

玻璃纤维增强聚醚醚酮复合材料在水润滑下的摩擦学性能

Tribological Property of Polyetheretherketone Composites
Reinforced with Glass Fiber Under Water Lubrication

李恩重,徐滨士,王海斗,郭伟玲

(装甲兵工程学院 再制造技术国家重点实验室,北京 100072)

LI En-zhong, XU Bin-shi, WANG Hai-dou, GUO Wei-ling

(National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces
Engineering, Beijing 100072, China)

摘要: 利用球盘式摩擦磨损试验机考察了玻璃纤维(GF)增强聚醚醚酮(PEEK)复合材料在干摩擦和水润滑条件下的摩擦磨损性能,并探讨了其磨损机理。结果表明:在干摩擦和水润滑条件下,PEEK 和 GF/PEEK 的摩擦因数和磨损率均随载荷和对磨时间的增加逐渐增大并趋于稳定,GF 的加入可以显著降低 GF/PEEK 复合材料的摩擦因数和磨损率;在水润滑条件下,PEEK 和 GF/PEEK 的摩擦因数和磨损率比干摩擦下显著降低。干摩擦下,PEEK 以黏着磨损和磨粒磨损的混合磨损形式为主,水润滑条件下,磨损方式主要是以轻微的黏着磨损为主;干摩擦下,GF/PEEK 磨损表面有大量的微观断裂裂纹和破碎,以磨粒磨损和疲劳磨损为主,水润滑条件下,磨损表面仅有微观切削的痕迹,磨损方式以轻微磨粒磨损为主。由于水的冷却和润滑作用,使得复合材料向对偶钢球的黏着转移明显减弱,同时阻止了对偶钢球上的 Fe 向复合材料磨损表面转移,从而减轻摩擦、降低摩擦表面温升,显著改善复合材料的摩擦磨损性能。

关键词: 聚醚醚酮;玻璃纤维;水润滑;摩擦学性能

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2014.03.014

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2014)03-0077-06

Abstract: The tribological behaviors of Polyetheretherketone(PEEK) reinforced with glass fibers(GF) have been investigated using the ball-on-disc configuration under dry sliding and water lubrication. The results indicated that the friction coefficient and specific wear rate of PEEK and GF/PEEK composites increased gradually and stabilized with the increase in applied load and grinding time under dry sliding and water lubrication. The friction coefficient and specific wear rate of PEEK and GF/PEEK under water lubrication were much lower than that of dry sliding. The wear of PEEK composite was characterized by adhesive and abrasive under dry sliding, while slight adhesive wear under water lubrication. The wear of GF/PEEK composite was characterized by adhesive and fatigue wear under dry sliding which severe GF failure/damage could be detected on the worn surfaces, while slight abrasive wear under water lubrication. The cooling and boundary lubricating effects of water hindered the melting of worn surface layer which caused a great improvement in the tribological characteristic. Moreover, the transfer between the counterface materials and the worn surface of the GF/PEEK was inhibited accounted for the decreased wear rate under water lubrication.

Key words: polyetheretherketone; glass fiber; water lubrication; tribological behavior

聚醚醚酮(PEEK)是一种线性芳香族半结晶性热塑性聚合物材料,具有优异的物理、化学、力学、热性能等,作为高性能复合材料的基体在工程中得到广泛应用^[1,2]。为了改善其摩擦学性能,常添加纤维、固体润滑剂及硬质填料;或者进行表面处理,以降低摩擦,增加耐磨性^[3,4]。纤维增强的 PEEK 复合材料具有优异

的耐摩擦、抗蠕变性、抗湿热老化性和耐冲击性能^[5]。玻璃纤维(GF)具有价格低廉、与 PEEK 结合容易、绝缘性能好、冲击性能和压缩性能好等优点,与 PEEK 复合后可使其具有更高的热变形温度和更小的收缩率,因此 GF/PEEK 复合材料广泛应用于航空航天、化工医药、矿山工业及精密机械等领域^[6,7]。

在水环境中,由于金属材料易受到腐蚀,具有优异性能的 PEEK 及其复合材料代替金属材料而得到广泛应用。然而,高分子材料在水环境中的摩擦磨损性能明显不同于其在干摩擦条件下的摩擦磨损性能。高分子材料吸收水后不仅降低了其力学性能和弹性模量,而且表面塑化作用显著影响其摩擦磨损性能^[8,9]。近年来科研工作者开展了关于纤维增强 PEEK 复合材料制备及其在干摩擦条件下的摩擦性能的研究,结果表明:GF 增强对 PEEK 复合材料在干摩擦条件下的耐磨性影响明显,复合材料的磨损以黏着磨损与磨粒磨损的混合形式为主,玻璃纤维的加入对复合材料的摩擦因数和磨损率影响较大,比磨损率显著减小^[10,11];玻璃纤维的加入可以显著降低 GF/PEEK 复合材料的热膨胀系数^[12]。而针对 GF 增强 PEEK 复合材料在水润滑条件下的摩擦行为及其摩擦磨损机理的研究报道较少。本工作采用纯 PEEK 和含 30%(质量分数,下同)短切玻璃纤维

增强 PEEK 复合材料为原料,研究了其摩擦学性能,考察了干摩擦和水润滑条件下外部因素(载荷、对磨时间)对复合材料摩擦磨损性能的影响,利用 SEM,XPS,EDS 等对复合材料磨损表面进行了分析,并探讨了其摩擦磨损机理。

1 实验

1.1 试样及设备

PEEK 和含 30%短切玻璃纤维的 GF/PEEK 由北京华通锐驰有限公司提供,其部分性能参数如表 1 所示,采用 CETR-3 型多功能摩擦磨损试验机测试复合材料的摩擦磨损性能,采用 Nova NanoSEM 650 型场发射扫描电子显微镜和 X 射线光电子能谱仪(XPS)分别观察磨损表面的微观形貌和磨损表面的元素分布,利用 JA2003N 型精密分析天平测量复合材料摩擦前后的质量差,进而求其磨损率。

表 1 PEEK 和 GF/PEEK 的主要物理力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of pure PEEK and GF/PEEK

Material	Density/ (g · cm ⁻³)	Water absorption/ %	Tensile strength/ MPa	Tensile modulus/ GPa	Flexural strength/ MPa	Flexural modulus/ GPa
Pure PEEK	1.32	0.5	90.3	2.8	139.1	3.7
GF/PEEK	1.49	0.11	148.2	4.9	230.7	8.9

1.2 摩擦性能测试

摩擦实验在 CETR-3 型球盘式多功能摩擦磨损试验机上进行,往复运动频率为 2Hz,往复行程为 5mm,对磨时间为 60min,实验在室温(20℃)下进行,相对湿度 50%。球盘式摩擦磨损试验机示意图如图 1 所示,上试样采用 AISI 52100 钢球(HRC62,φ4.0mm),钢球的化学成分组成如表 2 所示,下试样为聚合物材料(φ24.5mm×7.0mm)。摩擦因数由计算机直接得出,根据用精密分析天平测定的磨损前后的质量损失来计算磨损量,按式(1)换算成磨损率。

$$K = \frac{\Delta m}{\rho \cdot L \cdot F_N} \tag{1}$$

式中:K 为磨损率(mm³ · N⁻¹ · m⁻¹),Δm 为磨损前后质量差,ρ 为复合材料密度(g · cm⁻³),L 为滑动距离(m),F_N为载荷(N)。

1.3 表面微观结构表征

将样品的磨损表面分别用丙酮和无水乙醇进行清洗并烘干,用 Balzers SCD 050 型镀膜仪喷金 2min,然后利用扫描电镜分析磨损表面和磨屑形貌,用扫描电镜自带的能谱仪(EDS)和 XPS 分析磨损表面元素分布。

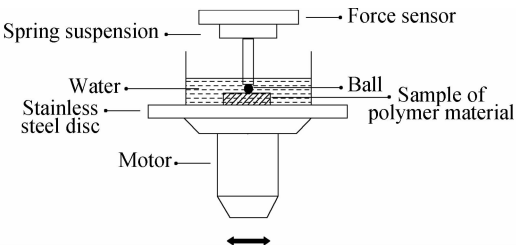


图 1 摩擦磨损实验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wear test apparatus

表 2 AISI 52100 钢球化学组成(质量分数/%)

Table 2 Chemical composition of AISI 52100 steel ball(mass fraction/%)

C	Si	Mn	Cr	S	P	Fe
0.95-1.05	0.15-0.35	0.20-0.40	1.30-1.65	<0.027	<0.027	Bal

2 结果与讨论

2.1 干摩擦和水润滑条件下的摩擦学性能

图2为频率2Hz、载荷200N,干摩擦和水润滑条件下 PEEK 和 GF/PEEK 摩擦因数随对磨时间的变化曲线。由图2可知,在干摩擦条件下,PEEK 和 GF/PEEK 摩擦因数随对磨时间的增加而增大并逐渐趋于稳定。在干摩擦和水润滑条件下 GF/PEEK 的摩擦因数均高于 PEEK,在摩擦过程中 PEEK 发生材料转移而在对偶面形成转移膜,短切 GF 以微细颗粒形态转移到对磨面上,对高分子转移膜有机械镶嵌作用,有利于形成较为致密均匀稳定的膜,由于转移膜的平整形态,使摩擦界面接触点增多,从而使 GF/PEEK 具有较高的摩擦因数^[13,14]。水润滑条件下 PEEK 和 GF/PEEK 复合材料的摩擦因数比干摩擦显著降低,复合材料的摩擦因数随对磨时间的增加基本保持不变。这主要由于 PEEK 含有强极性的羰基基团,水分子很容易与羰基通过氢键结合,形成水分子吸附膜;同时由于材料表面的宏观几何不平度、粗糙度及亚微观波纹度与微观孔穴等,有利于水的存留与渗透,从而改善摩擦副表面的润滑状态,起到较好的边界润滑作用,从而降低材料的摩擦因数^[15,16]。

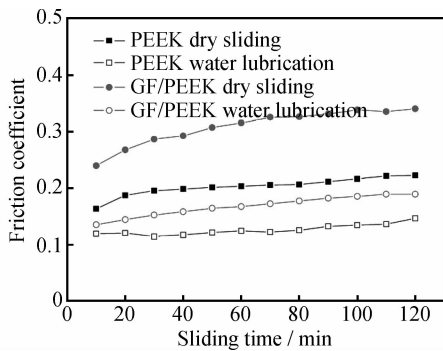


图2 干摩擦和水润滑条件下纯 PEEK 和 GF/PEEK 摩擦因数随时间的变化(载荷:200N, 频率:2Hz)

Fig. 2 Variation in friction coefficient of pure PEEK and GF/PEEK with sliding time under dry sliding and water lubricated conditions at a reciprocating frequency of 2Hz and applied load of 200N

图3和图4为频率2Hz、对磨时间60min,干摩擦和水润滑条件下 PEEK 和 GF/PEEK 摩擦因数随载荷的变化曲线。由图3可知,干摩擦和水润滑条件下 PEEK 的摩擦因数均随载荷的增加而不断增大,在水润滑条件下,PEEK 的摩擦因数比干摩擦下的明显降低,约为干摩擦时的 50%~70%。由图4可知,在干摩擦条件下,GF/PEEK 的摩擦因数随载荷的增加而持续上升,随着载荷的增加,摩擦因数逐渐趋于平

稳;在水润滑条件下,GF/PEEK 的摩擦因数随载荷的增加基本保持不变,摩擦因数约为干摩擦条件下的 50%~60%。PEEK 和 GF/PEEK 在水润滑条件下的摩擦因数要显著低于干摩擦条件下的摩擦因数,在水润滑条件下,水可以起到润滑和冷却作用,从而减轻摩擦、降低摩擦表面温升,减轻复合材料基体因摩擦热而导致的塑性变形和黏着,因此载荷对摩擦因数影响不大^[17]。

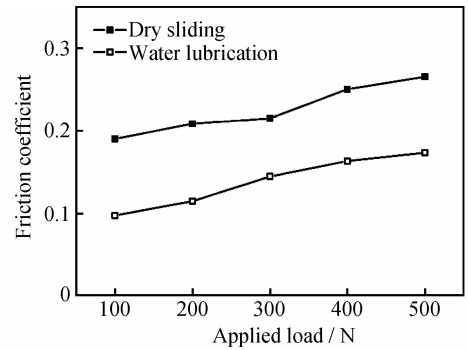


图3 干摩擦和水润滑条件下载荷对纯 PEEK 摩擦因数的影响(对磨时间:60min, 频率:2Hz)

Fig. 3 Variation in friction coefficient of pure PEEK with applied load under dry sliding and water lubricated conditions at a reciprocating frequency of 2Hz and sliding duration of 60min

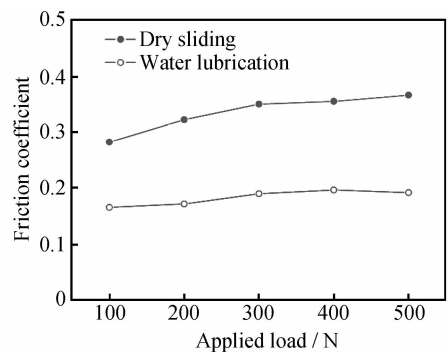


图4 干摩擦和水润滑条件下载荷对 GF/PEEK 复合材料摩擦因数的影响(对磨时间:60min, 频率:2Hz)

Fig. 4 Variation in friction coefficient of GF/PEEK with applied load under dry sliding and water lubricated conditions at a reciprocating frequency of 2Hz and sliding duration of 60min

图5为频率2Hz、对磨时间60min,干摩擦和水润滑条件下 PEEK 和 GF/PEEK 磨损率随载荷的变化曲线。由图5可知,在干摩擦和水润滑条件下,GF/PEEK 复合材料的磨损率均比 PEEK 小得多,高强度的玻璃纤维显著提高 GF/PEEK 复合材料的综合力学性能(如表1所示),从而改善其摩擦磨损性能,GF 作为填料使 PEEK 复合材料的抗磨性能得到提升。在水润滑条件下,PEEK 和 GF/PEEK 的磨损率显著小

于干摩擦条件下的磨损率。在水润滑条件下,水的冷却作用使摩擦热迅速耗散,摩擦表面处于黏弹态甚至玻璃态,因而磨损量随着负荷的增大而增大。由于水的冷却作用,复合材料向摩擦对偶面的黏着转移明显减轻,同时,水将磨屑从摩擦区域带走从而减轻了磨粒磨损,因此水润滑下的磨损率比干摩擦下的明显降低^[18]。

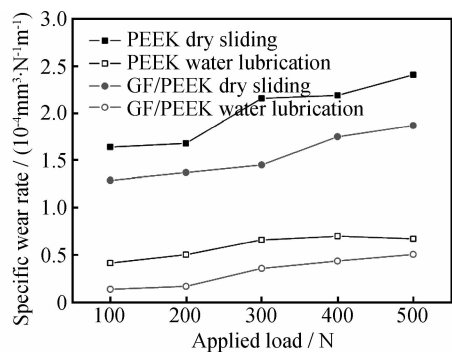


图5 干摩擦和水润滑条件下 PEEK 和 GF/PEEK 磨损率随载荷的变化(对磨时间:60min, 频率:2Hz)

Fig. 5 Variation in specific wear rate of pure PEEK and GF/PEEK with applied load under dry sliding and water lubricated conditions at a reciprocating frequency of 2Hz and sliding duration of 60min

2.2 微观形貌分析

图 6 为干摩擦和水润滑条件下 PEEK 和 GF/PEEK 磨损表面 SEM 形貌。在干摩擦条件下,PEEK 磨损表面有块状颗粒的磨屑,并且沿滑动方向形成程度不同的犁沟,磨损表面出现严重的塑性变形和黏着剥落,如图 6(a)所示,表现为黏着磨损和磨粒磨损的混合磨损形式;在干摩擦条件下,GF/PEEK 磨损表面有大量的微观断裂裂纹和破碎,复合材料中纤维发生断裂和破碎并被磨平,玻璃纤维和 PEEK 基体结合松散,并有块状磨屑,如图 6(c)所示,主要表现为磨粒磨损和疲劳磨损特征。根据机械-分子作用理论,摩擦力主要来源于机械作用力(犁沟,刮擦等)和分子作用力(黏着等),温度升高,材料的黏着磨损加剧,黏着产生的摩擦力增加,因此材料的摩擦因数和磨损增大^[19]。在干摩擦条件下,由于摩擦热的作用,磨损表面发生塑性变形,在对偶钢球表面上粘附有一层肉眼可见的不连续的较厚转移膜,导致复合材料的磨损率较大。从图 6(a)和图 6(c)可以看出,PEEK 和 GF/PEEK 磨损表面存在一些明亮区域。对图 6(c)明亮区域元素进行 EDS 分析,明亮区域含有 Fe 等元素。这表明在摩擦过程中对偶钢球上的 Fe 转移到复合材

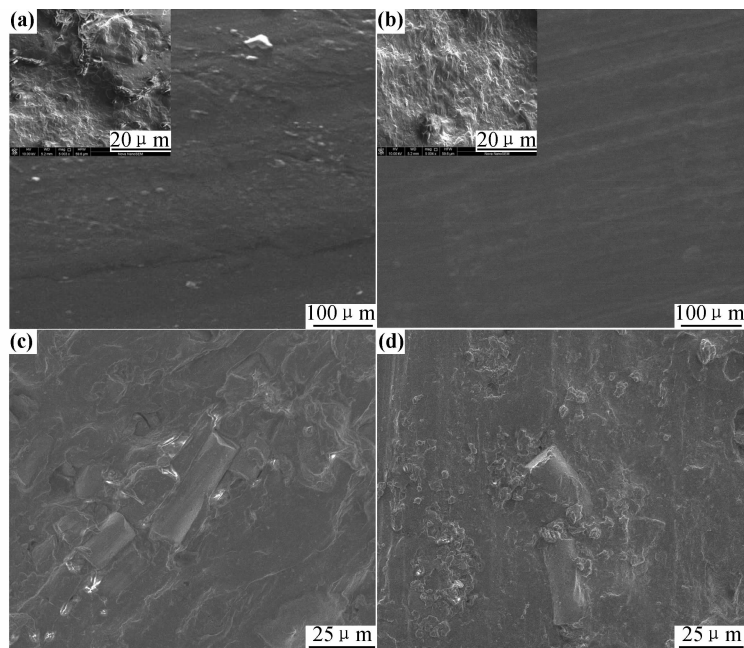


图 6 干摩擦和水润滑条件下纯 PEEK 和 GF/PEEK 磨损表面 SEM 形貌及表面成分分析
(载荷:200N,对磨时间:60min,频率:2Hz) (a)PEEK 干摩擦条件下;(b)PEEK 水润滑条件下;
(c)GF/PEEK 干摩擦条件下;(d)GF/PEEK 水润滑条件下

Fig. 6 SEM morphologies and elements analysis of the worn surfaces of GF/PEEK composite (test conditions: applied load, 200N; sliding duration, 60min; reciprocating frequency, 2Hz)

(a)PEEK under dry sliding;(b)PEEK under water lubrication;
(c)GF/PEEK under dry sliding;(d)GF/PEEK under water lubrication

料磨损表面,而在水润滑条件下,PEEK 和 GF/PEEK 磨损表面并不存在明亮区域。这可由 GF/PEEK 磨损表面 XPS 分析结果得到进一步证实,图 7 为 GF/PEEK 复合材料磨损表面 Fe 和 O 元素的 XPS 图谱,结合各元素的结合能值,对照各元素的标准谱图可知:Fe2p 谱为双峰,分别位于 711.3eV 和 724.3eV,结合能峰值 711.3eV 是单质铁结合能峰值,结合能峰值 724.3eV 是 Fe_2O_3 存在的依据;干摩擦条件下,磨损表面 O1s 谱主峰位置为 529.8eV,可归属为 Fe_2O_3 ,在干摩擦和水润滑条件下 O1s 位于 531.4eV 位置的谱峰对应于 PEEK 中的羰基($\text{C}=\text{O}$)中的氧。水的存在不仅减轻复合材料向摩擦对偶面的黏着转移,而且阻碍了对偶钢球上 Fe 的转移。在水润滑条件下,PEEK 磨损表面比较光滑,仅有微切削的痕迹,磨损表面的严重

塑性变形显著减轻,如图 6(b)所示;GF/PEEK 磨损表面比较平整,纤维和基体结合良好,GF 周围的 PEEK 基体被磨平,凸出的 GF 被对偶钢球局部磨平,有少量颗粒状磨屑存留于磨损表面上,如图 6(d)所示。裸露于复合材料磨损表面的纤维一方面可起承载作用,另一方面可阻止对偶表面微凸体对复合材料基体的切削作用。在水润滑条件下,材料表层在水中不同程度的吸水、溶胀,形成低剪切的吸水溶胀层,从而降低了摩擦因数和磨损率;同时,摩擦过程中产生的磨屑被水带走,不易积存于磨损表面。同时,由于水的冷却作用,摩擦热对 PEEK 基体力学性能的影响减小,复合材料的变形、塑性流动、黏着及纤维脱落受到明显抑制,因此复合材料在水润滑下表现出优良的耐磨性能^[20]。

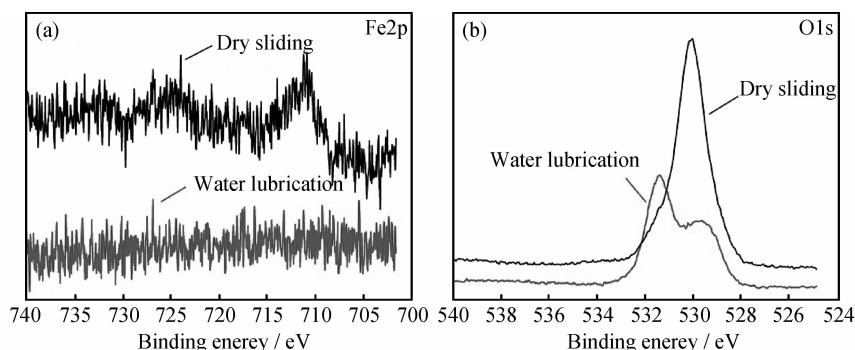


图 7 GF/PEEK 复合材料磨损表面的 XPS 图谱 (a)Fe2p;(b)O1s

Fig. 7 XPS spectra of Fe2p(a)and O1s(b)of the GF/PEEK worn surface

图 8 为水润滑条件下 GF/PEEK 磨损表面 SEM 形貌。可以看出,在水润滑条件下,磨损表面和未磨损表面存在明显的分界线(如图 8(a)所示)。摩擦之前 GF/PEEK 复合材料的表面较粗糙,短切 GF 杂乱地分散于 PEEK 中,复合材料表面存在空隙,空隙的存在与材料本身和加工工艺有着密不可分的联系,比如

材料成分的不同、成型工艺的不同引起的。磨损表面较致密、平滑,表面的空隙消失,同时出现块状的磨屑,在磨损表面很难看到 GF 的存在。图 8(b)为磨损区域和未磨损区域的放大 SEM 照片,可以看出,磨损区域较光滑同时没有 GF 的存在,PEEK 基体在载荷的作用下被挤出磨损表面覆盖在未磨损的区域,为底层

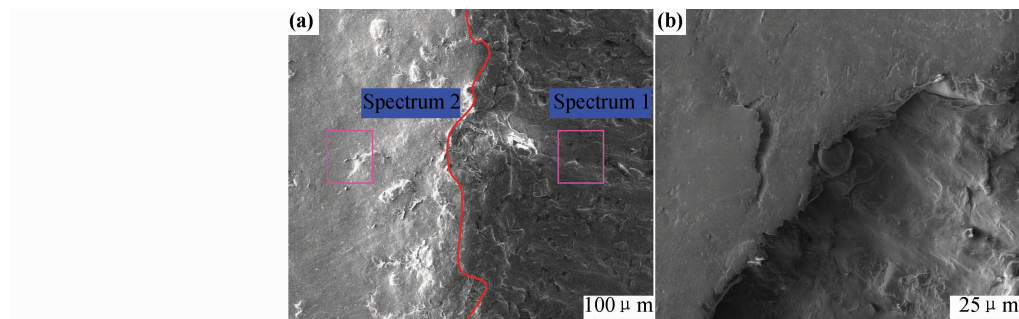


图 8 水润滑条件下 GF/PEEK 磨损表面 SEM 形貌(载荷:200N, 对磨时间:60min, 频率:2Hz) (a)低倍;(b)高倍

Fig. 8 SEM morphologies of the worn surfaces of GF/PEEK

(test conditions: applied load, 200N; sliding duration, 60min; reciprocating frequency, 2Hz)

(a)low magnification;(b)higher magnification

的 GF 提供暂时的保护。表 3 为图 8(a)中选定区域的 EDS 分析,未磨损区域(对应 Spectrum 1)和磨损区域(对应 Spectrum 2)均存在 C,O,Si,Ca,Au,Al,Na 等元素,但各个元素的含量不同,与未磨损区域相比,磨损区域中的 Si,Ca,Al 三种元素显著降低,结合磨损表面 SEM 形貌分析可以推测,在摩擦过程中 GF 逐渐地被对偶钢球磨削变细、破碎,并最终从聚合物中剥落。

表 3 图 8(a)中选定区域的 EDS 分析结果(质量分数/%)
Table 3 Elemental compositions of the different worn zones shown in fig. 8(a)(mass fraction/%)

Spectrum	C	O	Si	Ca	Au	Al	Na	Fe
1 [#]	53.49	23.51	10.66	4.66	4.14	2.98	0.56	—
2 [#]	67.03	27.41	0.68	0.4	3.44	0.28	0.53	0.23

3 结论

(1)在干摩擦和水润滑条件下,PEEK 和 GF/PEEK 的摩擦因数和磨损率均随载荷的增大而增加。GF 作为填料显著提高 GF/PEEK 复合材料的力学性能,在摩擦过程中,GF 承载了部分载荷,从而改善了 GF/PEEK 复合材料的抗磨性能。在摩擦过程中 GF 逐渐地被对偶面磨削变细、破碎,并最终从聚合物中剥落。

(2)PEEK 和 GF/PEEK 在水润滑条件下的摩擦因数和磨损率比干摩擦条件下显著降低。在水润滑条件下,由于水的冷却和润滑作用,降低了摩擦表面温升、减轻摩擦,减轻复合材料基体因摩擦热而导致的塑性变形和黏着,复合材料向摩擦对偶面的黏着转移明显减轻,同时,水将磨屑从摩擦区域带走从而减轻了磨粒磨损,因此复合材料在水润滑下的摩擦因数和磨损率比干摩擦明显降低。

(3)干摩擦条件下,PEEK 磨损表面出现严重的塑性变形和黏着剥落,以黏着磨损和磨粒磨损的混合磨损形式为主;水润滑条件下,磨损表面光滑,磨损方式主要是以轻微的黏着磨损为主。干摩擦下,GF/PEEK 磨损表面有大量的微观断裂裂纹和破碎,主要表现为磨粒磨损和疲劳磨损;水润滑条件下,磨损表面比较平整,磨损方式以轻微磨粒磨损为主。

参考文献

[1] STEINING T C, SMITH C P, KIMBER P J. Polyetheretherketone: high performance in a new thermoplastic[J]. Modern Plastics International, 1982,(3): 54—56.

[2] HARRASS M, FRIEDRICH K, ALMAJID A A. Tribological behavior of selected engineering polymers under rolling contact [J]. Tribol Int, 2010,43: 635—646.

随着对磨时间的增加和载荷的增大,GF 逐渐从磨损表面剥落,PEEK 基体因失去 GF 对载荷的承载而产生较大的塑性变形,从而使复合材料的摩擦因数和磨损量升高。同时磨损区域出现 Fe 元素,Fe 元素的出现是由于摩擦过程中对偶钢球上的 Fe 转移到 GF/PEEK 磨损表面,与图 6 中 GF/PEEK 磨损表面出现明亮区域的分析相符。

[3] BIJWE J. Potential of fibres and solid lubricants to enhance the triboutility of PEEK in adverse operating conditions[J]. Industrial Lubrication Tribology,2007,(4):156—165.

[4] ZHANG Z, BREIDT C, CHANG L. Wear of PEEK composites related to their mechanical performances[J]. Tribology International, 2004,37:271—277.

[5] FRANCISCO M, GAITONDE V N, KAMIK S R. Influence of cutting condition on machinability aspects of PEEK, PEEK CF 30 and PEEK GF 30 composites using PCD tools [J]. J Mater Process Tech, 2009,(4):1980—1987.

[6] THOMASON J L, VLUG M A. Influence of fiber length and concentration on the properties of glass fiber reinforced polypropylene impact properties[J]. Composites, 1997, 28: 277—288.

[7] SCHULEDJEWSKI R, FRIEDRICH K. Tensile properties of filled liquid crystal polymer systems[J]. J Mater Sci Lett, 1992, 11:840—842.

[8] STOLARSKI T A. External lubrication of high temperature thermoplastic polymers [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1993,48(5): 897—904.

[9] COGSWELL F N. Thermoplastic Aromatic Polymer Composites [M]. Oxford : Butterworth-Heinemann, 1992.

[10] DAVIM J P, CARDOSO R. Effect of the reinforcement (carbon or glass fibres) on friction and wear behaviour of the PEEK against steel surface at a long dry sliding[J]. Wear, 2009, 266 (7—8): 795—79.

[11] BURRIS D L, SAWYER W G. Tribological behavior of PEEK components with compositionally graded PEEK/PTFE surfaces [J]. Wear, 2007, 262:220—224.

[12] CHU X X, WU Z X, HUANG R J, et al. Mechanical and thermal expansion properties of glass fibers reinforced PEEK composites at cryogenic temperatures[J]. Cryogenics, 2010,50:84—88.

[13] STUART B H. Tribological studies of polyetheretherketone blends[J]. Tribology International, 1998,31(11):647—651.

[14] FRIEDRICH K, KARGER-KOCSIS J, LU Z. Effect of steel counterface roughness and temperature on the friction and wear of PEEK composites under dry sliding conditions [J]. Wear, 1991,148:235—247.

(下转第 89 页)

- velopment of high-performance OCTG[J]. Steel Pipe, 2009, 38(1): 1-9.
- [6] DMITRY S, DEREK P, BILL H. The electrochemistry of 13% chromium stainless steel in oil field brines [J]. Electrochimica Acta, 2005, 50: 4109-4116.
- [7] 陈长风,姜瑞景,张国安,等. 镍基合金管材高温高压 H_2S/CO_2 环境中局部腐蚀研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(3): 427-432.
- CHEN Chang-feng, JIANG Rui-jing, ZHANG Guo-an, et al. Study on local corrosion of nickel-base alloy tube in the environment of high temperature and high pressure H_2S/CO_2 [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(3): 427-432.
- [8] NICE P, MARTIN J. Application limits for super martensitic and precipitation hardened stainless steel bar-stock materials [C]//2005 NACE Corrosion Conference. Houston: NACE International, Paper NO 05091.
- [9] MARCHEBOIS H, LEYER J. SSC performance of a super 13% Cr martensitic stainless steel for OCTG: three-dimensional fitness-for-purpose mapping according to P_{H_2S} , pH and chloride content [C]//2007 NACE Corrosion Conference. Houston: NACE International, Paper NO 07090.
- [10] MIYATA Y, KIMURA M. Effects of chemical components on resistance to intergranular stress corrosion cracking in super martensitic stainless steel [C]//2007 NACE Corrosion Conference. Houston: NACE International, Paper NO 07092.
- [11] 董超芳,关喬心,程学群. pH 值对高温高压水中 304L 不锈钢应力腐蚀开裂的影响[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(12): 1569-1573.
- DONG Chao-fang, GUAN Yu-xin, CHENG Xue-qun. Effects of pH values on the stress corrosion cracking of 304L stainless steel in high-temperature and high-pressure water [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(12): 1569-1573.
- [12] 唐子龙,李超,李辉. NaCl 液膜下碳钢腐蚀速率及其与环境因素的关联性[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(1): 67-71.
- TANG Zi-long, LI Chao, LI Hui. Corrosion rate of carbon steel under liquid layer containing Cl^- and its correlation with environment control factors [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 30(1): 67-71.
- [13] TAI Wen-ta, CHEN Ming-shan. Stress corrosion cracking behavior of 2205 duplex stainless steel in concentrated NaCl solution [J]. Corrosion Science, 2000, 42: 545-559.
- [14] 胡艳玲,胡融刚,邵敏华. 不锈钢钝化膜形成和破坏过程的原位 ECSTM 研究[J]. 金属学报, 2001, 37(9): 965-970.
- HU Yan-ling, HU Rong-gang, SHAO Min-hua, et al. In situ ECSTM investigation on formation and breakdown of passive film for polycrystalline stainless steel [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 37(9): 965-970.
- [15] 刘道新. 材料的腐蚀与防护 [M]. 西安:西北工业大学出版社, 2006: 15-18.
- [16] 田伟. G3 镍基合金 H_2S/CO_2 腐蚀及表面膜电化学行为研究 [D]. 西安:西北工业大学, 2012.
- [17] HAKIKI N B, BOUDIN S, RONDOT B, et al. The electronic structure of passive films formed on stainless steels [J]. Corrosion Science, 1995, 37(11): 1809-1816.
- [18] VALERIA A A, BRETT M A. Characterization of passive film formed on mild carbon steel in bicarbonate solution by EIS [J]. Electrochimica Acta, 2002, 47: 2081-2087.
- [19] 程学群,李晓刚,杜翠薇,等. 316L 不锈钢在醋酸溶液中的钝化膜电化学性质 [J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(9): 911-915.
- CHENG Xue-qun, LI Xiao-gang, DU Cui-wei, et al. Electrochemical properties of passivation film formed on 316L stainless steel in acetic acid [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(9): 911-915.

基金项目:陕西省科技计划资助项目(2011K07-01)

收稿日期:2012-11-25;修订日期:2013-09-11

作者简介:姚小飞(1978—),男,博士生,研究方向为材料腐蚀与表面技术,联系地址:西安市友谊西路 127 号西北工业大学航空学院民航系(710072),E-mail: yxf933@126.com

(上接第 82 页)

- [15] XIONG D S, GE S R. Friction and wear properties of UHMWPE/ Al_2O_3 ceramic under different lubricating condition [J]. Wear, 2001, 250(11-12): 242-245.
- [16] CAHN R W. Materials Science and Technology [M]. London: Cambridge University Press, 1993.
- [17] 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 [J]. Composites Science and Technology, 2011, 71: 828-835.
- [18] PETER J B. Friction Science and Technology: From Concepts to Applications [M]. Florida, Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [19] 温诗铸,黄平. 摩擦学原理 [M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
- [20] FU H, LIAO B, QI F J, et al. The application of PEEK in stainless steel fiber and carbon fiber reinforced composites [J]. Composites, Part B Engineering, 2008, 39(4): 585-591.

基金项目:国家 973 项目(2011CB013403);国家杰出青年科学基金资助项目(51125023);装甲兵工程学院科研创新基金(2013CJ36)

收稿日期:2012-09-11;修订日期:2013-08-11

作者简介:李恩重(1985—),男,硕士,讲师,从事高分子材料工程与再制造工程研究,联系地址:北京市丰台区杜家坎 21 号再制造技术国家重点实验室(100072),E-mail: enzhongli@sina.com