

文章编号 1004-924X(2013)06-1545-08

不同金属基材上类金刚石薄膜的摩擦特性

郑锦华^{1,2*}, 李聪慧¹, 张冲¹, 晁云峰¹

(1. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南瑞邦能源科技开发有限公司, 河南 郑州 450001)

摘要:针对类金刚石(DLC)薄膜在精密机械零件中的应用,研究了在常温条件下沉积高界面强度的 DLC 薄膜的技术,以提高 DLC 薄膜与金属基材之间的结合强度。通过在基材与薄膜之间沉积加入 a-Si:H 中间过渡层,研究了在不同金属基材上 DLC 薄膜的结合强度。采用 Ball-on-Disk 方法评价了薄膜的摩擦特性并测定其摩擦系数、疲劳破坏寿命和磨耗。实验结果表明:在薄膜与金属基材之间加入 a-Si:H 过渡层后,界面的结合(键合)强度得到了明显的改善,在金属基材上沉积的 DLC 薄膜在磨耗过程中被完全磨穿而没有发生剥离。实验显示,在自制的化学气相沉积 RF-DCCVD 装置上沉积的 DLC 薄膜的最大沉积厚度是 3.3 μm ;在 1 μm 厚度的薄膜上施加 2.94 N 的负荷(点载荷),其疲劳破坏寿命达到了 70 万循环;DLC 薄膜与 SiC, Si₃N₄, SUS304 和 SUJ2 材料之间的摩擦系数为 0.1~0.15。得到的结果验证了薄膜与金属间的结合强度和摩擦特性能够满足精密机械零件的使用要求。

关键词:类金刚石(DLC)薄膜;中间过渡材料;摩擦和磨耗;薄膜界面强度;化学气相沉积(CVD)

中图分类号:O484.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132106.1545

Friction properties of DLC film on different metal substrates

ZHENG Jin-hua^{1,2*}, LI Cong-hui¹, ZHANG Chong¹, CHAO Yun-feng¹

(1. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan Reborn Energy Technology Development Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

* Corresponding author, E-mail: zhengjh2005@yahoo.com.cn

Abstract: According to the applications of Diamond-Like Carbon(DLC) films to precision mechanical parts, a method to deposit a DLC film by DC-CVD at room temperature was explored to improve the bonding strength between film and metal substrates. The a-Si:H intermediate material was intercalated between a substrate and a DLC film, and friction properties and bonding strength of the a-Si:H:DLC films deposited on different metal substrates were investigated and evaluated, and then their friction coefficients, fatigue failure life and the wear were determined by Ball-on-Disk. Experimental results show that the bonding strength at the interface is greatly improved by intercalating a-Si:H intermediate layer, the DLC film is completely worn out without delaminating. Moreover, the maximum thickness of film deposited by the equipment developed by ourselves is less than 3.3 μm , the failure lifetime within the thickness of 1 μm is up to 0.7 million cycles as applying a load of 2.94 N (point load), and the friction coefficients between DLC film and SiC, Si₃N₄, SUS304, SUJ2 are about 0.1-0.15. In conclusion, the bonding strength and friction properties of the film can satisfy the requirements of precision mechanical parts.

收稿日期:2013-01-04;修订日期:2013-02-22.

基金项目:河南省科技创新人才计划资助项目(No. 114100510025)

Key words: Diamond-like Carbon(DLC) film; intermediate material; friction property; failure life-time; Chemical Vapour Deposition(CVD)

1 引 言

DLC 类金刚石(Diamond-Like Carbon)薄膜是最具有代表性的低摩擦固体润滑耐磨薄膜材料,它是碳的一种非晶亚稳态结构,在微观上主要由一定比例的 sp^3 键和 sp^2 键混合组成。DLC 类金刚石薄膜由于它在化学和物理性能上有很多优点,因而在很多领域中得到应用,如精密仪器、精密模具、加工工具、机械零件、生体假肢、记录媒体和微电子机械系统(MEMS)等^[1-2],尤其是近年来在 DLC 薄膜制备、性能及应用等方面均取得了重大进展。但是在界面强度上仍存在问题:(1)膜内高的残余应力,当高能量的碳离子嵌进基板或薄膜中而无法移动扩散时,DLC 膜中的 sp^3 键会因结构因素而发生扭曲,造成膜中的变形程度提高,使其产生皱摺而发生剥落现象。(2)类金刚石薄膜与金属基材的性质差异,特别是热膨胀系数的差异,使得薄膜会在界面剪切应力的作用下,而造成剥落的行为^[3]。

近年来,为改善 DLC 薄膜的膜基结合强度,发展了过渡层膜技术^[4-7],通过一层或多层的中间过渡层系统作用于硬质镀层材料和基材之间改善它们的适应性,缓解化学键、热膨胀系数等性能的差异,改善膜基结合力。Deng^[8]采用 Ti/TiN/TiCN/TiC 作过渡层,获得了良好的效果;Ma 等人^[9]采用磁控溅射和等离子体浸没离子注入复合技术在不锈钢上沉积了 N/TiN/Ti(N,C)/DLC 梯度复合膜,降低了膜层的内应力,展现出作为空间结构材料的应用潜能;Endo^[10]提出在 a-C:F 薄膜上沉积一层 a-C:H 缓冲层,然后再沉积一层 SiO_2 薄膜,可以改善膜的黏附性。近年,日本东京工业大学为了缓解 DLC 薄膜内的压缩残余应力,开发了一种 DLC 薄膜表面的微小单元分割技术^[11],能够有效地释放由于基材收缩而产生的残余应力。

国内也做了类似的研究,如北京科技大学、上海交通大学、吉林大学、中科院兰州化学物理所等。兰州化学物理所研究了 Ti/Al-DLC 复合薄膜的摩擦学性能,并取得了良好的效果^[12];黄立

业^[13]等人认为类金刚石薄膜划擦过程经历了薄膜的变形阶段、薄膜与基体共同变形阶段以及薄膜的剥离阶段。薄膜的剥落主要是由于压头尖端处应力集中使得薄膜内部产生裂纹,以及薄膜与基体变形恢复不同步造成的膜基脱开共同作用的结果。因此,提高其抗剥落的途径应该是:减小膜内残余应力和增加界面的黏附力。

本研究在以前研究的基础上^[14],采用含有不定型 a-Si:H 的中间过渡材料,以缓解薄膜与基体由于热膨胀系数不同造成的影响并改善界面化学键合方式,a-Si:H 中间过渡层材料与金属基材和 DLC 薄膜都有较好的附着强度。通过尖端放电,在中间层上形成非沉积区。利用自制的 RF-DC 双电源 CVD 化学气相沉积装置沉积出具有非连续分割单元表面的 DLC 薄膜^[15-17],该分割单元边界能够释放 DLC 薄膜内的压缩残余应力。通过选用不同基材,考察所制备复合膜的结合强度,又选择了几种不同摩擦副材料来评价 DLC 薄膜的摩擦特性。另外,厚膜化技术的关键仍然是界面强度问题,随着膜厚度的增加,将引起更大的膜内残余应力。因此,本文最后对如何减小膜内残余应力和提高界面强度做了进一步研究。

2 实验方法

本实验所用的基材是厚度为 4 mm 的工业用纯钛板、Ti-6Al-4V、S45C 和 SKH51。首先把这些基材加工成直径为 $\phi 50$ mm 的圆片,对基材表面先用 1 000 目的砂纸研磨,然后再抛光成镜面,最后在超声波中用丙酮洗净。

图 1 是自制的 RF-DC 双电源 CVD 化学气相沉积装置概略图^[15]。电源使用日本真空株式会社生产的 DCS0052B(额定输出:800 V、1.25 A);沉积气体为 Ar、 H_2 及乙炔(C_2H_2);中间过渡材料使用氢硅化物气体 Si_xH_y 和 H_2 。实验过程如下:系统达到 5×10^{-3} Pa 的真空度后,通入氩气,真空压力控制在 20 Pa,施加 800 V 的电压,进行表面电刻蚀处理;接着导入氢硅化物气体,真空压力控制在 22.5 Pa,在一定的时间内用 30 W 的电力沉积 a-Si:H 过渡层;随后按一定比例导入

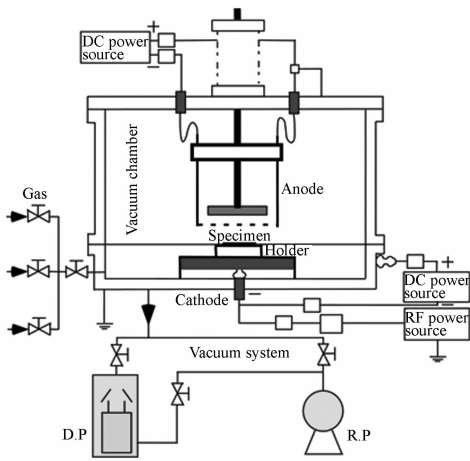


图 1 RF-DC 双电源 CVD 装置概略图

Fig. 1 Schematic diagram of RF-DC dual power CVD apparatus

C_2H_2 和 H_2 , 真空压力控制在 15 Pa, 使用 800 V 的满负荷电压沉积 DLC 薄膜, 薄膜沉积速度为 $1 \mu\text{m}/\text{h}$ 。使用不同的基材, 用以评价这种复合膜在不同基材上的结合强度。另外, 通过选择几种不同摩擦副材料来评价 DLC 薄膜的摩擦特性。通过长时间沉积, 研究该装置的最大沉积厚度。DLC 膜的摩擦特性实验在图 2 的 Ball-on-disk 装置上进行, 试验片被固定在转盘上, 转盘的滑动半径为 16 mm, 圆周滑动线速度为 0.1 m/s, 施加荷重 $P=2.94 \text{ N}$ 。在达到一定循环次数后, 用光学显微镜观察磨擦损耗轨迹的状态, 利用 EPMA 电子显微镜 (JXA-8900R/RL) 观察复合膜的断面情况, 同时用触针式表面粗糙度计测量磨擦损耗轨迹部断面曲线, 用于计算磨耗面积。另外, 在每一个循环周期, 测定其摩擦力, 用于计算摩擦系数 μ (F/P)。

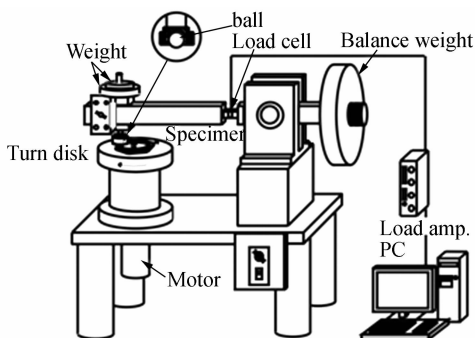


图 2 Ball-on-disk 装置概略图

Fig. 2 Schematic drawing of ball-on-disk wear test machine

3 结果与讨论

3.1 DLC 薄膜与金属基材的结合状态研究

常温下, 将 DLC 薄膜直接沉积在电侵蚀处理后的金属基材上。结果表明, 薄膜的附着力极弱。电子显微镜观察 (图 3) 显示, 薄膜与基材之间有一条几乎完整的裂纹, 这说明 DLC 膜中产生了较大的残余应力, 使界面与基材之间发生分离。因此, 在常温下, DLC 薄膜不能直接沉积在金属基材上。

为了使 DLC 膜与金属基材有好的结合强度, 考虑采用中间过渡材料的方法。薄膜层内残余应力对界面强度的影响很大, 膜层内的残余应力一般包括热应力 σ_{th} 和本征应力 σ_i 两部分, 热应力由薄膜与基底的热膨胀系数的差异所引起。经验公式为:

$$\sigma_{th} = E(\alpha - \alpha_s)(T_s - T_r)/(1 - \mu), \quad (1)$$

式中: E 、 μ 、 α 分别为薄膜层的弹性模量、泊松比和热膨胀系数, α_s 为金属基材的热膨胀系数, T_s 为沉积时基材表面温度, T_r 为室温。在沉积过程中, 由于原子的轰击, 使基材表面产生局部高温, 金属基材上沉积的 DLC 薄膜内产生较大的压缩残余应力, 热应力使得 DLC 膜与基材的附着力下降。过渡材料可以消除 DLC 膜与基材因晶格失配、热膨胀系数差异而造成的内应力, 同时可以阻止在沉积过程中薄膜与基材之间的直接反应, 如防止碳过度渗入基底影响 DLC 膜的生长, 在选择中间过渡材料时, 要考虑以下几点: (1) 热膨胀系数适中, 能够释放薄膜与基材之间的热应力; (2) 与金属材料 and DLC 膜均有较好的附着力; (3) 自身化学性质稳定, 具有一定的机械强度。常用的材料有 Si 及 IV a、V a、VI a 金属及其氮化物、碳化物和硼化物^[17]。按照过渡材料层的数量可以分为单一过渡层和复合过渡层。本研究中把 a-Si:H 中间过渡材料作为研究对象, 对 a-Si:H-DLC 复合薄膜与金属的结合状态进行了研究。

图 4 是 Ti 基材上沉积的 a-Si:H-DLC 复合薄膜的表面状态和界面结构的显微照片。由图 4 可见, 薄膜表面光滑, 没有发生剥离现象。通过观察断面, 可以看到 DLC 薄膜内结构致密, 在 DLC 膜与基材之间形成了厚度约为 $0.2 \mu\text{m}$ 的 a-Si:H 过渡层, 该过渡层与 DLC 薄膜及金属基材结

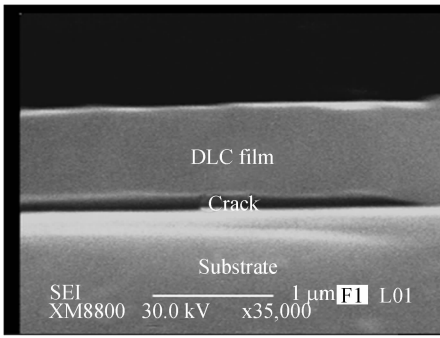


图 3 DLC 薄膜界面结构显微照片

Fig. 3 Micrographs of interface structure on DLC film

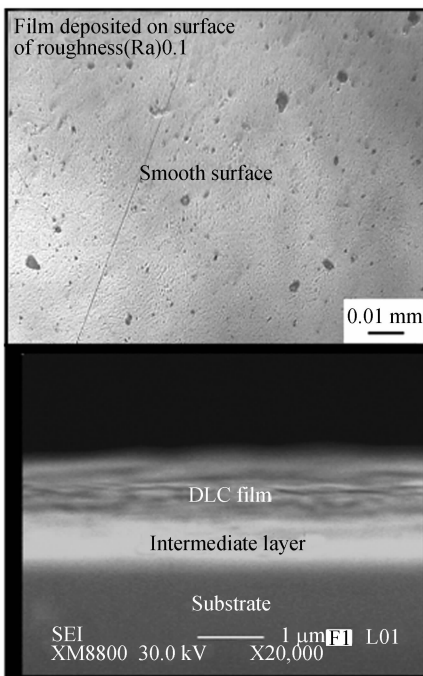


图 4 a-Si : H-DLC 薄膜界面结构显微照片

Fig. 4 Micrographs of interface structure on composite film(a-Si : H-DLC)

合紧密;可以观察到,在各界面上都出现了成分过渡层,成分过渡层对缓解残余应力有积极的作用。

3.2 在 Ti 基材上沉积 a-Si : H-DLC 复合薄膜的摩擦特性评价

利用 Ball-on-disk 方式对上述的 a-Si : H-DLC 复合薄膜进行摩擦特性评价。选择 SUJ2、SUS304、Si₃N₄、SiC 圆球分别作为摩擦副材料。图 5 是在不同摩擦副材料下,DLC 薄膜的摩擦特性曲线。由图 5 可见,摩擦趋势表现为:最初摩擦系数较高,随后摩擦系数迅速下降,达到一个稳定状态;随着摩擦的进行,摩擦系数有一个缓慢上

升的过程。通过光学显微镜观察摩擦轨迹的变化,其间有局部剥离(点蚀)的现象,局部剥离一旦发生,黏着摩擦增强,摩擦系数开始上升。摩擦系数与摩擦副的材料有一定关系,摩擦系数基本在 0.1~0.15 之间。总体来说,金属材料的摩擦系数要比陶瓷材料的稍高,但是上升速度却较慢。4 种磨擦副材料的组合中,Si₃N₄ 球作为摩擦副时,摩擦系数最低,接近 0.1;薄膜在磨耗途中发生了剥离,磨耗深度未达到 1 μm,其余未发生界面剥离。

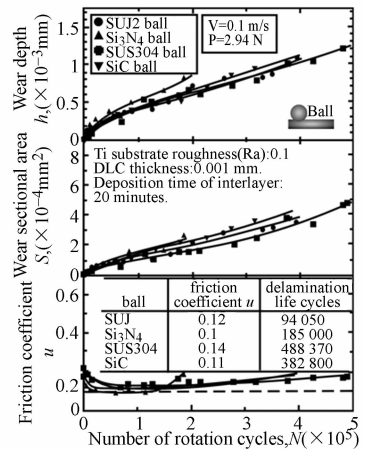


图 5 DLC 薄膜的摩擦特性曲线

Fig. 5 Friction and wear characteristic curves for DLC film

对磨耗量和磨耗深度进行观察,最初阶段变化速度最快,进入稳态后,磨耗速度则很缓慢,在接近中间过渡层时,磨耗量和磨耗深度的变化速度开始逐渐增加,这表明中间层的耐磨性比 DLC 薄膜差且摩擦系数也较高。通过磨耗速度的对比,金属球作为摩擦副材料的速度比较缓慢且具有较长的磨耗寿命。这种现象可以从材料硬度来分析,金属球的硬度小(SUJ2: Hv12 GPa, SUS304: Hv8 GPa),黏着摩擦主要发生在球的一侧,薄膜侧的硬度较高,磨耗速度较低,薄膜表现出较长的耐磨性。对于陶瓷材料来说,硬度(SiC: Hv29 GPa, Si₃N₄: Hv17 GPa)比金属要高很多,薄膜侧的磨耗则有所增加,表现出略大的磨耗速度。

磨耗的结果是,薄膜被完全磨光,但未发生整体剥离的现象,即使部分剥离发生,也没有造成薄膜整体的破坏,表现出了很强的界面强度。不锈钢球摩擦对的破坏寿命最长,达到了 48 万周。这

表明 a-Si:H 中间过渡材料层与 Ti 基材有足够的结合强度,同时与 DLC 薄膜材料也有很好的界面结合力。

3.3 在 Ti-6Al-4V 基材上沉积 a-Si:H-DLC 复合薄膜的摩擦特性评价

由于 a-Si:H 中间过渡层的加入,Ti 基材与 DLC 薄膜的结合强度有了很大的改善。Ti 合金材料作为工业用材具有同样的耐腐蚀性,同时又具备高强度和高刚性。在这里把 Ti-6Al-4V 作为基材,沉积与前面同样的 a-Si:H-DLC 复合构造膜。

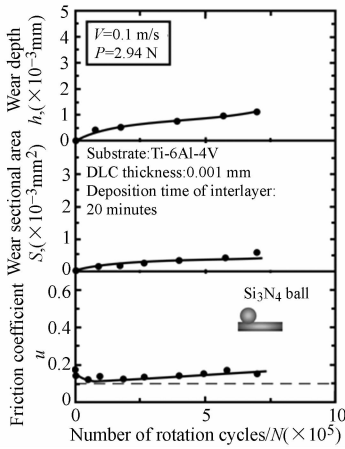


图 6 Ti-6Al-4V 基材上沉积的 DLC 膜的摩擦特性曲线
Fig. 6 Friction and wear characteristic curves of DLC film on Ti-6Al-4V substrate

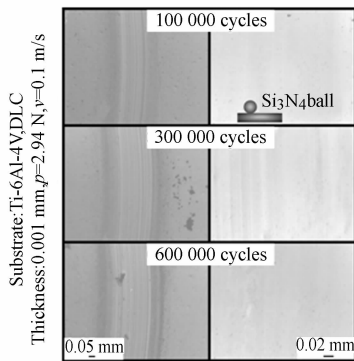


图 7 DLC 薄膜的磨损轨迹

Fig. 7 Surface view of wear scar in DLC film

在摩擦评价实验中,把摩擦系数最低的 Si₃N₄ 球作为摩擦副材料,对其摩擦特性进行评价。图 6 是摩擦特性曲线,实验结果表明,总体摩擦系数在 0.1~0.15 之间;在磨损过程中,未发生界面剥离,薄膜的破坏寿命达到了 700 000 cy-

cles。图 7 是该实验的摩擦轨迹显微照片,由图 7 可见,摩擦轨迹表面光滑,摩擦系数接近 0.1。当磨损循环次数达到 600 000 cycles 左右时,可以观察到薄膜颜色的变化,这说明薄膜成分发生变化。从磨损深度来看,已接近中间过渡层,磨损轨迹上出现点蚀,摩擦系数变大,直到中间过渡层被完全磨光,充分显示了极强的界面强度,表明 a-Si:H 中间过渡材料层对 Ti-6Al-4V 基材也适用。

3.4 在 S45C 基材上沉积 a-Si:H-DLC 复合薄膜的摩擦特性评价

实验表明 a-Si:H 中间过渡材料对 Ti 系基材有良好的界面结合强度,但是在工业中更常用的是铁系材料。本实验中采用常用的 S45C 材料作为基材,采用同样的成膜条件沉积 4 h,得到了较厚的 DLC 膜,并对这种厚膜的摩擦特性进行了评价。

评价结果如图 8 所示,摩擦系数接近 0.1,疲劳破坏寿命为 2 400 000 cycles,薄膜被完全磨光。这证明 a-Si:H 中间过渡材料对 S45C 基材也是有效的。

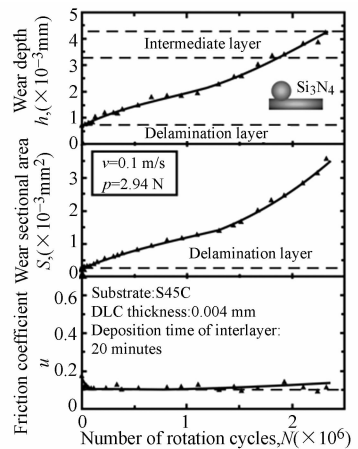


图 8 S45C 基材上沉积的 DLC 膜的摩擦特性曲线(厚膜)
Fig. 8 Friction and wear characteristic curves of DLC film on S45C substrate (thick film)

从磨损量和磨损深度曲线观察,最初有一个跃进过程,瞬间磨损深度达到了 0.7 μm 左右。图 9 是利用触针式表面粗糙度计测得的摩擦轨迹的轮廓形状,可以看出表层的膜厚是 0.67 μm。分析其形成原因,DLC 薄膜的电阻率高达 10¹⁴~10¹⁶ Ωcm。随着薄膜的沉积,薄膜的绝缘性也在

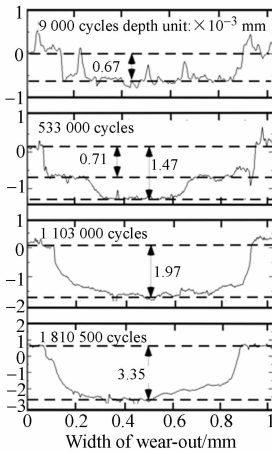


图 9 DLC 薄膜的磨损轨迹断面形状

Fig. 9 Changes in cross-section shape of wear scar

不断地增加,达到一定的膜厚后,电场强度变弱,薄膜沉积变的困难,出现了表面疏松层。这表明利用 DC 直流电源制作厚 DLC 膜较困难。据此说明,该装置的有效沉积范围在 $3.3 \mu\text{m}$ 以下。对图 8 的磨损曲线分析显示,最初的 $1 \mu\text{m}$ 厚度经历了 700 000 cycles 的磨损,与薄的薄膜相比耐磨性并未改变。随着膜厚度的增加,会导致膜内压缩残余应力增加,并且厚膜化处理对界面结合强度的要求更高。结果显示:a-Si:H 过渡材料的界面结合强度的强化非常有效。由于界面强度高,稳定磨损时间长,摩擦系数和磨损速度变的很小,这与薄膜表面抛光效应和球面的磨损而引起的接触应力降低有关。同样可以观察到摩擦一旦进入中间层附近,耐磨性变的较差。另外,也证明了铁系材料 SKH51 工具钢的界面强度也很高。可以得出:a-Si:H 中间过渡材料对铁系金属也有有效的结论。

参考文献:

- [1] CHARITIDIS C A. Nanomechanical and nanotribological properties of carbon-based thin films: A review [J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2010, 28(1):51-70.
- [2] ROBERTSON J. Diamond-like amorphous carbon [J]. *Materials Science and Engineering R*, 2002,

4 结 论

利用 RF-DC 双电源和自制的化学气相沉积 RF-DCCVD 装置,在常温条件下,在 Ti、Ti-6Al-4V、S45C、SKH51 基材表面上成功地沉积了 a-Si:H-DLC 复合薄膜;并且对在金属表面沉积 DLC 膜的条件和成膜方法进行了研究;同时对这些薄膜的摩擦特性也进行了评价,可以得到以下的结果:

(1)在常温下 DLC 薄膜直接沉积在金属基材表面时,界面结合强度极弱,界面上有明显的裂纹,而加入 a-Si:H 中间过渡层后,金属基材与 DLC 膜的界面结合强度得到了极大的改善。在 $p=2.94 \text{ N}$ 的情况下, $1 \mu\text{m}$ 厚度的 a-Si:H-DLC 复合薄膜的疲劳破坏寿命最长达到了 700 000 cycles,薄膜被磨穿而未发生剥离,表明有良好的界面结合(键合)强度。

(2) DLC 薄膜与摩擦副材料 SiC、 Si_3N_4 、SUS304、SUJ2 之间的摩擦系数为 $0.1 \sim 0.15$ 。 Si_3N_4 的摩擦系数最低,接近 0.1。金属材料摩擦副的摩擦系数略高,但是薄膜的磨损率却比较的低,疲劳破坏寿命比较长,而陶瓷材料摩擦副的摩擦系数略低,薄膜侧的磨损略大,疲劳破坏寿命略短。

(3)DLC 薄膜厚膜化沉积后,形成了表面疏松层,表明 DC 电源的有效成膜厚度是 $3.3 \mu\text{m}$,薄膜的疲劳破坏寿命达到了 2 400 000 cycles,平均 $1 \mu\text{m}$ 厚度薄膜的磨损循环次数为 700 000 cycles,表明厚膜化薄膜的耐磨性未发生改变;另外,薄膜也未发生剥离(或崩裂),厚膜化后,薄膜仍具有高的界面强度。

37(4-6):129-131.

- [3] FUJIMOTO A, OKADA M. Thermal durability of diamond like carbon films containing tungsten fabricated [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2012, 51: 06FD07-1-5.
- [4] J H ZHENG, M KATO, K NAKASA. Effect of intermediate layer on wear-delaminating life of low-frictional SiC-2.6mass% Ti film sputter-deposited

- on titanium substrate [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2010, 205(7):2532-2537.
- [5] 孙丽丽,代伟,张栋,等. Cr掺杂及Cr过渡层对类金刚石薄膜附着力的影响[J]. *中国表面工程*, 2010, 23(4):26-34.
- SHUN L L, DAI W, ZHANG D, *et al.*. The effect of Cr-doped and Cr interlayer on adhesive strength of diamond-like carbon films [J]. *China surface engineering*, 2010, 23(4):26-34. (in Chinese)
- [6] 王云峰. 复合类金刚石薄膜的制备及摩擦性能研究[D]. 兰州:兰州大学研究生论文, 2012, 6.
- WANG Y F. *A Study on Preparation and Tribological Properties of Composite DLC Films* [D]. Lanzhou: Lanzhou University graduate thesis, 2012, 6. (in Chinese)
- [7] 杨发展,沈丽如,高翠,等. 316不锈钢表面沉积厚类金刚石膜层的性能研究[J]. *功能材料*, 2012, 43(15):1994-1997.
- YANG F Z, SHENG L R, GAO C, *et al.*. Properties of diamond-like carbon films were deposited on 316 stainless? steel [J]. *Journal of Functional Materials*, 2012, 43(15):1994-1997. (in Chinese)
- [8] DENG J G, BRAUN M. Residual stress and microhardness of DLC multilayer coatings [J]. *Diamond and Related Materials*, 1996, 5(3): 478-482.
- [9] MA F, LI G. Diamond-like Carbon gradient film prepared by unbalanced magnetron sputtering and plasma immersion ion implantation hybrid technique [J]. *Materials Letters*, 2002, 57(1): 82-86.
- [10] ENDO K, TATSUMI T. Deposition of silicon dioxide films on amorphous carbon films by plasma enhanced chemical vapor deposition for low dielectric constant interlayer dielectrics [J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 70(9):1078-1079.
- [11] 足立雄介,青木佑一,大竹尚登. オイル潤滑下でのセグメント構造 DLC膜のトライボロジー特性評価 [J]. *日本機械学会論文集(C編)*, 2007, 74(737):169-173.
- ADACHI Y, AOKI Y, OHTAKE N. Tribological characterizations of DLC film with segment structure under oil lubrication [J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Ser. C*, 2007, 74(737):169-173. (in Japanese)
- [12] JIA Z, XIA Y, PANG X. Tribological behaviors of different Diamond-like carbon coatings on nitrided mild steel lubricated with benzotriazole-containing borate esters [J]. *Tribology Letters*, 2011, 41(1):247-256.
- [13] 黄立业,徐可为. 类金刚石碳膜在纳米划擦过程中的弹-塑性变形及断裂机制分析[J]. *金属学报*, 2001, 37(17):733-736.
- HUANG L Y, XU K W. Elasto-plastic deformation and fracture mechanism analysis of Diamond-like carbon film in Nano-scratch [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2001, 37(17): 733-736. (in Chinese)
- [14] ZHENG J H, CHEN Y. A study on interface strength of a-Si:H-DLC film [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 179-180:775-780.
- [15] 郑锦华. 高界面强度类金刚石薄膜材料的常温沉积设备 [P]. 专利号:ZL 2010 2 0673327. 2, 2011.
- ZHENG J H. *Deposition equipment of DLC films with high interfacial strength at room temperature* [P]. Patent No. ZL 2010 2 0673327. 2, 2011. (in Chinese)
- [16] 郑锦华. 高界面强度类金刚石薄膜材料的常温沉积设备及其方法. 中国, ZL 2010 1 0599609 [P]. 2012-07.
- ZHENG J H. Deposition equipment and method of DLC films with high interfacial strength at room temperature. China, ZL 2010 1 0599609 [P]. 2012-07. (in Chinese)
- [17] 廖家轩,夏立芳,孙跃. 氮和碳等离子体基离子注入铝合金表面氮化铝/类金刚石碳改性层的摩擦学特性[J]. *摩擦学学报*, 2001, 21(5): 324-329.
- LIAO J X, XIA L F, SUN Y. The tribological properties of AlN/DLC modified layer on 2024 aluminum alloy implanted with nitrogen and carbon by plasma based ion implantation [J]. *Tribology*, 2001, 21(5): 324-329. (in Chinese)

作者简介:



郑锦华(1965—),男,湖南常德人,特聘教授,高级研究员,1987年、1990年于郑州大学分别获得学士、硕士学位,2005年于日本国立广岛大学获得博士学位,曾担任日本广岛大学客座研究员、共同研究员和日本机械电子装备株式会社高级研究员,主要从事功能性薄膜的研究开发,在 SiC 薄膜和 DLC 薄膜方面的研究有独特的造诣,并在日本实现了产业化生产。E-mail: zhengjh2005@yahoo.com.cn



李聪慧(1987—),男,新疆塔城人,硕士研究生,2012年于郑州大学获得学士学位,主要从事功能性薄膜材料的研究开发,师从郑锦华教授从事 DLC 薄膜材料的研究工作。E-mail: liconghui1103@126.com



张冲(1987—),男,河南南阳人,硕士研究生,2011年于郑州大学获得学士学位,从事功能性薄膜材料的研究开发,师从郑锦华教授从事 DLC 薄膜材料的研究工作。E-mail: zzuzhangchong@163.com



晁云峰(1990—),男,河南驻马店人,硕士研究生,2012年于郑州大学获得学士学位,主要从事功能性薄膜材料的研究开发,师从郑锦华教授从事 DLC 薄膜材料的研究工作。E-mail: zzuchaoyunfeng@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)