

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2015.01.007

H₂/CH₄ 流量比对含氢 DLC 薄膜结构及摩擦学性能的影响 *

吴金龙, 周 晖, 郑 军, 杨拉毛草, 张延帅, 胡汉军

(兰州空间技术物理研究所 表面工程技术国防科技重点实验室, 兰州 730000)

摘 要: 利用等离子体增强化学气相沉积法在 Si(100) 基体上制备不同 H₂/CH₄ 流量比下的类金刚石薄膜, 采用拉曼光谱、红外光谱、扫描电子显微镜 (SEM)、纳米力学性能综合测试仪以及摩擦磨损试验机对薄膜的组织结构、力学以及摩擦学性能进行了分析。结果表明: 该条件下制备的薄膜具有典型的类金刚石结构且膜中氢含量较高, 薄膜表面光滑, 膜层致密且均匀, 薄膜的硬度及与基底的附着力均随着 H₂/CH₄ 流量比的增加而降低。薄膜在大气环境下具有优异的摩擦学性能, 在相同的载荷及转速条件下, H₂/CH₄ 流量比对薄膜的摩擦因数影响不大。当载荷为 5 N 时, 随着转速的增加, 摩擦因数降低; 而载荷为 10 N 时, 摩擦因数约为 0.05, 转速对其影响较小。薄膜的磨损率在 10⁻⁸ ~ 10⁻⁷ mm³/Nm 之间变化, 且随 H₂/CH₄ 流量比的增加而增大。

关键词: DLC 薄膜; H₂/CH₄; 流量比; 摩擦; 磨损

中图分类号: TG174.444; TG115.58 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9289(2015)01-0042-07

Effects of Flow Ratio of H₂ and CH₄ on Structure and Friction Properties of Hydrogen Diamond-like Carbon Films

WU Jin-long, ZHOU Hui, ZHENG Jun, YANG La-maocao, ZHANG Yan-shuai, HU Han-jun

(Key Lab for Surface Engineering Technology, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000)

Abstract: Various hydrogen contented diamond-like carbon films have been deposited on Si(100) wafers by PECVD technology. The effect of flow ratio of H₂ and CH₄ on the friction and wear behaviors of hydrogen diamond-like carbon films had been investigated. The microstructure, cross section morphology, and mechanics characteristics were obtained by Raman spectroscopy, infrared spectrometry, scanning electronic microscope (SEM), nano-hardness and nano-scratch tester. The tribological properties of films in ambient atmosphere at different loads and velocities were examined on a ball-disk tester. The result show that the films prepared by PECVD have typical hydrogenated diamond-like carbon characteristics and high hydrogen content, showing good smooth and compact. With the increase of the flow ratio of H₂ and CH₄, the hardness and adhesion force of the films decrease. The films own good tribology characteristics under ambient atmosphere, the flow ratio of H₂ and CH₄ has slight influence on the friction coefficient when the films undergo the same loads and velocities. Under high load, the velocities had little influence to the friction coefficient compared with low load. The wear rate of all films changes in the range of 10⁻⁸-10⁻⁷ mm³/Nm, and increases with the increase of the flow rate of H₂ and CH₄.

Keywords: DLC films; H₂/CH₄; flow ratio; friction; wear

0 引 言

在摩擦材料的设计使用中, 兼具高硬度与低

摩擦因数的 DLC 薄膜一直受到科学界及工业界的青睐。类金刚石膜中的含氢 DLC 薄膜的摩擦

收稿日期: 2014-08-13; 修回日期: 2014-12-31; 基金项目: * 装备预研基金(51318060205)

通讯作者: 周晖(1972-), 女(汉), 研究员, 博士; 研究方向: 空间机械摩擦学; Tel: (0931) 4585 518; E-mail: zhouhui510@sina.com

网络出版日期: 2015-01-05 17:01; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150105.1701.006.html>

引文格式: 吴金龙, 周晖, 郑军, 等. H₂/CH₄ 流量比对含氢 DLC 薄膜结构及摩擦学性能的影响 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(1): 42-48. Wu J L, Zhou H, Zheng J, et al. Effects of flow ratio of H₂ and CH₄ on structure and friction properties of hydrogen diamond-like carbon films [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(1): 42-48.

学性能对测试环境特别敏感,其在真空及惰性气体中的摩擦因数小于 0.01,磨损率在 10^{-10} 数量级,且随氢含量的增加而降低^[1]。而在大气环境中其摩擦因数随着环境中湿度的增大而增加,最高可达 0.4 左右^[2]。

石墨化现象普遍发生在类金刚石薄膜的摩擦磨损过程中,其对类金刚石薄膜获得低摩擦因数产生重要影响。但有研究表明,对于含氢类金刚石薄膜,影响其低摩擦因数的最主要因素并不是摩擦过程中表面的石墨化,而是氢元素^[3]。含氢 DLC 薄膜中氢元素分别以 C—H 结合键以及氢分子的形式存在,由于大量氢原子在碳悬键上的存在,使得薄膜与其他材料的表面亲和力大为降低,从而很大程度上避免了材料因新鲜表面裸露对摩擦副造成的粘着。随着氢含量的增加,薄膜在真空环境中的摩擦因数明显降低^[4]。

A. Erdemir^[4] 比较了利用纯 C_2H_2 、 C_2H_4 、 CH_4 及 H_2/CH_4 流量比 1:3 及 3:1 条件下制备了含氢 DLC 薄膜在氮气环境下的摩擦学性能,发现 H_2/CH_4 流量比 3:1 时摩擦因数及磨损率最低。台湾学者 Jeng^[5] 等人利用射频 (Plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD) 法研究了少量 H_2 掺入形成的富氢等离子体对 DLC 薄膜微观摩擦学性能的影响,发现掺入 H_2 后薄膜摩擦因数较低,但相对于纯 CH_4 制备的薄膜降低幅度较小。此外,国内中科院兰州化学物理研究所对高含氢 DLC 薄膜在大气环境中的摩擦学性能做过一定的研究^[3]。目前国内学者的研究焦点主要集中在流量比对薄膜在真空及惰性气体环境中摩擦学性能的研究,更多的是在针对氢元素对薄膜摩擦学性能影响的机理研究。从目前的研究发现,含氢 DLC 薄膜同样在大气环境中拥有优异的摩擦学性能,且耐磨寿命较长。它所具有的这一特性让工业应用领域看到了曙光,高含氢 DLC 薄膜在包括刀具、模具等众多行业能否成功应用也因此成为文中研究的初衷。文中对 H_2/CH_4 流量比对 DLC 薄膜在大气环境下的摩擦学性能进行研究,重点对载荷及转速对薄膜摩擦因数的影响进行了分析。

1 试验

1.1 DLC 薄膜的制备

利用等离子体增强化学气相沉积系统(设备

简图如图 1 所示)制备含氢 DLC 薄膜。选用晶面指数为(100)的圆形单晶硅片作为基底,表面粗糙度小于 5 nm。样品制备前将硅片经丙酮、乙醇溶液分别超声波清洗 20 min 后取出,再用去离子水冲洗,取出后用干燥氮气吹干后放入真空腔。关闭真空腔室,抽本底真空至 3×10^{-3} Pa,基底加热至 100 °C。为清除基底表面的杂质及氧化物,提高基底的活性,改善薄膜与基底的结合力,利用氩离子对样品进行 20 min 的刻蚀清洗。后调节氩气流量至 10 mL/min, H_2 及 CH_4 的流量比分别为 0:1、1:1、2:1、3:1 及 4:1,沉积压力保持在 45 Pa,脉冲偏压 400 V,脉冲频率 100 kHz,占空比 10%,制备不同氢含量的 DLC 薄膜。

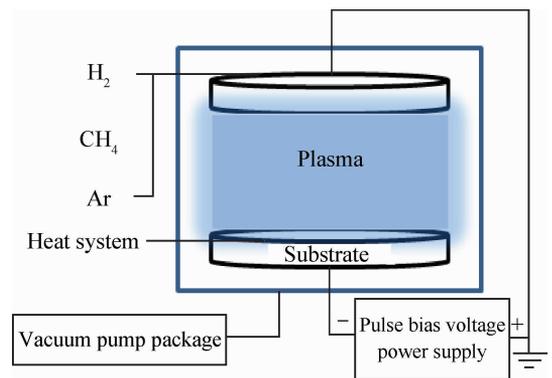


图 1 PECVD 沉积系统

Fig. 1 Schematic diagram of the PECVD deposition system

1.2 薄膜测试与评价

采用表面轮廓仪测量薄膜厚度、表面粗糙度及磨痕形貌, JSM-5600LV 型扫描电镜获取薄膜截面形貌, JobinYvon T6400 型拉曼光谱测试仪分析薄膜结构, IFS66v/S 红外光谱仪分析薄膜中的 C—H 基团类型。

采用 CSM 纳米硬度测试仪测量薄膜的纳米硬度和弹性模量,为了减少基底对测试结果的影响,压头的探测深度不超过薄膜厚度的 1/10,并取 16 个点的平均值。采用 CSM 纳米划痕仪测试薄膜与基底间的结合力,测试条件:压头半径 2 μ m,加载范围 1~100 mN,加载速率 100 mN/min,划痕速率 3 mm/min。

采用 UMT-2 型大气球-盘摩擦磨损试验机测试薄膜在大气环境中的摩擦学性能。摩擦对偶件选用 G10 级 Φ 8 mm 9Cr18 钢球(\geq 58 HRC)进

行干摩擦。环境温度 23~25 °C,相对湿度 11%~15%。试验时转速分别设为 100、300 和 500 r/min,加载荷分别选取 5 N 和 10 N。摩擦学试验采取定时结尾,周期为 300 min。

2 结果与分析

2.1 薄膜形貌及粗糙度

图 2 是利用表面轮廓仪获得的不同 H_2/CH_4 流量比下薄膜的表面粗糙度。可以看出,几种条件下制备的薄膜表面粗糙度均小于 5 nm,说明这种方法制备的薄膜表面粗糙度较低。随着反应气体中 H_2/CH_4 流量比率的增加,薄膜表面粗糙度呈下降趋势,从比值为 0:1 时的 4.8 nm 下降到 4:1 时 3.5 nm,随着 H_2/CH_4 流量比的增加,薄膜的组织结构更加致密,薄膜表面趋向于更加光滑。

图 3 为不同 H_2/CH_4 流量比下薄膜在硅基上的截面形貌。从图中可看出膜层微观结构清晰,厚度分布均匀。具有膜层致密、无明显大颗粒及缺陷少等特点,这与其他学者的研究结果一

致^[4]。随着参入氢气量的增加,膜层微观结构向更致密、断面形貌更加光滑的趋势发展。这可能与氢气容易电离有关^[6],随着反应腔中氢离子浓度的增加,甲烷在氢离子的轰击作用下更容易发生离解,同时,氢离子轰击生长膜面,促使薄膜结构更加致密。此外,这一过程还有利于薄膜的沉积,与后面薄膜沉积速率的计算结果一致。

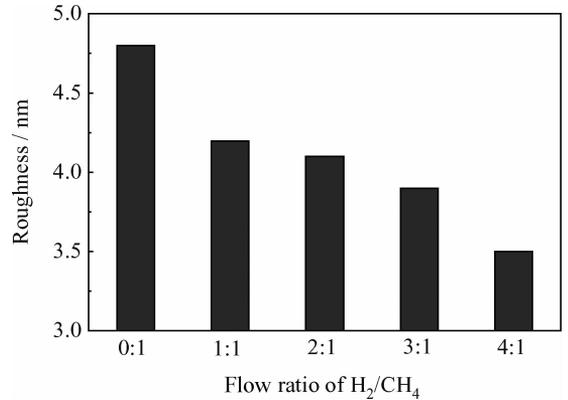
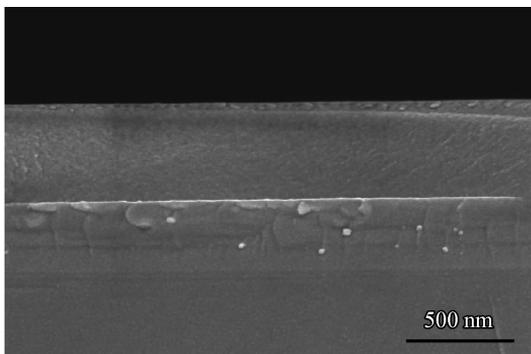
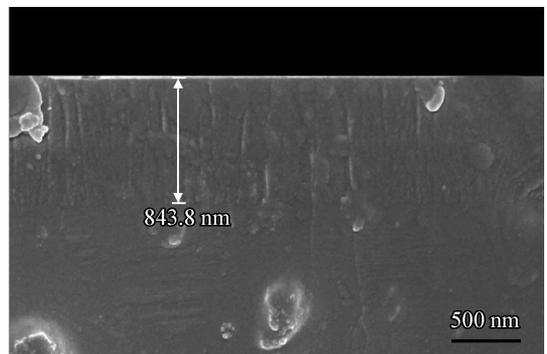


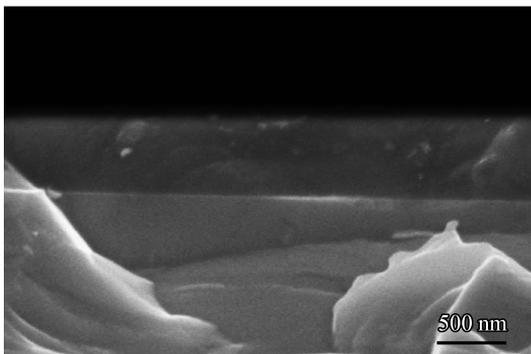
图 2 不同 H_2/CH_4 流量比下薄膜的表面粗糙度
Fig. 2 Roughness of the films deposited under different flow rates of H_2/CH_4



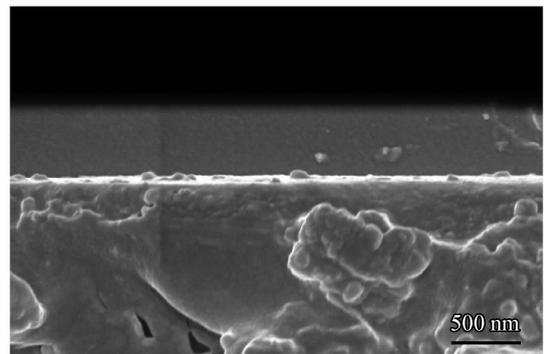
(a) 0:1



(b) 1:1



(c) 2:1



(d) 4:1

图 3 不同 H_2/CH_4 流量比下薄膜的截面形貌

Fig. 3 Cross section morphologies of the films deposited under different flow ratios of H_2/CH_4

2.2 薄膜成分及结构

拉曼光谱技术常用于分析 a-C:H 薄膜的结构。典型的类金刚石结构的 Raman 光谱可分为两个峰,分别在 $1\ 580\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\ 350\text{ cm}^{-1}$ 附近,称之为 G 峰和 D 峰。图 4 为不同流量比下制备样品的拉曼图谱,从图中可看出所制备的样品均出现典型的类金刚石膜的拉曼光谱特性。表 1 是样品的拉曼光谱经高斯分解后的结果,发现随着 H_2/CH_4 流量比的增加,G 峰及 D 峰均有向高波数方向漂移的现象,这与 A. Erdemir^[7] 等人的结果相同。随着活性氢离子浓度的增加,轰击成膜表面促使部分亚稳 sp^3 键向 sp^2 键转化,造成 I_D/I_G 随着流量比的增大而增加。 I_D/I_G 值越大,样品硬度越低,这与测得样品纳米硬度的结果相符。G 峰的半高宽与膜中 sp^2 团簇无序性有关,

G 峰的半高宽随流量比的增加而减小,说明膜中该结构的无序性在降低^[8]。

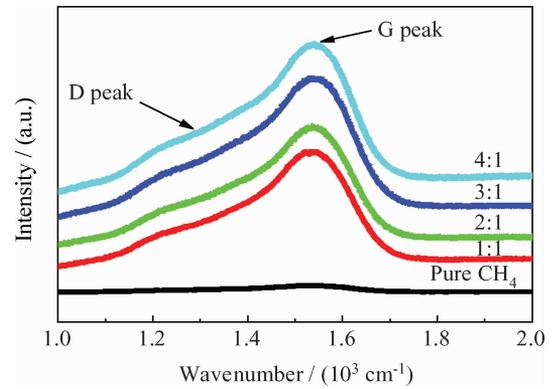


图 4 不同流量比下制备的薄膜的拉曼光谱
Fig. 4 Raman spectroscopy of the films deposited under different flow ratios of H_2/CH_4

表 1 不同 H_2/CH_4 流量比下制备的 a-C:H 薄膜的拉曼光谱高斯分解结果

Table 1 Raman spectroscopy analysis of a-C:H films deposited under different flow ratios of H_2/CH_4

H_2/CH_4	G peak		D peak		I_D/I_G
	Position/ cm^{-1}	FWHM/ cm^{-1}	Position/ cm^{-1}	FWHM/ cm^{-1}	
0:1	1 543.54	148.72	1 355.87	247.53	0.77
1:1	1 545.91	146.82	1 362.15	249.38	0.84
2:1	1 549.12	144.34	1 369.26	256.38	0.91
3:1	1 550.53	142.79	1 370.68	251.75	0.96
4:1	1 551.51	141.38	1 372.68	240.47	0.98

红外吸收谱常被用来研究类金刚石膜结构,特别是膜中的 C—H 基团^[8-10]。对于类金刚石薄膜的红外吸收谱,人们最感兴趣的是位于 $2\ 800\sim 3\ 100\text{ cm}^{-1}$ 区域的较强的 C—H 振动吸收谱。红外光谱能够提供薄膜中氢的相对含量和 C—H 基团的类型。一般认为在 $2\ 800\sim 3\ 000\text{ cm}^{-1}$ 出现伸缩振动吸收峰,表明薄膜中存在 sp^3 杂化结构,而在 $3\ 000\sim 3\ 100\text{ cm}^{-1}$ 处出现则说明存在 sp^2 杂化结构,峰强度越强,表明膜中该结构含量越多。图 5 为纯 CH_4 及 H_2/CH_4 流量比 4:1 条件下制备的类金刚石薄膜的红外图谱。可以看出,在 $2\ 800\sim 3\ 000\text{ cm}^{-1}$ 波段出现了较强的 C—H 伸缩振动吸收峰,表明薄膜中氢含量较高。另外,由于 C—H 伸缩振动吸收峰位于 $3\ 000\text{ cm}^{-1}$ 以下,表明薄膜中碳原子处于饱和状态。通过比较吸收峰的强度,发现 H_2/CH_4 流量比 4:1 条件

下制备的薄膜吸收峰强度明显高于纯甲烷制备的薄膜,表明富氢等离子体对薄膜中氢含量的提高作用显著。观察指纹区吸收峰时,可发现在 $1\ 449\text{ cm}^{-1}$ 出现吸收峰,表明膜中含有 sp^3C-CH_3 基及 sp^3C-CH_2 基,而 $1\ 115\text{ cm}^{-1}$ 及 985 cm^{-1} 处出现的峰则表明膜中存在 $sp^2C=CH$ 基及 $sp^2C=CH_2$ 基。 891 cm^{-1} 及 828 cm^{-1} 处出现的吸收峰代表 Si—OH 基及 Si—H 基,其中 Si 元素是来自基底的影响,同时表明薄膜中有少量的氧元素,薄膜中的氧元素可能来自于薄膜放置在大气中发生的轻微氧化。 726 cm^{-1} 处吸收峰说明膜中存在有 $-(CH_2)_n-$ ($n>4$) 直链结构。 614 cm^{-1} 处出现的强度较强的吸收峰表明膜中存在一定量的 $sp^1C\equiv CH$ 基。

2.3 不同流量比对薄膜生长速率的影响

在其他条件不变的情况下,研究了沉积速率

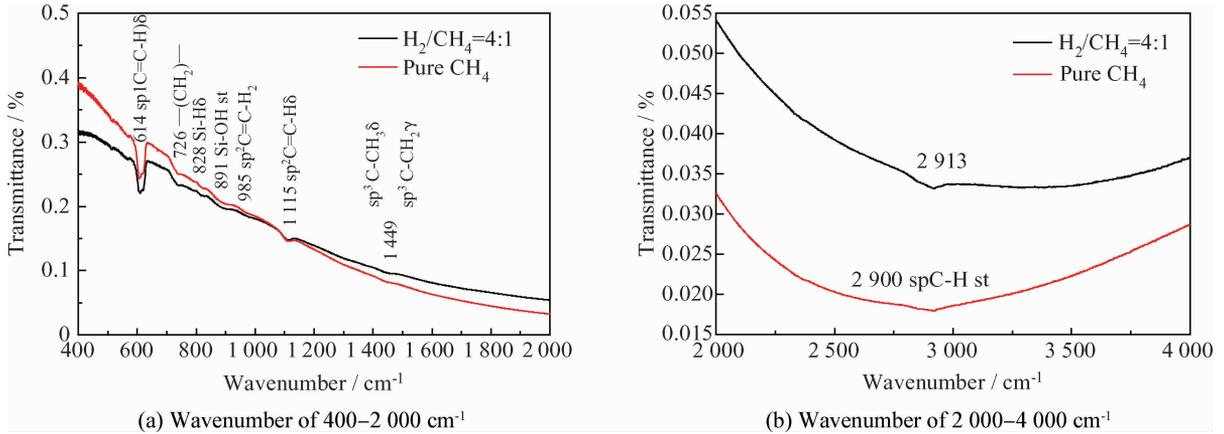


图5 纯CH₄及H₂/CH₄流量比4:1条件下制备的类金刚石薄膜的FTIR图谱

Fig. 5 FTIR spectrum of the a-C:H films deposited in pure CH₄ and hydrogen-rich CH₄ plasma

随气流量比率变化的关系。从图6可看出,使用纯甲烷制备的类金刚石薄膜沉积速率最高,达到9 nm/min,随着氢气掺入比率的增加,薄膜的沉积速率开始下降,在H₂/CH₄达到3:1时,降为3.4 nm/min。继续增加H₂的流量,薄膜的生长速率开始回升,4:1时升高到3.8 nm/min。其原因是:在气压不变的条件下,随着氢气流量比的增加,反应腔中碳元素的比例降低,碳原子量减少不利于薄膜沉积,造成薄膜沉积速率下降。同时,由于氢气分子的电离能较低,随着氢元素比率的增加,将会产生大量的富氢等离子体,氢离子有助于提高甲烷的离解率,有利于薄膜的沉积,在以上两种机制的综合作用下,出现薄膜沉积速率先降低后增长的趋势。通过比较发现,气体流量比从2:1增加到3:1,薄膜的沉积速率降低了1.4 nm/min,而从3:1增加到4:1,薄膜的沉积速率仅增加了0.4 nm/min,说明在该条

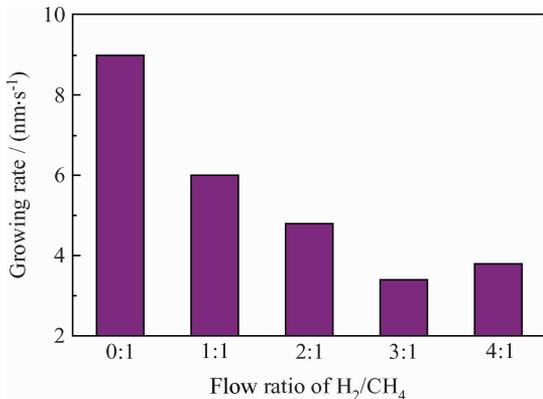


图6 沉积速率随气流量比率的变化

Fig. 6 Growing rate of the films under different flow ratios

件下影响薄膜沉积速率的最主要因素是等离子体中碳原子量的多少,而不是氢原子量。

2.4 薄膜力学性能

图7为不同氢气、甲烷流量比下薄膜的硬度及弹性模量。发现随着H₂/CH₄流量比的增加,薄膜的硬度从纯甲烷时的11.2 GPa降为4:1时的7.4 GPa,这与很多学者的研究成果相符^[6,11-12]。随着H₂/CH₄流量比的增加,薄膜中的氢含量增加,较高的氢含量造成类金刚石薄膜力学性能上一定程度上的损失。图中随着薄膜中H₂/CH₄比的增加,薄膜的弹性模量先增加,后降低,在2:1时达到最大值139 GPa,而4:1时则降为90 GPa。

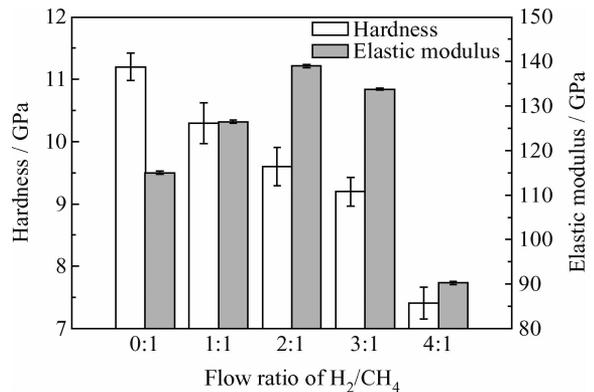


图7 不同气体流量比下薄膜的硬度和弹性模量

Fig. 7 Hardness and elastic modulus of the films deposited under different flow ratios

不同H₂/CH₄流量比下样品与基底的附着力的测试结果如图8所示,可以看到薄膜与基底的附着力随流量比的增加而降低。利用纯甲烷制

备的样品与基底的附着力高达 86.4 mN,而通入氢气后制得到样品的附着力出现了明显的下降, H₂/CH₄ 流量比 1 : 1 时,膜基附着力降为 64.4 mN,且随着 H₂/CH₄ 流量比的增加而降低,流量比 4 : 1 时仅为 49.6 mN。这可能是因为随着反应气体中 H 离子比例的增加,更多的 H 离子轰击生长膜面,造成样品表面应力增大。当停止沉积后,膜基间应力会发生一定程度的释放,而应力较大的样品则会释放更多的应力,造成膜基间附着力的下降。从图 3 中利用扫描电镜获得的样品的截面图也可以看出,随着流量比的增加,薄膜与基底间的分界越来越明显,甚至在膜层与基底之间出现了清晰的错位现象。

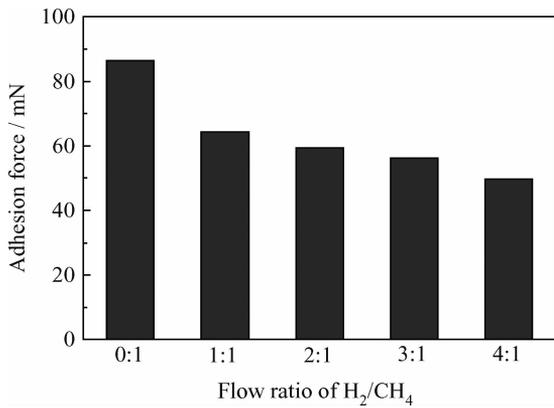


图 8 不同 H₂/CH₄ 流量比下薄膜的附着力

Fig. 8 Adhesion force of films under different flow rates of H₂/CH₄

2.5 不同载荷、速度下薄膜摩擦学性能

图 9(a)(b)分别载荷为 5 N 和 10 N 时在

同加载速度下测得的样品稳定阶段的摩擦因数。从图 9(a)可以看出,在加载载荷 5 N 条件下,所有样品的摩擦因数随着滑动速度的增加而降低, 100 r/min 时摩擦因数在 0.1 左右,而 500 r/min 时则降为 0.05 左右。而从图 9(b)则发现了不同的规律,在高载下(10 N),样品的摩擦因数随滑动速度的增加并没有呈现出明显降低的趋势,而是保持相对稳定,摩擦因数在 3 种滑动速度下均小于 0.06。对比载荷分别为 5 N 和 10 N 条件下的摩擦因数,发现高载时摩擦因数明显小于低载时的摩擦因数。对比不同 H₂/CH₄ 流量比下的摩擦因数发现,随着流量比的增加薄膜的摩擦因数并没有发生明显的变化,说明在该条件下氢含量对薄膜在大气环境中的摩擦因数影响不大。

图 10 是所制备样品的平均磨损率,可以看出使用纯甲烷制备的样品磨损率较大,为 $7.8 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$;当通入 H₂,且流量比为 1 : 1 时,薄膜的磨损率降为 $6.7 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$;继续增加 H₂ 的比率,薄膜的磨损率开始增加,在 4 : 1 时达到了 $1.1 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 。随着氢气比率增加,等离子体中氢离子浓度增加,氢离子加强了对薄膜表面的刻蚀,造成薄膜表面部分亚稳态 sp³ 键向 sp² 键转化,降低了薄膜硬度,造成薄膜在大气中的抗磨损性能降低,这与 Sánchez-López^[13] 等的研究结果一致。研究还发现,载荷为 5 N 时薄膜的磨损率明显高于 10 N 时的磨损率。类金刚石膜在摩擦过程中伴随着转移膜的形成,该转移膜具有石墨化的特征。在高载荷条件下,摩擦副接触表面局部温度急剧上升,有利于石墨化转移膜的形成,使得摩擦因数、磨损率均较低^[14]。

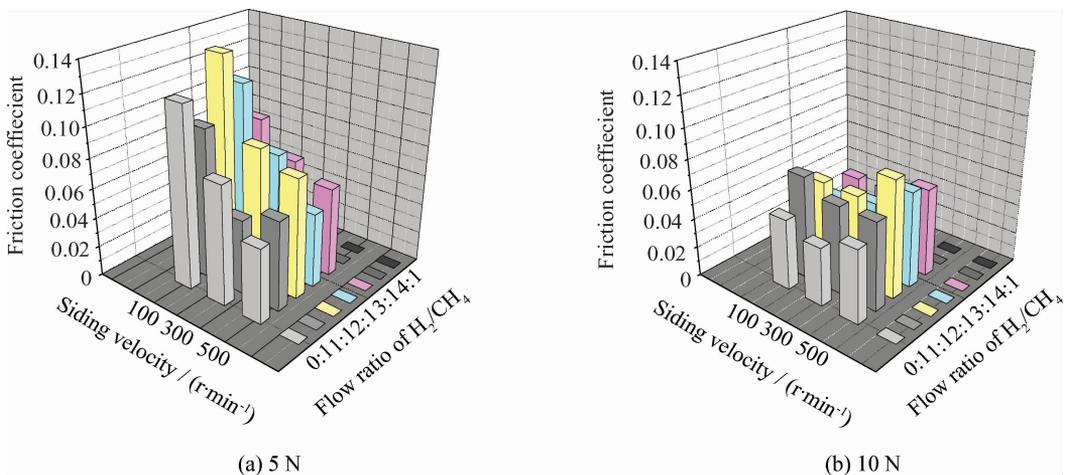


图 9 不同载荷下薄膜的摩擦因数

Fig. 9 Friction coefficient of the films under different loads

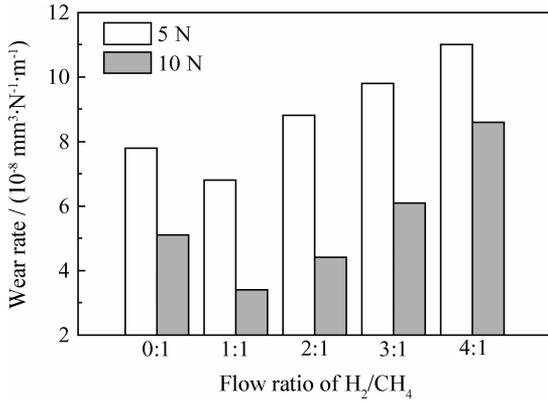


图 10 不同 H₂/CH₄ 流量比下薄膜的磨损率

Fig. 10 Wear rate of the films under different loads

3 结论

(1) 采用等离子体增强化学气相沉积法在不同 H₂/CH₄ 流量比下沉积的薄膜具有典型的类金刚石结构, 薄膜中 C—H 吸收振动峰位于 2 900~3 000 cm⁻¹ 之间, 膜中氢含量较高。

(2) 薄膜的硬度、膜基附着力均随 H₂/CH₄ 流量比的增加明显降低。薄膜硬度由纯 CH₄ 时的 11.2 GPa 降为 4:1 时的 7.4 GPa; 附着力则由 86.4 mN 降为 49.6 mN。

(3) 所制备的薄膜在大气环境下具有优异的摩擦学性能。随着 H₂/CH₄ 流量比的增加, 不同样品在同一载荷及转速下的摩擦因数变化不明显; 高载时摩擦因数明显小于低载时的摩擦因数; 薄膜的磨损率在 10⁻⁸~10⁻⁷ mm³/Nm 之间变化, 且随 H₂/CH₄ 流量比的增加而增大。

参考文献

- [1] Donnet C, Belin M, Augé J C, et al. Tribochemistry of diamond-like carbon coating in various environments [J]. *Surface & Coatings Technology*, 1994(68/69): 626-631.
- [2] Meunier C, Alers P, Marot L, et al. Friction properties of ta-C and a-C:H coatings under high vacuum [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2005, 200(5/6): 1978-81.
- [3] Cui L C, Lu Z B, Wang L P. Probing the low-friction mechanism of diamond-like carbon by varying of sliding velocity and vacuum pressure [J]. *Carbon*, 2014, 66: 259-266.
- [4] Erdemir A, Eryilmaz O L, Nilufer I B, et al. Effect of source gas chemistry on tribological performance of diamond-like carbon films [J]. *Diamond and Related Materials*, 2000, 9(3/4/5/6): 632-637.
- [5] Jeng Yeau-Ren, Tsai Ping-Chi, Wu Kuan-Te, et al. Effect of feed gas composition effects on the nanotribological properties of diamond-like carbon films [J]. *The Solid Films*, 2013, 529: 301-305.
- [6] 李明, 王凤, 蔺增, 等. 沉积参数对含氢非晶碳膜结构及性能的影响 [J]. *真空科学与技术学报*, 2008, 28(1): 64-66.
Li M, Wang F, Lin Z, et al. Growth conditions and mechanical properties of a-C:H films [J]. *Chinese Journal of Vacuum and Technology*, 2008, 28(1): 64-66 (in Chinese).
- [7] Erdemir A, Eryilmaz O L, Nilufer I B, et al. Synthesis of superlow-friction carbon films from highly hydrogenated methane plasmas [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2000, 133-134: 448-454.
- [8] 杨发展, 刘海峰, 沈丽如, 等. 等离子体增强化学气相沉积法制备含氢类金刚石膜的紫外 Raman 光谱和 X 射线光电子能谱研究 [J]. *物理学报*, 2013, 62(1): 017802.
Yang F Z, Liu H F, Sheng L R, et al. UV Raman and XPS studies of hydrogenous diamond-like carbon films prepared by PECVD [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(1): 017802 (in Chinese).
- [9] Ristein J, Stief R T, Ley L, et al. A comparative analysis of a-C:H by infrared spectroscopy and mass selected thermal effusion [J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 84(7): 3836-47.
- [10] 程宇航, 吴一平, 陈建国, 等. 类金刚石薄膜结构的红外分析 [J]. *硅酸盐学报*, 1998, 26(4): 508-512.
Cheng Y H, Wu Y P, Chen J G, et al. Study on the structure of diamond-like carbon films by FTIR spectroscopy [J]. *Journal of the Chinese ceramic society*, 1998, 26(4): 508-512 (in Chinese).
- [11] Vanhulsel A, Velasco F, Jacobs R, et al. DLC solid lubricant coatings on ball bearing for space applications [J]. *Tribology International*, 2007, 40(7): 1186-94.
- [12] Fontaine J, Donnet C, Grill A, et al. Tribochemistry between hydrogen and diamond-like carbon films [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2001, 146-147: 286-291.
- [13] Sánchez-López J C, Donnet C, Loubet J L, et al. Tribological and mechanical properties of diamond-like carbon prepared by high-density plasma [J]. *Diamond and Related Materials*, 2001, 10: 1063-9.
- [14] 李红轩, 徐洮, 陈建敏, 等. 直流射频等离子体增强化学气相沉积类金刚石薄膜的结构及摩擦学性能研究 [J]. *摩擦学学报*, 2004, 24(1): 1-5.
Li H X, Xu T, Chen J M, et al. Structure and tribological properties of DLC films deposited by DC-RF-PECVD [J]. *Acta Tribology*, 2004, 24(1): 1-5 (in Chinese).