

3D 打印 C-PEEK 复合材料的摩擦磨损性能研究

徐雯婷¹ 李智勇¹ 巢昂轩¹ 马思齐² 李权洪² 王美荣³ 何培刚^{2*}

(1. 昌河飞机工业(集团)有限责任公司, 景德镇 333000;

2. 哈尔滨工业大学材料学院特种陶瓷研究所, 哈尔滨 150080;

3. 哈尔滨工业大学材料结构精密焊接与连接全国重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 为探究不同工况条件下碳纤维增强聚醚醚酮(C-PEEK)复合材料制件的摩擦与磨损性能, 通过熔融沉积 3D 打印进行高精度 C-PEEK 复合材料制件, 采用对置往复摩擦磨损试验机对不同配对副、外加载荷、滑动速度、接触时长和温度条件下的 C-PEEK 样件进行分析。结果表明, 随着接触时长、滑动速度以及外加载荷的增加, C-PEEK 材料的磨损量虽然会有所提升, 但摩擦系数总体均维持在 0.3 及以下, 具有较好的耐磨性。在滑动速度为 15 mm/s、载荷为 30 MPa、试验时长为 1 h 时, 随温度的升高, C-PEEK 材料磨损量也会增大, 但摩擦系数逐渐减小。此外, 温度为 200 °C 时 GCr15 钢球+C-PEEK 摩擦副间的摩擦系数可低至 0.15, 展示了 C-PEEK 复合材料良好的摩擦磨损性能。

关键词: 3D 打印; 聚醚醚酮复合材料; 摩擦磨损性能; 摩擦系数; 磨损量

中图分类号: TG706; TB332; TB302 **文献标识码:** A

Friction and Wear Properties of 3D Printed Carbon Fiber Reinforced Polyetheretherketone Composites

Xu Wenting¹ Li Zhiyong¹ Chao Bingxuan¹ Ma Siqi² Li Quanhong² Wang Meirong³ He Peigang^{2*}

(1. Avic Changhe Aircraft Industry(Group) Co., Ltd., Jingdezhen 333000; 2. Institute for Advanced Ceramics, School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080; 3. National Key Laboratory of Precision Welding & Joining of Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: To explore the friction and wear properties of carbon fiber-reinforced polyetheretherketone(C-PEEK) composite specimens under different operating conditions, high-precision C-PEEK composite specimens were fabricated using fused deposition modeling(FDM) 3D printing. The specimens were then subjected to reciprocating friction and wear tests using a pin-on-disc tribometer under various pairing counterparts, external loads, sliding velocities, contact durations, and temperature conditions. The results showed that, although the wear volume of C-PEEK material increased with increasing contact duration, sliding velocity, and external load, the friction coefficient remained generally below 0.3, indicating good wear resistance. Under the conditions of a sliding velocity of 15 mm/s, a load of 30 MPa, and a test duration of 1 h, the wear volume of C-PEEK material increased with temperature elevation, while the friction coefficient gradually decreased. Additionally, at a temperature of 200 °C, the friction coefficient between GCr15 steel ball and C-PEEK friction pair could be as low as 0.15, demonstrating the excellent friction and wear properties of C-PEEK composite material.

Key words: 3D printing; polyetheretherketone composite materials; friction and wear performance; friction coefficient; wear amount

1 引言

聚醚醚酮(PEEK)及其碳纤维复合材料(C-PEEK)作为先进工程树脂材料,具有优异的耐高温、耐化学腐蚀和抗疲劳性能,成为航空航天和汽车等领域的理想选择,广泛用于制造结构件、零件和设备。传统的PEEK复合材料制备方法包括挤出、压缩成型等^[1-9]。然而,这些方法在复杂结构的制备和个性化生产方面存在一定的限制^[10-11]。相比之下,3D打印技术由于其独特的层叠制造方式,可在构件内部实现复杂的空间结构,提高材料的整体性^[12-18]。随着3D打印技术的不断创新,利用3D打印技术制备PEEK成为一种备受瞩目的新兴方法,为实现复合材料结构的精确控制提供了更大的自由度和可能性。目前,很多学者也开始将其与碳纤维等增强材料相结合,制备了碳纤维增强聚醚醚酮(C-PEEK)复合材料^[19-22]。C-PEEK复合材料不仅具备PEEK的高温稳定性和耐腐蚀性,还能够很好地控制碳纤维的分布和方向,增加了在力学性能方面的优越性能,这也进一步提升了结构件在生产 and 制造过程中的强度和刚性^[23]。

对于3D打印制备的C-PEEK复合材料,摩擦磨损性能的研究是至关重要的一环^[24-26]。这主要是因为摩擦磨损性能是评估材料在实际工作环境下力学性能的关键指标之一。摩擦磨损性能不仅直接关系到结构件的使用寿命和性能稳定性,还与其在各种极端工作条件下的可靠性密切相关^[27-33]。结构件在不同工作环境中,由于摩擦的存在,会受到表面磨损的影响。例如,过高或过低的碳纤维含量都可能导致材料性能的下降。通过控制碳纤维的分布和取向,使其更好地与基体树脂相互作用,可以有效提升摩擦磨损性能。此外,不同的制备工艺参数,如挤出温度、压力以及摩擦副等,也将显著影响打印材料的微观结构,从而影响其摩擦磨损性能^[34-36]。因此,针对C-PEEK这类复合材料,摩擦磨损性能的研究不仅能够揭示其在实际工作中的表现,还有助于优化其配方和制备工艺,从而更好地满足不同领域的工程需求。

在3D打印等先进制备技术的引入下,通过调整打印参数,可以实现不同区域的性能定制,这为设计具有特定摩擦磨损性能的复合材料提供了更大的灵活性。因此,本文通过对不同成分的C-PEEK丝材进行制备,系统研究了3D打印C-PEEK材料的摩擦磨损性能,并探讨不同配对副、外加载荷、滑动速度、接触时长和温度条件下C-PEEK制件的摩擦磨损特性,分

析其不同工况下摩擦系数和磨损量的变化。通过深入研究摩擦磨损机理,为3D打印C-PEEK材料的工程应用提供更加可靠的性能数据和设计指导。

2 实验材料与方法

2.1 实验材料

作为3D打印聚醚醚酮最为重要的一项环节,打印用丝材的标准化制备对打印产品的各项性能指标影响显著。打印用C-PEEK丝材的制备过程主要分为原料混合、材料干燥、粒材制备、丝材挤出和卷曲以及丝材热处理干燥过程。主要的制备流程为:首先称取一定质量的商用PEEK粉末与短切碳纤维在高速混料机中进行机械共混得到混合物料,然后制成丝材挤出卷曲成盘,并进行干燥处理以及保存。所用碳纤维形貌见图1,碳纤维为T700级、长度集中在100~200 μm、直径集中在5~9 μm。

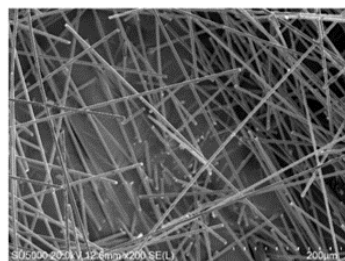


图1 丝材所用碳纤维原料形貌

实验过程所选取碳纤维含量为10%,命名为10C-PEEK。混合的时间为10h,以便达到机械混合的均匀性。将以上混合物料通过微型锥形双螺杆挤出机制成碳纤维/聚醚醚酮复合材料粒料。在造粒过程中需要明确混合有纤维聚醚醚酮混合物的熔化温度,即造粒过程中所选用的温度应略高于混合物的熔化温度而确保其完全融化,并经冷却后获得颗粒形态。聚醚醚酮原始粉末的热性能参数见表1。

表1 原始聚醚醚酮粉末的热性能参数 °C

热物理参数	参数
玻璃化转变温度 (ISO11357)	143
熔点 (ISO11357)	343

基于原始材料的熔化温度,双螺杆挤出机的挤出设置参数如下所示:一区(材料预热与初步融化)加热温度为345 °C、二区(材料充分融化)加热温度为365 °C、三区(材料保持熔融状态)加热温度为370 °C、模口温度为365 °C、螺杆转速为30 r/min,随后挤出的

原始丝材通过风冷装置定型后,经造粒机制成碳纤维/聚醚醚酮复合材料粒料。接着,将上述制备的碳纤维/聚醚醚酮复合材料粒料继续加入到单螺杆挤出机中进行再熔融挤出。单螺杆挤出机的挤出参数如下:一区加热温度为 $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、二区加热温度为 $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、三区加热温度为 $370\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、模口的温度为 $365\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、螺杆的转速为 10 r/min 。该阶段为丝材的二次融化阶段,主要是为了能够消除粒料内部的残余气泡。并且本阶段螺杆转速选择较低的 10 r/min ,这一措施将确保丝材能够均匀连续挤出,确保丝材表面质量。挤出的丝材经冷却后,依次通过激光测径装置、丝材牵引装置后收卷成型。所成型的丝材外形轮廓清晰均匀。C-PEEK 丝材见图2。丝材直径为标准化的 $(1.75\pm 0.05)\text{ mm}$,见图3。



图2 C-PEEK 丝材

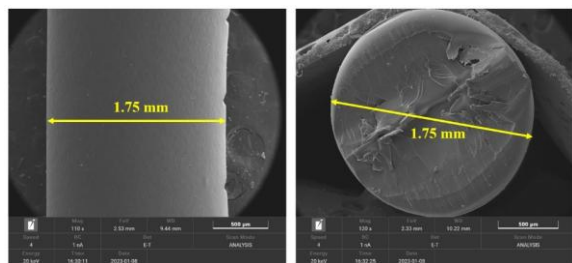


图3 C-PEEK 丝材的轴向和周向形貌及尺寸

为保证打印过程中丝材绝对干燥,使用前应对其进行烘干处理。含有碳纤维的丝材由于其内部孔隙较多且孔隙率相对较高,因此其吸水性能高于纯 PEEK 丝材,所需烘干温度同样略高。对于纯 PEEK 丝材,烘干温度可以设定为 $100\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、烘干时长应为 5 h 及以上。而对于含有碳纤维的 C-PEEK 丝材,烘干温度应设定为 $120\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、烘干时长同为 5 h 及以上。

2.2 实验方法

本文采用多功能摩擦磨损试验机测试 C-PEEK 打印产品的摩擦磨损性能,以球-盘往复滑动接触形式对打印样品的摩擦磨损性能进行评价。摩擦副上式样为 GCr15 钢球和 ZrO_2 陶瓷球,下式样为 3D 打印的 C-PEEK 制件。具体实验变量包含如下:不同配对副、不同外加载荷、不同滑动速度、不同接触时长、不同温度。施加载荷包含 10 MPa 、 20 MPa 、 30 MPa 、 40 MPa

四类,滑动速度包含 5 mm/s 、 10 mm/s 、 15 mm/s 三类,接触时长包含于 1 h 、 2 h 、 3 h 三类,温度包含 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 四类。磨损量的大小是打印样品耐磨性的直接体现,因此本文采用线磨损量表征 C-PEEK 材料的耐磨性能,其原理是利用共聚焦显微镜测量磨损划痕的深度,测量其磨损最深处与样品未磨损表面的高度差。利用 LabVIEW 数据采集程序准确采集摩擦副间的摩擦力随时间变化曲线,并经滤波后自动换算为摩擦系数曲线,其中摩擦系数信号采样频率为 10 000 Hz 。

3 结果与讨论

3.1 不同配对副对 C-PEEK 摩擦与磨损性能影响

为探究不同配对副对 C-PEEK 复合材料摩擦磨损性能影响,选取上配对副为 GCr15 钢球和 ZrO_2 陶瓷球,下式样为 3D 打印的 C-PEEK 制件。实验条件如下:滑动速度 15 mm/s 、载荷为 30 MPa 、温度为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、实验时长为 1 h ,实验结果如图4所示。通过测试配对副对 C-PEEK 打印样品的表面线磨损量,可知 C-PEEK 对磨 GCr15 钢球和 ZrO_2 陶瓷球时对应的线磨损量分别为 $50.7\text{ }\mu\text{m}$ 以及 $60.1\text{ }\mu\text{m}$ 。对应的摩擦系数均小于 0.35 。陶瓷球对磨样品的摩擦磨损性能好于相应钢球主要在于陶瓷球通常具有较高的硬度,相比之下,钢球的硬度相对较低,而陶瓷球则更能够提供更好的耐磨性。

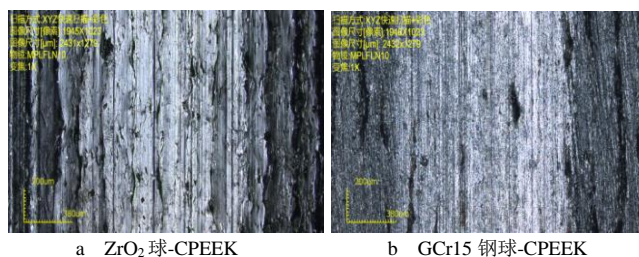


图4 不同配对副下 C-PEEK 的磨损形貌对比

3.2 不同磨损时间对 C-PEEK 摩擦与磨损性能影响

为探究不同磨损时间对 C-PEEK 复合材料摩擦磨损性能影响,选取上配对副为 GCr15 钢球,下式样为 3D 打印 C-PEEK 制件。实验的条件如下所示:滑动速度 15 mm/s 、载荷为 30 MPa 、温度为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。随着磨合时间的延长,三组实验中摩擦系数均维持在 0.3 左右。同时观察到在磨损时长延长到 3 h 时,整个过程未出现摩擦系数突增或波动的现象,说明该配对副适配性较好,无黏着磨损及拉缸现象出现,如图5所示。

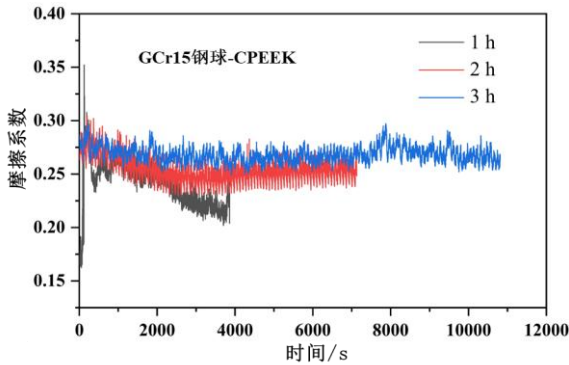


图5 不同磨损时间下 C-PEEK 的摩擦系数

对比磨损量可发现磨损时间的延长将加剧样品表面的磨损深度,可以看出随着磨损时间由 1 h 提升至 2 h 和 3 h,其磨损量由 50.7 μm 升高至 65.9 μm 和 87.7 μm ,如图 6 所示。对比摩擦磨损试验后三组样品中 C-PEEK 样品磨损形貌,如图 7 所示。可知磨损时间的提高加剧了表面的磨损,但对磨后不会出现材料粘连现象,两者间的磨损行为属于上配对副对下配对副的单一磨损。

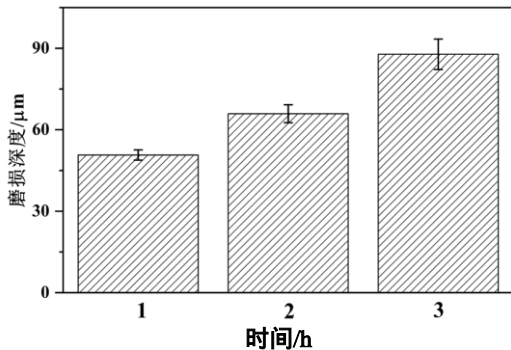


图6 不同磨损时间下 C-PEEK 的线磨损量

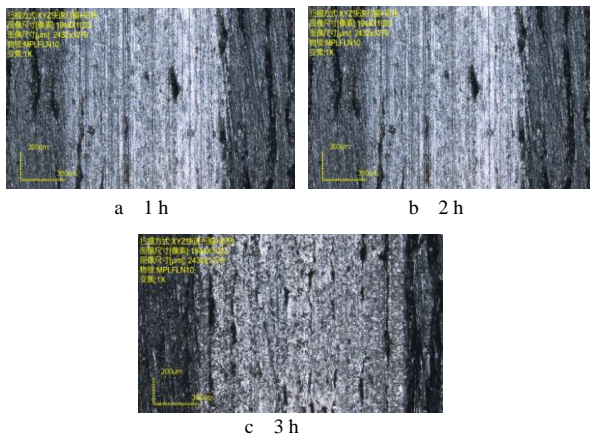


图7 不同磨损时间下 C-PEEK 的磨损形貌对比

3.3 不同滑动速度对 C-PEEK 摩擦与磨损性能影响

为探究不同滑动速度对 C-PEEK 复合材料摩擦磨损性能影响,选取上配对副为 GCr15 钢球,下式为 3D 打印 C-PEEK 制品。实验条件如下:磨损时间为 1 h、载荷为 30 MPa、温度为 50 $^{\circ}\text{C}$ 。实验结果见图 8。

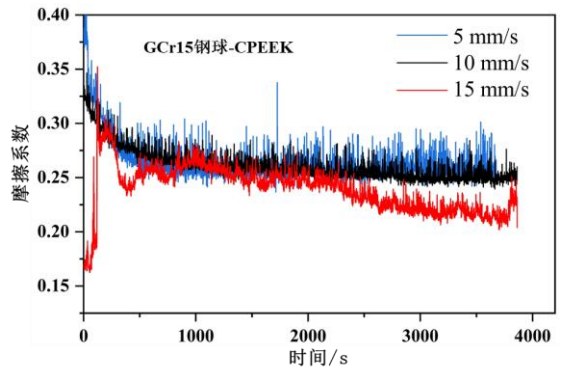


图8 不同滑动速度下 C-PEEK 的摩擦系数

转速较低的 5 mm/s 对应的摩擦系数波动较大,这是由于转速较低不利于配对副间相互磨合,因此磨损过程中微凸体较多导致摩擦系数曲线波动。通过对比磨损量可以发现摩擦副移动速度的延长将加剧样品表面的磨损深度,见图 9。随着磨损时间由 5 mm/s 提升至 10 mm/s 和 15 mm/s,虽然磨损量由 35.8 μm 升高至 45.8 μm 和 50.7 μm ,但摩擦系数仍维持在 0.3。此外,再对比摩擦磨损试验后三组样品中 C-PEEK 样品磨损形貌,如图 10 所示。可知摩擦副转动速度的提高加剧了表面的磨损,这主要是由于转速的提高增大了摩擦副间的磨损频率,因此会造成 C-PEEK 配对副表面磨损加剧。

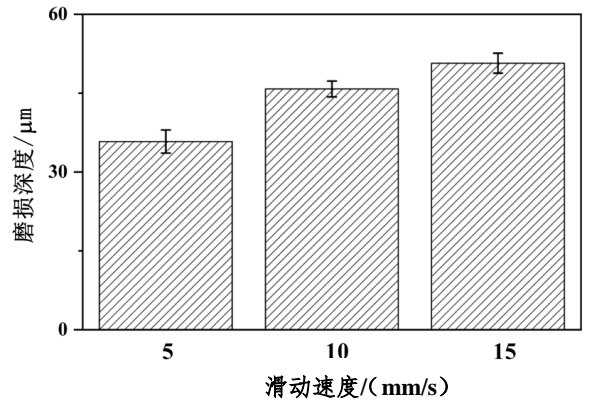


图9 不同滑动速度下 C-PEEK 的线磨损量

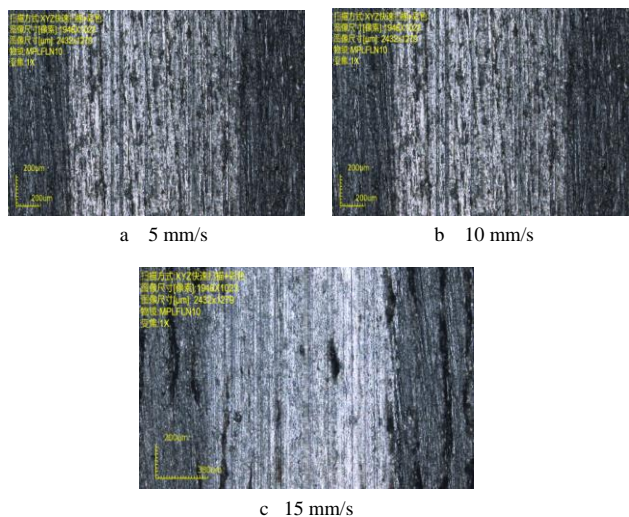


图 10 不同滑动速度下 GCr15 钢球对磨 C-PEEK 的磨损形貌对比

3.4 不同载荷对 C-PEEK 摩擦与磨损性能影响

为探究不同载荷对 C-PEEK 复合材料摩擦磨损性能影响,选取上配对副为 GCr15 钢球,下式为 3D 打印 C-PEEK 制品。实验条件为:滑动速度为 15 mm/s、磨损时间为 1 h、温度为 50 °C。随着施加载荷的增大,摩擦系数呈现出逐渐降低的趋势,摩擦系数分别为 0.28、0.26、0.23 和 0.21,如图 11 所示。

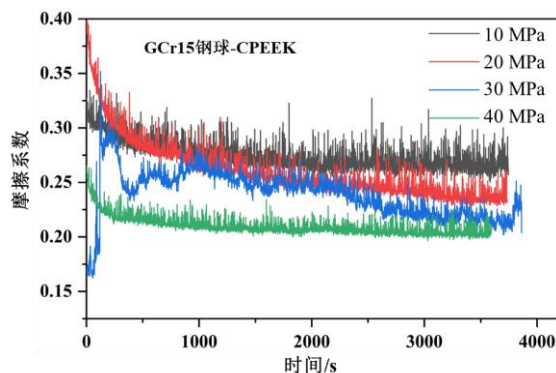


图 11 不同载荷下 C-PEEK 的摩擦系数

在高载荷下可加速配对副间的磨合进程,进而削平大部分微凸体,摩擦曲线平稳且摩擦系数较低。对比磨损量可以发现载荷的提高将加剧样品表面的磨损深度,随着载荷由 10 MPa 提升至 20 MPa、30 MPa 和 40 MPa,磨损量为 32.7 μm、42.5 μm、50.7 μm 和 67.1 μm,见图 12。此外,对比摩擦磨损试验后样品中 C-PEEK 样品磨损形貌可知,载荷的提高加剧表面的磨损,40 MPa 载荷下 C-PEEK 样品磨损最为严重,其打印层磨损后裸露在外。而 10 MPa 载荷下 C-PEEK 配对副表面磨损较轻微,未形成较宽磨损区域,如图 13 所示。这主要是因为

高载荷下,材料表面的微观凸起(微凸体)更容易被削平,使摩擦曲线更为平稳,从而降低了摩擦系数。此外,增大的载荷会导致更严重的表面磨损,加剧了材料的磨损深度。更高的载荷会产生更大的应力,使材料更容易发生塑性变形和磨损。

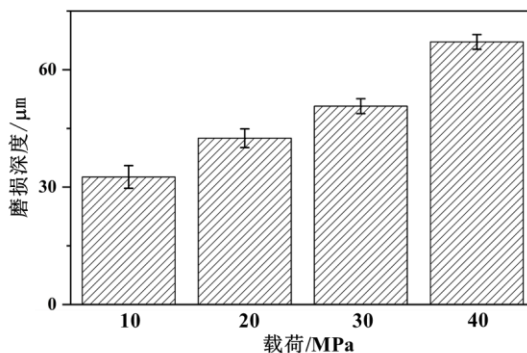


图 12 不同载荷下 C-PEEK 的线磨损量

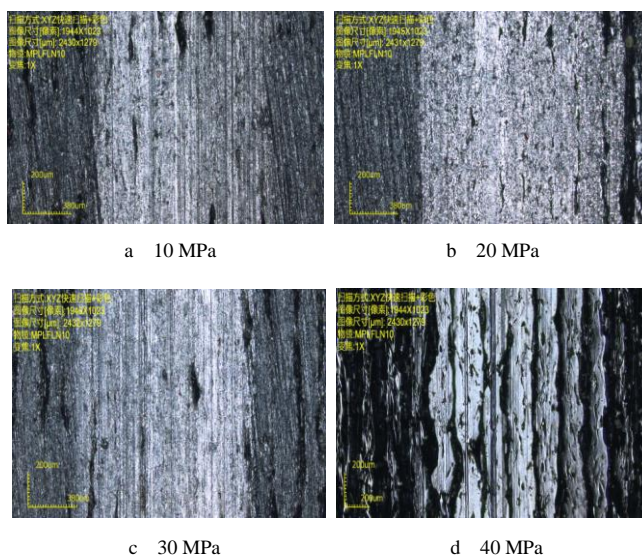


图 13 不同载荷下 C-PEEK 的磨损形貌对比

3.5 不同温度对 C-PEEK 摩擦与磨损性能影响

为探究不同温度对 C-PEEK 复合材料摩擦磨损性能影响,选取上配对副为 GCr15 钢球和下式为 3D 打印 C-PEEK 制品。实验条件如下:滑动速度 15 mm/s、载荷为 30 MPa、实验时长为 1 h。随着温度由 50 °C 升至 200 °C, GCr15 钢球+C-PEEK 配对副间摩擦系数呈逐渐降低的趋势,当 200 °C 时摩擦系数低至 0.15,见图 14。这是由于该温度下 C-PEEK 材料出现表面软化,有效降低了配对副间的摩擦力,进而降低了摩擦系数。对比磨损量可发现温度的提高同样将加剧样品表面的磨损深度。随温度由 50 °C 升至 100 °C、150 °C 和 200 °C 时,但磨损量由 50.7 μm 升高至 67.6 μm、108.4 μm 和

164.9 μm ，如图 15 所示。此外，对比摩擦磨损试验后四组样品中 C-PEEK 样品磨损形貌可知，温度的提高加剧了表面的磨损，150 $^{\circ}\text{C}$ 及 200 $^{\circ}\text{C}$ 下样品磨损表面划痕增多，如图 16 所示。这是由于高温条件下 PEEK 材料表面微软化加剧，表面硬度及强度降低，进而导致摩擦作用更加剧烈，加速了磨损的发生。

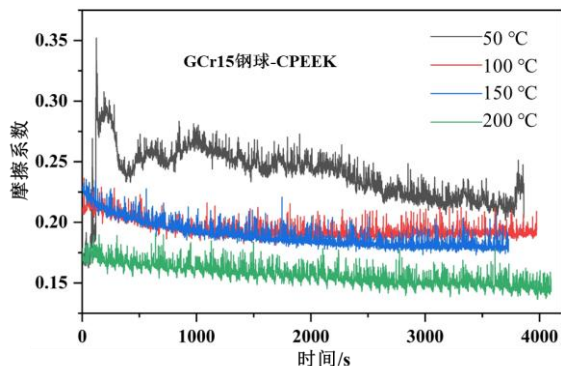


图 14 不同温度下 C-PEEK 的摩擦系数

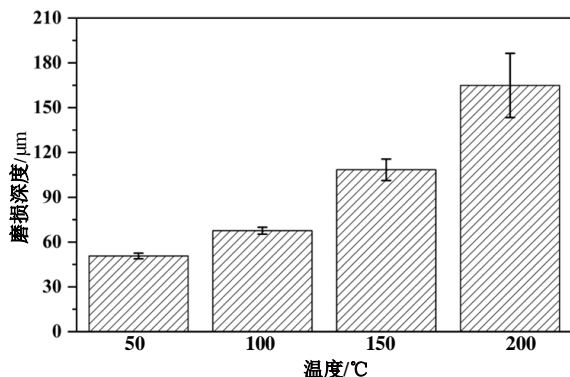


图 15 不同温度下 C-PEEK 的线磨损量

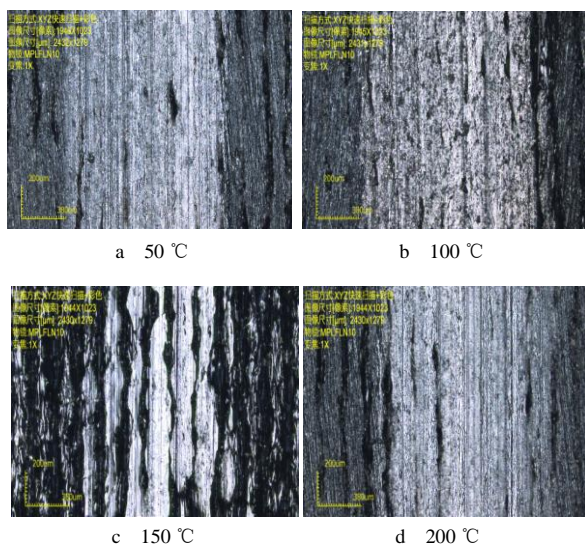


图 16 不同温度下 C-PEEK 的磨损形貌对比

4 结束语

为了探究不同工况条件下碳纤维增强聚醚醚酮 (C-PEEK) 复合材料制件的摩擦与磨损性能，本文通过对不同配对副、外加载荷、滑动速度、接触时长和温度条件下的 C-PEEK 样件进行分析。探讨了 C-PEEK 复合材料在不同条件下的摩擦性能，为材料应用提供了实验数据和分析结果，并展示了 C-PEEK 复合材料良好的摩擦磨损性能，结果如下：

a. 本文通过原料混合、材料干燥、粒材制备、丝材挤出和卷曲以及丝材热处理干燥过程，高精度制备出了含量为 10% 的 C-PEEK 复合丝材。并依次通过激光测径装置、丝材牵引装置后收卷成型，成功控制丝材直径为 (1.75 ± 0.05) mm。

b. 当滑动速度为 15 mm/s、载荷为 30 MPa、温度为 50 $^{\circ}\text{C}$ ，实验时长为 1h 时，各配对副摩擦系数均小于 0.35，由高到低为：ZrO₂ 陶瓷球+C-PEEK>GCr15 钢球+C-PEEK。并且 C-PEEK 打印样品对磨 GCr15 钢球和 ZrO₂ 陶瓷球时对应的线磨损量分别为 50.7 μm 以及 60.1 μm 。

c. 不同磨合时间、不同滑动速度、不同载荷和不同温度条件，均会对 C-PEEK 的摩擦系数产生影响。随着接触时长、滑动速度以及外加载荷的增加，C-PEEK 材料的磨损量均有所增加，但摩擦系数均维持在 0.30 左右。

d. 温度的提高会显著加剧 C-PEEK 复合材料的表面磨损深度。在滑动速度为 15 mm/s、载荷为 30 MPa 以及接触时长为 1 h 的试验条件下，当温度逐渐上升时，C-PEEK 材料的磨损量会随着温度的升高而增加。在温度达到 200 $^{\circ}\text{C}$ 时，其磨损量约为 164.9 μm 。但是 C-PEEK 材料的摩擦系数会在温度为 200 $^{\circ}\text{C}$ 时低至 0.15。

参考文献

- [1] 赵巍. 纳米氧化物粉体/PEEK 复合材料的制备工艺研究[D]. 天津: 天津大学, 2002.
- [2] 栾加双. 聚醚醚酮纤维的制备及性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [3] 杨丽龙. 石墨烯/聚醚醚酮导电复合材料的制备和性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [4] 宋禹莫. 溶液共混法制备聚醚醚酮/羟基磷灰石复合材料[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

- [5] Berretta S, Evans K, Ghita O. Additive manufacture of PEEK cranial implants: Manufacturing considerations versus accuracy and mechanical performance[J]. *Materials and Design*, 2018, 139: 141–152.
- [6] Luo Meng, Tian Xiaoyong, Zhu Weijun, et al. Controllable interlayer shear strength and crystallinity of PEEK components by laser-assisted material extrusion[J]. *Journal of Materials Research*, 2018, 33(11): 1632–1641.
- [7] Wong K, Hernandez A. A review of additive manufacturing[J]. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, 2012: 1–10.
- [8] Berretta S, Davies R, Shyng Y T, et al. Fused deposition modelling of high temperature polymers: exploring CNT PEEK composites[J]. *Polymer Testing*, 2017, 63: 251–262.
- [9] 廖俊波. 聚醚醚酮基导热复合材料的制备与性能研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
- [10] 邓纯博, 刘冬妍, 刘吉泉, 等. 聚醚醚酮及其复合材料作为骨科植入物的研究进展[J]. *生物医学工程与临床*, 2009, 13(5): 473–476.
- [11] 陈志华. 短纤维增强 PEEK 复合材料钻削加工性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2006.
- [12] Mansour S, Hague R. Impact of rapid manufacturing on design for manufacture for injection moulding[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2003, 217(4): 453–461.
- [13] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展[J]. *机械制造与自动化*, 2013, 42(4): 1–4.
- [14] 李涤尘, 苏秦, 卢秉恒. 增材制造——创新与创业的利器[J]. *航空制造技术*, 2015(10): 40–43.
- [15] Xu C, Quinn B, Lebel L L, et al. Multi-material direct ink writing(DIW) for complex 3dmetallic structures with removable supports[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2019, 11(8): 8499–8506.
- [16] Mohammadzadeh M, Fidan I. Tensile performance of 3d-printed continuous fiber-reinforced nylon composites[J]. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2021, 5(3): 68.
- [17] 杨洋. 3D 打印用碳纤维/聚醚醚酮复合材料的制备及性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [18] Tofail S A M, Koumoulos E P, Bandyopadhyay A, et al. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities[J]. *Materials Today*, 2018, 21(1): 22–37.
- [19] Wang Yuxuan, Zhou Yonghui, Lin Lanying, et al. Overview of 3D additive manufacturing(AM) and corresponding AM composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 139:106114.
- [20] Ivanova O, Williams C, Campbell T. Additive manufacturing(AM) and nanotechnology: promises and challenges[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2013, 19(5): 353–364.
- [21] Revilla L M, Özcan M. Additive manufacturing technologies used for processing polymers: current status and potential application in prosthetic dentistry[J]. *Journal of Prosthodontics*, 2019, 28(2): 146–158.
- [22] Bourell D, Kruth J P, Leu M, et al. Materials for additive manufacturing[J]. *CIRP Annals*, 2017, 66(2): 659–681.
- [23] 钟莹洁. 短碳纤维及微纳氧化锆颗粒增强聚醚醚酮复合材料的摩擦学及力学性能研究[D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2010.
- [24] 谢文迪. 3D 打印高性能聚醚醚酮的制备及其摩擦学性能研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- [25] Shibuya N, Porter R S. A kinetic study of PEEK sulfonation in concentrated sulfuric acid by ultraviolet-visible spectroscopy[J]. *Macromolecules*, 1992, 25(24): 6495–6499.
- [26] Kizuki T, Matsushita T, Kokubo T. Apatite-forming PEEK with TiO₂ surface layer coating[J]. *Journal of Materials Science-Materials in Medicine*, 2015, 26(1): 1–9.
- [27] Basgul C, Yu T, Macdonald D W, et al. Structure-property relationships for 3D-printed PEEK intervertebral lumbar cages produced using fused filament fabrication[J]. *Journal of Materials Research*, 2018, 33(14): 2040–2051.
- [28] Stratton P A A, Pasko K M, Brockett C L, et al. The biologic response to polyetheretherketone(PEEK) wear particles in total joint replacement: a systematic review[J]. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 2016, 474(11): 2394–2404.
- [29] 田小永, 刘腾飞, 杨春成, 等. 高性能纤维增强树脂基复合材料 3D 打印及其应用探索[J]. *航空制造技术*, 2016(15): 26–31.
- [30] Rinaldi M, Cecchini F, Pigliaru L, et al. Additive manufacturing of polyether ether ketone (PEEK) for space applications: a nanosat polymeric structure[J]. *Polymers*, 2021, 13(1): 11.
- [31] Chen Qing, Zhang Yuanyuan, Huang Pei, et al. Improved bond strength, reduced porosity and enhanced mechanical properties of 3D-printed polyetherimide composites by carbon nanotubes[J]. *Composites Communications*, 2022, 30: 101083.
- [32] Liaw C Y, Tolbert J W, Chow L W, et al. Interlayer bonding strength of 3D printed PEEK specimens[J]. *Soft Matter*, 2021, 17(18): 4775–4789.
- [33] Kennedy Z C, Christ J F, Fenn M D, et al. Mica filled polyetherketoneketones for material extrusion 3D printing[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 49: 102492.
- [34] Li Weijie, Sang Lin, Jian Xigao, et al. Influence of sanding and plasma treatment on shear bond strength of 3D-printed PEI, PEEK and PEEK/CF[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2020, 100: 102614.
- [35] Panayotov I V, Orti V, Cuisinier F, et al. Polyetheretherketone(PEEK) for medical applications[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2016, 27(7): 118.
- [36] Haleem A, Javaid M. Polyether ether ketone(PEEK) and its 3D printed implants applications in medical field: An overview[J]. *Clinical Epidemiology and Global Health*, 2019, 7(4): 571–577.