

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.03.014

打印角度对FDM碳纤维增强聚醚醚酮力学性能及表面性能影响

辛骅¹, 陈棋棋¹, 张泰¹, 杨乐^{1,2}, 贝茂阳²

(1. 陕西科技大学机电工程学院, 西安 710021; 2. 深圳扩维原子科技有限公司, 广东深圳 518000)

摘要: 采用熔融沉积成型(FDM)技术制备了碳纤维增强聚醚醚酮(PEEK)复合材料样件, 探究打印角度对样件力学性能、失效模式及表面性能的影响。结果表明, 打印角度对样件的力学性能影响显著, 其中, 0°打印的样件呈现最大拉伸和弯曲强度, 分别为 126.15 MPa±4.03 MPa 和 176.70 MPa±3.98 MPa, 而以剪切强度平均值为基准, 则±30°打印的样件剪切强度最大, 为 64.60 MPa。就失效模式而言, 0°打印样件的拉伸失效模式为层内失效, 呈现纤维拔出的断面形貌; 90°打印样件的拉伸失效模式为层间失效, 呈现PEEK基体微裂纹的断面形貌。样件的弯曲失效模式为下表面产生横断裂纹逐渐向上表面扩展。样件的剪切失效模式主要为裂纹的萌生并沿打印方向扩展, 直至完全断裂。打印角度对样件的表面粗糙度、润湿性、硬度等均无显著影响。样件抛光后的表面粗糙度可达到 0.22~0.28 μm, 完全满足骨科植入物要求。此外, 样件的表面呈现亲水特性(接触角 78.20°~82.72°), 具有较高的硬度(邵氏D硬度 72.20~75.70), 可用于人工关节假体设计领域。

关键词: 熔融沉积成型; 碳纤维增强聚醚醚酮复合材料; 打印角度; 力学性能; 失效模式; 表面性能

中图分类号: TH14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)03-0104-08

Impact of raster angle on mechanical and surface properties of FDM carbon fiber reinforced polyether ether ketone

XIN Hua¹, CHEN Qiqi¹, ZHANG Tai¹, YANG Le^{1,2}, BEI Maoyang²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China;

2. Shenzhen Kuowei Atomic Technology Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract : Carbon fiber reinforced polyether ether ketone (PEEK) composite specimens were fabricated using fused deposition modeling (FDM) technology to investigate the effects of raster angles on the mechanical properties, failure modes, and surface characteristics of the specimens. The results indicate that raster angles significantly affect the mechanical properties of the specimens: 0°-printed specimen exhibits the highest tensile and flexural strengths of 126.15 MPa±4.03 MPa and 176.70 MPa ±3.98 MPa, respectively, while ±30°-printed specimen shows the greatest shear strength of 64.60 MPa based on the average shear strength. In terms of failure modes, 0°-printed tensile specimen primarily exhibits intralaminar failure with fracture section of fiber pull-out morphology, while 90°-printed tensile specimen shows interlaminar failure with fracture section of microcracking in PEEK matrix. The flexural failure mode of the specimens is that the transverse crack generated on the lower surface gradually extends to the upper surface. For shear specimens, the failure mode is characterized by crack initiation and propagation along the raster direction until complete fracture. Raster angles show no significant impacts on surface roughness, wettability or hardness, the polished specimens achieve surface roughness of 0.22–0.28 μm, meeting stringent requirements for orthopedic implants. Additionally, the specimen surfaces demonstrates hydrophilic behavior (contact angle of 78.20°–82.72°) and high hardness (Shore D hardness of 72.20–75.70), indicating potential applicability in artificial joint prosthesis design.

Keywords : fused deposition modeling ; carbon fiber reinforced polyether ether ketone composite ; raster angle ; mechanical property ; failure mode ; surface characteristic

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划项目(23JK0348)

通信作者: 辛骅, 博士, 副教授, 主要研究方向为生物力学、聚醚醚酮医用聚合物的应用

收稿日期: 2025-02-13

引用格式: 辛骅, 陈棋棋, 张泰, 等. 打印角度对FDM碳纤维增强聚醚醚酮力学性能及表面性能影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(3): 104–111.

XIN Hua, CHEN Qiqi, ZHANG Tai, et al. Impact of raster angle on mechanical and surface properties of FDM carbon fiber reinforced polyether ether ketone[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(3): 104–111.

短碳纤维增强聚醚醚酮(PEEK)(CF/PEEK)复合材料以其优异的力学性能和生物相容性,在医学领域如关节置换和外伤修复中得到了广泛应用^[1-2]。PEEK为一种半结晶热塑性聚合物,其结晶行为(结晶度、晶体完整度、晶体生长方向等)往往与温度场息息相关。碳纤维增强相的引入提供了更多的成核点,有助于提高CF/PEEK复合材料结晶速度和结晶度,进而提升力学性能^[2]。研究发现,CF/PEEK复合材料的整体力学性能除与纤维种类、比重、尺寸等相关外,纤维与基体间界面结合强度也尤为重要^[3]。

近年来随着3D打印技术的突飞猛进,CF/PEEK复合材料的熔融沉积成型(FDM)技术吸引了众多学者的关注。由于FDM技术固有的层层堆叠打印特性,材料的力学性能易受到层间结合力的影响。研究表明,通过调节打印参数,尤其是温度场,可以有效地控制材料的结晶度与成型能力^[4-8]。Wang等^[6]研究发现提高打印喷头温度(如从400℃升至440℃)能够提高材料的拉伸强度。El Magri等^[7]研究发现调节打印热床温度有助于防止打印件变形与翘曲。此外,对碳纤维进行化学改性^[9]可以增强碳纤维与PEEK基体的界面结合强度;通过适当热处理^[10],可以提升层与层之间的结合强度。

综上所述,现有研究主要关注打印工艺参数优化,以此来调控材料的结晶行为、成型过程和力学性能。针对FDM CF/PEEK复合材料的力学失效研究相对匮乏,尚没有明确材料具体的失效与断裂模式。这一现实情况不利于FDM技术在CF/PEEK复合材料假体中的应用。此外,假体设计不应仅考虑所用材料的力学性能,还应重视假体表面性能。假体表面性能往往与假体的人体组织学反应和使用寿命相关。通过深入理解和调控假体表面性能,可以显著提升假体在临床中的表现,确保更好的病人适应性和更长的使用寿命^[11]。因此,笔者以FDM制备的CF/PEEK复合材料作为研究对象,探究其力学性能、失效模式与表面性能。与此同时,采用不同的打印角度,分析打印工艺参数对力学性能、失效模式与表面性能的影响,期望为FDM CF/PEEK复合材料打印工艺参数的优化提供理论依据,并为假体设计 and 应用提供数据支持。

1 实验部分

1.1 主要原材料

CF/PEEK 复合材料打印丝材:TECAPEEK

CF30,碳纤维质量分数为30%,密度为1.38 g/cm³,直径为1.75 mm±0.05 mm,上海锦廷科技公司。

1.2 主要仪器及设备

FDM 打印机:P220,德国 Apium Additive Technologies GmbH公司;

疲劳试验机:Instron 8801,英国英斯特朗仪器有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):Verios 460,美国赛默飞世尔科技公司;

邵氏硬度计:LXD-D,上海思为仪器公司;

超景深显微镜:DSX510S,日本OLYMPUS公司;

接触角测量仪:Oca20,德国 DataPhysics Instruments 公司。

1.3 样件制备

样件主要分为力学性能测试样件和表面性能测试样件两种,均通过FDM打印机制备,具体打印参数如下:打印速度为30 mm/s、喷嘴直径为0.4 mm、打印温度为485℃、床层温度为100℃、层厚为0.1 mm、填充率为100%。

根据ISO 178:2010,弯曲性能测试样件(弯曲样件)的尺寸为80 mm×10 mm×4 mm;根据ASTM D5379/D5379M-12,剪切性能测试样件(剪切样件)的尺寸为80 mm×20 mm×4 mm;根据ISO 527-2:2012,拉伸性能测试样件(拉伸样件)选择1BA型试样,标距长度为30 mm,尺寸为90 mm×10 mm×4 mm。所有样件主要尺寸如图1所示。

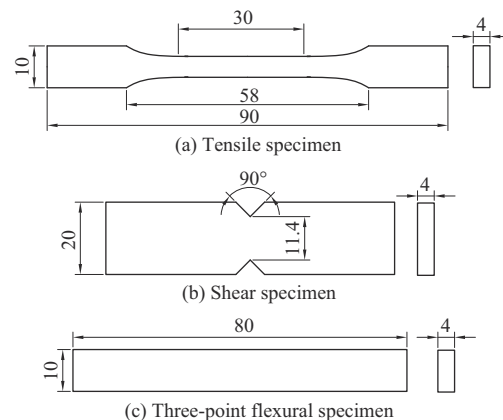


图1 力学性能测试样件示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of mechanical properties testing specimens (unit: mm)

打印流程为先打印外壳后内部填充的方式。首先,在XY平面打印3层外壳,随后进行内部100%填充。在本研究中,打印角度0°表示沿着X方向(水平方向)路径打印;打印角度90°表示沿着Y方向(垂

直方向)路径打印。对应样件命名方式为CF/PEEK-0°和CF/PEEK-90°;相似地,打印角度为 $\pm 30^\circ$ (后续简称为30°)和 $\pm 45^\circ$ (后续简称为45°)的样件命名为CF/PEEK-30°和CF/PEEK-45°。以剪切样件为例,打印路径如图2所示。

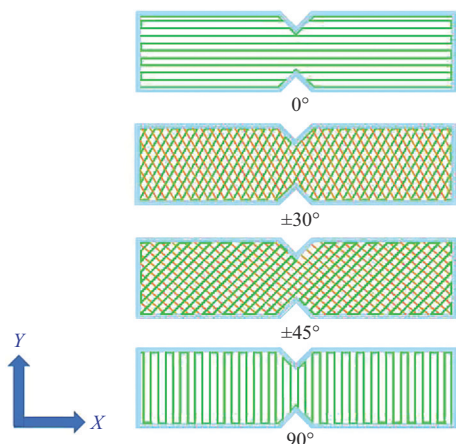


图2 剪切样件打印路径示意图

Fig. 2 Printing path schematic diagram of shear specimen

表面性能测试样件为盘样件,打印工艺与力学性能测试样件相似。盘样件尺寸为 $\varnothing 35\text{ mm} \times 4\text{ mm}$,如图3所示。

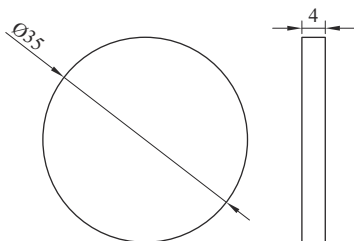


图3 盘样件(单位:mm)

Fig. 3 Disc specimen (unit: mm)

1.4 测试与表征

1.4.1 力学性能测试

每种打印角度的样件分别准备6个平行试样,使用疲劳试验机对样件进行拉伸试验、三点弯曲试验和剪切试验,具体条件如下。

拉伸试验:按照ISO 527-2:2012进行试验,试验速度设置为1 mm/min,直到样件断裂。

三点弯曲试验:按照ISO 178:2010进行试验,十字头速度设置为1 mm/min。

剪切试验:按照ASTM-D5379M-12进行试验,加载速度为2 mm/min,直至样件失效。

每个试验结束后,整理试验数据并绘制应力-应变曲线,并且针对结果计算 p 值,显著性水平取0.05,以便进一步分析。

1.4.2 断面微观形貌观察

使用SEM对断裂样件的断面进行观察,结合试验应力-应变数据,分析FDM CF/PEEK复合材料样件的失效模式。

1.4.3 表面粗糙度测量

采用超景深显微镜,使用69倍低倍镜头聚焦观察盘样件表面,再切换至700倍高倍镜头收集 $399\text{ }\mu\text{m} \times 399\text{ }\mu\text{m}$ 区域的表面图像。粗糙度截止长度选择0.08 mm。随机选取10个测量点,计算表面粗糙度的平均值和标准差。

1.4.4 表面硬度测量

采用邵氏硬度仪在盘样件表面上随机选择10个测量点,记录数据并计算邵氏D硬度的平均值与标准差。

1.4.5 接触角测量

使用接触角测量仪,在室温下,以去离子水为介质测量盘样件的静态接触角,随机选取10个测量点。

2 结果与讨论

2.1 样件力学性能分析

图4为不同打印角度FDM CF/PEEK复合材料样件的拉伸与弯曲应力-应变曲线,图5为由应力-应变曲线获得的拉伸强度和弯曲强度(若图中没有标出 p 值,说明两组数据之间的 p 值小于0.05,有显著性差异,下同)。在单向拉伸测试中,不同打印角度的CF/PEEK复合材料样件展现了相似的应力-应变曲线,但极限应力表现出显著差异(如图4a所示)。特别地,CF/PEEK-0°显示出最高的拉伸强度($126.15\text{ MPa} \pm 4.03\text{ MPa}$)。打印角度对弯曲性能的影响与拉伸相似,CF/PEEK-0°的弯曲强度最高,为 $176.70\text{ MPa} \pm 3.98\text{ MPa}$ 。所有样件的应力在达到最大值后均迅速降低,这一结果与现有文献结果^[12-14]一致。Gao等^[12]发现不同打印角度对纯PEEK的拉伸和弯曲性能的影响也存在明显的差异,其中0°方向表现最佳,90°方向最差,这与笔者研究结果一致。不同的是,碳纤维的加入显著提升了PEEK的拉伸强度(增加30%~50%)和弯曲强度(增加18%~55%),这一增强现象与已发表文献的研究结果^[15-16]相似。然而,与注射成型的CF/PEEK复合材料(其拉伸强度约为190 MPa)相比,通过FDM技术制造的CF/PEEK复合材料的最大拉伸强度仅为前者的66%。这种拉伸强度下降主要是归因于3D打印过程中层间结合较差和高孔隙率所导致的内部缺陷^[17]。

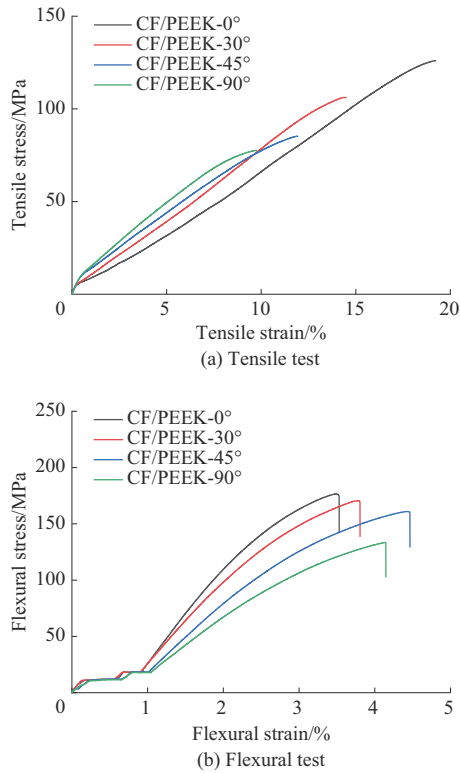


图4 不同打印角度FDM CF/PEEK复合材料样件的拉伸和弯曲应力-应变曲线

Fig. 4 Tensile and flexural stress-strain curves for FDM CF/PEEK composite specimens with varied raster angles

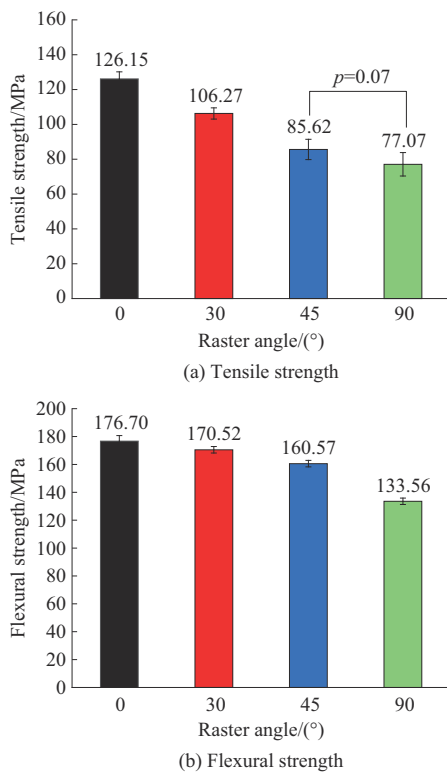


图5 不同打印角度FDM CF/PEEK复合材料样件的拉伸和弯曲强度

Fig. 5 Tensile and flexural strengths of FDM CF/PEEK composite specimens with varied raster angles

打印角度对于FDM制备的CF/PEEK复合材料样件的影响主要源于样件结构的非均匀性。这种结构特性使得样件的力学性能类似于单独丝材间的结合,样件的整体强度不仅取决于单根丝材的强度,更取决于丝材间的结合强度。就整体力学性能而言,打印角度与加载方向的一致性对样件力学性能产生了显著影响。当打印角度为0°时,打印路径与加载方向一致,丝材自身的强度得到充分利用,样件拉伸和弯曲强度较高。相反,在90°打印角度下,由于加载方向与打印路径垂直,样件的拉伸和弯曲强度主要依赖于丝材间的结合力,导致力学性能较低。

图6为不同打印角度FDM CF/PEEK复合材料样件的剪切应力-应变曲线和剪切强度。由图6a可以看出,复合材料剪切应力随着剪切应变的增大而增大,随后进入平缓阶段直至材料失效,该平缓阶段代表样件进入塑性变形。以图6b的剪切强度平均值为基准,则CF/PEEK-30°的剪切强度最大,为64.60 MPa;CF/PEEK-90°的剪切强度最小,为51.90 MPa。相较于3D打印的纯PEEK^[12],碳纤维的加入可使样件的剪切强度增大11%~21%,但增幅效果不

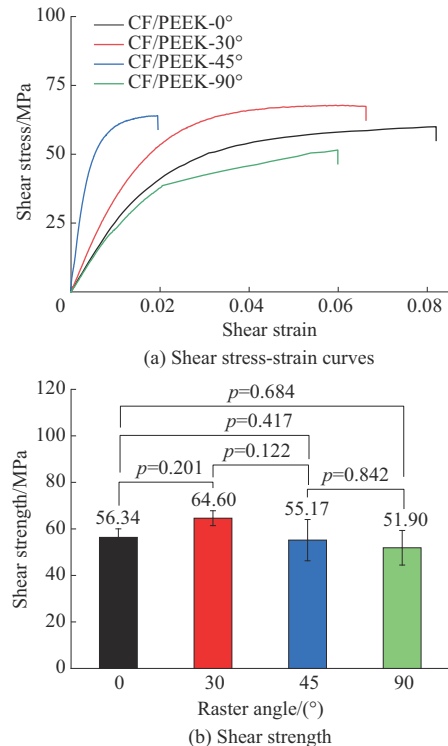


图6 不同打印角度FDM CF/PEEK复合材料样件的剪切应力-应变曲线和剪切强度

Fig. 6 Shear stress-strain curves and shear strength of FDM CF/PEEK composite specimens with varied raster angles

如拉伸强度和弯曲强度明显。这是由于剪切强度主要由丝材间结合力提供。在FDM过程中,微米级碳纤维随熔融态PEEK流动,因机械剪切效应,靠近喉管内壁(即打印喷头)的纤维会随打印方向定向排列,碳纤维的增强效果主要体现在打印方向,而垂直方向增强效果较弱(即丝材-丝材结合相)^[18]。后续,可通过热处理以及打印参数的优化提升层间结合力,进而提升剪切强度。

2.2 样件失效模式分析

为了进一步探究打印角度对FDM CF/PEEK复合材料样件失效模式的影响,在拉伸试验完成后对拉伸样件进行断裂形貌分析,如图7所示。

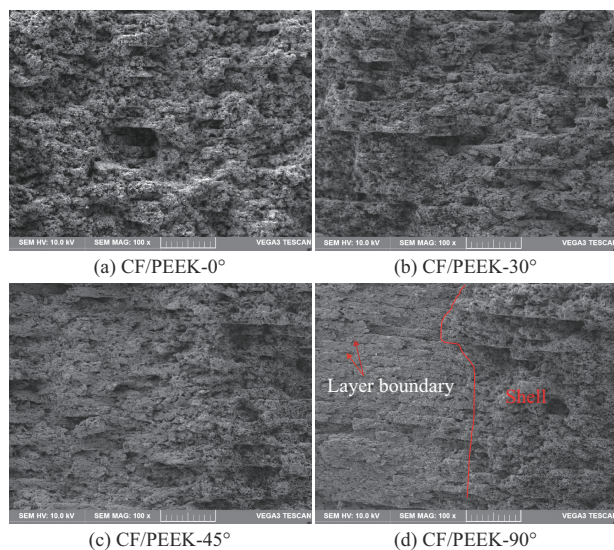


图7 不同打印角度FDM CF/PEEK复合材料样件的拉伸断面
Fig. 7 Tensile fracture sections of FDM CF/PEEK composite specimens with varied raster angles

由图7看出,CF/PEEK-0°断面较为起伏,无明显的层与层之间的边界。而CF/PEEK-90°的断裂面较为平整,可以观察到明显层间边界。这一现象,主要由载荷方向与丝材打印方向所共同决定。当两方向一致时,丝材直接受力,产生塑性形变,应变量较大。当两方向垂直时,载荷主要由薄弱的丝间结合相承担,应变量较小。

进一步放大CF/PEEK-0°断面(图8a和图8b),可以看到碳纤维拔出后留下的大量的深孔。且拔出的碳纤维覆盖着一层PEEK基体,碳纤维与基体结合良好,起到了充分的增强作用。这种微观断裂形貌表明其失效模式主要是碳纤维与PEEK基体的界面开裂,属于界面相失效,即层内失效^[19]。当界面相失效后,外部载荷由基体单独承担,丝材被轴向拉伸出现塑性形变直至断裂。

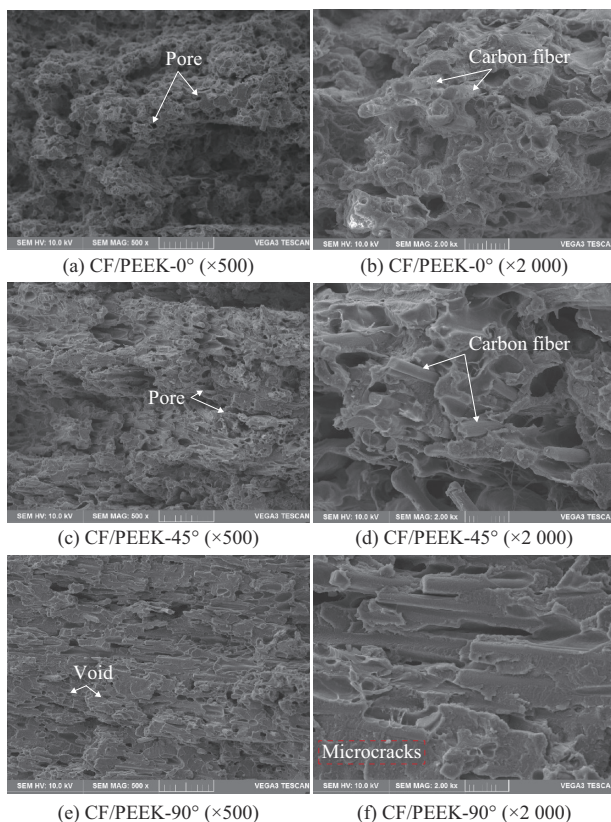


图8 不同打印角度FDM CF/PEEK复合材料样件的拉伸失效模式分析
Fig. 8 Tensile failure modes analysis of FDM CF/PEEK composite specimens with varied raster angles

如图8e和8f所示,CF/PEEK-90°断面上无明显纤维拔出所造成的深孔(pore),仅观察到小凹坑(void)。这些小凹坑可能源于样件层间的空隙(即打印缺陷),在拉伸过程中被扩大。此外,PEEK基体上呈现显著的微裂纹形貌。故CF/PEEK-90°的失效模式主要为丝材间结合相的开裂,即层间失效。CF/PEEK-45°样件两种失效模式都存在。

总而言之,与注塑CF/PEEK复合材料相比^[20],FDM CF/PEEK复合材料拉伸样件并未发现明显的裂纹成核和裂纹扩展现象,其断裂形貌主要表现为纤维拔出、空隙扩展,以及PEEK基体微裂纹,与已有文献结果相似^[21]。

就弯曲试验而言,FDM制备的CF/PEEK复合材料样件的上表面受压缩载荷,下表面受拉伸载荷,其失效模式为下表面产生横断裂纹逐渐向上表面扩展,如图9所示。图9中的断面呈现明显的区域特征,压缩区域较为平整,拉伸区域较为起伏。

相较于拉伸与弯曲试验,剪切试验衡量样件的层内强度,剪切试验下样件的失效模式如图10所示。由图10a看出,样件的失效区域集中在V型缺

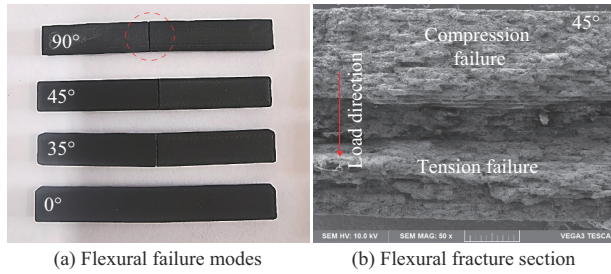


图9 不同打印角度FDM CF/PEEK复合材料样件的弯曲失效模式和CF/PEEK-45°样件的弯曲断面

Fig. 9 Flexural failure modes of FDM PEEK with varied raster angles and flexural fracture section of CF/PEEK-45° specimen

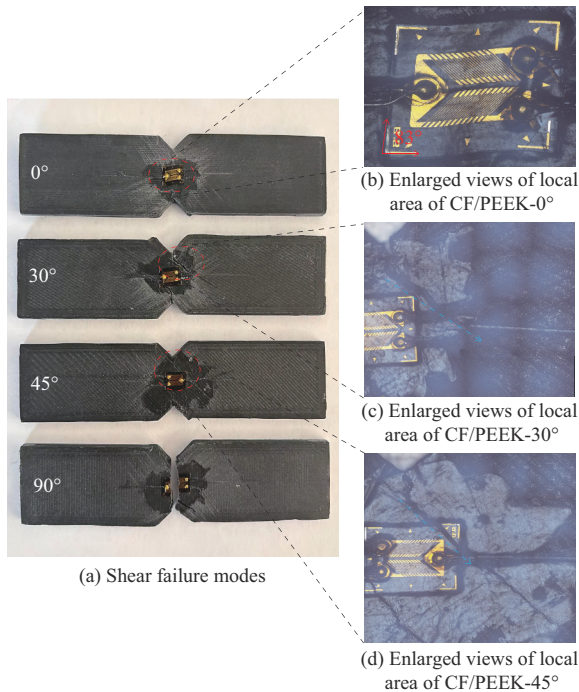


图10 不同打印角度FDM CF/PEEK复合材料样件的剪切失效模式
Fig. 10 Shear failure modes of FDM CF/PEEK composite specimens with varied raster angles

口之间。CF/PEEK-0°测试区域(图10b)发生显著的基体塑性形变。相比较之下,CF/PEEK-90°发生完全断裂,断面横贯上下V型缺口。此外,CF/PEEK-30°和CF/PEEK-45°均在V型缺口处发现裂纹扩展,其扩展方向与打印角度大致相同(图10c和图10d)。总体而言,剪切失效模式可归结于基体裂纹的产生与扩展。

2.3 样件表面性能分析

就假体应用而言,适当的表面粗糙度至关重要。过大的粗糙度会增加假体摩擦,导致不良组织反应。而过小的粗糙度则会降低细胞黏附性,影响临床疗效^[22]。不同打印角度FDM CF/PEEK复合材料样件抛光后的表面粗糙度三维形貌如图11所示,

表面粗糙度具体数值如图12所示。样件抛光后表面相对较为光滑,打印角度的影响不显著,算数平均粗糙值(S_a)和偏斜指数(S_{sk})的差异均无统计学意义($p>0.05$,图12)。根据ASTM F2033-12,聚合物关节面的 S_a 值应小于 $2\text{ }\mu\text{m}$,FDM CF/PEEK复合材料的 S_a 可控制在 $0.22\sim 0.28\text{ }\mu\text{m}$ 范围内,完全满足植入物设计要求。此外,较低的表面粗糙度有助于降低假体磨粒磨损,延长使用寿命等。另外, S_{sk} 均为负值,表明打磨后样件多呈现凹陷形貌,这种表面特征有利于细胞黏附和骨整合。

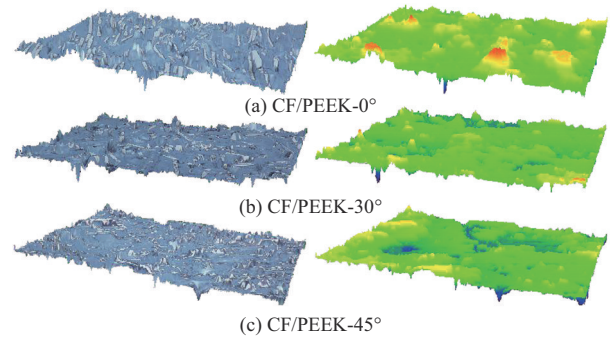


图11 不同打印角度FDM CF/PEEK复合材料样件抛光后表面粗糙度的三维形貌。

Fig. 11 3D morphology for surface roughness of FDM CF/PEEK composite specimens with varied raster angles after polishing

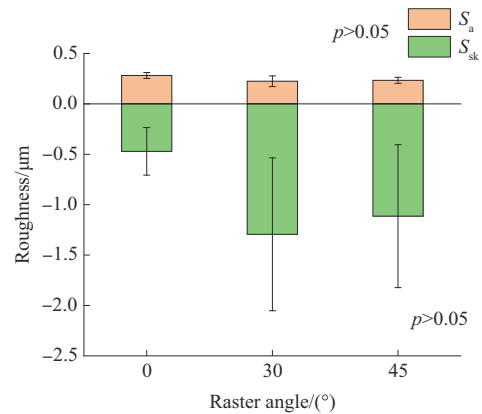


图12 不同打印角度FDM CF/PEEK复合材料样件抛光后的 S_a 和 S_{sk}
Fig. 12 S_a and S_{sk} of FDM CF/PEEK composite specimens with varied raster angles after polishing

接触角低于 90° 的材料被视为亲水性材料,有助于蛋白质的吸附、保持细胞活性及骨骼生长^[23]。图13为不同打印角度FDM CF/PEEK复合材料样件的接触角测试情况,对应的数值如图14所示。由图13看出,抛光后的FDM CF/PEEK复合材料样件均呈现亲水性,与FDM打印的纯PEEK类似^[12]。就接触角数值而言(图14),打印角度无显著影响($p>0.05$),具体数值分别为 $78.20^\circ \pm 4.53^\circ$ (0° 打印)、

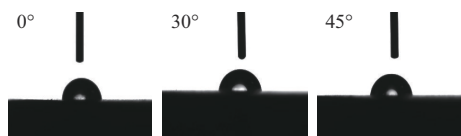


图13 不同打印角度FDM CF/PEEK复合材料样件的接触角测试情况

Fig. 13 Contact angle test conditions of FDM CF/PEEK composite specimens with varied raster angles

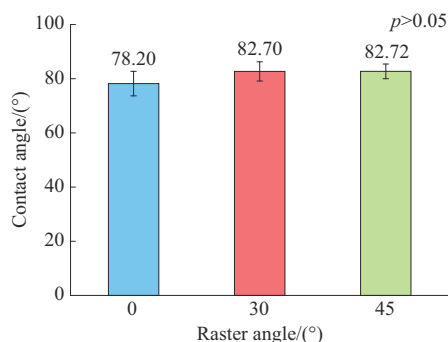


图14 不同打印角度FDM CF/PEEK复合材料样件的接触角值

Fig. 14 Contact angle values of FDM CF/PEEK composite specimens varied raster angles

82.70°±3.55° (±35° 打印) 和 82.72°±2.71° (±45° 打印)。与注射成型的CF/PEEK复合材料(50.70°±1.28°)相比,由于FDM的样件致密性较差,表面粗糙度增加,接触角也变大^[24]。

硬度是衡量材料抵抗外界物体入侵能力的指标,与材料的耐磨性和耐划伤性能密切相关,较高的硬度通常代表优异的耐磨性能^[25]。不同打印角度FDM CF/PEEK复合材料样件的邵氏D硬度如图15所示。由图15看出,3种FDM CF/PEEK复合材料样件的邵氏D硬度分别为72.20±0.68, 75.70±1.43, 72.50±1.34,差异无统计学意义($p>0.05$)。与注射成型的CF/PEEK复合材料相比(邵氏D硬度90.6),FDM样件大约可以达到其硬度的83%。该现象与其他力学性能下降相似,归结于FDM工艺固有内部缺陷^[17]。

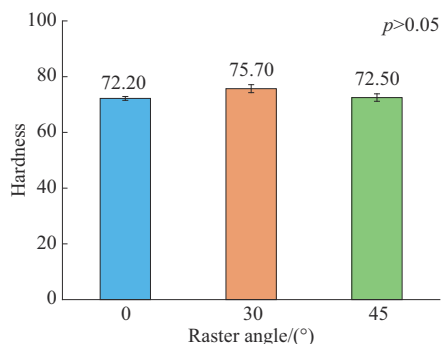


图15 不同打印角度FDM CF/PEEK复合材料样件的邵氏D硬度

Fig. 15 Shore D hardness of FDM CF/PEEK composite specimens with varied raster angles

3 结论

对采用FDM工艺制造的CF/PEEK复合材料样件的表面性能和力学性能进行了测试与分析,并通过SEM观察样件断面并分析了样件的失效模式,涵盖了拉伸、三点弯曲和剪切等力学性能以及硬度、表面粗糙度、润湿性的表面属性评估,主要结论如下。

(1)力学性能测试表明打印角度显著影响样件的力学性能。CF/PEEK-0°的拉伸和弯曲强度最高,分别达到126.15 MPa±4.03 MPa和176.70 MPa±3.98 MPa;而以剪切强度平均值为基准,CF/PEEK-30°在剪切强度测试中表现最强,剪切强度达到64.60 MPa。

(2)拉伸样件的断面形貌显示,0°打印角度的样件主要发生层内失效,表现为碳纤维与PEEK基体之间的界面结合失效,而90°打印角度的样件则以层间失效为主,表现为PEEK基体间的开裂。弯曲样件的失效模式表现为下表面形成横向裂纹并逐渐向上表面扩展。剪切样件的失效模式则主要为裂纹的萌生并沿打印方向扩展,最终导致完全断裂。

(3)表面性能分析显示,各打印角度的FDM CF/PEEK复合材料样件在邵氏D硬度上差异较小,最低约为72.20。打磨抛光后,样件表面粗糙度可达到0.22~0.28 μm,满足假体植入物的要求。所有样件的静态接触角均小于90°,表明其拥有良好的亲水性,有利于体内细胞的增殖和黏附。总体来看,打印角度对样件表面粗糙度、接触角和硬度的影响不显著。

参考文献

- [1] LAUX C J, HODEL S M, FARSHAD M, et al. Carbon fibre/polyether ether ketone (CF/PEEK) implants in orthopaedic oncology[J]. World Journal of Surgical Oncology, 2018, 16(1). DOI: 10.1186/s12957-018-1545-9.
- [2] HARRIS L. A study of the crystallisation kinetics in PEEK and PEEK composites[D]. Birmingham, West Midlands, UK: University of Birmingham, 2011.
- [3] QIN Y J, GE G T, YUN J X, et al. Enhanced impregnation behavior and interfacial bonding in CF/PEEK prepreg filaments for 3D printing application[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 20: 4 608-4 623.
- [4] MIRI S, KALMAN J, CANART J P, et al. Tensile and thermal properties of low-melt poly aryl ether ketone reinforced with continuous carbon fiber manufactured by robotic 3D printing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,

- 2022, 122(2):1 041–1 053.
- [5] YANG D, CAO Y, ZHANG Z K, et al. Effects of crystallinity control on mechanical properties of 3D-printed short-carbon-fiber-reinforced polyether ether ketone composites[J]. *Polymer Testing*, 2021, 97. DOI:10.1016/j.polymertesting.2021.107149.
- [6] WANG P, ZOU B, DING S L, et al. Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34 (9):236–246.
- [7] EL MAGRI A, VANAELI S, VAUDREUIL S. An overview on the influence of process parameters through the characteristic of 3D-printed PEEK and PEI parts[J]. *High Performance Polymers*, 2021, 33(8):862–880.
- [8] SUN Q L, SHAN Z D, ZHAN L, et al. Warp deformation model of polyetheretherketone composites reinforced with carbon fibers in additive manufacturing[J]. *Materials Research Express*, 2021, 8 (12). DOI:10.1088/2053-1591/abec8.
- [9] GUO J M, ZHUANG H L, LI D F, et al. Synergistic cooperation of a Magnolol-based waterborne cross-linkable PEEK sizing agent and click chemistry to construct exceptional solvent-resistance and interfacial properties of CF/PEEK composites[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2024, 192. DOI:10.1016/j.porgcoat.2024.108479.
- [10] RODZEŃ K, HARKIN-JONES E, WĘGRZYN M, et al. Improvement of the layer-layer adhesion in FFF 3D printed PEEK/carbon fibre composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 149. DOI: 10.1016/j.compositesa.2021.106532.
- [11] PORRELLI D, MARDIROSIAN M, CRAPISI N, et al. Polyetheretherketone and titanium surface treatments to modify roughness and wettability—Improvement of bioactivity and antibacterial properties[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 95:213–224.
- [12] GAO S S, LIU R J, XIN H, et al. The surface characteristics, microstructure and mechanical properties of PEEK printed by fused deposition modeling with different raster angles[J]. *Polymers*, 2021, 14(1). DOI:10.3390/polym14010077.
- [13] YANG X R, ZHENG L G, MA H, et al. 3D orthogonal woven carbon fiber/PEEK composites with superior bending and flame-retardant properties[J]. *Composite Structures*, 2023, 324. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.117559.
- [14] 王二平, 朱姝, 谭宗尚, 等. CF/PEEK复合材料的性能研究[J]. *纤维复合材料*, 2020, 37(4):35–38.
- WANG Erping, ZHU Shu, TAN Zongshang, et al. Research on performance of CF/PEEK composite[J]. *Fiber Composites*, 2020, 37(4):35–38.
- [15] HAN X T, YANG D, YANG C C, et al. Carbon fiber reinforced PEEK composites based on 3D-printing technology for orthopedic and dental applications[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2019, 8 (2). DOI:10.3390/jcm8020240.
- [16] DHAKAL N, ESPEJO C, MORINA A, et al. Tribological performance of 3D printed neat and carbon fiber reinforced PEEK composites[J]. *Tribology International*, 2024, 193. DOI:10.1016/j.triboint.2024.109356.
- [17] XIN H, LIU R J, ZHANG L, et al. A comparative biotribological study of self-mated PEEK and its composites under bovine serum lubrication[J]. *Biotribology*, 2021, 26. DOI:10.1016/j.biotri.2021.100171.
- [18] LI Q S, ZHAO W, LI Y X, et al. Flexural properties and fracture behavior of CF/PEEK in orthogonal building orientation by FDM: Microstructure and mechanism[J]. *Polymers*, 2019, 11(4). DOI: 10.3390/polym11040656.
- [19] KING J A, TOMASI J M, KLIMEK-MCDONALD D R, et al. Effects of carbon fillers on the conductivity and tensile properties of polyetheretherketone composites[J]. *Polymer Composites*, 2018, 39(S2):E807–E816.
- [20] ZHANG G, SCHLARB A K. Correlation of the tribological behaviors with the mechanical properties of poly-ether-ether-ketones (PEEKs) with different molecular weights and their fiber filled composites[J]. *Wear*, 2009, 266(1/2):337–344.
- [21] YU X, SONG W Z, ZHENG J H, et al. Effects of low-pressure annealing on the performance of 3D printed CF/PEEK composites[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, 2023, 2(2). DOI: 10.1016/j.cjmeam.2023.100076.
- [22] 王远洋, 舒丽君. PEEK复合材料在医用材料领域的研究进展[J]. *新材料产业*, 2022(3):35–42.
- WANG Yuanyang, SHU Lijun. Research progress on PEEK composite materials in medical materials field[J]. *Advanced Materials Industry*, 2022(3):35–42.
- [23] HOTCHKISS K M, REDDY G B, HYZY S L, et al. Titanium surface characteristics, including topography and wettability, alter macrophage activation[J]. *Acta Biomaterialia*, 2016, 31:425–434.
- [24] 锁涵, 邹华. 聚醚醚酮骨植入材料表面润湿性能研究进展[J]. *广州化学*, 2024, 49(4):32–35.
- SUO Han, ZOU Hua. Progress on surface wettability of PEEK bone implant material[J]. *Guangzhou Chemistry*, 2024, 49(4): 32–35.
- [25] 邱孝涛, 高阳, 王秀丽, 等. 碳纤维的长度与取向对聚醚醚酮基复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. *摩擦学学报*, 2020, 40(2): 240–251.
- QIU Xiaotao, GAO Yang, WANG Xiuli, et al. Effects of carbon fiber length and orientation on the tribological properties of polyetheretherketone based composites[J]. *Tribology*, 2020, 40(2): 240–251.