

摩擦磨损与润滑

表面结构化 DLC 涂层在脂润滑下的
摩擦学性能研究祁鹏浩¹, 仝哲¹, 刘奇¹, 李月², 董光能¹(1.西安交通大学 现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室, 西安 710049;
2.中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: **目的** 研究表面织构与类金刚石薄膜 (DLC) 的复合处理方法, 提高在 GCr15 钢盘表面在全氟聚醚 (PFPE) 润滑脂润滑下的摩擦学性能。 **方法** 设计了四种表面织构与两种厚度的 DLC 涂层相结合, 采用两种加工方法 (在织构表面镀上 DLC 涂层, 在 DLC 涂层上加工织构), 对 GCr15 金属盘表面进行处理。选用全氟聚醚润滑脂作为润滑介质, 通过球-盘摩擦磨损实验, 评价了在织构化和 DLC 涂层协同处理下, GCr15 金属盘表面的摩擦学性能, 并通过光学显微镜对磨痕形貌进行分析。 **结果** 在四种织构表面中, 微纹织构的减摩抗磨性能最好, 与 DLC 膜的协同效果最好, 在设定的实验条件下, 得到的摩擦系数为 0.1186, 磨斑直径为 159.68 μm 。DLC 镀膜处理的试样中, 3 μm 厚的 DLC 膜试样在实验中的减摩性能较好, 摩擦系数较低, 但是磨斑尺寸较大, 约为 508.86 μm 。在织构上镀 DLC 膜的复合处理方法, 对于摩擦学性能改善不明显。在 DLC 薄膜上加工微纹织构的表面, 表面织构化和 DLC 镀膜的耦合性能好, 尤其在 3 μm 厚 DLC 膜上加工微纹织构的试样, 实验得到的摩擦系数仅为 0.099 46, 磨斑尺寸为 192.22 μm 。 **结论** DLC 涂层上加工微纹织构的复合处理方法, 结合了微纹织构的储油特性和 DLC 的减摩特性, 两种处理方法产生了正向协同作用, 得到具有较好减摩和抗磨性能的摩擦表面。

关键词: PFPE 润滑脂; 表面织构; 类金刚石薄膜; 摩擦; 磨损; 复合处理**中图分类号:** TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)01-0296-09**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.01.025Tribological Properties of DLC Coated Textured Surfaces
under Grease LubricationQI Peng-hao¹, TONG Zhe¹, LIU Qi¹, LI Yue², DONG Guang-neng¹

(1.Key Laboratory of Modern Design and Rotor-Bearing System of Education Ministry, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2.Institute of Mechanical Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

收稿日期: 2020-06-17; 修订日期: 2020-09-27

Received: 2020-06-17; **Revised:** 2020-09-27**基金项目:** 国家自然科学基金 (51705489); 中物院创新发展基金 (PY2019071)**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51705489), Innovation and Development Fundation of China Academy of Materials Science (PY2019071)**作者简介:** 祁鹏浩 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为摩擦学。**Biography:** QI Peng-hao (1996—), Male, Master, Research focus: tribology.**通讯作者:** 李月 (1991—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为再制造工程。邮箱: 372949707@qq.com**Corresponding author:** LI Yue (1991—), Female, Master, Engineer, Research focus: mechanical design and surface engineering. E-mail: 372949707@qq.com**引文格式:** 祁鹏浩, 仝哲, 刘奇, 等. 表面结构化 DLC 涂层在脂润滑下的摩擦学性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(1): 296-304.

QI Peng-hao, TONG Zhe, LIU Qi, et al. Tribological properties of DLC coated textured surfaces under grease lubrication[J]. Surface technology, 2021, 50(1): 296-304.

ABSTRACT: The work aims to study the composite treatment of surface texture and diamond-like film (DLC) to improve the tribological properties of GCr15 bearing steel plate lubricated with perfluoropolyether (PFPE) grease. Four kinds of surface textures were designed to be combined with DLC coatings of two thicknesses. Two texture processing methods (plating DLC coating on the textured surface and processing texture on the DLC coating) were used to treat the surface of GCr15 metal disc. With perfluoropolyether grease as the lubricating medium, and through the ball-disk friction and wear test, the tribological performance of the surface of the GCr15 metal disc under the synergistic treatment of texture and DLC coating was evaluated, and the wear surfaces were analyzed by optical microscope. Among the four textured surfaces, the micro-texture had the best anti-friction and anti-wear properties, and the best synergistic effect with the DLC film. Under the set experimental conditions, the friction coefficient was 0.1186 and the wear width was 159.68 μm . Among the two DLC plated surfaces, the samples with thicker DLC film (3 μm) had better friction reduction and lower friction coefficient, but the width of the wear scar on the ball was larger, which was about 508.86 μm . The composite treatment method of plating DLC film on the textured surface had no obvious improvement on the tribological performance. Processing micro-textured surface on DLC coating, the coupling between surface texture and DLC coating was good, especially when processing micro-textured sample on 3 μm thick DLC film, the experimental friction coefficient was only 0.099 46, and wear width on the ball was 192.22 μm . The composite treatment method of processing micro-texture on DLC coating combines the oil storage characteristics of micro-texture and the anti-friction characteristics of DLC, and the two treatment methods produce a positive synergistic effect, thus obtaining a friction surface with good anti-friction and anti-friction properties.

KEY WORDS: PFPE grease; surface texture; diamond-like carbon film; friction; wear; composite processing

全氟聚醚润滑脂作为一种具有良好的耐高低温、抗氧化、抗辐射、化学惰性性能的润滑脂,广泛应用于航天飞行器的机械部件润滑,在化工、3D 打印、食品加工等行业的设备和精密仪器中也有着较为普遍的应用^[1-2]。但是,全氟聚醚基润滑脂的主要成分为含氟物质,材料的分子稳定性高,材料表面能低,因此与金属之间的粘附性差,容易被挤出摩擦区域,尤其在泵等具有往复运动的部件中作润滑剂时,润滑性能不稳定的状况时有发生。

表面织构化作为一种改善机械零件、微/纳零件摩擦学性能的有效手段,可改善材料的表面形貌,这将直接影响界面的粘着和摩擦行为^[3]。在摩擦副表面进行织构化设计(如凸起、凹坑或沟槽)可以作为储油槽、储屑槽,同时还有利于摩擦表面产生微动压润滑,提高承载力并减小摩擦力矩^[4]。类金刚石(Diamond-Like Carbon,简称 DLC)涂层具有高硬度、低摩擦系数、化学惰性^[5]以及高电阻率等优点,而成为薄膜领域研究的热点。研究表明,DLC 膜的摩擦学行为强烈地依赖于膜层的成分和结构,通过 DLC 薄膜表面的特殊形貌,可以消除在边界润滑条件下的疲劳磨损^[3],同时可以将对应部件的磨损保持在非常低的水平。因此,研究利用 DLC 薄膜的自润滑特性以及表面织构的储油特性,可极大地优化机械支承部件之间的摩擦磨损状况^[6-9]。

以往学者所做的研究主要集中在单一表面织构化技术或 DLC 涂层技术的润滑特性上,对几种表面处理技术的交互作用在金属基材表面的微/纳摩擦学行为的研究较少,因此有必要研究 PFPE 基脂润滑下

织构与 DLC 涂层表面固体润滑技术对金属表面摩擦学性能的影响。本文评价了在 GCr15 钢盘表面做织构化处理、镀 DLC 膜以及两种方法协同作用在 PFPE 润滑脂下的微/纳摩擦学特性。

1 实验

1.1 润滑脂制备

首先将六方氮化硼微粉加入到 JC1800 全氟聚醚基础油中,氮化硼和基础油的质量比为 1:65,在球磨机中球磨(常温,12 h,900 r/min),获得小粒径并均匀分散的润滑油悬浮液。将球磨后的油液和聚四氟乙烯(PTFE)微粉,按照 33:17 的质量比混和,将混合物在磁力搅拌机上搅拌(60 $^{\circ}\text{C}$,20 min,500 r/min),搅拌均匀后,再采用球磨机将混合物球磨 6 h,进行研磨脱气,然后在 200 $^{\circ}\text{C}$ 的真空干燥箱中真空下放置 2 h,抽气并除去易蒸发的组分。最后取出静置冷却至室温,制得实验所用的 PTFE 润滑脂。该润滑脂主要物理化学性质如下:外观为乳白色,密度为 1.85 g/cm^3 ,工作温度范围为-80~204 $^{\circ}\text{C}$,滴点为 155 $^{\circ}\text{C}$,蒸发量(204 $^{\circ}\text{C}$,22 h)为 0.6%,基础油运动黏度(40 $^{\circ}\text{C}$)为 494 mm^2/s 。

1.2 织构盘和 DLC 盘制备

采用球-盘摩擦副进行摩擦性能评价。金属盘的材料为 GCr15 轴承钢,直径为 30 mm,厚度为 5 mm。测试前将金属盘打磨抛光至表面粗糙度为 0.02 μm 左右。

制备镀 DLC 涂层的盘, 本文采用磁控溅射打底、化学气相沉积的方式。在抛光后的金属盘上沉积镀膜, 镀上 3 μm 或 1 μm 厚的 DLC 涂层。

制备织构盘, 织构选用常见的点阵、条纹凹坑织构和一种仿生减阻织构, 即圆形织构、线形织构^[10-11]和 V 形织构^[12-13], 并设计了一种微纹织构。将四种

织构参数进行二维建模, 结果如图 1 所示。使用激光打标机对金属盘表面进行织构处理。加工线形织构、圆孔织构和 V 型织构的激光功率均为 16 W, 激光扫描速度为 600 mm/s, 激光频率为 20 kHz。加工微纹织构的激光功率为 0.2 W, 激光速度为 1500 mm/s, 激光频率为 100 kHz。

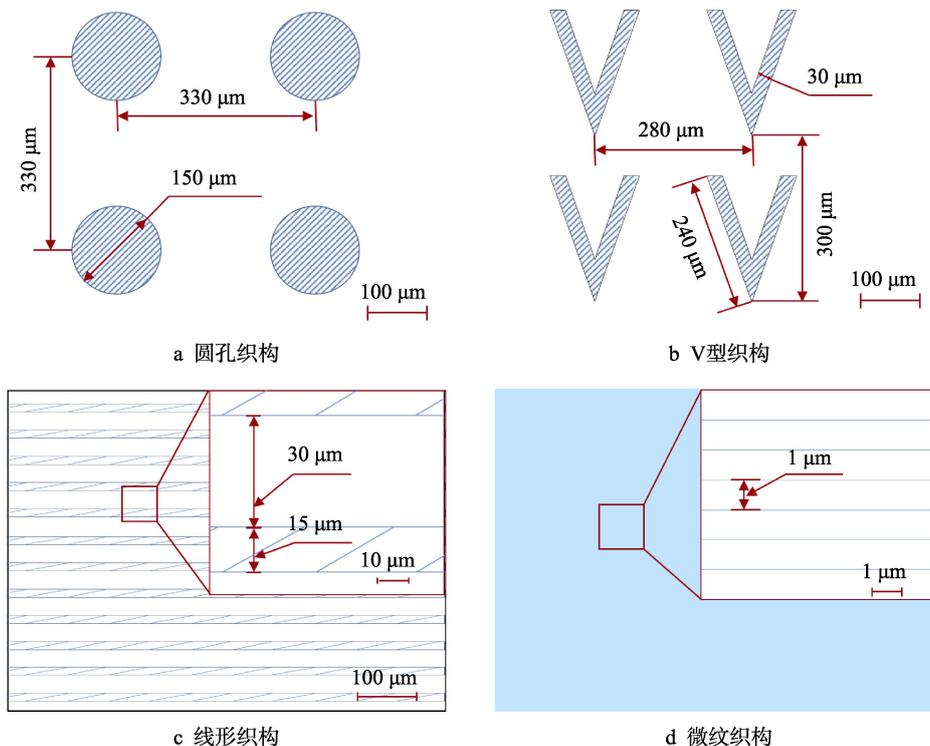


图 1 四种织构的示意图

Fig.1 Schematic diagram of four textures: a) circle texture; b) V-shape texture; c) line texture; d) micro texture

本文中线形织构、圆孔织构、V 型织构和微纹织构分别记为 T_L 、 T_C 、 T_V 、 T_M 。无织构的抛光盘记为 T_N 。1 μm 和 3 μm 厚的 DLC 涂层分别记为 DLC-1 和 DLC-3。

1.3 摩擦学实验

实验前, 计算膜厚比, 评估实验状态, 通过计算最小油膜厚度与摩擦副表面粗糙度的比值, 如 (1) 式所示, 计算膜厚比 λ 。

$$\lambda = h_{\min} / \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (1)$$

式中: h_{\min} 为最小油膜厚度 (μm), σ_1 和 σ_2 分别为两个摩擦副表面的粗糙度。点接触条件下的最小膜厚可以采用 Hamrock-Dowson 公式进行估算^[14-15]。摩擦磨损实验采用 CETR UMT-2 摩擦磨损试验机, 采用球-盘式摩擦副, 示意图如图 2 所示。球 AISI52100 钢, 直径为 9.5 mm, 表面粗糙度为 0.012 μm 左右。载荷为 5~10 N、滑动速度为 0.012~0.036 m/s 时, 计算所得的膜厚比 λ 在 0.1~0.5 之间。一般认为 $\lambda < 1$ 时, 润滑状态为边界润滑。

最终设定的摩擦实验条件为: 初始温度(25 ± 5) °C,

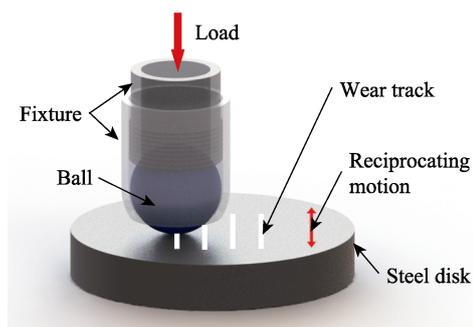


图 2 摩擦磨损实验中球-盘摩擦副的示意图

Fig.2 Schematic diagram of ball-disc friction pair in friction and wear experiment

法向载荷 5 N, 往复滑动的频率 2 Hz, 滑移距离 6 mm, 滑动速度 0.012 m/s, 测试时间 30 min。润滑介质为上文制备的 PTFE 润滑脂, 添加量约为 1.5 mL。

采用同一批金属球与经过不同表面处理的金属盘试样, 在相同的实验条件下进行摩擦磨损实验, 对比和分析实验所得的摩擦系数, 由磨痕计算得到了磨损量, 进而研究协同表面处理方法对 GCr15 钢盘在脂润滑下的摩擦学性能。

2 结果及分析

2.1 结构形貌

为了进一步表征结构的三维形状和尺寸，采用 OSL4000 激光共聚焦显微镜对结构进行观测，四种结构的表面形貌如图 3 所示。图 3a、3b 和 3c 三种大尺寸结构，由于激光加工的缺陷，部分熔化的金属熔融

物会在结构内部堆积。此外，由于激光的热冲击效应，在结构周边产生隆起^[16]。加工后在绒布上对结构表面进行打磨，可以去除部分堆积金属。图 3d 为微纹结构的观测形貌及其纹理示意图。微纹结构是利用熔融堆积的现象，通过使用小功率的激光，快速高频地扫描金属表面形成的。较小功率的激光加工的是盘表层金属，产生的金属熔融物较少，激光走刀使熔融物形成方向性的堆积，最终形成波纹状的表面形貌结构。

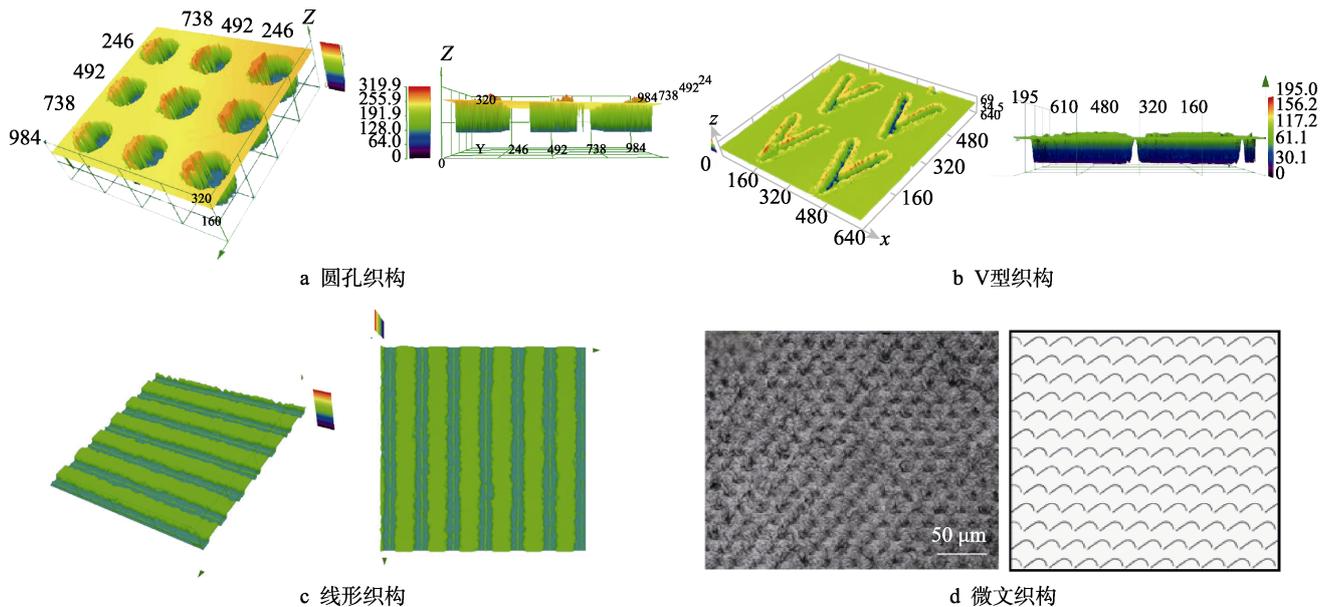


图 3 结构表面形貌的三维扫描图或示意图

Fig.3 Three-dimensional scanning diagram or schematic diagram of different texture: a) circle texture; b) V-shape texture; c) line texture; d) micro texture

由激光扫描测算可知，圆形结构的深度为 $(105 \pm 5) \mu\text{m}$ ，线形结构和 V 形结构的深度分别为 $(24 \pm 2) \mu\text{m}$ 和 $(50 \pm 3) \mu\text{m}$ ，微纹结构的表面粗糙度为 $(0.25 \pm 0.05) \mu\text{m}$ 。

2.2 表面处理对摩擦学行为的影响

2.2.1 表面结构化

图 4 为相同实验条件下，四种结构表面盘在 PFPE 脂润滑下的摩擦系数曲线。由图 4 可知，抛光盘试样，在前 200 s 处于磨合阶段，摩擦系数呈现缓慢上升的趋势，在 200~400 s 处于稳定摩擦阶段，摩擦系数趋于平缓。但是，在 400 s 左右，摩擦系数迅速增大，并且在后续实验时间内，摩擦系数呈现持续的波动。说明随着摩擦的进行，润滑脂受到接触压力的作用，从摩擦副的接触区被挤出，且润滑脂流动性差，无法及时补充润滑油膜，导致润滑膜破损，润滑失效并处于乏油润滑状态。结构可以改善润滑脂的分布状态，弥补了润滑脂流动性的不足。在实验中，结构的凹坑结构会存储一部分润滑脂，当受到载荷作用时，接触区发生变形，存储在凹坑中的润滑脂，随着弹性形变的发生，一部分润滑脂会重新进入接触区

域，实现二次润滑，因此在实验时间内，摩擦系数较低且数值稳定。

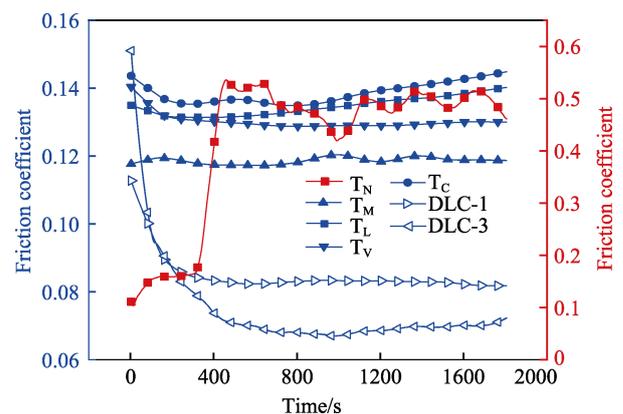


图 4 无结构与四种结构试样摩擦系数的变化曲线
Fig.4 Variation curves of friction coefficient of non-textured samples and four textured samples

从图 4 可知， T_M 和 T_L 的摩擦系数趋于平缓，而 T_V 和 T_C 的摩擦系数整体趋势是缓慢上升的。并且在四种结构中， T_M 的摩擦系数明显小于其他三种结构表面的摩擦系数。因此，在减摩性能上，四种结构的

关系是： $T_M > T_L > T_V > T_C$ 。

图5为无织构盘和四种织构配副球的表面磨损形貌。从图5a中可以看出，相比 T_N 试样，四种织构盘试样对应的磨斑深度浅，磨痕尺寸较小。 T_C 和

T_V 织构凹坑的边缘和内部有金属堆积（图5b和图5c），实验中摩擦球与织构边缘的凸起部分相接触，受凸起部分形状的影响，磨斑分为两块区域且形状不均匀。

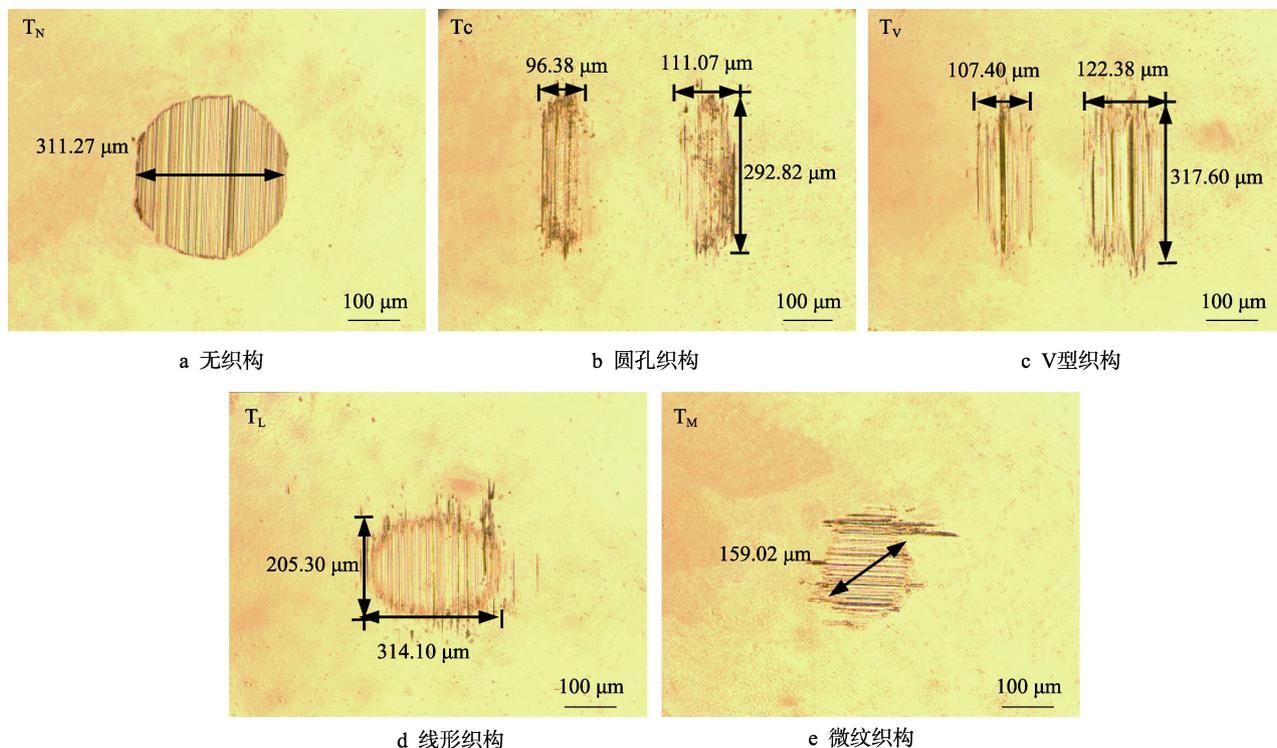


图5 无织构和四种织构试样对应的球摩擦副磨斑的观测图

Fig.5 Observation diagram of grinding spots of ball corresponding to non-textured samples and four textured samples: a) non texture; b) circle texture; c) V-shape texture; d) line texture; e) micro texture

如图5d所示， T_L 试样的磨斑形状为椭圆形。这是由于摩擦实验初期，线形凹坑受载荷的作用，摩擦接触区域上的表层金属发生了剥落现象，导致轴向应力幅值较低，形成了近椭圆形的摩擦斑^[17]。由图5e所示，微纹织构对应摩擦球的磨斑最小。这是因为在加工微纹织构时，激光脉冲能量导致金属表层产生位错运动，最终形成细化的晶粒^[18]。由于细晶在摩擦接触时变形较小，而且会硬化表面，从而提高试件的耐磨性，进而出现较低的摩擦系数和磨损率。

表面织构可以存储润滑介质，促进润滑脂重新转移并铺展成低剪切强度的保护层^[19]，起到“二次润滑”的作用，保证油膜的完整。此外，表面织构能够捕获并保存磨屑，减小磨粒磨损，所以织构表面在实验中的摩擦系数稳定，磨痕较浅。在四种织构表面中，微纹织构表面由于表面变形量小，减摩抗磨性能提高，摩擦系数和磨损最小。

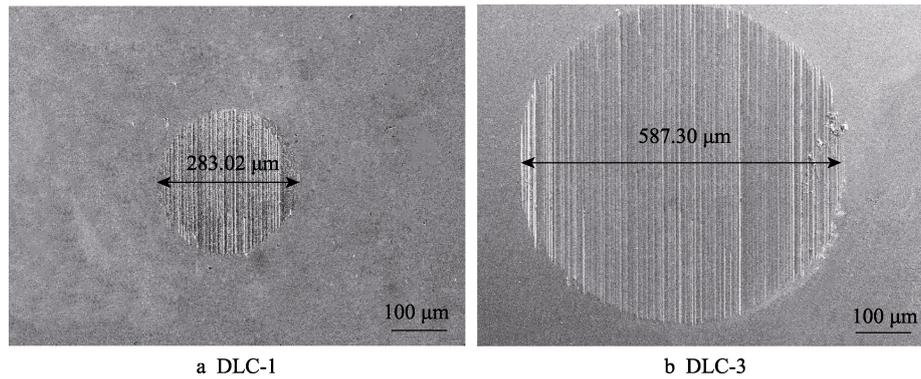
2.2.2 表面类金刚石薄膜

选用1 μm和3 μm厚DLC膜的盘在相同实验条件下进行实验，由图4可见，由于DLC膜的减摩性质，镀DLC膜的盘在摩擦磨损实验中，摩擦系数比

织构盘低0.04。镀1 μm的DLC膜试样的摩擦系数为0.085，而镀3 μm的DLC膜试样的摩擦系数为0.075。

图6为不同DLC膜厚的试样在摩擦实验后的磨斑图像。对比可知，DLC-3试样的磨斑直径较大，即磨损量较大，表明同种实验条件，厚度对DLC涂层在脂润滑下的摩擦性能存在影响。相同实验条件下，相比镀1 μm的DLC膜试样，镀3 μm的DLC膜试样的减摩性能更好，但是磨损量更大。

采用硬度仪和粗糙度仪对无织构盘、两种厚度涂层盘表面进行测定。DLC涂层表面和抛光盘的硬度与表面粗糙度如表1所示，几种盘的表面粗糙度接近，但是硬度相差较大，较厚涂层表面受衬底的影响小，整体表面硬度大，等效弹性模量增大和泊松比减小。在这种情况下，较厚涂层试样的赫兹接触压力大，因而摩擦球的变形量增大，DLC涂层的石墨化进程加快。此外，较厚的DLC涂层比较薄的涂层具有更强的绝热效果，而且薄膜硬度受衬底硬度的影响较小^[20-21]，导致在摩擦过程中，热量散失慢，赫兹接触压力和摩擦区域的温度增大，也会加速DLC膜石墨化的进程^[22]。



a DLC-1
b DLC-3
图 6 不同厚度 DLC 涂层试样对应磨斑的 SEM 图

Fig.6 SEM images of corresponding grinding spots of DLC coating samples with different thickness

表 1 抛光盘与不同厚度涂层盘的硬度与表面粗糙度
Tab.1 Hardness and surface roughness of polishing samples and coating samples with different thickness

Samples	Hardness(HV)	Surface roughness/ μm
T _N	733	0.022
DLC-1	1063	0.033
DLC-3	1385	0.037
DLC	2100~2400	—

图 7 为实验前后 DLC 薄膜的拉曼光谱的变化及其高斯分解图。根据高斯分布拟合计算出峰的位置和 I_D/I_G (D、G 两峰下积分面积的比值), 两个峰的位置在 1381 cm^{-1} 和 1568 cm^{-1} 左右。实验前, 试样的 I_D/I_G 约为 0.92, 而实验后, DLC-1 试样的两峰面积比 I_D/I_G 约为 0.68, DLC-3 试样的两峰面积比 I_D/I_G 约为 0.36。两峰面积比降低, 则表明 sp^2 键含量增加, sp^3 键含量减小^[23]。DLC-3 试样的 I_D/I_G 小, 表明石墨化程度高。

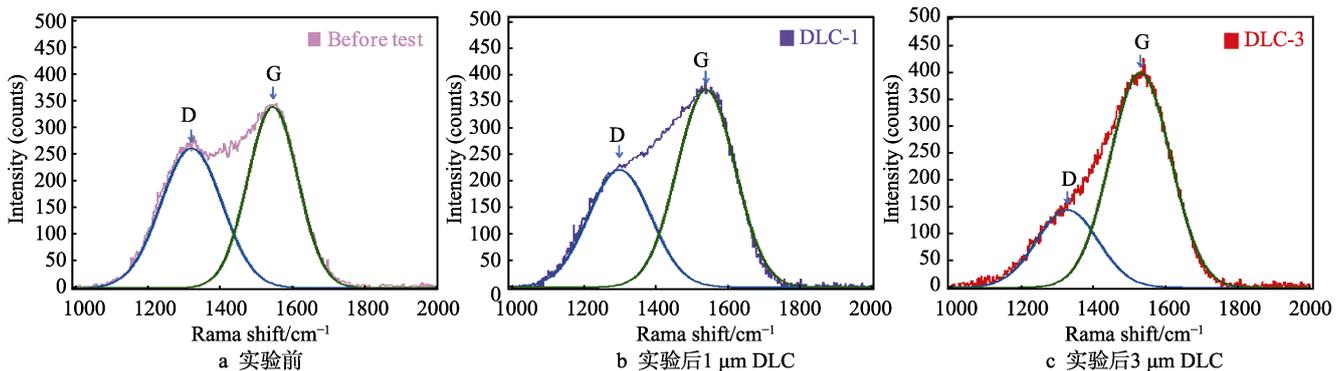


图 7 试验前后 DLC 膜试样的拉曼光谱分析

Fig.7 Raman spectral analysis of DLC film samples before and after the test: a) before test; b) after test, 1 μm DLC; c) after test, 3 μm DLC

碳原子在金刚石中被 sp^3 键合, 在石墨中被 sp^2 键合, 在 DLC 中被 sp^3 和 sp^2 键合, 所以 DLC 的结构和性能介于金刚石和石墨之间^[24]。DLC 薄膜中 C 原子轨道上的 sp^3 杂化结构决定了薄膜的耐磨性和较高的强度, sp^2 杂化结构赋予涂层表面较好的润滑特性^[25-26]。当 DLC 膜发生石墨化时, 表面 DLC 涂层的 sp^3 结构转变为 sp^2 杂化结构的石墨, 增强了接触区域的润滑性能, 摩擦系数减小, 但是薄膜表面丧失原有的高硬度、高耐磨性等优异特性, 所以磨损量增大^[27-28]。因此相同实验条件下, 相比镀 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的 DLC 膜试样, 镀 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的 DLC 膜试样的减摩性能更好, 但是摩擦副上的磨损量更大。

2.3 复合表面处理方法

2.3.1 结构化 DLC 膜

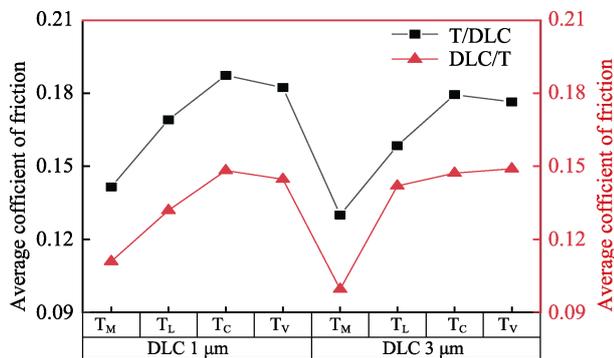
表面结构主要是通过缓释润滑脂、补充油膜并减

少磨屑的方式改善润滑。而 DLC 涂层则是通过表面结构转变, 形成更有利于润滑的石墨结构, 代替油脂成膜, 实现减摩的作用。

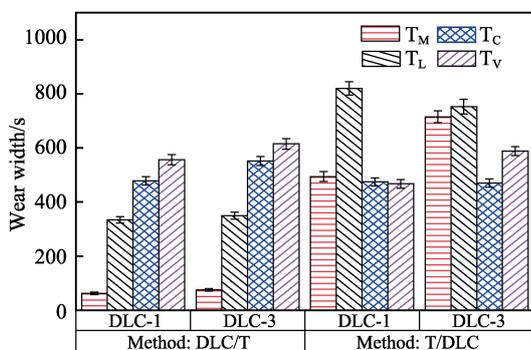
基于 DLC 薄膜以及结构化的两种润滑特性, 设计了两种加工方法, 研究两种表面处理方法对润滑脂摩擦性能的协同效果。方法一是在加工好的结构盘试样表面镀上 DLC 膜, 记为 T/DLC; 方法二是在镀有 DLC 涂层的金属盘上加工四种结构, 记为 DLC/T。其中, T 表示四种结构类型, DLC 表示两种厚度的 DLC 涂层。

图 8 为经过两种方法处理的盘在实验中的摩擦系数曲线及实验后的磨斑尺寸图。由图 8a 可见, DLC/T, 即方法二可以较好地改善接触表面的摩擦性能。采用方法二处理的试样, 在实验中的摩擦系数较低, 减摩性能好, 两种处理方法下的摩擦系数差值在 0.3 左右。而由图 8b 可见, 复合表面处理下,

膜厚对于磨损的影响小,不同织构对磨损的影响较为明显。



Coating thickness and texture type
a 摩擦系数对比图



Sample
b 磨痕宽度对比图

图8 DLC/T和T/DLC两种复合处理方法下摩擦系数和磨痕宽度的对比图

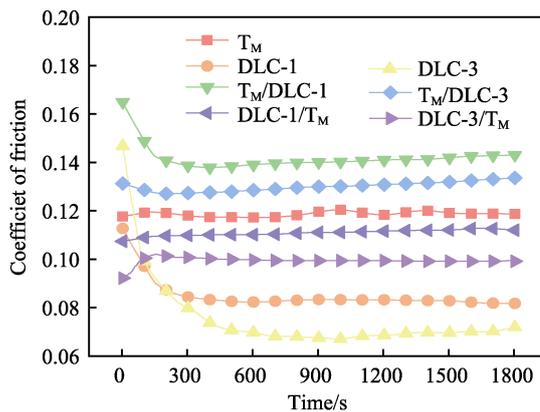
Fig.8 Variation curves of friction coefficient and wear width of samples with different surface treatment (DLC/T and T/DLC): a) friction coefficient; b) wear width

对比可知,复合表面处理中,采用方法二处理的表面摩擦学性能较好。实验选用的T_M、T_L、T_C和T_V四种织构中,T_M与DLC涂层的协同最好,摩擦系数低,磨损量小。所以选取T_M,即微纹织构,对不同处理方法下的摩擦学行为进行进一步研究。

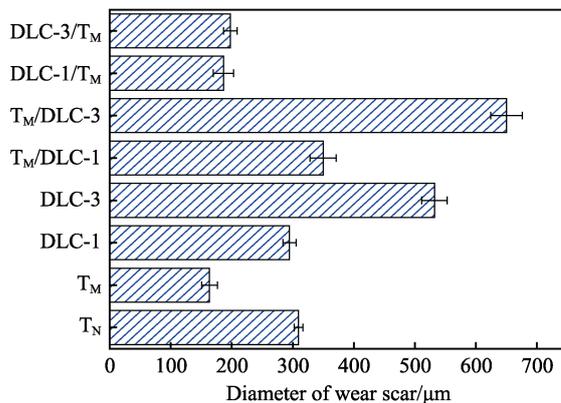
2.3.2 在微纹织构上沉积DLC

图9为经过T_M、DLC、T_M/DLC和DLC/T_M处理的表面在实验中的摩擦系数曲线和磨斑尺寸对比。由图9可知,采用微纹织构上沉积涂层的方式处理形成的表面,减摩抗磨性能较差,相比仅织构处理或仅涂层处理的表面,摩擦系数和磨损量都有明显的增大,说明这种处理方式下,织构化与涂层在改善表面润滑性能方面产生了拮抗作用。

采用粗糙度仪对处理后的表面进行测量,结果如表2所示。由表2可知,采用在微纹织构上沉积涂层的方式处理的表面,相比无织构表面和织构表面,表面粗糙度大,并且存在较大尺寸波动。表明沉积的DLC涂层表面质量不好,DLC膜表面没有形成类似的纹理织构,表面粗糙度反而较大,凹坑边缘可能存



a 摩擦系数曲线



b 磨斑尺寸

图9 T_M、DLC、T_M/DLC和DLC/T_M处理的试样在摩擦实验中的实时摩擦系数和磨斑尺寸对比

Fig.9 Real-time friction coefficient graph and wear width graph on the ball of samples under T_M, DLC, DLC/T_M and T_M/DLC treatments: a) friction coefficient graph; b) wear width graph

表2 经过不同处理的试样盘的表面粗糙度

Tab.2 Surface roughness of sample plates with different treatments

Samples	Roughness /μm	
	R _a	R _t
T _N	0.022	0.022
T _M	0.064	0.718
T _M /DLC-1	0.111	1.069
T _M /DLC-3	0.134	1.283
DLC-1/T _M	0.051	0.625
DLC-3/T _M	0.047	0.715

在锋利的边缘。在摩擦实验中,这些硬质凸起会刮除转移材料来中和摩擦膜的形成,导致转移膜损失,使得润滑性能变差^[3]。除此之外,织构边缘部分的DLC材料在载荷作用下会发生脱落,根据Dai等人^[29]的发现,这些硬质碳化物颗粒会引起磨料磨损,从而导致较高的摩擦系数和磨损系数,这与实验现象相符合。

2.3.3 DLC涂层上加工微纹织构

由图9a可知,DLC/T_M处理的试样,对表面润滑性能有较好的改善作用。减摩性能上,相较于T_M处

理的试样, DLC-1/ T_M 处理的试样表面摩擦系数降低了 8%, DLC-3/ T_M 处理的试样表面摩擦系数降低了 17%。抗磨性能方面, 由图 9b 可知, 磨斑尺寸与仅 T_M 处理的试样接近, 在 200 μm 左右。对比 DLC-1 处理的试样, 磨斑尺寸减小 33%, 相较于 DLC-3 处理的试样, 磨斑尺寸减小 62%, 抗磨效果显著。

图 10 为 DLC/ T_M 试样磨斑的 SEM 图。由图 10 可知, 磨斑上存在明显的划痕, 这是由于激光处理下, 表面形貌发生变化, 表面粗糙度上升, 出现了硬质凸起, 在摩擦过程中, 这些凸起脱落, 形成硬质磨粒。但是由于微纹结构储油 DLC 以及涂层石墨化, 保证了油膜的厚度和完整性, 从而降低了整体的摩擦系数和磨损量。

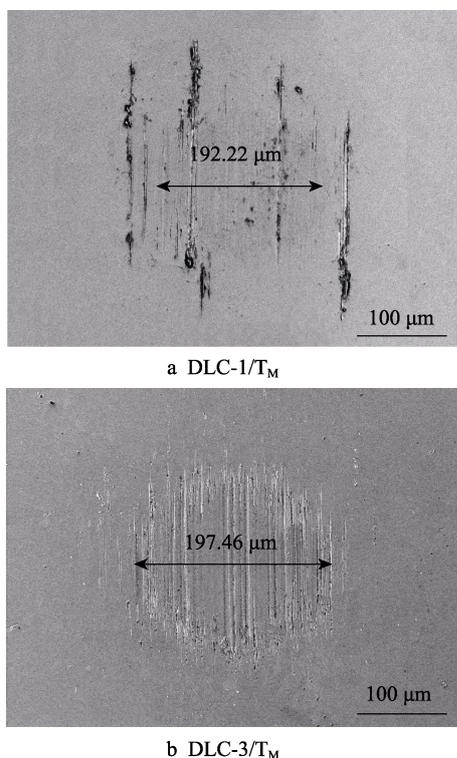


图 10 DLC/ T_M 试样磨斑的 SEM 图
Fig.10 SEM image of surface wear of DLC/ T_M sample

总的来说, 采用 DLC 涂层上加工微纹结构的方式处理形成的表面, 减摩抗磨性能较好, 相比仅织构处理或仅涂层处理的表面, 摩擦系数和磨斑尺寸减小, 说明这种处理方式下, 织构化与涂层在改善表面润滑性能方面产生了协同作用。在载荷作用下, 涂层结构发生石墨化转变, 因此摩擦系数稳定并保持较低的数值。此外微纹结构通过存储润滑介质, 保证了油膜的厚度和完整性, 提高了油膜承载, 减少了摩擦表面之间直接接触, 保护了摩擦表面, 因此磨损量减小。

3 结论

1) 四种织构中, 微纹织构表面性能较好, 相比

线形织构、圆形织构和 V 形织构, 微纹织构可以更好地提升 PFPE 脂润滑下的 GCr15 轴承钢盘的减摩抗磨性能, 实验中所得的摩擦系数和磨损量最小。

2) DLC 涂层试样中, 较厚的涂层表面受衬底影响小, 整体表面硬度高, 接触区域的接触压力大。因此, 3 μm 厚的 DLC 涂层试样在实验中, 石墨化程度高, 因而减摩性能好, 摩擦系数较低, 磨损量大。

3) 在织构上镀 DLC 膜的复合表面处理方法, 相较于仅织构盘, 摩擦系数和磨损量均增大, 说明这种方法下, 织构与 DLC 涂层产生了拮抗作用。

4) DLC 薄膜上加工微纹织构的加工方法下, 所得的摩擦系数相较于仅织构盘, 减小了 0.02 左右, 表明 DLC 涂层发挥了减摩的特性。在摩擦系数减小的情况下, 摩擦副上的磨斑尺寸也较小, 表明微纹织构表面起到了储油的作用, 保证了油膜的厚度和完整性, 从而提高了油膜承载能力, 减小了摩擦副变形, 降低了磨损。在这种加工方法下, 织构与 DLC 涂层的润滑特性相结合, 产生正向协同作用, 改善摩擦表面在 PFEP 脂润滑下的摩擦学性能。

参考文献:

- [1] 桑瑞鹏, 周晖, 张凯峰, 等. 纳米改性油脂润滑材料的空间摩擦学性能[J]. 润滑与密封, 2010, 35(8): 63-66.
SANG Rui-peng, ZHOU Hui, ZHANG Kai-feng, et al. Research on space tribological behavior of nano-modification grease lubricant[J]. Lubrication engineering, 2010, 35(8): 63-66.
- [2] MORALES W, STREET K W, ZARETSKY E V. Performance and analysis of perfluoropolyalkyl ether grease used on space shuttle actuators—A case study[J]. Tribology transactions, 2012, 55(1): 77-85.
- [3] PETERSSON U, JACOBSON S. Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts[J]. Tribology international, 2003, 36(11): 857-864.
- [4] 张玉周. 表面结构化改善摩擦学性能研究综述[J]. 成都大学学报: 自然科学版, 2013, 32(1): 64-67.
ZHANG Yu-zhou. Review of research on surface texturing for improving tribological performance[J]. Journal of Chengdu University (natural science), 2013, 32(1): 64-67.
- [5] BEWLOGUA K, HOFMANN D. History of diamond-like carbon films: From first experiments to worldwide applications[J]. Surface and coatings technology, 2014, 242(4): 214-225.
- [6] RUBIG B, HEIM D, FORSICH C, et al. Tribological behavior of thick DLC coatings under lubricated conditions[J]. Surface and coatings technology, 2017, 314: 13-17.
- [7] WANG Yi, XIONG Dang-sheng. The effect of laser surface texturing on frictional performance of face seal[J]. Journal of materials processing technology, 2008, 197(1-3): 96-100.
- [8] SUH N P, MOHSEN M, PHILLIP S H. Control of fric-

- tion[J]. *Wear*, 1994, 175(1-2): 151-158.
- [9] 付俊兴, 王谦之, 周飞. 类金刚石薄膜水润滑摩擦学特性研究进展[J]. *润滑与密封*, 2012, 37(7): 88-93.
FU Jun-xing, WANG Qian-zhi, ZHOU Fei. Progress in the tribological properties of diamond-like carbon films in water lubrication[J]. *Lubrication engineering*, 2012, 37(7): 88-93.
- [10] ZHANG Hui, DONG Guang-neng, HUA Meng, et al. Improvement of tribological behaviors by optimizing concave texture shape under reciprocating sliding motion[J]. *Journal of tribology*, 2017, 65: 245.
- [11] 历建全, 朱华. 表面织构及其对摩擦学性能的影响[J]. *润滑与密封*, 2009, 34(2): 94-103.
LI Jian-quan, ZHU hua. Surface texture and its influence on tribological properties[J]. *Lubrication engineering*, 2009, 34(2): 94-103.
- [12] 戴振东, 佟金, 任露泉. 仿生摩擦学研究及发展[J]. *科学通报*, 2006, 51(20): 2353-2359.
DAI Zhen-dong, TONG Jin, REN Lu-quan. Research and development of bionic tribology[J]. *Chinese science bulletin*, 2006, 51(20): 2353-2359.
- [13] LI Xing, LI Jia-qian, DONG Guang-neng. Bioinspired topological surface for directional oil lubrication[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2020, 12: 5113-5119.
- [14] HAMROCK, BERNARD J. *Ball bearing lubrication*[M]. London: Wiley, 1981: 279-281.
- [15] ZHU D, WANG Q J. Elastohydrodynamic lubrication: A gateway to interfacial mechanics—Review and prospect[J]. *Journal of tribology*, 2011, 133(4): 041001-1-14.
- [16] 王静秋, 王晓雷. 表面织构创新设计的研究回顾及展望[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(23): 84-95.
WANG Jing-qiu, WANG Xiao-lei. State of the art in innovative design of surface texture [J]. *Journal of mechanical engineering* 2015, 51(23): 84-95.
- [17] 何国球, 樊康乐, 刘兵, 等. 35CrMoA 钢在椭圆形路径加载条件下的微动疲劳行为[C]//第十七届全国疲劳与断裂学术会议论文集. 上海: 同济大学, 2014: 71-72.
HE Guo-qiu, FAN Lang-le, LIU Bing, et al. The fretting fatigue behavior of 35CrMoA steel under elliptical path loading[C]//Proceedings of the 17th national conference on fatigue and fracture. Shanghai: Tongji University, 2014: 71-72.
- [18] 鲁金忠, 罗开玉, 冯爱新, 等. 激光单次冲击 LY2 铝合金微观强化机制研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(10): 2662-2666.
LU Jin-zhong, LUO Kai-yu, FENG Ai-xin, et al. Micro-structural enhancement mechanism of LY2 aluminum alloy by means of a single laser shock processing[J]. *Chinese journal of lasers*, 2010, 37(10): 2662-2666.
- [19] 陈旭斌, 葛翔, 祝毅, 等. 选择性激光熔化零件微观结构及摩擦学性能研究[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(3): 63-72.
CHEN Xu-bin, GE Xiang, ZHU Yi, et al. A study on microstructure and tribology performance of samples processed by selective laser melting (SLM)[J]. *Journal of mechanical engineering*, 2018, 54(3): 63-72.
- [20] BJORLING M, LARSSON R, MARKLUND P. The effect of DLC coating thickness on elastohydrodynamic friction[J]. *Tribology letters*, 2014, 55(2): 353-362.
- [21] 陈光华, 卢阳华. 不锈钢衬底上沉积类金刚石薄膜的硬度[J]. *无机材料学报*, 1996(4): 639-645.
CHEN Guang-hua, LU Yang-hua. Hardness of DLC films deposited on stainless steel[J]. *Journal of inorganic materials*, 1996(4): 639-645.
- [22] 胡天昌, 丁奇, 胡丽天. 激光表面织构化对 GCr15 钢摩擦磨损性能的影响[J]. *摩擦学学报*, 2011, 31(5): 447-451.
HU Tian-chang, DING Qi, HU Li-tian. The effect of laser texturing of GCr15 steel surfaces on their tribological properties[J]. *Tribology*, 2011, 31(5): 447-451.
- [23] CHEN Liang-yi, FRANKLIN C N. Effects of SiO_x-incorporation hydrocarbons on the tribological properties of DLC films[J]. *Diamond & related materials*, 2001, 10(3-7): 1058-1062.
- [24] 曾群锋, 刘官, 董光能, 等. 类金刚石碳膜高温摩擦学性能的研究进展[J]. *真空科学与技术学报*, 2014, 34(10): 1024-1029.
ZENG Qun-feng, LIU Guan, DONG Guang-neng, et al. Latest development of high-temperature tribological properties of diamond-like-carbon coatings[J]. *Chinese journal of vacuum science and technology*, 2014, 34(10): 1024-1029.
- [25] 张东灿. 金刚石薄膜和类金刚石薄膜摩擦学性能试验及其应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
ZHANG Dong-can. Study on the tribological properties and applications of diamond and diamond-like films[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [26] 张艳, 东梅, 李媚, 等. 纳米尺度下类金刚石(DLC)薄膜摩擦性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2015, 32(2): 242-248.
ZHANG Yan, DONG Mei, LI Mei, et al. Investigation on the nano-friction properties of diamond-like carbon films[J]. *Tribology*, 2015, 32(2): 242-248.
- [27] 李刘合, 夏立芳. 类金刚石碳膜的摩擦学特性及其研究进展[J]. *摩擦学学报*, 2001, 21(1): 76-80.
LI Liu-he, XIA Li-fang. Tribological properties and the current state of tribological investigation of diamond-like carbon films[J]. *Tribology*, 2001, 21(1): 76-80.
- [28] 周琼, 黄彪, 张而耕, 等. DLC 涂层的制备及内应力、热稳定性改善措施研究现状[J]. *陶瓷学报*, 2019, 40(5): 555-564.
ZHOU Qiong, HUANG Biao, ZHANG Er-geng, et al. The research status on preparation of diamond-like carbon coating and measures to improve its internal stress and thermal stability[J]. *Journal of ceramics*, 2019, 40(5): 555-564.
- [29] DAI Wei, KE Pei-ling, MOON M W, et al. Investigation of the microstructure, mechanical properties and tribological behaviors of Ti-containing diamond-like carbon films fabricated by a hybrid ion beam method[J]. *Thin solid films*, 2012, 520(19): 6057-6063.