

离子液体/织构化类金刚石碳复合润滑薄膜的构筑及其摩擦学性能的研究

蒲吉斌, 万善宏, 胡天昌, 王立平*, 胡丽天

(中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 分别采用激光织构、磁控溅射和浸渍-提拉技术在单晶硅片表面成功构筑了具有离子液体纳米薄膜的织构化类金刚石碳复合润滑薄膜, 采用三维轮廓仪和 SEM 观察了织构化类金刚石碳表面, 通过 X 射线光电子能谱证实了织构化类金刚石碳膜表面离子液体纳米薄膜的存在, 并利用微摩擦试验机重点考察和理论分析了这种复合润滑薄膜在较大和微载荷下的摩擦学性能. 研究结果表明: 这种离子液体/织构化类金刚石碳复合润滑薄膜在微载荷下能够有效地缩短磨合时间、降低摩擦系数, 然而其在小载荷下摩擦学性能欠佳.

关键词: 离子液体; 类金刚石薄膜; 织构化; 摩擦学

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2012)05-0472-08

Fabrication and Tribological Study of Ionic Liquid/Texturing Diamond-like Carbon Composite Lubrication Films

PU Ji-bin, WAN Shan-hong, HU Tian-chang, WANG Li-ping*, HU Li-tian

(State Key Laboratory of Solid Lubrication,

Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Ionic liquid/texturing diamond-like carbon composite lubrication films were successfully prepared on silicon substrates by a composite technology combining of laser texturing, magnetron sputtering and dip-coating. Textured diamond-like carbon surface were analyzed using non-contact interferometric microscope and scanning electron microscope. Presence of ionic liquid nano-film on textured diamond-like carbon surface was confirmed by using X-ray photoelectron spectrometer, and the tribological properties of the as-prepared composite lubrication films were mainly studied and analyzed theoretically under different applied loads by a micro-tester. The investigation reveals that ionic liquid/textured diamond-like carbon composite lubrication films could shorten running-in time and decrease friction coefficient under low loads, but possess poor tribological behaviors under high loads.

Key words: ionic liquid, diamond-like carbon film, surface texturing, tribology

近年来, 微机电系统、超高密度磁盘存储系统、卫星器件等高新技术微器件发展迅速. 然而, 由于这类微小器件具有非常小的驱动力和高的比表面积, 以黏着和微摩擦主导的表面力严重影响了其稳定性、缩短了使用寿命^[1-4]. 应用于微小器件表面的超薄

润滑膜, 不仅要具有优良的减摩抗磨性能, 还应具备在超低摩擦副间隙下稳定工作的物化性能. 由阴阳离子组成的离子液体具有极低的挥发性、高的热稳定性和化学稳定性、良好的导电与导热性等优点^[5-7], 完全符合高表现润滑剂的性能要求^[8-10].

Received 14 May 2012, revised 4 June 2012, accepted 4 July 2012, available online 28 September 2012.

* Corresponding author. E-mail: lpwang@licp.cas.cn, Tel: +86-931-4968117.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51105352, 51102247).

国家自然科学基金项目(51105352 和 51102247) 资助.

作者研究小组^[11-17]也已经系统考察并报道了某些离子液体纳米薄膜具有较好的微/纳摩擦学性能.然而,以静电物理吸附方式形成的离子液体纳米薄膜的承载抗磨性有限,且在长期的摩擦过程中,多数润滑性能优异的离子液体对一些金属基底材料具有一定腐蚀性^[18-19],因此,有必要在基底与离子液体纳米薄膜之间制备具有固体润滑性能的隔离层.

类金刚石薄膜(Diamond-like carbon, DLC)具有高硬度、高电阻率、良好光学性能、化学惰性、优良生物相容性和优异的摩擦学特性^[20-23].然而,研究发现DLC薄膜虽然在小载荷摩擦中具有较低的摩擦系数,但微载荷下的微摩擦系数通常较大.许多研究发现表面织构化是一种优化材料摩擦学性能的有效方法,表面织构化能够减小运动部件间的真实接触面积,显著减小表面黏着和摩擦力^[24-30].Ding等^[31]从薄膜结构角度深入地研究了织构化DLC薄膜的水润滑性能,发现织构化的DLC薄膜在水环境下虽然具有高于未织构DLC薄膜的摩擦系数,但表现出更长的摩擦寿命.为了进一步减小织构化DLC薄膜在微器件中的微小力环境下的摩擦系数,在其表面涂覆纳米润滑剂薄膜将是有效途径之一.本文将具有优异润滑性能的离子液体纳米薄膜涂覆在织构化的DLC薄膜表面,分别在微载荷和小载荷下研究了这种复合薄膜的摩擦学性能,这将更好地理解织构化硬质薄膜与离子液体纳米薄膜的复配效应,为改善微器件运动部件摩擦学问题提供新的途径和理论支持.

1 实验部分

1.1 试验材料及制备

文中选用的1-丁基-3-甲基咪唑六氟磷酸盐离子液体(定义为[DMIM]PF₆)参考文献方法合成及纯化^[32],其化学分子式如图1所示;单面抛光单晶硅片p(100)(北京GRINM半导体材料公司)用作含氢类金刚石(a-C:H)薄膜基底;试验中所用其他试剂均为分析纯,直接使用;二次去离子水(大于18 MΩ)用于超声清洗.

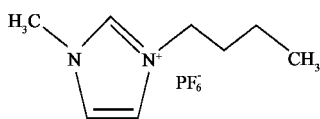


Fig. 1 Chemical structure of the ionic liquids

1-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate

图1 1-丁基-3-甲基咪唑六氟磷酸盐离子液体化学式

利用钇铝石榴石激光器(4 ns的脉冲频率是10 kHz,波长是1 064 nm)在超声清洁后的硅基底表面刻蚀一定密度的等间距凹坑阵列织构,凹坑直径是14 μm,凹坑阵列密度是20%.然后,抛光织构化的硅基底,去除凹坑的尖锐边缘.

在多功能薄膜沉积系统上,采用中频非平衡磁控溅射技术在织构化硅片表面制备a-C:H薄膜,具体制备方法如下:织构化硅基底分别在丙酮、无水乙醇中超声清洗10 min,氮气吹干,放入真空室.在沉积薄膜之前,真空室预抽至 2×10^{-3} Pa,再通入高纯Ar气,对基底表面利用Ar离子清洗活化10 min.然后在基底表面镀200 nm厚的Cr过渡层(放电气压: 0.9×10^{-1} Pa,基底偏压:-500 V、50%,靶材中频交流电源:2.0 A,Ar气流量:120 sccm).提高后续a-C:H薄膜与基底的结合强度.最后镀1 μm厚的Cr掺杂a-C:H薄膜(气压: 8.0×10^{-1} Pa,基底偏压:-1 000 V、20%,靶材中频交流电源:2.0 A,甲烷流量:40 sccm,Ar气流量120 sccm).镀膜结束后,织构化a-C:H薄膜样品(定义为TDLC)在真空下冷却至室温.

将织构化a-C:H薄膜试样分别在丙酮、酒精、二次去离子水中采用超声波清洗5 min,氮气吹干,然后采用浸渍-提拉法将清洁后的织构化a-C:H薄膜试样在[DMIM]PF₆的丙酮溶液中浸渍3 min,以60 μm/s的速度匀速提拉出,平置自然干燥12 h,最终在织构化a-C:H薄膜表面形成5 nm厚的离子液体薄膜(定义为TDLC-IL).以上离子液体纳米薄膜在温度20 °C,湿度18%的超净间制备.离子液体/织构化类金刚石碳复合润滑薄膜的制备过程如图2所示.

1.2 试验方法

利用CSPM 4000型原子力/摩擦力显微镜(AFM/LFM,中国本原纳米仪器公司)测量 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 范围的a-C:H薄膜表面形貌,并计算了a-C:H薄膜表面均方根粗糙度;利用JY-HR800型拉曼光谱仪对a-C薄膜进行Raman光谱测试,激发波长为514.5 nm(氙离子激光器);利用MicroMXA型非接触式三维表面轮廓仪观察了织构化a-C:H薄膜的表面形貌;利用JSM-5600LV型扫描电子显微镜(SEM)观察了织构化a-C:H薄膜表面凹坑截面形貌;在nano-indenter II型纳米压痕仪(美国MTS公司)上测定a-C:H薄膜硬度;采用测量精度为 ± 0.3 nm的装有He-Ne激光光源的L116-E型椭圆偏光测厚仪以50°掠射角度测量了a-C:H

薄膜表面离子液体纳米薄膜的厚度,在同一样品上分别测量 10 个不同点,计算出离子液体纳米薄膜平均厚度;采用 UMT-2MT 型摩擦试验机(美国 CETR 公司)在球-盘往复运动模式下测定了薄膜的摩擦学性能,无织构的光滑 a-C:H 薄膜及其与离子液体的复合薄膜(定义为 a-C:H-IL)的摩擦学性能

作为参照.摩擦对偶球为 AISI-52100 钢球(直径为 6 mm).摩擦对偶球保持静止,待测薄膜样品固定在往复运动的样品台上,往复运动行程为 5 mm,频率为 2 Hz,同一种摩擦试验条件重复 3 次.摩擦试验结束后,在 MicroMXA 型非接触式三维表面轮廓仪上观察薄膜表面形貌,分析薄膜的磨损机理.摩擦试

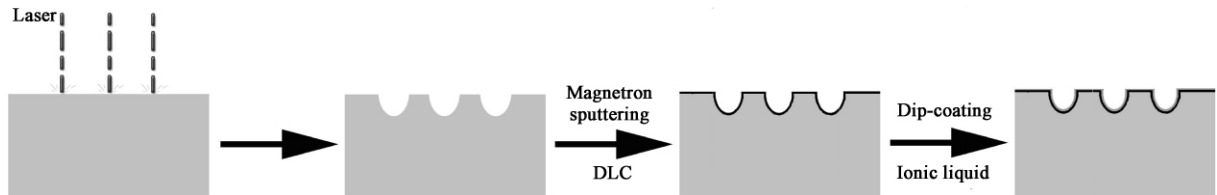


Fig. 2 Schematic drawing of the constructing process of ionic liquid/texturing diamond-like carbon composite lubrication films

图 2 离子液体/织构化类金刚石碳复合润滑膜的制备过程

验测试环境是温度 20 °C 和湿度 25%.

2 结果与讨论

2.1 织构化 DLC 薄膜表面形貌

图 3 显示了 a-C:H 薄膜表面的二维 AFM 形貌,从图 3 中发现:磁控溅射技术制备的 a-C:H 薄膜表面不如清洁单晶硅片表面光滑,表面呈现出岛状微突起.经 Imager 软件分析,a-C:H 薄膜表面在 20 μm × 20 μm 范围内的均方根粗糙度为 1.34 nm.

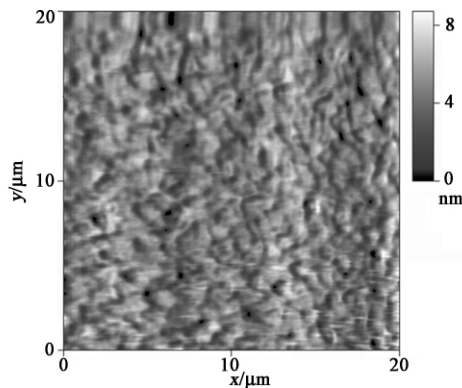


Fig. 3 Tapping-mode AFM image of a-C:H film on Si substrate

图 3 a-C:H 薄膜表面的 AFM 形貌图

Raman 光谱是研究碳基薄膜材料内部键合结构最常用的表征手段,图 4 为未涂覆离子液体的 a-C:H 薄膜的 Raman 光谱图.可以看出:所制备的 a-C:H 薄膜的拉曼光谱图呈现出典型 DLC 薄膜的拉曼光谱特征,即在 1 100 ~ 1 700 cm⁻¹ 范围内出现了很强

的宽峰.通常认为:典型 DLC 薄膜的 Raman 光谱曲线表现为 2 个宽峰,被称为 G 峰(位于 1 580 cm⁻¹)和 D 峰(位于 1 350 cm⁻¹),其中 D 峰来源于 sp² 碳簇的,即 D 峰为六元环状的石墨吸收峰,对应于 DLC 薄膜中无序的细小的石墨结构;而 G 模式代表的是平面伸缩振动的 sp² 碳簇,即包括所有 sp² 碳簇(链状和芳香环状)的吸收峰.

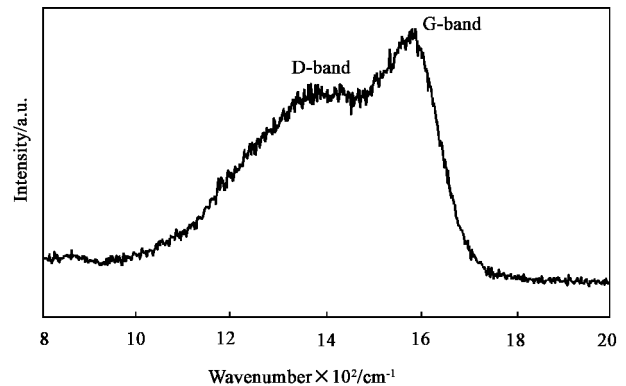


Fig. 4 Raman spectrum of a-C:H film

图 4 a-C:H 薄膜的 Raman 谱

图 5 为最终得到的织构化 a-C:H 薄膜的三维轮廓表面形貌照片.图 6 为沉积有 a-C:H 薄膜的织构化硅基底表面的凹坑截面 SEM 照片,从图 6 中可以看到:在凹坑周边具有连续的致密的 a-C:H 薄膜,厚度大约是 1 μm.通过纳米压入技术测得 a-C:H 薄膜的纳米硬度是 22 GPa.由于在凹坑侧壁具有非常弱的局部偏压电场强度,且电场方向与粒子运动方向平行,因而在凹坑侧壁的薄膜非常薄,但由

于凹坑侧壁在摩擦过程中不承受载荷, 因而对织构化的 a-C:H 薄膜的摩擦性能不产生影响。

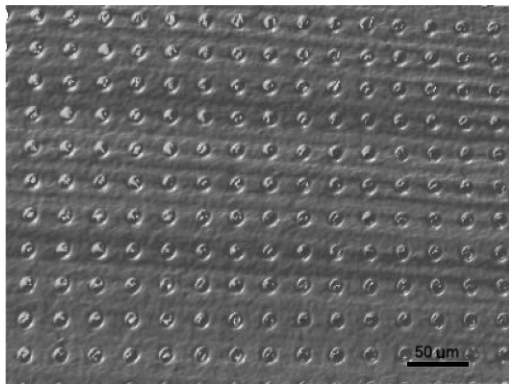


Fig. 5 Surface morphology of textured a-C:H film
图 5 织构化 a-C:H 薄膜的三维轮廓表面形貌图

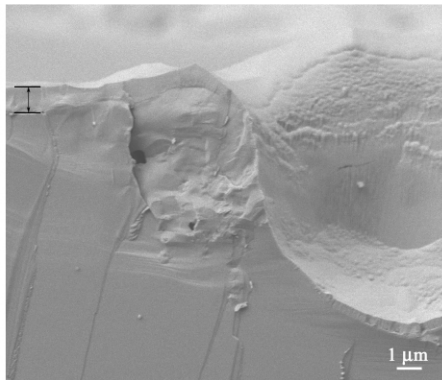


Fig. 6 SEM micrograph of the pit on textured a-C:H film

图 6 织构化 a-C:H 薄膜表面凹坑的 SEM 照片

2.2 薄膜的摩擦磨损性能

图 7(a) 和 8(a) 显示了未织构的 a-C:H 薄膜和 DLC 薄膜在 0.1 N 微载荷和 3 N 小载荷下的摩擦系数曲线。从图中可见: 未织构的 a-C:H 薄膜在 2 种载荷下初始阶段的摩擦系数都相对较高, 随着滑动周期的增加, 摩擦系数逐渐减少并达到稳定值。图中所示结果与已报道 DLC 薄膜的摩擦学性能一致: DLC 薄膜在较高载荷 (> 1 N) 下通常能够保持较低的摩擦系数 (< 0.1), 而在微载荷 (< 0.5 N) 下却表现出较高的摩擦系数, 且摩擦系数曲线波动很大, 非常不稳定。通常 DLC 薄膜的摩擦系数随着载荷的增加而逐渐减小, 并趋向于 DLC 薄膜在小载荷下的摩擦学特性。以下进行简单分析: 由于钢球对偶和 a-C:H 薄膜表面遵循实际粗糙表面接触理论, 即表面的粗糙峰高度按照概率密度函数分布, 因

此当两表面处于弹性接触状态时, 实际接触面积 A 和接触峰点的总载荷量 W 分别如式 (1) [33] 所示。

$$A = \pi n R \sigma \exp\left(-\frac{h}{\sigma}\right)$$

$$W = \frac{4}{3} n E R^{1/2} \sigma^{2/3} \exp\left(-\frac{h}{\sigma}\right)$$
(1)

式中: σ 为弹性表面的均方根粗糙度; h 为两表面粗糙峰中心线的距离; R 为微凸体的顶端曲率半径; E 为两表面的综合弹性模量; n 为粗糙表面的峰点数。

由此可知, 实际接触面积和接触峰点数目均与载荷呈线性关系。当两表面处于塑性接触状态时, 实际接触面积 A 和接触峰点的总载荷量 W 分别如式 (2) [33] 所示。

$$A = 2\pi n R \int_h^\infty (z-h) \varphi(z) dz$$

$$W = 2\pi n R \sigma_s \int_h^\infty (z-h) \varphi(z) dz$$
(2)

可以发现实际接触面积与载荷依然呈线性关系, 即两个实际工程表面接触时, 不论微凸体的顶端在弹性变形范围, 还是在塑性变形范围, 变形后所形成的实际接触面积 A 均与法向载荷 W 之间呈简单的线性关系, 因此根据式 (3) 摩擦系数应该不随载荷变化, 即弹性赫兹接触理论 [33] 无法解释摩擦系数随载荷增大而减小的规律。

$$\mu = \frac{S \cdot A}{W}$$
(3)

式中, S 为剪切强度。

由于影响摩擦系数的因素很多, 并且在一定载荷下各摩擦系数分量会随着摩擦时间而逐渐变化, 因此最终的摩擦系数可以表述为式 (4) [26, 33]。

$$\mu(t) = \mu_a(t) + \mu_p(t) + \mu_r(t)$$
(4)

μ_a 是由摩擦对偶表面性质决定的黏着摩擦系数; μ_p 是由摩擦对偶表面粗糙度和硬度决定的表面塑性变形产生的摩擦系数; μ_r 是由摩擦对偶表面粗糙度决定的表面微凸体的弹性碰撞产生的摩擦系数。根据上述实际粗糙表面接触理论可以知道, 在表面粗糙度不变的情况下, μ_a 不随载荷变化, 而由摩擦对偶表面或界面间的最低剪切应力决定。

在载荷非常小时, 由于摩擦对偶间的犁沟及微凸体的断裂非常小, 因此 μ_p 分量可以忽略, 摩擦系数主要是由 μ_a 和 μ_r 决定。而当载荷增大时, 初始阶段摩擦系数依然会很高, 然而随着持续的往复摩擦, 一些表面尖锐的微凸体会逐渐发生疲劳断裂 (这也是造成摩擦系数波动很大的原因), 这些断裂产生

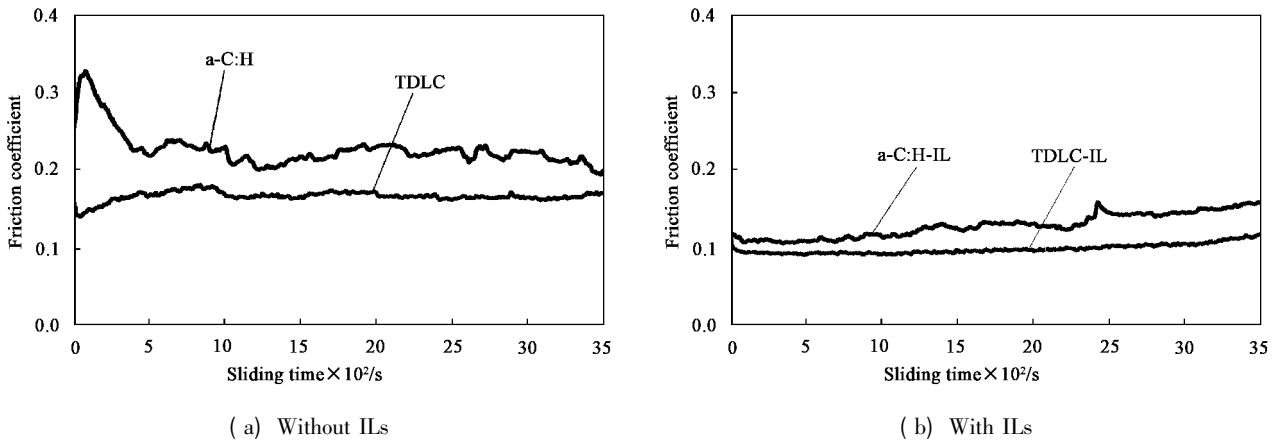


Fig. 7 Variation in friction coefficient with sliding time for a-C:H and TDLC films at a load of 0.1 N

图7 薄膜在 0.1 N 载荷下摩擦系数随时间的变化

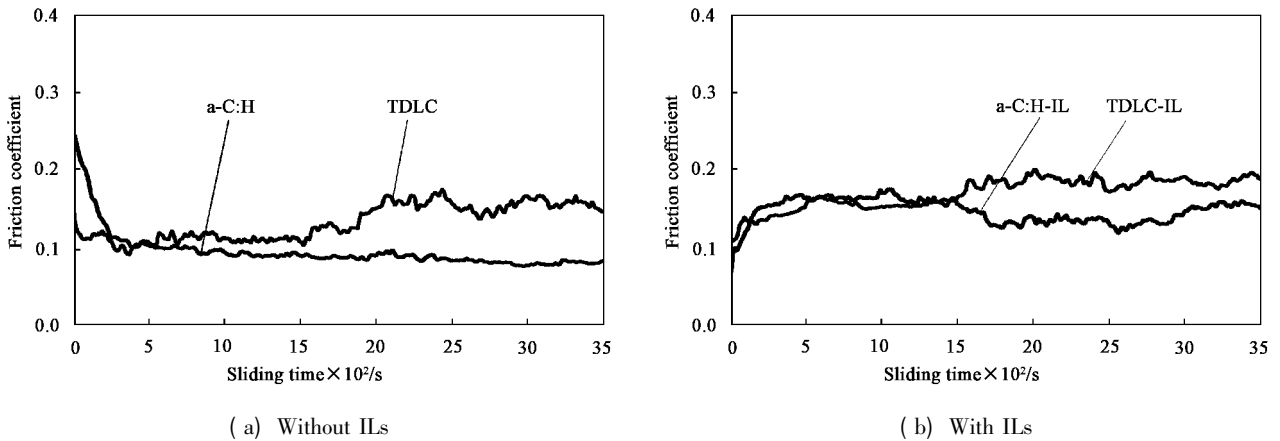


Fig. 8 Variation in friction coefficient with sliding time for a-C:H and TDLC films without ILs with ILs at a load of 3 N

图8 薄膜在 3 N 载荷下摩擦系数随时间的变化

的非常微小的磨屑会进入粗糙表面的凹坑处,不会对 μ_p 产生影响,此时表面粗糙度逐渐减小, μ_r 值也随之逐渐减小,同时磨合的表面逐渐趋向于理想的粗糙表面弹性接触状态,这种状态下接触面积与载荷的关系式如式(5)^[33]所示。

$$W = \frac{4E}{3\pi^{3/2}n^{1/2}R}A^{3/2} \quad (5)$$

由上述公式发现接触面积与载荷的 $2/3$ 次方成正比,根据式(3) μ_a 将随着载荷增大而减小,因此最终的综合摩擦系数 μ 将随载荷增大而逐渐减小,可以推知,当载荷进一步增大后,此时由于接触表面进入了理想粗糙表面塑性接触状态,这种状态下接触面积与载荷的关系式见式(6)^[33]。

$$W = 2\sigma_s A \quad (6)$$

式(6)中, σ_s 是接触表面屈服应力,由此可知实际接触面积与载荷成正比,因此 μ_r 将不再随载荷的增大而进一步减小了,而高载下产生的微小磨屑会对

a-C:H 薄膜产生轻微的擦伤,增加摩擦系数 μ_p ,但与此同时,这些磨屑也会诱导 a-C:H 薄膜表面的石墨化^[34],以及对偶表面的转移层均将维持薄膜非常低的摩擦系数^[35-36]。如图 8(a) 所示,如果载荷进一步增大,形成的磨屑或局部脱落的碎屑将加剧对 a-C:H 薄膜的犁沟磨损,因而急剧增大摩擦系数 μ_p ,同时增大的磨痕也显著增加了摩擦对偶的实际接触面积,在载荷不变的情况下,这将再次增大摩擦系数,最终导致薄膜失效。

由以上分析可以得出:未织构的 a-C:H 薄膜在 0.1 N 微载荷下摩擦时,摩擦对偶表面微凸体之间机械啮合作用(弹性碰撞)和高的固体表面黏着(剪切应力)造成了较高且不稳定的摩擦系数,如图 7(a) 所示。随着往复滑动周期的增加,表面一些尖锐的微凸体被磨平,因此摩擦系数逐渐降低并趋于稳定。TDLC 薄膜显示出稳定的,且低于未织构的 a-C:H 薄膜的摩擦系数,并且具有明显缩短的初

始磨合时间.这是由于在微载荷下 a-C:H 薄膜的织构化显著缩小了摩擦对偶间的实际接触面积.根据式(3),在外加载荷不变的情况下,这将减小摩擦副间的黏着摩擦系数.另外,由于外加载荷不变,减小的实际接触面积上的接触应力将显著增大,使得实际接触面积中的接触微凸体发生更大的弹性变形或塑性变形(一定程度上会稍微增大实际接触面积,但由于织构的存在,实际接触面积总体上是减小的).摩擦表面很快被磨平,因而摩擦初始阶段的磨合时间非常短.

图7(b)显示表面涂覆有离子液纳米薄膜的未织构 a-C:H 薄膜和 TDLC-IL 复合薄膜在 0.1 N 微载荷下的摩擦系数曲线.对比图7(a)和7(b)发现:涂覆离子液体纳米薄膜的未织构 a-C:H 薄膜和 TDLC-IL 复合薄膜的摩擦系数均相应减小了,且摩擦系数曲线相对平滑.未织构的 a-C:H 薄膜也表现出缩短的初始磨合时间.这是由于在微摩擦状态下,涂覆在 a-C:H 薄膜表面的离子液体纳米薄膜能够隔离固体表面,有效防止固体与固体间的直接接触,且流动的离子液体具有很低的剪切强度,能够显著减小摩擦系数 μ_a .同时离子液体薄膜能够吸收缓冲微凸体间的弹性碰撞能,这将显著减小黏着摩擦系数 μ_a 和机械啮合引起的摩擦系数 μ_r ,因而表现出更加稳定的摩擦系数曲线.另外,TDLC-IL 复合薄膜具有相对最小的实际接触面积,因而具有最低的摩擦系数.

如图8(a)所示,在 3 N 的小载荷下,TDLC 薄膜在开始的 25 min 内具有较低的摩擦系数,且较大的接触应力显著地缩短了初始磨合时间.然而,这种低的摩擦系数不太可能是由于织构化 a-C:H 薄膜的表层石墨化,这是因为小的磨屑是诱导类金刚石薄膜石墨化的主要因素(具有最低的石墨化温度)^[26],而大多数小的磨屑会进入到凹坑内,因而这一阶段的低摩擦系数是由载荷显著增大而 TDLC 薄膜的实际接触面积增幅不大导致的.

图8(b)显示了表面涂覆有离子液体纳米薄膜的未织构 a-C:H 薄膜和 TDLC-IL 复合薄膜在 3 N 小载荷下的摩擦系数曲线.从图8(b)中可以发现:在小载荷下离子液纳米薄膜并未改善未织构和织构化 a-C:H 薄膜的摩擦系数.这是由于离子液体纳米薄膜在小载荷下很快就被磨穿,故未能起到减摩的作用,同时破裂的润滑剂分子在高的接触应力下对 a-C:H 薄膜的摩擦性能具有一定的恶化作用,这可能是由于离子液体分子的存在不利于 a-C:H

薄膜的石墨化和对偶表面转移膜的形成.

继续摩擦,TDLC 薄膜的摩擦系数则逐渐增大,并明显高于未织构的 a-C:H 薄膜的摩擦系数,且非常不稳定.这是因为在长时间的小载荷往复摩擦过程中,在承受很大局部接触应力的织构边缘会产生疲劳裂纹,发生 a-C:H 薄膜的局部脱离,局部脱落的较大碎屑将加剧摩擦系数的波动.在图9三维轮廓摩擦表面形貌图中可以发现明显的 a-C:H 薄膜局部脱落现象.

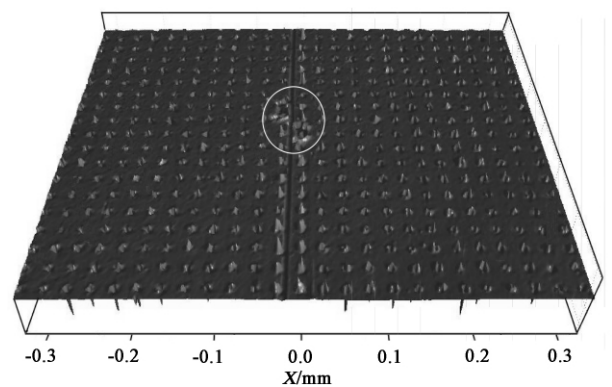


Fig. 9 Image of the worn surface of textured a-C:H film at load of 3 N

图9 TDLC 薄膜的三维轮廓摩擦表面三维形貌图

3 结论

a. 参数织构化 a-C:H 薄膜的实际接触面积减小,接触应力增大,在微载荷下显著降低了 a-C:H 薄膜的微观摩擦系数,缩短了初始磨合时间.涂覆离子液体纳米薄膜后,低剪切强度离子液体减小了固体表面间的黏着,进一步降低了微摩擦系数.

b. 参数织构化 a-C:H 薄膜在小载荷长时间的摩擦过程中,由于大的接触应力导致织构边缘薄膜的局部脱落导致宏观摩擦性能并无优势.

c. 有无织构的 a-C:H 薄膜涂覆离子液体薄膜后都显示出较高的宏观摩擦系数.这是由于在小载荷下离子液体纳米薄膜将瞬间破坏,且残留的离子液体不利于 a-C:H 薄膜表面的石墨化和对偶表面转移膜的形成.

参考文献:

- [1] Bhushan B. Nanotribology and nanomechanics in nano/biotechnology [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2008, 366: 1 499 - 1 537.

- [2] Palacio M , Bhushan B. Ultrathin wear - resistant ionic liquid films for novel MEMS/NEMS applications [J]. *Advanced Materials* 2008 20: 1 194 - 1 198.
- [3] Rha J J , Kwon S C , Cho J R , *et al.* Creation of ultra - low friction and wear surfaces for micro - devices using carbon films [J]. *Wear* 2005 259: 765 - 770.
- [4] Bhushan B. Tribology on the macroscale to nanoscale of microelectromechanical system materials: a review [J]. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers , Part J: Journal of Engineering Tribology* 2001 215: 1 - 18.
- [5] Izatt R M , Pawlak K , Bradshaw J S , *et al.* Thermodynamic and kinetic data for macrocycle interaction with cations and anions [J]. *Chemical Reviews* 1991 91: 1 721 - 2 085.
- [6] Wilkes J S. A short history of ionic liquids - from molten salts to neoteric solvents [J]. *Green Chemistry* 2002 4: 73 - 80.
- [7] Hagiwara R , Ito Y. Room temperature ionic liquids of alkylimidazolium cations and fluoroanions [J]. *Journal of Fluorine Chemistry* 2000 105: 221 - 227.
- [8] Wang H Zh , Ye Ch F , Liu W M. Tribological behavior of the ionic liquid of 1 - methyl - 3 - butyl - imidazolium hexafluorophosphate as a lubricant [J]. *Tribology* , 2003 , 23 (1) : 38 - 41 (in Chinese) [王海忠 , 叶承峰 , 刘维民. 1 - 甲基 - 3 - 丁基咪唑六氟磷酸盐离子液的摩擦学性能 [J]. *摩擦学学报* 2003 23 (1) : 38 - 41].
- [9] Zhang Sh M , Li J , Dai C , *et al.* Tribological behaviour study of two ionic liquids [J]. *Lubrication Engineering* 2006 9: 40 - 43 (in Chinese) [张晟卯 , 李健 , 代闯 . 两种离子液体的摩擦学行为研究 [J]. *润滑与密封* 2006 9: 40 - 43].
- [10] Yu B , Guo Zh G , Go P , *et al.* Preparation and tribological performance of ionic liquid films on various substrates [J]. *China Surface Engineering* 2005 2: 33 - 34 (in Chinese) [于波 , 郭志光 , 高平 . 不同基底上离子液体薄膜的制备及其摩擦学性能的研究 [J]. *中国表面工程* 2005 2: 33 - 34].
- [11] Pu J B , Jiang D , Wang L P , *et al.* Micro/nano - tribological behaviors of crown - type phosphate ionic liquid ultrathin films on self - assembled monolayer modified silicon [J]. *Surface & Coating Technology* 2011 205: 4 855.
- [12] Pu J B , Wang L P , Mo Y F , *et al.* Preparation and characterization of ultrathin dual - layer ionic liquid lubrication film assembled on silica surfaces [J]. *Journal of Colloid Interface Science* 2011 354: 858.
- [13] Pu J B , Wan S H , Wang L P , *et al.* Preparation and tribological study of functionalized graphene - IL nanocomposite ultrathin lubrication films on Si substrates [J]. *Journal of Physical Chemistry C* 2011 115: 13 275.
- [14] Pu J B , Liu X F , Wang L P , *et al.* Formation and tribological properties of two - component ultrathin ionic liquid films on Si [J]. *Surface and Interface Analysis* 2011 43: 1 332.
- [15] Pu J B , Huang D M , Wang L P , *et al.* Tribology study of dual - layer ultrathin ionic liquid films with bonded phase: Influences of the self - assembled underlayer [J]. *Colloids and Surfaces A* , 2010 372: 155.
- [16] Zhao W J , Mo Y F , Pu J B , *et al.* Effect of cation on micro/nano - tribological properties of ultra - thin ionic liquid films [J]. *Tribology International* 2009 42: 828 - 835.
- [17] Zhao W J , Huang D M , Wang L P , *et al.* Influence of chain length on the micro/nano - tribological properties of ionic liquid ultra - thin films [J]. *Tribology* 2010 30 (6) : 614 - 619 (in Chinese) [赵文杰 , 黄德明 , 王立平 , 等. 链长对离子液体超薄膜微/纳摩擦学性能的影响 [J]. *摩擦学学报* , 2010 , 30 (6) : 614 - 619].
- [18] Zhang L , Feng D P , Xu B. Tribological characteristics of alkylimidazolium diethyl phosphates ionic liquids as lubricants for steel - steel contact [J]. *Tribology Letters* , 2009 , 34: 95 - 101.
- [19] Jiang D , Hu L T , Feng D P. The Tribological properties of phosphate ionic liquid as lubricant for steel/Al Tribo - couple [J]. *Tribology* 2011 31 (6) : 599 - 603 (in Chinese) [姜栋 , 胡丽天 , 冯大鹏. 磷酸酯离子液体对钢/铝摩擦副的摩擦性能研究 [J]. *摩擦学学报* 2011 31 (6) : 599 - 603].
- [20] Charitidis C A. Nanomechanical and nanotribological properties of carbon - based thin films: A review [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 2010 28: 51 - 70.
- [21] Robertson J. Diamond - like amorphous carbon [J]. *Materials Science and Engineering: R Reports* 2002 37: 129 - 281.
- [22] Nalwa H S. *Handbook of thin film materials* [M]. New York: Academic Press 2002 (in America) .
- [23] Grill A. Diamond - like carbon: state of the art [J]. *Diamond and Related Materials* , 1999 8: 428 - 434.
- [24] Burton Z , Bhushan B. Hydrophobicity , adhesion , and friction properties of nanopatterned polymers and scale dependence for micro - and nanoelectromechanical systems [J]. *Nano Letters* , 2005 5: 1 607 - 1 613.
- [25] Bandorf R , Luthje H , Henke C , *et al.* Tribological behaviour of thin a - C and a - C: H films with different topographic structure under rotating and oscillating motion for dry lubrication [J]. *Surface & Coating Technology* 2004 188: 530 - 533.
- [26] Bhushan B. Adhesion stiction: mechanisms , measurement techniques , and methods for reduction [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B* 2003 21: 2 262 - 2 296.
- [27] Hu T C , Zhang Y S , Hu L H. Tribological investigation of MoS₂ coatings deposited on the laser textured surface [J]. *Wear* , 2012 278 - 279: 77 - 82.
- [28] Hu T C , Hu L T , Zhang Y S. Preparation of composite lubrication structure and its tribological properties on 45# steel surface [J]. *Tribology* 2012 32 (1) : 14 - 20 (in Chinese) [胡天昌 , 胡丽天 , 张永胜. 45# 钢表面复合润滑结构的制备及其摩擦性能研究 [J]. *摩擦学学报* 2012 32 (1) : 14 - 20].
- [29] 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 (in Chinese) [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].
- [30] Hu T C , Hu L T , Ding Q. Tribological properties of laser

- textured surfaces of 45[#] steel under dry friction [J]. *Tribology*, 2010, 30 (1): 46 - 52 (in Chinese) [胡天昌, 胡丽天, 丁奇. 45[#]钢表面激光织构化及其干摩擦特性研究[J]. *摩擦学学报* 2010, 30 (1): 46 - 52].
- [31] Ding Q, Wang L P, Wang Y X, *et al.* Improved tribological behavior of DLC films under water lubrication by surface texturing [J]. *Tribology Letters* 2011, 41: 439 - 449.
- [32] Huddleston J G, Willauer H D, Swatoski R P, *et al.* Room temperature ionic liquids as novel media for 'clean' liquid - liquid extraction [J]. *Chemical Communication*, 1998, 16: 1765 - 1766.
- [33] Bhushan B. *Introduction to tribology* [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [34] Haque T, Morina A, Neville A, *et al.* Effect of oil additives on the durability of hydrogenated DLC coating under boundary lubrication conditions [J]. *Wear* 2009, 266: 147 - 157.
- [35] Erdemir A, Halter M, Fenske G R, *et al.* Friction and wear mechanisms of smooth diamond films during sliding in air and dry Nitrogen [J]. *Tribology Transaction* 1997, 40: 667 - 675.
- [36] Grill A. Tribology of diamondlike carbon and related materials: an updated review [J]. *Surface & Coating Technology*, 1997, 94: 507 - 513.

订 阅 指 南

本刊为中国科学院兰州化学物理研究所主办、科学出版社出版并向国内外公开发行的覆盖摩擦学各分支学科的综合性学术期刊(双月刊)。本刊为中国科学院文献评价中心《中国科学引文数据库统计源期刊》和科技部中国科学技术信息研究所《中国科技论文统计源期刊》,已连续五版列入《中文核心期刊要目总览》,已被美国《工程索引(EI)》、《金属文摘》、《化学文摘(CA)》、《剑桥科学文摘(CSA)》以及《日本科技文献速报(JST)》等国际知名检索系统收录。

本刊主要报道摩擦学设计、摩擦力学、摩擦化学、摩擦学材料、摩擦学表面工程、特殊工况下的摩擦学、摩擦学测试技术与设备及摩擦学系统工程与应用等重要的基础研究和应用研究新成果。设有研究简报、研究论文、工程应用、专家论坛、评述与进展、回顾等栏目。

读者对象主要是从事摩擦学研究和新材料研制的科研技术人员及高等院校相关专业的教师和研究生以及工业领域的技术人员等。

订 阅 方 式

1 邮局订阅

全国各地邮局均可订阅,邮发代号:54-42,2012年定价:30.0元/期,180.0元/年(全年6期)

2 直接汇款至编辑部订阅(可随时订阅)

方式一: 邮局寄汇

地 址: 兰州市天水中路18号中国科学院兰州化学物理研究所《摩擦学学报》编辑部收。

邮 编: 730000

方式二: 银行汇款

开 户 行: 中国工商银行兰州市开发区支行

户 名: 中国科学院兰州化学物理研究所

帐 号: 2703000909026405762(银行汇款请注明“《摩擦学学报》编辑部”)