

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20180605001

γ -TiAl 合金表面 TiC 渗镀层的摩擦磨损性能

王洪孔, 郑可, 高洁, 于盛旺, 黑鸿君, 贺志勇

(太原理工大学材料科学与工程学院, 太原 030024)

摘要: 为了改善 γ -TiAl 合金摩擦学性能不理想的问题, 采用双辉等离子表面合金化技术在 γ -TiAl 合金表面制备了 TiC 渗镀层, 并使用扫描电子显微镜 (SEM)、辉光放电光谱成分分析仪 (GDOES) 和 X 射线衍射仪 (XRD) 对 TiC 渗镀层的形貌、化学成分和物相结构进行分析, 借助显微硬度计、划痕仪和往复摩擦磨损试验机对渗镀层的表面硬度、结合强度和摩擦磨损性能进行研究。结果表明: 在 γ -TiAl 合金表面形成了纳米结构的 TiC 渗镀层, 其中, 沉积层厚约 7 μm , 扩散层厚约 15 μm 。渗镀层硬度比基体显著提高, 达到 2200 HV_{0.2}。渗镀层的摩擦因数和比磨损率都比基体大幅降低, 摩擦因数从基体的 0.7 下降为 0.37, 比磨损率仅为基体的 6.5%, 表明制备的 TiC 渗镀层有效提高了 γ -TiAl 合金的耐磨性能。

关键词: γ -TiAl 合金; 等离子表面合金化技术; TiC 渗镀层; 摩擦磨损

中图分类号: TG174.445; TG115.58

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)06-0028-07

Wear Properties of TiC Permeation Layer Prepared on γ -TiAl Alloy

WANG Hongkong, ZHENG Ke, GAO Jie, YU Shengwang, HEI Hongjun, HE Zhiyong

(College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: To improve the tribological properties of γ -TiAl alloy, a TiC permeation layer on the surface of the γ -TiAl alloy was prepared by double glow plasma surface alloying technique. The microstructure, composition and phase structure of the TiC permeation layer were characterized by scanning electron microscopy (SEM), glow discharge optical emission spectrometer (GDOES) and X-ray diffraction (XRD). The surface hardness, adhesion strength and tribological properties of the TiC permeation layer were investigated by using a microhardness tester, a scratch tester and reciprocating friction and a wear tester, respectively. The results show that the TiC permeation layer with nanostructure includes a deposition layer of 7 μm and a diffusion layer of 15 μm . After treatment, the surface hardness of the γ -TiAl alloy is significantly improved, reaching at 2200 HV_{0.2}. Compared with the substrate, the TiC permeation layer has a relatively low friction coefficient and a very low specific wear rate. The friction coefficient decreases from 0.7 of the substrate to 0.37 of the permeation layer. Specifically, the specific wear rate of the permeation layer is only 6.5% of the substrate. Therefore, the TiC permeation layer can effectively enhance the wear resistance of the γ -TiAl alloy.

Keywords: γ -TiAl alloy; double glow plasma surface alloying technique; TiC permeation layer; friction and wear

收稿日期: 2018-06-05; 修回日期: 2018-08-22

网络出版日期: 2018-11-30 11:01; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.tg.20181130.1101.012.html>

通信作者: 贺志勇 (1964—), 男 (汉), 教授, 博士; 研究方向: 等离子表面合金化、超音速电弧喷涂、真空热处理及真空离子渗碳; **E-mail:** hezhiyong@tyut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (51601124, 51505318); 山西省应用基础研究计划面上青年基金 (201601D202026)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51601124, 51505318) and Youth Fund Project on Application of Basic Research Project of Shanxi Province (201601D202026)

引用格式: 王洪孔, 郑可, 高洁, 等. γ -TiAl 合金表面 TiC 渗镀层的摩擦磨损性能[J]. 中国表面工程, 2018, 31(6): 28-34.

WANG H K, ZHENG K, GAO J, et al. Wear properties of TiC permeation layer prepared on γ -TiAl alloy[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(6): 28-34.

0 引言

γ -TiAl 合金具有密度低、比强度、比刚度高、高弹性模量、耐蚀性和高温抗蠕变性好等优点, 在航空、航天、化工、汽车等领域有广泛的应用前景^[1-4]。但是由于对粘着磨损和微动磨损非常敏感, 这种材料的摩擦学性能差, 所以在一定程度上限制了其应用^[5-7]。

为了提高 γ -TiAl 合金的耐磨性能, 常采用在熔炼时加入 C 等间隙元素、表面渗碳或制备涂层等方法对材料进行改性处理。但是, C 等间隙元素的加入会使 TiAl 合金的脆性升高, 延展性降低, 因此容易导致合金的力学性能受到破坏^[7-9]。而表面渗碳和制备涂层的方法, 虽然能够在不影响基体材料性能的情况下, 提高 TiAl 合金表面的耐磨性。但是渗碳处理时, 碳化层形成后, 元素的扩散速度会受到抑制, 所以获得的渗碳层一般会比较薄^[10]。目前, 制备涂层常见的方法是物理气相沉积 (PVD) 或化学气相沉积 (CVD) 法, 所制备的涂层与基体间常为机械附着, 结合强度较差^[8]。

双层辉光等离子表面合金化技术, 能够使靶材中的元素扩散进基体表层, 进而在基体表面形成拥有较厚金属碳化物沉积层, 且与基体冶金结合的渗镀层^[11-16]。

TiC 具有硬度高、耐磨损和高温稳定性强等特性。有研究表明, TiC 颗粒增强涂层可以提高基体材料的摩擦磨损性能^[5, 17-21]。文中通过双辉等离子表面合金化技术在 γ -TiAl 合金表面制备 TiC 渗镀层以提高其表面耐磨性。

1 材料和方法

1.1 试验过程

基体材料选用成分为 Ti-46.5Al-2.5V-1.0Cr 的铸造 γ -TiAl 基合金。实验前用 SiC 水砂纸打磨并抛光后, 使用无水乙醇超声清洗样品, 并用热风吹干备用。源极材料采用特殊设计的靶材作为源极 (如图 1 所示), 即将尺寸为 $\Phi 3 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的 Ti 丝 (纯度为 99.99%) 均匀的穿在 $\Phi 60 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 石墨圆板上。这种丝状靶能够有效地增强空心阴极效应, 提高靶材的溅射面积和利用率, 提高原子的溅射效率^[22]。

γ -TiAl 基合金表面 TiC 渗镀层的制备, 采用了自行研制的 LS-450 型双辉等离子表面合金化装

置。实验时采用纯度为 99.99% 的氩气作为保护气体和等离子激发气体, 工艺参数为: 气压 35 Pa, 极间距 18 mm, 源极和工件极电压差 250 V, 预溅射时间 10 min, 基体温度 950 $^{\circ}\text{C}$, 保温时间 2 h。

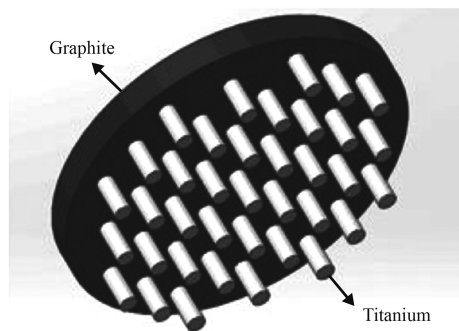


图 1 Ti 丝靶示意图

Fig.1 Schematic of Ti rods target

1.2 表征及性能测试

使用 TESCAN MIRA3 LMH 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察 TiC 渗镀层的表面及截面形貌; 采用 DX-2700X 型射线衍射仪 (XRD) 测定渗镀层的物相结构。通过 Spectro-GDA750 型辉光放电光谱成分分析仪 (GDOES) 测定试样截面深度方向的成分分布。使用 LECO M-400-H1 型维氏硬度测试仪对渗镀层表面的显微硬度进行表征。

使用 HT-5001 型划痕仪测试渗镀层与基体的结合强度, 测试时采用锥角为 120° 洛氏金刚石压头, 顶端球面半径 $R=0.2 \text{ mm}$; 加载载荷为 5~100 N, 加载速率为 80 N/min, 滑动速率为 2 mm/min。采用 MFT-R4000 型往复摩擦磨损试验机对 TiC 渗镀层的摩擦学性能进行测试, 摩擦方式为销-盘式干滑动摩擦, 摩擦副为 $\Phi 5 \text{ mm}$ 的氮化硅球, 滑动频率为 5 Hz, 摩擦时间为 15 min, 载荷为 2 N, 滑动距离为 5 mm, 试验温度 $(25 \pm 2) ^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $\text{RH}65\% \pm 5\%$ 。摩擦磨损试验结束后, 用 SEM 观测试样表面磨痕形貌, 并通过 WIVS 型白光干涉三维轮廓仪测量磨痕宽度和深度, 通过公式 (1) 和 (2) 计算试样的磨损体积。

$$K = W_v / PS \quad (1)$$

$$W_v = Lh(3h^2 + 4b^2)/6b \quad (2)$$

式中: K 为比磨损率, $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; W_v 为磨损体积, mm^3 ; P 为法向载荷, N; S 为滑动距离, m; h 为磨痕深度, mm; b 为磨痕宽度, mm; L 为磨痕长度, mm^[23]。

2 结果和讨论

2.1 TiC 渗镀层的表面及截面形貌

图 2 是 TiC 渗镀层的表面及截面形貌。从图 2(a) 可以看出, TiC 渗镀层表面由不规则凹坑和一些“胞状突起”组成, 胞状凸起由纳米尺寸的颗粒团聚而成。如图 2(b) 所示, TiC 沉积层的组织均匀、致密, 没有气孔、裂纹等缺陷, 与基体的结合良好, 其厚度大约为 7 μm 。

图 3 为 TiC 渗镀层截面深度方向的成分分布, 结合元素原子数分数变化和截面形貌, 分

3 个区域: 最外层的沉积层, 居中的扩散层和内侧的基体。其中, 沉积层的厚度与截面形貌基本相符合, 扩散层的厚度约为 15 μm , 随截面深度的变化梯度, 扩散层中 Al、Cr、V 元素含量增大, C 元素含量减小, 而 Ti 元素在扩散层中出现了含量的凸起, 这是由于基体中含有较高的 Ti, 沉积层和基体中 Ti 含量的浓度梯度差别较小, 阻碍了靶材 Ti 原子向内部扩散, 导致在扩散层中形成了富 Ti 的扩散层。此外, 沉积层与扩散层中元素都呈现梯度变化, 表明形成的 TiC 渗镀层与基体间呈冶金结合, 这有利于形成较高的结合强度。

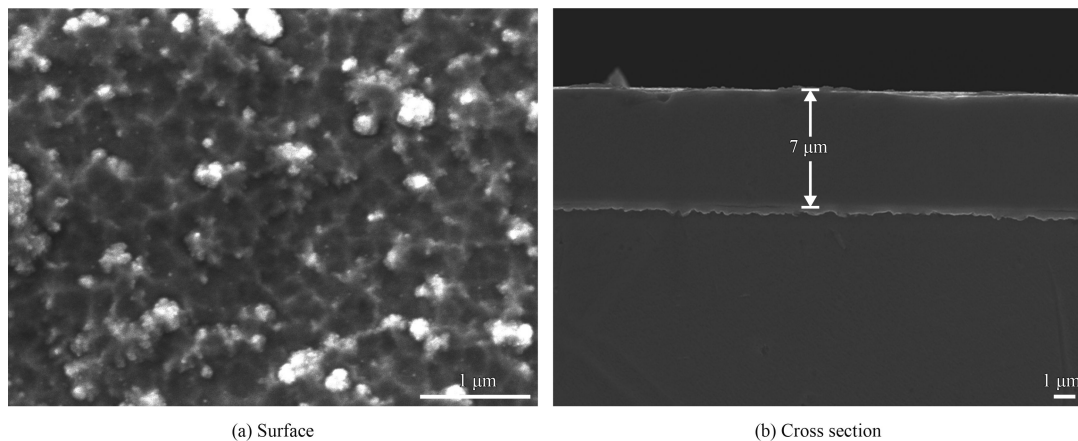


图 2 TiC 渗镀层的表面及截面形貌

Fig.2 Surface and cross section morphologies of the TiC permeation layer

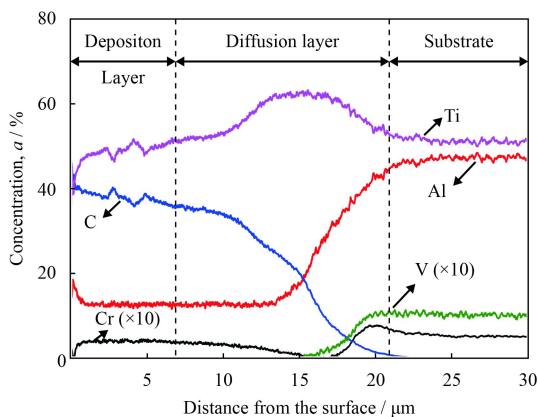


图 3 TiC 渗镀层的成分分布

Fig.3 Composition distribution of the TiC permeation layer

2.2 TiC 渗镀层的物相结构

图 4 为 γ -TiAl 合金和 TiC 渗镀层表面的 XRD 图谱。对比基体和 TiC 渗镀层的 XRD 衍射谱可以看出, 经双辉等离子表面合金化处理后, 样品中除了基体物相 γ -TiAl 和 α_2 -Ti₃Al 的衍射峰, 还在

2 θ 为 35.9°, 41.7°, 60.5° 和 72.4° 处出现了 TiC(111)、(200)、(220) 和 (311) 晶面的衍射峰。这表明, 在基体表面形成了 TiC 渗镀层。其中, 沉积层以 TiC 相为主, 而扩散层包括 TiC、 γ -TiAl 和 α_2 -Ti₃Al 相。此外, TiC 相的衍射峰都比较宽, 表明其晶粒尺寸十分细小。根据 Debye-Scherrer 方程 (3) 对 TiC 的晶粒尺寸进行估算。

$$D(2\theta) = \frac{K\gamma}{B\cos\theta} \quad (3)$$

式中, $D(2\theta)$ 为晶粒垂直于晶面方向的平均尺寸, B 为衍射峰的半峰宽; θ 为衍射角; K 为 Scherrer 常数, 其值为 0.89; γ 为 X 射线波长, 采用 Cu-K α 射线, 其波长为 0.154 056 nm^[22]。依据该公式利用峰强度较大的 TiC(111) 晶面的衍射峰的半峰宽进行计算, 结果表明垂直于 (111) 晶面的 TiC 晶粒尺寸为 9.6 nm, 说明基体表面形成了纳米级别的 TiC 沉积层。

在试验过程中, Ar^+ 的轰击作用下, 具有一定化学活度的 Ti 原子和 C 原子被溅射出来, 通过空间运输沉积在 TiAl 合金表面, 在 Ar^+ 轰击和高温的协同作用下, 元素反应扩散, 原位合成 TiC, 形成 TiC 渗镀层^[24]。而细小的纳米晶粒则是由于 TiC 的熔点很高, 为 3140 $^{\circ}\text{C}$, 远高于基体温度 950 $^{\circ}\text{C}$, 根据 J.A.Thornton 提出的薄膜结构区域模型 (Structure zone model, SZM)^[25], 基体温度是影响薄膜微观结构的最重要因素。当 $T_s/T_m \leq 0.3$ 时 (T_s 为基体温度; T_m 为薄膜材料的熔点; $T_s/T_m(\text{TiC}) = 0.3$), 吸附到基体表面的粒子扩散能力较低, 由于此时温度较低, 薄膜形核所需的临界形核功很小, 形核密度很高, 且临界晶核半径很小, 因此容易形成细小的纳米晶粒。

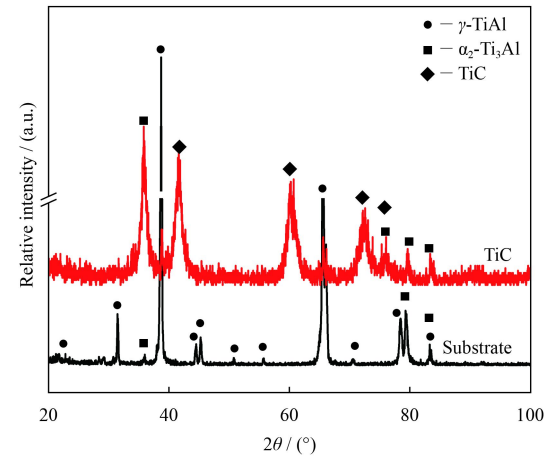


图 4 γ -TiAl 合金和 TiC 渗镀层表面的 XRD 图谱
Fig.4 XRD patterns of γ -TiAl alloy and TiC permeation layer

2.3 TiC 渗镀层的显微硬度及结合强度

图 5 为双辉等离子表面合金化处理前后试样表面的显微硬度。由图可知, 有 TiC 渗镀层的试样表面显微硬度约为 2200 $\text{HV}_{0.2}$, 远高于 γ -TiAl 合金基体的表面显微硬度 350 $\text{HV}_{0.2}$ 。这是由于处理后基体表面形成了包含纳米 TiC 硬质相的 TiC 渗镀层, 大幅地提高了基体表面的硬度。而 TiC 渗镀层的硬度相较于 TiC 的理论硬度值偏低, 主要是由于测量基体效应导致的。

采用划痕仪对 TiC 渗镀层的结合强度进行了评价。图 6 是 TiC 渗镀层的划痕测试过程中的声发射曲线。由图 6 可知, 当载荷较低时, 由于受薄膜表面粗糙度等的影响, 声发射曲线有微小抖动。随着连续线性增加载荷, 在加载力 32 N 左右

处, 声发射曲线出现突变峰值, 说明 TiC 渗镀层在此时被划破, 即渗镀层发生剥落的临界载荷值约为 32 N。随后随着加载力的增大, 划痕边缘只出现小碎屑, 渗镀层并无出现大面积的剥落, 故声发射曲线变化较小。划痕测试结果表明, TiC 渗镀层与基体具有良好的结合强度。

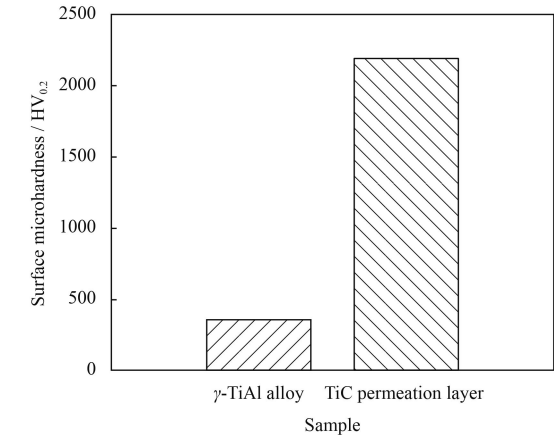


图 5 γ -TiAl 合金和 TiC 渗镀层的表面显微硬度
Fig.5 Surface microhardness of γ -TiAl alloy and TiC permeation layer

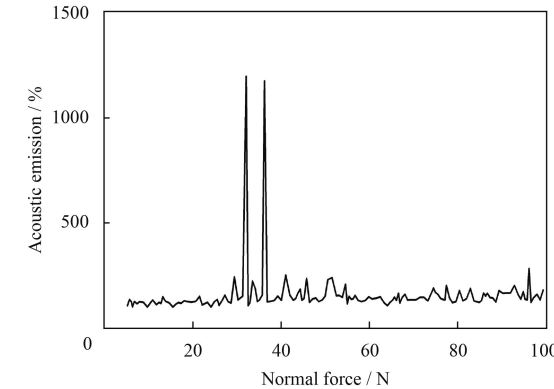


图 6 TiC 渗镀层划痕测试中的声发射曲线
Fig.6 Acoustic emission curves of TiC permeation layer during scratch test

2.4 TiC 渗镀层的摩擦磨损性能

图 7 为 γ -TiAl 合金基体和 TiC 渗镀层的摩擦因数。从图中可以看出, 在整个滑动过程中, 基体的摩擦因数在 0.58~0.80 波动, 平均值在 0.70 左右。由于基体比较软, 在与 Si_3N_4 球对摩时, 相对滑动过程中会产生粘着, 增加滑动阻力, 随着对磨时间的延长, 两者不断产生粘着、剪断、粘着、再剪断, 导致摩擦因数的变化幅度较大^[26]。与基体相比, 渗镀层表面为纳米结构的 TiC, 提高了渗镀层的硬度, 和 Si_3N_4 球的粘着性

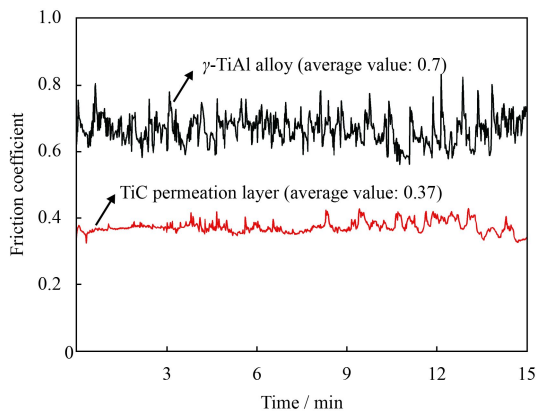


图 7 γ -TiAl 合金和 TiC 渗镀层表面的摩擦因数

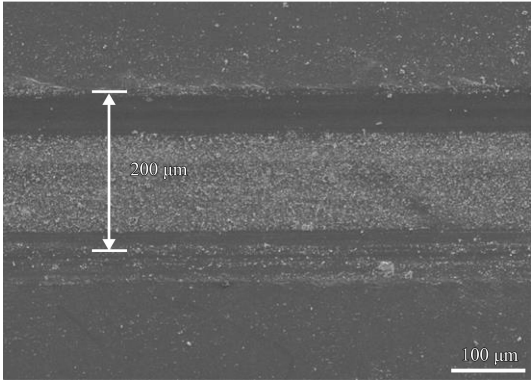
Fig.7 Friction coefficient of γ -TiAl alloy and TiC permeation layer

减小，渗镀层的屈服强度显著提高，塑性变形减小，磨损抗力增大，所以摩擦因数则变化较小，最终基本稳定在 0.37 左右，表明 TiC 渗镀层具有

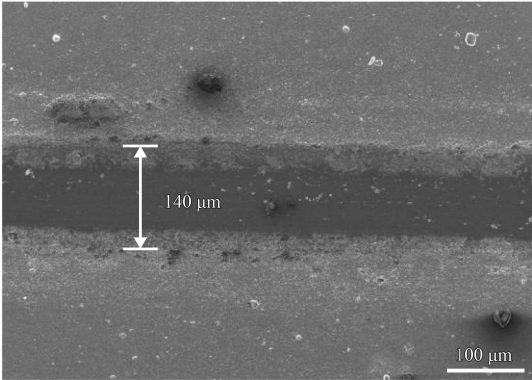
较好的抗粘着磨损和减摩的作用。

图 8 为 γ -TiAl 合金基体和 TiC 渗镀层表面磨痕 SEM 形貌。由图 8(a) 可知，常温下 γ -TiAl 合金基体表面的磨痕，宽度约为 200 μm ，磨痕中存在犁沟和磨屑，有明显的粘着磨损倾向。而从图 8(b) 可以看出，与钛合金基体相比，TiC 渗镀层表面的磨痕宽度显著减小，磨面较为平整，磨痕中仅存在极少量的磨屑，表明含渗镀层的试样耐磨性大幅度提高，主要以磨粒磨损为主。

图 9 为 γ -TiAl 基体和 TiC 渗镀层表面的磨痕轮廓曲线。由图 9(a) 可以得到， γ -TiAl 基体磨损严重，磨痕宽度和深度分别达到了 0.41 mm 和 9.72 μm ，且磨痕轮廓十分粗糙。而双辉等离子表面合金化处理后 (图 9(b))，TiC 渗镀层的磨痕宽度和深度明显下降，仅为 0.23 mm 和 1.12 μm ，磨痕轮廓相对光滑。



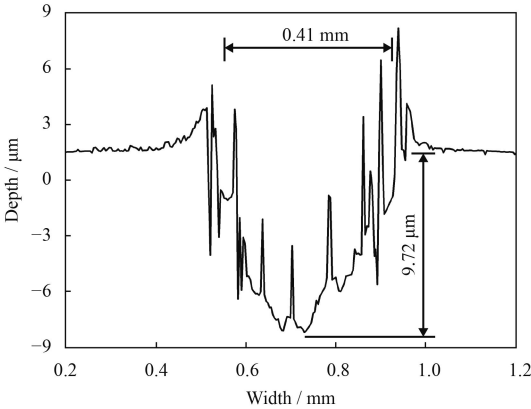
(a) γ -TiAl alloy



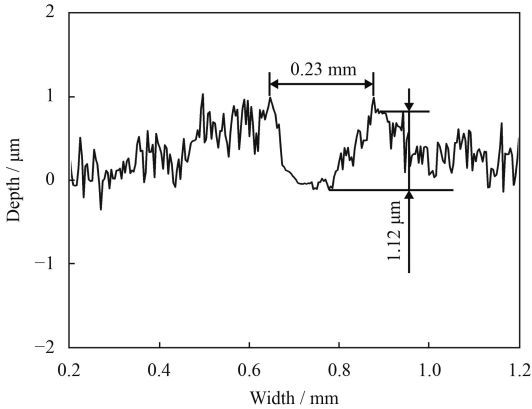
(b) TiC permeation layer

图 8 γ -TiAl 合金和 TiC 渗镀层表面磨痕形貌

Fig.8 Morphologies of the wear tracks on the γ -TiAl alloy and TiC permeation layer



(a) γ -TiAl alloy



(b) TiC permeation layer

图 9 γ -TiAl 合金和渗镀层的表面磨痕轮廓曲线

Fig.9 Profiles of the wear tracks on γ -TiAl alloy and TiC permeation layer

由公式(1)(2)计算得到, γ -TiAl 基体和 TiC 渗镀层的磨损体积分别为 1.33×10^{-2} 和 $8.59 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$; 比磨损率分别为 1.47×10^{-4} 和 $9.54 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, 即 TiC 渗镀层的磨损率是基材的 6.5%, 耐磨性显著提高。

3 结 论

(1) 通过双辉等离子表面合金化处理, 在 γ -TiAl 合金表面成功制备了 TiC 渗镀层, 沉积层厚约为 $7 \mu\text{m}$, 扩散层厚约 $15 \mu\text{m}$, 渗镀层与基体间呈冶金结合, 渗镀层发生剥落的临界载荷为 32 N, 结合力良好。

(2) TiC 渗镀层的表面显微硬度显著提高, 达到 2200 HV_{0.2}, 远高于基体的硬度值。

(3) 制备了 TiC 渗镀层试样的摩擦因数和比磨损率与基材相比均有大幅度下降, 比磨损率仅为基材的 6.5%, 表明双辉等离子表面合金化技术制备 TiC 渗镀层使得 γ -TiAl 合金基体具有较好的减磨和耐磨性能。

参考文献

- [1] BEWLAY B P, NAG S, SUZUKI A, et al. TiAl alloys in commercial aircraft engines[J]. *High Temperature Technology*, 2016, 33(4-5): 549-559.
- [2] 刘娣, 张利军, 米磊, 等. TiAl 合金的制备及应用现状[J]. *钛工业进展*, 2014(4): 11-15.
LIU D, ZHANG L J, MI L, et al. Preparation and application status of TiAl alloy[J]. *Titanium Industry Progress*, 2014(4): 11-15 (in Chinese).
- [3] JABBARIPOUR B, SADEGHI M H, SHABGARD M R, et al. Investigating surface roughness, material removal rate and corrosion resistance in PMEDM of γ -TiAl intermetallic[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2013, 15(1): 56-68.
- [4] KYZIOŁ K, LUKASZ K, BRZEZINKA G, et al. Structure, characterization and cytotoxicity study on plasma surface modified Ti-6Al-4V and γ -TiAl alloys[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 240: 516-526.
- [5] KAESTNER P, OLFE J, HE J W, et al. Improvement in the load-bearing capacity and adhesion of TiC coatings on TiAl6V4 by duplex treatment[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2001, 142: 928-933.
- [6] 贾海峰. TiAl 基合金表面改性层组织与摩擦磨损性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
BEN H F. Microstructure and wear resistance of the modified layer formed on TiAl based alloy[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008(in Chinese).

- [7] 贺志勇. TiAl 基合金等离子表面渗铬及其抗氧化和耐磨性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
HE Z Y. Study on oxidation and wear resistance of TiAl based alloy treated by plasma surface chromium alloying[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010 (in Chinese).
- [8] LIU X, TIAN W, XU W, et al. Wear resistance of TiAl intermetallics by plasma alloying and plasma carburization[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2007, 201(9-11): 5278-5281.
- [9] MATAR S F, ETOURNEAU J. Investigation of the electronic structure of carbon-containing TiAl[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 1996, 233(1-2): 112-120.
- [10] 张明阳. 表面改性对钛合金渗碳行为及耐磨性的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
ZHANG M Y. Effect of surface treatment on the carburizing behavior and wear resistance of Ti alloys[D]. Changsha: Central South University, 2013(in Chinese).
- [11] 徐重. 等离子表面冶金技术的现状和发展[C]. 第十一届中国热处理活动周论文集, 2016: 15.
XU Z. Development of plasma surface metallurgy technology[C]. *Proceedings of the Eleventh China heat treatment week*, 2016: 15.
- [12] 徐重. 等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.
XU Z. Development of plasma surface metallurgy technology[J]. *Engineering Sciences*, 2002, 4(2): 36-41 (in Chinese).
- [13] 徐重, 张艳梅, 张平则, 等. 双层辉光等离子表面冶金技术[J]. *热处理*, 2009, 24(1): 1-11.
XU Z, ZHANG Y M, ZHANG P Z, et al. Double glow plasma surface metallurgy technology[J]. *Heat Treatment*, 2009, 24(1): 1-11 (in Chinese).
- [14] XU Z. A novel plasma surface metallurgy: Xu-Tec process[J]. *Surface & Coatings Technology*, 1990, 43(1): 1065-1073.
- [15] XU Z, LIU X, ZHANG P, et al. Double glow plasma surface alloying and plasma nitriding[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2007, 201(9-11): 4822-4825.
- [16] 刘阳, 曾令可, 胡晓力, 等. 碳化钛的合成及其应用研究进展[J]. *中国陶瓷*, 2002, 38(5): 7-10.
LIU Y, ZENG L K, HU X L, et al. Synthesis of TiC and the development of its application[J]. *China Ceramics*, 2002, 38(5): 7-10 (in Chinese).
- [17] MAHAMOOD R M, AKINLABI E T, SHUKLA M, et al. Scanning velocity influence on microstructure, microhardness and wear resistance performance of laser deposited Ti6Al4V/TiC composite[J]. *Materials & Design*, 2013,

50(17): 656-666.

[18] SHANAGHI A, CHU P K, ROUHAGHDAM A R S, et al. Structure and corrosion resistance of Ti/TiC coatings fabricated by plasma immersion ion implantation and deposition on nickel-titanium[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 229(9): 151-155.

[19] RAJABI A, GHAZALI M J, DAUD A R. Chemical composition, microstructure and sintering temperature modifications on mechanical properties of TiC-based cermet - A review[J]. Materials & Design, 2015, 67: 95-106.

[20] 李新. 碳化钛/硅原位反应烧结研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(8): 118-120.

LI X. Preparation of TiC based material by in-situ reaction sintering[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(8): 118-120 (in Chinese).

[21] RASOOL G, STACK M M. Wear maps for TiC composite based coatings deposited on 303 stainless steel[J]. Tribology International, 2014, 74(4): 93-102.

[22] 高洁. 金刚石涂层硬质合金 HfC-SiC 过渡层制备及结合强度研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.

GAO J. Synthesis and adhesion of HfC-SiC interlayers for diamond coated cemented carbides[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017 (in Chinese).

[23] PEARSON W B, RAYNOR G V. A Handbook of lattice spacings and structures of metals and alloys[J]. Zeitschrift Für Kristallographie, 1961, 115(3-4): 319-320.

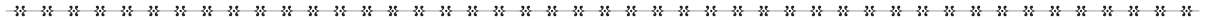
[24] 应峰, 缪强, 黄俊, 等. 钛合金表面原位合成 TiN 渗镀层摩擦性能研究[J]. 金属热处理, 2009, 34(9): 29-32.

YING F, MIAO Q, HUANG J, et al. Tribological property of TiN diffusion coating in-situ synthesized on titanium alloy surface[J]. Heat Treatment of Metals, 2009, 34(9): 29-32 (in Chinese).

[25] BARNAP B, ADAMIK M. Fundamental structure forming phenomena of polycrystalline films and the structure zone models[J]. Thin Solid Films, 1998, 317(1-2): 27-33.

[26] 魏祥飞, 张平则, 魏东博, 等. γ -TiAl 合金表面 Cr-W 共渗合金层的摩擦磨损性能研究[J]. 金属学报, 2013, 49(11): 1406-1410.

WEI X F, ZHANG P Z, WEI D B, et al. Friction and wear properties of surface plasma Cr-W alloying layer of γ -TiAl alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(11): 1406-1410 (in Chinese).



• 本刊讯 •

第十二届全国表面工程大会在昆明成功召开

第十二届全国表面工程大会暨第十届全国青年表面工程论坛于 2018 年 11 月 9—12 日在昆明云安会都酒店成功召开。大会邀请到薛群基院士、徐可为教授等 16 位专家学者作 5 个主旨报告和 11 个大会特邀报告。千人会场座无虚席，代表们不时为专家们的精彩演讲鼓掌。分论坛主要有第十届全国青年表面工程学术会议、薄膜科学与技术研讨会、生物材料表面工程论坛、热喷涂技术论坛、摩擦学及表面工程论坛、涂料涂装技术论坛、表面工程装备技术论坛、表层改性技术论坛、表面工程基础和应用技术论坛等。报告人和听众进行了深入的交流和充分的讨论，会场不时传来热烈的掌声。

会议共有 1000 余名代表参加，共进行大会场报告 16 个，分会场报告共 422 个，现场张贴海报 56 张，共收到超过 500 篇论文摘要。会议评选出 25 个优秀口头报告和 10 位优秀 posters 获奖人。会后，代表们普遍反映，大会报告选题合理，学术水平高，分会场邀请报告个个精彩，真正代表各自领域的研究水平，真正代表了我国表面工程的水平。

(本刊编辑部 供稿)