

聚醚醚酮摩擦学性能改性及其应用研究进展

Progress of Tribological Modification and Application of Polyetheretherketone

李恩重,郭伟玲,王海斗,徐滨士

(装甲兵工程学院 装备再制造技术国防科技重点实验室,北京 100072)

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

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

摘要: 本文综述了聚醚醚酮(Polyetheretherketone, PEEK)的特性及其应用,重点探讨了 PEEK 复合改性中的无机填料填充、纤维增强、聚合物共混及表面改性四个方面对 PEEK 复合材料性能的影响,简述了 PEEK 复合材料在航空航天领域、汽车工业及涂料工业中的应用研究进展,并指出 PEEK 改性过程中纳米材料的团聚以及无机有机物的相容性仍是目前亟待解决的重要问题,寻求更多的增强体和简便复合工艺以实现材料更优性价比是今后的研究重点。

关键词: 聚醚醚酮;改性;摩擦学性能;应用

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.01.018

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)01-0091-06

Abstract: The properties and the application of polyetheretherketone(PEEK) are briefly reviewed. The modifying technique and the friction and wear behaviors of the modified PEEK are discussed respectively from fiber reinforcing, adding inorganic fillers, blending with polymer and surface modification. The applications of PEEK composite in aviation, automobile and dope industries are summarized. The dispersion of nano-materials and the compatibility of inorganic-organic in the process of PEEK modification are still important issues to be resolved, the reinforcement and simple modification of PEEK are the focus of future research.

Key words: PEEK; modification; tribological behavior; application

特种工程塑料是继通用塑料、工程塑料之后于 20 世纪 70 年代初研究开发成功的第三代高分子材料的一个新领域。它具有高强度、高模量、耐高温、耐辐射以及尺寸稳定等特点,在电子电器、航空航天、汽车、机械制造等高新技术领域发挥着日益重要的作用^[1]。作为特种工程塑料中的一种,聚醚醚酮(Polyetheretherketone, PEEK)具有优异的物理、化学、力学、热等性能,并且能够以传统的热塑性塑料的加工方法成型,作为高性能复合材料的基体在工程中得到广泛应用。PEEK 刚性较大,尺寸稳定较好,其线膨胀系数较小,接近于金属铝材^[2,3]。PEEK 化学热稳定性好,对酸、碱及几乎所有的有机溶剂具有强的耐腐蚀性能,同时自身具有阻燃性,在火焰条件下释放烟和有毒气体少,抗辐射能力强。PEEK 材料具有突出的摩擦学特性,耐滑动磨损和抗微动磨损性能优异,尤其是能在 250℃ 高温下保持高的耐磨性和低的摩擦因数。此外,

PEEK 易于挤出和注塑成型,加工性能优异,成型效率较高,因此,PEEK 在航空航天、电子电气、汽车制造以及医疗等领域得到广泛的应用^[4]。

1 PEEK 摩擦学性能改性

随着航空航天、汽车、机械、医疗等领域技术的飞速发展,应用于这些领域的特种工程塑料性能的要求越来越高,对现有特种工程塑料进行复合改性是满足这种要求的有效途径。将 PEEK 与其他高性能聚合物共混或与纤维、粉状填料复合,可进一步提高其热力学性能和耐摩擦磨损性能,改善其在无润滑、高温、高负载、腐蚀等严酷环境下的使用性能,并降低材料成本,扩大其使用范围^[5]。目前,PEEK 的主要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。

1.1 无机填料填充改性 PEEK

无机填料填充 PEEK 不仅有效降低复合材料的成本,而且在聚合物中起到承载、减小形变作用,同时可以使高聚物薄膜转移,改善转移膜的附着强度,减小摩擦,降低磨损,形成自润滑复合材料。

纳米粒子作为聚合物填料具有小尺寸效应、化学活性、界面强相互作用等性能,在低填充量下,比普通粒子具有更优的摩擦学改性作用,同时较低的填充量可使复合材料密度更小,改性后的材料将集无机、有机和纳米材料的特点于一身,并表现出较好的耐磨性,有时还会获得一些新的性能^[6,7]。

KUO M. C. 和 CHRISTIAM J. 等系统研究了 SiO_2 , ZrO_2 , Si_3N_4 , SiC 等纳米粒子填充 PEEK 复合材料的摩擦磨损性能。结果表明,PEEK 复合材料的摩擦因数随纳米粒子含量的增加而降低,当纳米 SiO_2 、纳米 ZrO_2 和纳米 Si_3N_4 的质量分数为 15% 时,PEEK 复合材料的摩擦因数分别小于 0.22, 0.30 和 0.24,而磨损率则随纳米粒子含量的增加呈现先下降后上升趋势。同时 PEEK 复合材料的摩擦因数随载荷的增加而下降,表明在高载荷下纳米粒子更能有效地降低材料的摩擦因数。 SiC , Si_3N_4 等纳米粒子在滑动摩擦过程中通过与不锈钢表面的化学反应,使部分纳米粒子被氧化为 SiO_2 ,可在不锈钢摩擦副的表面形成一层较薄且均匀的转移膜,这种转移膜的黏结强度较高,从而使复合材料显示出较低的磨损率,而当纳米粒子含量过高时,复合材料的黏着力减弱,从而导致转移膜的质量变差,使磨损率上升。此外,与弹性模量较低的聚合物相比,纳米粒子具有优良的力学性能,因而在滑动过程中纳米粒子还起着承受载荷的作用^[8,9]。

YU Lai-gui 等通过挤压成型制备了微米级 Fe, Cu 颗粒填充 PEEK 复合材料,对复合材料的摩擦磨损性能进行了测试,研究了转移膜在提高复合材料摩擦磨损性能中的作用。结果表明,当采用 Cu 颗粒作为填料时,复合材料形成均匀的薄转移膜;而采用 Fe 颗粒作为填料时,复合材料形成不均匀的厚转移膜,转移膜对提高 PEEK 复合材料的磨损性能起到了关键作用。作为填料的 Fe 颗粒之间存在强烈的亲和力,致使 PEEK/Fe 复合材料与对偶不锈钢环表面的黏结力十分差,从而使 PEEK/Fe 复合材料形成厚的转移膜^[10]。

彭旭东等以热压成型法制备了纳米 Al_2O_3 和聚四氟乙烯 (Polytetrafluoroethylene, PTFE) 填充聚醚醚酮基复合材料,研究了干摩擦条件下纳米 Al_2O_3 和 PTFE 填充 PEEK 的摩擦磨损特性。结果表明,纳米 Al_2O_3 显著降低了复合材料的摩擦因数和比磨损率,

当纳米 Al_2O_3 的含量为 5% ~ 7% (质量分数,下同) 时,PEEK 复合材料的摩擦学特性最佳。当纳米 Al_2O_3 的含量较低 (3%) 时,纳米 Al_2O_3 -PTFE-PEEK 复合材料与钢对偶面产生的磨损模式以磨粒磨损和犁削为主;而当纳米 Al_2O_3 的含量较高 (10%) 时,纳米 Al_2O_3 填充 PEEK 的磨损模式主要是黏着磨损^[11]。

王齐华等研究了粒径分别为 10nm 和 86nm 的两种纳米 ZrO_2 (含量 7.5%) 填充 PEEK 的摩擦磨损性能,结果表明,粒径 10nm 的纳米 ZrO_2 可显著改善 PEEK 的摩擦学性能,因为其复合材料摩擦过程中在对偶 45 钢环上形成一层连续的与底材黏着紧密的薄转移膜,其主要的磨损机制是轻微的黏着转移和疲劳磨损,而粒径为 86nm 的纳米 ZrO_2 /PEEK 复合材料则不能在对偶面上形成性能优良的转移膜,故其摩擦学性能降低,其磨损以较为严重的磨粒磨损和黏着转移为主^[12]。

纳米粒子填充对 PEEK 摩擦性能的影响有一个共同的规律:纳米粒子的填充量存在一个最佳值,而且 PEEK 中纳米粒子的最佳含量随不同的纳米粒子而改变。含量小于最佳值时,摩擦学性能随含量的增加而提高;当含量大于最佳值时,摩擦学性能随含量的增加而下降。无机填料填充聚合物不仅起到承载、减小变形的作用,还可以使聚合物薄膜转移,改善转移膜的附着强度,减小摩擦,降低磨损,形成自润滑复合材料^[13,14]。

1.2 纤维增强改性 PEEK

碳纤维、玻璃纤维和各种晶须与 PEEK 具有很好的亲和性,可作为填料增强 PEEK 制成高性能复合材料,纤维增强 PEEK 不仅可以提高材料的力学性能,同时还可以改善材料的摩擦学性能。

FLOCK J. 等研究了纤维增强 PEEK 的摩擦学性能,结果表明,在碳纤维含量为 10% ~ 20% 时复合材料的摩擦学性能最好^[15]。

DAVIM J. P. 等分别以 30% 碳纤维和 30% 玻璃纤维为增强材料,通过挤出成型制得 PEEK 复合材料,研究了复合材料的耐磨性能和摩擦因数,并与纯 PEEK 进行对比。研究表明:纤维增强对 PEEK 复合材料在干摩擦条件下的耐磨性影响明显,比磨损率显著减小。其中,玻璃纤维增强的效果最好^[16]。

ZHANG Z. 等研究了纯 PEEK, PEEK/PTFE 复合材料和 PEEK/CF/PTFE/石墨复合材料三者的摩擦学性能,结果表明,在转移膜的连续区中,PEEK 膜最厚,PEEK/PTFE 膜次之,PEEK/CF/PTFE/石墨膜最薄;PEEK/CF/PTFE/石墨膜中石墨和 PTFE 存在优先转移,碳纤维增强 PEEK 复合材料形成的转移

膜薄,连续性、均匀性好,因此其摩擦学性能较好^[17]。

BIJWE J. 等探讨了 GF/PEEK, CF/PEEK 和 PEEK/CF/PTFE/石墨复合材料的摩擦磨损机理,研究表明,碳纤维的加入可以显著改善复合材料的力学性能而摩擦学性能改善并不明显,PEEK/CF/PTFE/石墨复合材料的摩擦磨损性能得到了显著的改善^[18]。

贾均红等比较了 PEEK/PTFE/CF 复合材料在干摩擦和水润滑下的摩擦学行为。水润滑下复合材料的磨损率显著降低,摩擦因数则随负荷的增加变化不大。在干摩擦条件下,复合材料的磨损以黏着磨损与磨粒磨损的混合形式为主;水润滑条件下,磨损表面比较光滑,磨损方式主要以轻微磨粒磨损为主,由于摩擦表面吸附水膜的边界润滑作用,复合材料的摩擦磨损性能显著提高^[19]。

HANCHI 等研究了温度对 CF/PEEK 复合材料摩擦因数和磨损量的影响。研究表明,CF/PEEK 复合材料的力学性能随温度的升高而增强,当温度从室温升高到复合材料的玻璃化转变温度(T_g)时,复合材料的摩擦因数略微减小而磨损量却急剧增大^[20]。

XU Liu-Jie 等利用人造神经网络研究了载荷和接触温度对 CF/PEEK 复合材料摩擦性能的影响,结果表明复合材料摩擦因数受载荷的影响较为显著而磨损量受接触温度影响较为显著^[21]。

李志方以 CaCO_3 晶须为填料,通过热压成型工艺制得 PEEK 基复合材料,研究发现:在干摩擦条件下,填充 CaCO_3 可明显降低 PEEK 基复合材料的摩擦因数,随着 CaCO_3 晶须含量的增加,复合材料摩擦因数持续降低,复合材料的磨损率也随着 CaCO_3 晶须含量的增加而降低,当晶须含量为 15% 时磨损率达到最低^[22]。

李恩重等研究了 PEEK/GF 复合材料在室温高速条件下的干滑动摩擦磨损性能,结果表明,随着载荷和频率的增加,PEEK/GF 复合材料的摩擦因数和磨损量逐渐增大并趋于稳定;微观结构分析显示 GF 与 PEEK 两相结合紧密,磨损方式主要以犁沟为主,GF 的加入阻断了 PEEK 从 PEEK/GF 复合材料磨损表面剥落,使 PEEK 磨屑在 GF 周围积聚,摩擦表面产生的热量使 PEEK 收缩团聚在一起;PEEK/GF 复合材料的热分解温度比纯 PEEK 提高了 75°C ^[23]。

1.3 有机材料共混改性 PEEK

有机材料共混是开发新材料的重要方法,有机材料共混物可以通过简便的方法得到,而所得的材料却具有混合组分所没有的综合性能。

聚四氟乙烯在较低滑动速度下摩擦因数很小,具

有良好的自润滑性能,但耐磨性能差,PEEK/PTFE 优化混合得到的复合材料具有更好的摩擦磨损性能。JAYASHREE 等将不同量 PTFE 粉末与 PEEK 混合后采用注塑成型制得复合材料,进行低振幅振动磨损和磨粒磨损实验,在磨粒磨损中,当 PTFE 的添加量为 7.5% 时,比磨损率最低,而在低振幅振动磨损中,其磨损率却随着 PTFE 添加量的增大而持续减小^[24]。

YAMAMOTO 等研究了水润滑条件下 PEEK/聚硫化苯(Polyphenylenesulfide, PPS)混合物的摩擦磨损性能,结果表明 PPS 在水环境中滑动摩擦条件下仍然保持良好的硬度,提高了复合材料的摩擦磨损性能,分析认为 PPS 中的 S 原子与刚环中的 Fe 反应在对偶钢环的表面形成了黏滞性的 FeS 转移膜^[25]。

颜红侠等研制了 PEEK/PTFE 共混物,并对共混物的物理、力学性能和摩擦磨损性能进行了测试。研究表明,PEEK/PTFE 共混物的摩擦因数为 0.18,其主要受黏着磨损控制,并伴有热塑性流动磨损^[26]。

龙春光等用物理共混-模压法制备了聚苯酯(Ekonol)/PEEK 和 Ekonol/石墨/ MoS_2 /PEEK 复合材料,通过摩擦磨损实验方法对材料的耐磨性能进行了研究。结果表明:PEEK 能在对偶面上形成不连续、厚薄不均的转移膜;Ekonol 的加入能促进转移膜的形成;Ekonol 和固体润滑剂能协同改善 PEEK 所形成转移膜的质量,从而提高 PEEK 的耐磨性能,复合材料在其对偶面上形成的转移膜质量的好坏对其耐磨性能产生直接影响^[27]。

1.4 PEEK 的表面改性

通过物理和化学方法对 PEEK 的表面进行处理使其表面的结构发生变化,极性和亲水性得到改善,从而提高 PEEK 与其他物质间的作用力及复合材料的力学、热学和摩擦学性能等。常用方法有等离子体法和激光改性法。

采用氧等离子体和 $\text{KMnO}_4/\text{H}_3\text{PO}_4$ 化学法处理 PEEK。两种方法都能明显提高 PEEK 表面的极性和亲水性,相比之下,氧等离子体处理使得接触角更低、表面能更高,表面积更大,并且等离子处理对整个部件具有合理的均匀性,是一种非常好的表面处理技术。用氧、氢和氩等离子体改性 PEEK,后二者处理情况一致,接触角为未处理过的 PEEK 的 1/2,电阻也相同;而氧等离子体处理使得接触角接近于 0° ,电阻比氢和氩等离子体处理过的 PEEK 要小^[28]。LAURENSA P. 等用激发态原子处理 PEEK 表面,并经过 XPS, SEM 分析发现,在激光处理过程中能产生极性基团从而提高 PEEK 表面的连接、支持强度,并且不损害其表面连接力学性能^[29]。

Chantal 等研究了 PEEK/PTFE/石墨/CF 复合材料和 PEEK 经氩等离子体处理后的摩擦学性能。结果显示所有材料的摩擦因数和磨损率均显著降低。PEEK 的平均摩擦因数从 0.42 降至 0.23, 其平均磨损率从 10^{-5} mm/(N·m) 数量级降至 10^{-6} mm/(N·m) 数量级; PEEK/PTFE 复合材料的平均摩擦因数从 0.36 下降到 0.18; PEEK/PTFE/石墨/CF 复合材料的摩擦因数从 0.28 降至 0.17。等离子处理能提高 PEEK 及其复合材料的摩擦学性能, 这是因为交联的 PEEK 能提高 PEEK 复合材料的界面结合强度^[30]。

采用无机填料填充、纤维增强、有机材料共混及表面改性等方法改性 PEEK, 显著改善了 PEEK 的力学、热学、摩擦学性能和加工性能, 扩大了其应用范围。

2 PEEK 的应用

2.1 在航空航天方面的应用

PEEK 树脂最早是在航空航天领域里获得应用的, 它可以代替铝、钛和其他金属材料制造各种飞机内、外零部件。其低密度、良好的加工性, 使其可直接加工成型精细的零部件。由于良好的耐水解性和耐腐蚀性, 可用它来制备飞机外部零件; PEEK 本身具有优异的阻燃性, 燃烧时的发烟量和有毒气体的释放量少, 常被用来制造飞机的内部零件。聚醚醚酮与碳纤维或芳酰胺纤维热压成型的复合材料强度可达 1.8GPa, 模量为 120GPa, 热变形温度为 300℃, 在 200℃ 以下保持良好的力学性能, 可用于机翼、天线部件和雷达罩等。此外, PEEK 还可制作火箭用电池槽、螺栓、螺母及火箭发动机的零部件等^[28,31,32]。

2.2 在机械及汽车方面的应用

PEEK 具有突出的强度和韧性、广泛的工作温度范围、高度的耐化学腐蚀性能和耐磨性以及易于加工性等, 可以在高速、化学侵蚀或高温等场合应用, PEEK 在高达 200℃ 的温度下并未显示出因温度和润滑油添加剂造成的老化现象。韩国 SKF 公司用 VICTREX® PEEK® 聚合物材料制造出高性能汽车滚动轴承保持架, 如图 1 所示^[33]。

在生产和供应特种轴承方面拥有 20 余年经验的韩国滚珠轴承制造商 SBB Tech 有限公司选择 VICTREX® PEEK® 聚合物生产机器人减速装置, 如图 2 所示^[34]。采用 Victrex PEEK 聚合物替代现有金属材料生产减速装置, 不仅可以降低生产成本, 而且能够减轻产品质量。日本精工开发出了机床主轴使用的高速角接触球轴承, 其保持架采用了聚醚醚酮, 外圈和内圈



图 1 PEEK 汽车滚动轴保持架^[33]

Fig. 1 PEEK motor vehicle rolling bearing retainer^[33]

采用了日本精工制造的轴承材料。在以油气润滑方式预加恒定压力的条件下, 实现了 4×10^4 r/min 的全球最高速度, 并且降低了噪声及耗气量^[34]。



图 2 VICTREX® PEEK® 聚合物制造机器人减速装置^[34]

Fig. 2 VICTREX® PEEK® robot speed controller^[34]

利用 PEEK 树脂良好的耐摩擦性能和力学性能, 可将其作为金属不锈钢和钛的替代品用于制造发动机内罩的材料, 制造汽车轴承、垫片、密封件、离合器齿环等各种零部件, 另外也可用在汽车的传动、刹车和空调系统中, 还用于涡轮压缩机、泵、阀、电线电缆、座位调节件、标准件等。目前大众、奔驰、通用、克莱斯勒、福特等许多汽车厂商已开始大量使用这种材料, PEEK 已成为汽车中钢、铝、青铜、钛等高性能金属零件的替代者。为满足汽车工业对 PEEK 的力学、热、摩擦性能提出的更高要求, 对 PEEK 进行无机、纤维和有机的复合改性, 可降低成本、扩大使用范围^[35,36]。

2.3 在涂料方面的应用

PEEK 涂料是新一代耐高温, 抗刮擦, 耐磨, 经久耐用的高性能涂料。此外, PEEK 涂料的特殊化学结构使其具有不粘涂料的耐磨性和耐刮擦性。PEEK 涂料不需要底涂, 涂层硬度高, 耐磨性好, 可单层喷涂也可多层喷涂, 操作简便, 综合性价比高, 绿色环保, 广泛应用于化工防腐蚀、家用电器、电子、机械等领域^[37]。

3 结束语

具有优异综合性能的 PEEK 基复合材料,已经在航空航天、汽车、机械等众多工程领域得到应用,并且具有广阔的发展前景。通过无机填料填充改性、纤维增强改性、有机材料共混改性及表面改性等,可进一步提高 PEEK 的热力学性能和耐摩擦磨损性能,改善其在无润滑、高温、高负载、腐蚀等严酷环境下的使用性能,扩大了其应用范围。国内外对各种改性方法得到的 PEEK 复合材料摩擦方面进行了大量的研究,但是纳米材料的团聚以及无机有机物的相容性仍是目前亟待解决的重要问题,寻求更多的增强体和简便复合工艺以实现材料更优性价比是今后的研究重点之一。

参考文献

- [1] 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(6):828-835.
- [2] 田爱国,郭强. 聚醚醚酮及其复合材料的特性与应用研究[J]. 工程塑料应用,2002,30(2):47-49.
TIAN Ai-guo, GUO Qiang. The characteristics and application of PEEK composites[J]. Engineering Plastics Application, 2002, 30(2):47-49.
- [3] 郭强,田爱国,罗唯力. PEEK 在气体压缩机阀片上的应用研究[J]. 上海化工,1997,22(6):12-16.
GUO Qiang, TIAN Ai-guo, LUO Wei-li. Studies on the application of PEEK for cap-valves in gas-compressor [J]. Shanghai Chemical Industry, 1997, 22(6):12-16.
- [4] 付国太,刘洪军,张柏,等. PEEK 的特性及应用[J]. 工程塑料应用,2006,34(10):69-71.
FU Guo-tai, LIU Hong-jun, ZHANG Bo, et al. Characteristics and applications of PEEK[J]. Engineering Plastics Application, 2006,34(10):69-71.
- [5] 王喜梅,齐贵亮,蔡江涛,等. PEEK 改性研究进展[J]. 工程塑料应用,2009,37(2):80-83.
WANG Xi-mei, QI Gui-liang, CAI Jiang-tao, et al. Research progress of PEEK modification[J]. Engineering Plastics Application, 2009,37(2):80-83.
- [6] 刘焕彬,陈小泉. 纳米科学与技术导论[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [7] KELSALL ROBERT, HAMLEY IAN, GERGHENAN MARK. 纳米科学与技术[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [8] KUO M C, TSAI C M, HUANG J C. PEEK composites reinforced by nano-sized SiO₂ and Al₂O₃ particles[J]. Materials and Physics, 2005, 90(1):185-195.
- [9] CHRISTIAN J, SCHWARTZ S. Studies on the tribological behavior and transfer film-counterface bond strength for polyphenylene sulfide filled with nanoscale alumina particles [J]. Wear, 2000,237(2):261-273.
- [10] YU Lai-gui. Processing of nano-scaled silicon powders to prepare slip cast structural ceramics[J]. J Appl Polym Sci, 2000, 76(2): 179-184.
- [11] 彭旭东,马红玉,雷毅. 纳米 Al₂O₃ 和聚四氟乙烯填充聚醚醚酮基复合材料摩擦学特性研究[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2004, 28(2):68-74.
PENG Xu-dong, MA Hong-yu, LEI Yi. Tribological behaviors of polyetheretherketone composites filled with nanometer Al₂O₃ and polytetrafluoroethylene[J]. Journal of China University of Petroleum;Edition of Natural Science, 2004, 28(2):68-74.
- [12] 王齐华,薛群基,沈维长. 纳米 SiC 和微米 SiC 填充聚醚醚酮的磨损机理研究[J]. 功能材料,1999,29(5): 558-560.
WANG Qi-hua, XUE Qun-ji, SHEN Wei-chang. Friction and wear properties of PEEK filled with nano-SiC and micro-SiC [J]. Journal of Functional Materials,1999,29(5): 558-560.
- [13] 刘玲玲. 颗粒填充聚醚醚酮复合材料的生物摩擦学性能研究[D]. 南京:南京理工大学,2006.
- [14] QIANG Hong-bin, GUO Qiang, TIAN Ai-guo, et al. A study on friction and wear characteristics of nanometer Al₂O₃/PEEK composites under the dry sliding condition[J]. Tribology International, 2007, 40(1):105-110.
- [15] FLOCK J, FRIEDRICH K, YUAN Q. On the friction and wear behavior of PAN and pitch-carbon fiber reinforced PEEK composites[J]. Wear, 1999, 225-229(4): 304-311.
- [16] 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): 795-799.
- [17] ZHANG Z, BREIDT C, CHANG L, et al. Wear of PEEK composites related to their mechanical performances [J]. Tribology International, 2004,37(3):271-277.
- [18] BIJWE J, NIDHI. Potential of fibres and solid lubricants to enhance the tribo-utility of PEEK in adverse operating conditions [J]. Industrial Lubrication Tribology, 2007,59(4):156-165.
- [19] 贾均红,陈建敏,周惠娣,等. 碳纤维增强聚醚醚酮复合材料在水润滑下的摩擦学行为[J]. 高分子材料科学与工程, 2005,21(2): 208-212.
JIA Jun-hong, CHEN Jian-min, ZHOU Hui-di, et al. The tribological properties of carbon fiber reinforced PEEK composites under water lubrication[J]. Polymeric Material Science & Engineering, 2005,21(2):208-212.
- [20] HANCHI J, EISSLER N S. Dry sliding friction and wear of short carbon-fiber-reinforced polyetheretherketone (PEEK) at elevated temperatures[J]. Wear, 1997, 203-204(3): 380-386.
- [21] XU Liu-jie, DAVIM J P, CARDOSO R. Prediction on tribological behaviour of composite PEEK-CF30 using artificial neural networks[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 189(1-3):374-378.
- [22] 李志方. 碳酸钙晶须增强 PEEK 复合材料的摩擦学性能研究[D]. 福州:福州大学,2005.
- [23] 李恩重,徐滨士,王海斗,等. 高速条件下玻璃纤维增强 PEEK 复合材料干摩擦性能研究[J]. 工程塑料应用,2012, 40(5):62-65.
LI En-zhong, XU Bin-shi, WANG Hai-dou, et al. Investigation

of dry tribological behavior of short glass fiber reinforced polyetheretherketone composites at high-speed conditions[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(5):62-65.

[24] JAYASHREE BIJWE, SUKANTA SEN. Influence of PTFE content in PEEK-PTFE blends on mechanical properties and tri-performance in various wear modes [J]. Wear, 2005, 258(10): 1536-1542.

[25] YAMAMOTO YUJI, HASHIMOTO MASAOKI. Friction and wear of water lubricated PEEK and PPS sliding contacts; part 2. Composites with carbon or glass fibre [J]. Wear, 2004, 257(1-2):181-189.

[26] 颜红侠, 宁荣昌, 黄英. PEEK 复合材料的性能研究[J]. 塑料工业, 2002, 30(4):44-45.
YAN Hong-xia, NING Rong-chang, HUANG Ying. Study of PEEK composite[J]. Plastic Engineering, 2002, 30(4):44-45.

[27] 龙春光, 吴茵, 华煜煜, 等. 不同载荷下 Ekonol/G/MoS₂/PEEK 复合材料摩擦学性能[J]. 机械工程材料, 2005, 29(7):53-55.
LONG Chun-guang, WU Yin, HUA Man-yu, et al. Tribological behavior of the Ekonol/G/MoS₂/PEEK under different applied load[J]. Mechanical Engineering Materials, 2005, 29(7): 53-55.

[28] 赵纯, 张玉龙. 聚醚醚酮[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.

[29] LAURENSA P, SADRASA B, DECOBERT B F, et al. Enhancement of the adhesive bonding properties of PEEK by excimer laser treatment[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1998, 18(1):19-27.

[30] CHANTAL G LAMONTAGNEA, GERALD N MANUEL PILLAIA, EMMA A TAYLOR B, et al. Normal and oblique hyper-velocity impacts on carbon fibre/PEEK composites[J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 23(1): 519-532.

[31] 陈亚莉. 高性能热塑性复合材料在飞机上的应用[J]. 航空维修与工程, 2003, (3):28-30.
CHEN Ya-li. Application of thermoplastic composite on aircraft [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2003, (3):28-30.

[32] 冯显灿, 张人佶. 聚醚醚酮及其复合材料的摩擦学研究进展[J]. 材料研究学报, 2002, 16(1):1-8.
FENG Xian-can, ZHANG Ren-ji. The tribological research pro-

(上接第 90 页)

LIU Y, LUO C T, YE Z Y, et al. Tribological behavior of MoS₂/graphite sputtering coatings under various load in vacuum [J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(11): 131-132, 169.

[7] RENEVIER N M, HAMPHIER J, FOX V C, et al. Advantages of using self-lubricating, hard wear-resistant MoS₂ based coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 142-144(6):67-77.

[8] DONNET C, MARTIN J M. Super-low friction of MoS₂ coating in various environments[J]. Tribology International, 1999, 29(13):123-128.

[9] 林春华, 葛祥荣. 电刷镀技术便览[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.

[10] 马国政, 徐滨士, 王海斗, 等. 多功能真空摩擦磨损试验机[P]. 中国专利:201110106243. X. 2011-04-27.

gress of PEEK composite[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2002, 16(1):1-8.

[33] SBB Tech 选择 VICTREX® PEEK® 聚合物制造机器人减速装置[J]. 电子工业专用设备, 2009, 179(12):55.
SBB Tech produced the robot speed cut equipment by the VICTREX® PEEK® composite[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2009, 179(12):55.

[34] SKF 用 VICTREX® PEEK® 聚合物材料制造出高性能汽车滚动轴承保持架[J]. 国外塑料, 2008, 26(3):77.
SKF produced the high performance car rolling bearing retainer by the VICTREX® PEEK® composite [J]. World Plastics, 2008, 26(3):77.

[35] 林有希, 高诚辉. 汽车用聚醚醚酮复合材料研究[J]. 汽车技术, 2005, (12):34-37.
LIN You-xi, GAO Cheng-hui. Study on polyetheretherketone compound material for automotive[J]. Automobile Technology, 2005, (12):34-37.

[36] 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.

[37] 李玉芳, 伍小明. 特种工程塑料聚醚醚酮的生产应用及发展前景[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2005, 3(3):7-11.
LI Yu-fang, WU Xiao-ming. Production, application and development prospects of special engineering plastics polyetheretherketone[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2005, 3(3):7-11.

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)

收稿日期: 2011-10-12; 修订日期: 2012-01-11

作者简介: 李恩重(1985—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事再制造工程与高分子材料工程方面研究工作, 联系地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室(100072), E-mail: enzhongl@sina.com

[11] STEINMANN M, MULLER A, MEERKAMM H. A new type of tribological coating for machine elements based on carbon, molybdenum disulphide and titanium diboride [J]. Tribology International, 2004, 37(17):879-885.

基金项目: 国家杰出青年科学基金(51125023); 国家 973 计划项目(2011CB013405); 北京市自然科学基金重大项目支持(3120001)

收稿日期: 2012-03-07; 修订日期: 2012-04-16

作者简介: 张森(1987—), 男, 硕士, 研究方向为空间摩擦学, 联系地址: 天津市红桥区丁字沽光荣道 8 号河北工业大学南院材料加工楼 205 室(300130), E-mail: zhangsencpa@126.com
通讯作者: 王海斗(1969—), 男, 教授, 联系地址: 北京市丰台区长辛店杜家坎 21 号装备再制造国防科技重点实验室(100072), E-mail: wang-haidou@tsinghua.org.cn