

# Ti6Al4V 合金干滑动磨损过程中 摩擦层及摩擦氧化物的作用

李新星<sup>1,2,3</sup>, 施剑峰<sup>2</sup>, 王红侠<sup>1,3</sup>, 韩伯群<sup>2</sup>, 封晶<sup>1</sup>, 张冰<sup>1</sup>

(1.宿迁学院 材料科学与工程系, 江苏 宿迁 223800; 2.江苏丰东热技术有限公司, 江苏 盐城 224100; 3.宿迁学院产业技术研究院, 江苏 宿迁 223800)

**摘 要:**目的 分析 Ti6Al4V 合金在不同滑动速度下的干滑动磨损行为及磨损特征, 研究钛合金的磨损机理, 并探讨干滑动磨损过程中摩擦层及摩擦氧化物的作用。方法 采用销盘式摩擦磨损试验机, 对 Ti6Al4V 合金在不同滑动速度下进行干滑动磨损实验。采用磨损率和摩擦系数表征钛合金的磨损行为, 采用 SEM、EDS 及 XRD 分析磨损表面及摩擦层的形貌及成分, 采用数字显微硬度仪表征摩擦层的力学性能。结果 滑动速度在 0.5~4 m/s 范围内变化, Ti6Al4V 合金的磨损率发生显著变化, 尤其是在高载条件下。0.5~1.5 m/s 速度范围内, 磨损率较低, 2.68 m/s 速度下, 磨损率达到最高值, 4 m/s 速度下, 磨损率达到最低值。0.75 m/s 速度下, 粘着磨损和磨粒磨损为主要磨损机理, 氧化磨损为次要磨损机理; 2.68 m/s 和 4 m/s 速度下的磨损机理分别为剥层磨损和氧化轻微磨损。2.68 m/s 速度下的高磨损率与硬度较低的无氧化物摩擦层对应, 而 4 m/s 速度下的低磨损率与高硬度的多氧化物摩擦层对应。结论 试验条件改变, Ti6Al4V 合金的磨损行为及磨损机理发生变化。不同试验条件下的磨损行为与不同的摩擦层特征相对应, 当摩擦层中包含一定量的摩擦氧化物时, 这种陶瓷性的摩擦层具有比基体更高的硬度, 能有效保护基体, 降低磨损率。

**关键词:** 钛合金; 干滑动; 磨损行为; 磨损机理; 摩擦层; 摩擦氧化物

中图分类号: TH117 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2019)12-0233-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.12.028

## Role of Tribo-layers and Tribo-oxides in Dry Sliding Wear Process of Ti6Al4V Alloy

LI Xin-xing<sup>1,2,3</sup>, SHI Jian-feng<sup>2</sup>, WANG Hong-xia<sup>1</sup>, HAN Bo-qun<sup>2</sup>, FENG Jing<sup>1</sup>, ZHANG Bing<sup>1</sup>

(1.Department of Materials Science and Engineering, Suqian College, Suqian 223800, China;

2.Jiangsu Fengdong Thermal Technology Limited Company, Yancheng 224100, China;

3.Institute of Industrial Technology Research of Suqian College, Suqian 223800, China)

**ABSTRACT:** The work aims to analyze the dry sliding wear behavior and wear characteristics of Ti6Al4V alloy at different sliding speed and study the wear mechanisms of titanium alloy and the role of tribo-layers and tribo-oxides in dry sliding wear

收稿日期: 2019-03-05; 修订日期: 2019-05-17

Received: 2019-03-05; Revised: 2019-05-17

基金项目: 江苏省第十三批“六大人才高峰”高层次人才项目(XCL-199); 江苏省高等学校自然科学研究项目(17KJB430030); 江苏省第五期“333 工程”培养资金资助项目(BRA2019225)

Fund: Supported by High Level Talent Program of the Thirteenth Batch of "Six Talents Summit" of Jiangsu Province(XCL-199) and Natural Science Research Program of Jiangsu Higher Education Institutions (17KJB430030), and Funding Scheme for Scientific Research of "333 Project" of Jiangsu Province (BRA2019225)

作者简介: 李新星(1983—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为表面工程、摩擦磨损。邮箱: newstar1015@126.com

Biography: LI Xin-xing (1983—), Female, Doctor, Assistant professor, Research focus: surface engineering, friction and wear. E-mail: newstar1015@126.com

process. Dry sliding wear tests of Ti6Al4V alloy at different sliding speed were performed on a pin-on-disk wear tester. The wear behavior of titanium alloy was characterized by wear rate and friction coefficient. The morphology and composition of worn surfaces and tribo-layers were analyzed by scanning electron microscopy, X-ray diffraction and energy dispersive spectroscopy, and the mechanical properties of tribo-layers were characterized by digital microhardness tester. As sliding speed varied in the range of 0.5~4 m/s, the wear rates of Ti6Al4V alloy varied obviously, especially at high loads. The wear rates were lower at 0.5 m/s to 1.5 m/s, but reached the highest at 2.68 m/s, and the lowest at 4 m/s. At 0.75 m/s, adhesion and abrasive wear were the primary mechanisms, while oxidation wear was the secondary mechanism. The wear mechanisms at 2.68 m/s and 4 m/s were delamination and oxidative mild wear, respectively. Tribo-layers with no oxides and low hardness corresponded to the maximal wear rate at 2.68 m/s, while tribo-layers with more oxides and high hardness corresponded to the minimal wear rate at 4 m/s. The wear behavior and wear mechanism of Ti6Al4V alloy vary with the test conditions. The distinct characteristics of tribo-layers are found to correspond to the wear behavior in various conditions. When tribo-layer contains some quantity of tribo-oxides, such ceramic tribo-layer has higher hardness than the matrix, thus effectively protecting the matrix and reducing the wear rate.

**KEY WORDS:** titanium alloy; dry sliding; wear behavior; wear mechanism; tribo-layer; tribo-oxide

钛是 20 世纪 50 年代发展起来的一种重要的结构金属,钛合金因具有高比强度、优良的耐蚀性和耐热性、较好的韧性和焊接性等优点,而被广泛用于各个领域<sup>[1-4]</sup>。近年来,随着钛合金的进一步研究开发,其应用领域不断扩展,关于钛合金磨损性能的研究越来越受到重视。在针对钛合金磨损的有限研究中,大部分研究者,比如 Straffelini、Alam、Qiu 等<sup>[5-13]</sup>,认为钛合金的摩擦氧化物是疏松的、脆性的,因而不能起到减摩作用,这通常被认为是钛合金具有差的耐磨性能的一个关键因素。近年来,关于钛合金耐磨性能及其摩擦氧化物的作用出现了一些不同的观点。Chelliah 和 Kailas<sup>[14]</sup>指出在钛合金的干滑动磨损中,摩擦氧化物具有一定的保护作用。Wang<sup>[15-18]</sup>等研究了钛合金(Ti-6Al-4V 和 Ti-5.84Al-3.86Mo-1.57Zr-0.32Si 合金)在不同温度下的磨损行为,发现钛合金具有优异的高温耐磨性能,并指出这是由于钛合金摩擦氧化物的保护作用造成的,可见目前关于钛合金摩擦磨损的研究存在两种相互矛盾的观点。因此,钛合金的磨损行为和磨损机理需要进一步的探索和研究。

本研究采用 Ti6Al4V 合金在不同滑动速度下进行干滑动磨损试验。通过对磨损表面、剖面,尤其是摩擦层进行系统分析,研究了 Ti6Al4V 合金的磨损行为。探讨了 Ti6Al4V 合金在不同试验条件下的磨损特征和磨损机理,并对摩擦层及摩擦氧化物的作用进行了深入研究。

## 1 实验材料及方法

采用商业用 Ti6Al4V 合金作为滑动材料,加工成直径 5 mm、长度 22 mm 的销试样,端面为平面。采用商业用 GCr15 轴承钢作为对磨盘材料,加工成直径 40 mm、厚度 8 mm 的盘试样。采用 HR-150A 型洛氏硬度计测量销和盘热处理后的硬度值。Ti-6Al-4V

合金经 760 °C 保温 2 h,空冷退火处理后,硬度值为 30HRC。GCr15 钢经 850 °C 奥氏体化处理,然后油冷淬火,再在 400 °C 回火 2 h,硬度值为 50HRC。

干滑动磨损实验在 MPX-2000 型销-盘式磨损试验机上进行。磨损实验前先用金相砂纸对销及对磨盘进行打磨,并用丙酮冲洗干净。实验参数为:滑动速度 0.5~4 m/s,施加载荷 10~50 N,滑动距离 3.6 km。所有的磨损试验均在室温大气环境中进行。采用精度为 0.01 mg 的电子天平测量销试样的磨损失重。每次测量前均用丙酮对试样进行清洗并烘干。磨损率被定义为磨损失重除以钛合金的密度(4.5 g/cm<sup>3</sup>)以及滑动距离。每组试验条件至少重复 3 次试验。磨损数据来自 3 次磨损实验结果的平均值。记录磨损试验过程中摩擦系数的变化。

采用 JSM-7001F 型扫描电子显微镜观察磨损表面和摩擦层的微观形貌。采用 Inca Energy 350 型能谱分析仪、D/Max-2500/pc 型 X 射线衍射仪及 Cu K $\alpha$  射线仪,分析相关的成分和物相。采用 HVS-1000 数显维氏硬度计分析摩擦层和基体的硬度变化规律,所加载荷为 0.49 N,加载时间为 20 s。

## 2 结果与讨论

### 2.1 磨损率及摩擦系数

Ti6Al4V 合金在不同滑动条件下的磨损率如图 1 所示。在低载 10 N 条件下,不同滑动速度下的磨损率差别不大。随着载荷的增大,不同滑动速度下的磨损率均呈增加趋势,在 2.68 m/s 速度下的磨损速率最快,在 4 m/s 速度下的磨损速率最缓慢。在高载 50 N 条件下, Ti6Al4V 合金的磨损率随速度发生显著变化。在 0.5~1.5 m/s 速度范围内磨损率较低,2.68 m/s 速度下磨损率达到最高值,4 m/s 速度下磨损率达到最低值。

图 2 为 Ti6Al4V 合金在不同滑动速度下、载荷 10 N 和 50 N 时的摩擦系数。由图 2 可知,不同滑动速度下,摩擦系数均随载荷的增加而减小,这可能与磨损过程中磨屑的产生有关。随着载荷的增加,磨损率增加,磨损变得更加剧烈,产生磨屑的数量增多,某些尺寸较小的颗粒状磨屑在摩擦表面起到了“滚珠”作用,减小了摩擦系数。滑动速度为 0.75 m/s 时,摩擦系数较小;滑动速度为 2.68 m/s 时,摩擦系数显著增大,且摩擦系数的波动更加剧烈;滑动速度为 4 m/s 时,低载(10 N)条件下的摩擦系数与 2.68 m/s 时接近,而高载(50 N)条件下的摩擦系数略有降低。摩擦系数的变化,说明不同滑动速度下钛合金磨损机理发生改变。

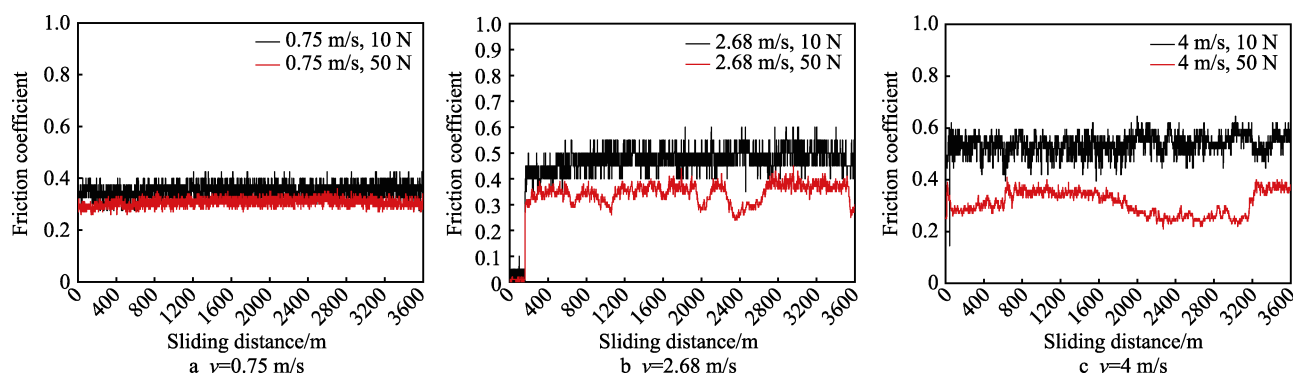


图 2 Ti6Al4V 合金在不同试验条件下的摩擦系数

Fig.2 Friction coefficient of Ti6Al4V alloy under various test conditions

## 2.2 磨损表面形貌及物相分析

图 3 给出了 Ti6Al4V 合金在不同试验条件下磨损表面的 XRD 分析结果。由图 3 可知,除了主要物相 Ti 之外,不同滑动速度下磨损表面均含有一定量的摩擦氧化物。在 0.75 m/s 速度下,磨损表面出现了少量的 TiO 和 TiO<sub>2</sub>。不同载荷下,氧化物数量基本保持不变。滑动速度为 2.68 m/s 时, TiO 和 TiO<sub>2</sub> 的衍射峰依然存在,但强度较 0.75 m/s 速度下更弱,说明此时磨损表面仅存在极少量摩擦氧化物。在 4 m/s 速度下,载荷为 10 N 时,磨损表面氧化物含量依然较低,随着载荷增加至 50 N,氧化物含量显著增加,除了 TiO 和 TiO<sub>2</sub>,还出现了少量的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。

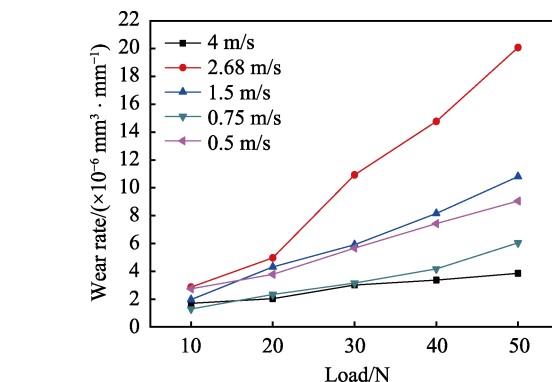


图 1 Ti6Al4V 合金在不同试验条件下的磨损率

Fig.1 Wear rates of Ti6Al4V alloy under various test conditions

Ti6Al4V 合金在不同试验条件下的磨损表面微观形貌及 EDS 分析结果如图 4 所示。在 0.75 m/s 速度下,磨损表面可以观察到清晰的粘着痕迹和沿着滑动方向的犁沟,这是典型的粘着磨损和磨粒磨损机理,此时磨损表面含氧量较低,说明氧化磨损并不是主要的磨损机理。2.68 m/s 及 4 m/s 速度下,磨损表面均呈现出剥层的形貌特征。对 2.68 m/s 及 4 m/s、载荷 50 N 条件下剥落区域进行 EDS 分析(图 4d 和图 4f 嵌入部分),结果表明,两个速度下磨损表面的剥层本质并不相同。在 2.68 m/s 速度下,载荷 50 N 时,剥落区域不含氧,说明 XRD 分析结果中显示的少量氧化物主要存在于磨损表面的最表层,因此该速

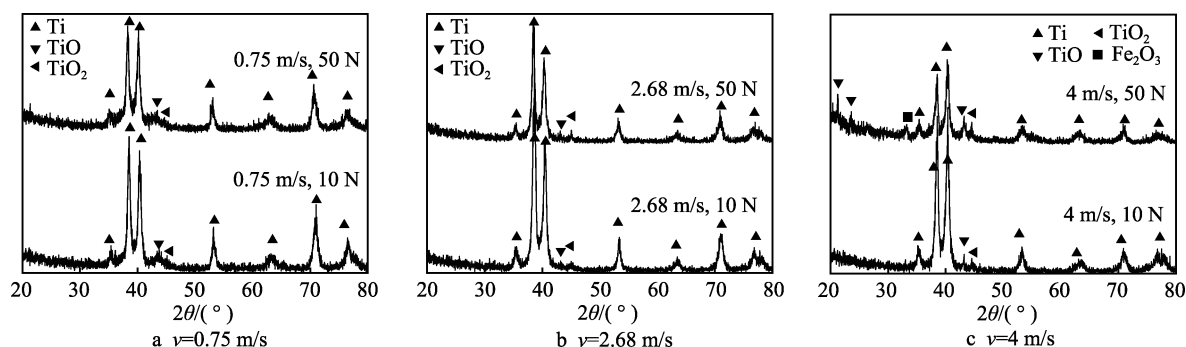


图 3 Ti6Al4V 合金在不同试验条件下磨损表面的 XRD 分析结果

Fig.3 XRD analysis results of worn surfaces of Ti6Al4V alloy under various test conditions



度下的剥层主要为金属性质的剥层, 磨损机制属于剥层磨损, 磨损率较高。而在 4 m/s 速度下, 载荷 50 N 时, 剥落区域具有较高的含氧量, 这与图 3 中的 XRD 分析结果相一致。说明此时磨损表面一定深度范围内均存在较多的氧化物, 磨损表面的剥层实际上是摩擦

氧化层的剥落, 此时磨损率很低, 磨损率随载荷的增加只是略有增加。根据 Wang 等的研究, 这是典型的氧化轻微磨损特征<sup>[18]</sup>。无论是 2.68 m/s 还是 4 m/s 的剥层, 在磨损过程中, 均体现为摩擦层的剥落和形成交替进行, 因此摩擦系数波动较为剧烈。

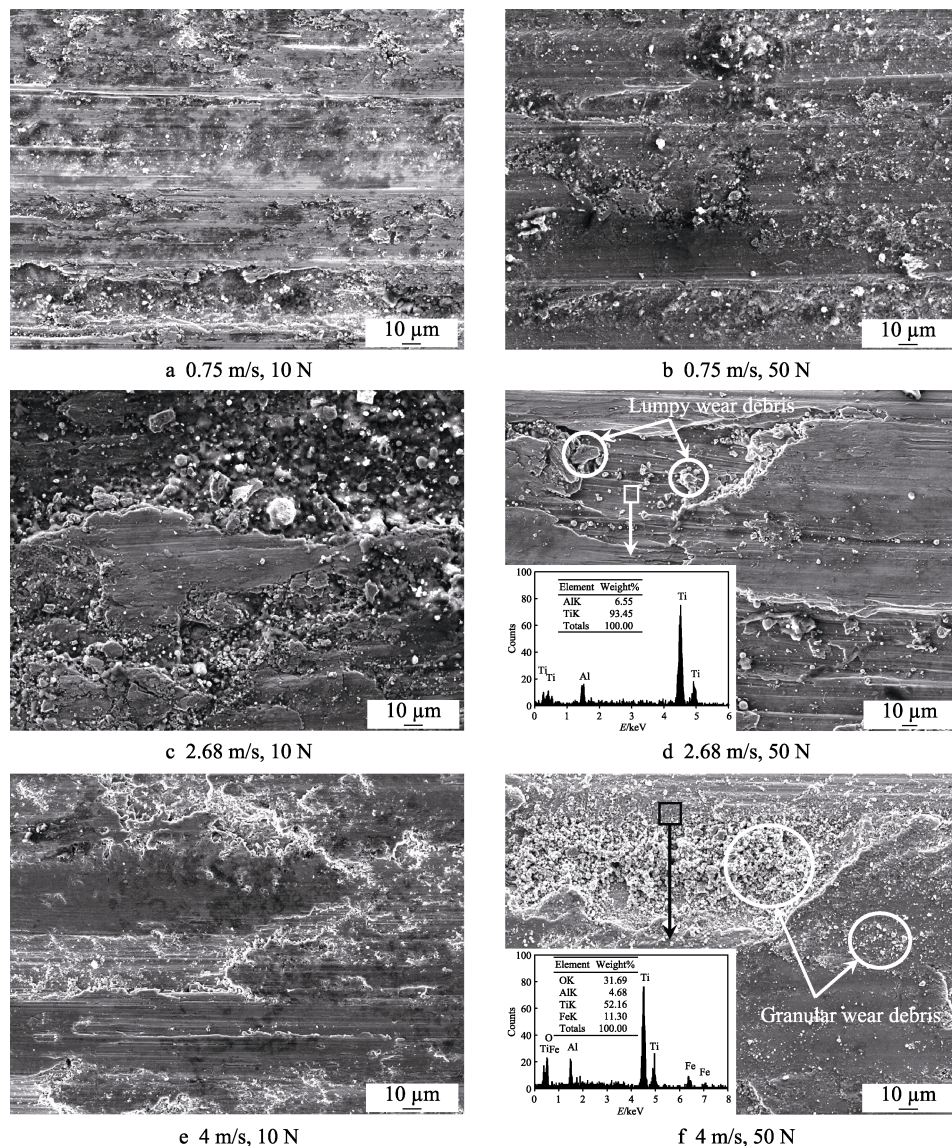


图 4 不同试验条件下 Ti6Al4V 合金磨损表面微观形貌及 EDS 分析结果

Fig.4 Micro-morphology and EDS analysis of worn surfaces for Ti6Al4V alloy under various test conditions

## 2.3 磨损剖面分析

图 5 给出了不同试验条件下 Ti6Al4V 合金的磨损剖面微观形貌及其线扫描分析结果。由图 5 可见, 不同试验条件下磨损表面总是存在一层不同于基体的摩擦层。由线扫描分析结果可知, 摩擦层在 0.75 m/s 速度下含有少量氧化物, 在 2.68 m/s 速度下几乎不含氧化物, 在 4 m/s 速度下含有较多氧化物, 这与前面的 XRD 和 EDS 分析结果保持一致。在 0.75 m/s 速度下, 滑动速度较低, 摩擦热效应小, 形成的摩擦氧化物数量较少, 此时的磨损机理主要为粘着磨损和磨粒

磨损。随着滑动速度增加至 2.68 m/s, 摩擦热效应增大, 亚表层基体热软化, 该速度下磨损机理转变为剥层磨损, 形成的磨屑为较大尺寸的块状磨屑 (图 4d)。一方面, 大尺寸磨屑活性低, 不容易被氧化; 另一方面, 大尺寸磨屑受到的离心力 ( $F=mv^2/r$ ) 作用更大, 在磨损过程中更容易逸出摩擦系统, 导致该速度下摩擦层较薄且几乎不含氧。4 m/s 速度下, 摩擦热效应进一步增大, 此时可能不仅是磨屑发生氧化形成摩擦氧化物, 甚至磨损表面也可能直接氧化形成摩擦氧化物<sup>[9]</sup>。因此, 该速度下磨损表面及摩擦层内部均出现较多氧化物。摩擦氧化物由于脆性大, 在磨损过程中



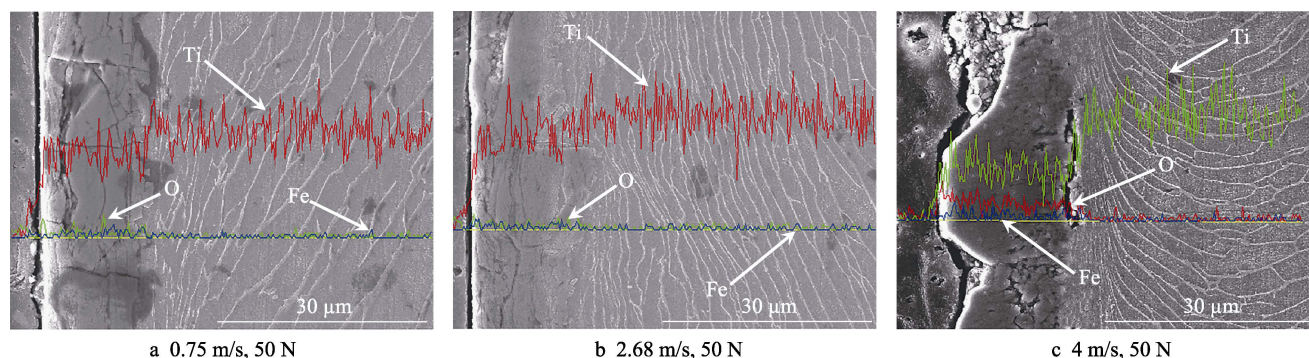


图 5 Ti6Al4V 合金在不同试验条件下磨损剖面形貌和线扫描分析结果  
Fig.5 Micro-morphology and energy dispersive line scanning analysis of worn cross-sections of Ti6Al4V alloy under various test conditions

很容易碎化形成小颗粒状磨屑 (图 4f)。

摩擦层的特性对 Ti6Al4V 合金的磨损行为和磨损机理产生重要影响。4 m/s 速度下, 摩擦层最厚, 厚度可达 20  $\mu\text{m}$  以上, 含氧最高; 而 2.68 m/s 速度下, 摩擦层较薄, 厚度只有 10  $\mu\text{m}$  作用, 且几乎不含氧; 0.75 m/s 速度下, 摩擦层厚度及含氧量均介于两者之间。较厚的含有一定量摩擦氧化物的摩擦层具有低的热传导系数和高的承载能力, 降低了亚表层基体的温度, 并能阻碍力向亚表层基体传递。因此, 4 m/s 速度下亚表层塑性变形程度相对较轻。可见, 4 m/s 速度下摩擦层能够有效保护亚表层基体金属, 从而降低涂层的磨损率。

图 6 为 Ti6Al4V 合金磨损剖面的显微硬度变化曲线, 可以看出, Ti6Al4V 合金基体的硬度在 330HV 左右。在不同速度下滑动后, 磨损剖面的显微硬度发生显著变化, 尤其是最表层的显微硬度, 而基体硬度保持最初硬度值不变。不同滑动速度下, 磨损剖面硬度均由表及里呈阶梯形变化趋势, 最表层硬度值最高, 然后逐渐下降到基体最初硬度值。滑动速度改变, 最表层硬度值发生变化, 0.75 m/s 速度下最表层硬度为 512HV, 4 m/s 时最表层硬度值约为 874HV, 而 2.68 m/s 速度下最表层硬度值只有 388HV, 几乎接近基体硬度值。由图 7 给出的 Ti6Al4V 合金磨损剖面的

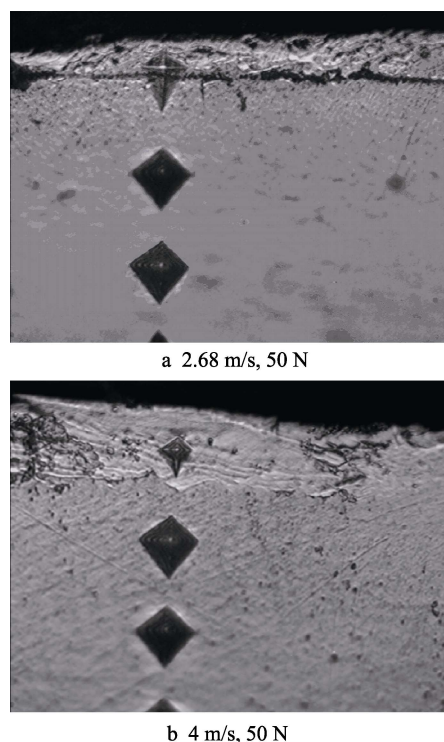


图 7 Ti6Al4V 合金磨损剖面的显微硬度压痕  
Fig.7 Microhardness impression of worn cross-sections of Ti6Al4V alloy under various test conditions

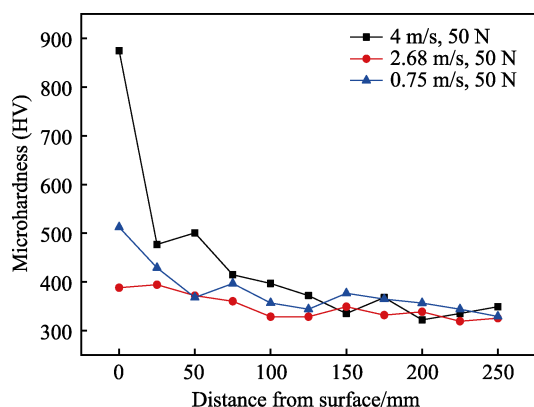


图 6 Ti6Al4V 合金磨损剖面的显微硬度变化曲线  
Fig.6 Microhardness distribution curves of worn cross-sections of Ti6Al4V alloy

显微硬度压痕图可知, 最表层硬度值主要来自摩擦层的硬度值, 因而主要取决于摩擦层的特性, 可以近似认为是摩擦层的硬度。2.68 m/s 速度下最表层硬度值低的原因主要有以下两个方面: (1) 该速度下摩擦层比较薄, 因而所测量的硬度值部分来自于基体的硬度 (图 7a); (2) 由于摩擦层中不含有摩擦氧化物 (图 5b), 因而硬度与塑性变形基体区域的硬度相似。

## 2.4 摩擦层及摩擦氧化物的作用

由上述分析可知, 不同试验条件下磨损表面都能形成一层不同于基体的摩擦层。在干滑动磨损过程中, 摩擦和磨损主要发生在销-盘之间的接触界面处, 所以必然会发生摩擦层的剥落。摩擦层在磨损过程中经历“形成—剥落—再形成—再剥落”的动态变化过



程。很容易理解,在滑动的初始阶段,一些或大或小的碎片由于粘着或剥层从磨损表面剥落形成磨屑,一部分磨屑将在离心力作用下逸出摩擦系统,剩余磨屑则滞留在磨损表面,进一步碎化、氧化、聚集、烧结形成摩擦层,部分硬度高的磨屑还会起到磨粒作用,产生磨粒磨损。随着磨损的持续进行,摩擦层内部萌生裂纹,裂纹不断扩展,最终摩擦层发生剥落,如图

8所示。摩擦层剥落后将产生新的磨屑,对摩擦层进行修补,或形成新的摩擦层。摩擦层对磨损率的影响可以分为以下三种情况:(1)摩擦层的形成速率>剥落速率,可以发挥减摩作用,磨损率较低;(2)摩擦层的形成速率=剥落速率,对磨损率无影响;(3)摩擦层的形成速率<剥落速率,起不到减摩作用,磨损率较高。

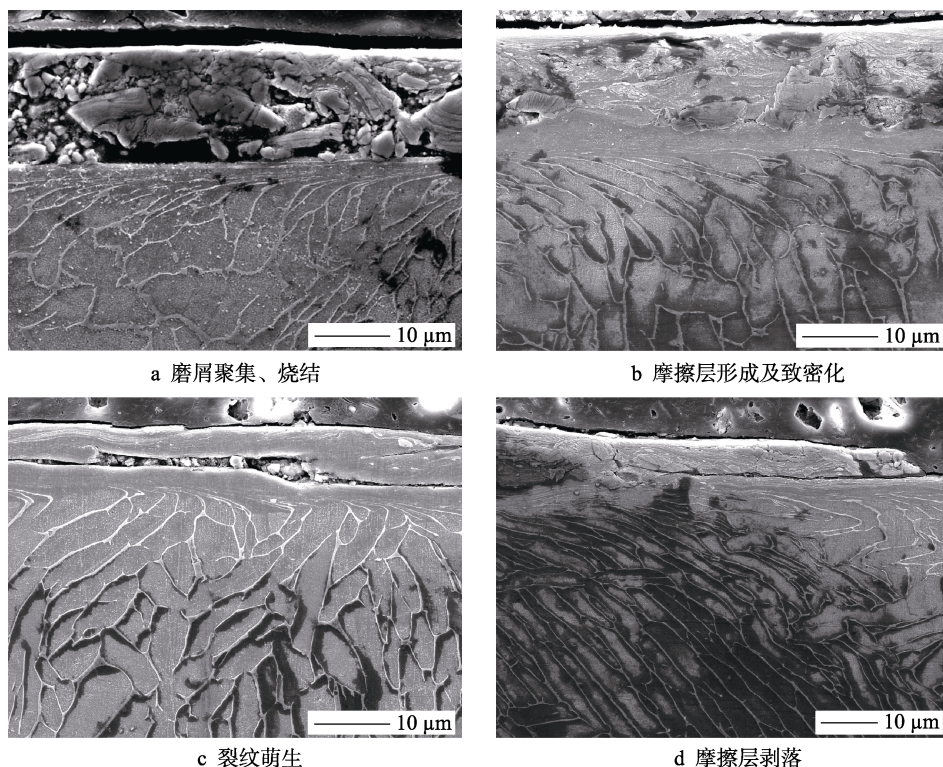


图8 Ti6Al4V合金摩擦层的动态变化过程  
Fig.8 Dynamic changes of tribo-layer for Ti6Al4V alloy

摩擦层能否发挥减摩作用取决于摩擦层性能特征,比如力学性能、致密度以及与基体的结合力等。摩擦层的性能对Ti6Al4V合金的磨损行为和磨损机理产生重要影响,可以通过硬度测试来近似地表征这些性能。经不同滑动速度下滑动后,磨损表面摩擦层的硬度值均有不同程度的升高。本研究中,4 m/s速度下高的摩擦层硬度和2.68 m/s速度下低的摩擦层硬度恰好分别与最低和最高的磨损率相对应。很容易理解,在金属的干滑动过程中,高硬度的具有陶瓷性的摩擦层,其性能优于金属基体,将对亚表层金属起到保护作用。反之,如果摩擦层具有与基体合金相似的性能,则不能对亚表层金属起到保护作用。在2.68 m/s速度下,低硬度的金属性质的摩擦层在磨损过程中剥落速率>生成速率,导致高的磨损率;在4 m/s速度下,较多的摩擦氧化物的存在,使得摩擦层具有较高的硬度,在磨损过程中剥落速率<生成速率,磨损率大幅度降低;0.75 m/s时,少量的摩擦氧化物使摩擦层硬度略有提高,同样能够发挥一定的减摩作用。

过去通常认为钛合金表面的摩擦氧化物具有不

理想的Pilling-Bedworth比率,且与基体的热膨胀系数差异较大,因而疏松多孔、容易剥落,不能起到保护作用<sup>[9]</sup>。但绝大多数情况下,钛合金磨损表面形成的摩擦层并不是单纯的摩擦氧化物层,而是含有摩擦氧化物的机械混合层。摩擦氧化物是磨损过程中金属和大气环境中的氧的反应产物,而摩擦层通常由摩擦氧化物和磨屑组成。摩擦层和摩擦氧化物是两个完全不同的概念。显然,摩擦氧化物通过摩擦层对磨损行为发挥作用。当摩擦层中含有一定数量的摩擦氧化物时,则具有不同于基体材料的优异性能(某种陶瓷性)。无论滑动条件如何,磨损表面总能形成摩擦层,但摩擦层中是否含有摩擦氧化物及摩擦层中摩擦氧化物的含量取决于滑动条件。只要摩擦层中包含摩擦氧化物,即使是少量,这种陶瓷性的摩擦层具有比基体更高的硬度,则能起到一定的减摩作用。

### 3 结论

1)随着滑动速度从0.5 m/s增加到4 m/s, Ti6Al4V合金磨损率发生显著变化,尤其是在高载条件下。磨

损率在 0.5~1.5 m/s 滑动速度下较低, 在 2.68 m/s 滑动速度下达到最高值, 在 4 m/s 滑动速度下达到最低值。

2) 0.75 m/s 速度下, 粘着磨损和磨粒磨损为主要磨损机理, 氧化磨损为次要磨损机理; 2.68 m/s 和 4 m/s 时的磨损机理分别为剥层磨损和氧化轻微磨损; 2.68 m/s 速度下的高磨损率对应于低硬度的无氧化物摩擦层; 而 4 m/s 速度下的低磨损率与高硬度的多氧化物摩擦层对应。

3) 不同滑动速度下 Ti6Al4V 合金磨损表面形成具有不同特性的摩擦层, 摩擦氧化物通过摩擦层对磨损行为发挥作用。当摩擦层中包含一定量的摩擦氧化物时, 这种陶瓷性的摩擦层具有比基体更高的硬度, 能有效保护基体, 降低磨损率。

#### 参考文献:

- [1] 黄张洪, 曲恒磊, 邓超, 等. 航空用钛及钛合金的发展及应用[J]. 材料导报, 2011, 25(1): 102-107.  
HUANG Zhang-hong, QU Heng-lei, DENG Chao, et al. Development and application of aerial titanium and its alloys[J]. Materials review, 2011, 25(1): 102-107.
- [2] 张秋阳, 丁红燕, 周广宏, 等.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  在钛合金干滑动磨损及摩擦层形成中的作用[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(1): 159-164.  
ZHANG Qiu-yang, DING Hong-yan, ZHOU Guang-hong, et al. Role of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  in dry sliding wear of a titanium alloy and formation of tribo-layers[J]. Rare metal materials and engineering, 2019, 48(1): 159-164.
- [3] 朱玉琴, 苏艳, 舒畅, 等. TC18 钛合金在海洋大气环境中的腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(3): 35-38.  
ZHU Yu-qin, SU Yan, SHU Chang, et al. Corrosion behaviors of TC18 titanium alloy in marine atmosphere environments[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(3): 35-38.
- [4] LI J, YU Z S, WANG H P, et al. Microstructural characterization of titanium matrix composite coatings reinforced by in situ synthesized TiB+TiC fabricated on Ti6Al4V by laser cladding[J]. Rare metals, 2010, 29(5): 465-472.
- [5] MOLINARI A, STRAFFELINI G, TESI B, et al. Effects of load and sliding speed on the tribological behaviour of Ti6Al4V plasma nitrided different temperatures[J]. Wear, 1997, 203: 447-454.
- [6] STRAFFELINI G, TRABUCCO D, MOLINARI A. Oxidative wear of heat-treated steels[J]. Wear, 2001, 250(1): 485-491.
- [7] MOLINARI A, STRAFFELINI G, TESI B, et al. Dry sliding wear mechanisms of the Ti6Al4V alloy[J]. Wear, 1997, 208(1): 105-112.
- [8] STRAFFELINI G, MOLINARI A. Dry sliding wear of Ti-6Al-4V alloy as influenced by the counterface and sliding conditions [J]. Wear, 1999, 236(1): 328-338.
- [9] STRAFFELINI G, MOLINARI A. Mild sliding wear of Fe-0.2%C, Ti-6%Al-4%V and Al-7072: A comparative study [J]. Tribology letters, 2011, 41(1): 227-238.
- [10] ALAM M O, HASEEB A. Response of Ti-6Al-4V and Ti-24Al-11Nb alloys to dry sliding wear against hardened steel [J]. Tribology international, 2002, 35(6): 357-362.
- [11] QIU M, ZHANG Y Z, ZHU J, et al. Correlation between the characteristics of the thermo-mechanical mixed layer and wear behaviour of Ti-6Al-4V alloy[J]. Tribology letters, 2006, 22(3): 227-231.
- [12] QIU M, ZHANG Y Z, YANG J H, et al. Microstructure and tribological characteristics of Ti-6Al-4V alloy against GCr15 under high speed and dry sliding[J]. Materials science and engineering: A, 2006, 434(1): 71-75.
- [13] 邱明, 张永振, 杨建恒, 等. 摩擦热对 Ti6Al4V 合金摩擦磨损性能的影响 [J]. 摩擦学学报, 2006, 26(3): 203-206.  
QIU M, ZHANG Y Z, YANG J H, et al. Effects of friction heat on tribological properties of Ti6Al4V alloy sliding against GCr15 steel[J]. Tribology, 2006, 26(3): 203-206.
- [14] CHELLIAH N, KAILAS S V. Synergy between tribo-oxidation and strain rate response on governing the dry sliding wear behavior of titanium[J]. Wear, 2009, 266(7): 704-712.
- [15] MAO Y S, WANG L, CHEN K M, et al. Tribo-layer and its role in dry sliding wear of Ti-6Al-4V alloy[J]. Wear, 2013, 297(1): 1032-1039.
- [16] CUI X H, MAO Y S, WEI M X, et al. Wear characteristics of Ti-6Al-4V alloy at 20~400 °C[J]. Tribology transactions, 2012, 55(2): 185-190.
- [17] WANG L, ZHANG Q Y, LI X X, et al. Severe-to-mild wear transition of titanium alloys as a function of temperature[J]. Tribology letters, 2014, 53(3): 511-520.
- [18] WANG L, ZHANG Q Y, LI X X, et al. Dry sliding wear behavior of Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si alloy[J]. metallurgical and materials transactions A, 2014, 45(4): 2284-2296.