

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.08.019

PEEK 及其 PEEK/CF 复合材料的高温摩擦磨损性能

逢显娟^{1,2}, 岳世伟¹, 谢金梦¹, 黄素玲¹, 王帅¹, 宋晨飞¹, 岳赞¹, 刘建¹, 陆焕焕¹

(1. 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, 河南洛阳 471023;

2. 河南科技大学材料科学与工程学院, 河南洛阳 471023)

摘要: 聚醚醚酮(PEEK)因其独特的结构而具有优异的综合性能,但纯 PEEK 材料因耐磨性能较差限制了其更广泛的应用,可通过填充改性来提高 PEEK 的摩擦磨损性能。利用真空热压烧结技术制备了纯 PEEK 及碳纤维(CF)增强聚醚醚酮(PEEK/CF)复合材料。采用 X 射线衍射、傅里叶变换红外光谱、热重分析等表征手段对材料的结构、力学性能和热学性能进行表征,并利用多功能摩擦磨损试验机、三维轮廓仪、扫描电子显微镜等对材料的高温摩擦磨损性能进行表征和分析。结果表明,CF 的加入并没有改变 PEEK 的结构。与纯 PEEK 材料相比,PEEK/CF 复合材料的硬度稍有增加,拉伸性能有所降低。PEEK 材料的磨损率先降低后增加,然而 PEEK/CF 复合材料的磨损率先增加后降低。在相对较低环境温度条件下,PEEK 及 PEEK/CF 复合材料的磨损机理为磨粒磨损和黏着磨损;在 200 °C 高温条件下,纯 PEEK 材料表现为黏着磨损和疲劳磨损,而 PEEK/CF 复合材料为轻微的黏着磨损。

关键词: 聚醚醚酮;复合材料;结构;摩擦;磨损

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)08-0119-08

High Temperature Friction and Wear Properties of PEEK and its PEEK/CF Composite

Pang Xianjuan^{1,2}, Yue Shiwei¹, Xie Jinmeng¹, Huang Suling¹, Wang Shuai¹, Song Chenfei¹, Yue Yun¹, Liu Jian¹, Lu Huanhuan¹

(1. National United Engineering Laboratory for Advanced Bearing Tribology, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract : Polyether ether ketone (PEEK) has excellent comprehensive properties due to its unique structure. However, pure PEEK material is limited in its wider applications due to poor wear resistance. Filling modification can be used to improve the friction and wear performances of PEEK. Using vacuum hot pressing sintering technology, pure PEEK and carbon fiber (CF) reinforced polyether ether ketone (PEEK/CF) composite materials were prepared. The structure, mechanical properties and thermal properties of the materials were characterized by means of X-ray diffraction, infrared, thermogravimetry, etc. The high temperature friction and wear properties of prepared materials were characterized and analyzed by means of multi-functional friction and wear tester, three-dimensional profiler, scanning electron microscope, etc. The results show that the addition of CF does not change the structure of PEEK. Compared with pure PEEK material, the hardness of PEEK/CF composite material slightly increases, while the tensile properties decrease. The wear of PEEK material first decreases and then increases, that wear of PEEK/CF composite material first increases and then decreases. Under relatively low environmental temperature conditions, the wear mechanism of PEEK and PEEK/CF composites are abrasive wear and adhesive wear. Under high temperature conditions of 200 °C, pure PEEK material exhibits adhesive wear and fatigue wear, while PEEK/CF composites exhibit slight adhesive wear.

Keywords : polyether ether ketone ; polymer composites ; structure ; friction ; wear

聚醚醚酮(PEEK)是一种半结晶性的全芳香族 一个醚键的重复单元,独特的结构使得 PEEK 具有优异的综合性能^[1-3],被广泛应用于医疗器械、航空航

基金项目: 国家自然科学基金项目(92266205, 52105181), 河南省自然科学基金项目(222300420436), 河南省高校国家级大学生创新创业训练计划项目(202210464028)

通信作者: 逢显娟, 副教授, 博士, 主要研究方向为聚合物摩擦磨损、表面工程

收稿日期: 2023-05-07

引用格式: 逢显娟, 岳世伟, 谢金梦, 等. PEEK 及其 PEEK/CF 复合材料的高温摩擦磨损性能[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(8): 119-126.

Pang Xianjuan, Yue Shiwei, Xie Jinmeng, et al. High Temperature friction and wear properties of PEEK and its PEEK/CF composite[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(8): 119-126.

天等诸多技术领域^[4-6],甚至在一些特殊领域可以代替金属和陶瓷等传统材料来使用^[7-11]。随着制造业的迅猛发展,单一聚合物材料的耐磨性、承载力等不足以满足不同的使用需求,因此需要进一步提升其综合性能,而最有效的方法就是将聚合物材料进行复合化改性^[12-15]。目前,聚合物复合改性的主要手段包括填充改性^[16-19]、高聚物共混改性^[20]及表面改性^[21-24]等。

目前PEEK/碳纤维(CF)复合材料摩擦学性能的研究较少,尤其高温环境下的摩擦磨损性能的研究鲜有报道。笔者前期已系统研究了快速热压烧结法制备PEEK及其PEEK/CF复合材料的最佳制备工艺,以及不同碳纤维含量、载荷和速度等对PEEK材料在常温下摩擦学性能的影响^[25-28]。笔者利用前期研究的快速热压烧结法制备了PEEK和PEEK/CF复合材料,系统研究了不同环境温度对PEEK及其复合材料摩擦磨损性能、磨损机理的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PEEK:450G,11 μm(1200目),东莞市川澳工程塑胶原料有限公司;

CF粉末:约16 μm(900目),单丝直径为7 μm,平均长径比为7:1,碳烯技术(深圳)有限公司;

无水乙醇:分析纯,天津市永大化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器及设备

行星式球磨机:QM-3SP04型,南京莱步科技实业有限公司;

真空快速热压烧结炉:FHP-828型,上海哈腾电炉设备有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:IRTracer-100型,日本岛津公司;

数显邵氏硬度计:LXD-D型,上海思为仪器制造有限公司;

X射线衍射(XRD)仪:D8-advanced型,德国布鲁克公司;

电子万能试验机:CMT6103型,美国MTS公司;

同步热分析仪:STA449 F5型,德国NETZSCH公司;

导热系数测试仪:DR-III型,湘仪仪器有限公司;

多功能摩擦磨损试验机:UMT-2型,德国布鲁克公司;

三维形貌轮廓仪:nanofocus型,德国Nanofocus AG公司;

扫描电子显微镜(SEM):Flex SEM 1000型,日本电子株式会社。

1.3 材料制备

前期研究结果表明,当CF质量分数为20%时,PEEK/CF复合材料具有最佳的力学性能、热学性能和常温下的摩擦磨损性能^[25]。因此,采用与前期研究相同的方法制备了PEEK及PEEK/CF复合材料^[26,28]。

1.4 测试与表征

(1)结构表征。

所制备的PEEK及其复合材料分子组成和分子结构及特征峰衍射采用FTIR仪和XRD仪进行表征,测试参数与前期研究^[26-27]相同。

(2)力学性能表征。

采用数显邵氏硬度计对制备的PEEK及PEEK/CF复合材料试样进行邵氏硬度测试。让试样放置在坚固的平面上,手握硬度计,在距离试样边缘12 mm左右的位置均匀稳定地将测量针压入试样中,当示数稳定时读取硬度值。在不同的位置测试5次,计算平均值。

采用电子万能试验机分别对所制备的PEEK及PEEK/CF复合材料进行拉伸试验,拉伸样品按照国标GB/T 528-2009制备,拉伸速率为2 mm/min。

(3)热学性能表征。

采用同步热分析仪对PEEK及PEEK/CF复合材料的分解温度及热稳定性进行测试。氮气环境下,吹气流量为50 mL/min,起始温度为40 °C,终止温度为800 °C,升温速率为10 °C/min。使用导热系数测试仪对材料的导热系数及热阻进行检测。

(4)摩擦试验。

PEEK及PEEK/CF复合材料在不同环境温度下的摩擦磨损试验于多功能摩擦磨损试验机的高温模块上进行。选择50,100,150 °C和200 °C 4个不同环境温度,试验材料为所制备的纯PEEK材料和PEEK/CF复合材料,摩擦配副为GCr15轴承钢球,施加载荷为30 N,旋转速度为300 r/min,旋转半径为4 mm,摩擦时间为30 min。

(5)磨损表面形貌分析。

摩擦试验结束后磨痕深度和宽度通过三维形貌轮廓仪进行测量,并计算PEEK和PEEK/CF复合材料的体积磨损率。利用SEM表征磨损表面形貌。

2 结果与讨论

2.1 XRD与FTIR分析

图1为所制备的PEEK和PEEK/CF复合材料的XRD图谱。从图1可以看出,PEEK及PEEK/CF都出现4个比较强的衍射峰,并且衍射峰位置也相同。PEEK的4个特征峰的衍射角 2θ 值分别为 18.71° , 20.76° , 22.81° 和 28.83° ,相对应的晶面分别为(110), (111), (200)和(211),衍射峰与文献[29]衍射峰的位置和形状基本一致。另外,在复合材料中可见碳纤维的特征峰。由此可见,加工成型工艺没有改变PEEK的结晶状态;另一方面,即使加工成型温度升高到 350°C ,PEEK也没有发生分解和裂解反应,并且CF也没有发生氧化反应。

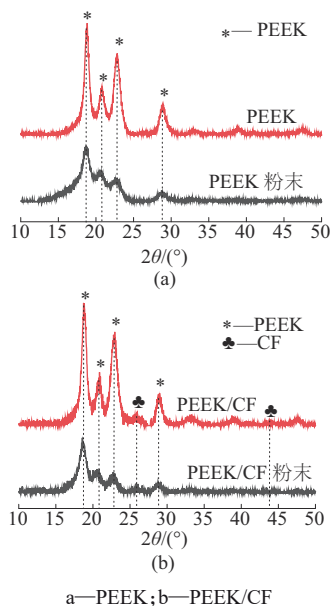


图1 PEEK和PEEK/CF的XRD图谱

图2为PEEK和PEEK/CF复合材料的FTIR图谱。从图2可以看出,所制得2种材料的特征峰形状和位置大致相同,说明PEEK结构中的官能团在材料制备过程中并没有发生改变。因为CF不存在官能团键的振动,所以PEEK/CF复合材料的FTIR图谱中主要呈现出PEEK结构中的官能团振动。其中,位于 764 cm^{-1} 和 840 cm^{-1} 的峰归属于苯环的C—H平面弯曲振动吸收谱带,且 840 cm^{-1} 为芳环对位取代的特征峰, 929 cm^{-1} 属于R—CO—R的对称伸缩振动谱带, $1\,163\text{ cm}^{-1}$ 属于芳醚或者芳酮结构中苯环的C—H平面内弯曲振动吸收谱带, $1\,226\text{ cm}^{-1}$ 是

R—O—R的不对称伸缩振动谱带, $1\,308\text{ cm}^{-1}$ 是R—CO—R苯环平面内振动谱带, $1\,597\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,501\text{ cm}^{-1}$ 是R—O—R苯环平面内振动谱带, $1\,652\text{ cm}^{-1}$ 是C=O伸缩振动谱带^[26]。

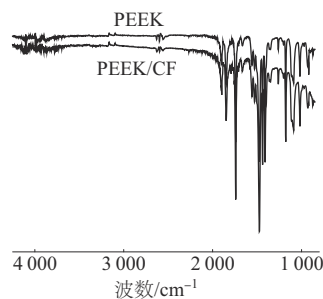


图2 PEEK和PEEK/CF的FTIR图

2.2 力学性能分析

所制备的PEEK和PEEK/CF复合材料的硬度分别为85 HD和87 HD。前期研究发现^[25-26],CF质量分数为20%时,PEEK/CF复合材料的硬度最大,达到87 HD,此时,熔融的PEEK基体材料与CF形成较为致密的共混体,CF具有较高的硬度,因此PEEK/CF复合材料的硬度高于纯PEEK材料。

图3为所制备的PEEK材料和PEEK/CF复合材料的应力-应变曲线图。从图3可以看出,由于CF的加入,PEEK/CF复合材料的拉伸强度由 65.15 MPa 降低到 44.78 MPa ,产生这一结果的原因有两方面:一方面CF作为增强相添加到PEEK基体材料中,破坏了PEEK基体材料的连续性,使得PEEK/CF复合材料中连续的PEEK减少,因此在受到外界拉力时,PEEK/CF复合材料的拉伸强度会降低;另一方面CF在PEEK基体材料中分散方向的无序性,在施加拉力过程中,CF受到的轴向拉应力和径向拉应力分配并不确定,故PEEK/CF复合材料的拉伸强度较PEEK材料有所降低。

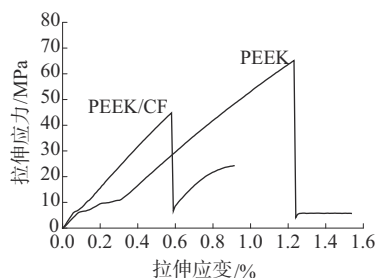


图3 PEEK和PEEK/CF的应力-应变曲线

2.3 热学性能分析

测量了所制备的PEEK和PEEK/CF复合材料的导热系数和热阻值。PEEK和PEEK/CF复合材料

的导热系数分别为 $0.4456 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $0.6301 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 相应的热阻分别为 $0.01384 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ 和 $0.01085 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ 。与纯 PEEK 材料相比, PEEK/CF 复合材料的导热系数提高了 1.5 倍。由于 PEEK 属于典型的高分材料, 具有绝缘隔热的特性, 所以纯 PEEK 材料导热性能较差, 而 CF 具有良好的导热性能, 因此把 CF 添加到 PEEK 中有利于改善 PEEK 材料的导热性能。

PEEK 和 PEEK/CF 复合材料的热重(TG)图谱和差示扫描量热(DSC)图谱见图 4。由图 4a 所示, PEEK/CF 复合材料的分解温度比纯 PEEK 的略有下降, 但失重率明显降低, 与纯 PEEK 材料相比, PEEK/CF 的失重率下降了 27% 左右。从图 4b 可以看出, PEEK/CF 复合材料的熔点和分解温度有所降低, 这是由于 CF 的存在, 使得 PEEK/CF 的热量散失加快, 进一步降低了 PEEK/CF 复合材料的熔点和分解温度。

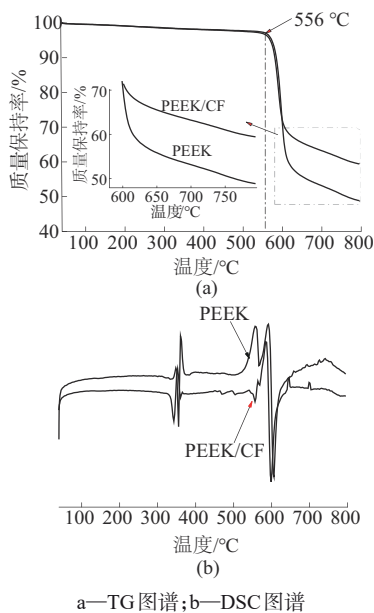
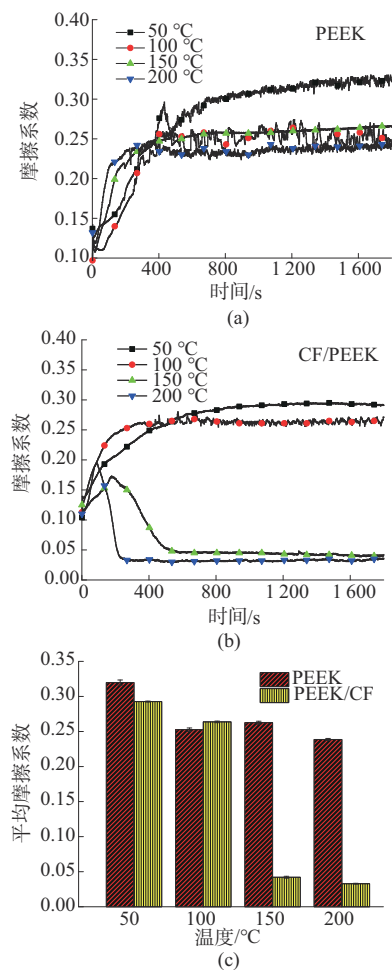


图4 PEEK和PEEK/CF的TG和DSC图谱

2.4 摩擦磨损性能及磨损机理分析

(1) 摩擦系数。

图 5 给出了 4 个环境温度条件下 PEEK 和 PEEK/CF 复合材料的摩擦系数。图 5a 和图 5b 分别为 PEEK 和 PEEK/CF 在不同环境温度下的瞬时摩擦系数曲线, 图 5c 是两种摩擦副在不同环境温度下稳定阶段的平均摩擦系数对比图。由图 5a 可以看出, 随试验进行, 纯 PEEK 在不同环境温度下的瞬时摩擦系数分为两个阶段: 磨合阶段和稳定阶段。磨合阶段的时间长短和稳定阶段的波动性与环境温



a—PEEK 瞬时摩擦系数曲线; b—PEEK/CF 瞬时摩擦系数曲线;
c—平均摩擦系数

图5 不同环境温度下 PEEK 和 PEEK/CF 的摩擦系数

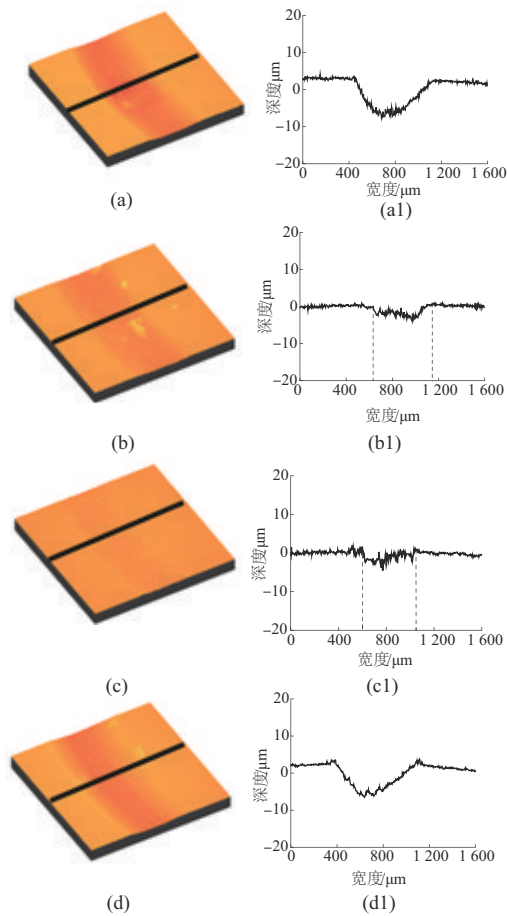
度有密切联系, 随着环境温度的升高, 磨合阶段时间变短, 当环境温度为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 达到稳定阶段的瞬时摩擦系数曲线平稳, 基本没有波动。由于摩擦温度达到 PEEK 的玻璃化转变温度 $143\text{ }^{\circ}\text{C}$, 与环境温度 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相近, 材料与环境温度之间的热传导比较小, 因此达到稳定阶段的瞬时摩擦系数曲线比较平稳。

由图 5b 可以看出, PEEK/CF 复合材料的瞬时摩擦系数曲线表现出与纯 PEEK 不同的规律。当环境温度为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 其保留了与纯 PEEK 相同的规律; 当环境温度为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, PEEK/CF 复合材料的瞬时摩擦系数总体分为磨合阶段和稳定阶段, 但是在磨合阶段增加一段转移膜逐渐形成均匀致密的过程, 使得摩擦系数曲线急剧下降至 0.03 左右。出现这一现象的原因是 CF 在高接触应力和高温摩擦过程中发生了石墨化, 在对偶球表面形成具有润滑性的均匀致密的转移膜, 避免对偶球

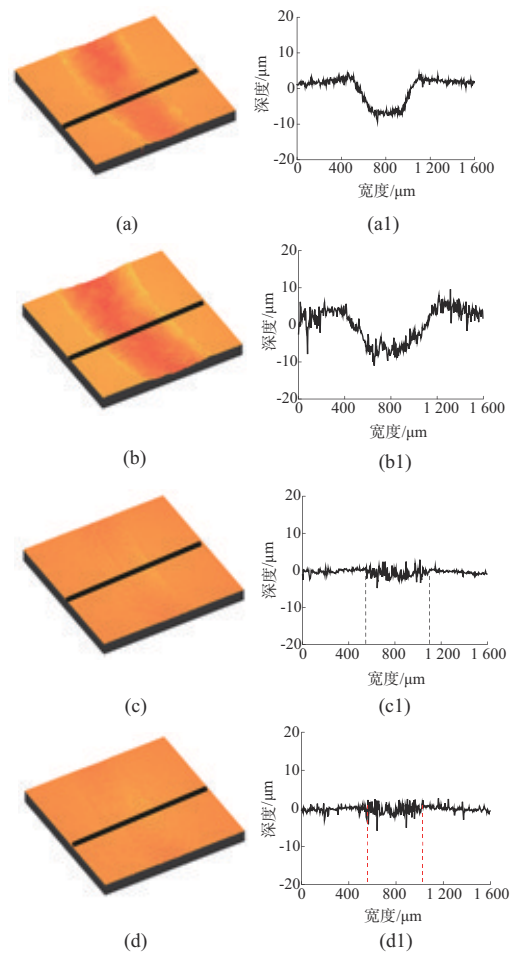
与PEEK/CF复合材料之间直接对磨。由图5c可见,随着环境温度的升高,2种材料的平均摩擦系数总体上表现出逐渐下降的趋势。这是由于聚合物的导热性较差,随着环境温度的升高,加之摩擦热不能快速扩散,摩擦表面升温较快,导致聚合物表面可能会被塑化,同时伴随着聚合物表面剪切强度的降低,导致较低的摩擦系数。

(2)磨损率。

图6和图7分别为不同环境温度下PEEK和PEEK/CF复合材料磨损表面三维形貌图和截面轮廓曲线。由图6可以看出,随着环境温度的升高,纯PEEK磨损表面先变得平整光滑,然后变得粗糙,在环境温度增加到150℃时,PEEK磨损表面达到最光滑状态;由图7可见,环境温度对PEEK/CF磨损表面影响与纯PEEK恰恰相反,当环境温度为100℃时,摩擦表面变得粗糙,在环境温度达到150℃和200℃时,摩擦表面异常平整光滑。从纯PEEK和PEEK/CF复合材料截面轮廓曲线图可以看



a, b, c, d—50, 100, 150, 200℃下PEEK的三维形貌图;
a1, b1, c1, d1—50, 100, 150, 200℃下PEEK的截面轮廓曲线
图6 不同环境温度下PEEK三维形貌图和截面轮廓曲线



a, b, c, d—50, 100, 150, 200℃下PEEK/CF的三维形貌图;
a1, b1, c1, d1—50, 100, 150, 200℃下PEEK/CF的截面轮廓曲线
图7 不同环境温度下PEEK/CF三维形貌图和截面轮廓曲线

出,随着温度升高,纯PEEK磨损痕深度先变浅后急剧加深,划痕宽度先逐渐变窄后加宽;与纯PEEK相比,PEEK/CF摩擦划痕深度先逐渐加深后大幅度变浅,划痕宽度先加宽后变窄。

在4个不同环境温度摩擦条件下,纯PEEK和PEEK/CF复合材料的磨损率如图8所示。由图8可知,随着温度的升高,纯PEEK材料的磨损率先降低后增加,当温度升高至150℃时,磨损率达到最低。由于外界环境温度升高,纯PEEK表面硬度下降,在对偶球上面逐渐形成转移膜,受到的剪切力变小,相应磨损率降低,当外界环境温度达到200℃时,分子链间作用力更容易遭到破坏,磨损率增加。与纯PEEK材料的磨损率相比,PEEK/CF复合材料的磨损率出现了不同的规律,随着环境温度的升高,PEEK/CF的磨损率先略微升高,然后大幅度降低,当环境温度为100℃时,其磨损率最高。在环境温度为100℃时,CF在形成的不连续转移膜中对摩擦

表面进行犁削,使磨损率增加,当环境温度达到150 °C和200 °C时,CF在高接触应力、高温中发生石墨化^[30],在对偶球上面形成不连续的转移膜,磨损率大幅度降低。对比纯PEEK和PEEK/CF复合材料的磨损率,纯PEEK在200 °C环境中磨损性能变差,然而经过CF改性后的PEEK在高温环境中仍具有良好的耐磨损性能。

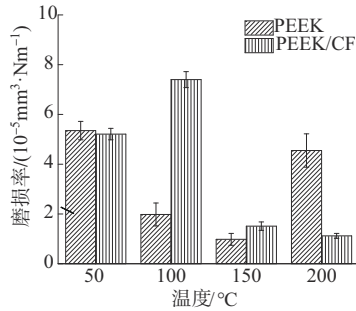
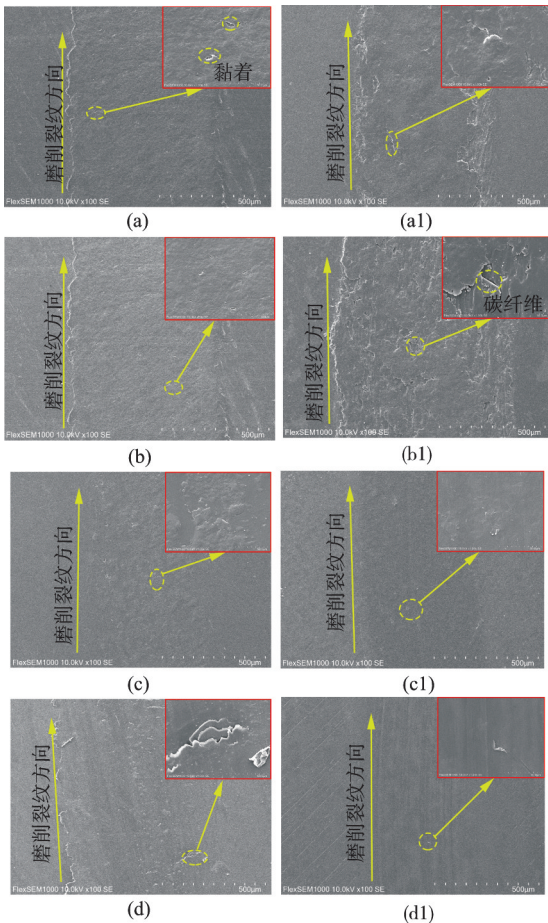


图8 不同环境温度下PEEK和PEEK/CF的磨损率

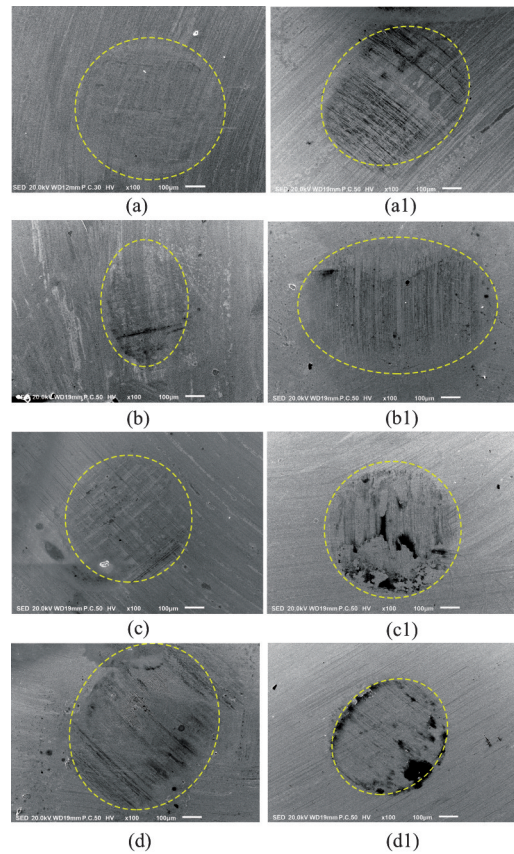
(3)磨损机制分析。

图9分别是纯PEEK和PEEK/CF复合材料在4



a, b, c, d—50, 100, 150, 200 °C下PEEK的磨损表面形貌;
a1, b1, c1, d1—50, 100, 150, 200 °C下PEEK/CF的磨损表面形貌
图9 不同环境温度下PEEK和PEEK/CF的磨损表面形貌

个不同环境温度下磨痕形貌图。图中右上角方框是磨痕局部位置放大图,单箭头为磨痕方向。图10为纯PEEK和PEEK/CF复合材料在不同环境温度下对磨球表面形貌。由图9a至图9d可以看出,4种环境温度条件下,纯PEEK表面都出现了不同程度的塑性变形。环境温度为50 °C和100 °C时,摩擦表面有部分剥落坑和微犁沟,说明此环境温度下的磨损主要是磨粒磨损和黏着磨损。环境温度为150 °C时,摩擦表面出现黏着碾压痕迹,在对偶球表面形成一层较薄的转移膜(图10c),微犁沟逐渐消失,因此该环境温度下的磨损机理以黏着磨损为主,此时的摩擦系数曲线光滑平稳和磨损率最小。当环境温度升高到200 °C时,摩擦表面出现微裂纹和剥落坑,表现为疲劳磨损和黏着磨损,与摩擦系数曲线波动和磨损率升高相对应。从图9a1至图9d1可以看出,环境温度为50 °C时,PEEK/CF摩擦表面出现塑性变形、黏着碾压痕迹和微犁沟,在对偶球表面(图10a1)形成断续的转移膜,说明该环境温度下的磨损机理是黏着磨损和磨粒磨损。环境温度



a, b, c, d—50, 100, 150, 200 °C下PEEK的对偶球表面形貌;
a1, b1, c1, d1—50, 100, 150, 200 °C下PEEK/CF的对偶球表面形貌
图10 不同环境温度下PEEK和PEEK/CF的对偶球表面形貌

为100℃时,摩擦表面犁沟加重,并且产生黏着剥落坑,因此该环境温度下的磨损率较大,磨损机理为磨粒磨损和黏着磨损。当环境温度升高到150℃和200℃时,摩擦表面变得平整光滑,只能看到轻微的黏着痕迹,从图10c1和图10d1对偶球表面可以看到均匀连续的转移膜,并且在转移膜上出现断断续续CF石墨化的黑色物质,所以该环境温度下的摩擦系数曲线急剧下降,磨损率大幅度降低,磨损机理表现为轻微的黏着磨损。

3 结论

利用真空热压烧结法制备了纯PEEK和添加CF质量分数为20%的PEEK/CF复合材料,对比研究了2种材料的结构、力学性能及热学性能,并系统研究了2种材料的高温摩擦磨损性能。通过分析摩擦系数、磨损率及磨损形貌变化规律,并结合摩擦学原理,得出PEEK及其PEEK/CF复合材料的磨损机理。具体结论如下:

(1)随着温度的升高,PEEK和PEEK/CF复合材料达到稳定阶段的平均摩擦系数逐渐降低,并且当温度为150℃和200℃时,PEEK/CF复合材料摩擦系数最低,为0.03左右;PEEK材料的磨损率先降低后增加,而PEEK/CF复合材料的磨损率先增加后降低。

(2)在相对较低环境温度条件下,PEEK及PEEK/CF复合材料的磨损机理为磨粒磨损和黏着磨损;在200℃高温条件下,PEEK表现为黏着磨损和疲劳磨损,而PEEK/CF为轻微的黏着磨损。

参考文献

- [1] Yan Ying, Mao Yu, Li Bo, et al. Machinability of the thermoplastic polymers: PEEK, PI, and PMMA[J]. *Polymers*, 2020, 13(1). DOI: 10.3390/polym13010069.
- [2] Zhang Lan, Lin Zhaohua, Zhou Qiang, et al. PEEK modified PLA shape memory blends: Towards enhanced mechanical and deformation properties[J]. *Frontiers of Materials Science*, 2020, 14(2): 177–187.
- [3] Hron R, Kadlec M, Růžek R. Effect of the test procedure and thermoplastic composite resin type on the curved beam strength[J]. *Materials*, 2021, 14(2). DOI:10.3390/ma14020352.
- [4] 张婷. 高性能热塑性复合材料在大型客机结构件上的应用[J]. *航空制造技术*, 2013, 56(15):32–35.
Zhang Ting. Applications of high performance thermoplastic composites for commercial airplane structural component[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013, 56(15):32–35.
- [5] 张欣悦, 张德坤, 陈凯, 等. 聚醚醚酮与髌骨软骨间的生物摩擦学特性[J]. *材料工程*, 2019, 47(2):129–137.
Zhang Xinyue, Zhang Dekun, Chen Kai, et al. Biological tribological properties between polyether ether ketone and patella cartilage [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(2):129–137.
- [6] Ahmed S, Bhowmik S. Interpenetrating polymer network adhesive bonding of PEEK to titanium for aerospace application[J]. *Journal of Polymer Engineering*, 2018, 39(1):1–9.
- [7] Abdul S M. Recent advances in UHMWPE/UHMWPE nanocomposite/UHMWPE hybrid nanocomposite polymer coatings for tribological applications: a comprehensive review[J]. *Polymers*, 2021, 13(4). DOI:10.3390/polym13040608.
- [8] 李桂花, 冶银平, 马彦军, 等. 聚酰胺酰亚胺/聚四氟乙烯复合涂层的制备及其摩擦学性能和耐腐蚀性能[J]. *摩擦学学报*, 2021, 41(4):455–466.
Li Guihua, Ye Yinping, Ma Yanjun, et al. Preparation of polyamide-imide/polytetrafluoro-ethylenecomposite coatings and its tribological and anti-corrosion properties[J]. *Tribology*, 2021, 41(4): 455–466.
- [9] 何国荣, 袁军亚, 李勇, 等. 二硫化钼/硫化锌纳米粉体的制备及其改性聚酰胺亚胺复合材料的摩擦学性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2022, 42(2):265–274.
He Guorong, Yuan Junya, Li Yong, et al. Preparation of MoS₂/ZnS nano-powder and tribological behavior of MoS₂/ZnS nano-powder reinforced polyimide composites[J]. *Tribology*, 2022, 42(2): 265–274.
- [10] Kumar D, Rajmohan T. Effect of MWCNT particles on wear loss in dry sliding wear of PEEK matrix composites[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 16:800–807.
- [11] 关集俱, 刘德利, 王勇, 等. MWCNTs 复合纳米流体的摩擦学性能[J]. *摩擦学学报*, 2020, 40(3):289–298.
Guan Jiju, Liu Deli, Wang Yong, et al. Tribological properties of nanofluid prepared by composite of multi-walled carbon nanotube and oleic acid[J]. *Tribology*, 2020, 40(3):289–298.
- [12] 杨学萍. CPEEK/CF 复合材料制备及应用研究进展[J]. *合成纤维*, 2021, 20(5):41–51.
Yang Xueping. Research progress in preparation and application of CPEEK/CF composites[J]. *Synthetic Fiber in China*, 2021, 20(5):41–51.
- [13] 于婉琦, 杨诗卉, 张静洁. 表面改性的碳纤维增强聚醚醚酮种植体的制备及其性能研究[J]. *现代口腔医学杂志*, 2020, 34(4): 219–223.
Yu Wanqi, Yang Shihui, Zhang Jingjie, et al. The study of biological properties of surface modified carbon fiber reinforced polyetheretherketone implant materials[J]. *Journal of Modern Stomatology*, 2020, 34(4):219–223.
- [14] Tsuka H, Morita K, Kato K, et al. Effect of laser groove treatment on shear bond strength of resin-based luting agent to polyetheretherketone (PEEK)[J]. *Journal of Prosthodontic Research*, 2019, 63(1):52–57.
- [15] 唐磊, 何杰. 改性聚醚醚酮复合材料在齿轮上的应用[J]. *工程塑*

- 料应用,2002,30(5):24-26.
- Tang Lei, He Jie. Applications of modified PEEK composites in the gear wheel[J]. *Engineering Plastics Application*, 2002, 30(5): 24-26.
- [16] 李恩重,徐滨士,王海斗,等. 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[J]. *材料工程*, 2014, 42(3):77-82, 89.
- Li Enzhong, Xu Binshi, Wang Haidou, et al. Tribological property of polyetheretherketone composites reinforced with glass fiber under water lubrication[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2014, 42(3):77-82, 89.
- [17] 邱孝涛,高阳,王秀丽,等. 碳纤维的长度与取向对聚醚醚酮基复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. *摩擦学学报*, 2020, 40(2): 240-251.
- Qiu Xiaotao, Gao Yang, Wang Xiuli, et al. Effects of carbon fiber length and orientation on the tribological properties of polyetheretherketone based composites[J]. *Tribology*, 2020, 40(2): 240-251.
- [18] Liu Houbao, Su Xinqing, Tao Jie, et al. Effect of SiO₂ nanoparticles-decorated SCF on mechanical and tribological properties of cenosphere/SPEEK/CF composites[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, 137(22). DOI:10.1002/app.48749.
- [19] Düzçükoğlu H, Ekinci Ş, Şahin Ö S, et al. Enhancement of wear and friction characteristics of epoxy resin by multiwalled carbon nanotube and boron nitride nanoparticles[J]. *Tribology Transactions*, 2015, 58(4):635-642.
- [20] Chen Jianbing, Guo Qiang, Zhao Zhengping, et al. Thermal, crystalline, and tribological properties of PEEK/PEI/PES plastics alloys[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 127(3): 2 220-2 226.
- [21] Liu Liu, Xiao Linghan, Zhang Xiuping, et al. Improvement of the thermal conductivity and friction performance of poly(ether ether ketone)/carbon fiber laminates by addition of graphene[J]. *RSC Advances*, 2015, 5(71):57 853-57 859.
- [22] Gravis D, Poncin-Epaillard F, Coulon J F. Correlation between the surface chemistry, the surface free energy and the adhesion of metallic coatings onto plasma-treated Poly(ether ether ketone)[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 501. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.144242.
- [23] Dupuis A, Ho T H, Fahs A, et al. Improving adhesion of powder coating on PEEK composite: influence of atmospheric plasma parameters[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 357:1 196-1 204.
- [24] Hammouti S, Pascale-Hamri A, Faure N, et al. Wear rate control of peek surfaces modified by femtosecond laser[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 357:1 541-1 551.
- [25] 岳世伟. PEEK/CF 复合材料摩擦磨损性能及其抗静电性能研究[D]. 洛阳:河南科技大学,2022.
- Yue Shiwei. Study on friction and wear properties and antistatic properties of PEEK/CF composites[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2022.
- [26] 逢显娟,岳世伟,黄素玲,等. 碳纤维/聚醚醚酮(PEEK/CF)复合材料摩擦磨损性能及抗摩擦静电特性研究[J]. *中国机械工程*, 2023, 34(3):277-286.
- Pang Xianjuan, Yue Shiwei, Huang Suling, et al. Tribological properties and anti-friction electrostatic properties of PEEK/CF composites[J]. *China Mechanical Engineering*. 2023, 34(3): 277-286.
- [27] 岳世伟,逢显娟,牛一旭,等. 载荷和速度对聚醚醚酮(PEEK)复合材料摩擦性能的影响[J]. *材料导报*, 2022, 36(16). DOI: 10.11896/cldb.21040271.
- Yue Shiwei, Pang Xianjuan, Niu Yixu, et al. Effects of load and velocity on the friction properties of Polyether-ether-ketone composites[J]. *Materials reports*. 2022, 36(16). DOI: 10.11896/cldb.21040271.
- [28] 逢显娟,岳世伟,黄素玲,等. 不同摩擦条件对PEEK、PEEK/CF复合材料摩擦学性能及其抗静电性能的影响[J]. *化工新型材料*, 2022, 50(11):109-115.
- Pang Xianjuan, Yue Shiwei, Huang Suling, et al. The effects of different friction conditions on the tribological and antistatic properties of PEEK and PEEK/CF composites[J]. *New Chemical Materials*. 2022, 50(11):109-115.
- [29] 徐利敏,赵剑锋,雷玉平,等. 特种工程塑料PEEK的合成与表征[C]//2006年年会暨循环经济专家论坛. 武汉:湖北省化学化工学会,2006:321-325.
- Xu Limin, Zhao Jianfeng, Lei Yuping, et al. Synthesis and characterization of special engineering plastics[C]//2006 Annual Meeting and Circular Economy Expert Forum. Wuhan: Hubei Provincial Chemical and Chemical Society, 2006:321-325.
- [30] 董凤霞,侯国梁,刘亮,等. 稀土改性对碳纤维增强聚酰亚胺复合材料在不同温度下摩擦学性能的影响[J]. *摩擦学学报*, 2017, 37(2):148-154.
- Dong Fengxia, Hou Guoliang, Liu Liang, et al. Effect of surface treatment on carbon fibre by rare earth on the tribological properties of carbon fiber reinforced polyimide composite at elevated temperatures[J]. *Tribology*, 2017, 37(2):148-154.