

文章编号: 1004 - 0609(2003)03 - 0570 - 04

# 钛合金 Ti6Al4V 表面渗钼层的摩擦磨损性能<sup>①</sup>

秦 林, 唐 宾, 赵晋香, 徐 重  
(太原理工大学 表面工程研究所, 太原 030024)

**摘 要:** 利用双层辉光离子渗金属技术在钛合金 Ti6Al4V 表面进行合金化, 形成均匀、致密、厚度为 9.4 μm 的钛钼合金渗层。表面硬度提高 3 倍左右, 达到 1 050 H<sub>k</sub>。采用球盘磨损试验机考察了钛合金 Ti6Al4V 表面渗钼层和 Ti6Al4V 钛合金的摩擦性能, 得出该合金表面渗 Mo 后虽然摩擦因数略微增大, 但耐磨性提高 100 余倍; 通过对磨损形貌的分析可知, 表面渗 Mo 合金层磨损机制主要表现为粘着及少量微切削。

**关键词:** 钛合金; 渗 Mo; 摩擦学性能

**中图分类号:** TG 146.2; TG 115.5

**文献标识码:** A

钛合金具有比强度高、热强性好、耐腐蚀性能优异等优点, 已成为航空、航天、火箭、导弹、舰艇及能源化工等工业部门的重要结构材料<sup>[1-3]</sup>; 其缺点是硬度低、耐磨性能差, 当用作滑动部件时, 易产生磨损。钛及其合金表面易发生氧化, 生成 TiO<sub>2</sub> 氧化膜, 该氧化膜在摩擦接触中易发生剥落, 因此必须对钛合金进行表面改性处理。Mo 的弹性模量高, 熔点高, 是较好的耐磨材质, 在钛及其合金表面渗 Mo 可以改善其表面耐磨性能。因为 Ti6Al4V 合金是应用最广的钛合金, 所以本文作者采用双层辉光离子渗金属技术<sup>[4-6]</sup> 在 Ti6Al4V 合金基体上制备渗 Mo 合金层, 并与 Ti6Al4V 合金对比考察渗 Mo 层同 GCr15 配副时的摩擦磨损性能。

## 1 实验

将 Ti6Al4V 合金加工成尺寸为 24 mm × 6 mm 的圆柱形试样。Ti6Al4V 试样表面用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及金刚石研磨膏抛光至镜面。利用双层辉光离子渗金属技术在 Ti6Al4V 合金表面渗 Mo 制成渗 Mo 试样, 其工艺参数为: 源极电压 1 300~ 1 400 V; 阴极电压 600~ 650 V; 气压 15~ 25 Pa; 阴-源极间距 15~ 20 mm; 渗金属温度 810~ 830 °C。渗 Mo 试样表面保持处理后状态。

硬度检测随机取样 3 个, 每个试样表面打 3 点硬度, 取平均值, 其结果如表 1 所示, 经渗 Mo 后, 表面硬度提高 3 倍左右。

表 1 表面合金渗层及 Ti6Al4V 基材硬度值(H<sub>k</sub>)

Table 1 Micro-hardness values of Ti6Al4V and Ti-Mo diffusion layer( surface) (H<sub>k</sub>)

Sample	Point 1	Point 2	Point 3	Average hardness
1 <sup>#</sup>	964	1 010	1 179	1 051
2 <sup>#</sup>	1 058	831	1 261	1 050
3 <sup>#</sup>	966	1 085	1 063	1 050
Ti6Al4V	354	354	351	353

磨损试验用西北工业大学自制球盘磨损试验机, 磨损试验配副为  $d$  4.75 mm 的 GCr15 钢球, 其硬度为 HRC62, 载荷  $p = 4.9$  N, 转速  $n = 110$  r/min, 磨痕轨迹半径  $r = 21.5$  mm, 实验温度为室温(20 ± 2) °C, 硬度为 RH(65 ± 3)。

如图 1 所示, 试验时球(不自转)相对于试样作圆周滑动, 盘形试样固定。小球对试样施加恒定垂

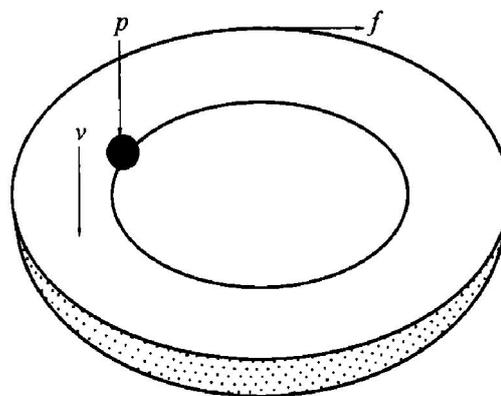


图 1 磨损试验原理简图

Fig. 1 Principle diagram of wear test

① 收稿日期: 2002 - 07 - 08; 修订日期: 2002 - 10 - 14

作者简介: 秦 林(1974 -), 男, 博士。

通讯联系人: 秦 林, 博士; 电话: 0351- 6010540; E-mail: qin - lin26@sohu.com

直压力, 受摩擦作用, 试样有如图  $f$  方向的力才能保持静止, 其大小等于摩擦力。为简化磨损体积计算, 采用文献[7]介绍的公式

$$V_w = \frac{2\pi \cdot t \cdot r}{6b} (3t^2 + 4b^2)$$

式中  $V_w$  为试盘磨损体积,  $\text{mm}^3$ ;  $t$  为磨痕深度,  $\text{mm}$ ;  $b$  为磨痕宽度,  $\text{mm}$ ;  $r$  为磨痕轨道半径,  $\text{mm}$ , 计算出总的磨损体积( $V_w$ )。根据比磨损率公式  $K = V_w/pS$  计算比磨损率,  $K$  为比磨损率,  $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $p$  为法向载荷,  $\text{N}$ ,  $S$  为滑动距离,  $\text{m}$ 。

## 2 结果与讨论

试样经双辉渗 Mo 处理后, 光学显微镜下的表面形貌如图 2(a) 所示, 在  $\text{Ar}^+$  和  $\text{Mo}^+$  的轰击下, 试样表面有刻蚀现象。图 2(b) 为渗层截面金相组织, 显示渗层均匀致密, 厚度为  $9.4 \mu\text{m}$ 。

图 3 表示 Ti6Al4V 合金及渗 Mo 处理后摩擦因数与滑动距离的关系。在初始跑合阶段, 摩擦因数随滑动距离的增加而急剧上升, 达到最高点后迅速下降, 出现一个尖峰, 随后经过不稳定态后摩擦因数趋于稳定, 进入稳定磨损阶段。Ti6Al4V 合金的摩擦因数为 0.55 左右。经过双辉离子渗金属处理后, 试样的摩擦因数有所增大, 与处理时  $\text{Ar}^+$  离子对表面的刻蚀有关。

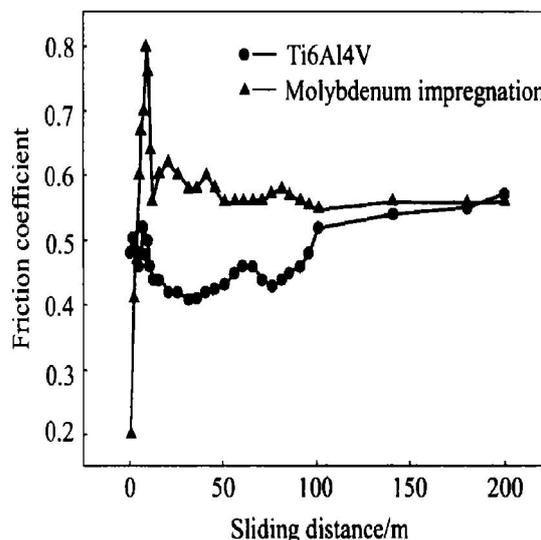


图 3 摩擦因数与滑动距离关系曲线

Fig. 3 Curves of relation between friction coefficient and sliding distance

表 2 所示为渗 Mo 试样及 Ti6Al4V 试样经 200 m 跑合距离后的比磨损率相对值。可以看到, 渗 Mo 处理试样比磨损率下降 2 个数量级。由此可见, 虽然经双层辉光离子渗 Mo 等工艺处理后的 Ti6Al4V 试样摩擦因数有所升高, 但其比磨损率却下降 2 个数量级, 表现出很优异的抗磨特性, 从而明显提高了 Ti6Al4V 合金的耐磨性。由图 4 可看出 Ti6Al4V 试样 100 m 行程的磨痕宽度远大于渗 Mo 试样 100 m 行程的磨痕。

表 2 200 m 跑合渗 Mo 合金层与 Ti6Al4V 的比磨损率相对值

Table 2 Relative wear rates of Mo-Ti film and Ti6Al4V alloy after 200m sliding

Sample	Wear rate compared with Mo-Ti film
Mo-Ti film	1
Ti6Al4V	104.2

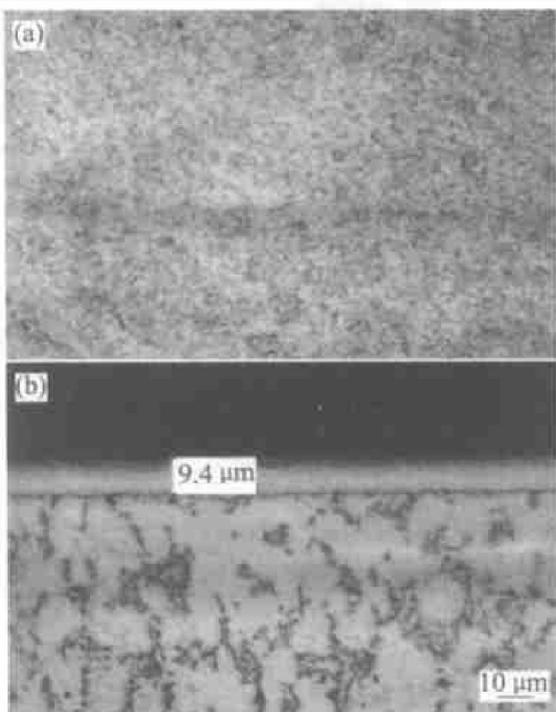


图 2 试样处理后表面形貌(a) 及渗层截面金相(b)

Fig. 2 Surface image (a) and section microstructure (b) after treatment

Ti6Al4V 的主要磨损机理是氧化磨损<sup>[8-10]</sup>。Ti6Al4V 表面的 Ti 容易形成  $\text{TiO}_2$  氧化薄膜, 而  $\text{TiO}_2$  薄膜脆性较大, 在接触应力的作用下易脱落, 裸露的表面又继续生成新的氧化薄膜而产生氧化磨损<sup>[11]</sup>。另外, 剥落的  $\text{TiO}_2$  磨屑不能及时排出还会导致磨粒磨损。Ti6Al4V 表面形成渗 Mo 合金层硬度较高, 渗层致密, 可屏蔽氧的渗入, 从而抑制并消除严重氧化磨损。在跑合阶段, 摩擦副相互接触, 由于试样表面存在许多微突体, 实际接触面积只占整个宏观接触面积的几千分之一, 使实际接触应力远大于名义接触应力, 接触点处的金属发生塑

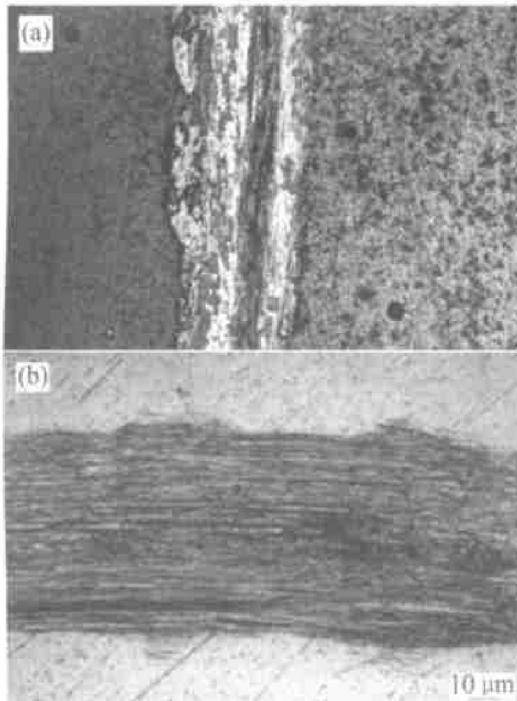


图4 渗 Mo 合金层 200 m 跑合磨损表面形貌(a) 及 基材 Ti6Al4V 合金 100 m 跑合磨损表面形貌(b)

Fig. 4 Morphologies of worn surface of Mo-Ti film after 200 m sliding (a) and Ti6Al4V alloy after 100 m sliding (b)

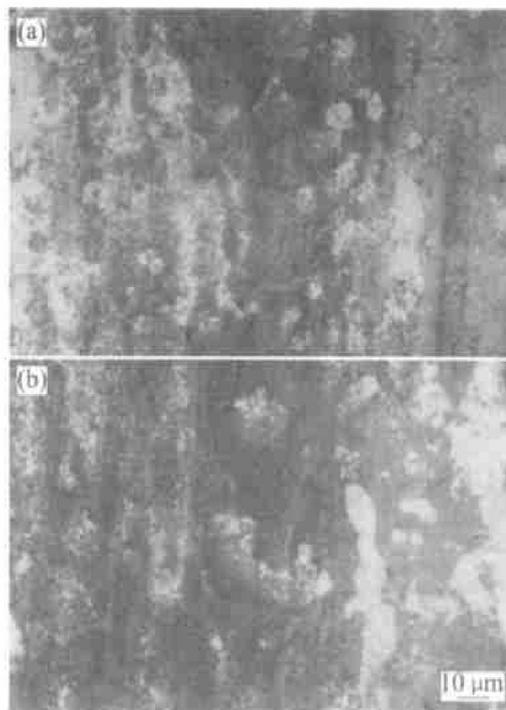


图5 渗 Mo 合金层 200 m 跑合后的磨损形貌

Fig. 5 Morphologies of worn surface of Mo-Ti film after 200 m sliding

性变形<sup>[11]</sup>, 致使整体接触的宏观应力场变为分散的微观应力场<sup>[12]</sup>。在这种微观应力作用下, 摩擦表面上的微凸体发生形变, 摩擦阻力增大。在这一阶段, 摩擦表面有较大的磨损并发热, 摩擦因数大且不稳定。随着接触面积逐渐加大, 摩擦因数变小, 并趋于稳定。

图5所示为渗 Mo 试样在跑合 200 m 后的磨痕, 垂直于摩擦方向有很整齐均匀的“皱纹”, 周围白亮物为摩擦副 GCr15 的转移物, 部分磨痕区域出现裂纹, 如图 5(b) 所示, 这可能是在接触应力重复作用下表层产生裂纹并长大所引起的。可以看出, 表面合金层磨损机制主要表现为粘着及少量微切削, 而 Ti6Al4V 基体主要为氧化颗粒的微切削。

### 3 结论

1) Ti6Al4V 合金表面经双层辉光离子渗钼处理后形成的钛钼合金渗层表现出较好的耐磨性能, 其耐磨性能提高 100 倍。

2) 钛钼合金渗层可有效保护 Ti6Al4V 基体, 其在干摩擦中的磨损机制主要是粘着及少量微切削, 而 Ti6Al4V 未处理的表面主要是氧化磨损。

### REFERENCES

[1] 彭艳萍, 曾凡昌, 王俊杰, 等. 国外航空钛合金的发展应用及其特点分析[J]. 材料工程, 1997(10): 3-6.  
 PENG Yarr ping, ZENG Fair chang, WANG Jurr jie, et al. Development, application and feature of titanium alloys in foreign aviation industry[J]. Journal of Materials Engineering, 1997(10): 3-6.

[2] 徐秀茹, 吴建社. 钛合金在能源工业中应用的最新发展[J]. 钛工业进展, 1998(6): 33-36.  
 XU Xiur ru, WU Jiarr she. New development of titanium alloys in energy industry[J]. Titanium Industry Progress, 1998(6): 33-36.

[3] 王国宏. 钛合金在航天火箭中的应用[J]. 钛工业进展, 1999(5): 26-27.  
 WANG Guo hong. Application of titanium alloys in aviation industry[J]. Titanium Industry Progress, 1999(5): 26-27.

[4] 徐重, 王振民, 古凤英, 等. 双层辉光离子渗金属技术[J]. 金属热处理学报, 1982(1): 71-83.  
 XU Zhong, WANG Zheir min, GU Feng ying, et al. Double glow plasma alloying technology[J]. Transactions of Metal Heat Treatment, 1982(1): 71-83.

[5] XU Zhong. US 4520268. 1985; US 4731539, 1988.

[6] 徐重. 等离子表面冶金技术的现状和发展[J]. 中国工程科学, 2002, 4(2): 36-41.  
 XU Zhong. Development of plasma surface metallurgy technology[J]. Engineering Science, 2002, 4(2): 36-41.

- [ 7 ] Broszeit E, Moatthes B, Herr W, et al. Tribological properties of r. f. sputtered Ti-B-C coatings under various pin on disc wear test conditions[ J ]. Surf Coat Technol, 1993, 58.
- [ 8 ] Clark I C, Mckellop H A. Handbook of Biomaterials Evaluation [ M ]. New York: MacMillan, 1986. 3 - 20.
- [ 9 ] Thompson N G, Buchanan R A. In vitro corrosion of Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V and type 316L stainless steel when galvanically coupled with carbon[ J ]. J Biomater Res, 1979( 13 ): 35 - 44.
- [ 10 ] Khan M A, Williams R L, Williams D F. Titanium Alloys Corrosion and Wear Studies in vitro [ A ]. Abstract 480, Transactions of 5<sup>th</sup> World Biomaterials Congress[ C ]. Toronto, 1996.
- [ 11 ] Zwaag S V D, Field J E. The effect of thin hard coatings on the Hertzian stress field[ J ]. Philosophical Magazine, 1982, A 46: 7.
- [ 12 ] Hogmark S, Hedengvist P. Tribological characterization of thin hard coatings[ J ]. Wear, 1994: 179.

## Friction and wear behavior of Ti-Mo diffusion layer on Ti6Al4V alloy substrate in sliding against GCr15

QIN Lin, TANG Bin, ZHAO Jing-xiang, XU Zhong

(Research Institute of Surface Engineering,  
Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Ti-Mo alloyed layers, whose friction and wear behavior against GCr15 was investigated under dry sliding by comparing with that of Ti6Al4V alloy against the same counterpart under the same testing condition, can be produced on the surfaces of Ti6Al4V alloy by Xu-Tec process. The worn surfaces of the tested samples were observed with optical microscope, as an effort to analyze the wear mechanisms. It has been found that the Ti-Mo film has good wear-resistant behavior in sliding and its wear rate is 100 times less than that of Ti6Al4V.

**Key words:** Ti alloy; Ti-Mo diffusion layer; friction and wear behavior

(编辑 彭超群)