

石墨靶溅射时间对Ta-C涂层性能的影响

黄彪, 张而耕, 周琼, 陈永康

(上海应用技术大学, 上海物理气相沉积(PVD)超硬涂层及装备工程技术研究中心, 上海 201418)

摘要: 采用脉冲磁控溅射在YG10硬质合金基体上制备Ta-C(Tetrahedral amorphous carbon)涂层, 通过控制石墨靶溅射时间制备得到不同性能的Ta-C涂层, 采用扫描显微镜、纳米压痕仪以及拉曼光谱仪分析了Ta-C涂层的表面形貌、硬度以及 sp^3 与 sp^2 比例, 并选取三个典型参数制备Ta-C涂层铣刀进行干式铣削2A50铝合金实验, 验证所选石墨靶溅射时间制备的Ta-C涂层的优劣。结果表明: 随着石墨靶溅射时间从40 min到80 min逐渐增加, Ta-C涂层的表面形貌质量、硬度、 sp^3 含量以及切削性能呈现先上升后下降的趋势, 石墨靶溅射时间55 min制备的Ta-C涂层综合性能最好, 硬度达到86.9 GPa, sp^3 含量较高。石墨靶不同溅射时间制备的Ta-C涂层表面形貌、硬度以及 sp^3 与 sp^2 比例有较大差别, 选择合适的溅射时间制备Ta-C涂层工件至关重要, 本项研究中石墨靶溅射55 min制备的Ta-C涂层综合性能最优, 使用寿命最长, 切削性能最好。

关键词: Ta-C涂层; 类金刚石涂层; 表面形貌; 硬度; 摩擦磨损; 切削性能

图法分类号: TQ174.75

文献标识码: A

文章编号: 1000-2278(2019)03-0318-07

Effect of Sputtering Time of Graphite Target on Properties of Ta-C Coating

HUANG Biao, ZHANG Ergeng, ZHOU Qiong, CHEN Yongkang

(Shanghai Engineering Research Center of Physical Vapor Deposition (PVD) Superhard Coating and Equipment, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: The work aims to study the effect of sputtering time of graphite target on the properties of Ta-C coating prepared by pulsed magnetron sputtering on cemented carbide (YG10). The SEM, nanoindentation and Raman spectrometer were used to analyze the surface morphology, hardness and ratio of sp^3 to sp^2 , then three time points were chosen to deposit Ta-C coating on the milling cutter for dry-type milling of 2A50 aluminum alloy. The advantages and disadvantages of Ta-C coating were observed. The results show with the increase of sputtering time from 40-80 min, the surface morphology, hardness, sp^3 content and cutting performance of Ta-C coating increased first and then decreased. The Ta-C coating prepared by sputtering for 55 min has the best properties: the hardness reached 86.9 GPa and the sp^3 content was relatively high. Thus, the surface morphology, hardness and the ratio of sp^3 to sp^2 of Ta-C coating prepared by graphite target sputtering for different time are quite different. It is very important to select the suitable sputtering time to prepare Ta-C coating. In this study, the Ta-C coating prepared by graphite target sputtering for 55 min has the best performance, the longest service life and the best cutting performance.

Key words: Ta-C coating; diamond-like carbon coating; surface morphology; hardness; friction and wear; cutting performance

0 引言

类金刚石(DLC)膜主要是由 sp^3 、 sp^2 键相互混杂的三维网络结构, 根据碳来源的不同, 可以制备得到两类不同的DLC膜, 一类是无氢非晶碳膜(Ta-C膜), 另一类是含有氢元素的涂层膜即含氢非晶碳膜^[1-4]。Ta-C膜的 sp^3 键含量为80%~90%, 主要成分为四面体碳结构(tetrahedral carbon), 其具有类似于金刚石薄膜的优良性能, 如摩擦系数低、硬度高、耐磨性好以及化学稳定性好等特点, 从而作为抗磨

减摩涂层应用于航空航天、医学以及有色金属切削等领域^[5-9]。

Ta-C涂层是类金刚石涂层中的一类, 属于无氢非晶碳膜, 其由碳原子之间的具有方向性和饱和性的共价键构成^[10-12]。共价键中的 σ 键与 π 键的比例、分布状态对Ta-C涂层中 sp^3 键与 sp^2 键比例等起着决定性的作用, 而 sp^3 键与 sp^2 键比例对Ta-C涂层的性能有着较大影响, 一般四面体结构的 sp^3 键含量越高, 涂层的硬度越高, 耐磨性越好, 切削性能越好^[13-17]。脉冲磁控溅射以 sp^2 结构的石墨靶为原料

收稿日期: 2018-10-17。

修订日期: 2019-01-27。

基金项目: 上海市科委重点支撑计划(170905038000)。

通信联系人: 张而耕(1973-), 男, 博士, 教授。

Received date: 2018-10-17.

Revised date: 2019-01-27.

Correspondent author: ZHANG Ergeng(1973-), male, Ph.D., Professor.

E-mail: zhangeg@yeah.net

制备 sp^3 与 sp^2 共存的Ta-C涂层，且不同制备方法、不同沉积工艺参数制备出来的Ta-C涂层的 sp^3 键与 sp^2 键比例不同^[18-22]。因此，猜想石墨靶溅射时间对Ta-C涂层中 sp^3 键含量及机械性能有影响，并设计实验进行研究验证，研究石墨靶不同溅射时间对Ta-C涂层中 sp^3 含量以及机械性能的影响，此外，至今并没有研究给出石墨靶溅射时间与Ta-C涂层机械性能之间的明确关系，因此，本研究对Ta-C涂层制备工艺改善以及进一步的发展具有指导意义。

1 实验方法

1.1 基体材料及涂层设计

针对Ta-C涂层存在内应力大、结合强度不高等不足，充分考虑到Ta-C涂层与基体之间因为热膨胀系数差、涂层本征应力造成涂层应力大以及工业运用等诸多方面，本研究选用基体材料为YG10硬质合金(尺寸为16 mm × 16 mm × 3 mm)和两刃硬质合金铣刀(尺寸为 ϕ 8 mm × 75 mm)，并设计基体、Ti打底层、Ti和C混合过渡层以及Ta-C涂层这样的四层梯度结构，如图1所示。

1.2 涂层制备

本研究采用脉冲磁控溅射技术，靶材为直径49 mm纯度99.9%的Ti靶和直径49 mm纯度99.9%石墨靶，在通入 Ar_2 的真空炉腔内制备Ta-C涂层。涂层制备之前对基体进行进行抛光、酒精清洗、蒸馏水清洗、烘干处理，用于去除基体表面的杂物，预处理完成的基体放置在托盘上送入脉冲磁控溅射设备(型号：PLASMAADS400)炉腔内。首先抽至本底真空 1×10^{-6} Pa，然后通入氩气到真空度 8×10^{-5} Pa，氩气通入流量为50 sccm，电离电压2000 V，基体在500 V偏压下经过氩离子刻蚀20 min，进一步去除基体表面的杂物并达到活化基体表面的目的，然后Ti靶以15 Hz的溅射频率进行溅射，溅射时间为5 min，并通过阳极过滤之后沉积到基体表面作为涂层的打底层；随后Ti靶和石墨靶同时以脉冲频率为15 Hz的溅射频率下进行溅射3 min，通过阳极过滤之后沉积到

Ti打底层表面，最后通过控制石墨靶溅射时间制备不同性能的Ta-C涂层。根据实验室先前其他涂层制备的研究成果溅射时间60 min时涂层性能较优，所以这里从40 min到80 min，每隔5 min选取一个参数，沉积参数如表1。

表1 Ta-C涂层沉积参数
Tab.1 The deposition parameters of Ta-C coating

Voltage /V	Current /A	$Ar_2/L \cdot min^{-1}$	Pulse /Hz	Distance /cm
120	25	38.2-50	15	28

2 实验结果及讨论

2.1 表面形貌

采用光学显微镜(型号为GSX-500)观察石墨靶不同溅射时间所制备的Ta-C涂层表面形貌如图2所示。由图可见，随着石墨靶溅射时间的改变Ta-C涂层表面呈现出不同的形貌，石墨靶溅射40 min(a图)制备的Ta-C涂层表面有大量的深且宽的小孔，表面较粗糙，随着溅射时间的增加，Ta-C涂层表面的小孔逐渐被靶材溅射出来的膜材粒子填平，小孔逐渐复合，到溅射时间55 min(d图)时，形成完整、致密的Ta-C涂层，表面平整光滑，而随着溅射时间的进一步增加，涂层表面质量有下降的趋势，石墨靶溅射时间60 min(e图)制备的Ta-C涂层表面局部出现较大的空洞，并且数量孔洞进一步增加，当溅射时间到80 min(i图)时，涂层表面空洞较大且多，可以明显看出表面组织呈疏松状态。

2.2 硬度

采用纳米压痕仪(型号：海思创TI950)测试Ta-C涂层的硬度，加载力5 mN，加载时间7 s，保载时间2 s，卸载时间5 s。纳米压痕测试经过加载、保持以及卸载三个阶段，加载时，压头压入样品表面，材料由弹性变形逐渐转到塑性变形，随着载荷不断加大，压头压入材料表面的深度增加，当载荷达到最大值后，移除载荷。在卸载过程中，仅弹性位移恢复，因此硬度及弹性性能即可从卸载曲线中分析得到^[23-24]。石墨靶溅射时间从40 min到80 min，每隔5 min制备的Ta-C涂层的纳米硬度如图3所示。

如图3所示涂层硬度呈先加速上升后缓慢下降的趋势，从石墨靶溅射40 min对应的49.3 GPa加速上升到溅射55 min制备的86.9 GPa，随后缓慢下降到溅射80 min制备的70.6 GPa。原因如下：当石墨靶溅射时间为40 min时，基体表面未形成完整、致密的Ta-C薄膜，缺陷较多，分子有序度较低，造成

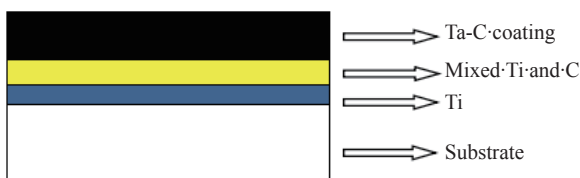


图1 涂层结构设计示意图

Fig.1 Schematic diagram of coating structure

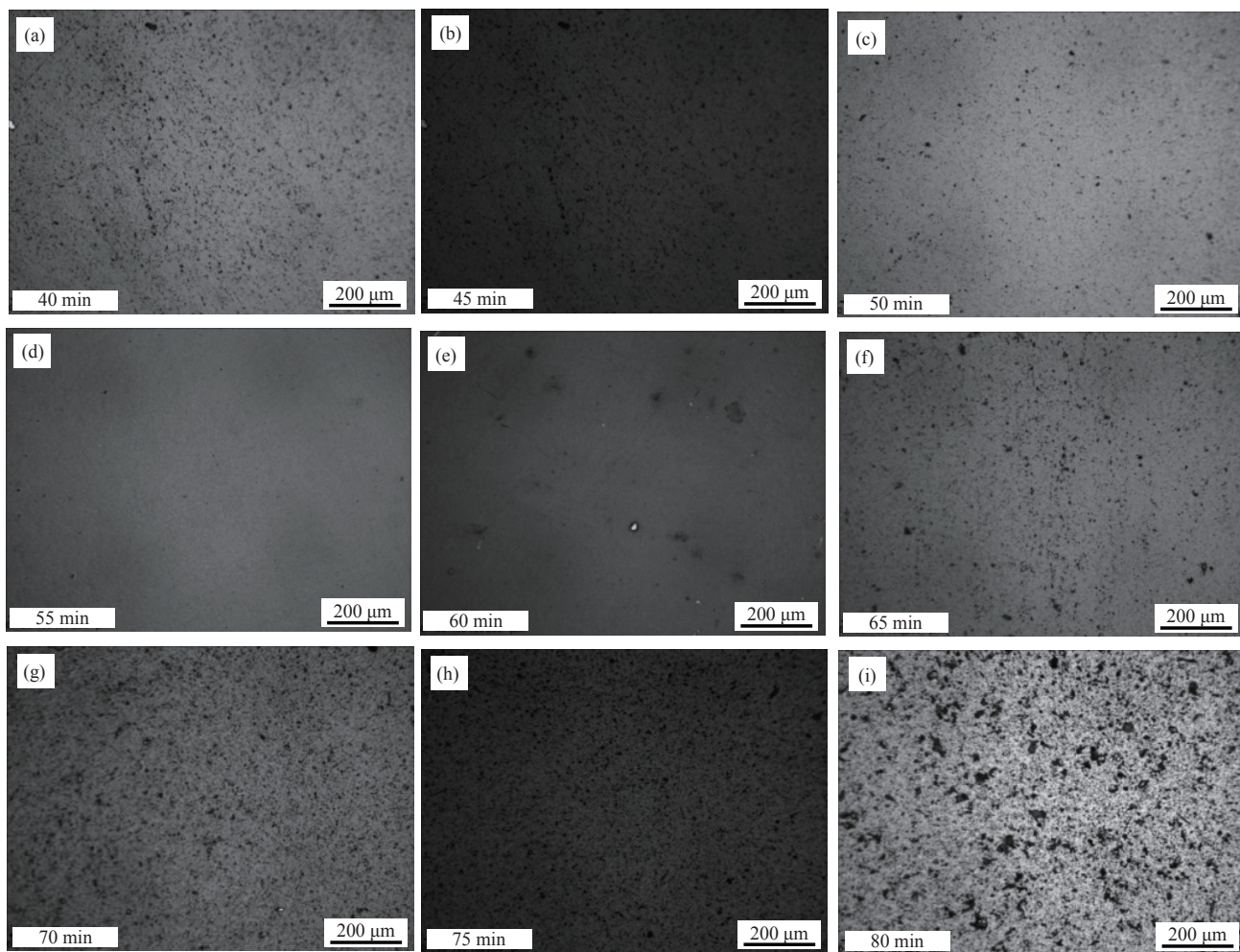


图2 石墨靶不同溅射时间制备的Ta-C涂层显微图像

Fig.2 Micrographs of the Ta-C coating with different deposition time

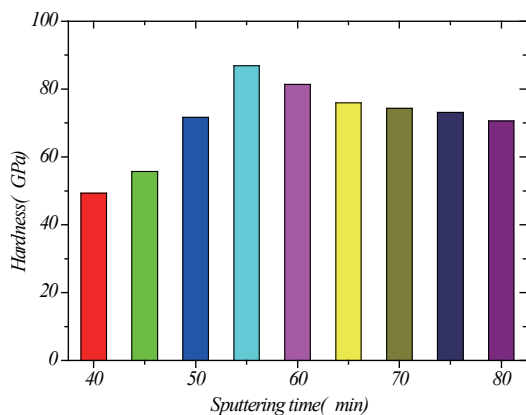


图3 涂层硬度测量结果

Fig.3 Coating hardness measurement results

杂化程度低, sp^3 含量较低, sp^2 含量较高, 当受到外部作用力时层状结构的 sp^2 杂化碳层发生侧滑是造成测试硬度较低的主要原因; 随着溅射时间的逐渐增加, 硬质合金基体表面逐渐形成完整、致密的

Ta-C涂层, 缺陷减少, 有序度增加, 分子之间碰撞的几率变大, 有利 sp^3 键的形成, 硬度上升至86.9 GPa; 而随着时间的进一步增加, 完整、致密的Ta-C薄膜热膨胀系数小、弹性模量大, 从靶材溅射过来的高能涂层粒子不易于在其表面附着, 且高能粒子轰击原有的Ta-C薄膜, 使原来形成的涂层膜变得疏松, 缺陷增加, 硬度下降。

2.3 拉曼光谱测试

本项研究所使用的拉曼光谱仪型号为B&W Tek BWS465-532S Raman spectro photometer (USA), 入射光线波长为532 nm。测试石墨靶溅射时间从40 min到80 min, 每5 min一个间隔制备的Ta-C涂层的拉曼光谱图如图4所示, 由于同一个拉曼光谱图中显示9组数据造成数据重叠无法进行观察和分析, 这里将测试数据分布到两个拉曼光谱图中, 40 min到60 min制备的Ta-C涂层拉曼光谱图如图4(a), 60 min到80 min制备的Ta-C涂层拉曼光谱图如图4(b)所示。

如图4(a)石墨靶溅射时间40 min到60 min的拉曼光谱可见，随着溅射时间的增加Ta-C涂层的拉曼光谱图中G峰的位置先左移后右移的趋势，从溅射40 min到55 min时G峰位置往左移动，溅射时间60 min时G出现往右移动。如图4(b)石墨靶溅射时间从60 min到80 min制备的Ta-C涂层的拉曼光谱图中，G峰位置呈现出持续往右移动的趋势。石墨靶溅射时间从40 min到80 min制备的Ta-C涂层的拉曼光谱图中G峰位置呈现先左移后右移动的趋势，从40 min到55 min时G峰位置往左移动，Ta-C涂层中的 sp^3 比例呈现出增长趋势，55 min到80 min时G峰位置往右移动，Ta-C涂层中的 sp^3 比例呈现出下降的趋势。

为了进一步验证石墨靶溅射时间从40 min到80 min制备的Ta-C涂层中 sp^3 含量的变化，对拉曼光谱图进行拟合之后高斯分峰，分出D峰和G峰。高斯分峰之后得溅射时间40 min到80 min制备的Ta-C涂层的D峰位置、G峰位置、D峰半峰宽数值、G峰半峰宽数值以及I(D)/I(G)的比值如表2所示。从表可见，D峰位置在1390 cm^{-1} 左右浮动，G峰位置在1560 cm^{-1} 左右浮动，证明拟合、高斯分峰得到的数据具有有效性。

石墨靶溅射时间从40 min到80 min制备的Ta-C

涂层进行高斯分峰之后D峰(a)与G峰(b)位置如图5所示，从图5(a)可见，溅射时间从40 min到80 min D峰位置变化无明显规律，从图5(b)可见，G峰的位置从溅射时间40 min的1565.8 cm^{-1} 降到溅射时间55 min的1561.2 cm^{-1} ，然后持续上升到溅射80 min的1564.5 cm^{-1} ，呈现出数值位置先降低后升高的趋势，这与图4不同溅射时间制备的Ta-C涂层拉曼光谱图中的变化保持一致。

石墨靶溅射时间从40 min到80 min制备的Ta-C涂层拉曼光谱图进行高斯分峰之后I(D)/I(G)的比值如图6所示，如图可见，溅射时间从40 min到80 min时I(D)/I(G)的值呈现出先减少后升高的趋势，从溅射40 min时对应的0.71下降到溅射55 min时的0.38，然后持续上升到80 min时的0.56。

综上所述，石墨靶溅射时间从40 min到80 min每隔5 min取一个参数点制备的Ta-C涂层的拉曼光谱图中G峰的变化趋势为先往靠近D峰方向移动后远离D峰，面积比I(D)/I(G)的值呈现先减少后增加的趋势。其原因在于石墨靶溅射40 min制备的Ta-C涂层，未形成完整、致密的薄膜，分子之间间隙较大，碰撞几率较小，形成 sp^3 杂化的几率低，所以涂层中的 sp^3 含量较低；而随着溅射时间

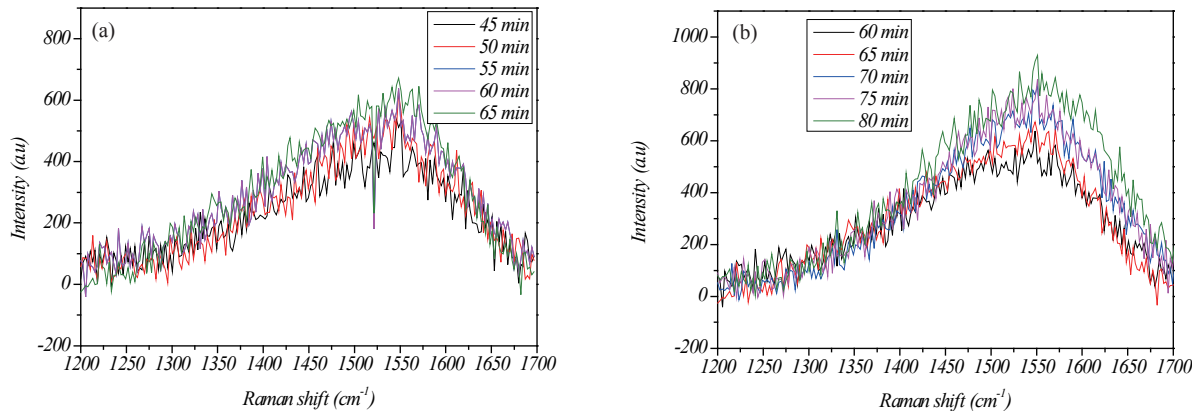


图4 拉曼光谱图
Fig.4 Ramanspectra

表2 拉曼光谱结果
Tab.2 The results of Roman spectra

	40 min	45 min	50 min	55 min	60 min	65 min	70 min	75 min	80 min
D-peak center	1394.3	1389.1	1393.2	1389.1	1389.7	1396.4	1387.6	1399.8	1395.4
D-peak FWHM	287.4	235.3	177.4	153.8	187.2	201.3	198.9	212.3	211.8
G-peak center	1565.8	1565.7	1563.9	1561.2	1562.5	1563.6	1563.8	1564.1	1564.5
G-peak FWHM	138.4	143.5	148.2	157	154.3	155	157.2	157.8	155.7
I(D)/I(G)	0.71	0.62	0.45	0.38	0.43	0.44	0.47	0.53	0.56

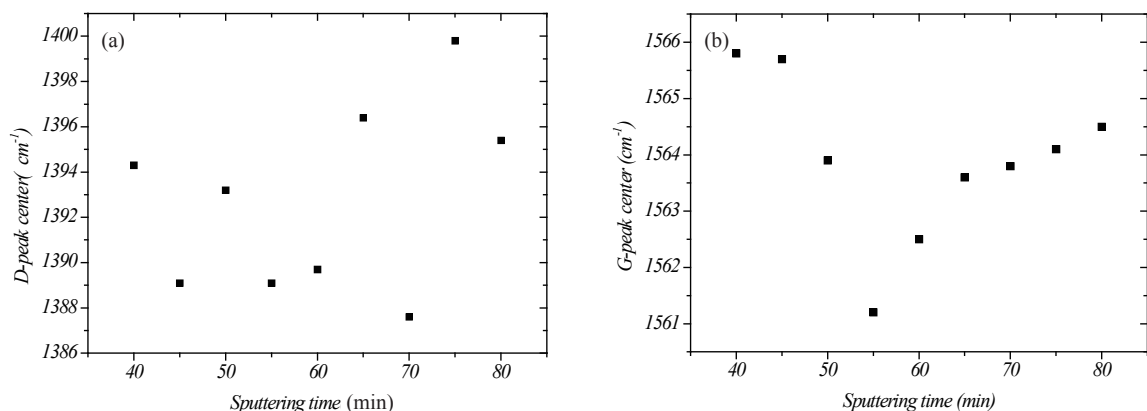


图5 D峰与G峰位置

Fig.5 The positions of D peak and G peak

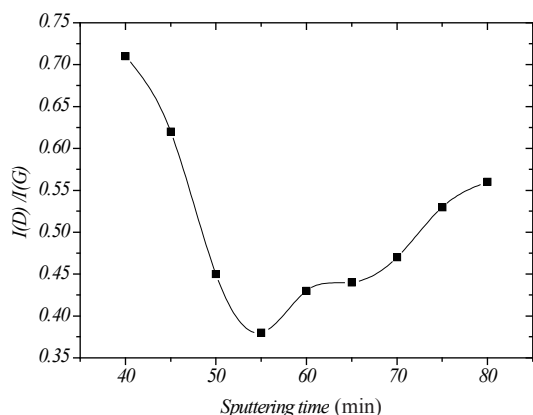


图6 I(D)/I(G)变化曲线图

Fig.6 The curve of I(D)/I(G)

的逐渐增加, 硬质合金基体表面的Ta-C薄膜逐渐趋于完整、致密, 分子之间的间隙降低, 有序度增加, 分子之间的碰撞几率增加, 杂化程度增高, sp^3 含量上升, 导致G峰位置逐渐往D峰移动, $I(D)/I(G)$ 比值逐渐减少; 随着溅射时间的进一步增加, 从靶材溅射出经过电磁场加速的高能粒子对完整、致密的Ta-C薄膜进行轰击, 逐渐破坏了其原有的结构, 组织变得疏松, sp^3 含量下降, 导致G峰位置远离D峰, $I(D)/I(G)$ 比值逐渐升高。

2.4 切削实验

根据上述研究表面质量、硬度以及拉曼测试结果, 选取具有典型代表的溅射时间为45 min、55 min以及65 min制备Ta-C涂层刀具, 并与无涂层刀具做对比, 研究溅射时间对Ta-C涂层切削运用的影响。本次切削实验VMC-1000 I I 机床为载体, 切削材料为2A50铝合金, 采用干式切削。切削参数如下: $a_p = 0.05$ mm, 轴转速 $n = 3980$ rev/min, $a_f = 2$ mm。在实验的过程中, 每切削10 m取下刀具测量刀具前刀面磨损量。当铣刀出现异常震动切削现象时, 判定

铣刀失效, 并记录铣刀的加工距离。由于切削实验收到切削环境等许多因素的影响, 本次实验重复3次, 最终获得的数据都是3次重复实验的平均值。本次Ta-C涂层刀具切削铝合金工件表面粗糙度测量使用的仪器为手持式粗糙度仪TR220, 具有极小的分辨率 $0.001 \mu\text{m}$, 测量范围覆盖4个数量级 $Ra 0.005 \mu\text{m} - 16 \mu\text{m}$ 。

2.4.1 刀具寿命

石墨靶不同溅射时间制备的Ta-C涂层铣刀切削2A50铝合金后刀面磨损宽度与加工距离的关系如图7所示。石墨靶溅射时间为45 min、55 min的两条曲线都符合刀具磨损的三个阶段: 切削初期由于刀具处于磨合阶段磨损快速增加, 切削中期由于刀具处于平稳切削磨损平稳, 切削后期刀具急剧磨损。石墨靶溅射时间为65 min的Ta-C涂层铣刀由于在切削过程中铣刀出现涂层剥落, 所以其磨损曲线并不满足初期磨损、正常磨损以及剧烈磨损三个阶段的变化趋势。

石墨靶溅射时间为45 min的铣刀较溅射时间为55 min、65 min的铣刀在磨损初期后刀面平均磨损宽度大, 在于石墨靶溅射时间为45 min的Ta-C涂层铣刀表面沉积的涂层比较薄, Ta-C涂层表面空洞较多, 表面较粗糙, 以致Ta-C涂层铣刀在切削加工过程中由于涂层受力不均匀磨损速度较快; 石墨靶溅射时间为65 min制备的铣刀在磨损初期之后直接进入急剧磨损状态, 在于溅射时间为65 min制备的Ta-C涂层内应力较大, 在受到切削力时出现涂层剥落现象; 石墨靶溅射时间为45 min的铣刀平稳磨损阶段较溅射时间55 min短, 在于溅射55 min沉积的涂层致密、均匀, 切削过程中受力均匀, 磨损较慢。三种铣刀切削失效距离如表3。

如表3所示, 石墨靶溅射时间为55 min的铣刀切削

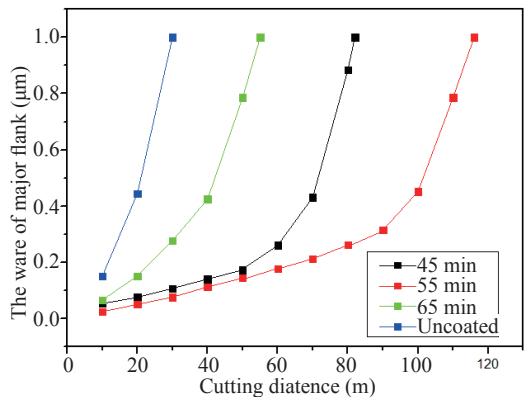


图7 切削2A50铝合金后刀面磨损宽度与加工距离关系图
Fig.7 The relationship between flank wear width and cutting distance of the 2A50 aluminum alloy

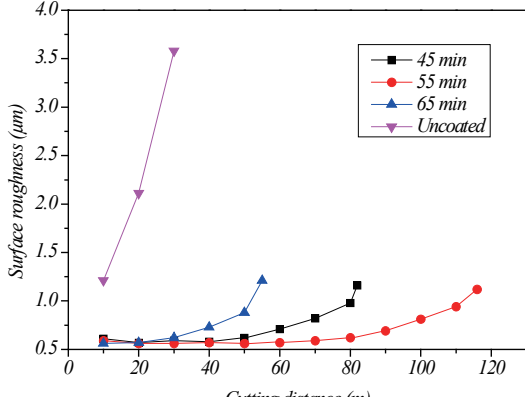


图8 切削 2A50铝合金表面粗糙度与加工距离关系图
Fig.8 The relationship between surface roughness and machining distance for cutting 2A50 aluminum alloy

表3 铣刀切削失效距离
Tab.3 The failure distance of the milling tool

The type of cutting tool	Cutting distance (m)
Graphite target sputtering for 45 min	82
Graphite target sputtering for 55 min	116
Graphite target sputtering for 65 min	55
No coating	30

失效距离最长，溅射时间为65 min的铣刀切削失效距离最短。

2.4.2 工件表面粗糙度

刀具的切削性能直接受到工件的表面粗糙度的影响。石墨靶不同溅射时间切削2A50铝合金表面粗糙度与加工距离关系图如图8所示，可见石墨靶溅射时间45 min制备的Ta-C涂层铣刀在切削初期工件的表面粗糙度较大，随后表面粗糙度呈先减小后增大趋势，主要是由于石墨靶溅射时间为45 min的Ta-C涂层铣刀表面粗糙度较大、空洞较多，与铝合金接触初期Ta-C涂层表面孔洞边缘起对工件造成划伤较严重，所以工件表面粗糙度比溅射时间55 min、65 min制备的Ta-C涂层铣刀高，随着切削的继续进行Ta-C涂层表面的深度较浅的空洞逐渐被磨损或者被切削过程中产生的切屑填平，加工出来的工件的表面粗糙度有降低趋势，之后具有摩擦系数低、自润滑性的Ta-C涂层在加工过程中被磨损、消耗，加工的工件表面粗糙度又升高。石墨靶溅射时间55 min制备的Ta-C涂层铣刀在切削初期工件的表面粗糙度较大，随后表面粗糙度降低之后又升高，主要是由于在切削初期Ta-C涂层铣刀处于磨合阶段，刀刃尖锐部位对工件表面产生划痕，随着切削的继续进行Ta-C涂层铣刀进入平稳

磨损阶段，工件表面粗糙度较低，之后Ta-C涂层在加工过程中被磨损、消耗，加工的工件表面粗糙度又升高。石墨靶溅射时间65 min制备的Ta-C涂层铣刀在切削初期工件的表面粗糙度较溅射时间45 min、55 min制备的Ta-C涂层铣刀最低，随后加工的继续进行工件的表面粗糙度逐渐升高，主要在于石墨靶溅射时间为65 min制备的Ta-C涂层铣刀表面组织疏松，在切削初期摩擦系数低的疏松的Ta-C涂层从表面局部脱落对干切削起到了润滑作用，随着切削的继续进行涂层出现剥落，刀具剧烈磨损，工件表面粗糙度升高。

3 结论

(1)脉冲磁控溅射中石墨靶溅射时间对Ta-C涂层的性能有较大影响，随着溅射时间从40 min到80 min，Ta-C涂层表面形貌质量呈现先上升后下降的趋势，溅射时间55 min制备的Ta-C涂层表面质量较好，涂层表面均匀平整、光滑。

(2)石墨靶溅射时间从40 min到80 min制备的Ta-C涂层，随着溅射时间的增加，Ta-C涂层的硬度、 sp^3 含量呈先上升后下降的趋势，石墨靶溅射时间55 min制备的Ta-C涂层综合性能最好，硬度达到86.9 GPa， sp^3 含量较高。

(3)选取典型点切削验证试验参数中，石墨靶溅射55 min制备Ta-C涂层铣刀的切削寿命最长116 m，对应的切削工件的表面质量最好，溅射时间55 min制备的Ta-C涂层综合性能较优得到验证。

参考文献：

[1]IRFAN U, ASLANTAS K, BEDIR F. The performance of DLC-coated and uncoated ultra-fine carbide tools in micromilling of

- Inconel 718[J]. Precision Engineering, 2015, 41: 135–144.
- [2] KHADEM M, PENKOV O V, PUKHA V E, et al. Ultra-thin nano-patterned wear-protective diamond-like carbon coatings deposited on glass using a C 60, ion beam[J]. Carbon, 2014, 80(1): 534–543.
- [3] XU J, HANG L, LIU W, et al. Hydrogen-free carbon thin films prepared by unbalanced magnetron sputtering[C]// Proceedings of the International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies, 2005: 61492S–61492S.
- [4] MA G, LIN G, WANG M, et al. Wettability study of different films prepared by magnetron sputtering hybrid deposition on the Ti alloy[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2013, 42: 170–173.
- [5] ZHANG X, ZHANG H, WU X, et al. Structure and wear resistance of tetrahedral amorphous carbon films[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 2003, 206(206): 215–218.
- [6] YEO R J, DWIVEDI N, TRIPATHY S, et al. Excellent wear life of silicon nitride/tetrahedral amorphous carbon bilayer overcoat on functional tape heads[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(9): 091604.
- [7] XIE J. Synthesis and characterization of amorphous carbon films for magnetic storage technology[D]. Dissertations & Theses – Gradworks, 2015.
- [8] YOKOTA T, SAWA T, YOKOUCHI M, et al. Frictional properties of diamond-like carbon coated tool in dry intermittent machining of aluminum alloy 5052[J]. Precision Engineering, 2014, 38(2): 365–370.
- [9] BEWILOGUA K, HOFMANN D. History of diamond-like carbon films — From first experiments to worldwide applications[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 242(4): 214–225.
- [10] 于翔, 张旭, 王成彪, 等. 四面体无定型无氢非晶碳膜的制备及其摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(2): 135–139.
- YU X, ZHANG X, WANG C B, et al. Journal of Tribology, 2005, 25(2): 135–139.
- [11] 蔡建, 杨巍, 代伟, 等. 基体负偏压对四面体非晶碳膜结构和性能的影响[J]. 中国表面工程, 2011, 24(6): 62–67.
- YU X, ZHANG X, WANG C B, et al. Journal of Tribology, 2005, 25(2): 135–139.
- [12] KANG M C, TAK H S, JEONG Y K, et al. Properties and tool performance of Ta–C films deposited by double-bend filtered cathodic vacuum arc for micro drilling applications[J]. Diamond & Related Materials, 2010, 19(7): 866–869.
- [13] 纪锡旺. 超硬类金刚石涂层的制备及其性能表征[D]. 华东理工大学, 2014.
- [14] 张婷, 何娟, 任瑛, 等. 类金刚石薄膜残余应力的研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(1): 84–87.
- ZHANG T, HE J, REN Y, et al. Material Guide, 2016, 30(1): 84–87.
- [15] 卓国海. 类金刚石薄膜的膜/基界面调控及其机械力学性能研究[D]. 江西理工大学, 2015.
- [16] 苏俊宏, 葛锦蔓, 徐均琪, 等. 类金刚石薄膜及其进展[J]. 应用光学, 2015, 36(5): 799–806.
- SU J H, GE J M, XU J Q, et al. Applied Optics, 2015, 36(5): 799–806.
- [17] 张而耕, 黄彪, 周琼. TaC涂层的研究现状及应用[J]. 陶瓷学报, 2017, 38(1): 8–12.
- ZHANG E G, HUANG B, ZHOU Q. Journal of Ceramics, 2017, 38(1): 8–12.
- [18] 李春伟, 苗红涛, 徐淑艳, 等. 复合高功率脉冲磁控溅射技术的研究进展[J]. 表面技术, 2016, 45(6): 82–90.
- LI C W, MIAO H T, XU S Y, et al. Surface technology, 2016, 45(6): 82–90.
- [19] 王启民, 张小波, 张世宏, 等. 高功率脉冲磁控溅射技术沉积硬质涂层研究进展[J]. 广东工业大学学报, 2013, (4): 1–13.
- WANG Q M, ZHANG X B, ZHANG S H, et al. Journal of Guangdong University of Technology, 2013, (4): 1–13.
- [20] INABA H, FUJIMAKI S, FURUSAWA K, et al. ECR-plasma parameters and properties of thin DLC films[J]. Vacuum, 2002, 66(3): 487–493.
- [21] GERETOVSZKY Z, SZÖRÉNYI T. Compositional and thickness distribution of carbon nitride films grown by PLD in the target plane[J]. Thin Solid Films, 2004, s453–s454: 172–176.
- [22] AHMAD I, MAGUIRE P D, LEMOINE P, et al. Deposition of carbon films onto metal and silicon substrates by filtered cathodic vacuum arc, plasma enhanced CVD and unbalanced magnetron sputtering[J]. Diamond & Related Materials, 2004, 13(4–8): 1346–1349.
- [23] HOOKS D E, RAMOS K J, MARTINEZ A R. Elastic-plastic shock wave profiles in oriented single crystals of cyclotrimethylenetrinitramine (RDX) at 2.25 GPa[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(2): 174–985.
- [24] 董美伶, 金国, 王海斗, 等. 纳米压痕法测量残余应力的研究现状[J]. 材料导报, 2014, 28(3): 107–113.
- DONG M L, JIN G, WANG H D, et al. Material Guide, 2014, 28(3): 107–113.