

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.06.014

纳米凹凸棒石对酚醛复合材料摩擦学性能的影响

王晓东¹, 李欢², 张嘎², 王小新¹

(1. 青岛科技大学高分子科学与工程学院, 山东青岛 266042; 2. 中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 源自优质黏土矿物资源的一维凹凸棒石(AT)纳米纤维, 可用于增强复合材料并改善其摩擦磨损特性。采用酚醛树脂(PF)模塑料塑炼工艺及热压成型工艺制备了 AT 纳米纤维混杂传统微米纤维如碳纤维(CF)、玻璃纤维(GF)及芳纶纤维(AF)增强 PF 复合材料, 系统考察了 AT 纳米纤维的含量对微米尺度短切纤维增强 PF 复合材料压缩性能及多种工况下摩擦学性能的影响规律, 利用扫描电子显微镜及能谱仪表征了摩擦界面原位生长转移膜的微观结构, 探索了 AT 纳米纤维与微米纤维在干摩擦、油润滑和水润滑条件下可能的协同减摩抗磨作用机理。结果表明, AT 与高模量纤维(CF, GF)表现出显著的协同增强作用, 显著提高了 PF 复合材料的压缩强度。当 AT 纳米纤维质量分数为 20% 时, CF/AT/PF 与 GF/AT/PF 的压缩强度分别可达 407 MPa 及 400 MPa。干摩擦条件下, AT 分别与 CF 和 AF 的复配使用促进了固体润滑特性转移膜的生长, 提高了材料的自润滑性能; 油润滑条件下, GF/AT/PF 表现出最高的耐磨性能, GF 减薄可能是主要的磨损机理; 水润滑条件下, AF/AT/PF 表现出最低的摩擦系数, 而 CF/AT/PF 表现出最高的耐磨性能。

关键词: 凹凸棒石; 摩擦磨损; 纤维增强; 多重工况; 转移膜

中图分类号: TQ322 文献标识码: A 文章编号: 1001-3539(2024)06-0095-08

Effect of nano-attapulgite on tribological properties of phenolic composites

WANG Xiaodong¹, LI Huan², ZHANG Ga², WANG Xiaoxin¹

(1. School of Polymer Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China;

2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract : One-dimensional attapulgite (AT) nanofibers sourced from high-quality clay mineral resources can reinforce polymeric composites and improve their anti-friction and wear resistance. Hybrid phenolic resin (PF) composites reinforced with both AT and conventional microfibers, i.e. carbon fiber (CF), glass fiber (GF) and aramid fiber (AF), were prepared via plasticization mixing of PF molding compound and hot press techniques. The effects of AT nanofiber contents on mechanical properties and tribological properties (under multiple working conditions) of micron-scale chopped fibers reinforced PF composites. Microstructures of in-situ growth tribofilms established at friction interface were studied by scanning electron microscopy and energy dispersive spectrometer. Possible synergetic roles and mechanisms of anti-friction and wear-reduction of AT nanofiber and the microfibers under dry friction, oil-lubricated and water-lubricated conditions were explored. The results demonstrate that combination of AT and high-modulus fibers (CF or GF) exhibits a significantly synergistic reinforcing effect on the PF matrix, greatly improving the compression strength of the PF composite. When the mass fraction of AT nanofiber is 20%, the compressive strength of GF/AT/PF and CF/AT/PF can reach 407 MPa and 400 MPa, respectively. Under dry friction condition, the addition of combined AT/CF or AT/AF into the PF matrix promotes tribofilm with solid lubrication characteristics growth on steel counterface. In particular, self-lubricating properties of CF/AT/PF and AF/AT/PF were identified. Under oil-lubricated conditions, GF/AT/PF shows the highest wear resistance among the composites, GF fiber thinning is surmised to be an important wear mechanism of the composite. When being subjected to sliding in water, AF/AT/PF shows the lowest friction coefficient, whilst CF/AT/PF shows the highest wear resistance.

Keywords : attapulgite ; friction and wear ; fiber reinforced ; multiple working condition ; tribofilm

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDB0470201), 中国科学院国际伙伴计划全球共性挑战专项资助项目(121B62KYSB20210030)

通信作者: 王小新, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事高分子材料先进成型技术研究; 张嘎, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事聚合物自润滑纳米复合材料研究

收稿日期: 2024-03-28

引用格式: 王晓东, 李欢, 张嘎, 等. 纳米凹凸棒石对酚醛复合材料摩擦学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(6): 95-102.

WANG Xiaodong, LI Huan, ZHANG Ga, et al. Effect of nano-attapulgite on tribological properties of phenolic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(6): 95-102.

在轨道交通、航空航天及风力发电等诸多高端装备中,极端或复杂多变的服役工况不仅使运动部件受到剧烈的磨损,而且增大了运动系统因摩擦失效而出现故障的风险^[1]。然而摩擦学性能并不是材料的固有特性,通常与服役工况密切相关。因此面对单一工况设计的材料在其他条件下有概率出现“材料-性能-工况”不匹配的问题。相关研究证明,通过材料的组分及结构设计以获得高工况适应性的聚合物固体润滑材料是一种可行的解决方案^[2-3]。作为典型的热固性树脂之一,酚醛树脂(PF)具有高耐热性、优异力学性能及良好的加工性能等,被广泛用于摩擦材料。然而纯PF的低韧性和高摩擦系数限制了其在固体润滑领域的应用,可通过分子结构改性、橡胶微粒掺杂以及纤维增强等多种方式来优化PF复合材料的摩擦学性能。其中,常规高模量纤维,如碳纤维(CF)、玻璃纤维(GF)、芳纶纤维(AF),充当承载作用,通过增强效应实现复合材料高耐磨性。相比于单一纤维增强PF复合材料,多元纤维杂化体系^[4]可充分发挥尺寸效应,增强材料的各向异性,协同诱导摩擦界面作用,改善摩擦磨损特性,以满足严苛工况下摩擦学性能要求。

不同于微米尺度的常规增强纤维,来源于凹凸棒石黏土矿物资源主要成分的一维凹凸棒石(Attapulgite, AT),经解离后呈现出具有大量纳米孔道的纳米纤维形态及层链状晶体结构^[5],可用作增强填料或固体润滑剂。目前,关于AT纳米纤维在润滑油添加剂与纳米增强填料领域的应用已有报道^[6-7]。中国科学院兰州化学物理研究所张嘎课题组研究发现在干摩擦条件下AT纳米纤维在聚酰亚胺^[8]、聚醚醚酮^[9]和环氧复合材料^[10]中有明显的减摩抗磨作用。然而,目前关于多种工况下AT纳米纤维对复合材料摩擦学行为的影响规律尚未有系统性研究,且影响摩擦界面转移膜生长的诸多因素仍需进一步探索。

笔者通过制备系列纤维增强PF复合材料,对比研究CF、GF及AF微米纤维或/与AT纳米纤维对复合材料力学性能和多种工况下的摩擦学性能的影响;利用扫描电子显微镜及能谱仪表征摩擦界面原位生长转移膜的微观结构,探索了AT纳米纤维与微米纤维在干摩擦、水润滑和油润滑条件下可能的协同减摩抗磨作用及机理。该结果可为适用于多重工况的聚合物固体润滑材料的结构设计及开发

提供理论依据及技术支持。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PF: PF8064A, 密度 1.4 g/cm^3 , 六亚甲基四胺含量为 17%~19%, 山东济南圣泉新材料有限公司;

CF: 德国 SGL Carbon 有限公司;

GF: 南京绿洲纤维有限公司;

AF: 上海喀狄特种纤维有限公司;

聚 α 烯烃基础油(PAO4): 美孚润滑油有限公司;

去离子水: 实验室自制。

AT 纳米纤维由中国科学院兰州化学物理研究所提供, 晶体束解离所得。

利用场发射扫描电子显微镜(FESEM)和透射电子显微镜(TEM)分别观察 CF、GF、AF 及 AT 表面形貌, 结果如图 1 所示; 纤维其他特征参数由厂家提供, 具体见表 1。

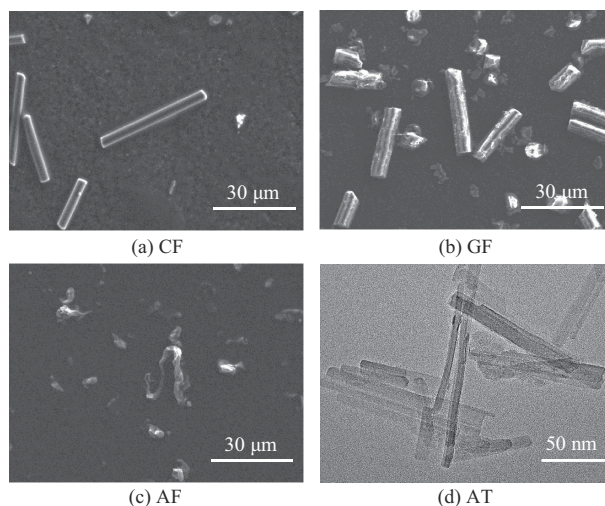


图1 CF、GF和AF形貌的FE-SEM图及AT的TEM图

Fig. 1 FE-SEM image of fiber (CF, GF and AF) morphology and TEM image of AT

表1 纤维特征参数

Tab. 1 Characteristic parameter of fibers

Fiber	Diameter/ μm	Average length/ μm	Density/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	Tensile strength/GPa	Tensile modulus/GPa
CF	7	50	1.8	3.0	200
GF	<10	30	2.3	3.4	73
AF	<10	20	1.4	2.8	120
AT	0.05	0.5	2.1	—	—

1.2 主要仪器及设备

小型摇摆式高速混合粉碎机: 2500C, 永康红太阳机电有限公司;

开放式炼胶机: CREE, 东莞科锐仪器科技有限

公司;

平板硫化机: SX302013, 建湖威力液压机械制造有限公司;

高温鼓风式干燥箱: 上海一恒科学仪器有限公司;

抛磨机: MP-2, 莱州蔚仪实验器械制造有限公司;

电子天平: MS105DU, 上海-梅特勒-托利多仪器有限公司;

邵氏硬度计: LD-J, 东莞三量量具有限公司;

万能材料力学试验机: DF-7000, 东莞高铁检测仪器有限公司;

环块式摩擦试验机: MRH-3, 济南益华摩擦学测试技术有限公司;

FESEM: EVO10, 德国 Carl Zeiss 公司;

TEM: Tecnai G2 TF20 S-TWIN, 美国 FEI 公司。

1.3 试样制备

将 PF 粉末、GF 及 AF 和 CF 置于 80 °C 烘箱内干燥 8 h, 以去除材料表面吸附的水分。按表 2 所示的配方对干燥后的原料进行称量后, 使用高速粉碎机进行充分混合。然后置于前辊温度为 125 °C、后辊温度为 110 °C 的开炼机上进行塑炼, 以得到纤维均匀分散的片状材料。再次使用高速粉碎机进行充分粉碎后转移至模压成型所需模具中, 于 30 MPa, 180 °C 下保压 30 min, 以固化成型。为消除内应力, 经进一步热处理最终得到复合材料板材。

表 2 PF 复合材料的代号及各组分质量分数

Tab. 2 Abbreviation and each component mass fraction of PF composites

Abbreviation	PF	AT	CF	GF	AF	%
10CF/PF	90		10			
10CF/10AT/PF	80	10	10			
10CF/20AT/PF	70	20	10			
10GF/PF	90			10		
10GF/10AT/PF	80	10		10		
10GF/20AT/PF	70	20		10		
10AF/PF	90				10	
10AF/10AT/PF	80	10			10	
10AF/20AT/PF	70	20			10	

1.4 测试与表征

按照 GB/T 1041-2008, 取微型台锯切割后的 10 mm×10 mm×4 mm 试样, 采用万能材料力学试验机进行压缩性能测试, 重复 5 次以上, 记录并计算压缩强度与压缩应变的平均值和误差值。

通过邵氏硬度计测定邵氏 D 硬度, 按照 GB/T 2411-2008, 进行 5 次以上重复测试, 取平均值。

摩擦学性能测试是通过环块式摩擦试验机完成, 测试温度为室温。所需试样尺寸为 4 mm×10 mm×25.5 mm, 摩擦对偶是外径 50 mm 的轴承钢环。钢环表面经过砂纸抛光, 表面粗糙度约为 0.15 μm。摩擦学性能测试之前, 用乙醇对试样与钢环进行超声清洗, 后用石油醚进行擦拭, 以去除表面磨屑和油渍。测试条件为干摩擦及润滑摩擦, 其中润滑摩擦所用润滑介质为润滑油 PAO4 和去离子水, 载荷为 50, 200 N, 滑动速度为 1 m/s, 测试时间为 3 h, 每个样品重复测试 3 次以上, 以确定平均摩擦系数及磨损率。其中, 取每次试验结束前 30 min 内平均摩擦系数为单次摩擦系数。采用 FESEM 对 PF 复合材料的磨损表面及钢环表面转移膜进行微观形貌表征并通过附带的能量色散射线光谱仪(EDS)观察表面元素分布。

2 结果与讨论

2.1 力学性能

为探索纳米纤维及常规微米纤维对复合材料的增强作用以及相互间可能存在的协同效应, 对所制备的纤维增强 PF 复合材料进行压缩性能测试, 其结果见表 3。当同等含量的不同纤维分别加入 PF 基体中, 10CF/PF 表现出最高的压缩强度, 可达近 350 MPa。有增强增韧效应的 AT^[1]加入 PF 时, AT/PF 表现出类似于 CF/PF 的高压缩强度。在微米纤维/PF 中加入这种 AT 纳米纤维(质量分数为 10%), AF/PF 的压缩强度变化不大但 CF/PF 和 GF/PF 的压缩强度得到大幅提高。随 AT 质量分数增加到 20%, 三者皆得到不同程度的增大, 尤其 GF/AT/PF 与 CF/AT/PF 的压缩强度可达到 400 MPa 及以上。由此可知, AT 纳米纤维与高模量微米纤维复配使用时对

表 3 PF 复合材料的压缩性能及硬度

Tab. 3 Compressive properties and hardness of PF composites

Samples	Compressive strength/MPa	Compressive strain/%	Shore hardness/HD
10CF/PF	349.33	20.88	96
10CF/10AT/PF	380.67	19.55	97
10CF/20AT/PF	407.00	16.92	98
10GF/PF	336.67	19.83	95
10GF/10AT/PF	360.67	14.97	95
10GF/20AT/PF	400.00	18.41	96
10AF/PF	326.33	24.02	94
10AF/10AT/PF	327.33	14.11	93
10AF/20AT/PF	346.33	17.14	96

PF复合材料的增强效果更为显著,得到的复合材料可具有更高承载能力。另一方面,压缩应变的大小可反映材料抗形变能力的强弱^[12]。相比于微米纤维/PF,AT纳米纤维的加入明显减小了微米纤维/PF复合材料的压缩应变,表明AT纳米纤维的增强作用可以提高复合材料抗形变能力。

如表3所示,经AT纳米纤维和微米纤维改性PF复合材料的邵氏D硬度均在90 HD以上。总体上看,AT纳米纤维的加入使3种微米纤维增强的PF复合材料硬度都有所提高,且硬度随着AT含量的增大有提高的趋势。同时添加CF和AT的PF复合材料的邵氏硬度最高且数值可达到98 HD,这归因于CF与AT的协同补强作用。

2.2 干摩擦工况下PF复合材料摩擦学性能

纤维填料基于其比强度高、比模量大等优点而广泛用于增强聚合物复合材料。不同纤维对聚合物复合材料的摩擦学性能影响也各不相同,在不同的工况下聚合物复合材料也表现出不同的摩擦磨损特性^[13]。首先对比研究了干摩擦下增强纤维种类对PF复合材料摩擦学性能的影响,得到载荷分别为50 N和200 N条件下复合材料的平均摩擦系数和磨损率,如图2所示。由图2a看出,GF、AF和CF增强PF表现出不同的摩擦学性能,对摩擦系数而言,从小到大排序为10GF/PF<10AF/PF<10CF/PF,而磨损率排序为10AF/PF<10GF/PF<10CF/PF。高模量CF可在摩擦配副界面引起严重刮擦^[13],加剧磨损。当AT纳米纤维加入微米纤维改性PF复合材料中时,GF/PF复合材料的摩擦系数变化不大,磨损率反而增大,据此推论AT与GF在改善PF摩擦性能方面无明显协同效应。摩擦剪切下生成的GF纳米级碎屑可起到类似于纳米SiO₂的润滑效果^[3],但GF与AT都属于氧化硅类的无机材料,高脆性导致过多氧化硅磨屑生成反而加重磨损。AT纳米纤维在与AF配合改性PF体系中表现出明显的减摩作用。与GF/PF不同的是,AT纳米纤维可使AF/PF摩擦系数显著降低,虽磨损率略有增大,但10AF/20AT/PF的摩擦系数低至0.3。值得注意的是,质量分数为10%的AT可使CF/PF摩擦系数和磨损率分别降低48.8%和66.4%,这种现象是由CF与AT的协同增强效应造成的^[9]。

载荷增大可加速摩擦界面转移膜的形成,使聚合物自润滑材料表现出更低的摩擦系数和磨损

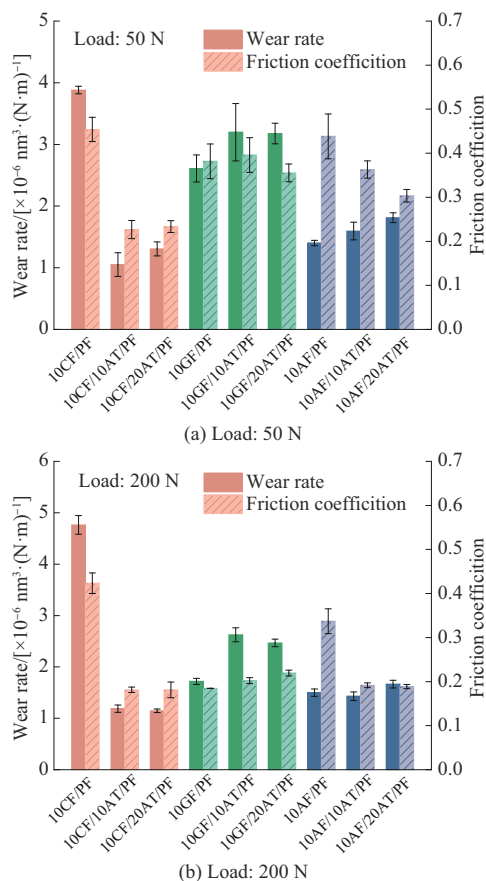


图2 干摩擦工况下PF复合材料的磨损率及摩擦系数

Fig. 2 Wear rate and friction coefficient of PF composites under dry friction condition

率^[14]。然而图2b的结果显示,在200 N条件下AT的加入对复合材料摩擦学性能的影响均表现出类似于50 N下摩擦系数和磨损率的变化趋势。不同的是,质量分数为10%AT的加入即可使AF/PF的摩擦系数降低43.8%,但磨损率变化不大。这说明载荷增大加速了AT解离或发生晶体的层间滑移,促进转移至摩擦对偶面形成转移膜,从而降低了摩擦系数。

图3展示了在200 N和1 m/s条件下AF/PF复合材料和AT增强AF/PF复合材料的摩擦系数演变,在起始阶段两种复合材料的摩擦系数都出现下降趋势。但磨合大约5 min后,10AF/PF复合材料的摩擦系数迅速增长到一个峰值然后下降,并在滑动摩擦45 min后趋于稳定。含AT的10AF/20AT/PF复合材料摩擦系数在前10 min左右保持下降趋势后趋于稳定。根据磨合理论,摩擦系数稳定后磨合阶段完成,此时摩擦界面转移膜构筑完成并达到动态平衡^[15]。磨合时间越长,说明转移膜的生成越困难。

在磨合过程中可以观察到AT的加入显著缩短

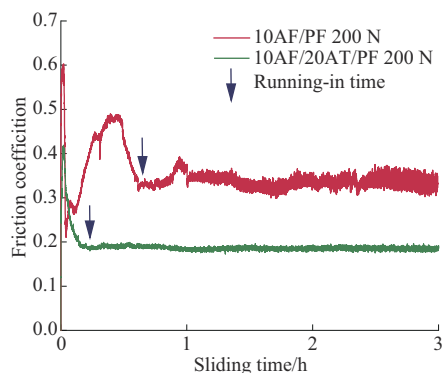


图3 干摩擦工况下AF/PF及AT纳米纤维增强AF/PF复合材料的摩擦系数演变

Fig. 3 Friction coefficient evolution of AF/PF and AT nanofiber reinforced AF/PF composites under dry friction conditions

了磨合时间,且明显减弱了摩擦系数波动,说明摩擦对偶面上迅速形成了稳定存在的转移膜。这与AT从基体快速释放至摩擦表面,并在基体与钢的强剪切作用力下与基体碎屑共混形成具有润滑特性的第三界面即转移膜有关。

图4对比了200 N, 1 m/s下纤维增强PF复合材料与钢环对摩后磨损表面的微观形貌。从图4可以明显观察到所有钢环表面都存在沿滑动方向分布的转移膜,但形貌上有一定差别。其中,与10CF/20AT/PF对摩钢环的表面粗糙且转移膜连续性不足,具有“摩擦烧结”特征;与10GF/20AT/PF对摩钢环的表面出现鳞片化现象,表面发现碎屑严重堆积且微突起多;而10AF/20AT/PF与钢环对摩后形成的转移膜分布更为均匀,连续性高且表面较为平整。对于样品磨损表面,10CF/20AT/PF磨损表面表现出明显的纤维减薄现象,纤维周围的基体表面光滑且无大量剥落。在10GF/20AT/PF样品磨损表面可观察到明显裂纹且表面粗糙,猜测这是由于基体在高剪切作用力下发生“解离”,或掉落的硬质GF碎屑在摩擦界面造成了三体磨损^[16]。而10AF/20AT/PF中,材料磨损表面光滑且无明显裂纹,只在凹陷处观察到微小碎屑聚集,可能是碎屑对磨损表面的二次修复效果。这与AF的低硬度有关,低硬度的AF在摩擦过程中不容易对钢环表面产生强的刮擦作用,同时也不会破坏强剪切应力下快速生成的转移膜,反而沉积在钢环表面修复磨痕,从而产生AF与AT协同减摩效应。

由以上结果可知,干摩擦下AT纳米纤维与常规微米纤维的配合体系在PF基体中的作用有明显区别。其中,CF和AF与AT表现出良好的协同减摩

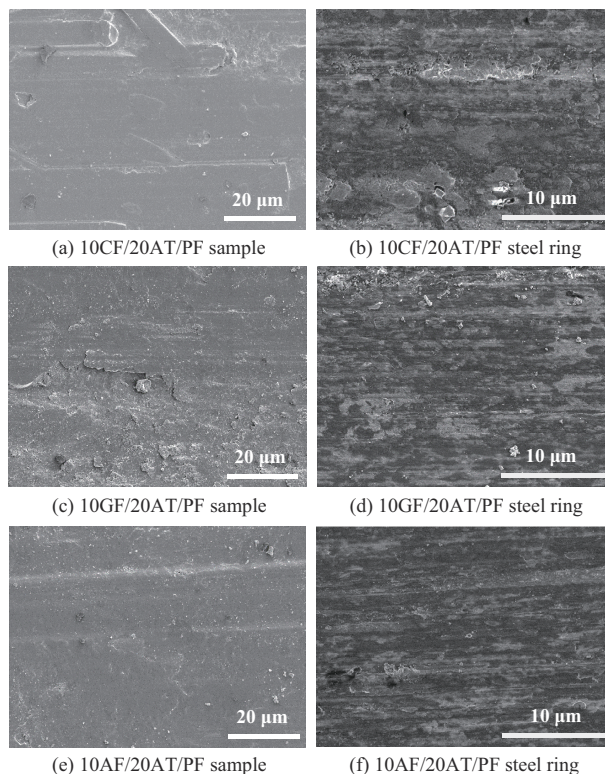


图4 干摩擦工况下样品磨损面及钢环表面的微观形貌

Fig. 4 Micro-morphology of sample worn surface and steel ring surface under dry friction condition

和/或抗磨作用,而GF与AT纳米纤维没有明显协同作用,可能因CF与AF是碳基高韧性纤维,而GF是与AT化学组成一致的高模量硅酸盐类,由此推测AT与其他纤维的协同作用与纤维的模量与主要化学组成有一定的相关性。

在摩擦过程中,由于剪切力和摩擦热驱使,磨损碎屑不仅在钢环表面参与转移膜的构筑,在基体表面也会形成了一层很薄的杂化层。图5展示了10AF/20AT/PF与钢环对摩后的样品磨损表面形貌SEM图和EDS元素分布情况。在样品磨损表面发现了钢环磨屑或摩擦氧化产物中的Fe元素,这证明了摩擦过程中钢表面剥离、氧化的铁屑或铁氧化物向复合材料表面转移,并和其他磨损碎屑混合形成杂化层。另外,样品磨损表面的磨痕处发现了Si元素与Al元素的明显聚集,这证明了AT在摩擦过程中从基体中释放且富集在摩擦界面,参与了钢环转移膜与基体杂化层的形成。杂化层与转移膜的存在将聚合物-金属配副的接触形式改变成杂化层-转移膜的接触形式,因此发挥明显的减摩效果。

综合来看,相比于CF和GF,AF对钢表面的刮擦作用最弱,且极少有硬质碎屑产生,在转移膜的

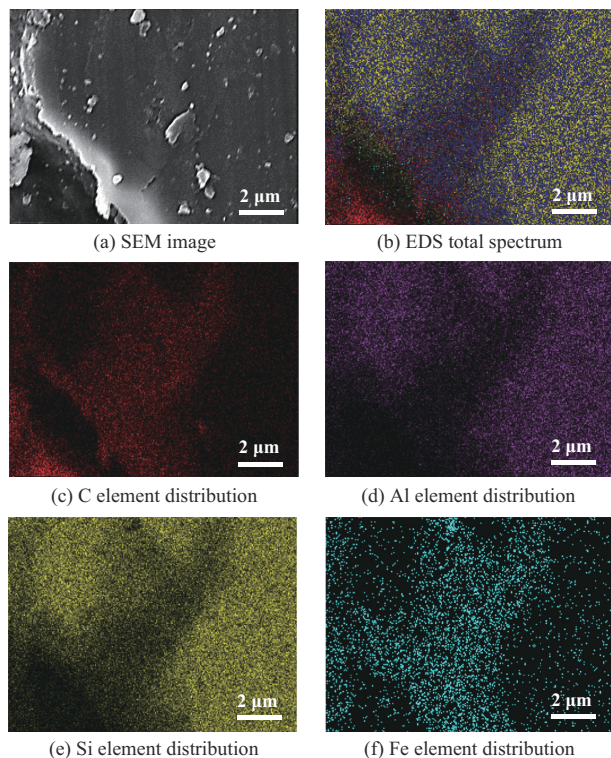


图5 10AF/20AT/PF与钢环对磨后的样品磨损表面形貌SEM图和EDS结果

Fig. 5 SEM image and EDS results of wear surface morphology of 10AF/20AT/PF sample after rubbing with steel ring

形成中表现明显优于CF和GF。由此可知,同摩擦工况下AT与不同纤维配合体系在转移膜的构筑中具有差异化作用。

2.3 润滑工况下PF复合材料的摩擦学性能

摩擦学性能不是材料的固有属性,聚合物自润滑复合材料摩擦学性能除自身特性外还受到外界条件(载荷、压强、速度、温度、对偶材料和润滑介质等)的影响^[2]。针对干摩擦工况下具有减摩抗磨作用的复合材料,在润滑工况下不一定能表现出优异的摩擦学性能。为开发适用于多种工况的PF复合材料,对于摩擦工况下摩擦学行为表现突出(摩擦系数曲线更加平稳、转移膜完整度更好)的10CF/20AT/PF,10GF/20AT/PF和10AF/20AT/PF进行了油润滑及水润滑下摩擦学性能的研究。3种复合材料在油润滑下的摩擦磨损性能如图6所示。由图6a看出,在200 N,1 m/s的油润滑工况下,随滑动时间增加,10GF/20AT/PF和10CF/20AT/PF的摩擦系数先增大后逐步趋于稳定,而10AF/20AT/PF的摩擦系数则不断减低后趋于稳定。当滑动时间为3 h后,10GF/20AT/PF的磨损率低至 $3.43 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,约是10AF/20AT/PF磨损率的四分之一,相比于10CF/

20AT/PF降低了58.2%,表现出最优的耐磨性。

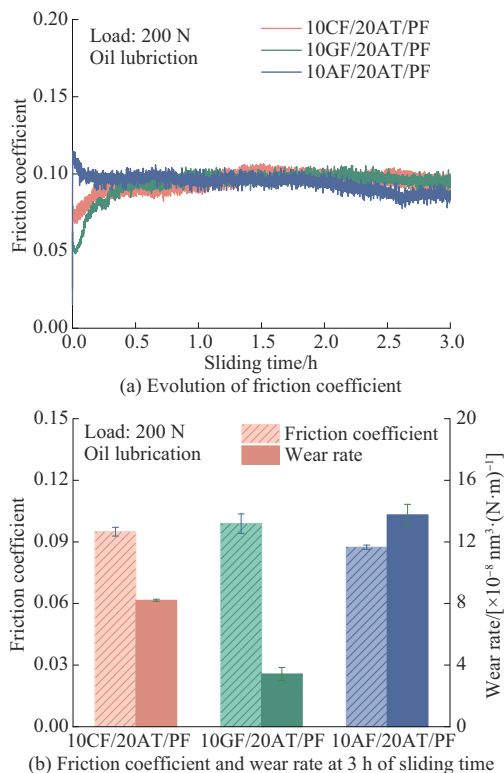


图6 油润滑工况下PF复合材料的摩擦系数演变及摩擦磨损性能对比

Fig. 6 Evolution of friction coefficient and comparison of friction and wear properties of PF composites under oil lubrication condition

当摩擦界面处于浸入润滑介质的状态时,流动的润滑介质会冲刷摩擦界面并洗掉磨损产物,阻碍基体与对偶界面的物质转移,最终抑制转移膜的生长。因此在浸油工况中,转移膜的生长难以达到理想的形貌从而充分发挥减摩抗磨效果。采用Hamrock-Dowson方程计算,在1 m/s速度下油膜厚度为 $0.33 \mu\text{m}$ 。油膜比厚(λ)值为0.78,故处于边界润滑区间($\lambda < 1$),此条件下摩擦界面的接触形式为PF复合材料表面与钢表面的部分直接接触。图7为油润滑工况下3种复合材料样品磨损面及钢环表面的微观形貌。从图7可以看到,在浸油工况中,与10GF/20AT/PF,10AF/20AT/PF及10CF/20AT/PF对磨后钢表面形成的转移膜都是少量且不连续的。润滑油严重阻碍了摩擦界面解离的AT和其他纤维与磨损产物向对偶面的转移及吸附,同时吸附能力较弱的转移膜受到CF与GF的强刮擦作用被破坏,在钢表面形成较深的犁沟。对比钢环表面原始粗糙度的留存情况,可推测出脆性大的GF和低模量的AF对钢表面的破坏作用比CF更小。图7c中,磨

出的GF受到剪切应力作用而发生磨损且周边产生微小裂纹,这说明在摩擦过程中GF优先承受载荷。以上分析表明,GF同CF一样具有耐磨支撑点作用与纤维减薄现象^[17],而GF的脆性大导致其对摩擦对偶的磨损较小。因此,GF/AT/PF在油润滑工况中会表现出更好的耐磨性。

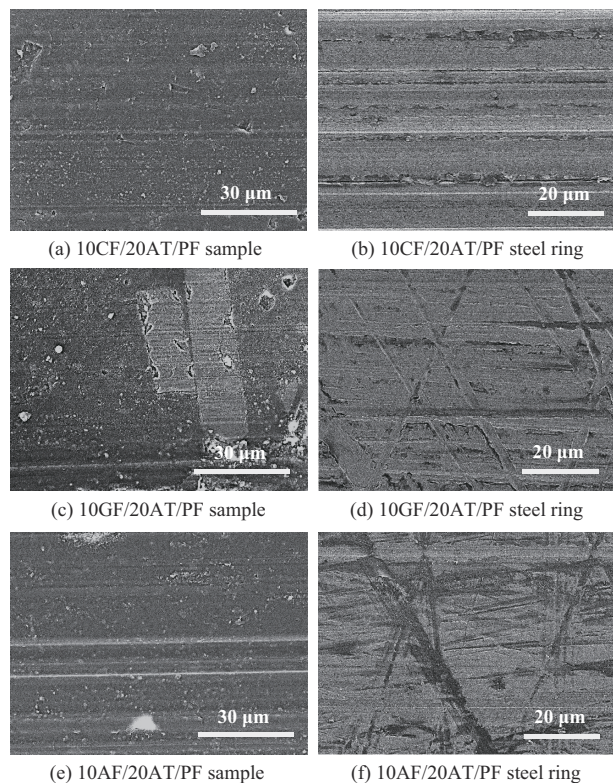


图7 油润滑工况下样品磨损面及钢环表面的微观形貌

Fig. 7 Microscopic morphology of sample worn surface and steel ring surface under oil lubrication condition

相比于润滑油,水作为润滑介质时黏度低、成膜能力更差,往往使摩擦副面临苛刻边界润滑,加剧磨损^[18]。3种复合材料在水润滑下的摩擦磨损性能如图8所示。在图8中,以水为润滑介质,200 N,1 m/s工况下,10CF/20AT/PF的摩擦系数不断增加,在滑动3 h后,稳定在0.24,且表现出低的磨损率。在水润滑工况中CF增强PF复合材料摩擦性能主要受到CF的物性影响,极易造成配副界面刮擦损坏^[19],因此10CF/20AT/PF表现出较高摩擦系数。然而,10GF/20AT/PF和10AF/20AT/PF的摩擦系数随滑动时间增加而不断减小,在滑动时间为2.5 h后摩擦系数分别稳定在0.135和0.088左右,且表现出高磨损率。这可能与AT纳米纤维的缓慢释放和水润滑工况中摩擦界面成膜能力差有关。

水作为润滑介质在摩擦界面会形成一层水膜

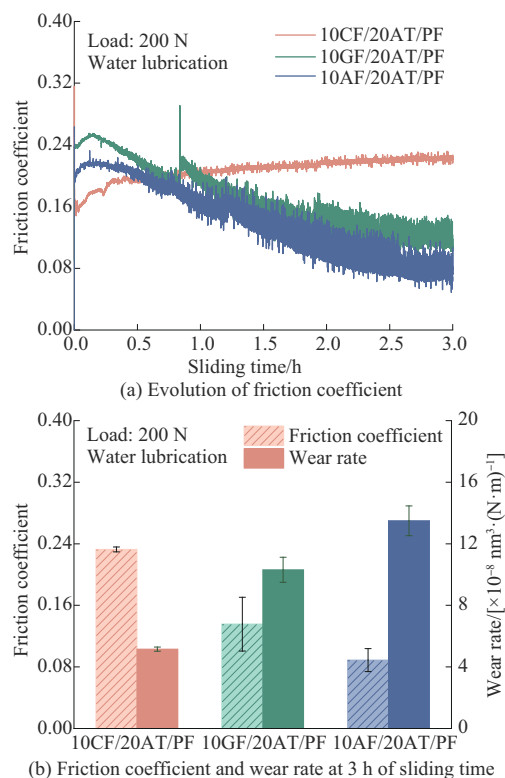


图8 水润滑工况下PF复合材料的摩擦系数演变及摩擦磨损性能对比

Fig. 8 Evolution of friction coefficient and comparison of friction and wear properties of PF composites under water lubrication condition

同时阻碍摩擦界面的物质转移,影响转移膜的生长^[19]。10GF/20AT/PF,10AF/20AT/PF和10CF/20AT/PF复合材料与钢环对摩后样品磨损表面和钢环表面如图9所示。由图9看出,三者的样品磨损表面平整度高,表现为轻微磨粒磨损,而钢环表面都存在较深的犁沟,且有少量的物质转移存在。其中,与10AF/20AT/PF复合材料对摩的钢表面犁沟少,破坏程度最小,而与10GF/20AT/PF和10CF/20AT/PF对摩后钢环表面均产生了大量犁沟。由此可知在水润滑条件下高模量纤维对钢表面损伤更加严重。纤维的高耐磨性和转移膜的形成是影响纤维增强AT/PF复合材料的摩擦学性能的关键。

3 结论

(1) AT纳米纤维与高模量微米纤维(CF, GF)复配使用时对PF复合材料具有显著的协同增强效应。当AT质量分数为20%时,多元纳米复合材料GF/AT/PF与CF/AT/PF的压缩强度高达400 MPa及以上,表现出极高的承载能力。

(2)干摩擦条件下,CF和AF与AT表现出显著的协同减摩和/或抗磨作用,而GF与AT没有明显的

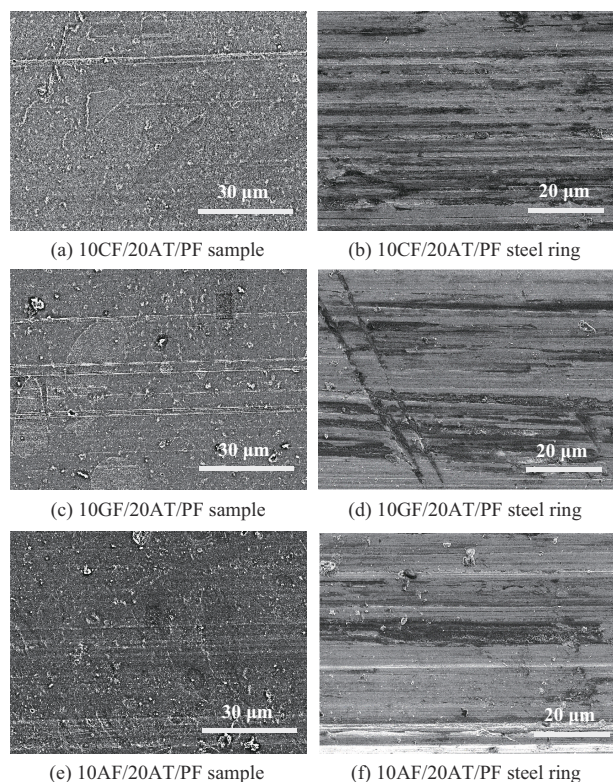


图9 水润滑工况下样品磨损面及钢环表面的微观形貌

Fig. 9 Microscopic morphology of sample worn surface and steel ring surface under water lubrication condition

协同作用。CF与AF是碳基高韧性纤维,可促进摩擦对偶转移膜的生成,而GF是与AT化学组成相近的硅类材料,摩擦剪切下导致过多氧化硅磨屑生成,丧失类似于纳米 SiO_2 的润滑效果,加重了摩擦界面刮擦,从而加剧了磨损。

(3)对比3种微/纳米纤维增强PF复合材料在润滑工况中的摩擦学特性,发现油润滑条件下GF/AT/PF表现出最高的耐磨性能,GF减薄可能是主要的磨损机理;水润滑条件下AF/AT/PF表现出最低的摩擦系数,而CF/AT/PF表现出最高的耐磨性能。

参考文献

- [1] 段春俭,邵明超,李宋,等.极端条件下的聚酰亚胺自润滑复合材料的研究进展[J].中国科学:化学,2018,48(12):1561-1567.
DUAN Chunjian, SHAO Mingchao, LI Song, et al. Research progress of polyimide self-lubricating composites under extreme conditions[J]. Science in China: Chemistry, 2018, 48(12): 1561-1567.
- [2] YANG Y W, WANG H G, REN J F, et al. Multi-environment adaptability of self-lubricating core/shell PTFE@PR composite: Tribological characteristics and transfer mechanism[J]. Tribology International, 2021, 154. DOI:10.1016/j.triboint. 2020.106718.
- [3] ÖSTERLE W, DMITRIEV A I, WETZEL B, et al. The role of carbon fibers and silica nanoparticles on friction and wear reduction of an advanced polymer matrix composite[J]. Materials &

Design, 2016, 93:474-484.

- [4] FRIEDRICH K. Polymer composites for tribological applications [J]. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2018, 1(1):3-39.
- [5] LU Y S, WANG A Q. From structure evolution of palygorskite to functional material: A review[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2022, 333. DOI:10.1016/j.micromeso. 2022.111765.
- [6] 南峰.微纳米颗粒对凹凸棒石润滑脂摩擦学性能的影响及其机理研究[D].上海:上海交通大学,2016.
NAN feng. Influence of micro-nano particles on tribological properties of attapulgite grease and its mechanism study[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [7] WANG K P, WU H C, WANG H D, et al. Tribological properties of novel palygorskite nanoplatelets used as oil-based lubricant additives[J]. Friction, 2021, 9(2):332-343.
- [8] 喻萍,王伟,许永坤,等.凹凸棒石增强聚酰亚胺复合材料的干摩擦性能研究[J].摩擦学学报,2023,43(2):209-219.
YU Ping, WANG Wei, XU Yongkun, et al. Study on dry friction properties of attapulgite reinforced polyimide composites[J]. Journal of Tribology, 2023, 43(2):209-219.
- [9] WANG W, ZHAO F Y, ZHANG J J, et al. Significant friction and wear-reduction role of attapulgite nanofibers compounded in PEEK-Based materials[J]. Composites Science and Technology, 2022, 230. DOI:10.1016/j.compscitech. 2022.109449.
- [10] 王伟,张利刚,赵福燕,等.凹凸棒石增强环氧树脂的摩擦性能[J].硅酸盐学报,2021,49(6):1222-1229.
WANG Wei, ZHANG Ligang, ZHAO Fuyan, et al. Tribological properties of epoxy resin enhanced by attapulgite[J]. Journal of the Chinese Academy of Ceramics, 2021, 49(6): 1222-1229.
- [11] WANG Y L, ZHANG Z Z, LIU M, et al. Effects of rod-like attapulgite and lamellar kaolin reinforcement on the tribological behavior of PBO textile-resin composite liner[J]. Tribology International, 2022, 174. DOI:10.1016/j.triboint. 2022.107689.
- [12] YANG K M, YANG X D, LIU E Z, et al. High strain rate dynamic compressive properties and deformation behavior of Al matrix composite foams reinforced by in-situ grown carbon nanotubes[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 729:487-495.
- [13] MA Z W, ZHENG C S, XIONG C B, et al. Friction-wear characteristics of carbon fiber reinforced paper-based friction materials under different working conditions[J]. Materials, 2022, 15(10). DOI:10.3390/ma15103682.
- [14] GAO C P, FAN S G, ZHANG S M, et al. Enhancement of tribofilm formation from water lubricated PEEK composites by copper nanowires[J]. Applied Surface Science, 2018, 444:364-376.
- [15] JOHANSSON P, MARKLUND P, BJÖRLING M, et al. Effect of roughness on the running-in behavior and tribofilm formation of carbon fiber reinforced PTFE composite in trace moisture environment[J]. Wear, 2022, 500-501. DOI:10.1016/j.wear.2022.204367.

(下转第109页)