氩气流量对非晶碳膜结构及力学和摩擦学性能的影响

冯兴国[1]，周晖[1]，张延帅[1]，郑宇[1]，张凯锋[1]，汪科良[1]，杨拉毛草[1]，张宝荣[2]，赵志勇[2]，郑军[1]，刘兴光[1]，郑玉刚[1]

（1.兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理国防科技重点实验室，兰州 730000；
2.山西柴油机工业有限责任公司，山西 大同 037000）

摘 要：目的 提升 9Cr18 不锈钢表面的耐磨损性能。**方法** 在不同氩气流量条件下，采用激光引弧磁过滤阴极电弧离子镀制备非晶碳膜。利用拉曼光谱、X 射线光电子能谱仪（XPS）和原子力显微镜（AFM）表征薄膜的微观结构和化学态。利用薄膜综合性能测试仪和大气球-盘摩擦试验机，测试薄膜的力学性能和摩擦学性能。**结果** 拉曼光谱分析表明，随着氩气流量从 0 mL/min 增大到 80 mL/min，I_D/I_G 值从 0.62 逐渐增大到 2.84，而 G 峰的半高宽随着氩气流量的增大而降低。XPS 分析表明，随着氩气流量的增加，薄膜中 sp^3 杂化键含量逐渐降低，氩气流量为 0 mL/min 时，sp^3 杂化键的原子数分数为 55.1%，氩气流量为 80 mL/min 时，sp^3 杂化键的原子数分数降低至 31.0%。氩气流量为 0 mL/min 时，制备的薄膜硬度和弹性模量最大，分别为 46.4 GPa 和 380.5 GPa。不同氩气流量制备的薄膜，其摩擦系数为 0.1~0.2，薄膜的磨损率随着氩气流量的增加而增大。**结论** 氩气流量对非晶碳膜的耐磨性能具有显著的影响，氩气流量为 0 mL/min 时，所制备的薄膜的磨损率为 3.8×10^{-17} $m^3/(m\cdot N)$，相较氩气流量为 80 mL/min 时所制备薄膜的磨损率（1.1×10^{-16} $m^3/(m\cdot N)$）降低了 1 个数量级，说明其具有优异的耐磨损性能。

关键词：电弧离子镀；氩气流量；非晶碳膜；微观结构；硬度；摩擦学性能

中图分类号：TG174.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2021)10-0263-07

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.10.026

Effects of Argon Flow on Structure, Mechanical and Tribological Properties of Amorphous Carbon Films

FENG Xing-guo[1], *ZHOU Hui*[1], *ZHANG Yan-shuai*[1], *ZHENG Yu*[1], *ZHANG Kai-feng*[1], *WANG Ke-liang*[1], *YANG La-mao-cao*[1], *ZHANG Bao-rong*[2], *ZHAO Zhi-yong*[2], *ZHENG Jun*[1], *LIU Xing-guang*[1], *ZHENG Yu-gang*[1]

(1.Science and Technology on Vacuum Technology and Physical Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China; 2.Shanxi Diesel Engine Industry Co., Ltd., Datong 037000, China)

收稿日期：2020-11-29；**修订日期：**2021-04-21

Received：2020-11-29；**Revised：**2021-04-21

作者简介：冯兴国（1983—），男，博士，高级工程师，主要研究方向为表面工程。

Biography：FENG Xing-guo (1983—), Male, Ph. D., Senior engineer, Research focus: surface engineering.

通讯作者：周晖（1972—），女，博士，研究员，主要研究方向为表面工程。

Corresponding author：ZHOU Hui(1972—), Female, Ph. D., Researcher, Research focus: surface engineering.

引文格式：冯兴国，周晖，张延帅，等. 氩气流量对非晶碳膜结构及力学和摩擦学性能的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(10): 263-269.

FENG Xing-guo, ZHOU Hui, ZHANG Yan-shuai, et al. Effects of argon flow on structure, mechanical and tribological properties of amorphous carbon films[J]. Surface technology, 2021, 50(10): 263-269.

ABSTRACT: This paper aims to improve the wear resistance of 9Cr18 stainless steel. The amorphous carbon films were deposited by pulsed laser-induced cathodic vacuum arc technique with various argon flows. The microstructure and chemical state were characterized by Raman spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and atomic force microscope (AFM). The mechanical and tribological properties of the films were analyzed by microhardness tester, nano-scratch tester and ball-on-disc friction tester. The Raman spectra showed that the integrated intensity ratio (I_D/I_G) was increased from 0.62 to 2.84 with increasing argon flow from 0 mL/min to 80 mL/min. The G peak full width at half-maximum (FWHM) was decreased with increasing argon flow. XPS showed that the sp^3 content was decreased with increasing argon flow. The sp^3 content of the film deposited at 0 mL/min was highest, with a value of 55.1%. As the argon flow at 80 mL/min, the sp^3 content reduced to a minimum value of 31.0%. The hardness and modulus were decreased with increasing argon flow. The friction coefficient of the films was between 0.1 and 0.2, and the wear rate was increased with increasing argon flow. The films deposited at 0 mL/min have the minimum wear rate with a value of 3.8×10^{-17} $m^3/(m\cdot N)$, which decrease ten times than the films deposited at 80 mL/min (1.1×10^{-16} $m^3/(m\cdot N)$), and indicates an excellent wear resistance.

KEY WORDS: arc ion plating; argon flow; amorphous carbon film; microstructure; hardness; tribological properties

类金刚石（DLC）薄膜是一种由 sp^3 键和 sp^2 键组成的亚稳态非晶碳膜，具有低摩擦系数、高硬度和耐磨损性能，已广泛应用于航天、航空、光学和生物医学等领域[1-3]。制备工艺参数和膜层结构是影响 DLC 薄膜性能的主要因素。研究显示，碳离子能量为 50~240 eV 时制备的 DLC 薄膜具有相对较高的 sp^3 键含量[4]，基体温度为 150~200 ℃时，开始出现 sp^3 键向 sp^2 键的转化[5]，梯度层或软硬交替层结构的膜层，可有效降低薄膜应力、提升薄膜附着力[6]。

非晶碳膜的制备方法有：磁过滤阴极真空电弧（FCVA）[7]、等离子体增强化学气相沉积（PECVD）[8]、脉冲激光沉积（PLD）[9]和离子束沉积（IBD）[10]等。以上方法制备的非晶碳薄膜已有大量的研究报道。而激光引弧阴极真空电弧沉积技术（PLICVA）是一种新技术，结合了 PLD 与 FCVA 的特点，具有靶材利用率高、弧斑位置可控、沉积速率高和膜层质量好等优点，特别适合在精密细小零部件表面制备 DLC 薄膜。Wu J. B.等[11]研究了 PLICVA 技术中电弧电流对 DLC 薄膜微观结构与耐腐蚀性能的影响。研究结果表明，随着电弧电流的增加，薄膜中 sp^3 键含量增加，硬度显著升高，耐腐蚀性能增强。张振宇等[12]采用 PLICVA 技术制备了不同厚度的 DLC 薄膜。研究显示，随着薄膜厚度的增加，磨损机制发生变化，从单一的磨粒磨损转变为复合的粘着磨损和磨粒磨损。蔡建等[13]采用 FCVA 技术制备了四面体非晶碳膜（ta-C），研究了不同氩气流量（从 2 mL/min 到 10 mL/min）下制备的薄膜的碳键态结构和性能。结果表明，随着氩气流量的增加，薄膜内应力下降，而摩擦系数略有上升。Zhang 等[14]采用 CVD 技术，以 C_6H_6 和 Ar 为前驱气体制备了 DLC 薄膜。结果表明，随着氩气流量的增加，DLC 薄膜的硬度和应力降低。虽然采用 PLICVA 技术制备 DLC 薄膜的论文相对较少，但是 PLICVA 技术是采用激光引弧，可以不通入任何气体进行非晶碳膜制备，能系统研究不通气体和不同流量氩气对薄膜结构、力学及摩擦学性能的影响，可为 PLICVA 技术制备的非晶碳膜的工业化应用奠定实验基础。

1 实验

1.1 材料及制备

选用单晶 Si（100）和 9Cr18 不锈钢作为基材，后者的成分（以质量分数计）为：0.90%~1.00% C，17.00%~19.00% Cr，≤0.80% Si，≤0.030% S，≤0.035% P，其余为 Fe。首先将 9Cr18 不锈钢加工成尺寸为 ϕ35 mm×5 mm 的试块后，进行预磨和抛光处理，直至表面粗糙度 $Ra\leqslant0.2$ μm，然后依次经乙醇、丙酮和超声波分别清洗 5 min。

采用自主研制的激光引弧磁过滤真空阴极电弧沉积设备制备非晶碳膜，如图 1 所示。左侧安装的是磁过滤金属电弧 Ti 靶，右侧安装的是激光引弧石墨电弧靶。激光引弧石墨靶的工作原理是，真空室外部的激光发射器产生激光，在光学透镜和反光镜的调控下，聚焦到真空室内石墨靶表面，引燃石墨靶，依靠预先充电的电容组给碳等离子体提供能量。当抽真空

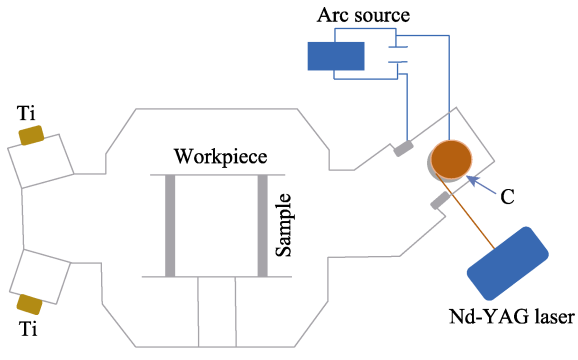


图 1 激光引弧磁过滤真空阴极电弧沉积设备

Fig.1 Schematic diagram of laser induced high current pulsed arc system

至 3×10^{-3} Pa 后，采用阳极层离子源对试样进行氩离子刻蚀清洗。清洗工艺参数为：清洗时间 15 min，离子源电流 150 mA，基体施加的偏压–350 V。等离子体清洗后，依次在基底表面沉积 Ti 过渡层和非晶碳薄膜。沉积 Ti 的参数为：Ti 靶电流 100 A，基底偏压 –70 V，沉积时间 10 min。沉积非晶碳薄膜的参数为：激光器能量 220 mJ，电容充电电压 250 V，频率 60 Hz，基体偏压 0 V。通过调控氩气流量（0、20、40、60、80 mL/min），制备不同结构的非晶碳薄膜。

1.2　结构表征与力学性能测试

采用 HORIBA 公司生产的 LabRam HR Evolution 拉曼光谱仪对薄膜的 G 峰和 D 峰进行分析，激发波长为 532 nm，光谱范围为 1000 cm^{-1} 到 2200 cm^{-1}。采用 X 射线光电子能谱仪（XPS，PHI5000 Versa 型）对 C 元素的电子结合能及不同 C 含量进行分析，首先通过 Ag $3d_{5/2}$ 的标准峰校准设备，然后样品表面经 Ar^+离子溅射 6 min 后，采集 C 1s 的精细谱。薄膜表面的粗糙度采用 Asylum Research 型原子力显微镜（AFM）进行测试。硬度和弹性模量采用 CSM NHT S/N060146 型纳米压痕仪进行测试，最大加载力为 10 mN，每个试样测试 12 个点，取其平均值。采用 Anton Paar 型纳米划痕仪测试薄膜的附着力，每个试样测试 3 条划痕，取其最小值，作为测试薄膜的附着力。非晶碳膜的摩擦学实验在 Anton Paar 生产的大气球-盘摩擦试验机上进行，摩擦条件是大气环境下的干摩擦，对磨件是 ϕ8 mm 的 9Cr18 钢球，载荷为 5 N，摩擦直径为 24 mm，转速为 500 r/min，摩擦距离约为 1800 m。采用表面轮廓仪（Taylor Hobson 型）测试薄膜的磨痕断面和磨痕 3D 形貌，采用公式(1)计算磨损率。

$$W_R=\frac{\pi DA}{pd} \tag{1}$$

式中：D 为磨痕轨道直径，mm；A 为磨痕截面面积，μm^2；d 为摩擦距离，m；p 为加载载荷，N。

2　结果与讨论

2.1　碳膜的化学组成及结构

图 2 为不同氩气流量条件下制备碳膜的拉曼光谱，采用高斯拟合对谱图进行双峰拟合，薄膜内层片 sp^2 团簇结构（大单晶石墨）的相应峰位在 1575 cm^{-1} 处，对应于 G 峰，微晶石墨相关的峰（无序细小的石墨结构）出现在 1320 cm^{-1} 处，对应于 D 峰[15-16]。D 峰和 G 峰的位置和强度可定性判断薄膜中 sp^2 杂化键和 sp^3 杂化键的相对含量。本文选择常用的峰面积比（I_D/I_G）进行分析，I_D/I_G 值越小，表明薄膜中 sp^3 杂化键含量越多[17]。表 1 是不同氩气流量下制备的碳膜拉曼光谱高斯分解结果，发现 G 峰半高宽随着氩气流量的增大而减小。H. Nakazawa[18]、S. Prawer[19]和 J. Robertson[20]等大量学者研究认为，随着 G 峰半高宽的增大，sp^3 键含量增多。从表 1 可知，随着氩气流量的增大，I_D/I_G 值也增大，表明薄膜中 sp^3 杂化键含量减小。当氩气流量为 0 mL/min 时，I_D/I_G 值最小，表明此时 sp^3 键含量最多；当氩气流量为 80 mL/min 时，I_D/I_G 值最大，表明此时 sp^3 键含量最小。G 峰半高宽和 I_D/I_G 值的变化趋势均表明，sp^3 键

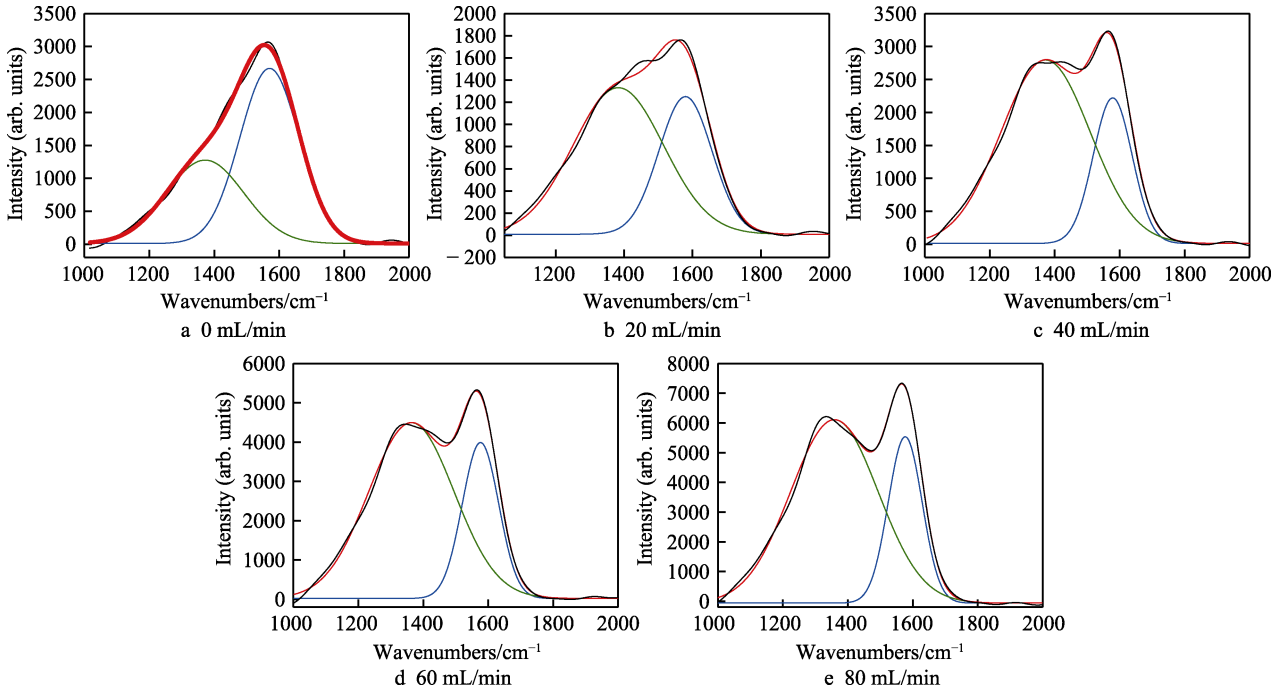


图 2　不同氩气流量下制备的碳膜拉曼光谱及分解结果

Fig.2 Raman spectra of films with various argon flows

表 1　不同氩气流量下制备的碳膜拉曼光谱高斯分解结果
Tab.1 The G position, FWHM and I_D/I_G of the films with various argon flows

Argon flow/(mL·min^{-1})	Peak G center/cm^{-1}	FWHM (G)/ cm^{-1}	I_D/I_G
0	1570	215	0.62
20	1581	182	1.82
40	1578	141	2.60
60	1576	132	2.64
80	1576	123	2.84

含量随着氩气流量的增加而减少。

根据 Lifshitz[21]和 Robertson[22]提出的亚表层注入模型，当碳离子能量较大时，离子能够穿透晶格空隙的表面层，并停留在亚表层形成间隙原子，使膜发生形变，导致膜层内的压应力增加，最终会使膜内的原子团稳定形成 sp^3 杂化相。随着氩气流量的增大，阴极石墨靶射出的碳离子与 Ar 原子的碰撞概率增大，碳离子的能量会通过碰撞转移到氩原子上，导致碳离子到达基底时的能量降低。随着碳离子能量的降低，可以注入亚表层形成间隙原子的碳离子将减少，导致薄膜内的压应力降低，压应力降低不利于 sp^3 杂化相的形成，因此薄膜的 sp^3 键含量会随着氩气流量的增大而逐渐降低。

图 3 是氩气流量为 20、80 mL/min 时所制备的非晶碳膜的 C 1s 精细谱。C 1s 谱可拟合为 3 个峰，结合能为(284.5±0.2) eV 的峰对应 C═C（sp^2）键，结合能为(285.3±0.2) eV 的峰对应 C—C（sp^3）键，结合能为(286.5±0.2) eV 的峰对应 C—O 键[23-24]。根据 C═C、C—C 和 C—O 键的峰面积大小，可以定量判断 sp^3 键含量。表 2 是不同氩气流量下制备的薄膜的 sp^3 键含量。从表 2 可知，sp^3 键的含量随着氩气流量的增大而减小。当不通氩气时，sp^3 键的原子数分数最高，为 55.1%，随着氩气流量的增大，sp^3 键含量不断减小；当氩气流量为 80 mL/min 时，sp^3 键的原子数分数达到最小，为 31.0%。

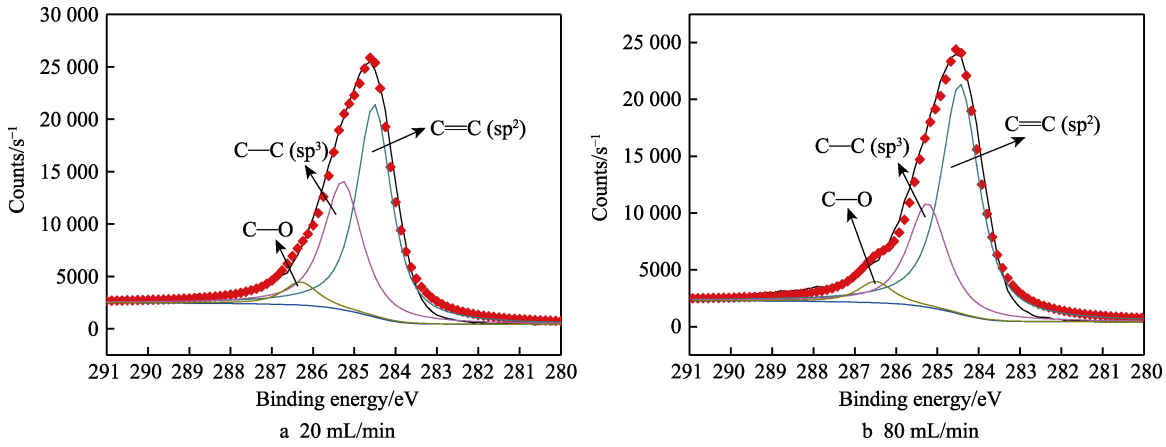


图 3　不同氩气流量下碳膜的 C 1s 拟合谱
Fig.3 C 1s fitting spectra of carbon film under different argon gas flow

表 2　不同氩气流量条件下制备的碳膜 sp^3 键含量
Tab.2 The concentration of different films by XPS C 1s spectra

Argon flow/(mL·min^{-1})	0	20	40	60	80
sp^3 bond content/at.%	55.1	40.1	38.6	36.5	31.0

氩气流量为 20、80 mL/min 时所制备薄膜的 AFM 形貌如图 4 所示。从图 4 中可以看出，氩气流量为 20 mL/min 的薄膜相较 80 mL/min 的薄膜，表面更为光滑，颗粒相对较少。氩气流量为 0、20、40、60、80 mL/min 时所制备的薄膜的表面粗糙度 *Ra* 分别为

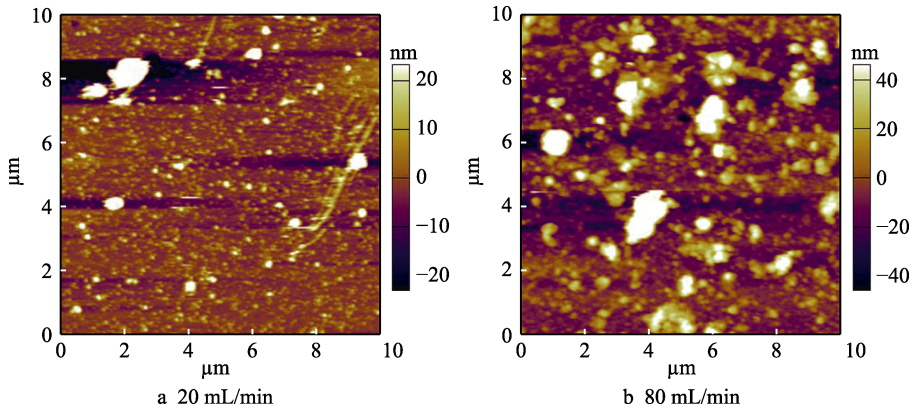


图 4　不同氩气流量下薄膜的 AFM 形貌
Fig.4 AFM morphology of thin films under different argon gas flow rates

16.0、13.5、11.6、10.9、15.5 nm，氩气流量与薄膜表面粗糙度无明显联系。原因是表面粗糙度主要受离子能量的影响，离子能量过高或过低，都会导致薄膜表面粗糙度增大。

2.2　碳膜的硬度及结合力

图 5 为薄膜的硬度和弹性模量随氩气流量的变化曲线。从图 5 中可以看出，薄膜的硬度和弹性模量均随着氩气流量的增大而逐渐降低。当氩气流量为 0 mL/min（不通气体）时，薄膜硬度和弹性模量最大，其值分别为 46.4 GPa 和 380.5 GPa。当氩气流量增大至 80 mL/min 时，薄膜硬度和弹性模量分别降低至 8.2 GPa 和 96.0 GPa。这可能是两方面因素造成的，主要原因是，碳膜的硬度和弹性模量受薄膜内部 sp^3 键含量的影响，sp^3 键含量越多，薄膜硬度和弹性模量越大；次要原因是，碳膜厚度对硬度和弹性模量的影响。随着氩气流量的增加，碳膜厚度从 835 nm（0 mL/min）降低至 743 nm（80 mL/min），最大压入深度由 81 nm（0 mL/min）增大至 122 nm（80 mL/min），压入深度大于膜厚的 10%，存在一定的基体效应。

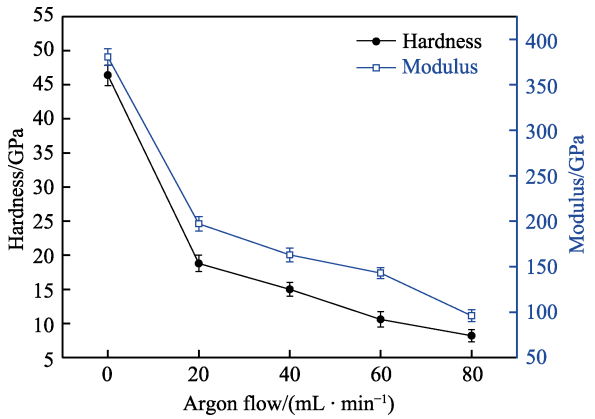


图 5　薄膜的硬度和弹性模量随氩气流量的变化曲线
Fig.5 Variation curve of film hardness and elastic modulus with argon flow

图 6 是附着力随氩气流量的变化曲线。本文将膜层完全剥离点的临界载荷（L_C）作为膜基附着力，如光学显微照片（图 6 插图）所示。氩气流量为 0 mL/min（不通入氩气）时所制备的薄膜的附着力为 614 mN。当氩气流量增加至 20 mL/min 时，膜基附着力降低到 420 mN。继续增加氩气流量，薄膜的附着力逐渐增大，当氩气流量为 80 mL/min 时，附着力达到最大值为 673 mN。由图 6 可知，除氩气流量为 20 mL/min 时所制备的薄膜附着力低于 500 mN，其他条件下制备的薄膜附着力均大于 500 mN，表现出良好的膜基结合力。分析原因是，碳离子能量较高时（不通气体），可以穿透基体表面原子层，与基底形成一个混合界面层，从而提高膜基结合力；而当通入氩气后，由于碳离子与氩原子碰撞使能量降低，所以无法穿透基体表面形成混合界面层，导致薄膜的膜基结合力降低。但随着氩气流量继续增加，薄膜的 sp^3 键含量和厚度显著降低，进而使薄膜内应力降低，较低的内应力有助于提升膜基结合力[25]。

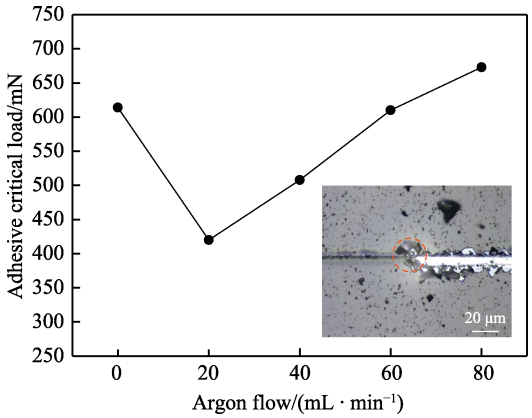


图 6　膜基附着力随氩气流量的变化曲线
Fig.6 Adhesive force as a function of argon flow

2.3　碳膜的摩擦学性能

图 7 为不同氩气流量条件下制备的非晶碳膜的摩擦系数随滑行距离的变化曲线。由图 7 可知，在初始阶段，摩擦系数较大，这可能是由于薄膜表面尚未形成转移膜造成的。随着滑行距离的增加，在摩擦副表面形成了石墨相的润滑层，起到了摩擦自润滑作用，使摩擦系数趋于平缓，达到稳定值[26]。薄膜的摩擦系数受薄膜表面粗糙度的影响，氩气流量对薄膜的表面粗糙度无明显影响，不同氩气流量下制备的碳膜的摩擦系数为 0.1~0.2。

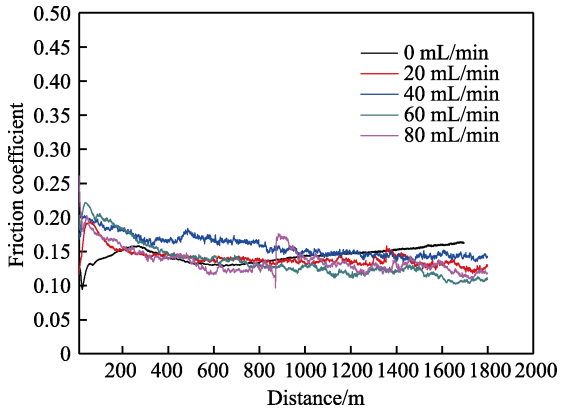


图 7　不同氩气流量下制备的碳膜的摩擦系数随滑动距离的变化曲线
Fig.7 The friction coefficient of the films with various argon flows

图 8 为不同氩气流量条件下制备的碳膜的磨损率和 H^3/E^2（硬度和弹性模量的比值）随氩气流量的变化曲线。从图 8 可以看出，薄膜的磨损率随着氩气流量的增加而增大，氩气流量为 0 mL/min 时，碳膜

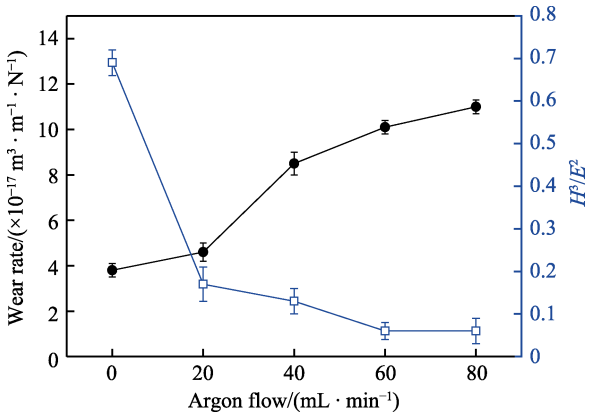
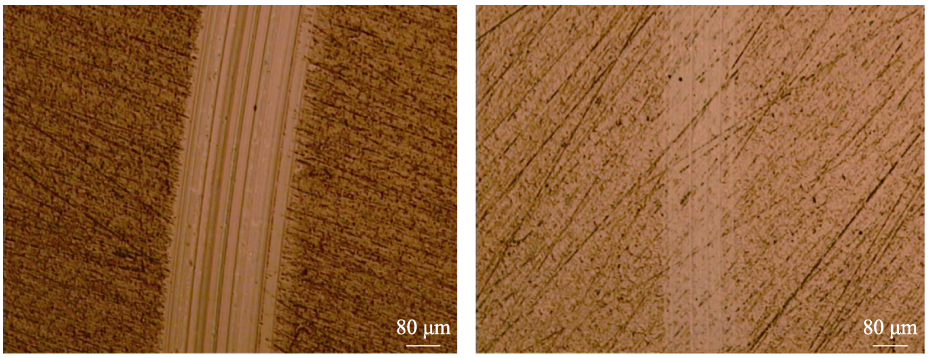


图 8　磨损率和 H^3/E^2 随氩气流量变化曲线

Fig.8 The wear rate and H^3/E^2as a function of the argon flow

的磨损率最低，其值为 3.8×10^{-17} $m^3/(m\cdot N)$；当氩气流量为 80 mL/min 时，薄膜的磨损率最大，其值为 1.1×10^{-16} $m^3/(m\cdot N)$，相较未通氩气（0 mL/min）所制备的碳膜，氩气流量为 80 mL/min 时所制备的碳膜的磨损率升高了 1 个数量级。H^3/E^2 可间接体现薄膜的抗塑性变形能力，相关研究证实，H^3/E^2 值越大，其抗塑性变形能力越强，相对具有较好的耐磨性能[27]。通过图 8 可看出，薄膜的 H^3/E^2 值随着氩气流量的增大而降低，当氩气流量为 0 mL/min 时，H^3/E^2 值为 0.67；继续增大氩气流量，H^3/E^2 值逐渐减小；当氩气流量为 80 mL/min 时，H^3/E^2 值最小，为 0.06，此时，薄膜的耐磨损性能变差，这和磨损率的分析结果相一致。此外，随着氩气流量的增加，薄膜的硬度和厚度显著下降，导致其抗塑性变形能力降低，耐磨性能变差。

图 9 是氩气流量为 20、80 mL/min 时所制备的非晶碳膜的磨痕形貌，相较氩气流量为 80 mL/min 时所制备的碳膜，氩气流量为 20 mL/min 时所制备的碳膜的磨痕宽度较小，磨痕深度较浅，这和磨损率分析结果相一致。氩气流量为 20 mL/min 时所制备的薄膜相较氩气流量为 80 mL/min 时所制备的薄膜具有更优的耐磨损性能，原因是 sp^3 杂化键的含量是影响耐磨性能的主要因素，sp^3 杂化键含量越高，耐磨性能越好。从图 9 也可看出，氩气流量为 20、80 mL/min 时所制备的薄膜的磨痕表面均存在显著的犁沟现象，属于典型的磨粒磨损。



a 20 mL/min　　b 80 mL/min

图 9　不同氩气流量下薄膜的磨痕形貌

Fig.9 Wear scar morphology of thin film under different argon gas flow

3　结论

1）氩气流量对激光引弧阴极真空电弧沉积技术制备的非晶碳膜中 sp^3 杂化键含量具有显著影响，随着氩气流量的增加，sp^3 杂化键含量逐渐降低。氩气流量为 0 mL/min 时所制备的薄膜的 sp^3 杂化键的原子数分数最大，为 55.1%；当氩气流量为 80 mL/min 时，sp^3 键的原子数分数最小，其值为 31.0%。

2）薄膜的硬度和弹性模量随着氩气流量的增加而降低，当氩气流量为 0 mL/min 时，薄膜的硬度和弹性模量最大，其值分别为 46.4 GPa 和 380.5 GPa；当氩气流量为 80 mL/min 时，薄膜的硬度和弹性模量均降低至最小值，分别为 8.2 GPa 和 96.0 GPa。

3）不同氩气流量制备的薄膜的摩擦系数为 0.1~0.2，氩气流量对摩擦系数的影响不大。薄膜的磨损率随着氩气流量的增加而增大，氩气流量为 0 mL/min 时所制备的薄膜的磨损率最小，其值为 3.8×10^{-17} $m^3/(m\cdot N)$，相较氩气流量为 80 mL/min 时所制备的薄膜的磨损率（1.1×10^{-16} $m^3/(m\cdot N)$）降低了 1 个数量级，具有优异的耐摩擦磨损性能。

参考文献：

[1] 郭飞飞, 胥光申, 任明基, 等. 类金刚石膜对 CoCrMo 合金摩擦性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 172-177.
GUO Fei-fei, XU Guang-shen, REN Ming-ji, et al. Effect of diamond-like coating on tribological behaviour of CoCrMo alloy[J]. Surface technology, 2020, 49(2): 172-177.

[2] 刘长鑫, 李璐璐, 王少峰, 等. 偏压对 DLC 薄膜结构及摩擦学性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 141-147.
LIU Chang-xin, LI Lu-lu, WANG Shao-feng, et al. Effect of bias on structure and tribological properties of diamond-like carbon films[J]. Surface technology, 2020, 49(3): 141-

147.

[3] 李党娟, 王娜, 吴慎将, 等. 不同工艺参数下 DLC 薄膜的应力状态[J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40(5): 421-426.
LI Dang-juan, WANG Na, WU Shen-jiang, et al. Stress reduction of diamond-like-carbon coatings by growth optimization[J]. Chinese journal of vacuum science and technology, 2020, 40(5): 421-426.

[4] ZHU Jia-qi, HAN Jie-cai, MENG Song-he, et al. Correlations between substrate bias, microstructure and surface morphology of tetrahedral amorphous carbon films[J]. Vacuum, 2003, 72(3): 285-290.

[5] KALINICHENKO A I, PEREPELKIN S S, STREL'NITSKIJ V E. Dependence of intrinsic stress and structure of ta-C film on ion energy and substrate temperature in model of the non-local thermoelastic peak[J]. Diamond and related materials, 2010, 19(7-9): 996-998.

[6] 杨芳儿, 龚润泽, 王贡启, 等. DLC 层厚度对 CN_x/DLC 多层膜结构及摩擦学性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(1): 62-70.
YANG Fang-er, GONG Run-ze, WANG Gong-qi, et al. Effects of diamond-like carbon (DLC) layer thickness on microstructure and tribological properties of magnetron sputtered CN_x/DLC multilayer films[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(1): 62-70.

[7] 姜其立, 王浩琦, 周晗, 等. 双弯管磁过滤阴极真空弧技术沉积超厚多层钛掺杂类金刚石膜[J]. 中国表面工程, 2018, 31(3): 53-60.
JIANG Qi-li, WANG Hao-qi, ZHOU Han, et al. Ultra-thick multilayer Ti-doped DLC films deposited by double bend-tube magnetic filter cathode vacuum arc technology [J]. China surface engineering, 2018, 31(3): 53-60.

[8] 李瑞武, 周艳文, 李建伟, 等. 工作压强对 PECVD 法制备 DLC 薄膜微观结构与力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(1): 162-167.
LI Rui-wu, ZHOU Yan-wen, LI Jian-wei, et al. Effect of deposition pressure on microstructure and mechanical properties of pulse-PECVD prepared DLC film[J]. Heat treatment of metals, 2019, 44(1): 162-167.

[9] 王雪敏, 吴卫东, 李盛印, 等. 脉冲激光沉积掺 W 类金刚石膜的性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(7): 1251-1255.
WANG Xue-min, WU Wei-dong, LI Sheng-yin, et al. Properties of W doped diamond-like carbon films prepared by pulsed laser deposition[J]. Rare metal materials and engineering, 2010, 39(7): 1251-1255.

[10] 周永, 孔翠翠, 李晓伟, 等. Ti/Al 过渡层对共掺杂类金刚石薄膜性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(1): 268-275.
ZHOU Yong, KONG Cui-cui, LI Xiao-wei, et al. Effect of Ti/Al transition layer on properties of co-doped diamond-like carbon films[J]. Surface technology, 2019, 48(1): 268-275.

[11] WU Jin-bao, CHEN Chao-ying, SHIN C T, et al. Microstructure and physical properties of DLC films deposited by laser induced high current pulsed arc deposition[J]. Thin solid films, 2008, 517(3): 1141-1145.

[12] ZHANG Zhen-yu, LU Xin-chun, LUO Jian-bin. Tribological properties of diamond-like carbon films deposited by pulsed laser arc deposition[J]. Chinese physics, 2007, 16(12): 3790-3797.

[13] 蔡建, 杨巍, 柯培玲, 等. 氩气流量对四面体非晶碳膜结构和摩擦性能的影响[J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32(8): 740-745.
CAI Jian, YANG Wei, KE Pei-ling, et al. Influence of Ar flow rate on microstructures and tribological properties of tetrahedral amorphous carbon films[J]. Chinese journal of vacuum science and technology, 2012, 32(8): 740-745.

[14] ZHANG Wei, TANAKA A, WAZUMI K, et al. Mechanical and tribological properties of Ar incorporated diamond-like carbon films[J]. Thin solid films, 2002, 416(1-2): 145-152.

[15] GHADAI R K, KALITA K, MONDAL S C, et al. PECVD process parameter optimization: Towards increased hardness of diamond-like carbon thin films[J]. Materials and manufacturing processes, 2018, 33(16): 1905-1913.

[16] WANG Lei, LI Liu-he, KUANG Xiao-cong. Effect of substrate bias on microstructure and mechanical properties of WC-DLC coatings deposited by HiPIMS[J]. Surface and coatings technology, 2018, 352: 33-41.

[17] LIU Fan-xin, YAO Kai-lun, LIU Zu-li. Substrate bias effect on structure of tetrahedral amorphous carbon films by Raman spectroscopy[J]. Diamond and related materials, 2007, 16(9): 1746-1751.

[18] NAKAZAWA H, YAMAGATA Y, SUEMITSU M, et al. Thermal effects on structural properties of diamond-like carbon films prepared by pulsed laser deposition[J]. Thin solid films, 2004, 467(1-2): 98-103.

[19] PRAWER S, NUGENT K W, LIFSHITZ Y, et al. Systematic variation of the Raman spectra of DLC films as a function of sp^2:sp^3 composition[J]. Diamond and related materials, 1996, 5(3-5): 433-438.

[20] ROBERTSON J. Diamond-like amorphous carbon[J]. Materials science and engineering R: Reports, 2002, 37(4-6): 129-281.

[21] LIFSHITZ Y, KASI S R, RABALAIS J W, et al. Subplantation model for film growth from hyperthermal species[J]. Physical review B, 1990, 41(15): 10468-10480.

[22] ROBERTSON J. Deposition mechanisms for promoting sp^3 bonding in diamond-like carbon[J]. Diamond and related materials, 1993, 2(5-7): 984-989.

[23] HELLGREN N, JOHANSSON M P, BROITMAN E, et al. Role of nitrogen in the formation of hard and elastic CN_x thin films by reactive magnetron sputtering[J]. Physical review B, 1999, 59(7): 5162-5169.

[24] ZHANG Hua-yu, LIU Liang-xue, WANG Yu-lei, et al. Structure and mechanical performance of nitrogen doped diamond-like carbon films[J]. Journal of materials science & technology, 2007, 23(4): 491-494.

[25] TAY B K, ZHANG P. On the properties of nanocomposite amorphous carbon films prepared by off-plane double bend filtered cathodic vacuum arc[J]. Thin solid films, 2002, 420-421: 177-184.

[26] HUANG Lei, YUAN Jun-tang, LI Chao, et al. Microstructure, tribological and cutting performance of Ti-DLC/α-C:H multilayer film on cemented carbide[J]. Surface and coatings technology, 2018, 353: 163-170.

[27] LEYLAND A, MATTHEWS A. On the significance of the *H*/*E* ratio in wear control: A nanocomposite coating approach to optimised tribological behaviour[J]. Wear, 2000, 246(1-2): 1-11.