

# DLC 薄膜技术在汽车发动机关键零部件的应用研究

高凯雄 张斌 强力 张俊彦

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

**摘要:** DLC 薄膜是目前最具发展潜力的固体润滑薄膜,它具有优异的力学、摩擦学及抗腐蚀性能。从节能减排,保护环境出发,开发可用于汽车发动机关键零部件的类金刚石(Diamond-like carbon, DLC)薄膜来降低摩擦磨损对能量的消耗,以改善燃油经济性,提高发动机的使用寿命和可靠性,成为目前全球研究的热点。本文主要研究采用磁控溅射技术在发动机关键零部件-控制活塞上制备 DLC 薄膜的性能。

**关键词:** 磁控溅射; DLC 薄膜; 发动机; 摩擦

## Research for Diamond-Like Carbon Films on Key Parts of the Automobile Engine

Kaixiong Gao, Bin Zhang, Li Qiang, Junyan Zhang

State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics,  
China Academy of Sciences

**Abstract:** Diamond-like carbon (DLC) films have excellent mechanical, tribological and corrosion resistance. Basing on energy conservation and environmental protection, we develop DLC films on key parts for automotive engines to reduce the friction for energy consumption, to improve fuel economy, increase engine life and reliability, which become the world's research focus. In this paper, we mainly investigate the performance of DLC films on the controlling piston using magnetron sputtering.

**Keywords:** Magnetron Sputtering; Diamond-like Carbon Films; Engine; Friction

### 前言

当代汽车发动机的发展趋势是大功率、高转速、低油耗和低排放。新型发动机不仅要具备大功率和良好的动力性,还要满足客户对低的燃油消耗和机油消耗的需要,其中减少发动机摩擦和提高其使用寿命占有相当高的比重。而液体润滑难以满足目前发动机关键部位的低摩擦、长寿命、高承载、可靠性的要求。固体润滑涂层更适合当今汽车发动机的发展需求。这些固体润滑涂层包括DLC、氮化钛、碳化钛和二硫化钼等<sup>[1-5]</sup>。其中DLC碳薄膜具有高硬度,高弹性恢复、低摩擦系数、良好的耐腐蚀等优异的机械性能,是一种优异的减磨抗磨固体润滑材料,其优势是在苛刻环境下(如高真空,高载荷,低温环境)表现出极低的摩擦系数和磨损率,机械运动部件表面应用DLC碳薄膜后能显著的降低摩擦磨损,延长使

使用寿命<sup>[5-7]</sup>。成为当今汽车节能减排领域研究的热点<sup>[8-10]</sup>。为了改善发动机的油耗，必须使燃油在气缸内进行高效燃烧，尽可能将燃烧能量无损地作为驱动力加以有效利用。在汽车发动机关键零部件上涂覆DLC薄膜来降低摩擦，提高精密件的密封和寿命，可直接减少这种能量损失，对改善发动机的油耗非常重要。另外在苛刻的边界润滑状态下，DLC薄膜在低摩擦的同时还有很高的耐磨性能，提高了发动机工作可靠性<sup>[11]</sup>。DLC碳薄膜的摩擦性能由内在的和外在的两方面因素决定：1、内部的微观结构决定薄膜的硬度和弹性恢复等机械性能；2、外部的服役环境影响薄膜的摩擦机理。考察摩擦性能与薄膜微观结构和工况条件的相关性，提炼薄膜的摩擦规律，对其在汽车上的应用有着重要指导意义。选择不同沉积系统和适当工艺条件调整化学组成和微观结构，可以获得适应不同工况条件的薄膜。

磁控溅射是目前应用最广泛的制备DLC薄膜的方法之一<sup>[12-14]</sup>，它的制备过程对环境无污染，沉积速度快，温度低，适合批量生产，而且随着环境污染的加剧，矿物能源的消耗，迫使越来越多的国家开始重视提高燃油效率和降低排放量。解决这一问题的关键在于降低发动机的摩擦损耗。因此本文主要研究了在发动机关键部件—控制活塞上涂覆DLC薄膜的摩擦学性能，并在冷拖试验机上对其可靠性进行了验证。

## 1 薄膜的制备

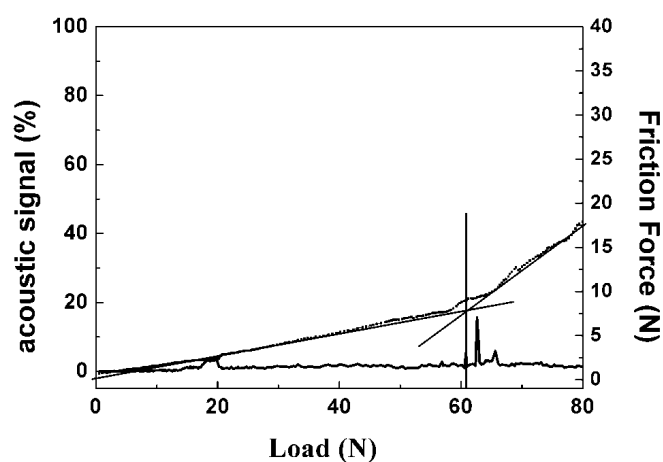
本试验中所采用的设备及电源由中科院兰州化学物理研究所与一汽技术中心合作开发的DLC薄膜的沉积设备，并首次用其在发动机关键零部件上涂覆DLC薄膜，达到降低油耗和减少CO<sub>2</sub>排放的作用。设备配备了四组孪生磁控溅射靶和一个单靶，分别采用拥有自主知识产权的高频双极脉冲电源和高功率脉冲电源为溅射靶提供能量。

采用的金属靶材为钛靶，电源频率为100-200KHz可调。以甲烷和氩气为先驱体，在控制活塞表面制备厚度为1500um的DLC薄膜。先依次用丙酮和乙醇超声清洗控制活塞，后置于真空室，沉积前将真空室气压预抽至 $3 \times 10^{-3}$ Pa。制备条件为：CH<sub>4</sub>流量为60sccm，氩气流量为120sccm，气压为0.4Pa，沉积功率约为1200W，基底偏压为-900V（频率20kHz，占空比为30%），沉积时间为60min。在沉积开始不久，钛靶因为靶表面“中毒”被碳膜覆盖，所以被轰击的是吸附在钛靶表面的碳膜而非钛靶本身，最终在控制活塞顶面获得了DLC薄膜。和控制活塞同样材质的试片被同时放入沉积室，用来研究薄膜的硬度和结合力、摩擦学性能。

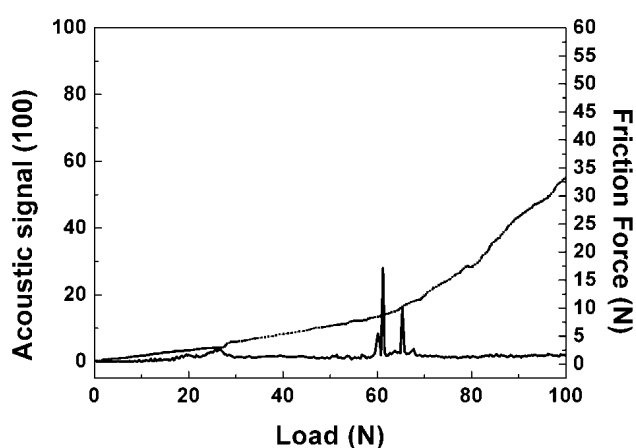
## 2 薄膜的摩擦学性能测试

对于发动机控制活塞，在工作过程对其上的DLC薄膜有三个方面的摩擦学性能是必须需要我们关注的：1、薄膜和基体之间要有高的结合力，防止薄膜从

基体上脱落；2、薄膜要有适当的硬度，良好的弹性恢复及不宜磨损摩擦副；3、薄膜要有低的摩擦系数，减少燃油消耗。因此我们分别对这三方面的摩擦学性能进行了测试。



(a)



(b)

图1 结合力破膜曲线，(a) 加载速度 80N/min, (b) 加载速度 100N/min

在划痕仪来评估薄膜与基体之间的结合强度时，当加载速度小于 70 N/min 时，刻划终止后并不能观察到声信号变化，划痕也没有出现破裂的迹象。只有当加载速度超过 80 N/min 时，才有明显的声信号出现，划痕末尾破裂明显。图 1 给出了加载速度 80 N/min 和加载速度 100 N/min 随载荷增加的曲线。综合图 1 (a) 和 (b)，可以看出我们所制备的薄膜结合力高达 62 N，完全能满足工业应用的需要。

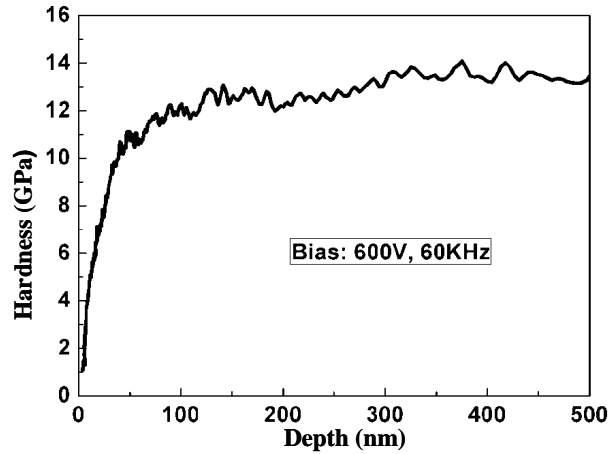


图 2 压入深度—硬度曲线

用MTS公司制造的Nano-indenter II型纳米压痕仪测定薄膜的硬度，图2给出了SY样品的纳米硬度和压入深度的关系曲线。通常我们选择的压入深度不会超过薄膜厚度的10%，但是图2给出的压入深度达到500nm，这样做的目的是为了便于研究渐变层和过渡层对含氢类富勒烯结构碳薄膜力学性能的影响。从结果可以看出，随着压入深度的增加，动态硬度也逐渐增大。在压入深入达到60 nm时，薄膜硬度为11GPa,且纳米硬度随薄膜压入深度的增加趋于缓和，最终达到14 GPa。计算得出纳米硬度的平均值为13GPa左右。

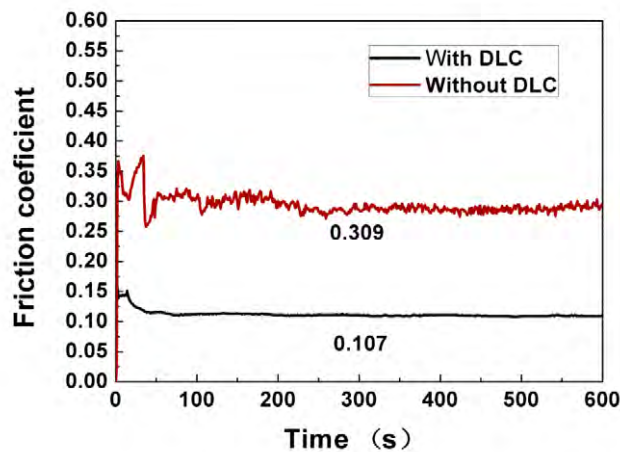


图 3 摩擦系数—摩擦时间曲线

为了进一步确认样件的摩擦学性能，为实际的工况应用提供更可靠的科学依据，在美孚10W-30机油润滑状况下，在SRV-3微震摩擦试验机上进一步研究了该薄膜摩擦学性能测试。对偶为GCr15钢球，直径10 mm，振幅5 mm，载荷400 N，点接触模式，频率50 Hz。为了更能说明情况，我们选择了一个没有涂覆DLC薄膜的试件在同样的条件下做测试。由图3可知，没有处理的工件在这种苛刻的条件下，

摩擦系数高达0.309，油膜几乎失去了其作用，相对裸件而言，涂覆DLC薄膜的工件其摩擦系数约为0.107，且摩擦曲线没有涂覆的平滑，摩擦系数几乎降低到1/3。这是因为在这么苛刻的条件下，油膜不能快速的建立，两个摩擦副直接接触，没有处理的工件金属粘着磨损增加，导致表面脱落严重；经过DLC薄膜处理的工件与钢球直接接触的过程和没有油润滑的状况相似，摩擦系数相对较小。这个结果说明，经过DLC碳薄膜处理以后，工件的减磨抗磨效果增强。

### 3 可靠性验证

在无锡油泵油嘴研究所对涂覆DLC薄膜控制活塞的6DL2共轨喷油器，进行冷拖可靠性跑合试验，来考察涂覆DLC薄膜控制活塞的可靠性。在一套（6支）6DL2 喷油器上装配涂覆DLC薄膜的控制活塞（如图4），按照《电控高压共轨系统6DL2喷油器总成可靠性试验规范》的要求进行冷拖可靠性跑合，在各个节点检测总成油量特性，并对控制活塞进行拍照检测以观察其变化情况。



图4 涂覆 DLC 薄膜的控制活塞

试验时采用零号柴油，涂覆DLC薄膜的控制活塞经过1250h交变循环工况跑合后，控制活塞表面没有磨损，几何精度等尺寸几乎没有变化（如表1所示），装配涂覆DLC薄膜的控制活塞的喷油器对喷油器性能没有降低的影响，并且耐磨性相对没有涂层的提高很多。

表1 0小时/1250小时涂覆DLC薄膜控制活塞的几何尺寸

控制活塞编号	直径 (mm)		粗糙度 (um)		圆柱度 (um)		平均圆度 (um)	
	0h	1250h	0h	1250h	0h	1250h	0h	1250h
20#	4.297	4.299	0.0583	0.0630	0.26	0.22	0.18	0.13
02#	4.297	4.299	0.0582	0.0643	0.35	0.30	0.11	0.12
09#	4.298	4.299	0.0583	0.0637	0.45	0.27	0.17	0.12
17#	4.297	4.299	0.0609	0.0661	0.45	0.54	0.22	0.26
06#	4.298	4.299	0.0599	0.0650	0.37	0.32	0.13	0.12
18#	4.297	4.298	0.0590	0.0603	0.72	0.65	0.17	0.14

## 4 结论

涂覆 DLC 薄膜的发动机关键部件—控制活塞的摩擦学性能得到了明显的提升,主要表现在三个方面:1、摩擦系数降低 1/3;2、硬度适中约为 13GPa;3、高达 62N 的结合力。而且 1250 小时的冷拖可靠性跑合试验也充分证明了其良好的摩擦学性能和高的可靠性,偶件间隙优化后,油泵供油效率大概可提升 7~8%。所以在发动机关键部件上涂覆 DLC 薄膜是降低发动机功率消耗、提高发动机寿命的一种非常行之有效的方法。这非常值得我们做进一步的深入研究,最终将其应用到一汽自主研发的发动机中,提升一汽的品牌价值和竞争力。

## 参考文献

- [1] T.Hoornaert, Z.K.Hua, J.H.Zhang. Hard Wear-Resistant Coating. Technical Sessions-Proceedings of CIST2008&ITS-IFTtoMM2008 Beijing, China, 2008, 774-778.
- [2] 李方坡,王引真,潘蛟亮,高海军. MoS<sub>2</sub>含量对Ni基固体润滑涂层性能的影响. 材料热处理学报, 2007, 28(4), 135-138.
- [3] 周先辉,孙友松,魏良模. 边界润滑摩擦面固体润滑涂层技术发展的若干趋势. 润滑与密封, 2006, 4, 175-178.
- [4] 张泰华,刘东旭,郇勇,王秀兰. 基体对氮化钛膜的微力学和摩擦性能的影响. 中国表面工程, 2003, 4, 23-26.
- [5] S D A Lawes, M E Fitzpatrick and S V Hainsworth. Evaluation of the tribological properties of DLC for engine applications. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40, 5427-5437.
- [6] R. Hauert. An overview on the tribological behavior of diamond-like carbon in technical and medical applications. Tribology International 2004, 37, 991-1003.
- [7] Rickard Gahlin, Mats Larsson and Per Hedenqvist ME-C:H. Coatings in Motor Vehicles Wear 2001, 249, 302-309.
- [8] 曾群锋,董光能,谢友柏,徐均琪,杭凌侠.高速钢表面镀覆DLC膜的结构及其摩擦特性研究. 2007, 32(10), 25-28.
- [9] Zh.R. Panosyan, A.T. Darbasyan, V.A. Meliksetyan, S.S. Voskanyan, A.S. Voskanyan, A.A. Sahakyan, R.V. Gzraryan. Low resistive diamond like carbon film development technique. Thin Solid Films, 2009, 517, 5404 - 5408.
- [10] 織田一彦. DLC膜的实用化现状与今后展望. 超硬材料工程, 2006, 18(4), 49-54.
- [11] 加纳真. DLC涂层在发动机滑动部件上的应用. 国内外内燃机. 2005, 3, 56-60.
- [12] 林松盛,代明江,侯惠君,李洪武,朱霞高,林凯生,牛仕超. 钛合金表面掺金属DLC薄膜的摩擦磨损性能研究. 摩擦学学报. 2007, 27(4), 382-386.
- [13] 杨武保,范松华,张谷令,马培宁,张守忠,杜健. 非平衡磁控溅射法DLC薄膜的制备及分析. 2005, 54(10), 4944-4948.
- [14] 赵之明,李合琴,顾金宝,宋泽润. 射频磁控溅射制备DLC薄膜的特性. 2006, 12(14), 215-218.