

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2015.06.018

生理盐水润滑下 PEEK/WK 复合材料的摩擦学性能*

李 凝¹, 黄健萌², 陈卫增¹

(1. 浙江师范大学 行知学院, 浙江 金华 321004; 2. 福州大学 机械工程学院, 福州 350116)

摘 要: 为研究生理盐水润滑条件下碳酸钙晶须含量、载荷大小、滑动速度因素对 PEEK/CaCO₃ 复合材料摩擦学性能的影响规律,并考察复合材料的摩擦学稳定性,在自制改性偶联剂处理晶须表面的基础上制备了 PEEK/CaCO₃ 复合材料,利用 MM-W1A 立式万能摩擦磨损试验机对复合材料的摩擦学性能进行测试,用扫描电子显微镜(SEM)对磨损表面形貌进行扫描分析表征。结果表明,晶须含量对复合材料摩擦学性能影响明显,在 0.9% 的生理盐水润滑条件下 PEEK/CaCO₃ 复合材料随着晶须含量的增加,摩擦因数及比磨损率均呈现先减小后增大现象;当晶须质量分数为 15% 左右时,复合材料的摩擦因数达到最低值,同时比磨损量相对最低,复合材料与摩擦副的磨合过程相对平稳,具有较好的摩擦学性能,表现为粘着-腐蚀磨损特征。外加载荷、滑动速度增大,材料的摩擦因数增大,比磨损率增加。

关键词: 碳酸钙晶须; PEEK 复合材料; 摩擦学性能; 生理盐水; 润滑

中图分类号: TB333.23; TG115.58

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2015)06-0133-08

Tribological Properties of PEEK/WK Composites Under Physiological Saline Lubrication

LI Ning¹, HUANG Jian-meng², CHEN Wei-zeng¹

(1. Xingzhi College, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, Zhejiang; 2. College of Mechanical Engineering & Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116)

Abstract: The content of CaCO₃ whisker, loads and sliding velocity effect laws on the tribological properties of PEEK/CaCO₃ composites were discussed under physiological saline lubrication conditions. The stability of tribology of the composites was also investigated. The PEEK composites reinforced with CaCO₃ whisker modified with the homemade coupling agent were prepared. The MM-W1A vertical universal friction and wear testing machine was used to test the tribological properties of the composites. And SEM was used for the wear surface morphology characterization. The experimental results show that the whisker content obviously impacts the tribological performance of the composites and the friction coefficient and wear rate of the PEEK/CaCO₃ composite materials first decreases and then increases with the increase of whisker content under 0.9% physiological saline lubrication conditions. The friction coefficient and the wear rate of composites increases along with the increase of loads and sliding velocity. The composite with the whisker content 15%wt is in the better tribological properties within the lowest friction factor and the minimum wear amount compared with the same prepared PEEK materials. The friction process of the composite material to friction pair is in a relatively stable state and a better tribological property. The wear mechanism is of the gelling-corrosion wear characteristics.

Keywords: CaCO₃ whisker; PEEK composites; tribological properties; physiological saline; lubrication

收稿日期: 2015-04-05; **修回日期:** 2015-09-25; **基金项目:** * 国家自然科学基金(51205062)

通讯作者: 李凝(1981-), 男, 讲师, 博士; **研究方向:** 材料表面改性工程; **Tel:** (0579) 8228 8020; **E-mail:** ln2316@zjnu.edu.cn

网络出版日期: 2015-12-09 08:35; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20151209.0835.016.html>

引文格式: 李凝, 黄健萌, 陈卫增. 生理盐水润滑下 PEEK/WK 复合材料的摩擦学性能 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(6): 133-140. Li N, Huang J M, Chen W Z. Tribological properties of PEEK/WK composites under physiological saline lubrication [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(6): 133-140.

0 引言

目前,国内外将聚醚醚酮(PEEK)及其改性复合材料应用于生物医用材料研究主要采用生物惰性的增强材料,如利用碳纤维增强等,通过体外细胞培养、动物体内植入等方法对 PEEK 材料与骨肉体黏附性、生物学相关功能等指标进行测定。研究证明 PEEK 具有良好的生物相容性和稳定的理化特性^[1-4],但改性复合材料的力学性能及作为膝关节的局限性较大。当前的大多研究主要集中在通过各种技术手段修饰 PEEK 的表面结构及添加各种活性材料^[5-8],提高 PEEK 和 PEEK 复合材料的生物活性。

碳酸钙由于其独有的生物特性,在人体骨骼、牙齿中占有较大成分,作为一种生物材料在医用领域得到了广泛的应用。将人体内含有的钙盐材料应用于骨组织工程中始于上世纪 90 年代,人们将天然珊瑚(主要成分是碳酸钙)制成细胞支架,用于多种细胞的体外培养。研究结果表明,碳酸钙制成的骨组织工程支架材料具有良好的生物可降解和细胞相容性^[9]。对于利用具有生物活性的 HA、碳酸钙增强 PEEK 复合材料,研究最深入的是南洋理工大学、福州大学、吉林大学和南航的多位学者,多采用干摩擦的使用环境研究其复合材料的摩擦学性能。PEEK 制成的各种骨科植入物已经应用到临床,已制备的碳纤维增强复合材料植入体内实验表明,具有一定长径比的纤维增强复合材料在体内与体液、皮质的融合效果最佳,且具有较好的血液相容性,但接触界面应力较大,材料磨损率较高。

为了降低材料磨屑对人体组织的影响,进一步扩大医用材料的研究范围,文中采用价格低廉、生物体内含有 Ca 盐的碳酸钙晶须(CaCO₃、微纳米级的短纤维)作为改性增强体对 PEEK 材料进行改性,研究改性后的 PEEK/CaCO₃ 复合材料在生理盐水润滑下的摩擦学性能,并探讨生理盐水润滑下复合材料的磨损机理。

1 材料及方法

1.1 材料

聚醚醚酮(PEEK):吉林大学新材料责任有限公司,浅茶色粉末,密度 2.17 g/cm³,吸水率 0.2%(25℃,50 RH),粒度小于 160 μm。CaCO₃晶须:青海海兴科技开发有限公司,白色粉末,长

度 20~30 μm,平均长径比为 20~25,比表面积 7.0 m²/g,密度 2.86 g/cm³,吸水率<1%。

1.2 晶须—偶联剂处理工艺

用自制偶联剂磺化聚醚醚酮 SPEEK 处理晶须表面,偶联剂用量为:

$$T = \frac{CM}{m} \quad (1)$$

其中, T 为偶联剂用量,g; C 为晶须或填料含量,g; M 为晶须或填料表面积,m²/g; m 为偶联剂的最小包覆面积,m²/g,文中采用偶联剂添加量为晶须或填料的 3%^[10-12]。

具体处理工艺:采用 N,N'-二甲基甲酰胺作为溶剂,将自制偶联剂磺化聚醚醚酮 SPEEK 配置成溶液,其他均按照传统偶联剂的处理工艺进行处理^[1,15]。湿法处理晶须表面工艺过程如下:将 CaCO₃晶须与 SPEEK 干燥 2 h,按配比称取不同含量(质量分数)的晶须和偶联剂,将 SPEEK 溶于 N,N'-二甲基甲酰胺中,再将 CaCO₃晶须加入该溶液,在(90±5)℃下搅拌 30 min;待晶须表面被偶联剂充分润湿后过滤,放置在 150℃的干燥箱内烘干 24 h,彻底去除 N,N'-二甲基甲酰胺,烘干备用,得到改性的晶须粉末。

1.3 样品制备

复合材料的制备工艺流程为:配料—加入溶剂—分散—烘干—模压成型—打磨—试样。

综合 PEEK 复合材料生物体内的医学应用,将改性后的晶须,分别按照不同的晶须含量 5%、10%、15%、20%、25%和 30%的比例,在同样的模压成型工艺参数条件下制备 PEEK 复合材料。将合格的试样加工成尺寸为 7 mm×7 mm×40 mm 的方销,考察复合材料在生理盐水润滑条件下不同载荷 20、40、60、80、100 kg;不同滑动速度 200 和 400 r/min 条件下的摩擦学性能。并就该复合材料的磨损机理进行分析。

1.4 性能表征

利用 Nicolet NEXUS670 中红外光谱仪对处理后的晶须表面进行成分分析,以期了解处理后晶须表面的亲水亲油官能团结构。进而改善复合材料的界面结合力,提高复合材料的物理力学性能。

在 MM-W1A 立式万能摩擦磨损试验机上测试复合材料的摩擦磨损性能,摩擦副为环块 45

钢,硬度为 47 HRC,实验前试销和试环均用 800 号水砂纸打磨抛光,并用丙酮洗净。试验时,圆环静止而复合材料方销旋转,销的磨损量用比磨损率表示,定义为每单位载荷乘以滑动距离上的磨损质量,其计算表达式如下:

$$\omega_s = \frac{\Delta m}{s p} \quad (2)$$

式中: ω_s 为比磨损率, $\text{kg}/(\text{N} \cdot \text{m})$; Δm 为式样的磨损质量损失, kg ; s 为滑动距离, m ; p 为摩擦销所受的法向载荷, N 。

在室温、常压下,滴加注射用生理盐水(0.9% NaCl), 65~70 滴/min,不同载荷、不同滑动速度条件,磨损时间 120 min,总行程为 3 168 m,取摩擦状态稳定后的 60 min 摩擦因数平均值作为稳定摩擦因数,取 3 次试验结果的平均值。磨损量利用精密电子天平(精度为 0.1 mg)称量试件在试验前后质量的变化来确定。表面形貌由日本日立公司生产的 S-4800 型高分辨场发射扫描电镜(Hitachi S-4800, 15 kV)对其进行分析表征。

2 结果与讨论

2.1 晶须表面改性结果

改性后的晶须表面红外光谱图如图 1 所示。从图中可以看出,改性样品在 1 700、1 250、1 160 和 1 080 cm^{-1} 处出现了新的吸收峰,分别对应苯环上的 3 位取代、磺酸根和磺酸盐的红外吸收峰^[13]。这一结果说明, SPEEK 通过化学键与 CaCO_3 晶须表面发生键合。碳酸钙晶须表面富集有大量的活性基团(如羟基),可与其它有机基团发生反应,使偶联剂分子以化学吸附的形式包覆在碳酸

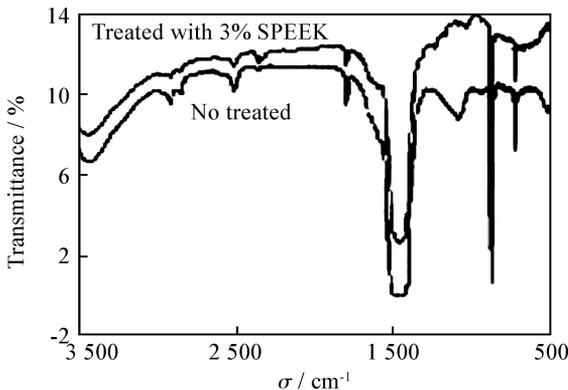


图 1 CaCO_3 晶须的磺化处理红外光谱图

Fig. 1 IR spectra of CaCO_3 whiskers

钙晶须表面,形成有机层,有利于其在基质 PEEK 内的分布和增强作用。

2.2 晶须含量对复合材料摩擦学性能的影响

图 2 是生理盐水润滑下、载荷 20 kg、转速 200 r/min 条件下 PEEK/ CaCO_3 复合材料的摩擦因数和比磨损率随晶须含量的变化规律。从图中可以看出,生理盐水润滑条件下,当复合材料中加入的 CaCO_3 晶须含量小于 15% 时,随着晶须含量的增加,PEEK 复合材料摩擦因数不断减小,比磨损率也逐渐降低;当晶须含量为 15% 时,复合材料的摩擦因数达到最低值 0.231,此时比磨损率仅为纯 PEEK 的 27.5%;当晶须含量超过 15% 时,摩擦因数随晶须含量的增加而升高,比磨损率随晶须含量的增加也呈递增趋势。说明 CaCO_3 晶须的加入可显著改善 PEEK 复合材料的耐磨性能。

复合材料的摩擦学性能表明,适量的 CaCO_3 晶须在复合材料中分散均匀,起到硬质颗粒点的作用,减少了材料的接触表面,降低了摩擦因数和比磨损率;随着 CaCO_3 晶须含量的增多,由于其自身极性易于在基体材料内形成团聚效应,摩擦过程中摩擦热导致基质形变,较多的 CaCO_3 晶须硬质颗粒点容易剥落,承力点降低,导致材料的接触表面积增加,表面粗糙度增大,摩擦因数增大,同时剥落的硬质点易于划伤材料表面,其磨损率也随之增大。

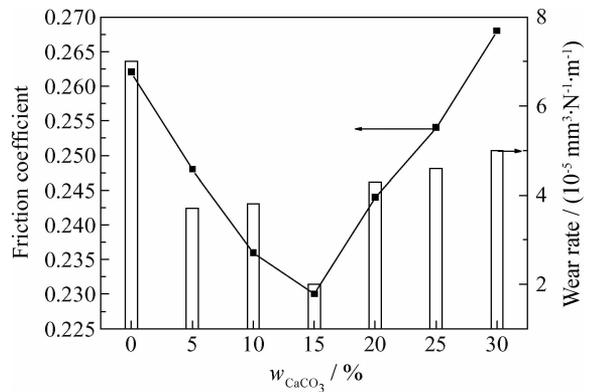


图 2 晶须含量对复合材料摩擦学性能的影响

Fig. 2 Effects of the CaCO_3 whisker content on tribological properties of the composites

2.3 载荷对复合材料摩擦学性能的影响

图 3 和图 4 为生理盐水润滑、转速 200 r/min 条件下,纯 PEEK 和 PEEK/ CaCO_3 复合材料的

摩擦因数及比磨损率随载荷的变化。从图3可看出,同一载荷条件下,随晶须含量增加摩擦因数先降低后增加;同一晶须含量条件下,随着载荷的增加,PEEK复合材料的摩擦因数表现为先增大后降低趋势;但纯PEEK的摩擦因数相对较高,而CaCO₃晶须改性增强的复合材料摩擦因数波动相对平缓。图4表明,复合材料的比磨损率表现与摩擦因数一致的性能,但当晶须含量较高时,其比磨损率反而较低。结合两图可以看出,当CaCO₃晶须含量为15%时,PEEK复合材料的摩擦因数相对最低,比磨损率也相对最低,这可能是因为在较低转速下摩擦,复合材料塑性变形较小,摩擦副处于边界润滑状态,摩擦因数和比磨损率均较小。从图中仍可以看出,当晶须含量高于10%时,随着载荷的增加,复合材料的比磨损率变化很小。分析认为较低载荷时,基体材料处于弹塑性变形阶段,随着载荷增大,材料的塑性变形增大,摩擦界面的实际接触面积增大,导致单位面积上承受的压力反而减小,摩擦因数呈现增加趋势;当载荷超过60 kg后,复合材料内的孔隙被压实,摩擦接触表面积接近理论接触面积趋于稳定,硬质颗粒点的支撑作用明显,摩擦因数相对降低,材料的比磨损率基本不变。复合材料在高载荷下仍表现出良好的耐磨性能,说明晶须增强PEEK复合材料的承载能力大幅提高。

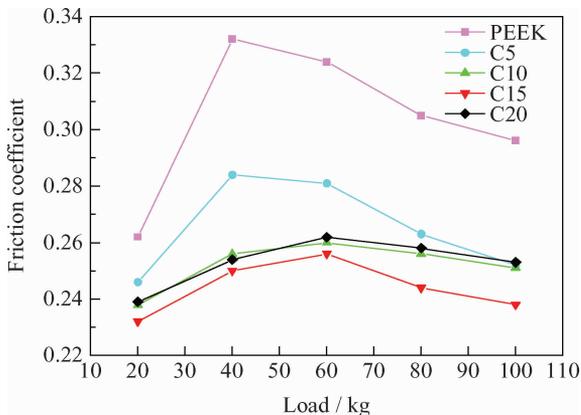


图3 复合材料不同载荷下的摩擦因数

Fig. 3 Friction coefficient of composites under different load

2.4 滑动速度对复合材料摩擦学性能的影响

图5为生理盐水润滑、载荷20 kg,不同滑动速度下PEEK/CaCO₃复合材料的摩擦学性能。速度为200 r/min时,晶须含量小于15%时,复

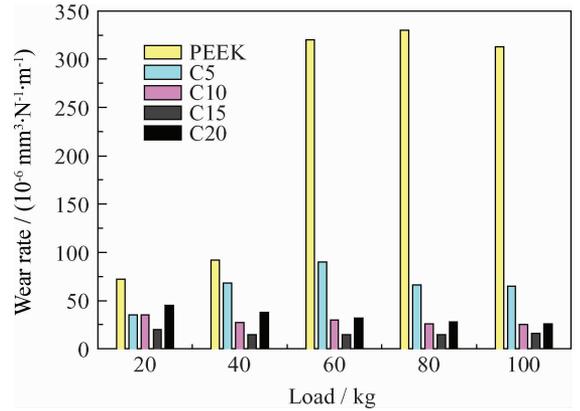


图4 复合材料不同载荷下的比磨损率

Fig. 4 Wear rate of the composites under different load

合材料的摩擦因数随晶须含量的增加而不断降低,并且在晶须含量为15%时达到最低值0.231,比纯PEEK摩擦因数降低了12%,显示出较好的减磨效果;晶须含量大于15%时,复合材料的摩擦因数开始升高。速度为400 r/min时,复合材料的摩擦因数随晶须含量的增加先降低而后增大,晶须含量为5%~15%时复合材料的摩擦因数趋于平稳,随后在晶须含量为20%时达到最低值0.246,比纯PEEK摩擦因数降低了14.5%,之后随着晶须含量的增加摩擦因数升高。当晶须含量在20%~30%时,两种速度下复合材料的摩擦因数比较接近。

由图亦可以看出,复合材料的比磨损率在晶须含量为20%~30%时较接近。一定量的碳酸钙晶须在复合材料内分散均匀,起到一定的骨架作用,减少复合材料与摩擦副之间接触面积,降低基体材料的塑变程度;当晶须含量超过一定值后,晶须分散受到自身极性作用,团聚加剧,复合材料内硬质点作用增强,但在生理盐水冲洗下易于脱落,导致基体塑变程度明显,同时剥落后的凹坑易于为塑变的基体填充,增大摩擦过程中的实际接触面积,摩擦因数和磨损率均增大。由此可知,当晶须等填料增大到一定含量时,复合材料的摩擦学性能基本稳定,这是由于晶须含量超过一定范围时,容易在复合材料基质内出现自身摩擦磨损特性,其摩擦因数和磨损率趋于稳定,与速度和载荷的关系甚微。对比两速度作用下的摩擦学性能变化曲线可以发现,复合材料在高速档的比磨损率比低速档的比磨损率稍大,主要是因为滑动速度增大,摩擦热增加,摩擦温升使得材料表面受热更容易产生塑性

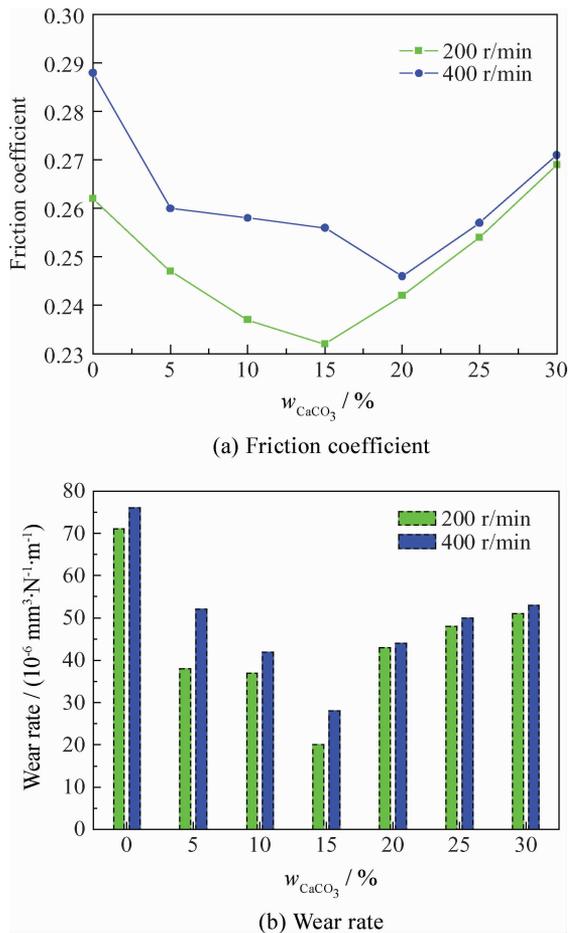


图 5 不同滑动速度下复合材料的摩擦学性能

Fig. 5 Tribological properties of the composites under different sliding velocity

变形,导致硬质颗粒点作用力减弱,磨损加剧。

2.5 复合材料摩擦学性能稳定性分析

结合图 2、图 3 和图 5 可以看出,晶须含量对复合材料的摩擦学性能影响最大,载荷及滑动速度对复合材料的影响呈正规律状态作用。基于此,考察生理盐水润滑下 PEEK/CaCO₃(15%) 复合材料在载荷 20 kg、转速 200 r/min 条件下的摩擦学稳定性如图 6 所示。从图中可以看出,式样摩擦因数的变化基本经过了两个阶段:磨合阶段和稳定摩擦阶段。磨合阶段的摩擦因数相对较低,但增长率较大,呈波动性升高,而后进入稳定摩擦阶段,摩擦因数保持相对平稳。这是由于摩擦初期真实接触面积很小,摩擦因数相对较低,随着摩擦磨损的延续,界面的法向载荷与接触面积之比远远大于材料的屈服极限,所以材料就不断发生屈服破坏,增大了接触表面,摩擦因数逐渐增大。随着接触面积的增大,表面粗糙度趋于

稳定,摩擦达到动态平衡,摩擦因数趋于平稳。表明一定晶须含量增强的复合材料的摩擦学性能在一定载荷作用下与对磨件的接触过程随着时间和工作过程逐渐趋于稳定,但与纯水润滑条件下摩擦因数相比,生理盐水润滑时摩擦因数波动相对较大^[14-17],这是由于生理盐水对摩擦副 45 钢具有一定的点蚀作用,却有利于摩擦接触表面温度的均衡,使摩擦界面粘着作用增强,磨屑脱落困难,表现为材料的摩擦因数波动明显。

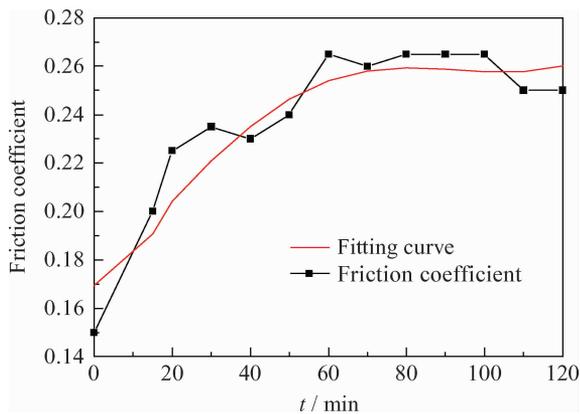


图 6 生理盐水润滑下复合材料摩擦因数的稳定性

Fig. 6 Friction coefficient stability of the composites in the lubrication of physiological saline

3 磨损机理分析

图 7 为不同 CaCO₃ 晶须含量改性增强 PEEK 复合材料在载荷 20 kg、 $v=200$ r/min 生理盐水润滑条件下的磨损形貌。从图 7(a) 可以看出,纯 PEEK 材料的磨损表面多呈平行于滑动方向的条状犁沟,粘有大片磨屑,基体形变较大,犁沟深度较深,表现为磨粒磨损和粘着磨损结构特征,这是由于 PEEK 基体的界面剪切强度不够,在摩擦力的作用下基体很容易被撕裂形成磨屑,较大的磨屑又在磨损过程中形成对基体的刮削作用,犁沟较深,磨损面较粗糙。添加改性 CaCO₃ 晶须后,PEEK 复合材料的磨损表面如图 7(b)~(d) 所示。图 7(b) 为 5% CaCO₃ 晶须改性复合材料的磨损表面,与纯 PEEK 对比可见,犁沟数量明显减少,宽度增加,深度变浅,有少许粘着磨屑,磨粒磨损和粘着磨损程度减轻,基体形变仍较明显。晶须含量增至 15% 时,复合材料磨损表面几乎看不到塑性变形以及剥层现象,只有微切削的划痕和细小的犁沟(图 7(c)),未发现破碎和脱落

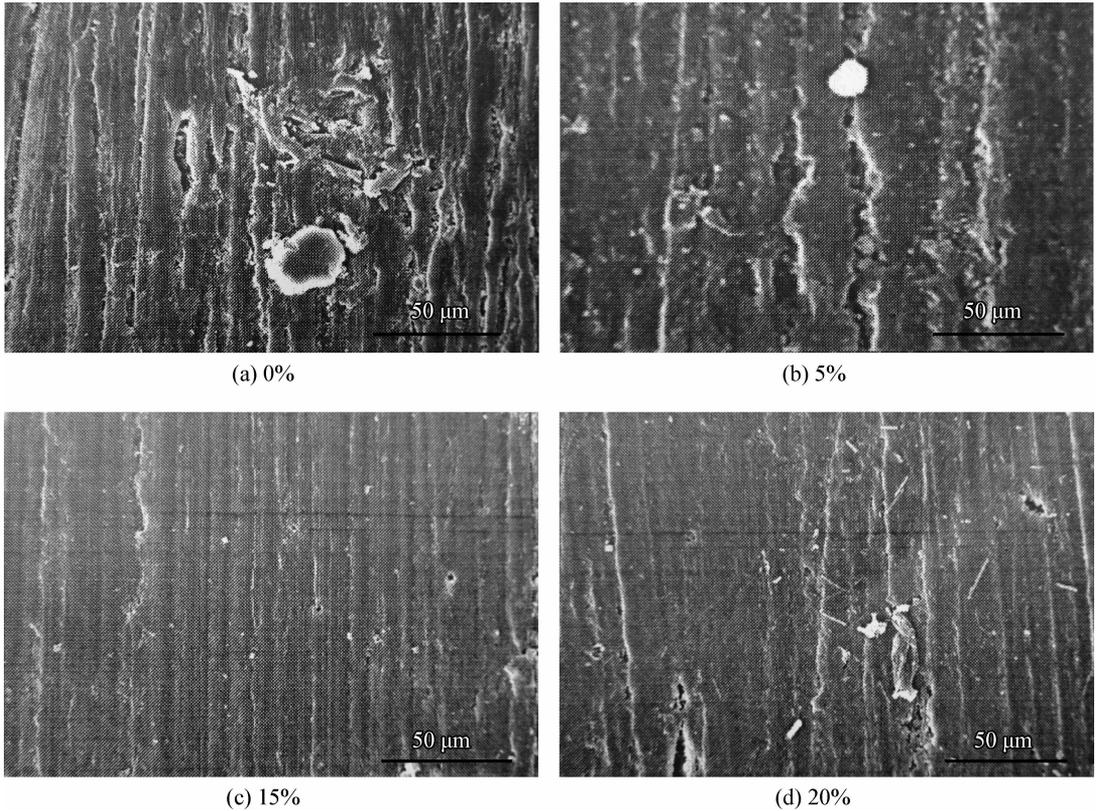


图 7 不同 CaCO_3 晶须含量改性增强 PEEK/ CaCO_3 复合材料的磨损形貌

Fig. 7 Worn morphologies of the PEEK/ CaCO_3 composites with different whisker content of CaCO_3

的磨屑碎片。材料磨损主要以犁沟磨损为主。图 7(d) 为晶须含量增至 20% 时的复合材料的磨损表面, 表面存有较宽的犁沟、磨屑脱落后留下的凹坑以及脱落的晶须。说明晶须含量超过一定范围时晶须团聚现象增多, 部分晶须不能被树脂基体包裹, 摩擦过程由于摩擦力、摩擦热和盐水的点蚀作用^[18-24], 很容易使晶须从复合材料中分离脱落, 表现为硬质颗粒点, 使得磨粒磨损加重。结合图 3 和图 4 可以发现, 晶须含量超过 20% 时, 复合材料的摩擦因数和比磨损量上升缓慢, 表明复合材料中随着硬质材料的增多, 材料的弹性变形能力降低, 复合材料的粘着磨损降低(图 7(d))。PEEK/ CaCO_3 复合材料磨损表面的 EDS 成分结果(图 8)中含有 Fe 和 Cr 元素, 表明在生理盐水、摩擦热、接触应力等的作用下, 摩擦副钢环发生了腐蚀磨损, 腐蚀物在摩擦过程中向复合材料磨损表面转移和粘着, 使得复合材料磨损表面存在 Fe 和 Cr。

4 结论

(1) 生理盐水润滑条件下, 晶须含量对复合

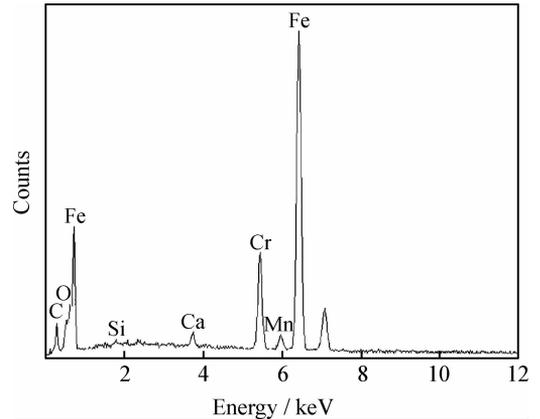


图 8 PEEK/ CaCO_3 复合材料磨损表面的 EDS 能谱
Fig. 8 EDS of worn surface on the PEEK/ CaCO_3 composites

材料的摩擦学性能影响显著。复合材料的摩擦因数随晶须含量的增加先降低后增大, 在晶须含量为 15% 左右时, 摩擦因数达到最低值, 同时比磨损量相对最低, 约为纯 PEEK 的 27.5%。说明加入 CaCO_3 晶须可有效改善 PEEK 复合材料的耐磨性能。

(2) 生理盐水润滑条件下,不同载荷及不同的滑动速度条件时 PEEK/CaCO₃ 复合材料仍表现出良好的耐磨性能和较低的摩擦因数,比磨损率也趋于稳定,表现出良好的耐磨性能。高载荷及高速下的摩擦因数和比磨损率同比较高。

(3) 生理盐水润滑条件下,纯 PEEK 材料的磨损主要表现严重的磨粒磨损和粘着磨损。PEEK/CaCO₃ 复合材料的磨损表面犁沟明显减少,粘着少量磨屑,主要表现为粘着一点蚀疲劳磨损特征。

参考文献

- [1] Ma N, Lin G M, Xie G Y, et al. Tribological behavior of polyetheretherketone composites containing short carbon fibers and potassium titanate whiskers in dry sliding against steel [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 123(2): 740-748.
- [2] 邓纯博, 刘冬妍, 刘吉泉, 等. 聚醚醚酮及其复合材料作为骨科植入物的研究进展 [J]. *生物医学工程与临床*, 2009, 13(5): 473-476.
Deng C B, Liu D Y, Liu J Q, et al. Advance in polyetheretherketone (PEEK) and its composite material for orthopaedic implants [J]. *BME & Clin Med*, 2009, 13(5): 473-476 (in Chinese).
- [3] Wang H Y, Lin S, Zhang S, et al. Biomimetic design and tribological properties of porous lubricating wear-resistance CF/PTFE/PEEK composite [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2014, 4(6): 45-50.
- [4] 倪卓, 华文语, 王应, 等. PEEK/HA 生物复合材料的结晶动力学 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2013, 29(2): 74-77.
Ni Z, Hua W Y, Wang Y, et al. Crystallization kinetics of PEEK/HA composite [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2013, 29(2): 74-77 (in Chinese).
- [5] 汪怀远, 张帅, 汪桂英, 等. 多孔 PEEK 自润滑材料的制备与摩擦磨损性能 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2012, 28(9): 137-140.
Wang H Y, Zhang S, Wang G Y, et al. Preparation and tribological properties of porous self-lubricating polyetheretherketone [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2012, 28(9): 137-140 (in Chinese).
- [6] Akagaki T. Improvement of tribological property of PEEK [J]. *Journal of Japanese Society of Tribologist*, 2012, 1: 18-23.
- [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): 56-62.
Zhang Y, Shao C G, Zhang R J, et al. Reinforced modification of PEEK and its applications [J]. *Polymer Bulletin*, 2012(9): 56-62 (in Chinese).
- [8] 贾政, 麦云飞. 水润滑下偶件表面粗糙度对碳纤维增强 PEEK 复合材料摩擦学性能的影响 [J]. *塑料工业*, 2014, 42(1): 83-85, 103.
Jia Z, Mai Y F. Effect of counterpart surface roughness on frictional behavior of carbon fiber reinforced PEEK composites under water lubrication [J]. *China Plastics Industry*, 2014, 42(1): 83-85, 103 (in Chinese).
- [9] 侯春春. 丝素蛋白碳酸钙复合支架材料的制备及其理化性能、生物相容性研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2011.
Hou C C. The Preparation and tests of physicochemical properties and biocompatibility of the silk fibroin and calcium carbonate composite scaffold [D]. Chongqing: Xinan University, 2011 (in Chinese).
- [10] 戴春霞, 李洁, 粟洋, 等. 四针状氧化锌晶须增强聚醚醚酮复合材料的正交试验研究 [J]. *润滑与密封*, 2011, 36(2): 35-37, 48.
Dai C X, Li J, Li Y, et al. Orthogonal experiments of t-ZnOw/PEEK composites [J]. *Lubrication Engineering*, 2011, 36(2): 35-37, 48 (in Chinese).
- [11] Lin Y X, Gao C H, Li Y. Effects of CaCO₃ whisker on the sliding wear behaviour of poly(etheretherketone) under water-lubricated condition, proceedings of the institution of mechanical engineers [J]. Part J: *Journal of Engineering Tribology*, 2010, 224(12): 1255-1259.
- [12] Wang H Y, Zhang S, Wang G Y, et al. Tribological behaviors of hierarchical porous PEEK composites with mesoporous titanium oxide whisker [J]. *Wear*, 2013, 297(1/2): 736-741.
- [13] Liu S Z, Wang F, Chen T L. Synthesis and characterization of a series of high sulfonated poly(ether ether ketone)s [J]. *Chemical Research in Chinese Universities*, 2001, 22(3): 495-497.
- [14] 唐群国, 姜静, 朱玉泉. 聚醚醚酮在水润滑下的摩擦磨损特性研究 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(9): 53-55.
Tang Q G, Jiang J, Zhu Y Q. Investigation of the tribological characteristics of PEEK under water lubrication [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science)*, 2005, 33(9): 53-55 (in Chinese).
- [15] Chen B B, Wang J Z, Liu N, et al. Synergetic effect of lubricant additive and reinforcement additive on the tribological behaviors of PEEK-based composites under seawater lubrication [J]. *Tribology Transactions*, 2013, 56(4): 672-680.
- [16] Xie G Y, Sui G X, Yang R. The Effect of applied load on tribological behaviors of potassium titanate whiskers reinforced PEEK composites under water lubricated condition [J]. *Tribology Letters*, 2010, 38(1): 87-96.
- [17] Li E Z, Xu B S, Wang H D, et al. Tribological property of polyetheretherketone composites reinforced with glass fiber under water lubrication [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2014, 4(3): 77-82.
- [18] 王全兵, 张志军, 刘爱学, 等. 高承载耐磨 PEEK 复合材料

- 配方与制备工艺研究 [J]. 塑料工业, 2013, 41(1): 116-119.
- Wang Q B, Zhang Z J, Liu A X, et al. Study on formula and forming process of high bearing and wear-resisting PEEK composite [J]. China Plastics Industry, 2013, 41(1): 116-119 (in Chinese).
- [19] Xie G Y, Zhuang G S, Sui G X, et al. Tribological behavior of PEEK/PTFE composites reinforced with potassium titanate whiskers [J]. Wear, 2010, 268(3): 424-430.
- [20] Xin H, Shepherd D E T, Dearn K D. A tribological assessment of a PEEK based self-mating total cervical disc replacement [J]. Wear, 2013, 303(1/2): 473-479.
- [21] Yeo S M, Polycarpou A A. Tribological performance of PTFE-and PEEK-based coatings under oil-less compressor conditions [J]. Wear, 2012, 296(1/2): 638-647.
- [22] Knör N, Gebhard A, Hauptert F, et al. Polyetheretherketone (PEEK) nanocomposites for extreme mechanical and tribological loads [J]. Mechanics of Composite Materials, 2009, 45(2): 199-206.
- [23] Li J, Sheng X H. Surface oxidation of carbon fibre on tribological properties of PEEK composites [J]. Materials Science & Technology, 2009, 25: 1051-1056.
- [24] Wang H Y, Yang S H, Zhang S, et al. Preparation and tribological behaviors of porous multi-walled carbon nanotube/polyetheretherketone composites [J]. Science of Advanced Materials, 2014, 6(7): 1475-1480.

(责任编辑: 常青)

• 本刊讯 •

版权转让声明

根据《中华人民共和国著作权法》等法规要求和国内有影响的期刊对著作权保护的做法,自2007年起,凡向本刊所投稿件应为原创作品,无一稿多投且不涉及保密问题及其他与著作权有关的侵权问题。全体作者需在投稿时签署《论文著作权转让书》,将该论文的复制权、发行权、翻译权、汇编权、信息网络传播权(包含优先数字出版权)等权利在全世界范围内转让给本刊;且授权中国科技期刊开放获取平台(COAJ)进行开放获取全文。本刊入编《中文核心期刊要目总览》,系中国期刊方阵“双效”期刊,并被中国知网、中国学术期刊综合评价数据库、中国科学引文数据库收录,被美国《化学文摘》、俄罗斯《文摘杂志》等国外数据库收录;凡被本刊录用的稿件将视为同意通过网络进行出版或提供信息服务。稿件一经刊用,将一次性支付作者著作权使用报酬(即稿费)。

著作权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行和信息网络传播本刊全文。作者向本刊所投文章即视为同意在中国学术期刊(光盘版)电子杂志社出版。所付稿酬包括该社著作权使用费。

《中国表面工程》编辑部

2015年12月