

·综述·

碳纤维增强热塑性复合材料摩擦性能研究进展

高卫锋^{1,2} 刘东^{2*} 颜春² 祝颖丹^{2*} 陈刚² 徐海兵² 刘国军¹ 黄剑鹏³

(1. 大连工业大学纺织与材料工程学院, 大连 116034; 2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江省机器人与智能制造装备技术重点实验室, 宁波 315201; 3. 宁波大东南万象科技有限公司, 宁波 315201)

摘要: 高性能碳纤维增强热塑性复合材料(CFRTP)具有高强高韧、自润滑耐磨和成型效率高等优异特性, 作为摩擦材料在航空航天、海洋工程、交通运输和医疗器械等领域具有重要应用。本文综述了CFRTP摩擦性能的研究进展, 主要包括碳纤维增强聚醚醚酮、聚酰亚胺、聚苯硫醚、超高分子量聚乙烯和聚酰胺等五种常用热塑性树脂基复合材料的减摩抗磨改性及其机理研究, 并对比分析了其各自的优缺点及应用领域。最后对CFRTP在摩擦领域应用中存在的问题和未来发展前景进行了展望, 为开发耐磨且力学性能优异的高性能结构-功能一体化碳纤维复合材料提供有益的参考。

关键词: 碳纤维; 热塑性复合材料; 摩擦性能; 润滑机理

Progress on Friction Properties of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites

GAO Wei-feng^{1,2}, LIU Dong^{2*}, YAN Chun², ZHU Ying-dan^{2*}, CHEN Gang²,
XU Hai-bing², LIU Guo-jun¹, HUANG Jian-peng³

(1. School of Textile and Materials Engineering, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China;
2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Robotics and Intelligent Manufacturing Equipment Technology,
Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China;
3. Ningbo Great Southeast Wan-xiang Science & Technology Co. Ltd., Ningbo 315201, China)

Abstract: Carbon fiber reinforced thermoplastic composites (CFRTP) are found to have excellent properties such as high strength and toughness, excellent self-lubricating and wear-resistant, and high molding efficiency, which have been widely used as friction materials in aerospace, marine engineering, transportation, medical apparatus and other fields. This paper reviews the research progress of antifriction and anti-wear modification aging on friction properties of five commonly used CFRTP, *i.e.*, polyether ether ketone, polyimide, polyphenylene sulfide, ultra-high molecular weight polyethylene and polyamide matrixes, and comparative analysis of their respective advantages, disadvantages and application fields. Finally, the existing problems and prospects of CFRTP for friction applications are presented, which may provide useful guidance for developing high-performance structural-functional integrated CFRTP with excellent mechanical and friction properties.

Keywords: Carbon fiber; Thermoplastic composites; Friction properties; Lubrication mechanism

2024-05-23 收稿, 2024-10-11 录用, 2024-11-26 网络出版

基金项目: 浙江省“领雁”研发攻关计划项目(项目号 2024C01156), 所长基金(基金号 2022SZKY0203), 宁波市重点研发计划(项目号 2023Z149), 天津市科技计划项目(项目号 22YFYSHZ00090), 丹阳市科技创新专项资金项目(项目号 SCG202203)。

*通信联系人: 刘东, E-mail: liudong@nimte.ac.cn; 祝颖丹, E-mail: y.zhu@nimte.ac.cn

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2024.24.158

引用: 高卫锋, 刘东, 颜春, 祝颖丹, 陈刚, 徐海兵, 刘国军, 黄剑鹏. 碳纤维增强热塑性复合材料摩擦性能研究进展. 高分子通报, 2025, 38(1), 1–13.

Citation: 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.* (in Chinese), 2025, 38(1), 1–13.

摩擦磨损是机械设备最常见、最大量的损坏方式之一。据统计, 世界上近 30% 的一次性能源因摩擦而浪费, 近 50% 的设备功率损耗在摩擦上, 近 80% 的设备零部件因磨损而失效^[1]。采用减摩擦耐磨材料是解决摩擦磨损问题的主要手段, 因此开发低摩擦系数且耐磨损的新材料成为研究热点, 对提高机械设备的使用寿命和节约能源具有重要意义。

常用的减摩擦耐磨材料主要有金属、陶瓷、橡胶和树脂基复合材料等四大类, 与前三者相比, 树脂基复合材料具有轻质高强、热膨胀系数小、耐腐蚀和抗辐射等性能优势, 而其中的高性能碳纤维增强热塑性树脂基复合材料具有自润滑耐磨、抗冲击和加工成型快等优异性能, 因此在摩擦材料领域应用广泛^[2]。目前使用最多的耐磨热塑性树脂基体主要有聚醚醚酮(PEEK)、聚酰亚胺(PI)、聚苯硫醚(PPS)、超高分子量聚乙烯(UHMWPE)和聚酰胺(PA)五大类, 表 1 总结了这 5 种树脂的基础性能, PEEK、PI 和 PPS 等特种工程塑料具有卓越的力学性能和耐热性能, 主要应用在航空航天和国防军工等尖端科技领域, 而 UHMWPE 和 PA 为常用工程塑料, 其力学性能和耐热性能较前者差, 但价格便宜, 因此较多应用于民用工业和生活领域^[3–13]。采用碳纤维(CF)增强后可大大提升热塑性树脂的摩擦和力学性能, 可作为结构摩擦材料广泛应用于航天航空、海洋工程和能源开采等领域。随着应用领域的不断扩大, CFRTP 的服役性能也备受考验, 如海上发电设备、钻井平台、舰艇、深海探测设备等, 其相关能动部件不仅要面临长

期高压湿热、高盐干湿交替等恶劣的服役环境, 还要承受高载荷、高速、变载和变速等复杂耦合条件下的磨损, 由此产生损伤失效, 带来巨大的设备修复和更新花费, 因此关键能动部件的摩擦磨损失效问题有待解决^[2,14]。研发综合性能更加优异的耐摩擦磨损复合材料对于实现机械设备在严苛工况下的可靠运行具有重要的现实意义^[2,14,15]。当前改善 CFRTP 摩擦性能的方法主要有填充改性和表面改性两种。填充改性是通过在树脂基体中添加增强材料达到目的, 常用的增强填料有纤维、晶须和纳米粒子等; 表面改性是通过物理或化学方法对纤维或树脂进行表面处理, 使其表面结构发生变化, 提升纤维和树脂之间的界面结合, 进而改善其摩擦和力学性能, 常用的表面改性方法主要有化学接枝和激光改性等^[15,16]。

本文综述了国内外 CFRTP 摩擦性能的研究进展, 包括碳纤维增强 PEEK、PI、PPS、UHMWPE 和 PA 五种热塑性树脂基复合材料的摩擦改性研究、增强机理及磨损机制, 对比分析了其各自的优缺点及应用领域, 最后总结了当前 CFRTP 在摩擦材料领域应用中存在的问题, 并对其未来发展进行了展望。

1 CF/PEEK 复合材料的摩擦性能

PEEK 具有力学强度高、耐高温、耐腐蚀和耐磨等特点, 广泛用于制造轴承、阀门、齿轮和喷嘴等零部件^[17]。碳纤维具有比重小、强度高和自润滑等特性, 通过碳纤维填充 PEEK 可显著提高其强度、刚度、耐摩擦磨损、抗蠕变、耐老化和抗冲

表 1 不同树脂的基础性能

Table 1 Basic properties of different resins

Resin	Tensile strength (MPa)	Flexural strength (MPa)	T_g (°C)	T_m (°C)	COF	Wear rate ($\times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	Ref.
PEEK	99	137	148	339	0.48	4.7	[3]
PI	95	150	264	388	0.31	6.3	[4–6]
PPS	62	116	92.6	285	0.85	72.3	[7,8]
UHMWPE	19.81	26.1	-81	130.6	0.398	8.7	[9–11]
PA	45~74	51~82	64.5	222	0.67	10.5	[8,12,13]

(注: T_g 为玻璃化转变温度; T_m 为熔点; COF 为摩擦系数)

击等性能,使其能够更好地满足在不同苛刻工况下的使役性能要求。

纤维的尺寸会影响复合材料的摩擦性能。Wang等^[17]用热压烧结技术将微米级和纳米级CF与PEEK制备成复合材料。研究结果显示,微米级CF较纳米级CF,可更好地改善复合材料的摩擦性能:当加入20 wt%的微米级CF时,摩擦系数降到0.42,磨损率较PEEK降低了56%,这是因为微米级CF主要承担了磨损面上的剪切应力,避免PEEK基体进一步损坏,磨损机制由磨粒磨损向粘着磨损转变。其后,研究者发现除了纤维尺寸外,纤维的取向和含量也会影响到复合材料的摩擦性能。邱孝涛等^[18]通过挤出、注塑工艺制备了CF填充聚四氟乙烯(PTFE)/PEEK复合材料。结果显示,当加入10 wt%的CF时,复合材料在X方向(平行于熔体流动方向)上的摩擦系数较低,磨损率较高,这是因为CF的取向与滑动方向一致,CF表层的石墨片有助于降摩,但是CF易剥落,致使磨损率增加;在Y方向上(垂直于熔体流动方向),复合材料的平均摩擦系数较高,磨损率较低,这是由于单根CF与摩擦面的接触面积比X方向大,摩擦过程中产生的CF磨屑致使摩擦系数上升,但高硬度的CF有效降低了对偶面对复合材料的破坏,因此磨损率下降;在Z方向上(与XY方向垂直),复合材料的摩擦系数较大,磨损率较小,这是因为摩擦方向与CF的轴向方向垂直,在摩擦过程中CF易被磨碎,使摩擦面的粗糙度增加,导致平均摩擦系数增大,但CF不易被拔出,因此磨损率较低。此外,复合材料的摩擦系数和磨损体积随着CF含量的增加先下降后上升,这是因为CF不仅能够承担载荷,而且其表面具有的石墨片层结构可与PTFE协同促进转移膜的生成,减小摩擦阻力的同时减少粘着磨损,使摩擦系数和磨损体积下降;随着CF含量的增加(质量分数大于20 wt%),树脂对CF的有效包覆能力下降,使其易被剥落,从而进入摩擦面,致使摩擦系数和磨损率上升。

提高界面粘结性能有助于提升CF/PEEK复合材料的摩擦性能^[19-22]。纤维表面化学改性是常用的改善纤维与树脂界面结合的方法,Feng等^[21]用水热法合成了一种短切CF-二硫化钼(SCF-MoS₂)抗磨填料,并将其与纳米二氧化硅(SiO₂)和PEEK通过挤出注塑工艺制备成复合材料。研究结果显示,与纯PEEK相比,SiO₂/SCF-MoS₂/PEEK复合

材料的弹性模量和拉伸强度分别提高了62.04%和26.49%,摩擦系数和磨损率分别降低了31.43%和79.18%。力学性能提升一方面是因为SiO₂的增强作用,另一方面是因为SCF-MoS₂提升了CF与PEEK的界面粘结性能;摩擦性能提升是因为纳米SiO₂、SCF、MoS₂与磨粒共同促进形成了完整、高质量且稳定的转移膜。此外,上浆剂也可改善纤维与树脂的界面粘结性能。Li等^[22]采用液相剥离法制得单层氮化硼后,通过超声处理获得羟基氮化硼(BNO),然后将聚醚酰亚胺(PEI)、BN、BNO和PEI-BNO分别以1%的浓度溶解在DMF中制备成上浆剂,再对CF进行上浆处理,最后通过热压成型制备了改性CF/PEEK复合材料(如图1所示)。结果显示,上浆剂提升了CF与PEEK的界面结合强度,使PEI-BNO-CF/PEEK复合材料的抗弯强度、剪切强度和导热系数较未改性的分别提高了60.8%、49.3%和14.5%;同时,PEI-BNO-CF/PEEK复合材料较未改性的材料表现出更好的摩擦性能,摩擦系数从0.3降到0.22,比磨损率从 $13.9 \times 10^{-14} \text{ m}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 降到 $5.1 \times 10^{-14} \text{ m}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,这是因为上浆剂改善了CF/PEEK复合材料的界面结合,提升了复合材料的力学和导热性能,减少了树脂裂纹、纤维拔出和摩擦热积聚的发生,最终使摩擦性能得到提升。

凹凸棒石纳米纤维(ATP)、钛酸钾晶须、空心微珠(CS)和纳米二氧化硅等无机填料常被用来提升复合材料的摩擦性能^[23-27]。ATP具有高长宽比和大比表面积的特点,使其在提高材料耐磨性能方面具有优势,Wang等^[26]用热压工艺制备了ATP/CF/PEEK复合材料。研究结果显示,在5 MPa和1 m/s的条件下,当加入10 wt%的CF和5 wt%的ATP后,复合材料的摩擦系数和磨损率较PEEK分别下降了67%和98%,这是因为在摩擦过程中CF、ATP、PEEK和对偶面的氧化铁在“摩擦烧结”的作用下形成了固体摩擦膜,从而提高了摩擦性能。CS具有密度小、无毒、热容量高、耐磨性好等优良性能,其硬质空心球结构能够有效改善材料的摩擦性能,Liu等^[27]研究了CS的含量对短碳纤维(SCF)/PEEK复合材料摩擦性能的影响。结果显示,在200 N条件下,复合材料的摩擦系数随着CS含量的增加先降低后提高。当CS含量为10 wt%时,复合材料的摩擦性能最佳,其摩擦系数为0.19,这是因为CS独特球形结构在摩

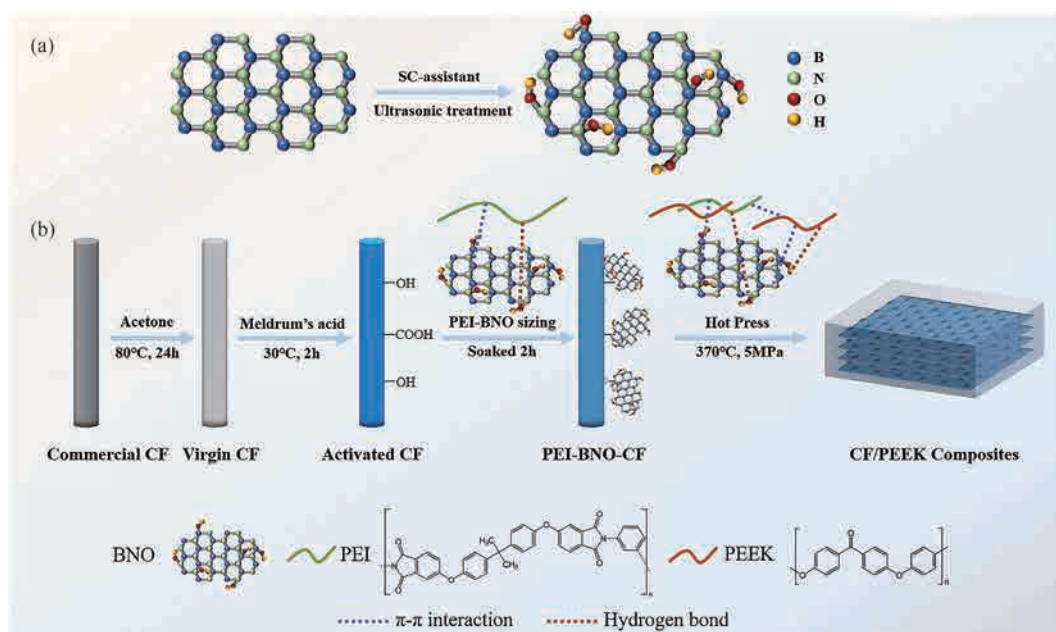


图1 (a) BNO和(b) CF/PEEK 复合材料制备示意图^[22] (2022 Elsevier Ltd. 版权许可)

Figure 1 Schematic illustration of fabricating (a) BNO and (b) CF/PEEK composites (Reprinted with permission from Ref.[22]; Copyright 2022 Elsevier Ltd.)

擦过程中起到“滚动轴承”的作用,可有效降低摩擦系数。另外,CS可以有效填充PEEK与CF之间的间隙,保护CF和树脂基体,从而降低了界面应力,减少PEEK塑性变形,进而提高复合材料的耐磨性。但是过高的添加量会导致CS团聚,从而使界面结合下降,磨损率上升。纯PEEK树脂与复合材料的磨损机制不同,PEEK的主要磨损机制是粘着磨损:SCF/PEEK复合材料的磨损机制在200 N条件下为磨粒磨损,400 N下为磨粒磨损,并伴有一定的粘着磨损;对于CS/SCF/PEEK复合材料,在200和400 N下,其主要磨损机制都是磨粒磨损(磨损机制如图2和图3所示)。

改善复合材料的导热性能有助于加快摩擦热耗散,减轻树脂基体软化,进而提升复合材料的摩擦性能^[28-30]。Yang等^[30]通过熔融共混制备了h-BN/CF/PEEK复合材料,研究了其导热和摩擦性能。结果显示,当加入20 wt%的CF和4 wt%的六方氮化硼(h-BN)时,复合材料导热系数达到了0.396 W/(m·K),较PEEK提高了126.3%,这是因为CF和h-BN在复合材料中形成了完整的导热网络。在1 MPa负载下,加入4 wt%的h-BN后,纤维含量为10 wt%、15 wt%和20 wt%的CF/PEEK复合材料的摩擦系数与未加h-BN的复合材料相比,分别降低了21%、10%和27%,磨损率分别降低6.89%、0.69%和43.72%,这一方面是因为复合

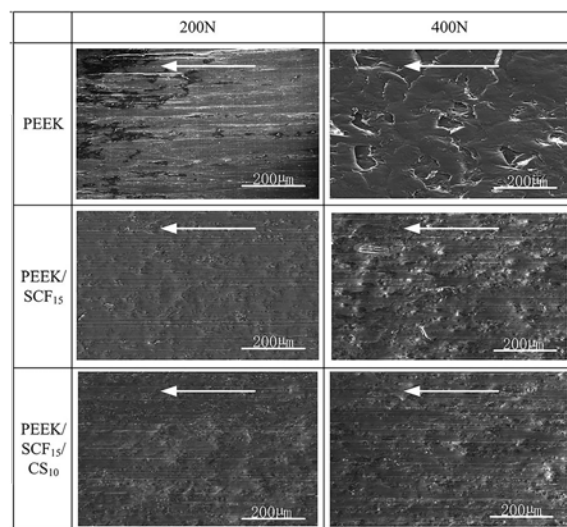


图2 PEEK及其复合材料在两种载荷下磨损表面的SEM图^[27] (2018 Wiley Periodicals Inc. 版权许可)

Figure 2 SEM images of worn surfaces of PEEK and its composites under two loads (Reprinted with permission from Ref.[27]; Copyright 2018 Wiley Periodicals Inc.)

材料导热性能的提升减轻了树脂基体软化,提升了复合材料的耐磨性,另一方面是因为h-BN的自润滑性使复合材料摩擦系数下降,两种作用协同提升了复合材料的摩擦性能。

在摩擦过程中生成高质量的转移膜是提高材料摩擦性能的关键之一,纳米氧化物颗粒(Bi_2O_3 、 SiO_2 、 ZrO_2 和 CuO)和铜纳米线等纳米粒子有助

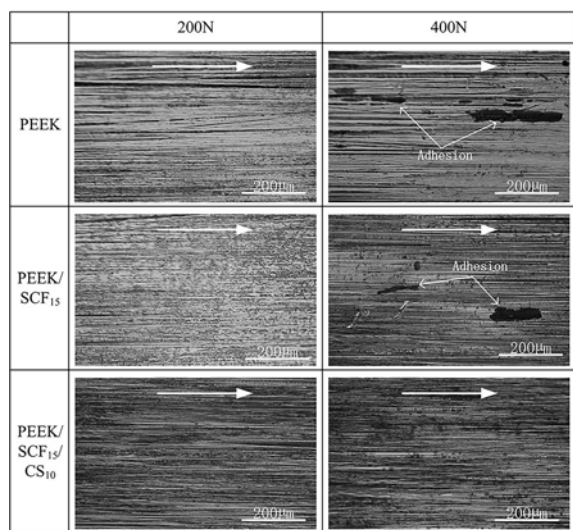


图3 两种负载下对偶面上的PEEK及其复合材料转移膜的光学显微镜观察图^[27] (2018 Wiley Periodicals Inc. 版权许可)

Figure 3 Optical microscopy of transfer film of PEEK and its composites on the counterbody under two loads (Reprinted with permission from Ref.[27]; Copyright 2018 Wiley Periodicals Inc.)

于促进生成高质量转移膜^[31~33]。Gao等^[33]在氢氧化钠溶液中用水合肼还原氢氧化铜制备了铜纳米线,然后通过熔融共混和热压成型,将其与10 vol% SCF、8 vol%石墨片(Gr)和PEEK制备成复合材料,研究了复合材料在水润滑条件下的摩擦性能。结果显示,当加入0.5 vol%的铜纳米线时,复合材料表现出最低的摩擦系数和磨损率,摩擦性能提升,一方面是因为铜纳米线承担了一部分外加载荷,延缓了疲劳效应,另一方面是因为铜纳米线促进形成稳定的转移膜,两种作用共同提高了复合材料的摩擦性能。

研究人员分别从CF的性质(添加量、尺寸和取向等)、界面结合、增强填料结构、导热性能以及高质量转移膜生成等几个方面探究了不同因素对CF/PEEK复合材料摩擦性能的影响。总结结果可见,增强填料与PEEK之间良好的界面结合有助于提升复合材料的力学性能,进而有利于改善复合材料摩擦性能;另外,利用增强填料自身特性(结构、导热和易剪切等)能够对复合材料进行特异性增强,利用增强粒子的性质(耐磨性、润滑性和导热性等)来提升复合材料的摩擦性能。

2 CF/PI复合材料的摩擦性能

PI具有抗腐蚀、耐疲劳、耐高温、耐冲击和自

润滑等特性,但纯PI树脂的抗拉和抗压强度较低,耐摩擦磨损特性难以单独作为摩擦材料在高速、高温等恶劣工况下使用^[34]。采用碳纤维增强后,CF/PI复合材料的抗拉、抗压和耐摩擦磨损等综合使用性能得到有效加强,因而被广泛应用于军工设备、电子与微电子等器械的摩擦部件中。

在油润滑中,金属镍(Ni)可在摩擦过程中生成NiO釉层,催化油分子脱氢,促进碳基转移膜生成,从而提高材料的摩擦性能。Lin等^[35]采用热压成型制备了Ni/CF/PI复合材料,研究了其在临界润滑和混合润滑条件下的摩擦性能。结果表明,在100 N和0.2 m/s条件下,5 vol% Ni/PI复合材料的减摩性最好,而5 vol% Ni/10 vol% CF/PI复合材料表现出更好的抗磨损能力;随着滑动速度的增加,含Ni的PI基复合材料的摩擦系数比PI树脂和10 vol% CF/PI复合材料下降更显著,这可能是因为Ni促进了界面转移膜的生长,从而增强了边界条件下的润滑效果;在使用PAO润滑油时,5 vol% Ni/10 vol% CF/PI复合材料在摩擦初始阶段形成了极薄的NiO釉层,然后在NiO釉层上方生长出均匀的碳基转移膜(图4),转移膜的主要成分有NiO和石墨纳米晶体等物质。NiO层可以通过减小摩擦副的接触来减轻钢的摩擦氧化,减小对树脂基体损伤;石墨纳米晶体易剪切,增加了转移膜的承载力,进而改善了复合材料的摩擦性能。

MoS₂和SiO₂等无机填料与CF杂化,既可以发挥无机填料的增强作用,又可以提升CF与PI树脂的界面结合,从而提高复合材料的摩擦性能^[36~40]。Chen等^[40]通过水热法制备了CF-MoS₂杂化材料,在30 MPa、350 °C条件下烧结制备了CF-MoS₂/PI复合材料。研究结果显示,在3 N、0.083 m/s的实验条件下,CF-MoS₂/PI复合材料比PI树脂和CF/PI复合材料表现出更好的摩擦性能,其摩擦系数降为0.24,磨损率降到 $2.01 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。在摩擦过程中,PI树脂易发生塑性变形而被磨损,如图5(a)所示,CF/PI复合材料中CF能够承担载荷,但暴露的CF易对转移膜造成损伤,如图5(b)所示,CF-MoS₂杂化物在外力作用下易剪切形成MoS₂转移膜,因此,CF-MoS₂/PI复合材料表现出更优异的摩擦性能(图5c)。

总结目前CF/PI体系的摩擦性能研究结果,可知研究人员先后从增强填料的作用和改善界面性能两个角度探究了CF/PI复合材料的摩擦性能

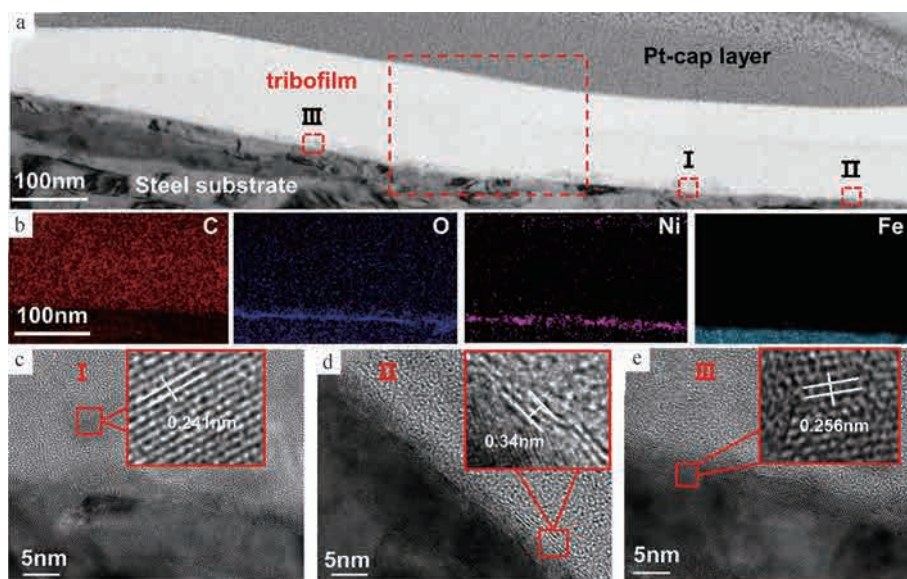


图4 (a) PAO 油润滑条件下 5 vol% Ni/10 vol% CF/PI 复合材料表面生成的摩擦膜的 TEM 图;(b) 图 a 中虚线框所示区域的C、O、Ni和Fe 元素的能谱图;(c~e) 图 a 所示区域 I~III 的 HR-TEM 图 (滑动速度:0.2 m/s, 负载:100 N, 润滑剂:PAO 基础油)^[35] (2022 Elsevier Ltd. 版权许可)

Figure 4 (a) TEM images of the tribofilm generated on the counterface after sliding against 5 vol% Ni/10 vol% CF/PI lubricated with PAO base oil; (b) EDS maps of C, O, Ni and Fe-elements of the region indicated by a dashed box in Fig. a; (c-e) HR-TEM graphs of regions I-III indicated in Fig. a (Sliding speed: 0.2 m/s, load: 100 N, lubricant: PAO base oil) (Reprinted with permission from Ref.[35]; Copyright 2022 Elsevier Ltd.)

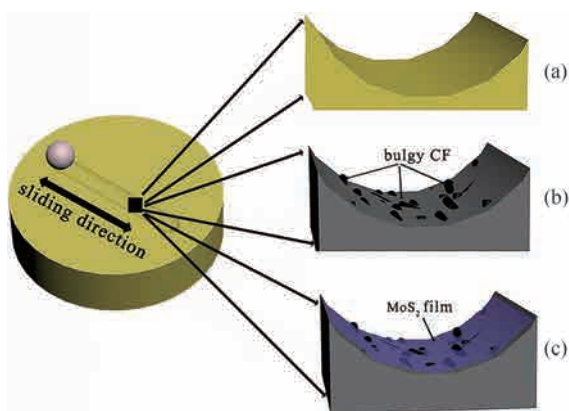


图5 (a) PI, (b) CF/PI, (c) CF-MoS₂/PI 复合材料的摩擦磨损过程示意图^[40] (2018 Elsevier Ltd. 版权许可)

Figure 5 Schematic illustration of friction and wear process of (a) PI, (b) CF/PI, (c) CF-MoS₂/PI composites (Reprinted with permission from Ref.[40]; Copyright 2018 Elsevier Ltd.)

和机理。总结发现, 增强填料和改善界面性能主要通过促进高质量转移膜的生成来提升复合材料的摩擦性能; 另外利用填料在摩擦过程中的反应特性来形成转移膜也是有效改善复合材料摩擦性能的未来研究方向之一。

3 CF/PPS 复合材料的摩擦性能

PPS 具有良好的耐磨性、耐化学腐蚀性和本

体阻燃等优异特性, 但是纯 PPS 树脂自润滑差、脆性大和高温下易氧化交联的缺陷限制了其作为摩擦材料的广泛应用^[41]。采用 CF 增强后的 PPS 基复合材料具有耐磨损和自润滑的特性, 使其在高温、高压和高速等应用环境下具有良好应用性能, 多被用于工业制造和航空航天等领域。

多尺度纤维交织而成的互锁网络结构可通过限制分子链的运动来提升复合材料的摩擦性能。Shi 等^[41]通过挤出注塑工艺制备了多尺度 CF 和 PTFE 纤维杂化的 PPS 基复合材料。研究结果显示, 在微米碳纤维 (MCF)/PTFE/PPS 复合材料中, 随着 MCF 含量的增加, 摩擦系数周期性波动程度减小, 比磨损率增大, 其原因是在滑动过程中 MCF 可承担部分载荷, 使其摩擦系数波动减小, 但 MCF 脱落形成的硬质磨粒易对 MCF-PTFE 混合网络结构形成破坏, 导致比磨损率上升, 磨损机制主要为磨粒磨损。SCF/PTFE/PPS 复合材料比前者具有更好的摩擦磨损性能, 在干滑动条件下, 当加入 20 wt% 的 SCF 时, 摩擦系数达到最低为 0.103, 随着 SCF 含量增加, 比磨损率逐渐下降, 这是因为 SCF-PTFE 纤维的网络结构有助于抑制 SCF 断裂, 提高耐磨性。SCF/PTFE/PPS 复合材料的磨损机制为粘着磨损并伴有一定的磨粒磨损。CF-PTFE

纤维杂化形成的互锁网络结构有效提高了复合材料的摩擦性能, 摩擦机理如图6所示。

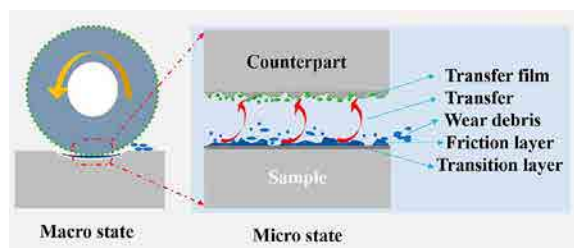


图6 PPS及其复合材料的摩擦机理示意^[41](2019 American Chemical Society 版权许可)

Figure 6 Schematic of the tribological mechanism of PPS and its composites (Reprinted with permission from Ref.[41]; 2019 American Chemical Society)

填料的含量会影响PPS基复合材料的摩擦性能^[42,43]。Luo等^[43]用熔融共混法制备了短碳纤维增强PTFE/PPS复合材料(CF/PTFE/PPS)。结果显示, 当加入15 vol%的CF后, 复合材料的比磨损率和平均摩擦系数分别为 $5.2 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 和0.085, 较PTFE/PPS分别下降了88%和47%, 这是因为CF一方面提升了复合材料力学性能, 使其耐磨性增强, 另一方面其表面的石墨层结构有助于降低摩擦系数, 增强复合材料的润滑性。磨损机制从粘着磨损向磨粒磨损转变。

填料与树脂基体界面粘结性能的提升有助于改善PPS基复合材料的摩擦性能^[44,45]。3-巯基丙基三甲氧基硅烷(MPTMS)带有的硫醇官能团(R-SH)可以与PPS的硫原子形成氢键, 进而提升填料与PPS树脂的界面结合^[45]。Kim等^[45]通过挤出注塑工艺制备了氧化石墨烯(GO)/CF/PPS复合材料。研究结果显示, 当加入MPTMS改性处理的CF和MPTMS改性处理的GO时, 5M-GO/20M-CF/PPS复合材料的导热系数从0.185 W/(m·K)提升到0.323 W/(m·K), 这是因为CF有序排列且MPTMS处理后的CF和GO与PPS基体有了更好的粘结效果, 降低了界面热阻, 增加了热导率; 同时5M-GO/20M-CF/PPS复合材料的摩擦系数从0.236降低到0.176, 比磨损率降低了3/4, 摩擦性能的提升一方面是因为MPTMS改善了填料与树脂基体的界面粘结性能和导热性能, 加快了摩擦热耗散, 减少了材料基体塑性变形; 另一方面是因为GO的片层结构提高了复合材料的润滑性, 两种作用协同提升了复合材料的摩擦性能。

目前研究人员主要从微观结构调控、填充比

例和界面改性等三个方面探究了CF/PPS复合材料的摩擦性能和机理。总结发现, 合适的填充比例和良好的界面结合性能可使复合材料具有更优的减摩耐磨性能。此外, 调控材料内部形成特定的微观结构也是协同提高复合材料摩擦性能的重要手段。

4 CF/UHMWPE复合材料的摩擦性能

UHMWPE具有高比强、低吸水、自润滑和无毒等优异性能, 但UHMWPE在加工过程中易氧化, 导致力学和摩擦性能下降, 无法满足恶劣环境下的性能要求^[46]。CF的增强效应可提升UHMWPE的力学和摩擦性能, 使CF/UHMWPE复合材料在恶劣工况下仍具有良好的使用性能。

材料的服役环境会影响UHMWPE基复合材料的摩擦性能。Zhen等^[46]在20 MPa、190 °C条件下热压烧结制备了UHMWPE、CF/UHMWPE(UC)、MoS₂/UHMWPE(UM)和MoS₂/CF/UHMWPE(UMC)复合材料, 研究了热老化时间对其摩擦性能的影响。结果显示, UHMWPE的摩擦系数和磨损率随着热老化时间的增加而逐渐升高, 并在32 h时达到最大, 分别为0.18和 $15.5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, 磨损机制主要为磨粒磨损; UC复合材料的摩擦系数和磨损率随着老化时间的增加在一定范围内波动, 磨损机制主要是磨粒磨损; UM复合材料的摩擦系数随老化时间的增加先下降后上升, 而磨损率逐渐升高, 磨损机制由疲劳磨损向氧化和疲劳磨损转变; UMC复合材料的摩擦系数和磨损率随老化时间的变化程度较小, 磨损机制由疲劳磨损向磨粒磨损转变。当热老化时间为32 h时, 材料的摩擦机制如图7所示, UHMWPE在摩擦过程中产生硬而脆的氧化层将自润滑基体和对偶材料隔开, 从而导致高的摩擦系数和磨损率; 而UC、UM和UMC复合材料在摩擦过程中CF和MoS₂会从基体中析出, 并作用在氧化层之外的磨损表面上, 起到润滑作用, 因此表现出较低的摩擦系数和磨损率。在不同的热老化时间下UMC复合材料具有相对最佳的摩擦性能, 这是因为CF与MoS₂可协同提升UHMWPE的承载能力和润滑性, 从而改善其摩擦性能。

对碳纤维进行表面改性能够改善纤维与UHMWPE树脂基体的界面粘结性能, 进而提

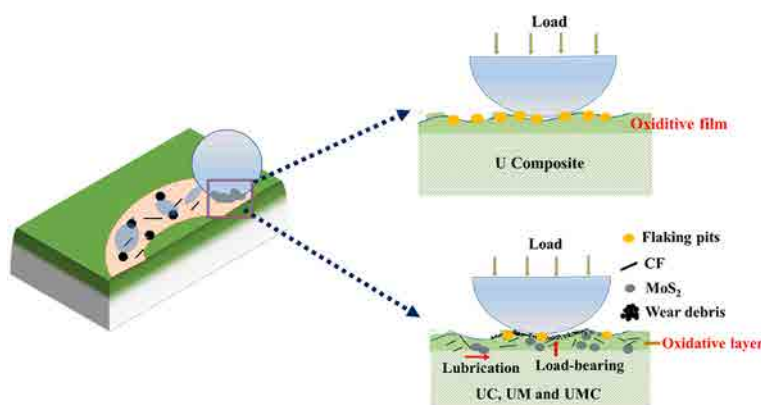


图7 老化时间为32 h时复合材料的磨损机制^[46] (2022 Elsevier Ltd. 版权许可)

Figure 7 Schematic of wear mechanism for composites as the aging time is 32 h (Reprinted with permission from Ref.[46]; Copyright 2022 Elsevier Ltd.)

升CF/UHMWPE复合材料的力学和摩擦性能。Meng等^[47]将ATP通过长链聚醚酰亚胺接枝到CF上,获得ATP-PEI-CF(图8),然后在10 MPa、200 °C条件下通过热压烧结制备了CF含量为15 wt%的改性CF/UHMWPE复合材料。研究结果显示,ATP-PEI-CF/UHMWPE复合材料的肖氏硬度较UHMWPE最大提高了13.8%,抗压强度和模量达到最高,这是因为ATP-PEI-CF的多嵌合位点结构增加了纤维破坏所需要的能量消耗,因此力学性能提升;摩擦系数和比磨损率分别为0.26和 $3.2 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,较UHMWPE分别降低了38%和62%。摩擦性能提高一方面是因为ATP纳米纤维的“滚动效应”有利于降低摩擦系数,另一方面是因为ATP-PEI-CF增强了CF与UHMWPE的界面结合,使复合材料的力学和导热性能提升,减小了基体塑性变形,提升了其耐磨性。

再生碳纤维(rCF)与原生碳纤维(vCF)对UHMWPE的摩擦性能呈现出类似的改善作用,且rCF具有成本低和环保的优点。Ventura等^[48]通过热压工艺制备了vCF/UHMWPE和rCF/UHMWPE复合材料,研究了其在水润滑条件下的摩擦性能。结果显示,当分别加入10 wt%的vCF和rCF时,两者摩擦系数均为0.04,较UHMWPE分别降低了60%和62%,比磨损率分别为 1.32×10^{-7} 和 $1.62 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,较UHMWPE分别下降了44.5%和31.9%,这一方面是因为CF自身的润滑性使复合材料摩擦系数下降,另一方面是因为CF改善了复合材料的力学性能,增加了其耐磨性。随着CF的加入,复合材料的磨损机制由磨粒磨损向粘着磨损和磨粒磨损转变。再生碳纤维与原生碳纤维对UHMWPE树脂摩擦性能提升效果相差不多,这使得再生碳纤维在多个应用领域取代原生碳纤维成为可能。

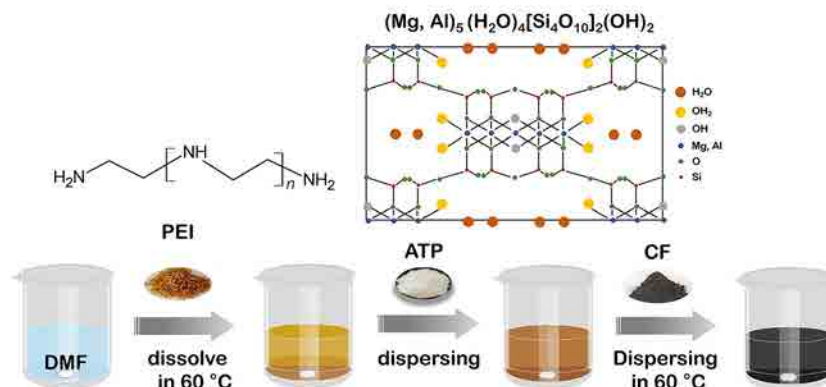


图8 PEI-CF和ATP-PEI-CF纤维的制备工艺^[47] (2022 John Wiley and Sons 版权许可)

Figure 8 The preparation process of PEI-CF and ATP-PEI-CF fibers (Reprinted with permission from Ref.[47]; Copyright 2022 John Wiley and Sons)

在不同的润滑条件下, 复合材料会表现出不同的摩擦性能。Vadivel等^[49]通过热压成型制备了氧化石墨烯/纳米金刚石(ND)/CF/UHMWPE复合材料, 研究了其在干燥、海水和润滑剂条件下的摩擦性能。与海水润滑和润滑剂条件下相比, 复合材料在干燥条件下表现出最高的摩擦磨损, 这是因为在干燥条件下复合材料与对偶面的高接触面积和低剪切界面使其难以形成稳定转移膜, 从而导致了高摩擦磨损。在海水润滑条件下, 复合材料的摩擦系数和磨损率较干燥条件下大幅度下降, 这一方面是因为GO易剪切的特性和ND发挥“迷你滚珠轴承”的作用, 以及海水中的矿物质形成的沉积物减少了对偶面的直接接触, 另一方面是因为在摩擦过程中形成的水膜能够起到润滑和散热作用, 从而降低了摩擦系数和磨损率^[50]。在润滑剂条件下, 复合材料表现出最低的摩擦系数和磨损率, 这一方面是因为高黏度的润滑剂所形成的润滑膜减少了摩擦面的直接接触, 另一方面是因为GO、ND和CF三者的协同效应提升了复合材料的抗变形能力, 两方面共同改善了复合材料在润滑剂条件下的摩擦性能。

研究人员从环境因素(热老化)、界面改性、纤维状态(原生CF与再生CF)和润滑方式等方面探究了CF/UHMWPE复合材料的摩擦性能。总结研究结果可见, 环境因素对其摩擦性能的长期使用稳定性影响较大。此外, 提升增强填料与树脂的界面粘结性能和使用合适的润滑方式能够更好地改善复合材料的摩擦性能。

5 CF/PA复合材料的摩擦性能

PA具有韧性好、耐疲劳和自润滑等优点, 是目前应用最多的工程塑料之一。但PA在高接触压力下极易变形, 限制了其在高压环境下的使用^[51]。采用碳纤维增强后的PA树脂基复合材料具有抗压、耐腐蚀和耐摩擦磨损等优异特性, 常被用于制造汽车、家电和工业机器等器械的零部件。

在干燥和油脂润滑条件下, PA66基复合材料呈现出不同的摩擦性能。Kunishima等^[51]通过挤出注塑工艺制备了CF/PA66和玻璃纤维(GF)/PA66复合材料, 并比较了其在油脂和干燥条件下的摩擦性能。结果显示, 在高接触压力和干燥条件下, CF/PA66复合材料比PA66树脂和GF/PA66复合材料表现出更好的摩擦性能, 这是因为在干

燥条件下CF促进摩擦表面生成一层润滑薄膜, 提升了其摩擦性能, 两种复合材料在干燥条件下的磨损机制均为粘着磨损。在油脂润滑条件下, 两种复合材料表现出比干燥条件下更低的摩擦系数和磨损率, 其低摩擦磨损是由油脂提供的, 但是GF/PA66复合材料的摩擦性能优于CF/PA66复合材料, 这可能是因为CF/PA66复合材料的界面粘结强度较GF/PA66复合材料的低, CF易被剥落, 进而对摩擦面造成损伤, 导致CF/PA66复合材料摩擦性能下降(图9)。

提升填料与树脂之间的界面粘结性能有助于改善PA基复合材料的力学和摩擦性能^[52,53]。偶联剂常被用来改善有机材料和无机材料之间的界面结合, Karatas等^[53]注塑成型制备了石墨烯纳米片(GNP)/CF/PA6,6复合材料, 并研究了1,4-亚苯基双噁唑啉偶联剂(PBO)处理GNP后的复合材料的力学和摩擦性能。结果表明, 当加入PBO处理的GNP时(CF-0.5GNP-PBO), 复合材料的拉伸强度较无PBO处理的提高了14%, 这是因为GNP和PBO的偶联效应提高了GNP的分散性和取向性, 从而提升了拉伸强度。同时CF-0.5GNP-PBO复合材料的摩擦系数和磨损体积达到最低, 这一方面是因为PBO可以与CF、GNP和PA6,6中的胺和羧酸等基团发生耦合, 提升复合材料力学性能的同时增加了耐磨性, 另一方面是因为GNP自身具有一定的润滑性, 两种作用共同提高了复合材料的摩擦性能。

填料自身的结构特性有助于改善复合材料的摩擦性能, 芳香族共聚酯液晶聚合物(LCP)表现出的液体流动性和Gr的润滑性可有效提高复合材料的摩擦性能。Zhou等^[54]通过热压成型制备了LCP/CF/聚酰胺-聚氨酯(PA-PU)和Gr/CF/PA-PU复合材料。研究结果显示, LCP/CF/PA-PU复合材料的摩擦系数和磨损率较CF/PA-PU分别降低了16.06%和32.22%, 这是因为LCP中两个苯环共轭形成的平面结构有利于分子有序排列, 形成易于剪切的润滑面, 增强复合材料的润滑性。另外LCP对CF好的粘附性使CF能够更好地承担载荷, 减少复合材料基体塑性变形, 提升其耐磨性。当添加1 wt%的Gr时, Gr/CF/PA-PU复合材料的摩擦系数为0.176, 较CF/PA-PU复合材料降低了19.27%; 当添加3 wt%的Gr时, Gr/CF/PA-PU复合材料的磨损率较CF/PA-PU降低了33.08%,

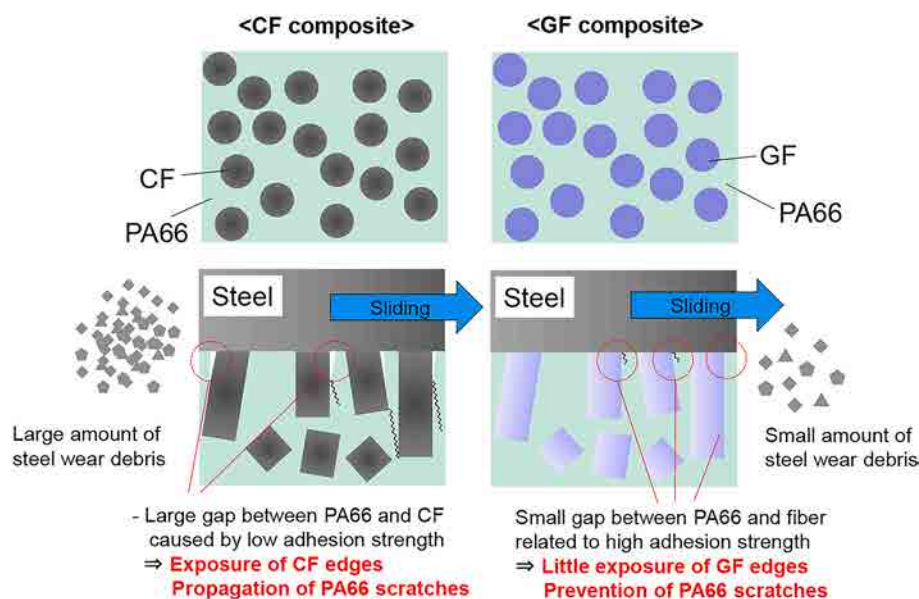


图9 CF/PA66和GF/PA66复合材料的滑动行为差异图^[51] (2021 Elsevier B.V. 版权许可)

Figure 9 Schematics of the differences in the sliding behavior of the GF composite and CF composite (Reprinted with permission from Ref.[51]; Copyright 2021 Elsevier B.V.)

这是因为Gr促进磨损表面形成了石墨晶体转移膜,从而降低复合材料的摩擦系数和磨损率。

研究人员从润滑方式、界面改性和填料结构特性等方面探究了CF/PA复合材料的摩擦性能。研究中发现,CF与PA树脂的界面结合性能不理想,在摩擦过程中CF易被拔出,从而造成更大的摩擦磨损,因此有必要对其进行界面改性,提高其界面结合强度,进而提升CF/PA复合材料的摩擦性能。另外,利用不同的润滑介质和填料结构特性也可有效提升CF/PA复合材料的摩擦性能。

6 五种碳纤维增强热塑性复合材料摩擦性能对比及应用

当前研究人员主要从材料体系改性和摩擦使役条件两大方面来研究CFRTP的摩擦性能。材料体系改性方面主要有增强粒子填充改性、界面改性和微观结构调控等方法,而摩擦使役条件方面主要包括润滑条件 and 环境因素两方面。通过探究性能与材料体系和摩擦使役条件之间的关系,能够促使热塑性碳纤维复合材料更好地发挥结构-功能优势。

结构决定性能,基体树脂之间由于分子结构和聚集态结构的不同,会使得宏观性能表现出较大的差异。PEEK、PI和PPS树脂分子链中含有大量的苯环结构,赋予其优异的力学、耐热和耐摩

擦抗磨损性能;UHMWPE树脂的分子链线形结构赋予其较高的柔性特性,但也导致其力学、耐摩擦磨损和耐热等综合使用性能逊色于前面三种特种工程塑料;PA树脂种类繁多,包含常规型和高温型,由于具有优异的力学、耐摩擦磨损、耐热和低成本等综合优势,成为应用最为广泛的工程塑料。考虑环境因素在内的使役性能对比,碳纤维增强PEEK、PI和PPS复合材料的耐摩擦抗磨损使役性能优于CF/UHMWPE和CF/PA复合材料。下面总结分析了本文中五种碳纤维增强热塑性复合材料的优缺点及其各自的应用领域。

(1) PEEK、PI和PPS基复合材料具有高强度、耐热、耐腐蚀、尺寸稳定、耐摩擦磨损等特性,在不同工况下都能表现出优异且稳定的摩擦性能,但因其成本较高,在民用领域的应用受到限制。因此以PEEK、PI和PPS等特种热塑性树脂为基体的碳纤维复合材料较多应用在航空航天、海洋开发、军工制造和能源工程等高精尖前沿领域。

(2) UHMWPE树脂基复合材料具有耐冲击、超低吸水性、自润滑性、耐腐蚀性和生物相容性等优异性能,在常温、常压等非严苛工况下表现出良好的使用性能。但是UHMWPE熔融黏度大,硬度低、膨胀系数较大和耐热性差等缺点限制了其在精密仪器和高温高承载结构器械上的应用。因此,CF/UHMWPE复合材料主要应用在医疗卫生、体育器材和一般机械制造等领域。

(3) PA 树脂基复合材料具有耐磨、耐冲击、耐化学腐蚀等性能, 兼具良好使用性能的同时, 成本相对低廉, 性价比较高, 但其吸水性大, 制品易发生变形, 在严苛环境下力学和摩擦性能不稳定等缺点限制了其在重载和高温潮湿等环境下的应用。因此 CF/PA 复合材料常被用于汽车制造和工业机械等民生领域。

7 总结与展望

CFRTP 作为一种高性能的结构摩擦材料, 在航天航空、海洋工程、能源开采、交通运输和医疗器械等领域具有广泛的应用前景。目前有关 CFRTP 摩擦性能的研究主要集中在通过控制填料组分配比和增强界面粘接等手段提升复合材料的力学和摩擦性能, 但是对于复合材料组分之间协同作用、摩擦面微观结构和环境因素等对摩擦性能的影响以及转移膜形成的微观过程的研究还较少。CFRTP 摩擦性能的研究及发展趋势主要围绕以下三个方面展开。

(1) 基于材料和摩擦学基础, 通过探究填料组分配比和工艺调控来实现复合材料摩擦面微结构的设计与调控, 探究其与宏观摩擦性能的内在关系和微观作用机理, 明确复合材料摩擦磨损机制。

(2) 针对不同条件下的摩擦机制进行探究, 重点研究不同的外界环境和工况下的转移膜形成作用机理, 以及填料之间的协同增强作用机制, 加深对摩擦基础理论的探究。

(3) 海洋开发和环境保护在未来发展中占据越来越重要的地位, 水润滑具有不燃、清洁无污染的优点, 因此新型高性能 CFRTP 水润滑材料在摩擦材料领域具有极大的发展前景。

参考文献

- 谢爽爽, 段春俭, 高传平, 张晟卯, 张平余. 羟基硅酸镁在润滑领域的应用研究进展. *表面技术*, **2023**, 52(12), 249–259.
- Alshammari, B. A.; Alsuhybani, M. S.; Almushaikeh, A. M.; Alotaibi, B. M.; Alenad, A. M.; Alqahtani, N. B.; Alharbi, A. G. Comprehensive review of the properties and modifications of carbon fiber-reinforced thermoplastic composites. *Polymers*, **2021**, 13(15), 2474.
- Li, F. F.; Hu, Y.; Hou, X. C.; Hu, X. Y.; Jiang, D. Thermal, mechanical, and tribological properties of short carbon fibers/PEEK composites. *High Perform. Polym.*, **2018**, 30(6), 657–666.
- Jeong, K. M.; Li, Y. H.; Yoo, D. G.; Lee, N. K.; Lee, H. G.; Ando, S.; Ha, C. S. Effects of crosslinking agents on the physical properties of polyimide/amino-functionalized graphene oxide hybrid films. *Polym. Int.*, **2018**, 67(5), 588–597.
- 邓杰. 热塑性聚酰胺. *纤维复合材料*, **2005**, 22(3), 61–64.
- Li, Z. H. The effect of titanium dioxide on the tribological properties of carbon fiber-reinforced polyimide composites. *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, **2015**, 28(2), 257–264.
- Li, H.; Lv, G. Y.; Zhang, G.; Ren, H. H.; Fan, X. X.; Yan, Y. G. Synthesis and characterization of novel poly(phenylene sulfide) containing a chromophore in the main chain. *Polym. Int.*, **2014**, 63(9), 1707–1714.
- Chen, Z. B.; Li, T. S.; Yang, Y. L.; Liu, X. J.; Lv, R. G. Mechanical and tribological properties of PA/PPS blends. *Wear*, **2004**, 257(7–8), 696–707.
- Salama, A.; Kamel, B. M.; Osman, T. A.; Rashad, R. M. Investigation of mechanical properties of UHMWPE composites reinforced with HAP+TiO₂ fabricated by solvent dispersing technique. *J. Mater. Res. Technol.*, **2022**, 21, 4330–4343.
- Zhang, X.; Zhao, S. C.; Xin, Z. The chain disentanglement effect of polyhedral oligomeric silsesquioxanes (POSS) on ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE). *Polymer*, **2020**, 202, 122631.
- Xin, X. C.; Wang, Y. X.; Meng, Z. J.; Yan, F. Y. Improving mechanical properties and fretting wear resistance of ultra-high-molecular-weight-polyethylene via incorporation of zeolitic imidazolate frameworks-carbon nano-fiber. *Polym. Adv. Technol.*, **2021**, 32(6), 2622–2632.
- Wu, J.; Chen, H.; Wu, Q.; Liu, H. B.; Luo, Z. J. Surface modification of carbon fibers and the selective laser sintering of modified carbon fiber/nylon 12 composite powder. *Mater. Des.*, **2017**, 116, 253–260.
- Xu, S. H.; Sun, L. C.; He, J.; Han, H.; Wang, H. G.; Fang, Y. Q.; Wang, Q. W. Effects of LiCl on crystallization, thermal, and mechanical properties of polyamide 6/wood fiber composites. *Polym. Compos.*, **2018**, 39(S3), E1574–E1580.
- 陈明锴, 陈磊, 马彦军, 张定军, 周惠娣, 陈建敏. 润滑耐磨耐蚀功能一体化有机黏结涂层的研究进展. *高分子材料科学与工程*, **2024**, 40(4), 182–190.
- 黄素玲, 逢显娟, 岳世伟, 谢金梦, 王帅, 宋晨飞, 陈德强, 张永振. 聚醚醚酮复合材料改性及其摩擦学性能与应用研究进展. *化工新型材料*, **2022**, 50(4), 1–5.

- 16 谢金梦, 逢显娟, 黄素玲, 赵若凡, 刘亚婷, 王帅, 宋晨飞, 李栋. 碳纤维改性PEEK复合材料摩擦学性能及其应用研究进展. *化工新型材料*, **2023**, 51(10), 1–7.
- 17 Wang, Q. F.; Wang, Y. X.; Wang, H. L.; Fan, N.; Wang, M. J.; Liu, H.; Yan, F. Y. Comparative study of the effects of nano-sized and micro-sized CF and PTFE on the thermal and tribological properties of PEEK composites. *Polym. Adv. Technol.*, **2018**, 29(2), 896–905.
- 18 邱孝涛, 高阳, 王秀丽, 顾爱群, 余自力. 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. *摩擦学学报*, **2020**, 40(2), 240–251.
- 19 Li, J.; Sheng, X. H. Surface oxidation of carbon fibre on tribological properties of PEEK composites. *Mater. Sci. Technol.*, **2009**, 25(8), 1051–1056.
- 20 Qiu, X. T.; Gao, Y.; Wang, X. L.; Tang, S. Q.; Gu, A. Q.; Xie, M. J.; Yu, Z. L. Cyclic (phenylene sulfide) treated carbon fiber for facile preparation of high performance PEEK based anti-wear composites. *Mater. Chem. Phys.*, **2022**, 278, 125665.
- 21 Feng, C. N.; Guo, Y.; Yu, Z. Y.; Chen, K.; Wang, D. G.; Li, X. W.; Luo, Y.; Wang, Q. L.; Zhang, D. K. Tribological properties of PEEK composites reinforced by MoS₂ modified carbon fiber and nano SiO₂. *Tribol. Int.*, **2023**, 181, 108315.
- 22 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.
- 23 Xie, G. Y.; Sui, G. X.; Yang, R. Effects of potassium titanate whiskers and carbon fibers on the wear behavior of polyetheretherketone composite under water lubricated condition. *Compos. Sci. Technol.*, **2011**, 71(6), 828–835.
- 24 Zhang, G.; Chang, L.; Schlarb, A. K. The roles of nano-SiO₂ particles on the tribological behavior of short carbon fiber reinforced PEEK. *Compos. Sci. Technol.*, **2009**, 69(7-8), 1029–1035.
- 25 Molazemhosseini, A.; Tourani, H.; Khavandi, A.; Eftekhari Yekta, B. Tribological performance of PEEK based hybrid composites reinforced with short carbon fibers and nano-silica. *Wear*, **2013**, 303(1-2), 397–404.
- 26 Wang, W.; Zhao, F. Y.; Zhang, J. J.; Myshkin, N. K.; Zhang, G. Significant friction and wear-reduction role of attapulgite nanofibers compounded in PEEK-based materials. *Compos. Sci. Technol.*, **2022**, 230, 109449.
- 27 Liu, H. B.; Su, X. Q.; Tao, J.; Fu, R. L.; Yang, W. G.; You, C. Q.; Qiu, L. S. Influence of cenosphere on tribological properties of short carbon fiber reinforced PEEK composites. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2019**, 136(12), 47245.
- 28 Liu, L.; Xiao, L. H.; Zhang, X. P.; Li, M.; Chang, Y. J.; Shang, L.; Ao, Y. H. Improvement of the thermal conductivity and friction performance of poly(ether ether ketone)/carbon fiber laminates by addition of graphene. *RSC Adv.*, **2015**, 5(71), 57853–57859.
- 29 Liu, L.; Yan, F.; Gai, F. Y.; Xiao, L. H.; Shang, L.; Li, M.; Ao, Y. H. Enhanced tribological performance of PEEK/SCF/PTFE hybrid composites by graphene. *RSC Adv.*, **2017**, 7(53), 33450–33458.
- 30 Yang, F.; Li, J.; Han, S. S.; Ma, N.; Li, Q. S.; Liu, D. Y.; Sui, G. X. Wear resistant PEEK composites with great mechanical properties and high thermal conductivity synergized with carbon fibers and h-BN nanosheets. *Polym. Adv. Technol.*, **2023**, 34(7), 2224–2234.
- 31 Guo, L. H.; Zhang, G.; Wang, D. A.; Zhao, F. Y.; Wang, T. M.; Wang, Q. H. Significance of combined functional nanoparticles for enhancing tribological performance of PEEK reinforced with carbon fibers. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **2017**, 102, 400–413.
- 32 Guo, L. H.; Qi, H. M.; Zhang, G.; Wang, T. M.; Wang, Q. H. Distinct tribological mechanisms of various oxide nanoparticles added in PEEK composite reinforced with carbon fibers. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **2017**, 97, 19–30.
- 33 Gao, C. P.; Fan, S. G.; Zhang, S. M.; Zhang, P. Y.; Wang, Q. H. Enhancement of tribofilm formation from water lubricated PEEK composites by copper nanowires. *Appl. Surf. Sci.*, **2018**, 444, 364–376.
- 34 刘福华, 明白, 李轩, 柴悦, 张晓燕, 来升, 田进. 聚醚亚胺及其复合材料的摩擦学改性研究进展. *材料科学与工程学报*, **2023**, 41(6), 1033–1040.
- 35 Lin, Y. S.; He, R.; Xu, Y. K.; Zhang, J. J.; Wetzel, B.; Zhang, G. Significance of nickel particles on reducing friction and wear of polyimide subjected to harsh boundary lubrication conditions. *Tribol. Int.*, **2023**, 178, 108063.
- 36 Chen, B. B.; Yang, J.; Wang, J. Z.; Liu, N.; Li, H. P.; Yan, F. Y. Fiber hybrid polyimide-based composites reinforced with carbon fiber and poly-*p*-phenylene benzobisthiazole fiber: Tribological behaviors under sea water lubrication. *Polym. Compos.*, **2016**, 37(6), 1650–1658.
- 37 Chen, B. B.; Li, X. F.; Li, X.; Jia, Y. H.; Yang, J.; Li, C. S. Hierarchical carbon fiber-SiO₂ hybrid/polyimide composites with enhanced thermal, mechanical, and tribological properties. *Polym. Compos.*, **2018**, 39(S3), E1626–E1634.
- 38 Song, J. F.; Yu, Y. H.; Zhao, G.; Qiu, J. H.; Ding, Q. J. Improved tribological properties of polyimide

- composites by micro-nano reinforcement. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2019**, 136(35), e47900.
- 39 Dong, Z.; Chen, B. B.; Zhang, M. J.; Li, J. Y.; Wang, S. One-step preparation of carbon fiber-ZrO₂ hybrid and its enhancement on the wear-resistant properties of polyimide. *Polym. Compos.*, **2021**, 42(5), 2598–2607.
 - 40 Chen, B. B.; Li, X.; Jia, Y. H.; Li, X. F.; Yang, J.; Yan, F. Y.; Li, C. S. MoS₂ nanosheets-decorated carbon fiber hybrid for improving the friction and wear properties of polyimide composite. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **2018**, 109, 232–238.
 - 41 Shi, Y.; Zhou, S. T.; Heng, Z. G.; Liang, M.; Wu, Y.; Chen, Y.; Zou, H. W. Interlocking structure formed by multiscale carbon fiber—polytetrafluoroethylene fiber hybrid significantly enhances the friction and wear properties of polyphenylene sulfide based composites. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2019**, 58(36), 16541–16551.
 - 42 Jian, L.; Tao, S. The mechanical and tribological properties of CF/PPS composite filled with PA6. *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, **2014**, 27(5), 594–602.
 - 43 Luo, W.; Liu, Q.; Li, Y.; Zhou, S. T.; Zou, H. W.; Liang, M. Enhanced mechanical and tribological properties in polyphenylene sulfide/polytetrafluoroethylene composites reinforced by short carbon fiber. *Compos. Part B Eng.*, **2016**, 91, 579–588.
 - 44 Qiu, X. T.; Gu, A. Q.; Tang, S. Q.; Tang, W. J.; Yu, Z. L. Tribological properties of cyclic phenylene sulfide heat-treated carbon fiber/polyphenylene sulfide composites. *Polym. Compos.*, **2023**, 44(2), 1408–1420.
 - 45 Kim, M.; Lee, J.; Cho, M.; Kim, J. Improvement of thermal and abrasion resistance performance of polyphenylene sulfide composite through 3-mercaptopropyl trimethoxysilane treatment of carbon fiber and graphene oxide fillers. *Polym. Test.*, **2022**, 108, 107517.
 - 46 Zhen, J. M.; Han, Y. X.; Zhu, L. L.; Hou, W. L.; Liu, Y. L.; Huang, W. L.; Yang, L. W.; Yuan, L.; Jia, Z. F.; Zhang, R. MoS₂/CF synergistic enhancement to improve the friction and wear properties of UHMWPE composites. *Tribol. Int.*, **2023**, 179, 108097.
 - 47 Meng, Z. J.; Wang, Y. X.; Liu, H.; Yan, F. Y. Carbon fiber modified by attapulgite for preparing ultra-high molecular weight polyethylene composite with enhanced thermal, mechanical, and tribological properties. *Polym. Adv. Technol.*, **2022**, 33(12), 4142–4151.
 - 48 Ventura, A. M.; Kneissl, L. M.; Nunes, S.; Emami, N. Recycled carbon fibers as an alternative reinforcement in UHMWPE composite. Circular economy within polymer tribology. *Sustain. Mater. Technol.*, **2022**, 34, e00510.
 - 49 Vadivel, H. S.; Somberg, J.; Kalin, M.; Emami, N. Tribological performance of a UHMWPE-based multiscale composite under different lubrication and loads. *Lubr. Sci.*, **2022**, 34(7), 480–492.
 - 50 Tian, J. W.; Qi, X.; Li, C. G.; Xian, G. J. Friction behaviors and wear mechanisms of multi-filler reinforced epoxy composites under dry and wet conditions: Effects of loads, sliding speeds, temperatures, water lubrication. *Tribol. Int.*, **2023**, 179, 108148.
 - 51 Kunishima, T.; Nagai, Y.; Bouvard, G.; Abry, J. C.; Fridrici, V.; Kapsa, P. Comparison of the tribological properties of carbon/glass fiber reinforced PA66-based composites in contact with steel, with and without grease lubrication. *Wear*, **2021**, 477, 203899.
 - 52 Yang, M.; Li, Y.; Liao, Q. J.; Yang, D. The interlaminar shear strength and tribological properties of PA6 composites filled with graphene oxide-treated carbon fiber. *Surf. Interface Anal.*, **2017**, 49(8), 755–758.
 - 53 Karatas, E.; Gul, O.; Karsli, N. G.; Yilmaz, T. Synergetic effect of graphene nanoplatelet, carbon fiber and coupling agent addition on the tribological, mechanical and thermal properties of polyamide 6,6 composites. *Compos. Part B Eng.*, **2019**, 163, 730–739.
 - 54 Zhou, Z.; Wang, X. Q.; Li, X. M.; Liu, C.; Li, G. P.; Luo, Y. J. Tribological and mechanical applications of liquid-crystal-polymer-modified carbon-fiber-reinforced polyamide-polyurethane composites. *Polymers*, **2023**, 15(9), 2033.