

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.6076

类金刚石薄膜的摩擦学性能研究进展

游雨乐¹,赵清华²,李 博¹,包宏伟¹,马 飞¹

(1. 西安交通大学 金属材料强度全国重点实验室,陕西 西安 710049 2. 西北工业大学 凝固技术全国重点实验室,陕西 西安 710072)

摘 要:类金刚石(DLC)薄膜凭借高硬度、高弹性模量、低摩擦系数、优异耐磨性等特点,在航空航天、汽车工业等领域展现出广阔的应用前景,是实现工程超滑的理想材料。然而,热稳定性差、膜基结合强度不足等问题严重制约了其产业化应用。本文介绍了 DLC 薄膜的结构特征及其典型制备方法,深入剖析了元素掺杂改性、多层结构设计等策略对 DLC 薄膜结构与摩擦学性能的调控机制,并阐述了分子动力学等理论模拟方法,从原子尺度揭示了实验改性策略的微观调控机制及 DLC 薄膜的超润滑机制。最后,分析了当前 DLC 薄膜摩擦学研究面临的挑战,并对未来研究方向进行了展望。

关键词:类金刚石薄膜;摩擦学性能;元素掺杂;多层结构;理论模拟

中图分类号: TH145; TG356.16

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)08-0843-12

Research Progress on the Tribological Properties of Diamond-like Carbon Films

YOU Yule¹, ZHAO Qinghua², LI Bo¹, BAO Hongwei¹, MA Fei¹

(1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Diamond-like carbon (DLC) films, known for their outstanding hardness, high elastic modulus, low friction coefficient, and excellent wear resistance, are ideal solid lubricants for achieving engineering superlubricity in aerospace and automotive applications. However, their poor thermal stability and insufficient adhesion strength between the film and the substrate severely hinder their widespread industrial application. Herein, the structural characteristics and typical deposition methods of DLC films are reviewed, and an in-depth analysis of how elemental doping and multilayer structure design modulate the film structure and tribological performance is provided. Moreover, it elucidates how theoretical simulation methods such as molecular dynamics reveal the microscopic regulatory mechanisms of these experimental modification strategies as well as the superlubricity mechanisms of DLC films at the atomic scale. Finally, the current challenges in DLC tribology research and future research directions are discussed.

Key words: diamond-like carbon films; tribological properties; element doping; multilayer structure; theoretical simulation

近年来,随着航空航天、汽车工业、高端制造等领域的飞速发展,越来越多的机械设备零部件面临真空、高温、重载荷等极端工况^[1-2]。以气门挺柱、活塞等车辆发动机的关键零部件为例,其不仅需在高温工况下运转,还需经历频繁启动/停止操作所带来的升温/降温过程。因此,要求其表面润滑材料不仅具备重载荷、宽温域范围内的连续工程超滑能力,

还应具有高硬度(抗磨损)和强韧性(抗疲劳)等特性^[3-4]。然而,传统润滑油/脂在 350 °C 以上会出现挥发、氧化分解甚至燃烧等不良现象^[5-6],难以满足高温工况下的润滑需求。为此,开发固体润滑材料是解决高温工况下机械零部件表面摩擦磨损的重要途径^[7]。

类金刚石碳(diamond-like carbon, DLC)薄膜是由 sp^2 和 sp^3 杂化碳原子构成的无序网络相互连接

收稿日期: 2026-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(52502750, 52271136);凝固技术全国重点实验室开放课题(SKLS202316, SKLS202313)

作者简介: 游雨乐,2003 年生,硕士生。研究方向为类金刚石薄膜摩擦学性能模拟。Email: 3125102099@stu.xjtu.edu.cn

通信作者: 包宏伟,1988 年生,博士,副教授。研究方向为先进薄膜材料特性多尺度模拟。Email: baohw2019@xjtu.edu.cn

引用格式: 游雨乐,赵清华,李博,包宏伟,马飞. 类金刚石薄膜的摩擦学性能研究进展[J]. 铸造技术,2026,47(8): 843-854.

YOU Y L, ZHAO Q H, LI B, BAO H W, MA F. Research progress on the tribological properties of diamond-like carbon films[J].

Foundry Technology, 2026, 47(8): 843-854.

而成的亚稳态非晶碳材料^[8-9],这种独特的结构赋予其高硬度、高弹性模量以及优异的耐磨性。此外,研究人员发现含氢非晶碳基薄膜(H-DLC)在摩擦过程中通过氢钝化^[10]、界面有序石墨化^[11]、转移膜^[12]等机制实现超滑(图 1a)。然而,DLC 薄膜在高温重载条件下易发生氧化^[13]、过度石墨化^[14]、脱氢^[15]等现象(图 1b),导致其力学性能恶化、润滑失效^[16-17]。此外,沉积过程中高能离子轰击效应以及薄膜与基材之间热膨胀系数、晶体结构的差异均会在薄膜内部产生较大的应力^[18-19],导致膜基结合强度不足,使薄膜在服役过程中出现脆断甚至脱落现象。目前国内外研究人员主要通过元素掺杂^[20-21]、多层结构设计^[22-23]等策略,来降低 DLC 薄膜的残余内应力,并提升其力学性能及摩擦学性能。尽管宏观实验在揭示 DLC 薄膜摩擦学行为方面取得了重要进展,但受限于分析

测试技术的固有局限性,研究人员难以实现对 DLC 薄膜摩擦界面微观组织演变原位观测,且对氢钝化、界面石墨化等润滑机制的主次关系及耦合机制的认识尚不清晰^[24-25]。而第一性原理计算、分子动力学模拟等理论研究手段能从原子尺度动态追踪薄膜内原子扩散迁移行为以及摩擦界面的结构演化,从而揭示 DLC 薄膜在宽温域重载条件下耐磨性与超滑性的作用机理^[26]。

本文以 DLC 薄膜为研究对象,介绍其结构特点以及典型制备方法,并围绕元素掺杂改性、多层结构设计等策略对薄膜结构及摩擦学性能的影响展开详细讨论,在此基础上,深入分析理论计算在揭示超滑机制以及元素掺杂、多层结构设计的微观调控机理方面的研究进展。最后,展望了 DLC 薄膜摩擦学研究的未来发展趋势。

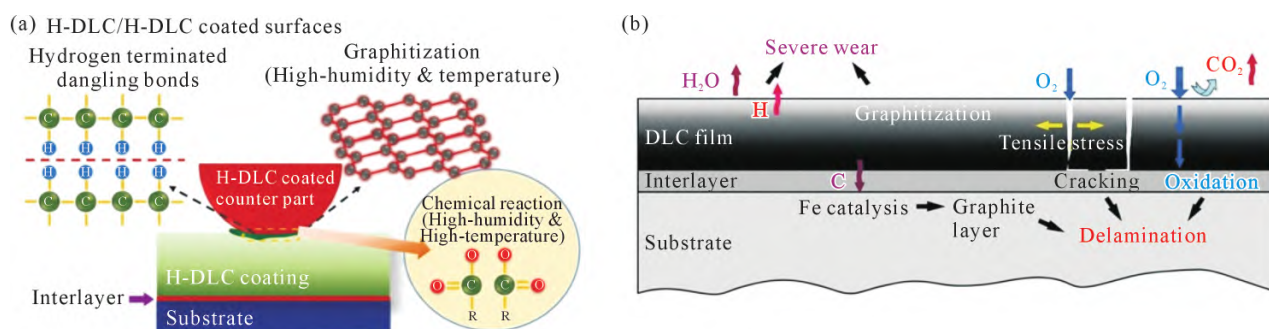


图 1 H-DLC 超滑机制及 DLC 薄膜高温润滑失效机理示意图:(a) H-DLC 超滑机制示意图;(b) DLC 薄膜高温润滑失效机理示意图^[11,14]

Fig.1 Schematic diagram of the superlubricity mechanism of H-DLC and the high-temperature lubrication failure mechanism of DLC films: (a) schematic diagram of the superlubricity mechanism of H-DLC; (b) schematic diagram of the high-temperature lubrication failure mechanism of DLC films^[11,14]

1 DLC 薄膜微观结构及典型制备方法

1.1 DLC 薄膜的微观结构特征

DLC 薄膜是一种亚稳态非晶碳基薄膜,其结构主要由短程有序的 sp^2 和 sp^3 杂化碳原子相互连接形成的三维无定形网络所组成,其中可能含有一定量的氢元素及其他掺杂元素。Jacob 等^[27]根据 DLC 中 sp^2 -C、 sp^3 -C 与氢元素含量的比例绘制了三元相图,用于划分 DLC 的主要结构类别,如图 2 所示,DLC 通常可分为非晶碳(a-C)、含氢非晶碳(a-C:H)、四面体非晶碳(ta-C)、四面体含氢非晶碳(ta-C:H)以及金属掺杂非晶碳(Me-DLC,Me 代表金属元素如 Ti、Mo 等)等类型^[28]。目前,DLC 薄膜的制备方法以物理气相沉积和化学气相沉积为主,本文简要介绍几种典型制备方法。

1.2 磁控溅射沉积

磁控溅射技术利用 Ar^+ 轰击固体靶材表面形成溅射原子/粒子流,并在外加偏压下使其沉积在基体

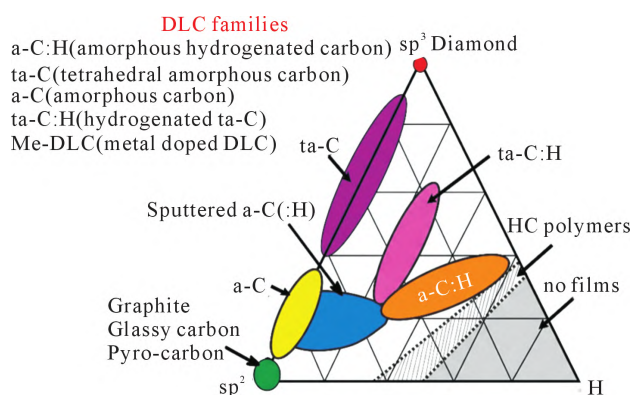


图 2 DLC 薄膜的三元相图^[27]

Fig.2 Ternary phase diagram of DLC films^[27]

表面形成薄膜。该技术通过施加磁场对电子进行约束以延长其运动路径,提高氩气离子化率,从而实现固体靶材的高效溅射与高效成膜^[29]。磁控溅射法因沉积效率高、薄膜均匀致密等优点被广泛应用于 DLC 薄膜制备中^[30]。

Ru 等^[31]采用射频磁控溅射技术制备了 F-DLC

薄膜,研究发现,F掺杂会破坏薄膜中的C-C网状结构,诱导薄膜中 sp^3 -C转变为 sp^2 -C,并在摩擦过程中取代悬空 σ 键,从而有效降低了DLC薄膜的摩擦系数。Guo等^[32]采用高功率脉冲磁控溅射和中频磁控溅射相结合的复合沉积技术制备了Si-DLC薄膜,结果表明,掺入的Si与碳原子结合形成Si-C键,使薄膜中 sp^3 -C杂化键比例提高,从而提高了薄膜的硬度与弹性模量。

1.3 脉冲激光沉积

脉冲激光沉积技术(pulsed laser deposition, PLD)利用脉冲激光束烧蚀石墨靶材,使其表面碳原子蒸发形成碳等离子体,碳等离子体在真空中发生绝热膨胀后向基体发射高能粒子,待粒子冷却后在基体表面成膜。PLD技术的优势在于能将靶材化学计量比有效转移至基体,且装置简单、工艺灵活、沉积速率快,但存在能耗高、易产生飞溅、薄膜生长不均等不足^[33-34]。

Lu等^[35]利用PLD技术在Cu基底上制备了多层DLC薄膜,该研究首先通过沉积Ti、SiC层以增强上层功能层与Cu基底间的结合强度,继而沉积了周期性交替的DLC/SiC层,不仅避免了厚层DLC薄膜中内应力的积累,而且减小了软Cu基底和硬质DLC层之间的硬度差异。Salah等^[36]采用PLD技术在不同基底温度下制备了DLC薄膜,研究发现,随着基底温度升高,薄膜的石墨化程度与表面粗糙度提高,导致其摩擦系数与磨损率增大。

1.4 等离子体增强化学气相沉积

与传统化学气相沉积法不同,等离子体增强化学气相沉积法(plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD)利用等离子体活化反应物气体分子,进而在基体表面反应成膜。该方法能在较低的温度下实现均匀致密薄膜的高效制备^[37]。

Li等^[38]利用PECVD技术制备了具有不同调制比的 Si_x -DLC/ Si_y -DLC薄膜,研究发现调制比为2:1,即低硅 Si_x -DLC层占比高时,薄膜与基体的结合强度最优。Jeng等^[39]采用PECVD技术以不同氢碳比的等离子体作为前驱气体,在Si基底上制备了H-DLC涂层,结果表明前驱气体中氢碳比越低,H-DLC涂层的硬度、弹性模量以及断裂韧性越高,且摩擦系数和磨损量越小。

2 DLC薄膜摩擦学性能的调控策略

DLC薄膜虽然具有高硬度、高弹性模量、低摩擦系数等优异特性,但其热稳定性差、膜基结合强度不足等问题严重制约了其产业化应用。为此,研究人员通过元素掺杂改性、多层结构设计等策略,以降低薄膜残余内应力、增强膜基结合力,从而改善DLC薄膜的力学性能以及摩擦学性能。

2.1 元素掺杂改性

如图3所示,根据掺杂元素与碳相互作用的强弱,国内外研究人员提出强碳作用金属元素(Ti、W、Cr、Nb等)、弱碳作用金属元素(Al、Cu、Ni、Ag、Au等)以及非金属元素掺杂(Si、N、B等)等策略^[40]。

2.1.1 强碳作用金属元素掺杂

强碳作用金属元素掺杂能形成热力学稳定的硬质碳化物纳米晶,弥散分布于非晶碳基体中,既能提高薄膜的硬度与弹性模量^[41-43],还能使DLC薄膜结构中键长与键角的畸变得以弛豫,从而有效降低薄膜中的残余内应力、增强膜基结合强度^[44]。

Zhou等^[45]采用离子束增强非平衡磁控溅射法在304不锈钢衬底上制备了不同钛掺杂量的类金刚石薄膜。如图4a所示,当Ti掺杂量为1.82%(质量分数)时,Ti主要以硬质TiC纳米晶形式存在,此时薄膜内应力最小(图4b),且临界载荷达到最大的35.8 N

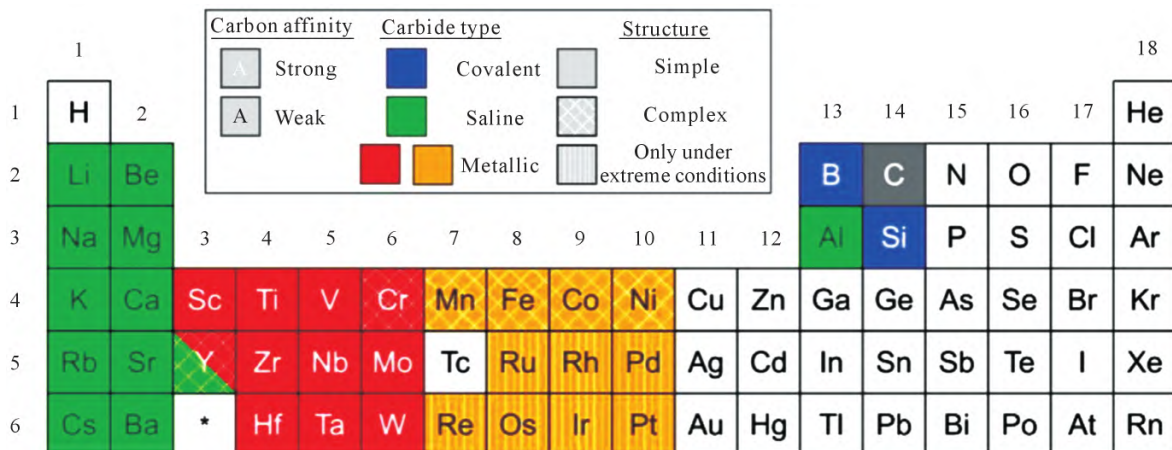


图3 元素周期表中碳化物形成能力的规律示意图^[40]

Fig.3 Schematic diagram of the carbide forming ability trend in the periodic table^[40]

(图 4c), 这可能是由于微量钛掺杂使薄膜结构的键角和键长畸变得以松弛, 从而降低薄膜内应力并增强薄膜的附着力。然而, 实验表征手段难以直接验证这一推测。

Wang 等^[46]采用直流阴极真空弧技术制备了不同 Cr 掺杂量的 DLC 薄膜。如图 5a 所示, 当 Cr 掺杂量达到 16.5%(原子分数) 时, 非晶碳基体中形成了 CrC 碳化物和 Cr 纳米晶团簇。纳米压痕表面形貌显示, 纯 DLC 薄膜在压痕周围产生明显的环形裂纹(图 5b), 而 Cr-DLC 薄膜表面未出现裂纹(图 5c), 表明薄膜在加载过程中出现塑性变形。由此可见, Cr 掺杂可有效抑制 DLC 薄膜开裂, 并显著提高薄膜韧性。但实验观测仅限于薄膜表面形貌, 无法揭示其微观机制。

2.1.2 弱碳作用金属元素掺杂

与强碳作用金属原子在非晶碳基体中形成热力学稳定的碳化物不同, 弱碳作用金属原子以非晶或纳米晶金属团簇形式嵌入非晶碳基体中, 通过纳米晶-非晶的界面强化作用来降低薄膜中的残余应力, 进而增强膜基结合强度^[47]。Dai 等^[48]探究了不同 Cu 掺杂浓度下 Cu-DLC 薄膜的微观结构, 当 Cu 原

子比低于 1.93% 时, Cu 以非晶态形式嵌入非晶碳基体中, 使薄膜结构中键角与键长的畸变得以弛豫, 从而降低 DLC 薄膜的残余内应力。当 Cu 原子比超过 1.93% 后, 薄膜中形成了 Cu 纳米晶团簇, 通过微晶滑动来降低薄膜残余应力。

Au、Cu 等弱碳作用金属元素具有良好的延展性, 在摩擦力的作用下从薄膜基体中向摩擦界面扩散聚集, 并在摩擦副表面形成具有良好自润滑特性的富金属转移膜, 从而降低薄膜的摩擦系数与磨损率。Pei 等^[49]通过磁控溅射法制备了 Au/DLC 复合薄膜, 在摩擦力与摩擦热效应的诱导作用下, Au 纳米晶从碳基体中向摩擦界面迁移, 并在对偶钢球表面形成富 Au 转移膜, 将强相互作用的 C-C 摩擦界面转变为弱活性的 Au/C 界面, 该薄膜在真空中摩擦系数低于 0.03、耐磨寿命超过 6.0×10^5 次循环。Kang 等^[50]在 Cu/a-C:H 薄膜中观察到了类似的扩散迁移行为, 如图 6 所示, 均匀分散在碳基体中的 Cu 原子聚集形成大尺寸晶态 Cu 团簇, 并在基体内形成连接至摩擦界面的迁移通道, 基体内 Cu 原子可持续向摩擦界面扩散, 并在对偶材料表面形成富 Cu 转移膜, 显著提升了薄膜的耐磨寿命。

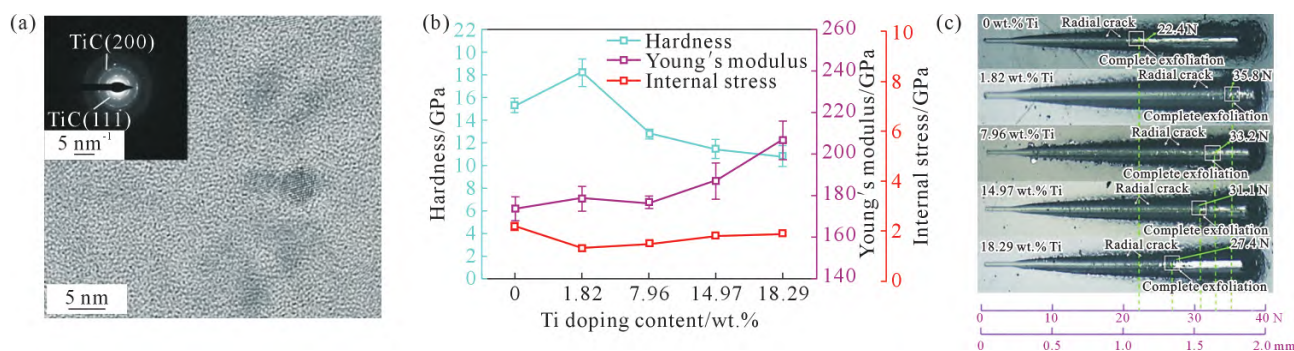


图 4 Ti-DLC 薄膜的 TEM 微观形貌及不同 Ti 掺杂量下的力学性能与附着力: (a) Ti 掺杂量为 1.82% 的 Ti-DLC 薄膜的 TEM 图; (b) 不同 Ti 掺杂量下 Ti-DLC 薄膜的硬度、杨氏模量及残余内应力; (c) 不同 Ti 掺杂量下 Ti-DLC 薄膜的附着力^[45]

Fig.4 TEM micrographs of Ti-DLC films and their mechanical properties and adhesion at various Ti doping levels: (a) TEM image of the Ti-DLC film with a Ti doping content of 1.82 wt.%; (b) hardness, Young's modulus, and residual internal stress of Ti-DLC films with different Ti doping contents; (c) adhesion of Ti-DLC films with different Ti doping contents^[45]

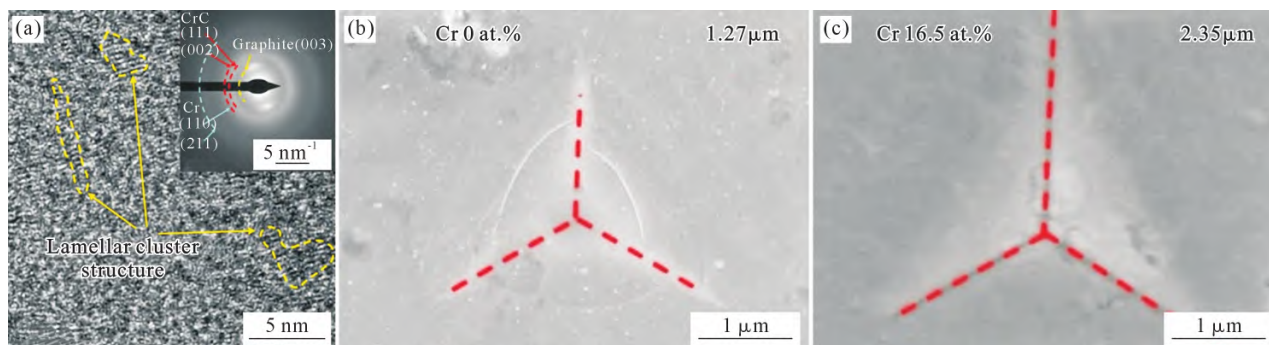


图 5 Cr-DLC 薄膜的微观结构与纳米压痕表面形貌: (a) Cr 含量为 16.5% 的 Cr-DLC 薄膜的 HRTEM 图像及 SAED 图案; (b, c) 0% 及 16.5% Cr 掺杂量 DLC 薄膜的纳米压痕表面形貌^[46]

Fig.5 Microstructure and nanoindentation surface morphologies of Cr-DLC films: (a) HRTEM image and SAED pattern of the Cr-DLC film with a concentration of 16.5 at.%, (b, c) nanoindentation surface morphologies of DLC films with 0 at.% and 16.5 at.% Cr-doped concentrations^[46]

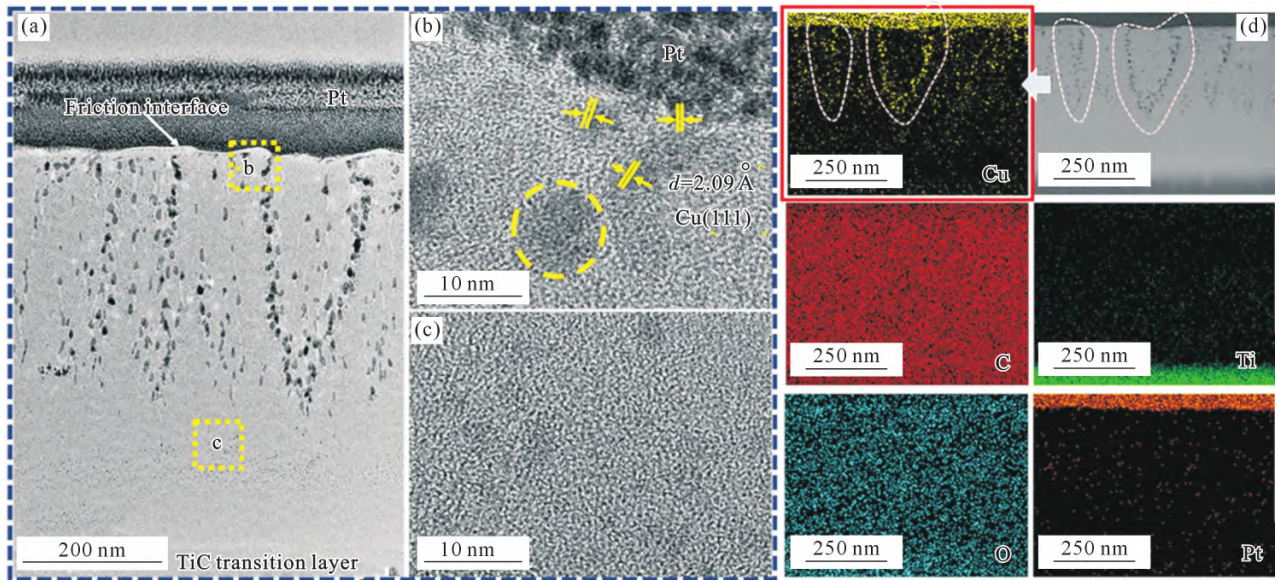


图6 Cu/a-C:H 薄膜磨损截面的 HRTEM 形貌及 EDS 元素分布:(a) 稳定摩擦阶段磨损截面的 HRTEM 形貌;(b, c) 分别为图(a) 中 b 区和 c 区的高分辨图像;(d) 磨损截面的 EDS 元素分布图^[50]

Fig.6 HRTEM morphology and EDS mapping of the wear track of the Cu/a-C:H films: (a) cross-sectional HRTEM morphology of the wear track in the stable friction stage; (b, c) HRTEM images of boxes b and c in (a); (d) EDS mapping of the wear track^[50]

2.1.3 非金属元素掺杂

非金属元素掺杂通过取代含氢非晶碳中的部分 C 原子或 H 原子,调控薄膜中 sp^2/sp^3 杂化键的比例及氢含量,促使非晶碳网络结构重整,进而提高的薄膜热稳定性及摩擦学性能。

Si 掺杂后与 C 原子形成 Si-C sp^3 杂化键,构筑了结构致密的 C-Si-C 三维骨架,从而提高 DLC 薄膜的硬度与弹性模量。此外,由于 Si-C 键的键能(3.21 eV)低于 C-C 键的键能(3.70 eV),Si 掺杂可有效松弛 C-C 键畸变,从而降低薄膜残余应力并增强膜基结合强度^[51]。Chen 等^[52]研究发现 Si 掺杂后 DLC 薄膜的残余内应力从 2.83 GPa 降低至 2.20 GPa,膜基结合力从 19.5 N 提升至 25.2 N。同时, Si-C 键具有良好的热稳定性,可有效抑制高温下薄膜的石墨化转变,并诱导摩擦界面生成含 SiO_x 的稳定润滑层,使其在高温下表现出优异的摩擦学性能。Jiang 等^[53]研究发现 Si-DLC 薄膜磨痕中氧含量(15.36%, 原子分数,下同)与磨屑中氧含量(16.54%)相近,表明在摩擦界面形成了高温自润滑 SiO_x 保护层,使薄膜在 300 °C 下的摩擦系数低至 0.025。

B 掺杂在碳基体中形成碳化硼化合物,通过固溶强化改善薄膜力学性能,同时促进薄膜石墨化转变并生成 H_3BO_3 润滑相,从而提升薄膜的摩擦学性能。此外, B 原子的共价半径(~84 pm)与 C 原子(~77 pm)相近,减少了掺杂引起的晶格畸变。Nakazawa 等^[54]采用脉冲激光沉积法制备了 B-DLC 薄膜,划痕测试结果表明, B-DLC 薄膜的临界载荷远高于纯 DLC 薄膜,表明 B 掺杂降低了薄膜内应力,从而增强了

薄膜与基体之间的附着力。Ma 等^[55]研究油酸润滑下 B 掺杂对 DLC 薄膜摩擦学性能的影响,发现 B-DLC 薄膜的摩擦系数随温度升高持续下降,在 100 °C 时低至 0.036,其归因于 B 掺杂促进了摩擦诱导的石墨化转变及 H_3BO_3 润滑相的生成。

2.1.4 多元素共掺杂

强碳作用金属元素掺杂在非晶碳基体中形成硬质碳化物,虽有助于提高薄膜的硬度,但过量掺杂形成的大量碳化物可能作为磨粒加剧磨损。而弱碳作用金属元素掺杂虽能形成具有自润滑特性的低剪切强度转移膜,但会导致薄膜硬度下降,加剧磨损。因此,单一元素掺杂难以实现 DLC 薄膜力学性能、摩擦学性能的综合提升。

Wang 等^[56]采用中频双磁控溅射法制备了 Ti(强碳金属)和 Ag(弱碳金属)共掺杂 TiC(Ag)/a-C:H 纳米复合涂层。Ti 掺杂在碳基体中形成硬质 TiC 纳米晶,弥补了因软质 Ag 相掺入而导致的硬度下降。Ag 则以纳米晶的形式分布于碳基体中,有效降低薄膜中残余应力,从而提高膜基结合强度。在摩擦过程中, Ag 向摩擦界面扩散并形成低剪切强度的富 Ag 转移膜,使复合涂层的摩擦系数低至 0.005。

Zou 等^[57]采用高功率脉冲磁控溅射法(high power impulse magnetron sputtering, HiPIMS)制备了 Ti/Si 共掺杂 DLC 薄膜。研究发现, Si 掺杂可有效抑制 DLC 薄膜在高温下的石墨化转变,进而阻碍薄膜在高温摩擦过程中的黏着磨损,显著提升薄膜的高温耐磨性,使薄膜在 450 °C 时摩擦系数低至 0.08,磨损率仅为 $1.40 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,较 Ti-DLC 薄膜的

$5.24 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 降低了一个数量级以上。

2.2 多层结构设计

合理的成分梯度与多层结构的构筑可以减小薄膜与基底之间因热膨胀系数、晶体结构以及化学成分差异等产生的内应力,从而提高膜基结合强度。此外,多层结构可使裂纹在界面处发生偏转,抑制其进一步扩展,进而提高薄膜的断裂韧性。

Sui 等^[58]采用磁控溅射技术制备了 DLC/CrN 多层复合涂层(图 7)。与单一 DLC、CrN 涂层相比,多层涂层具有更高的弹性恢复值,磨损率降低了约一个数量级,且在压痕形貌中未见明显的径向裂纹与剥落,展现出优异的断裂韧性。此外,多层涂层的摩擦系数比单一 CrN 涂层降低了大约 7 倍。Zhao 等^[59]采用非平衡磁控溅射技术制备了不同调制周期的 DLC/CrN 多层复合薄膜,与单层 DLC 薄膜相比,多层 DLC/CrN 薄膜的残余应力降低了 1/2 以上,断裂韧性与耐磨性显著提高。

2.3 元素掺杂/多层结构设计

元素掺杂/多层结构设计可通过调控薄膜微观结构及界面结合状态来改善 DLC 薄膜与基体的结合强度,一方面元素掺杂可有效松弛晶格畸变,降低薄膜残余内应力;另一方面,引入中间过渡层可缓解薄膜与基底之间因热膨胀系数差异等因素产生的内应力,从而增强界面结合强度。

Luo 等^[60]采用 PVD 法在软质 AISI 1045 钢上制备了不同 CrN 过渡层厚度的 CrN/W-DLC/DLC 多层涂层。随着 CrN 层数从 1 层增加到 3 层时,涂层的膜基结合强度由 10.3 N 提升至 13.9 N,同时涂层趋于石墨化,平均摩擦系数由 0.143 降至 0.097。Cao 等^[61]采用过滤阴极真空弧法在 Al 合金上沉积了由 Ti 层与 Ti-DLC 层交替构成的多层薄膜,研究发现, Ti 层与 Ti-DLC 层之间通过原子键实现紧密结合,而 Al 基体与 Ti 过渡层之间则形成了成分混合区,该混合区可有效降低界面自由能,缓解薄膜与基体

间的物理失配,进而改善界面结合性能。

3 DLC 薄膜摩擦学机制的理论计算研究

宏观实验难以从原子尺度直接观测 DLC 薄膜在摩擦过程中的微观结构演变与磨损变形行为,而第一性原理计算、分子动力学模拟等理论方法可动态追踪摩擦界面的结构演化、化学键断裂与重构等过程,为阐明氢钝化、界面有序石墨化及转移膜形成等超滑机制以及元素掺杂的强韧化机理和多层结构的界面增韧效应提供了关键理论支撑。

3.1 氢钝化超滑机制的原子尺度模拟

为从原子尺度揭示氢原子对含氢非晶碳基薄膜实现超滑性能的关键作用,Liu 等^[62]采用反应力场分子动力学(reactive force field molecular dynamics, ReaxFF MD)模拟方法,构建了不同氢含量的 H-DLC 薄膜摩擦模型,如图 8a 所示,薄膜在真空中摩擦模拟过程分为了松弛、加载、滑动 3 个阶段,直观呈现了薄膜在滑动过程中表面及内部的微观结构演变与磨损变形行为。模拟结果如图 8b 所示,在滑动过程中, H-DLC 薄膜内部的氢原子逐渐向摩擦界面扩散并聚集形成富氢团簇,并与摩擦界面碳原子结合成键,从而有效钝化了 C-C 悬挂键,显著减少了摩擦滑动界面 C-C 键的数量。此外,氢团簇在界面处表现为强静电排斥力,减少了摩擦副间的直接接触,使薄膜摩擦力显著降低。

3.2 界面有序石墨化机制的动态模拟

为从原子尺度揭示摩擦诱导薄膜石墨化的动态过程, Ma 等^[63]采用分子动力学模拟方法,构建了非晶碳薄膜与其自配非晶碳薄膜对磨的摩擦模型,以 C-C 共价键取向角(covalent bonding orientation angle, CBOA)为关键结构参数,系统分析了剪切过程中碳原子的取向及其杂化结构的演化规律。如图 9 所示,在滑动过程中,非晶碳薄膜在摩擦界面处形成

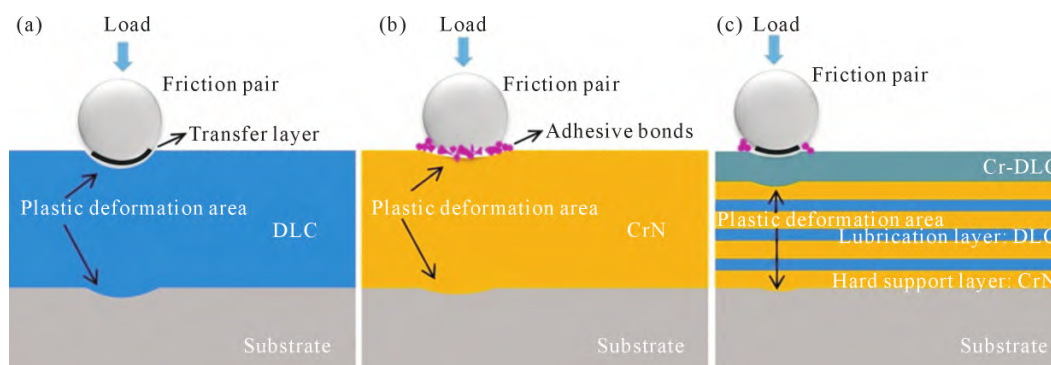


图 7 涂层磨损机理示意图:(a) DLC; (b) CrN; (c) CrN/DLC/Cr-DLC^[58]

Fig.7 Schematic diagrams of the wear mechanism of the coatings: (a) DLC; (b) CrN; (c) CrN/DLC/Cr-DLC^[58]

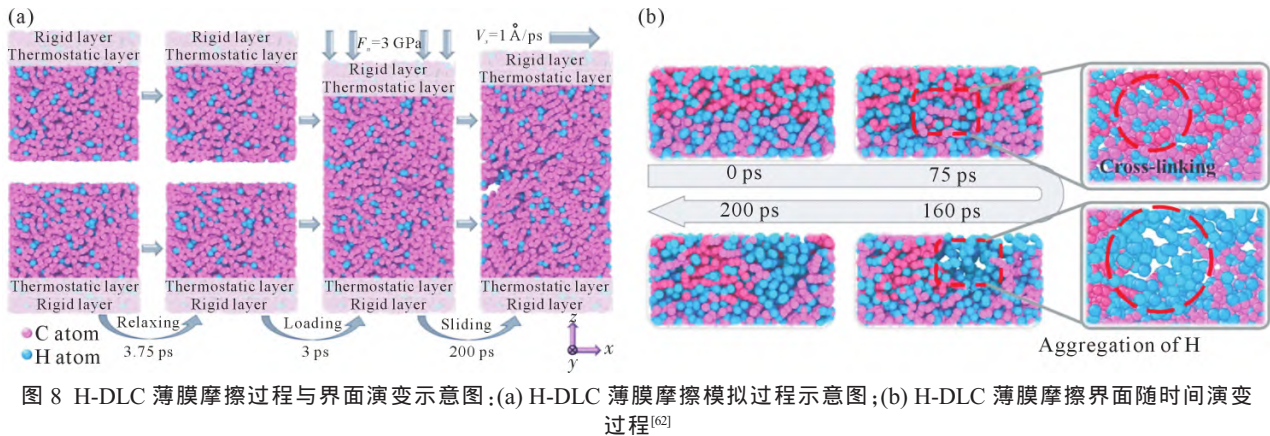


图 8 H-DLC 薄膜摩擦过程与界面演变示意图:(a) H-DLC 薄膜摩擦模拟过程示意图;(b) H-DLC 薄膜摩擦界面随时间演变过程^[62]

Fig.8 Schematic diagrams of the friction process and interfacial evolution of H-DLC films: (a) schematic diagram of the friction simulation process for H-DLC films; (b) evolution of the friction interface of H-DLC films over time^[62]

局域化剪切带,剪切带内碳键 CBOA 值显著下降, sp^2 杂化键比例明显上升,表明 C-C 键逐渐向滑动方向重新取向,并形成类石墨烯的层状有序结构,使薄膜摩擦力接近于零,实现了超低摩擦。该研究表明,界面有序石墨化的本质是剪切局域化驱动的 C-C 键取向有序化和结构有序化转变,并非单纯的 sp^3 -C 向 sp^2 -C 转变。

3.3 转移膜形成与演化机理

为从原子尺度揭示转移膜的形成与演化机制, Wang 等^[64]采用反应力场分子动力学模拟方法,构建了 a-C:H 薄膜与非晶 SiC 对磨的摩擦模型,通过追踪滑动过程中碳原子的迁移轨迹,系统分析了转移膜的形成过程,观察到了两种转移机制:“粘附诱导转移”和“碳氢化合物诱导转移”机制。粘附诱导转移过

程如图 10a 所示, a-C:H 表面的碳氢原子团(C_xH_y)首先与 SiC 对偶表面成键而发生吸附,随后从 a-C:H 基体完全脱附,从而完成向 SiC 对偶表面的转移。碳氢化合物发射诱导转移过程如图 10b 所示, C_xH_y 在粗糙峰碰撞下脱离 a-C:H 表面并以游离态发射至界面间隙,随后在持续滑动摩擦过程中吸附于 SiC 表面,实现了碳原子从 a-C:H 向 SiC 的转移。两种转移机制的本质区别在于脱附与吸附的先后顺序:粘附诱导转移为“先吸附后脱附”,而碳氢化合物发射诱导转移则为“先脱附后吸附”,二者共同促成了 a-C:H 转移膜在对偶材料表面的形成。

3.4 元素掺杂的强韧化机理

Li 等^[65]采用从头算分子动力学模拟,研究了 Ti 掺杂对 DLC 薄膜结构的影响。如图 11a 所示,薄膜

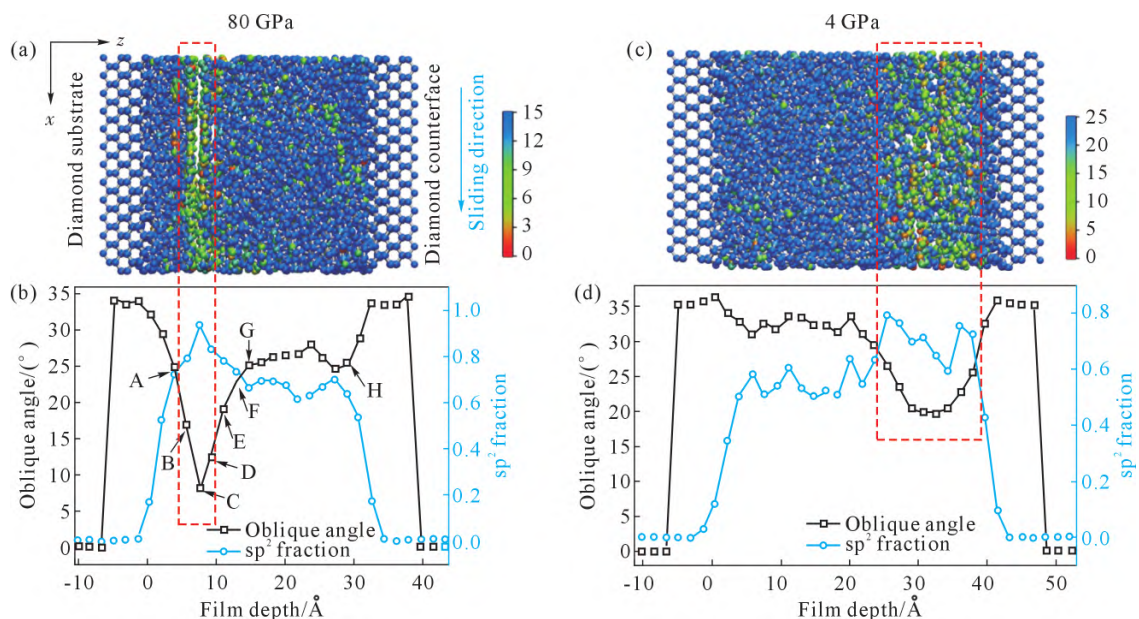
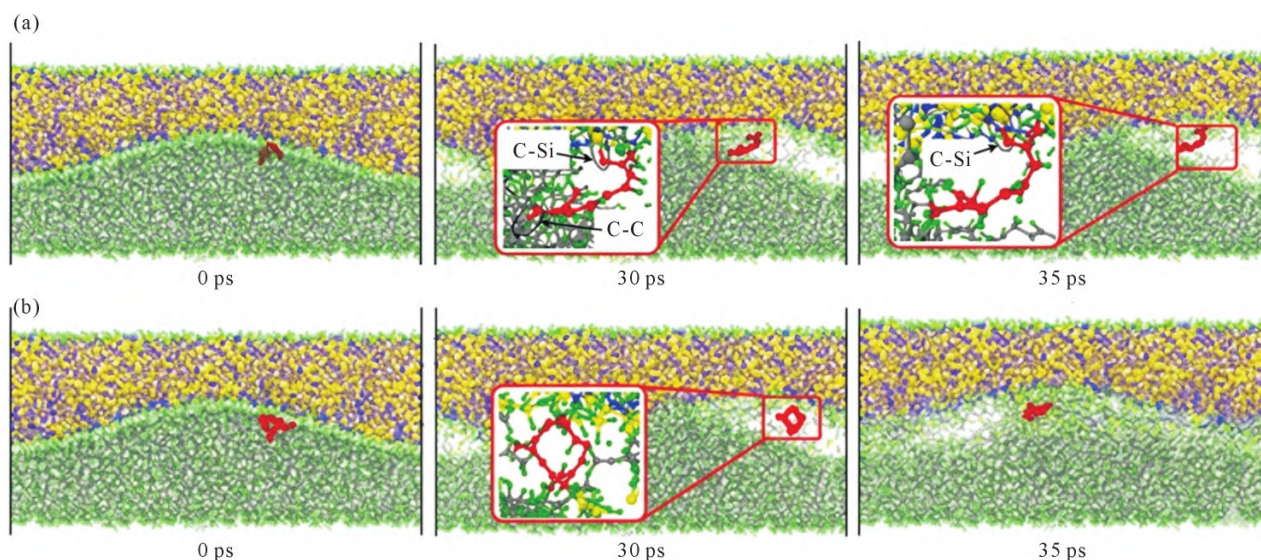
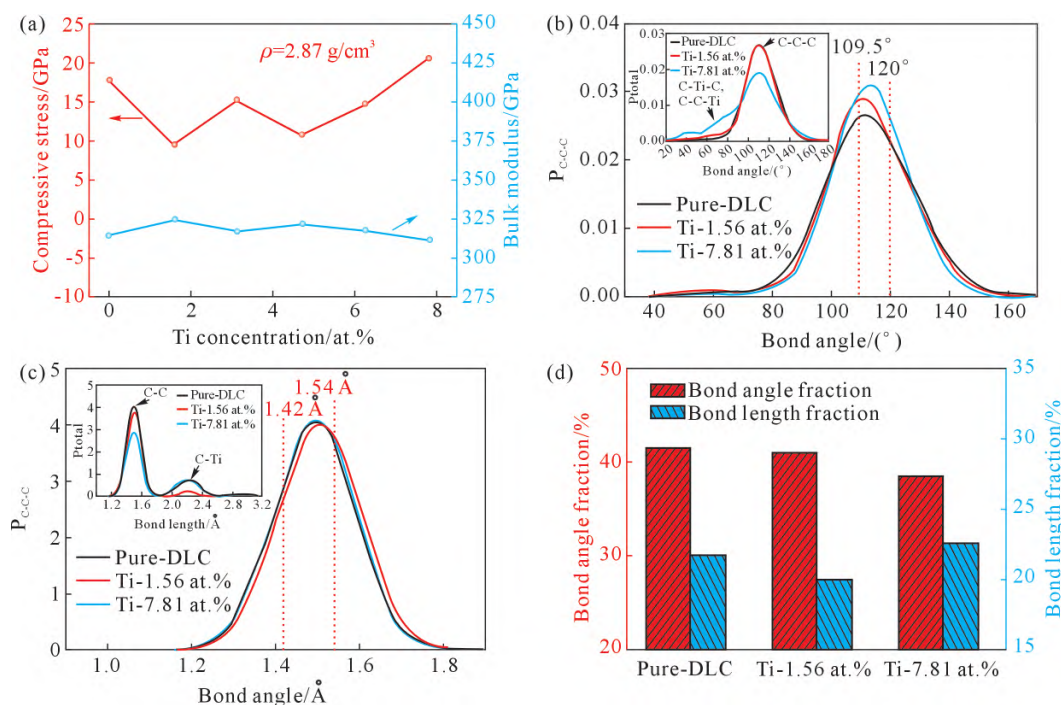


图 9 非晶碳薄膜的剪切局域化与结构转变:(a, c) 80 和 4 GPa 下稳态摩擦阶段的系统快照(原子颜色代表平均 CBOA);(b, d) 分别为(a)和(c)对应的平均 CBOA 与 sp^2 -C 比例深度分布曲线(虚线框标示剪切带位置)^[63]

Fig.9 Shear localization and structural transformation of a-C film: (a, c) system snapshots at steady-state friction stage under 80 and 4 GPa, respectively (atom color represents the averaged CBOA value); (b, d) depth profiles of averaged CBOA value and sp^2 -C fraction corresponding to (a) and (c), respectively (shear band positions are marked by dashed rectangles)^[63]

图 10 a-C:H/SiC 转移膜形成机制:(a) 表面粘附诱导;(b) 碳氢化合物发射诱导^[64]Fig.10 Transfer film formation mechanisms at the a-C:H/SiC interface: (a) surface adhesion induced; (b) hydrocarbon emission induced^[64]图 11 不同 Ti 掺杂量下 Ti-DLC 薄膜的压应力与键结构特征:(a) 不同 Ti 掺杂量下 Ti-DLC 薄膜的压应力;(b) Ti-DLC 薄膜键角分布曲线;(c) Ti-DLC 薄膜键长分布曲线;(d) Ti-DLC 薄膜中的扭曲键角和键长分数^[65]Fig.11 Compressive stress and bond structure characteristics of Ti-DLC films with different Ti doping contents: (a) compressive stress of Ti-DLC films with different Ti doping contents; (b) bond angle distribution curves of Ti-DLC films; (c) bond length distribution curves of Ti-DLC films; (d) fractions of distorted bond angles and bond lengths in Ti-DLC films^[65]

的残余应力随 Ti 掺杂量增加呈先降后升的趋势。原子键结构分析发现,当 Ti 掺杂量从 0 增至 1.56% (原子分数,下同)时,薄膜中高度扭曲的 C-C 键角(<109.5°)与 C-C 键长(<1.42 Å)比例同时降低,表明微量 Ti 掺杂通过松弛碳网络的几何畸变降低了残余应力;当 Ti 掺杂量升至 7.81%时,扭曲的 C-C 键长比例明显增加,且出现大量畸变的 C-Ti 结构,两者共同导致薄膜残余应力回升。该模拟从原子尺度揭示了 Ti 掺杂调控 DLC 薄膜残余应力的微观机

制,证实了 Zhou 等^[45]关于微量 Ti 掺杂松弛键角与键长畸变从而降低薄膜内应力的推测。

Wang 等^[46]在纳米压痕实验的基础上构建了不同 Cr 掺杂量的 DLC 模型,采用分子动力学模拟纳米压入过程中薄膜原子结构的演化,以阐明纳米压痕诱导的薄膜塑性变形机制。研究发现,随 Cr 掺杂量的增加,Cr 原子在弛豫过程中团聚形成富 Cr 团簇,其具有较大的自由体积和柔性的 Cr-C、Cr-Cr 键,更易引发大体积剪切转变区并促进键重排,并通

过原子集体的涡旋状运动将相邻的剪切转变区连接成高密度剪切带(图 12),从而增强薄膜的剪切能力,并产生显著的塑性。该研究从原子尺度阐释了纳米压痕实验中 Cr-DLC 薄膜无裂纹产生、韧性增强的现象,揭示了 Cr 团簇在诱导 DLC 从脆性向韧性转变中的关键作用。

3.5 多层结构的界面效应与增韧机理

为揭示多层结构设计对 DLC 薄膜应力调控及摩擦学性能的影响机制,Du 等^[66]采用分子动力学模拟方法,系统地研究了交变能量沉积多层 DLC 薄膜在高接触压力下的摩擦磨损行为。如图 13a 所示,DLC 薄膜由 1 eV 低能沉积形成的软层与 70 eV 高能沉积形成的硬层交替构成。如图 13b 所示,软层与硬层分别呈拉应力与压应力状态,相邻层因应力状态相反得以相互抵消残余应力,并中断长程应力传递路径、抑制大规模应力网络的形成,使 1-70 eV 与 70-1 eV 薄膜的残余应力分别降至 -3.7 GPa 与 0.1 GPa,较单能量沉积降低最高达 99%。在摩擦过程中,以高能硬层终止的薄膜(70 eV 与 1-70 eV)能在滑动界面形成稳定、饱和的非晶碳网络以钝化悬挂键,减少界面共价键交联,使摩擦机制由黏着主导向均匀剪切转变,导致薄膜摩擦系数显著降低(图 13c)。

4 结论与展望

4.1 结论

(1)元素掺杂可通过调控 DLC 薄膜的微观结构,从而增强膜基结合强度以及改善其摩擦学性能。强碳作用金属元素掺杂能形成硬质碳化物纳米晶/非晶的复合结构,提升薄膜的力学性能,改善其耐磨寿命。弱碳作用金属元素以非晶或纳米晶团簇嵌入非晶碳基体网络中,借助界面强化作用来增强膜基结合强度。非金属元素掺杂通过取代部分 C 原子或 H 原子,调控薄膜中杂化碳原子比例,降低薄膜内应力,进而增强膜基结合强度。

(2)设计多层结构薄膜可通过层间界面效应诱导裂纹偏转,阻碍其进一步扩展,从而提高薄膜的断裂韧性。同时借助梯度界面或成分变化逐层分散薄膜残余内应力,以增强膜基结合强度。

(3)理论计算从原子尺度揭示了 DLC 薄膜的多重润滑与强韧化机制。H-DLC 薄膜通过氢原子在界面的富集与成键,有效钝化表面悬挂键并产生静电排斥作用,从而显著降低摩擦力;界面有序石墨化源于剪切局域化驱动的碳键取向有序化与结构有序化转变,在摩擦界面处形成类石墨烯层状结构以实现

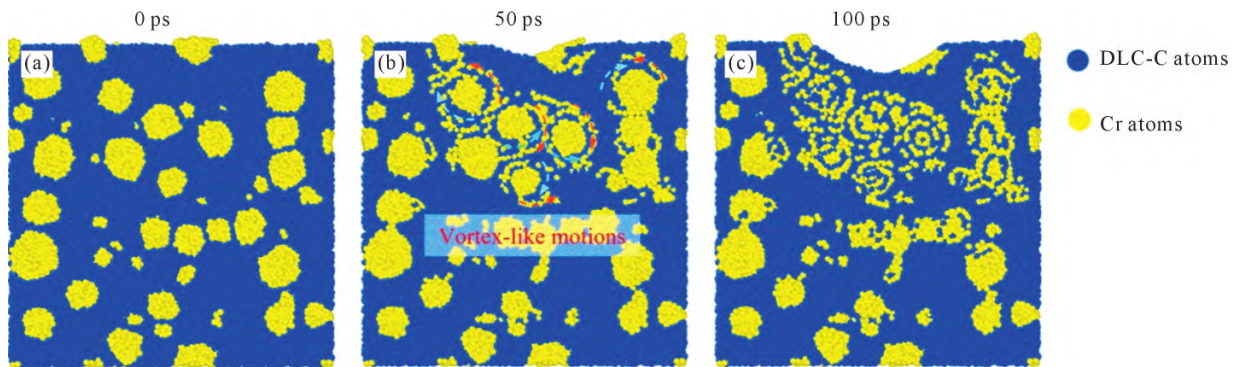


图 12 在加载速度为 0.15 Å/ps 时,不同压入深度下的原子位移快照:(a) 0 Å; (b) 7.5 Å; (c) 15 Å^[46]
Fig.12 Snapshots of the atomic displacement at a loading velocity of 0.15 Å/ps at different indentation depths: (a) 0 Å; (b) 7.5 Å; (c) 15 Å^[46]

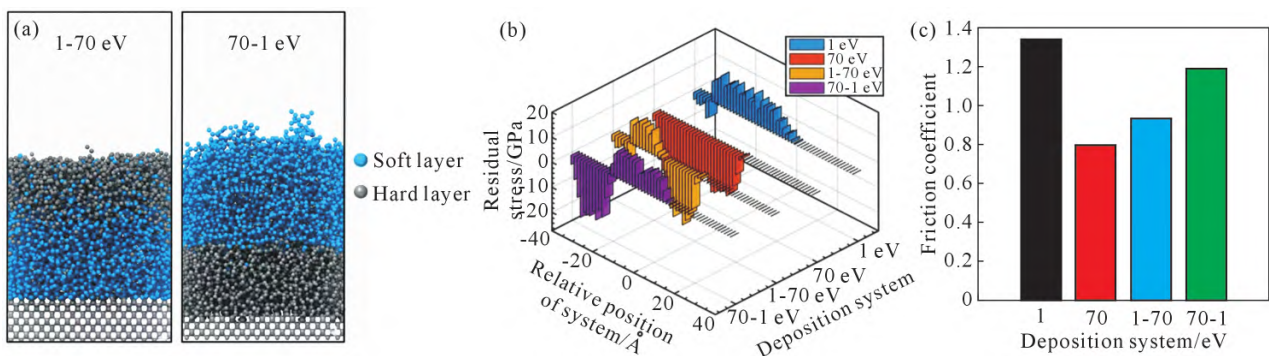


图 13 交变能量沉积 DLC 薄膜:(a) 结构构型;(b) 残余应力沿 z 方向分布;(c) 摩擦系数图^[66]
Fig.13 Alternating-energy-deposited DLC films: (a) structural configuration; (b) residual stress distribution along the z direction; (c) friction coefficient diagram^[66]

超低摩擦;转移膜的形成遵循“表面粘附诱导”与“碳氢化合物发射诱导”两种路径,其本质区别在于碳原子脱附与吸附的先后顺序。元素掺杂模拟阐明了微量 Ti 掺杂通过松弛碳网络几何畸变降低残余应力的机制,以及 Cr 团簇通过促进剪切转变区形成以增强薄膜塑性的增韧机理;多层结构模拟揭示了软硬交替层通过应力补偿大幅降低残余应力、高能硬层在滑动界面形成饱和非晶碳网络以降低摩擦系数的增韧机制。

4.2 展望

目前,DLC 薄膜的摩擦学研究尚未建立起完备的理论模型来剖析超滑机制间的主次关系及耦合作用,同时受限于先进表征技术的不足,难以实现对多因素耦合实际工况下的摩擦学行为的精准表征。因此,DLC 薄膜摩擦学性能的未来研究方向应聚焦于以下几个方面。

(1)开发先进的表征技术与试验方法,实现对多因素耦合条件下对 DLC 薄膜摩擦学性能的精准表征。

(2)协同运用元素掺杂、多层结构设计等多种调控策略,实现 DLC 薄膜摩擦学性能的综合提升。

(3)结合分子动力学、第一性原理计算等理论模拟方法,建立复杂工况下 DLC 薄膜微观结构演变及摩擦学机理模型,以理论模拟结果指导实验设计与工艺优化,为揭示润滑机制及预测摩擦学性能提供理论支撑。

参考文献:

- [1] AOUADI S M, LUSTER B, KOHLI P, MURATORE C, VOEVODIN A A. Progress in the development of adaptive nitride-based coatings for high temperature tribological applications[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 204(6-7): 962-968.
- [2] ZHU S Y, CHENG J, QIAO Z H, YANG J. High temperature solid-lubricating materials: A review[J]. Tribology International, 2019, 133: 206-223.
- [3] 刘二勇,贾均红,高义民,曾志翔,乌学东. 宽温域连续润滑材料的研究进展[J]. 中国表面工程, 2015, 28(4): 1-13.
LIU E Y, JIA J H, GAO Y M, ZENG Z X, WU X D. Progress of continuous lubricating materials over a wide temperature range[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(4): 1-13.
- [4] 陈建敏,卢小伟,李红轩,周惠娣. 宽温域固体自润滑涂/覆层材料的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(5): 592-600.
CHEN J M, LU X W, LI H X, ZHOU H D. Progress of solid self-lubricating coating over a wide range of temperature[J]. Tribology, 2014, 34(5): 592-600.
- [5] GUPTA S, FILIMONOV D, PALANISAMY T, EL-RAGHY T S. Ta₂AlC and Cr₂AlC Ag-based composites—New solid lubricant materials for use over a wide temperature range against Ni-based superalloys and alumina[J]. Wear, 2007, 262(11-12): 1479-1489.
- [6] TORRES H, RIPOLL M R, PRAKASH B. Tribological behaviour of self-lubricating materials at high temperatures[J]. International Materials Reviews, 2018, 63(5): 309-340.
- [7] AOUADI S M, GAO H, MARTINI A, SCHARF T W, MURATORE C. Lubricious oxide coatings for extreme temperature applications: A review[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 257: 266-277.
- [8] ZHOU Y, GUO P, SUN L L, LIU L L, XU X W, LI W X, LI X W, LEE K R, WANG A Y. Microstructure and property evolution of diamond-like carbon films co-doped by Al and Ti with different ratios[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 361: 83-90.
- [9] YETIM A F, KOVACI H, KASAPÖĞLU A E, BOZKURT Y B, ÇELİK A. Influences of Ti, Al and V metal doping on the structural, mechanical and tribological properties of DLC films[J]. Diamond and Related Materials, 2021, 120: 108639.
- [10] ERDEMİR A. The role of hydrogen in tribological properties of diamond-like carbon films[J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 146-147: 292-297.
- [11] SHARIFAHMADIAN O, PAKSERESHT A, AMIRTHARAJ MO-SAS K K, GALUSEK D. Doping effects on the tribological performance of diamond-like carbon coatings: A review[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 7748-7765.
- [12] LIU Y H, WANG L, XIAO C. The synergistic mechanism between transfer layer and surface passivation of diamond-like carbon film under different gas pressure environments[J]. Applied Surface Science, 2022, 587: 152874.
- [13] ZENG Q F, NING Z K. High-temperature tribological properties of diamond-like carbon films: A review[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2021, 60(1): 276-292.
- [14] 崔龙辰,余伟杰. 类金刚石碳薄膜的高温摩擦学研究进展[J]. 表面技术, 2019, 48(12): 150-159.
CUI L C, YU W J. Progress on high-temperature tribology of diamond-like carbon films[J]. Surface Technology, 2019, 48(12): 150-159.
- [15] ZHANG Y F, POLYCHRONOPOULOU K, HUMOOD M, POLY-CARPOU A A. High temperature nanotribology of ultra-thin hydrogenated amorphous carbon coatings[J]. Carbon, 2017, 123: 112-121.
- [16] WU Y X, LI K, SHI B, QI J W, ZHOU X Y, WANG Y S, ZHENG K, LIU Y, YU S W. The effect of sputtering power on the structural and tribological behaviors at elevated temperature of Ta/Si co-doped DLC films[J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 482: 130688.
- [17] EVARISTO M, FERNANDES F, CAVALEIRO A. Room and high temperature tribological behaviour of W-DLC coatings produced by DCMS and hybrid DCMS-HiPIMS configuration[J]. Coatings, 2020, 10(4): 319.
- [18] XIAO Y Y, SHI W K, HAN Z H, LUO J, XU L. Residual stress and its effect on failure in a DLC coating on a steel substrate with rough surfaces [J]. Diamond and Related Materials, 2016, 66: 23-35.
- [19] WEI C H, CHEN C H. The effect of thermal and plastic mismatch on stress distribution in diamond like carbon film under different interlayer/substrate system[J]. Diamond and Related Materials, 2008,

- 17(7-10): 1534-1540.
- [20] 郭培林,贾倩,孟树文,刘广桥,赖振国,文欣宇,张斌. 元素掺杂对类金刚石薄膜摩擦学性能的影响[J]. 中国表面工程, 2021, 34(4): 19-29.
- GUO P L, JIA Q, MENG S W, LIU G Q, LAI Z G, WEN X Y, ZHANG B. Effect of element doping on the tribological properties of diamond-like carbon film[J]. China Surface Engineering, 2021, 34(4): 19-29.
- [21] ZHANG Y G, SUN W C, DONG Y R, MA M, LIU Y W, TIAN S S, XIAO Y, JIA Y P. Electrodeposition and microstructure of Ni and B co-doped diamond-like carbon (Ni/B-DLC) films[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 405: 126713.
- [22] LUO G Q, XU X Y, DONG H R, WEI Q Q, TIAN F, QIN J L, SHEN Q. Enhance the tribological performance of soft AISI 1045 steel through a CrN/W-DLC/DLC multilayer coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 485: 130916.
- [23] RONG J, WU J H, TU J P, YU X H, FENG J, YUAN Z T. Improving the mechanical and tribological properties of amorphous carbon-based films by an a-C/Zr/ZrN multilayered interlayer[J]. Ceramics International, 2019, 45(6): 6950-6958.
- [24] LIU Y H, ZHANG H, WANG X W, LUO Y Y. Exploring the key mechanism of superlubricity behavior of DLC film in vacuum environment based on first-principles calculations and molecular dynamics simulation[J]. Tribology Letters, 2023, 71: 113.
- [25] XIONG Z P, YU Y F, CHEN H, BAI L C. A coarse-grained study on mechanical behaviors of diamond-like carbon based on machine learning[J]. Nanotechnology, 2023, 34(38): 385702.
- [26] YU Y F, ZHANG X, YIN S W, BAI L C, LIU Z S. The sp^2 - sp^3 transition and shear slipping dominating the compressive deformation of diamond-like carbon[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2022, 577: 121318.
- [27] JACOB W, MÖLLER W. On the structure of thin hydrocarbon films[J]. Applied Physics Letters, 1993, 63(13): 1771-1773.
- [28] ROBERTSON J. Diamond-like amorphous carbon[J]. Materials science and engineering: R: Reports, 2002, 37(4-6): 129-281.
- [29] ROSSNAGEL S M. Magnetron sputtering[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2020, 38(6): 060805.
- [30] 李学龙,徐兴文,徐斌骁. 磁控溅射的发展和工艺参数的探讨[J]. 新型工业化, 2021, 11(9): 9-10.
- [31] RU L, WANG Y R, LIU J J, TAO S M, XIAO J R. Hydrophobic, anticorrosion, and frictional properties of F-DLC films prepared by magnetron sputtering[J]. Vacuum, 2023, 217: 112567.
- [32] GUO C Q, LIN S S, GAO D, SHI Q, WEI C B, DAI M G, SU Y F, XU W, TANG P, LI H, WANG W, ZHU X G. Modulation of Si on microstructure and tribo-mechanical properties of hydrogen-free DLC films prepared by magnetron sputtering[J]. Applied Surface Science, 2020, 509: 145381.
- [33] OGUGUA S N, NTWAEABORWA O M, SWART H C. Latest development on pulsed laser deposited thin films for advanced luminescence applications[J]. Coatings, 2020, 10(11): 1078.
- [34] LU Y M, HUANG G J, WANG S, MI C W, WEI S F, TIAN F T, LI W, CAO H Y, CHENG Y. A review on diamond-like carbon films grown by pulsed laser deposition[J]. Applied Surface Science, 2021, 541: 148573.
- [35] LU Y M, HUANG G J, XI L. Tribological and mechanical properties of the multi-layer DLC film on the soft copper substrate[J]. Diamond and Related Materials, 2019, 94: 21-27.
- [36] SALAH N, ALSHAHRIE A, IQBAL J, HASAN P M Z, ABDEL-WAHAB M S. Tribological behavior of diamond-like carbon thin films deposited by the pulse laser technique at different substrate temperatures[J]. Tribology International, 2016, 103: 274-280.
- [37] CLAY K J, SPEAKMAN S P, MORRISON N A, TOMOZEIU N, MILNE W I, KAPOOR A. Material properties and tribological performance of rf-PECVD deposited DLC coatings[J]. Diamond and Related Materials, 1998, 7(8): 1100-1107.
- [38] LI A, LI X, WANG Y, LU Z B, WANG Y F, ZHANG G A, WU Z G. Investigation of mechanical and tribological properties of super-thick DLC films with different modulation ratios prepared by PECVD[J]. Materials Research Express, 2019, 6(8): 086433.
- [39] JENG Y R, ISLAM S, WU K T, ERDEMIR A, ERYILMAZ O. Investigation of nano-mechanical and-tribological properties of hydrogenated diamond like carbon (DLC) coatings[J]. Journal of Mechanics, 2017, 33 (6): 769-776.
- [40] JANSSON U, LEWIN E. Sputter deposition of transition-metal carbide films—A critical review from a chemical perspective[J]. Thin Solid Films, 2013, 536: 1-24.
- [41] SUN H B, YANG L, WU H C, ZHAO L M. Effects of element doping on the structure and properties of diamond-like carbon films: A review[J]. Lubricants, 2023, 11(4): 186.
- [42] JI L, WU Y X, LI H X, SONG H, LIU X H, YE Y P, CHEN J M, ZHOU H D, LIU L. The role of trace Ti concentration on the evolution of microstructure and properties of duplex doped Ti (Ag) /DLC films[J]. Vacuum, 2015, 115: 23-30.
- [43] LIU S, ZHUANG W J, DING J C, LIU Y, YU W B, YANG Y, LIU X G, YUAN J, ZHENG J. Fabrication and tribological properties of diamond-like carbon film with Cr doping by high-power impulse magnetron sputtering[J]. Coatings, 2024, 14(7): 916.
- [44] CHOI J H, AHN H S, LEE S C, LEE K R. Stress reduction behavior in metal-incorporated amorphous carbon films: First-principles approach[J]. Journal of Physics: Conference Series. 2006, 29: 155-158.
- [45] ZHOU Y F, LI L L, SHAO W, CHEN Z H, WANG S F, XING X L, YANG Q X. Mechanical and tribological behaviors of Ti-DLC films deposited on 304 stainless steel: Exploration with Ti doping from micro to macro[J]. Diamond and Related Materials, 2020, 107: 107870.
- [46] WANG L J, CHEN H, ZHANG Z L, LIU Y, WU Y, HU D W, ZHU R W. Atomic insights on nanoindentation-induced plastic-deformation behavior of tetrahedral amorphous carbon film [J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 473: 129978.
- [47] PAUL R, BHATTACHARYYA S R, BHAR R, PAL A K. Modulation of residual stress in diamond like carbon films with incorporation of nanocrystalline gold[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(24): 10451-10458.
- [48] DAI W, WANG A Y, WANG Q M. Microstructure and mechanical property of diamond-like carbon films with ductile copper incorporation[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 272: 33-38.

- [49] PEI L L, ZHANG J, JI L, MA T B, LI H X, LIU X H, ZHOU H D, CHEN J M. A novel strategy for improving tribological properties of a-C films in vacuum by Au doping and self-migration[J]. Tribology International, 2024, 193: 109345.
- [50] KANG F Y, PEI L L, LI H X, JI L, LIU X H, ZHOU H D, CHEN J M. Cu doping and friction-induced self-migration in a-C:H films to improve anti-wear life in vacuum[J]. Wear, 2024, 538-539: 205204.
- [51] LI A, CHEN Q C, WU G Z, HUANG X, WANG Y F, LU Z B, ZHANG G A, NIE X F. Effect of the variation of film thickness on the properties of multilayered Si-doped diamond-like carbon films deposited on SUS 304, Al and Cu substrates[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(12): 8473-8483.
- [52] CHEN Y J, SU F H, LI Q, SUN J F, LIU S S, MA G Z. Extremely enhanced friction and wear performance of hydrogen-free DLC film at elevated temperatures via Si doping[J]. Tribology International, 2024, 199: 109981.
- [53] JIANG C Y, ZHANG Z Y, JIA J L, LI D K, WANG X D. Comparative study of mechanical properties and tribological behavior of Si-DLC and B-DLC films[J]. Vacuum, 2026, 248: 115215.
- [54] NAKAZAWA H, OSOZAWA R, MOHNAI Y, NARA Y. Synthesis of boron/nitrogen-incorporated diamond-like carbon films by pulsed laser deposition using nitrogen gas and a boron-containing graphite target[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2017, 56(10): 105501.
- [55] MA K L, KOU Y L, ZHANG G A, SHANG L L, CHEN L, WANG S H, WANG F. Effect of doping elements on the tribological behavior and mechanism of diamond-like carbon film under oleic acid lubrication [J]. Diamond and Related Materials, 2025, 159: 112921.
- [56] WANG Y F, WANG J, ZHANG G A, WANG L P, YAN P X. Microstructure and tribology of TiC(Ag)/a-C:H nanocomposite coatings deposited by unbalanced magnetron sputtering[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(14): 3299-3308.
- [57] ZOU Y S, WANG X F, WANG L P. Microstructure and high-temperature tribological properties of Ti/Si co-doped diamond-like carbon films fabricated by twin-targets reactive HiPIMS[J]. Diamond and Related Materials, 2024, 141: 110573.
- [58] SUI X D, LIU J Y, ZHANG S T, YANG J, HAO J Y. Microstructure, mechanical and tribological characterization of CrN/DLC/Cr-DLC multilayer coating with improved adhesive wear resistance [J]. Applied Surface Science, 2018, 439: 24-32.
- [59] ZHAO Y C, XU F, LIU Y, ZHAO W X, ZHANG H L, ZUO D W. Microstructural, mechanical and tribological performances of DLC/CrN multilayer films with different modulation period[J]. Diamond and Related Materials, 2025, 154: 112163.
- [60] LUO G Q, XU X Y, DONG H R, WEI Q Q, TIAN F, QIN J L, SHEN Q. Enhance the tribological performance of soft AISI 1045 steel through a CrN/W-DLC/DLC multilayer coating [J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 485: 130916.
- [61] CAO H S, YE X, LI H, QI F G, WANG Q, OUYANG X P, ZHAO N, LIAO B. Microstructure, mechanical and tribological properties of multilayer Ti-DLC thick films on Al alloys by filtered cathodic vacuum arc technology[J]. Materials & Design, 2021, 198: 109320.
- [62] LIU Y H, HE Y X, LIU L G. Atomic effect and mechanism of different hydrogen content on superlubricity properties of H-DLC films[J]. Applied Surface Science, 2025, 679: 161211.
- [63] MA T B, WANG L F, HU Y Z, LI X, WANG H. A shear localization mechanism for lubricity of amorphous carbon materials [J]. Scientific Reports, 2014, 4: 3662.
- [64] WANG Y, XU J X, OOTANI Y, OZAWA N, ADACHI K, KUBO M. Proposal of a new formation mechanism for hydrogenated diamond-like carbon transfer films: Hydrocarbon-emission-induced transfer[J]. Carbon, 2019, 154: 7-12.
- [65] LI X W, KE P L, WANG A Y. Ab initio molecular dynamics simulation on stress reduction mechanism of Ti-doped diamond-like carbon films[J]. Thin Solid Films, 2015, 584: 204-207.
- [66] DU N Z, ZHANG X, LI X W, LEE K R, WEI X B, DONG J H, LU X, CHENG M, GUO P, CHEN K, ZHANG D K, ZHANG T C, WANG A Y. Atomic-scale stress release and structure - tribology correlations in alternating-energy DLC films under harsh load conditions[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2026, 1054: 186377.

(责任编辑:杨浩雪)