

摩擦学学报
Tribology
ISSN 1004-0595, CN 62-1095/O4

《摩擦学学报》网络首发论文

题目： 载荷及位移幅值对 DLC 薄膜微动磨损行为的影响
作者： 景鹏飞，俞树荣，张克菲，马邦豪
网络首发日期： 2020-09-29
引用格式： 景鹏飞，俞树荣，张克菲，马邦豪. 载荷及位移幅值对 DLC 薄膜微动磨损行为的影响. 摩擦学学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1095.O4.20200929.1348.010.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

载荷及位移幅值对 DLC 薄膜微动磨损行为的影响

景鹏飞, 俞树荣*, 张克菲, 马邦豪

(兰州理工大学 石油化工学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为了提高 TC4 钛合金表面的抗微动磨损性能, 本文采用非平衡磁控溅射技术(Unbalanced Magnetron Sputtering)在 TC4 钛合金表面沉积了类金刚石(DLC)薄膜。采用球/平面接触形式研究了 DLC 薄膜的微动摩擦磨损行为。在不同法向载荷和位移幅值下, 结合微动运行工况图研究了 DLC 薄膜滑移状态和损伤机理。利用原子力显微镜、纳米压痕仪、激光拉曼光谱仪、激光共聚焦显微镜、场发射扫描电子显微镜和 SRV-V 微动摩擦磨损试验机等设备对 DLC 薄膜进行性能的表征和微动摩擦磨损性能测试。通过微动图, 摩擦耗散能, 磨痕形貌、化学成分分析揭示其损伤机理。结果表明: 载荷和位移幅值对 DLC 薄膜微动摩擦磨损行为和损伤机理有显著影响。当位移幅值为 $25\mu\text{m}$ 时, 微动运行于混合滑移(mixed slip regime, MSR)情形下, 当位移幅值为 $100\mu\text{m}$ 时, 微动运行于完全滑移(gross slip regime, GSR)情形下。小位移幅值时, DLC 薄膜磨损机理是磨粒磨损为主; 大位移幅值时, DLC 薄膜磨损机理是黏着磨损为主。干摩擦条件下, DLC 薄膜有良好的抗微动磨损性能, 关键就在于其优异力学性能和自润滑特性。

关键词: 类金刚石膜; 微动磨损; 微动图; 滑移状态; 损伤机制

中图分类号: TH117.1

文献标识码: A

Effect of load and displacement amplitude on fretting wear behavior of DLC film

JING Pengfei, YU Shurong, ZHANG Kefei, MA Banghao

(College of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Gansu Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to improve the fretting wear resistance of TC4 titanium alloy, diamond-like carbon (DLC) films were deposited on the surface of TC4 titanium alloy by unbalanced

*Corresponding author: E-mail: yusr@lut.edu.cn

Supported by the National Natural Science Foundation of China(51275225)

国家自然科学基金资助项目(51275225)

magnetron sputtering (UBMS) technique. The fretting friction and wear behaviors of DLC film against GCr15 steel ball were studied using a ball-on-flat contact. Under different normal loads and displacement amplitudes, the slip regime and wear mechanism of DLC film were studied with the running condition fretting map(RCFM). The characterization and fretting friction and wear performance of DLC films were carried out by means of atomic force microscopy, nanoindentation, laser Raman spectroscopy, three-dimensional optical profilometer, laser confocal microscope, field emission scanning electron microscope and SRV-V fretting friction and wear tester. The damage mechanism was revealed through the analysis of fretting maps, dissipated energy, the morphology and chemical composition of wear track. The results show that the displacement amplitude and normal load had great effect on the fretting mode and damage mechanism. The mixed slip regime (MSR) was dominant at the displacement amplitude of 25 μm . On the other hand, the slip regime was gross slip regime (GSR) at the displacement amplitude of 100 μm . The abrasive wear was the main damage mechanism of DLC film under small displacement amplitude, whereas under larger displacement amplitude the wear mechanism of DLC film was mainly adhesive wear. In short, the good fretting wear performance of DLC film in dry friction lies in its excellent mechanical properties and self-lubricating properties

Key words: DLC; fretting wear; fretting map; slip regime; damage mechanism

微动是固体接触表面之间出现极小振幅的往复运动，振幅为微米量级^[1]。微动图以及能量耗散方法在微动磨损的研究方面已经展现出巨大的潜力^[2]。影响微动磨损的参数很多，主要参数包括载荷、位移幅值和频率等。Vingsbo 和 Soderberg、Vincent 和 Zhou 等人提出了“微动图”的概念，阐明微动磨损参数与微动磨损之间的关系^[3]。摩擦学研究中，虽然 Archard 是最普遍磨损模型^[4]，但没有考虑摩擦对磨损的影响。基于摩擦耗散能理论，Fouvry^[5]建立起微动磨损与能量耗散之间的联系。

TC4 钛合金是航空航天零部件的重要选材，但其微动磨损性能较差。表面改性技术是提高金属合金抗微动磨损性能的有效途径^[6]。其中，类金刚石薄膜 DLC 由于其较低的摩擦系数和较高的硬度，作为一种良好的固体润滑材料，受到人们的关注^[7]。Kalin^[8]发现 DLC 薄膜微动与滑动磨损两者不同的损伤机理。滑动磨损机理为磨粒磨损，微动磨损机理除磨粒磨损外，还有黏着磨损。与微动磨损相比，滑动磨损损伤较为轻微。Watabe^[9]研究认为增大微动频率可以降低 DLC 薄膜摩擦系数却促使其磨损率的上升。Navaneethakrishnan^[10]研究发现小位移幅值时，随法向载荷的增加 DLC 薄膜滑移状态从完全滑移变为部分滑移直至黏着。且大载荷时微动磨损体积较小，甚至可以认为 DLC 薄膜没有发生石墨化进程。Wäsche^[11]研究表明温度对 DLC 薄膜的石墨化进程影响较大。石墨化转变促使摩擦系数的增加、磨损率的上升以及最终失效。Amanov 等^[12]认为微动摩擦磨损推动 DLC 薄膜的石墨化进程。Ding 等^[13]则把微动磨损性能的提高主要归因于 DLC 薄膜磨屑的润滑作用而不是其高硬度。Blanpain 等^[14]认为 DLC 薄膜抗微动磨损性能的提高根源在于石墨化进程和对偶摩擦转移膜的形成。邓凯等^[15]认为 DLC 薄膜具有较低的摩擦系数，减少了磨粒磨损程度，使其抗微动

磨损性能优异。杜东兴等^[16]研究认为 DLC 薄膜良好断裂韧性是提高 TC4 合金微动磨损性能的关键。王立平等^[17]认为 DLC 薄膜低摩擦系数源于在摩擦过程中石墨化程度的增加,摩擦系数减小促使磨损率降低。

DLC 薄膜微动磨损具有特殊的运动形式和作用机制。磨屑的形成与排出、DLC 薄膜石墨化进程及摩擦转移膜形成等都会对微动摩擦磨损行为产生显著影响。综上所述,以往研究对 DLC 薄膜抗微动磨损机理的有一定认识,仍需系统性研究。因此,本文采用非平衡磁控溅射技术在 TC4 钛合金表面制备了 DLC 薄膜。在不同载荷和位移幅值条件下结合微动图以及摩擦耗散能理论,深入研究 DLC 薄膜的微动摩擦磨损特性。

1 实验方法

1.1 DLC 薄膜制备

基体为 $\alpha+\beta$ 双相的 TC4 钛合金,屈服极限为 845 MPa,试样尺寸为 $\Phi 24\text{ mm}\times 7.8\text{ mm}$ 。采用非平衡磁控溅射技术镀膜,以石墨为溅射靶材(纯度 99.99%),反应气体为氩气(纯度 99.999%),实验所用铬靶纯度为 99.999%。沉积前,腔体抽取真空至 $1\times 10^{-3}\text{ Pa}$ 。DLC 薄膜制备过程的工作压强约为 $3\times 10^{-1}\text{ Pa}$,基体偏压为 -100~-40 V,溅射功率为 300 W。DLC 薄膜制备过程中,首先用氩离子轰击清洗试样表面,预先沉积 Cr 过渡层以提高薄膜与基体的结合,然后沉积 DLC 薄膜。

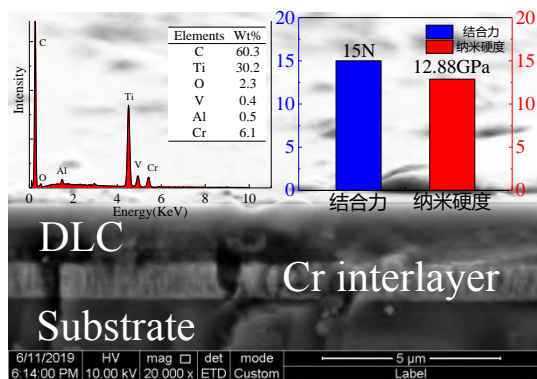
1.2 微动磨损试验

采用德国 Optimol 公司 SRV-V 试验机开展微动磨损实验。上试样为 $\Phi 10\text{ mm}$ GCr15 钢球,下试样为 DLC 薄膜处理后的 TC4。实验条件:微动磨损实验在室温、大气环境中进行。微动循环次数 $N=30000$,法向载荷 P 分别为 5 N、10 N、20 和 50N(相应的赫兹接触应力分别为 651、820、1034 和 1406MPa),位移幅值 D 为 25 μm 、50 μm 和 100 μm ,频率 f 为 50 Hz。实验过程中,数据采集系统连续测量摩擦系数。高分辨率分析模块(HRA)可以记录每个周期内各点的信息(摩擦系数和位移),通过这些点我们可以获得切向力与位移的关系图(F_t - D - N)。

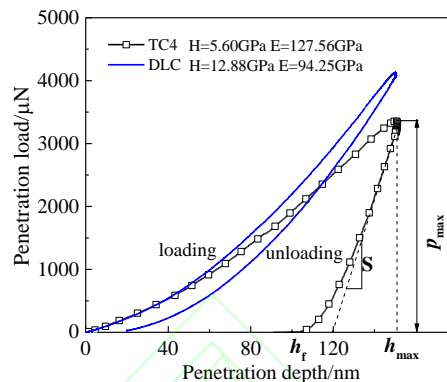
采用 Hysitron TI 950 TriboIndenter 纳米压痕仪测试 DLC 薄膜力学性能。采用 OLYMPUS OLS 5000 激光共焦扫描显微镜测量磨痕截面轮廓、磨损体积。采用 LabRam HR Evolution 激光拉曼光谱仪分析 DLC 薄膜在微动磨损实验前后物相组成的变化。采用 QUANTA FEG 450 扫描电子显微镜观察磨痕表面形貌以及 EDS 能谱仪对磨痕、磨屑进行成分分析。

2 结果与讨论

2.1 DLC 薄膜的表征



(a) The morphology of cross-section



(b) Load-displacement of Nanoindentation

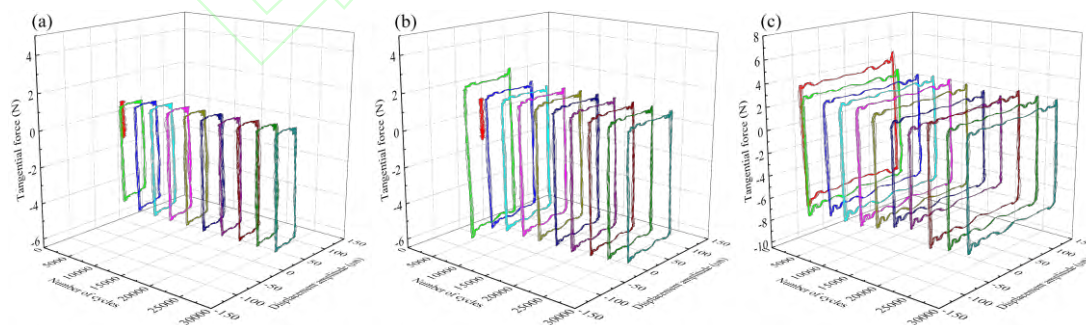
Fig.1 (a) The morphology of cross-section, (b) Load-displacement curves of nanoindentation of DLC film

图 1 DLC 薄膜断面形貌、纳米压痕载荷-位移曲线

DLC 薄膜的断面形貌如图 1(a)所示。通过断面分析膜厚为 1.5 μm 左右。采用压痕法测试薄膜硬度和弹性模量。DLC 薄膜的纳米压痕载荷-位移曲线如图 1(b)所示。加载与卸载曲线均未呈线性关系。在 4.05 mN 的最大法向载荷下, DLC 薄膜的最大穿透深度分别为 150 nm。DLC 薄膜的硬度和弹性模量分别为 12.88 和 94.25 GPa。

2.2 微动磨损实验分析

2.2.1 Ft-D-N 曲线和微动图分析



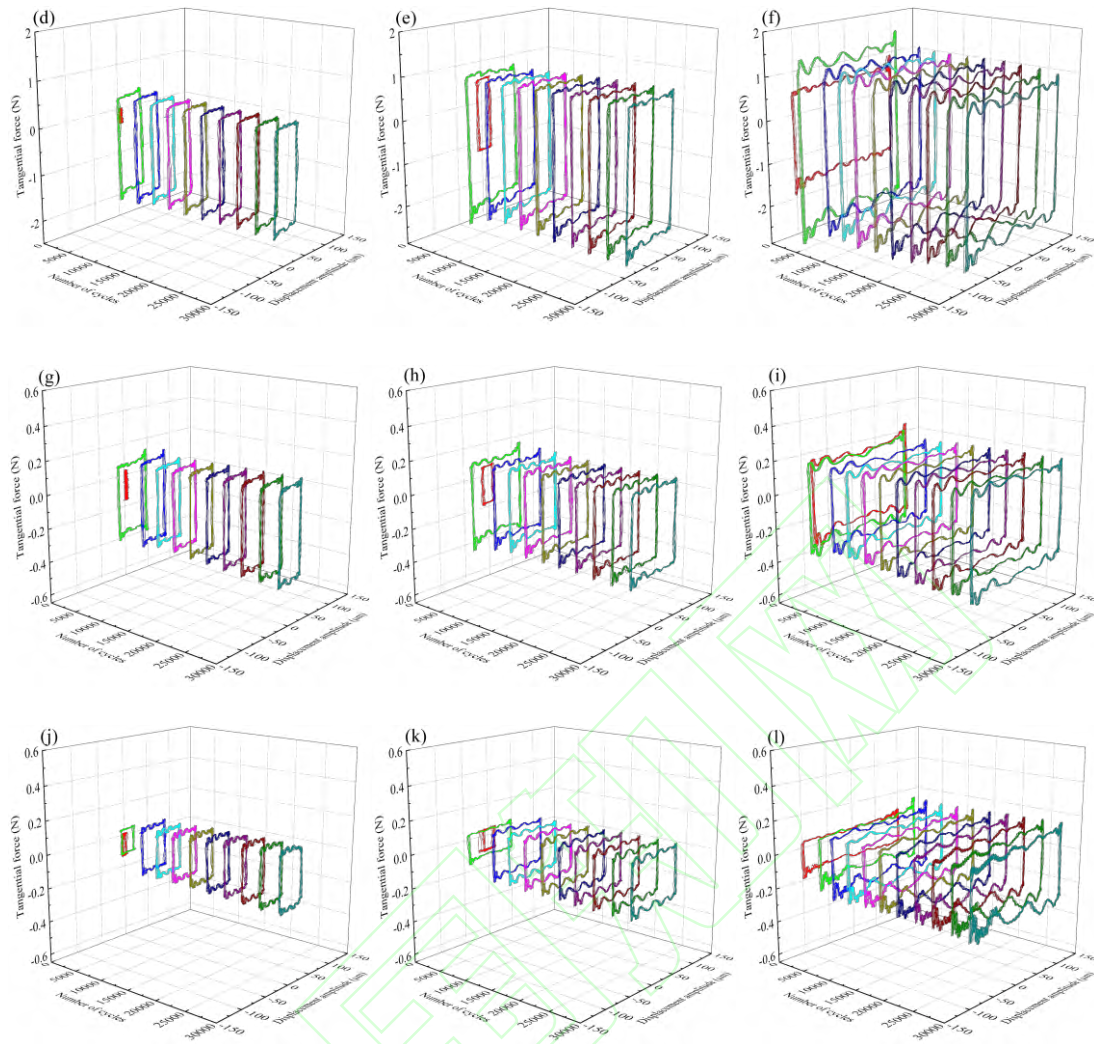


Fig.2 Fretting loops(Ft-D-N) of DLC film at different load and displacement amplitude (a: 50 N/25 μm , b: 50 N/50 μm , c: 50 N/100 μm , d: 20 N/25 μm , e: 20 N/50 μm , f: 20 N/100 μm , g: 10 N/25 μm , h: 10 N/50 μm , i: 10 N/100 μm , j: 5 N/25 μm , k: 5 N/50 μm , l: 5 N/100 μm)

图 2 DLC 薄膜在不同载荷及位移幅值条件下的 Ft-D-N 曲线(a: 50 N/25 μm , b: 50 N/50 μm , c: 50 N/100 μm , d: 20 N/25 μm , e: 20 N/50 μm , f: 20 N/100 μm , g: 10 N/25 μm , h: 10 N/50 μm , i: 10 N/100 μm , j: 5 N/25 μm , k: 5 N/50 μm , l: 5 N/100 μm)

根据采集的数据绘制 DLC 薄膜的 Ft-D-N 曲线，如图 2 所示。位移幅值 $D=25 \mu\text{m}$ 时，载荷 P 为 5、10、20 和 50 N 以及 $D=50 \mu\text{m}$ 时，载荷 P 为 50 N 条件下，Ft-D 曲线从初始的直线转变为平行四边形式，DLC 薄膜滑动状态由部分滑动转变为完全滑动。这时，DLC 薄膜状态为混合滑动。位移幅值 $D=100 \mu\text{m}$ 时，Ft-D 曲线都为平行四边形，表明微动状态为完全滑动。同时，位移幅值 $D=25 \mu\text{m}$ 时，磨损形式是磨粒磨损，切向摩擦力波动较小。位移幅值 $D=100 \mu\text{m}$ 时，磨损形式是黏着磨损，切向摩擦力波动较大。

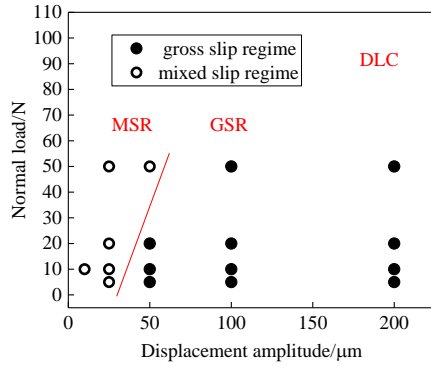


Fig.3 Running condition fretting maps of DLC film

图 3 DLC 薄膜运行工况微动图

最典型的运行工况微动图基于法向载荷与位移幅值。在试验频率一定条件下，将微动参数位移幅值和法向载荷设置为不同的值可以得到DLC薄膜的运行工况微动图，如图3所示。DLC薄膜的运行工况微动图由混合滑移以及完全滑移两部分组成。在较低法向载荷或较大位移幅值下，完全滑移(GSR)占主导地位。在较高法向载荷或较小位移幅值下，混合滑移(MSR)占主导地位。因此，载荷及位移幅值对DLC薄膜微动运行行为具有显著性的影响。

2.2.2 微动摩擦磨损特性分析

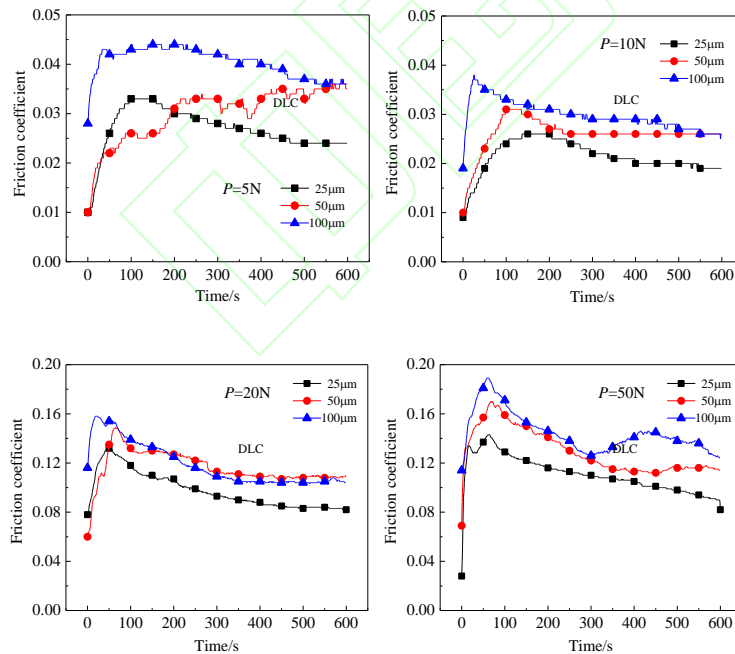


Fig.4 Friction coefficient curves of DLC film at different loads and displacement amplitude

图 4 不同载荷及位移幅值下 DLC 的摩擦系数曲线

图 4 为 DLC 薄膜的摩擦系数曲线。由于黏着的影响，微动初期摩擦系数较高。之后随着摩擦升温并伴随 DLC 薄膜石墨化进程，导致摩擦系数降低并趋于稳定。因此，DLC 摩擦系数曲线可以分为跑合、下降、稳定三个阶段。位移幅值越大，排屑能力不断增强，磨损机理由磨粒磨损向黏着磨损转变。由此位移幅值越大，摩擦系数越大。此外，不同法向载荷水平对摩擦系数影响也很大。弹性接触情形下，10N 时的摩擦系数约为 0.02~0.03，小于 5 N 时的摩擦系数 0.03~0.04。非弹性接触情形下，20N 时的摩擦系数约为 0.10~0.12，50N 时的摩擦系数 0.11~0.15。这可能是由于大载荷下 DLC 薄膜过高的石墨化程度导致摩擦系数上升^[11]，抑或表面完整性丧失导致摩擦系数上升。

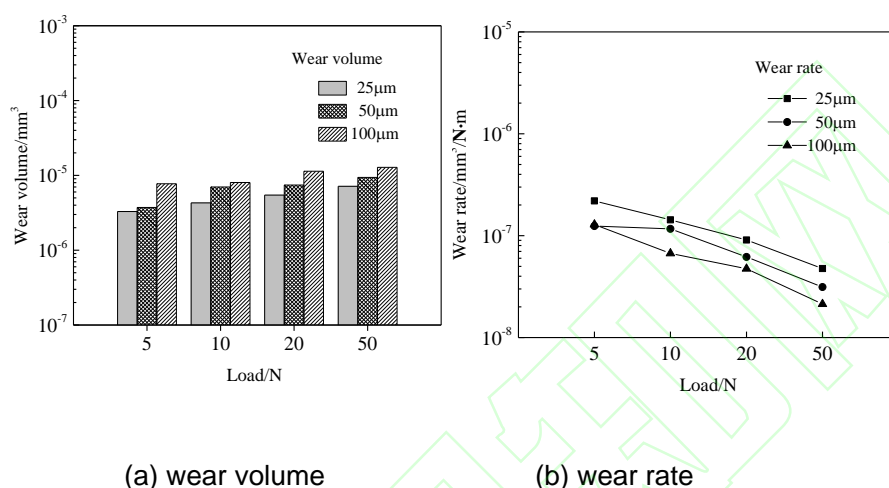
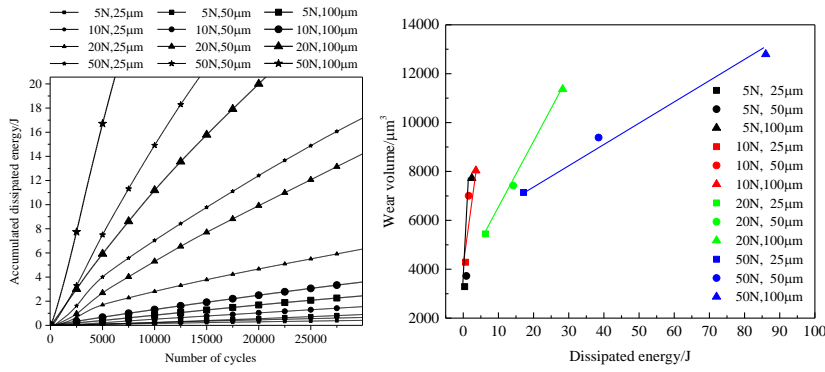


Fig.5 Wear volume and wear rate of DLC film

图 5 DLC 薄膜的磨损体积和磨损率

载荷和位移幅值对 DLC 薄膜磨损性能的影响如图 5 所示。相同载荷下，磨损体积均随着位移振幅的增大而增大。DLC 薄膜表现出随位移幅值增加磨损率逐渐降低的规律，且载荷越大，磨损率越小。载荷增大有利于磨损率降低，源于其石墨化程度不同。载荷越大，石墨化程度越大，可以降低磨损；位移幅值对磨损率的影响，源于磨损形式不同。这是因为位移幅值不仅影响微动磨损滑移状态，也影响其损伤机理。小位移幅值时，磨屑难于排出，以磨粒磨损为主，大位移幅值时，有利于磨屑排出，磨损机理以黏着磨损为主。故磨粒磨损比黏着磨损状态下的磨损率大。此外，载荷为 50 N，位移幅值为 100 μm 时，取得最小磨损率约为 $2.13 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 。



(a) The dissipated energy

(b) The relationship between wear volume and the dissipated energy

Fig.6 The dissipated energy and relationship between wear volume and the dissipated energy of DLC at different load and displacement amplitude

图 6 不同载荷、位移幅值下 DLC 薄膜的累积耗散能及磨损体积与摩擦耗散能的关系

摩擦学研究中，虽然 Archard 是最普遍磨损模型，但其没有考虑摩擦对磨损的影响。

摩擦耗散能是研究微动磨损中的重要参数^[3]。图 6(a)为摩擦耗散能曲线，由公式(1)计算得到，式中 P 为法向载荷， μ 为摩擦系数， D 为位移幅值。

$$E_d = \sum_{i=1}^n 4P\mu D \quad (1)$$

DLC 薄膜与 GCr15 对摩时，摩擦耗散能与循环次数呈线性关系。小的载荷或位移幅值时，摩擦耗散能增长缓慢。大的载荷或位移幅值时，摩擦耗散增长开始加快。能量耗散概念^[18]可以用来描述和比较硬质薄膜的微动磨损性能。根据能量模型^[5]可知，磨损体积 V 与摩擦接触中的摩擦耗散能 E_d 成正比，即公式(2)，式中： α 为能量磨损系数。

$$\alpha = \frac{V}{E_d} \quad (2)$$

DLC 薄膜微动磨损体积与摩擦耗散能的关系如图 6(b)所示，采用最小二乘法拟合试验数据^[19]，发现在相同载荷时，DLC 微动磨损体积与累积摩擦耗散能呈显著的线性关系。斜率为能量磨损系数 α ，残差(回归系数)为 R^2 。根据摩擦耗散能，可以预估 DLC 薄膜的磨损量。DLC 薄膜能量磨损系数随着法向载荷的增加而减小。在法向载荷 $P=50N$ 时，DLC 薄膜有最佳的耐磨性(即达到最小能量磨损系数)。相应的能量磨损系数(α)以及相关的回归系数(R^2)汇总在表 1 中。对于给定的载荷，能量磨损方法既展现了微动磨损过程的稳定性，也显示了能量磨损系数与法向载荷之间的相关性。

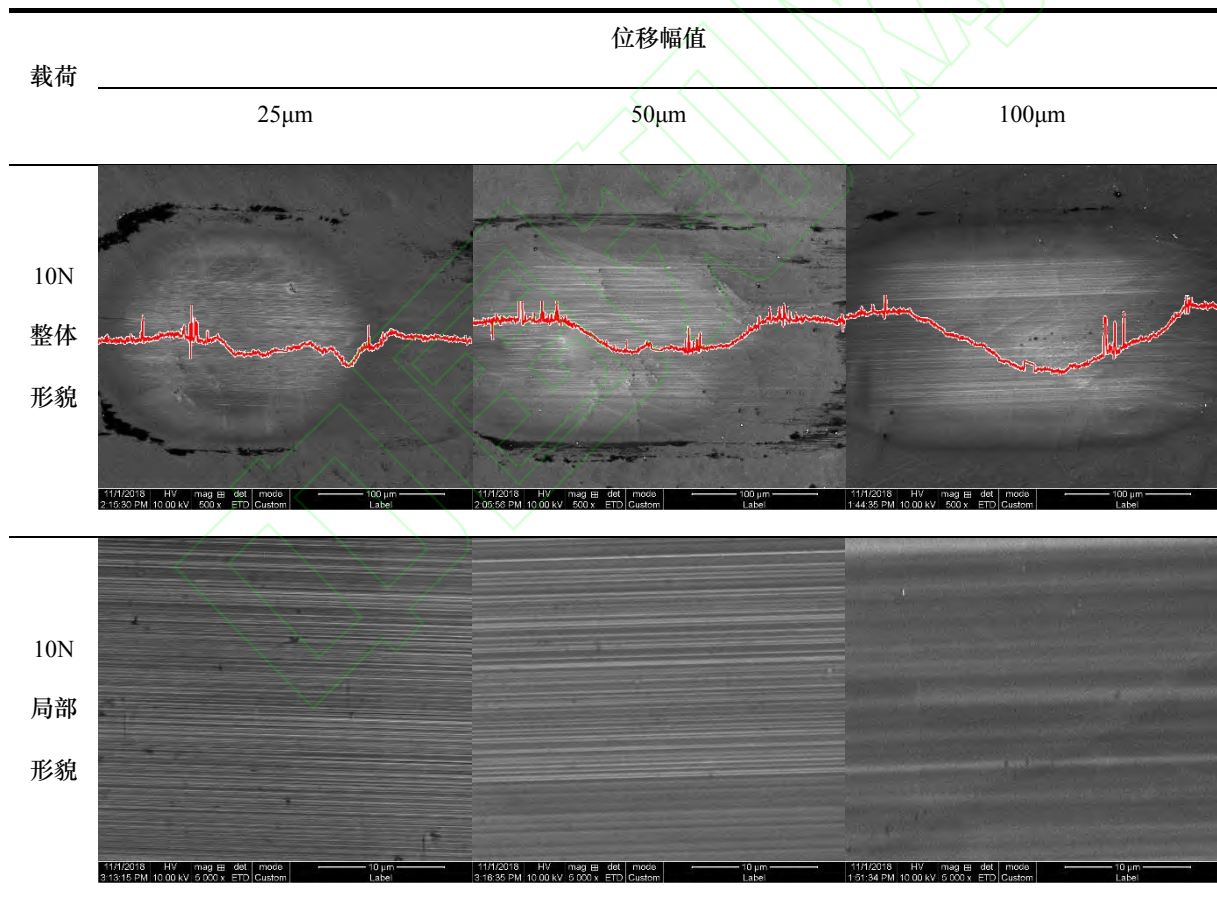
表 1 能量磨损系数 Table 1 Energy wear factor

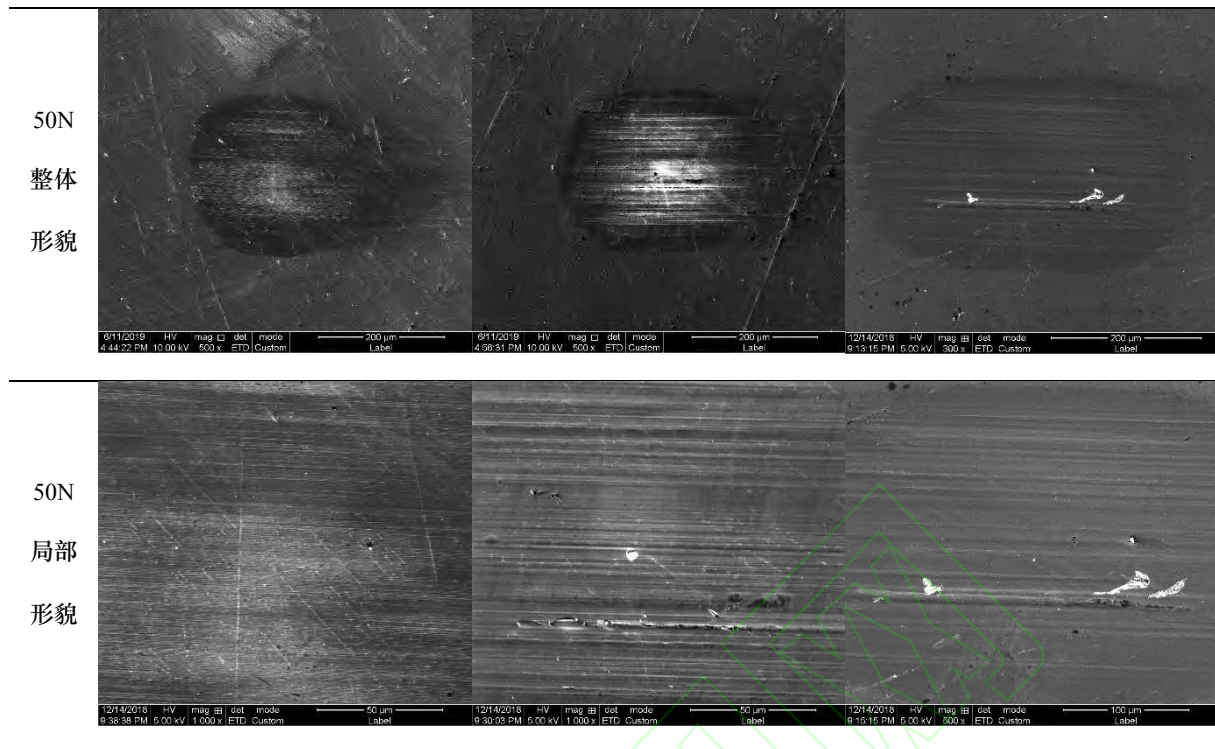
	$\alpha (\mu\text{m}^3/\text{J})/R^2$			
	5N	10N	20N	50N
DLC	2285/0.981	1144/0.791	270/0.999	80/0.990

2.2.3 DLC 磨痕形貌与 Raman 分析

表 2 DLC 微动磨损形貌

Table 2 Fretting wear morphology of DLC film





不同微动参数条件下 DLC 薄膜磨痕的表面形貌，如表 2 所示。相同载荷条件下，DLC 磨痕区域随位移幅值增大而增大。相同位移幅值条件下，载荷增大，磨痕宽度变大。通过磨痕截面轮廓也能反映出 DLC 薄膜的滑移状态。混合滑移状态下，截面轮廓呈“W”型，完全滑移截面轮廓呈“U”型。此外，载荷增大使接触面积变大，磨屑更加难于排出，磨粒磨损程度增加。总之，混合滑移比完全滑移情形下的磨损更为严重。

DLC 磨损形式主要为磨粒磨损，沿微动方向出现了犁沟的均匀分布。微动状态条件下，磨屑在载荷作用下发生黏着，不易排出接触面，随着磨损的进行磨屑作为第三体起到了切削作用。犁沟的出现减小实际接触面积及摩擦系数，从而减小了切向的摩擦力；并且犁沟可以存储磨屑，减轻磨损。此外，DLC 薄膜表面黏着磨损轻微，这主要是因为 DLC 膜的自润滑作用，在微动过程中石墨会向 GCr15 球表面转移，形成转移膜^[20]。它阻止了摩擦副的直接接触，延缓了 DLC 薄膜微动摩擦磨损进程，从而改善了其抗微动磨损性能。此外，DLC 薄膜磨痕经 EDS 分析表明成分以碳元素为主，氧元素含量很低。DLC 薄膜可以有效屏蔽氧的深入，抑制严重的氧化磨损^[15]。

位移幅值 $D=25\ \mu\text{m}$ 时，磨痕中犁沟密集程度较高；位移幅值 $D=50、100\ \mu\text{m}$ 时，犁沟密集程度降低。由此可知随着位移幅值增大，有利于磨屑的排出，降低了磨粒磨损的程度，从而降低了磨损率。载荷 $P=50\text{N}$ 时，磨屑引起较高应力集中现象，造成薄膜与基体的塑形变形不协调，最终生成微裂纹并扩展，加速薄膜失效。

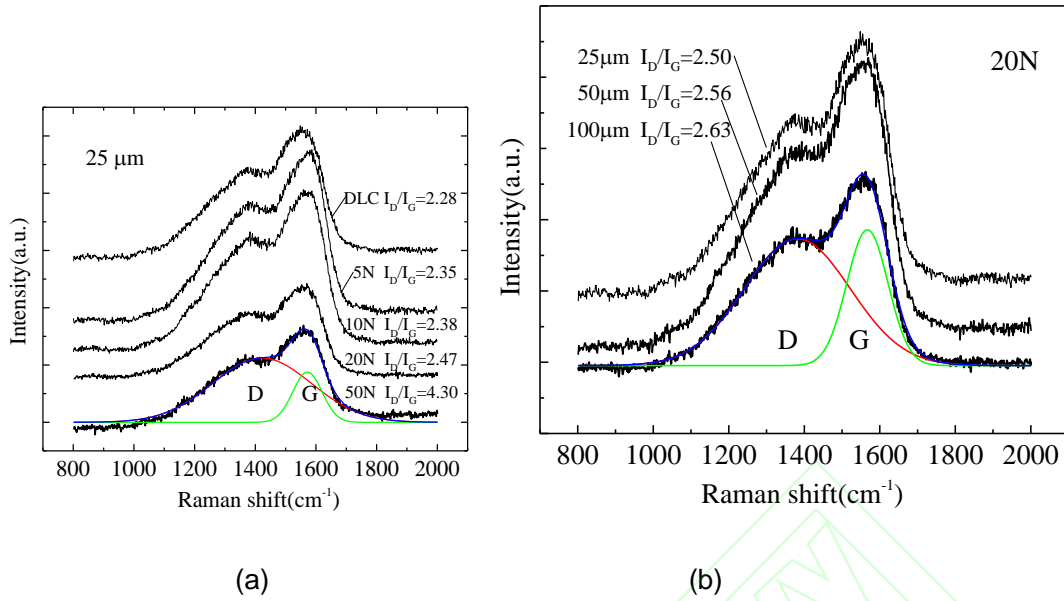
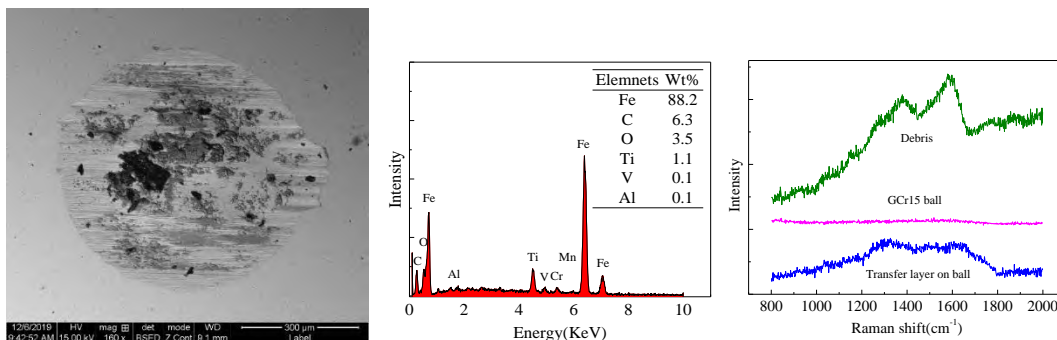


Fig.7 Raman spectra of wear tracks of DLC film with (a) an increase in normal load at the displacement amplitude of 25 μm and (b) an increase in displacement amplitude at the normal load of 20 N

图 7 (a)不同法向载荷($D=25 \mu\text{m}$)及(b)不同位移幅值($P=20\text{N}$)条件下 DLC 薄膜磨痕的拉曼光谱图

DLC 薄膜与 GCr15 钢球对摩后, 对 DLC 磨痕进行拉曼分析, 如图 7 所示。磨痕拉曼光谱显示了 D 峰和 G 峰的双峰结构。DLC 的 $I_D/I_G=2.28$, 磨痕中 I_D/I_G 都大于 2.28, 说明磨痕中 DLC 薄膜石墨化程度较高。由图 7 可以看出, DLC 薄膜试样微动实验后的 I_D/I_G 比微动实验前的 I_D/I_G 要高; 且法向载荷越大, I_D/I_G 越高, 位移幅值越大, I_D/I_G 越高。这意味着微动试验参数对 DLC 薄膜石墨化进程有显著的影响^[21]。

2.2.4 对偶磨斑 EDS 和拉曼光谱分析



(a) SEM images (b) EDS analysis (c) Raman analysis

Fig.8 SEM images, EDS and Raman analysis of wear scar of GCr15 ball

图 8 GCr15 球磨斑的形貌、EDS 及 Raman 分析

DLC/GCr15 对磨时, GCr15 摩擦副磨损严重, 磨斑表面成犁沟状并伴随大量的黏附物。如图 8(b)所示, 对黏附物进行 EDS 分析。EDS 分析表明磨斑表面有碳元素存在, 进一步通过拉曼光谱分析表明摩擦转移膜与石墨的拉曼光谱极为相似。说明在 GCr15 摩擦副表面有摩擦转移膜形成。它的形成减少了 DLC 与 GCr15 直接接触, 促进摩擦系数进一步降低, 有利于减缓微动磨损进程^[22]。此外, 磨屑的拉曼光谱也显示了 D 峰和 G 峰的双峰结构。磨屑中 D 峰的出现, 说明磨屑中存在石墨形式的碳。

2.3 微动磨损机理分析讨论

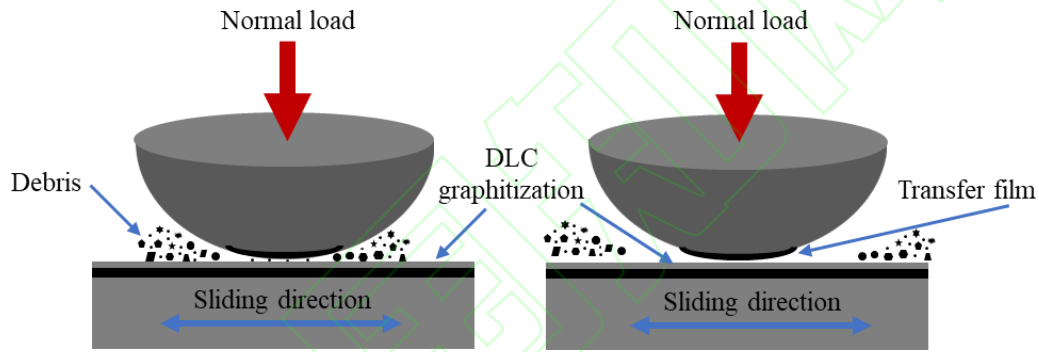


Fig.9 Fretting wear mechanism of DLC film

图 9 DLC 薄膜微动磨损机理图

图 9 为 DLC 薄膜微动磨损机理图。微动摩擦磨损过程中, DLC 薄膜表面的少量碳结构在摩擦剪切应力作用下从表面剥落形成磨屑。小位移幅值时, 磨屑会堆积在磨痕表面, 伴随微动摩擦进程并导致磨粒磨损。DLC 磨屑引起的高接触应力降低了石墨化温度并促进了石墨化转变^[23]。此外, 转变过程中也降低了 DLC 薄膜的硬度, 增加了 DLC 薄膜的磨损率^[24]。另一方面, 在干摩擦条件下, 磨屑充当固体润滑剂在一定程度上减轻黏着, 减少摩擦, 但其作为硬质磨料却加速了磨粒磨损^[25]。大位移幅值时, 有利于磨屑的排出, 停留在磨痕中的磨屑数量很少, 造成上下试样表面直接接触。这时 DLC 薄膜磨损机理是黏着磨损。有限接触应力也会导致 DLC 薄膜的石墨化进程, 但是其石墨化进程较为缓慢。此外, 黏着磨损条件下, DLC 石墨化进程促进摩擦转移膜在摩擦副表面形成, 具有纳米石墨团簇结构吸附在磨损的表面上并显示出减摩耐磨效果^[26], 从而降低微动磨损。因此, DLC 薄膜的磨损机制与磨屑的排出过程相关。结合以上对 DLC 薄膜表面磨损 SEM 形貌分析, 可以得出。在法向接触载荷和切向载荷的综合作用下, 小位移幅值时, DLC 薄膜的磨损机制是磨粒磨损为

主。表现为不同程度的磨粒磨损特征，犁沟主要沿微动运动方向分布。大位移幅值时，DLC 薄膜的磨损机制则是黏着磨损为主，伴随着轻微磨粒磨损的发生。

3 结论

在不同位移幅值和法向载荷等微动参数条件下，通过对 DLC 薄膜进行微动磨损实验，得到以下结论：

- a. 载荷及位移幅值对 DLC 薄膜微动运行行为和损伤机理具有显著性影响。它决定了微动磨损的滑移状态和损伤机制。根据材料响应微动图理论可知，DLC 薄膜微动滑移状态主要由混合滑移区和完全滑移区组成。
- b. 微动磨损过程中，位移幅值大小影响磨屑的排出。小位移幅值下，磨损机理以磨粒磨损为主。磨粒磨损状态下，一方面磨屑作为磨料加速磨损；另一方面磨屑存在石墨形式的碳，减轻黏着，减少摩擦。大位移幅值下，磨损机理以黏着磨损为主。黏着磨损状态下，DLC 薄膜自身石墨化进程以及摩擦副表面摩擦转移膜形成，减小摩擦，从而提高了抗微动磨损强度。
- c. DLC 薄膜损伤过程在于石墨化进程。法向载荷、位移幅值等微动参数对 DLC 薄膜的石墨化进程有显著影响。大的法向载荷或位移幅值有利于 DLC 薄膜石墨化进程。磨屑，犁沟导致应力集中，对 DLC 薄膜石墨化进程也有推动作用。石墨化程度的提高又有利于降低微动磨损率。

参考文献：

- [1] ZHOU Z R, NAKAZAWA K, ZHU M H, et al. Progress in fretting maps[J]. Tribology International, 2006, 39(10):1068-1073.
- [2] Pei Xianqiang, Wang Qihua, Wang Haijun. Application of fretting maps and energy approach in the research of fretting[J]. Lubrication Engineering, 2004, (4):97-101(in Chinese)[裴先强, 王齐华, 王海军. 微动图和能量的方法在微动研究中的应用[J]. 润滑与密封, 2004, (4):97-101].
- [3] Jing Pengfei, Yu Shurong, Song Wei, et al. Effect of contact load on fretting wear behavior of TC4 titanium alloy[J]. Surface Technology, 2019, 48(11):266-274(in Chinese)[景鹏飞, 俞树荣, 宋伟, 等. 接触载荷对 TC4 钛合金微动磨损行为的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(11):266-274].
- [4] CARDOSO R A, DOCA T, NERON D, et al. Wear numerical assessment for partial slip fretting fatigue conditions[J]. Tribology International, 2019, 136:508-523.
- [5] FOUVRY S, KAPSA P, VINCENT L. An elastic-plastic shakedown analysis of fretting

- wear[J], 2001, 247:41-54.
- [6] NIMURA K, SUGAWARA T, JIBIKI T, et al. Surface modification of aluminum alloy to improve fretting wear properties[J]. Tribology International, 2016, 93:702-708.
- [7] FU H, FAN X, LI W, et al. Tribological behaviors of fluid-lubricated DLC films under sliding and fretting conditions[J]. Applied Surface Science, 2018, 459:411-421.
- [8] KALIN M, VIZINTIN J. The tribological performance of DLC coatings under oil-lubricated fretting conditions[J]. Tribology International, 2006, 39(10):1060-1067.
- [9] WATABE T, AMANOV A, TSUBOI R, et al. Friction and Fretting Wear Characteristics of Different Diamond-Like Carbon Coatings Against Alumina in Water-Lubricated Fretting Conditions[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2013, 13(12):8167-8175.
- [10] NAVANEETHAKRISHNAN P, RAMAN S G S, PATHAK S D, et al. Fretting wear studies on diamond-like carbon coated Ti-6Al-4V[J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203(9):1205-1212.
- [11] WÄSCHE R, KLAFFKE D. Tribology of DLC films under fretting conditions [M]. Tribology of Diamond-Like Carbon Films. Springer. 2008: 362-382.
- [12] AMANOV A, WATABE T, TSUBOI R, et al. Fretting wear and fracture behaviors of Cr-doped and non-doped DLC films deposited on Ti-6Al-4V alloy by unbalanced magnetron sputtering[J]. Tribology International, 2013, 62:49-57.
- [13] DING H H, FRIDRICI V, BOUVARD G, et al. Influence of deposition positions on fretting behaviors of DLC coating on Ti-6Al-4V[J]. Tribology Transactions, 2019, 62(6):1155-1172.
- [14] BLANPAIN B, CELIS J P, ROOS J R, et al. A comparative study of the fretting wear of hard carbon coatings[J]. Thin Solid Films, 1993, 223(1):65-71.
- [15] Deng Kai, Yu Min, Dai Zhendong, et al. Fretting wear of TC11 and surface modified layers in seawater[J]. Rare Metal Materials And Engineering, 2014, 43(5):1099-1104(in Chinese)[邓凯, 于敏, 戴振东, 等. TC11 及表面改性膜层在海水中的微动磨损研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(5):1099-1104].
- [16] DU D, LIU D, YE Z, et al. Fretting wear and fretting fatigue behaviors of diamond-like carbon and graphite-like carbon films deposited on Ti-6Al-4V alloy[J]. Applied Surface Science, 2014, 313:462-469.
- [17] WANG L, BAI L, LU Z, et al. Influence of Load on the Tribological Behavior of a-C Films: Experiment and Calculation Coupling[J]. Tribology Letters, 2013, 52(3):469-475.

- [18] KORSUNSKY A M, KIM K. Dissipated energy and friction coefficient evolution during fretting wear of solid lubricant coatings[J]. Tribology International, 2010, 43(5-6):861-867.
- [19] Zhang Gaolong, Liu Ying, Wang Yuechang, et al. A friction-dissipation based method for quantity model and prediction of graphite/WC-Ni wear under dry sliding[J]. Tribology, 2019, 39(2):221-227(in Chinese)[张高龙, 刘莹, 王悦昶, 等. 基于摩擦耗散的石墨/WC-Ni 干摩擦下磨损定量及预测[J]. 摩擦学学报, 2019, 39(2):221-227].
- [20] ZHUANG W, FAN X, LI W, et al. Comparing space adaptability of diamond-like carbon and molybdenum disulfide films toward synergistic lubrication[J]. Carbon, 2018, 134:163-173.
- [21] Zhuang Wenhua, Fan Xiaoqiang, Li Hao, et al. Probing influence of displacement amplitude on fretting damage of diamond-like films[J]. Tribology, 2019, 32(4):84-96(in Chinese)[庄文华, 樊小强, 李浩, 等. 探究位移幅值对类金刚石薄膜微动损伤的影响[J]. 中国表面工程, 2019, 32(4):84-96.
- [22] Zhao Yiman, Liu Hongmei, Ji Li, et al. Effect of transfer film forming on super-low friction properties of hydrogenated amorphous carbon films[J]. Tribology, 2018, 38(1):115-120(in Chinese)[赵艺蔓, 刘红妹, 吉利, 等. 转移膜的形成对含氢碳膜超低摩擦性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(1):115-120].
- [23] QI D, WANG L, WANG Y, et al. Improved Tribological Behavior of DLC Films Under Water Lubrication by Surface Texturing[J]. Tribology Letters, 2011,41(2):p.439-449.
- [24] Zeng Qunfeng, Cao Qian, Ali E, et al. Current development situation of superlow friction behavior of DLC films[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(4): 1-19(in Chinese)[曾群锋, 曹倩, ALI E, 等. 类金刚石膜超低摩擦行为的研究进展[J]. 中国表面工程, 2018, 31(4):1-19].
- [25] MI X, CAI Z B, XIONG X M, et al. Investigation on fretting wear behavior of 690 alloy in water under various temperatures[J]. Tribology International, 2016, 100:400-409.
- [26] SCHARF T W, SINGER I L. Role of the Transfer Film on the Friction and Wear of Metal Carbide Reinforced Amorphous Carbon Coatings During Run-in[J]. Tribology Letters, 2009, 36(1):43-53.