

不同过渡层对钢基金刚石薄膜的影响*

王 玲, 余志明, 魏秋平, 田孟昆, 王志辉

(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 采用超高真空热丝化学气相沉积 (HFCVD) 系统, 以甲烷和氢气为反应气体, 在高速钢 W18Cr4V 基体上利用 3 种不同的过渡层 (WC、Cr、WC/Cr) 制备金刚石薄膜。采用场发射扫描电子显微镜 (FE-SEM)、X 射线衍射仪 (XRD)、显微激光拉曼光谱仪 (Raman) 以及洛氏硬度计对过渡层和金刚石薄膜进行检测分析, 研究了不同过渡层对金刚石薄膜形貌质量和附着性能的影响。结果表明, 3 种过渡层均可以有效减少钢基中 Fe 对金刚石薄膜的负面影响, 提高金刚石的形核率; 其中, 采用 WC/Cr 过渡层时膜基间残余应力最小, 仅为 0.25 GPa, 附着性能最好。

关键词: 金刚石薄膜; 高速钢; 过渡层; 化学气相沉积; 附着性能

中图分类号: TG174.444

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2011)01-0033-07

Investigation of Diamond Films Deposition on Steel Substrates with Different Interlayers

WANG Ling, YU Zhing-ming, WEI Qiu-ping, TIAN Meng-kun, WANG Zhi-hui

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083)

Abstract: Diamond films were deposited on high-speed steel (HSS) substrates pre-coated with different interlayers (WC, Cr and WC/Cr) by hot filament chemical vapour deposition (HFCVD). The surface morphology, film quality and interface structure of the diamond films were characterised by scanning electron microscopy (SEM), micro-Raman spectroscopy and X-ray diffractometry (XRD), respectively. The adhesion of the diamond films was measured by Rockwell hardness tester. The results show that with the WC, Cr and WC/Cr interlayer, the high quality, low residual stress and high nucleation density of diamond film are achieved on the HSS substrates. As determined from Raman spectra, furthermore, the films with WC/Cr interlayer are under the lowest compressive stress, $\sigma \leq 0.25$ GPa, showing a best adhesion.

Key words: diamond films; high-speed steel substrates; interlayers; chemical vapour deposition; adhesion

0 引 言

金刚石薄膜具有极高的硬度和热导率, 较低的摩擦因数和热膨胀系数, 较高的耐磨性, 良好的化学稳定性, 是一种优异的表面抗磨损改性膜, 是十分理想的刀具涂层材料。作为一种超硬薄膜, 其在工具、刀具等磨削抛光领域的应用研究引起人们越来越多的重视。

钢由于优良的综合机械性能和较低的成本, 被广泛应用于工程零件和工具制造领域。为了满足更高要求的应用, 在钢基上沉积金刚石薄膜的研究引

起了国内外学者的极大关注。在工具钢上沉积金刚石薄膜不仅可以降低成本, 取代硬质合金以及其他高成本材料, 而且由于金刚石薄膜良好的化学稳定性, 还可以满足耐腐蚀的要求。

经国内外学者研究表明直接在钢基表面沉积金刚石有很大困难, 其不利因素主要有以下 3 点^[1,2]:

① 基体中的铁有强的催石墨化作用, 它促进 sp^2 杂化的无定形碳和石墨等非金刚石碳相的生长, 因此, 在钢基体上虽然能沉积出金刚石, 但是金刚石是生长在一层松软的非金刚石碳相上, 其粘结性非常差。② 碳在铁中具有较高的溶解度和较大的扩散系数, 在金刚石薄膜高温沉积过程中, 气相中的碳向钢基体中扩散, 并形成渗碳体, 改变了钢的微观结构, 使其性能退化, 同时使基体表面碳浓度降

收稿日期: 2010-10-09; 修回日期: 2010-11-11

基金项目: *粉末冶金国家重点实验室开放基金 (2008112048); 湖南省研究生创新基金 (1343-74236000005); 中南大学贵重仪器开放共享基金 (ZKJ2008001)

作者简介: 王玲(1985—), 女(汉), 山西吕梁人, 硕士生。

低,降低了金刚石的形核率。③金刚石与钢的热膨胀系数相差较大(室温下, $\alpha_{\text{diamond}}=1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{\text{high-speed steel}}=12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$),钢基体冷却后产生大量收缩,导致薄膜内存在较大的热应力,易剥落。

上述不利因素导致在钢基体上很难直接沉积出理想的金刚石膜,必须采取有效措施来消除这些不利影响。其中一个可行的方法是在尽可能低的温度下(即不严重影响金刚石薄膜质量的前提下)沉积金刚石薄膜,但是在低温下沉积金刚石会导致生长速率严重下降;另一种方法是制备过渡层,在过渡层表面沉积金刚石薄膜。

理想的过渡层结构应满足以下几个条件^[3]: ①能有效隔离 C、Fe 扩散;②过渡层能利于金刚石形核;③过渡层必须与金刚石膜和钢基都具有良好的结合性;④过渡层的热膨胀系数介于金刚石膜与基体之间,能减小冷却后薄膜的内应力。

迄今为止,经报道的过渡层材料有 $\text{W}^{[4]}$ 、 $\text{Mo}^{[5]}$ 、 $\text{Cr}^{[6]}$ 、 $\text{Ti}^{[7,8]}$ 、 $\text{Al}^{[9]}$ 等金属以及 $\text{TiN}^{[10,11]}$ 、 $\text{CrN}^{[12]}$ 、 SiC 等氮化物和碳化物材料。上述各种单层膜结构均可隔离 C、Fe 扩散,提高金刚石薄膜质量和薄膜粘结力。文中采用 WC、Cr、WC/Cr 过渡层,在钢基上沉积金刚石薄膜,旨在寻找一种适合钢基制备金刚石的过渡层处理方法。

1 试 验

1.1 试样的制备

基体选用厚 2 mm 的高速钢 W18Cr4V (0.79 % C, 0.21 % Si, 0.15 % Mn, 18.65 % W, 4.2 % Cr, 1.16 % V, 0.11 % Mo) 钢板,用不同粒度的金相砂纸依次进行粗磨和精磨,随后在钢基表面分别制备 WC、Cr、WC/Cr 过渡层,最后将钢板切割成 10 mm × 8 mm × 2 mm 大小。过渡层的制备如表 1 所示。

表 1 三种过渡层的制备方法
Table 1 The preparation method of the three interlayers

样品	过渡层	过渡层的制备方法
S ₁	WC	采用热喷涂的方法制备 WC 过渡层(其组分为 85~90 % WC, 10~15 % Co); 喷涂参数为: 氧流量 940 L/min, 喷涂距离 30 cm, 燃料消耗率 0.378 L/min, 然后采用二步法 ^[13] 除 WC 过渡层表面的 Co (① $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$: KOH : H_2O =10 g: 10 g: 100 ml 的 Murakami 试剂超声波震荡腐蚀 2 min; ② H_2SO_4 (96 %): H_2O_2 =3:7(体积比)的混合酸溶液中超声波震荡腐蚀 30 s)
S ₂	Cr	将试样埋入装有渗剂(73.5 % Cr, 23 % Al_2O_3 , 2 % NH_4Cl , 1 % NaF, 0.5 % 硫脲)的坩埚中; 将坩埚放入电阻炉中加热, 逐渐升温至 1 000 °C, 并保温 5 h, 然后随炉冷却; 取出样品, 采用 800 号金相砂纸打磨, 去除表面粘附的渗剂残渣
S ₃	WC /Cr	先采用热喷涂的方法制备 WC 过渡层, 再将样品放入渗剂中渗 Cr, 具体方法同上; 取出样品, 采用 800 号金相砂纸打磨, 去除表面粘附的渗剂残渣

1.2 金刚石薄膜的制备

采用超高真空热丝化学气相沉积(HFCVD)系统,其背底真空可达 $1.33 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 。反应气体选用纯度均为 99.999 % 的 H_2 和 CH_4 。反应气体由 D07-11A/ZM 型质量流量计进行流量控制,反应室压强由 CMLA-21S08 型薄膜电容式真空计监测控制,灯丝温度用光学高温计测定,样品温度由热电偶监测控制。样品在沉积之前在微细金刚石粉(<500 nm)丙酮溶液中超声波振荡 20 min,再分别浸

泡于蒸馏水、酒精中超声波振荡清洗 1~2 min 后烘干备用。金刚石薄膜沉积工艺参数如表 2 所示。

沉积后样品采用扫描电镜(SEM)观察金刚石薄膜表面形貌和缺陷;采用 X 射线衍射仪(XRD)分析过渡层的相组成;采用激光拉曼扫描仪(Raman)检测金刚石薄膜的质量和内应力;采用压痕法表征金刚石薄膜的附着性能,所用金刚石压头的顶角为 $120^\circ \pm 20'$,顶端球面半径为 $(0.2 \pm 0.01) \text{ mm}$ 的金刚石圆锥体,载荷为 1 471 N,加载时间为 20 s。

表 2 金刚石薄膜沉积工艺参数
Table 2 Deposition parameters of diamond thin film

热丝温度 / °C	灯丝与基体的距离 / mm	基体温度 / °C	气压 / kPa	甲烷浓度 / %	沉积时间 / h
2300±100	9±1	730±10	3.00	2	2

2 结果与讨论

2.1 过渡层的 X 射线衍射分析

图 1 为高速钢基体以及 WC 过渡层、Cr 过渡层、WC/Cr 过渡层的表面 X 射线衍射图。从图 1 中可知,高速钢基体主要为单质 Fe,并含有少量的 FeC; WC 过渡层表面主要含 WC 相,并无发现 Co 元素,这表明经过二步法处理后,WC 过渡层表面的 Co 被清除了;Cr 过渡层和 WC/Cr 过渡层中主要含有 Cr_7C_3 相,且 Cr 过渡层中还有少量 Cr_2C 相,这是由渗剂中的 Cr 与钢基中的 C 反应形成,而這些碳化物中存在的化学键,保证了过渡层和基体间有较强的结合强度。而且在 3 种过渡层处理后的样品中均未检测到 Fe 的存在,表明采用 3 种不同的过渡层均可达到隔离 Fe 原子扩散的效果。

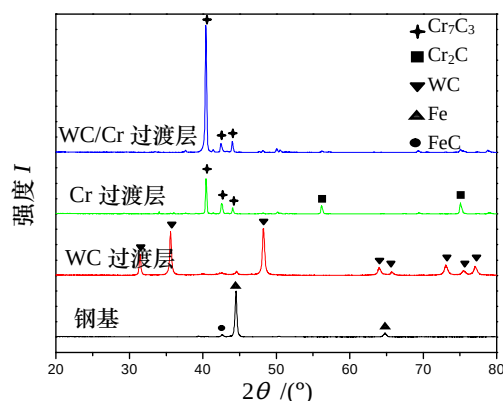


图 1 高速钢、WC 过渡层、Cr 过渡层、WC /Cr 过渡层的表面 XRD 分析

Fig.1 XRD spectra of steel substrate, WC interlayer, Cr interlayer and WC/Cr interlayer

2.2 金刚石薄膜表面形貌分析

图 2 是在不同过渡层上制备得到金刚石薄膜的

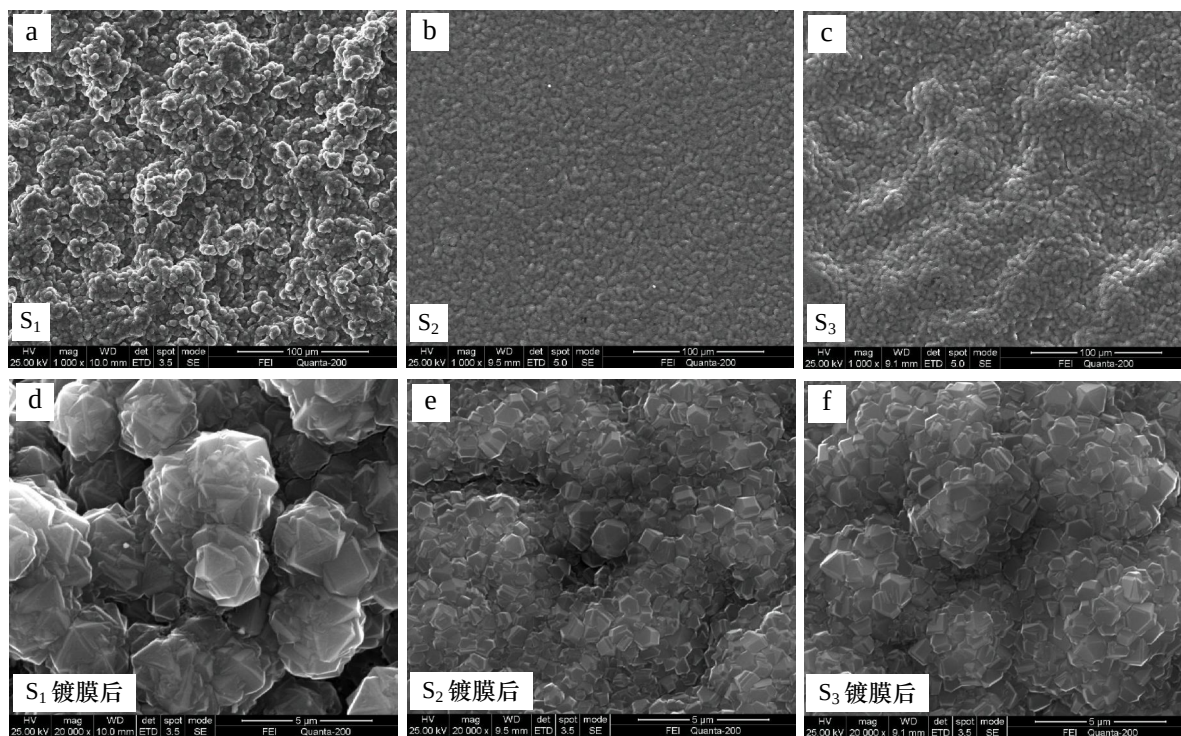


图 2 在不同过渡层 (a) (b) (c) 上制备的金刚石薄膜 (d) (e) (f) 的表面形貌

Fig.2 Surface morphologies of prepared diamond films (d) (e) (f) with various interlayers (a) (b) (c)

表面形貌。其中,样品 S_1 薄膜表面不平整,呈现一定的团簇状生长趋势,团簇间存在较大的空隙,形核密度较小,晶粒尺寸较大,平均尺寸约为 $1\mu\text{m}$,且存在大量的二次形核;样品 S_2 薄膜表面平滑致密,形核密度大,晶粒尺寸大小均匀,且弥散分布,

平均尺寸大约为 $0.5\mu\text{m}$,晶形完整。样品 S_3 薄膜形核密度、晶粒尺寸和晶形与 S_2 得到的金刚石晶粒相近,但晶粒粒度均匀性有了进一步提高。与 S_2 相比, S_3 的薄膜表面凹凸不平,这是由于采用热喷涂方法制备的 WC 过渡层表面粗糙度较大,故在其

表面渗 Cr 后制得的复合过渡层也有一定的粗糙度, 而 CVD 金刚石薄膜具有表面状态复制效应, 导致薄膜表面有一定的起伏。在后续试验中这一问题可通过将 WC 过渡层打磨后, 再在其表面渗 Cr 的处理方法得以改善。

SEM 结果表明, 在本文所选的试验条件下, 利用 3 种不同的过渡层均可制备出形核良好的金刚石薄膜。其原因主要是过渡层表面存在稳定的碳化物能有效隔离 Fe、C 的扩散, 一方面由于 Fe 原子半径较大, 它在碳化物中的扩散系数比在钢基中的低, 从而减弱甚至消除了 Fe 对金刚石沉积的不利影响; 另一方面, 碳化物中化学键的键能比钢基中纯金属键的键能高, 使 C 在这些化合物中的扩散能垒比钢中大, 故避免了因 C 原子向基体中扩散而导致的基体表面碳浓度的降低, 从而提高了金刚石的形核率。同时, 结果还表明 Cr 的引入可以促进金刚石薄膜的形核密度, 并使晶粒细化。

2.3 金刚石薄膜拉曼光谱分析

激光拉曼光谱是一种优异的、灵敏的、应用广泛的无损检测技术, 可用于表征碳物质(薄膜)质量及其键合状态。将它应用于金刚石薄膜的质量表征时, 可以反映出金刚石薄膜内应力、金刚石纯度、结晶质量等有用信息^[14]。图 3 是在不同过渡层上制备得到金刚石薄膜的拉曼图谱。

天然金刚石单晶的一阶拉曼谱约在 $1\,332\text{ cm}^{-1}$ 处有一尖锐峰。从图 3 中可以看出, 3 个试样在 $1\,332\text{ cm}^{-1}$ 附近均出现尖锐的金刚石峰, 且在 $1\,450\sim 1\,650\text{ cm}^{-1}$ 之间出现石墨等非金刚石碳相的一个宽带峰。由于非金刚石碳的拉曼谱灵敏度是金刚石的 50 倍, 因此在 3 种过渡层上制备的膜是以金刚石为主的薄膜, 从金刚石拉曼峰与非金刚石碳相的拉曼宽带峰的相对强度看出, 三者的膜纯度都较高, 而且样品 S_3 的非金刚石拉曼峰较金刚石峰很弱, 金刚石纯度最高。

图 3 中, 3 个试样的金刚石拉曼主峰位均有漂移, 这是由于钢基、过渡层和金刚石薄膜的晶格常数不同, 热膨胀系数不同, 且在沉积结束后要冷却至室温, 导致金刚石薄膜在沉积后存在很大的残余内应力。金刚石薄膜中的内应力可以通过拉曼峰的偏移来计算^[1], 内应力 σ 与拉曼峰的偏移量 $\Delta\nu$ 的关系为 $\sigma(\text{GPa}) = -0.567\Delta\nu(\text{cm}^{-1})$ 。计算结果若为正值对应残余拉应力, 负值则对应残余压应力。

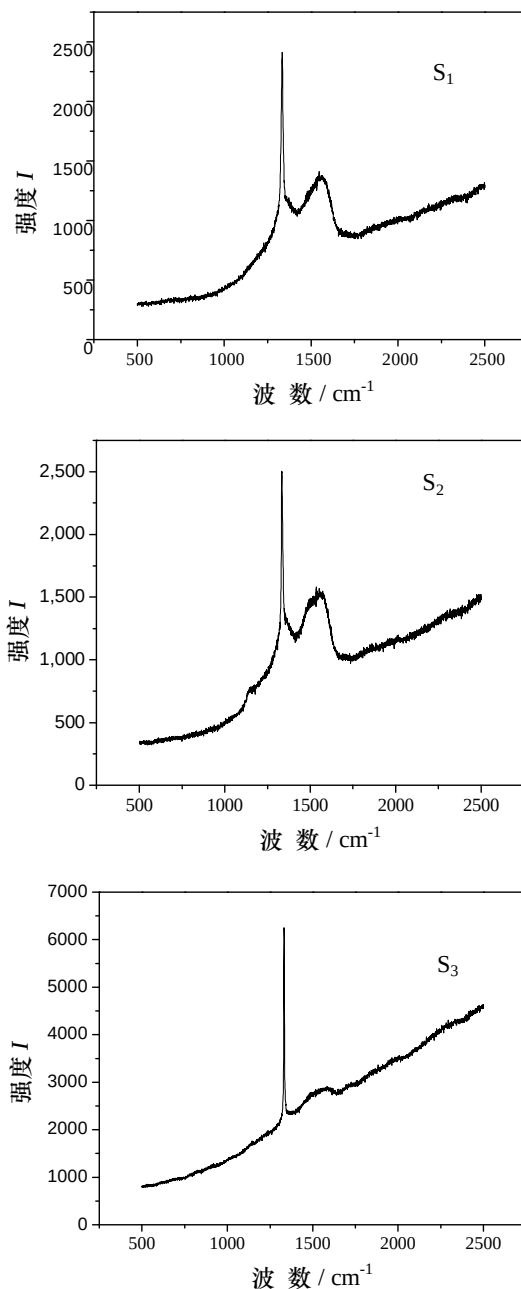


图 3 不同过渡层上制备得到金刚石薄膜的拉曼图谱
Fig.3 Raman spectra of diamond films with various interlayers

表 3 为 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 由拉曼峰偏移得到的薄膜内应力测量值与金刚石拉曼峰半高宽 FWHM 值。从表 3 中可以看出, 3 个试样的应力值均为负值, 说明薄膜的内应力为压应力, 且试样 S_3 的拉曼峰偏移最小, 薄膜内应力最小, 大约为 0.25 GPa 。试样 S_1 的次之。试样 S_2 的拉曼峰偏移最大, 薄膜内应力最大。薄膜的内应力与过渡层和金刚石的热膨胀系数有关, 两者差值越小, 内应力越小。WC 的热膨胀

系数约为 $4.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 而 CrC 的热膨胀系数约为 $9.4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, WC 的热膨胀系数与金刚石 (约为 $1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) 差值较小, 故内应力较小。而 S_3 由于采用复合过渡层可以更有效的缓解薄膜内应力^[3], 故内应力最小。

金刚石特征拉曼峰的 FWHM 值大小随着金刚石膜内金刚石的结晶度、缺陷、密度、杂质、非金刚石碳(SP^2 态碳)含量等因素的变化而改变, 反映了金刚石膜的结晶质量, FWHM 值小时对应的金刚石膜结晶质量好, FWHM 值大时对应的金刚石膜结晶质量差^[14]。天然金刚石单晶的特征拉曼峰的半高宽值一般为 $2 \sim 3 \text{ cm}^{-1}$, 非金刚石基体上制备的连续金刚石膜的金刚石特征拉曼峰一般在 $5 \sim 25 \text{ cm}^{-1}$ 范围内变化。

表 3 薄膜内应力测量值与金刚石拉曼峰半高宽 FWHM 值
Table 3 Residual stresses measured from Raman spectra and FWHM of diamond film

样 品	FWHM 值 / cm^{-1}	偏移量 / cm^{-1}	残余应力 / GPa
S_1	12.98	1.33	-0.76
S_2	9.29	2.33	-1.32
S_3	3.99	0.44	-0.25

从表 3 中还可看出, 试样 S_3 的 FWHM 值最小, 约为 4 cm^{-1} , 金刚石薄膜质量最好, 试样 S_2 的次之, 试样 S_1 的金刚石薄膜质量较差。可见三者中, 使用 WC/Cr 过渡层, 可在钢基上获得质量最好且内应力最小的金刚石薄膜。

2.4 薄膜的附着性能分析

薄膜与基体之间结合强度是评定薄膜附着性能的一个重要指标, 是保证薄膜满足其力学、物理和化学等性能的基本前提。结合强度与膜/基结合状态、薄膜内应力、薄膜的厚度、薄膜和基体的力学性质、塑性形变的能量损失以及试验中采用的测量方法等有关^[15]。目前, 评价膜基结合强度的方法有多种, 如划痕法、压痕法、直接拉伸法、直接切削法等。其中压痕法是使用洛氏硬度计 (1 471 N) 加载, 引起与压痕边缘相邻的膜层破坏。在卸载后用 100 倍的光学显微镜观察, 以评定其试验结果。将膜层破坏方式与图 4 所示的结合强度质量标准进行比较以评价其膜基结合强度的好坏。图 4 中 HF1~HF4 (HF 是德语中结合强度的缩写) 表示有足够的

结合强度, 而 HF5~HF6 表示结合强度不够^[16]。这种测试方法, 是一种应用最广、操作简单、结果较为直观的定性测量方法。

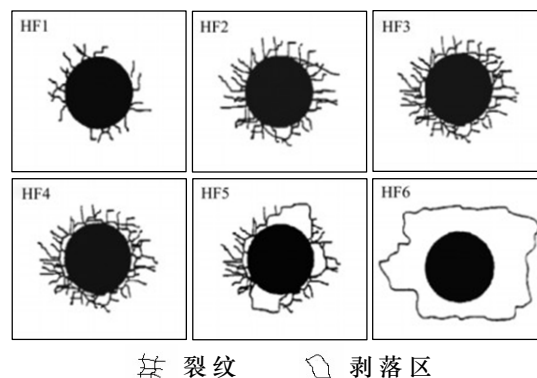
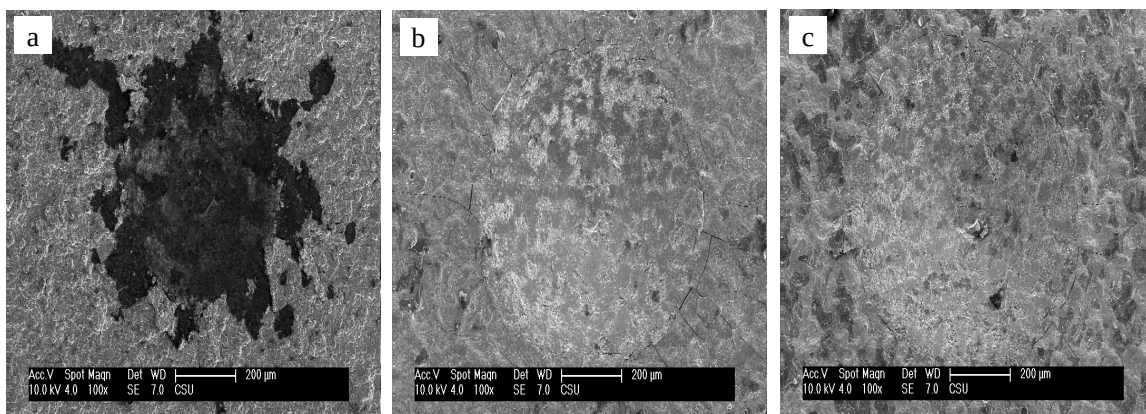


图 4 压入法测结合强度标准

Fig.4 Adhesion criterion of indentation method

图 5 是在不同过渡层上制备得到的金刚石薄膜样品在 1 471N 载荷下加载 20 s 后压痕的 SEM 照片。从图中可以看出, 样品 S_1 的薄膜压痕周围有明显的起皮剥落现象, 属于 HF6, 结合强度较差; 样品 S_2 的薄膜压痕无鼓泡, 剥落的现象, 但出现扩展性裂纹, 属于 HF2, 具有较好的结合强度; 样品 S_3 的薄膜压痕亦无鼓泡和剥落的现象, 且扩展性裂纹也较少, 约为 2~3 条, 结合强度最好。对样品 S_1 剥落的区域进行拉曼检测 (如图 6) 发现, 剥落区域的黑色物质为非金刚石碳相。

由试验结果看出, 尽管使用 WC 过渡层金刚石薄膜内应力较小, 但由于在高温沉积过程中, 过渡层中的 Co 受热扩散到表面对金刚石有催化石墨化作用, 所以样品表面先生成了一层松软的石墨、无定性碳等非金刚石碳相, 金刚石薄膜实际上生长在这些非金刚石碳相表面, 故膜基结合性很差。使用 Cr 过渡层的样品由于在基体表面形成了稳定的碳化物, 隔离了 Fe、C 的扩散; 同时这些化合物的晶格常数比铁大, 与金刚石晶格失配度要小一些, 且其热胀系数介于钢基和金刚石膜之间, 能减小冷却后薄膜的内应力, 增加附着力, 故膜基结合性较好。使用 WC/Cr 过渡层的样品由于 Cr 层隔离了扩散到生长的优势, 更重要的是复合过渡层还可以更有效 WC 层表面的 Co 元素, 不仅消除了 Co 元素对金刚石形核的不利影响, 而且又发挥了 Cr 层利于薄膜地消减薄膜内应力, 故膜基结合性最好。



(a) S₁ 镀膜后 (b) S₂ 镀膜后 (c) S₃ 镀膜后

图 5 不同过渡层上制备所得金刚石薄膜压痕的扫描电镜形貌
Fig.5 SEM images of indentation of diamond films with various interlayers

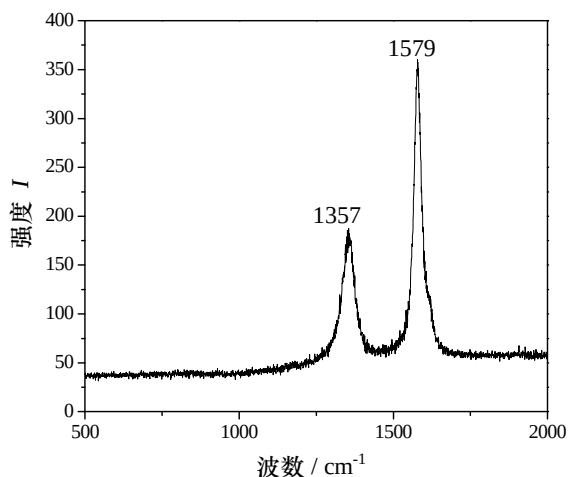


图 6 样品 S₁ 剥落区域的拉曼图谱
Fig.6 Raman spectra of delamination zone of S₁

3 结 论

(1) 采用WC过渡层、Cr过渡层和WC/Cr过渡层均可有效地隔离C、Fe原子的扩散,增加金刚石的形核率并提高薄膜的质量。

(2) 过渡层对金刚石薄膜的形核率和质量有较大的影响。采用WC过渡层的样品,金刚石形核率较低,晶形较差,二次形核比较严重且薄膜质量较差;采用Cr过渡层和WC/Cr过渡层的样品,金刚石形核率较高且质量较好。

(3) 过渡层对金刚石薄膜的内应力和结合强度也有很大的影响。采用WC过渡层的样品,虽然薄膜内应力较小,但膜基结合强度最差;采用Cr过渡层的样品,薄膜内应力较大,但结合强度较好;采

用WC/Cr过渡层的样品,薄膜内应力最小,仅为0.25 GPa,结合强度最好,附着性能最佳,是钢基沉积金刚石薄膜的理想过渡层。

参考文献:

- [1] Bareih C, Perle M, Rosiwal S M, et al. Diamond coating of steel at high temperatures in hot filament chemical vapour deposition (HFCVD) employing chromium interlayers [J]. Diamond and Related Materials, 2006, 15: 754-760.
- [2] Riccardo P, Giorgio M, Roberta V, et al. Raman spectroscopy characterization of diamond films on steel substrates with titanium carbide arc-plated interlayer [J]. Thin Solid Films, 2006, 515: 1011-1016.
- [3] Buijnsters J G, Shankar P, Fleischer W, et al. CVD diamond deposition on steel using arc-plated chromium nitride interlayers [J]. Diamond and Related Materials, 2002, 11: 536-544.
- [4] Ralchenko V G, Smolin A A, Pereverzev V G. Diamond deposition on steel with CVD tungsten intermediate layer [J]. Diamond and Related Materials, 1995, 4: 754-758.
- [5] Kwarada M, Kurihara K, Sasaki K. Diamond synthesis on a metal substrate [J]. Diamond and Related Materials, 1993, 2: 1083-1089.
- [6] Silva F J G, Baptista A P M, Pereira E, et al. Microwave plasma chemical vapour deposition diamond nucleation on ferrous substrates with Ti and

- Cr interlayers [J]. *Diamond and Related Materials*, 2002, 11: 1617-1622.
- [7] Hua F Q, Fernandes A, Gracio J. Diamond coating on steel with a titanium interlayer [J]. *Diamond and Related Materials*, 1998, 7: 603-606.
- [8] Hua F Q, Fernandes A, Pereira E, et al. Adhesion of diamond coatings on steel and copper with a titanium interlayer [J]. *Diamond and Related Materials*, 1999, 8: 1549-1554.
- [9] Li Y S, Tang Y, Yang Q, et al. Diamond deposition on steel substrates with an Al interlayer [J]. *Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2009, 27: 417-420.
- [10] Shang N G, Zhou Z F, Lee C S, et al. Effect of ion beam nitriding on diamond nucleation and growth onto steel substrates [J]. *Diamond and Related Materials*, 2001, 10: 1506-1510.
- [11] Weiser P S, Praver S. Chemical vapour deposition of diamond onto iron based substrates—the use of barrier layers [J]. *Diamond and Related Materials*, 1995, 4: 710-713.
- [12] Glozman O, Halperin G, Etsion I, et al. Study of the wear behavior and adhesion of diamond films deposited on steel substrates by use of a Cr-N interlayer [J]. *Diamond and Related Materials*, 1999, 8: 859-864.
- [13] 魏秋平, 余志明, 马莉, 等. YG6 硼化综合处理后基体温度对金刚石薄膜的影响 [J]. *中国表面工程*, 2006, 19: 30-34.
- [14] 匡同春, 刘正义. 光拉曼光谱在 CVD 金刚石薄膜质量表征中的应用 [J]. *理化检验—物理分册*, 1997, 33: 21-25.
- [15] 杨莉. 硬质合金—金刚石薄膜的制备和附着性能的研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2004.
- [16] 魏秋平, 余志明, 马莉, 等. 化学脱钴对硬质合金沉积金刚石薄膜的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18: 1070-1081.

作者地址: 长沙市中南大学本部 2 舍 114 室 410083
材料科学与工程学院
Tel: (0731) 8883 0335
E-mail: wangling11.5@163.com

(上接第 28 页)

电流减小 2 个数量级以上, 抗腐蚀性能得到很大程度的提高。

电子束直接改性处理和预涂覆 Cr 及 TiN 粉末, 都很大程度改善了试样抗滑动摩擦磨损性能, 尤其是预涂覆 TiN 粉末的试样, 其抗滑动磨损性能提高 3 倍。主要原因是第二相的钉扎强化作用。

参考文献:

- [1] Mordike B L. Development of highly creep resistant magnesium alloys [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 117(3): 391-394.
- [2] Zou J, Qin Y, Dong C, et al. Numerical simulation of the thermal-mechanical process of high current pulsed electron beam treatment [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 2004, 22(3): 545-552.
- [3] Dong C, Wu A, Hao S Z, et al. Surface treatment by high current pulsed electron beam [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2003, 163-164: 620-624.
- [4] Proskurovsky D I, Rotshtein V P, Ozur G E, et al. Pulsed electron-beam technology for surface modification of metallic materials [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1998, 16(4): 2480-2488.
- [5] Gao B, Hao S Z, Dong C, et al. Improvement of wear resistance of magnesium alloy AZ31 and AZ91HP by high current pulsed electron beam treatment [J].
- [6] *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 2005, 15(5): 978-984.

作者地址: 辽宁沈阳东北大学 118 信箱 110004
材料与冶金学院

Tel: (024) 8368 1320 E-mail: neuch@126.com

(上接第 32 页)

- [6] 刘高建, 杜继红, 李争显, 等. 用化学气相沉积方法在石墨表面沉积钨涂层的研究 [J]. *研发与应用*, 2005, 24(3): 28-29.
- [7] 杜继红, 李争显, 高广荣. 钼基体上化学气相沉积钨功能涂层的研究 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2005, 34(12): 2013-2015.

作者地址: 北京市朝阳区平乐园 100 号 100124
北京工业大学材料学院
Tel: (010) 6739 2171 E-mail: mlj1113@126.com