

# PECVD 制备 DLC 复合薄膜性能及模具应用

张而耕<sup>a</sup>, 陈强<sup>b</sup>

(上海应用技术大学 a.表面工程研究所 b.工程创新学院, 上海 201418)

**摘要:** **目的** 比较分析 CrN 过渡层与不同膜厚对 DLC 薄膜性能的影响, 以及涂层模具的成型特性。**方法** 采用 PECVD 方法在 718 合金试样及模具表面沉积 CrN/DLC 复合膜, 预设 CrN 过渡层厚度为 0.2  $\mu\text{m}$ , DLC 膜层厚度为 0.5~1.2  $\mu\text{m}$ 。采用无损设备对不同沉积时间 (10、15、20、25、30、35 min) 的薄膜厚度进行表征, 并使用扫描电子显微镜 (SEM) 观察薄膜表面及截面结构特征。采用拉曼光谱 (Raman) 分析不同厚度 DLC 膜的峰位信息以及  $\text{sp}^3\text{-C}/\text{sp}^2\text{-C}$  的比例关系, 用纳米压痕仪表征膜层硬度, 用硬度计分析膜/基结合力, 用轮廓仪表征薄膜表面特征, 并探讨膜厚对薄膜性能的影响机制。**结果** 薄膜的厚度值在预设范围以内, 该方法制备的薄膜结构致密, 表面光滑, 无分层、凹坑、液滴粘附等缺陷。随涂层厚度的增加, 薄膜中  $\text{sp}^3\text{-C}/\text{sp}^2\text{-C}$  的比例呈先减小后增大的趋势, G 峰也先向 D 峰靠近, 而后远离。薄膜硬度同样随膜层厚度的增加呈先增加后减小的趋势, 1.06  $\mu\text{m}$  厚的 CrN/DLC 膜的硬度最高 (3600HV)。薄膜的结合力等级最高可以达到工业级的 HF2。表面轮廓无较大波动, 表面粗糙度  $R_a$  最低可达 0.011  $\mu\text{m}$ 。1.06  $\mu\text{m}$  CrN/DLC 涂层模具的成型寿命是未涂层模具的 3 倍以上。**结论** 对橡胶模具而言, 适当厚度的 DLC 微/纳涂层处理可以起到一定的减磨、抗腐蚀效果, 降低模具本体表面润湿性, 保证橡胶件成型质量。

**关键词:** Cr/DLC; 结合强度; 耐磨性; 硬度; 寿命

**中图分类号:** TG174.444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)01-0298-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.01.039

## Properties of DLC Composite Films Prepared by PECVD and Application of Mold

ZHANG Er-geng<sup>a</sup>, CHEN Qiang<sup>b</sup>

(a.Institute of Surface Engineering, b.School of Engineering Innovation,  
Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

**ABSTRACT:** The work aims to compare and analyze the effects of CrN transition layer and different film thickness on the properties of DLC films and the molding characteristics of the coating mold. The CrN/DLC composite films were deposited on the surface of 718 alloy sample and mold by PECVD method. The thickness of the CrN transition layer and DLC film was pre-set as 0.2  $\mu\text{m}$  and 0.5~1.2  $\mu\text{m}$  respectively. The thickness of films for different deposition time (10 min, 15 min, 20 min, 25 min, 30 min and 35 min) was characterized by non-destructive equipment, and the surface and cross-sectional structure of the films

收稿日期: 2018-08-12; 修订日期: 2018-10-17

Received: 2018-08-12; Revised: 2018-10-17

基金项目: 上海市重点支撑计划 (170905038000)

Fund: Key Support Plan of Shanghai Science and Technology Committee (170905038000)

作者简介: 张而耕 (1973—), 男, 博士后, 教授, 主要研究方向为超硬纳微米 PVD 涂层、机械制造、材料失效分析等。

Biography: ZHANG Er-geng (1973—), Male, Post doctor, Professor, Research focus: ultra hard nano-micron PVD coating, machinery manufacturing, materials failure analysis.

通讯作者: 陈强 (1991—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为超硬纳微米 PVD 涂层、材料失效分析。邮箱: 270625685@qq.com

Corresponding author: CHEN Qiang (1991—), Male, Master, Assistant engineer, Research focus: ultra hard nano-micron PVD coating, material failure analysis. E-mail: 270625685@qq.com

were observed by scanning electron microscopy (SEM). Raman spectroscopy was used to analyze the peak position information and  $sp^3$ -C/ $sp^2$ -C ratio of DLC films with different thickness. The nano-indentator was used to characterize the film hardness, the hardness tester was adopted to analyze the adhesion strength of film and substrate and the profilometer was applied to characterize surface features. Moreover, all the mechanisms leading to the above effects were discussed. The thickness of all the films was within the preset range. The film structure fabricated by this method was compact, smooth, and free from defects such as delamination, pits, droplet adhesion, etc. The ratio of  $sp^3$ -C/ $sp^2$ -C in the film decreased and then increased with the increase of coating thickness, and the G peak approached D peak first and then went away. The hardness of film also increased with the increase of film thickness, and then decreased. 1.6  $\mu\text{m}$  thick film had the highest hardness (HV3600). The highest adhesion strength of the film could reach HF2 of the industrial grade. The surface profile was free from greater range of fluctuations, and the minimum surface roughness  $R_a$  could reach 0.011  $\mu\text{m}$ . The service life of the coating mold was increased by at least 1.5 times. For rubber mold, suitable thickness of DLC micro-nano coating can reduce wear and corrosion, lower the surface wettability of the mold body, and ensure the forming quality of rubber parts.

**KEY WORDS:** CrN/DLC; adhesion strength; wear resistance; hardness; life

物理气相沉积 (PVD) 涂层在模具领域的应用日益广泛, 在模具减磨、耐磨方面发挥着重要作用。目前, 提高模具服役期限及产品成型质量的主要办法有: 开发高性能模具用材料; 模具本体不变, 提高其表面性能; 改善橡胶成型方式, 优化工艺路线。模具材料及成型工艺的发展已日趋成熟, 单从改善材料及工艺性能而提高模具成型特性而言, 其作用及意义并不明显<sup>[1]</sup>。因此, 模具表面改性处理将成为提高其综合性能的主要技术手段之一, 也将成为以后的研究热点及主流发展方向。传统的表面改性方法主要有电镀、氰化处理、热喷涂、熔覆及堆焊等。传统表面改性工艺虽然在一定程度上提高了模具寿命, 但往往面临着环境污染、工艺繁琐及工艺精度低等缺点, 将逐渐被淘汰或被新技术取代。近几年, PVD 技术在工具镀膜领域的应用逐渐铺展开来, 是一种简便、经济、有效的模具表面处理方法, 对改善模具表面的耐磨性、耐腐蚀性以及润湿性起到良好效果。研究表明: 金属模具 PVD 涂层可以提高模具寿命 3~5 倍<sup>[2]</sup>; 精密有色金属压铸模具采用 PVD 涂层, 可避免模具龟裂、高温熔融金属冲蚀磨损、粘模<sup>[3]</sup>; 注塑模具采用 PVD 涂层, 可防止塑胶模具腐蚀、粘模、磨损, 保护模具镜面<sup>[2-3]</sup>。作者所在表面工程研究所开发的多元 Al-Cr-N 及 DLC 涂层, 分别应用于汽车不锈钢饰条滚压模具和娃哈哈瓶口模具, 使模具寿命分别提高 5 倍及 3 倍以上。DLC 涂层主要由  $sp^2$ -C、 $sp^3$ -C 组成, 其性能受  $sp^2$ -C/ $sp^3$ -C 的比例影响, 且其内应力高, 厚膜沉积易剥落。研究表明, 元素掺杂可改善内部应力, 成为了目前 DLC 薄膜改性研究的热点, 常用掺杂元素有硅、硼、氮、钛、铬、钨、钼、钴等<sup>[4-5]</sup>。

Ti、W、Si 元素掺杂可在保证 DLC 膜硬度不降低的情况下, 释放膜层内部应力, 改善内部力学性能, 但表面粗糙度降低。此外, DLC 膜与基体物理性质差异是产生应力集中的主要原因之一。因此, 研究人员采用多层过渡的方法降低因物性差异大而产生涂

层剥落的趋势。如 Cr/TiAl/TiAlN/DLC 复合多层膜<sup>[6-7]</sup>, 不仅保持着 DLC 膜高硬度的特点, 同时具备优异的结合性能。本文主要研究 Cr/N 过渡层及膜层厚度对 DLC 膜性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 涂层制备

本实验采用阴极电弧+辉光放电技术制备 CrN/DLC 薄膜, 基体材料为 718 模具钢, 沉积设备 (型号 ICS-04 ARC PRO) 及基材如图 1 所示, 橡胶模具主要元素含量及物理特性如表 1、表 2 所示。为提高膜基结合性能, 沉积前需对试样及模具基材进行抛光处理, 然后在丙酮溶液中进行 30 min 的超声波清洗。烘干后, 将其装夹送入真空炉腔, 并将炉腔由环境压力抽至  $10^{-4}$  Pa, 工件加热至 200  $^{\circ}\text{C}$ 。向炉腔中通入 Ar, 对工件及试样进行 60 min 的等离子刻蚀清洗、活化及进一步清洁基体表面。在  $\text{N}_2$  氛围中, 采用 Cr 靶 (纯度为 99.99%), 在基体表面预沉积 0.2  $\mu\text{m}$  厚的



a PVD设备

b 718模具及试样

图 1 涂层设备及 718 模具基体  
Fig.1 Coating equipment (a) and 718 mold (b)

CrN 过渡层。停止加热,在  $C_2H_2$  (纯度为 99.99%) 气体环境中沉积 DLC 膜,具体沉积参数如表 3 所示。DLC 涂层对于沉积温度的要求较高,高温易导致涂层石墨化而剥落。因此,涂层沉积为持续降温过程。本实验涂层厚度范围为  $0.7\sim 1.4\ \mu\text{m}$ ,DLC 沉积时间分别为 10、15、20、25、30、35 min。

表 1 718 橡胶模具主要元素含量  
Tab.1 Main elements of 718 rubber mold

wt. %					
Ni	Cr	Mn	Mo	Si	C
0.8~1.2	1.4~2.0	0.6~1.0	0.3~0.55	0.2~0.8	0.28~0.4

表 2 718 橡胶模具的物理特性  
Tab.2 Physical properties of 718 rubber mold

Hardness (HRC)	Elastic modulus/ GPa	Thermal expansion/ ( $\times 10^{-6}\ ^\circ\text{C}$ )	Thermal conductivity/ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ )	Density/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
60	205	11.9	29	7.8

表 3 涂层沉积参数  
Tab.3 Coating deposition parameters

Films	Tempera- ture/ $^\circ\text{C}$	Crtarget current/A	Bias/V	$C_2H_2$ flow/ ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )
CrN transi- tion layer	200	200	-120	
DLC	Continuous cooling		-700	$1.7\times 10^{-6}$

## 1.2 涂层性能

采用 X-ray 无损检测仪(FISCHERSCOPE X-RAY XUL)测量 DLC 薄膜厚度,钨靶,加速电压 20 kV,

放大倍数 100 倍,涂层厚度取 5 个点厚度的均值。采用球磨仪研磨涂层试样表面,观察表面凹坑形貌,钢球直径 30 mm,研磨速度 1200 r/min,研磨时间 30 s。采用扫描电子显微镜(SEM, FEI Quanta200 FEG)观察 CrN/DLC 复合薄膜的表面及断面形貌特征,加速电压 20 kV,放大倍数 10 000 倍。采用拉曼光谱仪(Raman, RM2000)分析薄膜内  $\text{sp}^2\text{-C}/\text{sp}^3\text{-C}$  的比例关系及团簇信息,激光器波长 514.5 nm,物镜  $50\times$ ,光斑直径  $2\ \mu\text{m}$ ,扫描时间 30 s。

采用纳米压痕仪(MTS Nano Indenter XP),通过持续刚度方法,表征复合薄膜的微观硬度,热漂移率  $0.05\ \text{nm/s}$ ,施加载荷 20 mN,压入深度 200 nm,取 5 点薄膜硬度平均值作为涂层硬度。通过压痕法表征涂层的结合性能,实验设备为洛氏硬度计,采用金刚石压头(锥角  $120^\circ$ ),施加载荷 150 kg,保荷时间 5 s,使用  $100\times$ 物镜观察压痕形貌。采用表面轮廓仪(型号)分析薄膜的表面粗糙度及轮廓特征,启动长度 0.3 mm,滑移速度  $0.25\ \text{mm/s}$ ,取样长度 7 mm。

## 1.3 模具成型实验

橡胶产品生产过程主要为配料—混炼—挤出一硫化。混炼的目的是破坏大分子链,提高其塑性及流动性,便于挤出加工。高温硫化处理是使挤出橡胶内部“交联”或“架桥”,形成弹性或硬质橡胶成品。

本实验采用上海磐泰模具制造有限公司生产的橡胶圈成型模具,材料为 718 模具钢,工艺流程如图 2 所示。DLC 涂层主要应用于挤出成型模具部分,挤出模具在模具挤出机成型过程中易磨损,且橡胶会对其产生粘附作用,恶化产品质量。以橡胶圈表面质量及脱模能力作为评估模具失效的标准。

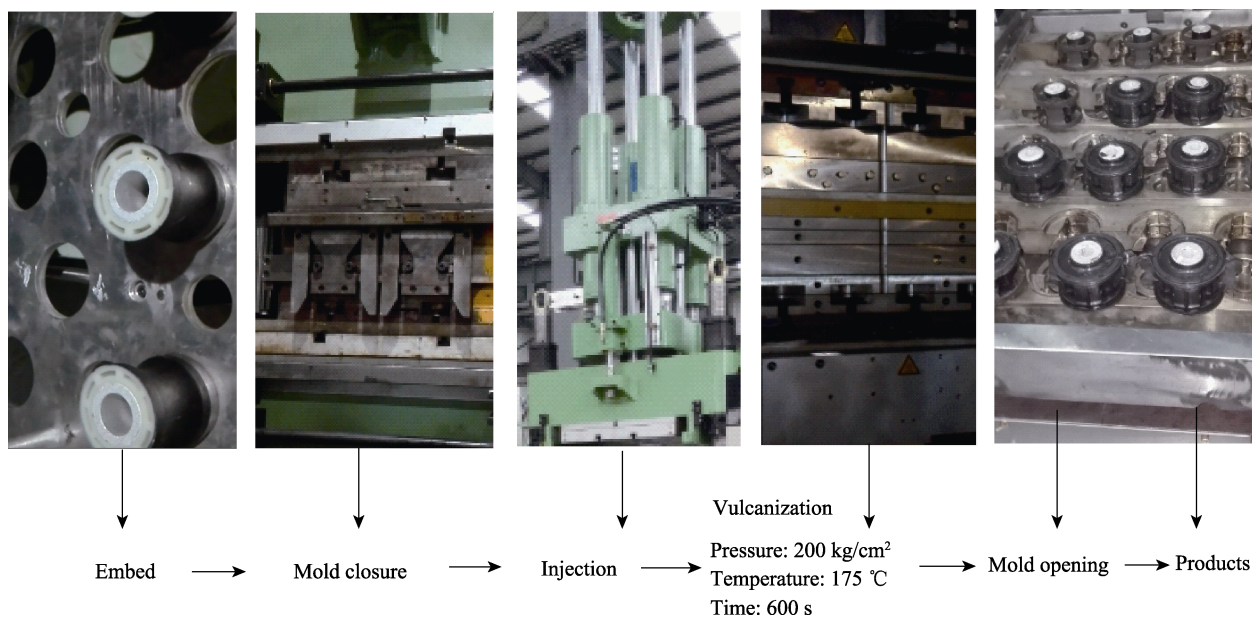


图 2 橡胶成型工艺过程  
Fig.2 Molding process of rubber



## 2 结果及讨论

### 2.1 微观结构

图 3 是沉积涂层后的试片及橡胶模具, 涂层呈黑色。DLC 膜具有内应力高、不易制备厚膜等缺点, 薄膜厚度常控制在  $1.5\ \mu\text{m}$  以内, 厚膜易剥落。本实验测得不同沉积时间时, 试片表面 5 个样本点的涂层厚度均值如图 4 所示, 可知随时间梯度的增加, 薄膜厚度呈近似线性增长, 沉积速率较为稳定。球磨处理后,  $1.06\ \mu\text{m}$  厚涂层试片的磨坑形貌如图 5 所示, 可知涂层与试片界面处犬齿交错, 无明显分界, 结合性能好。

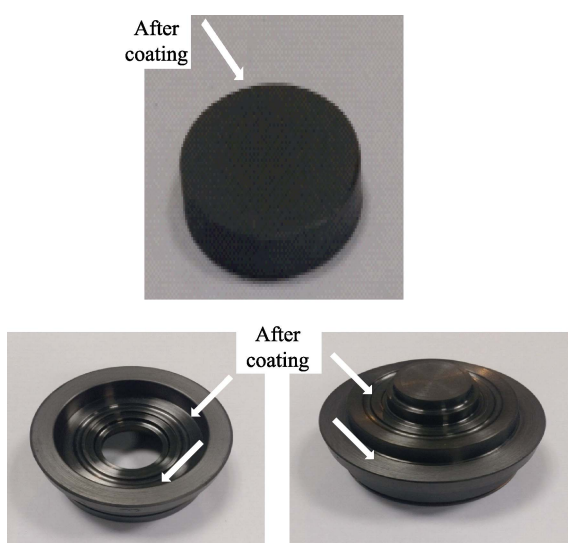


图 3 沉积涂层后的 718 合金试片及橡胶模具  
Fig.3 Coated 718 alloy sample piece and rubber mold

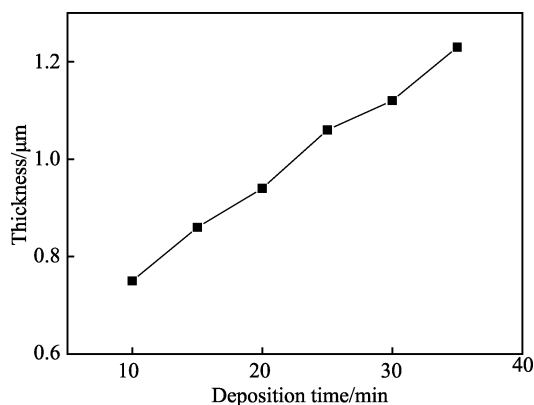


图 4 厚度-时间  
Fig.4 Coating thickness-time

$0.75\ \mu\text{m}$  厚 CrN/DLC 复合薄膜的表面及端面形貌如图 6 所示。相较于其他 PVD 沉积硬质薄膜, DLC 薄膜表面较为致密、光滑, 无针眼、凹坑, 其中大颗粒是由于宏观大粒子团的粘附所致。此外, 在界面处, 未出现开裂、剥离及分层等现象, 无明显的柱状晶, 界面细晶结构对于界面位错滑移具有阻碍作用, 有助

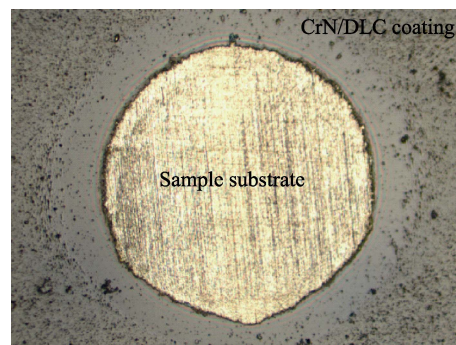
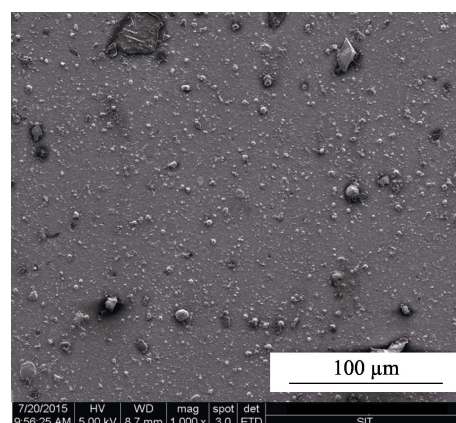
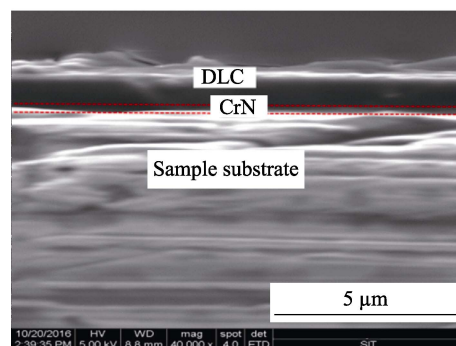


图 5 磨坑形貌  $100\times$   
Fig.5 Morphology of wear pit



a 表面形貌



b 断面形貌

图 6 CrN/DLC 复合薄膜的表面及断面形貌  
Fig.6 Surface and section morphology of Cr/DLC composite film

于提高膜/膜、膜/基体系的断裂韧性及硬度<sup>[8]</sup>。沉积工艺、CrN 层对 DLC 薄膜的硬度、薄膜内部  $\text{sp}^3\text{-C}/\text{sp}^2\text{-C}$  的比例及 D 峰、G 峰的位置, 都有不同程度的影响。DLC 薄膜存在多种不同状态的拉曼峰, 由于相互叠加作用而呈现出非对称情况。

图 7 为高斯拟合后不同沉积时间 CrN/DLC 膜的  $I_D/I_G$  及 G 峰位置信息。 $I_D/I_G$  值反映了薄膜中  $\text{sp}^3\text{-C}$  含量先增加后减小, G 峰也先向 D 峰移动而后疏远<sup>[9-10]</sup>。形成上述现象的原因主要是: 开始阶段, DLC 膜逐渐趋于完整, 间隙减小, 有序度及杂化度提高,  $\text{sp}^3\text{-C}$  含量上升; 而后由于离子轰击及应力的共同作用, 薄膜结构被破坏, 向低能态转变,  $\text{sp}^2\text{-C}$  含量增加<sup>[11-12]</sup>。

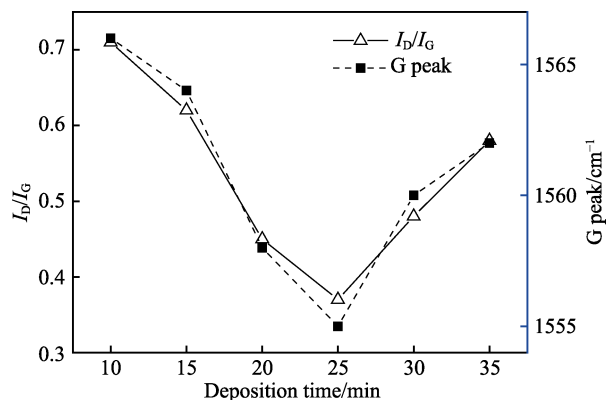


图7  $I_D/I_G$  及 G 峰位置信息  
Fig.7  $I_D/I_G$  and G peak position

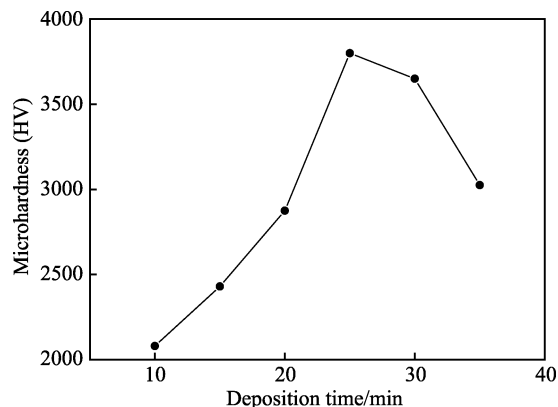


图8 涂层试样表面硬度与厚度的关系  
Fig.8 Relationship between surface hardness and thickness of coated sample

## 2.2 力学性能

CrN/DLC 复合薄膜的平均显微硬度如图 8 所示。随着沉积时间的延长,薄膜硬度呈先增大后减小的趋势。薄膜硬度的增加主要与膜层内  $sp^3$ -C 的含量有关,沉积 25 min 制备的膜层内  $sp^3$ -C 含量最高。DLC 沉积时间相对较少时,Cr 易与非晶碳网络中的 C 原子结合形成 Cr—C,减少了非晶碳网络中的配位 C 原子数,配位原子数量的减少以及局部碳原子密度的降低,导致了无定型碳网络中  $sp^2$ -C 含量的增加<sup>[13]</sup>。但随 DLC 层厚度的增加,相对 C 原子含量增加, $sp^3$ -C 相对含量也增加,涂层硬度提高。薄膜厚度增加,CrN/DLC 薄膜内应力积累严重,当超过临界应力值  $\sigma_c$  时,薄膜将以表面崩裂及裂纹扩展的形式释放应力,且膜厚越大,内应力越大,表面裂纹扩展愈明显,膜基系统的不稳定导致薄膜硬度下降<sup>[14-16]</sup>。

薄膜内应力对结合性能有重要影响,不同沉积时间的薄膜在相同载荷(150 kg)下的压痕形貌(100×)如图 9 所示,图 10 为不同沉积时间薄膜的结合力等级。图 9、图 10 表明,较薄 DLC 膜层的结合性能不佳。随着涂层厚度的增加,膜/基结合力有所改善,沉积 25 min 的薄膜的结合性能最佳,为 HF2。但 DLC 膜厚进一步增加,压痕周围膜层剥落的现象愈加明显,甚至出现大面积剥落,结合性能较差。研究发现,改善 DLC 膜的膜/基结合力有助于提高 DLC 膜的抗磨损性能和使用寿命<sup>[17]</sup>。沉积时间为 30、35 min 的薄膜剥落现象严重,进一步验证了厚膜的内应力高、表面易崩裂等特点。此外,薄膜的压痕形貌特征也是薄膜断裂韧性的体现。压痕边缘涂层脱落越明显,其薄膜的断裂韧性越差。同时,在某些外界因素(如摩擦力、高湿度、介质腐蚀等)的耦合影响下,由于应

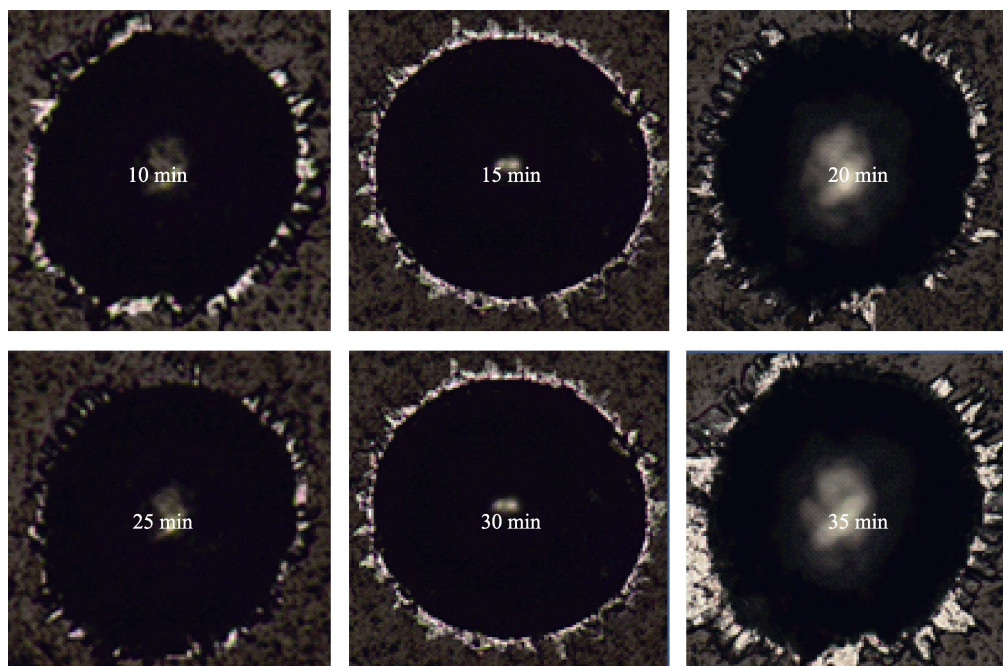


图9 涂层试样表面压痕形貌  
Fig.9 Surface indentation morphology of coated sample

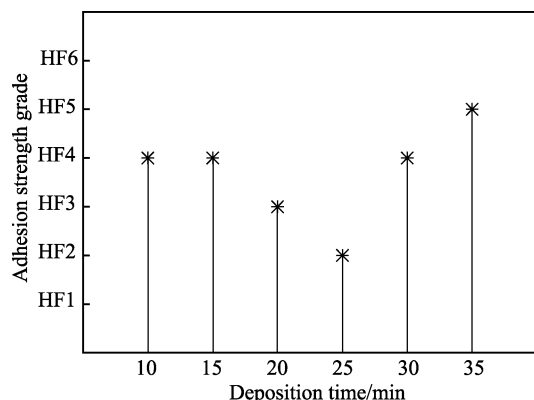


图 10 沉积时间-结合力  
Fig.10 Deposition time-adhesion strength

力释放, 还会导致薄膜起皱、开裂, 甚至剥落。

沉积 25 min 薄膜的表面轮廓曲线如图 11 所示。实验所用 718 合金试样本体的表面粗糙度  $Ra \leq 0.05 \mu\text{m}$ , 因此可近似忽略试样表面形貌特征对涂层表面轮廓的影响。涂层表面轮廓振动幅度较小, 无大范围波动, 表明其表面组织结构较均匀。不同沉积时间薄膜表面轮廓曲线相似, 但表面粗糙度值有区别, 如图 12 所示。DLC 层厚度小, 其  $Ra$  值相对较大, 主要原因是阴极弧沉积 CrN 过渡层时, Cr 靶材蒸发

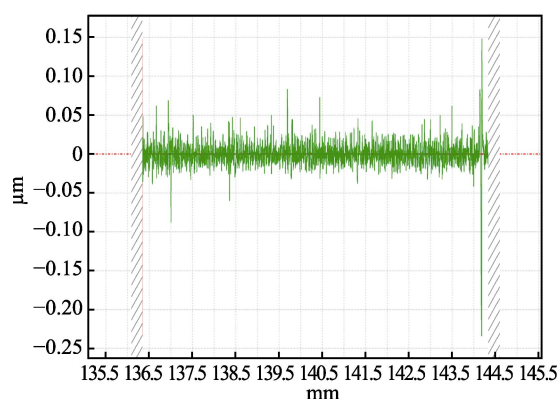


图 11 沉积 25 min 薄膜的表面轮廓曲线  
Fig.11 Coating surface profile curve for deposition time of 25 min

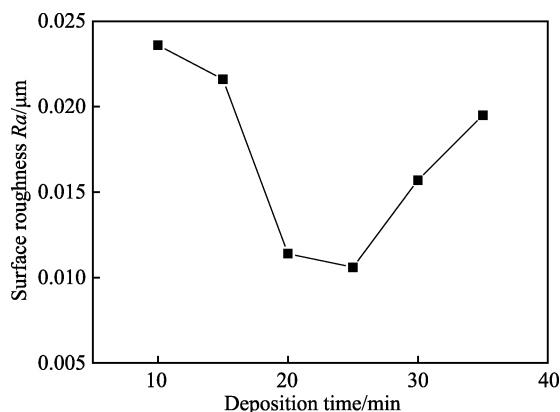


图 12 沉积时间-表面粗糙度的关系  
Fig.12 Deposition time-surface roughness

并产生大颗粒粘附所致。但随着沉积时间的增加, 荷能粒子轰击的时间延长, 加速大颗粒脱落, 促使涂层内应力释放, 减小内部缺陷。沉积 25 min 的薄膜同样具有最小的表面粗糙度  $Ra=0.011 \mu\text{m}$ , 但随沉积时间进一步增加, 应力增加显著, 易导致表面缺陷, 粗糙度值增大。

## 2.3 模具应用

橡胶模具在使用过程中, 由于受胶料粘附作用, 脱模效果及橡胶表面质量差。此外, 模具表面易受橡胶中化学成分的腐蚀, 橡胶在挤出过程中会对模具产生磨损。模具的主要失效形式为胶料粘附, 成型质量难以保证。企业生产实际表明, 若模具表面无涂层, 成型 400 模次后, 模具失效, 无法工作。不同沉积时间 DLC 涂层模具的成型模次如图 13 所示。DLC 膜具有碳基属性, 化学惰性好, 可有效防止硫化作用对模具造成的化学腐蚀。此外, 薄膜表面较致密光滑, 润湿性差, 摩擦系数低, 硬度高, 不仅可以减少橡胶对模具表面产生的粘附作用, 还可以降低磨损。沉积涂层使模具的寿命都具有不同程度的提升, 沉积 25 min 的涂层模具的寿命最佳, 为未沉积涂层的 3 倍多。

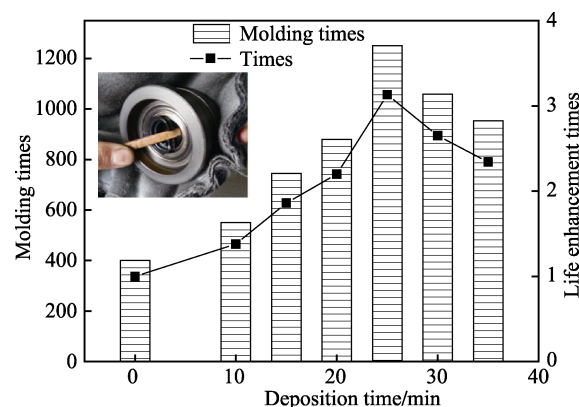


图 13 成型模次及倍数  
Fig.13 Molding times and multiples

## 3 结论

1) 在 718 合金试样及模具表面制备了不同厚度的 CrN/DLC 薄膜, 薄膜厚度随时间的延长近似线性增长, 且薄膜结构致密, 无明显缺陷。

2)  $\text{sp}^3\text{-C}$  含量随沉积时间的增加, 呈先减少后增加的趋势, 且 D 峰及 G 峰的相对位置发生变化, 沉积 25 min 的薄膜的  $\text{sp}^3\text{-C}$  含量最高。薄膜具有高硬度与  $\text{sp}^3\text{-C}$  含量有关。

3) DLC 膜具有较低的摩擦系数和润湿性。橡胶成型实验表明, 不同沉积时间的涂层模具的寿命均有所提升, 但沉积 25 min 的涂层使模具寿命提高 3 倍以上, 效果最显著。



## 参考文献:

- [1] PAULEAU Y, THIERY F. Deposition and characterization of nanostructured metal/carbon composite films[J]. Surface and coatings technology, 2004, 180-181: 313-322.
- [2] 张而耕, 陈强. 类金刚石涂层的研究进展及其应用[J]. 粉末冶金工业, 2015, 25(5): 60-65.  
ZHANG Er-geng, CHEN Qiang. Research progress and application of diamond-like carbon coating[J]. Powder metallurgy industry, 2015, 25(5): 60-65.
- [3] 张而耕, 朱州, 张体波. 超硬纳微米 PVD 涂层技术在模具领域的发展[J]. 表面技术, 2014(5): 118-123.  
ZHANG Er-geng, ZHU Zhou, ZHANG Ti-bo. Development of super hard nanomicon PVD coating technology in the field of mold[J]. Surface technology, 2014(5): 118-123.
- [4] ZHAO G H, AUNE R E, ESPALLARGAS N. Tribocorrosion studies of metallic biomaterials: The effect of plasma nitriding and DLC surface modifications[J]. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 2016, 63: 100-114.
- [5] WANG J, MA J, HUANG W, et al. The investigation of the structures and tribological properties of F-DLC coatings deposited on Ti-6Al-4V alloys[J]. Surface and coatings technology, 2017, 316: 22-29.
- [6] ERDEMIR A. The role of hydrogen in tribological properties of diamond-like carbon films[J]. Surface and coatings technology, 2001, 146-147: 292-297.
- [7] DALIBON E L, ESCALADA L, SIMISON S, et al. Mechanical and corrosion behavior of thick and soft DLC coatings[J]. Surface and coatings technology, 2017, 312: 101-109.
- [8] MULLER I C, SHARP J, RAINFORTH W M, et al. Tribological response and characterization of Mo-W doped DLC coating[J]. Wear, 2017, 376-377: 1622-1629.
- [9] BACHMANN S, SCHULZE M, MORASCH J, et al. Aging of oxygen and hydrogen plasma discharge treated a-C:H and Ta-C coatings[J]. Applied surface science, 2016, 371: 613-623.
- [10] OUCHABANE M, HASSANI S, DUBLANCHETIXIER C, et al. Effect of DLC films thickness on residual stress and mechanical properties[J]. Science of advanced materials, 2015, 7(7): 157-162.
- [11] 安书董, 王晓燕, 陈仙, 等. 基底表面纳米织构对非晶四面体碳膜结构和摩擦特性的影响研究[J]. 物理学报, 2015, 64(3): 440-445.  
AN Shu-dong, WANG Xiao-yan, CHEN Xian, et al. Effect of ion-beam surface modification technology on the variation of surface texture[J]. Acta phys sin, 2015, 64(3): 440-445.
- [12] İRFAN U, ASLANTAS K, BEDİR F. The performance of DLC-coated and uncoated ultra-fine carbide tools in micromilling of inconel 718[J]. Precision engineering, 2015, 41: 135-144.
- [13] RAY S C, PONG W F, PAPAKONSTANTINOU P. Iron, nitrogen and silicon doped diamond like carbon (DLC) thin films: A comparative study[J]. Thin solid films, 2016, 610: 42-47.
- [14] BOBZIN K, BAGCIVAN N, IMMICH P, et al. Advancement of a nano-laminated TiHfN/CrN PVD tool coating by a nano-structured CrN top layer in interaction with a biodegradable lubricant for green metal forming[J]. Surface and coatings technology, 2009, 203: 3184-3188.
- [15] SOLIS J, ZHAO H, WANG C, et al. Tribological performance of an H-DLC coating prepared by PECVD[J]. Applied surface science, 2016, 383: 222-232.
- [16] TSOTSOS C, BAKER M A, POLYCHRONOPOULOU K, et al. Structure and mechanical properties of low temperature magnetron sputtered nanocrystalline (NC-)Ti(N,C)/amorphous diamond like carbon (a-C:H) coatings[J]. Thin solid films, 2010, 519: 24-30.
- [17] QU Sheng-guan, SUN Fu-jian, ZHANG Liang, et al. Effects of cutting parameters on dry cutting of aluminum bronze alloy[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2014, 70(1): 669-698.