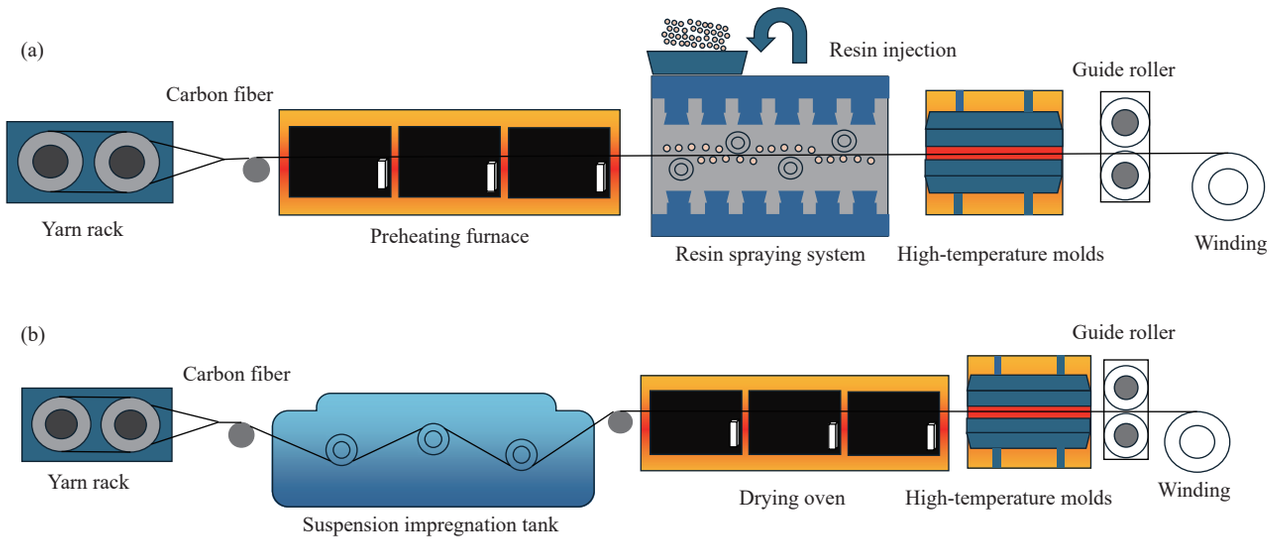

图 5 粉末浸渍工艺流程: (a)干法粉末浸渍工艺; (b)湿法粉末浸渍工艺

Fig. 5 Schematic of the powder impregnation process: (a) Dry powder impregnation; (b) Wet powder impregnation

聚倾向明显，则易造成局部富集，并在后续熔融过程中形成浸润不均和孔隙残留。王志平等[51]采用流化床结合外加电场实现 PPS 粉末在 CF 表面的静电吸附，在 80 kV 电场、吸附 10 s 及 300~310 °C热压条件下获得树脂质量分数高于 50%的 CF/PPS预浸带，表明外场辅助能够提高粉末沉积效率及树脂含量控制能力。Nassir等[52]采用干法粉末浸渍制备 CF/PEKK 预浸带，并发现 PEKK质量分数为 40%时综合性能较优。由此可见，干法粉末浸渍的关键在于调控颗粒输运、沉积与后续熔融铺展之间的匹配关系，粉末在纤维表面的初始空间分布将进一步影响后续树脂熔体的流动路径及孔隙闭合行为。

湿法粉末浸渍则通过液相介质构建树脂粉末悬浮体系，使粉末由直接沉积转变为经液相输运后再向纤维表面迁移和附着，其浸渍均匀性因而与悬浮液的稳定性密切相关。稳定的悬浮体系可维持较均一的颗粒浓度和粒径分布，使连续纤维通过浸渍区时获得相对稳定的颗粒通量；当悬浮液发生沉降、团聚或局部浓度波动时，纤维束表面的粉末沉积量将随位置和时间发生变化，进而造成树脂含量离散，并形成富树脂区与贫树脂区。进一步地，初始粉末分布的不均匀会在后续熔融固结过程中被放大：富树脂区域易产生局部树脂富集，而贫树脂区域则因熔体补充不足而难以充分填充纤维间隙，最终表现为局部浸润不足、孔隙残留及界面结合不均。Li等[53]采用表面活性剂与黄原胶构建 PEEK 水相悬浮体系，发现表面活性剂浓度达到临界胶束浓度时分散效果较好；Song等[54]通过曲拉通-100 (Triton-100)与聚乙二醇(PEG)复配增强空间位阻作用，使悬浮稳定窗口延长至 50 min，并获得纤维体积分数为 60%的复合材料。上述结果表明，悬浮液稳定性不仅影响粉末沉降，还会通过改变颗粒浓度分布及其输运过程，影响树脂在纤维束中的空间分布和最终浸渍均匀性。

除悬浮稳定性外，分散助剂的残留也是影响湿法粉末浸渍界面质量的重要因素。表面活性剂、增稠剂等助剂能够通过降低界面张力、提供静电排斥或空间位阻抑制粉末团聚，但若其在干燥过程中未充分脱除，或在后续高温熔融阶段发生热分解及碳化，则可能在纤维/树脂界面形成残留层。一方面，残留物会削弱树脂与碳纤维表面的直接接触，阻碍热塑性树脂熔体在纤维表面的铺展以及分子链扩散、缠结和界面结合；另一方面，热分解产生的低分子挥发物若不能及时逸出，还可能在界面及纤维束内部形成微孔缺陷，从而进一步降低层间结合强度和界面载荷传递效率。Li 等[53]的研究表明，不同悬浮助剂的残碳特征与层间性能保留率密切相关，琥珀酸二(2-乙基己酯)磺酸钠(AOT) 体系因残碳率较低而表现出较高的层间剪切强度保留率，但相较于乙醇循环体系仍存在一定性能下降。这说明湿法粉末浸渍中悬浮稳定性与界面洁净性存在内在耦合关系，即助剂需要在“提高颗粒分散稳定性”与“降低高温残留”之间取得平衡。

此外，纳米粒子的引入为湿法粉末浸渍由单纯的树脂引入向界面协同调控拓展提供了可能。Chen等[55]将纳米 SiO_2分散于 PEEK 水相悬浮液中，发现适量纳米 SiO_2可提高 CF/PEEK 复合材料的层间剪切强度及弯曲性能，表明悬浮体系不仅能够承担树脂颗粒的输运功能，还可作为纳米界面调控组分的

同步引入平台。但纳米粒子的加入也会改变悬浮体系的粒径分布、黏度及沉降行为，其团聚或局部富集可能反过来诱发新的界面缺陷。因此，湿法粉末浸渍的优化应由单一的粉末分散控制进一步转向“悬浮稳定—颗粒输运—沉积均匀—助剂脱除—熔融固结”的全过程协同调控。综合而言，干法依靠气流、静电等手段实现粉末直接沉积，具有流程短和连续化潜力高的特点，更适用于高效率、短流程预浸带制备；湿法依靠液相悬浮实现粉末分散与输运，在高黏度、高熔点热塑性树脂及高均匀性预浸带制备方面更具优势，但对悬浮稳定性、助剂残留和连续化工艺集成提出了更高要求。

粉末浸渍法可通过预先分布树脂粉末，在一定程度上降低高性能热塑性树脂高熔体黏度对纤维浸润的限制。其中干法粉末浸渍工艺流程短、无液相介质和后续干燥环节，具有较高的生产效率和连续化制备潜力，但其过程对粉末粒径、气流速度、静电场及纤维展宽状态较为敏感，粉末附着均匀性及粉尘安全控制是规模化应用需要重点解决的问题；湿法则借助液相介质构建稳定的粉末悬浮体系，通过液相输运和机械挤压促进树脂颗粒在纤维束中的分散与沉积，对粉末空间分布和树脂含量具有较好的调控能力，尤其适用于 PEEK、PPS、PAEK 等高性能热塑性树脂体系，但其工艺控制需兼顾悬浮稳定性、树脂含量均匀性、助剂残留及干燥脱除等因素，连续化制备的工艺集成难度相对较高。总体而言，干法更适用于流程简化、高效率及连续化生产场景，湿法则在高黏度树脂和高均匀性预浸带制备方面具有较好的适应性。未来，2种技术均需进一步加强粉末分散与输运过程的精准控制，并向树脂含量在线监测、大幅宽连续化及低缺陷熔融固结方向发展。

2.5 薄膜叠层法

薄膜叠层法是通过挤压或吹塑工艺将基体树脂制备成均匀薄膜，之后通过叠层工艺将纤维丝束或纤维织物与树脂薄膜交替铺放，经热压使树脂熔融并短程渗入纤维层内，冷却固结后形成层合结构的一种预浸带制备工艺。与溶液浸渍法相比，薄膜叠层法完全摒弃有机溶剂，从工艺路径上上消除了溶剂残留与挥发性有机化合物(VOC)排放问题；与熔融浸渍法相比，树脂熔体无需在纤维束内进行长程渗流，而是借助薄膜与纤维层的紧密接触，在热压过程中实现短程浸润与层间自黏合，显著降低了对熔体高黏度流变特性的敏感度。因此，薄膜叠层法具有工艺流程相对简单、树脂含量易于通过薄膜厚度和铺层比例进行设计、适合制备平板层合结构等特点。

图6展示了薄膜叠层法的工艺原理，该方法的关键在于树脂薄膜厚度、纤维铺层方式、热压温度、压力、保温时间及冷却制度的合理匹配。热压温度过低或保温时间不足时，树脂黏度较高，链段松弛受限，难以充分流入纤维束内部，易诱发层间界面结合薄弱、纤维束内孔隙滞留及局部贫树脂等结构性缺陷；温度过高或保温时间过长时，则可能引发树脂热氧化降解使分子量降低或结晶动力学异常，导致复合材料的力学性能和热性能劣化。压力兼具双重作用：提升熔体压力梯度以驱动树脂流动并排除气体，同时压实增强层间分子链扩散结合；但压力过高会导致纤维位移、波纹或织物变形，影响取向度。因此，薄膜叠层法需在树脂充模效率、纤维结构稳定与孔隙排除三者间取得平衡，通过温度-压力-时间的协同调控实现优化。

Lu等[56,57]先后开展了2种工艺路线制备CF/PEEK预浸带的研究。首先，将CF与PEEK纤维混编织成柔性平纹织物，通过混编法制备复合材料，系统考察了熔融温度、成型压力、结晶温度及树脂含量对性能的影响，结果表明当熔融温度为370 °C、成型压力为0.5 MPa、结晶温度为300 °C、树脂质量分数为59.07%时，复合材料拉伸强度达738.36 MPa，弯曲强度为659.68 MPa，实现了良好的界面结合。此外，该团队采用薄膜叠层工艺制备CF/PEEK层压板，系统研究了温度与压力对熔体流动速率、黏度及力学性能的影响，发现温度升高可降低树脂黏度并提高熔体流动速率，但在400 °C时，因PEEK分子链中部分化学键断裂，产生大分子链自由基并发生耦合反应，导致分子链运动受阻，流动性下降；压力则通过改变熔体

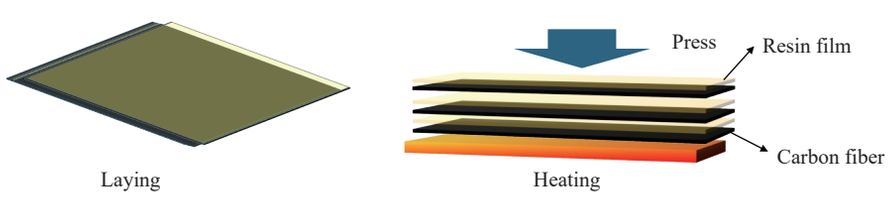

图 6 薄膜叠层法工艺示意图

Fig. 6 Schematic of the film stacking process

流动速率及纤维间间隙影响浸渍质量，当温度为380~390 °C、压力为0.5 MPa时，层间剪切强度与拉伸强度均提升约36%。李兴乐[58]基于薄膜叠层法开展CF/PEEK预浸带制备工艺研究，通过对浸润过程的分析认为，树脂完全浸渍纤维束的时间与树脂黏度、加热辊直径成正相关，与展纤宽度、初始张力成负相关，并确定了最佳熔融工艺参数，当成型温度380 °C、碳纤维宽度13 mm、收丝速度2.3 m/min时，预浸带孔隙率最低为5.23%，碳纤维质量分数达70.14%，层间剪切强度达91.66 MPa。因此，通过展纱、温度、压力控制和牵引速度匹配，可在一定程度上改善薄膜叠层法中树脂对纤维束的浸润效果。

在当前工业化生产过程中，薄膜叠层法被视为一种基础工艺，常用于低黏度树脂预浸带生产或与其他生产工艺联用，如熔融浸渍法。其主要局限在于该方法通常采用间歇式生产，需要逐一铺层、热压成型，每个循环需经历升温、保温(通常20~30 min)、冷却全过程，难以实现连续化大规模生产。从工艺原理角度分析，树脂含量由薄膜厚度与纤维织物面密度的初始匹配所决定，使得纤维体积分数通常被局限在50%~60%的范围内，限制了通过提高纤维含量实现结构轻量化的空间。此外，树脂薄膜通常需经熔融流延或吹塑等成型工序制备，其加工成本显著高于粉末或颗粒形态的树脂，进一步推高了材料的综合制造成本。

2.6 纤维混编法

纤维混编法是将基体树脂纤维与增强纤维按一定比例混合或编织成纤维束、纱线或纤维织物，如图7所示，将所得织物或预成型体置于热压模具中，在加热和压力作用下使树脂纤维熔融流动，从而实现纤维浸润和预浸带/复合材料坯料制备的一种工艺方法。该方法将热塑性树脂通过熔融纺丝制成纤维，再与碳纤维等增强纤维进行混纺或交织，借助纤维级别的配比实现对预浸带树脂含量的精确控制。其技术关键在于树脂纤维与增强纤维的混合均匀性、组分比例的严格调控、织造过程中纤维的机械损伤抑制，以及后续热压固结阶段树脂纤维的熔融流动、浸润与界面自粘合条件。同时，该工艺过程较为环保，且柔性混编预成型体可铺覆于复杂型面，适用于异型或大型结构件的近净成形，并可与缠绕成型、模压等后续工艺结合[59]。

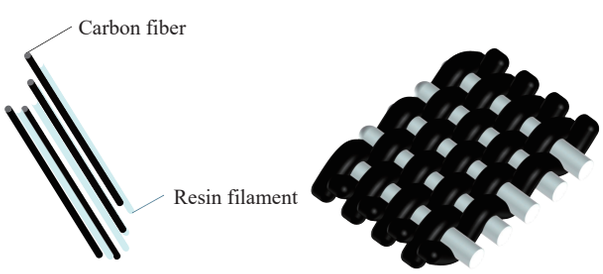

图 7 纤维混编工艺示意图

Fig. 7 Schematic of the hybrid weaving process

针对纤维混编制备热塑性复合材料的关键工艺与性能优化，张佳新等[60]以碳纤维为经纱、聚苯硫醚(PPS)纤维为纬纱编织平纹织物并模压成型，通过系统优化铺层层数、热压温度与时间及树脂含量，发现当树脂质量分数为50.2%、铺层20层、热压温度330 °C、保温时间30 min时，拉伸强度与弯曲强度分别达920.1 和890.6 MPa。在此基础上，Grabovetskaia等[61]进一步探究了不同树脂基体与含量对编织复合材料性能的影响，采用CF与PEEK纤维进行二维平纹编织，通过调控纬纱股数获得不同树脂含量的预制件，结果表明，在所研究的3种树脂含量范围内，树脂质量分数为66%时纤维浸渍效果最佳、层间结合致密，拉伸强度达330 MPa，且经湿热老化后强度保持率达93%。上述宏观工艺与性能研究揭示了编织参数对力学行为的调控规律，而编织结构固有的细观非均匀性对损伤演化亦有显著影响。为此，杨光猛等[62]针对纤维束波动效应，建立改进的像素法细观有限元模型，在Hashin准则中引入剪切修正因子，发现面外剪切应力集中是导致复合材料最终失效的主要因素之一，且忽略材料主方向随波动的变化会显著高估强度，强调细观模型中须准确描述纤维束波动形态。上述研究从工艺优化、性能表征到细观损伤机理揭示，系统阐明了纤维混编策略对复合材料力学行为的影响，为高性能编织热塑性复合材料的设计与性能评估提供了参考。

纤维混编法在实际推广中受制于多重因素。一方面，高性能热塑性树脂纺丝难度大、成本高，混编均匀性和织造过程对纤维的损伤难以完全避免；另一方面，在较高纤维体积含量或复杂织物结构中，仍易出现树脂浸润不足、孔隙残留及界面结合不均等问题，导致最终制品的力学性能分散性较大。此外，该工艺以编织物为主要产品形态，对以预浸带或预浸丝为原料的自动铺放、连续纤维3D打印等自动化成型工艺适配性有限，限制了其在高端制造领域的拓展空间。因此，纤维混编法目前更适用于对预成型体结构和层合设计有特定要求的复合材料构件制备，尤其适合中低纤维体积分数的层压板、复杂形状

叠层结构以及多向增强的板壳类部件。

2.7 碳纤维增强高性能热塑性预浸带制备工艺比较

不同制备工艺在树脂浸润效率、树脂含量控制、孔隙缺陷抑制及连续化生产能力方面各有特点，其适用性取决于树脂流变特性、纤维束结构及目标预浸带的质量要求。由于PEEK、PEKK、PAEK、PPS等高性能热塑性树脂具有较高熔体黏度，其浸渍过程相比传统热固性树脂更加困难，因此制备工艺的选择需综合考虑树脂流变特性、浸渍效率及后续成型需求，各工艺的主要特征及适用场景见表2。

表 2 预浸带制备工艺对比

Table 2 Comparison of prepreg tape preparation processes

制备工艺	树脂引入形式	主要浸润机制	浸润效率	连续化生产能力	典型适用树脂
溶液浸渍法	树脂溶液	低黏度溶液渗流/扩散	较高	中等	PA、部分PEKK/PI等可溶体系
熔融浸渍法	熔融树脂	压力/剪切驱动熔体渗流	中等	高	PEEK、PEKK、PPS、PAEK
粉末浸渍法	粉末颗粒	颗粒沉积＋后续熔融流动	中等	较高	PEEK、PEKK、PPS、PAEK
薄膜叠层法	树脂薄膜	短程熔融渗流	中等	较低	PEEK、PEKK、PPS等
纤维混编法	树脂纤维	熔融后短程渗流	中等	中等	PPS、PEEK、PA等
反应链增长浸渍法	单体/预聚体	低黏度浸润＋原位聚合	高	中等	PA6等反应型体系

当前，国外高性能热塑性预浸带产业相较于国内发展较早，已形成较完善的材料、制造装备及应用体系。以Toray Advanced Composites、Solvay、Victrex等国际复合材料企业为代表，已实现CF/PEEK、CF/PEKK、CF/PPS等高性能热塑性预浸带产品的商业化供应，并在航空航天、能源装备等领域获得应用。上述产业化发展主要依赖于成熟的热塑性预浸带制备技术体系。目前，高性能热塑性预浸带主要采用熔融浸渍法、粉末浸渍法、薄膜叠层法及纤维混编法等技术路线。其中，熔融浸渍法因具有工艺流程简单、无需溶剂、生产效率高以及易于连续化制造等优势，已成为高性能热塑性预浸带工业化制备的重要方法之一。然而，对于PEEK、PEKK等高熔体黏度树脂体系，熔融浸渍过程中仍存在纤维束内部浸润不足、残余孔隙控制困难以及高温加工窗口窄等问题。针对上述问题，粉末浸渍法通过树脂粉末预分布和后续熔融融合过程，可有效降低高黏度树脂浸润难度，近年来逐渐成为制备高性能热塑性预浸带的重要补充技术。与此同时，薄膜叠层法和纤维混编法因具有工艺灵活、适用范围广等特点，在部分特殊结构制造和实验研究中仍具有应用价值，但受限于生产效率和浸渍均匀性，目前尚未成为高性能连续碳纤维增强热塑性预浸带制造的主流技术。

相比之下，国内相关技术起步较晚，目前正由实验研究向工程化应用快速发展。近年来，北京航空航天大学、北京航空材料研究院、东华大学等单位围绕CF/LMPAEK等高性能热塑性预浸带开展技术攻关，并逐步实现国产化制备。同时，光威复材、江苏亨博、苏州娜恩等企业也已开展CF/PEEK、CF/PAEK等热塑性预浸带产品研发，部分产品已进入工程验证和批量应用阶段。我国当前高性能碳纤维增强热塑性预浸带制备技术虽已具备一定产业化基础，但针对航空自动铺放等快速制造需求，仍需进一步解决高黏度树脂快速浸润、预浸带质量稳定控制以及热历史对结晶行为和界面性能影响等关键问题。未来，以低熔点PAEK等高流动性树脂体系为基础，开发适用于快速AFP成型的高性能热塑性预浸带，将成为该领域的重要发展方向。

3 总结与展望

综合现有研究，碳纤维表面改性与预浸带制备共同影响CFRTP的界面形成和内部结构质量。表面改性主要通过调节纤维表面化学组成、形貌及界面层结构改善树脂润湿与界面适配性；预浸带制备则通过控制树脂引入方式、纤维束浸润过程及缺陷演化，影响预浸带的树脂分布和内部孔隙状态。两者的协同优化仍需兼顾界面性能、预浸带质量及连续化制造要求。本文围绕碳纤维表面改性和热塑性预浸带制备，综述了主要界面调控方法及预浸工艺，并分析了表面能态、树脂流变、热历史、分子链扩散和结晶行为对界面结合、浸渍质量及材料性能的影响。

未来，CFRTP 的性能提升有望由单一材料性能或工艺参数优化，逐步转向材料组成、界面结构与制造过程的协同设计。界面设计将由改善润湿和载荷传递向兼具增韧、损伤调控、热/电传输及状态感知功能的可编程界面演进；预浸带制备则有望由高黏度熔体浸润转向低黏度前驱体浸润与原位聚合，通过反应型浸渍突破传统熔融浸渍的流变限制。同时，

预浸带制备与构件成型将进一步融合，发展原位浸渍、原位铺放和原位固结一体化技术，推动高性能热塑性复合材料的高速、连续和复杂构件制造。此外，多物理场建模、机器学习与在线传感技术的结合，为CFRTP制造过程的状态监测和质量控制提供了新的研究思路。未来可进一步探索相关方法在树脂浸润、结晶行为及缺陷演化预测中的适用性，推动质量控制由制造后检测向制造过程监测与调控延伸。绿色制造也将由基体可回收拓展至基体、界面和增强体协同循环，发展可拆解、可修复和可再加工的材料体系。下一代CFRTP将向界面功能化、浸润反应化、制造原位化、控制智能化和循环闭环化方向发展，推动其由高性能材料体系向数字化、智能化和可持续制造范式转变。

参 考 文 献

1 Almushaikeh, A. M.; Alaswad, S. O.; Alsuhybani, M. S.; AlOtaibi, B. M.; Alarifi, I. M.; Alqahtani, N. B.; Aldosari, S. M.; Alsaleh, S. S.; Haidyrah, A. S.; Alolyan, A. A.; Alshammari, B. A. Manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastics and its recovery of carbon fiber: a review. *Polym. Test.*, **2023**, 122, 108029.

2 Arquier, R.; Iliopoulos, I.; Régnier, G.; Miquelard-Garnier, G. Consolidation of continuous-carbon-fiber-reinforced PAEK composites: a review. *Mater. Today Commun.*, **2022**, 32, 104036.

3 Carosella, S.; Hügle, S.; Helber, F.; Middendorf, P. A short review on recent advances in automated fiber placement and filament winding technologies. *Compos. Part B Eng.*, **2024**, 287, 111843.

4 Teltschik, J.; Matter, J.; Woebbeking, S.; Jahn, K.; Borja Adasme, Y.; van Paepegem, W.; Drechsler, K.; Tallawi, M. Review on recycling of carbon fibre reinforced thermoplastics with a focus on polyetheretherketone. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **2024**, 184, 108236.

5 Garofalo, J.; Walczyk, D. *In situ* impregnation of continuous thermoplastic composite prepreg for additive manufacturing and automated fiber placement. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf*, **2021**, 147, 106446.

6 Li, J.; Huang, Q.; Yin, Y. J.; Xu, J. G.; Jiang, Y. M.; Du, W. J. The technology and current applications of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites. *Polym. Compos.*, **2024**, 45(15), 13480−13498.

7 Moradi, A.; Sun, C. Z.; Guan, Z. W. Facilitating aqueous powder impregnation for manufacturing thermoplastic composites: a prepreg rig design and process optimisation. *J. Reinf. Plast. Compos.*, **2025**, 44(19-20), 1568−1589.

8 Otheguy, M. E.; Gibson, A. G.; Findon, E.; Cripps, R. M.; Mendoza, A. O.; Castro, M. T. A. Recycling of end-of-life thermoplastic composite boats. *Plast. Rubber Compos.*, **2009**, 38(9-10), 406−411.

9 高卫锋, 刘东, 颜春, 祝颖丹, 陈刚, 徐海兵, 刘国军, 黄剑鹏. 碳纤维增强热塑性复合材料摩擦性能研究进展. 高分子通报, **2025**, 38(1), 1−13.

10 Pegoretti, A. Towards sustainable structural composites: A review on the recycling of continuous-fiber-reinforced thermoplastics. *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.*, **2021**, 4(2), 105−115.

11 张吴妍, 杨雅帅, 薛怿, 吴龙强, 杜薇, 蒋民强, 张辉, 俞建勇. 聚酰胺66/聚酰胺6双组分纤维网纱层间增韧碳纤维/环氧树脂复合材料的多尺度协同机制. 高分子通报, **2026**, 39(12), 1−11.

12 Periasamy, K.; Kandare, E.; Das, R.; Darouie, M.; Khatibi, A. A. Interfacial engineering methods in thermoplastic composites: an overview. *Polymers*, **2023**, 15(2), 415.

13 Li, W. Z.; Li, Y. B.; Huang, M. H. Joining and separating behavior of roughness interface in CF/PEEK nanocomposite. *Polymer*, **2024**, 311, 127557.

14 王成博, 张代军, 李军, 陈祥宝. 碳纤维高温气相氧化对聚醚醚酮复合材料拉伸和层间剪切性能的影响. 复合材料学报, **2024**, 41(12), 6425−6437.

15 Cao, H. S.; Tian, Y. H.; Sun, J. M.; Zhang, X. J. Evolution of microstructure and properties of various types of PAN-based carbon fibers under the action of a mild electric field. *Carbon Lett.*, **2025**, 35(3), 1379−1395.

16 Kim, G.; Lee, H.; Kim, M.; Kim, D. U. Investigating the effects of nitric acid treatments on the properties of recycled carbon fiber. *Polymers*, **2023**, 15(4), 824.

17 Pitto, M.; Fiedler, H.; Kim, N. K.; Verbeek, C. J. R.; Allen, T. D.; Bickerton, S. Carbon fibre surface modification by plasma for enhanced polymeric composite performance: a review. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **2024**, 180, 108087.

18 He, J.; Wang, Y.; Qian, Y.; Guo, J. S.; Lu, J. X.; Yang, W. C. Surface modification of ultra-high-molecular-weight polyethylene and applications: a review. *Polymers*, **2024**, 16(23), 3431.

19 Tang, S.; Lu, N.; Wang, J. K.; Ryu, S. K.; Choi, H. S. Novel effects of surface modification on activated carbon fibers using a low pressure plasma treatment. *J. Phys. Chem. C*, **2007**, 111(4), 1820−1829.

20 Li, Y. R.; Liu, Q. C.; Shao, W.; Tan, Z.; Wu, Y.; He, D. Y. Effects of low-pressure plasma surface modification on the surface

properties of carbon fibers. *J. Mater. Res. Technol.*, **2026**, 42, 6368−6378.

21 刘高尚, 刘雅玄, 卞达, 赵永武. 氧化石墨烯接枝碳纤维及其树脂涂层在不同载荷下的摩擦学性能. 表面技术, **2021**, 50(4), 62−69.

22 Yang, H.; Yang, C. C.; Zhu, D. D.; Sun, C. Y.; Chen, B. Y.; Wang, X. L. Establishment of “rigid-flexible” transition interface between carbon fiber and resin matrix for interfacial adhesion enhancement. *Langmuir*, **2025**, 41(28), 18609−18621.

23 郭家铭, 张勇明, 李争鸣, 刘金波, 蒋继涵, 杨士钊. 碳纤维增强聚醚醚酮复合材料用上浆剂研究进展. 高分子通报, **2026**, 39(9), 1732−1747.

24 曹建凡, 白树林, 秦文贞, 严毅. 碳纤维增强热塑性复合材料的制备与性能研究进展. 复合材料学报, **2023**, 40(3), 1229−1247.

25 谢雨佳, 谢鑫淋, 裴维兵, 李奇, 郭家铭, 袁尧, 刘宇. 耐高温溶液型聚芳醚酮上浆剂的制备及其应用. 应用化学, **2025**, 42(1), 78−85.

26 王振豪. 改性聚醚醚酮上浆剂对碳纤维复合材料微观界面性能的影响. 上海: 东华大学, **2023**.

27 赵乐, 陈正国, 杨青, 刁春霞, 陆承志, 王少飞, 刘勇, 张辉. 酚酞型聚芳醚酮与硅烷偶联剂协同改性CF/PPS复合材料. 复合材料科学与工程, **2023**(9), 21−28.

28 蒋礼正,任宏亮, 刘嘉, 殷康, 刘佳南, 韩克清, 刘勇, 李永丰, 张辉, 王洪恩, 杨洋, 俞建勇. 聚醚砜水性上浆剂改善CF/PPS复合材料的界面性能. 复合材料学报. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20260604.005.

29 Yan, T. W.; Yan, F.; Li, S. Y.; Li, M.; Liu, Y.; Zhang, M. J.; Jin, L.; Shang, L.; Liu, L.; Ao, Y. H. Interfacial enhancement of CF/PEEK composites by modifying water-based PEEK-NH_2 sizing agent. *Compos. Part B Eng.*, **2020**, 199, 108258.

30 王少飞, 薛康昊, 范琳, 杨青, 吕玥蒽, 丁小马, 赵乐, 张辉, 刘勇. 共聚酰胺水性上浆剂改善CF/PA6复合材料的界面性能. 复合材料科学与工程, **2023**(6), 17−22.

31 Liu, Z. H.; Bao, Q. G.; Cheng, S.; Sun, Q. F.; Feng, J. Y.; Wang, N.; Li, N.; Jian, X. G. Developing a high-temperature-resistant water-soluble sizing agent *via* sulfonation site regulation strategy: toward enhanced interfacial properties in CF/PPESK composites. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2025**, 64(51), 24652−24664.

32 Song, X.; Li, C. F.; Le, L.; Yu, R. W.; Liu, M. L. Molecular engineering of hybrid functional waterborne polyurethane coatings: synergistic effects on interfacial enhancement of carbon fibers. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2026**, 18(1), 2538−2549.

33 Bao, Q. G.; Li, W. Z.; Wang, N.; Cheng, S.; Liu, J. G.; Wang, B.; Feng, J. Y.; Sun, Q. F.; Li, N.; Jian, X. G. A novel water-soluble sizing agent that enhances the interface and tribological characteristics of CF/PPEK composites. *Compos. Part B Eng.*, **2025**, 294, 112170.

34 Lopez, A.; Arroyo, S.; Fontes, D.; Perez, S.; Rodriguez, A.; Zaman, S.; Molina, L.; Favela, S.; Marquez, C.; Dantzler, J.; Mahmud, M. S.; Renteria, A.; Lin, Y. R. Additive manufacturing of multifunctional PEEK-carbon fiber-CNT lattices composites for tunable temperature and force sensing. *Polym. Compos.*, **2025**, 46(S3), S729−S742.

35 Zhang, Q.; Zu, X. J.; Ji, X. N.; Ma, H. H.; Zhou, X. D. Interfacial improvement of carbon fiber/poly(ether ether ketone) composites by coating water-based sulfonated poly(ether ether ketone) and carbon nanotube composite sizing agent. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2025**, 142(35), e57384.

36 Yang, X. Q.; Luo, J. M.; Ren, H. L.; Xue, Y.; Yang, C. X.; Yuan, T.; Yang, Z. H.; Liu, Y.; Zhang, H.; Yu, J. Y. Simultaneously improving the EMI shielding performances and mechanical properties of CF/PEKK composites *via* MXene interfacial modification. *J. Mater. Sci. Technol.*, **2023**, 154, 202−209.

37 Li, Y. Z.; Jiang, N. Y.; Xu, N.; Zhang, H. Y.; Zhou, N.; Zou, X. H.; Zhang, Y. X.; Zhang, D. X. A facile strategy to prepare boron nitride grafted carbon nanotubes coating for CF/PEEK composites interfacial enhancement. *Compos. Commun.*, **2023**, 44, 101770.

38 Hu, J. L.; Yan, F.; Liu, H.; Zhao, L. S.; Li, Z.; Liu, Y.; Ao, Y. H.; Liu, L. Water-based PEKC-COOH sizing agent for enhancing the interfacial adhesion of carbon fiber/polyether-ether-ketone composites. *Compos. Part B Eng.*, **2021**, 225, 109279.

39 岳伟, 袁远, 李莹莹. 热塑性预浸料的制备技术及研究进展. 纤维复合材料, **2023**, 40(4), 95−99.

40 盛哲, 盛文思, 金美汐, 孟思彤, 沈新慧, 于利超. 连续纤维增强高性能热塑性预浸料制备工艺研究进展. 棉纺织技术, **2026**, 54(2), 4−10.

41 Ishida, O.; Oda, S.; Uzawa, K. Impregnation process of large-tow carbon-fiber woven fabric/polyamide 6 composites using solvent method. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **2024**, 180, 108068.

42 Sun, H. B.; Lv, X. X.; Wen, X. D.; Liu, X. C.; Zhi, J. Y.; Yang, Y.; Cao, L. J.; Yuan, L. Y. High-content continuous carbon fiber reinforced polyamide prepreg filaments *via* solution impregnation: microstructure optimization and enhanced mechanical properties for 3D printing. *Mater. Today Commun.*, **2025**, 47, 113024.

43 焦梦晓. 聚醚酮酮结晶形态及热力学性能的调控研究. 上海: 东华大学, **2021**.

44 Wang, Z. H.; Pi, Z. P.; Jia, J.; Ouyang, Z.; Ma, J. Y.; Wang, H. Z.; Yang, L.; Yan, C. Z. Preparation of high-performance

CCF/PEEK prepreg filaments by melt impregnation: process optimization and performance enhancement. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **2026**, 202, 109476.

45 申少杰. 连续碳纤维增强聚醚醚酮预浸带及层压板制备与性能研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, **2025**.

46 Sidim, G.; Dogu, M.; Ozbek, B. Manufacturing and characterization of continuous carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide filaments *via* melt impregnation method. *Polym. Compos.*, **2025**, 46(1), 749−760.

47 马晓敏, 邢立学, 谭洪生, 王杰, 朱凯丽, 邢海妮. 连续碳纤维增强PA66复合材料的结晶与力学性能. 中国塑料, **2019**, 33(2), 40−46.

48 Irisawa, T.; Shibata, M.; Yamamoto, T.; Tanabe, Y. Effects of carbon nanofibers on carbon fiber reinforced thermoplastics made with *in situ* polymerizable polyamide 6. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **2020**, 138, 106051.

49 Cho, B. G.; Lee, J. E.; Hwang, S. H.; Han, J. H.; Chae, H. G.; Park, Y. B. Enhancement in mechanical properties of polyamide 66-carbon fiber composites containing graphene oxide-carbon nanotube hybrid nanofillers synthesized through *in situ* interfacial polymerization. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **2020**, 135, 105938.

50 Kim, B. J.; Cha, S. H.; Park, Y. B. Ultra-high-speed processing of nanomaterial-reinforced woven carbon fiber/polyamide 6 composites using reactive thermoplastic resin transfer molding. *Compos. Part B Eng.*, **2018**, 143, 36−46.

51 王志平, 顾子琛. 静电粉末流化法碳纤维/聚苯硫醚预浸料的制备及性能表征. 塑料工业, **2019**, 47(10), 22−26.

52 Nassir, N.; Birch, R. S.; Cantwell, W. J.; Wang, Q. Y.; Liu, L. Q.; Guan, Z. W. The perforation resistance of glass fibre reinforced PEKK composites. *Polym. Test.*, **2018**, 72, 423−431.

53 Li, Y. R.; Li, Y.; Huan, D. J.; Chen, X. D.; Li, L. S.; Liu, H. Q.; Wang, W. Q.; Wang, J. S.; Xiao, J. Study on polyetheretherketone prepreg manufactured by aqueous system of powder impregnation. *Polym. Compos.*, **2022**, 43(5), 2980−2991.

54 Song, J. P.; Zhao, Y.; Xiong, S.; Sun, M. C.; Duan, Z. Q.; Li, S.; Wang, K. The synergistic steric hindrance effect in the preparation of polyether ether ketone composites by powder slurry method. *Polym. Compos.*, **2022**, 43(4), 2384−2395.

55 Chen, J. L.; Zhang, T.; Wang, K.; Zhao, Y. Multiscale enhancement behavior of nano-silica modified CF/PEEK composites prepared by wet powder impregnation. *Polym. Compos.*, **2019**, 40(3), 1187−1197.

56 Lu, C. R.; Xu, N.; Zheng, T.; Zhang, X.; Lv, H. X.; Lu, X.; Xiao, L.; Zhang, D. X. The optimization of process parameters and characterization of high-performance CF/PEEK composites prepared by flexible CF/PEEK plain weave fabrics. *Polymers*, **2018**, 11(1), 53.

57 Lu, C. R.; Ma, J.; Lu, X.; Li, S. Q.; Zheng, T.; Ba, S. H. Study on impregnation parameters in preparation of CFF/PEEK laminates. *Mater. Lett.*, **2024**, 355, 135447.

58 李兴乐. PEEK基碳纤维预浸丝束成型工艺研究. 郑州: 河南工业大学, **2023**.

59 孙宝磊, 陈平, 李伟, 陆春. 先进热塑性树脂基复合材料预浸料的制备及纤维缠绕成型技术. 纤维复合材料, **2009**, 26(1), 43−48.

60 张佳新, 梅启林. CF/PPS编织复合材料的制备及力学性能研究. 复合材料科学与工程, **2020**(1), 76−81.

61 Tatiana, G. 碳纤维增强聚醚醚酮复合材料的制备及编织性能研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, **2019**.

62 杨光猛, 万小朋, 侯赤. 纤维束波动效应对平纹编织复合材料损伤行为的影响. 复合材料学报, **2020**, 37(1), 132−139.