

doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2012.03.017

# 钛在模拟空间环境下的摩擦学性能\*

郭 纯<sup>1,2</sup>, 陈建敏<sup>2</sup>, 姚润钢<sup>1</sup>, 周健松<sup>2</sup>, 俞友军<sup>2</sup>

(1. 中国船舶重工集团公司 第七二五研究所, 河南 洛阳 471039; 2. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 兰州 730000)

**摘 要:** 为了明确钛及其合金在空间环境下的摩擦磨损行为, 利用中科院兰州化学物理研究所自主研发的空间摩擦学试验系统对钛在模拟空间环境(高真空、原子氧和紫外辐照)下的摩擦磨损性能进行了研究。用 X 光电子能谱仪(XPS)分析了钛在原子氧辐照后表面元素价态的变化。采用扫描电镜(SEM)对磨损后试样和对偶钢球的磨痕形貌进行分析, 利用能量色散光谱仪(EDS)对钢球磨痕元素面分布进行分析, 揭示了钛在模拟空间环境下的摩擦磨损失效机理。结果表明: 钛在原子氧辐照后表面发生了氧化; 钛在大气环境条件下的摩擦磨损机理主要为磨粒磨损和粘着磨损, 在高真空、原子氧和紫外辐照模拟空间环境下的磨损机理主要为严重的粘着磨损、磨粒磨损和塑性变形。相比于大气环境条件下, 钛在高真空、原子氧和紫外辐照下的粘着磨损加剧, 摩擦因数增加。

**关键词:** 钛; 空间; 摩擦; 磨损

**中图分类号:** TG115.58      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1007-9289(2012)03-0086-06

## Tribological Properties of Titanium in Simulated Space Environment

GUO Chun<sup>1,2</sup>, CHEN Jian-min<sup>2</sup>, YAO Run-gang<sup>1</sup>, ZHOU Jian-song<sup>2</sup>, Yu You-jun<sup>2</sup>

(1. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, Henan; 2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

**Abstract:** The effects of simulated space environment on tribological properties of titanium were evaluated by the space tribological test system that was made by the State Key Laboratory of Solid Lubrication (LSL) in order to reveal the wear mechanism of titanium under harsh space environment. The simulated space environment included ultrahigh vacuum, atomic oxygen, and ultraviolet irradiation. The surface composition of titanium after atomic oxygen irradiation was analyzed by X-ray photonelectron spectroscopy (XPS). The worn morphologies, composition of titanium and counterpart GCr15 steel balls were characterized by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS). The results show that titanium is oxidized after atomic oxygen irradiation; titanium sliding against GCr15 steel balls under atmospheric environment is dominated by abrasive and adhesive wear, while server adhesive wear, abrasive wear and plastic deformation under ultrahigh vacuum, atomic oxygen and ultraviolet irradiation environment.

**Key words:** titanium (Ti); space; friction; wear

## 0 引 言

目前, 空间飞行器的设计原则是更高机动性和更大的推重比。由于空间飞行器的有效载荷相对较小, 空间飞行器的减重相对于飞机的减重

显得更为重要。钛及其合金因具有密度小、比强度高、耐腐蚀性强、生物相容性好和无磁等优异性能成为空间飞行器的优选材料<sup>[1-4]</sup>。据报道, 钛及其合金已在美国的“阿波罗”和“水星”计划中得到了应用, 飞行器的燃料箱和卫星舱体等部

收稿日期: 2012-03-08; 修回日期: 2012-05-11; 基金项目: \* 国家自然科学基金(51045004)

作者简介: 郭纯(1984—), 男(汉), 安徽宿州人, 博士; 研究方向: 表面工程技术与摩擦

网络出版日期: 2012-05-23 08:59; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20120523.0859.001.html>

引文格式: 郭纯, 陈建敏, 姚润钢, 等. 钛在模拟空间环境下的摩擦学性能 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(3): 86-91.

件是其典型应用实例。

空间飞行器,如人造卫星、飞船、空间站及星际探测器等飞行轨道的主要空间环境特征可以概括为超高真空、高低温、强辐射和原子氧等苛刻环境工况条件<sup>[5-6]</sup>。这些空间机械能否正常运转和达到预期的寿命,在很大程度上取决于航天器内各机械部件的摩擦磨损状况。随着航空航天技术的迅速发展,对空间机械摩擦学系统提出的总体要求可以概括为低摩擦、低摩擦噪声和长寿命。由此可见,空间机械摩擦副摩擦学性能的优劣,必然会对整个空间计划的实施产生重大影响,已成为国际空间摩擦材料与技术领域的研究热点<sup>[7-8]</sup>。

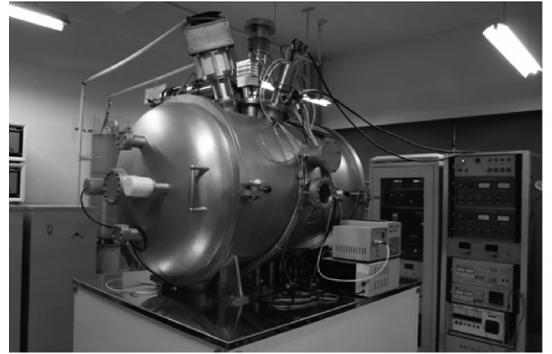
近年来,钛及其合金在空间机械领域的应用,以及其在空间环境下的磨损失效机理研究受到美、欧等发达国家的高度重视<sup>[9-11]</sup>。但是,国内在钛及其合金摩擦磨损性能领域的研究主要集中于地面大气环境<sup>[12-14]</sup>,关于钛及其合金在空间环境下的摩擦学性能研究较少<sup>[15]</sup>。因此,为了明确钛及其合金在空间环境下的摩擦磨损行为,文中采用空间摩擦学试验系统对钛在模拟空间环境下的摩擦磨损失效机理进行了深入研究。

## 1 试验部分

### 1.1 模拟空间摩擦试验

采用兰州化学物理研究所自主研发的空间摩擦学试验系统(图1所示)。

对钛(TA2)在大气、真空、原子氧辐照和紫外辐照4种环境条件下进行摩擦学性能测试,试样尺寸为 $\Phi 24\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 。大气环境条件为相对湿度45%,温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。真空条件为真空度 $2.0\times 10^{-4}\text{ Pa}$ 。原子氧辐照条件为束流的通量密度 $5.0\times 10^{15}\text{ atom}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ ,原子氧动能 $5\text{ eV}$ ,真空度 $2.0\times 10^{-4}\text{ Pa}$ ,辐照时间240 min。经原子氧辐照后的试样直接在真空中进行摩擦试验。紫外辐照条件为紫外辐照度 $300\text{ W}/\text{m}^2$ ,波长 $115\sim 400\text{ nm}$ ,真空度 $2.0\times 10^{-4}\text{ Pa}$ ,辐射时间240 min。经紫外辐照后试样直接在真空中进行摩擦试验。其它摩擦测试条件统一为:真空度 $2.0\times 10^{-4}\text{ Pa}$ (大气环境条件下的摩擦试验除外),摩擦对偶为直径 $3.175\text{ mm}$ 的GCr15钢球,法向载荷为 $5\text{ N}$ ,转速 $300\text{ r}/\text{min}$ ,摩擦时间 $30\text{ min}$ ,每个条件下测试3次。



(a) Space irradiation tester



(b) Space vacuum wear tester

图1 空间摩擦学试验系统<sup>[6]</sup>

Fig. 1 System of space tribological test<sup>[6]</sup>

### 1.2 分析表征

采用 Thermo Scientific K-Alpha X 射线光电子能谱仪(XPS)分析原子氧辐照后钛表面的元素价态。磨损体积用 MicroXAM 3D Non-contract Surface Mapping Profiler 表面形貌仪进行测量。用 SEM 观察摩擦磨损测试后试样和对偶 GCr15 钢球磨痕的表面形貌,用 EDS 分析对偶球的元素面分布。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同环境下的摩擦磨损性能

图2是钛在不同摩擦磨损测试环境条件下的摩擦因数。从图可以看出钛在大气环境条件(AR)下的摩擦因数为0.436,在模拟空间环境真空(VC)、原子氧(AO)和紫外辐照(UV)下的摩擦因数分别为0.692、0.672和0.689。由此可见钛在模拟空间环境下的摩擦因数大约是大环境条件下的1.5倍,同时还可以看出钛在真空(VC)、原子氧(AO)和紫外辐照(UV)3种模拟空间环境下的摩擦因数相差不大,而这3种模拟空

间摩擦测试条件具有相同的真空度,因此可知空间环境下真空度对钛的摩擦因数影响较大。

钛在空间环境下具有高的摩擦因数,原因为真空条件下钛的磨损表面生成的氧化物保护膜很快地被去除,而且再生困难。因此,摩擦副表面处于“裸露”状态,发生新鲜表面接触,而且新鲜表面更容易发生粘着,粘着力和剪切力增加,甚至产生冷焊,因此摩擦因数较高<sup>[1]</sup>,这一结论可以从后面给出的试样磨损表面形貌图上得以证实。

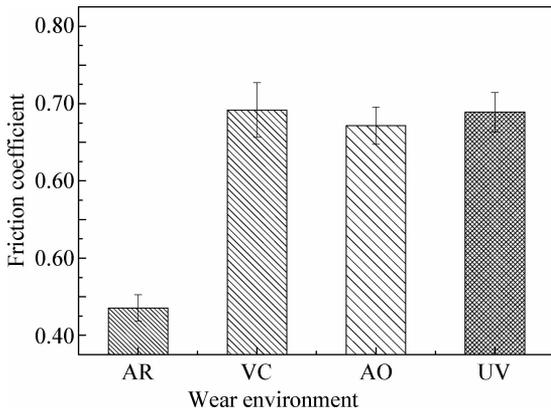


图2 钛在不同摩擦环境下的摩擦因数

Fig. 2 Friction coefficient of titanium under different environment

图3是钛在不同摩擦磨损测试环境下的体积磨损率。由图可见,钛在大气环境条件下的磨损率大于在模拟空间环境下的磨损率,钛在大气环境条件下的磨损率为  $3.128 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ,在模拟空间环境真空(VC)、原子氧(AO)和紫外辐照(UV)下的磨损率分别为  $1.833 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ,  $1.959 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ,  $1.876 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 。

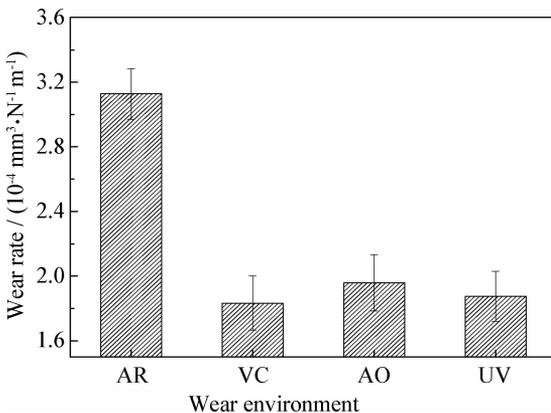


图3 钛在不同摩擦环境下的磨损率

Fig. 3 Wear rate of titanium under different environment

钛在大气环境条件下的磨损率大于模拟空间环境下的磨损率是由于模拟空间环境下,摩擦试样都处于真空中,钛粘着严重,犁沟产生的磨屑粘着在磨痕上很难甩出磨痕,而大气环境条件下产生的磨屑表面会发生氧化,磨屑粘着能力低,会很快地被甩出磨痕形成独立的磨屑。因此钛在大气环境条件下的磨损率远大于模拟空间环境下的磨损率。

这里需要指出的是原子氧(AO)和紫外辐照(UV)摩擦磨损测试都是辐照后在真空中进行的,现有设备还无法实现边辐照边摩擦测试,所以原子氧(AO)后钛表面只有很薄的氧化层,而氧化层以下的磨损和真空中应该近乎相同。所以3种模拟空间环境下的磨损率相差不是很大。但是根据钛在大气环境条件下的摩擦磨损状况,可以推测如果在原子氧辐照的同时做摩擦磨损测试,钛的磨损率应该会明显增加,希望在今后的研究中能实现原子氧辐照与摩擦磨损测试同步进行,使其更接近钛在真实空间环境工况下的摩擦磨损。

图4是钛在不同摩擦磨损测试环境条件下的磨痕低倍形貌图。对比不同环境条件下的磨痕形貌照片,可以很明显看出,钛在原子氧辐照后表面颜色发生了变化,说明在原子氧辐照条件下钛表面发生了侵蚀,后面的XPS分析结果表明表面为  $\text{TiO}_2$ ,而其它摩擦测试条件下钛表面未发生明显变化。

图5给出了钛在不同摩擦磨损测试环境条件下的磨痕SEM图。可以看出钛在大气环境条件下的磨痕形貌特征主要为犁沟、磨屑及粘着坑,因此钛在大气环境条件下的磨损机理主要为磨粒磨损和粘着磨损。钛在真空(VC)、原子氧(AO)和紫外辐照(UV)3种模拟空间环境下的磨痕形貌主要特征为塑性变形和粘着挤压产生的凸起以及犁削产生的犁沟,因此钛在3种模拟空间环境下的磨损机理主要为严重的粘着磨损、磨粒磨损和塑性变形。同时也进一步证明了前面关于真空条件下钛的粘着和剪切增加导致摩擦因数增加的解释是正确的。而且从模拟空间环境下的磨痕上几乎看不到磨屑的存在,与前面推测的磨屑在模拟空间环境下由于粘着不容易甩出磨痕,反复摩擦过程中被碾压在一起形成凸起,磨损率相比于大气环境条件下偏小的解释是一致的。

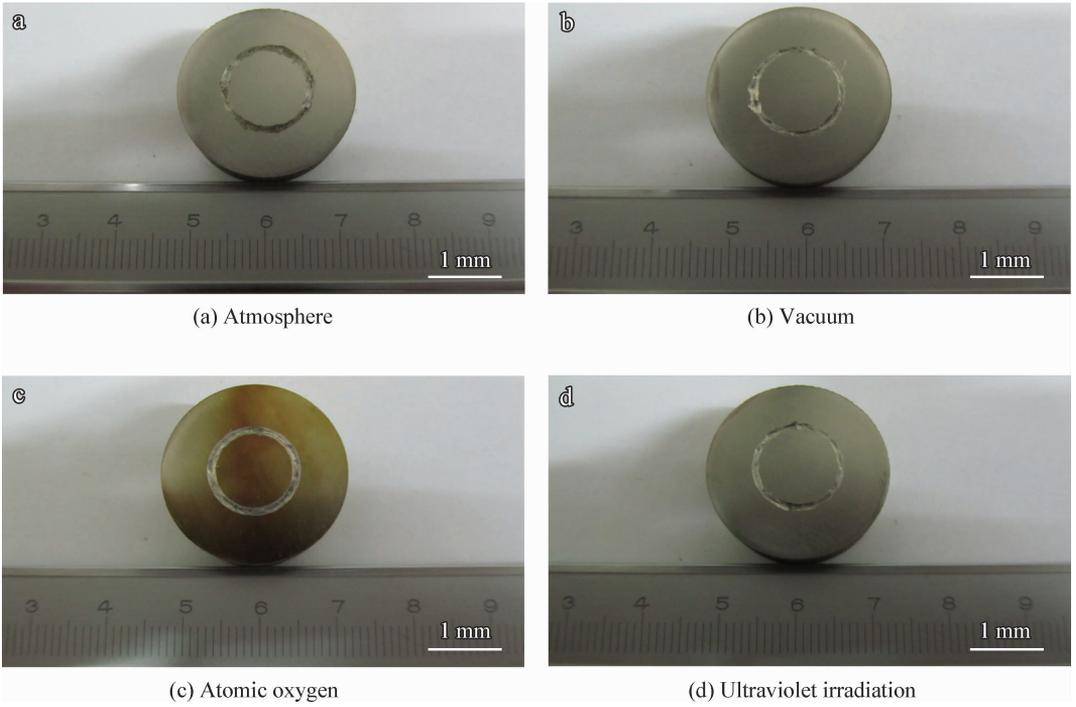


图 4 钛在不同环境下磨损表面形貌

Fig. 4 Worn surface images of titanium under different environment

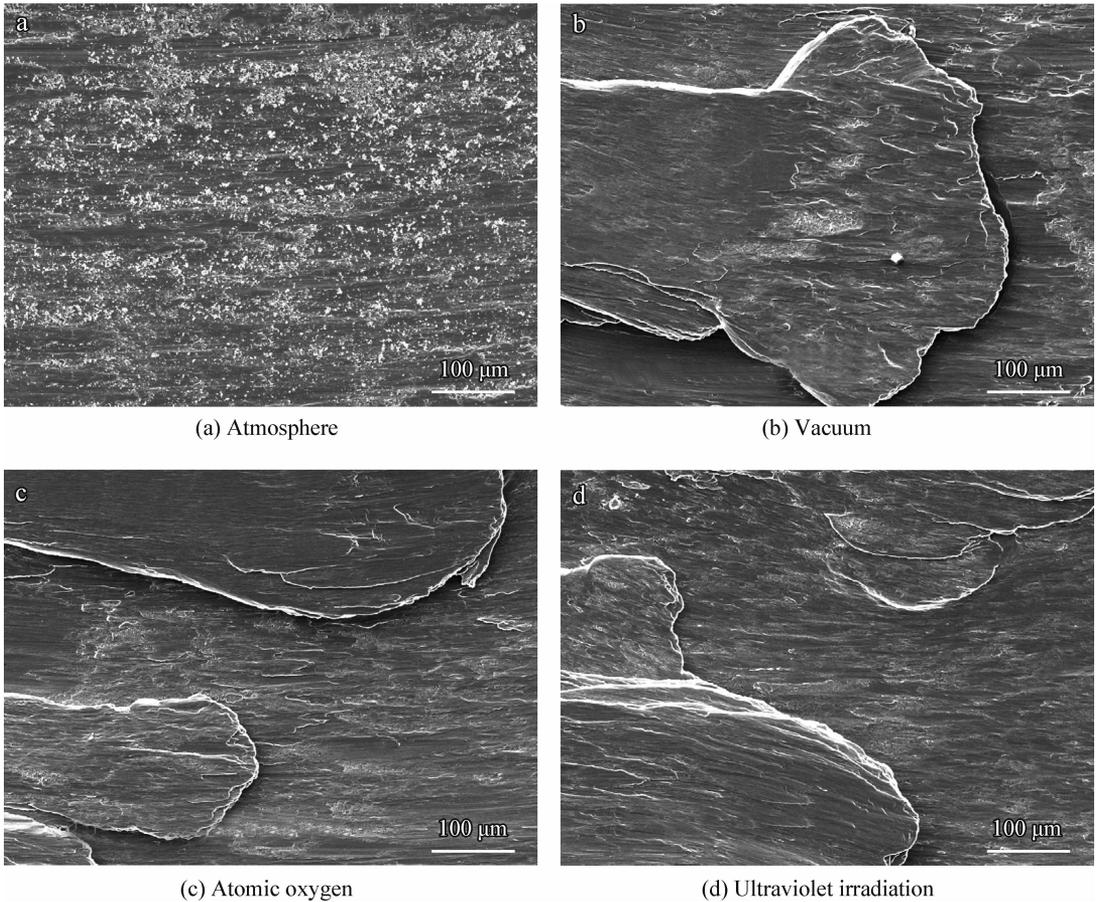


图 5 钛在不同环境下的磨痕形貌

Fig. 5 Worn morphologies of titanium under different environment

图6为不同环境下对偶GCr15钢球磨痕的SEM图和Ti元素的EDS面分布图。可以看出4种摩擦测试环境条件下都发生了钛元素向对偶球的转移,进一步说明了粘着磨损的存在,与图5得出的结论相吻合。同时对比4种摩擦测试环境条件下对偶球的元素面分布图,还可以看出钛在模拟空间下对偶球上的Ti元素明显多于大气环境条件下对偶球表面的Ti元素,说明钛在模拟空间环境下与对偶球粘着加剧,与图2和图5得出的结果相一致。

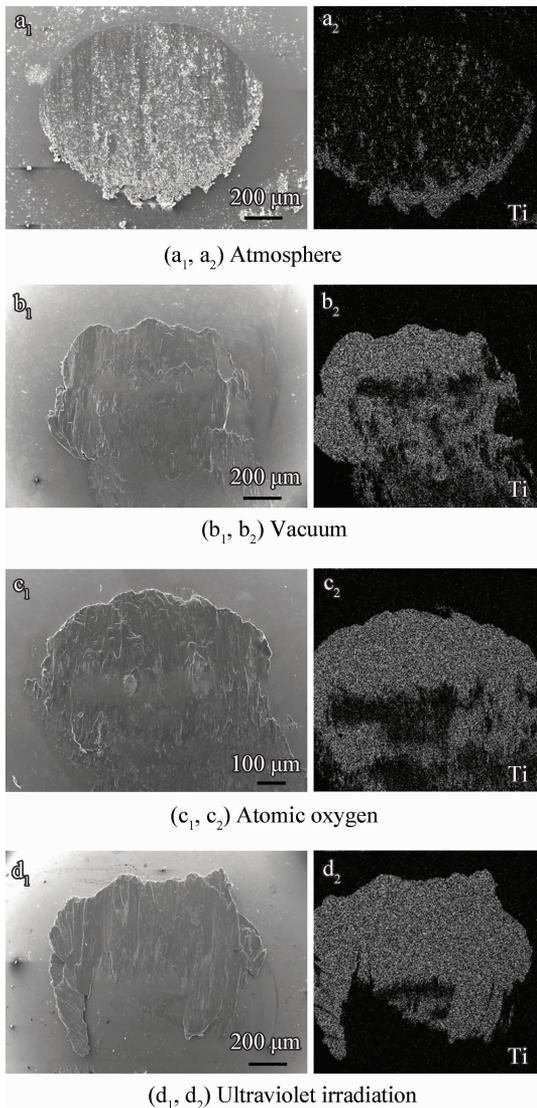


图6 对偶球磨痕的SEM图和Ti元素的EDS面分布图  
Fig. 6 Worn morphologies of counterpart GCr15 steel balls and corresponding map distribution of Ti element

## 2.2 原子氧辐照对钛的侵蚀

图7给出了原子氧辐照后钛表面的钛元素

价态随XPS氙离子剥蚀时间的变化图。从图首先可以看出,经原子氧辐照后钛表面发生了原子氧侵蚀,从结合能分析可知生成的是 $\text{TiO}_2$ 相。另外从钛的价态与剥蚀时间的关系可以看出,剥蚀300 s以后钛主要以单质形式存在,说明氧化层经氙离子300 s剥蚀后就已经剥蚀完达到原基材上,即240 min原子氧辐照形成的氧化层很薄,也证明了前面关于3种模拟空间环境下的摩擦因数和磨损率相差不大的原因解释是正确的。

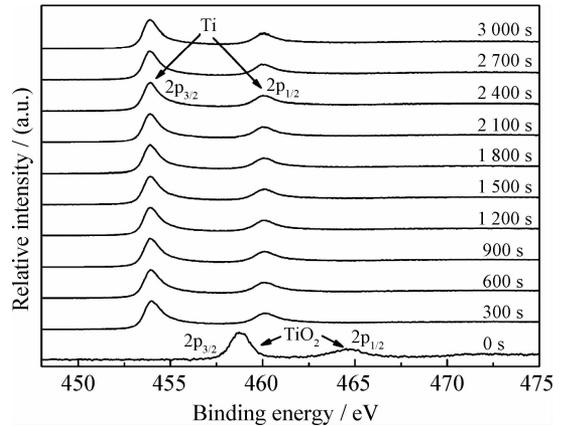


图7 原子氧辐照后钛表面Ti的价态变化图

Fig. 7 Variation of valence of Ti element as a function of etch time

## 3 结论

(1) 采用空间摩擦学试验系统对钛在模拟空间环境条件(真空、原子氧和紫外辐照)和大气环境条件下的摩擦学性能进行了研究。

(2) 钛在模拟空间环境下的摩擦因数大于大气环境条件下的摩擦因数。钛在模拟空间环境下的磨损率小于大气环境条件下的磨损率。

(3) 钛在原子氧辐照后表面发生了原子氧侵蚀生成了 $\text{TiO}_2$ 相。

(4) 钛在大气环境条件下的磨损机理主要为磨粒磨损和粘着磨损,钛在模拟空间环境下的磨损机理主要为严重的粘着磨损、磨粒磨损和塑性变形。

## 参考文献

- [1] Bruni S, Martinesi M, Stio M, et al. Effects of surface treatment of Ti-6Al-4V titanium alloy on biocompatibility in cultured human umbilical vein endothelial cells [J]. Acta Biomater, 2005, 1(2): 223-234.

[2] 郭纯, 陈建敏, 周健松, 等. Ti-6Al-4V 激光重熔结构及摩擦学性能 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(3): 11-16.

[3] 武万良, 王振廷, 孙俭峰. 钛基复合材料激光熔覆层显微组织及其强化机制 [J]. 中国表面工程, 2005, 18(4): 10-12.

[4] 屠振密, 朱永明, 李宁, 等. 钛及钛合金表面金属电沉积的预处理问题 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(1): 25-29.

[5] 童靖宇. 航天器可靠性与空间特殊环境试验 [J]. 航天器环境工程, 2005, 22(1): 9-18.

[6] 孙晓军, 刘维民. 固体材料的空间环境摩擦试验 [J]. 航天器环境工程, 2010, 27(3): 295-300.

[7] 翁立军, 刘维民, 孙嘉奕, 等. 空间摩擦学的机遇和挑战 [J]. 摩擦学学报, 2005, 25(1): 92-95.

[8] 马国政, 徐滨士, 王海斗, 等. 空间固体润滑材料的研究现状 [J]. 材料导报, 2010(1), 24: 68-71.

[9] Jha A K, Singh S K, Kiranmayee M S, et al. Failure analysis of titanium alloy (Ti6Al4V) fastener used in aerospace application [J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 17(6): 1457-1465.

[10] Yazdani M M, Edrisy A, Alpas A T. Vacuum sliding behaviour of thermally oxidized Ti-6Al-4V alloy [J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 202(4/5/6/7): 1182-1188.

[11] 孙荣禄, 孙树文, 郭立新, 等. 固体润滑技术在空间机械中的应用 [J]. 宇航材料与工艺, 1999, 1: 17-22.

[12] 田永生. 钛合金表面激光硼碳氮合金化层的组织结构与耐磨性能研究 [M]. 济南: 山东大学博士论文, 2006.

[13] 蒋平, 张继娟, 于利根, 等. Ti-6Al-4V 合金 SiC 粉激光表面合金化组织与耐磨性 [J]. 应用激光, 1999, 19(5): 229-231.

[14] 郭纯, 周健松, 安宇龙, 等. 纯钛表面激光硼化及其摩擦学性能 [J]. 材料科学与工程学报, 2009, 27(5): 745-748.

[15] Liu Y. Microstructure developed in the surface layer of Ti-6Al-4V alloy after sliding wear in vacuum [J]. Materials Characterization, 2003, 50(4/5): 275-279.

作者地址: 兰州市天水中路 18 号 730000  
 Tel: (0931) 4968 284  
 E-mail: guochun@licp.cas.cn



• 本刊理事单位介绍(续) •

沈阳大陆激光技术有限公司

沈阳大陆激光技术有限公司是沈阳大陆企业集团的核心企业之一。公司成立于 1998 年致力于工业激光再制造技术的开发和产业化应用, 先后开发出 1~10 kW 横流连续波 CO<sub>2</sub> 激光器和六轴四联动、五轴五联动飞行光路数控激光加工机床, 同时还开发出淬火、熔凝、合金化、熔覆 4 个系列高功率激光加工工艺技术以及铁基、镍基、钴基和金属陶瓷 4 个系列激光加工专用材料, 成功修复了数千台地面燃机、航空发动机、30 万千瓦及以上汽轮机、大型电机、烟汽轮机、TRT、轴流风机、离心压缩机、螺杆压缩机等涡轮动力机组的关键部件。各项技术广泛应用于石化、电力、冶金、航空、铁路等基础性行业。

公司目前拥有国家发明专利 14 项。2007 年 8 月, 辽宁省科技厅批准公司组建工程技术研究中心。2009 年 6 月, 公司被认定为国家高新技术企业。同时, 公司作为“全国激光修复技术标准化技术委员会”的秘书处单位, 承担着组织制订我国激光修复技术领域的国家标准和行业标准的工作任务。2009 年 12 月, 沈阳大陆激光技术有限公司被国家工业和信息化部确定为机电产品再制造试点企业, 承担起为我国再制造产业提供技术支持和技术服务的崭新任务。