

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.05.011

不同工艺条件下 PEEK/CF 复合材料摩擦磨损特性

宋恩敏¹, 卞达^{1,2}, 赵永武^{1,2}, 汤豪¹, 王剑宇¹

(1. 江南大学机械学院, 江苏无锡 214122; 2. 江南大学江苏省先进食品制造装备技术重点实验室, 江苏无锡 214122)

摘要:以碳纤维(CF)为增强相,制备了在不同处理工艺下的聚醚醚酮(PEEK)/CF复合材料,采用摩擦磨损试验机对复合材料的摩擦学性能进行测试并通过三维形貌仪以及扫描电子显微镜分析磨痕微观形貌。研究表明,CF的添加会增加PEEK/CF复合材料的摩擦系数,而且随着CF含量的增加,摩擦系数也逐渐增加;但PEEK/CF复合材料的磨损量会随着CF含量的增加,呈现出先减小后增加的趋势。不经过热处理时,CF质量分数在20%时,磨损量从CF质量分数为0%的 $2.9 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 降至 $1.8 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,当CF质量分数为40%时,磨损量急剧增大。经过热处理后,PEEK/CF复合材料的耐磨性有所提升,当CF的质量分数为20%时,磨损量为 $1.2 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,相较于未热处理的复合材料,磨损量减少了35.4%。

关键词:碳纤维;聚醚醚酮;摩擦系数;耐磨性

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)05-0053-06

Friction and Wear Characteristics of PEEK/CF Composite under Different Processes

Song Enmin¹, Bian Da^{1,2}, Zhao Yongwu^{1,2}, Tang Hao¹, Wang Jianyu¹

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract : With different treatment processes, carbon fiber(CF) was used as filler to make polyetheretherketone (PEEK)/CF composite with different content. The friction and wear properties of PEEK/CF composite were tested by friction and wear machine. The microscopic morphology of the wear marks were analyzed by three-dimensional morphometer and scanning electron microscope. The results show that the friction coefficient of PEEK/CF composites increases with the addition of CF increasing. And with the increase of CF content, the friction coefficient gradually increases. But the abrasion loss of composites with the increase of CF shows a trend of first decreasing and then increasing. As the same amount, the wear resistance of composite is improved by heat treatment. When CF content is 20%, the wear rate of PEEK/CF composites decreases from $2.9 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ to $1.8 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, and the wear rate increases sharply when the CF content is 40%. After heat treatment, the wear resistance of PEEK/CF composites is improved. When the content of CF is 20%, the wear resistance of PEEK/CF composites is improved. The amount of wear is $1.2 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, compared with the case without overheating treatment, the wear loss is reduced by 35.4%.

Keywords : carbon fiber ; polyetheretherketone ; friction coefficient ; wear resistance

聚醚醚酮(PEEK)是一种半结晶性高性能热塑性工程塑料^[1],在航空航天、武器装备、医疗设备、化工和能源等领域已成为一种不可缺少的重要材料^[2],在其它的工业领域也有大量的应用。PEEK一般通过对苯二酚、4,4'-二氟二苯酮和碱金属碳酸盐缩聚合成^[3],其玻璃化转变温度可达143℃,熔融温度

可达343℃,可在260℃的环境中长期使用^[4]。纯PEEK具有优良的滑动特性,适用于严格要求低摩擦系数和耐磨耗用途的场合。PEEK具有优异的力学性能、耐摩擦性、耐化学药品性等^[5],甚至在一些恶劣的环境中,可以替代传统金属。但是其本身仍有一定的缺陷和不足,为了扩大PEEK的应用范围

基金项目: 国家自然科学基金项目(51675232),江苏省自然科学基金项目(BK20190611)

通信作者: 卞达,讲师,博士,主要研究方向为表面工程 E-mail: bianda@jiangnan.edu.cn

收稿日期: 2021-02-25

引用格式: 宋恩敏,卞达,赵永武,等. 不同工艺条件下 PEEK/CF 复合材料摩擦磨损特性[J]. 工程塑料应用,2021,49(5): 53-58.

Song Enmin, Bian Da, Zhao Yongwu, et al. Friction and wear characteristics of PEEK/CF composite under different processes[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(5): 53-58.

和使用性能,近年来对 PEEK 进行耐磨性的研究很多。目前,PEEK 主要的改性方法包括无机填料填充改性、纤维增强改性、聚合物共混改性及表面改性等^[6]。玻璃纤维 (GF)、碳纤维 (CF) 和晶须与 PEEK 的亲合力强,可制成性能优异的复合材料^[7]。

PEEK 在实际应用过程中存在的主要问题有:

(1) 表面粘结性差,与填料的界面结合力不强,容易造成热变形和热疲劳;(2) 耐磨性仍然不能满足工程需要;(3) 成型加工较困难,加工工艺不稳定^[8]。

目前,在纤维增强 PEEK 中,常用 CF 和 GF 来改善 PEEK 的性能。李恩重等^[9]利用球盘式摩擦磨损试验机对质量分数为 30% 的短切 GF 增强 PEEK 复合材料进行室温干滑动磨损实验,试验结果表明,随着载荷的升高和对磨时间的增加,PEEK/GF 复合材料的摩擦系数和磨损量逐渐增大并趋于稳定,GF 的加入可以明显降低 PEEK/GF 复合材料的磨损量。万磊等^[10]研究了 PEEK/碳化硅陶瓷复合材料摩擦副在干摩擦和水润滑条件下的滑动摩擦磨损行为,干摩擦条件下,摩擦系数随时间的增加逐渐趋于稳定。PEEK 中弥散分布的 CF 可以起到增强机体和减摩作用,在摩擦过程中,随着载荷的增大,摩擦产生的热量也增大,导致摩擦表面温度升高,降低 PEEK 复合材料的硬度,加剧了 PEEK 复合材料的磨损。Zhu Juanjuan 等^[11]研究 4 种材料,包括未填充 PEEK、质量分数 30% CF 增强 PEEK (复合物 A)、质量分数 30% GF 增强 PEEK (复合物 B) 以及质量分数 10% 碳纤维、10% 石墨和 10% 聚四氟乙烯 (PTFE) 改性 PEEK (复合物 C) 的摩擦学性能。结果表明,纯 PEEK 由于较高的断裂伸长率,磨损率较低,甚至出现明显的塑性变形;在干滑动过程中,复合物 A 和复合物 B 的磨损表面可以看到由于界面剪切导致纤维与基体脱粘、拔出;复合物 C 磨损表面粗糙度增加,这表明了 PTFE、石墨与基体之间的结合较弱,虽然自润滑添加剂降低摩擦,但不能保持良好的耐磨性,PEEK/CF 复合材料在 4 种试验材料中表现出最佳的整体摩擦学特性。胡婕^[12]研究了质量分数为 30% 的 PEEK/CF 复合材料的摩擦磨损性能,CF 的加入可以显著提高 PEEK 材料的摩擦磨损性能,耐磨性有所提升。O. Jacobs 等^[13]研究了 PEEK/CF 复合材料在干燥和水环境下的滑动摩擦性能。与未加入 CF 的 PEEK 材料相比,复合材料的磨损量降低,耐磨性有所提升,在干燥环境下更为明显。但是填充 CF 与 PEEK 基体之间存在

残余应力,导致界面结合性较弱,容易出现孔隙与裂纹,降低了复合材料的耐磨性。磨损是造成摩擦材料失效的重要因素之一,磨损率的高低是评价材料耐磨程度的标准。笔者通过对 PEEK/CF 复合材料进行回火处理,释放 CF 与 PEEK 之间的残余应力,增强界面结合性来增强复合材料的耐磨性。

针对目前 PEEK 的耐磨性不能满足使用要求的现状,笔者以 CF 增强 PEEK 的耐磨性,研究 CF 的含量及热处理对复合材料的摩擦系数、磨损量的影响规律,探讨复合材料的磨损机理。

1 实验部分

1.1 原材料

CF: T300,中钢集团工程科技有限公司;

PEEK: 粉末 (工业级),长春吉大特塑工程研究有限公司。

1.2 仪器及设备

多功能摩擦磨损试验机: MFT-5000 型,美国 RTEC 公司;

电热鼓风干燥箱: 10HB 型,浙江力辰仪器科技有限公司;

注塑机: TY-400 型,深圳德润机械公司;

白光形貌仪: MFP-D 型,美国 RTEC 公司;

显微硬度计: MH-3 型,上海恒一设备有限公司;

扫描电子显微镜 (SEM): SU1510/EVO108 型,日本株式会社/蔡斯公司。

1.3 试样制备

采用物理共混-注塑成型制备不同含量的 PEEK/CF 复合材料。以不同含量 CF 和 PEEK 为原材料,将两者混合均匀,并且使用电热鼓风干燥箱干燥,将干燥好的料粒放入注塑机,注塑温度为 370℃,模具温度设定为 175℃,冷却后,部分材料取出,利用马弗炉进行热处理,加热至 145℃,保持 3 h,自然冷却。

1.4 测试表征

摩擦磨损试验: 采用多功能摩擦磨损试验机进行干摩擦条件下的摩擦磨损测试,采用线性往复模块,对磨小球采用直径为 9 mm 的 Si₃N₄ 陶瓷球,载荷为 50 N,频率为 2 Hz,时间为 30 min,所得磨痕长度为 6 mm;

磨损率: 使用白光形貌仪观察复合材料的磨痕,分析并计算其磨损率;

硬度: 利用显微硬度计测量其硬度,载荷为

10 g,施加载荷时间为 15 s,测量 7 个点,去除最大值和最小值,取平均值;

SEM:将试样的摩擦表面进行喷金处理,在不同的放大倍数下,利用 SEM 观察磨痕的表面形貌,用 SEM 观察表面并拍照。

2 结果分析

2.1 复合材料显微硬度分析

图 1 为不同含量 CF 的 PEEK/CF 复合材料的显微硬度。

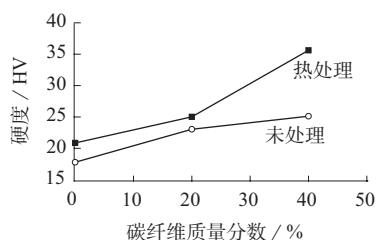


图 1 不同含量 CF 的 PEEK/CF 复合材料的显微硬度

由图 1 可以看出,随着 CF 含量的不断增加,复合材料的显微硬度逐渐增大。未添加 CF 时,热处理的复合材料的硬度为 20.86 HV,当 CF 的质量分数为 20% 时,硬度增加到 23.64 HV,提升了 13.3%,当 CF 的质量分数最大为 40% 时,复合材料的硬度为 35.62 HV。从未经过热处理的复合材料硬度来看,未添加 CF 时,硬度为 17.16 HV,当 CF 的质量分数增加到 20% 时,硬度增加到 23.2 HV,当 CF 的质量分数最大为 40% 时,硬度增大到了 25.12 HV,硬度提升了 46.4%。这是因为在进行硬度试验时,压头压入时,CF 能够有效地承担一部分载荷,发生弹性变形,并且由于 CF 的轴向强度高,当压头卸载时,变形回复,减小材料压痕面积,因此提高了复合材料的硬度。经过热处理,减少了 CF 与 PEEK 之间的残余应力,CF 与 PEEK 的结合性增强,所以会导致硬度有所增大。

2.2 复合材料的摩擦系数分析

图 2 为在未热处理条件下不同 CF 含量的 PEEK/CF 复合材料的摩擦系数。由图 2 可看出,复合材料的摩擦系数随着 CF 的含量增高而逐渐增加。未添加 CF 时,纯 PEEK 的摩擦系数为 0.0653。当 CF 的质量分数为 20% 时,摩擦系数约为 0.1027。随着 CF 含量不断增加,复合材料的摩擦系数不断增加,CF 的质量分数在 40% 时,摩擦系数达到 0.2595,其数值已经接近纯 PEEK 的 4 倍。图 3 显示了在热条件下不同含量 CF 的 PEEK/CF 复

合材料摩擦系数。复合材料的摩擦系数也随着 CF 含量不断增加而增大,未添加 CF 时,纯 PEEK 的摩擦系数为 0.0714。当 CF 的质量分数达到 20% 时,复合材料的摩擦系数为 0.0961。随着 CF 的含量继续增加,在质量分数为 40% 时,摩擦系数为 0.2282。热处理对复合材料的摩擦系数几乎没有影响。

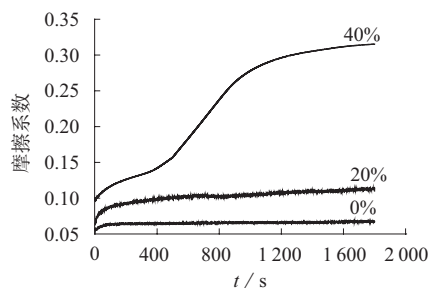


图 2 未热处理条件下不同含量 CF 的 PEEK/CF 复合材料摩擦系数

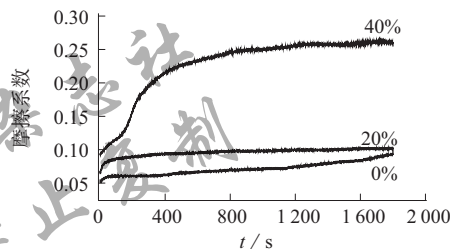


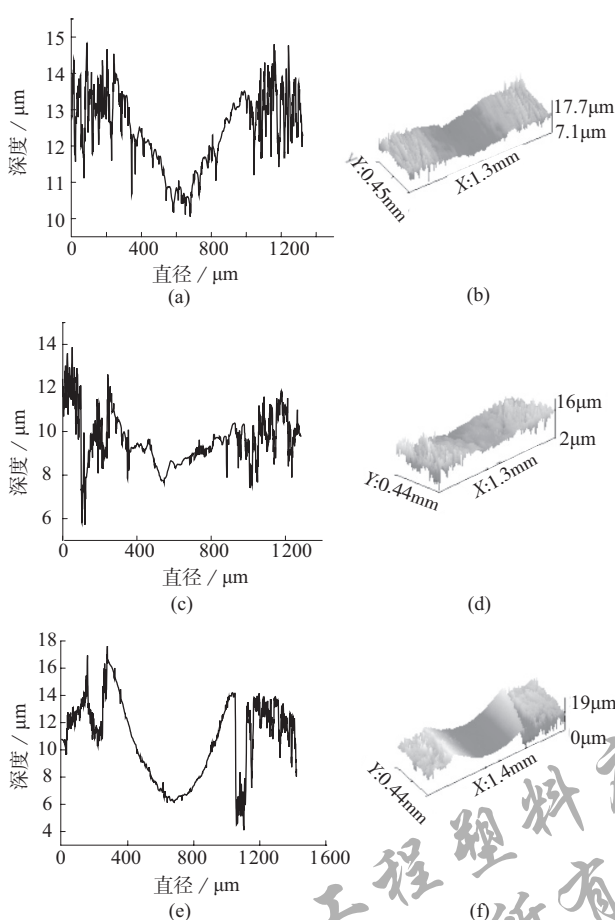
图 3 热处理条件下不同含量 CF 的 PEEK/CF 复合材料的摩擦系数

2.3 复合材料的耐磨性分析

图 4 为未处理不同含量 CF 的 PEEK/CF 复合材料试样的磨痕截面尺寸以及三维形貌的 SEM 照片。由图 4 可以看出,最大磨痕的深度随着 CF 的含量增加呈现先减小后增加的趋势,磨痕宽度变化较小,但可看出,在 CF 质量分数为 20% 时,复合材料试样的磨痕宽度有所减小。

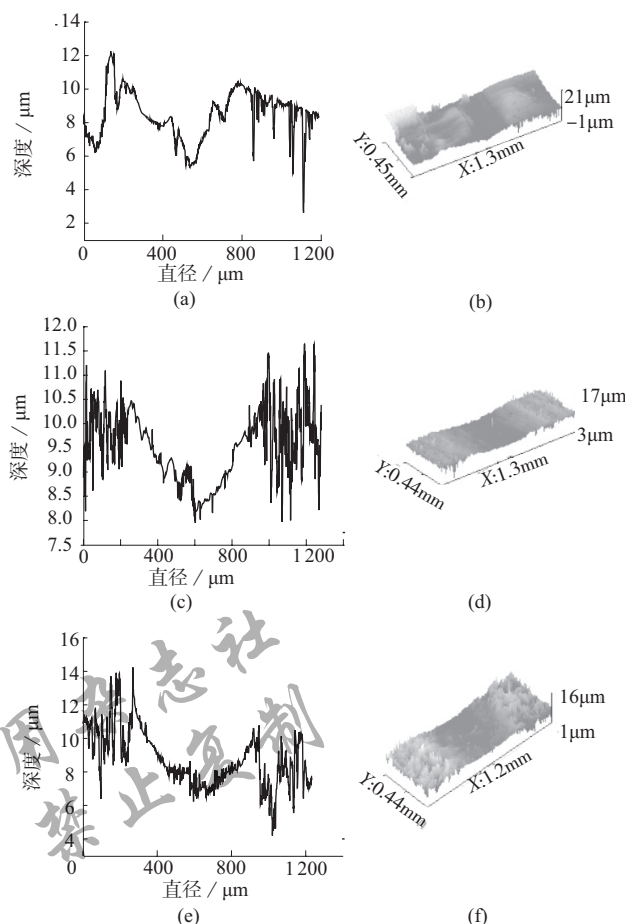
图 5 为热处理下不同含量 CF 的 PEEK/CF 复合材料试样的磨痕截面尺寸以及三维形貌的 SEM 照片。从图 5 可以看出,当 CF 的质量分数为 0% 时,最大磨痕的深度约为 4 μm ,宽度约为 0.5 mm,随着 CF 含量增加,当质量分数为 20% 时,最大磨痕深度减小,约为 1.4 μm ,但宽度有所增加。当 CF 质量分数为 40% 时,最大磨痕深度增加,宽度无明显变化。

图 6 为根据磨痕截面计算所得的磨损率,由图 6 可看出,在未热处理的条件下,磨损率先减小后增加。未添加 CF 时,PEEK 的磨损率为 $2.9 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,随着 CF 的含量增加,PEEK/CF 复合材料在 CF 质量分数为 20% 时,磨损率为最小,为 $1.8 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$; 当 CF



a—CF 质量分数 0% 磨痕截面; b—CF 质量分数 0% 三维形貌;
c—CF 质量分数 20% 磨痕截面; d—CF 质量分数 20% 三维形貌;
e—CF 质量分数 40% 磨痕截面; f—CF 质量分数 40% 三维形貌

图4 未热处理 PEEK/CF 复合材料试样磨痕截面尺寸和三维形貌的 SEM 照片



a—CF 质量分数 0% 磨痕截面; b—CF 质量分数 0% 三维形貌;
c—CF 质量分数 20% 磨痕截面; d—CF 质量分数 20% 三维形貌;
e—CF 质量分数 40% 磨痕截面; f—CF 质量分数 40% 三维形貌

图5 热处理条件 PEEK/CF 复合材料试样磨痕截面尺寸和三维形貌的 SEM 照片

质量分数为 40% 时,磨损率增大到 $6.6 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,磨损率增加较为明显,当 CF 含量较低时,增加 CF 的含量,对耐磨性有一定的提升。由图 6 可以看出,磨损率规律与未热处理的条件下类似。在未添加 CF 时,磨损率与未热处理时相差不大,为 $2.8 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$;当 CF 质量分数增加到 20% 时,磨损率减小较为明显,磨损率为 $1.2 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$;当 CF 质量分数从 20% 增加到 40% 时,此时磨损率为 $3.5 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,增加了 65.7%,但相比于未热处理条件下的同等含量,耐磨性有所提升。这是因为磨损过程中,由于施加的是循环接触应力,在摩擦的表面层受对偶小球的连续作用产生疲劳而发生部分脱落,同时在摩擦过程中产生热量,在摩擦副表面产生粘附,导致磨损量较大。随着 CF 的含量增加,PEEK/CF 复合

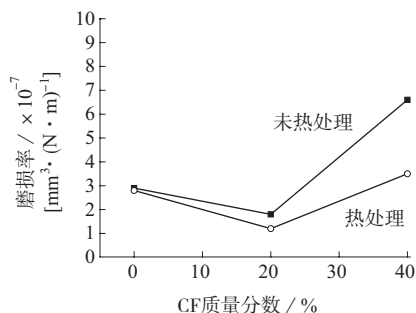
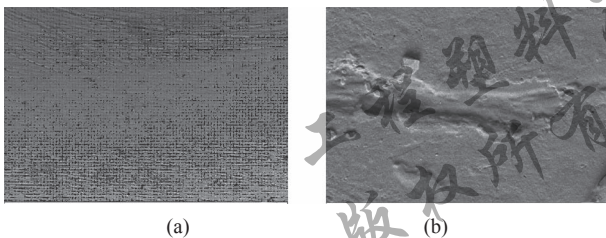


图6 不同 CF 含量的 PEEK/CF 复合材料的磨损率

材料的硬度有所增加,并且 CF 在摩擦过程中,承担部分载荷,使得复合材料抵抗外界载荷的能力增强。当 CF 质量分数为 40% 时,CF 和 PEEK 这两种材料之间存在残余应力,导致两种材料之间的结合性不好,内部存在孔隙与裂纹,耐磨性降低。在经过热处理后,释放 CF 与 PEEK 之间的残余应力,增强了 CF 与 PEEK 的结合性,耐磨性有所提升。

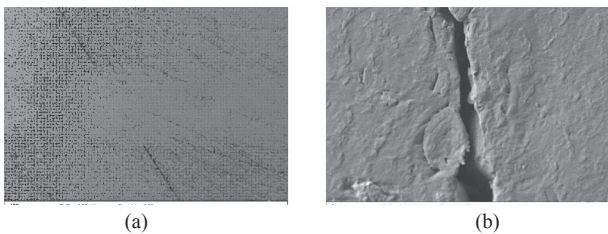
2.4 复合材料磨损表面 SEM 分析

图 7~图 9 为未热处理条件下不同 CF 含量的 PEEK/CF 复合材料的磨痕表面形貌 SEM 照片。由图 7 可以看出,在磨痕表面出现凹坑,是由于摩擦过程中,摩擦表面在磨料作用下产生的循环接触应力导致在摩擦过程中产生大量热量,使得摩擦表面材料软化,表面材料因疲劳而产生剥落以及粘着剥落现象,使得表面产生凹坑。由图 8 可见,由于填充了 CF,相比于未添加 CF 时,复合材料的硬度提高,抵抗载荷的能力变强,表现为磨痕深度变浅,磨损率降低,但此时,磨痕表面出现裂纹,这是由于 CF 与 PEEK 复合材料中存在残余应力,导致 CF 与 PEEK 界面结合性差,周围出现少量的裂纹和孔隙。由图 9 可见,CF 质量分数为 40% 时复合材料的磨痕表面出现较多的孔隙与裂纹,与 CF 质量分数为 0% 和 20% 相比,虽然此时硬度较大,但 CF 含量较大,起增强作用的 CF 暴露在表面,CF 与 PEEK 复合材料中存在较大的残余应力,界面结合性差,周围出现较多的缝隙与裂纹,在进行摩擦试验时,受到循环接



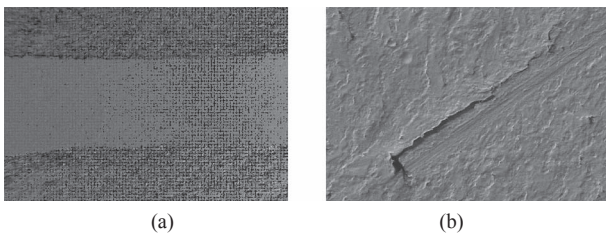
(a) (b)
a—放大 40 倍; b—放大 5 000 倍

图 7 未处理纯 PEEK 磨痕表面形貌 SEM 照片



a—放大 40 倍; b—放大 5 000 倍

图 8 未热处理 CF 质量分数为 20% 的 PEEK/CF 复合材料试样磨痕表面形貌 SEM 照片

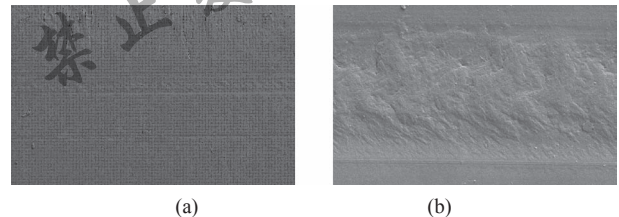


a—放大 40 倍; b—放大 5 000 倍

图 9 未热处理 CF 质量分数为 40% 的 PEEK/CF 复合材料磨痕表面形貌 SEM 照片

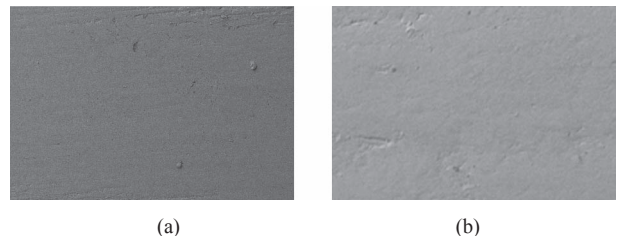
触应力,大量的材料迁移,磨损量增大。

图 10~图 12 为热处理条件下不同 CF 含量的 PEEK/CF 复合材料的磨痕表面形貌 SEM 照片。由图 10 可以看出,表面出现划痕,这是由于在滑动摩擦时,硬质颗粒划过摩擦副固体表面,造成表层材料产生磨屑,硬质磨粒切削柔软表面,表面被擦伤,产生划痕,同时也出现了裂纹,磨损形式为磨粒磨损。由图 11 可以看出,磨痕表面较为光滑,与相同含量的复合材料相比,此时最大磨痕深度变浅,磨损率低。这是因为 CF 含量增加,复合材料的硬度增大,增强了抵抗外界载荷的能力,经过热处理后,释放了部分 CF 与 PEEK 之间的残余应力,使得 CF 与 PEEK 之间的界面结合性增强,此时并未观察到明显的裂纹与孔隙。但是存在少许凹坑,这是由于在摩擦过程中,产生热量,使得材料软化,粘附在摩擦副表面,发生材料剥落。由图 12 可以观察到磨痕表面粗糙,有大量的 CF 裸露在表面,边缘堆积现象明显,由于 CF 的含量增大,CF 与 PEEK 之间的残余



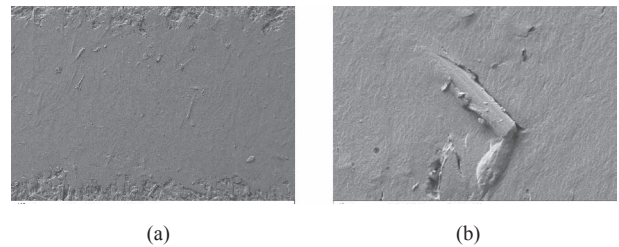
(a) (b)
a—放大 100 倍; b—放大 1 000 倍

图 10 热处理条件下纯 PEEK 试样的磨痕表面形貌 SEM 照片



a—放大 100 倍; b—放大 1 000 倍

图 11 热处理条件下 CF 质量分数为 20% 的 PEEK/CF 复合材料磨痕表面形貌 SEM 照片



a—放大 100 倍; b—放大 1 000 倍

图 12 热处理条件下 CF 质量分数为 40% 的 PEEK/CF 复合材料磨痕表面形貌 SEM 照片

应力较大,即使热处理可降低残余应力,但由于CF的含量过高,CF与PEEK结合性不好,周围出现孔隙与裂纹,导致磨痕表面出现裂纹,CF暴露出表面,裂纹的发生集中在CF附近,但相较于相同含量下未热处理的PEEK/CF复合材料,热处理PEEK/CF复合材料的耐磨性有所提升。

3 结论

(1) PEEK/CF复合材料的摩擦系数随着CF的含量的增加而不断增大。当CF的质量分数为40%时,复合材料的摩擦系数值约为纯PEEK的4倍。

(2) CF可以提高PEEK/CF复合材料的承载能力,从而降低其磨损率。当质量分数为20%时,加入CF对PEEK/CF复合材料的耐磨性提升较为明显。但在含量过高时即质量分数超过40%时,磨损率急剧增加,出现裂纹。

参考文献

- [1] Muhsin S A, Hatton P V, Johnson A, et al. Determination of polyetheretherketone (PEEK) mechanical properties as a denture material[J]. Saudi Dental Journal, 2019, 31(3):382-391.
- [2] 李振光, 于飞, 刘浏, 等. 碳纤维聚醚醚酮树脂基复合材料的制备及摩擦磨损性能研究[J]. 化工新型材料, 2018, 46(7):56-59, 63. Li Zhenguang, Yu Fei, Liu Liu, et al. Study on preparation and frictional wear performance for carbon fiber composite of polyether ketone resin[J]. New Chemical Materials, 2018, 46(7):56-59, 63.
- [3] 赵纯, 张玉龙. 聚醚醚酮[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008. Zhao Chun, Zhang Yulong. PEEK[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [4] 双玥. 聚醚醚酮市场分析[J]. 化学工业, 2013(12):35-40. Shuang Yue. Market analysis of PEEK[J]. Chemical Industry, 2013(12):35-40.
- [5] 郝章来, 吴丽君. 聚醚醚酮的生产应用及发展前景[J]. 化工新型材料, 2004, 32(4):43-44. Hao Zhanglai, Wu Lijun. Production, application and development prospect of polyether ether ketone[J]. New Chemical Materials, 2004, 32(4):43-44.
- [6] 李恩重, 郭伟玲, 王海斗, 等. 聚醚醚酮摩擦学性能改性及其应用研究进展[J]. 材料工程, 2013(1):91-96. Li Enzhong, Guo Weiling, Wang Haidou, et al. Progress of tribological modification and application of polyetheretherketone[J]. Material Engineering, 2013(1):91-96.
- [7] 张阳, 邵春光, 张瑞静, 等. 聚醚醚酮增强改性及其应用[J]. 高分子通报, 2012(9):58-64. Zhang Yang, Shao Chunguang, Zhang Ruijing, et al. Reinforced modification of PEEK and its applications[J]. Polymer Bulletin, 2012(9):58-64.
- [8] 方良超, 陈奇海, 霍绍新, 等. 聚醚醚酮(PEEK)的改性及其应用[J]. 合成材料老化与应用, 2019, 48(2):121-124. Fang Liangchao, Chen Qihai, Huo Shaoxin, et al. Modification of poly ether ether ketone and its application[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2019, 48(2):121-124.
- [9] 李恩重, 徐滨士, 王海斗, 等. PEEK与GF/PEEK摩擦学性能研究//第十一届全国摩擦学大会论文集[C]. 兰州: 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, 2013:4. Li Enzhong, Xu Binshi, Wang Haidou, et al. Study on the tribological properties of PEEK and GF/PEEK // Proceedings of the 11th National Tribological Conference[C]. Lanzhou: Chinese Academy of Sciences Laboratory, 2013:4.
- [10] 万磊, 刘丽斌, 马越, 等. 碳化硅陶瓷与聚醚醚酮复合材料的摩擦磨损特性研究[J]. 轴承, 2020(5):22-26. Wan Lei, Liu Libin, Ma Yue, et al. Study on friction and wear characteristics of SiC ceramics / PEEK composites[J]. Bearing, 2020(5):22-26.
- [11] Zhu Juanjuan, Ma Le, Dwyer-Joyce R. Friction and wear behaviours of self-lubricating PEEK composites for articulating pin joints[J]. Tribology International, 2019. doi:10.1016 / j.triboint.2019.04.025.
- [12] 胡婕. PEEK及碳纤维增强PEEK的性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2010. Hu Jie. The research in performance of PEEK and carbon fibre reinforced PEEK[D]. Shanghai: Donghua University, 2010.
- [13] Jacobs O, Jaskulka R, Yan C, et al. On the effect of counterface material and aqueous environment on the sliding wear of various PEEK compounds[J]. Tribology Letters, 2005, 18(3):359-372.
- [14] 崔晓华, 李英, 刘夏青, 等. 不同长度PEEK/CF复合材料润湿性及摩擦学性能研究[J]. 化工新型材料, 2020, 48(12):146-149. Cui Xiaohua, Li Ying, Liu Xiaqing, et al. Study on wettability and tribological properties of PEEK composite by CF with different lengths[J]. New Chemical Materials, 2020, 48(12):146-149.
- [15] 王二平, 朱姝, 谭宗尚, 等. PEEK/CF复合材料的性能研究[J]. 纤维复合材料, 2020, 37(4):35-38. Wang Erping, Zhu Shu, Tan Zongshang, et al. Research on performance of PEEK / CF composite[J]. Fiber Reinforced Composites, 2020, 37(4):35-38.