

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20160804004

海水润滑条件下316L不锈钢与仿生非光滑表面 CF/PEEK的摩擦学性能

梁瑛娜^{1,2}, 高殿荣¹, 毋少峰¹

(1. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 燕山大学 里仁学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 为探讨高压海水轴向柱塞泵滑靴副的减阻抗磨机理, 采用数控机床在CF/PEEK试样表面加工出不同形状仿生非光滑单元体, 与316L不锈钢形成配副, 对其在不同法向载荷下的摩擦因数、试样温度、磨损率等进行测试, 并用激光共焦显微镜及扫描电子显微镜对磨损表面进行分析。结果表明: 在海水润滑条件下, 光滑表面配副以磨料磨损和粘着磨损为主, 摩擦因数随时间稳定在0.05~0.09, 试样温升大, 磨损率大; 非光滑表面配副可有效存储海水和磨屑, 产生动压润滑效应、降低磨料磨损, 摩擦以犁沟效应为主, 摩擦因数稳定在0.02~0.06, 试样温升小, 磨损率小; 随法向载荷的增加, 由粘着效应所致CF/PEEK转移加快, 摩擦因数和试样温度升高, 磨损率降低且下降趋势逐渐减缓。

关键词: 海水润滑; 仿生非光滑; 316L; CF/PEEK; 摩擦学性能

中图分类号: TH117.2; TB332

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)01-0115-10

Tribological Performance of 316L Stainless Steel Sliding Against CF/PEEK with Bionic Non-smooth Surface Under Seawater Lubricated Condition

LIANG Ying-na^{1,2}, GAO Dian-rong¹, WU Shao-feng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei; 2. Liren College, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei)

Abstract: To explore the innovative mechanism to reduce resistance and anti-wear for slipper pair of high pressure seawater axial piston pump, different types of bionic non-smooth units were processed on the surface of CF/PEEK specimens using CNC machine tool. The tribological performance of friction pairs with 316L stainless steel under different normal loads were studied. The results show that abrasive wear and adhesive wear are the main forms of smooth surface friction pair. The friction coefficient fluctuates with time and stabilizes at 0.05–0.09. The temperature rises and the wear rate is high. Pits or holes can store seawater and wear debris, which helps producing hydrodynamic lubrication effect and reducing abrasive wear. The main wear form of friction pair with non-smooth surface is plowing effect and the friction coefficient stabilizes at 0.02–0.06. The temperature rises and the wear rate are low. With the increase of normal load, the transfer from CF/PEEK to 316L caused by adhesive effect is accelerated, the friction coefficient and the specimen temperature rise, the wear rate drops and its downward trend gradually slows down.

Keywords: seawater lubrication; bionic non-smooth; 316L; CF/PEEK; tribological performance

收稿日期: 2016-08-04; 修回日期: 2016-12-23

网络出版日期: 2016-12-30 14:55; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20161230.1455.004.html>

通讯作者: 高殿荣(1962—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 新型液压元件的流场数值计算与可视化; E-mail: gaodr@ysu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(51375421); 河北省自然科学研究重点项目(ZD20131027); 燕山大学青年教师自主研究计划课题(14LGB032)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China(51375421), Hebei Provincial Key Project of Science and Technology Research of China(ZD20131027) and Yanshan Universitaire Independent Research Project of Young Teacher of China(14LGB032)

引文格式: 梁瑛娜, 高殿荣, 毋少峰. 海水润滑条件下316L不锈钢与仿生非光滑表面CF/PEEK的摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2017, 30(1): 115-124.

LIANG Y N, GAO D R, WU S F. Tribological performance of 316L stainless steel sliding against CF/PEEK with bionic non-smooth surface under seawater lubricated condition[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(1): 115-124.

0 引言

聚醚醚酮(PEEK)是一种聚芳醚酮类高分子化合物,具有优异的物理性能和力学性能,在航空、机械、核电、化工、医疗、轨道交通等诸多领域有着广泛的应用。碳纤维增强聚醚醚酮(CF/PEEK)克服了普通热塑性树脂材料强度低、弹性模量低、软化温度低等缺点,进一步增强了聚醚醚酮(PEEK)的力学性能、热性能和摩擦性能^[1]。目前国内外学者已对制备CF/PEEK时,碳纤维的添加量^[2]、纤维形态^[3]、纤维排布方式及加工方法^[4]等作了较为系统的研究。

仿生非光滑表面也会对其摩擦磨损行为产生积极影响^[5]。模仿自然界生物非光滑的体表形态,在各种具有相对运动的摩擦副表面间加工出具有一定形状、大小、排列的微单元体,以提高摩擦副工作表面润滑性和耐磨性的仿生非光滑表面研究可以追溯到20世纪60年代。HAMILTON等^[6]最早发现机械密封表面上的微观非光滑单元体可以产生流体动压力和承载力。ANNO等^[7-8]研究发现微凸体是解决机械端面密封和止推轴承润滑问题的有效途径。之后的三十年,非光滑表面的研究陷入了低谷,直到1996年,ETSION等^[9-10]采用不可压缩、二维雷诺方程及Half-Sommerfeld空化边界条件模拟了表面带有球形凹坑的机械密封;随后又采用LST技术在其表面加工出具有一定规则排列的球形凹坑,研究发现,在流体润滑或混合润滑条件下,每个凹坑都可作为一个微型的动压轴承,提供一定的承载力;在贫油条件下,可作为润滑油的微存储器;在润滑和干摩擦条件下,均可作为磨屑的微容器。ANDERSSON等^[11]采用激光蚀抛光技术在钢表面制备并考察了织构对表面润滑行为的影响。研究发现,织构的存在极大地减小了表面摩擦,降低了磨损。其中低密度、深坑和直径小的坑状织构与高黏度润滑油搭配时对摩擦性能的提升幅度最大。任露泉等^[12-14]认为动物体表普遍存在的非光滑结构,具有减黏、降阻和耐磨等功能,基于这一原理设计的仿生推土板、仿生犁壁、仿生轧辊等具有显著的减阻性能。刘东雷等^[15]采用皮秒激光在灰铸铁表面进行了表面微造型,研究发现,在低载高副低速条件下,试验因素对摩擦因数稳定值的影响由大到小依次为润滑状况、形貌和载荷;试验因素对摩擦因数初值的影

响由大到小依次为载荷、润滑状况和形貌;对于摩擦因数稳定值的影响,4种形貌优劣依次为凹坑、网纹、断纹和光滑;对于摩擦因数初值的影响,4种形貌优劣依次为凹坑、断纹、网纹和光滑。

为化解能源与环境危机,以天然海(淡)水作为工作介质的绿色传动技术迅速发展^[16]。采用CF/PEEK制备水液压元件中的摩擦副可有效解决因海水黏度低、润滑性差而产生的腐蚀、磨损等问题^[17-19]。在此基础上,将非光滑表面技术结合进来,以期获得“1+1>2”的润滑、减阻、抗磨效果。文中针对高压海水轴向柱塞泵中的滑靴副,采用数控机床在CF/PEEK试样表面加工出不同形状的非光滑单元体,与316L不锈钢形成配副,借助MMD-5A多功能摩擦磨损试验机模拟滑靴副的运动,探寻仿生非光滑表面对316L-CF/PEEK配副在海水润滑条件下摩擦学性能的影响。

1 材料及方法

1.1 材料及试样的制备

上试样材料取自常用的316L不锈钢棒材,其化学成分为(w/%): 0.03C; 1.0Si; 2.0Mn; 0.035P; 0.03S; 10.0~14.0Ni; 16~18.5Cr; 2.0~3.0Mo。主要性能参数见表1。

表 1 316L 不锈钢的性能参数

Table 1 Property parameters of 316L stainless steel	
Density / (g·cm ⁻³)	8.03
Elasticity modulus / GPa	206
Brinell hardness / HB	230
Elongation / %	30
Thermal conductance / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	16.3
Coefficient of thermal expansion / (10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹)	16
Tensile strength / MPa	620
Yield strength / MPa	310

下试样基材PEEK为白色粉末,平均粒径为10 μm,密度1.32 g/cm³,常州君华特种工程塑料制品有限公司;增强体短切碳纤维,纤维直径7 μm,密度1.75 g/cm³,拉伸强度3.5 GPa,拉伸模量228 GPa,上海力硕复合材料科技有限公司。

首先将短切碳纤维放入丙酮中浸泡48 h,用混酸(98%硫酸:69%硝酸=3:2)超声20 min,经蒸馏水清洗后,放入150 °C烘箱中干燥6 h后取出。将碳纤维与PEEK以3:7的体积分数充分混合后,放

置于热压机的模具中, 经过压实、升温(375~390 ℃)、加压(10~14 MPa)、释压、排气、冷却、脱模等过程, 获得下试样材料, 其主要性能参数见表2。

表 2 CF/PEEK的性能参数

Table 2 Property parameters of CF/PEEK	
Density / (g·cm ⁻³)	1.4
Water absorption (24 h) / %	0.06
Rockwell hardness / HRR	107
Heat distortion temperature / ℃	315
Coefficient of thermal expansion / (10 ⁻⁵ ·℃ ⁻¹)	1.5
Tensile strength / MPa	220
Bending strength / MPa	298
Compressive strength / MPa	240

上、下试样成型结构如图1所示, 上试样圆环表面外径40 mm、内径20 mm, 其上均匀分布两个Φ 10 mm×2 mm的圆柱; 下试样尺寸Φ 43 mm×6 mm, 其表面均匀分布半球坑、圆柱坑、圆锥坑、圆通孔、椭圆柱坑、三棱柱坑6种仿生非光滑单元体, 具体形状及尺寸如图2所示。其中半球坑、圆柱坑、圆锥坑、圆通孔均布有5圈, 由内至外, 依次在直径为22、26、30、34和38 mm的分布圆上均布40、48、55、62、68个单元体; 椭圆柱坑、三棱柱坑均布有4圈, 由内至外, 依次在直径为23、28、33和38 mm的分布圆上均布48、58、68、78个单元体。以此保证单元体之间的径向、周向间隔大致相等。

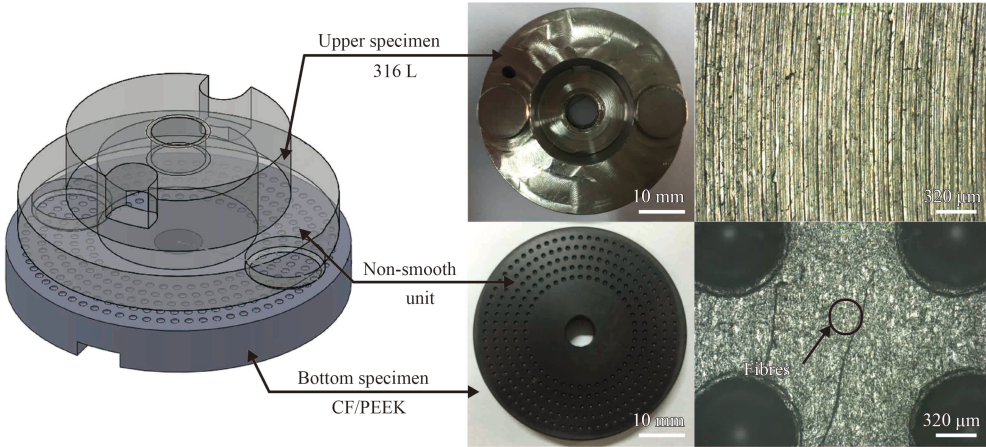


图 1 摩擦副结构及其二维表面形貌

Fig.1 Configuration and surface morphologies of friction pair

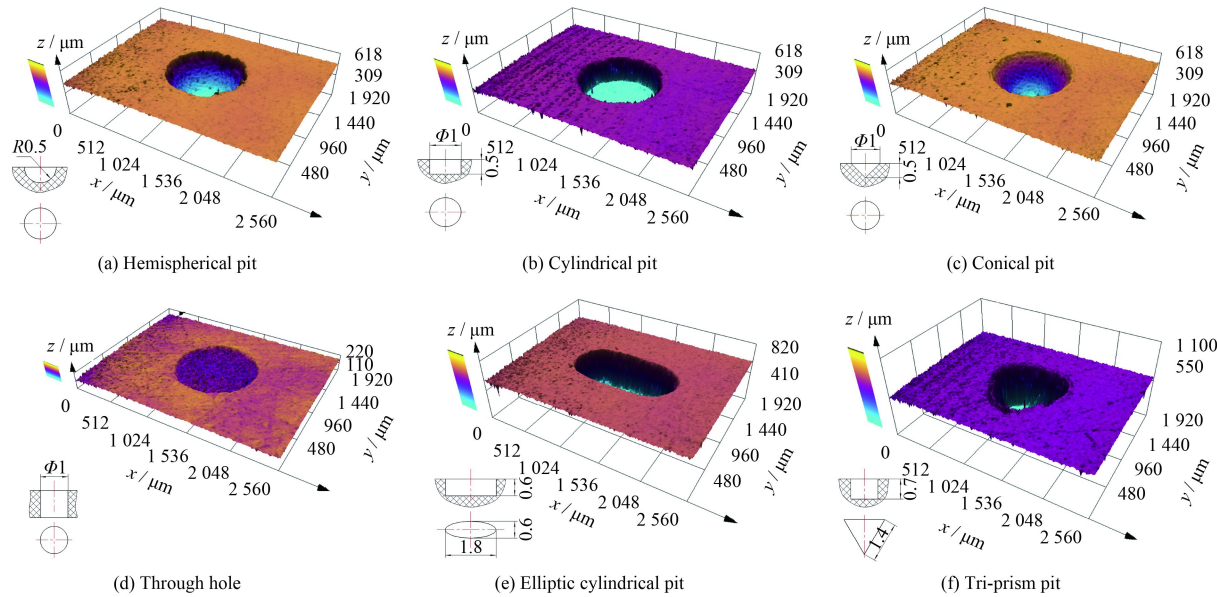


图 2 不同仿生非光滑单元体的三维形貌

Fig.2 3D topographies of different bionic non-smooth units

1.2 润滑介质的配制

试验所用润滑介质为天然海水,取自秦皇岛海域,根据国家海洋监测规范(GB 17378.4—2007)测定其PH值为7.2,盐度为2.983%。试验前,将海水静置24 h,并用滤纸过滤去多余的结晶盐及杂质后备用。

1.3 摩擦磨损试验

试验前所有试样均放入丙酮溶液中超声清洗20 min,在空气中自然风干。采用精度为0.1 mg的电子天平进行称重,为确保测量结果的准确性,每个试样均称重3次,取其平均值作为最后结果。采用奥林巴斯3100激光共焦显微镜及日立S-3400N扫描电子显微镜对试样进行表面观测。

采用MMD-5A多功能摩擦磨损试验机进行试验,其系统原理如图3所示。上试样通过上试样夹具安装在主轴上,由伺服电机驱动旋转;下试样通过下试样座固定在立柱上,由液压系统进行升降和加载。上试样夹具的设计具有自适应功能,可保证在滑动过程中上、下试样表面始终平行接触。上试样两个凸起圆柱与下试样之间的相对运动,即与滑靴副的运动模式相似。每次试验前,均在有机玻璃水盒内注入等量的海水,确保整个滑动过程一直处于海水润滑状态。摩擦因数和下试样温度可通过传感器进行实时监测和记录。

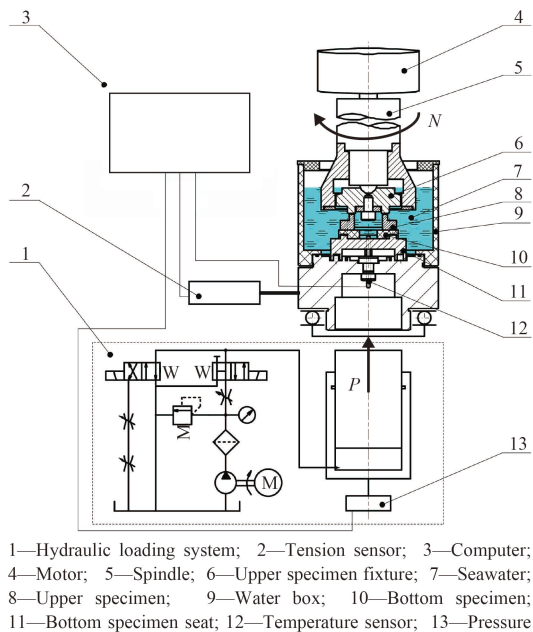


图3 MMD-5A摩擦磨损试验机示意图

Fig.3 Schematic diagram of MMD-5A friction and wear tester

试验结束后,试样再次进行清洗、干燥、称重和表面观测。为确保凹坑中不残留磨屑,再次清洗前先使用小毛刷清理凹坑内磨屑,再用高压气对凹坑进行喷刷。为消除材料吸水性对称重结果的影响,再次干燥时间24 h。

2 结果与讨论

2.1 摩擦磨损特性

保持试验时间 $t=90$ min,滑动速度 $v=1.57$ m/s(即转速 $N=1\ 000$ r/min)不变,在不同法向载荷 p 为0.64、0.95、1.27、1.59和1.91 MPa(即法向力 P 为100、150、200、250和300 N)下,光滑表面及6种非光滑表面摩擦副海水润滑条件下摩擦因数随时间变化的曲线如图4和图5所示。

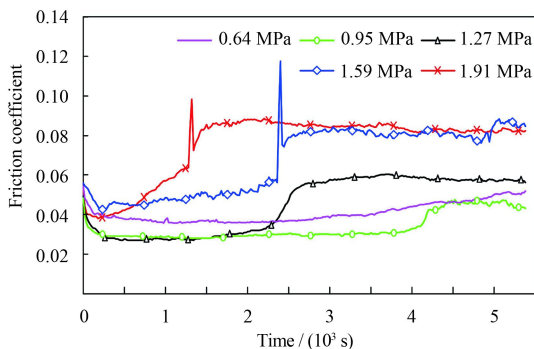


图4 光滑表面的摩擦因数-时间变化曲线

Fig.4 Variation of friction coefficient with test time on smooth surface

由图4可见,不论在何种载荷下,光滑表面配副的摩擦因数均在开始的300 s内由0.04~0.06迅速下降至0.03~0.05,在这一数值保持一段时间之后,又突然升至0.05~0.09,并一直持续至试验结束。随载荷增大,摩擦因数呈上升趋势,并且其突升的幅度和时间节点逐渐增大和前移。当 $p=0.64$ MPa时,摩擦因数曲线甚至没有明显的突升现象。由图5可见,非光滑表面配副的摩擦因数经过开始的磨合期后,基本上以0.02~0.06持续至试验结束,均无曲线突升现象。从数值上看,非光滑表面配副的摩擦因数较光滑表面均有不同程度的降低,其中圆通孔的降幅最为明显。

将不同表面摩擦副在各个法向载荷下的摩擦因数取平均值,进行线性拟合,如图6所示。由图可见,所有类型配副的摩擦因数基本上均随载荷的增大而增大。光滑表面配副的摩擦因数最大,

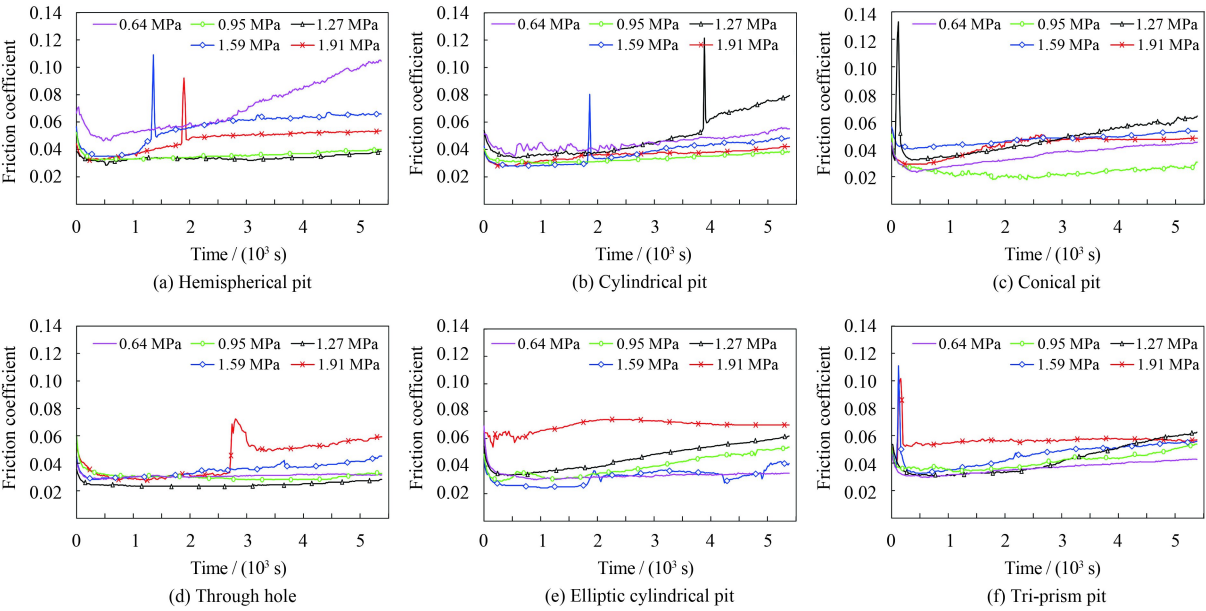


图 5 不同非光滑表面的摩擦因数-时间变化曲线

Fig.5 Variation of friction coefficient with test time on different non-smooth surface

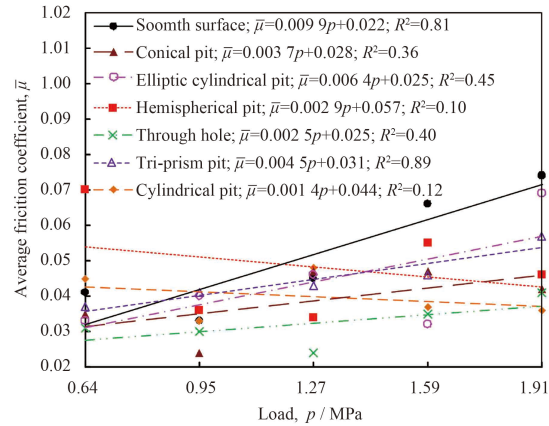


图 6 平均摩擦因数-法向载荷的线性拟合曲线

Fig.6 Linear dependence of average friction coefficient on load for different types of friction pair

且其随载荷增大的趋势最为明显。圆通孔表面配副的摩擦因数最小，且其随载荷增大的趋势最弱。此外，圆锥坑、三棱柱坑及椭圆柱坑表面配副也展现了较小的摩擦因数。这进一步证实了图4和图5得出的结论。

摩擦过程中产生的热量使表面温度升高，不同表面摩擦副下试样平均温度-法向载荷的线性拟合曲线如图7所示。对比图6，明显可见下试样温度与摩擦因数间的正相关联系，所有下试样温度均随载荷的增大而增大；其中光滑表面下试样的温度明显高于非光滑表面，且其随载荷增大的趋势最为明显；圆通孔、圆锥坑及椭圆柱坑表面下试

样在滑动过程中表面温升较小，其在图6中的摩擦因数曲线同样较低。摩擦因数越高，表明对磨表面间的相对运动越剧烈，产生的摩擦能耗越大，表面温升越高^[20]。

根据试样摩擦前后的质量差，计算其单位长度内单位压强下所磨损的体积，即磨损率。其中，非光滑表面摩擦副考虑其坑、孔所占面积率，按实际接触面积计算。不同表面摩擦副上、下试样磨损率随法向载荷的变化如图8、表3所示。上、下试样的磨损率均为正值，即所有试样对磨后质量都减轻了，其中下试样减轻的幅度显著大于上试样。随载荷增大，所有试样的磨损率基本均减

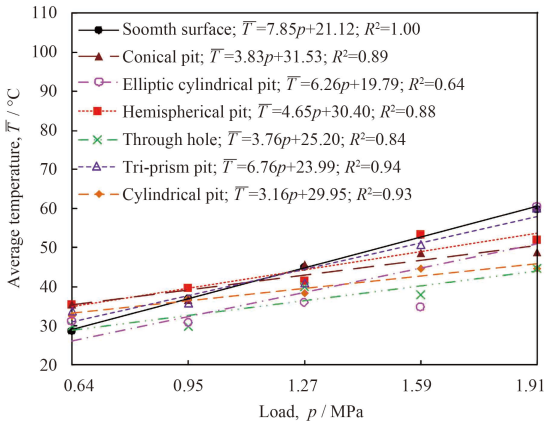


图 7 平均温度-法向载荷的线性拟合曲线

Fig.7 Linear dependence of average temperature on load for different types of friction pair

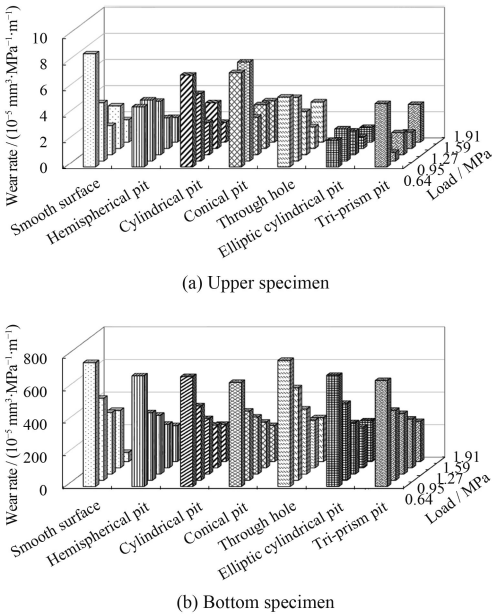


图 8 不同摩擦副试样的磨损率

Fig.8 Wear rate of specimens for different types of friction pair

表 3 不同摩擦副试样的磨损率

Table 3 Wear rate of specimens for different types of friction pair
($10^{-5} \cdot \text{mm}^3 \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)

Different friction pair		Load, p / MPa				
		0.64	0.95	1.27	1.59	1.91
Smooth surface	Upper	8.7	4.5	2.2	3.3	1.7
	Bottom	760.6	503.5	378.3	352.2	56.1
Hemispherical pit	Upper	4.6	4.7	4.1	2.4	1.9
	Bottom	679.9	414.8	361.1	267.4	220.2
Cylindrical pit	Upper	7.1	5.2	2.5	3.5	1.5
	Bottom	674.9	456.6	340.7	261.9	228.4
Conical pit	Upper	7.2	7.6	2.9	3.3	3.2
	Bottom	638.7	424.4	349.6	280.0	221.1
Through hole	Upper	5.4	4.9	3.3	1.6	3.1
	Bottom	774.8	568.1	399.4	291.6	269.2
Elliptic cylindrical pit	Upper	2.1	2.5	1.8	0.9	1.1
	Bottom	682.8	473.1	315.8	250.8	249.9
Tri-prism pit	Upper	4.9	0.7	1.7	1.2	2.9
	Bottom	651.2	429.9	371.6	299.3	246.4

小，且其下降的趋势逐渐减缓。光滑表面试样的磨损率最大，非光滑表面试样的磨损率较光滑表面试样均有不同程度的减小，即表现出与摩擦因数和下试样温度相同的变化规律。

2.2 摩擦磨损表面及过程分析

以半球坑、圆通孔表面摩擦副作为非光滑表面摩擦副的代表，在中间法向载荷 $p=1.27 \text{ MPa}$

下，光滑表面、半球坑及圆通孔表面上、下试样磨损表面及二维微观形貌如图9~11所示。整体上看(与图1对比)，316L不锈钢上试样表面均出现了轻微的划痕和颜色加深；CF/PEEK下试样表面则存在“抛光”现象和明显的沿滑动方向的沟槽。

对于光滑表面摩擦副，结合图4分析可知，试验开始后，在载荷作用下，316L和CF/PEEK的表面粗糙峰将互相接触或嵌入，当上、下试样发生相对滑动时，粗糙峰之间发生激烈碰撞，此时摩擦因数较高。由于316L硬度大于CF/PEEK，CF/PEEK的粗糙峰逐渐被刮平，至此“跑和”期结束。在随后的滑动中，316L粗糙峰开始嵌入CF/PEEK表面并推挤其材料，使之塑性流动并犁出一条条沟槽，即发生了犁沟效应。由于上试样仅两个凸起圆柱表面参与摩擦，这种销-盘运动方式更有利于海水在摩擦副表面间建立边界润滑膜、降低表面温升和冲刷磨屑[17]，故此时摩擦因数较低。随着摩擦副间裹挟的磨屑逐渐增多，磨料磨损开始发生，当界面间的粘结强度大于CF/PEEK分子间的粘合强度时[21]，CF/PEEK表面材料将转移至316L表面，即发生了粘着磨损。这正是图8中下试样磨损率较大的原因；而上试样因为硬度较大和表面附着转移膜，磨损率降低了两个数量级。

图12为上试样316L磨损后、未进行清洗前表面的EDS能谱图。能谱元素分析结果显示，C的质量分数升至18.83%，其来源应为下试样CF/PEEK中的碳纤维，证实了转移膜的存在。此外，元素中还发现了质量分数为16.95%的O，说明发生了轻微的氧化磨损。磨料磨损和粘着磨损共同存在，使摩擦因数和表面温度升高，磨损率增大，整个摩擦磨损过程与图4所描述的完全一致。图9(d)中可见，光滑表面下试样“抛光”环带的内圈有明显的烧灼痕迹，说明摩擦产生的热量较高且内圈散热不好。对比图9(f)与图10(f)、图11(f)，光滑表面CF/PEEK的塑性流动和碳纤维暴露更为明显，说明其经历了更激烈的摩擦运动和温升过程。

对于半球坑表面摩擦副，结合图5(a)分析可知，经过约300 s的“跑和”期，摩擦进入相对稳定的犁沟阶段。下试样表面的凹坑可有效存储海水和磨屑，当上试样发生相对滑动时，即可产生动压效应[22]和降低磨料磨损。图13为下试样

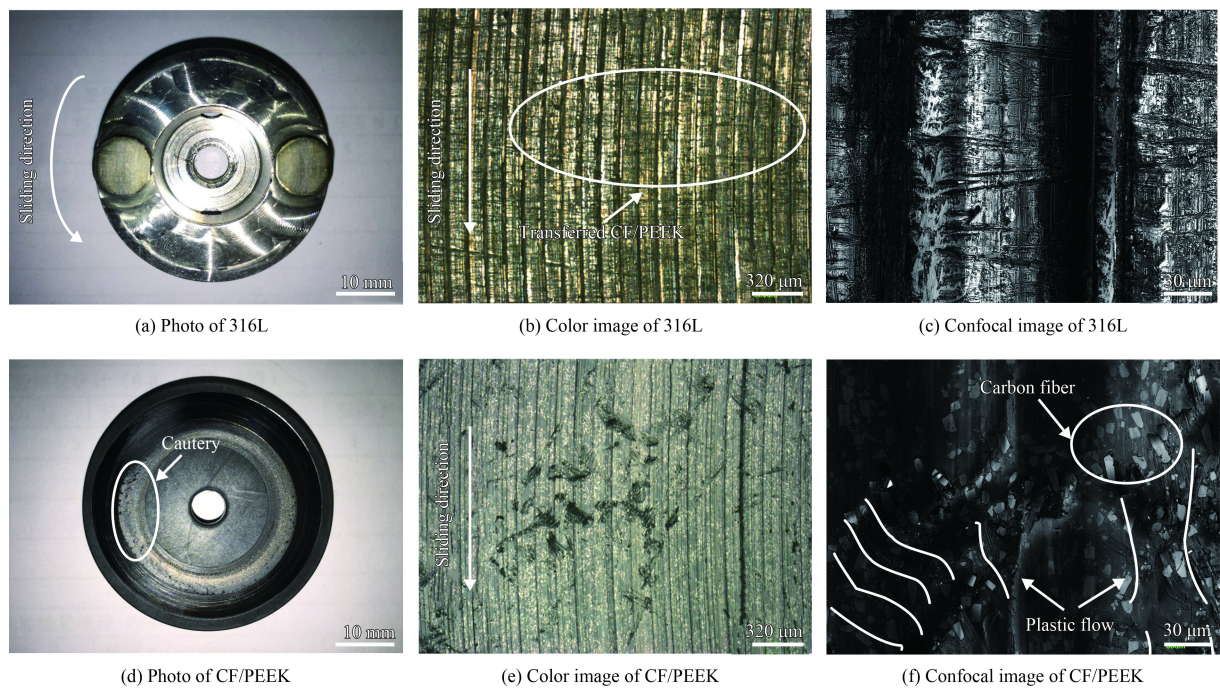


图 9 光滑试样的磨损形貌

Fig.9 Worn morphologies of smooth specimens

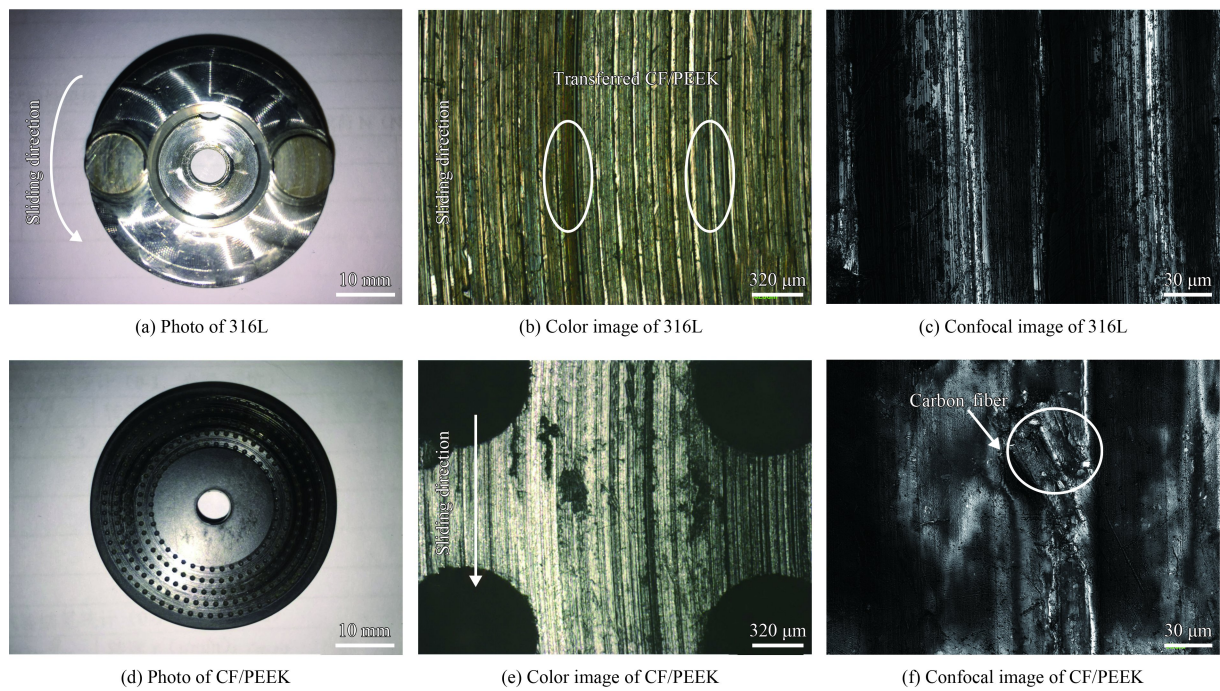


图 10 半球坑试样的磨损形貌

Fig.10 Worn morphologies of specimens with hemispherical pit

CF/PEEK磨损后、未进行清洗前凹坑内某点的EDS能谱图。其中, 7.54%的Na和2.61%的Cl来自于海水中的结晶盐; 26.68%的Fe、1.13%的Mg和15.6%的O来自于316L及其氧化物的磨屑。对比图14与图2(a), 磨损后半球坑中积存的磨屑及其周围表

面沿滑动方向的沟槽清晰可见。因此, 半球坑表面配副的摩擦过程主要以犁沟现象为主, 伴有轻微粘着磨损, 整个过程摩擦因数和温升较低, 磨损率较小。

对于圆通孔表面摩擦副, 结合图5(d)分析可

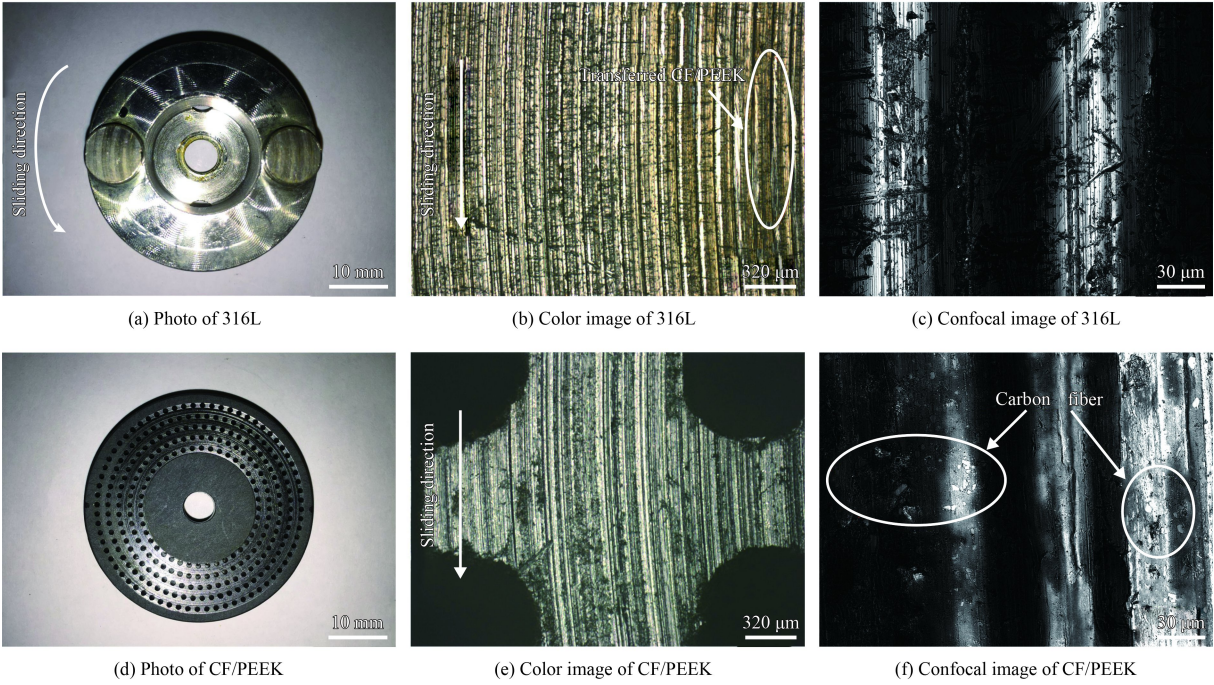


图 11 圆通孔试样的磨损形貌

Fig.11 Worn morphologies of specimens with through hole

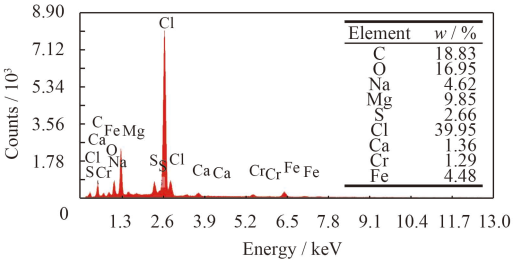


图 12 316L磨损后表面EDS能谱

Fig.12 EDS of worn surface of 316L

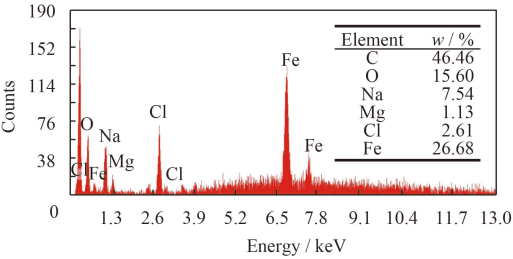


图 13 CF/PEEK磨损后半球坑内某点EDS能谱

Fig.13 EDS of selected area in hemispherical pit of CF/PEEK after wear

知，其经历了与半球坑表面摩擦副相似的摩擦过程。通过对前期数值模拟结果及本试验中摩擦因数、试样温度等参数的分析，圆通孔更利于形成海水动压润滑膜和存储磨屑，减阻、抗磨效果最好。其余非光滑表面配副的摩擦过程均与半球坑表面的相似，不再赘述。

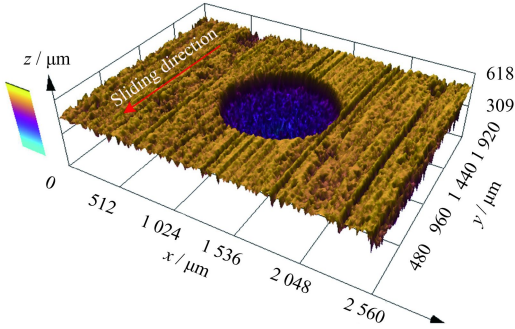


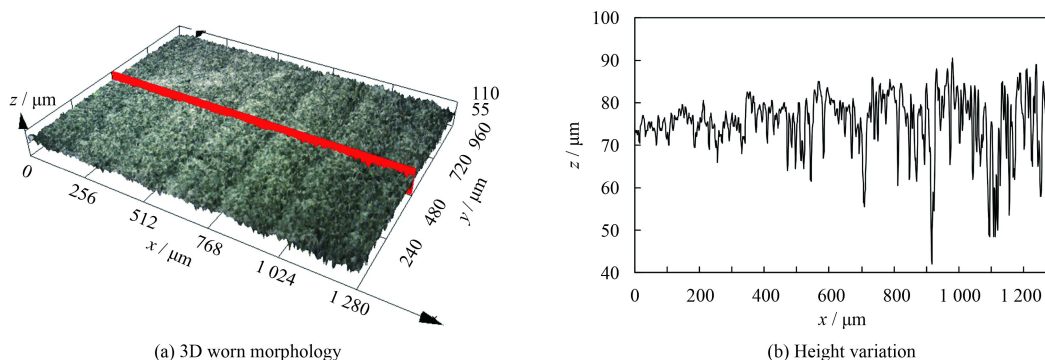
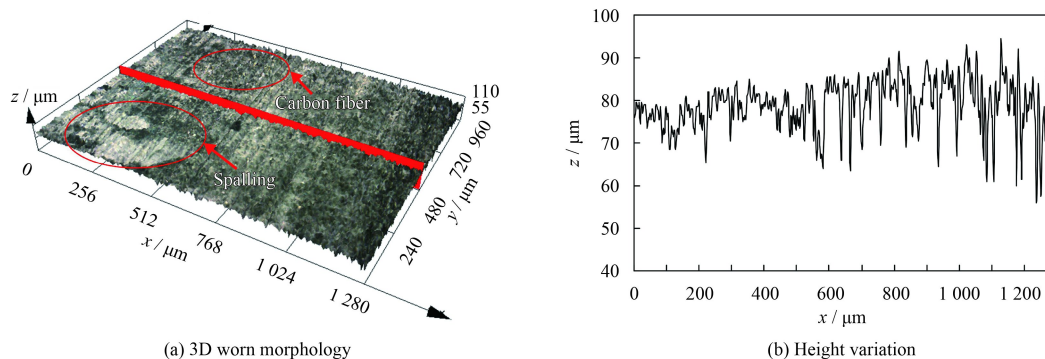
图 14 半球坑表面下试样的三维磨损形貌

Fig.14 3D worn morphology of bottom specimen with hemispherical pit

为进一步分析法向载荷对非光滑表面摩擦副摩擦磨损特性的影响， p 为0.64 MPa和1.91 MPa下，半球坑表面下试样磨损表面三维形貌及 $y=480\text{ }\mu\text{m}$ 处的磨痕高度变化曲线如图15、图16所示。

结合图6、图7分析得知，随着载荷的增大，配副间的表面粗糙峰互相嵌入越深入，由犁沟效应转变为磨料磨损及粘着磨损的过程越快，摩擦因数及试样温度越高。相比图15(a)，图16(a)中明显可见激烈相对滑动后碳纤维的磨损和暴露，及由粘着效应所致的CF/PEEK表层剥落。

结合图8分析得知，载荷增大使粘着磨损的进程加快、幅度加大，当316L表面附着的CF/PEEK转移膜达到一定量时，配副间的摩擦一定程度上

图 15 半球坑表面下试样的三维磨损形貌及磨痕高度曲线($p=0.64$ MPa)Fig.15 3D worn surface morphology and height variation curve of the bottom specimen with hemispherical pit ($p=0.64$ MPa)图 16 半球坑表面下试样的三维磨损形貌及磨痕高度曲线($p=1.91$ MPa)Fig.16 3D worn morphology and height variation curve of the bottom specimen with hemispherical pit ($p=1.91$ MPa)

发生在CF/PEEK之间,因此磨损率降低。图15(b)中磨痕高度曲线较低且变化幅度较大,这是较小载荷下、犁沟效应起主要作用时、磨损率较大的结果;图16(b)中磨痕高度曲线稍高且变化相对较小,这是较大载荷下、粘着磨损起主要作用时、磨损率较小的结果。即磨损表面形貌分析与之前摩擦磨损参数变化规律完全相符。

3 结 论

(1) 316L不锈钢与光滑表面CF/PEEK的摩擦过程以磨粒磨损和粘着磨损为主,摩擦因数高,试样温升大,磨损率大。

(2) 试样表面的非光滑单元体可有效存储海水和磨屑,产生动压润滑效应和降低磨料磨损。因此,316L不锈钢与六种非光滑表面CF/PEEK的摩擦过程均以犁沟效应为主,摩擦因数低,试样温升小,磨损率小。其中,圆通孔表面摩擦副的减阻、抗磨效果最为突出。

(3) 随着法向载荷的增大,摩擦因数和试样温度均呈上升趋势,磨损率则呈下降趋势且其走势逐渐变缓。

参考文献

- [1] 林有希,高诚辉.碳纤维增强聚醚醚酮复合材料的研究及应用[J].塑料工业,2005,33(10):5-8,20.
LIN Y X, GAO C H. Review of research and application of CF/PEEK composite[J]. China Plastics Industry, 2005, 33(10): 5-8, 20 (in Chinese).
- [2] 张志毅,章明秋,曾汉民.CF/PEEK复合材料的摩擦磨损行为研究[J].中山大学学报(自然科学版),1996,35(6):15-18.
ZHANG Z Y, ZHANG M Q, ZENG H M. The friction and wear behavior of PEEK composites reinforced by carbon fiber[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 1996, 35(6): 15-18 (in Chinese).
- [3] 刘川.连续碳纤维增强聚醚醚酮复合材料的制备及性能研究[D].吉林:吉林大学,2015,5.
LIU C. Preparation and properties of continuous carbon fiber reinforced poly(ether ether ketone) composites[D]. Jilin: Jilin University, 2015, 5 (in Chinese).
- [4] FUJIHARA K, HUANG Z M, RAMAKRISHNA S, et al. Influence of processing conditions on bending property of continuous carbon fiber reinforced PEEK composites[J]. Composites Science and Technology, 2004, 64(16): 2525-2534.
- [5] 赵文杰,王立平,薛群基.织构化提高表面摩擦学性能的研究

- 究进展[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(6): 622-631.
- ZHAO W J, WANG L P, XUE Q J. Development and research progress of surface texturing on improving tribological performance of surface[J]. Tribology, 2011, 31(6): 622-631 (in Chinese).
- [6] HAMILTON D B, WALOWIT J A, ALLEN C M. A theory of lubrication by micro-irregularities[J]. Fluids Engineering, 1966, 88: 177-185.
- [7] ANNO J N, WALOWIT J A, ALLEN C M. Microasperity lubrication[J]. Tribology, 1968, 90: 351-355.
- [8] ANNO J N, WALOWIT J A, ALLEN C M. Load support and leakage from microasperity-lubricated face seals[J]. Tribology, 1969, 91(4): 726-731.
- [9] ETSION I, BURSTEIN L. A model for mechanical seals with regular microsurface structure[J]. Tribology Transactions, 1996, 39(3): 677-683.
- [10] ETSION I. State of the art in laser surface texturing[J]. Tribology, 2005, 127(1): 248-253.
- [11] ANDERSSON P, KOSKINEN J, VARJUS S, et al. Microlubrication effect by laser-textured steel surfaces[J]. Wear, 2007, 262(3/4): 369-379.
- [12] 佟金, 马云海, 任露泉. 天然生物材料及其摩擦学[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(4): 315-320.
- TONG J, MA Y H, REN L Q. Naturally biological materials and their tribology: a review[J]. Tribology, 2001, 21(4): 315-320 (in Chinese).
- [13] 韩志武, 任露泉, 刘祖斌. 激光织构仿生非光滑表面抗磨性能研究[J]. 摩擦学学报, 2004, 24(4): 289-293.
- HAN Z W, REN L Q, LIU Z B. Investigation on anti-wear ability of bionic nonsmooth surfaces made by laser texturing[J]. Tribology, 2004, 24(4): 289-293 (in Chinese).
- [14] 杨卓娟, 韩志武, 任露泉. 激光处理凹坑形仿生非光滑表面试件的高温摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(4): 374-378.
- YANG Z J, HAN Z W, REN L Q. Friction and wear behavior of bionic non-smooth surfaces at high temperature[J]. Tribology, 2005, 25(4): 374-378 (in Chinese).
- [15] 刘东雷, 孟小霞, 袁春俭, 等. 多种规则微造型表面摩擦特性的试验研究[J]. 润滑与密封, 2008, 33(7): 28-31.
- LIU D L, MENG X X, YUAN C J, et al. Research on tribological performance of texturing surfaces[J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(7): 28-31 (in Chinese).
- [16] 王志强, 倪敬, 高殿荣. 不锈钢与GFER及CFRPEEK在海水润滑下的摩擦磨损特性[J]. 中国表面工程, 2016, 29(2): 49-57.
- WANG Z Q, NI J, GAO D R. Friction and wear properties of stainless steel sliding against GFER and CFRPEEK under seawater lubrication[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(2): 49-57 (in Chinese).
- [17] 唐群国, 陈品申, 金文浩. 氧化锆陶瓷/碳纤增强聚醚醚酮在水润滑下的摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(6): 601-606.
- TANG Q G, CHEN J S, JIN W H. Tribological properties of carbon fiber reinforced polyetheretherketone sliding against zirconia lubricated with water[J]. Tribology, 2010, 30(6): 601-606 (in Chinese).
- [18] 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 (in Chinese).
- [19] DAVIM J P, MARQUES N, BAPTISTA A M. Effect of carbon fibre reinforcement in the frictional behaviour of PEEK in a water lubricated environment[J]. Wear, 2001, 251: 1100-1104.
- [20] WANG Z Q, GAO D R. Friction and wear properties of stainless steel sliding against polyetheretherketone and carbon-fiber-reinforced polyetheretherketone under natural seawater lubrication[J]. Materials and Design, 2014, 53: 881-887.
- [21] MYSHKIN N K, PETROKOVETS M I, KOVALEV A V. Tribology of polymers: adhesion, friction, wear, and mass-transfer[J]. Tribology International, 2005, 38: 910-921.
- [22] 梁瑛娜, 高殿荣, 毋少峰. 凹坑形仿生非光滑表面滑靴副的动压润滑计算[J]. 机械工程学报, 2015, 51(24): 153-160.
- LIANG Y N, GAO D R, WU S F. Hydrodynamic lubrication calculation for slipper/swash plate pair with bionic non-smooth concave surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(24): 153-160 (in Chinese).

(责任编辑: 王文宇)