

摩擦介质对类金刚石薄膜摩擦性能的影响

罗 顺, 岳 伟, 胡 芳, 游玉萍

广东省工业技术研究院(广州有色金属研究院), 广东 广州 510650

摘 要:通过对比 DLC 薄膜和模具钢在无润滑介质、润滑油和水介质下的摩擦系数,研究了干摩擦、润滑油和水对 DLC 薄膜的摩擦性能影响。在无润滑介质即干摩擦条件下,模具钢的摩擦系数为 0.60, DLC 薄膜的摩擦系数为 0.14;在传统润滑油的条件下,模具钢试样的摩擦系数降低为 0.09,经过镀 DLC 薄膜的模具钢试样的摩擦系数也只降低到 0.08,与模具钢相比, DLC 薄膜在传统润滑油中未能体现出优越性;在水润滑条件下,模具钢的摩擦系数降低为 0.25,而 DLC 薄膜会快速破裂失效。

关键词:类金刚石薄膜;润滑油;摩擦性能;模具钢

中图分类号: TG113.25

文献标识码: A

类金刚石薄膜(DLC)是含有一系列 sp^2 和 sp^3 杂化轨道形式的亚稳态非晶碳膜的总称,是在性质上与金刚石类似的一种薄膜,其优异的性能引起了国内外学者的广泛关注。DLC 薄膜具有硬度高、耐磨性好、热导率高、电阻率高、摩擦系数低,以及化学惰性、生物相容性等优异性能。DLC 薄膜作为一种兼具优异减摩及抗磨性能的固体润滑薄膜,在摩擦学领域中应用尤为广泛,如磁存储介质、各种切削刀具(钻头、铣刀、车刀等)、各种金属成型模具、引擎上的零件(阀、活塞销、顶杆、活塞等)及其他零件(轴类、齿轮、轴承、凸轮和从滚轮等)^[1]。

在几乎所有的机械传动机构中,润滑油的利用不可避免。润滑油的加入可以极好地减轻金属材料之间的直接磨损,提高材料的使用寿命,优化设备的运行状况。而润滑油对 DLC 薄膜的润滑作用有多大的贡献,国外已经展开研究,而国内的研究较少。K. Vercammen 等人^[2]对多种 DLC(纯 DLC、掺硅 DLC 及掺钨 DLC)在多种油情况下的摩擦性能进行了研究。B. Podgornik 等人^[3]研究了发动机中润滑油对掺钨 DLC 薄膜摩擦性能的影响。本文通过 DLC 薄膜在干摩擦、发动机润滑油及水润滑条件下的摩擦试验,研究了不同介质对 DLC 薄膜摩擦磨损性能的影响。

影响。

1 实验部分

选用 1Cr12MoV 模具钢圆片作为试样,其尺寸为 D25 mm×5 mm。实验设备为中国科学院沈阳科学仪器研究中心有限公司研制的 650—实验型多功能镀膜机。以石墨为靶材,采用非平衡磁控溅射法,使用离子源辅助沉积类金刚石薄膜。首先用 Ar 等离子体对基体溅射清洗 30 min,为了提高薄膜与基体的结合强度,在薄膜与基体之间沉积 100~200 nm 厚的 Ti/Ti_xC_y 过渡层。薄膜沉积工艺为:温度 150 °C、气压 0.26 Pa、基体脉冲偏压 150 V;石墨靶功率密度 7.6 W/cm²,沉积时间 5 h。

使用 UMT-3 型多功能摩擦磨损试验机,测量 DLC 薄膜的摩擦系数。测量摩擦系数时,环境温度 23~24 °C,相对湿度为 40%~60%,载荷为 10 N,速度为 0.2 m/s。摩擦副为直径 4 mm 的 GCr15 钢球,旋转的线速度为 0.2 m/s。考虑到实际工况条件比较复杂,同时还进行了干摩擦和液体摩擦实验,其中液体摩擦介质包括润滑油、少量润滑油和水。为保证实验的准确性及可重复性,每个样品测量三次。

收稿日期:2013-04-28

作者简介:罗顺(1983-),湖南岳阳人,工程师,硕士。

润滑油为市面购置的某品牌合成内燃机油(牌号 SM/CF0W-50). 摩擦试样为基体模具钢和镀 DLC 薄膜的模具钢,研磨砂纸为 1200 号. 用 JXA-8100 型电子探针观察磨痕表面形貌;用法国 HJY 公司生产的 LabRAM Aramis 型激光光谱仪对膜层中 C 键结构进行分析,其中激光波长为 532.8 nm,测试时激光功率为 2.61 mW,束斑大小为 0.85 μm .

2 结果与讨论

2.1 DLC 薄膜

所制备的 DLC 薄膜厚度为 1.0~1.5 μm ,图 1 为所制备 DLC 薄膜的拉曼谱线图. 从图 1 可见,通过用 Gaussian 拟合曲线,D 峰峰位在 1372.1 cm^{-1} 处,G 峰峰位在 1553.9 cm^{-1} 处,表明薄膜具有典型的类金刚石的 Raman 特征^[4].

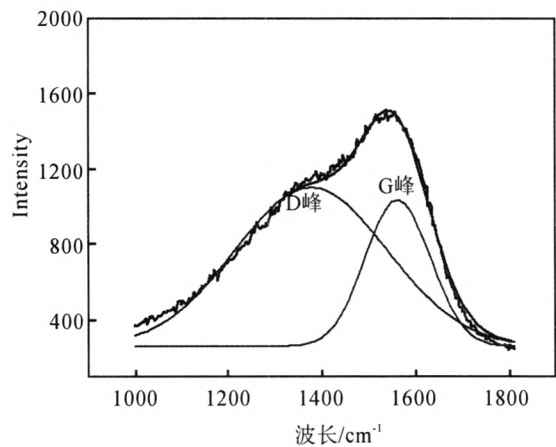


图 1 DLC 薄膜的 Raman 图谱
Fig.1 Raman spectra of DLC films

2.2 不同介质下的摩擦系数

图 2 为不同润滑条件下基体和 DLC 薄膜的摩擦系数曲线. 从图 2 可见:在干摩擦介质下,镀膜模具钢的摩擦系数明显比未镀膜模具钢的摩擦系数低. 镀膜前,模具钢摩擦系数为 0.6,经镀膜处理后摩擦系数达到了 0.14;在油润滑条件下,模具钢和镀膜处理的模具钢的摩擦系数分别为 0.09 和 0.08,两者之间区别不大. 因此,可以认为润滑油对 DLC 薄膜的减磨作用相比对基体的减磨作用并不明显.

图 3 为基体和 DLC 薄膜在水润滑条件下的摩擦系数曲线. 从图 3 可见,在水润滑条件下,模具钢的摩擦系数为 0.25,而经镀膜处理的模具钢的摩擦

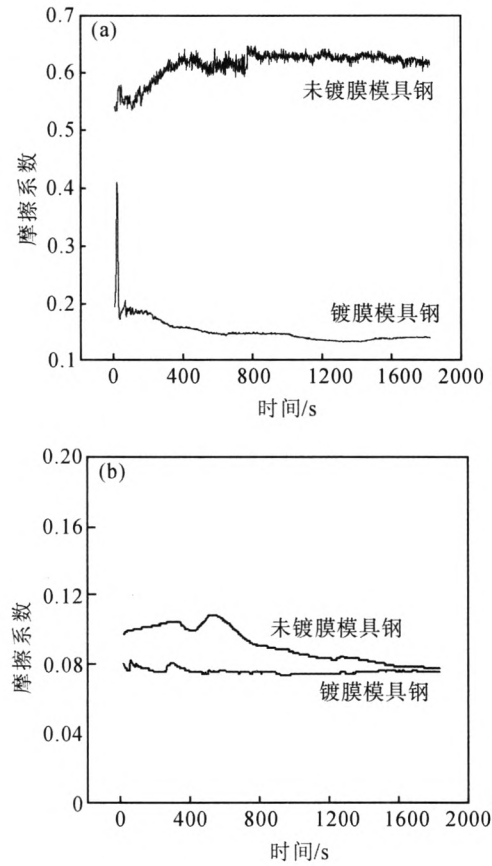


图 2 不同润滑条件下基体和 DLC 薄膜的摩擦系数
(a)干摩擦;(b)润滑油

Fig.2 The friction coefficients of both substrate and the DLC film on different lubrication conditions
(a)dry friction;(b)lubricating oil

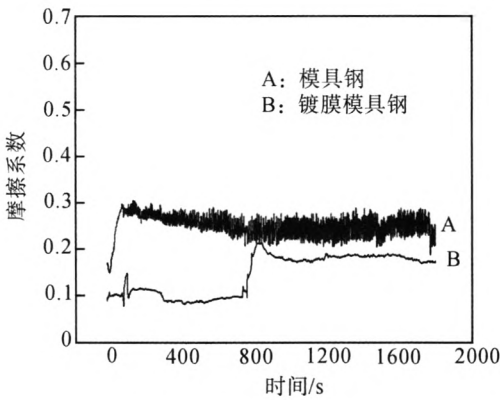


图 3 基体和 DLC 薄膜在水润滑条件下的摩擦系数曲线
Fig.3 The friction coefficients of both substrate and the DLC film on water lubrication

系数在初期(0~800 s)会有较低摩擦系数(约为 0.1),但经 800 s 后摩擦系数升为 0.18 左右.

为考察在润滑油不充分条件下 DLC 薄膜的摩擦性能,在加大载荷(8 kg)、高转速(0.6 m/s)的条

件下进行摩擦实验,实验结果见图 4. 从图 4(a)可见,干摩擦条件下,DLC 薄膜的摩擦系数在对磨球滑行 27 m 左右就进入了较高的水平,滑行 400 m 左右时摩擦系数为 0.5,由于此时的摩擦系数明显偏离正常情况下 DLC 薄膜的摩擦系数,因此可以认为 DLC 薄膜已经失效. 在 DLC 薄膜上加入少量润滑油,然后马上用滤纸擦除样品表面上的润滑油,在缺乏润滑油情况下(图 4(b)),DLC 薄膜仍能表现出较低的摩擦系数,滑行 2100 m 后,摩擦系数逐渐升高至 0.6,由于此时的摩擦系数明显偏离正常情况下 DLC 薄膜的摩擦系数,同样可以认为 DLC 薄膜已经失效.

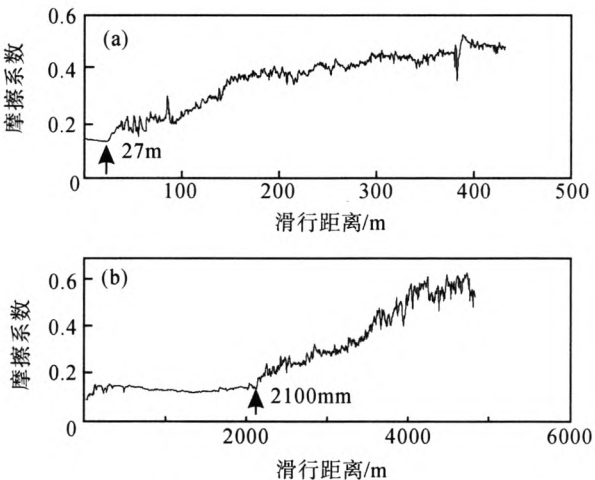


图 4 DLC 薄膜在不同润滑条件下的摩擦系数
(a)干摩擦;(b)不充分润滑

Fig. 4 The friction coefficients of the DLC film on different lubrication conditions
(a)dry friction;(b)inadequate lubrication

2.3 形貌分析

DLC 薄膜的石墨化-转移膜理论认为,DLC 薄膜中的碳处于一种亚稳态,如果 DLC 薄膜中亚稳态的碳在摩擦过程中能够克服一定的能量势垒,DLC 薄膜中不定形结构碳便可发生石墨化,而转变为结构稳定的石墨^[5]. 石墨是层状结构,层内的碳原子以共价键结合并排列成平面的网状结构,但层与层之间以 Van-der 力结合,较弱的层间结合力使得其具有较低的剪切强度,当其在摩擦对偶表面形成的转移膜参与摩擦时,会引起摩擦系数降低,从而使 DLC 薄膜表现出良好的减摩性能^[6].

图 5 为 DLC 薄膜在摩擦试验后的形貌图. DLC 薄膜在干摩擦条件下,膜层摩擦系数降低至 0.14,表现出较好的摩擦性能(图 5(a)). 但在加入水润滑条件下,摩擦系数在初期会比较低,但经一定时间后,摩擦系数明显出现突变为 0.24,可以认为膜层已经破裂,表明磨球已经与基体接触. 这是由于水的加入,破坏了 DLC 薄膜的石墨化过程,抑制了对磨球面上转移膜的形成^[7]. 观察 DLC 薄膜样品的磨痕形貌(图 5(b)),可以看到边部大量片状剥落,磨蚀坑平滑,表现出剥层磨损特征.

在加入润滑油的条件下,DLC 薄膜样品和模具钢样品的摩擦系数都很低,可以认为在有润滑油润滑的条件下,相比基体模具钢,DLC 薄膜的加入并未能使摩擦系数进一步的降低,或者说润滑油并不能显示 DLC 薄膜减磨的优越性. 这是由于润滑油中常含有少量的极性物质,极性物质具有化学活性,依靠分子或者原子间的范德华力可以牢固地吸附在金



图 5 DLC 薄膜在摩擦试验后的形貌图
(a)干摩擦;(b)水润滑;(c)少量润滑油

Fig. 5 Micrographs of DLC films after friction test
(a)dry friction;(b)water lubrication;(c)inadequate lubrication

属表面上,形成分层定向排列的单分子层或者多分子层的吸附膜,吸附膜将两摩擦表面隔开,提供了一个低剪切阻力的界面^[8]. 因此,在加入润滑油的条件下,对磨球与 DLC 薄膜进入边界润滑. 通过润滑油不充分条件下的摩擦试验可以看出(图 5(c)),在非正常情况下(高载、高速、润滑不充分),相比没有润滑油的 DLC 薄膜,润滑油的存在能够在短时间内一定程度上保护膜层不被破坏,相比没有润滑油条件, DLC 薄膜失效距离由 27 m 延长到 2100 m. 究其原因,是因为高载荷下,有少量润滑油可以让 DLC 薄膜有时间石墨化,在对磨球面上形成转移膜,减少剪切力,保持 DLC 薄膜的完整. 而在没有任何润滑的条件下, DLC 薄膜来不及形成转移膜,高的载荷下,对磨球迅速破坏掉 DLC 薄膜的完整,造成 DLC 薄膜的快速失效. 因此在 DLC 薄膜的实际使用过程中,仍然有必要添加润滑油.

3 结 论

(1)干摩擦条件下,模具钢的摩擦系数为 0.60, DLC 薄膜的摩擦系数为 0.14;在润滑油摩擦条件下,模具钢的摩擦系数降为 0.09, DLC 薄膜的摩擦系数降低为 0.08. 在干摩擦条件下 DLC 薄膜可使摩擦系数较大地降低,而在润滑油条件下 DLC 薄膜与模具钢的摩擦系数相同,未能体现出其优越性.

(2)在水润滑条件下,基体的摩擦系数可以从 0.6 降低为 0.25,而 DLC 薄膜在摩擦过程中会快速

失效,形成基体与摩擦副对磨,从而使摩擦系数升为 0.24. 所以, DLC 薄膜在使用过程中应严格控制水介质的加入.

参考文献:

- [1] 李庆生. DLC 表面涂覆在模具中的应用[J]. 模具工业, 2010,36(4):74-76.
- [2] VERCAMMEN K, VAN ACKER K, VANHULSEL A, et al. Tribological behaviour of DLC coatings in combination with biodegradable lubricants[J]. Tribology International, 2004,37(11-12):983-989.
- [3] PODGOMIK B, VIZINTIN J, VIZINTIN B J. Tribological reactions between oil additives and DLC coatings for automotive applications[J]. Surface & Coatings Technology, 2005,200(5-6):1982-1989.
- [4] TAMOR A, VASSELL M, RAMAN W C. Fingerprinting of amorphous carbon films[J]. Applied Physics, 1994,76(6):3823-3830.
- [5] LIU Y, ERDEMIR A, MELETIS E I. A study of the wear mechanism of diamond-like carbon films [J]. Surface and Coatings Technology, 1996,82(1-2):48-56.
- [6] 白越,黄敦新,曹萍,等. 类金刚石薄膜在干摩擦油和脂润滑条件下的摩擦学性能分析[J]. 真空科学与技术学报, 2011,31(5):555-559.
- [7] 王成兵,李红轩,徐洮. 相对湿度对类金刚石薄膜摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(5):426-429.
- [8] 温诗铸,黄平. 摩擦学原理[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.

The impact of friction media on friction performance of DLC film

LUO Shun, YUE Wei, HU Fang, YOU Yuping

Guangdong General Research Institute for Industrial Technology (Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals), Guangzhou 510650, China

Abstract: The friction performance of DLC film has been studied by comparing the friction coefficients of both DLC film and mold steel in unlubrication, oil and water media. The coefficient of friction of mold steel sample is 0.60 under the dry friction condition, while the coefficient of friction of the DLC film is 0.14. The coefficients of friction of mold steel with and without DLC film are 0.08 and 0.09 respectively under the condition of traditional lubricant. DLC film did not showed any better friction performance compared to the mold steel under a conventional oil medium. The friction coefficient of the mold steel reduced to 0.25, while the DLC film seemed to break down quickly. under water lubrication

Key words: diamond-like carbon film; oil lubrication; friction properties; mold steel