

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170904001

边界润滑条件下薄膜碎片对 W-DLC 薄膜磨损性能的影响

詹 华¹, 汪瑞军¹, 李振东¹, 王伟平^{1,2}

(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 2. 北京金轮坤天特种机械有限公司, 北京 100083)

摘 要: 为研究边界润滑条件下薄膜碎片对钨掺杂类金刚石 (W-DLC) 薄膜的摩擦磨损性能的影响规律, 分别在 M50 高温轴承钢和 (100) 晶向的 Si 片表面制备 W-DLC 薄膜, 并且采用刻蚀法去除 Si 获得 W-DLC 薄膜碎片。采用 Raman 光谱和扫描电镜研究薄膜和碎片的结构, 利用摩擦磨损试验机和三维白光干涉仪对添加碎片后的薄膜的摩擦磨损性能进行测试。结果表明: 在载荷分别为 2、5 和 10 N 时, 由于加入定量薄膜碎片后摩擦体系的平均摩擦因数分别增大 2%、4% 和 10%; 而载荷由 2 N 提高到 5 N 和 10 N 时, 摩擦体系的平均摩擦因数从 0.1277 减小到 0.1131 再减小到 0.1031。在载荷与薄膜碎片耦合作用下, 薄膜的磨痕宽度、深度和体积都增大。通过磨损形貌的观察发现, W-DLC 薄膜在边界润滑条件下的磨损受到了磨粒磨损机制的控制, 在摩擦接触表面上呈现典型的犁沟特征。

关键词: 边界润滑条件; 薄膜碎片; W-DLC 薄膜; 磨损性能

中图分类号: TG174.44; TG115.58

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)02-0059-07

Effects of Film Fragments on Wear Properties for W-DLC Films Under Boundary Lubrication Conditions

ZHAN Hua¹, WANG Rui-jun¹, LI Zhen-dong¹, WANG Wei-ping^{1,2}

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083; 2. Beijing Golden Wheel Special Machine Co., Ltd., Beijing 100083)

Abstract: In order to study the influence of film fragments on the friction and wear properties of tungsten doped diamond-like carbon films (W-DLC films) under boundary lubrication conditions, the W-DLC films were fabricated on the surface of M50 high temperature bearing steel and (100) crystal Si, respectively. The pure W-DLC film, obtained by etching the substrate Si, was mashed into its fragments. Raman spectroscopy and SEM were used to study the structure of the films and its fragments. Friction and wear properties of the film were tested by friction and wear tester and 3D white light interferometer. The results show that the average friction coefficient of the friction system increases by 2%, 4% and 10%, when the load is 2, 5 and 10 N, respectively. The average friction coefficient of the friction system decreases from 0.1277 to 0.1131, and then to 0.1031, when the load is increased from 2 N to 5 N and 10 N. Additionally, the wear width, depth and volume of the film increase by the coupling of the load and the film fragments. The wear morphology suggest that the friction contact surface has the typical plow. The wear of the W-DLC film follows the abrasive wear mechanism under the boundary lubrication conditions.

Keywords: boundary lubrication conditions; film fragments; tungsten doped DLC film; wear performance

0 引 言

非晶碳基薄膜 (Diamond-like carbon films, DLC) 因其具有良好的耐磨、减摩和自润滑等特性, 正在成为高端装备应用与研究的热点^[1-4]。传

统工艺制备 DLC 薄膜的方法, 如离子束沉积、溅射沉积、真空阴极电弧沉积、等离子体沉积、脉冲激光沉积、热丝化学气相沉积、直接光化学气相沉积和等离子体增强化学气相沉积等工艺, 多采

收稿日期: 2017-09-04; 修回日期: 2018-01-08

网络出版日期: 2018-03-07 13:14; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20180307.1313.012.html>

通讯作者: 詹华 (1982—), 女 (汉), 高级工程师, 博士; 研究方向: 材料表面改性、气相沉积; E-mail: zhanhua1101@163.com

引文格式: 詹华, 汪瑞军, 李振东, 等. 边界润滑条件下薄膜碎片对 W-DLC 薄膜磨损性能的影响[J]. 中国表面工程, 2018, 31(2): 59-65.

ZHAN H, WANG R J, LI Z D, et al. Effects of film fragments on wear properties for W-DLC films under boundary lubrication conditions[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(2): 59-65.

用高能离化的沉积技术，制备的 DLC 薄膜内应力大，难以制备出更大厚度的薄膜，并且对 DLC 薄膜的使用寿命产生了不利影响^[5-8]。近年，为满足降低厚 DLC 薄膜的内应力，同时提高膜基结合强度的需求，在异质元素掺杂^[9-11]、多层薄膜结构的设计和调控^[12-13]等方向的研究工作得到重视，相关研究成果已在有滑动、耐磨、抗粘咬等工况的高端装备中获得成功应用，如马勒集团的低摩擦功耗发动机中的活塞销、沃尔沃高性能双涡流涡轮增压发动机的气门顶杆系统^[14]、日本住友的干式加工铝合金的硬质合金刀具^[15]，以及 SKF、TIMNEK 等国际轴承公司的高端轴承^[16-18]等。但是，在实际的服役环境中，DLC 薄膜不可避免的存在剥落的风险，使得高端装备的使用者对薄膜剥落后产生的不良后果疑虑重重。这是因为薄膜剥落产生的碎片将会存在于摩擦体系中，使摩擦环境发生改变，但目前这种改变对服役部件的寿命会产生何种程度的不良影响还不清楚。文中针对此问题，通过在摩擦体系中添加定量的不规则钨掺杂类金刚石薄膜 (Tungsten doped diamond-like carbon films, W-DLC) 碎片，对比研究边界润滑条件下薄膜碎片对摩擦体系中薄膜的摩擦磨损性能的影响规律，以及载荷条件与薄膜碎片耦合作用对 W-DLC 薄膜摩擦磨损性能的影响规律。

1 材料与方法

1.1 试样制备

1.1.1 试验材料的选择

基体材料选择适用于航空发动机主轴承的高温轴承钢 M50 和 (100) 晶向的 Si 片，表 1 是 M50 轴承钢的基本性能参数表，Si 片是制备薄膜

表 1 M50 轴承钢的性能参数

Table 1 Performance parameters of M50 bearing steel			
Parameter	Hardness / HRC	Yield strength / MPa	Size / mm ²
Value	60	2 345	Φ 30×6

剥落碎片的基材。

制备试样时，M50 轴承钢经过粗磨、细磨、抛光等工序，其表面粗糙度控制在 Ra 40 nm，随后与 Si 片一起经过丙酮超声波清洗、无水乙醇超声波清洗、烘干工序后存放在干燥箱内待用。

1.1.2 薄膜的制备

在 M50 轴承钢表面采用矩形气体离子源匹配非平衡磁控溅射源的复合沉积系统 (图 1 所示) 制备 W 元素掺杂 DLC 薄膜。薄膜结构设计为三层结构，与基体相接触的是 CrN 打底层，制备时选用 99.99% 的 Cr 靶、气体使用 99.999% 氮气；中间层设计为 CrCN 过渡层，使用的气体为 99.99% 的甲烷；工作层为 W-DLC 薄膜功能层，选用 99.9% 的 W 靶，表 2 是详细的工艺参数表。

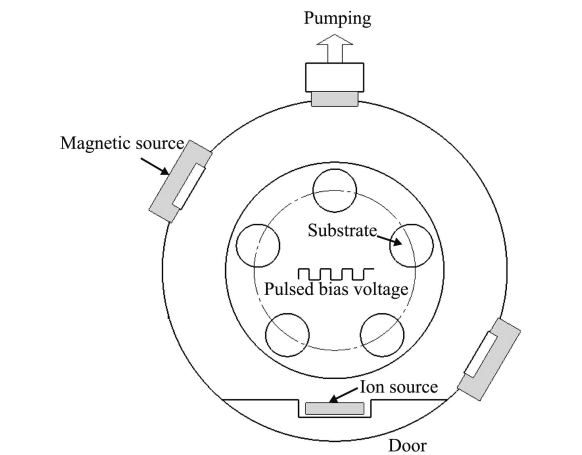


图 1 薄膜复合沉积系统的示意图

Fig.1 Schematic diagram of thin film composite deposition system

表 2 W-DLC 薄膜的制备步骤与参数

Table 2 Deposition process and parameters of the W-DLC films					
Coating process	Total gas pressure / Pa	Gas	Current / A	Bias / V	Time / min
Plasma cleaning	1.0	Ar		800	60
CrN layer	0.3	Ar+N ₂	15	120	60
CrCN layer	0.4	CH ₄ +N ₂	15	120	90
W-DLC layer	0.4	CH ₄	10	80	150

1.1.3 薄膜碎片的制备

与表 2 的步骤与工艺参数一致，在 (100) 晶向的 Si 片上制备厚度为 4 μm 的 W-DLC 薄膜，再采

用刻蚀的方法去除 Si 基体 (刻蚀剂是将 250 g NaOH，250 mL 甲醇，500 mL 水混合，在 80 ℃ 条件对硅进行刻蚀，化学反应为：Si+2NaOH+

$\text{H}_2\text{O}=\text{Na}_2\text{SiO}_3+2\text{H}_2$), 获得 W-DLC 薄膜, 并在陶瓷皿中破碎后备用。图 2 为薄膜碎片的宏观形貌, 可见形状不规则, 大小不一, 尺寸规格分布在 $0.1\sim 15\ \mu\text{m}$ 之间。能谱测试结果显示, 薄膜碎片材料的主要成分是碳, 其中还含有 W、Cr 和 N 元素, 这与 W-DLC 薄膜的化学成分是一致的。薄膜碎片的拉曼光谱结构见图 3。将该谱图分解可得到 G 峰的峰位在 $1\ 554\ \text{cm}^{-1}$ 处, D 峰的峰位位于 $1\ 357\ \text{cm}^{-1}$ 处, 经过计算获得 $I_{\text{D}}/I_{\text{G}}$ 的比值约为 1.49。

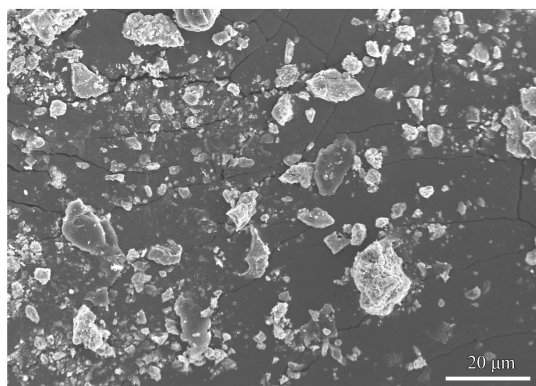


图 2 刻蚀 Si 基体后获得的薄膜碎片的表面形貌

Fig.2 Surface morphology of film fragments after etching Si substrate

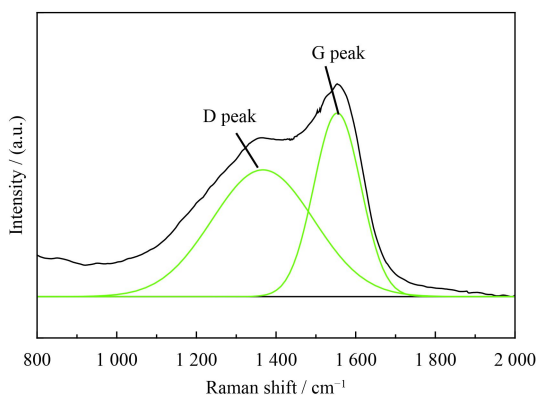


图 3 刻蚀 Si 基体后获得的薄膜碎片的拉曼光谱

Fig.3 Raman spectrum of film fragments after etching Si substrate

1.2 表征与分析

1.2.1 摩擦磨损试验

采用 MS-T 3000 型球-盘摩擦磨损试验机在室温环境下对薄膜的摩擦学性能进行测试, 试验开始前在盘试样表面滴 3~5 滴符合 MIL-L-7808J 标准的 4010 号航空润滑油, 建立边界润滑试验条件(边界润滑是指两摩擦表面被一层极薄的润滑油

膜隔开), 同时采用 XP504 天平称量 $0.005\ \text{g}$ 薄膜碎片置于摩擦体系中。在球盘试验机上进行边界润滑条件下的摩擦磨损试验, 采用 $\phi\ 4\ \text{mm}$ 的 GCr15 球与 W-DLC 薄膜对磨, 摩擦速度设定 $0.2\ \text{m/s}$, 摩擦行程 $1\ 000\ \text{m}$, 摩擦温度 $24\ ^\circ\text{C}$, 分别在 2、5 和 $10\ \text{N}$ 的载荷条件下进行摩擦。

1.2.2 表征与分析

拉曼光谱是用于表征 DLC 薄膜结构和成分的有效手段, 采用 LabRAM HR Evolution 型高分辨拉曼光谱仪观察所制备薄膜的微观结构, 选用 $532\ \text{nm}$ 激光器激发, 束斑直径 $1.25\ \mu\text{m}$, 功率 $150\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 扫描时间 $60\ \text{s}$, 累加次数 1 次。采用 S-4800 冷场发射扫描电镜 (SEM) 观察薄膜表面和截面的微观形貌。采用 MFT-4000 型多功能材料表面性能试验仪测定膜基结合力, 设定终止载荷 $100\ \text{N}$, 加载速度 $100\ \text{N}/\text{min}$, 划痕长度 $5\ \text{mm}$ 。采用 HP 型纳米压痕仪测量薄膜的硬度和弹性模量, 设定压入深度 $400\ \text{nm}$, 泊松比 0.25。采用三维表面轮廓仪测量摩擦磨损后磨痕三维形貌和磨痕长度、宽度。

2 结果与讨论

2.1 W-DLC 薄膜的微观结构和相组成

典型的 DLC 薄膜的拉曼光谱一般是在 $1\ 500\ \text{cm}^{-1}$ 附近的不对称的宽峰, 利用双 Gaussians 峰拟合可以将该宽峰分解为两个峰, 分别对应 G 峰和 D 峰。图 4 是 M50 轴承钢上制备的 W 元素掺杂 DLC 多层薄膜的拉曼光谱图, 将该谱图分解可得到 G 峰的峰位在 $1\ 560\ \text{cm}^{-1}$ 处, D 峰的峰位位于 $1\ 365\ \text{cm}^{-1}$ 处, 经过计算获得的 $I_{\text{D}}/I_{\text{G}}$ 的比

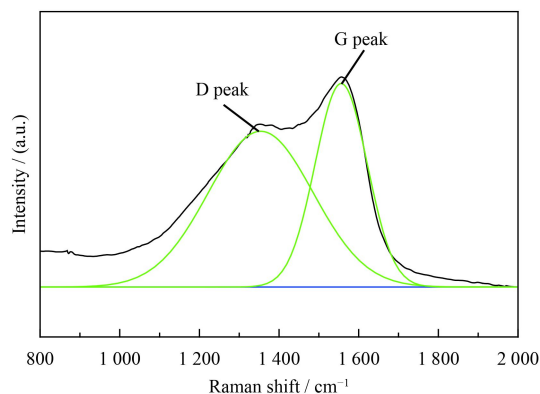


图 4 M50 轴承钢上 W-DLC 薄膜的拉曼光谱图

Fig.4 Raman spectrum of W-DLC films on M50 bearing steel

值约为 1.54。通常认为,拟合之后 D 峰与 G 峰的面积之比的比值越小, sp^3 含量越高,由分解图谱获得的 I_D/I_G 的比值可知, W-DLC 薄膜中含有较多的 sp^3 。

图 5 为 W-DLC 薄膜的 XRD 图谱,从图中可以看出:薄膜在 WC(001)、 $W_2C(110)$ 和 $W_2C(200)$ 出现了很宽的衍射峰,膜层主要是非晶结构。

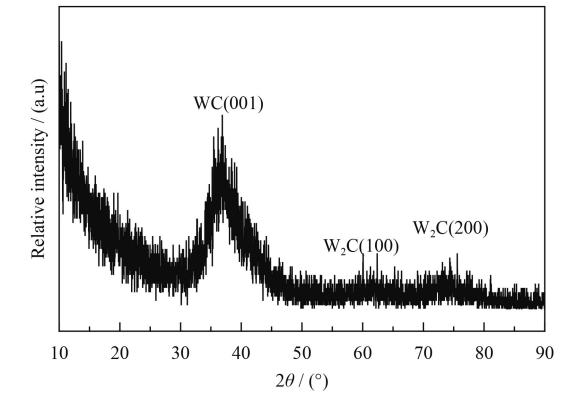


图 5 M50 轴承钢上 W-DLC 薄膜的 XRD 图谱
Fig.5 XRD patterns of W-DLC films on M50 bearing steel

图 6 是所制备的 W-DLC 薄膜的形貌,可见其表面致密光滑,膜层总厚度达到 $4\mu m$,并具有明显的 3 层结构,底层为厚度 $0.9\mu m$ 的致密 CrN 层,中间为厚约 $1.1\mu m$ 柱状 CrCN 层,最顶层为无定型态掺杂 W 的 DLC 层,厚度为 $2\mu m$ 左右。采用 EDS 测量表面工作层中的 W 元素的原子分数为 12%。

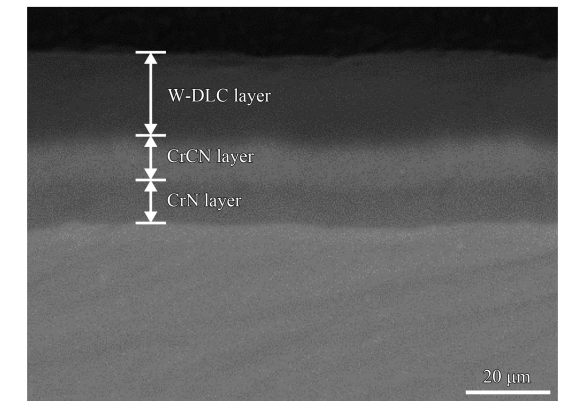


图 6 M50 轴承钢上 W-DLC 薄膜形貌
Fig.6 Morphology of W-DLC films on M50 bearing steel

2.2 W-DLC 薄膜的力学性能

如表 3 所示,依据 ASTM C 1624—2005 《用定量单点划痕测试法测定陶瓷涂层附着强度和机

械故障种类的试验方法》测量制备所得的 W-DLC 薄膜与基体之间的膜基结合力, W-DLC 薄膜的临界载荷 L_c 约为 62 N。采用连续刚度法通过纳米压痕测试得到 W-DLC 薄膜的硬度和弹性模量分别为 19 GPa 和 210 GPa。

表 3 W-DLC 薄膜的力学性能			
Table 3 Mechanical properties of W-DLC films			
Parameter	Binding force / N	Hardness / GPa	Elastic modulus / GPa
Value	62	19	210

2.3 载荷和剥离碎片耦合作用对薄膜摩擦因数的影响

图 7(a) 为不同载荷条件下,未添加薄膜碎片的摩擦体系的摩擦因数曲线。从图中可以看出,随着施加载荷的增加,摩擦体系的摩擦因数减小,载荷 2 N 时,摩擦体系的平均摩擦因数为 0.127 7;载荷 5 N 时,摩擦体系的平均摩擦因数减小为 0.113 1,载荷 10 N 时,摩擦体系的平均摩擦因数进一步减小为 0.103 1。

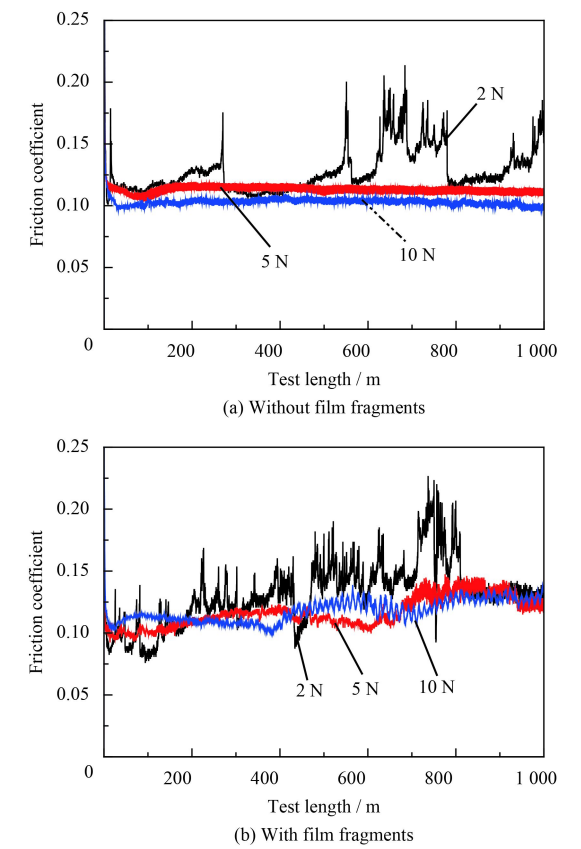


图 7 边界润滑条件下样品的摩擦因数
Fig.7 Friction coefficient of the samples under boundary lubrication conditions

分析认为,产生此现象的原因是边界润滑条件下,载荷对摩擦因数的影响主要取决于摩擦界面的摩擦化学反应^[19],对于掺杂 W 的 DLC 薄膜,薄膜中的 W 元素在摩擦过程中与油品中的 S 元素发生摩擦化学反应,在摩擦副表面生成具有润滑性能的 WS_2 转移膜,增大载荷使得摩擦接触面温度升高,升高的温度加速摩擦化学反应,使摩擦因数降低。另外,载荷为 2 N 时,摩擦因数曲线波动剧烈,而当载荷增大到 5 N 和 10 N 时,摩擦因数曲线平稳,分析认为大载荷能更快的去除摩擦表面的粗糙峰,使得摩擦因数较早进入平稳状态。图 7(b) 为不同载荷条件下,添加薄膜碎片的摩擦体系的摩擦因数曲线。可以看到,随着薄膜碎片的添加,摩擦体系的平均摩擦因数增大了,载荷 2 N 时,摩擦体系的平均摩擦因数为 0.131 2,较未添加薄膜碎片时提高了 2%;载荷 5 N 时,摩擦体系的平均摩擦因数为 0.117 7,较未添加薄膜碎片时提高了 4%;载荷 10 N 时,摩擦体系的平均摩擦因数为 0.116 5,较未添加薄膜碎片时提高了 12%。最重要的是添加薄膜碎片后摩擦体系的摩擦因数曲线表现为不平坦、起伏较多,而且持续的时间更长。分析认为,摩擦体系添加薄膜碎片后,边界润滑条件建立的油膜被破坏,形成磨粒磨损,此外,薄膜碎片的硬度与 W-DLC 薄膜的硬度一致,在磨粒磨损过程中符合

典型的过渡磨损区域^[20]特征。从图 7(b) 中还可以看到,当摩擦行程超过 800 m 后,不同载荷条件下的摩擦因数趋于一致,原因可能在于通过 800 m 行程的运转,原添加的不规则薄膜碎片在试验载荷的作用下尺寸基本趋于一致。通过对比图 7(a)(b) 可以得到,载荷和薄膜碎片同时作用于摩擦体系时,碎片对摩擦因数影响的权重高于载荷。

2.4 载荷和剥离碎片耦合作用对薄膜磨损性能的影响

图 8 为 W-DLC 薄膜磨痕三维形貌。从图 8 中可以看出,添加薄膜碎片对摩擦体系的磨损性能影响很大。当载荷为 2 N 时,未添加薄膜碎片的 W-DLC 薄膜表面的磨痕宽度 160 μm ;而添加薄膜碎片后, W-DLC 薄膜表面的磨痕宽度增加到 350 μm ,并且磨痕表面个别位置出现明显的犁沟。当载荷为 5 N 时,未添加薄膜碎片的 W-DLC 薄膜表面的磨痕宽度为 210 μm ;添加薄膜碎片后, W-DLC 薄膜表面的磨痕宽度增加到 390 μm 。当载荷为 10 N 时, W-DLC 薄膜表面的磨痕宽度为 260 μm ,添加薄膜碎片后, W-DLC 薄膜表面的磨痕宽度增加到 500 μm 。

从图 9 W-DLC 薄膜磨痕形貌的二维轮廓可以看到,随着薄膜碎片的添加,同样在 2 N 载荷条

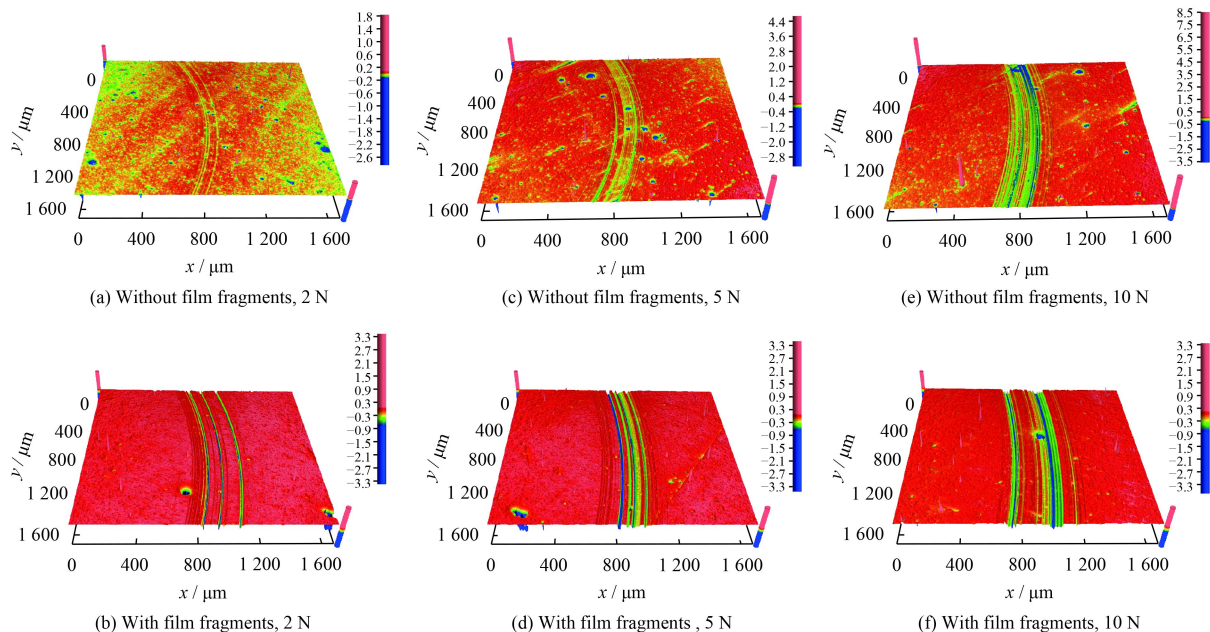


图 8 W-DLC 薄膜磨痕三维形貌

Fig. 8 Three-dimensional surface profiles of wear tracks on W-DLC films

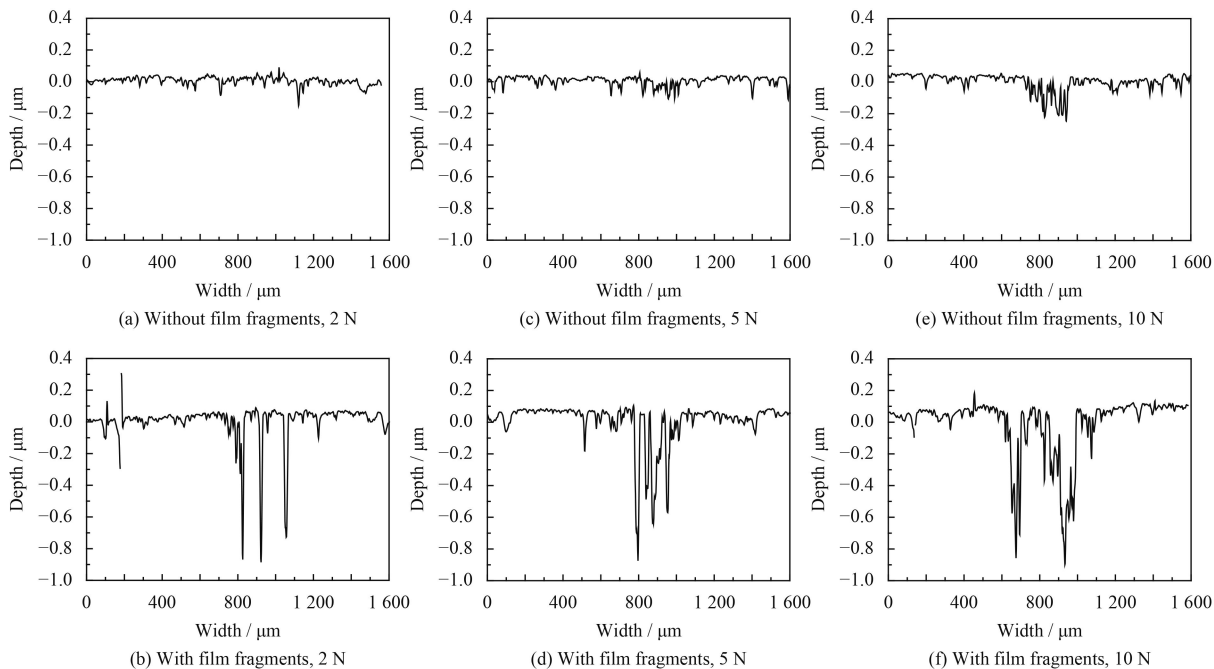


图9 W-DLC 薄膜二维轮廓图

Fig.9 Two-dimensional profiles of W-DLC films

件下(图9(a)(b)), W-DLC 薄膜的磨痕深度的最大值从 $0.092\ \mu\text{m}$ 增大到 $0.898\ \mu\text{m}$, 增大了近 10 倍, 磨损体积从 $0.004\ \text{mm}^3$ 增加到 $0.058\ \text{mm}^3$, 增大 14.5 倍。当载荷增大到 5 N 时(图9(c)(d)), W-DLC 薄膜的磨痕深度的最大值从 $0.119\ \mu\text{m}$ 增大到 $0.944\ \mu\text{m}$, 磨损体积从 $0.011\ \text{mm}^3$ 增加到 $0.105\ \text{mm}^3$ 。当载荷达到 10 N(图9(e)(f)), W-DLC 薄膜的磨痕深度的最大值从 $0.288\ \mu\text{m}$ 增大到 $0.933\ \mu\text{m}$, 磨损体积从 $0.042\ \text{mm}^3$ 增至 $0.279\ \text{mm}^3$ 。添加薄膜碎片后, W-DLC 薄膜的磨痕宽度、深度和磨损体积都在增大, 说明添加薄膜碎片加剧了 W-DLC 薄膜的磨损。从图9中还可以看到, 未添加薄膜碎片时, W-DLC 薄膜的磨损深度随着载荷的增加而加深, 添加薄膜碎片后, W-DLC 薄膜的最大磨损深度一致, 这也证明了载荷和薄膜碎片同时作用于摩擦体系时, 碎片对摩擦的影响权重高于载荷。

进一步分析认为在边界润滑条件下 W-DLC 薄膜与 GCr15 钢球对磨的磨损机制是磨粒磨损, 因为无论是否添加薄膜碎片, 摩擦接触表面都呈现典型的犁沟特征, 且均没有局部剥落发生, 但在两种情况下引起磨粒磨损的原因又有差别。当未添加薄膜碎片时, 由于 GCr15 钢球的硬度低于 W-DLC 薄膜, 在摩擦过程中, GCr15 钢球首先被

磨损, 产生的磨屑会在氧气作用下被氧化成细微的硬质颗粒散布在摩擦接触面上, 在进一步的摩擦过程中, 先在 GCr15 钢球表面产生沟槽, 然后粗糙的 GCr15 钢球又引起 W-DLC 薄膜的磨损和表面沟槽化。而对添加薄膜碎片的摩擦体系来说, 薄膜碎片本身就是磨粒, 而且该“磨粒”因为与 W-DLC 具有相同的成分和硬度, 所以会在摩擦一开始就直接影响摩擦接触的两个表面, 造成更为严重的磨损。

3 结 论

(1) 未添加薄膜碎片时, 随着施加载荷的增大 W-DLC 薄膜与 GCr15 钢球对磨的摩擦因数从 0.127 7 减小到 0.113 1 再减小到 0.103 1 减小, 且摩擦因数曲线在载荷 2 N 时剧烈波动, 在 5 N 和 10 N 时很平稳。

(2) 在施加一定载荷 (2、5 和 10 N) 的边界润滑条件下加入定量的薄膜碎片后, W-DLC 薄膜与 GCr15 钢球对磨的平均摩擦因数分别增加 2%、4% 和 10%, 同时摩擦因数曲线表现为波动剧烈, 摩擦行程超过 800 m 后, 所有载荷下的摩擦因数趋于一致。

(3) 在加入定量薄膜碎片的边界润滑条件下, 施加 2、5 和 10 N 载荷, W-DLC 薄膜的磨损体积

分别为 0.058、0.105 和 0.279 mm³, 即随着载荷增大 W-DLC 薄膜的磨损体积增加。通过磨损形貌的观察发现, 无论是否添加异物, W-DLC 薄膜表面均呈现为犁沟特征, 属于典型的磨粒磨损。

参考文献

- [1] SUZUKI M, SAITO T, TANAKA A. Tribological properties of DLC films against different steels[J]. *Wear*, 2013, 304(1-2): 83-87.
- [2] LIU X Q, HAO J Y, XIE Y T. Silicon and aluminum doping effects on the microstructure and properties of polymeric amorphous carbon films[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 379: 358-366.
- [3] ERDEMIR A, FONTAINE J, DONNET C. An overview of superlubricity in diamond-like carbon films in: *Tribology of diamond-like carbon films: fundamentals and applications*[M]. New York: Springer, 2008: 237-262.
- [4] PAGNOUX G, FOUVRY S, PEIGNEY M, et al. Influence of scratches on the wear behavior of DLC coatings[J]. *Wear*, 2015, 330-331: 380-389.
- [5] MUTAFOV P, LANIGAN J, NEVILLE A, et al. DLC-W coatings tested in combustion engine-Frictional and wear analysis[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2014, 260(260): 284-289.
- [6] DIMOFTE F, KRANTZ T L. Tests of bearings and gears with PVD coatings for aerospace transmissions; results and problems[C]. *Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Engineering*, Chalkidiki, Greece, 2008: 33-44.
- [7] 汪瑞军, 詹华, 李振东, 等. 轴承表面钨掺杂类金刚石薄膜性能研究[J]. *轴承*, 2015(7): 41-44.
WANG R J, ZHAN H, LI Z D, et al. Study of properties on bearings coated with tungsten doped diamond-like carbon films[J]. *Bearing*, 2015(7): 41-44 (in Chinese).
- [8] PAUL R. Uniformly dispersed nanocrystalline silver reduces the residual stress within diamond-like carbon hard coatings[J]. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 2017, 10: 69-79.
- [9] 李振东, 詹华, 王亦奇, 等. 干摩擦条件下基体粗糙度对 Cr-DLC 薄膜摩擦磨损性能的影响[J]. *摩擦学学报*, 2016, 36(6): 741-748.
LI Z D, ZHAN H, WANG Y Q, et al. Effect of substrate roughness on friction and wear properties of Cr-DLC films under dry-sliding condition[J]. *Tribology*, 2016, 36(6): 741-748 (in Chinese).
- [10] SÁNCHEZ-LÓPEZ J C, FERNÁNDEZ A. Doping and alloying effects on DLC coatings[J]. Springer US, 2008: 311-338.
- [11] SILVA C W M E, BRANCO J R T, CAVALEIRO A. How can H content influence the tribological behaviour of W-containing DLC coatings[J]. *Solid State Sciences*, 2009, 11(10): 1778-1782.
- [12] BAYÓN R, IGARTUA A, GONZÁLEZ J J, et al. Influence of the carbon content on the corrosion and tribocorrosion performance of Ti-DLC coatings for biomedical alloys[J]. *Tribology International*, 2015, 88: 115-125.
- [13] WANG Y X, WANG L P, ZHANG G A, et al. Effect of bias voltage on microstructure and properties of Ti-doped graphite-like carbon films synthesized by magnetron sputtering[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2010, 205(3): 793-800.
- [14] GOWRISHANKAR V, GURUSAMY A, SAMUELRAJ D, et al. Surface coating on engine valve[J]. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2015, 4(3): 164-168.
- [15] 廖先富. 日本住友电工开发的几种规制刀具新产品[J]. *工具展望*, 2009(6): 17-22.
LIAO X F. Japan sumitomo electric developed several kinds of cutting tool new products[J]. *Tool Review*, 2009(6): 17-22 (in Chinese).
- [16] BARAGETTI S. Fatigue resistance of steel and titanium PVD coated spur gears[J]. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(9-11): 1893-1903.
- [17] EICHLER J W, MATTHEWS A, LEYLAND A, et al. The influence of coatings on the oil-out performance of rolling bearings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2007, 202(4): 1073-1077.
- [18] GOLD P W, LOOS J, PLOGMANN M. Effects of PVD-coatings on fatigue of roller bearings[J]. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011: 568-574.
- [19] PODGORNIK B, HREN D, VIZINTIN J. Low-friction behaviour of boundary-lubricated diamond-like carbon coatings containing tungsten[J]. *Thin Solid Films*, 2005, 476(1): 92-100.
- [20] 温诗铸, 黄平. *摩擦学原理*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 262-266.
WEN S Z, HUANG P. *Principles of tribology*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 262-266 (in Chinese).

(责任编辑: 黄艳斐)