

钛合金表面双层辉光离子无氢渗碳层 摩擦磨损性能研究

张高会, 潘俊德, 张平则, 崔彩娥, 唐 宾, 徐 重

(太原理工大学 表面工程研究所, 山西 太原 030024)

摘要: 利用双层辉光放电离子渗碳原理, 以格栅状高纯度固体石墨作为源极, 钛合金作为阴极, 氩气作为工作气体, 依靠辉光放电和空心阴极效应在钛合金 (Ti6Al4V) 材料表面制备了具有特殊物理、化学性能的渗碳层; 采用 X 射线衍射和辉光放电光谱分析了渗碳层的相组成及 C 元素分布; 并考察了渗层的摩擦磨损性能. 结果表明: 复合渗碳层中形成了高硬相 TiC 及游离态 C 减摩相; 渗层内 C 元素的含量呈梯度分布; 经复合渗碳处理后材料的表面硬度大幅度提高, 由表及里硬度成梯度降低; 经渗碳处理后材料的减摩和抗磨性能显著改善, 摩擦系数降低 50% 以上, 比磨损率降低 3 个以上数量级.

关键词: 钛合金; 双层辉光; 无氢渗碳; 摩擦磨损性能

中图分类号: TG115.221.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2004)02-0111-04

钛合金因其优异的特性而被广泛应用于航空、航天等领域^[1,2]. 但钛合金的摩擦学性能较差, 对粘着磨损和微动磨损非常敏感. 对钛合金进行表面渗碳处理是提高其耐磨性能的重要途径. 目前渗碳方法主要有气体渗碳法、真空渗碳法和等离子渗碳法等, 其所使用的渗碳气体均含有氢元素, 在渗碳的同时有氢元素渗入到基体中, 进而可导致钛合金氢脆, 使材料的塑性、韧性及抗拉强度降低, 在钛表面出现裂纹、脱皮及断裂等现象^[3,4]. 针对这一问题, 我们用双层辉光放电离子无氢渗碳技术, 在 Ti6Al4V 合金表层形成包含游离 C 和 TiC 成分的扩散层, 从而在改善钛合金减摩抗磨性能的同时, 避免钛合金氢脆^[5].

要组成部分包括炉体、电器柜、供气系统、测温系统及冷却系统等^[6,7], 图 1 示出了其结构示意图. 以高纯度

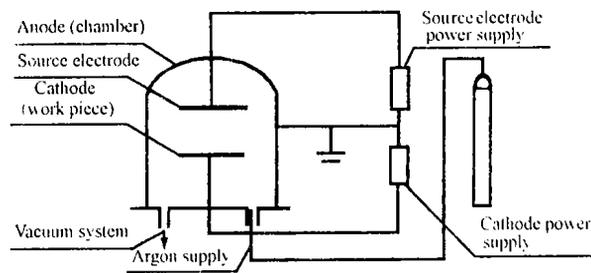


Fig 1 Schematic of double glow plasma surface alloying installation

图 1 双层辉光离子渗金属装置示意图

1 实验部分

1.1 材料

先将退火态 TC4 钛合金 (6.7% Al, 4.21% V, 0.07% Si, 0.10% Fe, 0.03% C, 0.14% O, 0.015% N, 0.003% H, 余量为 Ti) 基材制成 30 mm × 5 mm 的圆片试样, 经清洗、水砂纸磨光 (240# 1 000#)、抛光、超声清洗后装炉.

1.2 试验设备

采用自行研制的双层辉光离子渗金属设备, 其主

格栅状固体碳作为源极, 钛合金作为阴极, 氩气作为载气, 在一定的气压、阴极电压及源极电压下, 依靠空心阴极效应由氩离子轰击石墨源极, 溅射出的碳粒子流 (包括离子、原子等) 在阴极的负偏压作用下流向阴极表面, 并依靠扩散而渗碳. 渗碳工艺参数: 阴极电压为 300 V、阴极电流 0.3 A, 源极电压 600 V、源极电流 3 A, 温度 960 °C, 工作气压 35 Pa, 源极距工件距离 5 mm, 保温时间 2.5 h.

采用 NEOPHOTO-21 型光学显微镜观察渗碳

基金项目: 山西省自然科学基金资助项目 (20011048); 山西省留学生资助项目 (101055); 国家自然科学基金资助项目 (50371060).

收稿日期: 2003-06-24; 修回日期: 2003-11-13; 联系人徐重, e-mail: zhongxu37@sohu.com.

作者简介: 徐重, 男, 1937 年生, 教授, 博士生导师, 目前主要从事钛合金表面改性研究.

试样的金相结构及磨损表面形貌;采用日本理学电机 Rigaku D/max 2500 型 X 射线衍射仪(XRD)分析试样相组成;采用辉光放电光谱仪(GDS)检测渗层成分(德国产 GDA-2 型试验机);采用日本产 Leco M-400-H1 型硬度计测定渗碳试样的硬度.

采用西安交通大学研制的 BDW-2 型球-盘摩擦磨损试验机评价渗碳试样的摩擦磨损性能. 试验条件为:环境温度 15 ,相对湿度 16 % ,转速 110 r/min ,载荷 10 N;偶件为直径 4.75 mm 的 GCr15 钢球. 采用 TR-240 型粗糙度仪测量试样磨痕深度 t (分辨率为 0.01 μm),采用光学显微镜测量试样磨痕宽度 b 和半径 r ,进而经计算得到磨损体积损失.

2 结果与分析

2.1 渗碳层组织及性能

图 2 示出了渗碳层组织形貌金相显微照片. 可以



Fig 2 Optical micrograph of carburized layer of Ti6Al4V (400 \times)

图 2 Ti6Al4V 表面渗碳层结构光学显微照片 ($\times 400$)

看出,TC4 钛合金试样经渗碳处理后表面形成了结构复杂、相界面清晰的渗碳层,渗层厚度约为 130 μm . 图 3 示出了渗碳试样的 XRD 图谱. 可见 TC4 钛合金试样表面渗碳层含四方晶系 TiC、石墨状 C、AlTi₃ 及 V 等,由于 TiC 硬度高(仅次于金刚石)、摩擦系数和密度较小(同 WC 和 TaC 等比较),且能与碳形成固溶体,故渗层的硬度较高,摩擦系数较低.

图 4 示出了渗碳层成分 EDS 分析结果(取 3 点平均值). 可以看出, Ti6Al4V 经渗碳处理后最表层碳元素含量很高,钛元素含量较低;距表面 0.02 μm 处 C 和 Ti 含量分别为 91.04 % 以及 7.34 %;距离表面 0.06 μm 处的 C 和 Ti 含量分别为 48.27 % 以及 50.91 %;此后随着离表面距离的增加,C 含量迅速降低, Ti 含量增加;距离表面 1.00 μm 处 C 的含量降低

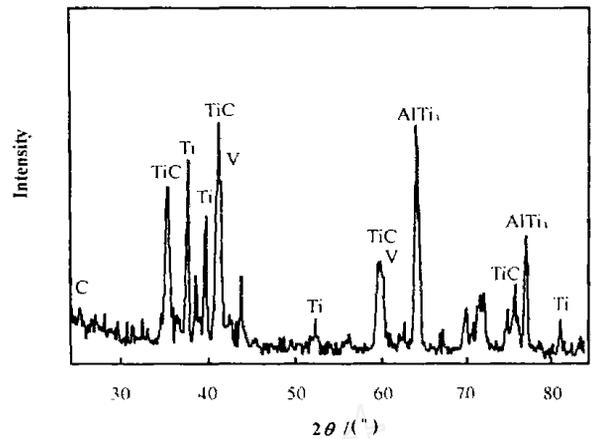


Fig 3 XRD pattern of carburized layer of Ti6Al4V

图 3 Ti6Al4V 表面渗碳层 XRD 图谱

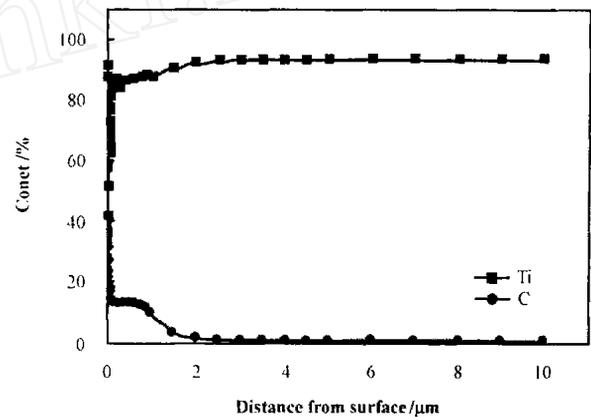


Fig 4 Ti and C concentration in carburized layer of Ti6Al4V

图 4 Ti6Al4V 表层 Ti、C 元素含量曲线

至 9.59 % ,距表面 4.50 μm 处的 C 元素含量降低至 0.16 % ,Ti 含量则接近 100 % . 渗碳层中 C 含量的分布与扩散规律基本相符.

图 5 示出了渗碳层硬度沿深度方向变化的关系

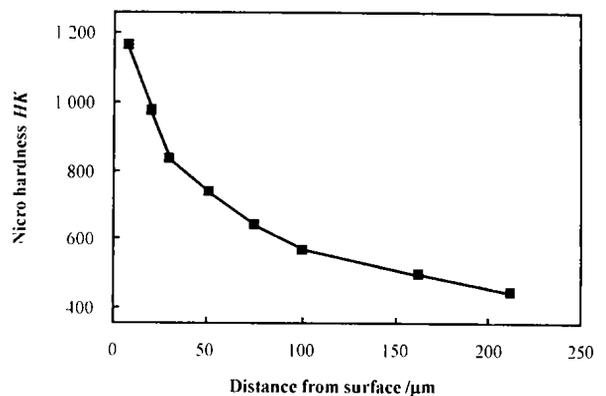


Fig 5 Microhardness of carburized layer of Ti6Al4V

图 5 Ti6Al4V 渗碳后的硬度曲线

曲线. 可以看出, 经过渗碳处理的钛合金表面的硬度

高达 1 200 *HK* 左右,同基体试样相比提高了近 3 倍,且硬度沿渗层深度方向呈梯度降低. 硬度提高的原因主要在于渗层内形成了硬质相 TiC ,而碳含量及相应的 TiC 生成量沿渗层深度方向的梯度降低导致了渗碳改性层的硬度沿深度方向的梯度降低. 材料表面硬度的梯度变化预示其摩擦磨损性能亦可能具有梯度变化特征,表面硬度提高则有利于抗磨性能的改善.

2.2 渗碳改性层的摩擦磨损性能

图 6 示出了经渗碳处理的 $Ti6Al4V$ 合金试样同

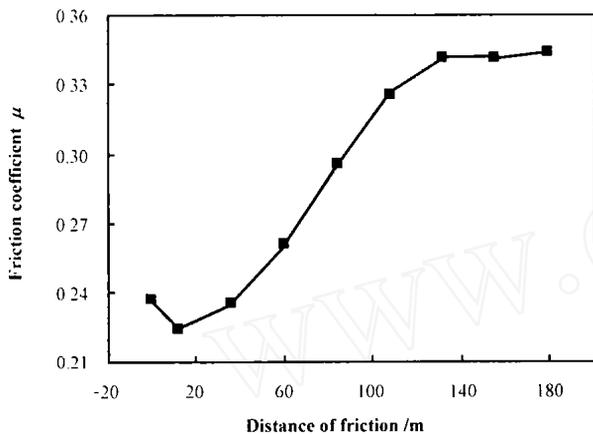


Fig 6 Friction coefficient curve of carburized $Ti6Al4V$

图 6 渗碳 $Ti6Al4V$ 试样同 $GCr15$ 钢球对摩时的摩擦系数随滑动距离变化的关系曲线

$GCr15$ 钢球对摩时的摩擦系数随滑动距离变化的关系曲线. 可以看出,在摩擦起始阶段,摩擦系数随滑动距离增加而有所降低,随后摩擦系数随滑动距离增加而逐渐增大;当滑动距离达到 130 m 时,摩擦系数增大至 0.34 并进入平台区. 总体而言,同 $Ti6Al4V$ 基体试样在相同条件下的摩擦系数(0.45)相比,经渗碳处理后试样的摩擦系数明显较低.

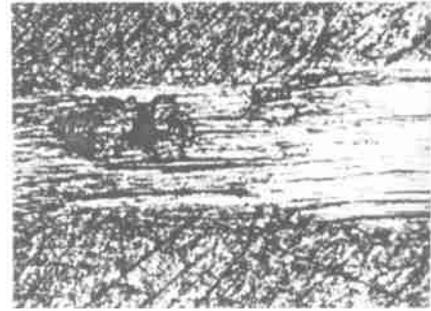
比磨损率是衡量材料抗磨性能的重要指标. 定义比磨损率为: $W_R = W_V / (p \cdot S)$, 其中 W_V 为磨损体积损失, p 为法向载荷, S 为滑动距离, 磨损体积损失:

$W_V = \frac{1}{6b} (3t^3 + 4b^2) 2r$, 其中: t 是磨痕深度(单位 mm); b 是磨痕宽度(单位 mm); r 是磨痕半径(单位 mm).

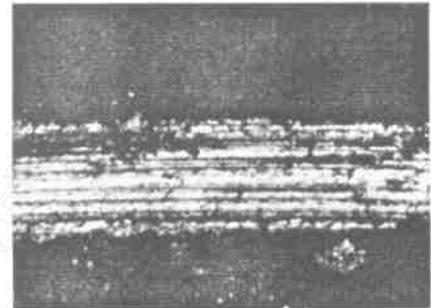
经测量磨痕并计算得到未经处理 $Ti6Al4V$ 比磨损率为 $2.17 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, 经无氢渗碳处理 $Ti6Al4V$ 比磨损率为 $6.75 \times 10^{-8} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$. 可见经无氢渗碳处理后 $Ti6Al4V$ 合金的比磨损率降低了 3 个以上数量级.

2.3 磨损表面分析

图 7 为 $Ti6Al4V$ 基体试样(滑动距离 100 m)及



(a) $Ti6Al4V$ matrix against $GCr15$ for 100 m



(b) Carburized $Ti6Al4V$ against $GCr15$ for 200 m

Fig 7 Optical micrographs of worn surfaces of $Ti6Al4V$ (a) and carburized $Ti6Al4V$ sliding against $GCr15$ steel ball for 100 m and 200 m respectively (50 \times)

图 7 $Ti6Al4V$ 及渗碳 $Ti6Al4V$ 磨损表面形貌光学显微照片($\times 50$)

渗碳改性 $Ti6Al4V$ 试样(滑动距离 200 m) 磨损表面形貌光学显微照片. 可以看出, 未经处理的 $Ti6Al4V$ 基体同 $GCr15$ 钢对摩时主要呈现磨粒磨损和粘着磨损特征[见图 7(a)]; 而经渗碳处理的 $Ti6Al4V$ 试样主要呈现磨粒磨损特征, 粘着磨损则显著减弱[见图 7(b)]. 2 种试样磨损表面形貌特征的不同取决于其表层结构、组成及机械性能的不同. 较软的 $Ti6Al4V$ 基体易被擦伤并发生粘着, 而较硬的 $Ti6Al4V$ 表面渗碳改性层抵抗塑性变形及粘着磨损的能力明显提高, 故即使在较长的滑动距离下其磨损表面的擦伤迹象仍较弱.

3 结论

a. 钛合金 $Ti6Al4V$ 经双层辉光离子无氢渗碳处理后形成由四方晶系 TiC 、石墨状 C 、 $AlTi_3$ 及 V 等组成的改性表层, 从而使表层硬度显著提高.

b. $Ti6Al4V$ 合金经双层辉光离子无氢渗碳处理后摩擦磨损性能显著改善, 这是由于渗碳处理导致其表层结构、组成及硬度等发生显著变化所致.

参考文献:

[1] Gorynin I V. Titanium alloys for marine application[J]. Materials

- Science and Engineering, 1999, A236:112-116.
- [2] Bloyce A, Morton P H, Bell T. Surface engineering of titanium and titanium alloys[J]. Surface Engineering, 1994, 5: 835-851.
- [3] Zhang G H, Zhang P Z, Guo L N, *et al.* Phase structure and brittleness of titanium alloys carburized in the absence of hydrogen[C]. Proceeding of 5th International Symposium on Test and Measurement, Shenzhen, China, 2003.
- [4] Zhang W G(张文光), Wang C T(王成焘), Liu W M(刘维民). Tribological behavior of surface-modified layers on Ti alloy(钛合金表面改性层的摩擦学性能)[J]. Tribology(摩擦学学报), 2003, 23 (2):91-94.
- [5] Pan J D(潘俊德), Chen F(陈飞), Zhang G H(张高会), *et al.* Study on arc-added glow discharge plasma carburizing without hydrogen of titanium alloy surface(钛合金表面加弧辉光离子无氢渗碳的研究)[J]. Journal of Yunnan University(云南大学学报), 2002, 24 (6B): 137-140.
- [6] Xu Z. Development of plasma surface metallurgy technology[J]. Engineering Science, 2002, 4: 36-41.
- [7] Li Ch M, Xu Zh, Tian L H, *et al.* Relativity of plasma parameters and process parameters in ion surface alloying[J]. Journal of Non-ferrous Metals(有色金属学报), 2003, 13 (2): 311-314.

Friction and Wear Behavior of Double Glow Plasma No-Hydrogen Carburized Layer on Titanium Alloy

ZHANG Gao-hui, PAN Jun-de, ZHANG Ping-ze, CUI Cai-e, TANG Bin, XU Zhong
(Research Institute of Surface Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract : The carburized layer with special physical and chemical properties was prepared on the surface of titanium alloy Ti6Al4V making use of double glow discharge plasma carburizing technique and hollow cathode effect, with a netlike highly pure graphite as the source cathode, titanium alloy as the cathode, and Ar as the working gas. The phase compositions and C distribution of the carburized layer were determined by means of X-ray diffraction and glow discharge spectrometry. The friction and wear behavior of the carburized Ti6Al4V alloy specimen sliding against GCr15 steel was evaluated on a BDW-2 ball-on-disc test rig. The microhardness of the carburized layer was measured, the elemental composition of the carburized layer determined by means of energy dispersive spectrometry, and the metallographic structure and worn surface morphologies of the carburized specimen were observed on an optical microscope. It was found that hard phase TiC was formed in the carburized layer, which contributed to increasing the hardness and wear resistance of the carburized surface. The improvement in the friction and wear behavior of the carburized specimen was attributed to the changes in the composition, structure, and hardness by the carburizing.

Key words : titanium alloy; double glow; carburizing without hydrogen; friction and wear behavior

Author : ZHANG Gao-hui, male, born in 1964, Associate Professor, e-mail: ghzhangh@163.com