

PEEK 复合 3D 打印预制丝材微观结构与力学性能研究

余威佑¹, 杨帅¹, 陈怡², 张昊¹, 李冰桐¹, 刘岩¹, 梁菲¹, 张冰^{1*}

(1. 北京化工大学机电工程学院, 北京 100029;

2. 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094)

摘要:为优化聚醚醚酮(PEEK)材料的综合力学性能,制备了含有不同比例的碳纤维(CF)和玻璃纤维(GF)的复合 PEEK 丝材。采用 GB/T 1447-2005 纤维增强塑料拉伸性能试验方法对含有不同组分的复合丝材力学性能进行测试,并使用扫描电子显微镜(SEM)对其微观结构进行研究。结果表明:PEEK/CF 复合丝材的强度随 CF 含量增加而增强。PEEK/GF 复合丝材强度也随 GF 含量增加而增强,添加 10% GF 的复合丝材强度相较于纯 PEEK 丝材提升明显,但随着 GF 含量继续增加,整体强度提升缓慢。

关键词:聚醚醚酮;复合材料;拉伸试验;力学性能

中图分类号: TQ326.5, TQ327.1

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2025)01-0015-05

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2025.01.003

0 引言

随着 FDM 3D 打印技术的快速发展,对打印丝材力学性能提出了更高的要求。目前,熔融沉积成型常用的材料多为普通的工程塑料或者无毒无公害的低熔点塑料,如聚乳酸(PLA)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PETG)等^[1],这些低熔点工程塑料的力学性能受限于材料本身的性质,无法满足特殊领域下的苛刻要求。

聚醚醚酮(PEEK)属于热塑性特种工程塑料的一种,具有良好的耐温性、力学性能、自润滑性、耐腐蚀性和阻燃性等理化性能,因而被广泛应用于航空航天、汽车、医疗等领域^[2]。尽管 PEEK 具有高强度,但其断裂韧性较低,在高冲击载荷下易出现脆性断裂且 PEEK 材料的生产成本较高,限制了其在某些领域的大规模应用。对 PEEK 材料改性改善其脆性断裂和价格昂贵的缺点成为众多研究者关注的焦点。PEEK 改性可以分为纤维改性和有机物改性^[3],常见纤维改性材料包括 CF、GF 等,有机物改性材料包括 PTFE、聚醚砜(PES)等^[4]。它们和 PEEK 基复合可有效提高材料的综合力学性能。李博澜等^[5]研究表明,合适的热处理条件可诱导 PEEK 在 CF 表面异相成核,形成界面横晶结构,提高复合材料的整体研究性能。候磊磊等^[6]研究表明,GF 降低了复合材料的结晶度;

GF 长径比会不同程度地影响复合材料的结晶度,进而影响复合材料的熔融温度、熔融焓等热性能。

为了拓展 PEEK 的应用范围,探索通过添加 CF、GF 来改善 PEEK 的综合性能,为 3D 打印技术在高性能材料加工领域的应用开辟了新的可能性。

1 实验准备

1.1 实验原料与设备

本实验使用原料信息如表 1 所示:

中文名称	英文简称	货号	生产厂家
聚醚醚酮	PEEK	5600G	江苏君华
碳纤维	CF	短切碳纤维	杭州高科
玻璃纤维	GF	超短玻璃纤维	杭州高科

双螺杆挤出机:JWP-35 型,江苏金沃机械有限公司;

万能材料试验机:6800 系列双立柱台式试验系统,英斯特朗;

扫描电子显微镜:Hitachi SU5000:型,日本日立公司。

1.2 实验丝材制备

以 PEEK 为基体,CF 和 GF 为增强材料,设计了

作者简介:余威佑(1999-),男,硕士研究生在读,主要从事聚合物加工工艺与设备方面的研究。

7 种不同配方体系，如表 3 所示：

表 2 配方体系

序号	配方体系
1	PEEK100%
2	PEEK90% CF10%
3	PEEK80% CF20%
4	PEEK70% CF30%
5	PEEK90% GF10%
6	PEEK80% GF20%
7	PEEK70% GF30%

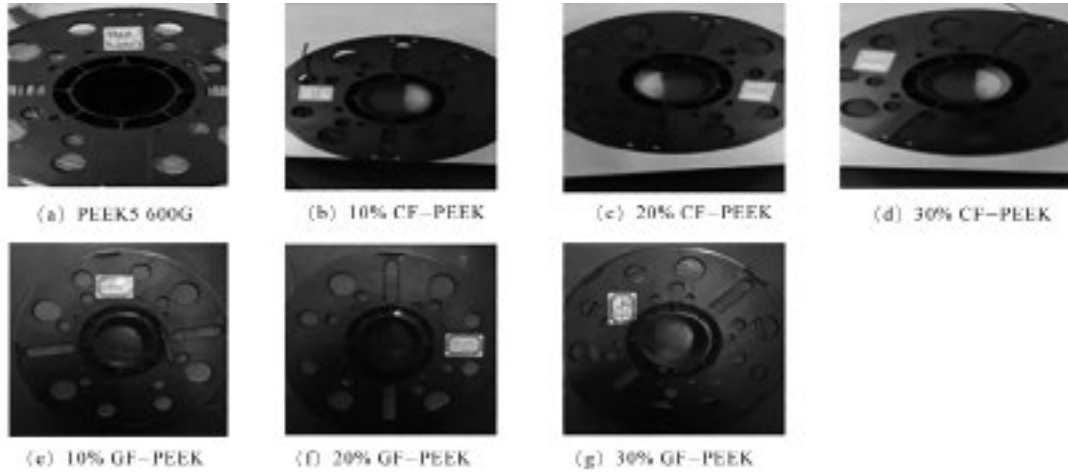


图 1 实验丝材

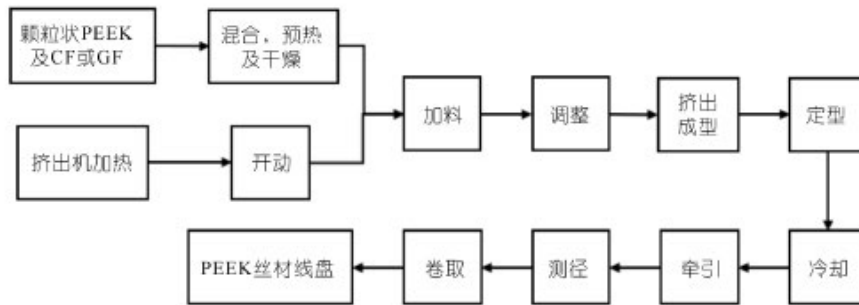


图 2 制丝流程



图 3 缠绕拉伸试验机

通过双螺杆挤出机将不同配方的原料挤出，得到以下 9 种直径为 $1.75 \text{ mm} \pm 0.05 \text{ mm}$ 的丝材，如图 1 所示，制丝流程如图 2 所示。

1.3 测试方法

将制备的含不同比例的 CF、GF 的复合丝材做缠绕拉伸试验，采用 GB/T 1447—2005 纤维增强塑料拉伸性能试验方法，测试用万能材料试验机如图 3 所示。

拉伸过程中，每隔 0.05 s 记录载荷、位移以及应力应变数据，通过实验数据拟合得到复合丝材的载荷位移曲线和应力应变曲线。并使用 SEM 对复合丝材表面和拉伸断裂截面进行观察。

2 结果与讨论

2.1 PEEK/CF 复合丝材力学性能及微观形貌

PEEK/CF 复合丝材力学性能曲线如图 4 所示，从图 4(a) 载荷位移曲线可以看出，随着 CF 含量增加斜率增大，即材料刚度增大，提高了材料的最大载荷。

含 10% CF、20% CF、30% CF 的复合 PEEK 丝材能承受的最大载荷约为 227.6 N、265.5 N、284.5 N。从图 4(b) 应力应变曲线可以看出，随着 CF 含量增加弹性区线性斜率增大，即材料杨氏模量增大，材料的极限应力值也增大。含 10% CF、20% CF、30% CF

的复合 PEEK 丝材能承受的极限应力值分别为 96.9 MPa, 103 MPa, 116.3 MPa。初步分析原因可能是碳纤维本身具有极高的拉伸强度与模量，在 PEEK 基体中增加碳纤维含量提高了整体的强度与刚度。

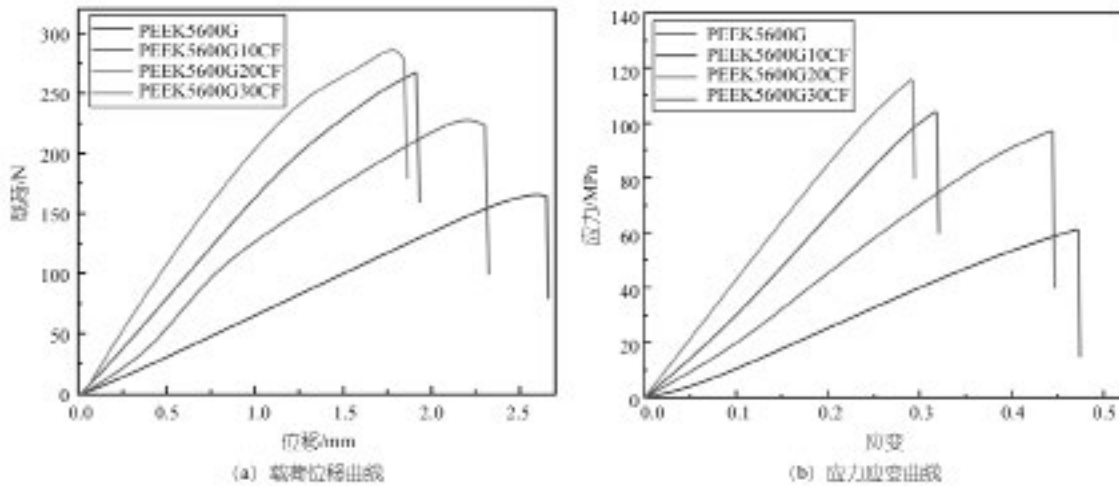


图 4 PEEK5600G/CF 丝材拉伸性能

PEEK/CF 丝材截面 SEM 如图 5 所示，从图 5(d)(e)(f) 可以看出，碳纤维在基体中分散良好，结构紧密，呈现细条状特征，且随着含量的增加，在基体中分布越来越均匀。同时，纤维与基体之间存在较强的界面结合，形成有效的网格结构，使基体和纤维之间的负载传递更有效。这有助于提高复合丝材的力学性能和抗疲劳特性。

力应变曲线可以看出，随着 GF 含量增加弹性区斜率增大，材料的杨氏模量增大，极限应力值也增大。含 10% GF、20% GF、30% GF 的 PEEK/GF 丝材的极限应力值分别约为 118 MPa、124.5 MPa、130.3 MPa。添加 10% GF 的复合 PEEK 丝相比于纯 PEEK 丝极限应力值提升明显，整体强度提高了 198%。随着 GF 含量继续增加，整体强度缓慢提升。产生的原因可能是玻璃纤维本身具有很高的抗拉强度和刚性，并有效地分担和转移应力，将其引入 PEEK 基体中时，它们能够承受更多的负荷，从而提高复合材料的总体强度。但随着 GF 含量继续增加，PEEK 复合丝材的极限应力值缓慢增加，可能的原因是高含量的 GF 会使复合材料变得更加脆性，尽管玻璃纤维增加了材料的强度，但同时也使材料的韧性降低。这种脆性的增加可能会导致材料在应力作用下更容易发生断裂，而不是继续提高强度。

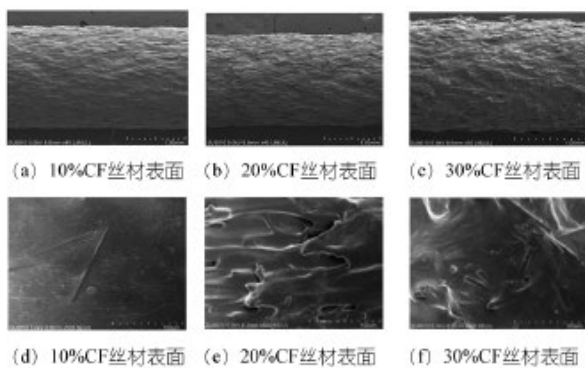


图 5 PEEK/CF 丝材 SEM 图

2.2 PEEK/GF 复合丝材力学性能及微观形貌

PEEK/GF 丝材力学性能曲线如图 6 所示，从图 6(a) 载荷位移曲线可以看出：随着 GF 含量增加斜率增大，材料刚度增强，提高了材料的最大载荷，含 10% GF、20% GF、30% GF 的复合丝材能承受的最大载荷约为 212.4N、223.2N、236.4N。从图 6(b) 应

力应变曲线可以看出，随着 GF 含量增加弹性区斜率增大，材料的杨氏模量增大，极限应力值也增大。含 10% GF、20% GF、30% GF 的 PEEK/GF 丝材的极限应力值分别约为 118 MPa、124.5 MPa、130.3 MPa。添加 10% GF 的复合 PEEK 丝相比于纯 PEEK 丝极限应力值提升明显，整体强度提高了 198%。随着 GF 含量继续增加，整体强度缓慢提升。产生的原因可能是玻璃纤维本身具有很高的抗拉强度和刚性，并有效地分担和转移应力，将其引入 PEEK 基体中时，它们能够承受更多的负荷，从而提高复合材料的总体强度。但随着 GF 含量继续增加，PEEK 复合丝材的极限应力值缓慢增加，可能的原因是高含量的 GF 会使复合材料变得更加脆性，尽管玻璃纤维增加了材料的强度，但同时也使材料的韧性降低。这种脆性的增加可能会导致材料在应力作用下更容易发生断裂，而不是继续提高强度。

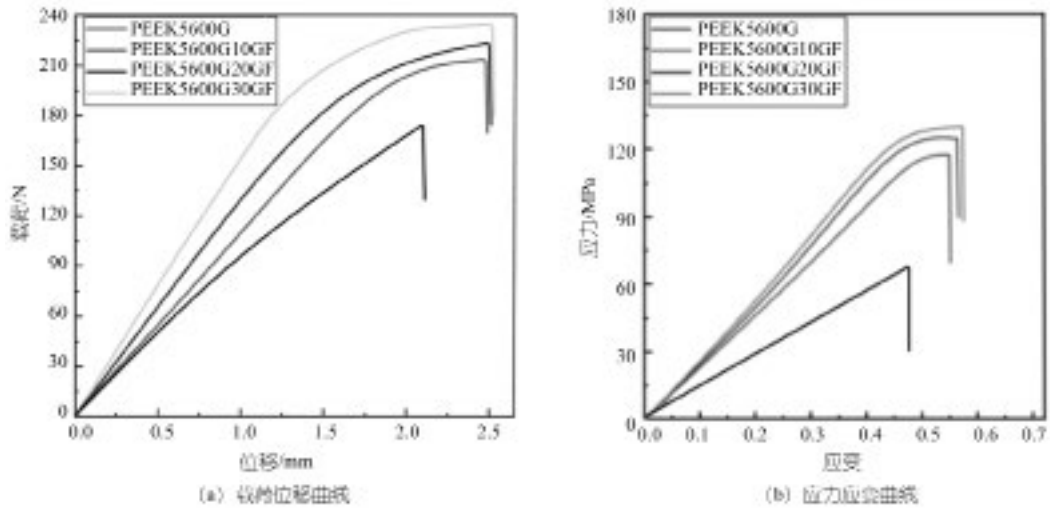


图6 PEEK5600G/GF 丝材拉伸性能

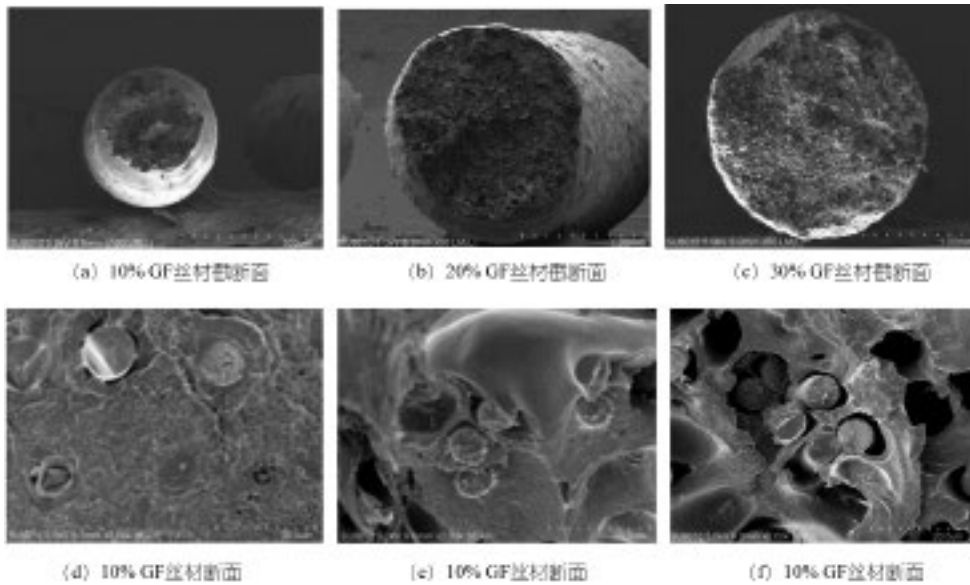


图7 PEEK5600G/GF 丝材 SEM

3 结论

直径为 1.75 mm 的 PEEK 丝材极限应力约在 63.92 MPa, 为拓展 PEEK 应用范围, 向 PEEK 基中添加 CF、GF 制备复合丝材得到如下结论:

(1) 添加 10% CF、20% CF、30% CF 的 PEEK/CF 复合丝材能承受的极限应力约在 96.9 MPa, 103 MPa, 116.3 MPa, 拉伸力学性能曲线只存在类似金属的弹性变形阶段。在 SEM 下观察发现: 碳纤维在基体中分散良好, 结构紧密, 呈现细条状特征, 且形成有效的网格结构, 使基体和纤维之间的负载传递更有效, 这有助于提高复合丝材的力学性能和抗疲劳特性。

(2) 添加 10% GF、20% GF、30% 的 PEEK/PTFE 复合丝材能承受极限应力约在 118 MPa、124.5 MPa、130.3 MPa。添加 10% GF 的复合丝材强度相较于纯 PEEK 强度提升明显, 但随着 GF 含量继续增加, 整体强度提升缓慢。拉伸力学性能曲线只存在类似金属的弹性变形阶段。在 SEM 下观察发现: 含 10% GF 时, 玻璃纤维能够均匀分散在 PEEK 基体中, 起到良好的增强作用。随着 GF 含量增加, 纤维之间发生了聚集或团聚, 导致分散不均匀反而限制了强度的进一步提升。

参考文献：

- [1] 严春晖, 战丽, 任永新, 等. PEEK/CGF 复合材料增材制造综合力学性能优化 [J]. 工程塑料应用, 2023,51(04):63-69.
- [2] 王成硕, 颜邓伊, 任浩浩, 等. 熔融沉积成型 3D 打印聚醚醚酮工艺优化研究进展 [J]. 高分子通报, 2024,37(03):316-327.
- [3] 禹程洪, 朱杰, 张亚宾, 等. PEEK 复合材料在滑动轴承中的应用 [J]. 轴承, 2023(01):1-8.
- [4] 杨程文. 高温强碱环境下 PEEK 复合材料研究 [D]. 燕山大学.
- [5] 李博澜, 张凤, 焦梦晓, 等. PEEK/CF 复合材料中 PEEK 结晶行为研究进展 [J]. 合成树脂及塑料, 2024,41(01):68-74.
- [6] 候磊磊, 曲敏杰, 何俊杰, 等. 不同长径比玻纤增强 PEEK 复合材料的性能研究 [J]. 塑料科技, 2018,46(02):41-46.

Research on the microstructure and mechanical properties of PEEK composite 3D printed prefabricated wire

Yu Weiyou¹, Yang Shuai¹, Chen Yi², Zhang Hao¹, Li Bingxu¹, Liu Yan¹, Liang Fei¹, Zhang Bing^{1*}

(1. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;
2. Beijing Satellite Manufacturing Co. LTD., Beijing 100094, China)

Abstract: In order to optimize the comprehensive mechanical properties of polyetheretherketone (PEEK) materials, researchers prepared composite PEEK filaments containing different proportions of carbon fiber (CF) and glass fiber (GF). Researchers used the GB/T 1447-2005 fiber-reinforced plastic tensile performance test method to test the mechanical properties of composite filaments containing different components, and studied their microstructure using scanning electron microscopy (SEM). The results indicate that the strength of PEEK/CF composite wire increases with the increase of CF content. The strength of PEEK/GF composite wire also increases with the increase of GF content. The strength of composite wire with 10% GF added is significantly higher than that of pure PEEK wire, but the overall strength improvement is slow as the GF content continues to increase.

Key words: polyetheretherketone; compound material; tensile test; mechanical property

(R-03)

通用股份积极推进海外新基地选址

General Science actively promotes site selection for new overseas bases

2024年12月3日,通用股份召开2024年第三季度业绩说明会。会上,通用股份董事长顾萃、董秘卞亚波,对公司业绩及海外项目情况进行了介绍。数据显示,该公司前三季度营收同比增长35.56%,净利润增长139.49%。

顾萃表示,公司前三季度业绩实现较大增长,有两方面的因素。一是公司全球化市场布局、品牌和渠道建设、研发创新和产品表现等核心竞争力的提升。二是泰国、柬埔寨海外双基地产能不断释放,产品销量实现大幅增长。

其中,通用泰国基地二期已于6月28日投产,预计2025年全面达产。

目前,泰国半钢厂一期及二期日产能,最高可达3万条。其海外基地半钢胎订单,持续保持供不应求状态。“通用股份新的海外轮胎生产基地,正在积极选址中。”顾萃说。

据卞亚波介绍,通用泰、中、柬三大生产基地,设计产能超3500万条。未来,公司将根据国内外经济、政策的变化,积极布局全球营销网络,提升市场占有率。

据悉,此前,玲珑轮胎在业绩说明会上,也透露了海外工厂的规划。该公司董事长王锋表示,其海外第三基地正在调研考察中。今年前三季度,玲珑轮胎实现营收159.49亿元,净利润达17.12亿元。

摘编自“轮胎世界网”

(R-03)