

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2015.06.006

不同过渡层对 DLC 薄膜力学性能和摩擦学性能的影响 *

卓国海^{1,2}, 柯培玲², 李晓伟², 汪爱英², 赵运才¹

(1. 江西理工大学 机电工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 a. 中国科学院海洋新材料与应用技术重点实验室, b. 浙江省海洋材料与防护重点实验室, 浙江 宁波 315201)

摘 要: 薄膜与基体间的界面结合性能是决定薄膜性能发挥的关键要素。针对类金刚石薄膜(DLC)在硬质合金上结合力差的问题,采用线性阳极离子束复合磁控溅射技术在硬质合金 YG8 基体上设计制备了单层 W 过渡层、WC 过渡层、双层 W 过渡层和三层 W 过渡层 4 种不同 W 过渡层的 DLC 薄膜,探讨了不同过渡层对 DLC 薄膜力学和摩擦学性能的影响。结果表明:不同过渡层结构的 DLC 薄膜结构致密,界面柱状生长随着层数增加及过渡层厚度的降低而打断,有利于改善薄膜的韧性。当为三层 W 过渡层时,DLC 薄膜的断裂韧性达到最大值 $6.44 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;与单层 W 过渡层相比,薄膜硬度有小幅下降,但薄膜内应力降低了 55%,且膜/基匹配性更佳,结合强度高达 85 N,此时薄膜具有较低的摩擦系数和磨损率,表现出比较优异的抗磨减摩性能。

关键词: 类金刚石; 过渡层; 力学性能; 摩擦性能

中图分类号: TG174.444; TG115.58

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2015)06-0039-09

Influences of Different Interlayers on Mechanical and Tribological Properties of DLC Films

ZHUO Guo-hai^{1,2}, KE Pei-ling², LI Xiao-wei², WANG Ai-ying², ZHAO Yun-cai¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi; 2a. Key Laboratory of Marine Materials and Related Technologies, 2b. Zhejiang Key Laboratory of Marine Materials and Protective Technologies, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, Zhejiang)

Abstract: Adhesion between the film and the substrate is a key factor to determine the performance of the films. Due to the low adhesion of diamond-like carbon (DLC) film on cemented carbide, the DLC films with different W interlayer (single W layer, single WC layer, W bilayer, and W trilayer) were deposited on cemented carbide YG8 substrate by a novel linear ion beam source composited with a DC magnetron sputtering process. The mechanical and tribological properties of DLC films were evaluated. The results show that the DLC films with different W interlayers are dense, and the interfacial columnar structure with the increased layers is interrupted, which is conducive to improve the toughness of DLC films. For the DLC film with W trilayer, its the biggest toughness is $6.44 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. The hardness decreases, however, the residual stress can be reduced by 55% compared to the film with single W layer and the adhesion strength reaches to 85 N. Additionally, this film has lower friction coefficient and wear rate, which exhibits excellent anti-wear and anti-friction properties.

Keywords: diamond like-carbon (DLC); interlayer; mechanical properties; tribological performance

收稿日期: 2015-05-12; **修回日期:** 2015-10-25; **基金项目:** * 国家国际科技合作专项(2014DFG52430); 宁波市重点科技项目(2014B10032); 宁波市创新团队项目(2011B81001); 宁波市国际合作项目(2015D10004)

通讯作者: 柯培玲(1979-), 女(汉), 研究员, 博士; **研究方向:** 新型固体润滑薄膜材料与技术, HIPIMS 薄膜技术与应用开发; **Tel:** (0574) 8668 5036; **E-mail:** kepl@nimte.ac.cn

网络出版日期: 2015-12-08 16:37; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20151208.1637.010.html>

引文格式: 卓国海, 柯培玲, 李晓伟, 等. 不同过渡层对 DLC 薄膜力学性能和摩擦学性能的影响 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(6): 39-47.
Zhuo G H, Ke P L, Li X W, et al. Influences of different interlayers on mechanical and tribological properties of DLC films [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(6): 39-47.

0 引言

类金刚石(Diamond like-carbon, DLC)薄膜是一种具有高硬度、耐腐蚀、化学稳定和低磨损等优异性能的硬质防护材料,在涂层领域得到了广泛的应用,可涂覆于切削刀具、模具、轴承、密封环等零部件^[1-3]。然而在实际应用中,薄膜热沉积过程中导致的残余应力大、膜/基结合力小,高温服役条件下(200~300 ℃以上)热稳定性差等问题抑制了薄膜的优异力学性能的发

Thostenson 等人^[4-6]采用 DLC 薄膜中掺杂金属(Ti、Cr、W、Zr)或非金属元素(N、Si、F)来提高膜/基结合强度,而结果发现:掺杂元素的方式往往以降低 DLC 薄膜硬度为代价,大幅度削弱了其摩擦学性能,降低了防护寿命。同时,作为切削刀具涂层,类金刚石薄膜常涂敷于硬质合金中,而硬质合金中 Co 元素不利于碳原子形核,且对形成软质石墨相具有催化作用,因此,工业上常用化学元素祛 Co,改善碳原子形核过程,以利于硬质碳基薄膜的沉积^[7]。此外,胡芳等^[8-12]通过微喷砂、火焰喷涂打底层及复合过渡层的添加等预处理方式来提升薄膜力学及摩擦性能,但是却发现,薄膜的高内应力引起了膜/基结合力的降低,鲜有大幅度的改善,严重制约了 DLC 薄膜的应用推广。

引入缓冲过渡层是目前应用最广泛的缓解膜/基匹配较差的有效方法之一,该方法通过改善界面之间的热膨胀系数差异和结构失配来提高界面结合强度^[13]。其中多层膜过渡可以形成复杂的界面结构、构造出多层界面,通过层间结构调控达到防止柱状晶和粗大晶粒生长,从而提高薄膜的韧性和抵抗变形能力,增强界面材料对位错滑移的阻碍作用,抑制裂纹的形成和扩展,降低薄膜残余应力,是一种有效地改善膜/基结合强度的方法^[14]。

沟引宁^[15]通过设计软硬交替的 C/C 多层膜制备了 0.7 μm 的 DLC 薄膜,硬度由单层时的 7.1 GPa 增大到多层时的 68 GPa。Zhang^[16]通过 Ti 和 C 共溅射方法制备掺杂 DLC 薄膜,发现随着 Ti 含量的增加,薄膜中出现纳米 TiC 晶体,薄膜硬度由 22 GPa 升高到 31 GPa,薄膜的摩擦学性能也得到明显改善。朱昌等^[17]在高速钢上添加 Ti 过渡层制备了 DLC 薄膜,并通过退火处理降低了残余应力,显著提高了膜/基结合强度。

Xu^[18]在钛合金表面制备了不同调制周期的 DLC 多层膜,发现多层膜的残余应力显著下降,C-C sp³ 含量随着薄膜调制周期的降低而减小,当调制周期为 70 nm 表现出最佳的结合强度,而调制周期为 140 nm 时,薄膜耐磨性能达到最优。

薄膜与基体界面的匹配和沉积过程中热应力的释放直接影响界面的力学性能。多层过渡层的设计主要是通过调控软硬交替的碳膜或添加过渡金属或金属化合物层以改善界面适应性,研究者选择过渡层多以常用的过渡金属靶材 Ti、Cr 为主,主要选择介于薄膜和基体材料热膨胀系数的过渡层材料,而少有分析基体成分对过渡材料选择的影响以及过渡层结构设计对薄膜力学特性的改变。

文中在合适过渡层厚度的基础上^[10],保持过渡层厚度不变,通过添加与硬质合金 YG8 (92% WC-8%Co)基体材料成分相近的 W 过渡层设计了单层 W 过渡层、单层 WC 过渡层、双层 W 过渡层和三层 W 过渡层 4 种不同的过渡层结构,系统研究了过渡层结构设计对薄膜力学性能的影响,并探讨了 WC 过渡层与纯 W 过渡层对薄膜力学性能的影响,以及过渡层层数变化对类金刚石薄膜摩擦学性能的影响,为获得高结合性能的 DLC 薄膜提供理论基础和试验数据。

1 试验部分

1.1 材料与方法

采用线性阳极离子束(Linear ion source, LIS)复合磁控溅射技术沉积类金刚石薄膜及过渡层,沉积设备^[10]如图 1 所示。为表征薄膜的结

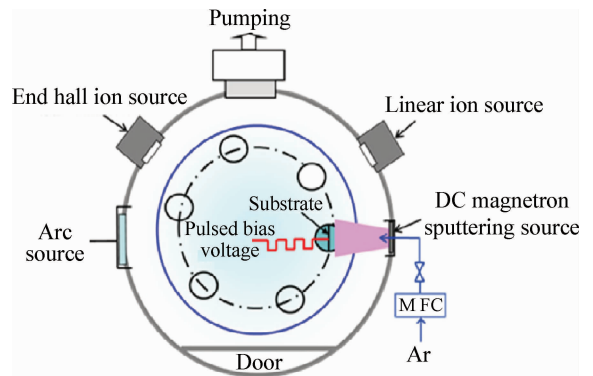


图 1 DLC 沉积设备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the DLC film deposition system

构和性能,分别选用 10 mm×20 mm×0.45 mm 的硅片 P(100)、15 mm×15 mm×5 mm 的硬质合金 YG8 (92%WC-8%Co)以及 40 mm×3 mm×0.25 mm 的应力硅片作为衬底材料。

首先将基体在酒精与丙酮中分别清洗 5 min 和 15 min,风干后置于腔体离子束前,靶基距为 15 cm,基架在腔体内可实现公转和自转,预抽真空至 2.66×10^{-3} Pa。沉积前,先在 -100 V 脉冲偏压下利用氩气刻蚀清洗衬底,去除基体表面的杂质大颗粒及氧化污染物,同时改善基体表面粗糙度,形成有利于过渡材料的附着条件,之后开始沉积过渡层及 DLC 薄膜。表 1 为 4 种不同类型 W 过渡层 DLC 薄膜的结构及沉积时间。表 2 为 W 过渡层、WC 过渡层和 DLC 薄膜的沉积工艺参数。

表 1 4 种 DLC 薄膜的结构及沉积时间

Table 1 Structure and deposition time of the four DLC films

Samples	Deposition time/min
No. 1	W(20)+DLC(40)
No. 2	WC(20)+DLC(40)
No. 3	W(10)+DLC(10)+W(10)+DLC(30)
No. 4	W(7)+DLC(10)+W(7)+DLC(10)+ W(6)+DLC(20)

表 2 过渡层的沉积工艺参数

Table 2 Deposition parameters of the interlayer

Interlayer styles	Ion source	Gas	Press/Pa
W	Sputter	Ar	0.44
WC	Sputter+LIS	Ar+C ₂ H ₂	0.52
DLC	LIS	C ₂ H ₂	0.20

1.2 表征与分析

采用 Alpha-Step IQ 表面轮廓仪测试薄膜厚度;日立公司 S-4800 场发射扫描电镜 (FESEM) 表征薄膜的表/截面微观形貌。薄膜的键价结构使用波长为 532 nm 的 Renishaw in Via Reflex 型共聚焦显微拉曼光谱仪进行分析。

薄膜硬度及弹性模量采用美国 MTS 公司 NANO Indenter G200 纳米压痕仪测试,利用动态连续加载卸载模式,最大加载载荷 500 mN,分

辨率 50 nN,压入深度为 200 nm。为了减小基底对测量结果的影响,取压入深度为薄膜 1/10 左右的 6 个测点的平均值作为薄膜的平均硬度。

残余应力采用韩国 J&L Tech 的 JLCST022 进行测量;薄膜的膜/基结合性能采用瑞士 CSM Revetest 划痕仪检测,金刚石压头半径 200 μm,测试采用 1~100 N 线性加载,划痕长度 3 mm;摩擦学性能测试采用美国 CETR 公司 UMT-3 型多功能摩擦磨损试验机,摩擦试验条件为:加载载荷 10 N,频率 5 Hz,摩擦副为 GCr15,直径 6 mm,磨痕长度 3 mm,摩擦时间 30 min。

2 结果与讨论

2.1 DLC 薄膜的形貌与结构

图 2 为硅片基体上 4 种不同过渡层 DLC 薄膜的截面形貌。经测量:4 种薄膜厚度分别为 1 065、1 072、1 058 和 1 110 nm,过渡层厚度都保持在 450 nm 左右。从图中可以看到,薄膜生长良好、结构致密、界面未呈现分层、开裂及剥离现象。No. 1 和 No. 2 试样界面过渡层出现了柱状晶,而 No. 3 和 No. 4 试样界面柱状晶粒度逐渐减小。根据 Hall-Petch 细晶强化效应,W 溅射沉积过程中柱状晶粒度减小,有利于增强对界面位错滑移的阻碍能力,对膜/基体系的硬度与断裂韧性具有明显增强作用^[19]。

利用 Raman 光谱仪对 4 种不同过渡层的 DLC 薄膜结构进行高斯拟合,结果如图 3 所示。可以看到:4 种试样均在 800~2 000 cm⁻¹ 范围内有一个 1 580 cm⁻¹ 为中心的非对称峰(G 峰),在 1 350 cm⁻¹ 附近有一个肩峰(D 峰),这是典型的非对称倾斜散射无定型碳结构。

图 4 为高斯拟合后 D 峰与 G 峰的强度比值 I_D/I_G 以及 G 峰位置。可以看出, I_D/I_G 比值随着过渡层 W 层层数的增加逐渐增大,而 WC 过渡层 DLC 的 I_D/I_G 值最高,G 峰位在此时也移动到了最高位。通常 Raman 高斯拟合后利用 I_D/I_G 的变化来定性表征 DLC 中 sp²/sp³ 含量的变化,研究发现: I_D/I_G 值越小,则 sp³ 相含量越高,薄膜的硬度越大,而 G 峰峰位的升高也会导致 sp² 石墨相的提高^[11]。由图 4 可以推断:4 种 DLC 薄膜硬度变化从高到低依次为:No. 1(单层 W 过渡层)、No. 3(双层 W 过渡层)、No. 4(三层 W 过渡层)、No. 2(WC 过渡层)。

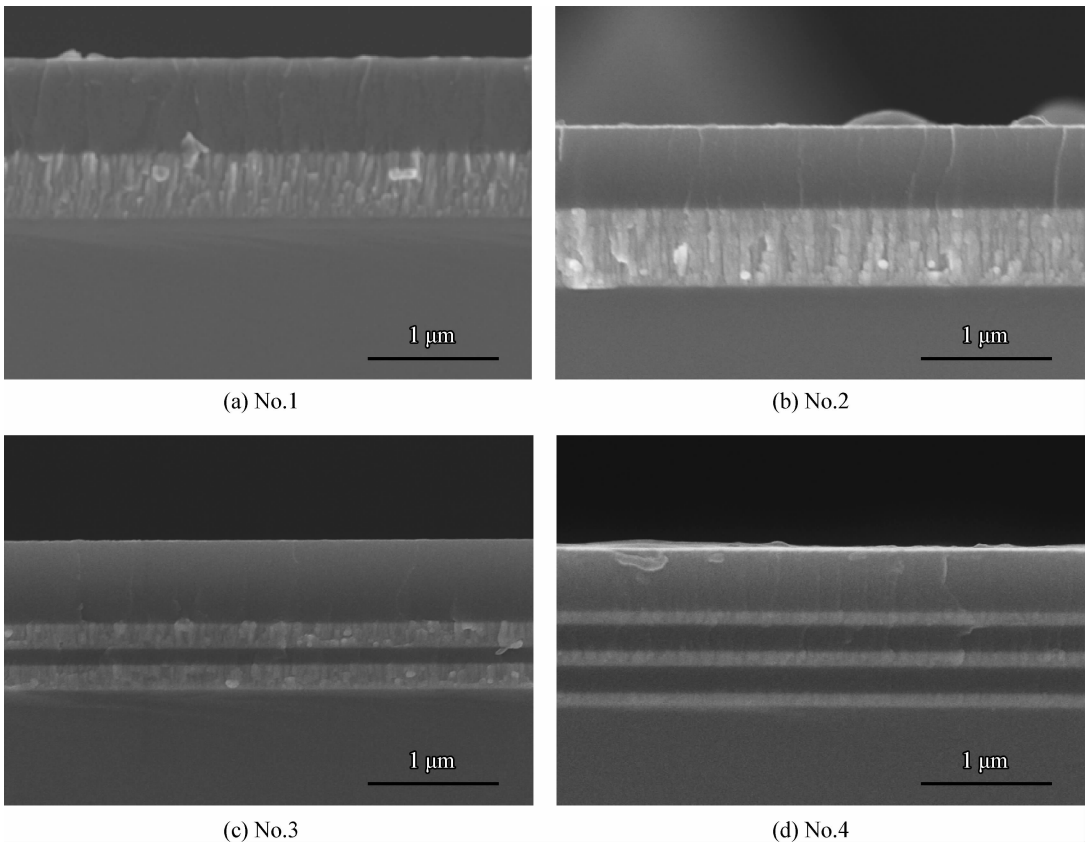


图2 Si基体上不同过渡层 DLC 薄膜的截面形貌

Fig. 2 Cross section morphologies of the DLC films with different interlayers on Si substrate

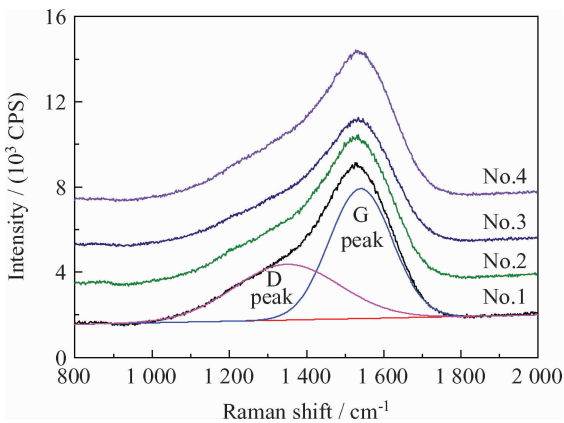


图3 不同过渡层 DLC 薄膜的 Raman 光谱图

Fig. 3 Raman spectra of the DLC films with different interlayers

过渡层界面柱状晶粒度反映了过渡层表面状态,随着柱状晶被打断,多层过渡层趋于光滑,粗糙度较小,当 C 离子沉积在表面时,表面更容易产生扩散,随着离子迁移以及相互碰撞程度的增加导致能量的减小,最终 C 离子以 sp^2 形式沉积,

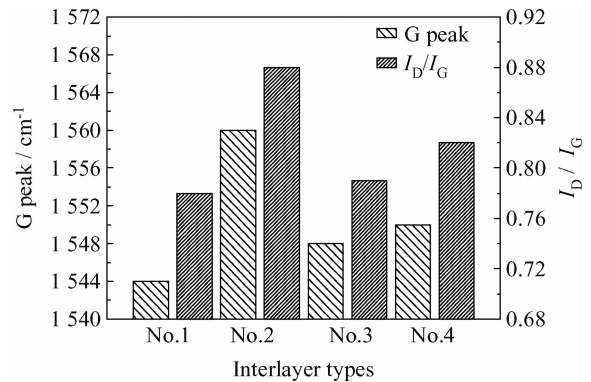


图4 不同过渡层薄膜的 I_D/I_G 和 G 峰位置

Fig. 4 I_D/I_G and G peak of the DLC films with different interlayers

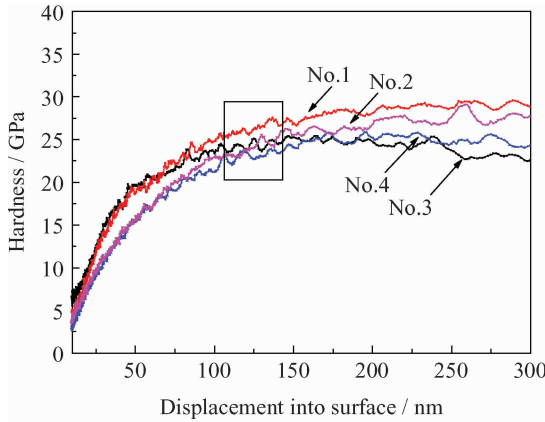
导致多层过渡层时, sp^3 含量较少。因此可以推断: DLC 薄膜中 sp^2 和 sp^3 含量的变化,与过渡层粗糙度变化引起的 C 原子成核的改变有关,进而导致 DLC 薄膜在不同过渡层状态下硬度有差异。

2.2 DLC 薄膜的力学性能

图 5 为不同过渡层结构下, DLC 薄膜力学性

能的变化规律,其中图 5(a)是不同加载深度下 4 种 DLC 薄膜的硬度变化规律,图 5(b)为平均硬度和弹性模量的变化趋势图。

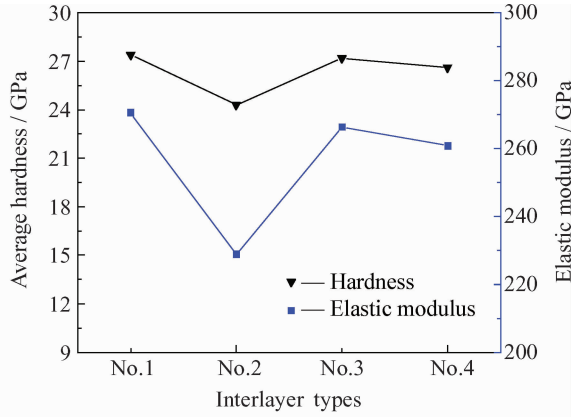
由图 5 可以看出:DLC 薄膜硬度从单层 W 过渡 DLC 薄膜的 27.2 GPa,下降到三层 W 过渡



(a) Hardness

的 26.5 GPa,薄膜硬度呈现小幅降低趋势。而采用 WC 过渡层时,薄膜硬度最低达到 24.3 GPa。WC 过渡层 DLC 薄膜硬度低主要是过渡层中纳米碳化钨相所致^[20]。

研究表明^[21-22]:少量金属掺杂可降低应力,而



(b) Average hardness and elastic modulus

图 5 不同过渡层对薄膜硬度和弹性模量的影响

Fig. 5 Effects of different interlayers on the hardness and modulus of the DLC films

WC、W₂C 的形成减少了非晶碳膜网络中 C 配位原子数,配位原子数减少及局部碳原子密度降低导致无定型碳 sp² 键的增加,在一定程度上削弱了薄膜硬度;同时,在沉积 DLC 过程中由于离子源采用恒定电流模式,随着线性离子源沉积时间的增加,离子束电压随着时间增长而上升,根据 DLC 亚表层注入模型^[22],随着离子能量的变化,离子沉积过程中,低能量时,离子无法注入薄膜亚表层,C-C 原子以 sp² 方式生长,当离子能量增加时,额外的能量可以促使薄膜内部原子发生局部结构和应力弛豫,促使 sp³ 转化为 sp²,因而硬度随着过渡层层数增加逐渐降低。

2.3 DLC 薄膜的残余应力

薄膜沉积过程中高能离子轰击以及薄膜与基体的界面不匹配导致薄膜内部产生拉应力或压应力,进而发生基底弯曲。残余应力通过硅片上 DLC 薄膜镀膜前后曲率半径的变化,利用 Stoney 方程进行计算:

$$\sigma = \frac{1}{6} \left(\frac{E_s}{1-\nu_s} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{t_s^2}{t_f} \right) \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \quad (1)$$

其中: σ 为薄膜残余应力,GPa; E_s 、 ν_s 、 t_s 分别为应力片弹性模量,GPa;泊松比与厚度,mm; t_f 为薄膜的厚度,mm。 R_1 、 R_2 为 DLC 薄膜镀膜前

后薄膜的曲率半径,mm。

图 6 给出了不同过渡层 DLC 薄膜的残余应力变化。相比于单层过渡层,三层过渡的 DLC 薄膜体系残余应力明显降低,从单层过渡层的 1.89 GPa 降低到 0.85 GPa,降幅约 55%;WC 过渡层的 DLC 薄膜体系应力也出现降低,分析认为薄膜中碳化物纳米颗粒增多,内应力通过颗粒相的变形和界面滑移释放而导致内应力大幅度降低。

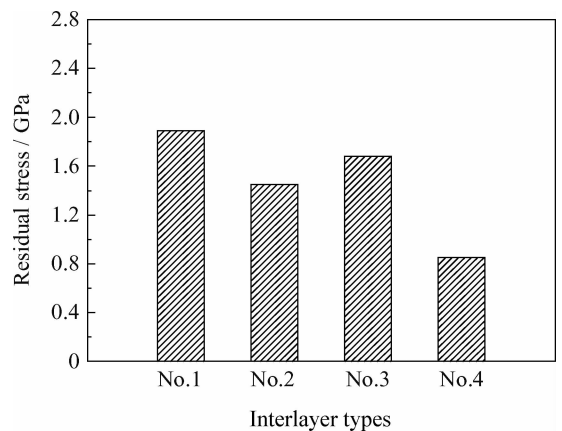


图 6 不同过渡层对薄膜残余应力的影响

Fig. 6 Effects of different interlayers on the residual stress of the DLC films

薄膜韧性反映了材料变形至断裂过程中吸收塑性变形功和断裂功的能力,断裂韧性则是材料抵抗裂纹扩展的能力。薄膜裂纹的萌生和扩展是膜层破坏的初级阶段,根据 Suh^[23]提出的剥层磨损理论,磨损过程包括3个阶段:塑性变形积累,裂纹形核及裂纹扩展,所以磨损过程中膜层的裂纹扩展能力直接反映薄膜的磨损性能。利用维氏硬度测试可以通过相同载荷下裂纹的长度或压痕周围剥落程度定性比较薄膜韧性。材料韧性计算公式如下:

$$K_{IC} = \delta \left(\frac{E}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{P}{c} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

其中: K_{IC} 为薄膜断裂韧性, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; δ 为试验常数,取决于加载压头的几何尺寸,试验采用标准四面体锥,其值取0.016; H 为薄膜硬度, MPa ; E 为薄膜弹性模量, MPa ; P 为加载载荷, N ; c 表示径向裂纹长度, μm 。

图7为不同过渡层 DLC 薄膜在载荷 300 g 条件下的压痕形貌,4种 DLC 薄膜的径向裂纹长度分别为:15、13、11和8 μm 。三层过渡层结构的 DLC 薄膜表现出最佳的抗裂纹扩展能力,断裂韧性最优,达到 $6.44 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

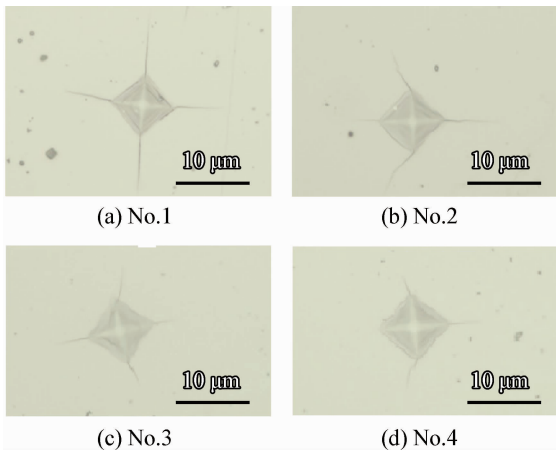


图7 不同过渡层 DLC 的维氏压痕形貌

Fig. 7 Vickers indentation morphologies of the DLC films with different interlayers

多层过渡层的引入,有利于界面处裂纹的偏转,而韧性较好过渡层的桥接作用及界面塑形变形对裂纹尖端起到钝化作用。相同压痕载荷作用下,界面层数的增加,可减小界面处弯曲应力,通过软硬交替沉积的调制层,可提供一个剪切应变区,法向作用下硬而韧的薄膜对缓解裂纹萌

生,过渡层内部晶界偏转、钝化、滑移或界面混合区的位错映像力的阻碍作用等复合因素使得多层过渡层条件下薄膜抗裂纹扩展能力增加。

2.4 DLC 薄膜的结合性能

图8为不同过渡层薄膜的划痕形貌。金刚石压头在 DLC 薄膜(硬质合金基体)表面线性加载的过程中,薄膜与基体变形不同步,导致薄膜沿划痕周边形成裂纹、脆性剥落、大片脱落等3个典型阶段。通常利用 Lc1(薄膜开裂)、Lc2(薄膜边缘片状崩落)、Lc3(大面积剥落、界面失效)来区分薄膜的结合状况,记录临界载荷 Lc3 为结合力,结合划痕试验过程中薄膜剥落形貌及声信号突变位置,得到4种过渡层结构的 DLC 薄膜平均临界载荷 Lc3 依次为:55.6、50.2、71.5和85 N,三层 W 过渡层的 DLC 薄膜表现出最佳的结合性能。

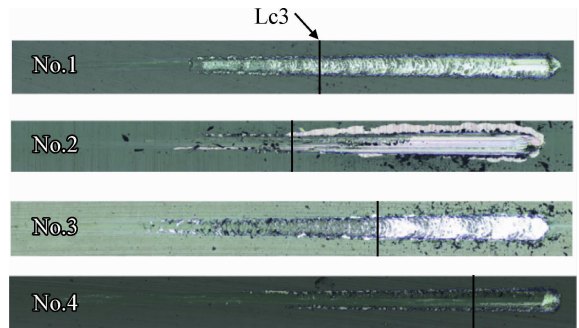


图8 不同过渡层 DLC 薄膜的划痕形貌

Fig. 8 Scratch morphologies of the DLC films with different interlayers

薄膜硬度对界面结合性能影响明显,高硬度薄膜与压头作用时,由于应变较小,产生剪切应力小,从而可以减小剪切应变,延缓或消除裂纹的产生。然而,薄膜与基体硬度差异及晶格不匹配导致的残余应力可能会产生界面分层,过渡层的涂覆一方面能够调控膜/基之间的不匹配性,降低界面应力;另一方面,相对 DLC 硬质薄膜,金属、金属化合物过渡层的缓冲作用及良好的韧性,能够降低压头划移过程中薄膜的脆性剥落,尤其在高载荷作用下,多层金属过渡层层间界面能够很好起到缓冲应力、偏转裂纹、释放载荷的作用^[19]。No.3和No.4试样的 DLC 薄膜断裂韧性较强,相同载荷作用下薄膜发生开裂、扩展、失效的可能性降低,从而提高了 DLC 薄膜体系的界面结合临界载荷。

2.5 DLC 薄膜的摩擦学性能

图 9 为常温干摩擦条件下, DLC 薄膜的摩擦因数随摩擦时间的变化情况。可以看到,不同过渡层的 DLC 薄膜摩擦因数在整个磨合过程中较低。摩擦初期阶段,由于薄膜表面吸附杂质等因素的影响,薄膜与对磨副之间存在一个磨合期,摩擦因数较高,随着摩擦的进行,摩擦因数逐渐稳定,其中三层过渡层的 DLC 薄膜摩擦因数最低为 0.11。

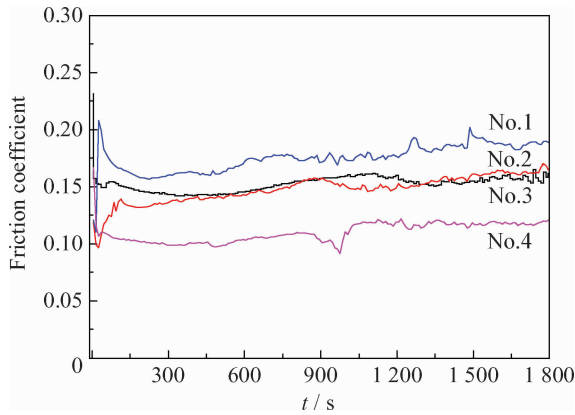


图 9 不同过渡层 DLC 薄膜的摩擦因数

Fig. 9 Friction coefficient of the DLC films with different interlayers

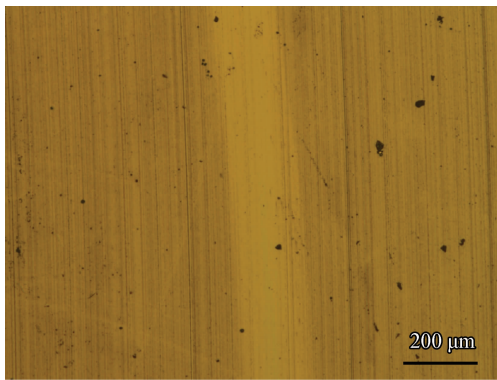
为获得 DLC 薄膜的磨损率变化,选取摩擦因数差异最大的 No. 1 和 No. 4 两种薄膜,分析最佳过渡层 DLC 薄膜磨损率改善情况。

图 10 是 No. 1 和 No. 4 薄膜的磨损及摩擦副的表面形貌,发现涂覆三层 W 过渡层的 DLC 薄膜磨痕明显变窄,摩擦副直径也较小,说明过渡层的增加,薄膜的磨损得到明显优化,提高了薄膜的表面抗磨性能。一方面摩擦因数低,与薄膜内应力下降有关;另一方面, DLC 薄膜属亚稳态结构碳膜,随着摩擦过程中温度升高,克服能量势垒后,将转化为稳定的石墨结构,局部接触面滑动诱导产生的热量导致 sp^3 杂化结构中的 C-H 键断裂,摩擦过程中 H 的减少引起 sp^3 杂化结构向 sp^2 杂化结构转变,石墨片状结构在磨损过程中可以起到转移磨屑的作用。

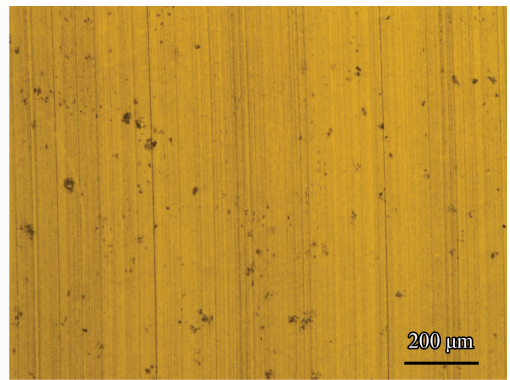
图 11 是 No. 1 和 No. 4 试样的磨痕截面示意图,利用磨损率公式:

$$W = Vl/FL \quad (3)$$

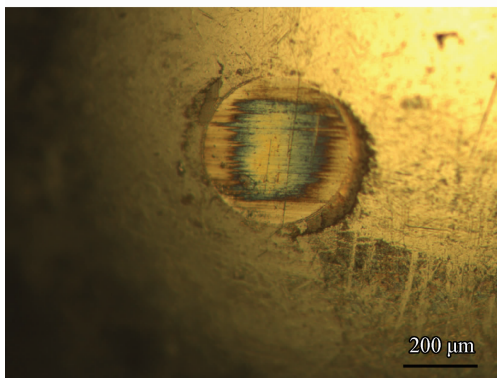
其中: W 为磨损率, $\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$; V 为磨痕面积, mm^2 ; l 为磨痕长度, mm ; F 为加载载荷, N ; L 为摩擦总距离, m 。



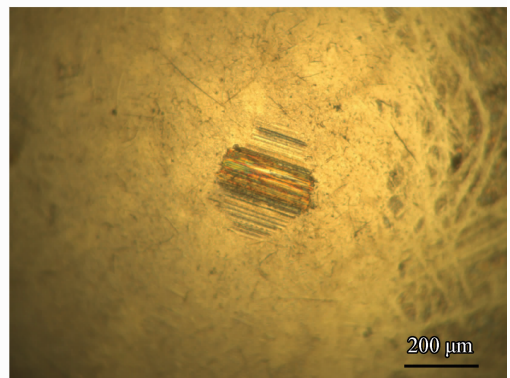
(a) No.1, film



(b) No.4, film



(c) No.1, counterpart ball



(d) No.4, counterpart ball

图 10 No. 1 和 No. 4 DLC 薄膜及其摩擦副的磨痕形貌

Fig. 10 Worn surface morphologies of sample No. 1, No. 4 and the counterpart balls

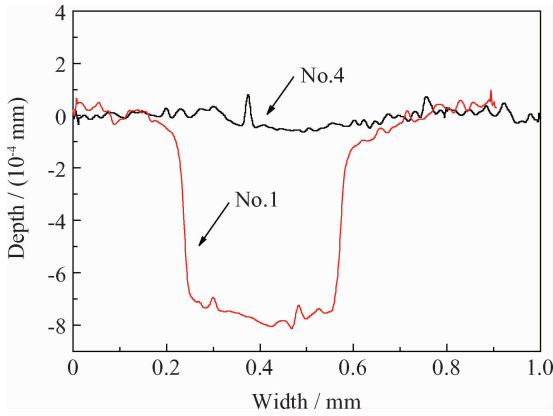


图 11 No. 1 和 No. 4 DLC 薄膜的磨痕轨迹

Fig. 11 Wear track of the worn surface of sample No. 1 and No. 4

对磨损形貌积分计算得到 No. 1 和 No. 4 薄膜的磨损率分别为 $6 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 和 $2.5 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, 对比发现薄膜在三层 W 过渡时的磨损率降低至单层 W 过渡时的 1/24。

3 结论

采用线性阳极离子束复合磁控溅射技术制备了具有 4 种不同过渡层的 DLC 薄膜, 探讨了不同过渡层对 DLC 薄膜结构、硬度、内应力、结合性能和摩擦学特性的影响。

(1) 具有不同过渡层的 DLC 薄膜均结构致密, 界面柱状生长随着层数的增加及过渡层厚度降低而打断, 有利于提高薄膜的韧性, 具有三层过渡层结构的 DLC 薄膜断裂韧性达到最大值 $6.44 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

(2) 过渡层层数的增加会影响 DLC 薄膜中 sp^3 含量, 导致薄膜硬度和弹性模量出现略微下降。相比于单层 W 过渡层, 多层 W 过渡层的引入, 膜/基匹配性能更佳, 在保持薄膜较高硬度的情况下, DLC 薄膜内应力降低了 55%, 且具有高达 85 N 的膜/基结合强度。

(3) 三层 W 过渡层结构的 DLC 薄膜具有相对较低的摩擦因数和磨损率, 分别为 0.11 和 $2.5 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, 表现出较优异的抗磨减摩性能。

参考文献

[1] Chen K W, Lin J F. The study of adhesion and nano-mechanical properties of DLC films deposited on tools steels [J]. Thin Solid Films, 2009, 517(17): 4916-4920.

[2] 郑艳彬, 姜志刚. DLC 膜涂层硬质合金刀具的研究进展 [J]. 硬质合金, 2012, 29(2): 116-122.
Zheng Y B, Jiang Z B. Research progress of diamond-like carbon coated cemented carbide tool [J]. Cemented Carbide, 2012, 29(2): 116-122 (in Chinese).

[3] Zhang D C, Shen B, Sun F H. Study on tribological behavior and cutting performance of CVD diamond and DLC films on Co-cemented tungsten carbide substrate [J]. Applied Surface Science, 2010, 256(8): 2479-2489.

[4] Thostenson E T, Li C Y, Chou T W. Nanocomposites in context [J]. Composites Science & Technology, 2005, 65(3): 491-516.

[5] Verpek S, Verperk-Heijman M G J, Karvankoval, et al. Different approaches to superhard coatings and nanocomposites [J]. Thin Solid Films, 2005, 476(1): 1-29.

[6] Ma G J, Lin G Q, Sun G, et al. Characteristics of DLC containing Ti and Zr films deposited by reactive magnetron sputtering [J]. Physics Procedia, 2011, 18(6): 9-15.

[7] 邓福铭, 王强, 邹波, 等. 硬质合金表面化学脱钴对金刚石涂层的影响 [J]. 硬质合金, 2013, 30(3): 113-121.
Deng F M, Wang Q, Zou B, et al. Effects of cobalt-etched surface pretreatment of cemented carbide on diamond coatings [J]. Cemented Carbide, 2013, 30(3): 113-121 (in Chinese).

[8] 胡芳, 代明江, 林松盛. 微喷砂预处理对硬质合金上沉积类金刚石薄膜结构和性能的影响 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(3): 53-58.
Hu F, Dai M J, Lin S S. Effects on structure and performance of diamond-like carbon films deposited on cemented carbide by micro-blasting pretreatment [J]. China Surface Engineering, 2011, 24(3): 53-58 (in Chinese).

[9] 雷淑梅, 匡同春, 尹诗衡, 等. YG6 硬质合金表面火焰法沉积纳米复合碳涂层 [J]. 材料研究与应用, 2011(1): 24-26.
Lei S M, Kuang T C, Yin S H, et al. Study on nano-composite carbon coating deposited on cemented carbide by combustion flame method [J]. Materials Research & Application, 2011(1): 24-26 (in Chinese).

[10] 卓国海, 赵运才, 李晓伟, 等. W 过渡层厚度对类金刚石薄膜结构及机械性能影响 [J]. 材料保护, 2014, 47(2): 54-58.
Zhuo G H, Zhao Y C, Li X W, et al. Influence of W buffer layer on structure and mechanical properties of diamond-like carbon films [J]. Materials Protection, 2014, 47(2): 54-58 (in Chinese).

[11] Liu Y, Yu X, Ma L, et al. Influence of chromium buffer layer on Cr/ta-C composite films [J]. Surface Engineering, 2013, 29(4): 276-279.

[12] 郭凤丽, 彭文屹, 冯亮, 等. 硬质合金表面类金刚石涂层的研究进展 [J]. 稀有金属, 2014, 38(4): 720-728.
Guo F L, Peng W Q, Feng L, et al. Research progress in diamond like coated cemented carbide [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2014, 38(4): 720-728 (in Chinese).

[13] 蒲吉斌, 王立平, 薛群基. 多尺度强韧化碳基润滑薄膜的

- 研究进展 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(6): 4-27.
- Pu J P, Wang L P, Xue Q J. Progress in strengthening and toughening carbon-based films [J]. China Surface Engineering, 2014, 27(6): 4-27 (in Chinese).
- [14] 翟玉浩. 非晶碳类薄膜的多层结构设计及其机械性能研究 [D]. 开封: 河南大学, 2013.
- Zhai Y H. The effect of design of multilayer structure on mechanical properties of carbon-based films [D]. Kaifeng: Henan University Master Dissertation, 2013 (in Chinese).
- [15] 沟引宁, 孙鸿, 黄楠, 等. 磁过滤真空弧源沉积技术制备 C/C 多层类金刚石膜/基摩擦磨损性能研究 [J]. 摩擦学学报, 2006, 26(2): 121-124.
- Gou Y N, Sun H, Huang N, et al. Fabrication and tribological characterization of multilayer C/C films prepared by filtered Cathodic vacuum arc technology [J]. Tribology, 2006, 26(2): 121-124 (in Chinese).
- [16] Zhang S, Xuan L B, Jiang J, et al. Microstructure and tribological properties of magnetron sputtered nc-TiC/a-C nanocomposite [J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 198(1/2/3): 206-211.
- [17] 朱昌, 韶霄, 梁海峰. 降低 DLC 薄膜应力的方法研究 [J]. 西安工业大学学报, 2007, 27(5): 416-420.
- Zhu C, Shao X, Liang H F. Study on reducing intrinsic stress of diamond-like carbon films [J]. Journal of Xi'an Technological University, 2007, 27(5): 416-420 (in Chinese).
- [18] Xu Z Y, Zheng Y J, Jiang F, et al. The microstructure and mechanical properties of multilayer diamond-like carbon films with different modulation ratios [J]. Applied Surface Science, 2013, 264: 207-212.
- [19] Zhang S, Sun D, Fu Y, Du H. Toughening of hard nano-structural thin films: a critical review [J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 198(1/2/3): 2-8.
- [20] Guo P, Ke P L, Wang A Y. Incorporated W roles on micro-structure and properties of W-C:H films by a hybrid linear ion beam systems [J]. Journal of Nanomaterials, 2013, 10: 1007-1024.
- [21] Wang A Y, Lee K P, Ahn J P. Structure and mechanical properties of W incorporated diamond-like carbon films prepared by ion beam deposition technique [J]. Carbon, 2006, 44(9): 1826-1832.
- [22] 薛群基. 类金刚石碳基薄膜材料 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- Xue Q J. Diamond-like carbon materials [M]. Beijing: Science Press, 2005 (in Chinese).
- [23] Svh N P. An overview of the delamination theory of Wear [J]. Wear, 1997, 44: 1-16.

(责任编辑: 黄艳斐)