

## Ti6Al4V 辉光等离子渗铝摩擦磨损性能研究

段良辉<sup>1,2</sup>, 刘亚萍<sup>1</sup>, 彭建盛<sup>3</sup>, 郭朝丽<sup>1</sup>, 潘俊德<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学表面工程研究所, 山西 太原 030024; 2. 江南机器集团有限公司科技部, 湖南 湘潭 411207;  
3. 广西河池学院物理与电子工程系, 广西 宜州 546300)

**[摘要]** 利用双层辉光等离子渗金属技术在 Ti6Al4V 上渗铝以提高材料的摩擦磨损性能, 对渗铝层的相结构和显微硬度进行了测试。采用球盘滑动磨损试验机对渗层进行摩擦磨损性能测试。结果表明: 渗铝后渗层由 Al<sub>3</sub>Ti 和 Al 组成, 材料的硬度值较基体 Ti6Al4V 有了很大的提高; 材料摩擦系数和磨损体积减小, 耐磨性得到提高。通过磨痕形貌分析可知, 渗层磨损机制为粘着磨损。可见采用辉光等离子渗铝技术改善了材料的摩擦磨损性能。

**[关键词]** Ti6Al4V; 渗铝; 摩擦磨损; 粘着磨损

**[中图分类号]** TG156.8; TG146; TH117

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2007)01-0005-03

## Friction and Wear Behavior of Aluminized Ti6Al4V by Glow Discharge Plasma Surface Modification

DUAN Liang-hui<sup>1,2</sup>, LIU Ya-ping<sup>1</sup>, PENG Jian-shen<sup>3</sup>, GUO Chao-li<sup>1</sup>, PAN Jun-de<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Surface Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;  
2. R&D Department of Jiangnan Machinery Co., Ltd, Xiangtan 411207, China;  
3. Department of Physics and Electron, Hechi College, Yizhou 546300, China)

**[Abstract]** An aluminized layer was formed on the surface of Ti6Al4V substrate by using the double glow discharge plasma surface modification process, the phase structure and micro-hardness of the layer were analyzed, also the friction and tribological behavior of the layer were investigated by a ball on disk sliding wear machine. The results indicate that the aluminized layer is composed by Al<sub>3</sub>Ti and Al and the micro-hardness of samples increases significantly; besides the wear test results show that the coefficient of friction and the wear volume decrease after aluminizing. From the wear scar we know that the wear mechanism is adhesion wear. Thus it is feasible to improve the friction and wear properties by glow discharge plasma surface modification.

**[Key words]** Ti6Al4V; Aluminizing; Friction and wear; Adhesion wear

## 0 引言

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。但钛合金的摩擦因数大、耐磨性较差, 这使它的应用受到一定的限制。目前已有一些技术能提高钛合金的表面性能, 如利用固态渗氮、离子氮化、等离子喷涂、激光气体表面合金化等表面技术来提高钛合金的耐磨性, 但是它们各有一定的缺点和局限性<sup>[1-3]</sup>。双层辉光离子渗金属技术主要是利用空心阴极辉光放电来工作的, 它合理安排两个阴极, 使两个阴极的负辉区叠加, 使从一个阴极发出的电子在它自己的阴极位降区被加速, 而在另一个阴极的阴极位降区又被减速, 电子在两阴极间来回振荡, 被电离和激发, 增加电子和气体分子的碰撞几率, 引起

更多激发和电离过程, 形成等离子区, 被激发和电离的粒子不断撞击被处理试样, 一方面试样温度上升, 另一方面, 粒子在试样表面沉积和扩散, 形成具有特殊物理、化学性能和机械性能的渗层。其主要优点是: 成分、硬度呈梯度分布, 不存在“膜基结合力”问题; 合金层成分基本可控, 成分变动范围大, 这是许多传统表面处理方法所难以做到的<sup>[4]</sup>。本文采用双层辉光离子渗金属技术对 Ti6Al4V 进行表面渗铝处理, 在 Ti6Al4V 表面形成了渗铝层, 并采用球盘滑动磨损试验机对渗铝后材料的摩擦磨损性能进行研究。

## 1 试验方法

### 1.1 试样制备

将退火态 Ti6Al4V 合金棒材加工成  $\phi 30\text{mm} \times 5\text{mm}$  的圆盘状试样, 基材成分(质量分数)为 6.7% Al; 4.21% V; 0.07% Si; 0.10% Fe; 0.03% C; 0.14% O; 0.015% N; 0.003% H; Ti 余量, 表面平均硬度 HV345。利用双层辉光离子渗金属技术在 Ti6Al4V 合金表面渗铝后制成磨损试样<sup>[5]</sup>。渗铝工艺是: 温度

**[收稿日期]** 2006-08-08

**[基金项目]** 山西省自然科学基金资助项目 20041065。

**[作者简介]** 段良辉(1980-), 男, 湖南株洲人, 硕士, 主要研究方向为钛合金表面改性。

1150℃;气压 80Pa;保温时间 3 h;两极距离 15 mm。

## 1.2 检测方法

采用 AXIOVERT25 图像分析仪分析渗层金相组织。采用日本产 Leco M-400-H1 型显微硬度计进行表面硬度测试,载荷为 5g。采用日本理学 Rigaku D/max 2500 型 XRD 衍射仪测定渗层相结构,使用 Cu(K<sub>α</sub>) 靶。采用中国科学院兰州物理化学研究所 WTM-1E 型可控气氛微型摩擦磨损试验机,对 Ti6Al4V 基体和最优工艺参数条件下所得渗铝试样进行销盘磨损试验,测试和比较 Ti6Al4V 基体和渗铝后试样的比磨损率(mm<sup>3</sup>/N·m)和磨损体积(mm<sup>3</sup>),研究渗铝后材料的耐磨性。测试条件:碳素钢球对磨材料,直径 φ4mm;载荷为 100g;转速为 1000r/min;环境温度为 (20 ± 2)℃;电机转速为 7m/min;磨痕轨迹半径为 4mm。磨损体积计算采用文献[6]中的计算方法:

$$V_w = \frac{\pi \cdot r \cdot h(3h^2 + 4w^2)}{3w}$$

其中,  $V_w$  是磨损体积,mm<sup>3</sup>;  $r$  是磨痕轨道半径,mm;  $h$  是磨痕深度,mm;  $w$  是磨痕宽度,mm。根据的公式  $K = V_w / (P \cdot s)$  求得比磨损率<sup>[6]</sup>。其中,  $K$  为比磨损率,mm<sup>3</sup>/N·m;  $V_w$  为磨损体积,mm<sup>3</sup>;  $P$  为载荷,N;  $s$  为滑动距离,m。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 渗层相结构与常规力学性能

渗铝后材料的断面形貌如图 1a 所示。可见渗铝后在 Ti6Al4V 表面形成了渗层,该渗层由沉积层和扩散层组成,基体为较粗大的 α + β 组织。图 1b 为渗铝后材料沿深度方向的硬度曲线,可以看出渗铝后材料的硬度较 Ti6Al4V 基体的 345HV 得到了很大的提高,在距表面 12.5μm 处硬度值达到 728 HV,整个曲线呈梯度下降,用显微硬度计测得从材料表面至硬度降为基体硬度处的渗层厚度约为 500μm。

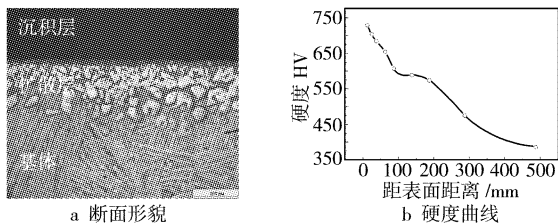


图1 渗铝后试样横截面的组织形貌及渗铝后材料硬度曲线  
Figure 1 Cross-section morphology and micro-hardness curve of aluminized Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>

采用 X 射线对渗铝后的渗层进行相分析,结果如图 2 所示。由图 2 可见,渗铝后渗层由 Al 和 Al<sub>3</sub>Ti 组成,这与 Ti-Al 相图基本一致。Al 在材料中起到了固溶强化作用,Al<sub>3</sub>Ti 为金属间化合物。

### 2.2 摩擦因数

摩擦因数是衡量材料摩擦学性能的重要指标之一。在相同条件下,对于相同的摩擦副,摩擦因数越小,耐磨性越好;反之,则耐磨性越差。图 3 为渗铝前后的试样摩擦因数与滑动距离的曲线。可见,在跑合阶段,由于表面存在许多微突体,实际接触面积很小,实际接触应力远大于名义接触应力,接触点处的金属

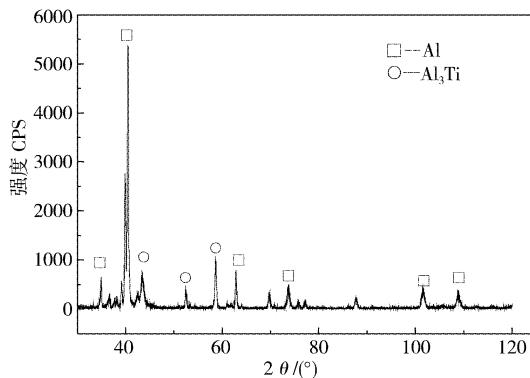


图2 渗层的 X 射线衍射

Figure 2 XRD pattern of layer after aluminizing

发生塑性变形,致使整体接触的宏观应力场变为分散的微观应力场<sup>[7]</sup>。在这种微观应力作用下,摩擦表面上的微凸体发生变形,摩擦阻力增大,摩擦表面有较大的磨损并发热,摩擦因数大且不稳定。进入稳定磨损阶段,接触面积逐渐加大,摩擦因数变小,并趋于稳定<sup>[8]</sup>。基体材料在跑合阶段,摩擦因数随滑动距离的增加而急剧上升,在 20 ~ 80m 处进入稳定阶段,平均摩擦因数为 0.397。渗铝后试样在跑合阶段直到稳定阶段基本上没有什么变化,平均摩擦因数为 0.188。可见,试样经渗铝后,摩擦因数大大减小,渗铝对材料起到了一定的减摩作用。

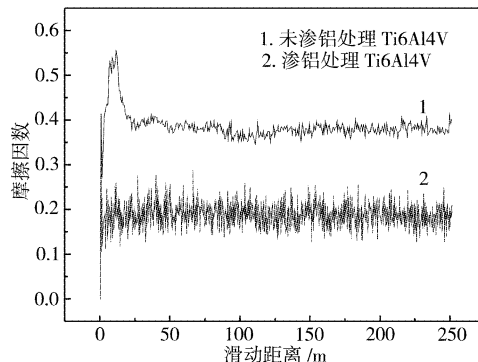


图3 渗铝前后的摩擦因数和距离的曲线  
Figure 3 Coefficient of friction to distance curves of non-aluminized and aluminized Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V

### 2.3 磨损性能

图 4 是 Ti6Al4V 基体和渗铝处理试样经过 250m 滑动行程的磨损形貌。Ti6Al4V 基体磨痕宽度为 670μm 左右,磨痕范围较大。渗铝试样的磨痕宽度较基体 Ti6Al4V 明显减小,磨痕宽度为 400μm 左右。基体 Ti6Al4V 的磨损以磨粒磨损和粘着磨损为主,渗铝后材料的磨损为粘着磨损。渗铝后由于材料硬度的提高,刚开始与钢球接触的只有那些较硬的微凸体,随着微凸体逐渐被磨平,从试样表面剥落的渗层碎片由于与钢球的剪切强度大于它与试样的剪切强度,因而被粘在钢球上,其硬度很高,会对试样产生犁削和微切削作用,在图 4b 上表现为一个个的犁坑。随着滑动时间的延长、金属的转移和磨损过程继续,磨屑的尺寸逐渐变小,且与钢球对磨的渗铝处理试样由于亚表层材料比表层材料软,在试样上形成涂抹层对试样产生抛光作用(在图 4b 中表现为白亮层),在摩擦中起到一定的润滑作用,从一定程度上减轻了材料磨损。文献[9]认为,对硬质镀层而言,

磨损主要是以抛光和疲劳剥落两种方式进行,总磨损量  $\Delta W = \Delta W_p + \Delta W_s$ 。提高镀层硬度能明显减少  $\Delta W_p$ ,而经渗铝处理后材料的硬度较基体 Ti6Al4V 提高了 2 倍以上,所以硬度的提高能减小  $\Delta W_p$ ,进而有助于材料的抗磨损。而疲劳磨损量  $\Delta W_s$  主要取决于膜基结合强度及镀层自身韧性。对于双层辉光渗金属技术而言,由于渗层成分可控、硬度呈梯度分布,不存在“膜基结合力”问题,膜基结合强度高,因此从另一方面也可以提高材料的抗磨损性能。

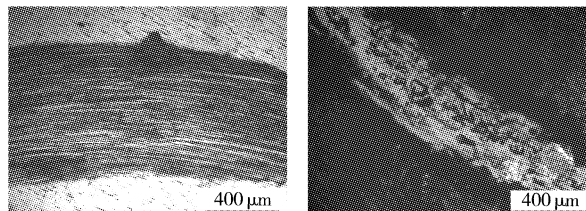


图 4 滑动 250m 后的基材 Ti6Al4V 和渗铝 Ti6Al4V 的磨损痕形貌  
Figure 4 Wear scar of of Ti6Al4V and aluminized Ti6Al4V after 250m sliding distance

根据文献[6]计算摩擦磨损过程中的磨损体积和比磨损率,结果见表 1。渗铝后材料的磨损体积仅为  $0.0080\text{mm}^3$ ,较基体 Ti6Al4V 的  $0.02173\text{mm}^3$  下降了 1 个数量级以上,渗铝后比磨损率也降低了 1 个数量级以上。由此可见,渗铝后材料的摩擦磨损性能得到很大的提高。

表 1 基体 Ti6Al4V 与渗铝后的磨损结果

Table 1 Wear results of Ti6Al4V substrate and aluminized Ti6Al4V

试样	磨痕宽度 $w/\text{mm}$	磨痕深度 $h/\text{mm}$	磨损体积 $V_w/\text{mm}^3$	比磨损率 $K/(\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$
Ti6Al4V	0.67	0.0283	0.3172	$12.88 \times 10^{-4}$
渗铝试样	0.4	0.0080	0.0268	$1.094 \times 10^{-4}$

### 3 结 论

- 1) 渗铝后渗层由  $\text{Al}_3\text{Ti}$  和 Al 组成,金属间化合物  $\text{Al}_3\text{Ti}$  的存在和 Al 的固溶强化对材料硬度的提高有很大作用。
- 2) 渗铝后材料的摩擦因数和磨损体积都得到很大降低,比磨损率为  $1.094 \times 10^{-4}\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ,降低了 1 个数量级以上。
- 3) 渗铝后材料的磨痕宽度明显减小,渗层磨损机制为粘着磨损。

### [参 考 文 献]

- [1] Akgun O, Inal O T. Laser surface modification of Ti6Al4V alloy[J]. Journal of Materials Science, 1994, 29:1159-1168
- [2] Tair, Wu I, Wu Tian Kuo. Effect of temperature and current density on the surface hardness and tribological properties of Ti6Al4V alloy by molten salt carburization[J]. Surf. Coat. Tech. 1997, 90:258-267
- [3] 秦林,唐宾,刘道新,等.钛合金 Ti6Al4V 表面 Mo-N 改性层的摩擦性能研究[J].稀有金属材料与工程,2005,34(9):1465-1468
- [4] 徐重.离子表面冶金技术的现状与发展[J].中国工程科学,2002,4(2):36-41
- [5] 段良辉,刘亚萍,潘俊德,等.钛合金表面双层辉光离子渗铝的研究[J].热加工工艺,2005,(6):40-41
- [6] 何奖爱,王玉玮.材料磨损与耐磨材料[M].沈阳:东北大学出版社,2001.12
- [7] Sture Hogmark, Per Hedenqvist. Tribological characterization of thin, hard coatings[J]. Wear, 1994, 1799(7):147-154
- [8] Neale M J. Tribology Handbook[M]. London: Butterworths, 1973. 787-790
- [9] Clark I C, McKellop H A. Handbook of Biomaterials Evaluation [M]. New York: MacMillan, 1986. 568-569

## 热烈庆祝“2006 重庆汽车摩托车腐蚀与老化技术研讨会”圆满召开

由国防科技工业自然环境试验研究中心和美国 Q-Lab 公司共同主办的“2006 重庆汽车摩托车腐蚀老化技术研讨会”已圆满结束。会议主办方国防科技工业自然环境试验研究中心在腐蚀与老化领域享有国内权威称誉,此次与美国 Q-Lab 公司合作举办研讨会,旨在将其办成西南地区最权威且最具影响力的腐蚀与老化技术的年度研讨会。

本次研讨会邀请到了中国兵器工业第五九研究所副所长陈文毅和南方汽车工业股份有限公司王翀经理为会议致词,与会代表 150 余人,来自包括重庆长安福特有限公司、长安铃木有限公司、长安福特马自达有限公司、重庆建设摩托等汽摩行业各个领域,可谓规模空前。

来自长安汽车研究院的专家对汽车车身耐腐蚀分析及新工

艺技术发表了演讲,其对汽车涂装新工艺的介绍为汽车行业提供最新信息。国防科技工业自然环境试验研究中心副主任张伦武博士就如何进行汽车环境测试展开了探讨,并介绍了国防科技工业自然环境试验研究中心在耐老化方面的能力介绍。四川大学的博士则介绍了无机纳米材料改型工程塑料抗老化应用研究。

与会人员除了与来自国防科技工业自然环境试验研究中心的专家们分享了腐蚀与老化领域的最新信息最新技术,还参观了国防科技工业自然环境试验研究中心实验室。从会议回执表显示,与会人员对“2006 重庆汽车摩托车腐蚀老化技术研讨会”给予了极高评价,并期待下一届腐蚀与老化技术研讨会的召开。

如欲了解更多详情,请致电国防科技工业自然环境试验研究中心,电话:023-68792180。