

• 化学工程与材料工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.202001141



本刊网刊

纳米填料增强UHMWPE-橡胶水润滑摩擦学性能

杨东亚¹, 田松¹, 任俊芬^{2*}, 王宏刚², 高贵^{1,2}, 陈生圣², 李伟涛¹

(1.兰州理工大学机电工程学院, 甘肃兰州 730050; 2.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, 甘肃兰州 730000)

摘要:为了研究水润滑条件下试验载荷和速度对纳米磷化硅填料(Nano-SiC)改性超高分子量聚乙烯(UHMWPE)-橡胶复合材料摩擦学性能的影响,通过高温混炼、热压成型制备Nano-SiC辅以聚四氟乙烯(PTFE)填充改性UHMWPE-橡胶复合材料;采用MRH-3型环-块摩擦试验机探究4种不同载荷条件下复合材料的摩擦磨损性能,采用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)和非接触光学3维轮廓仪对试样微观磨损表面形貌分析,从微观层面探究改性复合材料的摩擦机理。试验结果表明:在定载变速条件下,速度由0.005 m/s升到0.541 m/s时,改性复合材料的动、静摩擦系数均呈现大幅下降趋势,摩擦系数波动归于平稳,黏-滑现象逐渐减弱直至消失。试验载荷和纳米粒子含量的变化与试样摩擦磨损程度呈负相关:在水润滑条件下,随着纳米粒子含量增加,摩擦系数与磨损率均出现明显降低,填充比例5%的复合材料摩擦学性能最佳,摩擦系数整体较UHMWPE-橡胶材料降低35%,磨损率降低46.6%,磨损表面形貌也随之发生改变;随着载荷的增加,复合材料的磨损率从 $1.25 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 降至 $0.40 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。Nano-SiC的含量与工况载荷压力对摩擦磨损均存在一定影响,即填充适量Nano-SiC的UHMWPE-橡胶复合材料能减轻黏-滑现象,与一定工况压力下的对偶钢环组成的摩擦副能有效改善摩擦性能,有利于减小水润滑轴承的磨损,增强传动系统服役寿命。

关键词:水润滑轴承;超高分子量聚乙烯;黏-滑现象

中图分类号:TH117.1

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2021)05-0191-08

Tribological Properties of UHMWPE-Rubber Reinforced by Nano Fillers Under Water Lubricated

YANG Dongya¹, TIAN Song¹, REN Junfen^{2*}, WANG Honggang², GAO Gui^{1,2}, CHEN Shengsheng², LI Weitao¹

(1.School of Mechanical and Electrical Eng., Lanzhou Univ. of Technol., Lanzhou 730050, China;

2.State Key Lab. of Solid Lubrication, Lanzhou Inst. of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to study the effect of test load and speed on the tribological properties of Nano-SiC modified ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE)-rubber composites under water lubrication condition, Nano-SiC and Polytetrafluoroethylene (PTFE) filled UHMWPE-rubber composites were prepared by high temperature mixing and hot pressing. The friction and wear properties of the composites under four different loading conditions were investigated by MRH-3 ring block friction tester. The micro wear surface morphology of the samples was analyzed by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) and non-contact optical three-dimensional profilometer, and the friction mechanism of the modified composites was explored from the micro layer surface. The experimental results show that when the speed increases from 0.005 m/s to 0.541 m/s, the dynamic and static friction coefficients of the modified composites show a significant downward trend, the fluctuation of the friction coefficient is stable, and the stick-slip phenomenon gradually weakens until it disappears. The change of test load and nano particle content are negatively related to the friction and wear degree. Under the condition of water lubrication, the friction coefficient and wear

收稿日期:2020-12-31

基金项目:国家自然科学基金项目(51675509)

作者简介:杨东亚(1977—),男,副教授.研究方向:润滑材料. E-mail: eastasiayang@163.com

*通信作者:任俊芬, E-mail: jfren@licp.cas.cn

网络出版时间:2021-08-27 09:10:10

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20210826.1121.003.html>

rate decrease obviously with the increase of nano particle content. The composite with 5% filling ratio has the best tribological performance. The friction coefficient and wear rate decrease 35% and 46.6% respectively compared with UHMWPE–rubber, and the worn surface morphology also changes; The wear rate of the composite decreases from $1.25 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ to $0.40 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$. The results showed that both the content of Nano–SiC and the load pressure have a certain influence on the friction and wear, that is, UHMWPE–rubber composite filled with appropriate amount of Nano–SiC can reduce the stick–slip phenomenon, and the friction pair composed of the dual steel ring under a certain load pressure can effectively improve the friction performance, which is conducive to reducing the wear of water lubricated bearing and enhancing the service life of ship transmission system.

Key words: water lubricated bearing; UHMWPE; stick–slip phenomenon

当今,对海洋环境日益关注,排放法规越发严格,必须尽量减少有害物质的排放,而油作为船舶轴承的润滑介质,一旦泄露,会造成污染影响海洋生态^[1–4]。因此,水润滑轴承因其结构简单,环境适应性好,运行成本低且抗噪声和抗冲击性好等特点,发展潜力巨大^[5]。但是,水润滑轴承在低速、重载及启停时,常会出现黏–滑现象,引起摩擦波动与摩擦噪声,导致寿命降低、噪声增大,对舰艇的安全性和隐蔽性造成隐患^[6]。此外,由于水膜的承载力较低,导致水润滑轴承常处于混合润滑甚至边界润滑状态,摩擦磨损加剧^[4]。要解决上述难题,研制水润滑性更好的轴承材料很关键。

近些年,越来越多的橡胶–塑料复合材料被尝试用于水润滑轴承,其性能表现优异,抗振动性好,抗冲击性强,低噪声且不会污染水环境。但缺点也很明显:承载能力低,设计比压低^[2,4],在启动、停机或低速运转等工况下会产生黏–滑现象,主要表现在摩擦振动异常和摩擦噪声过大,对舰船的轴承寿命和安全性带来隐患。相比其他非金属材料,超高分子量聚乙烯(ultra-high molecular weight polyethylene, UHMWPE)具有很好的耐摩擦性能、抗冲击性能、抗老化性能和耐低温性能^[7]。但由于其分子量太高,导致其熔体黏度高,流动性差,加工困难,与基体间界面结合强度低^[8–9]。而聚四氟乙烯(PTFE)因为优异的润滑性能、化学稳定性、耐腐蚀性、密封性和良好的抗老化性,在水润滑复合材料中被广泛使用^[10]。目前,用PTFE改性UHMWPE虽然在一定程度上改善了其摩擦系数,但工作时PTFE易从UHMWPE基体上脱落^[11],且受载时会产生蠕变,引起硬度变化,进而影响复合材料性能^[12–15]。纳米碳化硅(Nano–SiC)具有较好的硬度、耐高温性、耐磨性和耐腐蚀性等特点,是一种性能优异的新型改性材料。在高分子聚合物间加入微量纳米碳化硅可有效提升其摩擦性能和力学性能^[16–20],但针对纳米材料改性舰艇传动系统水润滑材料摩擦磨损性能的研究鲜见。

作者针对PTFE填充UHMWPE–橡胶材料水润滑轴承工作时存在的黏–滑现象、低承载力、高磨损率等问题,进一步采用Nano–SiC对其改性,研究不同

组分改性复合材料在不同载荷和速度下的摩擦磨损性能及对应的表面形貌变化规律,旨在探究Nano–SiC在水润滑条件下对UHMWPE–橡胶复合材料摩擦磨损特性的影响,为舰艇传动系统水润滑轴承的优化改进提供试验依据和理论指导。

1 试验部分

1.1 原料

超高分子量聚乙烯(UHMWPE):牌号GUR–4150,平均粒径120 μm。全硫化羧基丁腈橡胶:牌号VP501,平均粒径为30~50 μm;聚四氟乙烯(PTFE):牌号为XPP538,平均粒径为25 μm,苏威公司;Nano–SiC:平均粒径为50 nm,合肥开尔纳能源科技股份有限公司。

1.2 试样制备

将超高分子量聚乙烯与丁腈橡胶、聚四氟乙烯、纳米碳化硅按比例高速分散10 min,然后于Brabender混炼机中以177 ℃混炼30 min,取出样块在6 MPa、185 ℃条件下热压2 h成型,并加工成19 mm×12 mm×12 mm大小的试验试块。试验按表1共制备4种不同比例复合材料进行对比。

表 1 试样配比
Tab. 1 Sample formula

样品	% UHMWPE 丁腈橡胶 PTFE Nano–SiC			
A	73.0	27.0	0	0
B	65.7	24.3	10	0
C	65.7	24.3	9.5	0.5
D	65.7	24.3	5.0	5.0

1.3 材料性能测试与分析

1.3.1 硬度测试

根据GB/T531.1—2008标准采用XHS–D型邵氏硬度计对试验样品进行硬度测量并对比。

1.3.2 摩擦磨损性能测试

在济南益华MRH–3型环–块摩擦磨损试验机上对设计的材料进行水润滑摩擦磨损试验,采用的对偶环材质为GCr15,表面粗糙度为0.1 μm左右。试验条件为水润滑、室温环境,试验施加的载荷通过MII–B–17901标准计算得出分别为33、66、132与

200 N。试验变速条件同样对标MIL-B-17901,该标准的轴直径为17.145 cm(6.75英寸),结合标准和实际工况,将转速设置为8、17、35、70、105、140、210、348、870和1394 r/min,对应的线速度为20、44、90、180、270、360、541、896、2240、3589 mm/s,每5 min增速一次,试验时间50 min。最后,增加1组转速2 r/min,对应线速度为5 mm/s作为黏-滑现象对比条件。试验前使用酒精棉球擦洗试样与对偶钢环,试验后将试样放入100 ℃烘箱放置24 h后取出,再使用0.1 mg精度的电子分析天平对试块进行称重。摩擦系数由试验机自带软件进行采集,复合材料的体积磨损率由式(1)计算^[13]:

$$K = \frac{\Delta m}{\rho NL} \quad (1)$$

式中, K 为试样的体积磨损率, Δm 为试样在摩擦磨损试验前后的质量差, ρ 为试样密度, N 为试验加载载荷, L 为最终摩擦距离。每组样品重复3次试验,摩擦系数和质量差取其平均值。

1.3.3 表面形貌分析

试验样块磨损面喷金后采用JSM-6380LV扫描电子显微镜(SEM)对表面形貌进行分析表征;采用Microxam-800非接触式光学轮廓仪对比分析其磨损后3维形貌。

2 结果与讨论

2.1 Nano-SiC和PTFE对复合材料硬度的影响

图1为复合材料的硬度随Nano-SiC含量的改变而变化的趋势。

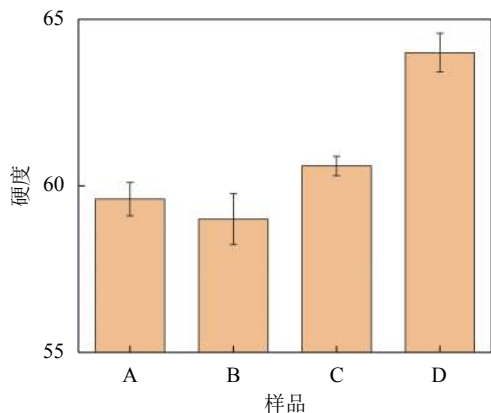


图1 Nano-SiC和PTFE对复合材料硬度的影响

Fig. 1 Effect of Nano-SiC and PTFE on the hardness of the composites

从图1可知:UHMWPE-橡胶材料A的硬度为59;B为材料加入10%PTFE后,复合材料硬度略有降低;当加入Nano-SiC后,复合材料的硬度有明显提升。随着纳米粒子含量增多,复合材料的硬度呈单调增

大趋势,加入的纳米粒子均匀嵌入UHMWPE基体材料中橡胶与PTFE颗粒空隙间,使材料的整体性提高,性能得到优化,从而复合材料的硬度有明显提高,这与前人结论一致^[14]。

2.2 水润滑条件下Nano-SiC对复合材料摩擦磨损性能的影响

2.2.1 不同速度下UHMWPE复合材料的黏-滑现象

图2显示了在不同速度水润滑条件下的D组试块与GCr15环之间的摩擦系数 μ 波动,进而表明了黏-滑现象的变化。5.15 mm/s速度下的摩擦系数如图2(a)所示,可以看出波动比较明显且幅度稳定。图2(b)为不同材料在37 s内摩擦系数的具体情况。一般来说,随着转动时间的增加,摩擦系数呈锯齿状波动,复合材料表面微凸体与对偶环在压力作用下逐渐冷焊并黏着;在黏着过程中,由于对偶环转动,摩擦系数逐渐增大(图2(b)中黏着过程);当摩擦力增大到足够破坏黏着点时,复合材料与对偶表面微凸体的黏着消失,摩擦系数急速下降到最低点(图2(b)中滑动过程);此时对偶环继续转动,环的另一部分与试样微凸体继续接触并发生黏着,摩擦系数再次增大并再次被破坏,往复如此。这种现象被称为材料的黏-滑现象。通过图2(b)还可以看出,不添加PTFE和Nano-SiC的材料的波动幅度最剧烈,黏-滑周期 T_a 更长;在加入10%PTFE后,黏-滑周期 T_b 缩短,波动幅度减小,黏-滑现象减弱;在加入Nano-SiC之后,摩擦系数的幅度和周期 T_d 均减小。此外,试验速度对黏-滑现象有显著影响,在最低速(5.15 mm/s)时,其波动幅度最大为0.024,波动周期最长为4 s;随着速度的增加,摩擦系数的波动幅度和波动周期逐渐减小,如图2(c)~(g)所示,当速度逐渐增加到270.36 mm/s时,波动幅度和波动周期均单调递减。由图2(b)和(g)可以看出,在相同速度条件下,随着Nano-SiC含量的增加,试样的摩擦波动逐渐平缓。在速度达到360 mm/s和541 mm/s(图2(h)和(i))时,摩擦系数波动趋于平稳,不再出现异常波动和噪声,此时可以确定黏-滑现象已消失。

2.2.2 复合材料动、静摩擦系数差值对黏-滑现象的影响

由于轴承的起动过程中通常会产生黏-滑现象,而静摩擦系数通常大于动摩擦系数。图3显示了在水润滑条件下不同载荷时试块与GCr15环之间的静摩擦系数。静摩擦系数采集时先用手轻微带动环-块摩擦磨损试验机,在其有轻微转动之前记录摩擦力,再设置摩擦磨损试验机转速为1 r/min。采集启动时记录摩擦系数,每组试验在相同的条件下各重复3次,记录其摩擦系数取其平均值。

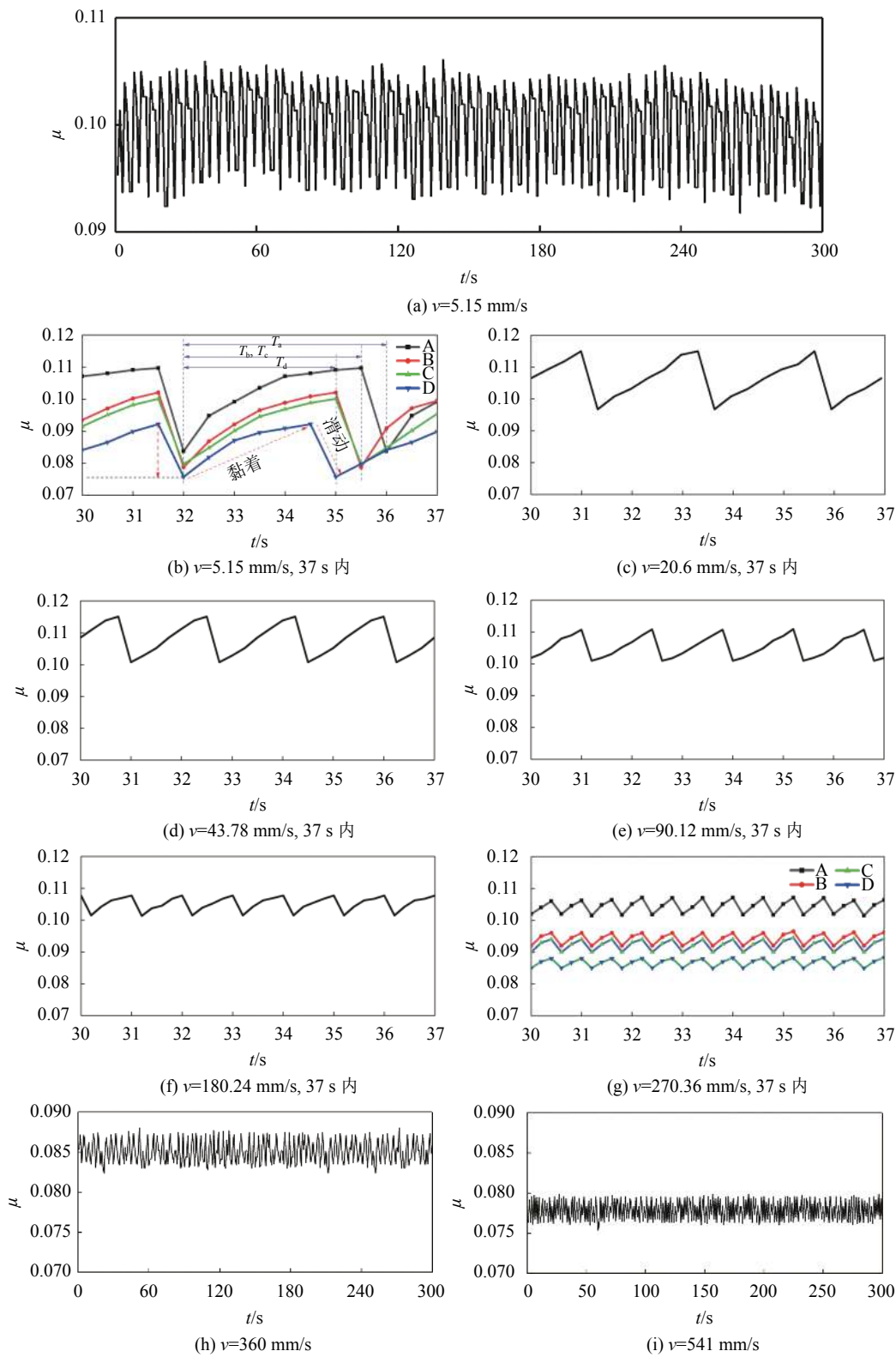


图 2 水润滑条件下复合材料与GCr15环之间的摩擦黏-滑现象

Fig. 2 Stick-slip phenomenon between UHMWPE and GCr15 rings under water lubrication

从图3(a)可以看出,随着载荷从33 N增大到250 N,不同组分的复合材料的静摩擦系数均逐渐减小,最后趋于稳定;并且随着Nano-SiC含量的增多,对应复合材料的静摩擦系数变化幅度也降低。从图3(b)

可以看出, Nano-SiC改性复合材料具有较小的摩擦系数波动幅度,静摩擦系数与动摩擦系数差值也较小。一般而言,摩擦力变化剧烈波动对摩擦噪声的产生起着非常重要的作用,摩擦力差值越大,摩擦噪声

就越大。因此, Nano-SiC改性复合材料D相比UHMWPE-橡胶材料A来说, 黏-滑现象减轻。由图2和3数据可以看出, 随着速度、Nano-SiC含量的增加, 黏-滑现象逐渐减弱, 摩擦波动归于平稳。

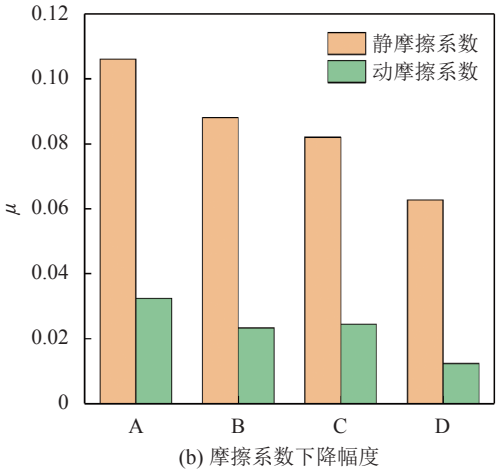
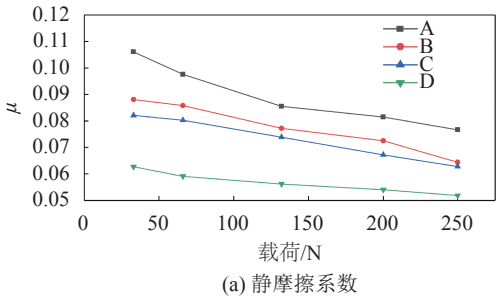


图 3 4组UHMWPE复合材料不同载荷下的摩擦系数
Fig. 3 Friction coefficient of four groups of polymers under different loads

2.2.3 不同载荷对UHMWPE复合材料摩擦系数的影响
图4显示了4种UHMWPE复合材料A、B、C和D在水润滑条件下, 分别在33、66、132和200 N的载荷下摩擦系数变化规律。

从图4可见: 4种复合材料的摩擦系数均随速度的增加先升后降直至逐渐稳定, 但不同载荷对应的摩擦系数变化区间明显不同; 随着载荷逐渐增大, 4种复合材料的摩擦系数均有不同程度的降低。在4种载荷下, UHMWPE-橡胶材料(复合材料A)的摩擦系数曲线均最高, 在加入PTFE后, 复合材料B的摩擦系数有一定程度降低, 再加入0.5% Nano-SiC后, 复合材料C的摩擦系数继续降低, 而当 Nano-SiC 含量增加到5%时, 复合材料D的摩擦系数达到最低。摩擦系数的变化与材料表面撕裂脱落情况都会随着载荷的增大表现出相同的变化趋势, 即水润滑轴承材料在一定范围内, 随着载荷的增加, 耐磨损性能逐渐增强^[20]。此外, 在水润滑条件下UHMWPE复合材料开始处于边界润滑阶段并伴随黏-滑现象, 摩擦系数逐渐增大。随着速度的提升, 黏-滑现象减弱, 边界润滑

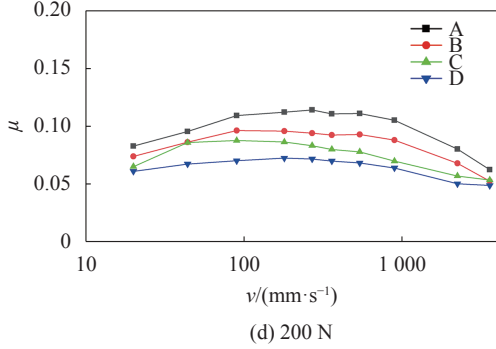
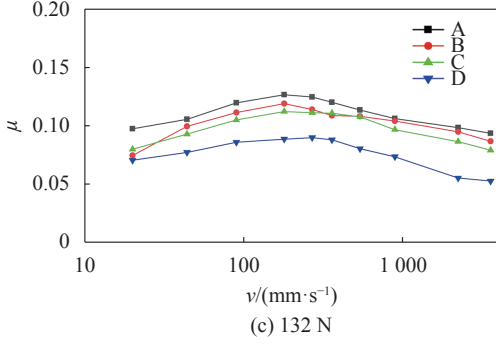
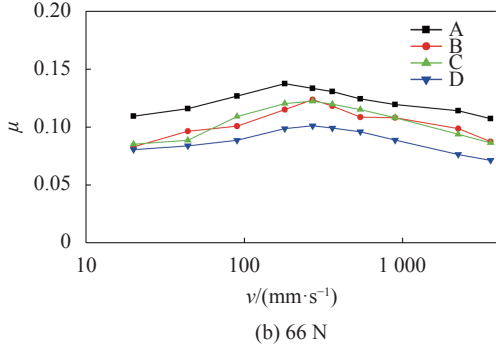
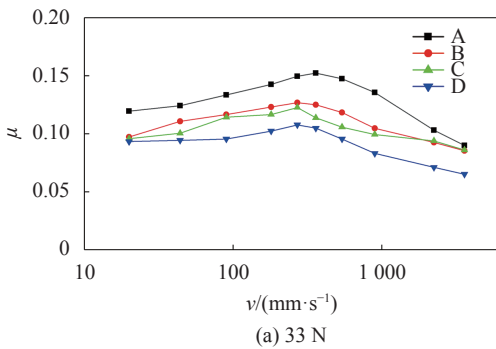


图 4 不同载荷下UHMWPE复合材料摩擦系数
Fig. 4 Friction coefficient of UHMWPE composites under different loads

逐渐变为混合润滑, 试样表面出现磨损凹坑, 更多的水进入磨损表面, 最终形成流体润滑, 摩擦系数随之降低并逐渐趋于稳定。这可能是因为复合材料加入纳米材料后, Nano-SiC在水介质中产生摩擦化学反应生成SiO₂^[19,21], 生成的SiO₂凝胶在摩擦过程中受力剪切变形, 在摩擦表面生成较为致密的薄膜, 从而降低了摩擦系数。

2.2.4 不同载荷对UHMWPE复合材料磨损率的影响

图5给出了4种UHMWPE复合材料在33、66、132、200 N载荷下的体积磨损率变化规律, 体积磨损率按照式(1)计算得出。

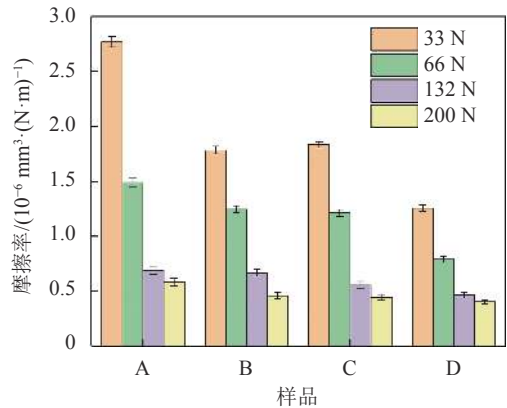


图 5 不同载荷下UHMWPE复合材料磨损率
Fig. 5 Wear rate of UHMWPE composites under different loads

由图5可知: 随着载荷的增大, 4种复合材料的体积磨损率均出现不同程度的减小。这是因为在摩擦行为刚开始时, 随着载荷的增加, 复合材料表面的黏着-滑动过程更为剧烈, 产生的摩擦热增加, 使表面温度升高, 初期的高温高载条件使得复合材料表面的磨损表面软化, 其抗剪切性和抗蠕变性下降, 耐磨

性被削弱, 导致材料的磨损量少许增加^[14,22-23], 但是, 根据式(1)计算可知增加的磨损量远低于载荷增大的程度, 从而得出体积磨损率随着载荷的增大而减小。随着Nano-SiC含量增加, 复合材料的磨损率呈现下降趋势, 其中D组试样的磨损率最低, 明显看出加入Nano-SiC明显提高了复合材料的耐磨性, 能够承受更高的载荷。最主要的原因是硬质纳米颗粒在复合材料中起到一定的支撑作用, 提高了复合材料的抗剪切和抗蠕变能力^[15]; 第二个原因可能是Nano-SiC在水环境下与水发生反应形成SiO₂, 而SiO₂凝胶可有效缩短复合材料的磨合期, 增强了材料颗粒的物理黏附能力, 显著提高了复合材料的耐磨性^[19]。

2.3 摩擦表面形貌分析

图6显示了4种复合材料在摩擦磨损试验后的表面形貌。在固定载荷66 N水润滑条件下, 复合材料A的表面存在显著磨损现象, 如图6(a)所示, 复合材料A的表面存在一些球形凹坑或凸起, 这是由于UHMWPE材料耐热性差, 与丁腈橡胶VP501结合程度低, 磨损表面在摩擦温升下变得软化^[19], 此时基体材料与填料之间的稳固性会下降, 从而导致摩擦过程中VP501橡胶脱落形成大小起伏的球形凹坑或凸起, 在水环境下磨损时产生的磨屑被对偶环上的水带走^[24-25]。

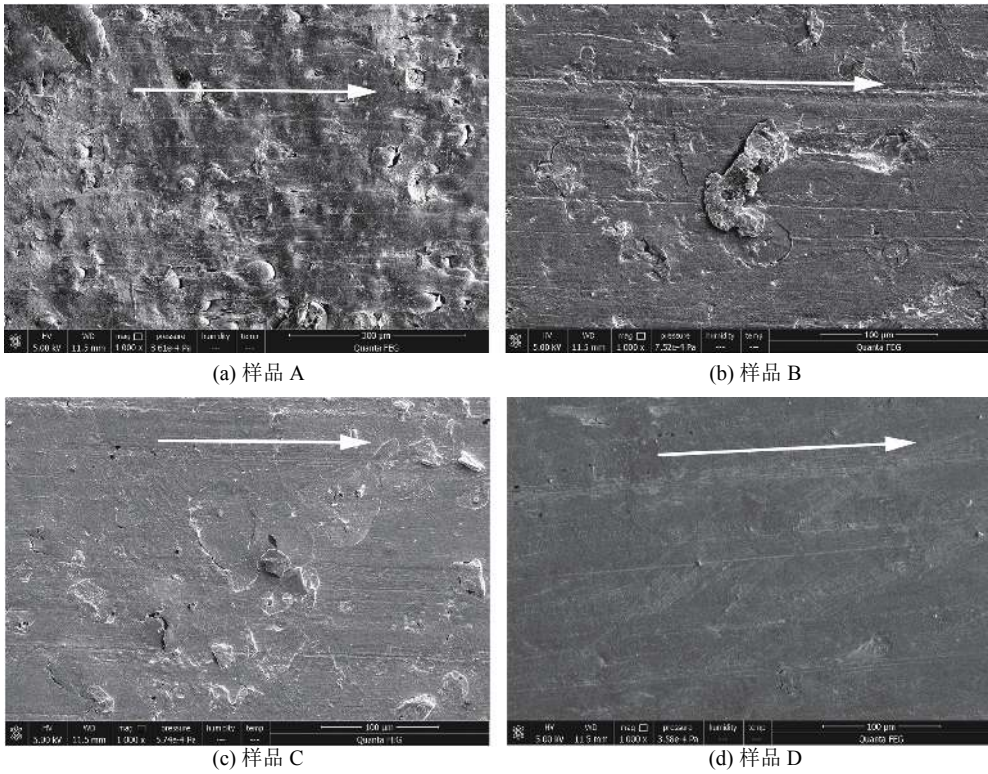


图 6 不同UHMWPE复合材料的SEM表面形貌分析
Fig. 6 SEM surface morphology analysis of different UHMWPE composites

较之于图6(a),由于加入PTFE后复合材料耐高温性增加,VP501橡胶不再出现脱落情况。在其磨损面上显示大片状磨屑被撕扯现象,这是由于材料表面虽然经过数道工序打磨,表面观察已变光滑,但在微观上仍然是凹凸不平的;当材料表面与对偶环接触时,只有两个表面的凸起部分实际接触,两接触面的接触部分在压力下逐渐产生黏着。随着对偶环转动,黏着点被外力剪断,此时材料表面的下一凸起部分与对偶环继续发生黏着并剪断,往复黏着-断裂-黏着的过程使得复合材料一直处于黏着磨损状态,这种状态下的磨损表面易产生大片磨屑的撕裂,并被由对偶环转动带来的水冲掉,在材料表面留下磨屑痕迹,见图6(b),大片磨屑在黏着磨损状态下被撕裂,即将脱落的场景。

随着Nano-SiC的加入,复合材料的硬度、抗磨损性能、承载能力、抗蠕变性能和抗剪切性能提升,黏

着作用减弱,降低了磨屑的剥落。如图6(c)所示,加入0.5% Nano-SiC后材料表面的磨屑痕迹变少而且更小,磨损表面逐渐变得平整。随着Nano-SiC含量的增加,如图6(d)所示,更多的纳米粒子与粗糙表面微观粗糙峰作用更有利于形成机械互锁,进而降低材料的磨损率^[20]。磨损表面变得更加平整均匀,仅在一部分表面出现小型凹坑。再与复合材料A表面形貌进行对比,可见摩擦表面更光滑,此结论与图4、5所示的摩擦系数与磨损率对比结论相吻合。并且由于纳米粒子填充后,在宏观层面由物理测试得知其硬度增强,使得材料结构更加致密;再通过微观表征可以发现纳米粒子填充在一定程度上增强了材料分子间作用力,优化了摩擦过程,因此达到减轻黏-滑现象的作用,与前文黏-滑现象试验结论相呼应。

图7为4种复合材料在Microxam-800非接触式光学轮廓仪下的3维形貌。

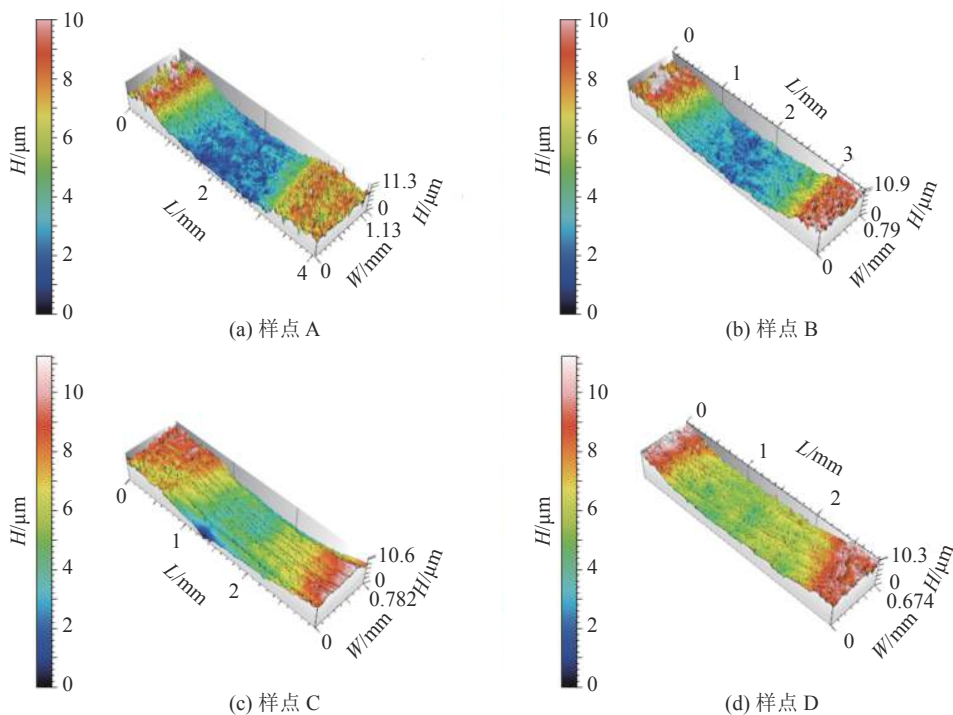


图7 不同UHMWPE复合材料的3维表面

Fig. 7 Three-dimensional surface of different UHMWPE composites

由图7可以看出:复合材料A的3维表面杂乱不平,与图6结果一致。随着PTFE的加入,磨痕形状出现好转。随着Nano-SiC含量的增加,磨损深度与磨痕宽度都出现不同程度的减小,与试验结论一致。

3 结论

1)复合材料的硬度随着Nano-SiC含量的增加而提升,其承载能力随之增强,对应摩擦副的犁削现象

减小,从而摩擦系数降低,耐磨性提高。

2)速度对UHMWPE材料的黏-滑现象影响很大,复合材料的黏-滑现象随着速度的增加而减轻直至逐渐消失。填充5% Nano-SiC粒子的复合材料在高速运行的对偶面上摩擦学性能最佳,在相同工况下其摩擦系数波动幅度和周期均大幅度降低,动、静摩擦系数的差值减小,轴承摩擦波动降低,黏-滑现象减弱。

3) 工况载荷对复合材料的影响较大。改性复合材料的摩擦系数与磨损率随着载荷的增大而减小, 当工况载荷从 33 N 增加至 200 N, 改性复合材料磨损率从 $1.25 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 降至 $0.4 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。随着 Nano-SiC 含量的增加, 试样磨损表面的橡胶颗粒脱落情况有效改善, 大片磨屑撕扯脱落情况减少, 犁沟变得细而浅, 黏着磨损减弱, 磨损率和摩擦系数显著降低。

参考文献:

- [1] Dai Chunhai, Lao Xingsheng, Liu Yong, et al. Experimental study on water-lubricated bearing material in deep sea space station[J]. *Materials Science Forum*, 2019, 947: 155–159.
- [2] Zhou Xiaoran, Zhou Xincong, Cheng Junfeng, et al. Study on tribological properties of modified UHMWPE for water lubricated bearings[J]. *Lubrication and Sealing*, 2016, 41(12): 80–85. [周潇然, 周新聪, 程俊锋, 等. 改性 UHMWPE 水润滑轴承材料摩擦磨损性能研究[J]. *润滑与密封*, 2016, 41(12): 80–85.]
- [3] Ding Xingwu, Wang Jiaxu, Yang Rongsong, et al. Analysis of elastic deformation of liner on lubrication performance of water-lubricated structure[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2012, 44(5): 233–238. [丁行武, 王家序, 杨荣松, 等. 衬层弹性变形对水润滑结构润滑性能的影响分析[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2012, 44(5): 233–238.]
- [4] Peng Jinmin, Wang Jiaxu. Research on key technology of improving bearing capacity of water lubricated bearing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2005, 36(6): 149–151. [彭晋民, 王家序. 提高水润滑轴承承载能力关键技术研究[J]. *农业机械学报*, 2005, 36(6): 149–151.]
- [5] Qin Zhang, Yang Hongling, Zhu Hefa, et al. Experimental analysis on friction-induced vibration of water-lubricated bearings in a submarine propulsion system[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 203: 107239.
- [6] Qin Hongling, Zhou Xincong, Yan Zhimin, et al. Review of research advances of water-lubricated stern bearing noise[J]. *Noise and Vibration Control*, 2013, 33(1): 123–126. [秦红玲, 周新聪, 闫志敏, 等. 水润滑尾轴承振动噪音研究进展[J]. *噪声与振动控制*, 2013, 33(1): 123–126.]
- [7] Qi L, Basavarajaiah S, Kim N H, et al. Synergy effect of hybrid fillers on the positive temperature coefficient behavior of polypropylene/ultra-high molecular weight polyethylene composites[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, 116(1): 116–124.
- [8] Li Chunyang, Li Weiwei, Li Ruipei, et al. Surface modification of UHMWPE fiber composite and mechanical properties of rubber matrix composite[J]. *Acta Composite Materials*, 2015, 32(2): 409–419. [李春阳, 李微微, 李瑞培, 等. 超高分子量聚乙烯纤维复合表面改性及其橡胶基复合材料的力学性能[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(2): 409–419.]
- [9] Ming Yan, Jia Runli. Moulding processing and modifying of ultra-high molecular weight polyethylene[J]. *Synthetic Resins and Plastics*, 2002, 19(4): 68–71. [明艳, 贾润礼. 超高分子量聚乙烯成型加工及改性[J]. *合成树脂及塑料*, 2002, 19(4): 68–71.]
- [10] Huang Li, Yang Ru, Guo Jiangjiang, et al. Friction and wear properties of ptfe-based composites filled with micron and nanometer SiO₂ particles[J]. *Acta Composite Materials*, 2004, 21(4): 82–86. [黄丽, 杨儒, 郭江江, 等. 微米和纳米 SiO₂ 改性聚四氟乙烯的摩擦磨损性能[J]. *复合材料学报*, 2004, 21(4): 82–86.]
- [11] Gügen S, Celik O N, Kushan M. Tribological behavior of UHMWPE matrix composites reinforced with PTFE particles and aramid fibers[J]. *Composites Part B(Engineering)*, 2019, 173: 106949.
- [12] Song Ning, Song Bo. Effect of PTFE on properties of PE-UHMW[J]. *Engineering Plastics Application*, 2016, 44(2): 129–133. [宋宁, 宋博. PTFE 对 PE-UHMW 性能的影响[J]. *工程塑料应用*, 2016, 44(2): 129–133.]
- [13] Pitenis A A, Harris K L, Junk C P, et al. Ultralow wear PTFE and alumina composites: It is all about tribochemistry[J]. *Tribology Letters*, 2015, 57(1): 1–8.
- [14] Mi Xiang, Gong Jun, Cao Wenhan, et al. Tribological behavior of Nano-SiC/PI reinforced PTFE composites[J]. *Materials Guide*, 2017, 31(18): 102–108. [米翔, 龚俊, 曹文翰, 等. 纳米 SiC 与 PI 填充改性 PTFE 复合材料的摩擦磨损性能[J]. *材料导报*, 2017, 31(18): 102–108.]
- [15] Gao Gui, Li Ruihong, Gong Jun, et al. Effect of counterpart surface roughness on the tribological properties of Nano-SiO₂ modified PTFE composites[J]. *Advanced Engineering Science*, 2020, 52(2): 207–214. [高贵, 李瑞红, 龚俊, 等. 对偶表面粗糙度对 Nano-SiO₂ 改性 PTFE 复合材料摩擦学性能的影响[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(2): 207–214.]
- [16] Wang Qihua, Xue Qunji, Liu Weimin, et al. Effect of nanometer SiC filler on the tribological behavior of PEEK under distilled water lubrication[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2000, 78(3): 609–614.
- [17] Ye J, Khare H S, Burris D L. Quantitative characterization of solid lubricant transfer film quality[J]. *Wear*, 2014, 316(1/2): 133–143.
- [18] Wang J, Hu X G, Tian M, et al. Study on mechanical and tribological property of nanometer ZrO₂-filled polyoxymethylene composites[J]. *Polymer Plastics Technology & Engineering*, 2007, 46(5): 469–473.