

文章编号 1004-924X(2014)04-0934-08

类陨石坑表面类金刚石薄膜的制备及摩擦特性

郑锦华^{1,2*}, 张冲, 晁云峰¹, 李聪慧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:为了提高 DLC(Diamond-like Carbon)类金刚石薄膜与 SAE1060 碳素钢基材的结合强度,以延长发动机活塞环的使用寿命,研制了一种带有复合阳极的 RF-DCCVD 双电源化学气相沉积设备。利用锯齿结构的辅助阳极产生尖端放电,制备了具有微米类陨石坑非连续结构的 DLC 薄膜,并利用 Ball-on-Disk 摩擦评价试验机评价了薄膜的摩擦特性。着重研究了极间距 S-T 对薄膜表面类陨石坑密度的影响;最后利用拉曼光谱仪分析了薄膜结构和成分。结果表明:在同样的电压下,类陨石坑的密度随着电极间距的增加而减小,最佳电极间距 S-T 为 40~60 mm,此时不仅具有比较适中的类陨石坑密度,对 DLC 薄膜的摩擦特性影响不大,而且具有较强的界面结合强度。当 S-T 为 50 mm,施加载荷为 3 N 时,薄膜的破坏寿命达到了 130 万循环,比光滑表面的薄膜延长了 30 万循环。得到的结果显示微米类陨石坑非连续结构能够有效地释放膜内的残余压缩应力,延长 SAE1060 碳素钢基材上沉积类金刚石薄膜的使用寿命。

关键词:类金刚石薄膜;界面强度;摩擦特性;破坏寿命;残余应力;拉曼光谱

中图分类号:O484.2;TN304.055 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142204.0934

Deposition and friction properties of DLC films with micro-crater-like structures

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

(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: To enhance the adhesive strength between a Diamond-like Carbon (DLC) film and a SAE1060 substrate and to prolong the service life of engine piston rings, the RF-DCCVD dual power chemical vapor deposition equipment with a composite anode was developed. The auxiliary anode with zigzag was used to produce cutting-edge discharge, and the DLC films with micro-crater-like structures were formed. Then, the friction properties of the films were experimentally evaluated with a "Ball-on-Disk" wear testing machine. The effects of electrode spacing S-T on the density of the micro-crater-like on the surface of the films were studied and the structure and composition were determined by a Raman spectrometer. The experimental results indicate that the micro-crater-like density on the surface of DLC films decreases with the increase of the electrode spacing (S-T) under the same voltage. The best electrode spacing is 40-60 mm, in which there is a relatively moderate micro-crater-like

收稿日期:2013-12-04;修订日期:2014-01-23.

基金项目:河南省科技创新杰出人才计划资助项目(No. 114100510025);郑州市科技领军人才项目(No. 131PLJRC639)

density, a relatively strong adhesive strength at the interface and little effect on the friction characteristics. When S-T is 50 mm or so, there is a maximum in the failure lifetime, which reaches approximately 1.3 million cycles as applying the load of 3 N, and 300,000 cycles are increased over films with a smooth surface. In conclusion, the micro-crater-like discontinuous structures effectively reduce the residual compressive stress within films, and the failure life of DLC films deposited on SAE1060 substrates is effectively prolonged.

Key words: Diamond-like Carbon(DLC) film; interfacial strength; friction property; failure life; residual stress; Raman spectrum

1 引言

类金刚石薄膜(Diamond-like Carbon, DLC)是固体润滑薄膜材料中最具代表性的材料之一,由于含有 sp^3 金刚石结构成分和 sp^2 石墨结构成分,因而具有较低的摩擦系数和高的耐磨强度,已经广泛地用于各种运动机构的润滑及抗磨损^[1-3]。从成膜方法来看,等离子化学气相沉积(Chemical Vapor Deposition, CVD)是制造 DLC 薄膜材料的主要方法,大约占整个制造方法的 75% 以上;另外就是等离子物理气相沉积(Physical Vapor Deposition, PVD)技术,可以制备无氢 DLC 薄膜材料,主要用于汽车发动机的制造;其它还有通过热分解有机碳氢化合物沉积 DLC 薄膜的热 CVD 法以及通过激光照射分解沉积 DLC 薄膜的光 CVD 法等^[4-6]。

目前的研究主要集中在该材料的产业化应用方面,其中最重要的是薄膜材料与基材之间的结合强度^[7,8]。影响膜基结合强度的因素有两个:(1)薄膜材料与基材之间的热膨胀系数的差异,这会在薄膜内部产生大的残余压缩应力和界面剪切应力;(2)膜基材料之间的性质差异,包括晶格失配、化学键的形成以及界面化学等问题,这些问题使界面黏接力弱或不结合的情况普遍存在。在外加载荷的作用下,薄膜产生的剥离和脱落现象往往是以上两个原因共同作用的结果,要实现 DLC 薄膜的产业应用,就必须研究膜内残余应力的释放方法和提高界面黏接强度的手段,目前采用的方法有基材的表面处理、采用中间过渡材料以及多层薄膜结构等^[9-13]。

随着汽车制造业的发展,对汽车的动力性能要求越来越高。为了使汽车有强劲的动力,需要增加活塞的运行速度,而高速运行的活塞容易发

生“干摩”现象,该现象是由于活塞环与气缸的接触面发生供油不足,引发气缸或活塞环的快速磨损,从而影响发动机的性能和使用寿命。利用 DLC 薄膜提高活塞环的耐磨性,关键问题是要提高 DLC 薄膜与金属活塞环之间的结合强度,防止薄膜的脱落或剥离。充足的润滑油不但能够防止磨损和提高密封性,而且能够有效地降低摩擦接触处的温度,保证 DLC 薄膜的正常使用,但这要求开发一种适用于该使用要求的薄膜结构。多孔结构具有吸附和储存液体的性质,在 DLC 薄膜表面上形成微坑(或微孔)结构能够有效吸附和储存润滑油,改善气缸表面的润滑状况,防止“干摩”。本文利用自主设计制造的能够产生微米类陨石坑非连续分割表面 DLC 薄膜材料的设备,开发了一种在常温下沉积带有微米类陨石坑非连续表面 DLC 薄膜的沉积方法,以减小膜内的残余压缩应力;在增强界面结合强度方面采用 a-Si:H:C 的中间过渡材料,很好地解决了膜基结合强度问题^[14-15]。

2 实验方法

图 1 所示为自主研发的 RF-DCCVD 双电源化学气相沉积设备^[16-17]。通过该设备的复合阳极产生的尖端放电,在 DLC 薄膜表面形成了微米类陨石坑非连续的分割结构。另外,在薄膜沉积过程中,钨丝线圈阳极还能够作为热灯丝,实现热丝辅助 CVD 化学气相沉积过程,提高薄膜的沉积速度。

实验基材采用活塞环用 SAE1060 碳素钢,把厚度为 5 mm 的钢板加工成直径为 50 mm 的圆片,基材表面通过机械加工和研磨处理,使表面粗糙度 R_a 达到 0.08 的镜面,在超声波中用丙酮进行脱脂洗净处理。

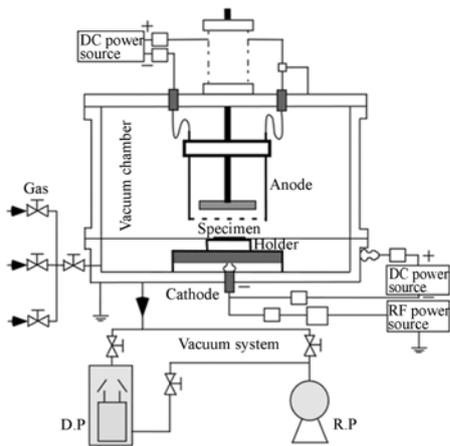


图 1 RF-DC 双电源 CVD 装置概略图

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

DLC 薄膜的沉积气体采用 Ar、H₂ 和乙炔 (C₂H₂)；中间过渡材料采用 SiH₄、Ar、C₂H₂ 和 H₂，以形成 a-Si:H:C 中间过渡层。实验过程：沉积室达到 5×10⁻³ Pa 的真空度后，通入 Ar 气，真空压力控制在 5 Pa，施加一定的电压，进行表面电蚀处理；然后按一定比例通入 SiH₄、C₂H₂ 和 H₂，沉积 a-Si:H:C 中间过渡层；在中间过渡层沉积完成后，关闭 SiH₄ 气体，C₂H₂、Ar 和 H₂ 以 1:5:10 的体积比连续导入，真空压力控制在 20 Pa，沉积 DLC 薄膜。在中间过渡层的沉积过程中，由于尖端放电，在薄膜表面形成了微米量级的类陨石坑，着重研究阴阳极间距 S-T 对薄膜表面类陨石坑密度的影响，对不同类陨石坑密度的薄膜界面强度和疲劳破坏寿命进行评价。薄膜的成分结构利用荷兰 Avantes 公司生产的 AvaRaman-

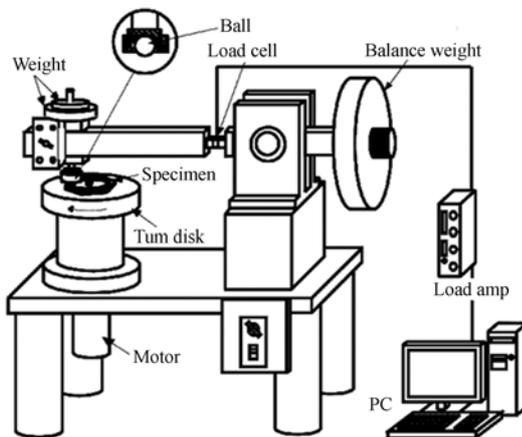


图 2 Ball-on-Disk 装置概略图

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

532 型拉曼光谱仪测定。

DLC 薄膜的摩擦特性评价在图 2 所示的 Ball-on-Disk 装置上进行，试验片被固定在转盘上，圆周线速度为 0.1 m/s，施加荷重 P=3 N。在达到一定的循环次数后，用光学显微镜观察摩擦轨迹的状态，用触针式表面粗糙度计测量滑动部断面曲线，用于计算磨损面积。另外，在每个循环周期测定其摩擦力，用于计算摩擦系数 $\mu (= F/P)$ 。

3 结果与讨论

3.1 极间距对薄膜表面微米类陨石坑密度的影响

图 3 所示为能够使薄膜表面形成微米类陨石坑非连续表面的复合阳极结构示意图，该阳极在真空腔室内可以调整其相对位置，以改变阴阳极间距离；在平板阳极的下部有一个带有锯齿的辅助热丝阳极，热丝阳极的锯齿尖端部能够产生尖端放电现象，在强直流电场作用下，在中间过渡层薄膜表面形成微米类陨石坑，微坑能够有效地释放膜内残余应力来减小界面剪切应力。

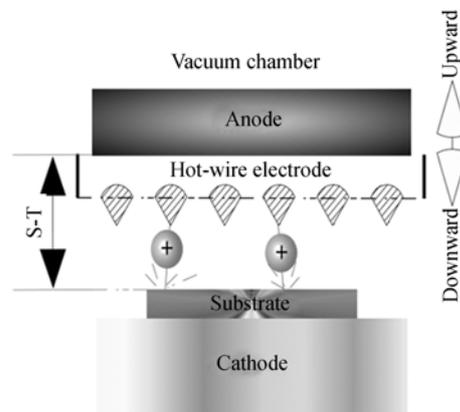


图 3 复合阳极示意图

Fig. 3 Schematic drawing of composite anode

图 4 为极间距的变化对薄膜表面微米类陨石坑密度影响的显微照片。实验选择极间距分别为 20、30、40、50、60 和 70 mm，从薄膜表面的显微照片看，随着极间距的增加薄膜表面的类陨石坑密度逐渐减小，但微坑的直径并没有明显的变化，大约在 20~30 μm 之间，且在表面上呈现出不规则分布。在 S-T=20 mm 时，基板表面发生密集火花放电，使薄膜表面几乎没有沉积 DLC 薄膜，显现出带有高密度类陨石坑的中间层薄膜；而当

S-T=70 mm 时,在基材表面发生少量的火花放电,薄膜表面只有很少的微米类陨石坑,形成了几乎连续的 DLC 薄膜;S-T=40~50 mm 时,类陨石坑把 DLC 薄膜分割成非连续表面。通过观察,类陨石坑的底部能够看到金属基材和中间过渡层,说明在中间过渡层形成过程中,由于高能离子的轰击,类陨石坑底部未能附着 a-Si:H:C 薄膜层,导致 DLC 薄膜也不能在这一区域附着,从而形成了微米类陨石坑非连续表面的 DLC 薄膜。

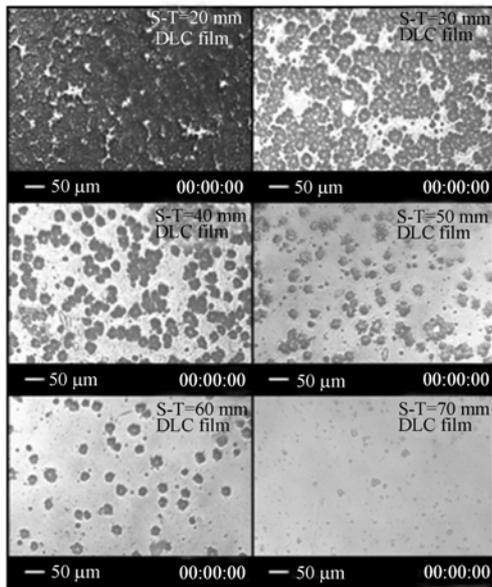


图4 不同极间距下沉积 DLC 薄膜的表面形貌

Fig. 4 Surface view of DLC film deposited at difference electrode spacings

该结果可以得到一个满意的解释,静电荷在导体表面的分布是不均匀的,决定于导体表面的形状,电荷密度与金属表面的曲率成正比。对于导体表面某点附近的电场强度可以根据高斯定律得到^[18]:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \mathbf{n} = \frac{dq}{\epsilon_0 ds} \mathbf{n}, \quad (1)$$

而两极板间的电压 ΔU 与电场强度 E 的关系:

$$\Delta U = \int_A^B E dl = E \cdot d, \quad (2)$$

式中: σ 为导体表面某点附近的面电荷密度, ϵ_0 为真空介电常数, q 为该点附近的电量, s 为该点的面积, d 为极板间距, \mathbf{n} 表示电场方向是在该点的法线方向。

电场强度只与该点附近的电荷密度有关;在恒定的电压下,电场强度又与极间距有关。成锥型的导体(曲率大),尖端的电荷特别密集,在尖端附近就会产生很强的电场,而在强电场的作用下,气体被电离击穿而发生放电效应^[18];击穿过程是阳极尖端部与基板表面的缺陷位之间形成放电通道,在高速离子的轰击下,使薄膜在该区域不能沉积,形成非沉积区。在相同的电压下,两极板间距越小,电场强度 E 就越大,而随两极间距的减小更易发生火花型尖端放电。

3.2 类陨石坑表面 DLC 薄膜的摩擦特性评价

为了研究不同类陨石坑密度的非连续 DLC 薄膜的摩擦、磨耗和破坏过程,在 SAE1060 碳素钢表面沉积了 $1 \mu\text{m}$ 厚度的 DLC 薄膜。利用 Ball-on-Disk 摩擦评价试验机对薄膜进行了摩擦特性评价。选用直径 $\Phi 10 \text{ mm}$ 的 SiC 球作为摩擦副材料,表 1 列出了 DLC 薄膜的摩擦特性评价结果。

表 1 微米类陨石坑表面 DLC 薄膜的摩擦特性

Tab. 1 Friction properties of DLC film with micro-crater-like structures

摩擦特性	S-T 间距/mm					
	20	30	40	50	60	70
破坏循环次数 ($\times 10^5$)	0.4	6.9	11.5	13.0	9.9	6.2
平均磨耗量 ($\times 10^{-9} \text{ mm}^2/\text{cycle}$)	6.00	2.30	1.20	0.90	0.96	1.30
破坏时磨痕深度 / μm	1.00	1.00	1.00	0.98	0.90	0.61
摩擦系数	0.320	0.190	0.120	0.110	0.105	0.096

图 5 所示为微米类陨石坑表面 DLC 薄膜的摩擦特性曲线,结果显示:薄膜的破坏寿命起初随着类陨石坑密度的减小而增加,在 S-T=40~50 mm 之间时达到最大值,大约为 130 万循环;随着类陨石坑密度的减小而减小;摩擦系数随着类陨石坑密度的减小而降低,在 0.1 附近达到稳定状态;平均磨耗速率起初随着类陨石坑密度的减小而迅速减小,在 S-T=50 mm 时达到最小值 $0.9 \times 10^{-9} \text{ mm}^2/\text{cycle}$,随后随着类陨石坑密度的减小磨耗速率呈上升的趋势;薄膜破坏时的磨耗深度在 S-T=20~60 mm 之间时,摩擦过程中未出现薄膜的剥离现象,直到膜层被磨尽;当 S-T \geq 60

mm 时,在摩擦过程中薄膜发生了剥离,并且随着类陨石坑密度的减小,破坏时磨损深度变的更浅。

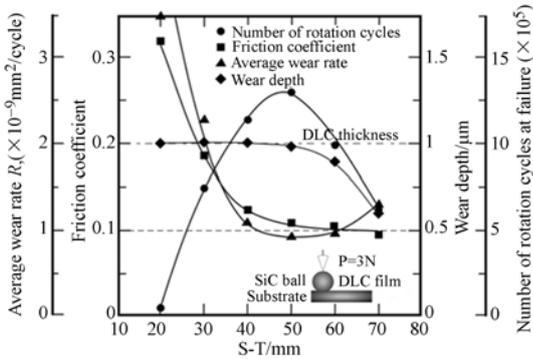


图 5 微米类陨石坑表面 DLC 薄膜的摩擦特性

Fig. 5 Friction properties of DLC films with micro-crater-like structures

从图 5 的照片观察, S-T=20 mm 时,高密度的类陨石坑使 DLC 薄膜很少附着,呈现出大量的中间过渡层成分,导致摩擦系数较高;另外,还反映出中间过渡成分 a-Si:H:C 的耐磨性较差,磨损率比较高,薄膜被较快地磨光。随着 DLC 薄膜覆盖率的增加,摩擦系数和磨损速率迅速下降,破坏寿命也迅速延长。在 S-T=20~50 mm 之间时,薄膜被磨光,说明较高的类陨石坑密度能够很好地改善薄膜的界面强度,达到了残余压缩应力的释放效果;当 S-T>60 mm 时,薄膜表面类陨石坑密度显著减小,在循环疲劳应力的作用下,较早地发生了剥离破坏,破坏时的磨损深度变浅。另外也可以发现随着极间距的增加(S-T>50 mm 时),薄膜的耐磨性能下降。根据式(2)可知,在相同的偏压下,随着极间距的增加,电场强度减弱,且离子在行程过程中碰撞次数增加,到达基材表面的离子(或原子)能量减小,使薄膜中的 sp³ 金刚石结构成分减少,而 sp² 的石墨结构成分增加。从摩擦系数的变化曲线也反映出随着极间距的加大,摩擦系数呈减小的趋势,原因为:(1)极间距小时,薄膜表面微坑密度较大,在摩擦过程中发生较强烈的黏着摩擦,使薄膜的磨损速率和摩擦系数增大,随着类陨石坑密度的减小,这种影响也随之减小;(2)随着极间距的增大,薄膜的结构成分比例发生了变化,sp² 石墨结构成分随之增加。

以上的结果表明:当 S-T=40~60 mm 之间时,1 μm 厚度的薄膜,在 P=3 N 的点载荷下,破坏寿命达到了 100 万循环以上,能够满足工程应

用的要求;同时也说明薄膜沉积的最佳极间距为 50 mm 左右。

3.3 微米类陨石坑结构对薄膜破坏寿命的影响

为了进一步了解薄膜表面微米类陨石坑结构对薄膜摩擦特性的影响,在 S-T=50 mm 时,通过平面平板电极沉积了 1 μm 厚度的表面无微坑结构的 DLC 薄膜,从图 6(a)可以看到,被沉积的 DLC 薄膜表面致密而光滑;图 6(b)则是带有微米类陨石坑非连续表面的 DLC 薄膜。

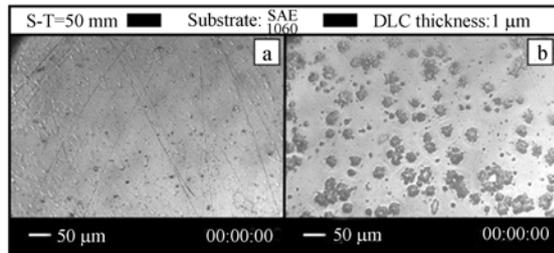


图 6 光滑表面和微坑表面 DLC 薄膜的表面形貌

Fig. 6 Surface view of DLC film (a) without the micro-crater-like (b) with the micro-crater-like on the surface

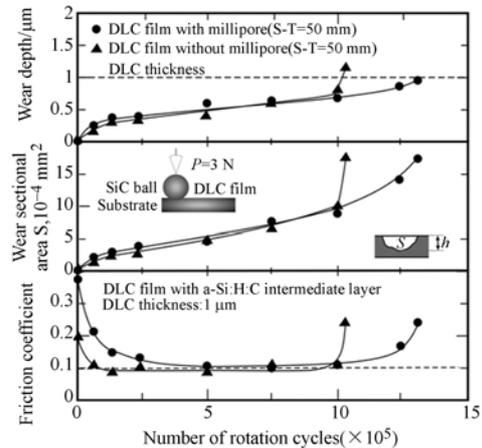


图 7 极间距为 50 mm 时类陨石坑结构对薄膜的破坏寿命、摩擦系数、磨损量和磨损深度的影响

Fig. 7 Effects of micro-crater-like structures on the failure life, friction coefficient, wear sectional area and wear depth when S-T=50 mm

图 7 所示为这两种薄膜结构的摩擦特性比较评价结果。带有表面类陨石坑结构的 DLC 薄膜的摩擦系数和磨损速度比光滑表面 DLC 薄膜略高,但总体影响不大,特别是在磨损后期几乎趋于一致。破坏寿命差异较大,带有表面类陨石坑结

构的 DLC 薄膜的破坏寿命达到了 130 万循环,而光滑表面的 DLC 薄膜的破坏寿命接近 100 万循环,说明在相同条件下类陨石坑结构能够有效地延长薄膜的破坏寿命。实验结果表明,由于表面类陨石坑结构的存在,使初始时摩擦系数和磨损速率都比较大,主要是由于类陨石坑的存在而引发了强烈的黏着摩擦所致;随着摩擦的进行,由于摩擦粉体的填充作用和 SiC 球表面接触面的形成,使黏着摩擦强度减弱,促使两种结构的薄膜摩擦特性趋于一致。破坏寿命的差异主要表现在界面强度上,光滑表面的 DLC 薄膜,在磨损深度 $0.9 \mu\text{m}$ 时发生了剥离;而表面带有微坑的 DLC 薄膜,在磨损深度 $0.98 \mu\text{m}$ 时才被破坏, DLC 薄膜被磨光,未出现剥离现象。对比实验表明:在相同的实验条件下,表面微米类陨石坑结构的存在,能够有效地释放膜内残余应力,提高了界面的结合强度。

3.4 DLC 薄膜材料的拉曼光谱成分分析

图 8 所示为极间距 $S-T=50 \text{ mm}$ 时,用拉曼光谱分光法测定的 DLC 薄膜的特征光谱,并得到了相应的高斯拟合曲线。表 2 列出了 Raman 光谱的高斯拟合曲线特性参数。

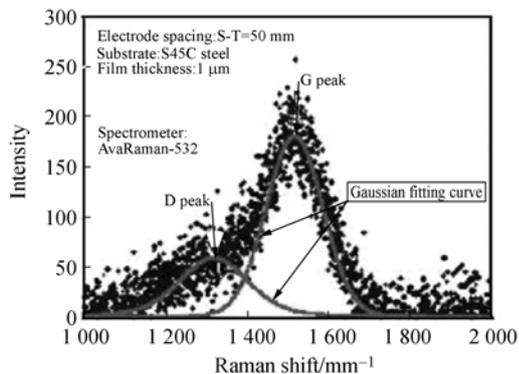


图 8 DLC 薄膜的拉曼光谱($S-T=50 \text{ mm}$)

Fig. 8 Visible Raman spectra of the DLC film($S-T=50 \text{ mm}$)

表 2 拉曼光谱和高斯拟合特性参数

Tab. 2 Data of Raman spectrum and Gaussian fitting

拉曼光谱	面积	峰位	峰宽	峰高	I_D/I_G
D 峰	5 772	1 322	233	58	0.46
G 峰	12 666	1 520	186	181	

根据标准 Raman 光谱图,具有 sp^3 四面体金刚石结构的特征光谱是波数在 $1\ 332 \text{ cm}^{-1}$ 处出现单一峰,而具有 sp^2 三角形结构的特征光谱是波数在 $1\ 580 \text{ cm}^{-1}$ 处出现单一峰。在薄膜的实际沉积过程中,由于 sp^3 、 sp^2 沉积颗粒的尺寸大小以及键的扭曲等,光谱峰值位置会发生偏移,这种漂移并不影响定性判断该结构成分的存在^[19,20];而根据高斯拟合曲线所围成的积分面积可以定量地得到薄膜结构成分的比例 I_D/I_G ,不同成分比例薄膜的摩擦特性和物性也不同^[21]。

图 8 的测定结果表明:该薄膜中的 sp^2 石墨结构成分的特征光谱峰值出现在 $1\ 520 \text{ cm}^{-1}$ 处,向低波数方向偏移了 60 cm^{-1} ;而作为肩峰的 sp^3 金刚石结构成分的特征光谱峰值出现在 $1\ 322 \text{ cm}^{-1}$ 处,向低波数方向偏移了 10 cm^{-1} 。有这种 Raman 光谱特征峰的碳膜含有一定数量 sp^3 杂化碳原子, sp^3 杂化碳原子镶嵌在 sp^2 杂化碳原子做成的基体中^[21]。根据高斯拟合曲线计算的 I_D/I_G 比值为 0.46,说明制备的 DLC 薄膜中含有较多的石墨成分,同时伴有一定量的金刚石结构成分。

4 结 论

利用自主研发的 RF-DCCVD 双电源化学气相沉积设备,成功地沉积了表面带有微米类陨石坑非连续表面的 DLC 薄膜,并对薄膜的摩擦特性进行了评价研究,得到以下结果:

(1)随着极间距 $S-T$ 的增加,薄膜表面微坑密度随之减小,摩擦系数也随之减小;薄膜的破坏寿命存在一个最大值, $S-T=50 \text{ mm}$ 左右时,破坏寿命达到了 130 万循环,比光滑表面薄膜的破坏寿命增加了 30 万循环,表明微坑非连续结构能够有效地减小膜内压缩残余应力和界面剪切应力,提高界面强度。

(2)综合比较摩擦特性显示,薄膜沉积的最佳极间距在 $40\sim 60 \text{ mm}$ 之间,沉积的薄膜具有比较好的耐磨性和高的界面强度,同时具有比较低的摩擦系数(接近 0.1)。

(3)Raman 光谱表明,D 峰和 G 峰的峰强度比值 $I_D/I_G=0.46$,说明薄膜中含有一定量的 sp^3 金刚石结构成分。

参考文献:

- [1] SUNDARAM V S. Diamond like carbon film as a protective coating for high strength steel and titanium alloy [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2006, 201(6): 2707-2711.
- [2] LIU X F, WANG L P, LU Z B, *et al.*. Vacuum tribological performance of DLC-based solid-liquid lubricating coatings: Influence of sliding mating materials [J]. *Wear*, 2012, 292-293: 124-134.
- [3] MIYAKE S, SHINDO T, SUZUKI M. Nanomechanical and boundary lubrication properties of titanium carbide and diamond-like carbon nanoperiod multilayer and nanocomposite films [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2013, 221:124-132.
- [4] BOLELLI G, LUSVARGHI L, MANTINI F P, *et al.*. Enhanced tribological properties of PECVD DLC coated thermally sprayed coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2008, 202(18): 4382-4386.
- [5] YU X, NING Z W, HUA M, *et al.*. Influence of silver incorporation on toughness improvement of diamond-like carbon film prepared by ion beam assisted deposition [J]. *Journal of Adhesion*, 2013, 89(7):578-593.
- [6] PAPPAS D L, SAENGER K L, BRULEY J, *et al.*. Pulsed laser deposition of diamond-like carbon films [J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, 71(11): 56-75.
- [7] 张华, 杨坚, 杨玉卫, 等. RF-PECVD 制备类金刚石膜的研究[J]. *真空*, 2012, 49(4): 44-46.
ZHANG H, YANG J, YANG Y W, *et al.*. Study of diamond-like carbon coatings prepared by RF-PECVD [J]. *Vacuum*, 2012, 49(4): 44-46. (in Chinese)
- [8] NAKAJIMA M, UEMATSU Y, KAKIUCHI T, *et al.*. Effect of quantity of martensitic transformation on fatigue behavior in type 304 stainless steel [C]. *11th International Conference on the Mechanical Behavior of Materials, Como*, 2011, 10: 299-304.
- [9] MAHESWARAN R, SIVARAMAN R, MAHAPATRA O, *et al.*. Surface studies of diamond-like carbon films grown by plasma-enhanced chemical vapor deposition [J]. *Surface and Interface Analysis*, 2010, 42(12-13):1702-1705.
- [10] BOBZIN K, BAGCIVAN N, THEISS S, *et al.*. Behavior of DLC coated low-alloy steel under tribological and corrosive load: Effect of top layer and interlayer variation [J]. *Surface & coatings technology*, 2012, 215:110-118.
- [11] 郑锦华, 李聪慧, 张冲, 等. 不同基材上类金刚石薄膜的摩擦特性[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6): 1545-1552.
ZHENG J H, LI C H, ZANG CH, *et al.*. Friction properties of DLC films on different metal substrates [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6):1545-1552. (in Chinese)
- [12] GAYATHRI S, KUMAR N, KRISHNAN R, *et al.*. Tribological properties of pulsed laser deposited DLC/TM (TM=Cr, Ag, Ti and Ni) multilayers [J]. *Tribology International*, 2012, 53: 87-97.
- [13] ZHENG J H, KATO M, NAKASA K. Effect of intermediate layer on wear-delamination life of low-frictional SiC-2.6mass% Ti film sputter-deposited on titanium substrate [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2010, 205: 2532-2537.
- [14] 郑锦华. 高界面强度类金刚石薄膜材料的常温沉积设备及方法[P]. 中国:ZL 1 0599609, 2011.
ZHENG J H. Deposition equipment and method of DLC films with high interfacial strength at room temperature [P]. China:ZL 1 0599609, 2011. (in Chinese)
- [15] ZHENG J H, CHEN Y. A study on interface strength of a-Si:H-DLC film [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 179-180: 775-80.
- [16] ZHENG J H, CHAO Y F, ZHANG C, *et al.*. Design on ultrahigh vacuum system with titanium pump [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 702:286-290.
- [17] 郑锦华. 高界面强度类金刚石薄膜材料的常温沉积设备[P]. 中国: ZL 2010 2 0673327. 2, 2011.
ZHENG J H. Deposition equipment of DLC films with high interfacial strength at room temperature [P]. China:ZL 2010 2 0673327. 2, 2011. (in Chinese)

- [18] 张三慧, 藏庚媛, 华基美. 大学物理·电磁学 [M]. 第一版, 北京:清华大学出版社, 1991: 42-82.
- ZHANG S H, ZHANG G Y, HUA J M. *College Physics • Electromagnetics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991: 42-82. (in Chinese)
- [19] FERRARI A C. Determination of bonding in diamond-like carbon by Raman spectroscopy [J]. *Diamond Related Material*, 2002, 11 (3-6): 1053-1061.
- [20] DOMINGUES M R, MOUSINHO A P. Micro-Raman spectroscopy as a tool to analyze mechanical stress in nano-structured diamond-like carbon films [J]. *Physica Status Solidi C*, 2012, 9(6):1431-1434.
- [21] MABUCHI Y, HIGUCHI T, WEIHNACHT V. Effect of sp^2/sp^3 bonding ratio and nitrogen content on friction properties of hydrogen-free DLC coatings [J]. *Tribology International*, 2013, 62: 130-140.

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,特别是 SiC 薄膜和 DLC 薄膜方面的研究。E-mail: zhengjh2005@yahoo.com.cn



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,DLC 薄膜材料的研究工作。E-mail: zzuzhangchong@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)