

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.04.008

DLC、TiN涂层对TC4钛合金抗砂尘冲蚀性能的影响*

曹 鑫¹, 何卫锋¹, 何光宇¹, 廖 斌², 张虹虹³, 李应红¹

(1. 空军工程大学 等离子体动力学重点实验室, 西安 710038; 2. 北京师范大学 核科学与技术学院, 北京 100875; 3. 西安交通大学 机械工程学院, 西安 710049)

摘 要: 为提高TC4钛合金的抗砂尘冲蚀性能, 采用金属蒸汽真空弧(MEVVA)离子源注入与磁过滤真空阴极弧(FCVA)沉积复合技术、磁控溅射技术在TC4钛合金表面制备DLC、TiN涂层。采用SEM、Raman、XRD、纳米压痕仪和划痕仪等方法对涂层的物相结构、硬度、弹性模量以及与基体的结合力进行表征。在冲蚀试验平台上考核试样在不同入射角度条件下的抗砂尘冲蚀性能。结果表明: DLC涂层表面结构致密, 含有大量sp³键, 硬度为62.1 GPa, 弹性模量为391.64 GPa, 结合力达80.4 N; TiN涂层表面存在许多熔滴颗粒及空穴, 硬度为22.72 GPa, 弹性模量为383.18 GPa, 结合力达34.7 N。30°冲蚀条件下, 涂层主要是通过提高基体表面硬度来抵抗砂尘粒子的微切削作用, 从而提高TC4钛合金的抗砂尘冲蚀性能。90°冲蚀条件下, 涂层通过延缓基体的塑性变形来实现TC4钛合金抗砂尘冲蚀性能的提高。

关键词: TC4钛合金; 抗砂尘冲蚀; DLC涂层; TiN涂层; 质量损失

中图分类号: TG174.444

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2016)04-0060-08

Effects of DLC and TiN Coatings on Sand Erosion Resistance of TC4 Titanium Alloy

CAO Xin¹, HE Wei-feng¹, HE Guang-yu¹, LIAO Bin², ZHANG Hong-hong³, LI Ying-hong¹

(1. Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038; 2. College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875; 3. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: DLC and TiN coating were prepared on the substrate of TC4 titanium alloy respectively by combining metal vapor vacuum arc (MEVVA) technology and filtered cathodic vacuum arc (FCVA) deposition method and megnetron sputtering method to improve the erosion resistance of TC4 titanium alloy. SEM, Raman, XRD, nano indentation and scratch tester were used to analyze the phase structure, hardness, elastic modulus and bonding strength of DLC and TiN coating. The performance of erosion resistance of different samples were evaluated on the erosion test platform under different erosion degrees. The results show that the DLC coating has compact surface structure with plenty of sp³ bond. The hardness, elastic modulus and adhesion force of DLC coating are 62.1 GPa, 391.64 GPa and 80.4 N, respectively. The TiN coating, however, has large number of has droplet particles and holes on its surface. The hardness, elastic modulus and adhesion force of TiN coating are 22.72 GPa, 383.18 GPa and 34.7 N, respectively. At the erosion angle of 30°, coating mainly depends on improving the surface hardness to resist the micro-cutting action of particles, which thereby can improve the TC4 titanium alloy's performance of sand erosion resistance. At the erosion angle of 90°, the delay of the substrate's plastic deformation lead to the improvement sand erosion resistance of TC4 titanium alloy.

Keywords: TC4 titanium alloy; sand erosion resistance; DLC coating; TiN coating; mass loss

收稿日期: 2016-04-07; 修回日期: 2016-05-26; 基金项目: *国家重点基础研究发展规划(973计划)(2015CB057400); 国家自然科学基金(51405506); 陕西省科技统筹创新工程计划(2015KTCQ01-72); 中国博士后科学基金(2013M532223)

通讯作者: 何卫锋(1977—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 航空发动机部件强化与砂层防护; Tel: (029) 8478 7527; E-mail: hehe_coco@163.com

网络出版日期: 2016-07-21 14:30; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20160721.1430.026.html>

引文格式: 曹鑫, 何卫锋, 何光宇, 等. DLC、TiN涂层对TC4钛合金抗砂尘冲蚀性能的影响[J]. 中国表面工程, 2016, 29(4): 60-67. CAO X, HE W F, HE G Y, et al. Effects of DLC and TiN coatings on sand erosion resistance of TC4 titanium alloy[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(4): 60-67.

0 引言

直升机在沙漠等恶劣环境下工作时, 尤其在起飞和降落过程中, 自然环境中的砂尘在旋翼下洗气流的作用下被扬起而形成一个局部的高浓度砂尘环境, 大量的砂尘被吸入发动机内, 对压气机叶片造成冲蚀损伤^[1-2], 破坏发动机叶片的结构完整性, 逐渐降低发动机压气机工作效率, 显著减少了叶片服役寿命^[1]。硬质涂层是解决这一问题的有效手段^[3], 国内外的研究主要集中在陶瓷涂层、WC/Co涂层、ZrN、TiN涂层等^[4]。随着对冲蚀损伤机理的深入认识, 涂层的韧性逐渐受到关注^[5-6]。Q.Yang等人研究发现, 同时具备良好的韧性与硬度才是提高涂层抗冲蚀性能的关键^[7]。

目前, TiN涂层是唯一应用于航空发动机压气机叶片抗冲蚀保护的涂层, 可使压气机寿命提高2~3倍^[8]。类金刚石(Diamond-like carbon, DLC)涂层是一种同时含有金刚石结构(sp³)键与石墨结构(sp²)键的亚稳定形态碳, 与TiN涂层相比, 具有更好的耐磨性能以及独特的摩擦学特性(摩擦因数低, 具有自润滑特性等)^[9-11], 其硬度和弹性模量也比TiN涂层更高。

Shojiro Miyake等人采用磁过滤真空阴极弧(Filtered cathodic vacuum arc, FCVA)方法在Si的表面制备了不同厚度的DLC涂层, 相比较于采用等离子体化学气相沉积(Plasma chemical vapor deposition method, P-CVD)制备的DLC涂层, 其耐磨寿命更久^[12]。杨静远等人采用FCVA方法在不锈钢基底上制备了DLC(ta-C)涂层, 其sp³含量可达85%, 其低摩擦因数和耐磨性都高于CrTiAlN涂层^[13]。但DLC涂层韧性不够, 且由于与基体材料在结构和性能上都有很大的差异导致与基体的结合力差^[14], 限制了DLC涂层在抗砂尘冲蚀方面的应用。

金属蒸汽真空弧(Metal vapor vacuum arc, MEVVA)离子源注入技术能够对材料表面进行改性。Timur V. Kulevoy等人采用MEVVA技术在Rusfer EK-181钢表面注入Ti和N离子, 试样表面硬度从8.51 GPa最高提高到9.94 GPa, 增加了试样的表面硬度^[15]。L.P.Ward等人在TiN涂层表面分别注入Cr、Zr、Nb、Mo和W离子, 发现注入后的TiN涂层晶粒尺寸减少, 表面粗糙度也降低^[16]。

文中针对DLC涂层在抗砂尘冲蚀方面的不足, 采用MEVVA离子源注入与FCVA沉积复合技

术在TC4钛合金表面先进行了Ti离子与Ti过渡层的反复注入与沉积, 再进行DLC涂层沉积。同时, 采用磁控溅射技术制备了TiN涂层, 对比研究了两种涂层的基本结构, 纳米压痕行为以及与基体结合力。在冲蚀试验平台分别进行了小角度下(30°)与大角度下(90°)冲蚀试验, 讨论了DLC、TiN涂层对TC4钛合金抗冲蚀性能的影响, 分析了DLC涂层抗冲蚀性能相对于TiN涂层的优势与不足及改进方向。

1 材料与方法

1.1 涂层的制备

基体选用压气机叶片常用材料TC4钛合金, 尺寸为50 mm×20 mm×4 mm, 其成分如表1所示^[17]。试样经过粗磨、细磨、抛光后, 进行丙酮超声波清洗, 分别再用去离子水、无水乙醇清洗, 烘干待用。

表 1 TC4 钛合金的化学成分^[17]

Table 1 Chemical composition of TC4 titanium alloy^[17] (w/%)

Element	Al	V	Fe	C
Content	6.06	3.92	0.3	0.013
Element	N	H	O	Ti
Content	0.014	0.001 4	0.15	Bal.

DLC涂层的制备在北京师范大学自主研发的MEVVA注入与FCVA沉积复合机上完成。先进行Ti离子注入与Ti过渡层的沉积, 使用的靶材为99.999%的高纯Ti; 再进行DLC涂层沉积, 使用的靶材为高纯度石墨(99.99%), 具体制备步骤与工艺参数见表2。其中, 真空室气压为4×10⁻⁵ Pa, DLC涂层沉积时, 磁过滤器偏转角度为180°, 沉积30 min, 厚度约为300 nm。

采用JGP450型超高真空磁控溅射仪制备TiN涂层, 工艺控制参数为: 基体偏压-400 V, 钛靶电流60~100 A, 氮气压力0.2 Pa, 靶材为99.999%的高纯Ti。在基体上先沉积Ti过渡层, 沉积7 min, 再沉积TiN涂层, 沉积30 min, 厚度约4 μm。

1.2 表征与分析

1.2.1 表面形貌与结构表征

利用JSM-6700F型扫描电子显微镜(SEM)观察TC4钛合金及DLC、TiN涂层的表面形貌, 并采用Talysurf 5P-120表面形貌仪测量其表面粗糙度, 随机测量5个位置, 取平均值。

表 2 DLC涂层的沉积步骤与参数

Table 2 Deposition process and parameters of the DLC coating

Process	Implantation voltage / kV	Implantation dose / (10 ¹⁶ cm ⁻²)	Arc current / A	Negative bias / V	Duty cycle	Time / min
Implantation (Ti ⁺)	8	3				
Deposition (Ti layer)			100	-200	90%	0.1
Implantation (Ti ⁺)	12	3				
Deposition (Ti layer)			100	-200	90%	7
Deposition (DLC layer)			100	-300	20%	30

拉曼光谱(Roman)是确定DLC涂层结构最好的非破坏性工具^[11], 采用WITec公司生产的Alpha 300型拉曼光谱仪对DLC涂层进行分析, 激发波长514 nm, 测量范围1 000~2 000 cm⁻¹. 利用SHIMADZU XRD-7000型X射线衍射分析仪分析TiN涂层的组织结构, X射线源为Cu K_α, 管压40 kV, 管流40 mA, 连续扫描, 衍射角范围为20°~80°.

1.2.2 力学性能测试

采用WS-2005涂层附着力自动划痕仪测量DLC、TiN涂层与基体的结合力, 加载速率100 N/min, 载荷100 N, 划痕长度10 mm, 选择声发射模式. 采用Agilent公司生产的Nano Indenter G200型纳米压痕仪评定DLC、TiN涂层的纳米硬度与弹性模量, 其压头为Berkovich型金刚石压头. 为减少基体对涂层性能的影响, 选择深度测试模式, 压入深度60 nm, 随机选取5个点测量, 取其平均值.

1.2.3 抗砂尘冲蚀性能考核

在固体颗粒冲蚀台上考核DLC、TiN涂层以及裸露TC4试样的抗砂尘冲蚀性能. 图1是该试验设备的示意图, 主要由供气系统、供砂系统和试验舱等组成. 其中, 供气系统主要通过提供不同压力的空气来控制粒子的速度, 供砂系统采用螺杆装置, 可通过调节转速精确控制砂尘供给率. 待冲蚀试样以一定角度安装在试验舱内的夹具上, 砂尘粒子经供气系统提供的压缩空气加速后由喷嘴喷出, 冲蚀试样表面.

试验条件为: 空气压力0.2 MPa, 砂尘粒子(取自塔克拉玛干沙漠, 主要成分为SiO₂, 粒径为100~250 μm的粒子超过85%)经粒子图像测速方法(Particle image velocimetry, PIV)测得平均速度为80 m/s、供给率为10 g/min, 喷嘴内径8 mm, 喷嘴距试样15 mm, 砂尘冲蚀角度分别为30°和90°. 冲蚀时间为20 min, 前5 min每隔1 min将试件取出, 后15 min每隔5 min将试件取出, 采用电子分析天平(精度0.1 mg)称量试样剩余质量, 记录单次质量损失. 每组冲蚀试验重复3次取平均值.

2 结果与讨论

2.1 表面形貌与组织结构

TC4钛合金基体及DLC、TiN涂层的表面形貌如图2所示. 可以看到: DLC涂层表面总体上比较致密, 但存在一些长短深浅不一的划痕, 这是由于涂层较薄, 受到了TC4基体表面状态的影响; TiN表面存在许多熔滴颗粒以及空穴. 3种试样的粗糙度Ra分别为0.037、0.015和0.238 μm. 对比可知: 采用磁过滤工艺制备的DLC涂层, 降低了基体表面粗糙度, 表面质量较TiN涂层更好.

图3为DLC涂层的拉曼光谱, 主峰位于~1 563 cm⁻¹, 为不对称宽峰, 这是典型DLC涂层的拉曼光谱图. 将其进行Gaussian拟合, 在1 566 cm⁻¹附近出现较强的宽峰(G峰), 在1 367 cm⁻¹存在一个弱肩峰(D峰). 研究发现: D峰和G峰的强度之比(I_D/I_G)越小, 涂层中sp³键含量越高, 涂层的硬度也越大^[18]. 文中DLC涂层的I_D/I_G为0.16, 根据相关文献^[11, 19-20]可知, 该涂层中的sp³键含量远高于sp²键. 图4为TiN涂层的XRD图谱, 其中右上方为TiN的标准衍射峰, 可以看到在标准峰中(200)晶面的衍射峰为最强峰, 但图4中TiN涂层的最强衍射峰在(111)晶面, 这表明TiN涂层在沉积过程中, 具有明显的沿(111)面的择优生长取向.

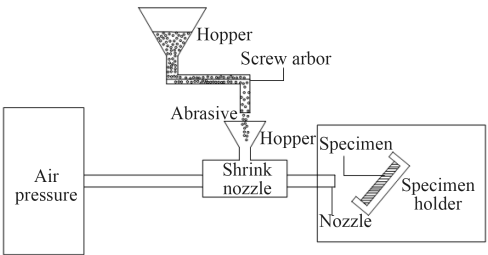
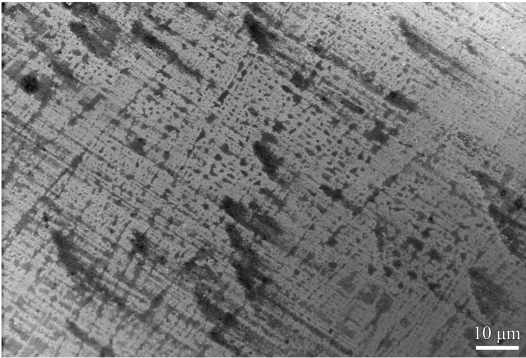
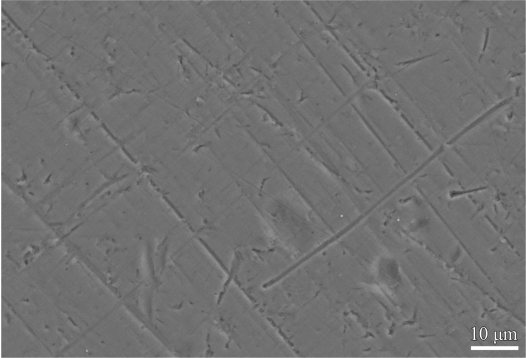


图 1 冲蚀装置示意图

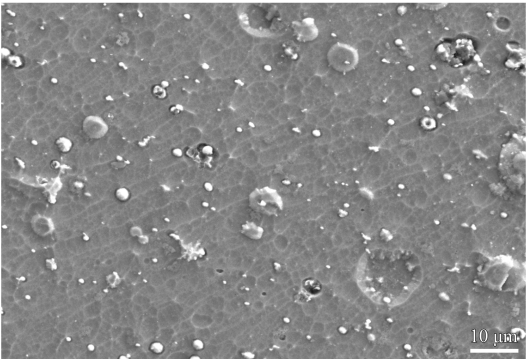
Fig. 1 Schematic diagram of the erosion device



(a) TC4



(b) DLC



(c) TiN

图 2 TC4钛合金及DLC、TiN涂层的表面形貌
Fig. 2 Surface morphologies of TC4 titanium alloy, DLC and TiN coating

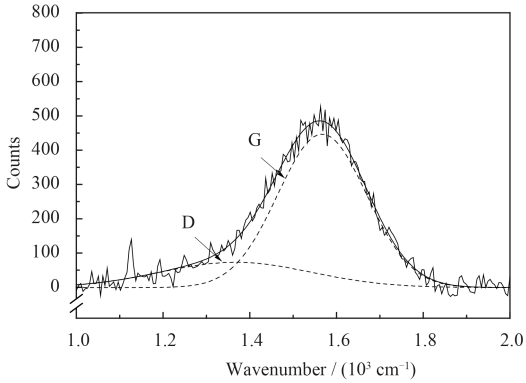


图 3 DLC涂层的拉曼光谱
Fig. 3 Raman spectra of the DLC coating

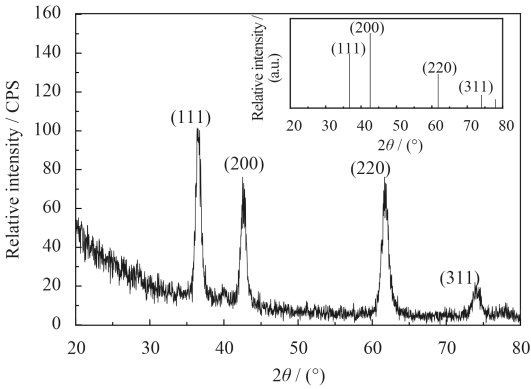


图 4 TiN涂层的XRD图谱
Fig. 4 XRD patterns of the TiN coating

2.2 力学性能

划痕法是采用划针在涂层表面逐渐加压划过时，涂层发生开裂时的最小压力来表征涂层与基体的结合强度，该过程可通过声发射信号来监测，当声发射信号突变时，认为涂层发生开裂。图5为DLC、TiN涂层的声信号监测结果。由图可知：DLC涂层与基体的结合力约为80.4 N，TiN涂层与基体的结合力约为34.7 N，DLC涂层结合力约为TiN涂层的2.3倍，分析可知，采用MEVVA离子注入技术，大幅增加了涂层与基体的结合力。这是因为高能Ti离子被注入到基体材料时，能够形成“钉扎层”，在此基础上再沉积Ti层，可使Ti层与基体结合力大大增加。

材料的抗冲蚀性能不仅与其硬度 H 有关，还受到弹性模量 E 的影响。通常采用 H^3/E^2 的值表示材料抵抗塑性变形的能力，一般认为，随 H^3/E^2 的值增大，材料的抗冲蚀性能提高^[21]。表3给出了TC4钛合金、DLC及TiN涂层的硬度、弹性模量和

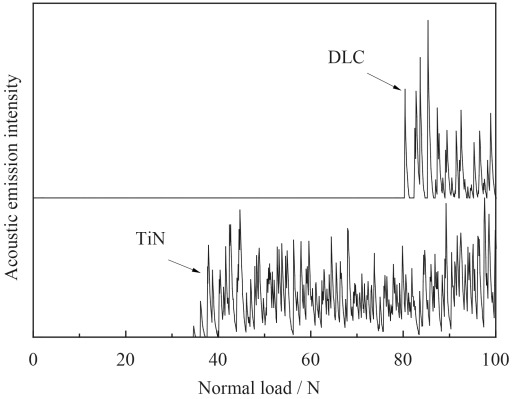


图 5 声发射信号强度与载荷的关系
Fig. 5 Relationship between acoustic emission intensity and normal load

表 3 TC4钛合金及DLC、TiN涂层的弹性模量和硬度
Table 3 Hardness and elastic modulus of TC4 titanium alloy, DLC and TiN coating

Sample	H / GPa	H / GPa	$(H^3/E^2) / \text{GPa}$
TC4	3.95	130.5	3.6×10^{-3}
DLC	62.1	391.64	1.56
TiN	22.72	383.18	7.99×10^{-2}

H^3/E^2 的值。可以看出：DLC涂层硬度约为TiN涂层的3倍， H^3/E^2 值远远高于TiN，结合Raman光谱分析可知，这与DLC涂层含有大量 sp^3 键有关^[9]。

2.3 抗沙尘冲蚀性能

采用试样20 min内的质量总损失来评价其抗冲蚀性能。图6为TC4钛合金与镀有DLC、TiN涂层的试样在冲蚀速度为80 m/s，冲蚀角度分别为30°和90°条件下，冲蚀20 min后的总质量损失。在30°条件下，TC4钛合金质量损失为13.1 mg，DLC、TiN涂层试样质量损失分别为6.6和8.1 mg，相对钛合金分别降低了49.62%和38.17%；在90°条件下，TC4钛合金质量损失为21.8 mg，DLC、TiN涂层试样质量损失分别为17.5和16.4 mg，分别降低了19.72%和24.77%。可见，DLC涂层可以同时提高TC4钛合金表面在低角度与高角度下的抗沙尘冲蚀性能，且在低角度下抗冲蚀性能较TiN涂层更佳。但是，DLC涂层抗沙尘冲蚀性能在高角度时低于TiN涂层，这与 H^3/E^2 的值增大，材料的抗冲蚀性能提高^[21]的结论不一致。这可能是由于：沙尘粒子的粒径远远大于涂层的厚度，其冲蚀作用深度已经超出涂层的厚度范围，虽然DLC涂层的 H^3/E^2 值远高于TiN涂层，但DLC涂层的厚度不足TiN涂层的1/10，因而与TiN涂层相

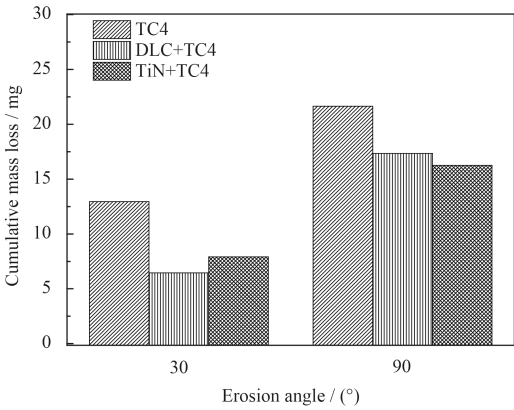


图 6 TC4钛合金及DLC、TiN涂层试样累积质量损失
Fig. 6 Cumulative mass loss of TC4 titanium alloy, DLC and TiN coating

比，DLC涂层受基体的影响更大。TC4钛合金基体的 H^3/E^2 值很低，因而冲蚀作用距离范围内的基体与DLC涂层整体的 H^3/E^2 值可能会小于基体与TiN涂层整体的 H^3/E^2 值。

采用冲蚀率(ϵ)来分析不同试样的冲蚀过程，其计算方法如下：

$$\epsilon = \frac{\text{试样单次质量损失 (mg)}}{\text{砂粒供给率 (g/min)} \times \text{单次冲蚀时间 (min)}} \quad (1)$$

根据上述方法，得到了不同试样的冲蚀率随供砂量的变化曲线，见图7。在冲蚀角度为30°的条件下，钛合金的冲蚀率先快速降低，然后缓慢上升，最后趋于稳定。对于带有涂层的试样，其冲蚀率同样先快速降低，但是在极低水平下会维持一段时间后再缓慢上升，最后同样趋于稳定。在冲蚀角度为90°的条件下，钛合金的冲蚀率初始很高，随后冲蚀率快速降低又快速上升。DLC涂层试样的冲蚀率一直在上升，而TiN涂层试样的冲

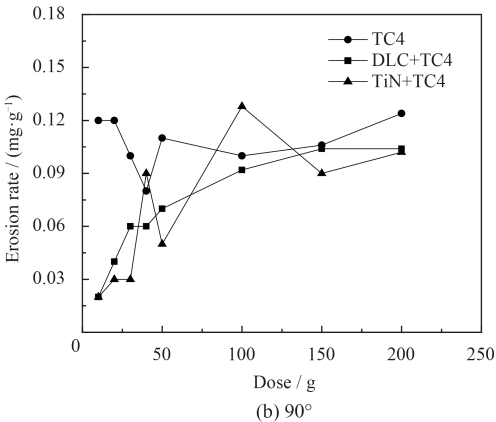
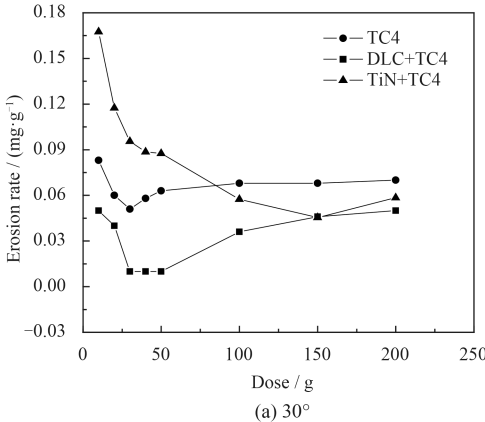


图 7 不同冲蚀角下冲蚀率随供砂量的变化
Fig. 7 Changes of the erosion rate depend on the mass of sand under different erosion angle

蚀率则为波动上升。

图8为不同试样冲蚀损伤的表面形貌，其中图8(a)(b)(c)为30°冲蚀角度下钛合金及DLC、TiN涂层试样的损伤形貌，3个试样表面都存在大量明显的犁削沟槽，这是由砂尘粒子微切削造成的；同时也都存在少量冲击凹坑，这是粒子的垂直冲击分量造成的。结合30°条件下的冲蚀率变化规律与冲蚀损伤形貌，可以将钛合金冲蚀过程分为3个阶段。第一阶段：砂尘粒子刚开始冲蚀试样表面，凸起区域的材料容易被去除，所以初始冲蚀率处在较高水平，随着砂尘粒子对试样的冲击，导致

其表面产生硬化现象，试样表面硬度增加^[22]，砂尘粒子对试样的切削影响下降，冲蚀率不断降低；第二阶段：砂尘粒子持续对试样表面进行冲蚀，在粒子反复冲击导致材料剥落与冲蚀磨损的共同作用下，试样的冲蚀率逐渐增加；第三阶段：材料的硬化现象和材料的冲蚀作用稳定下来，试样的冲蚀率将维持在一个稳定范围，约为0.07 mg/g。

对于DLC涂层试样，可分成4个阶段。第一阶段：DLC涂层表面的部分缺陷使初始冲蚀率较高，但由于表面粗糙度低于TC4钛合金基体，因

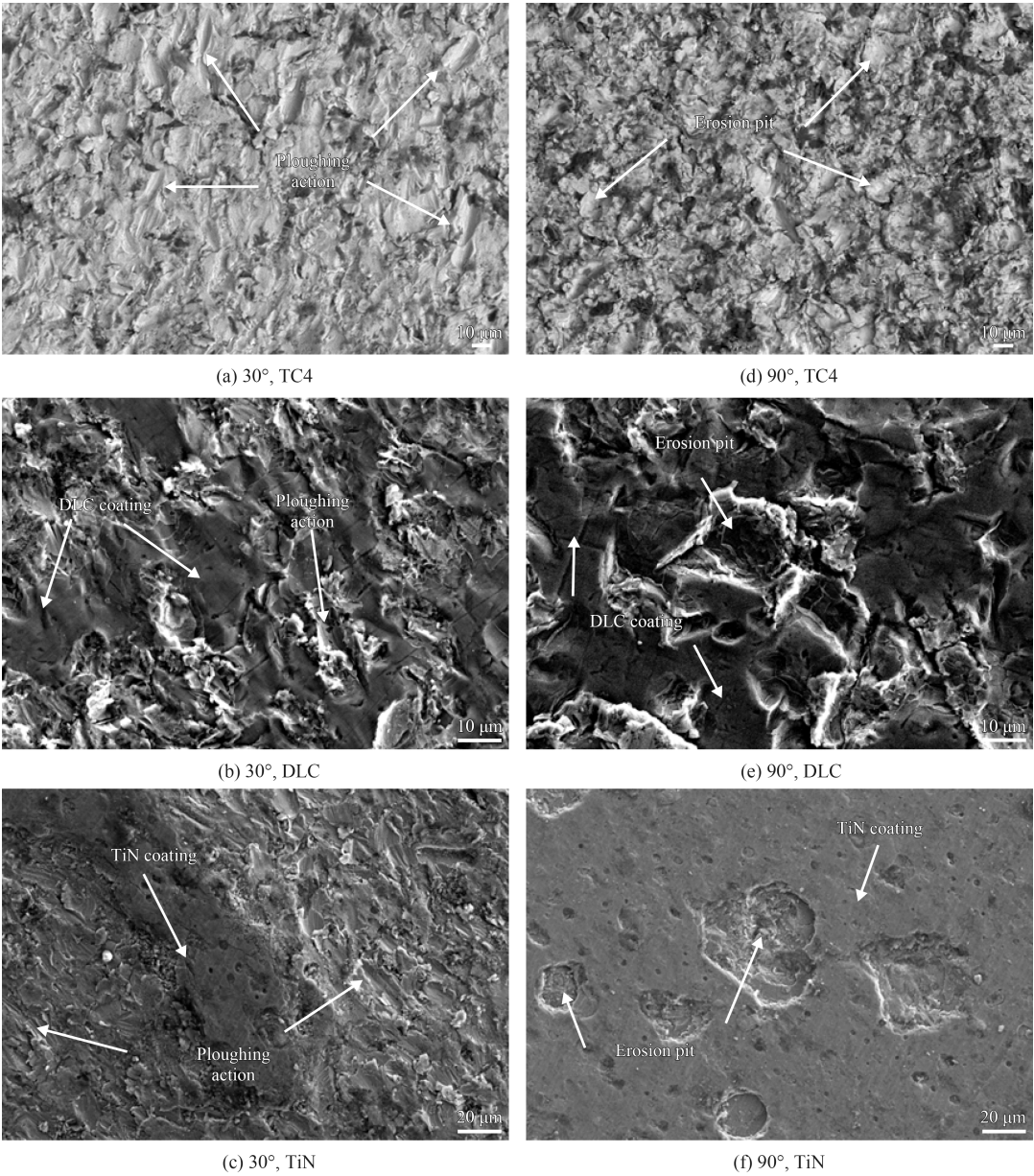


图 8 TC4钛合金及DLC、TiN涂层试样在不同冲蚀角下的表面损伤形貌

Fig. 8 Surface damage morphologies of TC4 titanium alloy, DLC and TiN coating under different erosion angle

而冲蚀率低于基体,在大量砂粒冲蚀下,涂层表面状态在短时间内迅速趋于平整,且由于DLC硬度很高,抵抗砂粒切削的能力较强,所以此阶段中试样的冲蚀率迅速降低;第二阶段:由于DLC涂层硬度高,抗切削能力强,且砂粒的冲击作用造成的损伤还处在冲击孕育期,因而此时试样的冲蚀率维持在最低水平,约为0.01 mg/g,仅为TC4钛合金基体的14.29%;第三阶段,随着冲蚀时间的增加,粒子的垂直冲击作用不断累积,由于DLC涂层本身脆性大,抗冲击能力弱,涂层内易萌生裂纹并迅速扩展而发生剥落,导致部分区域基体露出,此时的质量损失包含了涂层与基体两者共同的损失,由于基体的冲蚀率相比于DLC涂层较高,所以带有DLC涂层的试样冲蚀率增加;第四阶段:当基体完全暴露时,冲蚀率与基体冲蚀率相同。由上,第二阶段为DLC涂层的有效抗砂尘冲蚀阶段,利用了DLC涂层的高硬度。与DLC涂层相比,TiN涂层初期冲蚀率很高,这是由于其表面存在大量熔滴颗粒,很容易被砂尘粒子快速去除引起的;有效抗砂尘冲蚀阶段冲蚀率为0.045 mg/g,高出DLC涂层3倍以上,可知涂层的硬度在低角度时影响较大。

图8(d)(e)(f)为90°下钛合金及DLC、TiN涂层试样的损伤形貌,可以看到材料表面存在许多垂直冲击所引起的凹坑,在凹坑四周存在被冲蚀粒子挤压出来的材料,形成挤压唇,挤压唇杂乱交替,无明显的方向性。这些挤压唇在冲蚀过程中会被锻打并掉落,造成材料质量损失。结合冲蚀率变化规律可知:在90°条件下,TC4钛合金试样冲蚀率初始也很高,这跟试样表面状态有关。随后冲蚀率快速降低又快速上升,这是由于在挤压唇形成过程中,钛合金发生塑性变形,材料去除量较低,而形成之后,不同的挤压唇相互交替,很容易被随后的高速砂尘粒子去除,导致冲蚀率快速上升。当两者平衡后,冲蚀率基本稳定下来。

DLC、TiN涂层试样在刚开始冲蚀时,过渡层能够吸收一部分冲击能量,且涂层表面硬度很高,材料不容易被去除,随着砂粒的不断冲击,过渡层能量吸收饱和,涂层没有足够的塑性变形能力,只能通过萌生裂纹来消耗能量,DLC涂层内应力大,裂纹会迅速扩展、交叉,导致DLC涂层不断剥落,很快露出基体,因而冲蚀率呈上升趋势,直至完全露出基体。对于TiN涂层,内应力

小于DLC涂层,裂纹扩展速度会相对较慢,当裂纹在扩展阶段时,材料不会立刻去除,此时冲蚀率会较低,当裂纹发生交叉后,材料会剥落,冲蚀率会上升,因而TiN涂层的冲蚀率表现为波动上升。分析可知,在90°冲蚀条件下,涂层起到延缓基体塑性变形的作用,实现砂尘防护。

综上,DLC涂层相较于TiN涂层,在冲蚀角为30°的条件下优势很明显,但在90°时还略有不足,这与DLC内应力大,韧性不足有关。在不大幅降低DLC涂层硬度的前提下,如何降低DLC涂层内应力,降低DLC涂层在砂尘冲蚀下裂纹萌生与扩展速率,将成为接下来DLC涂层的改进方向。

3 结 论

(1) 采用MEVVA注入与FCVA沉积复合技术在TC4钛合金表面制备DLC涂层,其表面致密,硬度高达62.1 GPa,与基体结合力80.4 N;采用磁控溅射技术制备TiN涂层,其表面存在大量熔滴,硬度22.72 GPa,与基体结合力34.7 N。

(2) DLC、TiN涂层可提高TC4基体在低角度与高角度下的抗粒子冲蚀性能。冲蚀角为30°时,TC4钛合金质量损失为13.1 mg,DLC、TiN涂层试样质量损失为6.6 mg和8.1 mg,分别降低49.62%和38.17%;冲蚀角为90°时,TC4钛合金质量损失为21.8 mg,DLC、TiN涂层试样质量损失为17.5 mg和16.4 mg,分别降低19.7%和24.77%。

(3) 30°冲蚀条件下,冲击损伤孕育阶段(第二阶段)为涂层的有效抗砂尘冲蚀阶段,DLC涂层相比于TiN涂层,这个阶段的冲蚀率持续时间更长,冲蚀率更低;在90°冲蚀条件下,涂层起到了延缓基体塑性变形的作用,DLC涂层内应力大,相比TiN涂层,冲蚀率上升更快。

参考文献

- [1] HENDERSON R E, HENNECKE D K. Erosion corrosion and foreign object damage effects in gas turbines[R]. ADA289820, 1998.
- [2] PEPI M, SQUILLACIOTI R, PFLEDDERER L, et al. Solid particle erosion testing of helicopter rotor blade materials[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2012, 12(1): 96-108.
- [3] TRAPEZON A G, LYASHENKO B A. Fatigue strength of metals with hardening coatings[J]. Strength of Materials, 2013, 45(3): 284-294.

- [4] 何光宇, 李应红, 柴艳, 等. 航空发动机压气机叶片砂尘冲蚀防护涂层关键问题综述[J]. 航空学报, 2015(36): 1733-1743.
- HE G Y, LI Y H, CHAN Y, et al. Review of key issues on coating against sand erosion of aero-engine compressor blade[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015(36): 1733-1743 (in Chinese).
- [5] BORAWSKI B, SINGH J, TODD J A, et al. Multi-layer coating design architecture for optimum particulate erosion resistance[J]. Wear, 2011, 271(11): 2782-2792.
- [6] BORAWSKI B, SINGH J, TODD J A, et al. The influence of ductile interlayer material on the particle erosion resistance of multilayered TiN based coatings[J]. Wear, 2011(271): 2890-2898.
- [7] YANG Q, SEO D Y, ZHAO L R, et al. Erosion resistance performance of magnetron sputtering deposited TiAlN coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 188: 168-173.
- [8] BIELAWSKI M, BERES W. FE modelling of surface stresses in erosion-resistant coatings under single particle impact[J]. Wear, 2007, 262(1): 167-175.
- [9] 王佳凡, 陈克选, 王永欣, 等. Cr/WC/DLC薄膜的多环境摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2015, 28(3): 49-55.
- WANG J F, CHEN K X, WANG Y X, et al. Tribological properties of Cr/WC/DLC film in multiple environments[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(3): 49-55 (in Chinese).
- [10] 张艳, 东梅, 李媚, 等. 纳米尺度下类金刚石(DLC)薄膜摩擦性能研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(2): 242-248.
- ZHANG Y, DONG M, LI M, et al. Investigation on the nano-friction properties of diamond-like carbon films[J]. Tribology, 2015, 35(2): 242-248 (in Chinese).
- [11] 宋贵宏, 杜昊, 贺春林. 硬质与超硬涂层: 结构, 性能, 制备与表征[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- SONG G H, DU H, HE C L, et al. Hard and ultrahard coating[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 146-167 (in Chinese).
- [12] MIYAKE S, INAGAKI J, MIYAKE M. Dependence of the friction durability of extremely thin diamond-like carbon films on film thickness[J]. Wear, 2016, 356: 66-76.
- [13] 杨静远, 李茂林, 韩冬傲, 等. 两种耐磨涂层摩擦特性研究[J]. 化学工程与装备, 2015(11): 12-13.
- YANG J Y, LI M L, HAN D A, et al. Friction characteristics of two wear-resistant coating[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2015(11): 12-13 (in Chinese).
- [14] 李光, 孙跃, 夏立芳, 等. PBII制备TiN_x/DLC多层膜的结构及摩擦学性能[J]. 材料科学与工艺, 2003, 11(1): 20-24.
- LI G, SUN Y, XIA L F, et al. Structure and tribological properties of TiN_x/DLC films prepared by plasma based ion implantation[J]. Materials Science & Technology, 2003, 11(1): 20-24 (in Chinese).
- [15] KULEVOY T V, CHALYHK B B, FEDIN P A, et al. Surface modification of ferritic steels using MEVVA and duoplasmatron ion sources[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(2): 411-425.
- [16] WARD L P, PURUSHOTHAM K P, MANORY R R. Studies on the surface modification of TiN coatings using MEVVA ion implantation with selected metallic species[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2016, 368: 37-44.
- [17] 颜鸣皋. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- YAN M G. China aeronautical materials handbook[M]. Beijing: China Standard Press, 2004 (in Chinese).
- [18] 卓国海, 柯培玲, 李晓伟, 等. 不同过渡层对DLC薄膜力学性能和摩擦学性能的影响[J]. 中国表面工程, 2015, 28(6): 39-47.
- ZHUO G H, KE P L, LI X W, et al. Influence of different interlayers on mechanical and tribological properties of DLC films[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(6): 39-47 (in Chinese).
- [19] 覃礼钊, 张旭, 吴正龙, 等. 磁过滤阴极弧制备四面体非晶碳膜热稳定性研究[J]. 无机材料学报, 2008, 23(4): 789-793.
- QIN L Z, ZHANG X, WU Z L, et al. Thermal stability of tetrahedral amorphous carbon films fabricated by filtered cathodic arc technique[J]. Journal of Inorganic Materials, 2008, 23(4): 789-793 (in Chinese).
- [20] 覃礼钊, 廖斌, 吴正龙, 等. Ni离子注入四面体非晶碳(ta-C)膜微观结构研究[J]. 真空, 2008, 45(5): 49-53.
- QIN L Z, LIAO B, WU Z L, et al. Microstructural study on tetrahedral amorphous carbon (ta-C) film implanted with Ni ions[J]. Vacuum, 2008, 45(5): 49-53 (in Chinese).
- [21] 吴凤芳. PVD氮化物涂层的冲蚀磨损特性及机理的研究[D]. 济南: 山东大学, 2011, 12.
- WU F F. Erosion wear performance and mechanism of PVD nitride coatings[D]. Jinan: Shandong University, 2011, 12 (in Chinese).
- [22] 王艳, 周仲荣. TC4合金冲击磨损性能与机制的研究[J]. 润滑与密封, 2009, 34(6): 1-4.
- WANG Y, ZHOU Z R. An investigation of impact wear and wear mechanism of TC4 alloy[J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(6): 1-4.