

TC4 表面织构化 DLC 薄膜摩擦学特性研究

崔坤杰^{1,2}, 孙耀¹, 陈祖亮¹, 王涛^{1,2}, 时礼平^{1,2,3}, 李蒙^{1,2*}

(1.特种重载机器人安徽省重点实验室, 安徽 马鞍山 243002; 2.安徽工业大学,
安徽 马鞍山 243002; 3.安徽工业大学芜湖技术创新研究院, 安徽 芜湖 241002)

摘要: **目的** 研究 TC4 钛合金基体表面织构设计对类金刚石薄膜 (DLC) 的摩擦学性能影响。**方法** 利用激光加工和物理气相沉积组合技术, 在 TC4 钛合金表面制备凹坑织构阵列与 DLC 薄膜的复合结构, 研究其在甘油溶液下的协同摩擦学性能。通过微观划痕和纳米压痕试验对织构化 DLC 薄膜进行力学性能表征, 利用 ABAQUS 对有无织构下 DLC 薄膜的失效过程进行仿真对比分析。**结果** 表面织构可以有效地增加 TC4 表面 DLC 薄膜“低摩擦”效应的作用时间, 延长其使用寿命。不同织构参数设计对 DLC 薄膜耐磨时间有显著影响, 其中直径 200 μm 、面积率 20% 的织构化 DLC 薄膜的性能最佳, 对比光滑 DLC 薄膜, 其耐磨寿命提升了 7.52 倍。力学表征及仿真分析表明, 表面织构增强了 DLC 薄膜与 TC4 基体之间的“机械锁合”程度, 并存在“应力扩散”现象, 能够有效提升 DLC 薄膜与 TC4 基体间的力学性能。对比光滑 DLC 薄膜, 织构化 DLC 薄膜试样涂层与基体之间的结合力最大可提升 1.9 倍。**结论** 表面织构化设计可以有效地提升 DLC 薄膜与基体的力学性能, 在摩擦过程中调节接触界面的应力分布, 增强 DLC 薄膜耐磨性能, 延长 DLC 薄膜使用寿命。研究结果将为新型人工关节表面设计提供理论支撑。

关键词: Ti-6Al-4V; 类金刚石薄膜; 表面织构; 复合处理; 力学行为; 摩擦磨损性能

中图分类号: TH117.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2025)01-0161-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2025.01.015

Tribological Properties of DLC Films on Textured Titanium Alloy Surface

CUI Kunjie^{1,2}, SUN Yao¹, CHEN Zuliang¹, WANG Tao^{1,2}, SHI Liping^{1,2,3}, LI Meng^{1,2*}

(1. Anhui Provincial Key Laboratory of Special Heavy-Duty Robots, Anhui Ma'anshan 243002, China; 2. Anhui University of Technology, Anhui Ma'anshan 243002, China; 3. Wuhu Institute of Technology Innovation, Anhui Wuhu 241002, China)

ABSTRACT: As a crucial medical treatment modality, artificial joint replacement has gained extensive utilization in addressing joint aging and pain. However, the service life of artificial joint pairs is predominantly constrained by the friction and wear characteristics of the material surface. Prolonged usage of artificial joints often leads to loosening and detachment, exacerbating patients' discomfort. The work aims to fabricate a composite structure by integrating surface texture and DLC film onto the titanium alloy surface of artificial joints to investigate their frictional and wear properties. Moreover, the underlying mechanism

收稿日期: 2024-01-23; 修订日期: 2024-07-02

Received: 2024-01-23; Revised: 2024-07-02

基金项目: 国家自然科学基金 (52205178); 安徽高校协同创新项目 (GXXT-2023-022); 芜湖市科技计划项目 (2023jc02); 安徽省自然科学基金项目 (2108085ME174, 2108085QE228)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (52205178); The University Synergy Innovation Program of Anhui Province (GXXT-2023-022); The Science and Technology Plan Project of Wuhu City (2023jc02); Natural Science Foundation of Anhui Province (2108085ME174, 2108085QE228)

引文格式: 崔坤杰, 孙耀, 陈祖亮, 等. TC4 表面织构化 DLC 薄膜摩擦学特性研究[J]. 表面技术, 2025, 54(1): 161-170.

CUI Kunjie, SUN Yao, CHEN Zuliang, et al. Tribological Properties of DLC Films on Textured Titanium Alloy Surface[J]. Surface Technology, 2025, 54(1): 161-170.

*通信作者 (Corresponding author)

governing the tribological behavior of DLC film on textured TC4 titanium alloy surfaces will be elucidated, thereby providing theoretical support for innovative design of artificial joint interfaces.

The measurements were carried out by a ball-on-disk friction and wear tester with a lubrication of glycerol solution. The applied normal load was 300 g (2.94 N), with a friction radius of 6 mm and sliding speed of 0.063 m/s. A volume of 10 mL of lubricant was used, and the test duration lasted for 30 minutes. Subsequently, the surface wear condition of the sample was assessed through metallographic microscope (GMM-580P) and scanning electron microscope (VH-Z250R). Furthermore, the hardness and elastic modulus of DLC films were measured by Agilent Technologies Nano Indenter G200 nanoindentation instrument, while the adhesion between DLC films and substrates was evaluated with a micro-scratch tester. Finally, mechanical properties simulation and analysis were performed with ABAQUS.

The surface texture effectively enhances the durability of the "low friction" effect of DLC film on TC4 surfaces, thereby extending its service life. Varying the parameters of the texture design significantly affects the wear resistance time of DLC films. Among different texture parameters, a textured DLC film with a diameter of 200 μm and an area ratio of 20% exhibits optimal performance, increasing its wear resistance life by 7.52 times compared to a smooth DLC film. However, there is no significant improvement in anti-friction effect for textured DLC films under different texture parameters before failure occurs. Mechanical characterization and theoretical simulation show that the mechanical properties of the DLC film and TC4 substrate are significantly improved by surface textures. The textures create a "mechanical locking" effect between the DLC film and TC4 substrate, and favor a "stress diffusion" at the sliding interface. Moreover, textured TC4 substrates greatly augment the nano-hardness and elastic modulus of DLC films. Compared to smooth controls, the adhesion between textured TC4 and DLC film can increase up to 1.9 times higher.

The interface stress between the smooth substrate and DLC is transmitted horizontally, accompanied by the propagation of cracks. In contrast, the interface stress between the textured matrix and DLC is regulated by the concave wall during the diffusion process, which transforms the direction of stress transmission from the horizontal direction to the vertical direction, then gradually attenuating. Consequently, it effectively suppresses crack propagation at the substrate-coating junction, enhances wear resistance of the DLC film, and prolongs its failure time. The research findings presented in this work provide valuable theoretical support for surface design of novel artificial joints.

KEY WORDS: Ti-6Al-4V; diamond-like carbon film; surface texture; composite treatment; mechanical behavior; friction and wear properties

钛合金具有生物相容性高、耐腐蚀、低密度等特性^[1],在人工关节领域有着广泛的应用。相关研究表明,钛合金在长期往复运动中,接触界面的高摩擦行为会引起材料表面磨损,缩短植入关节的使用寿命,且摩擦也会加剧表面钛离子的溶解与析出,增加患者过敏风险^[2]。对此,国内外诸多学者进行了大量的表面改性研究,以期提高钛合金表面的耐磨与降摩性能,延长植入关节的使用寿命。其中,表面织构与涂层是 2 种较为典型的技术。

表面织构化即通过物理或化学方法在表面加工出具有一定尺寸和形状的凹坑阵列,已被证实为一种改善材料表面摩擦学性能的有效途径。其主要作用机理为:干摩擦条件下,减少接触面积,收集磨屑^[3-5];边界润滑条件下,储存润滑剂,提供二次润滑^[6-8];流体润滑条件下,产生动压效应,提高承载力^[9-11]。现有研究表明,通过对织构参数的优化,可以在人工关节材料表面取得较低的摩擦因数,并有效提升关节副的耐磨性能^[12-14]。此外,Jamari 等^[15]进一步证实,人工髋关节摩擦副双面织构化设计能

够增大储油和界面动压效能,与光滑试样相比,合适的织构参数可将接触区域的承载力提高 13%。近年来,通过对自然界生物功能表皮的深入研究,发现仿生结构可以进一步提升摩擦接触界面的润滑效能^[16-18]。Liu 等^[16]对人工关节材料表面进行了鱼鳞结构、鲨鱼皮结构和条纹结构等形状的织构设计,以此提高关节副的亲水性,并利用毛细效应促使关节液在滑动界面的润滑效能得到进一步提升。由此可知,表面织构设计是改善关节材料表面摩擦学性能和延长其使用寿命的一种有效手段,但其具体的降摩/磨效能依赖于特定工况下的尺寸、形状等结构参数设计^[19-20],这在一定程度上限制了它的使用前景。

表面涂层化是人工关节表面改性技术的另一种重要手段,即在人工关节表面通过物理或化学气相沉积等技术制备 CrN、TiN 或类金刚石(Diamond-Like-Carbon, DLC)薄膜等硬质涂层,以降低植入关节的磨损^[21-23]。其中, DLC 薄膜凭借自身低摩擦因数、高生物相容性等特点在人工关节领域的研究与应用

较为广泛^[24]。其主要作用机理为在界面摩擦过程中发生的石墨化转变促使 DLC 薄膜形成 sp^2 杂化结构的石墨润滑膜, 进而增强接触界面的润滑性能, 降低摩擦因数^[25-27]。Madej 等^[28]研究发现, DLC 薄膜的引入明显降低了摩擦因数, 并提高了摩擦副表面的耐磨性和耐腐蚀性。相比于表面织构, DLC 薄膜对基体表面的初期降摩效果更为明显, 但由于 DLC 薄膜自身内应力较高, 以及在多数材料表面时附着力较低^[27], 随着摩擦的进行, 薄膜会逐渐出现裂纹, 并剥落, 导致薄膜失效^[29]。对此, 目前主要使用元素掺杂和制备梯度薄膜 2 种方式改善 DLC 薄膜的内应力和膜基结合力^[30-33], 然而单一 DLC 薄膜使用寿命较低的缺点仍然较为突出^[34], 如何提高 DLC 薄膜的使用寿命仍是亟待解决的问题。

本文将表面织构技术与 DLC 涂层相结合, 在 TC4 钛合金表面制备了织构化 DLC 薄膜, 进行不同织构尺寸及面积率下的摩擦学试验。研究表面织构和 DLC 薄膜共同作用下的界面摩擦学行为, 并对织构化 DLC 薄膜进行力学性能表征及仿真分析。

1 试验

1.1 试样制备

试验采用球-面接触方式, 上试样采用氧化铝陶瓷球, 直径为 9 mm, 硬度 80HRA~90HRA, 表面粗糙度 $Ra=0.02\text{ }\mu\text{m}$ 。基体选用尺寸为 $\phi 25\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 的 TC4 (Ti-6Al-4V) 钛合金, 其化学成分见表 1。润滑液选用 50% (质量分数) 的甘油溶液 (十二烷基硫酸钠 1 g/L), 外观为透明色液体, 密度为 1.12 g/cm^3 , 基础运动黏度 ($40\text{ }^\circ\text{C}$) 为 $66.49\text{ mm}^2/\text{s}$ 。

表 1 试验用 TC4 化学成分
Tab.1 Chemical composition of TC4 alloy

wt. %								
Al	V	Fe	C	N	H	O	Others	Ti
6.2	3.8	0.2	0.08	0.04	0.015	0.15	0.3	Balance

依次使用 400、600、800、1 200 目的砂纸对 TC4 基体进行打磨, 并利用粒度为 W0.25 氧化铝粉末进行抛光处理, 最后制得 TC4 试样表面粗糙度约为 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 。然后使用无水乙醇超声清洗 20 min, 氮气吹干备用。实验使用激光打标机 (UV3-SD, 天极星激光设备有限公司) 对已制试样进行织构加工, 织构均匀分布在 TC4 表面, 加工的织构直径分别为 200、300、400 μm , 面积率分别为 5%、10%、15%、20%。激光扫描速度为 500 mm/s, 激光频率为 20 kHz, 泵浦电流为 5 A, 扫描次数为 5~20 次。由于激光加工存在热影响区金属堆积行为, 需对织构化试样表面进行二次打磨与抛光处理, 并用光学数码显微镜 (VH-Z250R, Keyence) 进行表征。最后对所制备的织构化表面进行 DLC 薄膜沉积 (物理气相沉积)。主要步骤: 腔体内真空度抽至 $4.0\times 10^{-4}\sim 5.0\times 10^{-4}\text{ Pa}$, 通入氩气至气压为 0.4~0.9 Pa; 保持偏压为 -80 V, 轰击石墨靶材 1~2.5 h; 沉积过程中, 试样平台的旋转速度保持在 10 r/min。最终获得 DLC 薄膜厚度约为 $5\text{ }\mu\text{m}$, 表面粗糙度约为 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 。织构化 DLC 表面显微镜照片与三维形貌如图 1 所示, 其中织构的直径为 400 μm , 间距为 515 μm , 面积率为 15%, 所制备的表面织构深度均为 $(25\pm 2)\text{ }\mu\text{m}$ 。

1.2 摩擦学及涂层力学性能测试方法

使用球-盘式摩擦磨损试验机进行摩擦学试验, 如图 2 所示。摩擦学试验条件: 法向载荷为 300 g (2.94 N), 摩擦半径为 6 mm, 滑动速度为 0.063 m/s, 润滑液为 50 mL, 试验时间为 30 min。试验数据由计算机自动记录, 摩擦因数采集频率为 5 Hz。试验环境温度为室温, 相对湿度为 40%。为保证试验数据的准确性, 每组试验至少重复 3 次。采用金相显微镜 (GMM-580P, 上海光密仪器) 和扫描电子显微镜 (Mira3, Tescan) 进行表面磨损状态评估。使用三维光干涉形貌仪 (Contour GT—K, Bruker) 和超景深三维显微镜 (VH-Z250R, Keyence) 观测磨痕三维和截面形貌, 计算磨损率。磨损率计算公式:

$$K = \frac{V}{F \cdot L}$$

(1)

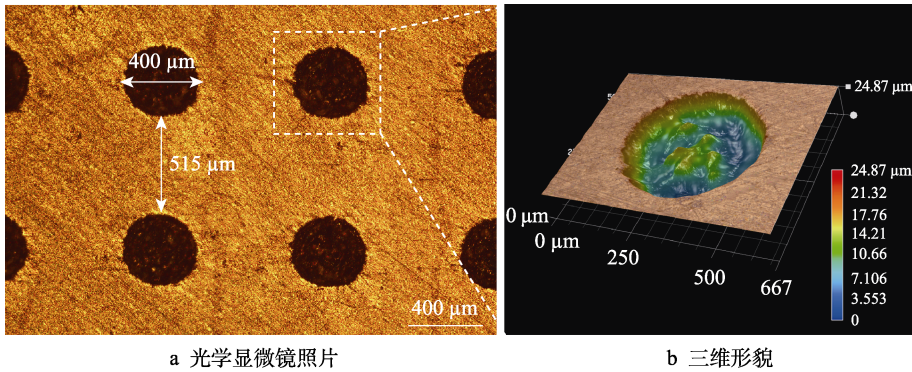


图 1 钛合金表面织构化 DLC 形貌 (直径 400 μm , 面积率 15%)
Fig.1 Textured DLC morphology on titanium alloy surface (diameter 400 μm , area ratio 15%):
a) optical microscope photo; b) three-dimensional morphology

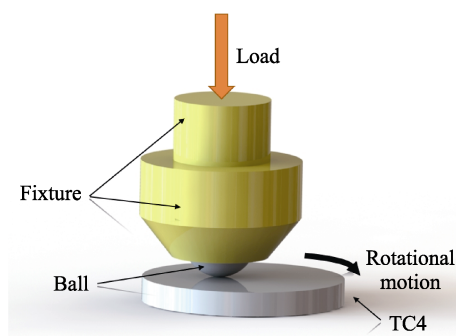


图 2 摩擦示意图
Fig.2 Friction diagram

式中： K 为磨损率； V 为磨损体积； F 为载荷； L 为摩擦总行程。

采用 G200 纳米压痕仪（Agilent Technologies Nano Indenter）测试 DLC 薄膜的硬度和弹性模量，测试深度为 800 nm。在测试的初始阶段，即测试压头刚刚接触到测试表面时，试样具有与薄膜较为接近的硬度和弹性模量。当压入深度不断接近基体时，测量结果受基体影响的程度越来越大，其更多反映的是薄膜-基体系统的硬度和弹性模量值^[35]。选取 100~200 nm 的硬度和弹性模量取平均值，测试不同织构下 DLC-TC4 系统的力学性能。采用中科凯华 WS2005 微划痕测试仪测试 DLC 薄膜与基体的结合力，加载速率为 15 N/min，长度约为 5 mm。测试过程中，薄膜表面的破裂或剥落会导致电导信号突然降低。当测试探针与基体完全接触时，电导信号接近为 0。记录下测试过程中的电导信号，从而确定 DLC 薄膜失效时的临界载荷点，临界载荷值反映了 DLC 薄膜与基体之间的结合强度。对于织构化 DLC 试样，其力学测试点位于相邻凹坑织构的中心位置。

2 结果与讨论

2.1 织构化 DLC 薄膜对 TC4 表面摩擦学行为的影响

光滑试样、DLC 薄膜及织构化 DLC 薄膜试样表面的摩擦学测试原始曲线如图 3 所示。由图 3 可知，光滑 TC4 试样表面的摩擦因数较大，且呈现波动状态，经过磨合期（约 6 min）后，趋于稳定，平均值约为 0.2。图 3 中棕色曲线为 TC4 表面 DLC 薄膜的摩擦因数曲线。可以明显看出，DLC 薄膜在滑动初期具有较低的摩擦因数（约 0.025），且整体较为平稳，无磨合期。与光滑试样相比，DLC 涂层可使 TC4 表面摩擦因数降低约 87.5%。随着滑移周期的持续增加，DLC 薄膜试样的摩擦因数在 17 min 出现了突增峰，并逐渐增多，且在滑动时间约为 25 min 时，呈现与光滑试样摩擦曲线相似的特征，说明 DLC 薄膜可能已完全失效。图 3 中蓝色曲线为 TC4 织构化 DLC

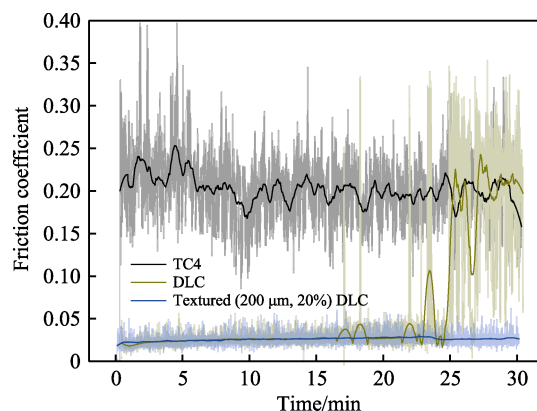


图 3 光滑试样、DLC 薄膜和织构化
DLC 薄膜的摩擦因数曲线

Fig.3 Friction coefficient curves of smooth samples,
DLC films and textured DLC films

薄膜的摩擦因数曲线。对比其余 2 种试样，织构化 DLC 试样在试验时间内始终保持低且稳定的摩擦因数。这表明 TC4 表面织构化设计能够显著抑制 DLC 涂层的失效行为，延长其使用寿命。

摩擦学试验后试样表面的磨损形貌如图 4 所示。可以看出，光滑试样和 DLC 薄膜试样的磨损表面均存在较为明显的犁沟现象，而织构化 DLC 试样磨痕较浅，磨损较少。与光滑试样相比，DLC 薄膜试样的磨痕宽度较小，但其与对偶球接触部分的 DLC 薄膜已基本完全脱落，这可由其能谱表征（EDS）证实。如图 5a 所示，磨痕区域外表面主要成分为 Ti 元素和 C 元素，磨痕区域内为 Ti 元素和 Al 元素，以及少量 C 元素残留，同时存在氧化反应得到的部分 O 元素。结合图 3 中的摩擦曲线测试结果可知，TC4 表面 DLC 薄膜在摩擦试验的前期起到了降摩和抑磨作用，但随着滑移周期的增加，DLC 薄膜逐渐碎裂并脱落失效，致使摩擦因数上升。在薄膜基本脱落后，呈现与 TC4 试样相近的摩擦因数，但由于 DLC 薄膜前期的降摩保护作用（失效前），因此 DLC 试样的磨损程度相较于 TC4 试样较小。

对比有/无织构存在的 DLC 薄膜磨损形貌可以明显看出，织构化 DLC 薄膜试样具有较低的磨损量，表现出较强的抗磨性能。由织构化 DLC 薄膜磨损后的 EDS 图（图 5b）可知，DLC 薄膜的磨损集中于凹坑织构的边缘区域，面积较小。相比 DLC 薄膜试样，磨痕区域内的 C 元素含量较大，反映出 TC4 表面 DLC 薄膜未受到完全破坏，即使在磨痕区域内也存在残留的润滑涂层。总而言之，TC4 表面凹坑阵列设计可以有效地提升 DLC 薄膜的抗磨特性，延长其使用寿命。

表面织构几何参数变化对织构化 DLC 薄膜摩擦学性能的影响如图 6 所示。由图 6a 可知，不同设计参数下（面积率&凹坑直径），织构化 DLC 薄膜摩擦因数呈交织状，变化较小。与光滑 DLC 薄膜相比，

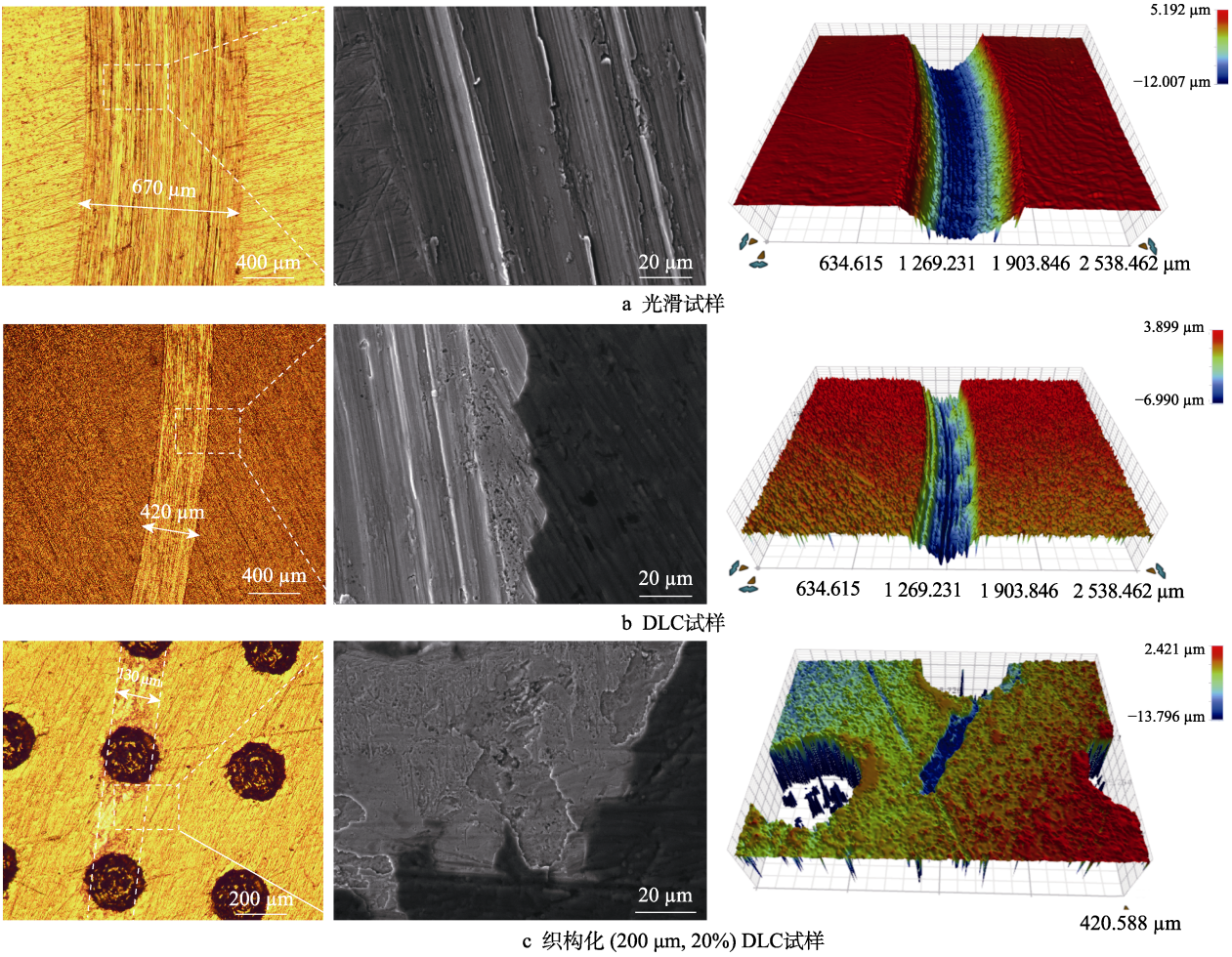


图 4 不同试样的磨损形貌

Fig.4 Wear morphologies of different samples: a) smooth sample; b) DLC sample; c) textured (200 μm , 20%) DLC sample

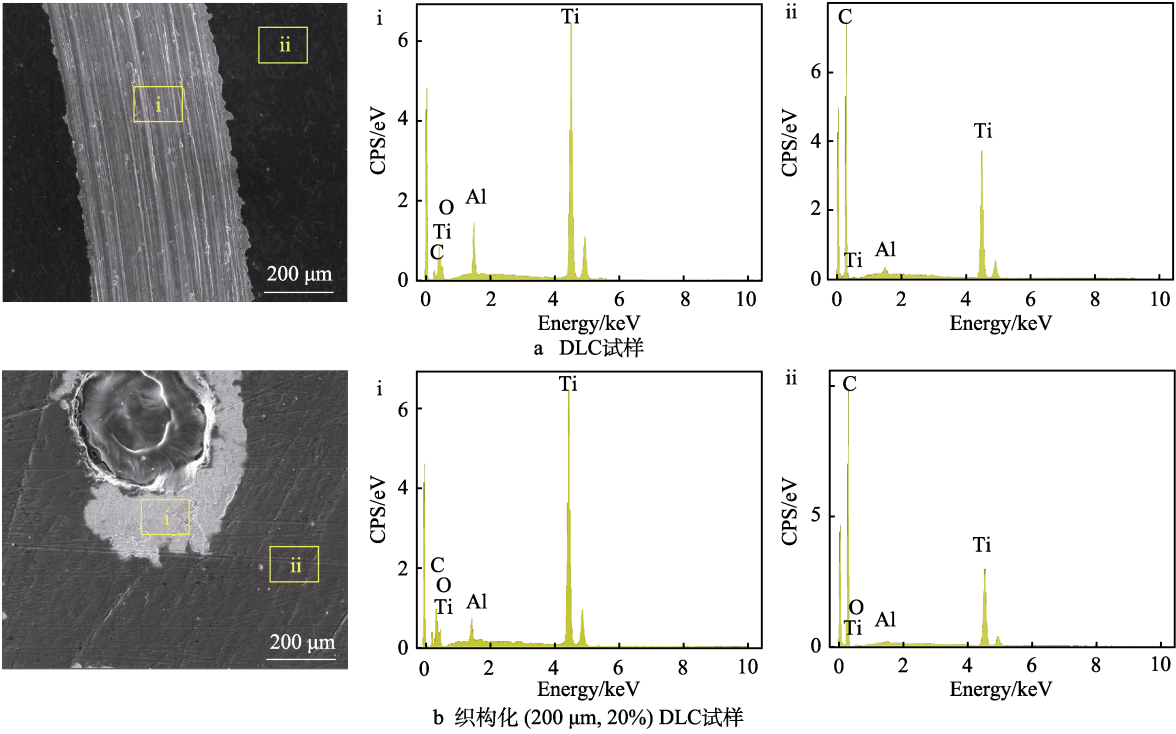


图 5 DLC 薄膜磨损表面 EDS 图谱

Fig.5 EDS spectrum of DLC film wear surface: a) DLC sample; b) textured (200 μm , 20%) DLC sample

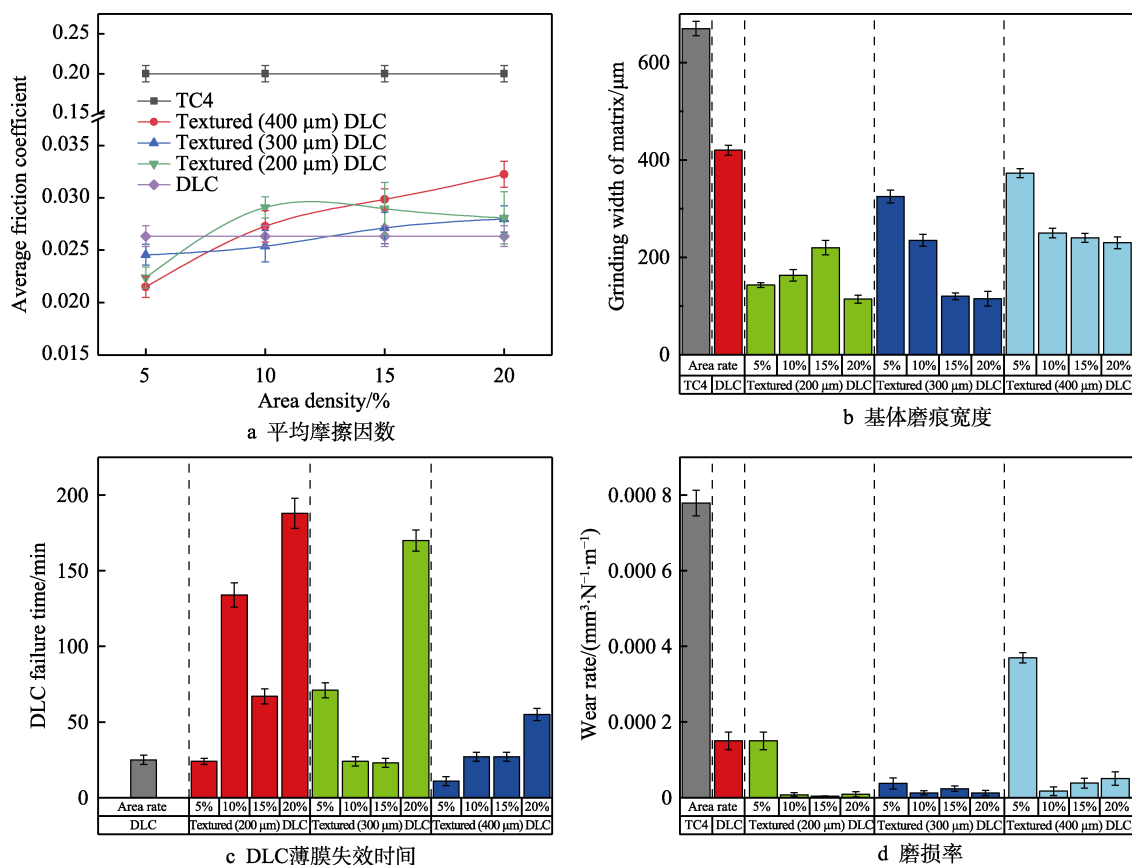


图6 不同织构参数下 DLC 薄膜摩擦学性能
Fig.6 Tribological properties of DLC films with different texture parameters: a) average friction coefficient; b) wear scar width; c) failure time of DLC films; d) wear rate

表面织构的引入对 DLC 薄膜减摩行为的影响较小, 摩擦因数无显著变化。图 6b 为不同直径和面积率下织构化 DLC 薄膜磨痕大小的变化图。可以看出, 织构直径是影响织构化 DLC 耐磨性能的主要因素, 其磨痕宽度整体随织构直径的增加而增大。在直径为 200 μm 时, 不同面积率织构化 DLC 薄膜的耐磨性能较为稳定, 磨痕宽度较小 (面积率 20% 表现最好)。图 6c 为不同参数下织构化 DLC 耐磨寿命的量化对比, 其中 DLC 薄膜磨损失效的临界时间点可以由其剧烈震荡的摩擦曲线 (见图 3) 确定。由图 6c 可见, 织构化 DLC 薄膜的耐磨寿命受织构直径和面积率影响较大, 小直径和高面积率的参数设计对其耐磨寿命的提升极为显著。几种试样中, 直径为 200 μm 且面积率为 20% 的织构化 DLC 薄膜表现最好, 失效时间约为 188 min。与光滑 DLC 试样相比 (平均失效时间约为 25 min), 耐磨寿命提升约 7.5 倍。图 6d 为不同参数下, 织构化 DLC 薄膜的磨损率。由图 6d 可见, 表面织构在提升 DLC 薄膜耐磨寿命的同时, 有效降低了织构化薄膜试样的磨损。综上可知, “小而密”的织构参数设计对 DLC 薄膜耐磨/抗磨性能的提升最为有益。

总而言之, TC4 表面织构化设计可以有效地提升 DLC 薄膜的失效时间, 延长其使用寿命。尽管现有

研究已证实表面织构存在“减少接触面积”“二次润滑”“微动压”等效应^[7,9], 但在本文中, 织构化 DLC 薄膜与光滑 DLC 在滑动初期却几乎保持相同的摩擦因数, 表明织构的作用主要在于改善其耐磨性能, 而非滑动界面润滑特性。本质上, DLC 作为一种高性能润滑涂层, 表面具有较好的低摩擦性能, 但由于与基体界面间存在化学与物理性能 (模量、硬度、热膨胀系数等) 的差异, 使得其与基体的结合力受限, 在摩擦界面往复接触应力下易发生碎裂失效, 表现出较短的失效时间^[40]。对于织构化 DLC 薄膜试样, 其表面在摩擦作用下的磨损碎裂行为得到有效抑制, 耐磨寿命得到大幅提升。尽管凹坑织构存在收集磨粒、减少磨料磨损的作用^[4], 但织构化 DLC 试样在滑移界面上少量且浅显的磨痕 (见图 4、5) 反映出 DLC 薄膜与 TC4 基体整体的强结合力是其长寿命的主要诱因。显然, 凹坑织构阵列的引入改善了 TC4 基体与 DLC 界面的结合应力, 可能存在“机械互锁”“应力传递”等效应, 为探究其作用机理, 我们对织构化 DLC 薄膜的力学性能进行了量化研究。

2.2 织构化 DLC 薄膜的力学性能

DLC 薄膜和织构化 DLC 薄膜的纳米压痕测试曲线如图 7 所示。依据测试标准^[41], 选取压痕深度在

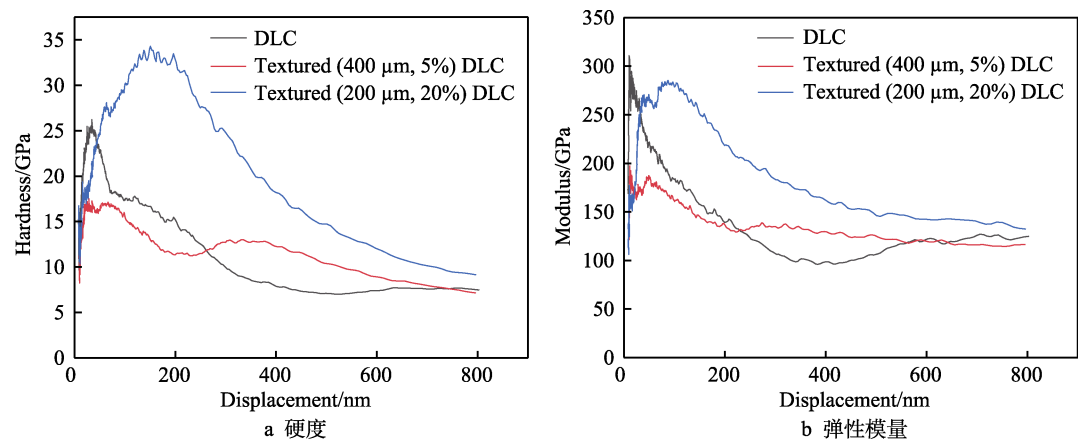


图 7 不同织构化 DLC 薄膜的纳米压痕曲线
Fig.7 Nanoindentation curves of different textured DLC films: a) hardness; b) elastic modulus

100~200 nm 的数据进行均值处理, 可得光滑 DLC 试样的硬度和弹性模量分别为 18.5、160.3 GPa。与光滑 DLC 相比, 直径为 400 μm 、面积率为 5% 的织构化 DLC 薄膜的硬度和弹性模量小幅降低, 其值分别为 14.1、148.1 GPa; 当直径为 200 μm 、面积率为 20% 时, 织构化 DLC 的硬度和弹性模量都有较大的提升, 分别为 28.7、222.5 GPa, 这与其长磨损失效时间相对应。可以看出, 合适参数的织构化处理可以有效提高 DLC 薄膜的表观硬度与弹性模量。为进一步量化研究 DLC 薄膜与织构化 TC4 的结合力, 本文还进行了薄膜划痕试样, 结果如图 8 所示。由图 8 可知, 光滑 DLC 薄膜与 TC4 基体的结合力受限, 其临界载荷较小, 约为 4.9 N。随着 TC4 基体织构化处理, DLC

薄膜的最大结合力也随之增大。直径为 400 μm 、面积率为 5% 的织构化 DLC 试样为 7.3 N, 而织构为直径 200 μm 、面积率为 20% 的 DLC 试样可以增加至 9.4 N。

由上文可知, TC4 表面织构化设计能有效提升基体与 DLC 界面结合强度, 延长涂层的使用寿命。为揭示表面织构对膜-基系统应力作用机理, 本文利用 ABAQUS 进行了薄膜划痕力学性能分析, 如图 9 所示。刚性压头半径为 150 μm , 基体表面织构直径为 100 μm , 面积率为 5%。涂层设置为线弹性材料, 其弹性模量为 160 GPa, 泊松比为 0.3, 涂层厚度为 5 μm ; 基体设置为线弹性材料, 其弹性模量为 110 GPa, 泊松比为 0.3, 基体厚度为 50 μm 。在涂层和基体之间设置一层厚度为 0 的 Cohesive 单元, 用来描述涂层与基体间的附着行为。边界条件设置如下: 压头向下施加位移 h , 基体与涂层完全固定。在分析过程中, 不考虑残余应力、粗糙度以及加载速率和惯性载荷对结果的影响。

划痕加载过程中, 光滑 DLC 薄膜与织构化 DLC 薄膜的等效应力分布如图 10 所示。可以看出, 随着滑移的进行, 压头压入深度 h 的增加, 基体和薄膜的

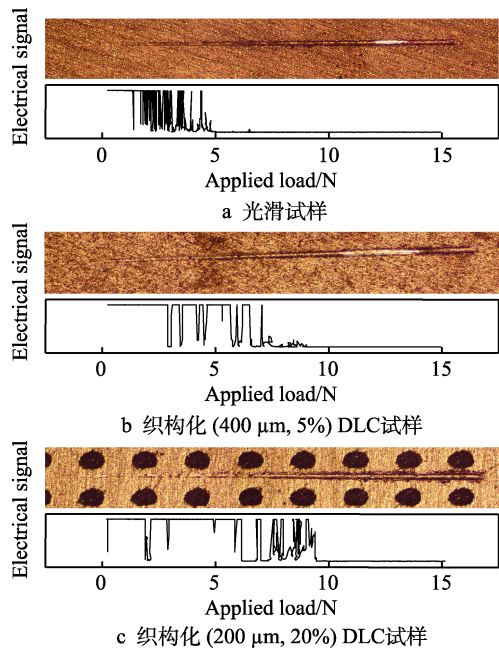


图 8 不同织构化 DLC 薄膜的电导信号和划痕显微形貌
Fig.8 Conductance signals and scratch micrographs of DLC films with different textures: a) smooth sample; b) textured (400 μm , 5%) DLC sample; c) textured (200 μm , 20%) DLC sample

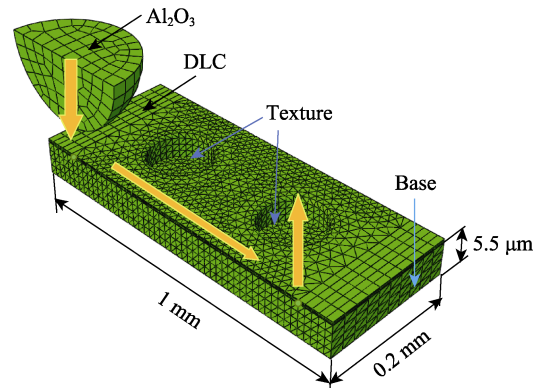


图 9 膜基系统模型及网格划分 (网格单元的最小尺寸约为 $x \times y \times z = 2 \mu\text{m} \times 1.25 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$)
Fig.9 Film-based system model and mesh generation (the minimum mesh size is about $x \times y \times z = 2 \mu\text{m} \times 1.25 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$)

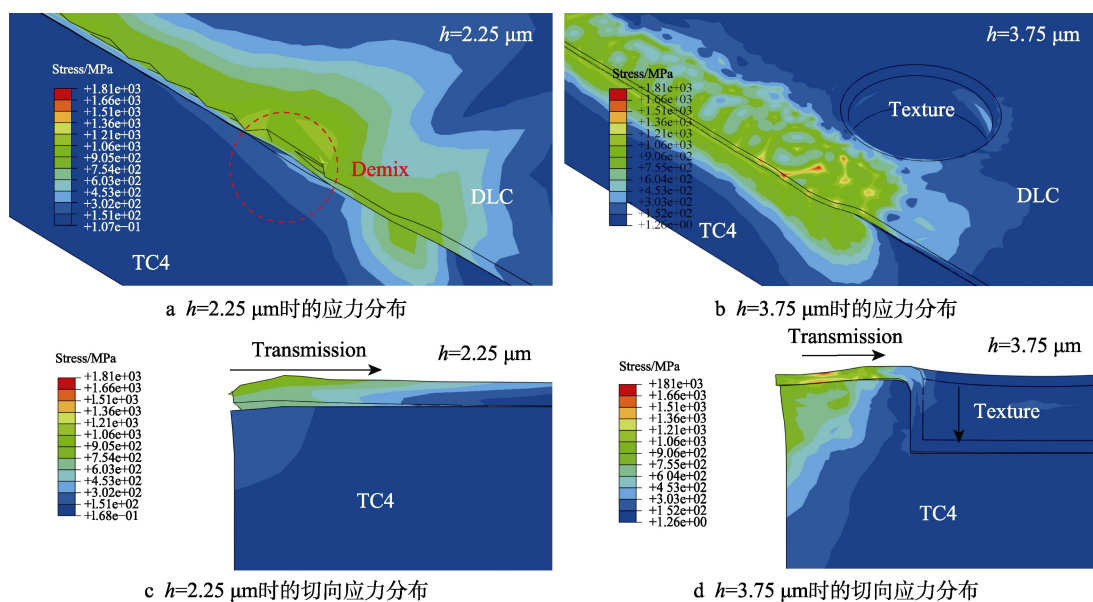


图 10 划痕测试中膜基系统的形变和应力演化

Fig.10 Deformation and stress evolution of film-based system in scratch test: a) stress distribution ($h=2.25\ \mu\text{m}$); b) stress distribution ($h=3.75\ \mu\text{m}$); c) tangential stress distribution ($h=2.25\ \mu\text{m}$); d) tangential stress distribution ($h=3.75\ \mu\text{m}$)

接触界面应力逐渐增加, 当其大于所设 Cohesive 层的内聚力时, 会出现分层失效。对于光滑 DLC 薄膜, 其临界压入深度为 $h=2.25\ \mu\text{m}$, 而织构化 DLC 薄膜在加载过程中未出现明显分层现象。这说明织构化设计可以使基体与 DLC 薄膜拥有更强的“锁合”程度, 可以在滑动界面“抵抗”更大的压入载荷。此外, 对于基体-薄膜系统, 较高的切向应力会导致分层区域的界面位移, 表现为涂层裂纹的扩展。对比图 10a、b 可以明显看出, 光滑基体与 DLC 的界面应力沿水平方向传递, 并伴随裂纹的自由扩展, 而织构化基体与 DLC 的界面应力在扩散过程中受到凹坑壁面的引诱, 使其由水平转化成垂直方向, 并且受凹坑结构的影响, 逐渐衰减, 从而有效地遏制了基体与涂层结合处裂纹的扩展。

总而言之, TC4 表面织构化设计可以有效地提升 DLC 薄膜与基体的结合力, 延长涂层的耐磨寿命。内在机制为凹坑织构对 DLC 薄膜的“机械互锁”行为, 以及在裂纹扩展过程中对其驱动应力的传递、抑制效应, 但其具体的性能可能依赖于其参数设计。图 6b、c 中织构化 DLC 薄膜试样表面差异化的磨痕宽度和失效时间说明, “小而密”的织构参数设计 (小直径、高面积率) 具有较好的界面力学行为, 能够有效地提升基体与 DLC 薄膜的“机械互锁”与“应力传递”效应, 大幅提升 DLC 的使用寿命。

3 结论

本文利用激光加工和物理气相沉积工艺在 TC4 表面制备了不同参数的织构化 DLC 薄膜, 探索了其在甘油溶液润滑下的摩擦学性能, 并对织构化基体-

薄膜系统的界面力学行为进行了定量研究。主要结论如下:

- 1) TC4 表面织构可以有效地提高 DLC 薄膜的耐磨性能, 延长其失效时间, 但受织构设计参数影响较大。“小而密”的织构参数设计对 DLC 薄膜耐磨性能的提升最为有益。
- 2) 织构化 DLC 薄膜的长耐磨寿命源于其织构设计对基体与涂层界面间的结合力提升, 而非其在滑动界面的润滑效应。
- 3) TC4 表面织构设计对 DLC 薄膜具有“机械互锁”效应, 且在滑动摩擦过程中调节基体与涂层应力状态, 抑制涂层裂纹的扩展, 提高其使用寿命。

参考文献:

- [1] 李兆峰, 张新杰, 蒋鹏, 等. 钛合金摩擦磨损特性及表面改性技术研究进展[J]. 表面工程与再制造, 2022, 22(1): 21-29.
LI Z F, ZHANG X J, JIANG P, et al. Research Progress on Friction and Wear Characteristics and Surface Modification Technology of Titanium Alloy[J]. Surface Engineering & Remanufacturing, 2022, 22(1): 21-29.
- [2] GONZÁLEZ J E G, MIRZA-ROSCA J C. Study of the Corrosion Behavior of Titanium and Some of Its Alloys for Biomedical and Dental Implant Applications[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 1999, 471(2): 109-115.
- [3] 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 T C, DING Q, HU L T. The Effect of Laser Texturing

- of GCr15 Steel Surfaces on Their Tribological Properties[J]. *Tribology*, 2011, 31(5): 447-451.
- [4] 金志浩, 潘振, 龙日升, 等. 条纹型织构对 81107 轴承干摩擦性能的影响[J]. *机械设计与制造*, 2023(2): 152-156.
- JIN Z H, PAN Z, LONG R S, et al. Effect of Stripe Texture on Dry Friction Performance of 81107 Dearing[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2023(2): 152-156.
- [5] 金志浩, 鞠子辰, 龙日升, 等. 凹坑型织构对 81107-TN 推力圆柱滚子轴承干摩擦性能的影响[J]. *轴承*, 2021(8): 11-15.
- JIN Z H, JU Z C, LONG R S, et al. Influence of Pit Texture on Dry Friction Properties of 81107-TN Cylindrical Thrust Roller Bearings[J]. *Bearing*, 2021(8): 11-15.
- [6] 王泽霄, 陈文刚, 张禄中, 等. 几何特征及工况条件对表面织构摩擦特性影响研究[J]. *表面技术*, 2022, 51(10): 89-100.
- WANG Z X, CHEN W G, ZHANG L Z, et al. Research Progress on the Influence of Geometric Characteristics and Working Conditions on the Friction Characteristics of Surface Texture[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(10): 89-100.
- [7] ITO S, TAKAHASHI K, SASAKI S. Generation Mechanism of Friction Anisotropy by Surface Texturing under Boundary Lubrication[J]. *Tribology International*, 2020, 149: 105598.
- [8] YUE H Z, DENG J X, GE D L, et al. Effect of Surface Texturing on Tribological Performance of Sliding Guide-way under Boundary Lubrication[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 47: 172-182.
- [9] DING X S, WU J, WANG Y G, et al. Influence of Surface Texture on Sealing Performance of PTFE Materials[J]. *Macromol*, 2022, 2(2): 225-235.
- [10] 纪敬虎, 董保栋, 陈天阳, 等. 交叉沟槽织构化粗糙表面流体润滑数值分析[J]. *表面技术*, 2019, 48(8): 39-47.
- JI J H, DONG B D, CHEN T Y, et al. Numerical Analysis of Hydrodynamic Lubrication of Textured Surfaces with Cross-Hatched Grooves[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(8): 39-47.
- [11] 韩雷. 流体润滑状态下织构化表面的摩擦学性能研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2014.
- HAN L. Study on Tribological Properties of Textured Surface under Fluid Lubrication[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2014.
- [12] LIU Y Y, DENG J X, WANG W, et al. Effect of Texture Parameters on Cutting Performance of Flank-Faced Textured Carbide Tools in Dry Cutting of Green Al_2O_3 Ceramics[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(11): 13205-13217.
- [13] MARIAN M, ALMQVIST A, ROSENKRANZ A, et al. Numerical Micro-Texture Optimization for Lubricated Contacts—A Critical Discussion[J]. *Friction*, 2022, 10(11): 1772-1809.
- [14] NIEMCZEWSKA-WÓJCIK M. Wear Mechanisms and Surface Topography of Artificial Hip Joint Components at the Subsequent Stages of Tribological Tests[J]. *Measurement*, 2017, 107: 89-98.
- [15] JAMARI, TAUVIQIRRAHMAN M, HUSEIN H R, et al. Effect of Surface Texturing on the Performance of Artificial Hip Joint for Muslim Prayer (Salat) Activity[J]. *Biotribology*, 2021, 26: 100177.
- [16] LIU Y Y, ZHU Q, WANG C Y, et al. Tribological Behavior of CoCrMo Artificial Knee Joint with Symmetrically Biomimetic Textured Surfaces on PEEK[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 157: 108774.
- [17] GUO Q G, ZHENG L, ZHONG Y H, et al. Numerical Simulation of Hydrodynamic Lubrication Performance for Continuous Groove-Textured Surface[J]. *Tribology International*, 2022, 167: 107411.
- [18] QIN S Q, PENG Z, SHI X L, et al. Optimization of Textured Parameters to Improve the Tribological Behavior of TC4-Based Bionic Coating Using RSM[J]. *Tribology Transactions*, 2022, 65(3): 441-456.
- [19] 赵立新, 章宝玲, 刘洋, 等. 基于表面织构技术改善摩擦学性能的研究进展[J]. *摩擦学学报*, 2022, 42(1): 202-224.
- ZHAO L X, ZHANG B L, LIU Y, et al. State of the Art for Improving Tribological Performance Based on of Surface Texturing Technology[J]. *Tribology*, 2022, 42(1): 202-224.
- [20] ALLEN Q, RAEYMAEKERS B. Surface Texturing of Prosthetic Hip Implant Bearing Surfaces: A Review[J]. *Journal of Tribology*, 2021, 143(4): 040801.
- [21] 徐帅, 周艳文, 李金龙, 等. 钛合金表面 CrN 涂层高温氧化及力学性能[J]. *辽宁科技大学学报*, 2023, 46(3): 187-195.
- XU S, ZHOU Y W, LI J L, et al. High Temperature Oxidation and Mechanical Properties of CrN Coatings on Titanium Alloy Surface[J]. *Journal of University of Science and Technology Liaoning*, 2023, 46(3): 187-195.
- [22] JIN P L, XIAO D Z, TIAN X B, et al. Synergistically Tailoring the Distribution of Precursor Gas for Uniform Internal DLC Coating of Long Tube[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2023, 466: 129661.
- [23] 王金磊, 朱丽慧. 优化 TiN/MT-TiCN/ Al_2O_3 /TiN 多层涂层摩擦磨损性能的研究[J]. *工具技术*, 2021, 55(12): 13-18.
- WANG J L, ZHU L H. Study on Optimization of Friction and Wear Properties of TiN/MT-TiCN/ Al_2O_3 /TiN Multi-layer Coating[J]. *Tool Engineering*, 2021, 55(12): 13-18.
- [24] 洪如辰, 任瑛, 李龙飞, 等. 人工关节材料摩擦性能研究进展[J]. *功能材料与器件学报*, 2021, 27(1): 46-53.
- HONG R C, REN Y, LI L F, et al. Research Progress on Tribological Properties of Artificial Joint Materials[J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2021, 27(1): 46-53.
- [25] 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 Q F, LIU G, DONG G N, 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.
- [26] 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 D C. Tribological Properties of Diamond Films and Diamond-Like Carbon Films and Their Application[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [27] 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 Y, DONG M, LI M, et al. Investigation on the Nano-Friction Properties of Diamond-Like Carbon Films[J]. Tribology, 2015, 32(2): 242-248.
- [28] MADEJ M, OZIMINA D, PIWONSKI I, et al. The Properties of Diamond-Like Carbon Coatings Used for Artificial Joints[J]. Metallic Materials, 2021, 50(4): 277-284.
- [29] 汪科良, 周晖, 张凯锋, 等. 掺杂类金刚石薄膜微观结构和摩擦学性能的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(2): 148-159.
WANG K L, ZHOU H, ZHANG K F, et al. Research Progress on Microstructure and Tribological Properties of Doped Diamond-Like Carbon Films[J]. Surface Technology, 2021, 50(2): 148-159.
- [30] TAEGER G, PODLESKA L E, SCHMIDT B, et al. Comparison of Diamond-Like-Carbon and Alumina-Oxide Articulating with Polyethylene in Total Hip Arthroplasty[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2003, 34(12): 1094-1100.
- [31] MURUGAN V S, MADHU S. Analysis of Mechanical and Tribological Properties of Silicon Incorporated Diamond Like Carbon Nanocomposite Coating[J]. Silicon, 2022, 14(11): 6053-6061.
- [32] 雍青松, 王海斗, 徐滨士, 等. 类金刚石薄膜摩擦机理及其摩擦学性能影响因素的研究现状[J]. 机械工程学报, 2016, 52(11): 95-107.
YONG Q S, WANG H D, XU B S, et al. Research Status of the Tribological Property of Diamond-Like Carbon Films[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(11): 95-107.
- [33] 孙建芳, 唐邕涛, 苏峰华, 等. 钛合金表面 DLC 薄膜的制备及其与不同材料配副的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2021, 41(6): 953-963.
SUN J F, TANG Y T, SU F H, et al. Synthesis of DLC Film on Titanium Alloy and Its Tribological Property Sliding Against Different Mating Materials[J]. Tribology, 2021, 41(6): 953-963.
- [34] CASADEI F, TULUI M. Combining Thermal Spraying and PVD Technologies: A New Approach of Duplex Surface Engineering for Ti Alloys[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 237: 415-420.
- [35] 王宇迪, 王鹤峰, 杨尚余, 等. 纳米压痕技术及其在薄膜/涂层体系中的应用[J]. 表面技术, 2022, 51(6): 138-159.
WANG Y D, WANG H F, YANG S Y, et al. Nanoindentation Technique and Its Application in Film/Coating System[J]. Surface Technology, 2022, 51(6): 138-159.
- [36] DAI W, KE P L, 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.
- [37] LI X M, DENG J X, LIU L L, et al. Tribological Properties of WS₂ Coatings Deposited on Textured Surfaces by Electrohydrodynamic Atomization[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 352: 128-143.
- [38] 祁鹏浩, 仝哲, 刘奇, 等. 表面织构化 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 P H, TONG Z, LIU Q, et al. Tribological Properties of DLC Coated Textured Surfaces under Grease Lubrication[J]. Surface Technology, 2021, 50(1): 296-304.
- [39] 邓建新, 孟莹, 张志慧, 等. 织构化表面涂层的研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(7): 22-35.
DENG J X, MENG Y, ZHANG Z H, et al. Research Progress of Textured Surface Coatings[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(7): 22-35.
- [40] BOLELLI G, LUSVARGHI L, MONTECCHI M, et al. HVOF-Sprayed WC-Co as Hard Interlayer for DLC Films[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 203(5/6/7): 699-703.
- [41] BUSHAN B. Handbook of Micro/Nano Tribology[M]. 2nd Edition. Boca Raton: CRC Press, 2020.