http://pmse.scu.edu.cn

与45钢对摩材料干摩擦条件下的摩擦学性能

张金鹏[1]，张玮炜[3]，齐 瑾[2]，王小静[1]，朱丽慧[2]，金 健[1]
（1.上海大学 机电工程与自动化学院，上海 200444；2.上海大学 材料科学与工程学院，上海 200444；3.上海船舶设备研究所，上海 200031）

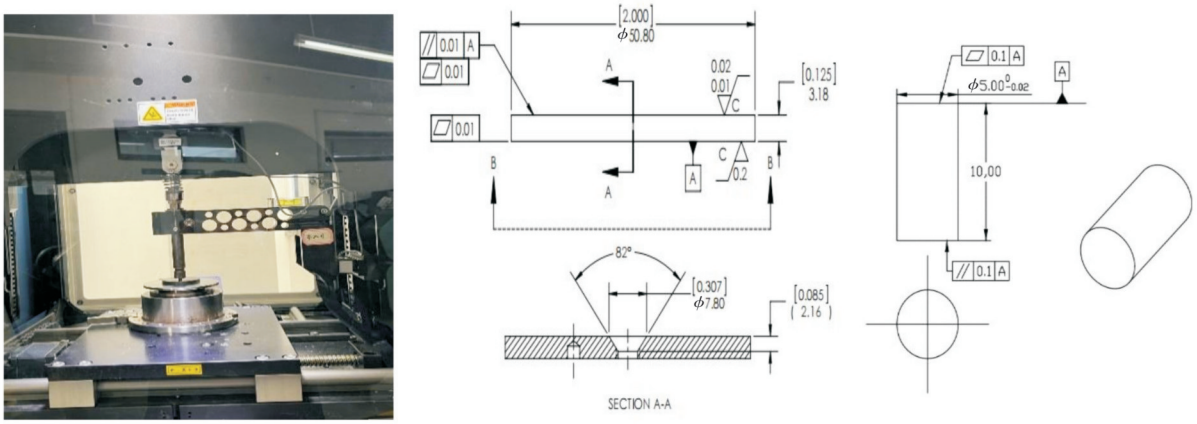
摘要：为选择与45钢对摩的摩擦副材料以适应干摩擦苛刻工况，采用RTEC多功能摩擦试验机，对超高分子量聚乙烯(UHMWPE)、改性聚醚醚酮树脂（改性PEEK）、浸渍呋喃树脂碳石墨(M120K)和浸渍巴氏合金碳石墨(M120B)4种配副材料的摩擦学性能进行测试，并利用扫描电子显微镜对磨损表面进行观察和分析，从微观角度揭示了4种材料的摩擦磨损机理。结果表明，随着载荷和转速的增加，平均摩擦系数大致呈现出M120B＜UHMWPE＜改性PEEK＜M120K的规律，磨损率则大致呈现出M120B＜改性PEEK＜M120K＜UHMWPE的规律。当载荷增大时，UHMWPE和M120K由磨粒磨损逐渐转变为粘着磨损；改性PEEK以粘着磨损为主并伴随轻微的磨粒磨损；M120B表现出磨粒磨损与粘着磨损共存的形式。当转速增大时，UHMWPE和M120B以磨粒磨损为主并伴随轻微的粘着磨损；改性PEEK和M120K以粘着磨损为主并伴随轻微的磨粒磨损。

关键词：45钢对摩材料；干摩擦；摩擦系数；磨损机理
中图分类号：TG142.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2024）02-0115-09

船舶调距桨螺距指示机构摩擦块与45钢组成摩擦副，在干摩擦状态下工作，耐磨性是其重要的性能指标。浸渍呋喃树脂碳石墨是该机构摩擦块广泛应用的材料之一，其虽然具有低摩擦、耐腐蚀、导热性好等突出优点[1~3]，但经历了较长的服役时间后极易发生严重磨损的现象，因而寻找新的耐磨材料成为当前亟待解决的问题之一。相对于浸渍石墨材料，聚合物及其复合材料则具有低密度、高韧性、耐磨、抗疲劳等优良性能[4,5]，使其有望替代现役材料成为新的减磨耐磨材料。在过去的几十年里，聚合物和浸渍石墨材料的摩擦磨损行为得到了学者们的广泛关注和研究。这些研究主要分为2个方面：一方面通过对这两类材料进行改性、复合、填充或者浸渍等处理来提升其摩擦学性能[6~8]；另一方面通过深入研究这两类材料的摩擦磨损机理，揭示材料的摩擦学本质，为材料的改进和选用提供科学依据[9,10]。

对聚合物材料进行复合改性处理虽然可以提高基体材料的摩擦学性能，但也可能导致材料其他方面性能的下降[11]。石墨作为良好的减磨耐磨材料，在干燥环境中表现出的低摩擦和磨损行为是由于其层状结构和较弱的平面间范德华力[12]。浸渍石墨在滑动条件下表现出的低摩擦和低磨损率主要是形成了稳定的转移膜[13,14]和石墨平面的重新定向[15]。当前大部分学者只研究了聚合物材料或者浸渍石墨材料的摩擦学行为，很少有学者对这2类材料进行对比研究。而本文选取了超高分子量聚乙烯（UHMWPE）、改性聚醚醚酮树脂材料（改性PEEK）2种聚合物材料和浸渍呋喃树脂碳石墨、浸渍巴氏合金碳石墨2种浸渍石墨材料，对比研究了这4种材料摩擦系数、磨损率和磨损表面形貌，并分析了不同试验条件下这4种材料的摩擦磨损机理。本文研究结果对干摩擦条件下聚合物材料和浸渍石墨材料的使用及

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0029
收稿日期：2023-04-19
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52075311）
通讯联系人：王小静，主要从事滑动轴承与转子动力学研究，E-mail: xjwangshu@126.com



(a) (b) (c)

Fig. 1 Test equipment and test piece processing dimensions
(a): testing equipment; (b): disc sample; (c): pin sample

选择提供了一定借鉴和帮助。

1 实验部分

1.1 试验原料及设备

UHMWPE(密度0.93 g/cm³,白色)、改性PEEK(棕黑色,密度1.46 g/cm³):以上2种材料均购于上海品塑贸易有限公司;浸渍呋喃树脂碳石墨(M120K):黑色,密度1.7 g/cm³,购于太仓市明宇密封件有限公司;浸渍巴氏合金碳石墨(M120B):黑色,密度2.3 g/cm³,购于四川自贡升力碳制品有限公司。

利用Rtec摩擦磨损试验机开展销盘试验,上试样为4种材料的销,尺寸为Φ10×5 mm,下试样为45钢盘,尺寸为Φ50.8×3.18 mm,销盘均采用机加工方式加工成试验要求尺寸,销盘接触示意图以及销盘尺寸如Fig.1所示。

1.2 测试与表征

1.2.1 *摩擦磨损性能测试*:采用Rtec多功能摩擦试验机(美国),进行空气环境下的干摩擦实验,其中,环境温度约为23 ℃,相对湿度约为R_H30%。试验前将销盘用无水乙醇进行超声清洗,干燥后称量备用。试验过程中销试样固定在试验机夹具上,盘试样与主轴一起旋转并与销试样表面对摩,旋转半径为16 mm。试验在定速变载和定载变速条件下进行,定速变载实验时,转速为200 r/min,对应旋转线速度为0.32 m/s,载荷选取为60 N,80 N,100 N和120 N。定载变速实验是,载荷为100 N,转速选取为150 r/min,200 r/min和250 r/min,对应旋转线速度分别为0.24 m/s,0.32 m/s和0.40 m/s。每组试验重复3次取平均值。试验完成后对销试样进行超声清洗,干燥后称量,利用美国奥豪斯精密电子分析天平(精度0.1 mg)称量出试验前后销试样的质量(每个试样称量5次取平均值),摩擦系数由试验机软件直接采集,利用如式(1)计算出销试样的磨损率

$$k=\frac{\Delta m}{\rho NL} \tag{1}$$

式中:k——体积磨损率,mm³/(N·m);Δm——磨损前后试样的质量差,g;ρ——试样的密度,g/mm³;N——试样受到的法向载荷,N;L——总的滑动距离,m。

1.2.2 *磨损形貌表征*:为了深入分析这4种材料的摩擦磨损机理,利用Leica EM ACE600喷金仪对试验处理后的销试样表面进行喷金处理,采用日本日立公司Regulus 8230冷场发射扫描电子显微镜进行摩擦表面形貌观察与分析,扫描电压18 kV,分辨率0.6 nm。

2 结果与讨论

2.1 载荷和转速对摩擦系数的影响

Fig.2(a)和Fig.2(b)显示了随载荷和转速增加,4种材料平均摩擦系数变化趋势图。从Fig.2(a)中可以看出,当载荷增大时,UHMWPE的平均摩擦系数先迅速减小而后缓慢增加,在80 N时摩擦系数取得最小值0.188;当载荷增大时,改性PEEK的平均摩擦系数先小幅度增加而后缓慢减小,80 N时摩擦系数为最大值0.213;M120K的平均摩擦系数先大幅增加

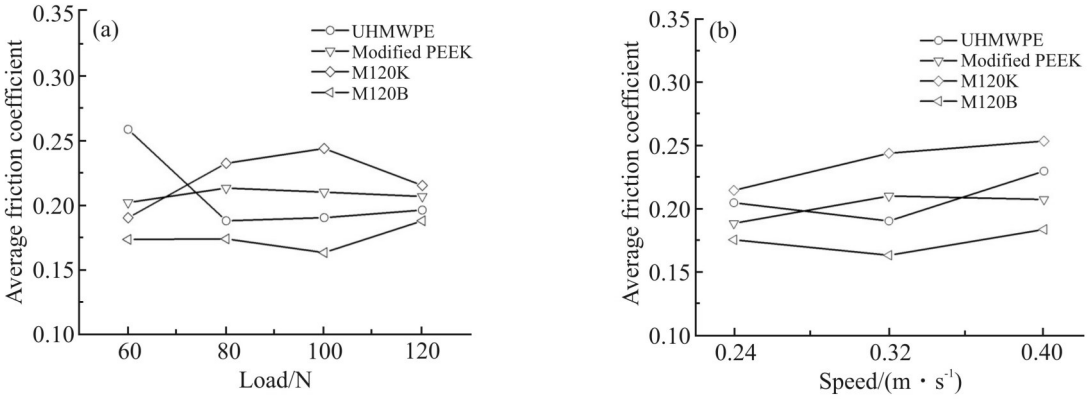


Fig. 2 Effect of (a)load and (b)speed on average friction coefficient of UHMWPE, modified PEEK, M120K and M120B

而后迅速减小，100 N时摩擦系数取得最大值0.244；当载荷增大时，M120B的平均摩擦系数呈现出先缓慢增加后小幅减小而后快速增加的趋势，120 N时摩擦系数取得最大值0.188。结果表明，在一定范围内，M120B这种浸渍石墨材料与UHMWPE和改性PEEK这2种聚合物材料平均摩擦系数相差不大，且都小于M120K的平均摩擦系数。

从Fig.2(b)中可以看出，当转速增加时，UHMWPE的平均摩擦系数先减小而后突然增加，在0.32 m/s时平均摩擦系数取得最小值0.190；当转速增加时，改性PEEK的平均摩擦系数先突然增加而后缓慢减小，0.32 m/s时平均摩擦系数取得最大值0.210；当转速增加时，M120K的平均摩擦系数呈上升趋势，0.24 m/s时平均摩擦系数取得最小值0.215；当转速增加时，M120B平均摩擦系数先减小后增加，0.32 m/s时摩擦系数取得最小值0.163。结果表明，UHMWPE和改性PEEK这2种聚合物材料平均摩擦系数较为接近，且都小于M120K的平均摩擦系数，M120B平均摩擦系数最小。

由Fig.2可知，随着载荷和转速增加，4种材料平均摩擦系数大致呈现出M120B＜UHMWPE＜改性PEEK＜M120K的规律。这主要是因为摩擦热使UHMWPE分子链活性增大，UHMWPE材料表层分子容易取向,从而降低了摩擦系数。当载荷转速继续增加时，UHMWPE分子链构象难以在应力作用下进行快速调整，易造成磨粒对UHMWPE的切削，导致摩擦系数有所增加；改性PEEK熔点和软化点较低，摩擦过程中易发生粘着磨损，导致其摩擦系数有所增加。载荷转速继续增加，摩擦表面形成了一层更为完整的转移膜，导致其摩擦系数有所减小；M120K中的呋喃树脂熔点较低，摩擦过程中粘着磨损不断加剧，从而表现出了较高的摩擦系数。M120B中的金属颗粒在摩擦过程中能够填充在石墨孔隙当中，从而在摩擦表面形成一层抗磨润滑层，使M120B表现出了较低的摩擦系数。

2.2　载荷和转速对磨损率的影响

Fig.3(a)和Fig.3(b)分别显示了随着载荷和转速增加，4种材料磨损率变化趋势图。从Fig.3(a)中可以看出，随着载荷的增加，UHMWPE的磨损率呈现出先增加后减小的趋势；改性PEEK的磨损率则呈现出大幅减小的趋势；M120K的磨损率呈现出不断减小的趋势；M120B的磨损率呈现出先减小后增加的趋势。当转速为0.32 m/s、载荷为60 N时，UHMWPE磨损率最高为9.41×10^{6} mm^3/(N·m)，分别是M120K、改性PEEK和M120B磨损率的1.08倍、1.44倍和2.06倍；载荷为80 N时，UHMWPE磨损率增至10.47×10^{6} mm^3/(N·m)，分别是M120K、改性PEEK和M120B磨损率的1.36倍、2.54倍和3.58倍；当载荷增加至100 N时，UHMWPE的磨损率减小为9.45×10^{6} mm^3/(N·m)，分别是M120K、改性PEEK和M120B磨损率的1.37倍、3.96倍和5.46倍；载荷增加至120 N时，UHMWPE的磨损率减至9.36×10^{6} mm^3/(N·m)，分别是M120K，M120B和改性PEEK磨损率的1.54倍、4.33倍和6.59倍；

从Fig.3(b)中可以看出，随着转速的增加，UHMWPE的磨损率呈现出先突然减小而后缓慢增加的趋势；改性PEEK的磨损率呈现出快速减小的趋势；M120K的磨损率呈现出不断减小的趋势，M120B的

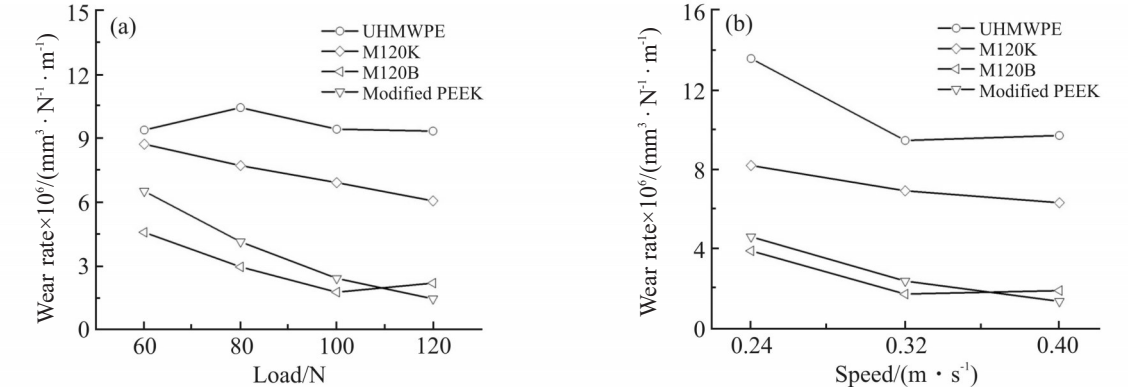


Fig. 3 Effect of (a)load and (b)speed on wear of UHMWPE, modified PEEK, M120K and M120B

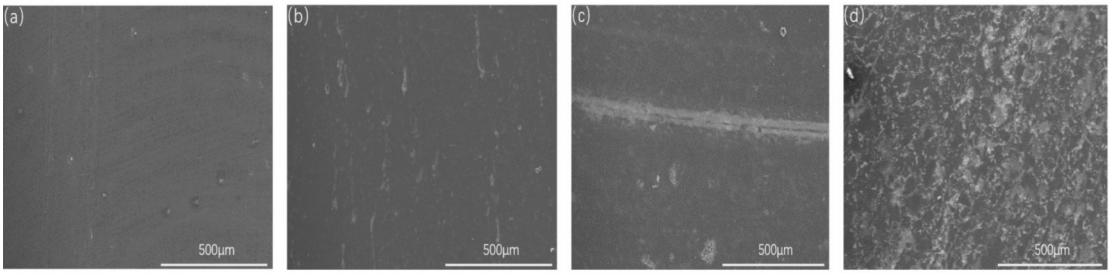


Fig. 4 Wear surface morphology of (a)UHMWPE, (b)modified PEEK, (c)M120K and (d)M120B under load of 60 N

磨损率呈现出先突然减小而后缓慢增加的趋势。当转速为0.24 m/s时，UHMWPE磨损率最高为13.56×10^6 $mm^3/(N \cdot m)$，分别是M120K、改性PEEK和M120B磨损率的1.66倍、2.94倍和3.48倍；当转速为0.32 m/s时，UHMWPE磨损率突然减小至9.45×10^6 $mm^3/(N \cdot m)$，分别是M120K、改性PEEK和M120B磨损率的1.37倍、3.97倍和5.47倍；当转速为0.40 m/s时，改性PEEK磨损率增至9.70×10^6 $mm^3/(N \cdot m)$，分别是M120K，M120B和改性PEEK磨损率的1.53倍、5.09倍和7.12倍。

从Fig.3可知，随着载荷和转速增加，4种材料磨损率大致呈现出M120B＜改性PEEK＜M120K＜UHMWPE的规律。这是因为在摩擦过程中，UHMWPE表面粗糙峰易受到挤压、切削进而发生断裂、脱落而产生大量磨屑，从而呈现出了较高的磨损率；改性PEEK在摩擦过程中能够在摩擦表面形成一层转移膜，在一定范围内，随着载荷和转速的增加，形成的转移膜更加完整，从而降低了磨损率；载荷转速增加，摩擦表面温升加剧，被撕裂的呋喃树脂受热与石墨屑彼此交联固化，在摩擦表面形成了一层转移膜，从而降低了M120K的磨损率；摩擦过程中M120B在摩擦表面形成了一层致密的石墨金属转移膜，从而减小了磨损，当载荷转速继续增加时，多余的石墨屑团聚成为石墨粒，破坏了转移膜的完整性，导致磨损率有所增加。

2.3 磨损表面的形貌

2.3.1 定速变载条件下磨损表面的形貌：Fig.4显示了在定速（0.32 m/s）变载条件下UHMWPE、改性PEEK、M120K、M120B磨损表面的形貌。Fig.4可知，当载荷为60 N时，UHMWPE磨损表面伴随有细小磨屑颗粒物和浅显的划痕，如Fig.4(a)所示，属于轻微的磨粒磨损，这是因为较硬的45钢表面微凸体对较软的UHMWPE表面粗糙峰挤压、切削作用产生磨屑，磨屑沿滑动方向对材料产生了轻微的犁削作用，导致了划痕的产生。载荷为60 N时，改性PEEK磨损表面分布着稀疏的粘着剥落坑，如Fig.4(b)所示，此时发生了轻微的粘着磨损。当载荷较小时，摩擦表面温升较低，45钢表面硬粗糙峰对改性PEEK软表面切削作用较弱，粘着点处部分材料撕裂下来导致了粘着剥落坑的产生。载荷为60 N时，M120K的磨损表面分布着长而宽的划痕，如Fig.4(c)所示，此时发生了较为严重的磨粒磨损。在压应力作用

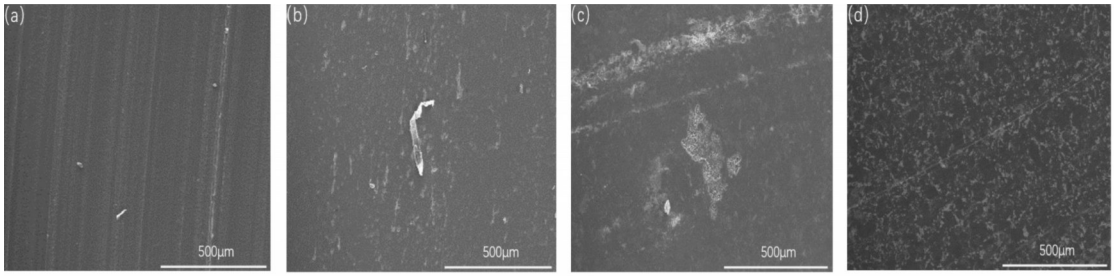


Fig. 5 Wear surface morphology of (a)UHMWPE, (b)modified PEEK, (c)M120K and (d)M120B under load of 80 N

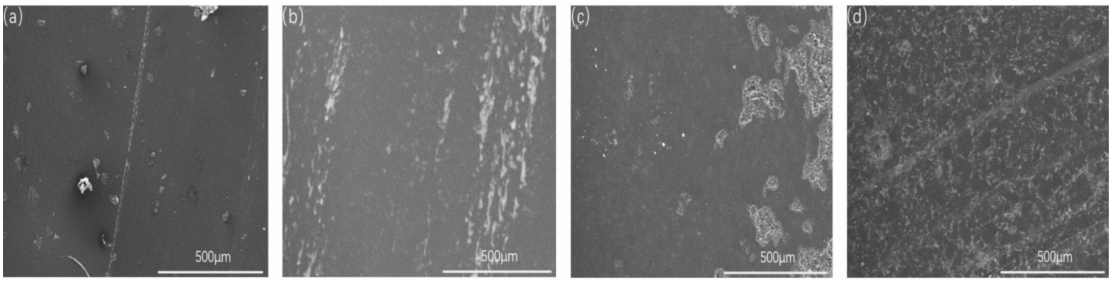


Fig. 6 Wear surface morphology of (a)UHMWPE, (b)modified PEEK, (c)M120K and (d)M120B under load of 100 N

下,45钢表面微凸体嵌入了较软的浸树脂石墨材料中,并沿着滑动方向产生犁耕作用,粗糙峰之间脆断作用产生的磨粒嵌入到表面一定深度时,其应力陡然增加,会进一步引起材料表面划伤。载荷为60 N时,M120B的磨损表面出现了大量交错分布的白色粘着组织,如Fig.4(d)所示。此时主要发生了粘着磨损。这是因为45钢表面微凸体与M120B表面粗糙峰相互切削时,在表面压应力和剪切力作用下,石墨晶体发生层间分离,导致石墨鳞片断裂形成石墨屑,石墨碎片黏附在摩擦表面上从而出现了大量交错分布的粘着组织。

当载荷为80 N时,UHMWPE的摩擦表面上存在粗大的磨粒和密集连续的细长划痕,如Fig.5(a)所示,此时磨粒磨损加剧。载荷增大,45钢表面的粗糙峰进一步嵌入UHMWPE表面,犁耕作用加剧,导致了细长犁沟划痕的产生,并生成了颗粒状磨屑。载荷为80 N时,改性PEEK的磨损表面出现了密集的长条状剥落坑和细长纤维组织及部分磨屑,如Fig.5(b)所示,此时粘着磨损进一步加剧并伴随轻微的磨粒磨损。这是因为载荷增加,45钢表面的硬粗糙峰进一步嵌入材料表面,在粗糙峰切削作用下材料脆断形成磨屑,脱落磨屑在挤压扭转作用下形成了长条状纤维组织。载荷为80 N时,M120K的磨损表面出现了带有脊缘的犁沟和粘着组织,如Fig.5(c)所示,此时发生了严重的磨粒磨损和粘着磨损。这是因为载荷增加,粗糙峰进一步嵌入M120K中,在滑动作用下推挤材料,使之塑性流动并犁出沟槽。材料从沟槽向侧边堆积转移,在周期性疲劳应力作用下,材料沿沟槽的侧面形成了脊缘[16]。载荷为80 N时,M120B的磨损表面出现了细长划痕,磨损表面组织分布较为均匀,如Fig.5(d)所示,发生了磨粒磨损和粘着磨损。这是因为载荷增加导致部分石墨碎片凝聚成团,形成了石墨粒,石墨粒在压应力作用下嵌入材料之中,沿滑动方向对材料起到了犁削作用,导致了细长划痕的产生。

当载荷为100 N时,UHMWPE的磨损表面分布着粗大磨粒并出现了较深的犁沟状划痕,如Fig.6(a)所示,发生了严重的磨粒磨损。这是因为载荷增加导致磨屑颗粒团聚加剧,从而形成了粗大磨粒,磨粒对UHMWPE表面犁削作用加剧,导致了犁沟状划痕的产生。载荷为100 N时,改性PEEK磨损表面的长条带状剥落坑交错连接在一起形成了剥落坑群,如Fig.6(b)所示,此时发生了严重的粘着磨损。在表面交变应力作用下,剥落坑周围材料发生了疲劳剥落,并进一步向邻近剥落坑扩展,导致剥落坑连接在一起形成了剥落坑群。载荷为100 N时,M120K的磨损表面分布有大量粘着组织和部分白色细小磨粒,如Fig.6(c)所示,此时发生了严重的粘着磨损和轻微

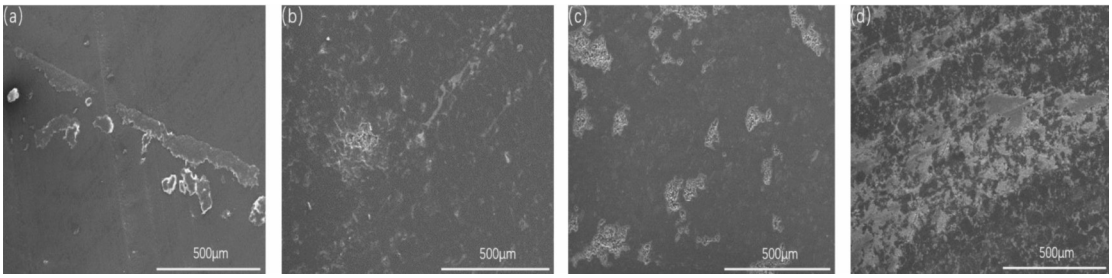


Fig. 7 Wear surface morphology of (a)UHMWPE, (b)modified PEEK, (c)M120K and (d)M120B under load of 120 N

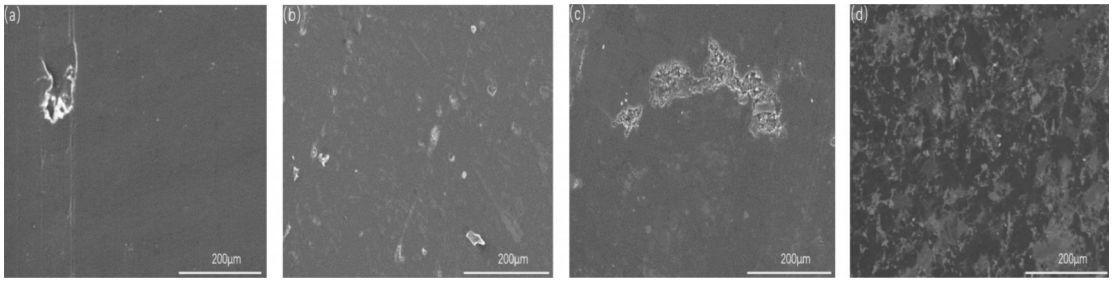


Fig. 8 Surface morphology of (a)UHMWPE, (b)modified PEEK, (c)M120K and (d)M120B worn surfaces at a speed of 0.24 m/s

的磨粒磨损。载荷进一步增加，导致摩擦副实际接触点处局部应力增加，引起材料塑性变形加剧，同时材料表面摩擦温升加剧，导致材料粘着效应加剧，发生了较为严重的粘着磨损。载荷为100 N时，M120B的磨损表面出现了长而宽的浅犁沟和部分磨粒，如Fig.6(d)所示，此时发生了较为严重的磨粒磨损。载荷增加导致45钢表面硬粗糙峰嵌入M120B表面程度加深，粗糙峰的相互啮合、碰撞以及弹塑性变形加剧，导致大量片状石墨脱落形成石墨颗粒，石墨颗粒沿滑动方向对材料的犁耕作用加剧，导致了犁沟的形成。

当载荷为120 N时，UHMWPE的磨损表面出现了大量长条状粘着组织，如Fig.7(a)所示，此时主要发生了粘着磨损。这是因为载荷增加，微凸体或磨粒对UHMWPE表面的切削作用加剧，同时摩擦过程中产生的大量摩擦热使摩擦副表面温度急剧升高，高温导致UHMWPE分子链取向发生变化[17]，软化的磨屑颗粒更易黏附在对磨面上，加剧了粘着磨损。载荷为120 N时，改性PEEK的磨损表面出现了大面积的粘着层，如Fig.7(b)所示，此时发生了显著的粘着磨损。这是因为摩擦表面互相接触的粗糙峰剧烈对摩，导致摩擦表面温度迅速升高，粘着结合点的材料黏附在摩擦表面，导致了大面积粘着层的出现。载荷为120 N时，M120K的磨损表面出现了大面积粘着组织，如Fig.7(c)所示，此时发生了显著的粘着磨损。在高载荷和转速作用下，某些接触点局部压力超过该处材料屈服强度导致材料发生黏合，同时在剪切力和压应力作用下，粘着点处材料发生了严重的撕裂效应，导致大量材料迁移至摩擦表面，从而出现了大面积粘着层。载荷为120 N时，M120B的磨损表面分布着长而宽的深犁沟，并出现了大量裸露的剥落凹坑，如Fig.7(d)所示，此时发生了严重的磨粒磨损和粘着磨损。这是由于在高载作用下，两表面的微凸体之间的接触压力很大，造成接触点的粘着，在表面交变应力作用下，接触点材料发生着“粘着-剪断-再粘着”的循环过程，从而导致了大量粘着凹坑的产生。

2.3.2 *定载变速条件下磨损表面的形貌*：Fig.8为定载(100 N)变速条件下UHMWPE、改性PEEK、M120K、M120B磨损表面形貌图。由图可知，当转速为0.24 m/s时，UHMWPE的磨损表面存在细长划痕并散落分布着部分磨粒，表面存在粘着组织，如Fig.8(a)所示。此时发生了轻微的磨粒磨损和粘着磨损。细长划痕是由于45钢表面硬粗糙峰对UHMWPE软表面微观切削作用造成的，颗粒状磨屑是由于切削作用导致材料脱离表面形成的。转速为0.24 m/s时，改性PEEK的磨损表面分布着粘着剥落坑和散落的粗大磨粒，如Fig.8(b)所示。此时发生了较为

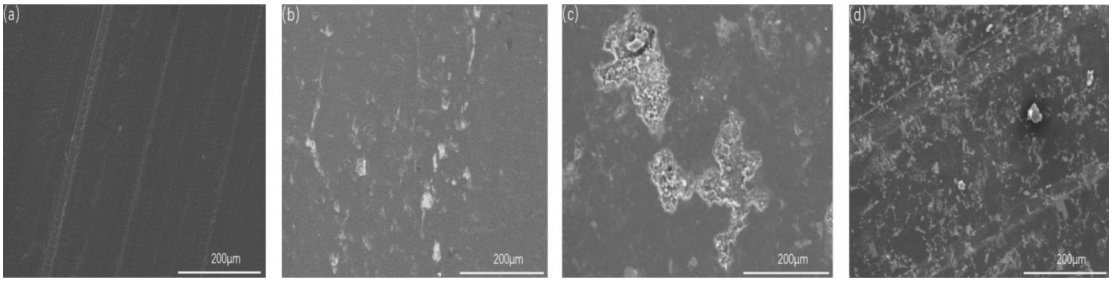


Fig. 9 Surface morphology of (a)UHMWPE, (b)modified PEEK, (c)M120K and (d)M120B worn surfaces at a speed of 0.32 m/s

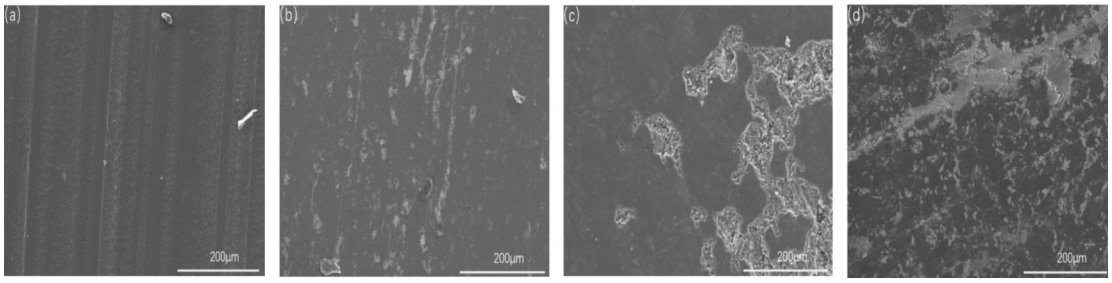


Fig. 10 Surface morphology of (a)UHMWPE, (b)modified PEEK, (c)M120K and (d)M120B worn surfaces at a speed of 0.40 m/s

严重磨粒磨损和粘着磨损。这是因为在滑动过程中，材料接触峰点因瞬时高温作用形成粘着点，粘着点因剪切而断裂，断裂点发生在粘着结合点附近，从而导致了粘着凹坑的出现。转速为0.24 m/s时，M120K磨损表面出现了一定面积的粘着组织和少量磨屑，如Fig.8(c)所示。此时发生了粘着磨损和磨粒磨损。这是因为在滑动过程中，粗糙峰之间的剪切作用导致材料塑形变形加剧和磨屑的产生，在表面压应力作用下，脆断的磨屑黏附在摩擦表面上形成粘着层。转速为0.24 m/s时，M120B磨损表面出现了细微划痕并散落着细小磨粒，如Fig.8(d)所示。此时发生了轻微的磨粒磨损。当转速较低时，摩擦表面相互接触粗糙峰之间的切削作用较弱，部分粗糙峰发生脆断形成磨粒，磨粒沿滑动方向产生了微弱的犁耕效应，导致了细微划痕的产生。

当转速为0.32 m/s时，UHMWPE的磨损表面出现了大量长条状划痕，如Fig.9(a)所示，此时发生了较为严重的磨粒磨损。这是由于转速增加导致45钢表面微凸体沿滑动方向的犁削效应加剧，在摩擦过程中形成的磨粒嵌入摩擦表面，进一步导致了“二体磨损”的加剧，从而形成了大量细长划痕。转速为0.32 m/s时，改性PEEK的磨损表面出现了大量粘着剥落深坑和部分粗大磨粒，剥落面积进一步增大，如Fig.9(b)所示，此时发生了严重的粘着磨损和磨粒磨损。速度增加导致相互接触的粗糙峰脆断加剧，同时转速增加导致粘着点温升加剧，粘着点材料发生“粘着-剪断-转移-再粘着”的循环过程，导致了粘着磨损的加剧。转速为0.32 m/s时，M120K的磨损表面出现了大面积的粘着层，如Fig.9(c)所示，此时粘着磨损进一步加剧。转速增加导致粗糙峰之间微观切削作用加剧，材料脆断导致大量磨屑产生，转速增加也会导致摩擦温升增加，粘着点材料塑性变形加剧，脱落的磨屑受到挤压和扭转作用交织在一起从而形成了大面积的粘着层。转速为0.32 m/s时，M120B的磨损表面出现了大量细长划痕并散落着粗大磨粒，如Fig.9(d)所示，此时磨粒磨损进一步加剧。转速增加导致45钢表面微凸体对M120B的犁削作用加剧，犁削产生的磨屑受到挤压和扭转作用凝聚成团，从而形成了粗大磨粒，磨粒沿滑动方向的犁耕效应导致了大量划痕产生。

当转速为0.40 m/s时，UHMWPE的磨损表面分布着密集的长条状划痕和粗大磨粒，如Fig.10(a)所示，此时发生了严重的磨粒磨损。高转速作用下，45钢表面的粗糙峰对UHMWPE表面的切削作用更为剧烈，从而形成了大量磨粒，磨粒进一步嵌入摩擦表面，并沿着滑动方向犁削出了大量划痕。转速为0.40 m/s时，改性PEEK的磨损表面出现了交错连接的长条状剥落坑带和粗大磨粒，剥落面积进一步增

加，如Fig.10(b)所示，此时发生了显著的粘着磨损和磨粒磨损。转速增加导致粘着点剪切作用加剧，粘着点处材料的碰撞断裂加剧，从而导致了长条状剥落坑带的形成。转速为0.40 m/s时，M120K的磨损表面出现了大面积交错连接的粘着组织，如Fig.10(c)所示，此时发生了严重的粘着磨损。高转速作用下，相互接触的粗糙峰点因瞬时高温作用而形成粘着结点，粘着结点材料在摩擦过程中发生撕裂脱落，并在挤压和扭转作用下形成了大面积交错连接的粘着组织。转速为0.40 m/s时，M120B的磨损表面存在长而宽的犁沟，如Fig.10(d)所示，此时主要发生了显著的磨粒磨损。在高转速作用下，相互接触材料粗糙峰之间微观切削作用加剧，材料脆断导致大量磨屑产生，这些磨屑在挤压和扭转作用下凝聚成团形成石墨颗粒，石墨颗粒沿滑动方向产生显著的犁耕效应，导致了粗大犁坑的产生，此时“二体磨损”效应较为显著。

3 结论

(1) 随着载荷和转速的增加，4种材料平均摩擦系数大致呈现出M120B＜UHMWPE＜改性PEEK＜M120K的规律，而磨损率大致呈现出了M120B＜改性PEEK＜M120K＜UHMWPE的规律。熔点和软化点较低的材料表现出了较高的摩擦系数，而转移膜生成能力强的材料表现出了较低的磨损量。

(2) 这4种材料磨损机理主要表现为磨粒磨损和粘着磨损2种形式。随着载荷和转速的增加，UHMWPE磨粒磨损不断加剧，并伴随轻微的粘着磨损；改性PEEK以粘着磨损为主并伴随一定程度的磨粒磨损；M120K由磨粒磨损为主逐渐转变为粘着磨损为主；M120B以磨粒磨损为主并伴随一定程度的粘着磨损。

本文通过开展与45钢对摩材料的摩擦学性能测试，解决了现役船舶调距桨螺距指示机构摩擦块材料易磨损问题，有利于相关材料在摩擦学领域的推广和应用。

参考文献：

[1] 肖云鹏,李双喜,李庆展,等.干摩擦机械密封端面材料配对性能的台架试验研究[J].润滑与密封,2020,45(2):99-104.
Xiao Y P, Li S X, Li Q Z, *et al*. Bench test study on matching performance of dry friction mechanical seal end materials[J]. Lubrication and Sealing, 2020, 45(2): 99-104.

[2] Zhu Z, Bai S, Wu J, *et al*. Friction and wear behavior of resin/graphite composite under dry sliding[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2015, 31: 325-330.

[3] Zhao J, Liu Y, Liu D, *et al.* The tribological performance of metal-/resin- impregnated graphite under harsh condition[J]. Lubricants, 2021, 10: 2.

[4] Hsissou R, Seghiri R, Benzekri Z, *et al.* Polymer composite materials: a comprehensive review[J]. Composite Structures, 2021, 262: 113640.

[5] 李志科,陈斯佳,马英杰,等.自润滑聚合物材料研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(8): 165-172.
Li Z K, Chen S J, Ma Y J, *et al*. Research progress of self-lubricating polymer materials [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(8): 165-172.

[6] Li N, Chen D, Gao X, *et al*. Biological tribology properties of the modified polyether ether ketone composite materials[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2020, 59: 399-405.

[7] Zhao J Y, Li Y J, Liu Y, *et al*. Friction and wear performances of impregnated graphite in ring-on-ring tribological test[J]. Tribology International, 2022, 174: 107715.

[8] 曹翔禹, 贾丹, 詹胜鹏, 等. 玻璃纤维改性超高分子量聚乙烯的热膨胀和摩擦学性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(7): 60-68.
Cao X Y, Jia D, Zhan S P, *et al*. Thermal expansion and tribological properties of glass fiber modified ultra high molecular weight polyethylene[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2022, 38(7): 60-68.

[9] Wang Q, Sun J, Yu M, *et al*. Study on the lubrication film formation and characteristics of different graphite seal composites[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 36: 3949-3959.

[10] Wang Q, Wang Y, Wang H, *et al*. Experimental investigation on tribological behavior of several polymer materials under reciprocating sliding and fretting wear conditions[J]. Tribology International, 2016, 104: 73-82.

[11] 刘爱萍, 付华, 刘圣华, 等. 不锈钢纤维/碳纤维混杂增强聚醚醚酮基摩擦材料的制备与性能[J]. 机械工程材料, 2007(2): 36-39.
Liu A P, Fu H, Liu S H, *et al*. Preparation and properties of stainless steel fiber/carbon fiber hybrid reinforced polyetheretherketone based friction materials[J]. Mechanical Engineering Materials, 2007(2): 36-39.

[12] Sung M K, Lee S. The effect of van der waals forces on the exfoliation of graphene sheets from graphite by frictional motion[J].

Journal of Nanoscience & Nanotechnology, 2016, 16:11529-11534.

[13] Morstein C E, Dienwiebel M. Graphite lubrication mechanisms under high mechanical load[J]. Wear, 2021, 477: 203794.

[14] Zhang E, Gao F, Fu R, *et al*. Tribological behavior of phenolic resin-based friction composites filled with graphite[J]. Materials, 2021, 14: 742.

[15] Ru G, Qi W, Tang K, *et al*. Interlayer friction and superlubricity in bilayer graphene and MoS_2/$MoSe_2$ van der Waals heterostructures[J]. Tribology International, 2020, 151: 106483.

[16] Zhu Z, Bai S, Wu J, *et al*. Friction and wear behavior of resin/graphite composite under dry sliding[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2015, 31: 325-330.

[17] 李飞,郭奕友,成惠斌,等. 超高分子量聚乙烯摩擦磨损行为及拉曼成像[J]. 高分子材料科学与工程,2020, 36(2):82-89.
Li F, Guo Y Y, Cheng H B, *et al.* Friction and wear behavior and raman imaging of ultra high molecular weight polyethylene [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020,36(2): 82-89.

Tribological Properties of Friction Material with 45 Steel Under Dry Friction Condition

Jinpeng Zhang[1], Weiwei Zhang[3], Jin Qi[2], Xiaojing Wang[1], Lihui Zhu[2], Jian Jin[1]

(*1. School of Mechatronic Engineering and Automation*, *Shanghai University*, *Shanghai 200444*, *China*;
2. School of Materials Science and Engineering, *Shanghai University*, *Shanghai 200444*, *China;*
3. Shanghai Marine Equipment Research Institute, Shanghai 200031, China)

ABSTRACT: In order to select the material of the friction pair for rubbing against 45 steel to adapt to the harsh working conditions of dry friction, the RTEC multifunctional friction testing machine was used to test the tribological properties of ultra-high molecular weight polyethylene(UHMWPE), modified polyether ether ketone resin(modified PEEK), the impregnated furan resin carbon graphite(M120K) and the impregnated Babbitt alloy carbon graphite (M120B), and the wearing surface was observed and analyzed by scanning electron microscope(SEM). The friction and wear mechanisms of these four materials were revealed. The results show that with the increase of load and speed, the average friction coefficient roughly presents the law of M120B<UHMWPE<modified PEEK<M120K, and the wear rate roughly presents the law of M120B<modified PEEK<M120K<UHMWPE. When the load increases, UHMWPE and M120K gradually change from abrasive wear to adhesive wear; modified PEEK is dominated by adhesive wear accompanied by slight abrasive wear; when the speed increases, UHMWPE and M120B are mainly abrasive wear accompanied by slight adhesive wear; modified PEEK and M120K are dominated by adhesive wear accompanied by a certain degree of abrasive wear.

Keywords: 45 steel anti-friction material; dry friction; friction coefficient; wear mechanism