doi：10.3969/j.issn.1007-9289.2013.05.009

T10 钢双辉离子渗钛层的组织及摩擦学性能 *

洪晓露[1]，王 馨[1]，杨佼源[1]，季诚昌[2]，韦习成[1]
（1. 上海大学 材料科学与工程学院，上海 200072；2. 东华大学 材料科学与工程学院，上海 201620）

摘 要： 采用双层辉光离子渗金属技术，在 T10 钢表面进行渗钛，研究了渗钛层的显微组织和摩擦磨损性能。利用超景深三维显微系统、X 射线衍射仪、显微硬度计、能谱仪等分别对渗钛层的组织、相结构、硬度及元素的浓度分布进行检测和分析，用 MM-W1 万能摩擦磨损试验机研究了渗层的摩擦磨损性能。结果表明：T10 钢双辉渗钛后可在表面形成均匀、致密且与基体结合良好的 TiC 层，渗钛层硬度达到 1 100 $HV_{0.01}$ 以上，且呈平缓的梯度下降。与未处理的 T10 钢相比，渗钛层的磨损率明显降低，耐磨性增强。

关键词： 双辉离子渗钛；显微组织；摩擦学性能；T10 钢
中图分类号： TG174.445；TG115.58 **文献标识码：** A **文章编号：** 1007-9289(2013)05-0049-05

Microstructure and Tribological Properties of Double Glow Plasma Titanizing Layer of T10 Steel

HONG Xiao-lu[1], WANG Xin[1], YANG Jiao-yuan[1], JI Cheng-chang[2], WEI Xi-cheng[1]
(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072; 2. School of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620)

Abstract: The titanized layer was prepared on the surface of T10 steel using a double glow plasma surface alloying technique, and its microstructure and tribological properties were studied. The microstructure, phases, microhardness and composition distribution of the titanized layer were characterized by metallographic photos OM(OM), X-ray diffraction(XRD), microhardness tester, and energy disperisve spectrometer(EDS), respectively, The tribological properties were detected by MM-W1 friction and wear tester. The results show that the TiC layer formed on the sample surface is homogeneous, dense, and metallurgically combines with the substrate. The microhardness of the titanized layer is up to 1 100 $HV_{0.01}$, and gradually decreases with the depth. Compared with the as-received substrate, the friction coefficient of the titanized layer is reduces, exhibiting excellent wear properties.

Key words: double glow plasma titanizing; microstructure; tribological properties; T10 steel

0 引 言

众所周知，TiC 有着很高的硬度和耐磨性，可广泛应用于各种切削工具和耐磨零部件表面。通常，在零件表面形成 TiC 层的方法主要有 PVD、CVD[1]、激光熔覆、离子注入、等离子溅射沉积[2]、激光熔覆[3]等。然而，处理后的 TiC 层厚度往往不足以确保零件的耐用性，其性能和结构与基体的不同使得表层残余应力随厚度增加而增大，开裂的危险性也随之增大[4]。

双层辉光离子渗金属(Double glow plasma surface alloying, DGPSA)技术是一种新型的表面改性技术。1980 年初，我国学者在离子氮化的基础上，利用辉光放电和离子轰击开发出固态金属元素在碳钢表面形成合金渗层的表面强化技术[5]。由于该技术渗速快、渗层均匀、劳动条件好和无污染，因而有着极大的经济效益和推广价值。

收稿日期： 2013-07-11；**修回日期：** 2013-09-03；**基金项目：** * 国家自然科学基金(50975166)
作者简介： 洪晓露(1988—)，女(汉)，浙江宁波人，硕士生；**研究方向：** 等离子表面强化

网络出版日期： 2013-09-25 16：36；**网络出版地址：** http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130925.1636.002.html
引文格式： 洪晓露，王馨，杨佼源，等. T10 钢双辉离子渗钛层的组织及摩擦学性能[J]. 中国表面工程，2013，26(5)：49-53.

同时，它可获得合金含量呈梯度分布的合金层，并与基体之间呈冶金结合，实现了表面层与基体间足够的厚度和良好结合，显著改善了材料的表面性能[6-7]。在当今世界要求环保和节能的大环境下，DGPSA 技术的应用必将会成为一种趋势。

目前，DGPSA 技术已成为提高金属材料表面耐磨性、耐蚀性、抗高温氧化性等的重要手段之一。如在钢铁材料表面形成 W-C[8]、W-Mo[9]、W-Mo-Co[10]、W-Mo-Y[11]等表面耐磨层，高 Cr 的 Cr-Mo[12]、Cr-Ni-Mo-Cu[13]、Cr-Ni-Mo-Co[14]等抗高温氧化的合金层，Fe-Al[15]耐腐蚀层以及 Ni 基合金[7]、Ti 基合金[16]、Nb 合金[17]等表面超合金层[18]。但对于在高碳钢表面进行渗钛的研究却很少。

文中采用 DGPSA 技术，通过对 T10 钢进行表面渗钛处理，检测渗后试样的显微组织和摩擦磨损性能，以提高 T10 钢的耐磨性。

1 试验材料与方法

渗钛试验所采用的基体材料为退火态 T10 钢，含碳量 1.05%，其原始组织如图 1 所示。试样经线切割制成 10 mm×10 mm×40 mm 的条状样。渗钛前试样经抛光处理后的表面粗糙度为 *Ra* 0.005 μm。

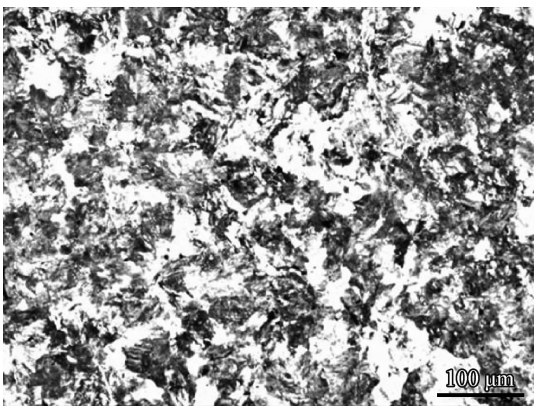


图 1 T10 钢原始组织

Fig. 1 Original microstructure of T10 steel

靶材试样为北京冠金利新材料科技有限公司提供的纯度为 99.99 %的纯钛靶，尺寸为 60 mm×60 mm×3 mm。试验反应炉为 DGLT-15F 多功能离子化学热处理炉，有效尺寸 Φ 200 mm×350 mm。反应气体为氩气，流量为 100 mL/min。其它工艺参数如下：源极电压 900 V、阴极电压 300 V、气压 50 Pa、极间距 15 mm、温度 1 000 ℃、保温时间 4 h。

试样渗钛后用 4%硝酸酒精溶液进行金相腐蚀，用 VHX-600 超景深三维显微系统(OM)观察渗层表面形貌和组织并测量渗钛层厚度，用 18KWD /MAX2500V+/PC X 射线衍射仪对渗层进行物相分析，用 HITACHI SU-1500 扫描电子显微镜(SEM+EDS)检测渗钛层中的 Ti、Fe、C 的浓度分布，用 MH-3 显微硬度计检测渗钛试样由表面至心部的硬度。

将热处理(780 ℃淬火 15 min+170 ℃回火 90 min)后的未渗钛试样与渗钛处理后的试样在 MM-W1 立式万能摩擦磨损试验机上进行销-盘摩擦磨损试验，载荷 60 N，转速 500 r/min，回转半径 11.5 mm，试验时间 2 h。对摩副是调质处理后的 20CrMnTi，硬度 38 HRC，表面粗糙度 *Ra* 0.03～0.09 μm。润滑剂采用普通机油。最后，用 CP 225D 电子分析天平称量磨损前后试样的质量，用扫描电镜观察磨痕形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 渗层显微组织

图 2 是渗钛层的表面形貌。T10 钢渗钛后的表面非常不平整，并可见一些胞状的微小凸起和由于等离子体溅射和轰击后所造成的凹坑。在渗钛过程中，渗钛层的形成主要分为 2 个步骤：首先，钛原子从纯钛靶中溅射出来，通过等离子体运输到试样表面。此时，已被加热到高温的试样表面产生大量缺陷。其次，钛原子与试样中的碳原子形成 TiC 层。因此，该表面形貌对渗层的摩擦磨损性能会造成一定的影响。

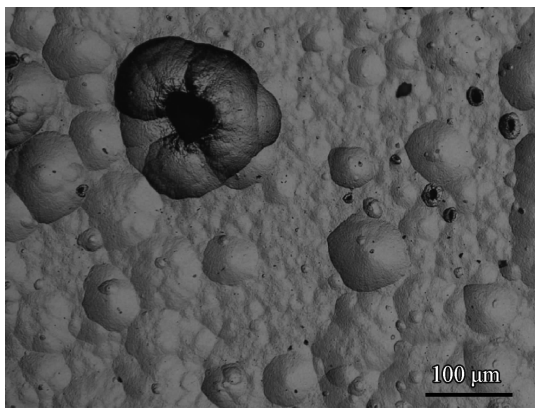


图 2 渗钛试样表面形貌

Fig. 2 Surface morphology of the titanized sample

图 3 是渗层的横截面形貌。可以看出，T10 钢的表面形成了约 35 μm 的渗钛层，比一般的表面处理技术获得的涂层要厚得多，如 PACVD 制备的涂层在相同条件下仅 1.5～3.5 μm[19]。而且，渗层均匀致密，与基体结合良好。此外，根据 XRD 图谱（图 4）的分析结果，渗钛层主要存在 TiC、Ti、FeTi、Fe_2Ti 等相。

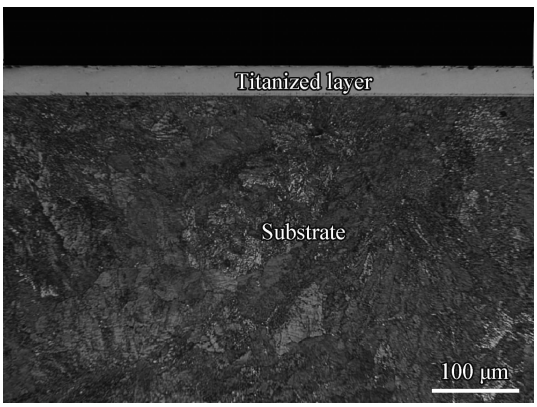


图 3 渗钛试样的截面形貌

Fig. 3 Cross section morphology of the titanized sample

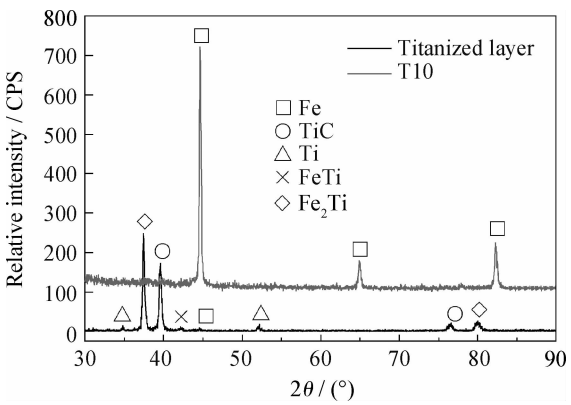


图 4 渗钛试样的表面 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns of the surface of the titanized sample

在 EDS 下对渗层进行线扫描，其结果如图 5 所示，纵坐标为该元素相对强度。可见从表面到基体，钛元素逐渐下降，铁元素逐渐上升，而碳元素先上升后下降。

这是由于在双层辉光离子渗钛过程中，强烈的离子轰击使运输到试样表面的钛原子以及基体中的铁、碳原子大量溅射出来。钛原子的溅射损失，可以由钛靶源源不断地运输至试样表面得到补充，而铁、碳原子则无法得到外界补充而下降，尤其是含量较少的碳原子，表面浓度下降更为明显。同时，钛属强碳化物形成元素，与碳的亲和力比铁强，能从铁中俘获碳原子，也引起了表层碳浓度的下降。因此，为保持碳浓度的平衡，且由于表层碳含量的降低，故建立一个由表面指向心部的碳浓度梯度，并在此浓度梯度下，碳原子由基体内部不断向表层迁移。至次表层时，碳原子因与钛原子形成 TiC，其含量略高于表面层和基体。同时，由于 TiC 的阻碍作用，外界钛原子无法继续进入试样，只能堆积在表面，使得表面钛含量处于较高状态。

此外，在距离表面 35～45 μm 处，存在一个钛和铁的互扩散区域，这也表明了渗钛层与基体之间为冶金结合。

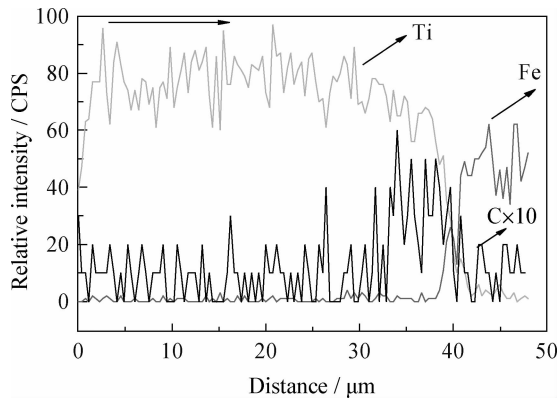


图 5 渗钛试样的线扫描图

Fig. 5 Cross section composition distribution of the titanized sample

2.2　渗层显微硬度

对渗钛试样测试的由表面至心部的硬度分布如图 6 所示。试样表面的最大硬度在 1 100 $HV_{0.01}$ 以上，约为基体硬度的 6 倍，随着渗层深度的增加而降低，符合了合金元素浓度梯度分布这一现象。

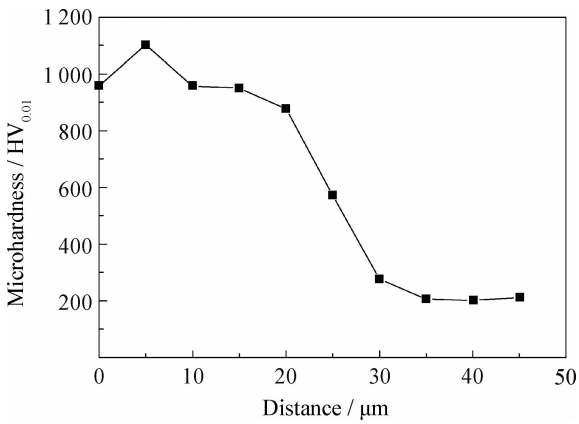


图 6 渗钛试样的显微硬度分布

Fig. 6 Cross section microhardness of the titanized sample

T10 钢试样在渗钛后表面硬度急剧升高的原因是由于在高温下试样表面钛的渗入，生成了细小弥散的 TiC、(Fe, Ti)等硬质相。这些硬质相可通过钉扎位错，阻碍晶界移动达到细晶强化和弥散强化的效果，极大地提高了表面硬度和耐磨性。

2.3 摩擦学性能

图 7 所示为热处理之后未渗钛的试样和渗钛试样的摩擦因数。由图中可知，未渗钛的试样稳定后摩擦因数在 0.05 左右，而渗钛试样的摩擦因数在 0.10 左右。这是由于渗钛层表面的离子轰击，使得试样表面粗糙度增加，摩擦因数也随之增大。但渗钛后摩擦因数的波动性明显比未渗钛试样小。这是由于渗钛试样表面凹凸不平，在磨损过程中产生的磨粒在一定程度上填补了凹坑，使其表面粗糙度减小[20]。相比较未渗钛的试样，磨损前的表面较为光滑，但磨损后由于磨粒的影响，粗糙度反而大大增加，使得摩擦因数的波动性也随之增大。而且，渗钛后表面生成的 TiC 属于陶瓷相结构，其键型主要是由离子键、共价键和金属键的混合，对于对摩副 20CrMnTi 也不会产生很大的粘着。而同为金属的未渗钛试样和 20CrMnTi 则会有很大的粘着倾向。

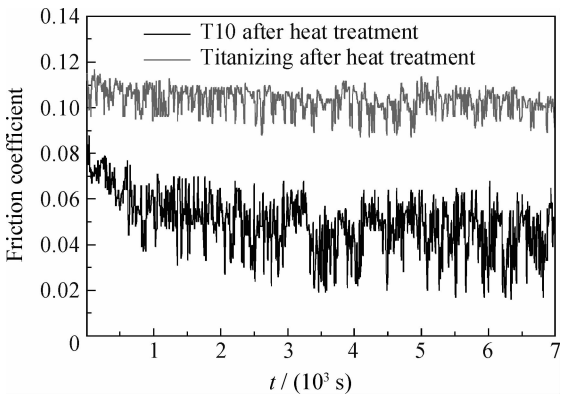


图 7 试样的摩擦因数

Fig. 7 Friction coefficient of the samples

未渗钛试样和渗钛试样的磨损率计算结果如表 1 所示，渗钛试样的磨损率约为未渗钛试样的 1/17。其中，磨损率的计算公式[21]为：

$$I=W/L \tag{1}$$

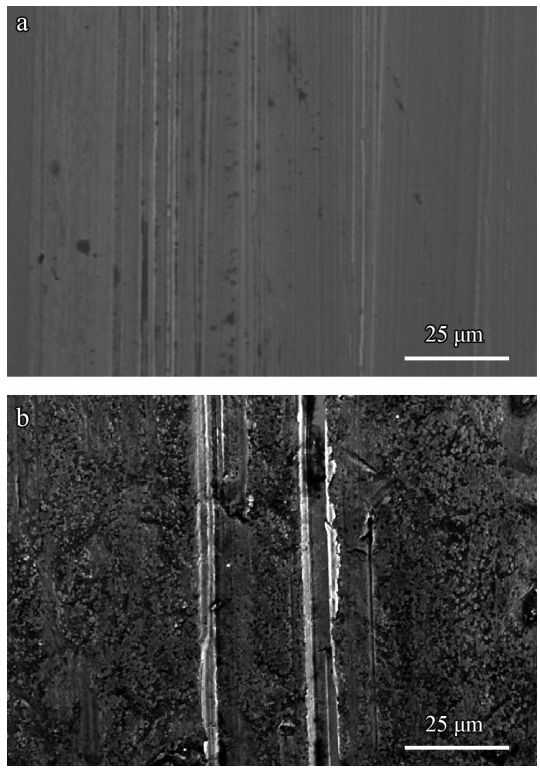
式中：I 为磨损率，W 为总磨损失重，L 为总磨损距离。

图 8 所示为磨痕的微观形貌。未渗钛的试样和渗钛试样的磨损表面均可见明显的犁沟，其磨损机制都为磨粒磨损。但未渗钛试样的犁沟数量明显要比渗钛试样多。究其原因，主要是由于试样在渗钛处理后表面产生了硬质相，表面硬度急剧增加，使得表面抵抗磨粒犁削的抗力大大增强，犁沟数量减少。

表 1 磨损率计算结果

Table 1 Wear rate value of the samples

Samples	Wear loss/g	Wear rate/(g · m^{-1})
T10 after heat treatment	2.33×10^{-4}	5.37×10^{-8}
Titanizing after heat treatment	1.33×10^{-5}	3.07×10^{-9}



(a) T10 after heat treatment (b) Titanizing after heat treatment

图 8 试样磨痕微观形貌

Fig. 8 Morphologies of the worn surfaces of the samples

3 结 论

(1) T10 钢双层辉光渗钛处理后可形成均匀致密的 TiC 层，厚度约为 35 μm。

(2) 渗钛层硬度达到 1 100 $HV_{0.01}$ 以上，约为

基体硬度的 6 倍，且呈平缓的梯度下降。

（3）与未处理的 T10 钢相比，渗钛层的磨损率明显降低，仅为 T10 钢的 1/17。

参考文献

[1] 余志明，张益豪，魏秋平，等. 梯度基体温度法和反应溅射 TiC 过渡层对钛合金基体沉积金刚石薄膜的影响 [J]. 中国表面工程，2012，25(3)：20-27.

[2] 罗雯，揭晓华，蒙云开，等. 双阴极等离子溅射沉积 TiC 薄膜对金刚石工具性能的影响 [J]. 中国表面工程，2012，25(5)：26-30.

[3] 齐勇田，邹增大. 原位生成 Ti(C、N)/Fe 基复合熔覆层的微观结构 [J]. 中国表面工程，2011，24(4)：38-42.

[4] Wang Z，He H Z，Wang Y Q，et al. Microstructure and tribological behaviors of Ti6Al4V alloy treated by plasma Ni alloying [J]. Applied Surface Science，2011，257(23)：10267-72.

[5] 徐重. 双层辉光离子渗金属技术的发展、现状和展望 [J]. 表面工程，1997(1)：1-10.

[6] Xu Z，Liu X，Zhang P，et al. Double glow plasma surface alloying and plasma nitriding [J]. Surface and Coatings Technology，2007，201(9/10/11)：4822-5.

[7] Xu Z，Xie X S，Yang Z M，et al. A study of nickel-based corrosion resisting alloy layer obtained by double glow plasma surface alloying technique [J]. Surface and Coatings Technology，2000，131(1/2/3)：378-382.

[8] 姜云冬，姚正军，张平则，等. 20 钢表面双辉等离子钨-碳渗镀层制备及其耐磨性能 [J]. 机械工程材料，2011，35(4)：69-75.

[9] 孙晓宾，骆心怡，张平则，等. Ti6Al4V 钛合金表面双层辉光等离子钨-钼共渗层的制备及其高温摩擦磨损性能 [J]. 机械工程材料，2010，34(10)：50-54.

[10] 任乃娟，王卫群，张艳梅，等. 低合金钢双辉渗 W-Mo-Co 初探 [J]. 太原理工大学学报，2003，34(3)：261-263.

[11] 高原，王成磊，李冰，等. 等离子钇钨钼共渗表面冶金高速钢的研究 [J]. 桂林电子科技大学学报，2010，30(5)：474-478.

[12] Xu J Y，Gao Y，Xiang J W，et al. Cr-Mo diffusion layer made by double glow plasma surface metallurgy [J]. Proceedings of Sino-Swedish Structural Materials Symposium，2007，14(5)：156-160.

[13] Jiang X，Xie X S，Xu Z，et al. Investigation on multi-element Ni-Cr-Mo-Cu alloying layer by double glow plasma alloying technique [J]. Materials Chemistry and Physics，2005，92(2/3)：340-347.

[14] Liu X P，Gao Y，Li Z H，et al. Cr-Ni-Mo-Co surface alloying layer formed by plasma surface alloying in pure iron [J]. Applied Surface Science，2006，252(10)：3894-902.

[15] Zhu X L，Yao Z J，Gu X D，et al. Microstructure and corrosion resistance of Fe-Al intermetallic coating on 45 steel synthesized by double glow plasma surface alloying technology [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China，2009，19(1)：143-148.

[16] Zhong J，Zheng Y，Yuan Q，et al. Fabrication of functionally graded Ti(C，N)-based cermets by double-glow plasma carburization [J]. Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials，2009，27(3)：642-646.

[17] Wang W B，Xu Z，He Z Y，et al. Study on double-glow plasma niobium surface alloying of pure titanium [J]. Vacuum，2007，81(8)：937-942.

[18] 高原. 钨、钼、碳三元共渗等离子表面冶金低合金高速钢的研究 [D]. 太原：太原理工大学，2003.

[19] 夏延秋，周峰，林一民，等. 45# 钢等离子渗氮在不同润滑剂下的摩擦磨损性能研究 [J]. 摩擦学学报，2006，26(2)：145-149.

[20] 刘伟燕. 316L 不锈钢表面等离子钛合金化及相关性能研究 [D]. 太原：太原理工大学，2010.

[21] 何奖爱，王玉玮. 磨损与耐磨材料 [M]. 沈阳：东北大学出版社，2001.

作者地址：上海市闸北区延长路 149 号　　200072

金属楼 202 室

Tel：(021) 5633 1377

E-mail：wxc1028@staff.shu.edu.cn