

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.06.022

乏油润滑下 PEEK 复合材料的摩擦学性能

易蒙^{1,2}, 段海涛^{1,2}, 陈松^{1,2}, 涂杰松^{1,2}, 顾卡丽^{1,2}

(1. 武汉材料保护研究所, 武汉 430030; 2. 特种表面保护材料及应用技术国家重点实验室, 武汉 430030)

摘要: 利用 SST-ST 销/盘摩擦磨损试验机, 以纯聚醚醚酮 (PEEK) 和分别含有质量分数 30% 的玻璃纤维 (GF)、碳纤维 (CF)、聚四氟乙烯 (PTFE) 的 PEEK 复合材料与 GCr15 盘组成的摩擦副为研究对象, 系统地研究了 4 种 PEEK 材料在干摩擦、油润滑和乏油润滑下的摩擦学性能, 并利用扫描电子显微镜和白光共焦三维形貌仪观察了 PEEK 材料和 GCr15 金属盘磨损表面形貌, 分析了摩擦磨损机制。结果表明, 在不同的润滑条件下, GF、CF 和 PTFE 均能显著提高 PEEK 基体的摩擦磨损性能, 其中 CF 对复合材料抗磨性能的提高最为突出, 但是在干摩擦下具有优异摩擦学性能的 PEEK/PTFE 复合材料在油润滑下却表现不佳, 这与其摩擦学性能强烈依赖转移膜有关; 在磨损机理上, 干摩擦下, 由于摩擦热的影响, PEEK 及 3 种 PEEK 复合材料的磨损表面均出现材料粘着以及剥落现象, 磨损机理主要表现为粘着磨损。由于润滑油的润滑作用和散热作用, 油润滑条件下 PEEK 及 3 种 PEEK 复合材料的磨损表面都比较光滑, 磨损机理主要为轻微的粘着磨损并伴有疲劳磨损。乏油润滑下材料磨损表面形貌与干摩擦下类似, 但是由于摩擦副之间残留的润滑油存在, 降低了材料的磨损。

关键词: 聚醚醚酮; 轴承保持架; 乏油润滑; 表面形貌; 摩擦磨损

中图分类号: TH117.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)06-0105-06

Tribological Properties of PEEK Composites under Starved-Oil Condition

Yi Meng^{1,2}, Duan Haitao^{1,2}, Chen Song^{1,2}, Tu Jiesong^{1,2}, Gu Kali^{1,2}

(1. Wuhan Research Institute of Materials Protection, Wuhan 430030, China; 2. State Key Laboratory of Special Surface Protection Materials and Application Technology, Wuhan 430030, China)

Abstract: In order to study on the tribological properties of 4 kinds of poly(ether-ether-ketone)(PEEK) materials (pure PEEK, PEEK/GF, CF/PEEK and PEEK/PTFE) against GCr15 under starved-oil condition, the friction and wear of PEEK composites in three different lubrication condition (dry friction, oil lubrication and starved-oil condition) were investigated on a SST-ST friction tester. The wear surface morphology of the PEEK composites and its counter part was observed by SEM and white light confocal three-dimensional morph meter, then discuss the wear mechanism. The results show that the glass fiber, carbon fiber and PTFE all can significantly improves the friction and wear properties of PEEK composites under different conditions. In addition, carbon fiber is the most prominent. PEEK/PTFE composites has excellent tribological properties under dry friction, however not good under oil lubrication, which is related to the strong dependence of the transfer film, as for wear mechanism, due to the influence of frictional heat, all 4 kinds of PEEK materials worn surface appears adhesion and spalling phenomenon, and the mainly wear mechanism under dry friction is adhesive wear and fatigue wear. Because of the lubrication and heat dissipation of lubricating oil, the wear surfaces of the PEEK and 3 PEKK composites are smooth under the condition of oil lubrication, and the wear mechanisms are mainly slight adhesive wear, abrasive wear, and fatigue wear. The wear surface morphology of the materials under starved-oil is similar to that under dry friction, but the wear of the material is reduced due to the presence of the residual lubricating oil between the friction pairs.

Keywords: poly(ether-ether-ketone); bearing cage; starved-oil lubrication; surface topography; friction and wear

高性能工程塑料作为一种重要的轴承保持架材料, 广泛地应用于航天宇宙、轨道交通、深海探测

和车辆等设备中。在这些设备中轴承保持架材料的耐磨损性能对传动系统的整体性能至关重要^[1]。轴

基金项目: 国家自然科学基金(51505341), 国家自然科学基金(51575402), 湖北省技术创新专项重大项目(2017AAA119)

通讯作者: 顾卡丽, 研究员, 主要研究方向为表面工程技术与摩擦学的研究 E-mail: gukali@163.com

收稿日期: 2018-03-28

引用格式: 易蒙, 段海涛, 陈松, 等. 油润滑下 PEEK 复合材料的摩擦学性能 [J]. 工程塑料应用, 2018, 46(6):105-110.

Yi Meng, Duan Haitao, Chen Song, et al. Tribological properties of PEEK composites under starved-oil condition[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(6):105-110.

承保持架在服役过程中,由于摩擦会造成保持架磨损和发热,严重时会造成保持架断裂,致使轴承不能正常工作。相关研究表明,轴承保持架材料磨损是导致各种型号设备传动系统失效的主要原因之一^[2-4]。

研究轴承保持架材料的摩擦学性能,提高其耐磨性一直受到国内外学者的广泛关注^[5-9]。例如, V. B. Balyakin 等^[6]在滚珠轴承上对聚四氟乙烯 (PTFE) 轴承保持架进行了一系列应力应变状态分析和油润滑下的摩擦学试验。发现轴承的寿命不仅与沟槽与滚动体接触有关,也与 PTFE 保持架的磨损有重要联系。E. Feyzullahoglu 等^[7]研究了干摩擦条件下不同工程塑料轴承保持架在滑动轴承上的摩擦学行为。发现保持架材料的摩擦学性能受转速、载荷以及工作时间的影 响,其中转速对材料的磨损量影响最大。Wang Anying 等^[9]采用了在极端环境下广泛用作滚动轴承保持架材料的聚醚醚酮 (PEEK) 和聚酰亚胺 (PI),并与 Si_3N_4 陶瓷组成摩擦副,对比研究了两种摩擦副在干摩擦和水润滑条件下的摩擦学性能。发现 PEEK 和 PI 在干摩擦下具有类似的摩擦学行为,而在水润滑下,PI 表现出比 PEEK 更加优异的耐磨性。可以看出,目前大多数学者对聚合物轴承保持架的摩擦学性能研究主要基于干摩擦、水润滑和油润滑条件下的,乏油润滑下的报道则很少。但是在实际情况中,许多处于高速运转,液油或油雾润滑条件下的轴承保持架会出现乏油润滑状态,特别是在一些紧急情况下,例如直升机遭受攻击后,润滑油会逐渐流失,造成不充分供油,从而形成乏油润滑,轴承保持架急剧磨损,进而导致传动系统失效,造成灾难性事故^[10]。因此,迫切需要开展乏油工况下轴承保持架材料的摩擦磨损行为研究。

PEEK 及其复合材料具有优异的耐水解、耐腐蚀、自润滑及良好的力学性能和尺寸稳定性,是一种新型的轴承保持架材料。笔者利用销/盘摩擦磨损试验机,选择以下 4 种聚合物材料作为试验材料:纯 PEEK、质量分数 30% 的玻璃纤维 (GF) 改性 PEEK (PEEK/GF) 复合材料、质量分数 30% 的碳纤维 (CF) 改性 PEEK (PEEK/CF) 复合材料、质量分数 30% 的 PTFE 改性 PEEK (PEEK/PTFE) 复合材料。探索了 PEEK 及 3 种 PEEK 改性材料与 GCr15 轴承钢盘组成的摩擦副在干摩擦、油和乏油润滑条件下的摩擦学行为,分析了不同润滑条件下 PEEK

复合材料的磨损机理,以期为进一步提高 PEEK 复合材料轴承保持架耐磨性和延长其使用寿命提供理论依据。

1 试验部分

1.1 原材料

PEEK, PEEK/GF, PEEK/CF, PEEK/PTFE 复合材料:南京首塑特种工程塑料有限公司。主要性能指标如表 1 所示。润滑介质为 NIKI ME-20B 航空轴承润滑油,主要性能参数如表 2 所示。

表 1 PEEK 及 3 种 PEEK 复合材料的性能参数

材料	密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	拉伸强度 /MPa	弯曲强度 /MPa	压缩强度 /MPa	硬度 (HSD)
PEEK	1.28	100	165	125	85.2
PEEK/GF	1.51	175	265	250	88.4
PEEK/CF	1.40	260	380	300	88.7
PEEK/PTFE	1.37	150	275	230	83.6

表 2 ME-20B 航空润滑油性能参数

润滑油型号	操作温度 / $^{\circ}\text{C}$	密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 25°C)	燃点 / $^{\circ}\text{C}$	黏度指数
ME-20B	-57 ~ 200	4.9	240	242

无水乙醇:分析纯,市售。

1.2 主要试验仪器及设备

SST-ST 销/盘摩擦学试验机:TRM-T221 型,德国 WAZAU 公司;

白光共焦三维形貌仪:MICRLMEASUER2 型,德国 GBS 公司;

扫描电子显微镜 (SEM):JSM-6510 型,日本 JEOL 株式会社。

1.3 试样制备

以 PEEK 材料和 GCr15 金属盘为研究对象,采用销-盘接触方式进行摩擦学试验。其中 PEEK 销试样和对偶金属圆盘按图 1 精车加工,并打磨抛光处理,处理后 PEEK 材料表面粗糙度小于 $0.8 \mu\text{m}$;金属盘表面粗糙度小于 $0.5 \mu\text{m}$ 。

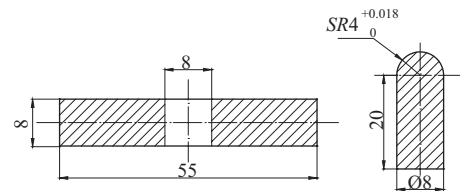


图 1 圆盘和销的尺寸

1.4 摩擦磨损试验

试验所用 SST-ST 销/盘磨损试验机及摩擦副接触方式如图 2 所示。试验采用 3 种不同的润滑条件,分别为干摩擦、油润滑以及乏油润滑。乏油润滑是让摩擦副在油润滑状态下运行 20 min,然后将润滑油从油盒中抽出,特意制造出乏油润滑工况。试

验环境温度为 $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $40\% \pm 5\%$, 载荷为 30 N, 滑动速度为 0.5 m/s, 时间为 2 h。试验前后, 分别用无水乙醇将 PEEK 材料试样和金属盘超声洗净并吹干。利用 SEM 观测 PEEK 及其复合材料磨损的表面形貌, 通过白光共焦三维形貌仪测量对偶金属盘磨损表面形貌参数, 绘制表面轮廓曲线。

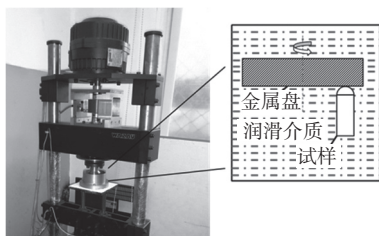


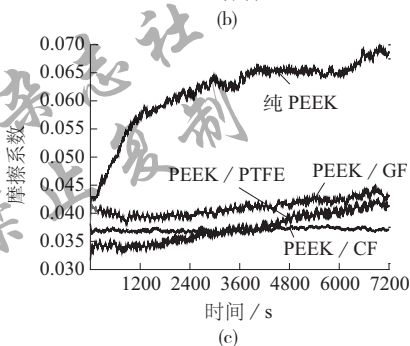
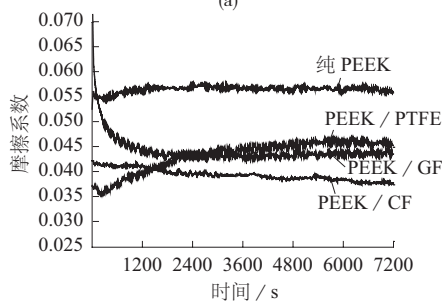
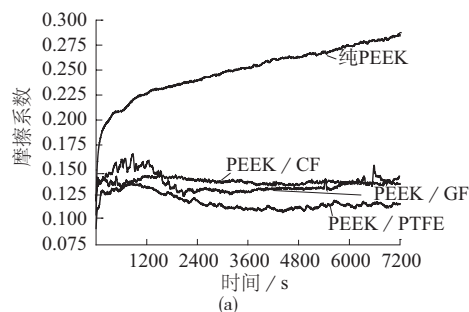
图2 SST-ST 摩擦磨损试验机及摩擦副接触方式

2 结果与讨论

2.1 摩擦磨损性能分析

图3为 PEEK 材料与金属盘组成的摩擦副在不同润滑条件下摩擦系数随时间的变化关系。从图3可以看出, 在3种润滑条件下, 纯 PEEK 材料的摩擦系数明显大于 PEEK/GF, PEEK/CF 和 PEEK/PTFE 复合材料, GF, CF 和 PTFE 的加入可以显著降低 PEEK 的摩擦系数。相较于油和乏油润滑条件下, 干摩擦下 PEEK 复合材料的摩擦系数在试验初期波动较大, 随着试验的进行, 纯 PEEK 材料的摩擦系数持续增大, PEEK 复合材料的摩擦系数进入稳态阶段, 干摩擦条件下 PEEK/PTFE 复合材料摩擦系数最小。

由于润滑油的润滑减摩作用, 油润滑条件下 PEEK 及 3 种 PEEK 复合材料的起始摩擦系数比干摩擦明显降低, 并且很快达到稳态摩擦阶段 (图3a)。但是与干摩擦不同的是, 油润滑下 PEEK 复合材料摩擦系数大小次序发生了变化, PEEK/PTFE 复合材料的摩擦系数在 3 种复合材料中最大 (图3b)。乏油润滑条件初期, 摩擦副表面尚吸附着一定量润滑油。由于对润滑油吸附性较差, 纯 PEEK 材料的摩擦系数在试验初期迅速上升 (图3c), 其余 3 种 PEEK 材料的摩擦系数较为稳定。将润滑油取出, 摩擦副进入乏油润滑, 此时润滑油的润滑作用逐渐丧失, 摩擦副之间的摩擦状态逐渐趋向干摩擦。纯 PEEK, PEEK/GF 和 PEEK/PTFE 复合材料摩擦系数均增大, 与此同时, CF 却表现出优异的改善作用, PEEK/CF 复合材料的摩擦系数在整个试验过程中较小且十分稳定。



a—干摩擦; b—油润滑; c—乏油润滑

图3 不同润滑条件下 PEEK 及其复合材料的摩擦系数随时间变化曲线

图4为 PEEK 及其复合材料在 3 种润滑条件下的磨损体积。

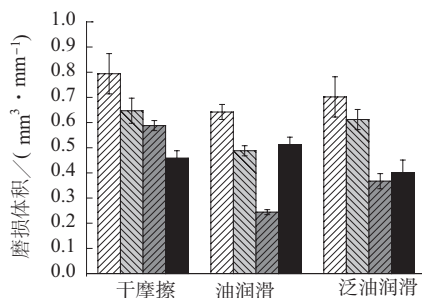


图4 PEEK 及 PEEK 复合材料在不同润滑条件下的磨损体积

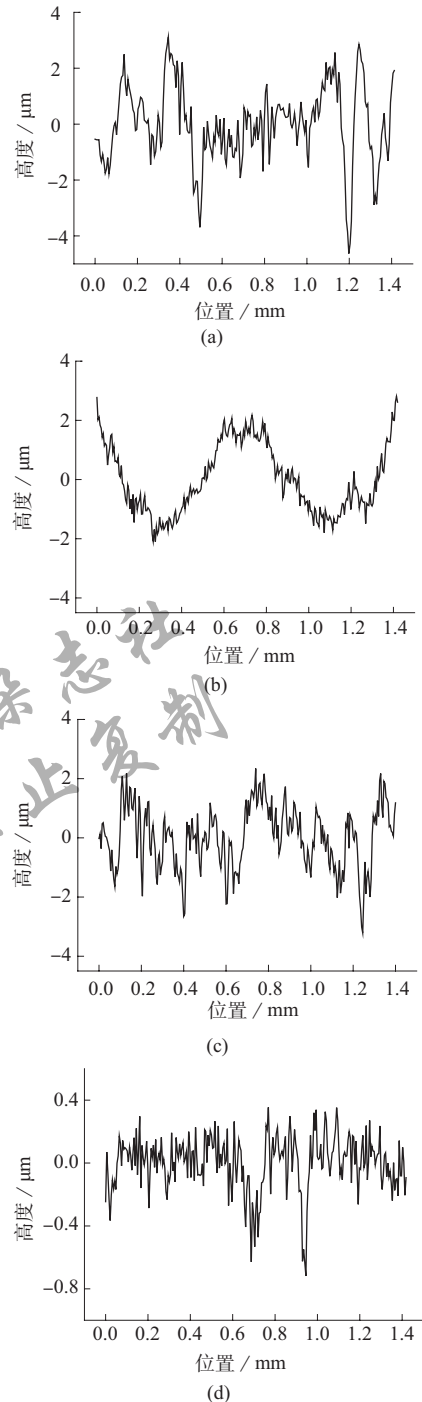
由图4可以看出, 在干摩擦下纯 PEEK 的磨损体积最大, 加入 GF, CF, PTFE 后复合材料的磨损情况得到改善, 并且 PTFE 对 PEEK 基体的耐磨性提高最大, PEEK/PTFE 复合材料的磨损体积较纯 PEEK 材料减少了 42.3%。但是在油润滑条件下, PTFE 对 PEEK 的耐磨性能增强作用却大幅下降,

PEEK/CF复合材料的耐磨性变为最好。由于摩擦副表面吸附少量润滑油的润滑作用,乏油润滑条件下 PEEK 及其复合材料的磨损体积较干摩擦有所降低。从图 4 可以看出,除 PEEK/CF 复合材料外,其余复合材料的磨损体积与干摩擦下的十分接近,但是大小顺序发生了改变。干摩擦条件下 PEEK 及其复合材料磨损体积大小顺序为 $V_{\text{PEEK/PTFE}} < V_{\text{PEEK/CF}} < V_{\text{PEEK/GF}} < V_{\text{PEEK}}$, 乏油润滑下 PEEK 及其复合材料磨损体积大小顺序为 $V_{\text{PEEK/CF}} < V_{\text{PEEK/PTFE}} < V_{\text{PEEK/GF}} < V_{\text{PEEK}}$ 。有研究表明,乏油润滑条件下材料的磨损体积不仅与材料本身的摩擦学性能有关,也与对偶面的表面形貌有关,与光滑表面相比,具有不规则形貌的表面可以大幅度降低摩擦副之间的磨损,在摩擦过程中具有明显的减阻作用^[11]。

图 5 为乏油润滑下 GCr15 盘与 PEEK 及 3 种 PEEK 复合材料对磨后的表面轮廓曲线。从图 5 可以得出, PEEK/PTFE 复合材料对偶件表面相对比较光滑,纯 PEEK 和 PEEK/GF 复合材料对偶件表面有较深的凹坑且分布不均, PEEK/CF 复合材料对偶件表面凹坑深度和分布相对均匀。在乏油润滑下,对偶件表面由于摩擦形成的凹坑有利于储存润滑油,并且储存能力和油膜的承载能力随凹坑深度的增大而增强,但是并不是无限增大的,过深且过大的凹坑会使摩擦副间实际接触面积减少,导致摩擦系数和磨损较大^[12]。所以在乏油润滑条件下,表面相对粗糙但规整的 PEEK/CF 复合材料对偶件比表面光滑的 PEEK/PTFE 复合材料对偶件具有更强的润滑油储存能力;另一方面比表面凹坑大小和深度分布不均的纯 PEEK, PEEK/GF 复合材料对偶件具有最佳的承载能力。综上所述, PEEK/CF 复合材料在乏油润滑下具有最小的磨损体积。在工程实际应用中,最好是选用具有一定粗糙度且表面相对规整的摩擦副。

2.2 磨损形貌分析

图 6 为 3 种润滑条件下 PEEK 及其复合材料磨损表面形貌。由图 6a 可知,在干摩擦条件下,纯 PEEK 材料磨损表面存在明显的塑性变形和大面积材料粘着剥落以及基体材料破碎现象,磨损表面散布着大小不一的颗粒磨屑。磨损机理主要为粘着磨损和疲劳磨损特征。PEEK/GF 复合材料磨损表面有大量不规则条形坑以及沿滑动方向的犁沟。这是由于在摩擦过程中一部分 GF 受对偶件粘着作用从基体中剥离形成凹坑,另一部分则发生断裂和破碎,



a—纯 PEEK ; b—PEEK/GF ; c—PEEK/CF ; d—PEEK/PTFE

图 5 PEEK 及 PEEK 复合材料与 GCr15 金属盘表面轮廓曲线

进入到摩擦副之间,对复合材料表面造成刮削作用,干摩擦下, PEEK/GF 复合材料的磨损机理主要为粘着磨损和三体磨粒磨损。而 PEEK/CF 复合材料的磨损表面除犁耕痕迹外,还存在少量的磨屑以及基体材料粘着和片状剥落。CF 部分暴露于摩擦表面,并且伴有纤维撕裂痕迹,表明高载荷条件下纤维承载了摩擦表面大部分应力,提高了基体的耐磨

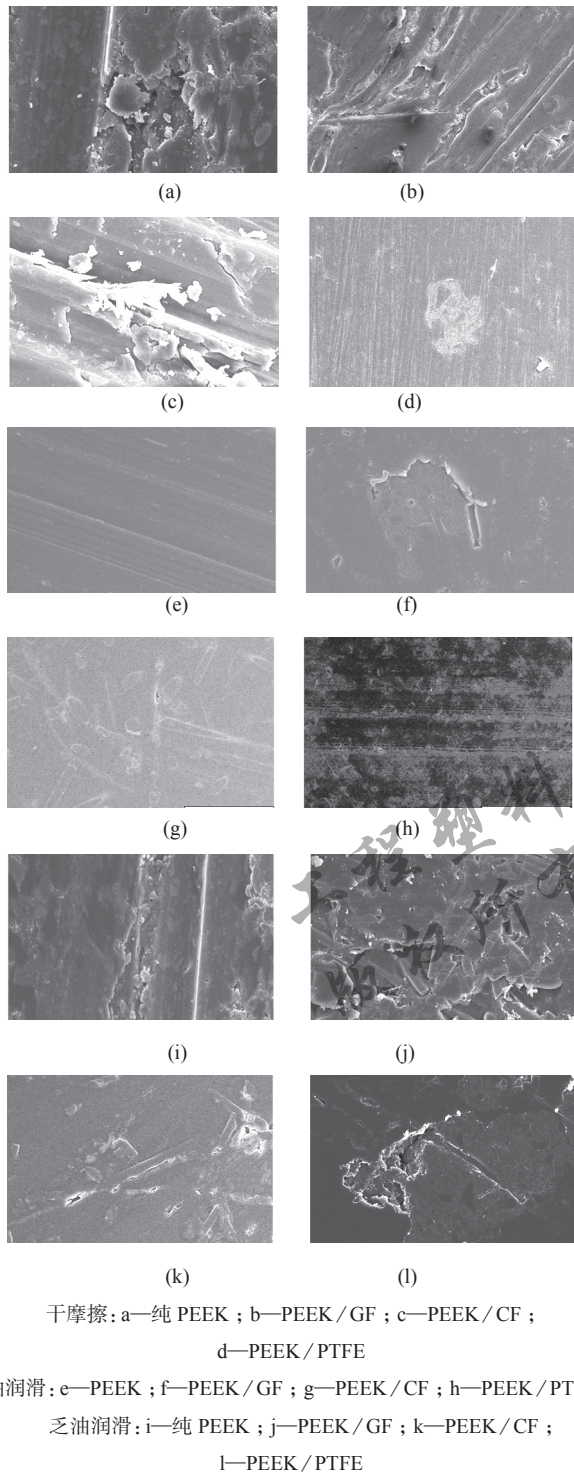


图 6 3 种润滑条件下 PEEK 及 PEEK 复合材料的磨损表面形貌

性,降低了复合材料的磨损体积^[13]。干摩擦条件下, PEEK/CF 复合材料的磨损机理主要为粘着磨损和轻微的磨粒磨损。相较于其它 3 种 PEEK 复合材料,干摩擦下 PEEK/PTFE 复合材料磨损表面十分平整,表面没有明显的材料粘着剥落和犁沟,只有一些轻微的线状摩擦和片状剥落痕(图 6d),磨损机理主

要为轻微粘着磨损。

由于润滑油的润滑冷却作用,油润滑下摩擦热对 PEEK 材料影响显著减小,因摩擦热导致的复合材料塑性变形、粘着及纤维脱落受到明显抑制;并且润滑油可以带走摩擦副间的磨屑,使其不易积存于磨损表面,所以油润滑下 PEEK 及 3 种 PEEK 复合材料的磨损表面都比较光滑。从图中可以看出,油润滑下 PEEK/CF 复合材料的磨损表面可以看到明显的纤维减薄磨平现象,说明 CF 和基体结合良好,并且在摩擦过程中 CF 不仅可起承载作用,阻止对偶表面微凸体对复合材料基体的切削,并且 CF 之间的间隙有利于润滑油在摩擦副间流动,起到一定的流体润滑效果,因此 PEEK/CF 复合材料磨损体积最小。在干摩擦条件下摩擦学性能极佳的 PEEK/PTFE 复合材料,在油润滑下却大幅下降,其摩擦系数和磨损体积均超过了 PEEK/GF 和 PEEK/CF 复合材料。这是因为 PEEK/PTFE 复合材料的摩擦学性能强烈依赖于其在对偶面形成的转移膜^[14-15],干摩擦条件下,PEEK/PTFE 复合材料对偶面上形成一层致密、连续、均匀的转移膜,如图 7a 所示,起到了良好的润滑作用。在油润滑条件下,润滑介质会破坏或者抑制转移膜的形成,如图 7b 所示,不利于改善材料的磨损行为。但是必须看到,润滑油在抑制转移膜的同时,也在摩擦副之间产生了一定程度的润滑作用,降低了体系的摩擦,有利于减轻材料的磨损,因而 PEEK/PTFE 复合材料的磨损体积仍小于纯 PEEK。由于干摩擦下 PEEK/PTFE 复合材料在对偶面形成的转移膜对于磨损性能的改善优于润滑油,因此,PEEK/PTFE 复合材料在干摩擦下的磨损体积较油润滑下的小。

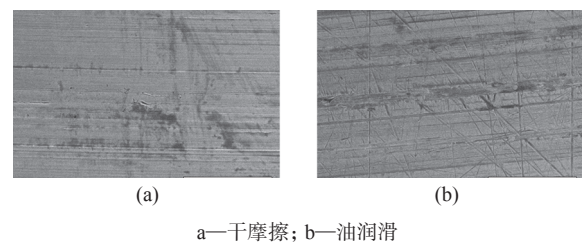


图 7 不同润滑条件下 PEEK/PTFE 复合材料的对偶件金属盘磨损表面 SEM 照片

根据前面的分析可知,乏油润滑环境下,试验进行一定周期后摩擦副表面吸附的润滑油逐渐流失,运行工况优于干摩擦,所以 PEEK 及其复合材料的磨损体积接近但小于干摩擦下的磨损体积。事实上,磨损后材料的表面形貌也会表现出相似的特

征。在乏油润滑下,纯 PEEK 磨损表面有材料的粘着和挤压滑移,磨损机理主要为粘着磨损。PEEK/GF 复合材料磨损表面存在大量裸露纤维以及基体材料块状剥落现象,纤维之间的基体在摩擦过程中被剥落,磨损机理主要表现为疲劳剥落磨损。由于 CF 与 PEEK 树脂基体界面结合良好,CF 承担了大部分接触压力,在磨损表面没有看到材料剥落现象。PEEK/PTFE 复合材料磨损表面有材料脱落以及出现明显的较大裂纹。与纯 PEEK 和 PEEK/GF 复合材料相比,PEEK/CF 在乏油润滑下具有更加优异的摩擦学性能。

3 结论

(1) 在不同润滑条件下,GF,CF,PTFE 都能显著地提高 PEEK 树脂基体的摩擦学性能,其中 CF 的综合表现最为优异。

(2) 干摩擦下,由于摩擦热的影响,PEEK 及 3 种 PEEK 复合材料的磨损表面均出现不同程度的材料粘着以及剥落现象,均表现出了粘着磨损特征。油润滑条件下,由于润滑油的润滑冷却作用,减轻了摩擦热对材料的影响,所以 PEEK 及 3 种 PEEK 改性材料的磨损表面都比较光滑。乏油润滑下材料磨损表面形貌与干摩擦下类似,但是由于摩擦副之间残留的润滑油存在,降低了材料的磨损。

(3) 在乏油润滑下,PEEK 复合材料的摩擦磨损特性不仅与材料本身的性能有关,也与对偶面表面形貌有关,具有一定粗糙度并且表面相对规整的对偶件可以有效地减少材料的磨损。

参考文献

- [1] Neglia S G, Culla A, Fregolent A. Bearing cage dynamics: Cage failure and bearing life estimation[M]. Cham: Nonlinear Dynamics, 2016: 491-504.
- [2] Ejaz N, Ali L, Rizvi S A. Failure of an aero engine ball bearing due to axial loading[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2015, 15(1): 15-24.
- [3] Qiu Ming, Chen Long, Li Yingchun, et al. Friction, wear, and lubrication in the bearing application[M]. Berlin: Bearing Tribology Springer, Heidelberg, 2017: 1-8.
- [4] Hebrard Y, Lang D, Karlsson A, et al. Bearing cage with antenna and method for detecting failure of a bearing cage: US15 / 278, 082[P]. 2017-04-13.
- [5] Oh H, Azarian M H, Morillo C, et al. Failure mechanisms of ball bearings under lightly loaded, non-accelerated usage conditions[J]. Tribology International, 2015, 81: 291-299.
- [6] Balyakin V B, Zhil'nikov E P, Pilla C K. Calculating life spans of bearings taking into consideration the wear and failure of PTFE cages[J]. Journal of Friction and Wear, 2018, 39(1): 19-23.
- [7] Feyzullahoglu E, Saffak Z. The tribological behaviour of different engineering plastics under dry friction conditions[J]. Materials & Design, 2008, 29(1): 205-211.
- [8] 张涛,陈晓阳,姜绍娜,等.精密轴承球与保持架的摩擦特性研究[J].机械设计与研究,2015,31(4):86-89.
Zhang Tao, Chen Xiaoyang, Jiang Shaona, et al. Study on friction characteristics between ball and cage of precision bearings[J]. Machine Design and Research, 2015, 31(4): 86-89.
- [9] Wang Anying, Yan S, Lin B, et al. Aqueous lubrication and surface microstructures of engineering polymer materials (PEEK and PI) when sliding against Si₃N₄[J]. Friction, 2017, 5(4): 414-428.
- [10] Riggs M R, Murthy N K, Berkebile S P. Scuffing resistance and starved lubrication behavior in helicopter gear contacts: dependence on material, surface finish, and novel lubricants[J]. Tribology Transactions, 2016. doi:10.1080 / 10402004.2016.1231358.
- [11] 董峰,沈明学,彭旭东,等.乏油环境下橡胶密封材料在粗糙表面上的摩擦磨损行为研究[J].摩擦学学报,2016,36(6):687-694.
Dong Feng, Shen Mingxue, Peng Xudong, et al. Friction and wear behaviors of rubber sealing material against rough surface under starved-oil condition[J]. Tribology, 2016, 36(6): 687-694.
- [12] 王敬,周杰,张建生,等.乏油润滑下 Cr12 表面不规则形貌的减摩研究[J].华中科技大学学报:自然科学版,2014(5):25-29.
Wang Jing, Zhou Jie, Zhang Jiansheng, et al. Study on anti-friction capability of irregular surface topography in starved-oil lubrication of Cr12[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2014(5): 25-29.
- [13] Pan L, Yapici U. A comparative study on mechanical properties of carbon fiber / PEEK composites[J]. Advanced Composite Materials, 2016, 25(4): 359-374.
- [14] Rodriguez V, Sukumaran J, Schlarb A K, et al. Influence of solid lubricants on tribological properties of polyetheretherketone (PEEK)[J]. Tribology International, 2016, 103: 45-57.
- [15] Onodera T, Nunoshige J, Kawasaki K, et al. Structure and function of transfer film formed from PTFE / PEEK polymer blend[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2017, 121(27): 14 589-14 596.

欢迎订阅 2018 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

欢迎广大读者到当地邮政局(所)订阅 2018 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志,订阅杂志及合订本光盘及过期刊物的读者可直接向杂志社办理订阅。《工程塑料应用》为月刊,大 16 开本,每月 10 日出版,2018 年定价 15 元/期,全年 180 元。《化学分析计量》为双月刊,大 16 开本,单月 20 日出版,2018 年定价 15 元/期,全年 90 元。

电话: (0531)85878223 85878057 传真: (0531)85947355