

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.03.021

基于FDM的碳纤维增强聚醚醚酮复合材料低温试验及失效机理

崔梦洋^{1,2}, 茅健^{1,2,3}

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2. 机械工业大型复杂构件智能制造技术重点实验室, 上海 201620;

3. 上海交通大学四川研究院, 成都 610213)

摘要: 为研究碳纤维(CF)增强聚醚醚酮(PEEK)复合材料在低温环境下的失效机理, 通过熔融沉积成型(FDM)技术制备了CF质量分数为10%的CF/PEEK复合材料试样。设计了5种温度梯度(25, -25, -75, -125, -175 °C)下的低温拉伸试验, 利用扫描电子显微镜(SEM)对试样断面形貌进行表征, 分析了复合材料在不同温度下的力学性能、失效模式及界面性能变化。结果表明, 随温度降低, CF/PEEK复合材料的拉伸强度持续下降, 在-175 °C时达到最低值12.83 MPa, 较室温(81.93 MPa)降低了84.3%; 而拉伸弹性模量呈现先减小后增大的趋势, 在-75 °C时最小为6.8 GPa, -175 °C时升至最大值7.8 GPa。SEM观察表明, 低温环境下复合材料的失效机制包括纤维脆性断裂、基体脆性断裂、纤维-基体界面脱黏及层间分层。其中, -175 °C时层间空隙显著增大, 表明复合材料界面结合性能严重衰退。PEEK与CF热膨胀系数差异导致界面区域热应力集中, 加剧了低温下的界面脱黏; 同时, 低温抑制了分子链运动, 虽增强了基体刚性, 但限制了塑性变形能力, 最终引发脆性断裂。上述结果揭示了CF/PEEK复合材料在低温下的多尺度失效机制, 为该复合材料的极端环境应用提供了借鉴。

关键词: 熔融沉积成型; 碳纤维增强聚醚醚酮; 低温; 失效机理; 力学性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)03-0153-07

Low temperature experiment and failure mechanism of carbon fiber reinforced PEEK composites based on FDM

CUI Mengyang^{1,2}, MAO Jian^{1,2,3}

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Technology for Large Complex Thin-Walled Components of Aviation in Machinery Industry, Shanghai 201620, China; 3. Shanghai Jiao Tong University Sichuan Research Institute, Chengdu 610213, China)

Abstract : To investigate the failure mechanisms of carbon fiber (CF) reinforced polyetheretherketone (PEEK) composites under low-temperature environments, CF/PEEK composite specimens with a carbon fiber mass fraction of 10% were fabricated using fused deposition modeling (FDM) technology. A series of low-temperature tensile tests were conducted under five temperature gradients, including 25, -25, -75, -125, -175 °C, and scanning electron microscopy (SEM) was used for characterizing the fracture morphology of the specimens. Then the mechanical properties, failure modes, and interfacial performance change of the composites were analyzed at different temperatures. The results reveal that the tensile strength of CF/PEEK composite decreases continuously with decreasing temperature, reaching a minimum of 12.83 MPa at -175 °C, which represents an 84.3% reduction compared to the room-temperature value (81.93 MPa). In contrast, the tensile modulus exhibits a trend of initial decrease followed by increase, with a minimum value of 6.8 GPa at -75 °C and a maximum of 7.8 GPa at -175 °C. SEM observations indicate that the failure mechanisms of the composites under low-temperature conditions include brittle fracture of fibers, brittle fracture of the matrix, fiber-matrix

基金项目: 四川省自然科学基金项目(2023NSFSC0366)

通信作者: 茅健, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为碳纤维复材增材制造等

收稿日期: 2025-01-22

引用格式: 崔梦洋, 茅健. 基于FDM的碳纤维增强聚醚醚酮复合材料低温试验及失效机理[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(3): 153-159.

CUI Mengyang, MAO Jian. Low temperature experiment and failure mechanism of carbon fiber reinforced PEEK composites based on FDM [J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(3): 153-159.

interfacial debonding, and interlaminar delamination. Notably, at $-175\text{ }^{\circ}\text{C}$, the interlaminar gaps become significantly larger, suggesting a severe degradation of interfacial bonding performance of the composite. The mismatch in coefficients of thermal expansion between PEEK and CF can lead to thermal stress concentration at the interface, exacerbating interfacial debonding under low-temperature conditions. Furthermore, the suppression of molecular chain mobility at low temperatures increases matrix rigidity but limits the plastic deformation capability, ultimately leading to brittle fracture. The above results elucidate the multiscale failure mechanisms of CF/PEEK composites under low-temperature conditions, providing reference for their application in extreme environments.

Keywords : fused deposition modeling ; carbon fiber reinforced polyetheretherketone ; low temperature ; failure mechanism ; mechanical property

熔融沉积成型(FDM)是增材制造(又称3D打印)技术中最常使用的打印技术之一,FDM技术通过将熔融的材料逐层沉积来构建三维物体,这种逐层构建的方式使得在制造过程中可以灵活调整材料组分和打印参数,为实现高性能复合材料的定制化和优化提供了可能^[1-3]。

聚醚醚酮(PEEK)作为一种半结晶型高性能热塑性聚合物,以其优异的力学性能、耐高温性和化学稳定性在航空航天、医疗器械和能源领域得到了广泛应用^[4-7]。PEEK在极端环境的优良性能使其成为传统金属材料的理想替代品^[8]。然而,随着应用场景的复杂化,对材料在低温条件下的力学性能提出了更高的要求。低温环境会改变材料的微观结构和力学行为^[9-11]。例如,聚合物基体的分子运动在低温下减弱,导致材料表现出更高的刚性和脆性^[12-13]。而通过引入增强相,如碳纤维(CF)、碳纳米管或石墨烯,可进一步改善材料的综合力学性能^[14-16],使其在低温条件下表现出更高的适应性。将PEEK与CF复合,旨在通过CF的增强作用,进一步提升PEEK的整体刚性和强度^[17],同时改善PEEK在极端环境下的稳定性和耐久性,从而拓宽其应用范围。然而,复合材料在极端温度下的微观结构可能发生变化,低温可能导致材料的脆性增加、韧性降低^[18-22],从而影响其实际应用中的可靠性和安全性。因此,研究复合材料在低温下的力学性能以及相应的失效机制对于评估其在低温环境中的应用潜力具有重要意义。

笔者利用FDM技术,以PEEK为基体,CF作为增强纤维,制备了CF/PEEK复合材料试样,研究了不同低温下CF/PEEK复合材料的拉伸断裂行为并分析了其失效机理。

1 3D打印工艺原理与平台搭建

基于FDM的3D打印工艺,首先将设计的三维

CAD实体模型离散化,按几何形状变化分成一定厚度的薄层,得到截面轮廓和填充轨迹。FDM的控制系统将丝状的热塑性材料加热至熔融状态。在计算机的控制下,打印喷头根据截面轮廓和填充轨迹信息,将熔融的材料选择性地挤出并沉积在工作台上。材料在挤出后迅速冷却并固化,形成一层截面。这一过程会不断重复,逐层沉积,直至整个实体模型造型完成。

为确保稳定性、刚性和精度,笔者使用的3D打印设备为本课题组自主搭建,如图1所示。该设备主要用于打印CF增强复合材料,同时也可以打印纯聚合物材料。采用多轴运动控制系统控制设备的运动及信号的输出/采集,包括SMC-606运动控制卡、温控仪、驱动板及步进电机、温度传感器、限位开关等,实现X,Y,Z轴运动控制、线材切断控制、温度检测反馈等功能。该设备采用国标4040铝型材搭建主要框架结构,并采用加固设计以防止结构出现微晃动。为确保运动精度,X方向采用高精度线性导轨,Y/Z两个方向运动全部采用高精度滚珠丝杆进行控制,并采用大直径光轴和高精度直线轴承,装到锁紧基座上运动导向,总体装备质量200 kg,结构稳定可靠。

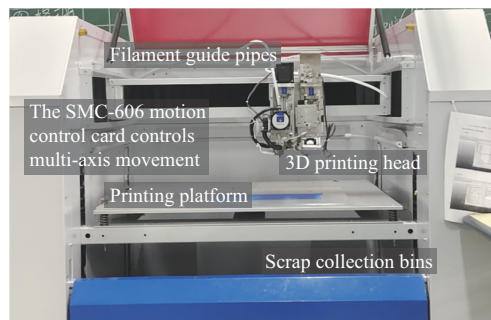


图1 CF增强复合材料3D打印实验平台

Fig. 1 Carbon fiber (CF) reinforced composite 3D printing experimental platform

1.1 主要原材料

CF:50K,平均直径 $7\ \mu\text{m}$,无锡智上新材料科技有限公司;

PEEK:ESD101,英国威格斯公司。

1.2 主要仪器及设备

CF复合材料FDM打印机:自主搭建;

电子材料拉力机:Z100TEW-100kN,德国Zwick公司;

溅射镀膜仪:Quorum SC7620,英国Quorum公司;

扫描电子显微镜(SEM):Hitachi Regulus 8100,日本日立公司。

1.3 试样制备

图2为CF/PEEK复合材料试样的制备过程。为避免复合后的纤维在高温熔体内黏度过大,确定CF的质量分数为10%,此外CF含量较低亦有助于打印喷头顺利挤出^[23]。将干燥好的CF和PEEK颗粒按照指定比例通过高温双螺杆挤出机进行熔融复合,确保PEEK完全熔融,利用螺杆剪切力切断CF,使其均匀分散在PEEK基体中,熔融态的复合材料挤出再冷却后进行收卷缠绕。将制备好的线材干燥后装入自主搭建的CF复合材料FDM打印机的加料系统,并逐步加热至 $400\ ^\circ\text{C}$,使线材完全熔融,熔融态的CF/PEEK通过打印机的打印喷头,按照设置的打印参数制备试样。打印过程详细工艺参数见表1。

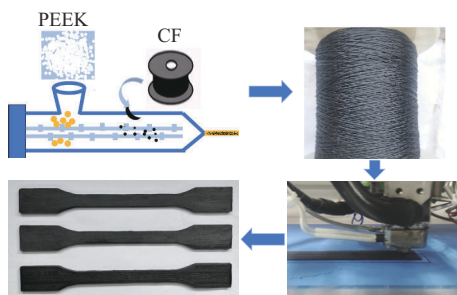


图2 CF/PEEK复合材料试样制备过程

Fig. 2 Preparation process of CF/PEEK composite specimen

表1 打印工艺参数配置

Tab. 1 Printing process parameters configuration

Process parameters	Value
Nozzle temperature / $^\circ\text{C}$	400
Platform temperature / $^\circ\text{C}$	90
Layer thickness /mm	0.2
Printing width/mm	0.4
Printing speed /(mm $\cdot\text{s}^{-1}$)	40

1.4 测试与表征

按照ISO 527-2:2012对试样进行拉伸试验,以 $0.2\ \text{mm/min}$ 的速率缓慢施加拉伸载荷,测量材料的低温拉伸性能,每组温度测试5个试样。

通过将固定在夹具上的试样浸入充有液氮的低温恒温器中以实现低温条件,如图3所示。在低温拉伸试验之前,将整个试样在液氮环境中浸泡10 min以上以达到热平衡条件。

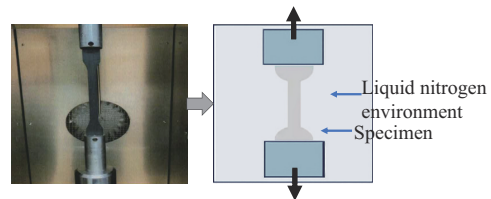


图3 拉伸试验的低温试验系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a low-temperature testing system for tensile testing

使用溅射镀膜仪对试样拉伸断面喷金45 s,喷金时的电流为10 mA,再使用SEM观察试样的断面微观形貌。

2 结果与讨论

2.1 力学性能

CF/PEEK复合材料在室温($25\ ^\circ\text{C}$)和低温下的应力-应变曲线如图4所示。可以看出,所有温度下曲线均无屈服,呈现出近似线性的应力-应变关系,表明复合材料脆性断裂行为的实质。复合材料在室温下的拉伸强度最大,达到 $81.93\ \text{MPa}$,随着测试温度不断降低,复合材料的应力-应变曲线斜率和最大载荷均降低,原因是低温对材料内部微观结构的影响。而当温度降至 $-25\ ^\circ\text{C}$ 时,复合材料拉伸强度略降至 $76.63\ \text{MPa}$,当温度进一步降至 $-75\ ^\circ\text{C}$ 时,拉伸强度降低至 $63.23\ \text{MPa}$,降幅达18%。在 $-175\ ^\circ\text{C}$

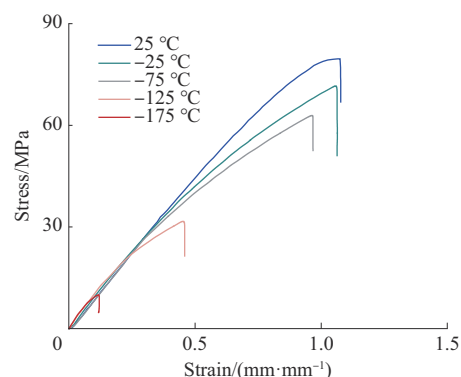


图4 5种温度下CF/PEEK复合材料试样的拉伸应力-应变曲线

Fig. 4 Tensile stress-strain curves of CF/PEEK composite specimens at five temperatures

时,拉伸强度最小仅为12.83 MPa,相比25 °C时降低了84.3%。

5种温度下CF/PEEK复合材料的拉伸弹性模量如图5所示。复合材料的拉伸弹性模量随着温度的降低先小幅减小后增大,在-125 °C和-175 °C时,拉伸弹性模量相对室温都略有增大,从室温下的7.1 GPa分别升高至7.3 GPa和7.8 GPa,而当温度为-75 °C时,拉伸弹性模量最小为6.8 GPa。

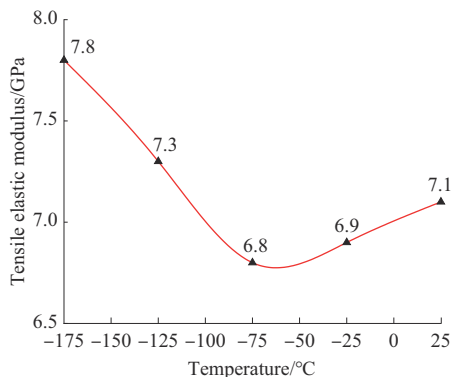


图5 5种温度下CF/PEEK复合材料试样的拉伸弹性模量
Fig. 5 Tensile elastic modulus of CF/PEEK composite specimens at five temperatures

2.2 纤维形态

室温下CF/PEEK复合材料试样断面的SEM照片如图6所示,图6显示拉伸断面上有较少的CF拔出,纤维发生脆性断裂。

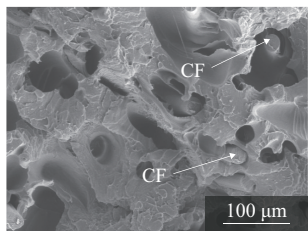


图6 室温下CF/PEEK复合材料试样断面纤维形态
Fig. 6 Fracture fiber morphology of CF/PEEK composite specimens at room temperature

低温环境下CF/PEEK复合材料试样断面的SEM照片如图7所示。随着温度的降低,断面上的纤维数量略有增加(如图7a~图7d所示),意味着纤维与基体之间的界面结合强度相对较低。纤维是复合材料中主要承受载荷的组分,当纤维从基体中拔出时,它们无法有效地传递载荷,从而导致复合材料的拉伸强度下降。从图7a和图7b能观察到拔出的纤维与基体界面处存在明显孔隙,但低温下拔出的纤维长度与室温相比无太大差别,在纤维表面上可以观察到部分的PEEK基体(图7c和图7d)。

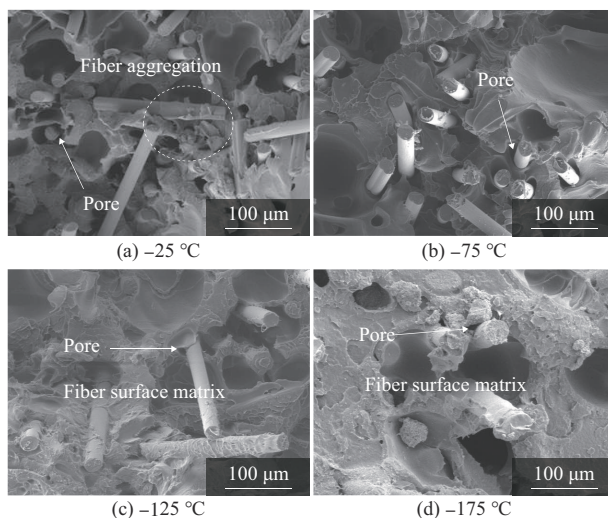


图7 低温环境下CF/PEEK复合材料试样断面纤维形态
Fig. 7 Fracture fiber morphology of CF/PEEK composite specimens in low temperature environment

由于CF在PEEK基体中的分布是无序的,裂纹前端CF的取向和长度不一,在相同应力作用下将以不同的形式发生断裂,因此能观察到形态各异的纤维形态。此外,在-125 °C下于CF/PEEK断面中观察到纤维聚集缺陷(图7a),这可能导致拉伸过程中裂纹快速扩展。

2.3 断面形貌

2.3.1 基体-纤维界面形貌

低温下载荷主要由基体和基体-纤维界面承担。裂纹沿着基体撕裂或基体-纤维界面扩展,导致纤维裸露,而在断面上的纤维上没有附着基体碎片。在图7中,检测到纤维和树脂基体之间的孔隙(图7中箭头所示),这表明组分之间存在不良黏附现象。这种现象可以通过以下机制来解释:温度降低会导致聚合物基体的热运动减弱,从而降低了基体分子链与CF表面之间的物理吸附作用,同时基体材料的力学性能(如弹性模量和黏弹性行为)也会发生显著变化。这些变化共同导致了CF与PEEK之间的界面作用力显著降低,进而降低了应力传递效率,使得低温下复合材料的界面结合性显著变差。在断裂过程中,纤维-基体界面附近的孔隙可能作为应力集中区域,进而引发二次裂纹的产生,加速了材料的失效过程^[24]。

通过图6发现,室温下纤维与基体界面结合相对致密,界面孔隙显著少于低温条件。这一现象可能与FDM工艺中高温挤出(400 °C)后逐层冷却的固化过程有关:高温熔融态PEEK基体在冷却收缩过

程中对纤维形成有效包覆^[25],而室温环境下材料已处于热平衡状态,界面热应力较小。

2.3.2 层间形貌

PEEK基体的失效是脆性的,断面总体上显得粗糙且基体碎片之间不黏附。图8为5种温度下CF/PEEK复合材料试样断面层间形貌。通过对比图8a~图8e,可以清晰地看出,温度在25℃和-25℃及-75℃时,CF/PEEK试样的层间缝隙均小于后两组,室温中CF/PEEK试样层间缝隙较小,而在-175℃时,超低温环境增加了材料的脆性断裂程度,低温作用导致相邻长丝之间的分子扩散较弱,使得CF/PEEK的断裂界面上存在较大的层间缝隙,如图8e所示。

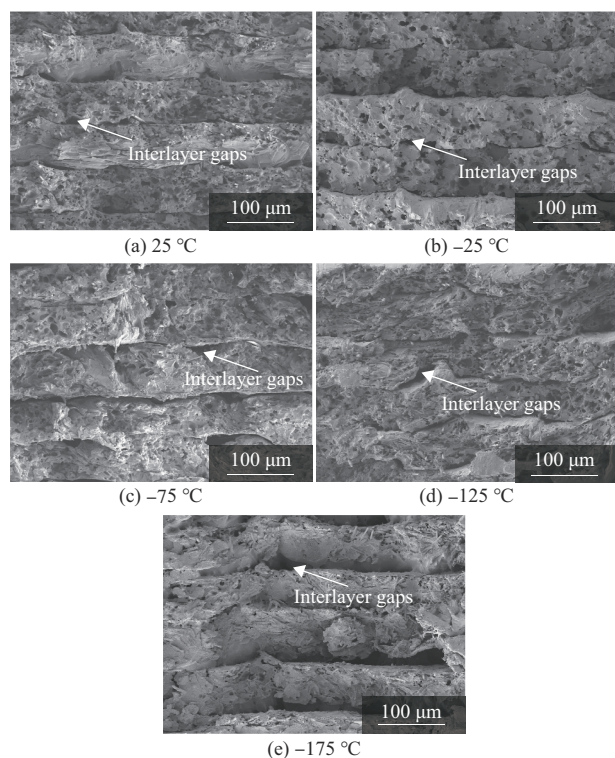


图8 5种温度下CF/PEEK复合材料试样断面层间形貌

Fig. 8 Interlaminar morphology of fracture of CF/PEEK composite specimens at five temperatures

3 失效机理分析

3.1 微观力学层面

低温环境处理会使CF/PEEK复合材料的内部结构发生变化,进一步对CF/PEEK复合材料的力学性能产生影响。随着温度的降低,CF/PEEK复合材料的拉伸弹性模量变化不大甚至稍有增加。在温度逐渐降低的过程中,分子链的运动减缓,导致氢键的稳定性增强,分子链开始趋向于更加有序地排列。这种有序的排列使得材料在受到外力作用时,

聚合物分子链之间的相互作用更加紧密,从而提高了材料的刚性。然而,氢键强度的增加也限制了分子链的滑移能力,使基体在受载时难以通过塑性变形分散能量,最终表现为脆性断裂。如图4和图5所示,在温度降低的初期,分子链还未完全冻结,其运动仍然存在一定的自由度,这可能导致材料的拉伸弹性模量略有减小。随着温度的进一步降低,聚合物分子链的运动几乎停滞,材料内部的分子结构变得更加稳定,分子链之间的相互作用力增强,从而提高了材料的拉伸弹性模量。但低温也会导致基体分子链与CF的界面结合变差,在图7d中,-175℃下拔出的CF上附着的基体量更少,表现出CF的界面附着力更差。

此外,推测在实验过程中,将CF/PEEK试样从室温直接浸泡在低温环境中,可能会对试样产生大幅的热冲击,进而导致CF/PEEK试样产生残余应力,使内部裂纹产生和扩展。残余应力在聚合物发生不可逆变形之前逐渐累积达到最大强度,进而导致裂纹快速扩展和脆性断裂。尽管实验未直接测量韧性参数,但低温下PEEK基体的脆性断裂及层间脱黏现象(如图8e)表明,材料在低温环境中可能因脆性增强而导致韧性下降。

3.2 宏观力学层面

PEEK作为一种高分子材料,在低温下也会表现出一定的热收缩性,其热膨胀系数在 $1.5 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 和 $2.2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 之间,随着温度降低,热膨胀系数也会逐渐减小。在常温下,CF的热膨胀系数约为 $1.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,较低的热膨胀系数意味着CF在温度变化时尺寸变化较小。在温度降低初步阶段,CF和PEEK的热膨胀系数差异较大导致热应力增加,使得复合材料的内部结构发生微小变化(如微裂纹的产生或扩展),从而导致拉伸弹性模量减小。随着温度降至极低温,PEEK的热膨胀系数逐渐降低,与CF的热膨胀系数差异减小,热应力得到一定程度的释放和平衡,使得拉伸弹性模量增加。此外,低温会加剧材料界面热应力集中^[24],进一步解释了收缩率差异与层间缺陷的耦合效应,并且经FDM打印后,在逐层冷却过程中,每层材料的收缩行为差异会在层间形成残余应力,叠加低温环境下的收缩现象,最终导致宏观层间缝隙的显著增大。

4 结论

在CF质量分数为10%的条件下,研究低温环

境对CF/PEEK复合材料试样力学性能和失效机理的影响,揭示其低温失效机制。结果表明不同环境温度对试样失效行为影响不一,主要结论如下。

(1)采用FDM制备了CF/PEEK复合材料试样,力学性能分析表明,复合材料的拉伸强度随着温度的降低不断下降,当温度降低至 $-175\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,拉伸强度达到最小值 12.83 MPa ,拉伸弹性模量相比室温略有增加,从室温下的 7.1 GPa 上升至 7.8 GPa 。

(2)利用SEM观察CF/PEEK复合试样拉伸断面微观形貌,复合材料在低温下失效模式表现为纤维拉拔损伤、纤维的断裂伴随纤维聚集缺陷、基体的脆性断裂、纤维与基体之间的界面脱黏低温诱导材料内部裂纹扩展和应力集中效应。

(3)随着环境温度降低,一方面拔出纤维表面附着部分基体,另一方面相邻长丝之间的分子扩散较弱,使得在较低温度下CF/PEEK的断裂界面上存在比室温较大的层间缝隙,导致纤维与基体之间的界面结合力减弱。此外,PEEK和CF热膨胀系数差异使材料内部产生热应力,从而导致拉伸弹性模量的变化。

本研究兼顾实验可行性与成本效率,聚焦于低温环境下FDM CF/PEEK复合材料的拉伸性能及失效机理,揭示了界面脱黏、层间分层与热应力作用的耦合效应。然而,材料在实际应用中可能承受更复杂的载荷形式(如冲击、弯曲及疲劳载荷),因此亟需拓展多维力学性能测试以全面评估该类复合材料的低温适应性。

参考文献

- [1] WANG P, ZOU B, DING S L, et al. Preparation of short CF/GF reinforced PEEK composite filaments and their comprehensive properties evaluation for FDM-3D printing[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 198. DOI:10.1016/j.compositesb.2020.108175.
- [2] ZHANG Y N, XU F J, ZHANG C Y, et al. Tensile and interfacial properties of polyacrylonitrile-based carbon fiber after different cryogenic treated condition[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 99:358–365.
- [3] 田国强, 吴凯, 高森森, 等. FDM工艺参数对CF/PETG制件尺寸精度的影响[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(8):104–109, 116.
TIAN Guoqiang, WU Kai, GAO Sensen, et al. Effect of FDM process parameters on dimensional accuracy of CF/PETG parts[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(8):104–109, 116.
- [4] SUN Z, LIU Q X, LIU F, et al. Influences of cryo-thermal cycling on the tensile properties of short carbon fiber/polyetherimide composites[J]. *Composite Structures*, 2024, 344. DOI: 10.1016/j.compstruct.2024.118336.
- [5] LI F, HUA Y, QU C B, et al. Greatly enhanced cryogenic mechanical properties of short carbon fiber/polyethersulfone composites by graphene oxide coating[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 89:47–55.
- [6] 李伟, 杨颜志, 王勇. 低温环境下PEEK/CF复合材料结构和性能研究进展[J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(2):160–163.
LI Wei, YANG Yanzhi, WANG Yong. Research progress on structure and properties of PEEK/CF composite in cryogenic temperature[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(2):160–163.
- [7] WU Z X, LI J W, HUANG C J, et al. Effect of matrix modification on interlaminar shear strength of glass fibre reinforced epoxy composites at cryogenic temperature[J]. *Physics Procedia*, 2015, 67: 1 068–1 073.
- [8] MELCHER R J, JOHNSON W S. Mode I fracture toughness of an adhesively bonded composite – composite joint in a cryogenic environment[J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67(3-4): 501–506.
- [9] ICTEN B M, ATAS C, AKTAS M, et al. Low temperature effect on impact response of quasi-isotropic glass/epoxy laminated plates[J]. *Composite Structures*, 2009, 91(3):318–323.
- [10] 吴英哲, 赵钦宇, 甘智华, 等. 材料低温力学性能测试技术研究进展[J]. *低温工程*, 2021(5):18–27.
WU Yingzhe, ZHAO Qinyu, GAN Zhihua, et al. Advances in mechanical property testing at cryogenic temperature[J]. *Cryogenics*, 2021(5):18–27.
- [11] 周俊键, 张学习, 钱明芳, 等. 常见结构材料低温性能研究进展[J]. *航空材料学报*, 2024, 44(2):72–86.
ZHOU Junjian, ZHANG Xuexi, QIAN Mingfang, et al. Research progress on low-temperature properties of common structural materials[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2024, 44(2):72–86.
- [12] HUNG P Y, LAU K T, QIAO K, et al. Property enhancement of CFRP composites with different graphene oxide employment methods at a cryogenic temperature[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 120:56–63.
- [13] GAITANELIS D, WORRALL C, KAZILAS M. Influence of rapid high-temperature processing on the interface of CF/PEEK, a quick and effective method for enhancing the IFSS[J]. *Composites Science and Technology*, 2024, 251. DOI:10.1016/j.compscitech.2024.110564.
- [14] ZHANG S X, TANG H B, TANG D N, et al. Effect of fabrication process on the microstructure and mechanical performance of carbon fiber reinforced PEEK composites via selective laser sintering[J]. *Composites Science and Technology*, 2024, 246. DOI: 10.1016/j.compscitech.2023.110396.
- [15] LIU K, ZHANG J, LI J M, et al. Experiment study of surface formation mechanism during cryogenic turning of PEEK[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 104:322–333.
- [16] XU Z Y, ZOU B, DING S L, et al. Study on the hot isostatic press-

- ing post-treatment of FDM-3D printed continuous carbon fiber reinforced composites[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 104:205–217.
- [17] LIU J J, WANG L Q, HE Y Q, et al. Experimental study of notched tensile strength of large open-hole carbon fiber reinforced polymer laminates at low temperature[J]. *Composites Communications*, 2023, 39. DOI:10.1016/j.coco.2023.101546.
- [18] HUNT M, SALMON K, HANEY J, et al. Ultimate tensile strengths of 3D printed carbon-fiber reinforced thermoplastics in liquid nitrogen[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 755(1). DOI: 10.1088/1757-899X/755/1/012118.
- [19] CHEN Y, MAO J, QIAN B, et al. Progress in surface modification preparation, interface characterization and properties of continuous carbon fiber reinforced polymer matrix composites[J]. *Composite Interfaces*, 2024, 31(6):729–758.
- [20] 刘晓军,单忠德,刘检华,等.连续纤维增强PEEK复合材料3D打印精度研究[J/OL]. *机械工程学报*, 2024: 1–15[2025-01-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20241219.1427.066.html>.
- LIU Xiaojun, SHAN Zhongde, LIU Jianhua, et al. Research on 3D printing accuracy of continuous fiber reinforced PEEK composite[J/OL]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024: 1–15[2025-01-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20241219.1427.066.html>.
- [21] DUTTA P K, HUI D. Low-temperature and freeze-thaw durability of thick composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 1996, 27(3-4):371–379.
- [22] 关博文,张代军,王成博,等.基于FDM的连续纤维增强复合材料3D打印技术研究进展[J/OL]. *复合材料科学与工程*, 2024: 1–10[2025-01-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1683.TU.20241218.1647.004.html>.
- GUAN Bowen, ZHANG Daijun, WANG Chengbo, et al. Research progress on 3D printing technology of continuous fiber reinforced composites based on FDM [J/OL]. *Composites Science and Engineering*, 2024: 1–10[2025-01-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1683.TU.20241218.1647.004.html>.
- [23] KWON D J, WANG Z J, CHOI J Y, et al. Interfacial evaluation of carbon fiber/epoxy composites using electrical resistance measurements at room and a cryogenic temperature[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 72:160–166.
- [24] NIKONOVICH M, RAMALHO A, EMAMI N. Effect of cryogenic aging and test-environment on the tribological and mechanical properties of PEEK composites[J]. *Tribology International*, 2024, 194. DOI:10.1016/j.triboint.2024.109554.
- [25] YAO S S, JIN F L, RHEE K Y, et al. Recent advances in carbon-fiber-reinforced thermoplastic composites: A review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 142:241–250.
- the warping deformation of mid-frame plastic components based on BP-SSA neural network model[J]. *China Plastics Industry*, 2024, 52(7):97–104.
- [14] 周纪委,王明伟,张文超,等.基于响应面法和灰色关联分析的汽车雾灯灯罩注塑工艺多目标优化[J]. *塑料*, 2023, 52(6):122–129.
- ZHOU Jiwei, WANG Mingwei, ZHANG Wenchao, et al. Multi-objective optimization of automotive fog lampshade injection molding process based on response surface method and grey correlation analysis[J]. *Plastics*, 2023, 52(6):122–129.
- [15] 薛庆红,苗盈,薛兹键,等.基于熵权TOPSIS法的注塑工艺参数多目标优化[J]. *塑料*, 2023, 52(6):142–146.
- XUE Qinghong, MIAO Ying, XUE Zijian, et al. Multi-objective optimization of injection molding process parameters based on entropy-weight TOPSIS method[J]. *Plastics*, 2023, 52(6):142–146.

(上接第132页)

- [11] 娄艳华,周建华.基于正交试验的高性能排水管注塑成型工艺优化[J]. *塑料科技*, 2024, 52(11):136–139.
- LOU Yanhua, ZHOU Jianhua. Optimization of injection molding process for high-performance drainage pipe based on orthogonal test[J]. *Plastics Science and Technology*, 2024, 52(11):136–139.
- [12] 黄关山,王新艳.基于DOE设计及MOPSO算法的汽车滤清器外壳多目标优化分析[J]. *塑料科技*, 2024, 52(8):105–108.
- HUANG Guanshan, WANG Xinyan. Multi-objective optimization analysis of automotive filter shell based on DOE design and MOPSO algorithm[J]. *Plastics Science and Technology*, 2024, 52(8):105–108.
- [13] 杨明,侯健超,刘巨保,等.基于BP-SSA神经网络模型的中框塑件翘曲变形优化[J]. *塑料工业*, 2024, 52(7):97–104.
- YANG Ming, HOU Jianchao, LIU Jubao, et al. Optimization of