

盐雾腐蚀条件下 Ti 合金表面功能 薄膜的摩擦磨损性能

詹华^{1,2}, 汪瑞军^{1,2}, 李振东^{1,2}, 王伟平²

(1.中国农业机械化科学研究院, 北京 100083;
2.北京金轮坤天特种机械有限公司, 北京 100083)

摘要: **目的** 研究 Ti6Al4V 合金、铬掺杂类金刚石 (Cr-DLC) 薄膜、钨掺杂类金刚石 (W-DLC) 薄膜和氮化钛 (TiN) 薄膜, 在干摩擦和盐雾腐蚀气氛摩擦条件下的摩擦磨损性能。**方法** 在商用 Ti6Al4V 合金表面通过非平衡磁控溅射制备 Cr-DLC 薄膜和 W-DLC 薄膜, 通过多弧离子镀技术制备 TiN 薄膜。利用扫描电镜、显微硬度计、摩擦磨损试验机、白光干涉扫描轮廓仪, 对薄膜的形貌、硬度、干摩擦和腐蚀摩擦性能、磨痕形貌进行测试分析。**结果** 干摩擦条件下, Ti6Al4V 合金表面沉积 Cr-DLC、W-DLC 和 TiN 三种薄膜的摩擦系数均比 Ti6Al4V 合金低; Ti6Al4V 合金及其表面制备的三种薄膜在盐雾腐蚀气氛条件下的摩擦系数都比干摩擦条件下有所增加。与 Ti6Al4V 合金相比, Cr-DLC、W-DLC 和 TiN 三种薄膜在干摩擦和盐雾腐蚀气氛摩擦条件下均减小了磨损体积。干摩擦条件下, W-DLC 薄膜的磨损体积为 0.0017 mm^3 , 耐磨性最好; 盐雾腐蚀气氛摩擦条件下, TiN 薄膜的磨损体积为 0.0028 mm^3 , 表现出最佳的耐腐蚀磨损性能。通过磨痕形貌可以得出, 盐雾腐蚀气氛摩擦条件下, Ti6Al4V 合金表面制备的金属掺杂类金刚石薄膜的磨损受到磨粒磨损和腐蚀磨损双重机制的影响。**结论** 三种表面功能薄膜在盐雾腐蚀气氛摩擦条件下都较好地保护了 Ti 合金, 极大地减少了磨损损失。

关键词: Ti6Al4V 合金; Cr-DLC 薄膜; TiN 薄膜; W-DLC 薄膜; 干摩擦; 盐雾腐蚀气氛摩擦

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)09-0109-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.09.015

Friction and Wear Properties of Functional Films on Ti Alloy Surface under Salt Spray Corrosion Conditions

ZHAN Hua^{1,2}, WANG Rui-jun^{1,2}, LI Zhen-dong^{1,2}, WANG Wei-ping²

(1.Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China;
2.Beijing Golden Wheel Special Machine Co., Ltd, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The work aims to study friction and wear properties of Ti6Al4V alloy, chromium doped diamond-like carbon (Cr-DLC) films, tungsten doped diamond-like carbon (W-DLC) films and titanium nitride (TiN) films under the conditions of dry friction and salt spray corrosion friction. Cr-DLC films and W-DLC films were prepared on commercial Ti6Al4V alloy in

收稿日期: 2018-02-08; 修订日期: 2018-07-04

Received: 2018-02-08; Revised: 2018-07-04

基金项目: 北京市科技计划项目 (Z181100006318013)

Fund: Supported by the Beijing Science and Technology Project (Z181100006318013)

作者简介: 詹华 (1982—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为表面工程。

Biography: ZHAN Hua (1982—), Female, Ph. D., Senior engineer, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 汪瑞军 (1967—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为表面工程和再制造工程。

Corresponding author: WANG Rui-jun (1967—), Male, Ph. D., Researcher, Research focus: surface engineering and remanufacturing engineering.

the method of unbalanced magnetron sputtering. TiN films were prepared by adopting multi-arc ion plating technique. Morphology, hardness, dry friction performance, corrosion friction resistance and wear scar morphology of the films were tested and analyzed by using scanning electron microscope, microhardness tester, friction and wear tester as well as white light interference scanning profiler. Friction coefficient of Cr-DLC, W-DLC and TiN films deposited on the surface of Ti6Al4V alloy were lower than that of Ti6Al4V itself under dry friction condition. Compared with the condition under dry friction, the friction coefficient of Ti6Al4V and the three films prepared on its surface were increased in the salt spray corrosion atmosphere. Compared with wear volume of Ti6Al4V alloy, that of Cr-DLC, W-DLC and TiN films was reduced under the conditions of dry friction and salt spray corrosion. Under the dry friction condition, the wear volume of W-DLC film was 0.0017 mm^3 , and the film showed the best wear resistance. Under the salt spray corrosion condition, the wear volume of TiN film was 0.0028 mm^3 , and the film exhibited the best corrosive wear resistance. It could be concluded from wear scar morphology that the wear of metal-doped diamond-like carbon films prepared on the surface of Ti6Al4V alloy was affected by dual mechanism of abrasive wear and corrosion wear under the condition of salt spray corrosion. Ti alloy is well protected by the three kinds of surface functional films under the condition of salt spray corrosion friction, and wear loss is greatly reduced.

KEY WORDS: Ti6Al4V alloy; Cr-DLC film; TiN film; W-DLC film; dry friction; salt spray corrosion atmosphere friction

摩擦副表面在腐蚀性环境中会由于化学或电化学反应发生腐蚀磨损,其过程是磨损和腐蚀协同作用加速了摩擦表面材料迁移产生的表面损伤^[1-2]。在海洋环境中服役的泵、阀门、齿轮、活塞和传动轴等关键部件失效的原因之一,就是受到了摩擦磨损的同时,还受到盐雾环境的腐蚀、侵蚀,因此提高金属材料抵抗摩擦和腐蚀协同作用,是提高装备关键部件摩擦副使用的可靠性、安全性和服役寿命的重要研究方向。

钛合金是目前已知抗常温海洋环境腐蚀性能最优异的金属材料之一。这是由于钛合金不仅具有比重小、强度高的特点,而且在大气或者海洋盐雾气氛中,钛合金表面会生成一层钝化膜,使之在常温海洋环境中不会发生点蚀和晶间腐蚀^[3]。但钛合金的耐磨损能力差,极易因摩擦导致钝化膜破坏,特别是在一些无润滑介质的特殊工况条件下,钛合金表面的耐腐蚀磨损性能更差^[4-6],这会大大限制其在高端装备上的应用范围。采用先进表面技术在钛合金表面制备高性能耐磨、减摩与耐腐蚀的类金刚石薄膜^[7-10] (Diamond-Like Carbon, DLC) 和 TiN 超硬薄膜^[11-14],是提高钛合金在海洋环境服役性能与服役寿命的有效方法。

Ti 合金及其表面制备的功能薄膜在盐雾腐蚀环境中的摩擦磨损特性未见相关报道,本文利用改造的

摩擦磨损试验机,在盐雾腐蚀气氛环境下,对 Ti6Al4V 合金及其表面制备的金属掺杂 DLC 薄膜和 TiN 薄膜的摩擦磨损性能进行对比研究,为在海洋气氛服役环境中的摩擦副选用 Ti 合金材料提供工程应用解决方案。

1 实验

1.1 金属掺杂 DLC、TiN 薄膜的制备

基体材料选用 Ti6Al4V 合金,试样的尺寸为 $\phi 30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。基体试样经过粗磨去除表面氧化膜后,再经细磨、抛光和超声波清洗(丙酮溶剂),随后采用去离子水、无水乙醇清洗并在 80°C 烘干。

采用磁控溅射方法制备铬掺杂类金刚石(Cr-DLC)薄膜和钨掺杂类金刚石(W-DLC)薄膜,采用多弧离子镀膜方法制备氮化钛(TiN)薄膜,表 1 是制备薄膜的工艺参数。为提高 Cr-DLC 薄膜、W-DLC 薄膜的膜/基界面结合力,采用双层结构的薄膜设计。图 1 是双层结构薄膜的示意图,其中过渡层选用 CrN 薄膜,厚度为 $1\sim 2 \mu\text{m}$,面层为金属掺杂类金刚石薄膜,厚度为 $1.5\sim 2 \mu\text{m}$ 。

表 1 三种薄膜的制备工艺参数
Tab.1 Preparation process parameters of three films

| Film type | Vacuum/Pa | Bias/V | Ion source power/kW | Flow/($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$) | | | Target current/A | | | Deposition temperature / $^\circ\text{C}$ |
|-----------|--------------|--------|---------------------|--|----------------|-----------------|------------------|---|----|---|
| | | | | Ar | N ₂ | CH ₄ | Cr | W | Ti | |
| Cr-DLC | CrN layer | 0.3 | -120 | 1.5 | 150 | 60 | 15 | | | 150 |
| | Cr-DLC layer | 0.4 | -80 | 2.2 | 150 | 120 | 10 | | | |
| W-DLC | CrN layer | 0.3 | -120 | 1.5 | 150 | 60 | 15 | | | 180 |
| | W-DLC layer | 0.4 | -80 | 2.2 | 150 | 120 | | 8 | | |
| TiN | | 1.6 | -80 | | 400 | | | | 70 | 300 |

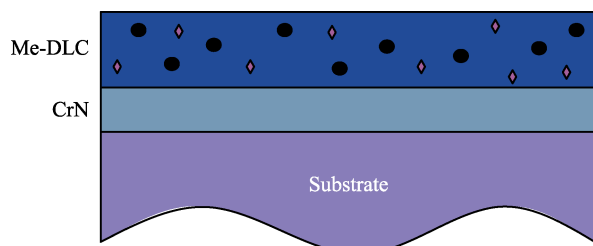


图 1 金属掺杂类金刚石薄膜双层结构的示意图
Fig.1 Schematic diagram of double-layered structure of metal-doped diamond-like carbon film

1.2 表征与性能分析

采用球-盘摩擦的方式完成了盐雾腐蚀条件下的摩擦磨损试验，图 2 是实验装置的工作原理示意图。在该实验系统中，利用盐雾生成系统产生盐雾腐蚀气氛，通过管道引入试验环境池，形成腐蚀环境，测试样品则被封闭在密闭的环境池中。实验过程中，载荷的加载与卸载是通过伺服电机驱动齿轮箱中的蜗轮蜗杆减速机构旋转，进而带动丝杠螺母机构旋转，使弹簧座升降压缩或释放弹簧实现的。摩擦系数是利用摩擦力传感器测量摩擦力矩，通过公式（1）计算获得。为了研究钛合金及其表面薄膜在重载低速下的摩擦磨损性能，本实验设定摩擦载荷为 20 N，摩擦转速为 10 r/min，对磨材料为 $\phi 6$ mm 的 Si_3N_4 球，摩擦时间为 60 min。

$$\mu = \frac{T}{Pr} \quad (1)$$

式中： μ 为摩擦系数； P 为试验机轴向试验力（N）； T 为试验机摩擦力矩（N·mm）； r 为接触点轨迹半径（mm）。

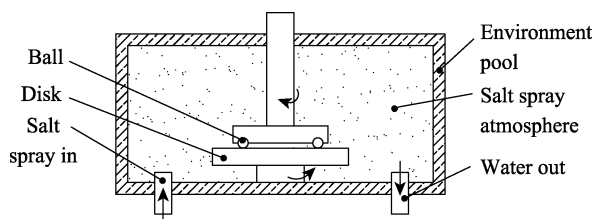


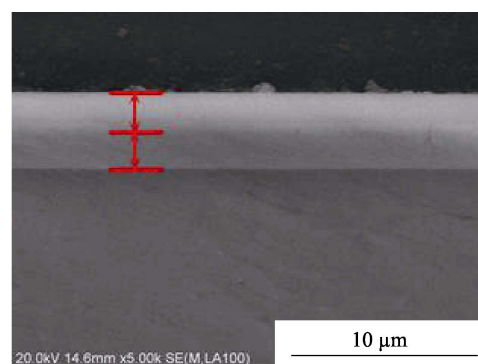
图 2 盐雾气氛环境复合薄膜摩擦磨损测试平台示意图
Fig.2 Schematic diagram of friction and wear test platform for composite film in salt spray atmosphere

采用 S-4800 冷场发射扫描电镜（SEM）观察薄膜截面的微观形貌。拉曼光谱是研究碳基薄膜材料内部键合结构最常用的表征手段，采用 LabRAM HR Evolution 型高分辨拉曼光谱仪测试分析碳基薄膜的微观结构。采用 X 射线衍射仪测试氮化钛薄膜的相组成。采用 EM1500DL 型显微硬度计测量薄膜的显微硬度，试验载荷为 25 g，保压时间为 10 s，取 5 次测量的平均值作为薄膜的显微硬度。采用划痕仪，按照 ASTM C 1624—2005《用定量单点划痕测试法测定陶瓷涂层附着强度和机械故障种类的试验方法》测定膜基结合力。采用 Nexview 白光干涉扫描轮廓仪测量薄膜磨损后的二维轮廓。

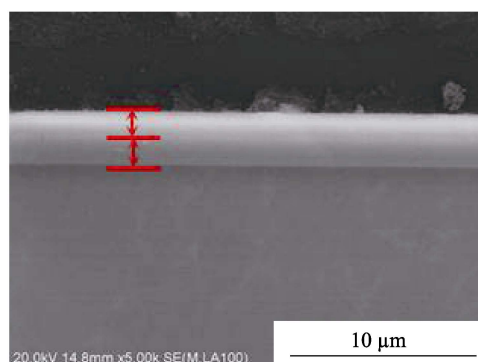
2 结果与分析

2.1 薄膜的形貌与性能

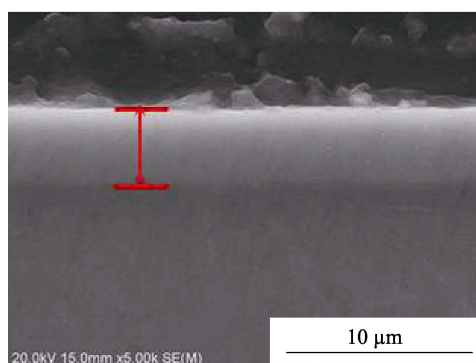
图 3 是在钛合金基体材料 Ti6Al4V 合金表面制备 Cr-DLC、W-DLC 和 TiN 薄膜的截面形貌，可见三种薄膜致密，膜/基界面未见缺陷，双层结构的 Cr-DLC 和 W-DLC 薄膜界面清晰，厚度均匀一致性好。由图 3a 可见，在 Ti6Al4V 合金表面的 Cr-DLC 薄膜为双层结构，总厚度为 3.8 μm ，其中 Cr-DLC 顶层的厚度约为 1.6 μm ，过渡层 CrN 层的厚度约为 2.2 μm 。图 3b 所示的 W-DLC 薄膜也是双层结构，总厚度为 2.8 μm ，其中 W-DLC 顶层的厚度约为 1.5 μm ，CrN 层厚约为 1.3 μm 。图 3c 为单层结构的 TiN 薄膜，厚度为 3.8 μm 。



a Cr-DLC



b W-DLC



c TiN

图 3 薄膜截面形貌
Fig.3 Cross-sectional morphology of films

图 4 为测得的 Cr-DLC 薄膜和 W-DLC 薄膜的拉曼光谱,可见两种薄膜都具有典型的碳基薄膜特征,即在 1500 cm^{-1} 附近具有一个不对称的宽峰,利用双 Gaussians 峰拟合可以将该宽峰分解为两个峰,分别对应 G 峰和 D 峰,其中 Cr-DLC 薄膜的 G 峰峰位位于 1541 cm^{-1} 附近, D 峰峰位位于 1350 cm^{-1} 处; W-DLC 薄膜的 G 峰峰位在 1556 cm^{-1} 处, D 峰峰位位于 1354 cm^{-1} 处。通常认为 D 峰与 G 峰的面积比 (I_D/I_G 比值) 越小, sp^3 杂化建的含量越高,薄膜的硬度越高。计算获得 Cr-DLC 和 W-DLC 薄膜的 I_D/I_G 比值分别为 1.54 和 1.46,可见, W-DLC 薄膜中 sp^3 杂化建的含量高。

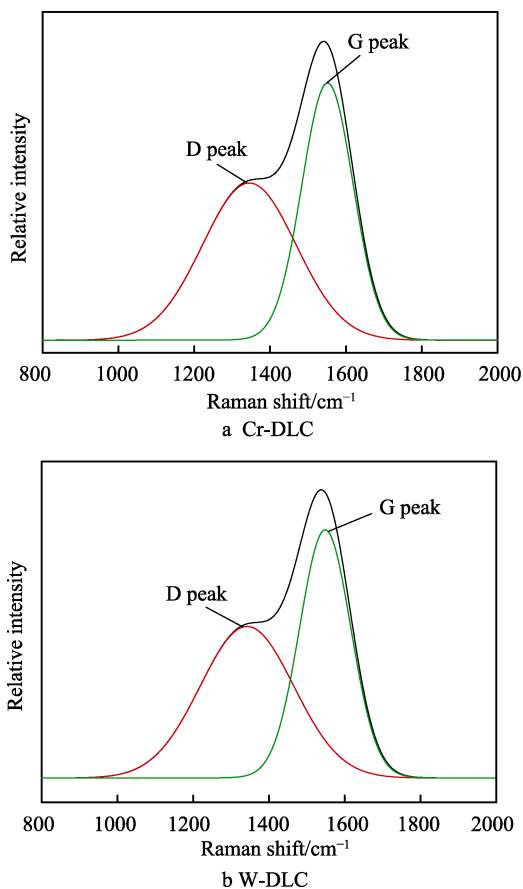


图 4 碳基薄膜的 Raman 光谱图
Fig.4 Raman spectra of carbon-based films

图 5 是 TiN 薄膜的 XRD 图谱,可见 TiN 薄膜的主要生长取向包括 (111)、(200)、(220) 晶面,其中最优的生长取向为 (111) 晶面。对于具有强烈 (111) 晶面择优取向的 TiN 薄膜来说,其性能表现为光亮度高、硬度高、结合强度高且耐磨性好。

表 2 是所制备的三种薄膜的基本性能,其中 TiN 薄膜的膜/基结合力最大,为 72 N,而双层结构的 Cr-DLC 薄膜和 W-DLC 薄膜的膜/基结合力较低,分别为 56 N 和 60 N。这是因为采用多弧离子镀技术制备的 TiN 薄膜,电弧放电产生了更高的离子能量。测得的 W-DLC 薄膜和 Cr-DLC 薄膜的显微硬度分别是 15 GPa 和 12 GPa, TiN 薄膜的显微硬度为 25.4 GPa。

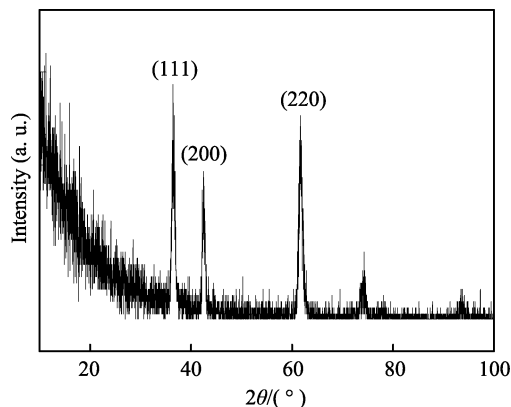


图 5 TiN 薄膜的 XRD 图谱
Fig.5 XRD patterns of TiN film

表 2 三种薄膜的基本性能
Tab.2 Basic properties of three films

| Sample | Hardness/GPa | Roughness/nm | Bonding force/N |
|---------|--------------|--------------|-----------------|
| Ti6Al4V | 3.4 | 40 | |
| Cr-DLC | 12.0 | 92 | 56 |
| TiN | 25.4 | 118 | 72 |
| W-DLC | 15.0 | 46 | 60 |

2.2 盐雾条件下的摩擦磨损性能

图 6 是实验获得的 Ti6Al4V 合金、Cr-DLC、W-DLC 和 TiN 薄膜在干摩擦条件下与盐雾腐蚀气氛摩擦条件下的摩擦系数曲线。可见在盐雾腐蚀气氛摩擦条件下,四组试样的摩擦系数均比干摩擦条件下的大,这是由于盐雾腐蚀气氛中的偶极作用与毛细管作用力增强,摩擦副接触表面间的粘着力增大,导致摩擦系数升高^[15]。

图 7 为四种试样分别在干摩擦与盐雾腐蚀摩擦条件下的磨痕二维轮廓曲线,可见钛合金 Ti6Al4V 在干摩擦下的磨痕深度和宽度分别为 $23.53\text{ }\mu\text{m}$ 、 $847\text{ }\mu\text{m}$,在盐雾腐蚀气氛中的磨痕深度和宽度均增大,分别为 $33.75\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1029\text{ }\mu\text{m}$ 。有 Cr-DLC、W-DLC 和 TiN 薄膜的试样在干摩擦条件下,磨痕深度和宽度分别为 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 和 $195\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.33\text{ }\mu\text{m}$ 和 $157\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.62\text{ }\mu\text{m}$ 和 $185\text{ }\mu\text{m}$;在盐雾腐蚀摩擦条件下,磨痕深度和宽度分别为 $1.75\text{ }\mu\text{m}$ 和 $200\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.94\text{ }\mu\text{m}$ 和 $195\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.44\text{ }\mu\text{m}$ 和 $513\text{ }\mu\text{m}$ 。

图 8 是不同实验条件下四种试样的磨痕体积对比分析结果,可见在干摩擦和盐雾气氛腐蚀摩擦条件下,钛合金 Ti6Al4V 表面制备的三种薄膜的耐磨损性能均有较大幅度提高。干摩擦条件下, W-DLC 薄膜的磨损体积仅为 0.017 mm^3 ,体积损失量最小; TiN 薄膜的体积损失量次之,为 0.0022 mm^3 ; Cr-DLC 最大,体积损失量为 0.0028 mm^3 。TiN、W-DLC、Cr-DLC 薄膜在盐雾腐蚀气氛条件下的磨损体积分别为 0.0028 、 0.0056 、 0.0121 mm^3 ,对比可得,薄膜在盐

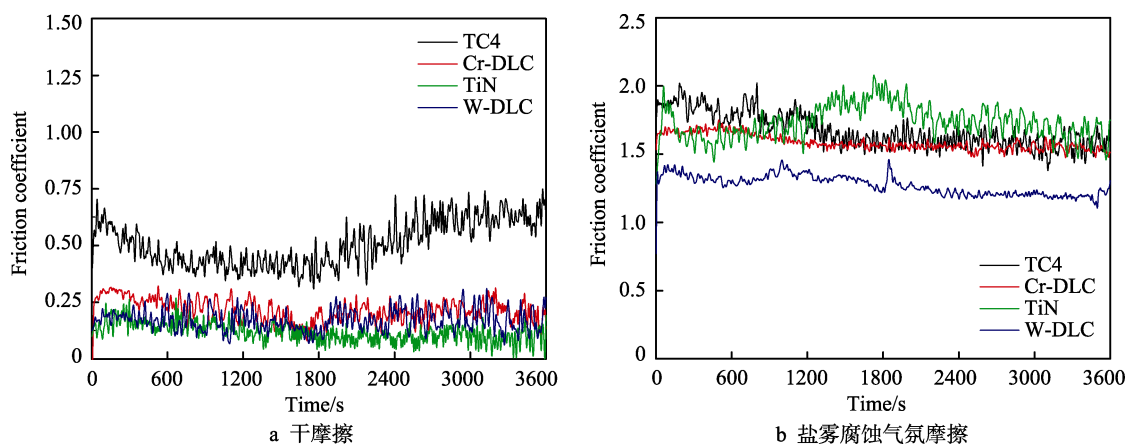


图 6 摩擦系数曲线

Fig.6 Friction coefficient curves: a) Dry friction, b) Salt spray corrosion friction

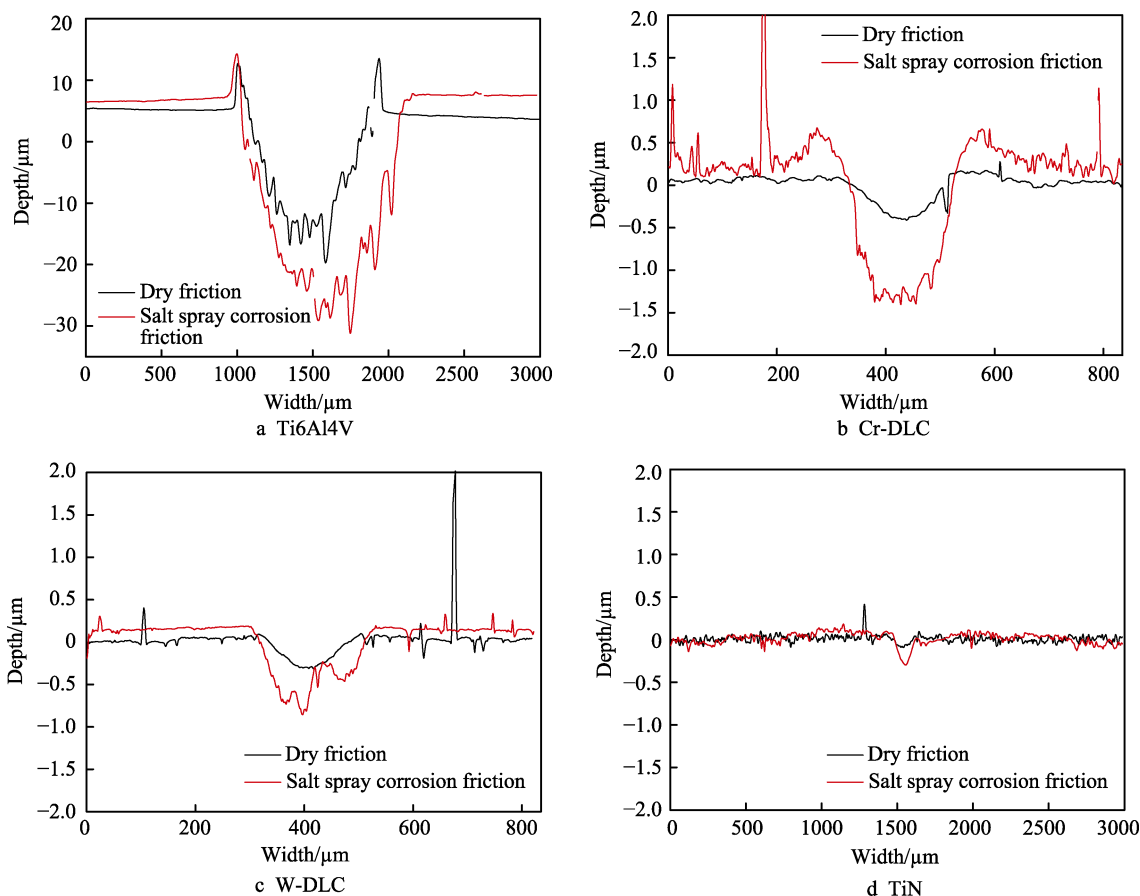


图 7 磨痕二维轮廓曲线

Fig.7 Two-dimensional profile curves of wear scar

雾腐蚀气氛下的磨损体积都比其在干摩擦条件下的磨损体积大,即盐雾腐蚀气氛下薄膜的耐磨性均比干摩擦条件下的差。

为深入分析所制备薄膜在盐雾腐蚀气氛摩擦条件下的耐磨性均比干摩擦条件下差这一现象,采用 SEM 获得了薄膜的磨痕形貌,如图 9 所示。可见在 Ti6Al4V 合金表面沉积的薄膜样品表面存在微小的孔隙,当进行盐雾腐蚀摩擦时,这些孔隙成为腐蚀介

质的通道,另外盐雾腐蚀气氛中的偶极作用与毛细管作用力增强,导致摩擦系数升高,加速了薄膜的磨损;因此,盐雾腐蚀条件下摩擦系数的增大和薄膜表面孔隙的存在共同造成了磨损体积的增大。从图 9a、b 可以看出,在盐雾气氛腐蚀摩擦条件下,元素掺杂的类金刚石薄膜均可见沟槽状磨损痕迹,这是摩擦过程中的磨屑夹杂在两对磨表面间产生的痕迹,可见盐雾气氛腐蚀摩擦条件下存在磨粒磨损和腐蚀磨损双重机

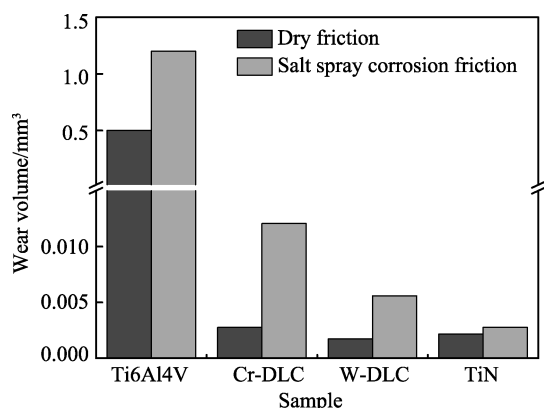
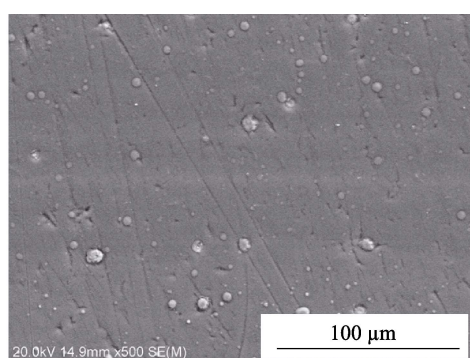
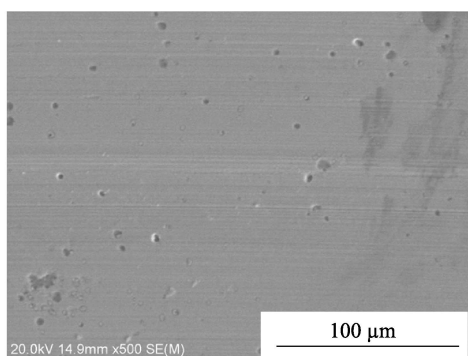


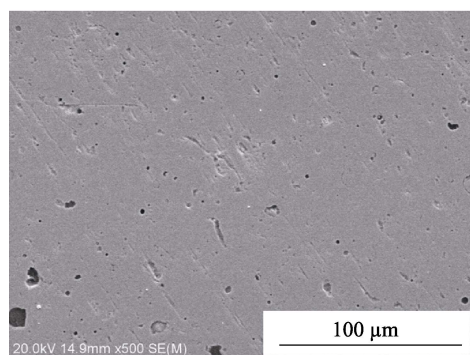
图8 样品的磨损体积
Fig.8 Wear volume of samples



a Cr-DLC



b W-DLC



c TiN

图9 薄膜盐雾腐蚀摩擦后的磨痕形貌

Fig.9 Morphology of wear scars on films under salt spray condition

制。而对于盐雾气氛腐蚀摩擦条件下的 TiN 薄膜来说, 磨痕轻微且呈光滑外观(图 9c)。这是由于超硬 TiN 薄膜的化学惰性较高, 不易与氧发生反应, 摩擦

过程中不易产生硬质氧化物颗粒, 同时 TiN 薄膜的表面硬度高, 磨屑不易被压入薄膜, 这也是其在盐雾腐蚀摩擦条件下有最高耐磨性的主要原因。但盐雾气氛对其耐磨性还是有一定的影响, 这主要与所制备 TiN 薄膜表面的微小孔隙有关。

3 结论

1) 干摩擦条件下, Cr-DLC、W-DLC 和 TiN 三种薄膜的摩擦系数均比 Ti6Al4V 合金低; 盐雾腐蚀气氛条件下, Ti6Al4V 合金及其表面制备的三种薄膜的摩擦系数均比干摩擦条件下有所增加。

2) 与 Ti6Al4V 合金相比, Cr-DLC、W-DLC 和 TiN 三种薄膜在干摩擦和盐雾腐蚀摩擦条件下均减小了磨损体积。干摩擦条件下, W-DLC 薄膜的磨损体积为 0.0017 mm^3 , 耐磨性最好; 盐雾腐蚀摩擦条件下, TiN 薄膜的磨损体积为 0.0028 mm^3 , 表现出最佳的耐腐蚀磨损性能。

3) 通过磨痕形貌观察可以得出, 盐雾腐蚀摩擦条件下, Ti6Al4V 合金表面制备的金属掺杂类金刚石薄膜的磨损受到磨粒磨损和腐蚀磨损双重机制的影响。

参考文献:

- [1] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
WEN Shi-zhu, HUANG Ping. Principles of tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [2] VLADIMIR T, VLADIMIR P, THOMAS C, et al. Surface engineering of Ti6Al4V surfaces for enhanced tribocorrosion performance in artificial seawater[J]. Materials and design, 2016, 104: 10-18.
- [3] C 莱茵斯, M 皮特尔斯. 钛与钛合金[M]. 陈振华, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005: 417-421.
LEYENS C, PETERS M. Titanium and titanium alloys[M]. CHEN Zhen-hua, translated. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 417-421.
- [4] 屠振密, 李宁, 朱永明, 等. 钛及钛合金表面处理技术的应用及发展[C]//2009 年全国电子电镀及表面处理学术交流会. 上海: [s. n.], 2009: 43-47.
TU Zhen-mi, LI Ning, ZHU Yong-ming, et al. Applications and advances on surface treatment for titanium and titanium alloy[C]//2009 year national electroplating and surface treatment symposium proceedings. Shanghai: [s. n.], 2009: 43-47.
- [5] 秦建峰, 王馨舶, 邹娇娟, 等. 热氧化提高钛及钛合金表面性能的研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(1): 1-8.
QIN Jian-feng, WANG Xin-bo, ZOU Jiao-juan, et al. Research progress of thermal oxidation effect on improving surface properties of titanium and titanium alloy[J]. Sur-

- face technology, 2017, 46(1): 1-8.
- [6] 李争显, 刘瑞斌, 华云峰, 等. 钛表面薄膜技术的应用现状及发展[J]. 钛工业进展, 2014, 31(1): 1-5.
LI Zheng-xian, LIU Rui-bin, HUA Yun-feng, et al. Progress in research of film technology for titanium alloys[J]. Titanium industry progress, 2014, 31(1): 1-5.
- [7] 刘建立, 王智, 张玉娟, 等. Ti6Al4V 合金上类金刚石膜的摩擦学性能及腐蚀行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(2): 255-258.
LIU Jian-li, WANG Zhi, ZHANG Yu-juan, et al. Tribological characterization and corrosion behavior of DLC films on Ti6Al4V alloy[J]. Rare metal materials and engineering, 2011, 40(2): 255-258.
- [8] ARSLAN E, TOTIK Y, EFEOGLU I. The investigation of the tribocorrosion properties of DLC coatings deposited on Ti6Al4V alloys by CFUBMS[J]. Progress in organic coatings, 2012, 74: 768-771.
- [9] AMANOV A, WATABE T, TSUBOI R, et al. Fretting wear and fracture behaviors of Cr-doped and non-doped DLC films deposited on Ti-6Al-4V alloy by unbalanced magnetron sputtering[J]. Tribology international, 2013, 62: 49-57.
- [10] MARTINI C, CESCHIINI L, CASADEI B, et al. Dry sliding behaviour of hydrogenated amorphous carbon (a-C: H) coatings on Ti-6Al-4V[J]. Wear, 2011, 271: 2025-2036.
- [11] LI Hong-tao, LIU Yan-jie, JIANG Bai-ling, et al. The structure and toughness of TiN coatings prepared by modulated pulsed power magnetron sputtering[J]. Vacuum, 2016, 125: 165-169.
- [12] ALI R, SEBASTIANI M, BEMPORAD E. Influence of Ti-TiN multilayer PVD-coatings design on residual stresses and adhesion[J]. Materials and design, 2015, 75: 47-56.
- [13] PROUDHON H, SAVKOVA J, BASSEVILLE S, et al. Experimental and numerical wear studies of porous reactive plasma sprayed Ti-6Al-4V/TiN composite coating[J]. Wear, 2014, 311: 159-166.
- [14] YUHAZRI M, JEEFFERIE A R, SIHOMBING H, et al. Effect of parameter controlled in TiN coating on the mild steel substrate[J]. International journal of engineering science and technology, 2011, 3(3): 2113-2117.
- [15] ANDERSSON J, ERCK R A, ERDEMIR A. Frictional behavior of diamond-like carbon films in vacuum and under varying water vapor pressure[J]. Surface & coatings technology, 2003, 163: 535-540.