doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.01.025

连续碳纤维增强聚醚醚酮预浸丝制备及增材制造应用研究进展

陈艳雷,王宏晓,郭嘉仪,朱登洁,李鑫鹏,冯欣雨,惠延波
(河南工业大学机电工程学院,郑州 450001)

摘要:连续碳纤维增强聚醚醚酮(CCF/PEEK)复合材料因高耐热性与可回收加工性,正成为高端结构件增材制造的重要材料。介绍了CCF/PEEK预浸丝的熔融浸渍拉挤、喷嘴内原位浸渍与粉末浸渍复合三种成型工艺,回顾了模具温度、牵引速度、纤维体积分数与进料方式对浸渍质量、孔隙率与力学性能的影响;简述了上浆剂与等离子体等界面改性在提升润湿性、界面剪切与层间致密度方面的进展;概述了国内外适配高温热塑性与连续纤维协同成形的增材制造装备及其在航空航天、汽车与风电等领域的应用。分析表明,PEEK树脂高黏度、界面惰性及工艺窗口窄是造成浸渍不足与界面弱化的主要因素。未来亟需面向工艺—界面—装备—智能化的协同优化,突破制丝工艺与界面改性协同控制、增材制造装备升级以及数据驱动的在线监测与智能预测等关键环节。

关键词:连续碳纤维;聚醚醚酮;预浸丝;成型工艺;界面改性;增材制造

中图分类号:TQ327.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1001-3539(2026)01-0193-07

Research progress on preparation and additive manufacturing applications of continuous carbon fiber-reinforced poly(ether ether ketone) prepreg filament

CHEN Yanlei, WANG Hongxiao, GUO Jiayi, ZHU Dengjie, LI Xinpeng, FENG Xinyu, HUI Yanbo
(School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Continuous carbon fiber reinforced poly (ether ether ketone) (CCF/PEEK) composites, characterized by high thermal resistance and recyclability, have become promising materials for additive manufacturing of high-performance structural components. Three typical fabrication routes of CCF/PEEK prepreg filaments, namely melt-impregnation pultrusion, in-nozzle in-situ impregnation, and powder-impregnation hybridization were reviewed. The effects of mold temperature, traction speed, fiber volume fraction, and feeding mode on impregnation quality, porosity, and mechanical properties were summarized. Interfacial modification techniques such as sizing and plasma treatment were briefly introduced for their progress in improving wettability, interfacial shear strength, and interlayer densification. The development of additive manufacturing equipment capable of co-processing high-temperature thermoplastics and continuous fibers was outlined, together with representative applications in aerospace, automotive, and wind-energy fields. Analysis indicates that the high viscosity of PEEK resin, inert fiber surface, and narrow process window are the primary factors causing insufficient impregnation and interfacial weakening. Future efforts are urgently required to pursue the collaborative optimization of process-interface-equipment-intelligence, with breakthroughs in key aspects including the synergistic control of filament fabrication and interface modification, the upgrading of additive manufacturing equipment, as well as data-driven online monitoring and intelligent prediction.

Keywords: continuous carbon fiber ; poly(ether ether ketone) ; prepreg filament ; forming process ; interface modification ; additive manufacturing

基金项目:国家科技支撑计划项目(2012BAF12B13),河南省科技攻关计划项目(232102221024)

通信作者:惠延波,教授,博士生导师,主要研究方向为增材制造、数字化设计与制造

收稿日期:2025-10-22

引用格式:陈艳雷,王宏晓,郭嘉仪,等.连续碳纤维增强聚醚醚酮预浸丝制备及增材制造应用研究进展[J].工程塑料应用,2026,54(1):193-199.
CHEN Yanlei, WANG Hongxiao, GUO Jiayi, et al. Research progress on preparation and additive manufacturing applications of continuous carbon fiber-reinforced poly(ether ether ketone) prepreg filament[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(1): 193-199.

近年来,高性能热塑性复合材料因其较高的比强度/比刚度、耐化学腐蚀与可回收加工性而受到关注[1-3]。其中特种工程塑料聚醚醚酮(PEEK)兼具高热稳定性、可热焊接性、抗疲劳性和可回收加工性能,是连续碳纤维(CCF)增强热塑性体系中最具代表性的基体之一[4-5]。碳纤维是一种具有高比强度、高比模量等优良性能的增强材料[6],当与PEEK结合成为复合材料时,不仅保留了PEEK的固有优良特性,还显著提升了复合材料的刚度与承载能力[7]。相较于短切碳纤维(SCF),连续碳纤维(CCF)与PEEK的结合可以实现更高的结构强度与可靠性,具有更优异的力学性能[8]。CCF/PEEK复合材料可实现媲美航空级热固性复合材料的力学性能,同时具备熔融黏结与按需重塑特性[9]。随着增材制造技术的快速发展,CCF/PEEK复合材料在制造轻量化、定制化、高性能部件等方面展现出广阔的前景[10],尤其在航空航天、汽车零部件及其他特种工程领域具有重要应用价值与潜力[11-12],成为新一代增材制造及快速结构修复与替换的理想原料[13]。

伴随复合材料增材加工技术的显著进步,原材料质量波动和性能差异正成为限制高性能构件应用的关键瓶颈,对于CCF/PEEK预浸丝来说,其制备质量直接影响3D打印过程的稳定性及最终打印构件力学性能。在实际应用中,CCF/PEEK预浸丝的加工成形存在诸多限制,PEEK基体的熔融温度高且熔体流动性差,难以在狭小通道中充分渗透纤维束,导致增强纤维间浸润不全及微孔缺陷[14];纤维铺展不完全、牵引力失调以及温度场波动,同时诱发树脂局部积聚与结晶分化,继而引起应力积聚与结构缺陷[15]。这些问题在后续打印阶段逐渐加剧,呈现出层间熔合欠佳、孔隙率增长、纤维波纹突出与构件各向异性加剧,进而降低了材料的强度韧性及耐久性能[16]。另一方面,碳纤维的化学惰性强,表面能低,导致与PEEK树脂的相容性差,界面结合强度与能量传递效率不足[17]。当需要碳纤维保持较高的体积分数时,树脂的浸渍难度与孔隙缺陷的风险攀升,两相剥离倾向进一步加剧[18]。此外,预浸丝的制备工艺易受粉末干燥程度不足、模头膨胀、拉伸比起伏及进料摩擦力的制约,引起径向偏差及尺寸不均一,降低了预浸丝打印的可控性[19]。可见CCF/PEEK预浸丝的性能与其制备工艺中的材料属性、界面质量及加工精度密切相关,性能强化需制备参数与界面特性同步调整。

针对这一背景,对CCF/PEEK预浸丝在增材制造领域的材料开发与成型技术进展进行系统综述很有必要。本文从四个角度全面探讨了CCF/PEEK预浸丝的工艺特性及其在增材制造中的应用场景,首先比较了三种预浸丝制备工艺的适用边界与浸润特性,其次分析了原材料的界面调控方式对界面增强的影响,进而总结了国内外适用于CCF/PEEK预浸丝的增材制造装备及其特性,并总结了现阶段CCF/PEEK预浸丝的增材制造应用场景,为提升CCF/PEEK材料在高端增材制造中的稳定应用提供依据。

1 CCF/PEEK预浸丝制备方法与工艺进展

预浸丝作为复合材料3D打印的核心原料,其质量优劣直接关系到制件的极限性能参数[20]。在CCF/PEEK预浸丝制备的过程中,需攻克PEEK树脂高温高黏的工艺瓶颈,保证树脂能够完全渗透纤维并实现高强度的界面结合。就CCF/PEEK预浸丝而言,目前主流制备工艺可分为三类:熔融浸渍拉挤工艺、原位浸渍成型工艺及粉末浸渍复合法[21-23],详细阐释各项工艺的原理及前沿成果,对CCF/PEEK复合材料在3D打印领域的突破意义重大。

1.1 熔融浸渍拉挤工艺

熔融浸渍拉挤工艺是目前制备CCF/PEEK预浸丝的最常用的工艺方法,如图1所示,其核心是利用高温模具将一定张力下的碳纤维与熔融的PEEK树脂充分浸渍,实现预浸丝的连续成型。熔融浸渍拉挤工艺能够实现熔融树脂在张力与压力作用下对碳纤维的充分浸渍与均匀包覆,是一种连续、高效且适于规模化的预浸丝制备方法[24]。但在制备较高纤维体积分数或更小直径的预浸丝时,需进一步通过提高模具温度或延长纤维与树脂的浸渍时间保证制丝的低孔隙率与高界面紧致性。

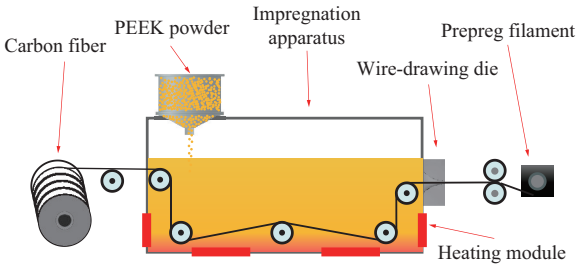

图1 熔融浸渍拉挤工艺制备预浸丝示意图

Fig. 1 Schematic illustration of prepreg filament prepared by melt-impregnation pultrusion process

陈意伟等[25]设计了一套包含双螺杆挤出机、弯曲流道浸渍模具和牵引装置组成的熔融浸渍拉挤实验平台,采用3K级碳纤维制得直径约为0.77 mm的预浸丝。结果显示,提高模具温度并降低牵引速率,可以有效改善树脂对纤维的浸渍效果,从而抑制孔隙产生及浸润缺陷,增强预浸丝的界面结合强度。在390 ℃熔融温度与7 mm/s牵引速度的情况下,预浸丝的拉伸强度为662 MPa;将牵引速度调整至16 mm/s,强度与应变同步减少约30%,反映出单纯的速度提升会削弱浸渍效果,造成性能劣化现象。该研究表明,“高温-低速”工艺配置对CCF/PEEK预浸丝成型质量改善起关键作用。Vatandaş等[26]开发了集成纤维铺展、熔融浸渍、模具成形和收卷工序的熔融浸渍拉挤平台,利用模具输出端可更换的喷嘴组件来调节丝径粗细与树脂流量,以此实现碳纤维体积分数的调整。采用3K规格的碳纤维时,可制得直径约为0.5 mm与0.6 mm两种规格的CCF/PEEK预浸丝,实际两种规格的预浸丝中碳纤维的体积分数分别约为55.69%和40.67%,孔隙率结果分别约为5.41%和3.28%。测量结果说明,较高的碳纤维体积分数能有效提升抗拉承载能力:试验测得0.6 mm

直径的预浸丝拉伸强度约为1 048 MPa，弹性模量约为49.06 GPa，当直径减为0.5 mm时，则拉伸强度值升至约1 692 MPa，模量值可达约63.11 GPa。总体来看，这两项研究建立了CCF/PEEK熔融浸渍的基本工艺窗口，但未系统量化模具几何尺寸与流场耦合的影响。相比之下，近年来的研究更关注模具流道优化与实时浸润监测等方向，以实现连续化生产的可控性。

在产业化层面，瑞士的Suprem公司已推出适用于3D打印的CCF/PEEK预浸丝产品，为高性能热塑性复合材料的自动化与增材制造提供了较为成熟的原料。另外江苏君华特种高分子材料股份有限公司也通过其专利[27]公开了一种可用于CCF/PEEK预浸丝制备的熔融浸渍拉挤工艺，利用预热与等离子体处理后的碳纤维束在浸润定型模具中与熔融PEEK树脂充分浸渍，并通过牵引冷却成型得到直径为1.75~2.5 mm的预浸丝。

1.2 原位浸渍成型工艺

原位浸渍成型工艺通过连续纤维与树脂在打印喷嘴内进行复合而后直接进行熔融沉积3D打印[28]，示意图如图2所示，该工艺省略了独立的制丝环节，缩短了工艺链，在一定程度上可以提升制造效率。但对于CCF/PEEK预浸丝，由于PEEK基体的高黏度特性，其在短浸渍通道内难以完全渗透到碳纤维束内部，容易形成孔隙，面临浸渍质量与工艺稳定性的双重挑战。目前公开的文献或资料中对于CCF/PEEK原位浸渍成型工艺的研究极少，相关机理与优化路径仍亟待深入探索。

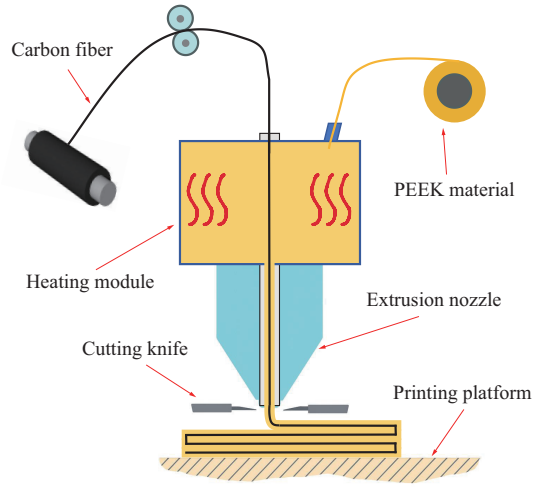

图2 原位浸渍成型工艺制备预浸丝示意图

Fig. 2 Schematic illustration of prepreg filament prepared by in-nozzle impregnation forming process

Nardiello等[29]提出一种采用原位浸渍技术的3D打印喷头方案，该方案的核心是借助双通道喷头完成聚合物基体和连续纤维的在线整合，喷嘴内部由熔融的热塑性树脂[如PEEK、聚醚酮酮(PEKK)、聚醚酰亚胺(PEI)及聚醚砜等]形成间隙腔，CCF沿纤维通道进入后，经熔体包覆实现完全浸渍，形成纤维增强丝束后沉积到工作平台。该项技术能依据打印轨迹实时调控纤维取向，结合喷嘴前端设置的切断部件，实现了纤维沉积过程的连续性及路径一致性，进而强化了打印成品的结构承载能力。Huttunen等[30]设计出一种集预热区、加热区与压实环于一体的耦合式喷头结构，使预浸渍的连续纤维复合丝在喷嘴内充分熔融且完成界面重新浸润，采用压实环或超声焊接方式提升层间压实度和界面附着强度。该原位浸渍成型工艺方案对CCF/PEEK材料适用性强，其集成化的多喷头系统可用来制造复杂部件。就CCF/PEEK而言，前述两项专利成果表明，采用原位浸渍成型工艺可在增材制造时直接构建优质结构部件，为连续纤维增强热塑性复合材料的3D打印技术开辟了新的工艺路径。

Philip等[31]基于Fused Granular Fabrication (FGF)平台构建了CCF/PEEK的喷嘴内原位浸渍系统：将熔融态PEEK与碳纤维在喷嘴中同步耦合，同步进行纤维束牵引与熔融浸渍，喷头的特殊设计能有效阻断熔体从进料口倒灌，经几何设计优化，在维持温度场均匀的同时，实现纤维束在26.6 mm有限浸渍区间的完整浸润。此外喷头材料的选用满足750 ℃耐热标准，可在必要时借助热分解方式去除残留的PEEK树脂。Philip的研究表明，合理设计喷头几何结构与加工工艺窗口，可同步改善PEEK对连续纤维的浸润特性及界面黏附力，为CCF/PEEK的直接3D打印应用打下基础，由此证实了原位浸渍成型技术在生产致密化程度高、界面结合好的复合材料构件中的实用价值。

综合来看，上述原位浸渍方案在设备集成度与路径同步性方面实现了突破，但其打印过程仍受限于PEEK高黏度带来的短浸渍区不足问题。当前多数研究停留在喷头几何优化与温控设计层面，尚缺乏对熔体/纤维间流变耦合机理与界面演化的深入分析，这限制了向高强度致密化构件的推广。未来应结合数值模拟与实验验证，构建喷嘴内浸润预测模型以支撑工艺标准化。

1.3 粉末浸渍复合法

粉末浸渍复合法通过使PEEK粉末均匀附着于碳纤维表面后再加热熔融渗透制备预浸丝[32]，如图3所示，该工艺避免了高黏度熔体浸渍不足及树脂热降解的问题，树脂含量可控，具有工艺灵活、产品性能优异等特点。但同时，由于整体的工艺复杂性，粉末浸渍复合法在制备高性能预浸丝时，受干燥与二次熔融工艺的影响，难以实现快速制丝的效率瓶颈。

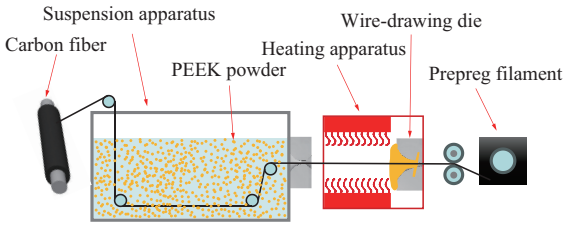

图3 粉末浸渍复合法制备预浸丝示意图

Fig. 3 Schematic illustration of prepreg filament prepared by powder impregnation composite process

王显峰等[33]提出了一种适用于CCF/PEEK的“分散液浸渍+熔融包覆”的CCF增强热塑性复合材料制备方法。其工艺为:将PEEK与乙醇按1∶(2~6)比例混合形成浸胶液,T800碳纤维在牵引作用下经浸胶槽浸渍,并于360~380 ℃烘道干燥后,经热压辊压实得到厚度0.1~0.3 mm、宽度1~3 mm的预浸丝。随后将预浸丝预热至300 ℃,再牵引并通过熔融聚苯硫醚进行二次包覆,并以单束或多束形式沉积成形。在340 ℃、100~200 mm/min条件下,所制得复合材料的拉伸强度可达225~231 MPa,弯曲强度为186~195 MPa。Zhang等[34]采用两步法加工方案制备CCF/PEEK包覆纱,以提高碳纤维的浸润充分性。采用15%的粉末浓度配合2.0 m/min走丝速度和1 037 T/m捻度时,可达到较理想工艺状态。采用1 K规格碳纤维时,复合丝中碳纤维的质量分数可达60%~75%,拉伸强度范围为400~620 MPa,较一步法而言提升了2~3.6倍;弯曲强度测试结果为250~500 MPa,增强效果达1.8~4.2倍,且内部孔隙明显减少,界面结合状态得到改善,但当纤维牵伸速率增大时,会因浸渍欠缺造成性能下降。

上述研究充分展示了粉末浸渍复合法在CCF/PEEK预浸丝制备方面的应用潜力,但该种方式仍存在工艺周期长、二次加热导致树脂氧化与界面残应力的问题。从行业应用角度看,粉末复合法在小批量高性能预浸丝制备上具有优势,但若用于大规模制丝仍需引入溶剂分散控制与短流程干燥技术以提升效率与一致性。

2 纤维–树脂界面调控与性能提升策略

采用界面改性与表面处理技术协同优化预浸丝制备工艺,可进一步增强连续纤维与树脂基体的界面结合强度,纤维与树脂的界面结合质量直接影响复合材料应力传递效果及力学性能,因而界面调控策略对CCF/PEEK预浸丝性能提升有着重要作用[35]。现阶段广泛采用的界面优化方法涵盖上浆剂处理、等离子体改性、化学接枝以及纳米填料引入等技术[36−38],当前CCF/PEEK预浸丝的界面优化研究多聚焦于上浆剂处理和等离子体改性两种方法,为进一步制备高性能CCF/PEEK预浸丝及其3D打印构件提供了可行的技术途径。

2.1 上浆剂/界面涂层调控策略

上浆剂法是指将CCF浸渍在可与PEEK相容的聚合物溶液中,在干燥、固化以后会在纤维表面形成一层具有良好化学活性且表面粗糙度较大的功能涂层,该涂层可以有效增强纤维和树脂间的界面结合强度[39]。Yu等[40]研发了一种上浆装置,以50%的乙醇水溶液和二辛基磺基琥珀酸钠(5 g/L)活化剂作为上浆剂配方,对6 K规格碳纤维进行上浆处理,在其表面得到了一层功能化的涂层,最后经过熔融浸渍制得直径为0.8 mm的CCF/PEEK预浸丝。力学实验表明丝材的拉伸强度由仅工艺优化时的1 274.6 MPa进一步提升到1 589.6 MPa,该研究证明了使用上浆剂进行界面调控可以有效提升CCF/PEEK丝材力学性能,也为高性能3D打印CCF/PEEK预浸丝的制备提供了可靠的实验依据和数据支撑。Qin等[41]采用热塑性上浆剂改善纤维与基体之间的润湿性和界面相容性,该研究对比了未上浆、PEI上浆以及PEEK上浆样品。CCF/PEEK预浸丝通过热熔挤出机在螺杆转速100 r/min、温度410 ℃条件下制得,预浸丝直径控制在0.4 mm左右,其中CCF质量含量为65%~67%;结果表明:相对于未上浆丝材,PEI上浆复合材料拉伸强度提高约47.6%,PEEK上浆提升约54.0%;上浆剂在纤维表面形成了与PEEK基体相容性好的过渡层,显著增强了CCF与树脂基体之间的润湿性及界面结合强度,使预浸丝更加致密、均匀,为后续3D打印CCF/PEEK构件提供了性能更可靠的原料基础。上浆剂法可提高CCF/PEEK预浸丝的润湿性、界面结合力,对其力学性能也有很大的提高,有利于CCF/PEEK预浸丝在高性能结构件增材制造上的运用和发展。

上述两项研究均验证了上浆剂的显著增效作用,但主要聚焦于力学性能的宏观变化,缺乏对界面化学键结构与官能团作用机理的深入探讨。结合当前行业趋势,未来应从界面相容性分子层级匹配和耐高温上浆体系的稳定性入手,实现更可控的界面设计。此外,上浆剂在3D打印循环热环境中的热老化稳定性亦需评估。

2.2 等离子体与表面能调控策略

等离子体法是指通过高能射频或低温等离子体在CCF表面进行轰击、刻蚀等操作去除其表面杂质,同时引入羧基等极性官能团,提高CCF与树脂基体的润湿性和化学键结合能力,增强界面结合力。Luo等[42]提出等离子/激光协同辅助3D打印工艺,在打印过程中利用等离子体对CCF表面进行处理,引入羟基、羧基等含氧极性基团并进行轻微刻蚀以增大表面粗糙度,提升碳纤维表面能和界面润湿性,同时通过激光对局部熔融区进行加热,改善聚合物流动性和浸润效果,在打印速度120 mm/min、层厚0.2 mm、激光功率恒定为10 W条件下打印制得CCF/PEEK构件试样并进行力学测试,结果表明:协同优化后的层间剪切强度从约5.78 MPa提升至约39.05 MPa,经过断口形貌分析表明,等离子/激光协同改性后的CCF/PEEK的3D打印构件界面剥离显著减少、纤维拔出现象明显减轻,CCF与树脂基体结合更为紧密。

Li等[43]针对熔融沉积成型制备的PEEK及CF/PEEK材料,系统研究了大气压等离子体表面处理对其胶接界面性能的影响。在一定等离子体处理条件下,结合接触角测试、表面能分析及单搭接剪切实验,对处理前后的试样进行了对比评估。结果表明,大气等离子体处理可显著引入含氧极性官能团,提高材料表面能和润湿性,从而显著改善胶黏剂对基体表面的铺展与界面结合性能。力学测试结果显示,经等离子体处理后,PEEK及CF/PEEK试样的单搭接剪切强度由2~3 MPa提升至9~12 MPa,失效模式由界面脱黏逐渐转变为混合型甚至内聚破坏,表明胶接界面由弱界面向强界面转变。该研究表明,大气等离子体处理是一种高效、低损伤的表面活化手段,可有效提升PEEK基增材制造构件的界面连接性能。

等离子体处理技术能大幅提高CCF/PEEK预浸丝及其3D打印构件的界面强度，且对纤维损伤较小，具有简便高效和绿色环保等优势，为实现高性能CCF/PEEK预浸丝的制备提供了可行途径。

3 国内外增材制造装备研究现状

CCF/PEEK预浸丝在增材制造中的成功应用，不仅依赖于材料体系与工艺参数的优化，也更需要相关配套高性能增材制造装备的支撑[44−45]，与常规熔融长丝制造(FFF)[46−48] 3D打印装备相比，此类装备必须在高温环境下稳定运行，并实现连续纤维的精确铺放与必要的压实，以应对PEEK高熔点和高黏度带来的浸渍与成型难题。近年来，国内外科研机构与企业开发了多种高性能增材制造平台，从实验室级设备到工业化系统，逐渐建立了CCF/PEEK构件增材制造成形的技术基础。

3.1 国外CCF/PEEK增材制造设备发展

国外针对CCF/PEEK预浸丝的高性能增材制造装备研发起步稍早，已形成从桌面级精密设备到大型工业化系统的多层次布局。荷兰的CEAD公司在2018年推出大尺寸龙门式连续纤维增材制造3D打印机CFAM Prime，该设备采用原位浸渍工艺实现包括PEEK在内的颗粒挤出结合连续纤维进行增强，可用于打印大尺寸、高性能复合材料部件。Fiber HT由美国Desktop Metal公司于2019年发布，是一款面向高性能复合材料的连续纤维3D打印机。该设备采用双喷头设计，结合FFF与微型自动纤维铺放技术，可在复杂几何区域实现CCF带材增强。其突出特点是能够加工高温热塑性基体，包括PEEK与PEKK基体的CCF复合丝材，从而制备出兼具高强度、耐高温与化学稳定性的结构件。卢森堡的Anisoprint公司(现总部为中国)2021年正式发布了PROM IS 500工业级连续纤维打印平台，该系统主打开放材料策略，能够支持包括PEEK、PEKK、PEI在内的多种高性能热塑性基体，可直接打印包括CCF/PEEK预浸丝在内的多款高性能CCF增强热塑性预浸丝，打印尺寸高达600 mm×420 mm×300 mm，适合航空航天及汽车领域的中大型部件制造[49]。可以看出，国外设备在连续纤维与高温热塑性树脂的增材制造融合方面形成了较完整的技术体系，既覆盖实验室级工艺探索，也支撑了工业化应用场景。

3.2 国内CCF/PEEK增材制造设备发展

与国外CCF增强热塑性复合材料增材制造装备的发展相呼应，国内近年来也迅速推出了一系列具备高温成型与连续纤维增强能力的3D打印机，用于CCF/PEEK预浸丝的成型与应用探索。苏州同异三维打印科技有限公司于2023年推出了Y600 3D打印机。该设备针对高性能工程塑料与连续纤维的协同成型需求，配置了高温喷头与封闭恒温腔体，能够实现CCF/PEEK的稳定打印。Y600在结构设计上强调精度与可靠性，适合科研实验及中小型功能件制备。深圳协同创新高科技发展有限公司于2024年发布YJ-F600 3D打印机，其硬件集成显著提升了连续纤维的进给及铺放控制性能，能够在维持稳定纤维体积分数和成形精度的同时，完成大规格构件的打印。南京长江工业技术研究院在2025年推出的CF1000设备实现了大尺寸复合材料的增材制造，推动纤维复合材料从平面堆叠工艺向空间自由成形技术的革命性进步，成功突破了层间黏结力不足的工艺瓶颈，实现了加工范围与工艺弹性的双重突破，尤其适合开展CCF/PEEK结构件的成形探索与工程实践。同时，CF500作为同系新机型，支持包括CCF/PEEK在内的连续纤维与短切纤维增强热塑性树脂材料的协同3D打印，可动态调控树脂及纤维含量，精准调整打印构件的表面成型质量。

综上所述，当前国内外在CCF增强热塑性复合材料增材制造装备方面已形成多类型、多层级的发展格局。表1总结了可用于打印CCF/PEEK预浸丝的典型增材制造设备，其在成形尺寸、喷头数量及功能特征方面各具优势，体现出国外设备在系统集成与材料开放性方面的成熟，而国内技术装备虽起步稍晚，但核心工艺难点正逐步被攻克，在高温成形、结构优化及工艺协同控制等方面取得显著进展，正加快向市

表1 用于打印CCF/PEEK预浸丝的典型增材制造设备

Tab. 1 Typical additive manufacturing equipment for printing CCF/PEEK prepreg filament

Manufacturer (Country)	Equipment model	Maximum molding size	Nozzles	Equipment features
CEAD(Netherlands)	CFAM Prime	4 000 mm×2 000 mm×1 500 mm	2	Large−format gantry build envelope; Fully enclosed printing environment
Desktop Meta (United States)	Fiber HT	310 mm×240 mm×270 mm	2	Porosity less than 1%; Dual−print−head μAFP−based system
Anisoprint (Luxembourg/China)	PROM IS 500	600 mm×420 mm×300 mm	4	Multi−nozzle interchangeable head system;open material compatibility
Suzhou TOYI(China)	Y600	600 mm×500 mm×400 mm	3	High−temperature printing system; Integrated multi−zone temperature control strategy
Shenzhen XTRI−TECH (China)	YJ−F600	600 mm×450 mm×500 mm	2	Integrated multi−zone temperature control for improved interlayer bonding and stability
Nanjing CHANGJIANG ITRI(China)	CF1000	1 000 mm×1 000 mm×1 000 mm	4	Five−axis spatial forming capability;multi−angle continuous fiber deposition
Nanjing CHANGJIANG ITRI(China)	CF500	480 mm×500 mm×480 mm	2	Synergistic printing of continuous or short fibre;dynamic control of resin/fibre content

场化与产业化应用阶段过渡,为复合材料工程化制造提供了坚实支撑。

4 CCF/PEEK预浸丝的增材制造应用

伴随CCF/PEEK预浸丝在制丝装置与浸渍工艺以及界面优化技术的渐进改良,其力学性能与机械可靠性得到持续改善,预浸丝材的逐层制造技术已跨越实验室阶段,进入工程化推广期,加速了复合材料增材制造技术在航空航天、新能源汽车、船舶工程及风电等领域的实际应用[50−52]。凭借低密度、高比强度、良好热稳定性及服役期可维护替换等特征,该类材料既能保障关键性能指标,又为构件设计提供了更多的设计自由度。

4.1 航空航天领域

在航空航天领域,凭借其高强度特性和高温耐受性等特性,CCF/PEEK预浸丝多被应用于各类航天器的次承载结构中[53],有研究显示合理控制热处理参数能大幅提高3D打印件的层间结合强度与整体性能。Werken等[54]采用热等静压方法处理3D打印后的CCF/PEEK复合试样,处理后样品的弯曲与层间剪切力学性能较对照组提高30%左右,有效抑制了层间结构缺陷的形成,该成果揭示了后处理工艺对提升打印件稳定性方面具有重要意义。Liu等[55]通过引入共形红外预热与双热压辊协同压实的旋转3D打印工艺,实现了CCF/PEEK (美国)海军军械实验室(NOL)环的高致密成形,使层间剪切强度提高约117%,揭示了热-机耦合工艺在改善界面致密性与提升复合构件层间性能方面的重要作用,为将曲面/回转承载构件应用于航空航天领域的高性能增材制造奠定了技术基础。

4.2 新能源汽车领域

在新能源汽车领域,伴随汽车智能技术持续升级,轻量化设计、长期耐用及功能整合成为零部件的核心诉求,基于CCF/PEEK的增材制造可实现电子外壳与支架结构的一体化成形,并可同步实现内部冷却流道的植入,既加固了结构又提升了热传导效率。借助增材制造技术,CCF/PEEK凭借优异的介电指标及电磁波阻隔能力,可用于生产高频雷达天线罩、精密传感器支架以及复杂线束连接器等关键器件,以实现高性能电子系统的功能需求。

4.3 船舶与海洋工程领域

在船舶与海洋工程领域,高盐高湿环境中的持久服役使船体结构材料必须满足苛刻的耐蚀性与可靠性标准。采用CCF/PEEK的增材制造工艺打破了传统方式对水动力复杂结构件的制约,实现非线性几何轮廓与特种翼型部件的制备,既能提高推进效率又可控制空泡音噪。借助优异的抗腐蚀及防海洋生物附着特性,CCF/PEEK材料可通过3D打印加工阀门、泵体、叶轮以及抗腐蚀管路接头等流体机械组件。在无人水下航行器等水下装备中采用此项技术,能大幅削减外部构件、舵板及仪器托架的重量负荷,在保证力学性能稳定的基础上,同步提高航行时长及载荷指标。

4.4 风电叶片应用领域

在风力发电领域,叶片大型化的趋势愈发显著,结构减重需求与耐疲劳性能要求形成了突出的技术矛盾,依托增材制造技术,CCF/PEEK材料可一次性完成叶片及其内部筋条、扰流板的成型,借助拓扑优化实现叶片的耐疲劳性能提升与整体结构减重[56]。Fang等[57]提出采用多轴优化算法的3D打印策略,实现碳纤维沿主应力方向的连续排布优化。实验结果表明,该工艺使结构失效荷载提升644%,刚度增强约240%,体现了该方案在叶片局部补强与轻量化设计中的显著优势。伴随生产技术日趋成熟及复合材料增材制造相关标准的建立完善,CCF/PEEK结合增材制造技术可有效推动叶片结构优化与工装制造技术进步,为风电设备性能提升与高效生产开辟可行路径。

5 结语与展望

作为高性能增材制造原材料,CCF/PEEK预浸丝体现出优异的综合特性,在力学强度、耐热性与轻量化方面体现出明显的协同优势,现有的研究在预浸丝制备工艺、纤维-基体界面调控策略以及增材制造装备开发等方面实现了关键进展,有效深化了对纤维分布规律、孔隙演化机制及力学性能增强机理的认知。较之短切纤维或长纤维的复合材料而言,CCF/PEEK预浸丝可实现载荷的有效传递,还支持对复杂结构实施灵活设计,为航空级复合材料同先进3D打印技术的深度融合提供了可行途径。然而现阶段该领域的研究依旧未实现系统性整合:预浸丝制备工艺、微观结构优化与打印性能评价之间依旧缺少有效联动。尽管在提升力学性能以及验证功能样件方面已获显著成效,但工艺参数体系、界面结合质量控制以及结构设计标准的规范化工作正处于起步状态,CCF/PEEK预浸丝迫切要在技术层面达成进一步的突破,同时急需材料科学、加工工程及应用技术等多学科开展协同创新。着眼未来CCF/PEEK预浸丝制备及其3D打印应用,需系统考量下述路径的可行性及技术壁垒:

(1)针对PEEK树脂高黏度导致纤维浸润不足与孔隙控制困难的问题,协同开发先进制丝工艺与先进界面改性技术,联动优化预浸丝质量,制备更低纤维损伤、纤维体积分数更可控、不同预浸丝形态的可打印CCF/PEEK材料。

(2)针对目前增材制造装备仍受能量场与压实力耦合不足、层间融合不均与热管理困难的制约问题,对CCF/PEEK用增材制造装备进行升级改造,推出打印速度更快、打印尺寸更大、打印精度更高、打印力学性能更优、打印自由度更灵活的新型装备。

(3)针对当前缺乏统一的质量评价体系与多尺度性能预测手段的问题,构建CCF/PEEK预浸丝基于不同直径(圆形)、不同形状,不同纤维体积分数的多维质量评价体系,开发预浸丝从单独纤维与单独树脂、预浸丝、熔道、打印层直至打印构件的渐进损伤评估模型。

(4)针对CCF/PEEK制备与打印过程中多参数耦合、工艺窗口窄及过程稳定性差的问题,发展基于数据驱动的工艺优

化与智能控制技术，通过引入机器学习构建智能模型，结合实时在线监测手段，为CCF/PEEK预浸丝制备与打印质量的实时控制和智能优化提供支撑。

参 考 文 献

[1] BAGHERI S，et al. Composites Part B: Engineering，2024，278. DOI:10.1016/j.compositesb.2024.111443.

[2] SACKS G，et al. Biomedical Technology，2024，6:75–89.

[3] TELTSCHIK J，et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing，2024，184. DOI: 10.1016/j. compositesa. 2024. 108236.

[4] DALLAL S，et al. Polymers，2025，17(14). DOI: 10.3390/polym. 17141968.

[5] LUO M，et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing，2019，121:130–138.

[6] KÖNIG S，et al. Macromolecular Materials and Engineering，2021，306(12). DOI:10.1002/mame.202100484.

[7] YE M X，et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing，2025，196. DOI:10.1016/j.compositesa.2025.108964.

[8] WANG P，et al. Coatings，2022，12(6). DOI: 10.3390/coatings12060827.

[9] SCHLOTHAUER A，et al. Composites Part B: Engineering，2023. 261. DOI:10.1016/j.compositesb.2023.110764.

[10] CHEN Y W，et al. Composite Structures，2022，281. DOI:10.1016/j.compstruct.2021.114975.

[11] BALAKUMARAN V，et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing，2023，165. DOI: 10.1016/j. compositesa. 2022.107314.

[12] ZHANG B N，et al. Virtual and Physical Prototyping，2025，20(1). DOI:10.1080/17452759.2025.2509612.

[13] RASHVAND K，et al. Additive Manufacturing，2024，80. DOI: 10.1016/j.addma.2024.103975.

[14] WANG Y，et al. Polymers，2024，16(7). DOI: 10.3390/polym. 16070897.

[15] ZHU K L，et al. Fibers and Polymers，2019，20(4):839–846.

[16] YU X，et al. Composites Part B: Engineering，2025，297. DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.112213.

[17] LU C R，et al. ACS Applied Materials & Interfaces，2019，11(34): 31 520–31 531.

[18] ZHANG J M，et al. Additive Manufacturing，2023，73. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103680.

[19] VALENTE M，et al. Polymers，2023，15(1). DOI: 10.3390/polym. 15010242.

[20] ZHU W J，et al. Journal of Manufacturing Processes，2024，131: 1 928–1 941.

[21] 李兴乐. PEEK基碳纤维预浸丝束成型工艺研究[D]. 郑州：河南工业大学，2023.
LI Xingle. Research on PEEK-based carbon fiber prepreg tow forming process[D]. Zhengzhou:Henan University of Technology，2023.

[22] WANG X C，et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing，2025，199. DOI:10.1016/j.compositesa.2025.109259.

[23] MATSUZAKI R，et al. Scientific Reports，2016，6(1). DOI: 10.1038/srep23058.

[24] ZHI Q，et al. Composites Communications，2023，44. DOI: 10.1016/j.coco.2023.101726.

[25] 陈意伟，等. 工程塑料应用，2022，50(5):61–67.
CHEN Yiwei，et al. Engineering Plastics Application，2022，50(5): 61–67.

[26] VATANDAŞ B B，et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing，2023，167. DOI: 10.1016/j. compositesa. 2023. 107434.

[27] 陆士强，等. CN202011546384.9[P]. 2022-09-16.
LU Shiqiang，et al. CN202011546384.9[P]. 2022-09-16.

[28] 周子彦，等. 复合材料学报，2023，40(9):5 070–5 084.
ZHOU Ziyan，et al. Acta Materiae Compositae Sinica，2023，40 (9):5 070–5 084.

[29] NARDIELLO J A，et al. US 10173410B2[P]. 2019-01-08.

[30] HUTTUNEN M，et al. EP 3740373B1[P]. 2022-06-29.

[31] PHILIP A A. Development of a large-scale continuous carbon fiber composite additive manufacturing system based on fused granular fabrication[D]. Edmonton:University of Alberta，2024.

[32] WAN T Y，et al. Fibers and Polymers，2022，23(6):1 672–1 683.

[33] 王显峰，等. CN 110576531A[P]. 2019-12-17.
WANG Xianfeng，et al. CN 110576531A[P]. 2019-12-17.

[34] ZHANG J H，et al. Materials，2023，16(3). DOI: 10.3390/ma. 16031168.

[35] QIAO J，et al. Additive Manufacturing，2019，30. DOI: 10.1016/j. addma.2019.100926.

[36] LIU H S，et al. Polymer Composites，2021，42(2):931–943.

[37] QIAO L，et al. Materials Research Express，2021，8(4). DOI: 10.1088/2053–1591/abf6f9.

[38] SUN M C，et al. Materials，2024，17(12). DOI: 10.3390/ma. 17122899.

[39] 邢宇，等. 材料工程，2022，50(8):70–81.
XING Yu，et al. Journal of Materials Engineering，2022，50(8): 70–81.

[40] YU X，et al. Polymer Composites，2025，46(9):7 993–8 014.

[41] QIN Y J，et al. Journal of Materials Research and Technology，2022，20:4 608–4 623.

[42] LUO M，et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing，2020，131. DOI:10.1016/j.compositesa.2020.105812.

[43] LI W J，et al. International Journal of Adhesion and Adhesives，2020，100. DOI:10.1016/j.ijadhadh.2020.102614.

[44] 单忠德，等. 中国机械工程，2020，31(2):221–226.
SHAN Zhongde，et al. China Mechanical Engineering，2020，31 (2):221–226.

[45] MAQSOOD N，et al. Advanced Composites and Hybrid Materials，2024，7(6). DOI:10.1007/s42114–024–01035-w.

[46] PERTUZ A D，et al. International Journal of Fatigue，2020，130. DOI:10.1016/j.ijfatigue.2019.105275.

(下转第206页)