

# 硬质合金刀具类金刚石涂层的摩擦磨损性能

安孝玲, 刘利国\*

(江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 以等离子体化学气相沉积技术在硬质合金刀具表面制备了类金刚石(DLC)涂层。研究了DLC涂层刀具和无涂层刀具的硬度, 不同载荷、不同转速下两种刀具的摩擦磨损性能, 以及在水润滑和油润滑条件下DLC涂层刀具的滑动摩擦行为。结果表明, DLC涂层刀具的平均硬度为2 099.9 HV, 比无涂层刀具提高了48.3%; DLC涂层刀具的摩擦因数明显低于无涂层刀具, 其磨损率随着载荷的增加而增大, 随转速的增大而减小; 油润滑比水润滑能更有效减缓摩擦作用。

**关键词:** 硬质合金刀具; 类金刚石膜; 等离子体化学气相沉积; 摩擦学

**中图分类号:** TB43; TH117.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1004-227X(2009)06-0068-04

**Friction wear behavior of diamond-like carbon films on carbide cutting tool** // AN Xiao-ling, LIU Li-guo\*

**Abstract:** Diamond-like carbon (DLC) films were prepared on the surface of carbide tool by plasma chemical vapor deposition. The hardness and friction wear properties under different loads and at different rotation speeds for the tools with and without DLC films, as well as the sliding friction behavior of the tools with DLC films under water and oil lubricating conditions were studied. The results showed that the average hardness of the tools with DLC films is 2 099.9 HV, an increase of 48.3% as compared with the untreated carbide tool. The friction factors of the tools with DLC films are remarkably lower than that of the tools without DLC films. The wear rate is increased with increasing load, but decreased with increasing speed. The friction effect under oil lubrication is decreased more efficiently than that under water lubrication.

**Keywords:** carbide cutting tool; diamond-like carbon film; plasma chemical vapor deposition; tribology

**First-author's address:** School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

## 1 前言

类金刚石膜(diamond-like carbon films, 简称

**收稿日期:** 2009-03-05 **修回日期:** 2009-04-01

**作者简介:** 安孝玲(1983-), 女, 湖北襄樊人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

**通讯作者:** 刘利国, 副教授, (E-mail) liuliguo@jiangnan.edu.cn。

DLC膜)是一类硬度、光学、电学、化学和摩擦学等特性类似于金刚石的非晶碳膜<sup>[1]</sup>, 有诸多类似于金刚石的优良特性, 如热导率高, 热膨胀系数小, 化学稳定性好, 硬度和弹性模量高, 耐磨性好及摩擦因数低等<sup>[2]</sup>。但其制备方法较金刚石的简单, 可采用离子束沉积(IBD)法、射频溅射(RFS)法、磁控溅射(MS)法、高强度直流电弧(HCDCA)法和等离子体化学气相沉积(PCVD)法等<sup>[3]</sup>。其中, 等离子体化学气相沉积技术是利用低温等离子体作为能量源, 样品置于低气压下辉光放电的阴极上, 利用辉光放电(或另加发热体)使样品升温到预定的温度, 然后通入适量的反应气体, 气体经一系列化学反应和等离子体反应后在样品表面形成固态薄膜<sup>[4]</sup>。常海波等<sup>[5]</sup>利用此法在单晶硅表面沉积了类金刚石薄膜, 并发现所沉积的类金刚石膜显示出良好的减摩抗磨性能, 摩擦因数较低, 耐磨寿命较长。目前, 类金刚石膜沉积于刀具后, 对刀具的摩擦学性能研究的报道不多。本文以硬质合金刀具作为基体, 在刀具表面采用等离子体化学气相沉积技术制备了含氢类金刚石涂层, 并考察涂层在不同工况下的摩擦学性能, 初步探讨其摩擦机理。

## 2 实验

### 2.1 样品制备及其表面性能测试

采用硬质合金YG6作为基体, 将其先后放置于清洗、喷砂设备中进行表面清理, 然后置于等离子体化学气相沉积设备腔体内制备类金刚石薄膜。源气为体积比30:100的甲烷和氢气混合气体, 沉积条件如下: 压强5 Pa, 偏压100 V, 沉积时间3 h。

采用本原公司生产的CSPM5000型原子力显微镜(AFM)观察DLC涂层的表面形貌; 用时代集团公司生产的TT260数字式覆层测厚仪测量涂层厚度, 取5次测量结果的平均值; 用上海恒一电子测试设备有限公司生产的MH-3型显微硬度计测量涂层硬度; 用上海奥豪斯仪器有限公司生产的精度为0.000 1 g的Adventurer

AR2140 型电子分析天平测定磨损前后刀具试样的质量；用苏州时代集团生产的 TR200 型粗糙度测量仪测量涂层表面粗糙度。

## 2.2 摩擦磨损试验

试验在山东益华公司生产的 MMW-1A 万能摩擦磨损试验机上进行，摩擦磨损试验示意图如图 1 所示。

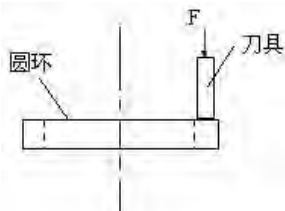


图 1 摩擦磨损试验示意图

Figure 1 Schematic diagram of friction wear test

试验时，将涂覆 DLC 膜的硬质合金刀具放置于大方销夹头中固定，通过其旋转与下盘构成大销盘摩擦副来实现相对滑动。下盘材料是硬度为 55 HRC 的淬火 45# 钢。工况分为干摩擦、水润滑和油润滑。试验施加的载荷分别为 40、80、120 和 160 N，转速为 50 ~ 250 r/min。试验时，通过该摩擦磨损试验机的数据采集系统直接获得各瞬时的摩擦因数，并生成瞬时曲线图。摩擦 30 min 后，根据系统保存下来的数据，得到其对应的平均摩擦因数。

## 3 结果与讨论

### 3.1 薄膜结构及涂层刀具的性能参数

图 2 所示为所制备的 DLC 涂层的二维原子力显微镜照片。从图 2 可以看出，薄膜由 50 ~ 100 nm 的圆形颗粒紧密堆积而成，表面比较光滑，粗糙度  $R_a = 2.7$  nm。

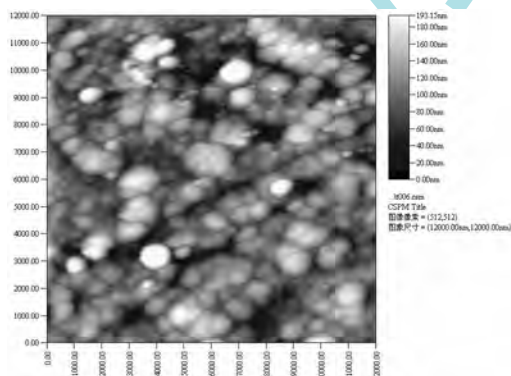


图 2 DLC 涂层 AFM 形貌照片

Figure 2 AFM morphology of DLC films

试验得到的涂层刀具的性能参数见表 1。从表 1 可以看出，硬质合金 YG6 的平均硬度为 1 417.4 HV，沉积 DLC 涂层后，硬度变为 2 099.9 HV，提高了 48.3%。充分说明了沉积 DLC 涂层可以有效提高硬质合金刀具的表面硬度。

表 1 不同 DLC 涂层试样的性能参数测试结果

Table 1 Test results of performance parameters for different DLC coating samples

试样号	镀前硬度/HV	镀后硬度/HV	$\delta/\mu\text{m}$	粗糙度/ $\mu\text{m}$
1	1 402.4	2 096.7	3.8	0.509
2	1 433.8	2 112.5	3.6	0.541
3	1 421.3	2 156.2	4.3	0.532
4	1 412.2	2 034.5	3.7	0.534

### 3.2 载荷对摩擦磨损性能的影响

图 3 为 DLC 刀具和无涂层刀具与 45# 钢摩擦时平均摩擦因数随载荷的变化曲线 (转速为 100 r/min)。从图 3 可以看出，无涂层刀具的摩擦因数明显高于涂层刀具的摩擦因数；在相同转速情况下，随着载荷的增大，摩擦因数呈先上升后下降、然后趋于稳定的趋势；在载荷为 80 N 时，两种刀具的摩擦因数达到最大值。

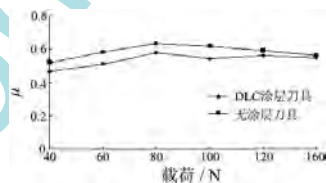


图 3 转速 100 r/min 下，DLC 涂层刀具和无涂层刀具的平均摩擦因数随载荷的变化

Figure 3 Variation of average friction factor with load for the tools with and without DLC film at rotation speed of 100 r/min

摩擦因数的这种变化与载荷所致的接触应力有关。在摩擦磨损过程中，必然有一个由点接触逐渐向微小面接触转变的过程。载荷在这一转变过程起很重要的作用。随着载荷的逐渐增加，微凸体的变形将逐渐由弹性向弹塑性，并最终向完全塑性转化。由此可见，载荷的增大加速了接触点向微小面的转变。

图 4 为 DLC 涂层刀具和无涂层刀具与 45# 钢摩擦时磨损率随载荷的变化曲线 (转速为 100 r/min)。

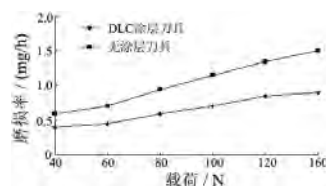


图 4 DLC 涂层刀具和无涂层刀具磨损率随载荷的变化

Figure 4 Variation of wear rate with load for the tools with and without DLC film

从图 4 可以看出，DLC 涂层刀具的磨损率明显低于无涂层刀具的磨损率，降低了 20% ~ 70%。随着载荷的增加，磨损率呈上升趋势。这是因为：当载荷较小时，磨盘对磨损表面颗粒的剪切应力较小，涂层与基体材料的结合情况较好，不易发生颗粒的脱落，此时涂层材料的磨损率较低；而随着载荷的增大，涂层材料与基体结合处受到的剪切力及压应力逐渐增大，

颗粒的脱落几率也逐渐增大，而脱落的颗粒作为松散磨粒对涂层材料进行磨损，降低了涂层材料的耐磨性，所以磨损率也随之增加。

图 5a 和 b 分别是转速 100 r/min 时，DLC 涂层刀具在 40 N 和 160 N 载荷下摩擦磨损后磨痕形貌的 SEM 照片。由图 5a 可看出，当载荷为 40 N 时，涂层表面有很浅的沟痕，无明显的剥落。这是由于涂层表面的凸起处在对磨件的摩擦挤压作用下，发生反复的切削和塑性变形所致。由图 5b 可看出，载荷为 160 N 时，在摩擦交变应力作用下，划痕加深，涂层剥落区域增大，材料表面变得十分粗糙，因而导致磨损率急剧增大。

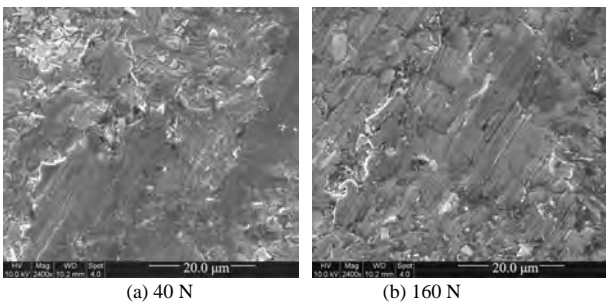


图 5 DLC 涂层在不同载荷下摩擦磨损后的扫描电镜照片  
Figure 5 SEM images of DLC films after friction wear under different loads

### 3.3 转速对摩擦磨损性能的影响

图 6 为 DLC 刀具和无涂层刀具与 45#钢摩擦时平均摩擦因数随转速的变化曲线(载荷为 120 N)。

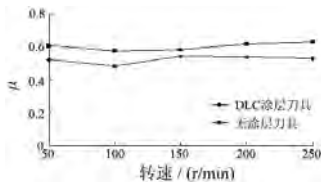


图 6 DLC 涂层刀具和无涂层刀具平均摩擦因数随转速的变化  
Figure 6 Variation of average friction factor with rotation speed for the tools with and without DLC film

从图 6 可以看出，无涂层刀具的摩擦因数明显高于涂层刀具的摩擦因数。在相同载荷情况下，随着转速的增大，摩擦因数呈先下降后上升、然后趋于稳定的趋势。转速为 100 r/min 时，两种刀具的摩擦因数达到最小值。这是因为滑动速度对摩擦因数的影响具有两面性。首先，如果速度的增加还没有引起摩擦表面温度的激增，则滑动速度的增加可能会使摩擦和磨损减小。因为滑动速度的大小决定着表面摩擦连续点作用的时间，如果时间很短，材料来不及变形，则摩擦因数小。另外，在滑动速度很大且引起表面温度增加的情况下，材料的热传导和机械性能受到影响，从而使摩擦因数增大。

图 7 为 DLC 涂层刀具和无涂层刀具与 45#钢摩擦

时磨损率随转速的变化曲线(载荷为 120 N)。从图 7 可以看出，DLC 涂层刀具的磨损率明显低于无涂层刀具的磨损率，降低了 20% ~ 40%。随着转速的增大，磨损率呈下降趋势。这主要也是因为滑动速度对磨损量的影响具有两面性，只要速度的增加还没有引起摩擦表面上温度的激增，滑动速度增大会使摩擦磨损减少。

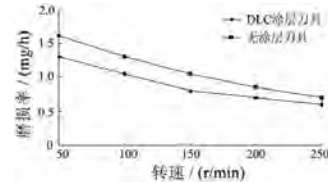


图 7 DLC 涂层刀具和无涂层刀具磨损率随转速的变化  
Figure 7 Variation of wear rate with rotation speed for the tools with and without DLC film

图 8a 和 b 是载荷为 120 N 时，DLC 涂层刀具分别在 50 r/min 和 250 r/min 转速下摩擦磨损后，磨痕形貌的 SEM 照片。由图 8a 可知，在低速(50 r/min)情况下，涂层摩擦表面粗糙，有大量硬质颗粒脱落后残留的凹坑。由图 8b 可知，在高速(250 r/min)情况下，涂层摩擦表面较光滑，硬质颗粒脱落较少，说明高速情况下涂层具有较好的抗磨作用。

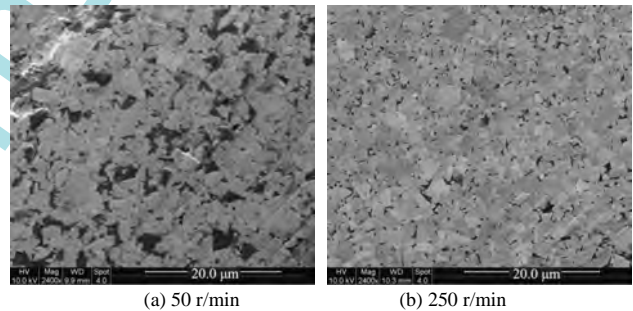


图 8 DLC 涂层刀具在不同转速下摩擦磨损后的扫描电镜照片  
Figure 8 SEM images of the tool with DLC film after friction wear at different rotation speeds

### 3.4 润滑介质对摩擦磨损性能的影响

图 9a 和 b 分别为水润滑和油润滑条件下，DLC 涂层刀具的 SEM 照片。

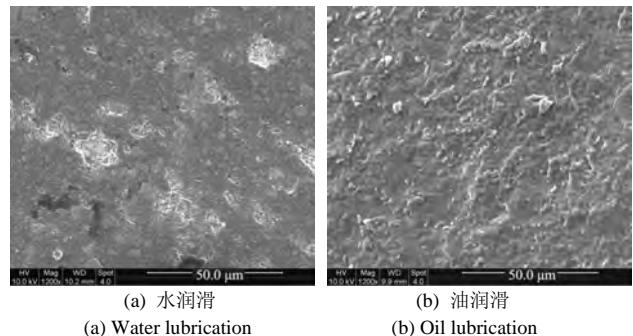


图 9 DLC 涂层刀具在不同润滑条件下摩擦磨损后的电镜照片  
Figure 9 SEM images of the tool with DLC film after friction wear under different lubricating conditions

(上接第 75 页)

- [32] 肖鑫, 龙有前, 邹小燕. 银镀层变色的综合控制[J]. 材料保护, 1998, 31 (2): 27-29.
- [33] 刘尧年. 提高镀银层抗变色性能的研究[J]. 雷达与对抗, 1995 (4): 66-69, 72.
- [34] 林宜超. 银制工艺品的变色与防护[J]. 材料保护, 1993, 26 (3): 28-31.
- [35] KARTLÜKE V D, SCHOLZ R R, FUNK M J, et al. Anlaufschutz und reibminderung mit thiolen auf silberoberflächen [J]. Galvanotechnik, 1992, 83 (6): 1918-1926.
- [36] EVESQUE M, KEDDAM M, TAKENOUTI H. The formation of self-assembling membrane of hexadecane-thiol on silver to prevent the tarnishing [J]. Electrochimica Acta, 2004, 49 (17/18): 2937-2943.
- [37] BURLEIGH T D, GU Y, DONAHEY G, et al. Tarnish protection of silver using a hexadecanethiol self-assembled monolayer and descriptions of accelerated tarnish tests [J]. Corrosion, 2001, 57 (12): 1066-1074.
- [38] BERNARD M C, DAUVERGNE E, EVESQUE M, et al. Reduction of silver tarnishing and protection against subsequent corrosion [J]. Corrosion Science, 2005, 47 (3): 663-679.
- [39] BURLEIGH T D, SHI C, KILIC S, et al. Self-assembled monolayers of perfluoroalkyl amideethanethiols, fluoroalkylthiols, and alkylthiols for the prevention of silver tarnish [J]. Corrosion, 2002, 58 (1): 49-56.
- [40] LAFFINEUR F, AUGUSTE D, PLUMIER F, et al. Comparison between  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{SH}$  and  $\text{CF}_3(\text{CF}_2)_3(\text{CH}_2)_{11}\text{SH}$  monolayers on electrodeposited silver [J]. Langmuir, 2004, 20 (8): 3240-3245.
- [41] 刘金红, 王怡红, 郭志睿, 等. 银表面分子自组装膜的防腐性能[J]. 化工学报, 2004, 55 (10): 1674-1677.
- [42] 刘金红, 王怡红, 郭志睿, 等. 银保护用自组装单分子膜的防腐蚀研究[J]. 材料保护, 2004, 37 (1): 6-8.
- [43] FREY T, KÖGEL M. Tarnish protection of silver jewels by plasmopolymer coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 174/175: 902-904.
- [44] D'AGOSTINO R, FRACASSI F, PALUMBO F, et al. Protection of silver-based alloys from tarnishing by means of plasma-enhanced chemical vapor deposition [J]. Plasma Processes and Polymers, 2005, 2 (2): 91-96.
- [45] 张勇强. 镀银电接触表面硫化(变色)机理及防变色探讨[J]. 机电元件, 1994, 14 (3): 23-26.
- [46] 戴永盛. 催化镀银与防银变色的实践[J]. 电镀与精饰, 1999, 21 (4): 15-17.
- [47] 刘文, 詹益腾. 防银变色最佳工艺效果的探讨[J]. 电镀与精饰, 1984, 6 (1): 41-44.
- [48] 文斯雄. 铍青铜电镀银工艺[J]. 电镀与涂饰, 1999, 18 (4): 61-63.
- [49] 张宝根, 周泰华, 汝永平, 等. 镀银件腐蚀变色及保护[J]. 电镀与涂饰, 1998, 17 (4): 30-33.
- [50] 杨远琪. 镀银件的变色及防变色措施[J]. 表面技术, 1994, 23 (5): 238-239.
- [51] 陈跃东. DJB-823 在防银变色上的应用[J]. 表面技术, 2000, 29 (2): 38-39.
- [52] 黄昌明, 王琼芳. 电镀银/金层耐腐蚀性能试验[J]. 电子对抗技术, 1966 (5): 33-37.

[编辑: 韦凤仙]

(下转第 70 页)

从图 9a 可以看出, 在水润滑条件下, 涂层摩擦面有大量的硬质颗粒脱落, 表面留下很多凹坑。从图 9b 可以看出, 在油润滑条件下, 涂层摩擦面没有硬质颗粒脱落。这主要是因为介质油在摩擦过程中起到了阻隔作用, 相当于摩擦副的两个表面分别与介质油发生摩擦。

#### 4 结论

(1) DLC 涂层刀具的摩擦因数明显低于无涂层刀具的摩擦因数。随着载荷的增加, 摩擦因数呈先上升后下降、然后趋于稳定的趋势; 随着转速的增加, 摩擦因数呈先下降后上升、然后趋于稳定的趋势, 但变化幅度较小。

(2) DLC 涂层刀具磨损率随载荷的增加而增大。较小载荷下, DLC 涂层表面较平坦, 硬质颗粒脱落较少; 在较大载荷下, DLC 涂层表面粗糙, 有较深的沟痕, 硬质颗粒脱落较多。

(3) DLC 涂层刀具的磨损率随转速的增大而减小。低速下, DLC 涂层表面粗糙, 有大量的硬质颗粒脱落, 形成了大量凹坑; 在高转速下, DLC 涂层表面

较平坦, 硬质颗粒脱落较少。说明 DLC 涂层刀在高转速下具有较好的抗磨作用。

(4) 在油润滑条件下, DLC 涂层表面较平坦, 硬质颗粒脱落较少。说明油能有效减缓摩擦。

#### 参考文献:

- [1] 李刘合, 夏立芳, 张海泉, 等. 类金刚石碳膜的摩擦学特性及其研究进展[J]. 摩擦学报, 2001, 21 (1): 76-80.
- [2] 韩修训, 阎鹏勋, 阎逢元, 等. 类金刚石涂层在不同载荷和湿度下的摩擦特性[J]. 摩擦学报, 2003, 23 (1): 5-9.
- [3] 戴达煌, 周克崧. 金刚石薄膜沉积制备工艺与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- [4] 张叶成, 张津, 郭小燕, 等. PCVD 技术在模具强化中的应用与进展[J]. 模具工业, 2008, 24 (2): 64-68.
- [5] 常海波, 徐洮, 李红轩, 等. 用等离子体增强化学气相沉积技术制备类金刚石碳薄膜的摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2005, 25 (4): 298-302.
- [6] 侯亚奇, 庄大明, 张弓, 等. 润滑条件下金刚石薄膜及石墨/金刚石复合薄膜的摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2002, 22 (1): 1-5.

[编辑: 韦凤仙]