

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.04.009

类金刚石薄膜改性钛合金的扭动摩擦磨损特性*

许林敏^{a,b}, 张德坤^b, 陈凯^b, 杨雪晖^b, 王庆良^b, 亓健伟^b

(中国矿业大学 a. 机电学院, b. 材料学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 以Ti6Al4V合金、类金刚石薄膜(DLC膜)改性Ti6Al4V合金分别与超高分子量聚乙烯(UHMWPE)配副, 模拟颈椎间盘的轴向旋转运动, 并在改装后的多自由度磨损试验机上进行扭动摩擦试验。结果表明: 随着循环周次的增加, 两对摩擦副均呈现出摩擦扭转力矩、摩擦耗散能、磨损量相应增大的趋势。与Ti6Al4V合金相比, DLC薄膜改性后的Ti6Al4V合金摩擦副接触界面间摩擦扭转力矩降低了51.6%、摩擦耗散能降低了48%, 进入完全滑移状态的时间缩短, 具有更好的耐磨性。Ti6Al4V合金的磨损机制表现为严重的磨粒磨损, 经DLC薄膜改性后的钛合金的磨损形式以应力集中产生的脆性剥落为主。DLC薄膜增大了对磨副UHMWPE的磨损, UHMWPE的磨损机制是粘着磨损和磨粒磨损综合作用的结果。

关键词: Ti6Al4V合金; DLC薄膜; 扭动; 磨损机理

中图分类号: TG174.44; TH117.1

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2016)04-0068-07

Torsional Friction and Wear Characteristics of Ti6Al4V Alloy Modified by DLC Film

XU Lin-min^{a,b}, ZHANG De-kun^b, CHEN Kai^b, YANG Xue-hui^b, WANG Qing-liang^b, QI Jian-wei^b

(a. School of Mechatronic Engineering, b. School of Materials Science and Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu)

Abstract: The Ti6Al4V alloy and Ti6Al4V alloy modified by diamond-like carbon (DLC) film were matched with ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) to simulate the axial rotating movement of cervical discs. The torsional friction experiments were conducted on the modified multi degree of freedom material abrasion tester. The results show that the friction rotating torque, friction dissipated energy and wear loss of the two friction pairs shows the increasing trend with the increasing of cycle number. Comparing with Ti6Al4V alloy, the friction rotating torque decreased by 51.6% and the frictional dissipated energy decreased by 48% on the friction pair contact interface of the Ti6Al4V alloy modified by DLC film. Besides, the time of entering the complete slip state is shortened and the wear resistance is improved. The wear mechanism of Ti6Al4V alloy presents the serious abrasive wear, while the Ti6Al4V alloy modified by DLC film shows the brittle spalling generated by stress concentration. However, DLC film increases the wear of the UHMWPE. The wear mechanism of the UHMWPE is the combined effect of adhesive wear and abrasive wear.

Keywords: Ti6Al4V alloy; DLC film; torsion; wear mechanism

0 引言

钛合金因其优越的生物相容性、耐磨耐蚀性及抗疲劳性能, 且弹性模量与人皮质骨更接近, 而被广泛的用作医用植入材料^[1-3], 但是临床上发现钛合金耐磨性较差, 产生的磨屑易导致人工关

节发生无菌松动, 为提高钛合金的耐磨性, 延长其使用寿命, 研究者们采用了离子注入、热氧化、激光熔覆及磁控溅射等方法对其表面进行改性处理, 均取得了较理想的效果^[4-6], 在生物摩擦学领域, 大部分学者对钛合金的滑动、滚动及滚

收稿日期: 2016-03-25; 修回日期: 2016-05-10; 基金项目: *国家自然科学基金(51275514); 江苏省自然科学基金(BK20130200); 中国博士后科学基金(2015M580487)

通讯作者: 张德坤(1971—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 摩擦学; Tel: (0516) 83591 872; E-mail: dkzhang@cumt.edu.cn

网络出版日期: 2016-07-21 12:00; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20160721.1200.020.html>

引文格式: 许林敏, 张德坤, 陈凯, 等. 类金刚石薄膜改性钛合金的扭动摩擦磨损特性[J]. 中国表面工程, 2016, 29(4): 68-74. XU L M, ZHANG D K, CHEN K, et al. Torsional friction and wear characteristics of Ti6Al4V alloy modified by DLC film[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(4): 68-74.

滑运动摩擦学特性进行了深入的研究, 而对于轴向扭转运动摩擦特性的研究, 目前主要集中在理论研究和模拟阶段, 相应的模拟试验开展的较少, 林修洲^[7]研制了恒温扭动腐蚀磨损试验装置, 模拟了恒温液体介质中的扭动微动腐蚀过程, 针对小尺度的扭动微动腐蚀行为及磨损机理开展了研究。K.L. Johnson^[8]通过研究得出了扭转加载条件下圆形、椭圆域的应力分布特征。文中采用扭动摩擦形式模拟颈椎间盘的轴向扭转运动, 在小牛血清润滑、循环周次为21 600条件下, 研究不同配副条件下扭动摩擦的 T - θ 曲线、摩擦扭转力矩、摩擦耗散能及磨损量的变化规律, 用扫描电镜分析磨痕和磨屑的微观(SEM)形貌, 得出不同配副条件下的扭动磨损机制。

1 试验部分

文中简化颈椎间盘中髓核与终板的接触模型为球-窝接触, 仅讨论髓核球冠与上终板之间的接

触特征与轴向扭动生物摩擦学行为。试验采用目前人工关节最常用的人体植入材料超高分子量聚乙烯(UHMWPE)球冠代替颈椎间盘中的髓核, 原料选用UHMWPE粉末, 分子量为 9×10^6 。文中所有UHMWPE试样均采用真空高温烧结炉(2T-40-20YB)在高温下热压成型, 如图1(a)所示。下试样终板选择Ti6Al4V合金和DLC薄膜改性后的Ti6Al4V合金, Ti6Al4V合金具备良好的力学性能, 与人体的骨骼的密度、刚度和柔韧度具有较高的相似性, 其化学成分、力学性能分别如表1、表2所示; 将其机械加工成圆柱形带窝试样, 对球窝表面进行多次抛光, 直至平均表面粗糙度 Ra 达到 $0.03\sim0.04\text{ }\mu\text{m}$, 加工完成后的试样为较薄的圆柱体, 圆柱体下表面为平面, 上表面中心处呈窝状, 如图1(a)所示; 经DLC薄膜改性后的下试样颜色变暗, 如图1(b)所示。上下试样的尺寸及接触形式如图1(c)所示, 图中尺寸标注单位为mm。

以DLC薄膜改性后的Ti6Al4V合金和未改性的

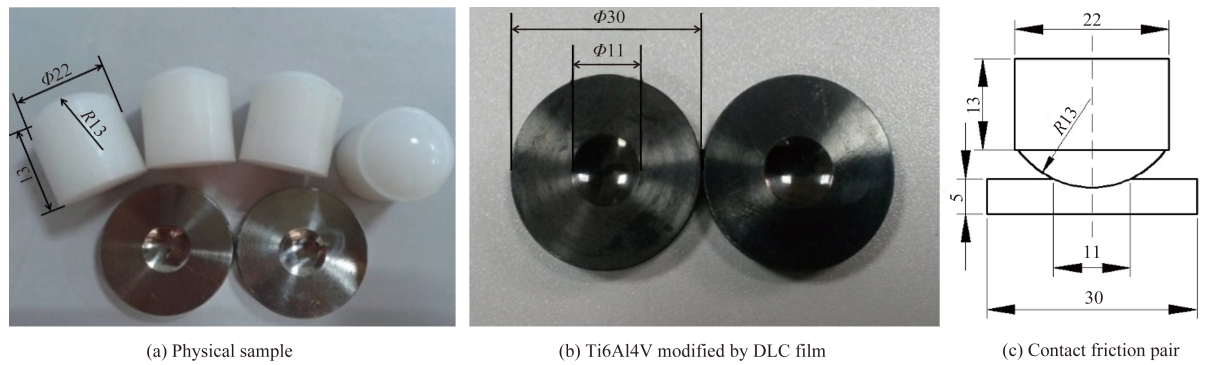


图1 试样形状及接触示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the sample shape and contact form (Unit: mm)

表 1 Ti6Al4V的化学成分							
Table 1 Chemical composition of Ti6Al4V (w / %)							
Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H
Bal.	6.20	4.30	0.20	0.08	0.01	0.01	0.003

表 2 Ti6Al4V的主要力学性能	
Table 2 Main mechanical properties of Ti6Al4V	
Parameters	Value
Tensile strength / MPa	965
Yield strength / MPa	895
Elongation rate	17%
Section shrinkage	41%

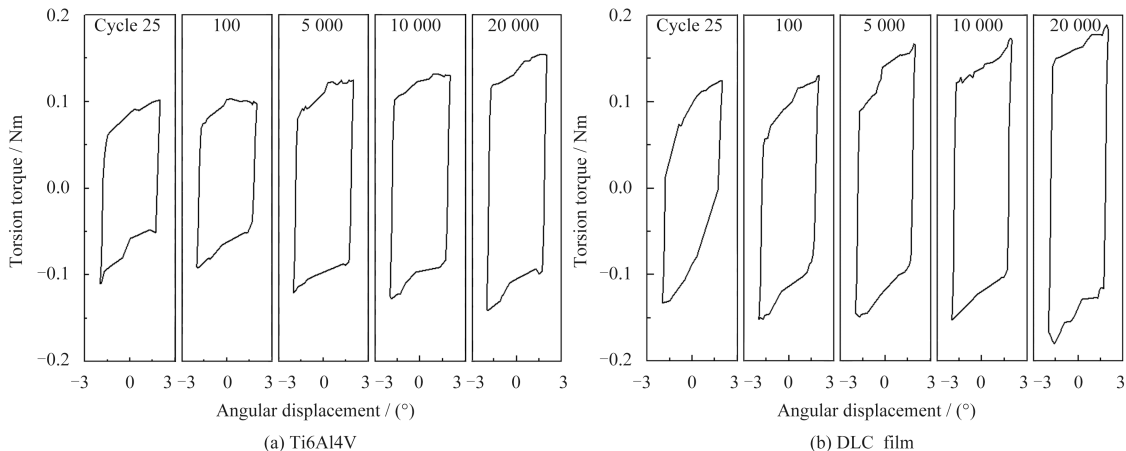
$\pm 2^\circ$, 浓度为 $25\%\pm 2\%$ 的小牛血清润滑, 室温, 频率为1 Hz, 循环周次为21 600次。利用计算机采集扭动摩擦过程中摩擦扭转力矩和角位移的变化, 绘制摩擦扭转力矩(T)-角位移幅值(θ)随循环周次的变化曲线, 从而确定扭动的区域特性。通过计算得出扭转力矩及摩擦耗散能^[7]随循环周次的变化曲线, 研究钛合金改性前后的变化。用S-3000 N型扫描电子显微镜观察DLC薄膜与Ti6Al4V合金磨损后的磨痕、磨屑的形貌特征, 研究DLC薄膜、Ti6Al4V合金轴向扭转运动的损伤机理。

2 结果与讨论

2.1 T - θ 曲线

图2为不同循环周次条件下, DLC薄膜改性前

Ti6Al4V合金分别与UHMWPE配副, 在改装的多自由度磨损试验机上进行扭动摩擦磨损试验, 具体试验参数为: 轴向载荷为100 N, 角位移幅值为

图2 DLC薄膜改性前后Ti6Al4V的 T - θ 曲线Fig. 2 T - θ curves of Ti6Al4V with and without DLC film modification

后Ti6Al4V的 T - θ 曲线。可以看出,从摩擦扭动初期至试验结束,Ti6Al4V合金的 T - θ 曲线始终为平行四边形(图2(a)),且随着循环周次的增大,平行四边形的面积呈现出逐渐增大的趋势。摩擦扭动初期,由于Ti6Al4V合金表面氧化膜的润滑作用,接触界面间较易进入相对滑移状态;随着摩擦运动的运行,表层氧化膜破坏,钛合金基体与上试样UHMWPE直接接触,由于钛合金表面硬度相对较低,耐磨性较弱,在100次循环时,接触表面间的运动已经为相对滑移状态。前100次循环, T - θ 曲线更接近于正方形,随着循环次数的增加, T - θ 曲线的摩擦扭矩范围逐渐增大,曲线形状逐渐变窄,直至试验结束,整个运动状态始终保持为相对滑移。

从图2(b)中可以看出,在25次循环时, T - θ 曲线为椭圆型,接触界面间的运动处于粘滑混合状态,上试样UHMWPE表面的部分区域粘着在DLC薄膜表面,随着界面间的相对运动,接触界面间部分区域已经发生了明显的塑性变形。当循环至5 000次时, T - θ 曲线的形状介于椭圆形和平行四边形之间,此阶段的运动一直处于从粘滑混合状态缓慢向完全滑移状态的过渡,当循环至10 000次时,接触界面间处于完全滑移状态,直至试验结束。Ti6Al4V合金与UHMWPE配副时,从摩擦运动初期,接触界面间就进入了完全相对滑移状态,直至试验结束。DLC薄膜与UHMWPE配副时,当摩擦运动循环至10 000次时,接触界面间的运动完全进入相对滑移状态,此前一直处于相对滑移状态。DLC薄膜延长了接触界面间发生相对完全滑动的时间,保护了

Ti6Al4V合金基体,从而降低了钛合金基体的磨损,延长了使用寿命。

2.2 摩擦扭转力矩曲线

图3为Ti6Al4V改性前后摩擦扭转力矩随循环周次的变化曲线,试验条件为:载荷100 N,扭转角度为 $\pm 2^\circ$ 。可以看出,在相同的循环周次,DLC薄膜改性后的Ti6Al4V合金的摩擦扭转力矩均低于Ti6Al4V合金,且随着循环周次的增加,力矩差值增大。在摩擦初始阶段,Ti6Al4V/UHMWPE和DLC/UHMWPE摩擦副间的扭转力矩均处于较低值,且力矩差值较小;钛合金易发生氧化反应,其表面存在一层致密的氧化膜,在氧化膜的润滑作用下,接触表面间的摩擦扭转力矩表现为较低值。随着循环周次的增加,Ti6Al4V表面的力矩呈现出较缓慢的上升趋势,5 000次循环以后,力矩曲线表现为接近于线性增大的趋势,一直到试验结束未出现稳定阶段;随着Ti6Al4V表层保护膜的

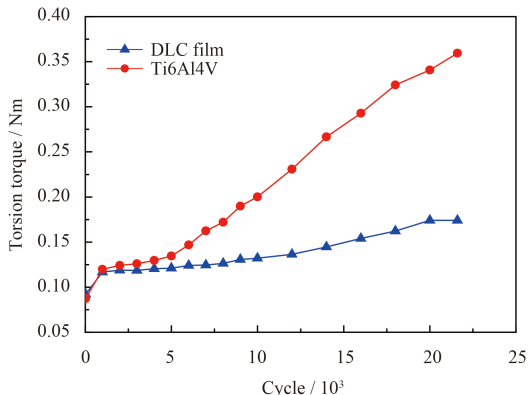


图3 DLC薄膜改性前后Ti6Al4V的摩擦扭矩曲线

Fig. 3 Friction torque curves of Ti6Al4V with and without DLC film modification

破裂, UHMWPE与Ti6Al4V基体发生了直接的接触, 并发生粘着, 随着轴向扭转运动的不断进行, 在接触界面间切向剪切力的作用下, 粘着在Ti6Al4V合金表面的UHMWPE发生塑性变形, 最终导致从UHMWPE基体剥落, 形成磨屑。

DLC薄膜本身具有优异的自润滑性能, 因此在整个摩擦过程中摩擦扭转力矩均为较低值, 随着循环周次的增加, 力矩曲线呈现出缓慢上升的趋势; 摩擦初期, DLC薄膜表层存在一层物理吸附膜, 因此摩擦扭转力矩表现为较低值, 随着循环周次的增加, 一方面, 越来越多的UHMWPE粘附在DLC薄膜表面, 并伴随着相对扭转运动的进行, UHMWPE球表面发生塑性变形, 进而导致UHMWPE从基体剥落, 摩擦扭转力矩逐渐增大; 另一方面, 接触界面间的相对运动导致局部区域出现摩擦热集中, 从而加速了 sp^2 杂化键向 sp^3 杂化键的转变, 在DLC薄膜表面形成了石墨转移膜, 增大接触界面间的润滑效果, 从而减小了摩擦扭转力矩急剧的增大幅度, 表现为缓慢上升。

2.3 耗散能

图4为Ti6Al4V改性前后摩擦耗散能随循环周次的变化曲线, 耗散能相对强度由图2中 $T-\theta$ 曲线得到。从图中可以看出, Ti6Al4V改性前后, 摩擦耗散能随着循环周次的增加均呈现出增大的趋势, 均在初始阶段保持较低的数值, 随后逐渐增大, 且Ti6Al4V合金的摩擦耗散能曲线增幅更大, 试验结束时约为DLC薄膜耗散能的2倍, 这与摩擦扭转力矩的变化趋势相似。DLC薄膜的耗散能曲线一直处于较低值状态, 且随着循环周次的增加

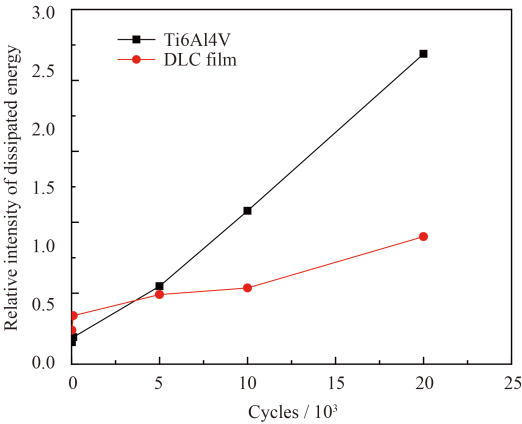


图 4 DLC薄膜改性前后Ti6Al4V的摩擦耗散能曲线
Fig. 4 Frictional dissipating energy curves of Ti6Al4V with and without DLC film modification

呈现出缓慢上升的趋势, 磨损前期上升趋势缓慢, 后期上升趋势显著增大; 由于DLC薄膜具有较高的表面硬度和优异的自润滑性能, 摩擦扭转力矩和耗散能均保持较低值, 且上升的趋势较缓慢。

2.4 磨损量

图5为Ti6Al4V合金与DLC薄膜改性后的Ti6Al4V合金分别与UHMWPE配副, 扭转运动26 100次循环后, 上试样UHMWPE的磨损量。可以看出, 摩擦副发生相对扭动条件下, 纯钛合金配副条件下UHMWPE的磨损量(1.002 mg)远低于DLC薄膜改性Ti6Al4V合金配副的磨损量(1.742 mg), 这与摆动条件下的磨损量呈现出截然相反的趋势。一方面钛合金的抗微动性能较差, 容易发生微动损伤, 主要与它的电子层、晶体结构和热传导率有关系^[9]。钛电子层中d-bond非常低, 而且活性相对较高, 容易与其他元素发生化合反应, 磨损过程中极易发生氧化^[10-12], 而钛的传热导热率较小, 容易导致一般的润滑剂产生失效^[13]。另一方面是由于摩擦副接触界面间发生相对扭转运动的过程中, 由于扭动角位移相对较小, 发生了微动磨损, 而不同材料配副发生微动磨损时, 损伤主要发生在较软的基体上^[14], 因此对磨面之间的硬度差在很大程度上决定了较软基体的损伤程度。与Ti6Al4V相比较, DLC薄膜与UHMWPE之间存在更大的硬度差, 当接触界面间发生相对对转动时, DLC薄膜表面高硬度的微凸体嵌入UHMWPE表面, 并在扭动的方向上发生犁削, 从而加速了上试样UHMWPE的磨损。

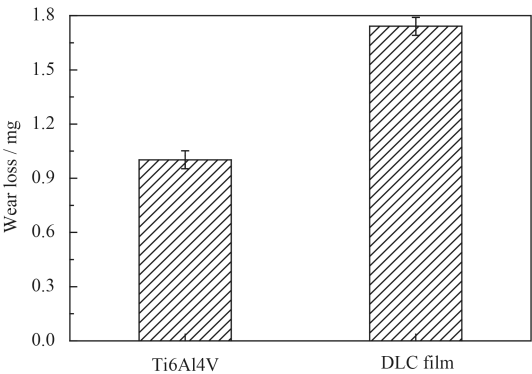


图 5 DLC薄膜改性与未改性Ti6Al4V条件下UHMWPE的磨损量
Fig. 5 Wear loss of UHMWPE under Ti6Al4V with and without DLC film modification

2.5 磨痕SEM形貌

图6为Ti6Al4V合金与经DLC薄膜改性扭动摩

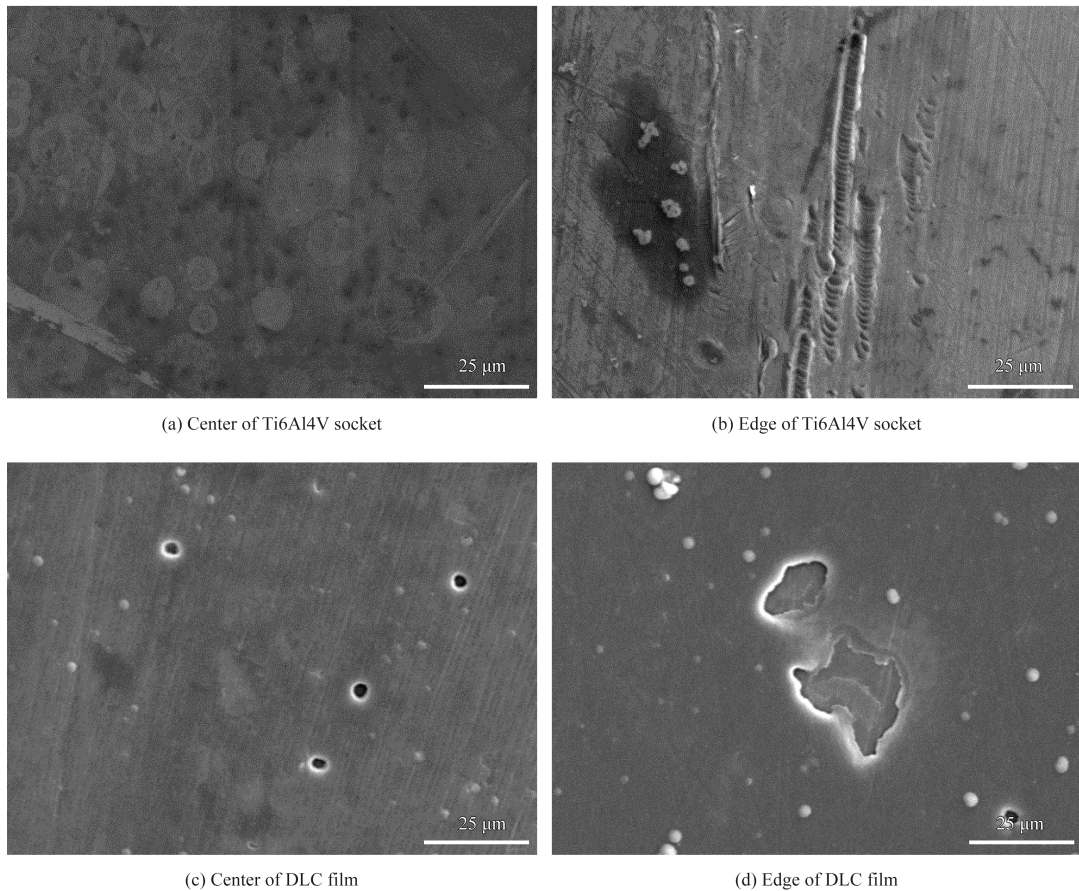


图 6 DLC薄膜改性前后Ti6Al4V的磨损表面形貌

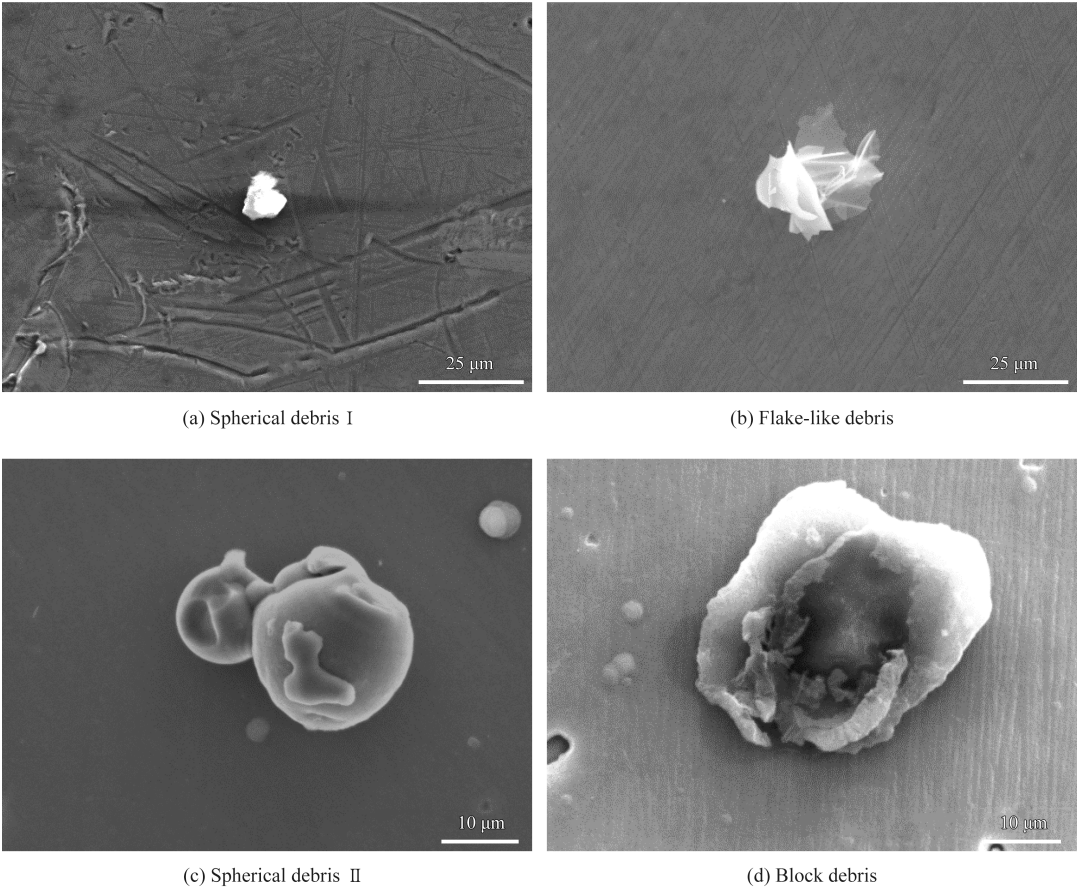
Fig. 6 Worn morphologies of Ti6Al4V with and without DLC film modification

擦21 600次循环后的表面微观形貌。可以看出Ti6Al4V合金球窝的中心部位可见到大量圆形的磨斑(图6(a)), 且磨斑的直径大小不等, 多介于50~150 μm之间, 这主要是在摩擦扭动的稳定阶段, 由于轴向扭动的原因, 大部分的磨屑集中在球窝的中心位置, 少量的磨屑被排出接触界面间, 在摩擦副接触界面间往复运动, 由于轴向载荷的挤压作用, 导致磨屑在球窝中心的接触表面形成大量圆形的擦伤。图6(b)为Ti6Al4V合金球窝边缘的SEM形貌, 可以看到明显的犁沟存在, 但是犁沟的形状和方向与摆动状态下Ti6Al4V合金的微观形貌存在较大的区别: ①犁沟内部存在较多的褶皱, 这主要是由于扭动过程中, 磨屑对钛合金表面往复多次的犁削而形成。②摆动磨损产生的犁沟方向大多垂直于球窝边缘, 或与球窝边缘形成较大的夹角; 而扭动磨损产生的犁沟方向则多平行于球窝边缘点的切线方向, 这主要是由于磨屑在扭动的过程中, 扭转力的方向是沿边缘点切线方向, 在扭转力的作用下, 接触界面间处于最外

围的磨屑会逐渐被排出。图6(c)(d)是经DLC薄膜改性后的Ti6Al4V合金球窝的SEM形貌, 可以看出球窝中心存在一些面积较小的剥落坑, 这是在接触应力作用下产生的DLC薄膜脆性剥落; 相比之下, 球窝边缘剥落坑的面积要大很多, DLC薄膜完全剥落, 基体材料已发生了粘着磨损, 这主要是球窝边缘存在较大的残余应力与磨粒犁削综合作用的结果。

2.6 磨屑SEM形貌

Ti6Al4V与DLC薄膜改性后分别与UHMWPE对磨后, 磨屑形貌见图7。可以看出, Ti6Al4V合金与UHMWPE对磨后产生的磨屑多为边缘较粗糙的球型磨屑(图7(a)), 粒径介于5~10 μm之间, 这是由于摩擦副接触界面间发生了粘着, 在扭转运动作用下, 相对较软的UHMWPE基体表面发生了撕裂脱落, 在反复的扭转碾磨作用下, 逐渐变为球型磨屑; 同时也有少量的薄片状磨屑存在(图7(b)), 这种磨屑的形成主要是钛合金表面的凸峰



(a) Spherical debris I (b) Flake-like debris (c) Spherical debris II (d) Block debris

图 7 DLC薄膜改性与未改性Ti6Al4V条件下UHMWPE的磨屑形貌

Fig. 7 Wear debris morphologies of UNMWPE under Ti6Al4V with and without DLC film modification

在UHMWPE表面形成轻微刮擦, 造成了UHMWPE表面层脱落, 形成了类似花型的薄片状磨屑。DLC薄膜表面凸峰对UHMWPE表面犁削产生磨屑, 在扭转运动的反复碾压作用下, 逐渐演变为球型磨屑(图7(c)), 粒径介于10~20 μm之间; 块状磨屑的形成主要是发生了粘着磨损, 在轴向载荷的作用下, 硬度相对较小的UHMWPE较容易粘附在DLC薄膜表面, 在剪切力的作用下, 发生撕裂并逐渐从UHMWPE表面脱落, 形成了块状磨屑(图7(d))。

2.7 磨损机制对比

图8为扭动摩擦形式下, DLC薄膜改性Ti6Al4V合金球窝的磨损机制。图中灰色区域为球窝表面, 咖啡色区域为球窝的中心, 与摆动磨损机制相反, 转动摩擦形式下, 球窝中心相对运动速度为零, 且从中心到边缘, 接触界面间的相对运动速度呈线性增大的趋势。球窝中心为应力集中区, 即图中所示的深咖啡色区域, 部分存在缺

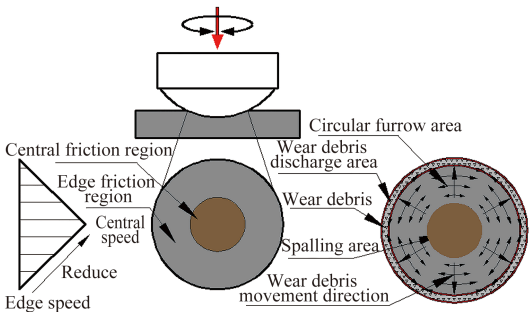


图 8 DLC薄膜改性Ti6Al4V合金扭动磨损机制

Fig. 8 Rotation wear mechanism of Ti6Al4V alloy deposited with DLC film

陷的区域最先发生损伤, 从表面剥落的磨屑逐渐排出接触界面之间, 大部分磨屑沿扭动的切线方向排出, 少量磨屑从其他方向排出, 图中灰色区域标出了磨屑排出的主要方向。结合以上对DLC薄膜表面磨损SEM形貌和磨屑SEM形貌的对比分析, 可以得出, 在接触应力和轴向载荷的综合作用下, 摩擦初期, 球窝中心的磨损机制主要为粘着磨损, 摩擦稳定阶段的磨损机制以脆性剥落为

主。球窝边缘区域则表现为不同程度的磨粒磨损,犁沟主要沿扭动切线方向分布,与球窝边缘呈一定的夹角。同时由于扭动角位移相对较小,DLC薄膜/UHMWPE摩擦副接触界面间存在微动磨损现象,由于微动磨损更容易发生在较软的表面上,从而加速了对磨面UHMWPE的磨损。Ti6Al4V合金的磨损机制则是以磨粒磨损和擦伤为主,伴随着轻度氧化磨损和粘着磨损的发生。

3 结 论

(1) 与Ti6Al4V合金相比,DLC薄膜改性后的Ti6Al4V合金摩擦扭转力矩降低了51.6%、耗散能降低了48%,进入完全滑移状态的时间缩短,具有更好的耐磨性。

(2) Ti6Al4V合金的磨损机制是磨粒磨损和轻度擦伤为主,伴随着轻度氧化磨损和粘着磨损的发生。DLC薄膜的磨损机制主要是局部区域应力集中引起的脆性剥落。

(3) DLC薄膜增强了Ti6Al4V合金基体的耐磨性,但同时也增大了对磨幅UHMWPE的磨损。

参考文献

- [1] 葛世荣,王成焘. 人体生物摩擦学的研究现状与展望[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(2): 186-191.
GE S R, WANG C T. State-of-the-art and prospect of biotribology in human body[J]. Tribology, 2005, 25(2): 186-191 (in Chinese).
- [2] POPOOLA A P I, PHUME L, PITYANA S, et al. In-situ formation of laser Ti6Al4V-TiB composite coatings on Ti6Al4V alloy for biomedical application[J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 285: 161-170.
- [3] YILDIZ F, YETIM A F, ALSARAN A, et al. Wear and corrosion behaviour of various surface treated medical grade titanium alloy in bio-simulated environment[J]. Wear, 2009, 267(5): 695-701.
- [4] JOSKA L, FOJT J, CVRCEK L, et al. Properties of titanium-alloyed DLC layers for medical applications[J]. Biomater, 2014, 4(1): 29505-1-29505-7.

- [5] HE D H, WANG P, LIU P, et al. HA coating fabricated by electrochemical deposition on modified Ti6Al4V alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 277: 203-209.
- [6] 冯兴国,孙明仁,马欣新,等. 空气等离子基注入Ti6Al4V合金摩擦学性能研究[J]. 中国表面工程, 2010, 23 (2): 50-55.
FENG X G, SUN M R, MA X X, et al. Study on tribological performance of Ti6Al4V alloy by air plasma based ion implantation[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(2): 50-55 (in Chinese).
- [7] 林修洲. 钛合金扭动微动腐蚀行为研究[D]. 成都: 西南交通大学. 2010.
LIN X Z. Research on torsional fretting corrosion behaviors of titanium alloy[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010 (in Chinese).
- [8] JOHNSON K L. (著). 接触力学[M]. 徐秉业, 罗学富, 宋国华, 等(译). 北京: 高等教育出版社, 1992.
JOHNSON K L. Contact mechanics[M]. Translated by XU B Y, LUO X F, SONG G H, et al. Beijing: Higher Education Press, 1992 (in Chinese).
- [9] 孙晓宾, 骆心怡, 郑婷, 等. 钛合金抗微动损伤的研究进展[J]. 金属热处理, 2010, 35(3): 83-87.
SUN X B, LUO X Y, ZHENG T, et al. Research progress in fretting resistance technology of titanium alloys[J]. Heat Treatment of Metals, 2010(3): 83-87 (in Chinese).
- [10] ALAM M O, HASEEB A S M A. Response of Ti-6Al-4V and Ti-24Al-11Nb alloys to dry sliding wear against hardened steel[J]. Tribology International, 2002, 35(35): 357-362.
- [11] STRAFFELINI G, MOLINARI A. Dry sliding wear of Ti-6Al-4V alloy as influenced by the counterface and sliding conditions[J]. Wear, 1999, 236(1/2): 328-338.
- [12] MOLINARI A, STRAFFELINI G, TESI B, et al. Dry sliding wear mechanisms of the Ti6Al4V alloy[J]. Wear, 1997, 208(1/2): 105-112.
- [13] HUTCHINGS I M. Tribology friction and wear of engineering materials[J]. Tribology, 1992, 13: 187-188.
- [14] 郭军霞, 蔡珣, 陈秋龙. 类金刚石碳膜的结构及其微动磨损行为[J]. 材料保护, 2003, 36(9): 15-18.
GUO J X, CAI X, CHEN Q L. Microstructure and fretting of diamond-like carbon based multilayer coating[J]. Materials Protection, 2003, 36(9): 15-18 (in Chinese).

(责任编辑: 王鑫)