

过渡层对 TC4 钛合金基类金刚石 多层薄膜磨损特性的影响

徐照英^{1,2,3*} 霍永清² 栾佰峰³ 张腾飞¹ 王锦标¹

(1. 重庆文理学院 材料科学与工程学院 重庆 402160; 2. 重庆嘉陵特种装备有限公司 重庆 400032;

3. 重庆大学 材料科学与工程学院 重庆 400044)

Effects of Interlayers on Tribological Property of Diamond-Like Carbon Multilayer Films on TC4 Titanium Alloy

XU Zhaoying^{1,2,3*}, HUO Yongqing², LUAN Baifeng³, ZHANG Tengfei¹, WANG Jinbiao¹

(1. Chongqing University of Arts and Sciences, School of Materials Science and Engineering, Chongqing 402160, China;

2. Chongqing Jialing Special Equipment Co., Ltd., Chongqing 400032, China;

3. Chongqing University, School of Materials Science and Engineering, Chongqing 400044, China)

Abstract The deposition of diamond-like (DLC) films on a titanium alloy (TC4) surface is an effective method to improve its wear resistance and service life. The soft/hard DLC multilayer film and DLC multilayer films with two different interlayers (Ti and Ti/TiC) were deposited on titanium alloys by filtered cathodic vacuum arc technology. The structure and surface morphology of the multilayer films were analyzed by using scanning electron microscopy (SEM) and optical microscope. The residual stress, hardness, adhesive force, and wear properties were evaluated using the nano-indenter, film stress tester, scratch tester, and wear test, respectively. The results show that the DLC multilayer films have lower compressive stress than the monolithic hard DLC film, and the residual stress decreased from 12.63 GPa to 6.21 GPa. The DLC multilayer film with Ti/TiC interlayer has the lowest compressive stress and the best adhesion strength. The wear resistance and hardness of the DLC multilayer film with Ti/TiC interlayer were significantly improved. The results provide technical reference and theoretical basis for the preparation and application of high-hard wear resistance DLC multilayer film on titanium alloy.

Keywords Titanium alloy, Transitional layer, Diamond-like carbon multilayer films, Residual stress, Wear resistance

摘要 在钛合金 (TC4) 表面制备类金刚石 (DLC) 薄膜是提高其耐磨损性能和使用寿命的一种有效方法。本文采用磁过滤阴极弧源技术在钛合金表面上制备软硬相间的类金刚石多层薄膜、Ti 和 Ti/TiC 过渡层组成的类金刚石多层薄膜。利用光学显微镜和扫描电镜分析多层膜表面外观形态,并使用台阶仪、纳米压痕仪、摩擦实验机等分析多层膜的残余应力、纳米硬度、膜基结合力和摩擦磨损特性。研究表明: DLC 多层薄膜的残余应力均低于单层 DLC 薄膜,残余应力从 12.63 GPa 降低到 6.21 GPa,增加 Ti/TiC 过渡层的 DLC 多层薄膜的残余应力最小。压痕结合力研究表明,加入 Ti/TiC 过渡层的 DLC 多层薄膜的结合状况得到了显著提高。Ti/TiC 过渡层构成的类金刚石多层薄膜,有较大的硬度和良好减摩耐磨性能。试验结果将为 TC4 钛合金基体上制备硬质耐磨损 DLC 多层薄膜提供技术方案和理论依据。

关键词 钛合金 过渡层 类金刚石多层薄膜 残余应力 磨损特性

中图分类号: TG115.58

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202208011

收稿日期: 2022-08-12

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目 (KJQN202001303, KJQN202101303, KJQN 202101316); 重庆市自然科学基金项目 (2023NSCQ-MSX0711, cstc2020jcyj-msxmX0069, cstc2018jcyjAX0492)

* 联系人: E-mail: 285237725@qq.com

钛合金被誉为“太空金属”、“海洋金属”和“智能金属”，是21世纪重要的战略金属材料，广泛应用于航空航天、船舶、冶金、电力、石化等工业领域的各种关键结构件的制造^[1]。钛合金被较多的应用在工业关键结构件零部件中，如用于高强度/重量比率、耐热、耐疲劳和耐腐蚀的零部件的Ti-6Al-4V(牌号:TC4)钛合金。但是，由于TC4合金的弹性模量较低、耐磨性和硬度较差，使得这种合金在摩擦方面的应用和使用寿命受到限制^[2]。钛合金在摩擦过程中表面形成的氧化钛薄膜易于剥落，同时来源于大气中的氧易于融入钛合金基体，使基体表面发生氧脆，降低了材料的力学性能，损伤了TC4合金的摩擦学性能^[3]。随着科技的飞速发展，对工业结构材料的性能要求越来越高，在钛合金表面进行镀层或涂层可以有效地提高其硬度和耐磨损性能，隔离基体和磨损腐蚀环境，从而达到磨损开裂防护的目的^[4-5]。因此，针对钛合金上述磨损问题，基于表面工程和摩擦学设计，提出有效调控钛合金表面状态、应力分布、腐蚀损伤过程等的措施，保证工业钛合金在全寿命周期内的超高可靠和安全运行。

类金刚石薄膜(diamond-like carbon, DLC)是一种包含金刚石结构(sp^3)的新型超硬非晶碳膜，它具有高硬度、高弹性模量、高导热性、良好的化学稳定性、优异的力学性能和可控的摩擦学性能。在航空航天、机械、生物医学等领域具有广阔的应用前景^[6]。在工业关键零部件材料钛合金表面制备高硬度耐磨损类金刚石薄膜是提高其耐磨损性能和使用寿命的一种有效方法^[7-8]。Ding等^[9]在TC4合金表面沉积DLC薄膜，发现DLC薄膜摩擦系数较低、抗粘着磨损能力较好，同时也提高了钛合金的耐磨性能。然而，研究发现类金刚石薄膜在钛合金表面弱结合以及高的残余应力等问题是限制该类薄膜在先进制造技术和高技术装备系统广泛应用的主要瓶颈^[10-13]。因此，有效控制并降低DLC膜中的残余应力，提高DLC膜与工业部件材料钛合金(TC4)的界面结合力，并且维持DLC膜的高机械性能、耐磨性及腐蚀性能是DLC膜的实用化面临的重要科学问题。研究发现，在钛合金基底和DLC薄膜之间引入过渡层并逐渐实现成分和性能的转变是改善DLC薄膜和基底之间的界面结合力的一般有效方法之一^[14]。Wang等^[15]通过制备Ti-TiCN-TiC-DLC的复合薄膜，研究发现这种多层Ti结构承载层具有

更好的化学连续性，增加了DLC与衬底间结合强度，同时可以减少薄膜中裂纹的产生。Duan等^[16]通过磁控溅射离子镀技术在TC4基底上获得Ti-TiC-DLC梯度涂层，研究成果显示梯度过渡层结构有效提高了与Ti6Al4V衬底的结合力，并改善了TC4合金材料的耐磨性能。因此，基于类金刚石薄膜与工业结构件钛合金材料的结合力较差的问题和工业应用的需要，提出在TC4合金上构建弹性模量、硬度等力学性能梯度变化的类金刚石多层薄膜，缓解DLC薄膜中的残余应力，实现耐磨微纳结构复合碳基多层薄膜与TC4合金的有机结合，进一步使薄膜与基体之间的结合强度和使用寿命得到改善。

随着对薄膜结构与性能关系认知的不断深入，薄膜材料的研究已经从单组元、单结构过渡到多组元、纳米化、多层梯度化、微/纳织构化、多相复合化和智能化等方向^[17-19]。Zhang等^[20-23]采用多尺度耦合强韧化设计方法，突破了软质底材表面集高硬度、高韧性与高耐腐蚀特性于一体的碳基薄膜关键制备技术，实现碳基薄膜硬度/韧性和耐腐蚀特性的统一，解决了薄膜结合强度低、脆性高及环境敏感等关键技术难题。可见，多层界面能够有效抑制微裂纹的萌生和扩展，是实现碳基薄膜强韧与耐磨损性能一体化的有效技术途径^[24]。鉴于多元复合微纳结构薄膜材料的高硬度、高韧性、高耐磨性和残余应力可控等特性，完全符合钛合金结构件对润滑材料的使用性能要求，具有非常高的研究和应用价值。为解决钛合金表面DLC薄膜中的残余应力过大和膜基结合不牢的问题，为了确保DLC膜的功能的发挥，在类金刚石多层膜和TC4合金材料之间引入Ti过渡层和Ti/TiC梯度过渡层(如下图1所示)，比较研究了无过渡层的类金刚石多层膜、具有Ti过渡层和Ti/TiC梯度过渡层的类金刚石多层膜的残余应力、纳米硬度、膜基结合力和摩擦磨损性能，期

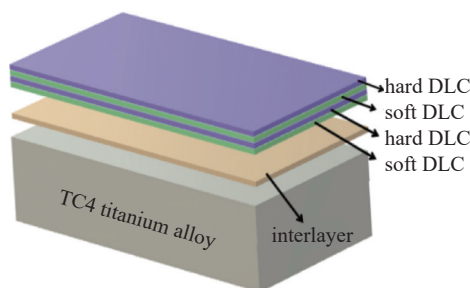


图1 多层薄膜的结构示意图

Fig. 1 The structure diagram of the multilayer film

望实现进一步的减小类金刚石多层薄膜中的残余应力和改善膜-基结合力以提高 TC4 合金基体的耐磨损性能,为软的合金材料上制备耐磨损硬质多层涂层提供技术方案和理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 样品制备

实验所用的基底材料为 TC4 合金。实验时首先将样品机械加 $\Phi 15\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 大小的圆盘,然后使用 200 #、400 #、600 #、800 #、1200 #号砂纸研磨,然后使用氧化硅悬浊液抛光至镜面。最后,分别在丙酮酸、无水乙醇和双蒸水介质中各超声洗涤二十分钟,取出用吹风机烘干后备用。在 TC4 钛合金和单晶硅片基体上直接沉积类金刚石多层薄膜作为对比样,标记为#D1;在沉积 DLC 多层膜之前,将厚度约 20 nm 的钛金属膜作为过渡层沉积在钛合金表面上,然后将 DLC 多层膜沉积在钛金属过渡层上,样品标记为#D2。在类金刚石多层膜和 TC4 合金基底之间制备了 Ti/TiC 梯度过渡层的薄膜,标记为#D3。#D1、#D2 和#D3 试样中的软硬交替类金刚石多层薄膜制备工艺相同,薄膜的总厚度约为 350 nm(多层薄膜结构如图 1 所示)。

采用高纯石墨(99.99%)作为阴极材料,用磁过滤电弧离子镀方法制备无过渡层的类金刚石多层薄膜和含有过渡层的类金刚石多层薄膜。金属钛过渡层使用的电弧电流为 55 A,直流脉冲偏压 1800 V(20 kHz 的频率,25% 占空比),沉积时间为 5 min。采用乙炔压力 0.15 Pa 制备 TiC 层,偏压为直冲 1000 V(频率为 20 kHz,占空比为 50%),电弧电流 55 A,沉积时间 5 min。通过向钛合金基板材料施加直流 80 V 负偏压来制备高硬度(高 sp^3 含量)DLC 薄膜,并向基板施加频率为 20 kHz 占空比为 50% 的脉冲直流 1000 V 负偏压来制备低硬度(低 sp^3 含量)的 DLC 薄膜。通过调整 DLC 薄膜沉积过程中施加到工件上的负偏压值的大小,制备 sp^3 键含量不同的非晶碳膜,交替沉积硬质 DLC 薄膜(高 sp^3 含量)和软 DLC 膜(低 sp^3 含量)来制备 DLC 多层金刚石薄膜^[25]。类金刚石多层膜从软 DLC 膜开始沉积,以获得良好的结构梯度和硬度。

1.2 性能测试

DLC 多层薄膜制备完成后,采用 AMBIOS XP-2 型台阶仪测量膜厚和残余应力;通过测量薄膜沉

积前后样品的等效曲率半径的变化情况,然后通过 Stoney 公式利用仪器自带的应力计算功能得到薄膜中的残余应力值^[26]。采用 CSEM 纳米硬度计测量 DLC 多层薄膜的硬度值,载荷 15 mN,加载速度 1.4 (0.292 mN/sec),最大载荷保持时间为 10 sec。为得到较好的统计数值,在多层薄膜表面分别随机取 8~10 个测试点,再取平均值做为薄膜的最终测试硬度值。采用压痕法测其膜基结合力,所用仪器型号是 HXD-1000,采用 400 g 的载荷值,最大载荷保持时间 15 s,压痕形貌通过 SEM 观察。摩擦性能测试采用往复摩擦方式,往复磨损行程为 4 mm,设备为瑞士 CSEM 摩擦磨损试验机,摩擦副为直径为 6 mm 碳化硅球珠,不添加过渡层、加入 Ti 与 Ti/TiC 过渡层而制备的 DLC 多层膜在 3N 载荷往复摩擦磨损周期为 5 万,TC4 钛合金样品在 3N 载荷下往复摩擦磨损周期为 1 万做为对比样。磨损后用台阶仪扫描磨损痕迹深度,用光学显微镜观察 DLC 多层膜的磨损痕迹形貌,分析 DLC 多层膜的磨损机理。

2 结果与讨论

2.1 残余应力

DLC 薄膜在制备过程中形成了很大的残余应力,这些残余应力使 DLC 膜与钛合金基体的结合力较差,膜层容易破碎和剥落,严重限制了 DLC 薄膜的应用^[25]。从图 2 中可以看出,单层硬 DLC 薄膜中具有最大的残余应力,制备在钛合金(TC4)上的单层硬 DLC 膜,由于具有高的残余应力而出现局部剥落和大量的裂纹^[25]。多层薄膜样#D1、#D2 和#D3 的残余应力均小于单层 DLC 薄膜中的残余应力。在引入 Ti 过渡层之后的 DLC 多层膜(样品#D2)的残余应力没有多大变化,这是因为采用在膜基之间设

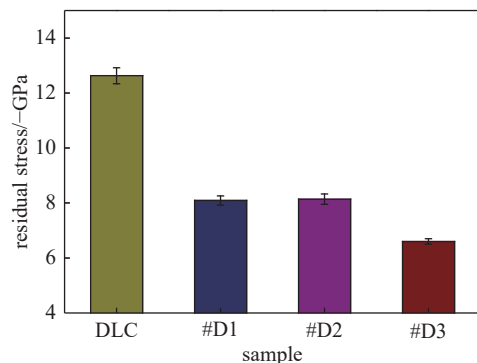


图2 不同样品的残余应力

Fig. 2 The Residual stresses of different deposited samples

计 Ti 转换层的方法, 虽然由于膜基界面之间的失配性和热膨胀系数的失配的应力得到一定的缓和, 但是 DLC 多层膜内部的固有应力不被缓和。在钛合金基底表面添加 Ti/TiC 过渡层的 DLC 多层薄膜 (样品 #D3) 的残余应力最小, 这是由于 Ti/TiC 层和软 DLC 层的引入可使硬 DLC 层产生较大的弹塑性变形, 同时 Ti/TiC 过渡层和软 DLC 层作为硬 DLC 层的缓冲层^[26], 因此 DLC 多层薄膜的残余应力得到释放。研究结果可以发现, 随着结构与成份的连续改变, Ti/TiC 梯度过层的引入可以降低 DLC 多层薄膜和 TC4 合金基体之间在硬度差、弹性模量以及热膨胀系数等上的失配, 从而减少了薄膜中的整体残余应力。

2.2 硬度测试

硬度体现了薄膜局部抗外来硬质并压入其表面的能力, 由于基材表面改质层较薄 (负荷: 15 mN), 硬度计的头部压入深度超过多层膜厚度的 5%~10%, 所以检测出的硬度值是多层膜和 TC4 钛合金基材的复合硬度。如图 3 所示, TC4 钛合金基材、未添加过渡层、增加 Ti 过渡层和 Ti/TiC 梯度过渡层的

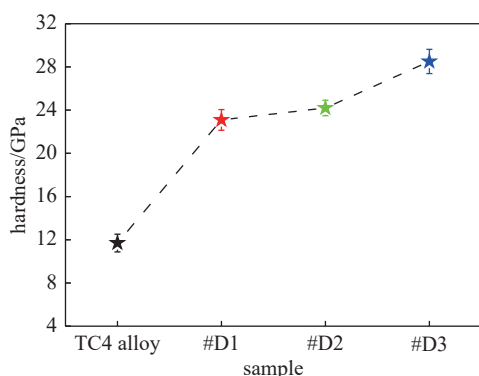


图3 不同样品的硬度值

Fig. 3 The Hardness of different deposited samples

DLC 多层膜的显微硬度值分别是 (11.7±0.82), (23.1±0.96), (24.2±0.71) 和 (28.5±1.12) GPa。从图 3 中可以看出, 经制备 DLC 多层薄膜后能够使 TC4 钛合金材料表面的硬度值得到明显的提高。在相同条件下, 与添加 Ti/TiC 转换层的膜相比, 不添加过渡层的 DLC 多层膜 (样品 #D1) 硬度相对较小。在具有 Ti/TiC 梯度过渡层的类金刚石多层薄膜 (样品 #D3) 中, TiC 薄膜本身的显微硬度高, 增加了钛合金的承载能力^[27]。因此, 具有 Ti/TiC 梯度过渡层的样品 #D3 的显微硬度明显高于没有梯度转换层的 DLC 多层薄膜样品 #D1, 达到了 28.5 GPa, 高于钛合金基底硬度的 57.89%。另一方面 Ti/TiC 过渡层增加了薄膜内部的界面数量, 对裂纹的扩展起到抑制作用^[28]。

2.3 膜-基结合力分析

从图 4(a) 的压痕 SEM 照片可以看出无过渡层的 #D1 样品在 400 g 的负载压力下在压痕边缘膜上产生局部裂纹和剥落, 这正是薄膜与钛合金基底的结合强度不牢的一种表现。相对于 Ti 过渡层的 DLC 多层薄膜样品 #D2 (图 4(b)), 压痕端部仅存在细微的裂纹, 压痕中没有明显的裂纹和剥离, 同时也表明多层膜与钛合金基底的结合力足够强大, 并且与未添加过渡层的样品相比, 膜基结合强度显著增加。Ti/TiC 梯度过渡层薄膜表现出较高的结合强度, 制备 Ti/TiC 梯度过渡层的 #D3 样品没有明显的剥离现象 (图 4(c)), 薄膜中仅出现轻微的裂纹, 显示出良好的膜基结合力。这可能是通过添加 Ti/TiC 梯度转变层来防止基体的塑性变形, 改善基体与 DLC 多层薄膜系统的力学性质的匹配, 对 DLC 多层膜起到良好的支持作用阻止了截面微裂纹萌生, 因此能够有效的抑制裂纹的产生, 防止界面的分层^[29]。研究发现这种梯度过渡 Ti/TiC 结构承载层

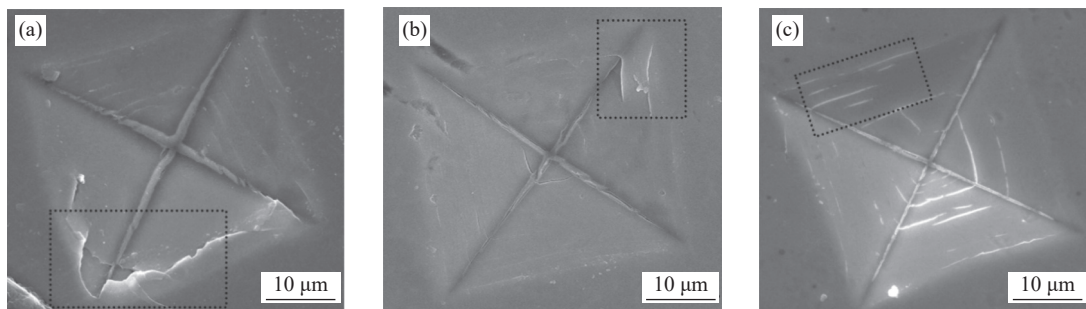


图4 不同样品的压痕 SEM 形貌图。(a) #D1, (b) #D2, (c) #D3

Fig. 4 The Vickers indentation SEM morphology of the deposited different samples. (a) #D1, (b) #D2, and (c) #D3

具有更好的化学连续性,膜基体系的承载能力和硬度值得到提高,使其由于钛合金基体形变而引发 DLC 多层薄膜剥落的临界法向载荷向大载荷移动^[27],同时减少了 DLC 多层薄膜中裂纹的产生,因此使其结合力得到提高。

根据 Vickers 压痕试验测试的结果显示,在增加 Ti 过渡层以及 Ti/TiC 过渡层后, DLC 多层薄膜的结合力均有不同程度的提高, Ti/TiC 梯度过渡层的加入,在一定程度上提高了钛合金基体对 DLC 多层薄膜的承载能力,改善了基体与薄膜体系的力学性能的匹配,使其由于钛合金基体形变而引发 DLC 多层薄膜剥落的临界法向载荷向大载荷移动,可以极大地提高膜基的附着力,充分缓解 DLC 膜与基片之间热膨胀因子失配引起的内应力,提高附着力^[30]。薄膜硬度对界面结合特性的影响十分明显,当高硬薄膜与维氏压头作用时,能够减小剪切应力,推迟或减少断裂的形成,在增加 Ti 过渡层,虽然在一定程度上降低了薄膜的残余应力,TC4 钛合金与薄膜结合力有所提高,但是由于界面层缺乏强化学键合过渡层,其膜基结合仍低于引入 Ti/TiC 过渡层后的 DLC 多层薄膜样品#D3 的结合强度。

2.4 摩擦磨损分析

本研究制备的多层薄膜与直径 6 mm 的 SiC 球进行对磨,负载 3 N,平均相对滑移速度 2.00 cm/s,往复磨损行程 4.00 mm。图 5(a) 是未沉积任何薄膜的 TC4 钛合金样品在 3N 载荷下往复摩擦磨损 1 万往复周期后的表面的磨痕形貌,从图中局部放大图可以看出,TC4 钛合金基体表面有宽而深的磨痕,磨痕深度达到 2.75 μm 。磨痕表面有一些沟槽和划痕,表明损伤是由磨粒磨损和粘着磨损共同作用造成的,这说明 TC4 钛合金样品不仅摩擦性能很差,同时还会对摩擦对偶材料造成很大的损坏。图 5(b) 是在 TC4 钛合金基底材料表面直接沉积 DLC 多层薄膜样品#D1,其磨痕形貌显示发生了严重的粘着磨损。从图 5(b) 的磨痕截面轮廓线中可以看出,磨痕深度约为 0.25 μm , DLC 多层薄膜样品的磨痕相对较窄。从图 5(b) 的局部放大磨痕形貌可以看出,磨痕表面出现局部剥落,且部分薄膜已经完全失效。这是由于在实验过程中 DLC 多层薄膜的残余应力较大和附着力较低,未加入过渡层的 DLC 薄膜由于硬度和韧性较低,裂纹在外力作用下容易形成和扩展,部分 DLC 多层薄膜在外力的作用

下逐渐被磨损破坏。这是由于在摩擦磨损过程中,黏着磨损和疲劳磨损起着主要的作^[31], DLC 多层薄膜由于与 TC4 合金基体的附着力不好,在摩擦磨损的过程未能完全起到保护基体和减摩抗磨的作用。

图 5(c) 是沉积有 Ti 过渡层的类金刚石多层薄膜样品#D2 的磨损痕迹的形态和磨损痕迹截面轮廓线,从图 5(c) 中可以看出,样品表面的磨损痕迹较浅,没有出现薄膜的断裂和剥落,磨痕的薄膜剥落处呈现暗色,说明在摩擦磨损的过程中薄膜已经被磨损了一定深度,薄膜并没有被磨穿,磨痕深度仅为 0.15 μm 。在钛合金基体上沉积了具有一定厚度的 Ti 过渡层的 DLC 多层薄膜后,使样品具有了较好的耐摩擦磨损性能。这是由于沉积 Ti 过渡层后相对提高了薄膜与基体的附着力,能有效地减小摩擦,改善钛合金基体的抗摩擦磨损性能。图 5(d) 是加入 Ti/TiC 梯度过渡层的 DLC 多层膜(样品#D3)在磨损 5 万个往复周期的磨损痕迹的形貌和磨损痕迹截面轮廓线,从图 5(d) 可以看出,在相同磨损条件下磨损痕迹非常浅且窄,磨痕中没有任何明显的犁沟、裂纹和剥落,薄膜表面光滑完整,无明显的失效特征。从局部放大图(图 5(d)) 看出在摩擦方向上仅仅具有轻微的沟痕,无裂缝和剥落迹象, Ti/TiC 梯度过渡层的引入大幅度增强了钛合金表面 DLC 多层膜的耐磨损能力。DLC 多层薄膜失效与薄膜的残余应力与附着力相关,结合图 3 和图 4 可以看出:所制备的 DLC 多层薄膜中,样品#D3 的临界载荷最高,残余应力最低,这同其相应的较高的耐磨寿命相一致^[25]。另外,这主要是由于 Ti/TiC 梯度过渡层的引入使 DLC 多层薄膜的整体成分与结构的逐渐变化,使薄膜的晶格畸变、弹性模量和硬度等性能逐渐过渡变化^[32],从而提高了 TC4 合金和多层膜的整体承载力、结合强度和耐磨损性能。因此,高的临界载荷延缓了薄膜的失效,提高了薄膜的使用寿命。

3 结论

(1) 利用磁过滤阴极弧源技术在钛合金 (TC4) 表面上成功的制备软硬相间的 DLC 多层薄膜、Ti 和 Ti/TiC 过渡层组成的类金刚石多层薄膜,且添加 Ti/TiC 过渡层的 DLC 多层薄膜的残余压应力最小。

(2) 制备 DLC 多层薄膜后使 TC4 钛合金材料

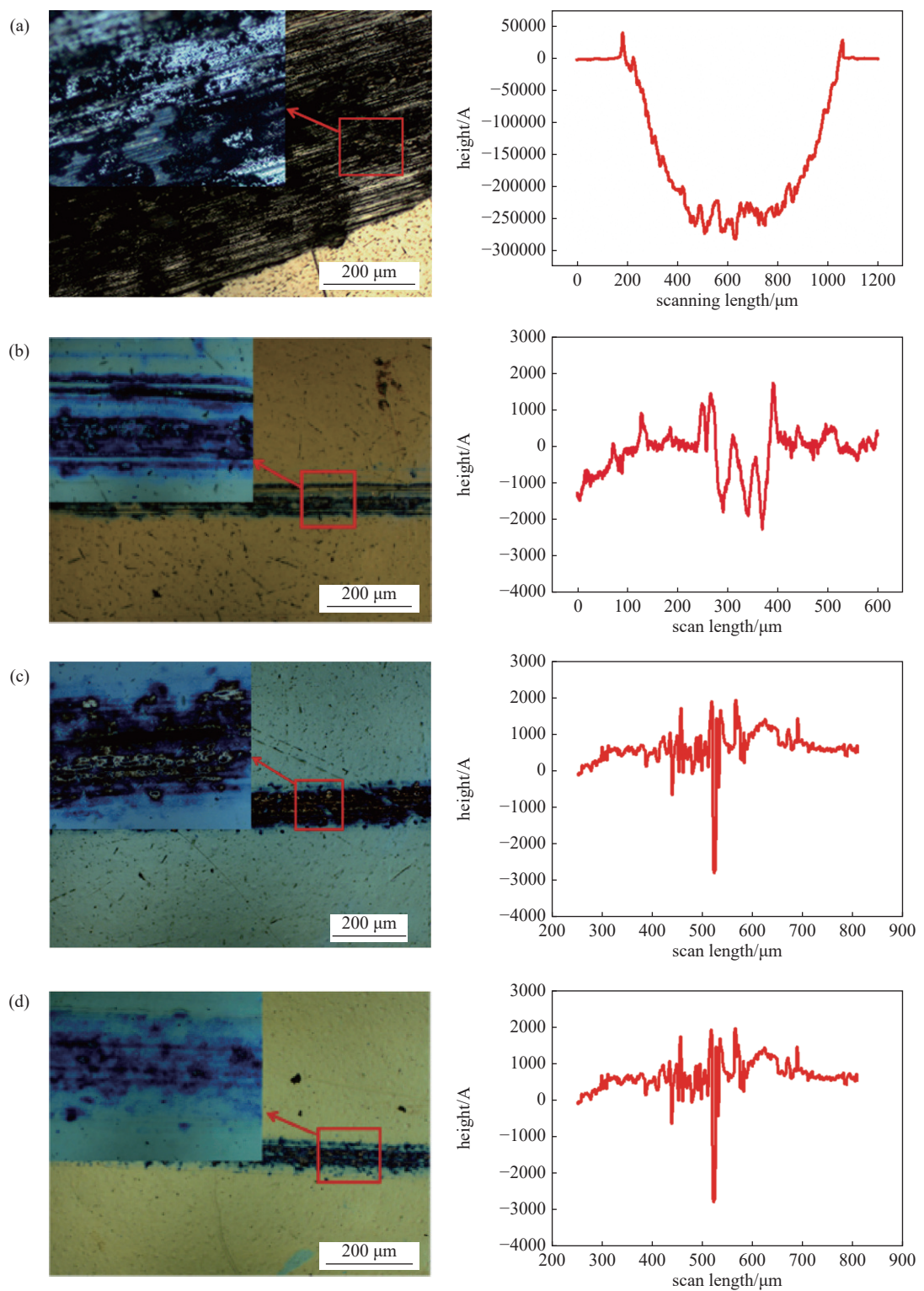


图5 磨痕形貌光学图和磨痕截面轮廓线。(a) 钛合金基底, (b) #D1, (c) #D2, (d) #D3

Fig. 5 Morphology and groove profiles of wear tracks. (a)TC4 alloy, (b) #D1, (c) #D2, and (d) #D3

表面的硬度得到明显的提高, 添加 Ti/TiC 过渡层的类金刚石多层薄膜的硬度达到 28.5 GPa。

(3) 添加 Ti/TiC 过渡层的类金刚石多层膜具有最优异的整体承载能力和膜基结合力, 其主要原因

是添加 Ti/TiC 梯度层可改善基底与 DLC 多层薄膜系统的力学性质的匹配, 对 DLC 多层膜起到良好的支持作用。

(4) 由于高硬度可以提高薄膜的抗塑性变形能

力, 高的膜基结合能力和高韧性可以提高薄膜的抗脆性破坏能力, 与没有过渡层的 DLC 多层膜相比, 加入 Ti/TiC 过渡层的 DLC 多层膜具有更高的耐磨损性能。

参 考 文 献

- [1] Wang H, Zhao K X, Chu X R, et al. Constitutive modelling and microscopic analysis of TC4 alloy sheet at elevated temperature[J]. *Results in Physics*, 2019, 13: 102–122
- [2] Ottria L, Lauritano D, Bassi M A. Mechanical, chemical and biological aspects of titanium and titanium alloys in implant dentistry[J]. *Journal of Biological Regulators and Homeostatic Agents*, 2018, 32: 81–90
- [3] Paula L O, Sene A C, Manfroi L A, et al. Tribo-Corrosion and Corrosion Behaviour of Titanium Alloys with and With DLC Films Immersed in Synthetic Urine[J]. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 2018, 4: 51–56
- [4] Ovchinnikov V, Kurbatova I, Uchevatkina N. Determination of the effect of surface treatment on the physico-mechanical properties of a titanium alloy[J]. *Materialstudy proceedings*, 2021, 38: 1405–1408
- [5] Kong C C, Guo P, Sun L L, et al. Tribological mechanism of diamond-like carbon films induced by Ti/Al co-doping[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 342: 167–177
- [6] Ferrari A C, Robertson J. Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond[J]. *Physical and Engineering Sciences*, 2004, 362(1824): 2477–2512
- [7] Xue qunji, Wang liping. Diamond-like carbon based film materials [M]. Science press, 2012 (薛群基, 王立平. 类金刚石碳基薄膜材料[M]. 科学出版社, 2012. (in chinese))
- [8] Erdemir A. Genesis of superlow friction and wear in diamondlike carbon films[J]. *Tribology International*, 2004, 37(11): 1005–1012
- [9] H. H[J]. Ding, V. Fridrici, J. Geringer, et al. Influence of diamond-like carbon coatings and roughness on fretting behaviors of Ti-6Al-4V for neck adapter-femoral stem contact[J]. *Wear*, 2018, 6: 53–67
- [10] Jacek Grabarczyk, Justyna Gaj, Bartosz Pazik, et al. Tribocorrosion behavior of Ti6Al4V alloy after thermochemical treatment and DLC deposition for biomedical applications[J]. *Tribology International*, 2021, 153: 106560
- [11] Yusei Yamada, Motoyuki Murashima, Noritsugu Ume-hara, et al. Effect of fracture properties and surface morphology on wear of DLC coatings at severe contact condition[J]. *Tribology International*, 2022, 169: 107486
- [12] Ziyuan Zhao, Pengfei Hui, Fuyuan Liu, et al. A key to tune the grain size gradient of the TiC coating on titanium by interstitial carburization: The timing for pressing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 817: 152725
- [13] Viswanathan S, Mohan L, Parthasarathi B, et al. Corrosion and wear resistance properties of multilayered diamond-like carbon nanocomposite coating[J]. *Surface and Interface Analysis*, 2018, 50: 12–16
- [14] Jones M I, McColl I R, Grant D M, et al. compatibility of DLC and TiC-TiN interlayers on titanium[J]. *Diamond and Related Materials*, 2016, 8: 457–462
- [15] Wang K L, Zhou H, Zhang K F, et al. Effects of Ti interlayer on adhesion property of DLC films: A first principle study[J]. *Diamond and Related Materials*, 2021, 111: 108188
- [16] Duan Z W, Qiao L, Chai L Q, et al. Structure, properties and growth mechanism of a self-assembled nanocylindrical MoS₂/Mo-SC composite film[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 465: 564–574
- [17] Ding H H, Fridrici V, Geringer J, et al. Influence of diamond-like carbon coatings and roughness on fretting behaviors of Ti-6Al-4V for neck adapter-femoral stem contact[J]. *Wear*, 2018, 6: 53–67
- [18] Bahi R, Nouveau C, Beliardouh N E, et al. Surface performances of Ti-6Al-4V substrates coated PVD multilayered films in biological environments[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 385: 125412
- [19] Cao H S, Ye X, Li H, et al. Microstructure, mechanical and tribological properties of multilayer Ti-DLC thick films on Al alloys by filtered cathodic vacuum arc technology[J]. *Materials & Design*, 2021, 198: 109320
- [20] Zhang D, Yi P Y, Peng L F, et al. Amorphous carbon films doped with silver and chromium to achieve ultra-low interfacial electrical resistance and long-term durability in the application of proton exchange membrane fuel cells[J]. *Carbon*, 2019, 145: 333–344
- [21] Wang Y F, Gao K X, Zhang B, et al. Structure effects of sp²-rich carbon films under super-low friction contact[J]. *Carbon*, 2018, 137: 49–56
- [22] Tao Y, Jianwei M, Zhenyuan J, et al. Microstructure, Mechanical Properties and Low-temperature Tribological Behavior of Cr/Cr-W/W-DLC/DLC Multilayer Coatings on

- 5A06 Al Alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 5: 204353
- [23] Li L, Liu L L, Li X, Guo P, Ke P, Wang A. Enhanced tribocorrosion performance of Cr/GLC multilayered films for marine protective application[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2018, 10: 13187–13198
- [24] Kashyap A, Harsha A P, Kondaiah P, et al. Study on galling behaviour of HiPIMS deposited Mo/DLC multilayer coatings at ambient and elevated temperature[J]. *Wear*, 2022, 11: 204327
- [25] Xu Z Y, Zhen Y J, Su H, et al. Numerical and experimental study of residual stress of multilayer diamond-like carbon films prepared by filtered cathodic vacuum arc deposition[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, 9: 2261–2266
- [26] Laconte J, Iker F, Jorez S, et al. Thin films stress extraction using micromachined structures and wafer curvature measurements[J]. *Microelectronic Engineering*, 2004, 76: 219–226
- [27] Xu zhaoying. The residual stress control and mechanical properties of multilayer diamond like carbon films[D]. Chengdu, Southwest Jiaotong University, 2013 (徐照英. 类金刚石(DLC)多层薄膜残余应力调控及其机械性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013(in chinese))
- [28] Matthews A, Jones R, Dowey S. Modelling the deformation behaviour of multilayer coatings[J]. *Tribology Letters*, 2001, 11(2): 103–106
- [29] Dumkum C, Grant D M, McColl I R. A multilayer approach to high adhesion diamond like carbon coatings on titanium[J]. *Diamond and Related Material*, 1997, 6: 802–806
- [30] Zhang S, Sun D, Fu Y, Du H. Thoug hening of hard nanostructural thin films: a critical review[J]. *Surface Coatings Technology*, 2005, 198(1/2/3): 2–8
- [31] Deng Shoujun, Sun neiming, Zhang yongzheng, et al. Evolution and present situation of wear mechanism[J]. *Mechanical research and application*, 2004(6): 10–11+15 (邓守军, 孙乐民, 张永振, 等. 磨损机理的变迁与现状[J]. *机械研究与应用*, 2004(6): 10–11+15(in chinese))
- [32] Lu X C, Li M, Tang X M, et al. Micromechanical properties of hydrogenated diamond-like carbon multilayers[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2006, 201: 1679–1684