

DOI: 10.11973/jxgccl202210001

类金刚石薄膜摩擦学性能影响因素及改善措施的研究进展

周 琼¹, 温亚东¹, 张而耕¹, 黄 彪¹, 李耀东², 梁丹丹¹, 陈 强¹

(1. 上海应用技术大学上海物理气相沉积(PVD)超硬涂层及装备工程技术研究中心, 上海 201418;

2. 中国兵器工业集团第二〇二研究所, 咸阳 712000)

摘 要: 类金刚石(diamond-like carbon, DLC)是一类含有金刚石结构(sp^3 杂化键)和石墨结构(sp^2 杂化键)的亚稳态非晶物质, 具有高硬度、耐腐蚀、低摩擦因数、耐磨损等优良特性, 但也存在着由于制备工艺、沉积参数等不同导致的内应力大、热稳定性差、摩擦学行为敏感等问题, 大大限制了其产业化应用。从固有因素和外界因素 2 个方面综述了影响 DLC 薄膜摩擦学性能的因素, 从异质元素掺杂、表面织构化等方面论述了改善 DLC 薄膜摩擦学性能的措施, 展望了 DLC 薄膜摩擦学性能研究趋势。

关键词: DLC 薄膜; 摩擦学性能; 影响因素; 表面织构; 元素掺杂

中图分类号: TH117

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2022)10-0001-07

Research Progress on Affecting Factors of Diamond-Like Carbon Film Tribological Properties and Improvements

ZHOU Qiong¹, WEN Yadong¹, ZHANG Ergeng¹, HUANG Biao¹, LI Yaodong²,
LIANG Dandan¹, CHEN Qiang¹

(1. Shanghai Physical Vapor Deposition (PVD) Superhard Coating and Equipment Engineering Technology Research Center, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;

2. The 202nd Research Institute of China North Industries Group, Xianyang 712000, China)

Abstract: Diamond-like carbon (DLC) is a kind of metastable amorphous material containing diamond structure (sp^3 hybrid bond) and graphite structure (sp^2 hybrid bond), and has excellent characteristics such as high hardness, corrosion resistance, low friction coefficient, wear resistance. However, DLC also has problems such as large internal stress, poor thermal stability and sensitive tribological behavior caused by different preparation process and deposition parameters, which greatly limits its industrial application. The affecting factors of DLC film tribology properties are summarized from two aspects of the intrinsic factors and external factors. The improvements of DLC film tribology properties are discussed from heterogeneous elements doping and surface texture. The research trend of tribological properties of DLC film is prospected.

Key words: DLC film; tribological property; influencing factor; surface texture; element doping

0 引 言

1971 年美国 AISENBERG 和 CHABOT 等通过离子束沉积的方法发现了一种全新的硬质碳, 并根据其物理化学性能与金刚石相近而取名为类金刚石(diamond-like carbon, DLC); 经历 50 多 a 的研究历程, DLC 薄膜的制备技术、分析测试手段不断发展^[1]。DLC 中的碳原子主要以 sp^3 杂化键(金刚石

收稿日期: 2021-08-19; 修订日期: 2022-09-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51971148); 上海市自然科学基金资助项目(20ZR1455700); 上海应用技术大学中青年人才发展基金资助项目(ZQ2021-25)

作者简介: 周琼(1984—), 女, 江西修水人, 讲师, 博士

通信作者: 温亚东

结构)和 sp^2 杂化键(石墨结构)结合,因此 DLC 兼具金刚石和石墨的特点,表现出高硬度、耐腐蚀、低摩擦因数、耐磨损等优良特性,特别是 DLC 所表现出来的在一定条件下的超滑特性(摩擦因数低于 0.01),为真正的近零磨损提供了可能^[2]。DLC 优异的减摩抗磨特性,使其在摩擦学领域得到广泛应用,但是影响其摩擦学性能的因素及其改善措施却缺少系统总结。为了给薄膜摩擦领域学者系统地研究 DLC 薄膜提供参考,作者从固有因素和外界因素 2 个方面综述了 DLC 薄膜摩擦学性能的影响因素,总结了 DLC 薄膜摩擦学性能的改善措施,提出了未来 DLC 薄膜摩擦学的重点研究方向。

1 摩擦学性能影响因素

1.1 固有因素

1.1.1 成分

JACOB 等^[3]认为 DLC 的主要成分为 sp^2 杂化碳原子和 sp^3 杂化碳原子,有的还含有氢原子,其中碳原子轨道上的 sp^3 杂化键决定了薄膜具有诸多类似于金刚石的优良特性,比如高的硬度、良好的化学稳定性等,而 sp^2 杂化键决定了薄膜具有类似于石墨的较好的润滑特性^[1]。已有大量学者研究了成分对 DLC 薄膜摩擦学性能的影响。RAVEH 等^[4]研究发现,当 sp^3 杂化键含量和氢含量都较高时,DLC 薄膜在真空中的摩擦因数仅为 0.01,不同的 sp^2 和 sp^3 杂化键比例会直接影响 DLC 薄膜的摩擦学性能。氢原子含量对 DLC 薄膜的摩擦学性能具有显著的影响。ERDEMIR^[5]通过改变化学气相沉积中反应气源的氢、碳原子比例,在 AISI-H13 钢盘上制备了含氢量不同的 DLC 薄膜,然后在氮气气氛下进行摩擦磨损试验,发现制备的无氢 DLC 薄膜的稳定摩擦因数为 0.65,而当反应气源中氢、碳原子数比约为 10 时,含氢 DLC 薄膜的稳定摩擦因数低至 0.003;DONNET 等^[6]采用等离子辅助化学气相沉积技术制备了不同氢含量的 DLC 薄膜,发现氢原子分数为 40% 和 42% 的 DLC 薄膜在真空环境中可以实现超低摩擦因数。

1.1.2 基体材料

在陶瓷、硅、硬质合金、玻璃、铝合金、钛合金等基体材料上都可以沉积 DLC 薄膜,一般 DLC 薄膜的摩擦因数随基体硬度的增加而减小,在表面硬度低的铝合金表面直接沉积的 DLC 薄膜的摩擦因数较大^[1]。通常认为与碳有相近的晶格匹配、热膨胀

系数以及能与碳形成强化学键的材料是理想的沉积 DLC 薄膜的基体材料^[1]。但是,大多数基体材料都不易与碳形成化学键,且与碳的硬度和热膨胀系数差别很大,直接在这些基体上沉积的 DLC 薄膜的结合性能很差,放置一段时间后会大面积脱落现象^[7],因此通常在沉积 DLC 薄膜前会在基体表面制备一层过渡层。过渡层的热膨胀系数、硬度和弹性模量介于薄膜和基体之间,可以缓冲沉积 DLC 薄膜过程中所产生的生长应力及冷却过程中的热应力,提供足够的承载力,协调变形,减弱基体的影响^[8-9]。孙建芳等^[10]采用物理气相沉积/等离子增强化学气相沉积复合离子镀膜技术在 TC4 钛合金基体上先制备了 Ti/TiN/TiCN 过渡层,然后在过渡层上制备了 DLC 薄膜,发现该复合薄膜与钛合金基体结合紧密,厚度均匀,具有较好的力学和摩擦学性能。周佳等^[11]综述了铝合金表面沉积 DLC 薄膜的研究进展,指出通过增强基体力学性能与减少表面宏观缺陷可以极大提高薄膜和基体的结合性能,采用物理气相沉积或其他表面处理方法在铝合金表面制备一层或多层中间过渡层,可以极大缓解 DLC 薄膜与铝合金基体在结构和性能上的差异。李安等^[12]用等离子体增强化学气相沉积技术在不锈钢、铝合金、铜合金基体上沉积了多层硅掺杂超厚 DLC 薄膜,发现所得薄膜结构致密,层间界面清晰可见,沉积过程中无明显缺陷形成,相比于钢、铜合金基体,在铝合金基体上沉积的超厚 DLC 薄膜的磨损率最低。可见,基体材料对 DLC 薄膜摩擦学性能具有极大影响。

1.1.3 表面粗糙度

薄膜表面越粗糙就意味着存在越多的微凸体,在摩擦过程中微凸体会相互嵌入产生互锁作用,从而引起严重的机械啮合和严重的磨损。基体的表面粗糙度也会影响薄膜的摩擦学性能。HOLMBERG 等^[13]研究发现,在具有微米级光滑形貌的基体表面沉积 DLC 薄膜并与钢或陶瓷组成摩擦副时,薄膜的摩擦因数为 0.05~0.30,而在具有分子程度光滑形貌的基体表面沉积 DLC 薄膜的摩擦因数为 0.001~0.150。VLADIMIROV 等^[14]研究发现,DLC 薄膜的摩擦磨损性能与基体表面粗糙度和薄膜厚度的比值有关,适合的比值范围为 0.2~0.3。一般降低基体表面粗糙度会使 DLC 薄膜的摩擦因数减小,但并不是表面越光滑,DLC 薄膜的摩擦学性能越好,这是因为当表面粗糙度降低到一定值时,基体分子间会产生相互作用力,导致薄膜具有较大的摩擦因数。

1.2 外界因素

1.2.1 试验条件

影响 DCL 薄膜的摩擦磨损性能的试验条件主要包括载荷、滑动速度等。高载荷会加速 DLC 薄膜的石墨化进程并增大石墨化程度,导致薄膜的摩擦因数降低^[1,15]。FIELD 等^[16]研究发现,采用物理气相沉积技术制备的 DLC 薄膜的摩擦因数与法向载荷有关,在 20~100 N 法向载荷条件下,法向载荷越大,摩擦因数降低的速率越快,稳态摩擦因数越低,达到稳定摩擦因数的时间越短。李红轩^[17]研究发现,在空气环境中随着滑动速度的增大,DLC 薄膜的摩擦因数较大且呈降低趋势,但在干燥氮气环境中,摩擦因数极低且基本保持不变,这与在空气环境中,活泼的氧分子和水分子使薄膜在摩擦过程中发生氧化,而在干燥的氮气环境中,氮气分子未参与摩擦过程有关。

1.2.2 对磨材料

随着 DLC 薄膜的广泛应用,与 DLC 薄膜组成摩擦副的对磨材料越来越多,可分为金属材料(钢、钛、铝、铜等金属及合金材料)、软质材料(聚合物、橡胶等)、高硬度陶瓷材料(刚玉、陶瓷、金刚石及各种硬质涂层等)三大类。由于软质材料的应用极其特殊,因此在此主要讨论金属材料和高硬度陶瓷材料作为对磨材料对 DLC 薄膜摩擦学性能的影响。

孙建芳等^[10]利用等离子体增强化学气相沉积法在钛合金表面制备了 DLC 薄膜,并研究了薄膜与 4 种陶瓷球(Al_2O_3 、SiC、 Si_3N_4 、 ZrO_2)和 4 种金属球(纯铝、黄铜、304 不锈钢、GCr15 合金钢)配副的摩擦学性能,发现 DLC 薄膜与 SiC 和 ZrO_2 陶瓷球配副后,这 2 种陶瓷球表面形成比较稳定的 DLC 转移膜,陶瓷球表面磨斑面积较小,DLC 薄膜的摩擦因数和磨损率均较低;与 304 不锈钢和 GCr15 合金钢金属球配副后,金属球表面的磨斑面积较小,DLC 薄膜的摩擦因数和磨损率均较低;相比陶瓷球,与低硬度的金属球配副后的 DLC 薄膜较易磨损,转移膜易流失,摩擦因数较高。CHU 等^[18]研究发现,不同

陶瓷材料(Si_3N_4 、SiC、WC、 ZrO_2 、 SiO_2)与 DLC 薄膜摩擦后,陶瓷表面形成的转移膜的石墨化程度不同,其中 WC、SiC、 Si_3N_4 表面的转移膜石墨化程度很高, ZrO_2 表面转移膜石墨化程度较低, SiO_2 表面未形成转移膜;转移膜的石墨化程度越高,摩擦因数越低。DLC 薄膜与金属材料配副时的摩擦因数较高,一般为 0.1~0.2,而与高硬度陶瓷材料配副时的摩擦因数较低,一般小于 0.1^[1]。与 DLC 薄膜配副的对磨材料表面能否形成转移膜以及转移膜的石墨化程度决定着 DLC 薄膜的摩擦学性能。

1.2.3 气氛环境

在 ENKE 等^[19]于 1980 年首次报道了 DLC 薄膜在特定气氛环境下具有低摩擦因数和持久耐用性后,研究者对 DLC 薄膜在不同气氛环境中的摩擦学性能进行了深入的探讨。有学者认为不同气氛环境中摩擦学性能的差异是由于薄膜表面的自由悬键在真空或惰性气氛中会引起非常强的黏着作用,导致 DLC 薄膜具有较大的摩擦因数,而在高湿度环境中氧分子或水分子可以消除自由悬键,使摩擦因数降低。

郑韶先等^[20]研究发现,相比于真空环境,在 CO_2 环境中 DLC 薄膜与铝配副时的摩擦学性能较好,这是由于在 CO_2 环境中,铝原子和氧原子会与 CO_2 分子反应,形成离子键,大幅降低界面分离功。DONNET 等^[21]研究发现,在大气环境中,在硅基体上沉积的 DLC 薄膜与 AISI52100 钢配副时的稳定摩擦因数约为 0.15,当真空度为 $10^{-7} \sim 10^{-1}$ Pa 时,稳定摩擦因数为 0.006~0.008,当真空度为 10~50 Pa 时,稳定摩擦因数为 0.01~0.07。WU 等^[22]研究发现,相比于空气环境,DLC 薄膜在氦气环境中的摩擦学性能受对磨材料的影响较大,且与氦气环境相比,DLC 薄膜在空气环境中的摩擦学性能得到明显提高。宁可心等^[23]研究发现,DLC 薄膜在干燥氮气中与 Al_2O_3 陶瓷球配副时的磨损寿命比在空气中长,这是因为在氮气环境中 Al_2O_3 陶瓷球表面的转移膜可以在一定程度上稳定存在,从而降低磨损程度,延长磨损寿命。表 1 中总结了不同 DLC 薄膜

表 1 不同 DLC 薄膜在不同气氛环境中的摩擦因数^[1]

Table 1 Friction coefficient of different DLC films in different atmospheres^[1]

DLC 薄膜种类	摩擦因数			
	真空环境	干燥氮气	干燥空气 (相对湿度 5%~15%)	潮湿空气 (相对湿度 15%~95%)
无氢 DLC	0.300~0.800	0.600~0.700	0.600	0.050~0.230
含氢 DLC	0.007~0.050	0.001~0.150	0.025~0.220	0.020~0.500
硅掺杂 DLC	0.030	0.007	0.030	0.030~0.400

在不同气氛环境中的摩擦因数,可以明显看出薄膜的摩擦学性能受气氛环境的影响较大。

2 摩擦学性能的改善措施

2.1 表面织构化

表面织构化指采用适当的加工工艺,在不改变材料自身性质的前提下,在表面制备具有特定排布、尺寸、形状的微结构阵列,以获得特殊的表面性能。合理的织构化设计具有改善摩擦学性能及生物学性能的能力,同时随着理论与技术的发展,表面织构技术已快速应用到涂层制备、机械密封等行业中。1966年,HAMILTON等^[24]第一次通过蚀刻技术在密封零部件上加工了一系列微观凸起结构,这就是最早期的织构,通过试验获得了最佳的表面织构尺寸,证实了这些微观凸起结构可明显降低摩擦因数,同时还可增强摩擦副的承载能力。WANG等^[25]利用飞秒激光器在金刚石刀具上制备了环形网格、直槽形、同心圆形、凹槽形织构,通过试验发现除同心圆形织构外,其他形状织构化的金刚石刀具的摩擦因数都大大降低。

近几年李振东等^[26]采用激光加工的方法制备了表面织构密度分别为5.95%,8.26%,11.55%的3组钛合金试样,然后采用等离子增强物理气相沉积技术在其表面制备DLC薄膜,发现在织构密度5.95%的钛合金表面所制备的DLC薄膜磨损率相比直接在钛合金表面制备薄膜降低了60%,同时随着织构密度的增大,磨损率增加,摩擦因数变化极小。祁鹏浩等^[27]设计了圆孔织构、V形织构、线形织构和微纹织构4种织构,采取了在织构上沉积DLC薄膜和在DLC薄膜上加工织构2种加工方法,通过球盘摩擦磨损试验发现,相比于在DLC薄膜上加工织构的方法,在织构上沉积DLC薄膜的方法对其摩擦学性能改善不明显,此外在DLC薄膜上沉积微纹织构的摩擦学性能最好。

2.2 异质元素掺杂

2.2.1 金属元素掺杂

根据金属元素在非晶碳基体中的存在形式,将金属掺杂DLC薄膜分为弱碳金属掺杂DLC薄膜(如铝掺杂DLC,银掺杂DLC)和亲碳金属掺杂DLC薄膜(如钛掺杂DLC,铬掺杂DLC)^[28],所掺杂的金属元素主要包括钛、铬、钼、铝、铜、银、锆、钴等。

钛掺杂可以提高DLC薄膜的硬度,减小摩擦副的磨损,加快石墨化转移层的形成,从而提高薄膜的耐磨性能^[1]。上海物理气相沉积超硬涂层及装备工

程技术研究中心运用磁控溅射技术制备了多梯度钛掺杂DLC薄膜,与GCr15钢球组成摩擦副进行摩擦磨损试验后发现,相比于无掺杂DLC薄膜,钛掺杂DLC薄膜由于具有较高的硬度和良好的热稳定性而表现出较好的摩擦学性能。

铬具有强的抗氧化能力和优异的耐磨性能,将铬掺杂在DLC薄膜中后可与碳键合形成稳定的碳化物纳米晶相,降低薄膜内应力,提高薄膜与基体间的结合力,改善DLC薄膜的摩擦学性能^[1]。DAI等^[29]采用磁控溅射和离子源复合技术在镁合金表面制备了不同铬掺杂量的DLC薄膜,发现当掺杂铬的原子分数为2.34%时,DLC薄膜表现出了非晶特征,而当掺杂铬的原子分数为31.5%时,薄膜的非晶态基体中出现了碳化铬结晶相。GASSNER等^[30-31]系统研究了铬掺杂DLC薄膜微观结构及化学组成,发现当薄膜中的碳化铬结晶相颗粒尺寸在2~10 nm并高度分散时,薄膜表现出较低的摩擦因数和良好的耐磨性能,碳化铬颗粒的存在可大幅度提高薄膜的力学性能。

铝作为异质元素掺入DLC薄膜中,会与碳形成不稳定的弱键合碳化物,易使DLC中的碳原子在对磨材料表面形成转移膜,从而大幅度增强DLC薄膜的服役环境适应性和摩擦学性能。韩熙等^[32]研究了铝掺杂DLC薄膜在空气和水介质中的摩擦磨损行为,发现在水介质中DLC薄膜的磨损程度较小,这归因于铝的掺杂使薄膜表面吸附水分子能力变强,说明铝掺杂可以增强DLC薄膜的服役环境适应性。

铜、银、钼均具有良好的自润滑性能,适合用于高温、超低温、超高真空等苛刻环境,这些金属的硬度低、延展性良好,与DLC薄膜复合后不仅可降低DLC薄膜的内应力,还可有效强化DLC薄膜在真空和空气环境下的摩擦学适应性^[1]。赵栋才等^[33]研究发现,随着铜掺杂量的增加,电弧离子镀DLC薄膜的摩擦因数缓慢增加,磨损量较小,但是当铜含量达到一定值后,其摩擦因数波动较大,磨损量增大。鲁志斌等^[34]研究发现,在高真空条件下,与未掺杂DLC薄膜相比,非平衡磁控溅射技术制备的银掺杂DLC薄膜与GCr15球对磨后达到了超润滑状态,且薄膜的硬度、弹性模量、黏塑性都有较大提高。钼作为一种过渡元素掺入DLC薄膜中,可在介质润滑条件下对薄膜的摩擦学性能起到好作用^[35]。

2.2.2 非金属元素掺杂

与金属元素相比,掺入DLC薄膜中的非金属元

素均与薄膜中的碳原子发生不同程度的键合,即非金属元素部分取代非晶碳基网络中的碳原子或氢原子,改变薄膜中 sp^2 和 sp^3 杂化键的比例及氢含量,促使非晶碳基网络结构重整,从而提高薄膜的热稳定性、力学性能与摩擦学性能,以及根据服役工况调控薄膜的光电性能、生物相容性等^[1]。目前,可以提高 DLC 薄膜摩擦学性能的非金属元素主要包括硅、氮和氟。

上海物理气相沉积超硬涂层及装备工程技术研究中心通过阴极电弧沉积法制备了硅掺杂 DLC 薄膜,通过摩擦磨损试验发现,相比于无掺杂 DLC 薄膜,硅掺杂 DLC 薄膜表现出更好的摩擦学性能,在大气环境下的摩擦因数为 $0.07 \sim 0.08$,这是因为掺杂的硅与碳形成了新的 C—Si 键,同时薄膜中 sp^2 杂化键含量也未显著增加。ZHAO 等^[36]研究发现,硅掺杂 DLC 薄膜在水环境中的摩擦因数低至 0.005,实现了超滑状态。汪科良等^[37]研究发现,硅的掺杂能够提高 DLC 薄膜的热稳定性,拓宽使用温度范围,降低摩擦学性能对湿度的敏感性。

氮掺杂 DLC 薄膜中 C—N 键合状态、原子含量、薄膜微观结构决定薄膜的摩擦学性能,掺杂的氮会提高类石墨相的交联程度,大量碳以芳香环结构键合,摩擦因数降低^[1]。张志龙^[38]运用射频磁控溅射法,通过调控氮气和氩气的流量比,制备了不同含量氮掺杂 DLC 薄膜,发现当掺杂氮的原子分数为 6.64% 时, sp^3 杂化键含量最多,薄膜的磨损率最小。

氟元素掺入 DLC 薄膜中后可极大提高 DLC 薄膜在潮湿环境下的摩擦学适应性,同时薄膜的氟化改性可有效钝化薄膜表面对氧和水分的吸附,增强耐腐蚀性能^[1]。FONTAINE 等^[39]研究发现,氟掺杂 DLC 薄膜在高真空环境中的摩擦因数低至 0.005,这是因为氟作为一个单价原子,在结构中的作用与氢相同。WANG 等^[40]研究发现,在 Ti-6Al-4V 合金上沉积的氟掺杂 DLC 薄膜与基体间结合良好,且随着氟掺杂量的增加,薄膜在空气条件下的摩擦学性能提高。

2.2.3 化合物掺杂

化合物掺杂 DLC 薄膜是指掺杂相以化合物形式嵌埋在 DLC 网络结构中所形成的纳米晶/非晶复合结构薄膜,目前研究较多的化合物有 MoS_2 化合物、 WS_2 化合物等。 MoS_2 化合物是国际航空航天工程领域中应用的标准固体润滑剂,具有极佳的润滑性能^[1]。将 MoS_2 化合物分散在具有高化学稳定

性的致密非晶碳基体中,利用纳米晶/非晶复合结构强化及 MoS_2 -DLC 理化性能协同效应,可实现在真空和大气潮湿环境下具有长寿命、低摩擦因数的 DLC 复合薄膜的制备^[1]。VOEVODIN 等^[41]根据变色龙在不同环境改变皮肤颜色以增加其生存机会的能力作为灵感来源,采用脉冲激光沉积研制了自适应超强的耐磨 MoS_2 -DLC 薄膜,发现 MoS_2 以纳米晶的形式镶嵌在非晶 DLC 体系中,该薄膜在不同环境中均表现出良好的摩擦学性能,在潮湿空气、真空和干燥空气环境中的摩擦因数分别约为 0.1, 0.03, 0.007。王松等^[42]利用低温离子渗硫技术和离子束辅助沉积技术制备了 WS_2 /W-DLC 薄膜,发现薄膜在大气环境下表现出优异的力学性能和超低的摩擦因数, WS_2 均匀镶嵌于 DLC 基体内形成复合结构,该复合结构是薄膜表现出优异性能的主要原因。

3 结束语

DLC 薄膜摩擦学性能的影响因素包括固有因素和外界因素两个方面,其中固有因素包括薄膜的成分、基体材料、表面粗糙度,外界因素包括试验条件(载荷、滑动速度)、对磨材料、气氛环境。在 DLC 薄膜摩擦磨损过程中,接触表面不仅会发生物理机械作用、黏着作用、摩擦化学作用、热作用、第三体作用,而且薄膜表面还会发生不同程度的石墨化而在对磨材料表面形成转移膜;服役环境会影响转移膜的产生,环境中的氢原子、氧原子等极度活跃,摩擦后薄膜表面不仅会发生氧化反应,而且在摩擦剪切作用下断裂的 C—C 键还会与环境中的原子发生化学反应,形成新的原子键,增大接触面之间的相互作用能^[43]。目前大多数的研究都是在相同试验条件下对不同 DLC 薄膜或是在不同试验条件下对相同 DLC 薄膜的摩擦学性能进行对比,但并未将各种影响因素耦合起来进行分析研究。DLC 薄膜摩擦学性能的改善措施包括表面织构化、异质元素掺杂(金属元素、非金属元素、化合物)等。

目前,对多因素耦合条件下 DLC 薄膜摩擦学性能的研究缺乏先进的表征技术和手段,对于其摩擦机制以及在实际工况下的应用缺少理论模型,因此 DLC 薄膜摩擦学性能今后的研究方向主要集中在以下 3 个方面:(1) 研究先进的表征手段和试验仪器以在多因素耦合条件下准确衡量 DLC 薄膜的摩擦学性能;(2) 结合计算机模拟方法,建立完善的

DLC 薄膜摩擦学动力学模型,有效并且准确地评估 DLC 薄膜的摩擦学机制;(3)多元素掺杂、梯度薄膜、表面织构化、表面改性等多种方法的联合应用是未来提高 DLC 薄膜摩擦学性能的关键。

参考文献:

- [1] 薛群基,王立平.类金刚石碳基薄膜材料[M].北京:科学出版社,2012.
- XUE Q J, WANG L P. Diamond-like carbon-based thin film materials [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [2] 王康,陈新春,马天宝.类金刚石薄膜固体超滑的研究现状和挑战[J].表面技术,2020,49(6):10-21.
- WANG K, CHEN X C, MA T B. Research status and challenges of solid superlubricity of diamond-like carbon film [J]. Surface Technology, 2020, 49(6): 10-21.
- [3] JACOB W, MÖLLER W. On the structure of thin hydrocarbon films[J]. Applied Physics Letters, 1993, 63(13): 1771-1773.
- [4] RAVEH A, MARTINU L, Hawthorne H M, et al. Mechanical and tribological properties of dual-frequency plasma-deposited diamond-like carbon [J]. Surface and Coatings Technology, 1993, 58(1): 45-55.
- [5] ERDEMIR A. The role of hydrogen in tribological properties of diamond-like carbon films [J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 146/147: 292-297.
- [6] DONNET C, FONTAINE J, MOGNE T L, et al. Diamond-like carbon-based functionally gradient coatings for space tribology [J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 120/121: 548-554.
- [7] 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.
- [8] WEI C, WANG Y S, TAI F C. The role of metal interlayer on thermal stress, film structure, wettability and hydrogen content for diamond like carbon films on different substrate [J]. Diamond and Related Materials, 2009, 18(2/3): 407-412.
- [9] BURNETT P J, RICKERBY D S. The relationship between hardness and scratch adhesion[J]. Thin Solid Films, 1987, 154 (1/2): 403-416.
- [10] 孙建芳,唐昱涛,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.
- [11] 周佳,孙丽丽,郭鹏,等.铝合金表面沉积类金刚石薄膜的研究进展[J].表面技术,2020,49(1): 113-121.
- ZHOU J, SUN L L, GUO P, et al. Research progress in diamond-like carbon films deposited on aluminum alloy [J]. Surface Technology, 2020, 49(1): 113-121.
- [12] 李安,陈庆春,王云锋,等.不锈钢、铝、铜合金表面超厚类金刚石薄膜的制备及其摩擦学性能研究[J].材料保护,2020,53 (5): 63-67.
- LI A, CHEN Q C, WANG Y F, et al. Preparation and tribological properties of super-thick diamond-like carbon films on stainless steel, aluminum and copper alloys [J]. Materials Protection, 2020, 53(5): 63-67.
- [13] HOLMBERG K, RONKAINEN H, LAUKKANEN A, et al. Friction and wear of coated surfaces: Scales, modelling and simulation of tribomechanisms [J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 202(4): 1034-1049.
- [14] VLADIMIROV A B, TRAKHTENBERG I S, RUBSHTEN A P, et al. The effect of substrate and DLC morphology on the tribological properties coating [J]. Diamond and Related Materials, 2000, 9(3/4/5/6): 838-842.
- [15] 景鹏飞,俞树荣,张克菲,等.载荷及位移幅值对 DLC 薄膜微动磨损行为[J].摩擦学学报,2021,41(2): 213-222.
- JING P F, YU S R, ZHANG K F, et al. Effects of load and displacement amplitude on fretting wear behavior of DLC film [J]. Tribology, 2021, 41(2): 213-222.
- [16] FIELD S K, JARRATT M, TEER D G. Tribological properties of graphite-like and diamond-like carbon originated from a unique fullerene-like nanostructure [J]. Nanotechnology, 2004, 37: 949-956.
- [17] 李红轩.等离子体增强化学气相沉积类金刚石碳薄膜及其摩擦学性能研究[D].北京:中国科学院,2005.
- LI H X. Plasma enhanced chemical vapor deposition of diamond-like carbon films and their tribological properties [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [18] CHU P K, LI L H. Characterization of amorphous and nanocrystalline carbon films [J]. Materials Chemistry and Physics, 2006, 96(2/3): 253-277.
- [19] ENKE K, DIMIGEN H, HÜBSCH H. Frictional properties of diamondlike carbon layers [J]. Applied Physics Letters, 1980, 36(4): 291-292.
- [20] 郑韶先,李强,霍磊. CO₂ 环境下 DLC 与不同对偶的摩擦学机理分析[J].兰州理工大学学报,2019,45(5): 6-11.
- ZHENG S X, LI Q, HUO L. Tribological mechanism analysis of DLC film and its different matings in CO₂ environment [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2019, 45(5): 6-11.
- [21] DONNET C, BELIN M, AUGÉ J C, et al. Tribochemistry of diamond-like carbon coatings in various environments [J]. Surface and Coatings Technology, 1994, 68/69: 626-631.
- [22] WU D H, REN S M, PU J B, et al. A comparative study of tribological characteristics of hydrogenated DLC film sliding against ceramic mating materials for helium applications [J]. Applied Surface Science, 2018, 441: 884-894.
- [23] 宁可心,王鹏,江海霞,等.含氢无定型碳摩擦转移膜结构演化规律研究[J].摩擦学学报,2021,41(4): 484-492.

- NING K X, WANG P, JIANG H X, et al. Structural evolution of the transfer film of a-C:H[J]. Tribology, 2021, 41(4): 484-492.
- [24] HAMILTON D B, WALOWIT J A, ALLEN C M. A theory of lubrication by microirregularities[J]. Journal of Basic Engineering, 1966, 88(1): 177-185.
- [25] WANG Q W, YANG Y, YAO P, et al. Friction and cutting characteristics of micro-textured diamond tools fabricated with femtosecond laser[J]. Tribology International, 2021, 154: 106720.
- [26] 李振东, 詹华, 柯庆航, 等. 激光织构和碳基薄膜复合处理提高钛合金摩擦学性能研究[J]. 润滑与密封, 2020, 45(12): 135-140.
- LI Z D, ZHAN H, KE Q H, et al. Research on laser texture and carbon-based film composite treatment to improve the tribological properties of titanium alloy[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(12): 135-140.
- [27] 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.
- [28] 彭雅利, 郭朝乾, 林松盛, 等. 综述金属掺杂对类金刚石薄膜结构和性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2019, 38(15): 826-832.
- PENG Y L, GUO C Q, LIN S S, et al. Effect of metal doping on structure and properties of diamond-like carbon films: A review[J]. Electroplating & Finishing, 2019, 38(15): 826-832.
- [29] DAI W, WU G S, WANG A Y. Preparation, characterization and properties of Cr-incorporated DLC films on magnesium alloy[J]. Diamond and Related Materials, 2010, 19(10): 1307-1315.
- [30] GASSNER G, PATSCHEIDER J, MAYRHOFFER P H, et al. Tribological properties of nanocomposite $\text{CrC}_x/\text{a-C:H}$ thin films[J]. Tribology Letters, 2007, 27(1): 97-104.
- [31] GASSNER G, PATSCHEIDER J, MAYRHOFFER P H, et al. Structure of sputtered nanocomposite $\text{CrC}_x/\text{a-C:H}$ thin films[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2006, 24(4): 1837.
- [32] 韩熙, 郑建云, 张帅拓, 等. Al-DLC 薄膜结构及其在水介质下摩擦学性能研究[J]. 摩擦学报, 2017, 37(3): 310-317.
- HAN X, ZHENG J Y, ZHANG S T, et al. Study on Structure and tribological properties of Al-DLC thin Films in aqueous Medium[J]. Tribology, 2017, 37(3): 310-317.
- [33] 赵栋才, 任妮, 马占吉, 等. 掺铜对 DLC 膜力学性能影响研究[J]. 中国表面工程, 2008, 21(5): 38-42.
- ZHAO D C, REN N, MA Z J, et al. Study on the mechanical properties of DLC films doped with Cu[J]. China Surface Engineering, 2008, 21(5): 38-42.
- [34] 鲁志斌, 王云峰, 王立平, 等. Ag 掺杂含氢 DLC 超润滑性能研究[C]//第八届全国表面工程学术会议暨第三届青年表面工程学术论坛论文集. 北京: 中国机械工程学会, 2020: 78-79.
- LU Z B, WANG Y F, WANG L P, et al. Study on the super-lubricating performance of Ag-doped hydrogen-containing DLC[C]//Proceedings of the 8th National Surface Engineering Conference and the 3rd Youth Surface Engineering Forum. Beijing: Chinese Mechanical Engineering Society, 2020: 78-79.
- [35] BUTT M Z, KHALEEQUE-UR-RAHMAN M, ALI D, et al. Deposition and characterization of multilayer DLC: Mo thin films grown on silicon substrate by off-axis pulsed laser deposition technique[J]. Applied Surface Science, 2015, 331: 407-414.
- [36] ZHAO F, LI H X, JI L, et al. Superlow friction behavior of Si-doped hydrogenated amorphous carbon film in water environment[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203(8): 981-985.
- [37] 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.
- [38] 张志龙. B 与 N 掺杂类金刚石薄膜摩擦学性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- ZHANG Z L. Tribological properties of B and N doped diamond-like films[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.
- [39] FONTAINE J, LOUBET J L, MOGNE T L, et al. Superlow friction of diamond-like carbon films: A relation to viscoplastic properties[J]. Tribology Letters, 2004, 17(4): 709-714.
- [40] WANG J J, MA J J, HUANG W J, et al. The investigation of the structures and tribological properties of F-DLC coatings deposited on Ti-6Al-4V alloys[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 316: 22-29.
- [41] VOEVODIN A A, ZABINSKI J S. Supertough wear-resistant coatings with 'chameleon' surface adaptation[J]. Thin Solid Films, 2000, 370(1/2): 223-231.
- [42] 王松, 岳文, 李星亮, 等. 超低摩擦 WS_2/W -DLC 固体润滑薄膜的制备与性能[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(2): 159-163.
- WANG S, YUE W, LI X L, et al. Fabrication, microstructure and properties of super-low friction WS_2/W -DLC solid lubrication film[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37(2): 159-163.
- [43] LI H, TAO X, WANG C, et al. Tribochemical effects on the friction and wear behaviors of a-C:H and a-C films in different environment[J]. Tribology International, 2007, 40(1): 132-138.