

· 研究论文 ·

多尺度增强体改性对聚醚醚酮复合材料摩擦磨损性能的影响

王露露^{1,2} 薛键鑫¹ 李杰^{1*} 陆焕焕¹ 王帅¹ 刘建¹ 宋晨飞¹ 逢显娟^{1,2*}

(河南科技大学¹ 高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室² 化学化工学院 洛阳 471023)

摘要 针对聚醚醚酮(PEEK)在高载荷工况下承载能力不足及摩擦稳定性差的问题,本研究构建了碳纤维(CF)/碳纳米管(MWCNTs)多尺度协同增强体系,并引入聚醚酰亚胺(PEI)和第三代聚酰胺-胺(PAMAM)进行界面化学改性.通过上浆与接枝实现MWCNTs在CF表面的均匀负载,制备了不同结构复合材料.结果表明,改性后界面形成稳定共价键合,显著增强界面结合与载荷传递能力.与纯PEEK相比,复合材料硬度和导热性能均得到提升,其中CF-PAMAM-MWCNTs/PEEK综合性能最优.在130 N下,其摩擦系数和比磨损率分别降低约15.8%和31.97%,在3~9 mm/s范围内磨损率降低约65%~75%.性能提升归因于多尺度增强体协同作用及稳定摩擦膜的形成,有效抑制纤维拔出和三体磨损.

关键词 聚醚醚酮; 碳纤维; 碳纳米管; 界面改性; 摩擦磨损

引用: 王露露, 薛键鑫, 李杰, 陆焕焕, 王帅, 刘建, 宋晨飞, 逢显娟. 多尺度增强体改性对聚醚醚酮复合材料摩擦磨损性能的影响. 高分子学报, 2026, 57(7), 1551-1565.

Citation: Wang, L. L.; Xue, J. X.; Li, J.; Lu, H. H.; Wang, S.; Liu, J.; Song, C. F.; Pang, X. J. Effect of multiscale reinforcement modification on the tribological performance of poly(ether ether ketone) composites. *Acta Polymerica Sinica* (in Chinese), 2026, 57(7), 1551-1565.

聚醚醚酮(poly(ether ether ketone), PEEK)作为一种处于金字塔顶端的特种半结晶热塑性工程塑料,凭借其卓越的耐热性、化学稳定性、自润滑性以及优异的力学性能^[1],在航空航天、汽车制造、电子信息及生物医疗等高端领域得到了广泛应用^[2].然而,随着现代工业对关键零部件在极端工况下服役性能要求的不断提高,纯PEEK材料在承载能力、耐磨性及导热性等方面的局限性日益凸显,难以满足高负荷、高滑动速度下的严苛摩擦学应用需求^[3].另一方面,对于增强体和基体确定的复合材料体系,其诸多性能均取决于其界面性质.从摩擦学角度来讲,强的界面结合强度有助于改善复合材料内部应力的传递、分散,提高其承载能力,进而增强其减摩抗磨

性^[4];但界面粘结强度过高则会引发界面区域应力集中,导致界面韧性下降,恶化复合材料抗冲击的能力,从而不利于复合材料在高承载、高速极端苛刻条件下维持稳定的摩擦学特性^[5].为了进一步提升PEEK的综合性能,特别是其摩擦磨损性能,引入高强度、高模量的碳纤维(CF)作为增强体已成为主流且高效的核心策略^[6].碳纤维增强聚醚醚酮(CF/PEEK)复合材料不仅兼具了PEEK基体的优良特性,更显著提高了材料的比强度和比模量,成为极具潜力的减摩耐磨材料.

尽管碳纤维具有优异的力学性能,但其表面呈现高度的化学惰性,表面能低且缺乏活性的极性官能团,导致其与非极性或弱极性的PEEK基体之间难以形成有效的化学键合或物理锚定^[7],

2026-02-25收稿, 2026-03-25录用, 2026-06-23网络出版.

基金项目: 国家自然科学基金(基金号 92266205, 52575206), 宁波市重点研发计划暨“揭榜挂帅”(项目号 2023Z006), 河南科技大学优秀青年创新人才项目(项目号 2025HNKJDXQNCXRC01).

* 通信联系人, E-mail: lijie@huast.edu.cn; xjpang2001@huast.edu.cn

doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26026; CSTR: 32057.14.GFZXB.2026.7591

这种弱的界面结合力在受到摩擦剪切力作用下,极易诱发纤维与基体的剥离与纤维拔出,从而加剧磨损并制约复合材料整体性能的充分发挥.因此,通过碳纤维表面改性引入活性官能团、构筑稳固界面过渡层,已成为提升CF/PEEK复合材料摩擦学性能的关键.目前修饰CF表面的方法可分为物理法、化学法及物理化学结合法,具体包括氧化法、化学接枝和涂层改性等^[8-10].涂层法由于设计灵活性高、成本低、实施效果好等优点,极具研究与应用价值.上浆处理、气相沉积和偶联剂处理是涂层法中较常用的方法.在众多改性方法中,表面上浆和化学接枝因其对纤维损伤小且工艺可控性强而备受青睐.Hassan等^[11]通过化学接枝将胺化聚醚醚酮(PEEK-NH₂)固定于碳纤维表面(PEEK-NH₂@CF),并用于制备CF/PEEK复合材料,结果显示纤维-基体界面结合性显著提升,复合材料层间剪切强度(ILSS)提高约33.4%,储能模量及弯曲力学性能同步增强;Ren等^[12]采用硫化聚醚砜(s-PSF)/氧化石墨烯复合上浆剂对碳纤维进行表面改性,有效提升了CF/PEEK复合材料的弯曲强度、弯曲模量及ILSS,充分验证了上浆剂的界面强化效应;Yuan等^[13]开发的半脂肪族聚酰亚胺(SA-PI)水性上浆剂,借助分子链中的酰亚胺结构与碳纤维表面形成分子间相互作用,同时与PEEK基体发生 π - π 堆积及分子链缠结,显著提升了CF/PEEK复合材料的弯曲性能与层间剪切性能.上述研究表明,接枝与上浆改性不仅能构建稳定的界面过渡层,更可通过引入活性官能团提高复合材料的界面强度,因此成为近年来碳纤维表面改性的有效且具有应用前景的技术途径.在界面改性剂的选择上,聚醚醚酮(PEI)因其与PEEK具有相似的芳香族分子结构和优异的热力学相容性,常被用作高性能上浆剂以优化界面润湿性^[14].聚酰胺-胺(PAMAM)树状大分子凭借其独特的三维立体结构、高度支化的分子链以及外围丰富且可调控的活性官能团,可作为“分子桥梁”在纤维与基体间构建化学键合,实现载荷的高效传递^[15].但单一成分的上浆剂或偶联剂在提升复合材料界面性能时仍存在瓶颈,难以同时实现高强度界面结合与界面自润滑的双重需求.碳纳米管(MWCNTs)因其卓越的力学性能和独特的自润滑特性,是构筑高性能复合改性体系的理想填

料^[16].为此,本研究提出在传统PEI上浆或PAMAM偶联剂中引入MWCNTs,通过构建微-纳多尺度协同增强界面并结合界面化学改性,实现“高强界面结合+界面自润滑”的双重功能需求,借助多尺度增强的协同效应全面优化CF/PEEK复合材料的综合性能.

值得注意的是,采用大分子接枝改性碳材料时,普遍存在碳材料表面反应位点少以及大分子空间位阻效应导致的接枝效率低、反应活性受限等问题.PAMAM树状分子的代数是影响其接枝效果的关键因素:代数过低,活性基团数量不足;代数过高,分子内部空间拥挤且表面位阻大,反而阻碍了后续的化学反应^[17].Gao等^[18]研究发现,在碳纤维表面接枝G1~G4代PAMAM后,复合材料的层间剪切强度(ILSS)和界面剪切强度(IFSS)分别提升约55%和111%,证实了“低代PAMAM构建过渡界面层可有效强化力学界面”的结论,但该研究同时指出,低代PAMAM虽能降低空间位阻,却存在活性基团数量不足的缺陷.Zhao等^[19]将1~3代三聚氰胺基树枝状分子接枝到CFs表面,系统研究了改性前后CF的微观结构与界面特性.结果表明,三聚氰胺基树枝状分子接枝可显著提升CF表面粗糙度,且该效应随接枝时间延长而愈发显著,经第三代树枝状分子改性后,CF/环氧复合材料的界面剪切强度和冲击强度分别提升61.8%和39.9%.基于此,本研究中选择第三代树枝状聚酰胺-胺树状分子作为改性剂,既能提供足够多的反应位点,又可避免因分子位阻过大导致接枝效率下降、反应可控性降低的问题,从而在碳纤维表面实现较高的接枝密度,为构筑高效应力传递界面奠定结构基础.然而,目前相关研究仍主要集中于聚合物复合材料力学性能的提升,对CF与PEEK基体界面结合特性调控摩擦学行为的影响关注不足,同时,摩擦学领域的现有研究多局限于单一增强改性策略,对基于上浆或接枝改性CF制备的CF/PEEK复合材料的摩擦学行为规律缺乏系统认知.

针对上述问题,本研究通过化学改性技术将多壁MWCNTs负载于CF表面,通过引入第三代PAMAM树状分子作为桥梁,构建了CF-PAMAM-MWCNTs多尺度增强体结构,依次制备了纯PEEK、20%CF-1%MWCNTs/PEEK、

CF-PEI-0.3%MWCNTs/PEEK 以及 CF-PAMAM-0.5%MWCNTs/PEEK 4种复合材料,利用 UMT-2 多功能摩擦磨损试验机,在不同载荷和滑动速度条件下,系统表征并对比了这4种材料的摩擦系数与比磨损率,结合磨损表面的三维形貌分析,深入探讨其磨损机理,重点分析纳米级 MWCNTs 和微米级 CF 的多尺度协同作用对材料减摩抗磨性能的提升效果,研究结果为高性能 CF/PEEK 摩擦学材料的设计与制备提供理论依据和技术参考。

1 实验部分

1.1 实验材料

聚醚醚酮(PEEK),分子筛目数 1200#,粒径约 10 μm ,英国威格斯 450P,东莞市川澳工程塑胶原料有限公司;碳纤维(CF),粒径 7 μm ,长度 7 μm ,日本东丽 T700-12K,购于深圳佳晟新材料有限公司;多壁碳纳米管(MWCNTs),分子量为 12.01,纯度>97.5%,管径 3~15 nm,长度 15~30 μm ,购于佳兆业(广东)新材料有限公司;聚乙烯亚胺(PEI),分子量为 7.0×10^4 ,50 wt%水溶液,购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司;第三代 PAMAM 树枝状聚合物,分子量为 6909,牌号 CYD-130A,购于威海晨源高分子有限公司。

1.2 样品制备

经前期研究^[20,21]基础确定材料组成为(表 1):CF-MWCNTs/PEEK 复合材料中含质量分数(总质量为 100)为 20% CF、1% MWCNTs 和 79% PEEK,CF-PEI-MWCNTs/PEEK 复合材料中经 PEI 上浆剂处理的增强体质量分数为 20%,PEEK 质量分数为 80%,CF-PAMAM-MWCNTs/PEEK 复合材料中经 PAMAM 偶联剂处理的增强体质量分数为 20%,PEEK 质量分数为 80%。首先将干燥后的粉料装至石墨模具中,预压成块后采用 ZT-40-21Y 型真空热压烧结炉(上海晨华科技股份有限公司)以 340 $^{\circ}\text{C}$ 、10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 和 13 MPa/min 的速度持续升温加压,烧结环境保证真空度为 0.1~100 Pa,然后在 340 $^{\circ}\text{C}$ 、13 MPa 的条件下保温保压 10 min,随炉冷却温度降至 150 $^{\circ}\text{C}$ 以下取出模具并脱模。压制成尺寸为 $\phi 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的圆柱块体。最终制备出纯 PEEK、CF-MWCNTs/PEEK、CF-PEI-MWCNTs/PEEK 以及 CF-PAMAM-MWCNTs/PEEK 4 种材料。所制备试样表面通过 800#、1000#、1200#、1500#、2000#、3000# 金相砂纸研磨并抛光,使得试样表面的粗糙度 R_a 控制在 100~150 nm,之后放在无水乙醇中使用 030S 型超声波清洗仪清洗干净。

Table 1 Design table of reinforcement and modification.

Composite material	Mass fraction (%)	
	Enhancement phase	Matrix group (%)
PEEK	0	100% PEEK
CF-MWCNTs/PEEK	20%CF-1%MWCNTs	79% PEEK
CF-PEI-MWCNTs/PEEK	20%(CF-PEI-0.3%MWCNTs)	80% PEEK
CF-PAMAM-MWCNTs/PEEK	20%(CF-PAMAM-0.5%MWCNTs)	80% PEEK

PEEK: poly(ether ether ketone); CF: carbon fiber; MWCNTs: multi-walled carbon nanotubes; PEI: polyetherimide; PAMAM: poly(amidoamine) dendrimer.

1.3 分析表征

结构表征:通过扫描电子显微镜(SEM, JSM-IT100,日本,JEOL Ltd.)观察改性 CF 的形态,通过高分辨透射电子显微镜(TEM, JEM-2100,日本)观察改性后的界面区域,使用 X 射线光电子能谱(XPS, ESCALAB 250Xi,美国, Thermo Fisher Scientific)分析改性后 CF 表面的化学组成.利用傅里叶红外光谱(FTIR, IR Tracer-100,日本, Shimadzu)对 CF、CF-MWCNTs、CF-PEI-MWCNTs 和 CF-PAMAM-MWCNTs 的官能团进行分析,测试范围为 500~4000 cm^{-1} 。

表面润湿性表征:使用光学接触角测试(ThetaLite,芬兰, Biolin Scientific)来测定 CF 改性前后复合材料的表面张力。

力学性能表征:使用数显邵氏硬度计 LXD-D 型(上海立信橡塑仪器有限公司)对改性前后 CF/PEEK 复合材料进行硬度测试,在压座与试样紧密接触后 1 s 内读取硬度计的最大值,每组至少测量 5 次取平均值。

导热性能表征:通过 DR-III 导热系数测试仪(湘潭市湘仪仪器有限公司)对改性前后 CF/PEEK 复合材料的导热系数及热阻性能进行了测定,以

评估并比较各材料的热学性能。

摩擦学性能表征：利用UMT多功能摩擦磨损试验机(UMT-2, 北京, 布鲁克科技有限公司), 对复合材料的摩擦磨损性能进行表征. 摩擦实验采用UMT-2型多功能摩擦磨损试验机, 将直径40 mm、厚度10 mm的样品固定于UMT摩擦磨损试验机的往复平台上. 选用 $\phi=6.35$ mm的GCr15轴承钢球作为对磨副, 粗糙度 $R_a=0.02$ μm , 硬度为62 HRC, 变载试验条件为: 载荷50、70、90、110和130 N, 滑动速度5 mm/s, 滑动时间30 min, 单程划痕长度6 mm; 变速试验条件: 滑动速度3、5、7和9 mm/s, 载荷50 N, 摩擦时间30 min, 单程划痕长度6 mm. 通过扫描电子显微镜(SEM)观察改性CF/PEEK复合材料的磨损表面形貌. 通过三维光学轮廓仪(S neox, 西班牙, Sensofar)对磨损形貌测量磨痕深度和宽度, 并计算纯PEEK材料、CF-MWCNTs/PEEK复合材料、CF-PEI-MWCNTs/PEEK复合材料和CF-PAMAM-MWCNTs/PEEK复合材料的比磨损率, 计算方法如下式:

$$\omega = \frac{\Delta V}{Fvt} \quad (1)$$

式中: ω 为比磨损率($\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$); ΔV 为磨损体积(mm^3); F 为施加的载荷(N); v 为滑动速度(mm/s); t 为摩擦时间(s).

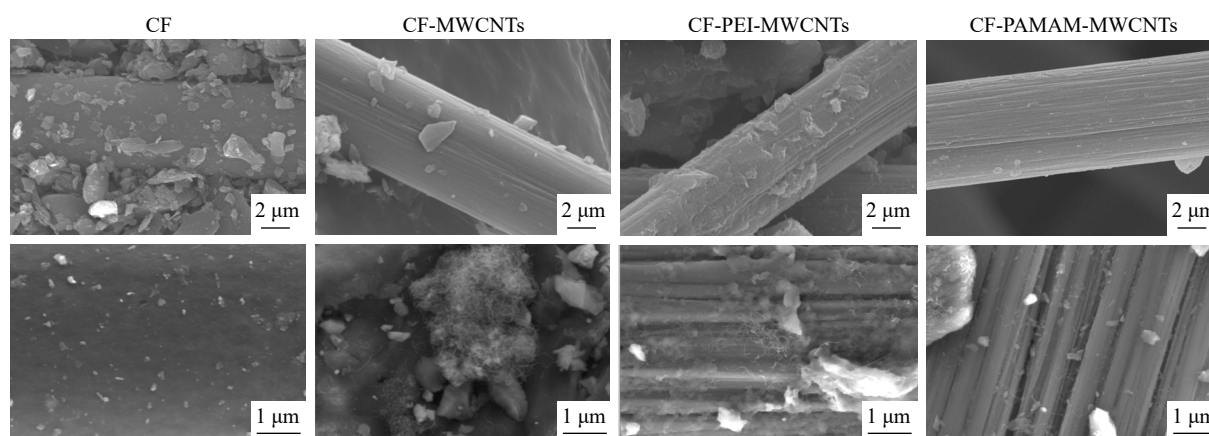


Fig. 1 SEM images of CF before and after modification under different magnificants.

为了进一步观察PEI和PAMAM改性碳纤维在界面处的分布状态, 采用高分辨透射电镜(TEM)对界面过渡区进行了表征. 如图2(a)所示, 线性PEI上浆处理后, MWCNTs被一层薄而均匀的聚合物包覆层紧密锚定在CF表面, 界面层厚度较窄, 这一结构有助于维持较高的填料填充密

2 结果与讨论

2.1 复合材料结构及表面润湿性表征

图1为商用CF、CF-MWCNTs、CF-PEI-MWCNTs、CF-PAMAM-MWCNTs的形貌图. 为提高原始CF在实际应用中的强度和力学性能, 商用CF产品普遍会对其表面进行上浆处理, 所以其表面会附着杂质和纤维碎屑^[22]. 未经表面改性的物理混合的CF-MWCNTs粉末形貌图显示碳纳米管因分散性不好导致表面出现块状或颗粒状团聚物, 这表明单纯的机械混合难以实现MWCNTs的均匀分散和有效负载. 经PEI上浆剂改性后的碳纤维表面形貌图显示其表面包覆一层PEI薄膜, 且可观察到MWCNTs形成的部分网状/缠绕结构嵌入到纤维纵向沟槽中, 说明PEI上浆处理通过有效填补沟槽使MWCNTs均匀分布, 进而让CF与PEEK基体形成更多接触界面, 最终有效增强复合材料的界面黏附能力^[23]. 经PAMAM偶联剂改性后的碳纤维表面形貌图显示纤维表面粗糙且均匀, 高倍图清晰显示MWCNTs均匀的分散在碳纤维上, 这种均匀的覆盖不仅极大地增加了CF的表面粗糙度和比表面积, 还有利于通过增强机械连锁效应来提升CF与基体间的界面结合强度^[24].

度, 为载荷传递提供了高效路径. 相比之下, 图2(b)呈现了第三代PAMAM树枝状大分子接枝改性后的界面形貌. 得益于PAMAM高度支化的三维结构与空间位阻效应, CF与MWCNTs之间形成了厚度显著增加、形貌更为复杂的聚合物过渡层. 该厚质界面层通过机械互锁与共价键合的协

同作用,将MWCNTs深度锚固于CF表面,构建了稳定的交联网络.这种界面结构可更有效地分担外加载荷,抑制纤维剥离及MWCNTs脱落,

从而显著提升复合材料的减摩耐磨性能.

图3(a)~3(e)为CF改性前后表面化学组成的XPS分析结果.从全谱图可见,改性前后CF表

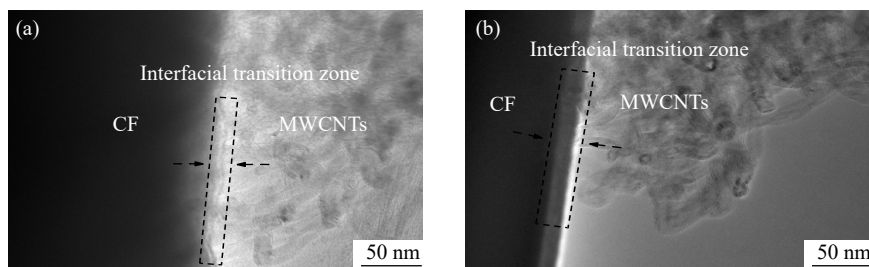


Fig. 2 TEM images of the interfacial transition zones in (a) CF-PEI-MWCNTs and (b) CF-PAMAM-MWCNTs composites.

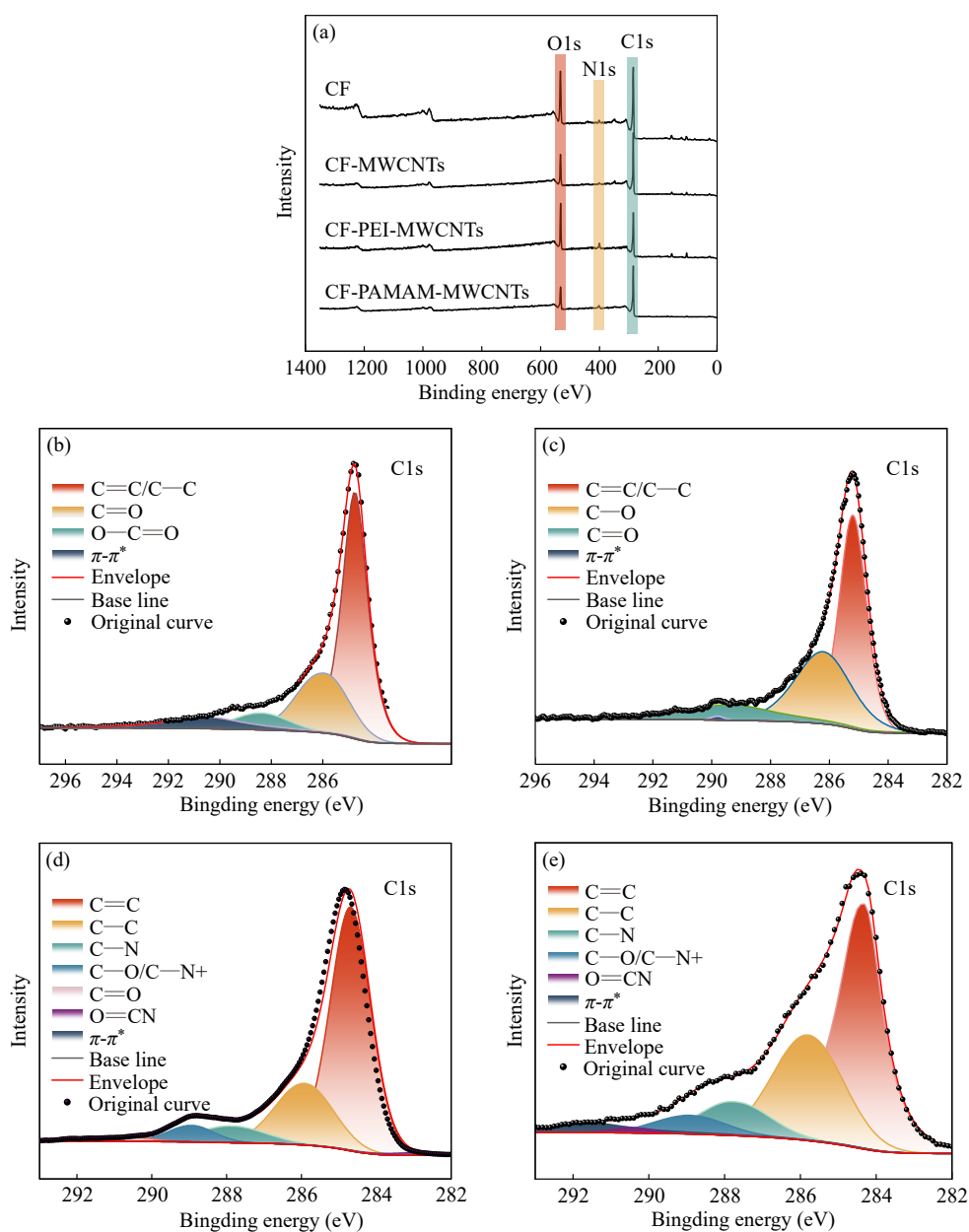


Fig. 3 (a) XPS survey spectra; C1s peak fitting curves of (b) CF, (c) CF-MWCNTs, (d) CF-PEI-MWCNTs, (e) CF-PAMAM-MWCNTs.

面的主要元素为碳、氮、氧3种. 经过PAMAM与PEI改性后的CF表面均检测到了N1s的特征信号, 这表明2种含氨基的改性剂已成功引入CF表面^[25-27]. 为深入探究表面化学键的变化, 对C1s谱图进行了高斯拟合, 结果如图3(b)~3(e)所示. 未处理的原始CF及CF-MWCNTs样品(图3(b)和3(c))的C1s谱图为4个特征峰, 其结合能分别为284.80、286.30、289.0和290.5 eV, 依次对应C=C/C-C、C=O、-COOH和 $\pi-\pi^*$ 官能团. 经过PAMAM和PEI改性后的样品(图3(d)和3(e))在约286.50 eV处均出现了1个新的特征峰. 该峰为C-NH_x吸收峰, 其形成机理是羧基化MWCNTs表面-COOH与PAMAM和PEI分子末端的氨基(-NH₂)发生酰胺化反应, 进而生成共价键合的酰胺键. C-N键特征峰的出现, 直接证明PAMAM和PEI是通过化学键而非物理吸附成功接枝到CF表面的. 同时, 这种稳固的界面键合作用也表明, MWCNTs借助该化学机制被有效

固定于CF表面.

为深入解析PAMAM、PEI及MWCNTs与CF的作用机制, 对改性前后的CF进行了FTIR分析, 结果如图4所示. 引入MWCNTs后, CF-MWCNTs中羟基的吸收峰强度较CF减弱, 这表明MWCNTs的羧基与CF表面的羟基产生弱相互作用力(如氢键), 导致羟基特征峰信号减弱. 在经过PEI和PAMAM化学改性的CF谱图, 在155~1648 cm⁻¹峰处出现酰胺键(CO-NH)的特征吸收峰, 表明线性聚合物PEI和树枝状聚合物PAMAM末端-NH₂与MWCNTs表面-COOH成功发生了酰化反应, 产生了共价接枝^[28-30]. FTIR检测到的酰胺键特征峰与XPS的分析结果吻合, XPS全谱图中改性CF表面出现了明显的N元素特征峰, 且高分辨C1s谱图中出现酰胺键中C-N的特征峰. 2种表征手段的结果相互印证, 不仅证实了酰化反应的发生及酰胺键的成功形成, 更共同验证了CF表面已成功改性.

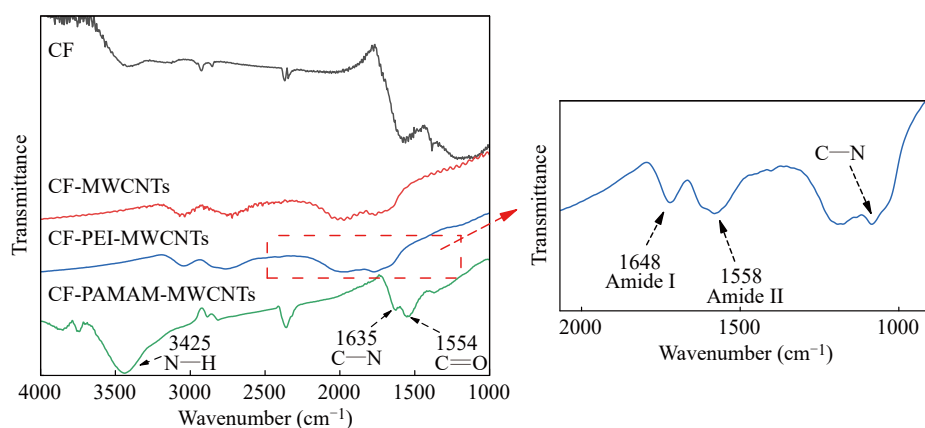


Fig. 4 FTIR spectra of CF before and after modification.

接触角测量是表征固体表面润湿行为并间接计算表面能的常用手段, 其理论基础为杨氏方程, 指出表面能与润湿性正相关: 表面能越高, 液体越易在其表面铺展^[31]. 在CF及其复合材料的界面研究中, 通过测定对去离子水和甘油的接触角可以定量比较改性前后的表面能, 从而评估界面改性效果^[32]. 结合图5的接触角与表面能数据可见, 4种材料的表面能与接触角呈反比关系, 这一规律由材料表面极性改性程度、增强相特性及液体性质共同调控: 纯PEEK表面能最高, 因基体含醚键、酮基等极性基团, 无疏水增强相, 故在去离子水和甘油中接触角均最低; CF-MWCNTs/PEEK受碳纤维与碳纳米管石墨化非

极性结构支配, 表面能最低、接触角最高; 经PEI上浆剂改性的CF-PEI-MWCNTs/PEEK引入极性基团, 表面能提高至约30 mJ·m⁻²并导致接触角下降; 而以PAMAM偶联剂改性的CF-PAMAM-MWCNTs/PEEK暴露更多极性基团, 表面能进一步升至约35 mJ·m⁻²、接触角继续减小. 此外, 甘油因极性更强、表面张力更低, 故同一材料在甘油中的接触角均低于去离子水体系, 且材料间接触角差值更明显, 进一步验证了表面极性对亲疏水性的核心调控作用.

2.2 复合材料硬度及导热性能表征

图6为CF改性前后复合材料的硬度和导热系数: 纯PEEK的本征导热系数为0.32 W·m⁻¹·K⁻¹,

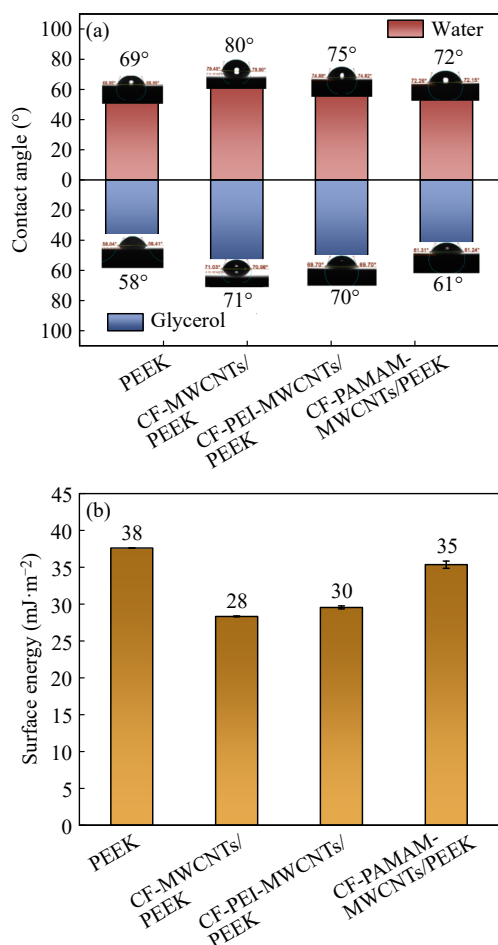


Fig. 5 Contact angles (a) and surface energies (b) of four materials with different liquids.

基础硬度为 88.9 HD, 呈现出纯 PEEK 材料典型的热学与力学特征; CF-MWCNTs/PEEK 复合材料因加入了高模量、高硬度的 CF 和 MWCNTs 导致硬度较纯 PEEK 提升约 3.94%, 同时填料阻碍了 PEEK 分子链的移动, 进一步增强了材料硬度, CF 在 PEEK 基体中均匀分散形成网络结构, 适量 MWCNTs 则填充了 CF 间的空隙, 二者协同构建多尺度导热网络, 形成连续导热路径, 从而提高了材料的导热系数^[33]; CF-PEI-MWCNTs/PEEK 因 PEI 末端氨基与羧基化 MWCNTs 的相互作用改善了 MWCNTs 的分散性, 同时通过界面化学键合增强了 CF 与 PEEK 基体的结合强度, 有效减少了界面空隙与缺陷, 该改性方法强化了界面载荷传递能力以维持较高硬度, 硬度升高至 92.1 HD, 导热系数达到了峰值升至 $0.42 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 这主要归功于羧基 MWCNTs 与 PEI 上浆剂的协同作用在 CF 表面形成的连续网络极大地降低了界面热阻, 从而实现了最高效的能量

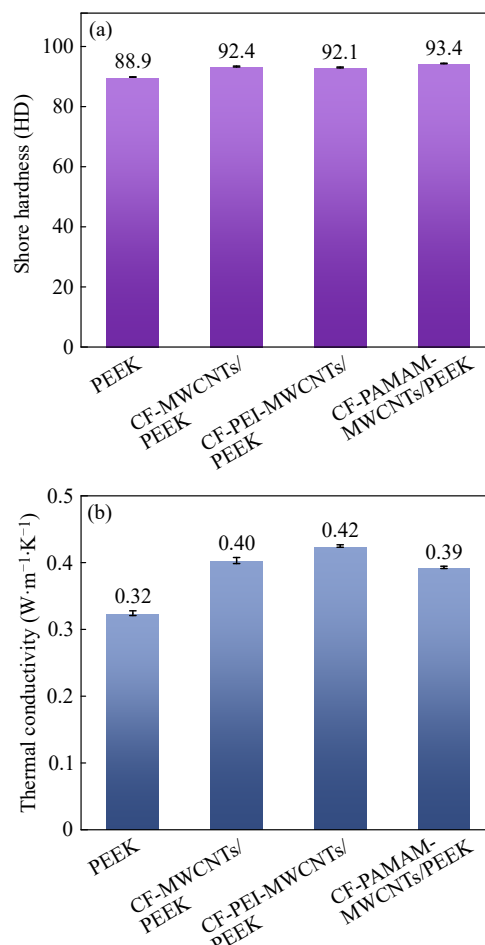


Fig. 6 Properties of the four composite materials: (a) hardness and (b) thermal conductivity.

传递. CF-PAMAM-MWCNTs/PEEK 表现出最高的硬度, PAMAM 第三代树状大分子具有高度支化的结构和丰富的末端官能团, 能够与羧基 MWCNTs 形成极强的共价键合或物理纠缠, 在界面处构建了极为致密的交联网络, 从而显著增强了材料抵抗局部塑性变形的能力, 硬度升高至 93.4 HD, 导热系数降低至 $0.39 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 这可能是由于 PAMAM 虽然增强了机械结合力, 但其复杂的分支结构在界面处可能导致了较厚的聚合物包裹层, 导致界面处的界面热阻显著上升, 从而使导热系数降低. 综上所述, 硬度的提升主要受界面结合强度和填料刚性的控制; 而导热系数的优化则更依赖于界面热阻的降低.

2.3 载荷和速度对 PEEK 复合材料摩擦学性能的影响

图 7 所示为不同载荷下 4 种复合材料的平均摩擦系数和比磨损率. 与纯 PEEK 相比, 改性复合材料在全载荷范围内的摩擦系数与比磨损率均

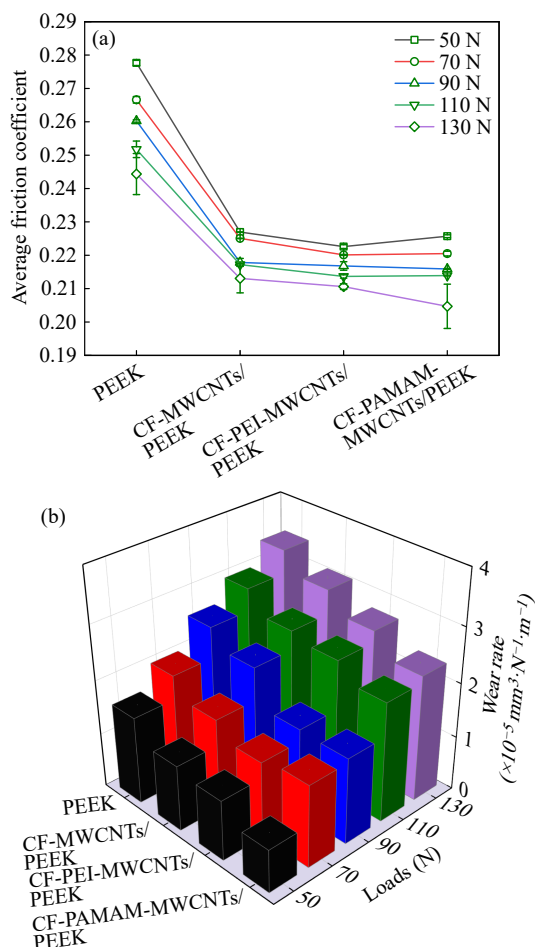


Fig. 7 Average friction coefficients (a) and wear rates (b) of the four composites under different loads.

大幅下降. 在 130 N 载荷下, CF-MWCNTs/PEEK、CF-PEI-MWCNTs/PEEK 和 CF-PAMAM-MWCNTs/PEEK 的摩擦系数分别降低了 13.11%、15.08% 和 15.80%; 对应的比磨损率分别降低了 10.44%、20.68% 和 31.97%. CF-PAMAM-MWCNTs/PEEK 相比于未经过表面处理的 CF-MWCNTs/PEEK, 摩擦系数和比磨损率分别进一步降低了约 3.1% 和 24.0% (130 N); 而与通过 PEI 上浆改性的 CF-PEI-MWCNTs/PEEK 相比, 其在高载荷下的摩擦稳定性更高, 比磨损率降低了 14.2%. 结果表明改性复合材料在摩擦系数和比磨损率上的综合优势主要源于增强体协同与界面强化效应: CF 作为宏观承载骨架有效分担外载, MWCNTs 填补 CF 与基体之间的微米级缺陷并降低应力集中, 而表面改性进一步增强了增强体与 PEEK 基体之间的界面结合强度, 有效抑制了纤维拔出、界面脱粘以及由此诱发的三体磨粒磨损, 从而实现更稳定的减摩与抗磨效果^[34]. 相比之下, PAMAM

偶联剂因末端大量的氨基及更强的界面锚固能力, 使复合材料在全载荷范围内均表现出更低的摩擦系数和比磨损率, 体现出最优的耐磨性能与界面强化效应.

图 8 为不同载荷下 4 种材料的三维形貌图, 用于分析材料的耐磨性能. 纯 PEEK 表现出最差的耐磨性, 即使在低载荷下, 其表面也出现了明显的沟槽, 随着载荷增加至 110 和 130 N, 磨痕中心区域呈现出代表深度的黄绿色, 且边缘隆起明显, 这表明纯 PEEK 表面磨损严重. CF-MWCNTs/PEEK 的磨痕深度较纯 PEEK 变浅, 磨损程度有所减轻, 表明刚性填料起到了一定的承载作用. 经过化学改性的复合材料 CF-PEI-MWCNTs-PEEK 与 CF-PAMAM-MWCNTs 展现出了优异的磨损形貌, 从三维形貌图中可以清晰观察到, 这 2 组材料的磨痕最为平整、浅窄, 且颜色分布主要集中在代表浅磨损的红色区域, 这一现象得益于 PEI 上浆剂与 MWCNTs 之间形成的 π - π 共轭作用, 该作用有效抑制了 MWCNTs 的团聚行为, 促进其在 PEEK 基体中实现均匀分散, 同时, 其共轭作用提升了 CF 与 PEEK 基体间的界面结合强度, 优化了载荷传递效率, 进而确保复合材料在高载荷工况下仍能保持较浅的磨痕, 表现出稳定的抗磨性能^[35]; 而 CF-PAMAM-MWCNTs/PEEK 的三维形貌表面浅且平整, 因 PAMAM 偶联剂末端多个氨基与含有羧基化的碳纳米管生成更多的酰胺键, 以化学键的形式将 MWCNTs 接枝到碳纤维后与 PEEK 基体形成更多化学相互作用, 显著提高纤维和基体的界面结合强度, 均匀分散的 MWCNTs 能形成连续的“增强网络”, 在摩擦过程中更高效地传递载荷, 避免局部应力集中导致材料大块剥落, 从而减小磨痕深度.

图 9 为 4 种复合材料在不同载荷下的磨损表面形貌. 对于纯 PEEK (图 9(a1)~9(a5)), 随着载荷由 50 N 增至 130 N, 表面逐渐出现明显裂纹与大面积片状剥落; 在 130 N 时尤为显著, 裂纹深且广, 表现为大面积的材料迁移. 这一现象源于干摩擦产生的摩擦热使基体局部软化, 在往复应力作用下, 较低载荷为磨合阶段的塑性流动和轻微划痕, 高载荷时接触应力引起基体局部塑性变形、界面裂纹扩展并发生片状脱落, 最终以疲劳磨损与严重的黏着磨损为主; 加入 CF 与

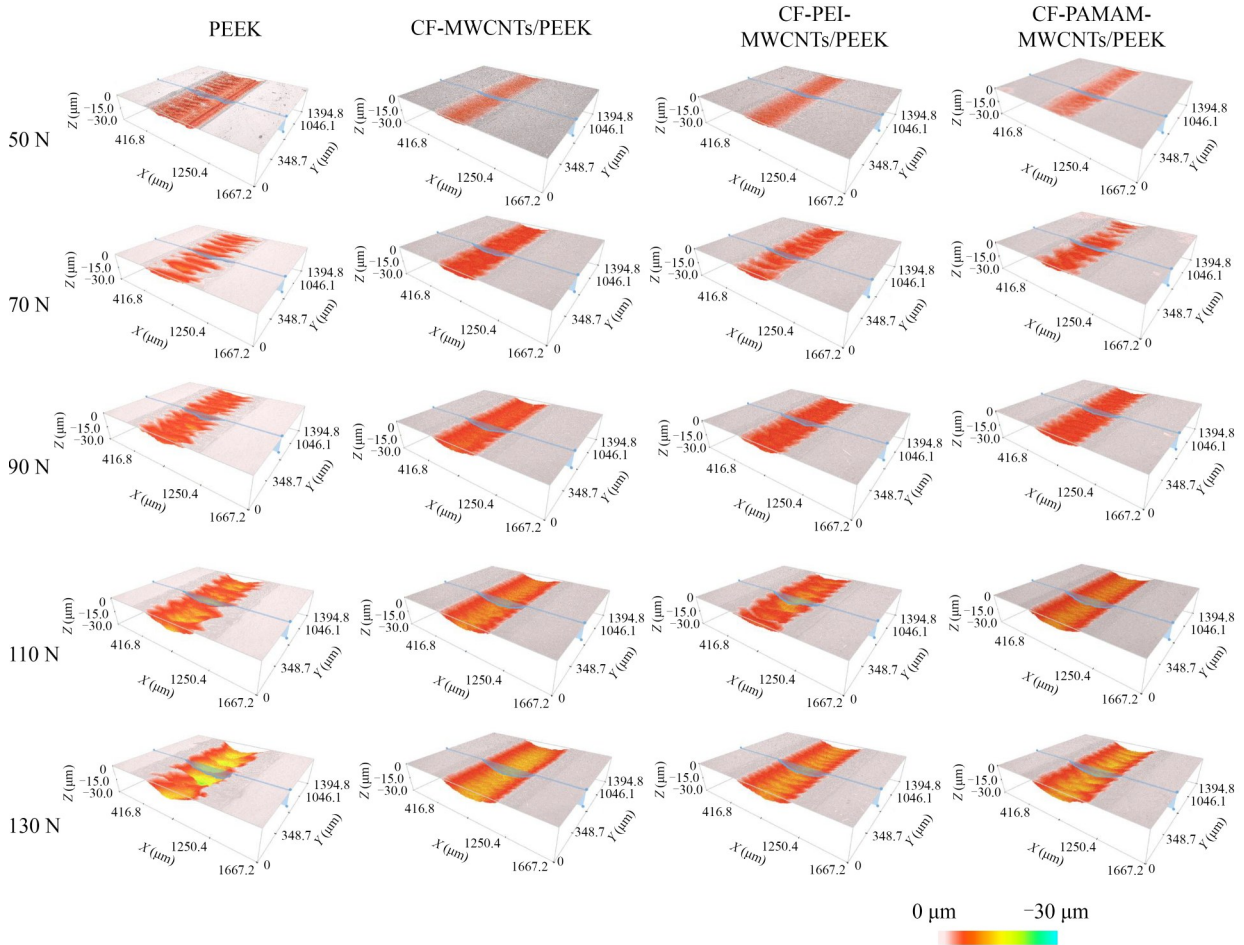


Fig. 8 Three-dimensional morphologies of four materials under different loads.

MWCNTs的CF-MWCNTs/PEEK(图9(b1)~9(b5))使表面变得相对平整,大面积裂纹消失,表现出较浅的犁沟,但仍可见碳纤维断裂和微小的剥落坑,因碳纤维承担了主要的载荷,降低了聚合物基体的局部变形, MWCNTs通过增强基体和润滑作用,使磨损机理从大规模疲劳磨损转变为轻微的磨粒磨损和黏着磨损;进行PEI上浆改性后的CF-PEI-MWCNTs/PEEK(图9(c1)~9(c5)),磨损表面在所有载荷下均更为平整,表面犁沟变浅、变细,出现局部纤维暴露,但整体犁沟变窄、碎屑细小分散,这是因PEI作为界面改性剂显著增强了MWCNTs、CF与PEEK基体之间的界面结合力,材料表现出更高的承载能力,磨损机理以轻微磨粒磨损为主^[36];最优的是CF-PAMAM-MWCNTs/PEEK(图9(d1)~9(d5)),其表面形态最为均匀平整,即便在130 N高载荷下仍仅呈连续的浅而致密划痕,犁沟细小且分布均匀,没有出现明显的剥落坑或深裂纹,PAMAM末端丰富的氨基通过化学锚定增强了填料-基体

的相容性并改善了填料的分散性,同时有利于在摩擦界面构建致密的、富碳纳米相的摩擦薄膜,该薄膜既承担部分接触载荷,又减少了基体与对磨副的直接接触,从而有效抑制黏着与三体磨粒作用,延缓裂纹扩展与材料剥落,显著提高了高载荷工况下的抗磨稳定性^[37]。

图10为不同速度下4种复合材料的平均摩擦系数和比磨损率.与纯PEEK相比,3种改性复合材料在不同滑动速度下均表现出显著降低的摩擦系数和比磨损率,充分体现了增强体引入和界面改性的有效性:纯PEEK在3~9 mm·s⁻¹范围内的平均摩擦系数维持在0.26~0.29,比磨损率在该范围内降低了约69%,表明在干摩擦条件下承载与抗磨能力的局限性;相比之下,CF-MWCNTs/PEEK的平均摩擦系数在全速度区间内降低至约0.22~0.24,较纯PEEK降低约15%~20%,同时比磨损率在对速度下显著下降,最大降幅超过35%,表明微米级CF与纳米级MWCNTs的协同引入有效分担了接触载荷并抑制了基体磨损;进

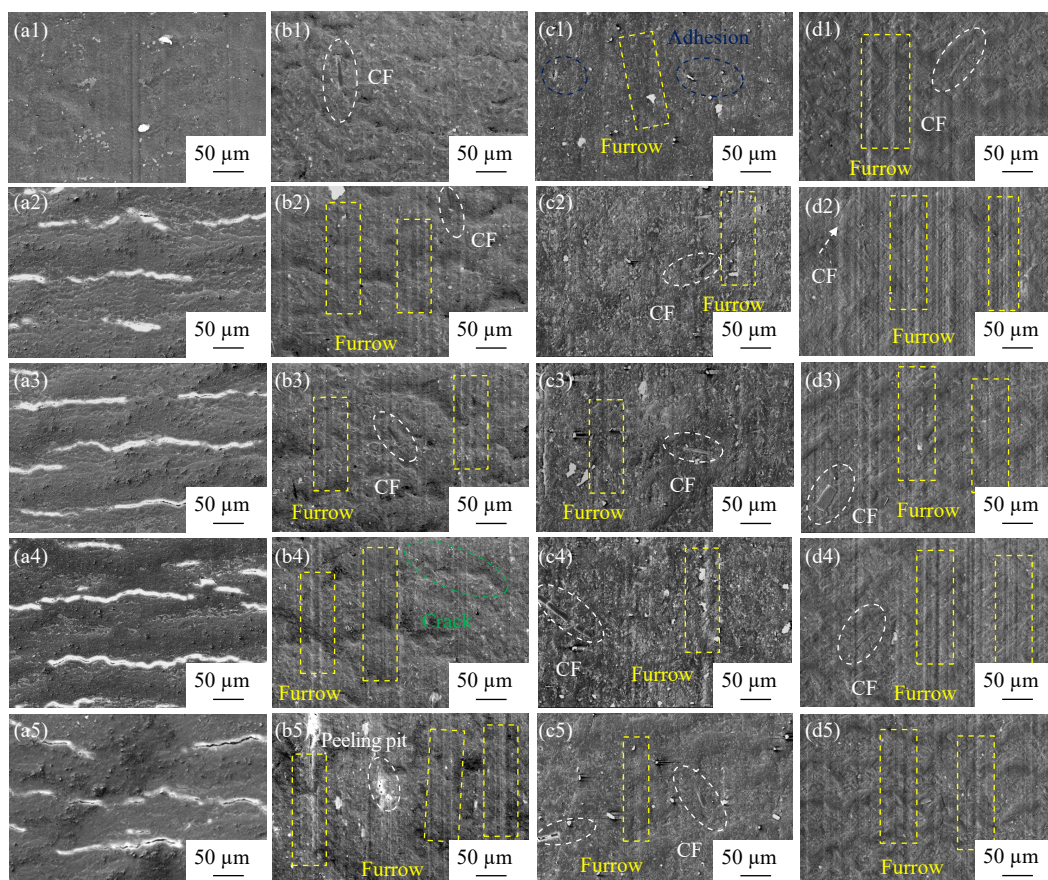


Fig. 9 SEM micrographs of wear surface morphology of four materials under different loads: (a1–d1) 50 N; (a2–d2) 70 N; (a3–d3) 90 N; (a4–d4) 110 N; (a5–d5) 130 N.

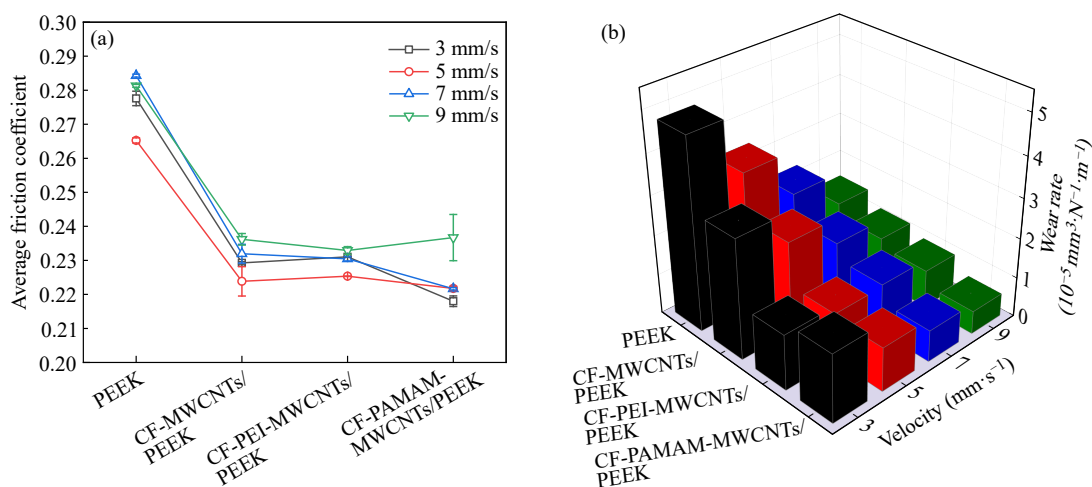


Fig. 10 Average friction coefficients (a) and wear rates (b) of the four composites under different velocities.

一步 PEI 上浆改性后, CF-PEI-MWCNTs/PEEK 在各速度下的摩擦系数明显低于纯 PEEK, 比磨损率相比纯 PEEK 的降幅达到 60% 以上, PEI 上浆剂强化了填料与基体的界面结合强度, 避免了摩擦过程中填料脱落引发的三体磨损, 进而有利于提高耐磨稳定性. 相比之下, CF-PAMAM-

MWCNTs/PEEK 在全速度区间内均表现出最低的摩擦系数约为 0.22, 而在 $9 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 出现轻微回升至 0.24, 可能为高滑动速率下局部接触温升导致的暂态效应, 比磨损率随速度升高持续显著下降, 在中高速度下较纯 PEEK 降低约 65%~75%, 这种显著的减摩与耐磨协同提升表明, PAMAM

通过末端大量氨基既可增强碳纤维-基体界面化学锚固又能更有效地分散MWCNTs,改善载荷传递并抑制增强体/纳米管的拔出与聚集,从而减少第三体磨粒的产生^[38],同时,界面化学键合与更均匀的纳米-微尺度填充有利于在接触面形成连续、粘附性更好的摩擦膜.综上,PAMAM化学改性通过强化界面键合与优化多尺度填充协同作用,显著提升了复合材料的减摩与耐磨性能,从而使复合材料在干摩擦条件下获得最优的综合摩擦学性能.

图11为不同滑动速度下4种材料的三维形貌图.纯PEEK的磨痕深且宽,表面出现不规则的波状褶皱,表明表面磨损严重;加入碳纤维和碳纳米管后,CF-MWCNTs/PEEK磨痕变窄、深度明显减小且表面更均匀,表明刚性增强体分担了

接触应力且碳纳米管作为“固体润滑/增强相”抑制了大块黏着剥落;经PEI上浆改性的CF-PEI-MWCNTs/PEEK磨痕更加均匀平整、深度进一步降低,说明PEI的化学结构提高了碳纤维与基体的界面结合力,改善了MWCNTs的分散性,进而优化复合材料内部的应力传递效率与分布均匀性,增强了载荷传递与磨损稳定性;CF-PAMAM-MWCNTs/PEEK磨痕浅且最均匀,PAMAM树状聚合物末端大量-NH₂官能团结构在CF、MWCNTs与PEEK基体之间构建了多点锚定与桥联网络,显著提高了MWCNTs的分散均匀性与界面结合强度,同时其三维树枝状结构增强了增强相与基体界面的载荷传递效率^[39],即使在较高滑动速度下,该材料仍能维持窄而浅的磨痕形貌.

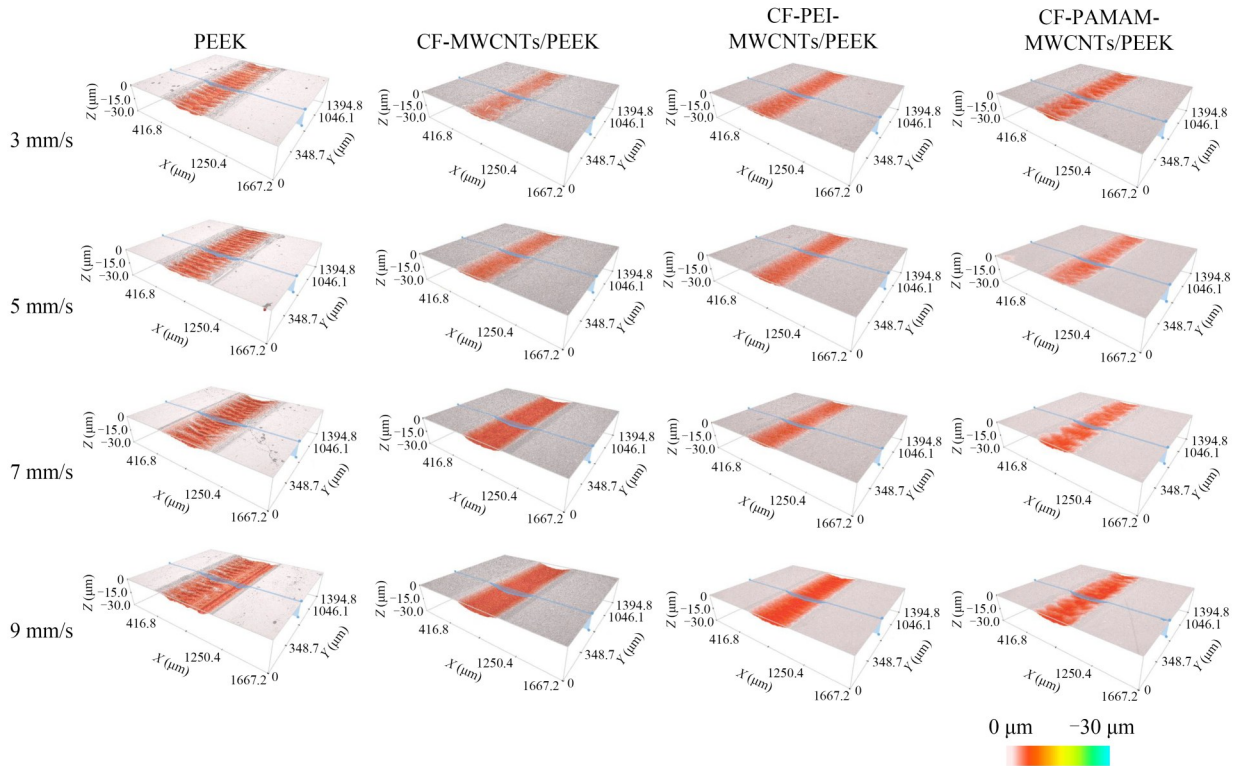


Fig. 11 Three-dimensional morphologies of four materials under different velocities.

图12为4种材料在不同速度下的磨损形貌.由图12(a1)~12(a4)表明纯PEEK表面表现出明显的条带状塑性变形,随着速度增加,表面出现更深的平行于滑动方向的犁沟,并伴有细微的热塑性流变痕迹,因纯PEEK导热性差,速度升高导致摩擦热积累进而加剧基体软化,主要磨损机理为黏着磨损和塑性变形;图12(b1)~12(b4)为CF-MWCNTs/PEEK复合材料的磨损表面形貌图,

相比纯PEEK,表面平整度大幅提升但仍有犁沟出现,在较高速度下,表面较粗糙,出现裸露的碳纤维和明显的犁沟,CF和MWCNTs的协同作用可有效承担载荷并导出部分摩擦热,部分脆性的碳纤维在高速剪切下发生断裂或拔出,形成的硬质碎片夹在摩擦副中间,产生了“三体磨损”,使磨损机理转变为轻微磨粒磨损,在表面划出深犁沟;图12(c1)~12(c4)表明CF-PEI-MWCNTs/

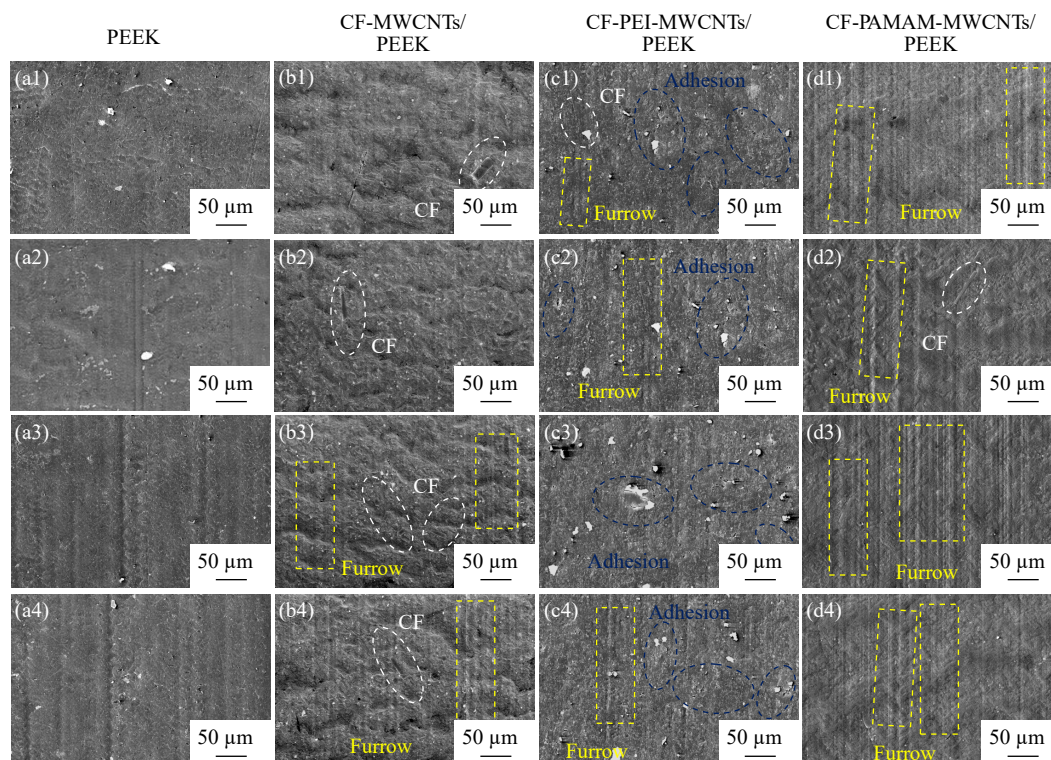


Fig. 12 SEM micrographs of wear surface morphology of four materials under different velocity conditions: (a1–d1) $3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (a2–d2) $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (a3–d3) $7 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (a4–d4) $9 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

PEEK 复合材料在整个变速过程中表面形貌出现黏着磨损, 虽然 PEI 上浆剂改善了界面, 但表面明显的黏着磨损区域表明磨损下来的碎屑并没有及时排出, 而是在摩擦热和压力的作用下, 反向粘涂在磨损表面, 形成不平整的转移膜层, 犁沟的出现表明仍有硬质颗粒在起作用, PEI 上浆剂通过 π - π 共轭效应促进 MWCNTs 分散并强化界面结合, 有效抑制了磨粒磨损, 磨损机理以黏着磨损和微弱磨粒磨损为主^[40]; 图 12(d1)~12(d4) 表明 CF-PAMAM-MWCNTs/PEEK 复合材料表面最为光滑致密, 主要是均匀分布的浅细犁沟, 无大面积的剥落, 说明增强体被牢牢的锚定在基体中, 没有发生大面积的脱黏, PAMAM 树状分子末端大量氨基使 MWCNTs 与 CF 与 PEEK 基体之间形成多点化学锚定作用, 显著提升界面结合强度与应力传递效率, 同时, 纳米填料的均匀分散也进一步减少了摩擦过程中的应力集中, 主要机理为极轻微的磨粒磨损, 表现出极佳的速度稳定性.

3 结论

通过碳基增强与界面功能化改性策略, 提升聚醚醚酮基复合材料摩擦磨损性能. 结果表明,

(1) 表面化学改性利用 PEI 上浆剂的 π - π 共轭作用及 PAMAM 树状大分子末端丰富的氨基, 成功在 CF 表面引入了极性官能团并接枝了 MWCNTs, 这种改性显著提高了增强体的表面能, 改善了 CF 与 PEEK 基体间的界面润湿性及化学键合强度, 解决了单纯机械混合导致的 MWCNTs 团聚问题. (2) 界面改性有效增强了载荷传递效率并降低了界面热阻, 其中, PAMAM 改性利用共价键合/物理纠缠构建了致密的界面交联网络, 在提升界面结合强度的同时, 赋予材料最强的抗塑性变形能力. PEI 改性通过优化填料分散与界面浸润, 在维持高硬度的基础上显著降低界面热阻, 提高了导热系数. (3) PEEK 基复合材料中, 利用 PAMAM 树枝状聚合物偶联引入 MWCNTs 的 CF-PAMAM-MWCNTs/PEEK 表现出最优摩擦学性能, 在 130 N 下摩擦系数较纯 PEEK 降低约 15.80%, 比磨损率降低约 31.97%; 在 $3\sim 9 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度区间比磨损率较纯 PEEK 下降约 65%~75%, 摩擦系数约 0.22~0.24. 磨损机理从纯 PEEK 严重的黏着磨损与疲劳磨损, 转变为改性后轻微的磨粒磨损. 这得益于坚固的界面结合有效抑制了纤维剥离, 并在摩擦界面形成了稳定的富碳纳米摩擦膜.

REFERENCES

- 1 Wang, C. S.; Yan, D. Y.; Ren, H. H.; He, Y. Z.; Sun, C. F.; Zhao, H. M.; Li, T. T.; Zhao, X. F.; Guo, R. Research progress on process optimization of 3D-printed poly(ether ether ketone) by fused deposition modeling. *Polym. Bull.*, **2024**, 37(3), 316–327.
- 2 任天翔, 滕晓波, 黄兴, 马金星, 赵德方, 占海华. 聚醚醚酮的改性及应用研究进展. *塑料科技*, **2022**, 50(9), 123–128.
- 3 党亚朋, 汤赫男, 王明辉, 刘林. 纳米ZrO₂增强PEEK/PTFE复合材料摩擦行为分子动力学模拟. *润滑与密封*, **2024**, 49(9), 59–63.
- 4 Dabees, S.; Henderson, L. C.; Hayne, D. J. Carbon fibre surface modification and its effects on adhesion, mechanical, and tribological behaviour of high-performance thermoplastics. *Compos. Part B Eng.*, **2025**, 306, 112758.
- 5 柳杰, 蒋青, 徐佳宜, 王睿君, 吴凌清, 蒋嘉伟, 杨瑾. 基于表面织构化的异质材料连接研究现状及进展. *焊接*, **2025**(1), 82–91.
- 6 Gao, W. F.; Liu, D.; Yan, C.; Zhu, Y. D.; Chen, G.; Xu, H. B.; Liu, G. J.; Huang, J. P. Progress on friction properties of carbon fiber reinforced thermoplastic composites. *Polym. Bull.*, **2025**, 38(1), 1–13.
- 7 王在跃, 姜宁, 王明道. 碳纤维表面改性对其增强热塑性复合材料性能影响的研究进展. *复合材料学报*, **2025**, 42(1), 147–161.
- 8 刘柳薪, 卢晓英, 吴颖, 荔栓红, 吴谨好, 袁文静, 高源. 碳纤维增强树脂基复合材料界面改性及应用进展. *材料工程*, **2024**, 52(9), 70–81.
- 9 李娜, 李晓岫, 黄玉东, 刘丽, 程曼芳, 王彩凤. 基于电泳沉积法碳纤维表面改性的研究进展及应用. *高分子通报*, **2021**, 34(2), 29–37.
- 10 李子琪, 裴纯, 朱继华. 碳纤维增强水泥基复合材料界面优化设计研究进展. *复合材料学报*, **2024**, 41(10), 5125–5145.
- 11 Hassan, E. A. M.; Elagib, T. H. H.; Memon, H.; Yu, M. H.; Zhu, S. Surface modification of carbon fibers by grafting PEEK-NH₂ for improving interfacial adhesion with polyetheretherketone. *Materials*, **2019**, 12(5), 778.
- 12 Ren, T. N.; Zhu, G. M.; Hou, X.; Li, B.; Hao, Y. J. Improvement of interfacial interactions in CF/PEEK composites by an s-PSF/graphene oxide compound sizing agent. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2021**, 138(45), 51327.
- 13 Yuan, C. C.; Li, D. Z.; Yuan, X. Y.; Liu, L.; Huang, Y. D. Preparation of semi-aliphatic polyimide for organic-solvent-free sizing agent in CF/PEEK composites. *Compos. Sci. Technol.*, **2021**, 201, 108490.
- 14 Xing, Y.; Zhang, D. J.; Wang, C. B.; Ni, H. J.; Li, J.; Chen, X. B. Research progress in carbon fiber sizing agents for PEEK composites. *J. Mater. Eng.*, **2022**, 50(8), 70–81.
- 15 Yu, C.; Luo, J. P.; Zeng, X. P.; Wang, D. W.; Wang, W.; Wu, J. Y. Research progress of polyamide-amine dendrimer modified separation membrane in water treatment. *Polym. Bull.*, **2024**, 37(6), 766–775.
- 16 Miao, Y.; Chen, Q. H.; Li, Y. G.; Zhuo, D. X.; Wang, R. Tribological properties of carbon nanotube/polymer composites: a mini-review. *Front. Mater.*, **2023**, 10, 1129676.
- 17 梁琦, 杨群, 王黎明, 代正伟. 温敏型聚酰胺-胺型树状聚合物的研究进展. *功能材料*, **2020**, 51(4), 4054–4060.
- 18 Gao, B.; Zhang, R. L.; Gao, F. C.; He, M. S.; Wang, C. G.; Liu, L.; Zhao, L. F.; Cui, H. Z. Interfacial microstructure and enhanced mechanical properties of carbon fiber composites caused by growing generation 1–4 dendritic poly(amidoamine) on a fiber surface. *Langmuir*, **2016**, 32(33), 8339–8349.
- 19 Zhao, M.; Meng, L. H.; Ma, L. C.; Wu, G. S.; Xie, F.; Ma, L. N.; Wang, W.; Jiang, B.; Huang, Y. D. Stepwise growth of melamine-based dendrimers onto carbon fibers and the effects on interfacial properties of epoxy composites. *Compos. Sci. Technol.*, **2017**, 138, 144–150.
- 20 唐鸣津, 王艺璇, 杨晓萱, 薛键鑫, 王露露, 王帅, 宋晨飞, 陆焕焕, 张永振, 李杰, 逢显娟. 增强体表面改性对碳纤维/聚醚醚酮复合材料摩擦磨损性能的影响. *高分子学报*, **2025**, 56(4), 653–667.
- 21 Tang, M. J.; Wang, Y. X.; Yang, X. X.; Xue, J. X.; Wang, L. L.; Wang, S.; Li, J.; Song, C. F.; Lu, H. H.; Pang, X. J.; Chen, B. B.; Zhang, Y. Z. The synergistic effects of modified carbon fiber and multiwalled carbon nanotubes on the tribological properties of polyetheretherketone composites. *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2025**, 7(17), 11248–11261.
- 22 Li, Y. C.; Li, H. F.; Dong, J. X.; Chen, Z.; Zhao, J. K.; Huan, X. H.; Jia, X. L.; Ge, L.; Yang, X. P.; Zu, L.; Geng, H. B.; Chen, X. P.; Li, T. M.; Ding, W. H. Revisiting the sequential evolution of sizing agents in CFRP manufacturing to guide cross-scale synergistic optimization of interphase gradient and infiltration. *Compos. Part B Eng.*, **2024**, 287, 111825.

- 23 Liu, H. S.; Zhao, Y.; Li, N.; Li, S.; Li, X. K.; Liu, Z. W.; Cheng, S.; Wang, K.; Du, S. Y. Effect of polyetherimide sizing on surface properties of carbon fiber and interfacial strength of carbon fiber/polyetheretherketone composites. *Polym. Compos.*, **2021**, 42(2), 931–943.
- 24 Ansari, M. S.; Zafar, S.; Pathak, H. A comprehensive review of surface modification techniques for carbon fibers for enhanced performance of resulting composites. *Results Surf. Interfaces*, **2023**, 12, 100141.
- 25 Zhang, N.; Said, A.; Wischke, C.; Kral, V.; Brodewolf, R.; Volz, P.; Boreham, A.; Gerecke, C.; Li, W. Z.; Neffe, A. T.; Kleuser, B.; Alexiev, U.; Lendlein, A.; Schäfer-Korting, M. Poly[acrylonitrile-co-(N-vinyl pyrrolidone)] nanoparticles-composition-dependent skin penetration enhancement of a dye probe and biocompatibility. *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, **2017**, 116, 66–75.
- 26 Gao, B.; Zhang, R. L.; He, M. S.; Wang, C. G.; Liu, L.; Zhao, L. F.; Wen, Z. J.; Ding, Z. P. Interfacial microstructure and mechanical properties of carbon fiber composites by fiber surface modification with poly(amidoamine)/polyhedral oligomeric silsesquioxane. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **2016**, 90, 653–661.
- 27 Peng, X. C.; Wu, Y. F.; Wei, Z. M. Research progress on the surface modification of carbon fiber. *RSC Adv.*, **2024**, 14(6), 4043–4064.
- 28 Tang, M. J.; Lu, H. H.; Pang, X. J.; Wang, Y. X.; Yang, X. X.; Xue, J. X.; Wang, L. L.; Wang, S.; Song, C. F.; Zhang, Y. Z.; Li, J. Enhanced interfacial and tribological properties of polyether ether ketone composites by the addition of modified carbon fibers. *Polym. Compos.*, **2025**, 46(18), 17123–17141.
- 29 Akbari, S.; Bahi, A.; Farahani, A.; Milani, A. S.; Ko, F. Fabrication and characterization of lignin/dendrimer electrospun blended fiber mats. *Molecules*, **2021**, 26(3), 518.
- 30 Athulya Wickramasingha, Y.; Dharmasiri, B.; Randall, J. D.; Yin, Y. T.; Andersson, G. G.; Nepal, D.; Newman, B.; Stojcevski, F.; Eyckens, D. J.; Henderson, L. C. Surface modification of carbon fiber as a protective strategy against thermal degradation. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **2022**, 153, 106740.
- 31 Roosta, A.; Zendehboudi, S.; Rezaei, N. Estimating contact angle of pure and mixed liquids on smooth solid surfaces using dispersive-to-attractive surface energy ratio from PCP-SAFT model. *Chem. Eng. Sci.*, **2024**, 300, 120607.
- 32 Duan, Z. Q.; Li, W. D.; Liu, H. S.; Shen, P. F.; Yang, H. Z.; Zhong, X. Y.; Bao, J. W. Synergetic improvement of interfacial performance and impact resistance of carbon fiber-reinforced epoxy composite *via* continuous electrochemical oxidation. *Polymers*, **2025**, 17(8), 1007.
- 33 Bai, Y. G.; Qian, H. X.; Cao, X. L.; Wen, F. Y.; He, Y. S.; Ma, J. R.; Cheng, L.; Wang, Y. F.; Tan, H. Y.; Gu, Y. X.; Lian, P. B.; Chen, R.; Mu, J. X. Three-dimensional thermal network structured GnPs&MWCNTs@PBO/PEEK composites integrating high thermal conductivity and electromagnetic shielding. *J. Mater. Chem. A*, **2024**, 12(36), 24633–24646.
- 34 Li, W.; Li, Z.; Zhang, Z. N. Tribological behavior of the carbon fiber-reinforced epoxy resin matrix composite with orderly arranged carbon nanotubes. *Tribol. Int.*, **2025**, 201, 110246.
- 35 Hassan, E. A. M.; Yang, L. L.; Elagib, T. H. H.; Ge, D. T.; Lv, X. W.; Zhou, J. F.; Yu, M. H.; Zhu, S. Synergistic effect of hydrogen bonding and π - π stacking in interface of CF/PEEK composites. *Compos. Part B Eng.*, **2019**, 171, 70–77.
- 36 Li, Y. Z.; Xu, N.; Lyu, H. X.; Jiang, N. Y.; Zhang, H. Y.; Zhou, N.; Zhang, D. X. Enhanced mechanical and tribological properties of carbon fiber/PEEK composites by hydroxylated boron nitride nanosheets and polyetherimide sizing agents. *Compos. Sci. Technol.*, **2023**, 232, 109851.
- 37 Liu, M.; Zhang, Z. Z.; He, Y. H.; Liao, C. Y.; Yang, M. M.; Chu, F. J.; Jiang, W.; Yuan, J. Y.; Liu, W. M. Enhanced interfacial and tribological properties of fabric liner by constructing a MXene/HNTs/PAMAM hierarchical coating. *Polym. Compos.*, **2024**, 45(9), 7879–7892.
- 38 Chen, B. B.; Li, X. F.; Yang, J.; Huang, H.; Peng, W. X.; Li, C. S.; Zhang, Z. Z. Enhancement of the tribological properties of carbon fiber/epoxy composite by grafting carbon nanotubes onto fibers. *RSC Adv.*, **2016**, 6(55), 49387–49394.
- 39 Sahu, R.; Ponnusami, S. A.; Weimer, C.; Harursampath, D. Interface engineering of carbon fiber composites using CNT: a review. *Polym. Compos.*, **2024**, 45(1), 9–42.
- 40 Chen, Y.; Tao, J.; Li, S.; Khashab, N. M. Compositing polyetherimide with polyfluorene wrapped carbon nanotubes for enhanced interfacial interaction and conductivity. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2014**, 6(12), 9013–9022.

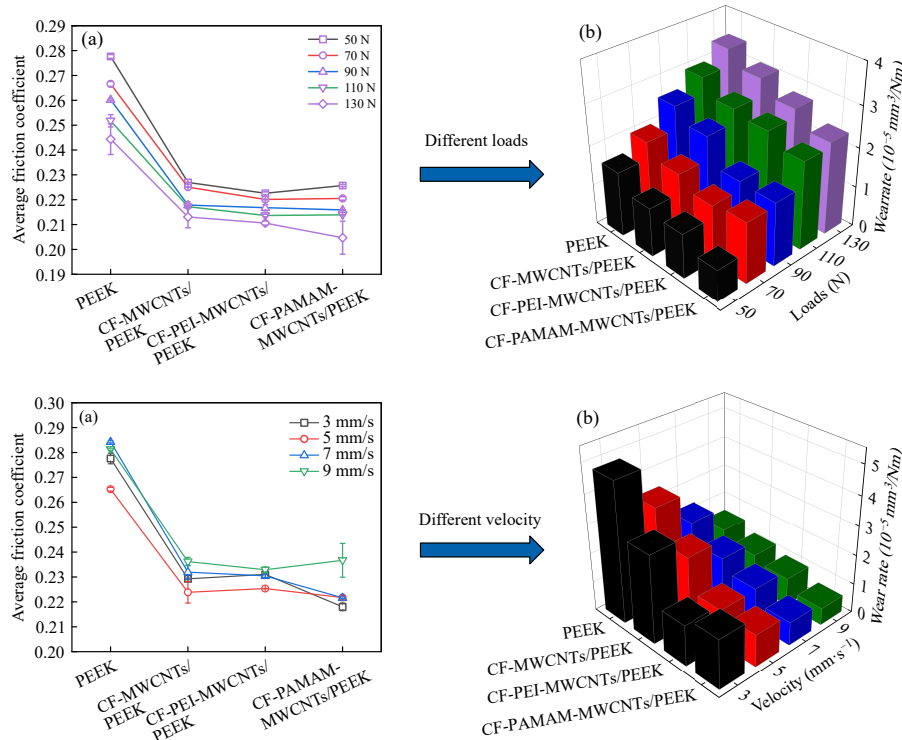
Research Article

Effect of Multiscale Reinforcement Modification on the Tribological Performance of Poly(ether ether ketone) Composites

Lu-lu Wang^{1,2}, Jian-xin Xue¹, Jie Li^{1*}, Huan-huan Lu¹, Shuai Wang¹, Jian Liu¹,
Chen-fei Song¹, Xian-juan Pang^{1,2*}

(¹National United Engineering Laboratory for Advanced Bearing Tribology, ²School of Chemistry and Chemical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023)

Abstract To address the insufficient load-bearing capacity and poor friction stability of poly(ether ether ketone) (PEEK) under severe conditions, a multiscale synergistic reinforcement system combining carbon fibers (CF) and carbon nanotubes (MWCNTs) with interfacial chemical modification was developed. Polyetherimide (PEI) and third-generation poly(amidoamine) (PAMAM) dendrimers were employed to functionalize the CF surface, enabling uniform anchoring of MWCNTs *via* sizing and grafting. The results showed that stable covalent bonding was formed at the interface, significantly enhancing interfacial adhesion and load transfer. Compared with neat PEEK, the composites exhibited improved hardness and thermal conductivity, with CF-PAMAM-MWCNTs/PEEK showing the best overall performance. At 130 N, its friction coefficient and wear rate decreased by 15.8% and 31.97%, respectively, while the wear rate was reduced by 65%–75% within 3–9 mm·s⁻¹. The enhanced tribological performance was attributed to the multiscale synergistic effect and the formation of a stable tribofilm, which effectively suppress fiber pull-out and three-body abrasion.



Keywords Poly(ether ether ketone); Carbon fiber; Carbon nanotubes; Interfacial modifications; Friction and wear

* Corresponding authors: Jie Li, E-mail: lijie@haust.edu.cn

Xian-juan Pang, E-mail: xjpang2001@haust.edu.cn