

DOI: 10.3901/JME.2023.03.158

GF/PTFE 自润滑纤维复合材料磨损性能热衰退研究*

刘 建 李伟博 逢显娟 宋晨飞 杜三明 张永振

(河南科技大学高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室 洛阳 471003)

摘要: 针对高频摆动关节轴承摩擦热对自润滑纤维复合材料摩擦磨损性能的影响, 研制了高频使用条件下的玻璃纤维增强聚四氟乙烯(GF/PTFE)自润滑纤维复合材料, 利用 MYB~500 高频高载摆动摩擦磨损试验机, 对其进行不同摩擦温度下的摩擦磨损性能测试, 研究摩擦热作用下材料自润滑性能和磨损性能衰退特征, 分析磨损产物和摩擦表面以及不同摩擦温度下材料的磨损机理。结果表明, 摩擦热对材料自润滑性能影响显著, 适当的摩擦温度范围能够保证材料的自润滑性能, 摩擦温度和摩擦因数之间互为耦合作用, 对材料的磨损性能具有一定的影响; 高摩擦热作用于自润滑过程及机理的改变, 造成材料的磨损性能衰退现象。因此, 不同温度下材料的磨损特征具有明显的差异化, 其中低摩擦温度下(60~120 °C)材料自润滑性能优异, 磨损率很低; 140 °C 摩擦温度条件下材料摩擦磨损性能开始衰退; 材料在高摩擦温度下(140~180 °C)的磨损初期自润滑性能良好、磨损轻微, 而中后期磨损严重。微观分析表明, 低摩擦温度下材料的磨损机理以轻微粘着和疲劳磨损为主; 高摩擦温度下材料的磨损以片状剥落、纤维剪切破坏为主, 且磨损面局部损伤特征明显, 磨损严重。

关键词: 自润滑; 摩擦热; PTFE; 摩擦因数; 磨损

中图分类号: TH117

Study on Thermal Degradation of Wear Properties of GF/PTFE Self-lubricating Fiber Composites

LIUJian LI Weibo PANG Xianjuan SONG Chenfei DU Sanming ZHANG Yongzhen

(National Engineering Laboratory for Advanced Bearing Tribology,

Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003)

Abstract: For high frequency oscillating spherical plain bearing, friction heat has significant effect on friction and wear properties of the self-lubricating fiber composites. The glass reinforced polytetrafluoroethylene (GF/PTFE) self-lubricating fiber composites are developed for high frequency service condition, and a MYB-500 high frequency and high load oscillating tribological tester is used to carry out tribological tests of the composites under different friction temperatures. The self-lubricating performance and wear behavior of material under friction heat are investigated, and the wear debris and friction surface and wear mechanisms under different temperatures are analyzed. Results show that, friction heat has notable influence on self-lubricating performance of the composites. Proper friction temperature is beneficial to improve the self-lubricating performance of the material, and the interaction between friction temperature and friction coefficient has a certain effect on wear behavior of the material. High friction heat acts on the self-lubricating process and mechanism, resulting in degradation of material wear properties. Therefore, wear behavior of the composite is different under different friction temperature. The self-lubricating performance under low friction temperature(60-120 °C)is the best and the wear rate is the lowest. The degradation of friction and wear performance of the composite occurs until it reaches to 140 °C. Under high temperature(140-180 °C), the material initially has good self-lubricating performance and slight wear, whereas it becomes worse in the middle and late stage. Micro analysis shows that, the wear mechanism of the material at low friction temperature is mainly slight adhesion and fatigue wear. At high friction temperature, the wear of the material

* 国家自然科学基金资助项目(52005160)。20220204 收到初稿, 20220728 收到修改稿

is mainly characterized by a large number of adhesion and flaking off, and the material surface has obvious local damage with serious wear.

Key words: self-lubricating; friction heat; PTFE; friction coefficient; wear

0 前言

随着尖端科学技术的发展,自润滑零部件越来越广泛的应用于航空、航天及军工等领域的重要装备中。其中,纤维编织复合材料综合了高性能有机纤维和树脂的优点,以强度高、摩擦因数低、耐磨损等优点在无需润滑和无法使用油润滑的零部件中发挥着重要作用,大量应用于高载、高速、耐高温的自润滑耐磨件,如齿轮、轴承、密封圈等^[1-4]。在纤维编织复合材料中,增强纤维起主要的承载作用,使复合材料具有较高的抗拉强度和刚度,粘接树脂则能够增强纤维织物结构的稳定性,使纤维编织结构能够承受较高的压缩和剪切载荷,其最终目的都是为提高材料的摩擦磨损性能^[5-10]。然而,纤维编织复合材料的摩擦磨损性能除受编织结构、各成分含量、工艺等内在因素影响外,其应用条件与本身性能的匹配也是决定材料服役性能的关键,尤其是不同摩擦热作用下对材料性能进行表征是明确材料在高频、重载等苛刻应用条件下使用的关键依据,也是不同应用领域选材需要考虑的重要参量。

相关学者对自润滑纤维复合材料的磨损性能进行了大量研究, SU 等^[11]研究了玻璃纤维增强的 PTFE 织物复合材料的摩擦磨损性能,分析不同工艺下 GF/PTFE 织物增强酚醛树脂基复合材料的滑动摩擦性能,结果表明 GF/PTFE 织物不仅具有玻璃纤维优异的抗磨性能,同时具有 PTFE 纤维优异的自润滑性能。AGLAN 等^[12-14]对玻璃纤维增强 PTFE(GF/PTFE)复合材料的疲劳断裂韧性及其机理进行了系统的评价。ZHAO 等^[15]对比研究了碳纤维、玻璃纤维和芳纶纤维增强聚酰亚胺树脂在不同条件下的干摩擦磨损性能。结果表明 CF/PI 和 GF/PI 复合材料分别呈现最低和最高的摩擦因数,但均显示出相当优异的耐磨性能。ZHENG 等^[16]研究了不同环境条件下自润滑复合材料的摩擦学性能及对应的损伤机理,表明自润滑材料的损伤过程受温度影响明显。TSUKIZOE 等^[17]研究了纤维增强复合材料的磨损过程,根据经验公式和实验数据提出了因磨损发生塑性变形、纤维断裂、纤维剥离等三种磨损模型,并给出了磨损量的计算方法。GUO 等^[18]研究了芳纶纤维等离子体处理后自润滑编织复合材料的摩

擦磨损性能,结果表明,通过提高树脂与纤维的粘接强度,摩擦过程中基体将具有更强的抗剥落性能,从而更好地保护增强纤维并提高材料的耐磨损性。

目前,有关 GF/PTFE 自润滑纤维复合材料的研究主要集中在不同成分、工艺下的摩擦磨损性能研究,对其在不同摩擦热作用下的磨损特征尚有待进一步深入研究。而摩擦热引起的摩擦面接触温度提高使自润滑材料基体由无定形的玻璃态逐渐转为高弹态, PTFE、GF 纤维和树脂的力学性能以及三者之间的结合强度、结构稳定性受到很大的削弱,摩擦学性能及磨损寿命随之衰退^[19-24]。为此,通过不同摩擦温度下材料摩擦磨损性能测试,对 GF/PTFE 自润滑纤维复合材料在不同摩擦热条件下的摩擦学性能及磨损衰退特征进行研究,分析其损伤机理,为材料制备工艺改进提供优化依据,并对材料使用条件的界定以及不同应用背景下的选材提供可参考的性能指标。

1 试验材料及方法

1.1 材料制备

GF/PTFE 自润滑纤维复合材料织物由 GF 纤维和 PTFE 纤维经缎纹编织而成,织物面密度为 380~410 g/m², 体积质量分数 $V_{GF}:V_{PTFE}=3:1$ 。GF 织物由南京玻璃纤维研究设计院提供,粘结树脂为有机硅改性的酚醛-缩醛树脂,由上海新光树脂厂提供。粘接过程固化温度为 180 °C,固化时间 2 h,固化压强 0.3 MPa。试样制备过程在兰州化学物理研究所完成。所得试样粘贴剥离强度 0.37~0.41 N/mm(剥离角度与粘贴面成 140° ±40°)。对偶副根据自润滑关节轴承的内球材料选用 9Cr18Mo,并按照 GB/T3086 高碳铬不锈钢轴承钢技术条件处理(冷处理温度-55 °C 以下,保温时间不少于 1 h),表面粗糙度 0.16 μm,直径 100 mm,试验前用丙酮对对偶环进行去油处理。

1.2 试验方案

根据 GF/PTFE 自润滑纤维复合材料高频摆动使用条件,以摆动频率 10 Hz、载荷 30 MPa(60 kN)、摆动角度±3°作为摩擦磨损的试验条件,通过环境箱控制摩擦面监测温度分别维持在 60 °C、100 °C、140 °C、180 °C,对材料进行 50 万次往复摆动摩擦

周期的磨损试验, 获得不同摩擦热作用下的摩擦磨损性能。试验平台主机结构如图1所示。摩擦副的往复摆动由主轴上的液压摆动缸实现, 摆动频率范围 0~30 Hz; 通过摩擦副下方的液压缸完成加载, 载荷范围为 5~200 MPa, 其加载方式为闭环控制, 可保证摆动摩擦过程中加载力精度 $\pm 1\%$; 扭角和扭矩分别通过光电编码器、扭矩传感器测量; 摩擦温度通过使用试样托中距离摩擦表面 0.9 mm 处的接触式热电偶实时测量温度来近似表征。磨损厚度及摩擦副变形量通过位移传感器测量。试验前对试样进行 30 min 预磨, 避免初始阶段摩擦磨损性能波动过大对最终结果的影响。实验过程实时监测记录摩擦温度、摩擦因数、变形量随摩擦次数的波动, 并每隔 50 h 收集磨损产物, 同时对摩擦表面剩余厚度进行测量。

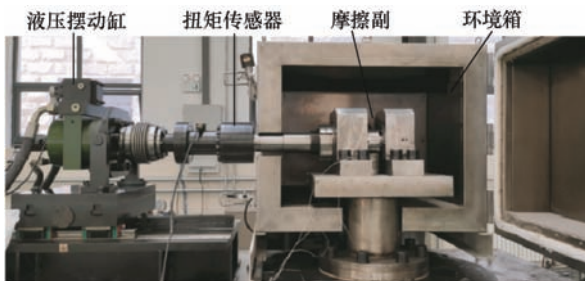


图1 主机结构

2 结果分析

2.1 摩擦温度对材料摩擦因数的影响

为研究不同摩擦温度下材料的自润滑性能, 首先通过环境箱控制摩擦面监测温度并维持相对稳定状态。此时的摩擦因数监测值即能够反映该摩擦温度条件下材料的自润滑性能。由于自润滑材料在滑动干摩擦中通过表层形变等方式将大部分的摩擦力转变成摩擦热, 并通过摩擦副的传递或辐射形式向外耗散, 而大多数干摩擦副表面的摩擦热产生速率大于耗散速率, 从而造成摩擦热积累并导致接触表面的温度迅速升高。因此, 在环境温度可控的条件下, 摩擦副的温度值能够有效反映摩擦热的生成与积累。图2为摩擦温度随往复摩擦次数的变化过程, 可以看出摩擦初期温度值急剧增高, 在环境温度的控制下, 60℃、100℃的摩擦温度经过约4万~6万次摆动周期后即达到最高值并保持动态稳定状态, 140℃摩擦温度在经过3.7万次摆动周期后处于动态稳定状态, 但其波动幅度明显增大, 稳定阶段温度波动幅度为12℃, 其原因为高摩擦温度条件下

(140~180℃)自润滑材料性能不稳定, 导致摩擦力做功转换成的摩擦热波动较大, 从而影响摩擦表面温度。因此, 温度越高, 稳定阶段的动态波动越大, 180℃的摩擦温度曲线达到相对稳定后, 前半段温差最高19℃, 而后半段温差高达40℃, 表明材料自润滑性能的波动造成摩擦副界面的热累积从而超出温控范围。对应的摩擦因数变化如图3所示, 摩擦温度为60℃时的材料摩擦因数, 在开始阶段数值较高, 随着摩擦副热积累到一定程度, 摩擦因数降低, 并处于动态稳定状态, 对应此阶段的摩擦因数无明显的大幅波动, 表明低摩擦温度条件下试样的自润滑性能较为稳定。100℃下的摩擦因数均值最低, 波动性最小, 表明适当的摩擦热有利于提高材料的自润滑性能。摩擦温度为140℃时的摩擦因数相比之前两种条件明显偏高, 且波动性增大, 此时的摩擦温度开始弱化材料的自润滑性能, 但在整个磨损周期内依然保持相对稳定。而摩擦温度为180℃时摩擦因数均值高达0.125, 且稳定性极差, 标准偏差 δ 值高达0.022, 表明这一摩擦温度下材料自润滑性能极差。

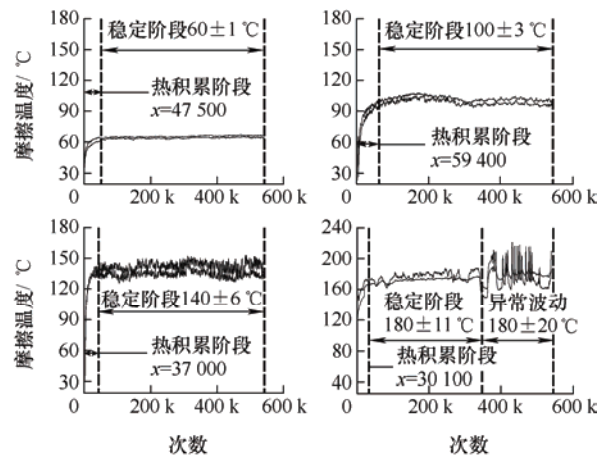


图2 不同摩擦温度变化曲线

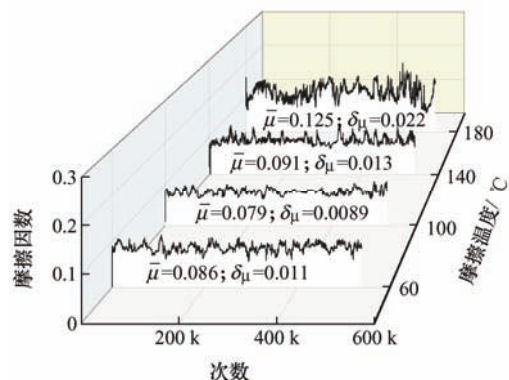


图3 不同摩擦温度下摩擦因数变化

根据摩擦过程中 PTFE 转移膜的粘附特点,随着摩擦温度的提高,材料表层 PTFE 分子键的抗剪切强度降低,当摩擦温度升高到一定程度,材料表层树脂、PTFE 及增强纤维基体的硬度和弹性模量开始急剧降低。材料变形阻力的增加和分子键抗剪切强度的降低均影响摩擦因数,前者导致摩擦因数增大,后者则降低摩擦因数,当前者的影响程度大于后者时,摩擦因数便开始增大,反作用于摩擦力做功进而影响摩擦热的生成,因此,摩擦接触面温度和摩擦因数互为耦合作用,共同影响着材料的自润滑性能,60~120 °C 的摩擦温度更容易保证材料自润滑性能的稳定,过高的温度则导致摩擦因数过大,且波动剧烈,造成自润滑性能急剧恶化。

2.2 不同摩擦温度下的磨损性能

为研究摩擦温度对材料磨损性能的影响,对摩擦过程中材料磨损的厚度数据进行分析,如图 4 为不同摩擦温度下材料的磨损情况。可以看出,温度 60 °C、100 °C 下的磨损量最小,且厚度变化接近线性,140 °C 下的磨损厚度明显增大,且不同阶段差异较大,表明该温度下材料的磨损出现了阶段性不均匀现象,一定程度上加剧了磨损。180 °C 下的磨损量最大,整个磨损过程出现剧烈的波动,表明自润滑状态极不稳定,且磨损严重,然而 0~5.7 万摩擦周期内的磨损量变化则显示出材料的磨损量很小,甚至低于 140 °C 条件下同期的磨损量,其原因为高环境温度作用下自润滑材料摩擦界面能够很快地建立良好的自润滑状态,减少初期的磨损。这也是很多使用自润滑材料的零部件通过热机预磨以保证性能稳定及延寿的原因。然而,随着摩擦次数的增多,摩擦界面温度急剧增高,过高的摩擦温度弱化了材料基体的力学性能,降低了转移膜的厚度和稳定性,造成磨损量增大。前期研究中发现,该自润滑材料在全寿命试验的不同阶段,对偶副摩擦面上均粘附有转移膜,成分分析表明其中含有不同量的氟元素(表 1)。其中,寿命中期 PTFE、树脂等含量较高,形成的转移膜较厚,因此表 1 中的 1、2 区域成分碳含量偏高,而 F 含量相对偏低。寿命后期因树脂含量极少,PTFE 是转移膜的主要成分,因此 F 含量相对增大,同时由于转移膜整体厚度和均匀性降低, Cr、Fe 元素含量增大。因此,高环境温度下材料初期自润滑性能好,磨损量小,而中期随着摩擦热的积累,磨损量急剧升高,后期磨损则非常严重。

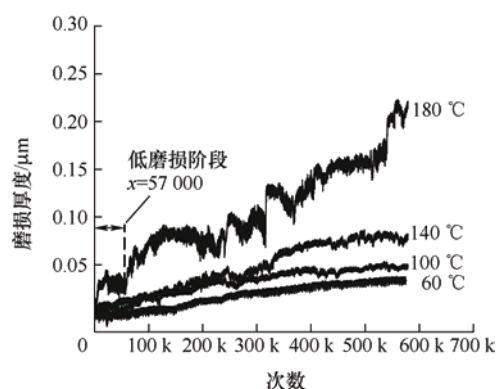


图 4 不同摩擦温度下磨损厚度变化

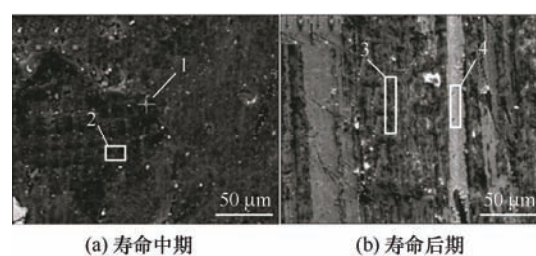


图 5 转移膜 SEM

表 1 对应图 5 中区域的 EDS 分析(质量分数%)

区域	C	O	Cr	Fe	F	Mn	Ni
1	74.50	3.60	3.54	16.43	0.88	0.39	0.65
2	80.49	12.34	0.60	2.58	3.41	0.18	0.39
3	10.69	2.10	12.45	52.41	21.7	0.64	0
4	16.28	3.92	19.59	28.58	31.23	0.41	0

图 6 为不同摩擦温度下摩擦因数和磨损率随摩擦温度的变化规律,可以看出二者具有较强的对应关系。摩擦因数在摩擦温度为 100 °C 达到最低值,磨损率则随摩擦温度非线性增大。二者之间的关联性在于:① 低摩擦温度直接影响着基体中的树脂和 PTFE 大分子及支链等越过界面转移到对偶面的量,导致摩擦过程中转移膜厚度、均匀性较差,造成自润滑性能不足,摩擦因数偏高,而低摩擦温度下材料强度相对较高产生一定的磨粒磨损,抑制了摩擦因数增大导致的高磨损率,因而无明显增大。② 高温条件下,大量摩擦热在摩擦表面积累导致自润滑材料基体软化,造成力学性能降低,在较大载荷(60 kN)作用下,对偶环金属表面对自润滑材料表层的压缩变形和剪切应力加剧,金属表面微凸峰对自润滑材料表面的切削和犁沟效应也更加显著。同时,自润滑材料内部纤维和树脂的结合面在高温下(如 140 °C、180 °C)更容易产生应力集中,由此引发微裂纹并扩展到材料表面导致严重的剥落磨损。因此,该阶段的摩擦因数与磨损率同步增大。

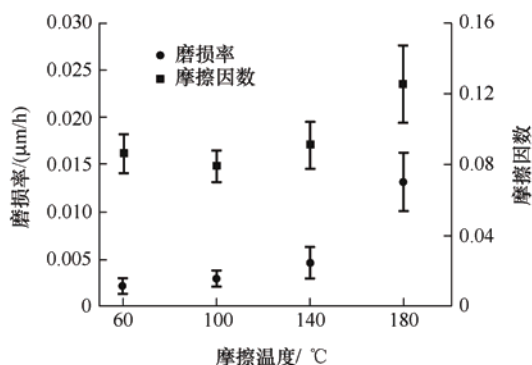


图 6 摩擦因数和磨损率随摩擦温度变化

为研究磨损后的表面特征,对每个试样的磨损表面等间距(共 48 个测点)测量剩余厚度,如图 7 所示。可以看出,同一表面不同区域的磨损程度明显不同,且不同条件下严重磨损区域也不相同,如 7a、7b,表明自润滑材料磨损过程中局部损伤区域具有动态变化特征。摩擦温度为 60 °C、100 °C 时磨损表面相对均匀,不同区域磨损厚度相差较小,剩余厚度方差分别为 21.3 和 23.5。摩擦温度为 140 °C、180 °C 时磨损表面不均匀程度最大,且磨损最严重区域集中在长度方向一端,其表面不同区域磨损厚度方差分别为 33.1、35.6,表明自润滑材料表面并非均匀磨损,而是存在严重不均匀的局部损伤。通过图 7a~图 7d 对比可以判断,摩擦温度影响自润滑材料表面的磨损程度和均匀性,适当的摩擦热能够提高材料的自润滑性能和磨损均匀性,而过高摩擦温度则加剧材料磨损,并造成局部严重磨损现象,这也是 180 °C 环境温度下材料磨损率急剧增大的原因之一。

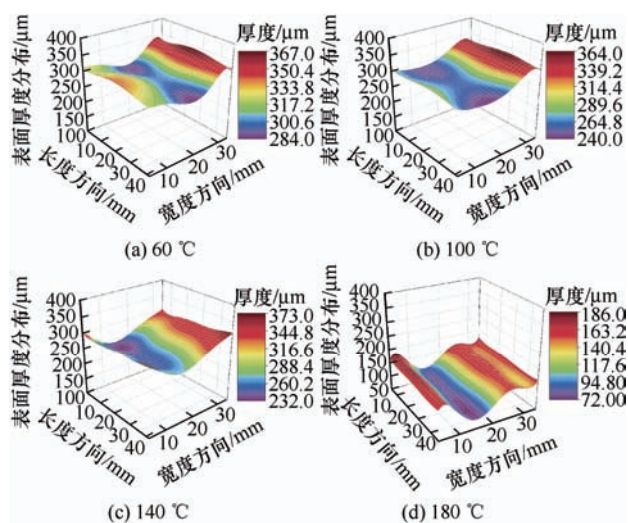


图 7 不同摩擦温度下表面磨损程度

2.3 损伤机理分析

为进一步分析材料在摩擦热作用下的磨损特

征,对材料磨损后的表面进行检测,如图 8 所示,其中图 8a、8b 为磨损前表面,其中 PTFE 和 GF 纤维的编织结构清晰均匀,表面有涂布树脂。在摩擦往复作用力下,表层部分 PTFE 和 GF 纤维发生断裂并成为细小的磨屑状,与树脂发生粘结,覆盖于摩擦面,如图 8c、8d 所示为 60 °C、100 °C 下的磨损表面,可以看出表面存在均匀完整的粘接树脂等附着物,底层增强纤维结构并没有暴露。从材料的自润滑过程来看,摩擦初期对偶环金属直接与材料表面接触,对表面具有较强的机械剪切刮擦作用,此时磨损量较高,摩擦因数波动较大。随着摩擦过程的进行,PTFE 在对偶环往复摩擦的机械力及摩擦热作用下,界面上的大分子链极易发生交互作用,使两接触表面发生黏着磨损,同时在切向力作用下,支链、链段和大分子链被拉出基体并粘附在对偶环表面形成转移膜,转移膜的形成-破坏-修复过程是材料具有自润滑性能的关键,同时也是自润滑复合材料基体的磨损过程。同时试样表面在机械剪切作用力下形成一定量的剥落树脂呈无约束状态存在于摩擦副接触面之间,适当量的剥落树脂和 PTFE 在摩擦过程中能够起到类似滑板的作用,起到分散载荷、降低对偶环金属对试样基体的机械作用力,从而提高自润滑材料承载力和耐磨损性能。但过量的剥落树脂和 PTFE 容易造成团聚现象,破坏材料表面自润滑状态的稳定性和均匀性,发生团聚的树脂和 PTFE 极易被挤出摩擦接触面,在摩擦面重建稳定均匀的自润滑状态过程中,对偶环对材料基体的磨损必然在一定程度上加剧。而影响树脂和 PTFE 团聚现象的外部因素之一便是摩擦热,高摩擦温度作用下树脂界面结合力增强,极易造成自由态下的剥落部分发生团聚。这也是高摩擦温度下材料摩擦因数波动性大、磨损严重的原因之一。

如图 8e 为 140 °C 环境温度下磨损后的局部表面,可以看到表面树脂等附着物已出现局部缺失,底层 GF 增强纤维骨架已经逐渐显露,表明材料局部磨损严重。而图 8f 中则可以看出,高摩擦热作用下局部区域表层树脂、PTFE 等附着物进一步减少,暴露出大量的 GF 增强纤维基体,并已严重磨损。图 9 中则给出了与图 8d 相对应的磨损表面损伤区域的 SEM 照片,其中图 9a 可以看出增强纤维在机械剪切力下发生的断裂,脱离基体形成剥落坑,而后随着对偶环的往复运动,其他区域的 PTFE、树脂等粘着层转移到剥落坑覆盖 GF 纤维基体,防止进一步的剪切破坏,如图 9b 所示。很明显,高摩擦温度产生的粘结层团聚现象是剥落坑修复过程中的重要

影响因素。

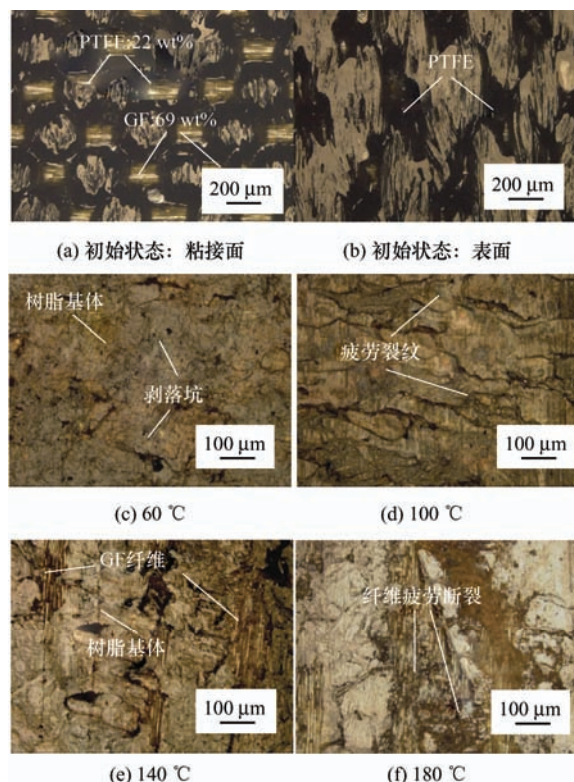


图 8 不同摩擦温度磨损后的表面

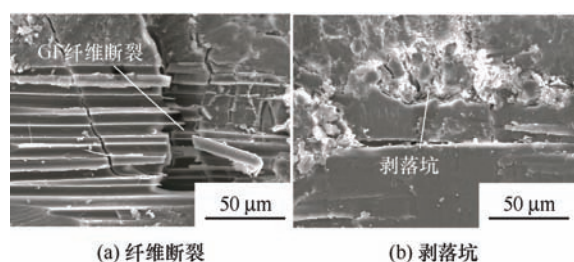


图 9 180 °C 磨损后的表面纤维断裂及剥落坑

图 10 为不同摩擦温度磨损过程中的磨屑形貌, 其中图 10a、10b 的磨损产物为大量的细小磨屑, 无

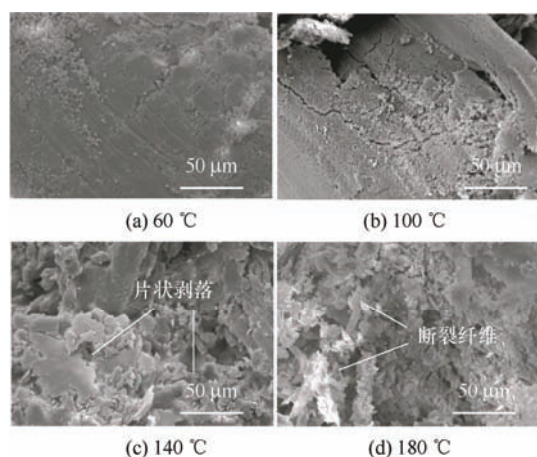


图 10 不同摩擦温度下的磨屑 SEM

大片剥落产物, 表明磨损过程自润滑性能良好, 磨损率较低, 该摩擦温度下转移膜和粘着部分附着力加强, 使摩擦副自润滑性能提高, 材料的磨损以细小磨屑的挤出消耗为主, 磨损率极低。图 10c 的磨屑较图 10b 相比尺寸形貌增大, 其中存在大片的树脂剥落产物, 并含有少量的断裂 GF 纤维, 其原因为随着温度的升高, 树脂和增强纤维基体软化, 强度降低, 当树脂在较高温度下剥离并挤出摩擦面时, 部分增强纤维将直接与对偶环接触, 导致部分增强纤维的断裂挤出。

3 结论

(1) 摩擦接触面温度直接干预 GF/PTFE 自润滑纤维复合材料的干摩擦状态, 并作用于摩擦因数, 二者互为耦合, 共同影响着材料的自润滑性能。合适的温度范围有利于降低材料摩擦因数、提高自润滑稳定性, 温度过高时, 材料自润滑性能明显下降。

(2) 材料的磨损性能受温度影响显著。摩擦温度较低时, 初期自润滑性能差、磨损严重, 中后期自润滑性能稳定且磨损量小。高摩擦温度下, 初期自润滑性能优异, 磨损轻微; 中后期自润滑性能急剧降低, 磨损严重。

(3) 摩擦热直接作用于材料转移膜的状态及磨损机理的变化并造成磨损性能衰退。低摩擦温度倾向于均匀磨损, 磨损方式以粘着、疲劳磨损为主, 表现出良好的自润滑性能及耐磨性能。高摩擦温度下非均匀损伤特征明显, 磨损特征以片状剥落、纤维剪切断裂为主, 局部损伤区域的出现加剧了材料整体的磨损程度。

参 考 文 献

- [1] 向定汉, 潘青林, 姚正军. 聚四氟乙烯自润滑编织复合材料关节轴承的摆动摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(1): 72-75.
XIANG Dinghan, PAN Qinglin, YAO Zhengjun. Friction and wear behavior of polytetrafluoroethylene fabric composite spherical bearing in swaying[J]. Tribology, 2003, 23(1): 72-75.
- [2] 沈雪瑾, 曹磊, 陈有光, 等. 织物衬垫自润滑关节轴承的研究现状与展望[J]. 轴承, 2009(3): 57-61.
SHEN Xuejin, CAO Lei, CHEN Youguang, et al. Research status and prospect of spherical plain bearings with self-lubricating fabric liner[J]. Bearing, 2009(3): 57-61.

- [3] SHEN Xuejin, LIU Yunfei, CAO Lei, et al. Numerical simulation of sliding wear for self-lubricating spherical plain bearings[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2012, 1(1): 8-12.
- [4] CUI Wenyan, RAZAK, ZHAO Zhijun, et al. Role of transfer film formation on the tribological properties of polymeric composite materials and spherical plain bearing at low temperatures[J]. *Tribology International*, 2020, 152: 1-11.
- [5] ZUO Zhen, SONG Laizhou, YANG Yulin. Tribologic-al behavior of polyethersulfone-reinforced polytetrafluoroethylene composite under dry sliding condition[J]. *Tribology International*, 2015, 86: 17-27.
- [6] LI Hulin, YIN Zhongwei, JIANG Dan, et al. Tribological behavior of hybrid PTFE/Kevlar fabric composites with different weave densities[J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2016, 68(2): 278-286.
- [7] SATAPATHYB K, BIJWEJ. Performance of friction materials based on variation in nature of organic fibres Part I. Fade and recovery behavior[J]. *Wear*, 2004, 257(5-6): 573-584.
- [8] GU Dapeng, DUAN Changsheng, FAN Bingli, et al. Tribological properties of hybrid PTFE/Kevlar fabric composite in vacuum[J]. *Tribology International*, 2016, 103: 423-431.
- [9] LARSEN T, ANDERSENT L, THORNINGB, et al. Comparison of friction and wear for an epoxy resin reinforced by a glass or a carbon/aramid hybrid weave[J]. *Wear*, 2007, 262(7-8): 1013-1020.
- [10] ADERIKHAV N, SHAPOVALOVV A. Mechanical and tribological behavior of PTFE-polyoxadiazole fiber composites; Effect of filler treatment[J]. *Wear*, 2011, 271(5-6): 970-976.
- [11] VAILJ R, KRICKB A, MARCHMANK R, et al. Polytetrafluoroethylene (PTFE) fiber reinforced polyetheretherketone (PEEK) composites[J]. *Wear*, 2011, 270(11-12): 737-741.
- [12] YANG Mingming, ZHU Xiaotao, REN Guina, et al. Influence of air-plasma treatment and hexagonal boron nitride as filler on the high temperature tribological behaviors of hybrid PTFE/Nomex fabric/phenolic composite[J]. *European Polymer Journal*, 2015, 67: 143-151.
- [13] VOSSH F. The wear behavior of short-fiber reinforced thermoplastic's sliding against smooth steel surface[J]. *Wear of Materials*, ASME, 1985, 1: 740-750.
- [14] 周先辉, 孙友松, 王万顺. CF/PTFE 纤维混编织物增强环氧复合材料干摩擦特性[J]. *摩擦学学报*, 2016, 36(5): 650-658.
- ZHOU Xianhui, SUN Yousong, WANG Wanshun. Dry tribological property of carbon/polytetrafluoroethylene hybrid fabric reinforced epoxy composite[J]. *Tribology*, 2016, 36(5): 650-658.
- [15] ZHENG Fei, WANG Qihua, WANG Tingmei. Effects of aramid fiber and polytetrafluoroethylene on the mechanical and tribological properties of polyimide composites in a vacuum[J]. *Journal of Macromolecular Science Part B*, 2015, 54(8): 927-937.
- [16] TSUKIZOET O. Friction and wear of advanced composite materials[J]. *Fibre Science and Technology*, 1983, 18(4): 265-286.
- [17] GUO Fang, ZHANG Zhaozhu, LIU Weimin, et al. Effect of plasma treatment of Kevlar fabric on the tribological behavior of Kevlar fabric/phenoliccomposites[J]. *Tribology International*, 2009, 42 (2): 243-249.
- [18] MENG H, SUI G X, XIE G Y, et al. Friction and wear behavior of carbon nanotubes reinforced polyamide 6 composites under dry sliding and water lubricated condition[J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69(5): 606-611.
- [19] YU Chuanyong, WAN Hongqi, CHEN Lei, et al. Marvelous abilities for polyhedral oligomeric silsesquioxane to improve tribological properties of polyamide-imide/polytetrafluoroethylene coatings[J]. *Journal of MaterialsScience*, 2018, 53: 12616-27.
- [20] CHANG Li, ZHANG Ga, WANG Hongjian, et al. Comparative study on the wear behaviour of two high-temperature-resistant polymers[J]. *Tribology Letters*, 2017, 65: 34.

作者简介: 刘建(通信作者), 男, 1984 年出生, 博士研究生。主要研究方向为材料摩擦学。

E-mail: lixinliu@haust.edu.cn