

# 反应温度对 TC4 钛合金等离子氮氧共渗层微观结构及耐磨性能的影响

高洪宇<sup>1</sup>, 黄亚军<sup>2</sup>, 陈永强<sup>2</sup>

(1. 海装驻上海地区军事代表局, 上海 201206)

(2. 海装驻上海地区第九军事代表室, 上海 201206)

**摘要:** 分别在 700、750、800 °C 条件下对 TC4 钛合金进行等离子氮氧共渗, 研究等离子共渗温度对涂层微观组织结构、表面硬度及耐磨性能的影响规律和作用机制。结果表明: 经过等离子氮氧共渗, 能够在 TC4 基体表面形成氧化钛/氮化钛/富 Al 扩散层结构的多层复合渗层, 并且三层组织都会随着反应温度的升高而增厚; 等离子氮氧共渗能够将 TC4 基体的表面硬度由 300 HV 提高到 554 HV, 700、750 °C 下制备的试样摩擦系数显著高于 TC4 基体, 而 800 °C 下制备的试样, 初期摩擦系数较低, 随后逐渐上升至约 0.65, 与 700、750 °C 试样基本一致; 等离子氮氧共渗能够有效保护基体, 提高材料的耐磨性能, 并使磨损方式由磨粒磨损变为黏着磨损, 并伴有氧化行为。

**关键词:** TC4 钛合金; 等离子氮氧共渗; 耐磨涂层; 摩擦磨损

中图分类号: TG174.4; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2025)06-022-07

## Influence of Reaction Temperature on Microstructure and Wear Resistance of TC4 Titanium Alloy Plasma Oxynitriding Layer

Gao Hongyu<sup>1</sup>, Huang Yajun<sup>2</sup>, Chen Yongqiang<sup>2</sup>

(1. Military Representative Office of the Navy Armament Department in Shanghai, Shanghai 201206, China)

(2. The 9th Military Representative Office of the Navy Armament Department in Shanghai, Shanghai 201206, China)

**Abstract:** Plasma oxynitriding of TC4 titanium alloy was conducted at 700, 750, and 800 °C. The effects of processing temperature on the microstructure, surface hardness, and wear resistance of the coatings were investigated, along with the underlying reaction mechanisms. The results show that a multi-layer composite diffusion structure, consisting of Ti-O, Ti-N, and Al-rich layers, forms on the TC4 substrate after treatment. The thickness of these layers increases with rising temperature. Moreover, plasma oxynitriding enhances the surface hardness of TC4 substrate from 300 HV to 554 HV. The friction coefficients of the co-diffusion layers produced at 700 °C and 750 °C are notably higher than that of the untreated TC4 substrate. In contrast, the specimen treated at 800 °C exhibits a low initial friction coefficient, which subsequently rises to 0.65, showing consistency with the specimens treated at 700 °C and 750 °C. Overall, plasma oxynitriding effectively protects the substrate, improves the wear resistance of the material, and alters the dominant wear mechanism from abrasive to adhesive wear and oxidation behavior.

**Keywords:** TC4 titanium alloy; plasma oxynitriding; wear-resistant coating; friction and wear

钛合金具有高比强度、优良的生物相容性、出色的耐蚀性及较好的高温性能, 广泛应用于航空航天、海洋工程、能源化工及生物医疗等领域<sup>[1-4]</sup>。然而, 钛合金表面硬度低、耐磨性差等缺点严重限制了其应用范围<sup>[5-6]</sup>。采用表面处理技术提高钛合金耐磨损性能

一直是钛合金领域的研究热点<sup>[7-8]</sup>。表面处理技术主要包括热喷涂<sup>[9]</sup>、冷喷涂<sup>[10]</sup>、电火花强化<sup>[11]</sup>、渗碳<sup>[12]</sup>、化学气相沉积<sup>[13-14]</sup>、物理气相沉积<sup>[15-16]</sup>、离子注入<sup>[17]</sup>、激光合金化<sup>[18]</sup>等。其中, 热喷涂制备的涂覆层与基体结合强度不佳, 冷喷涂易产生剧烈的塑性变形; 电火花强化技术操作简单, 却易产生微裂纹; 离子注入制备涂层精确可控, 但存在设备造价高等问题。

收稿日期: 2025-08-13

通信作者: 黄亚军 (1985—), 男, 工程师。

随着钛合金的应用推广, 对其性能的要求日益苛刻, 单一的表面处理技术已不能满足钛合金复杂的应用需求, 多技术复合已成为目前的研究趋势<sup>[19-20]</sup>。其中, 等离子氮氧共渗具有渗速快、工件变形小、化学稳定性高、工艺简单等优点<sup>[21]</sup>, 是钛合金表面处理技术研究的重点之一。

目前, 等离子氮氧共渗技术的研究重点是反应过程中氧含量的控制与反应温度/时间的协同作用机制<sup>[21-22]</sup>。反应过程中增加适量的氧, 不仅可以打破 TiN 致密层, 利于 Ti 和 N 的进一步反应, 降低反应温度, 还可以得到性能优异的 TiO<sub>2</sub>/TiN 复合涂层体系。因此, 以 TC4 钛合金为研究对象, 分别在 700、750、800 °C 下进行等离子氮氧共渗处理, 对比研究反应温度对 TiO<sub>2</sub>/TiN 复合涂层微观组织结构的影响, 并探索了经等离子氮氧共渗处理的 TC4 钛合金表面的硬度及耐磨性变化规律。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

实验材料为 TC4 钛合金棒材, 规格为  $\phi 20\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ , 表面粗糙度  $Ra < 0.8$ , 化学成分 (质量分数) 为: Ti 90%~91%, Al 5.5%~6.75%, V 3.5%~4.5%。

### 1.2 涂层制备

采用等离子双层辉光冶金设备 (沈阳聚东真空技术研究所生产, 功率 30 kW) 进行 TC4 钛合金氮氧共渗处理, 制备过程如下: ① 将洁净的 TC4 基体置于等离子氮化设备载物台上; ② 抽真空至  $1.0 \times 10^{-2}\text{ Pa}$  以下; ③ 按体积比 10:1 充入氮气 (纯度为 99.999%, 流量为 50 mL/min) 和氧气 (纯度为 99.999%, 流量为 5 mL/min), 保持真空度在 550~700 Pa 范围内; ④ 按表 1 工艺参数分别制备等离子氮氧共渗试样。

表 1 等离子氮氧共渗工艺参数

Table 1 Fabrication parameters of plasma oxynitriding

| No.            | $V(\text{N}_2) : V(\text{O}_2)$ | Temperature/°C | Time/h |
|----------------|---------------------------------|----------------|--------|
| 1 <sup>#</sup> | 10 : 1                          | 700            | 1      |
| 2 <sup>#</sup> | 10 : 1                          | 750            | 1      |
| 3 <sup>#</sup> | 10 : 1                          | 800            | 1      |

### 1.3 检测

采用 SU5000 热场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察等离子氮氧共渗层的表面及截面形貌, 并用能谱仪 (EDS) 对等离子氮氧共渗层的元素组成进行分析。采用 D/max-7000S X 射线衍射仪 (XRD) 分析等离子氮氧共渗层的物相组成。采用 HV-1000 型表面硬度仪

测试基体材料和等离子氮氧共渗层的表面硬度, 载荷为 1.96 N, 保载时间为 15 s。采用 MFT-5000 型摩擦磨损仪表征基体和涂层的耐磨性能, 摩擦对磨球为直径 5 mm 的氮化硅球, 测试时间为 30 min, 频率为 1 Hz, 试验力为 10 N。

## 2 结果与讨论

### 2.1 表面微观结构

图 1 为不同温度下等离子氮氧共渗试样的表面形貌。从图 1 可以看出, 在 700 °C 下, 试样表面较为平整 (图 1a), 放大后发现表面存在较多小颗粒堆积物 (图 1b), 颗粒尺寸在 0.25~1  $\mu\text{m}$  之间 (图 1c)。对表面区域 1 进行 EDS 分析发现, 该区域主要元素为 Ti、N、O, 原子分数分别为 63.10%、28.92%、7.10% (见表 2)。通过计算可推测, 此时的物相主要为 Ti<sub>2</sub>N 和 TiO<sub>2</sub>, 且两者的比例约为 16:1。

在 750 °C 下, 等离子氮氧共渗试样表面略显粗糙 (图 1d), 形成局部凸起颗粒状物质 (图 1e), 放大后发现表面存在较多的球状细小颗粒堆积物 (图 1f), 尺寸约为 0.1  $\mu\text{m}$ , 表现出氧化物特征。对表面区域 2 进行 EDS 分析发现, 该区域的主要元素仍为 Ti、N、O, 原子分数分别为 58.44%、22.98%、12.64% (见表 2), 相比 700 °C 试样, 表面的 O 含量增加, Ti、N 含量降低。通过计算可推测, 此时的物相主要为 Ti<sub>2</sub>N 和 TiO<sub>2</sub>, 且两者的比例约为 7:1。

在 800 °C 下, 等离子氮氧共渗试样表面明显变得粗糙 (图 1g), 出现大量突起的脊状堆积物 (图 1h), 放大后发现表面存在密集的极小颗粒堆积物 (图 1i), 表现出氧化物特征。对表面区域 3 进行 EDS 分析发现, 该区域的主要元素还是 Ti、N、O, 原子分数分别为 57.46%、23.11%、14.67% (见表 2)。通过计算可推测, 此时的物相主要为 Ti<sub>2</sub>N 和 TiO<sub>2</sub>, 且两者的比例约为 6:1。

### 2.2 截面微观结构

图 2 为不同温度下等离子氮氧共渗试样的截面形貌及 EDS 元素线扫描图。从图 2 可以看出, 在 700 °C 下, 等离子氮氧共渗试样表面仅形成了很薄的渗层 (图 2a), 厚度约为 0.5  $\mu\text{m}$ , 渗层与基体结合良好, 界面清晰平整 (图 2b)。从试样截面 EDS 元素线扫描图可观察到, 元素含量由高到低依次为 Ti、Al、N、O (图 2c)。结合图 1b、1c 可知, 700 °C 等离子氮氧共渗后, 最外侧有约 0.5  $\mu\text{m}$  的富 N 层, 此层中 N 元素形成显著的峰值。在此富 N 层的下方, 则是 Al 元素的富集区域, 厚度约为 1.2  $\mu\text{m}$ 。O 元素整体上含量较低, 不易被观察到。

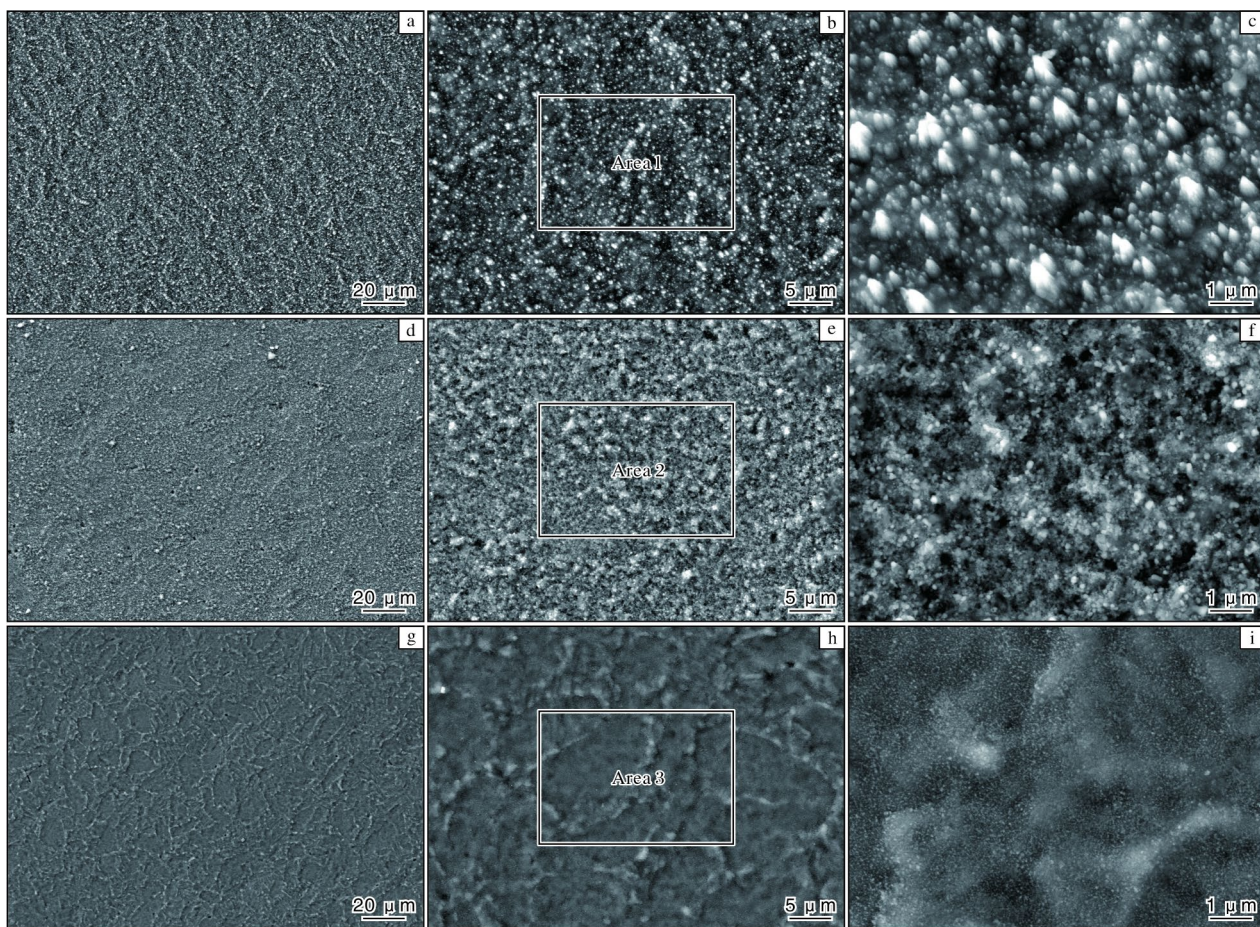


图 1 不同温度下等离子氮氧共渗试样的表面形貌

Fig.1 Surface morphologies of plasma oxynitriding specimens at different temperatures: (a–c) 700 °C; (d–f) 750 °C; (g–i) 800 °C

表 2 等离子氮氧共渗试样的 EDS 分析结果 (x/%)

Table 2 EDS analysis results of plasma oxynitriding specimens

| Area   | C    | N     | O     | Al   | Ti    | V    | Fe   |
|--------|------|-------|-------|------|-------|------|------|
| Area 1 | 0.33 | 28.92 | 7.10  | 0.29 | 63.10 | —    | 0.26 |
| Area 2 | 0.72 | 22.98 | 12.64 | 3.26 | 58.44 | 1.30 | 0.66 |
| Area 3 | 0.75 | 23.11 | 14.67 | 2.15 | 57.46 | 1.06 | 0.80 |

在 750 °C 下, 等离子氮氧共渗试样表面形成厚度约 1.2 μm 的渗层, 且渗层与基体结合良好, 界面清晰平整 (图 2d), 表现出整体块状特征。结合截面 EDS 分析 (图 2f)、表面形貌 (图 1e) 和表面 EDS 分析 (表 2) 可知, 最外侧为 0.2 μm 厚的氧化物层, 随后是 1 μm 厚的氮化物层, 氮化物层下方是 1.8 μm 厚的富 Al 区域。

在 800 °C 下, 等离子氮氧共渗试样的截面形貌与 750 °C 试样相似, 此时试样表面形成了厚度约 1.6 μm 的渗层, 且渗层与基体结合良好, 界面清晰平整 (图 2g), 表现出整体块状特征, 渗层下方还可以观察到显著的扩散反应区 (见图 2h)。结合截面 EDS 分析结果 (图 2i) 可知, 此时试样的最外层为约 0.4 μm

厚的氧化物层 (O 富集区), 中间是 1.2 μm 厚的氮化物层 (N 富集区), 里层是约 2 μm 厚的铝化物层 (Al 富集区)。

综上可知, 700~800 °C 下等离子氮氧共渗形成的复合涂层结构一致, 依次为氧化物层/氮化物层/富 Al 扩散层, 随着反应温度的升高, 三层的厚度均逐步增加, 其中, 在 750 °C 下形成 0.2 μm 氧化物层/1 μm 氮化物层/1.8 μm 的富 Al 扩散层, 在 800 °C 下形成 0.4 μm 氧化物层/1.2 μm 氮化物层/2 μm 的富 Al 扩散层。

### 2.3 表面硬度

图 3 是不同温度下等离子氮氧共渗试样的表面硬度测试结果。从图 3 可以看到, TC4 基体的硬度约为 300 HV, 等离子氮氧共渗后硬度有效提高, 700 °C 处理后表面硬度约为 490 HV, 750 °C 处理后提高到 545 HV, 但温度继续提高到 800 °C 时, 表面硬度仅略有提高, 为 554 HV。分析认为, 等离子氮氧共渗能够在 TC4 基体表面形成多层复合的氧化物/氮化物渗层, 这些氧化物、氮化物的硬度都显著高于基体, 从而提高了基体的表面硬度。

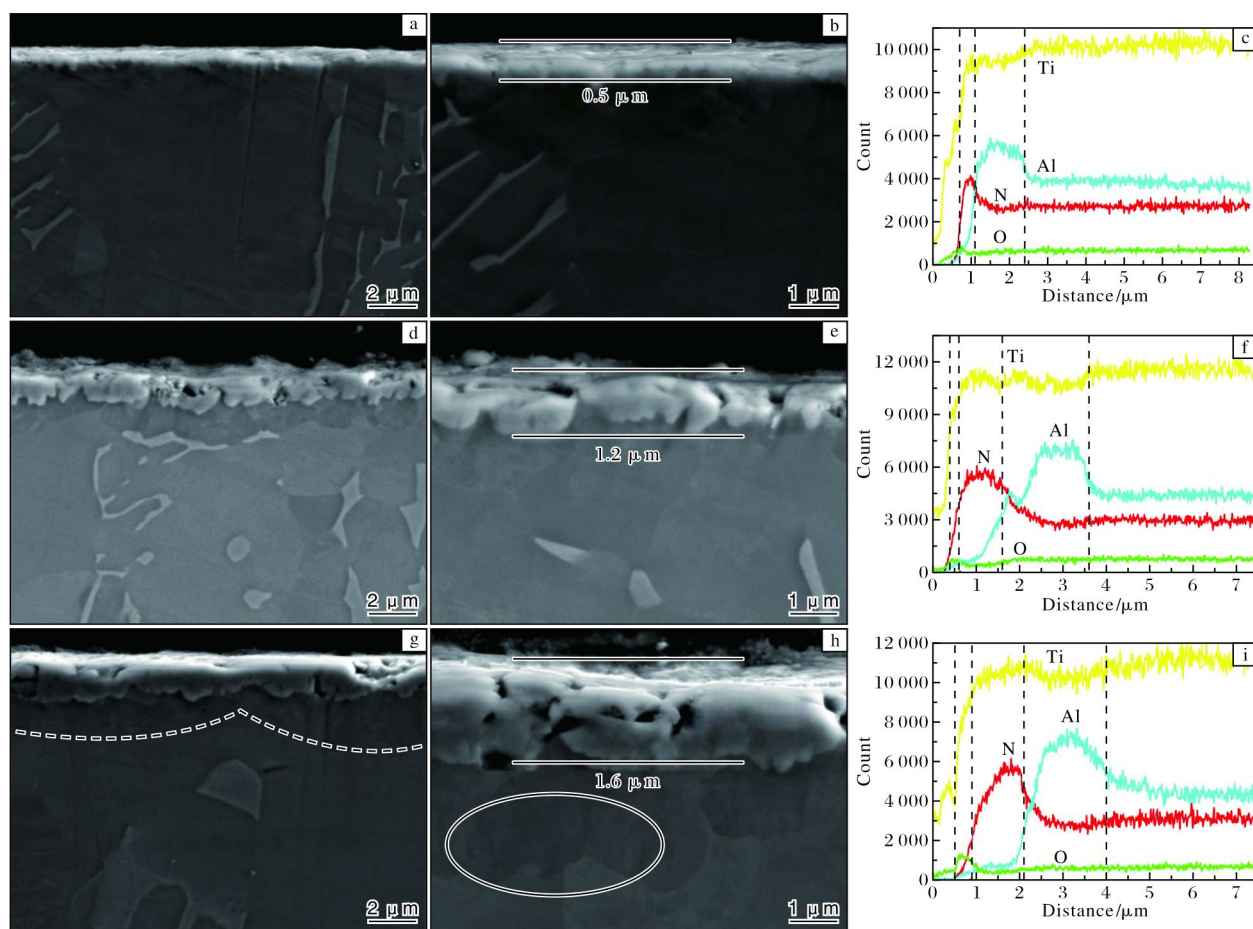


图 2 不同温度下等离子氮氧共渗试样的截面形貌及 EDS 元素线扫描图

Fig.2 Cross-section morphologies and EDS element line scan maps of plasma oxynitriding specimens at different temperatures: (a-c) 700 °C; (d-f) 750 °C; (g-i) 800 °C

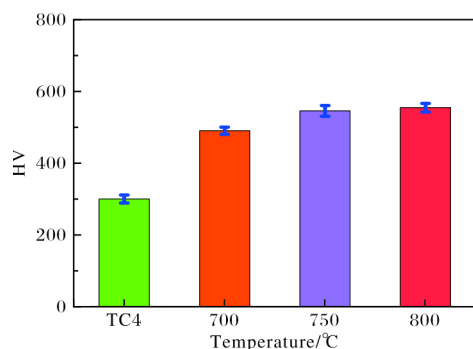


图 3 不同温度下等离子氮氧共渗试样的表面硬度

Fig.3 Surface hardness of plasma oxynitriding specimens at different temperatures

值得注意的是, 当反应温度为 700 °C 时, 复合渗层的厚度较薄, 在 1.96 N 载荷作用下被击穿, 因此表现出较低的表面硬度。而在 750、800 °C 下形成的复合渗层厚度较厚, 在 1.96 N 载荷作用下渗层未被击穿, 因此两组试样的表面硬度较高, 同时两者的渗层结构

一致, 表面硬度差距较小。

## 2.4 摩擦磨损性能

图 4 为等离子氮氧共渗试样的摩擦系数曲线。从图 4 可以看出, TC4 基体的摩擦系数基本在 0.4~0.5 之间, 平均摩擦系数为 0.44; 经 700 °C 等离子氮氧共渗后, 试样的摩擦系数在 100 s 内快速上升, 随后稳

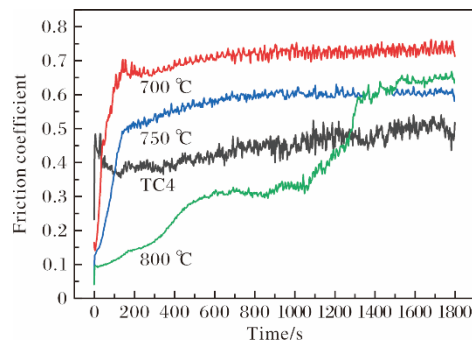


图 4 等离子氮氧共渗试样的摩擦系数曲线

Fig.4 Friction coefficient curves of plasma oxynitriding specimens

定在 0.65~0.75 之间, 平均摩擦系数为 0.69; 750 °C 等离子氮氧共渗后, 试样的摩擦系数也是在 100 s 内快速上升, 随后稳定在 0.5~0.6 之间, 平均摩擦系数为 0.56, 与 700 °C 试样相比略有下降; 经 800 °C 处理后, 试样的摩擦系数在 550 s 内逐步上升至 0.3, 随后在 550~1060 s 内稳定在 0.3, 然后在 1060~1320 s 再次开始上升, 最终稳定在 0.60~0.65 之间。

结合试样的微观结构分析(图 1、图 2)可知, 等离子氮氧共渗形成的氧化物层能够降低 TC4 钛合金的摩擦系数, 而氮化物层则会使摩擦系数增加。700 °C 试样表面氧化物层最薄, 因此摩擦系数最大。750 °C 试样表面氧化物层增加, 但厚度也较薄, 摩擦系数相

比 700 °C 试样有所降低。而 800 °C 试样因制备温度较高, 最外层形成了  $\text{TiO}_2$  层, 此时氧化层较为平整, 摩擦系数只有 0.3 左右, 但由于  $\text{TiO}_2$  的断裂韧性(约  $2\sim 3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ )很低, 耐磨性较差, 仅约 10 min 后就被磨损击穿, 露出氮化物层, 摩擦系数也增加至 0.65 左右, 与 700、750 °C 试样基本一致。

## 2.5 磨痕形貌

图 5 为 TC4 基体及不同温度等离子氮氧共渗试样的磨痕形貌, 图 6 为试样磨痕区域的 EDS 元素面扫描图。从 TC4 基体的磨痕形貌(图 5a~5c)可以看出, TC4 基体的耐磨性能较差, 经过摩擦后表面出现大量犁沟和白色颗粒状磨屑, 说明 TC4 基体磨损较为严重,

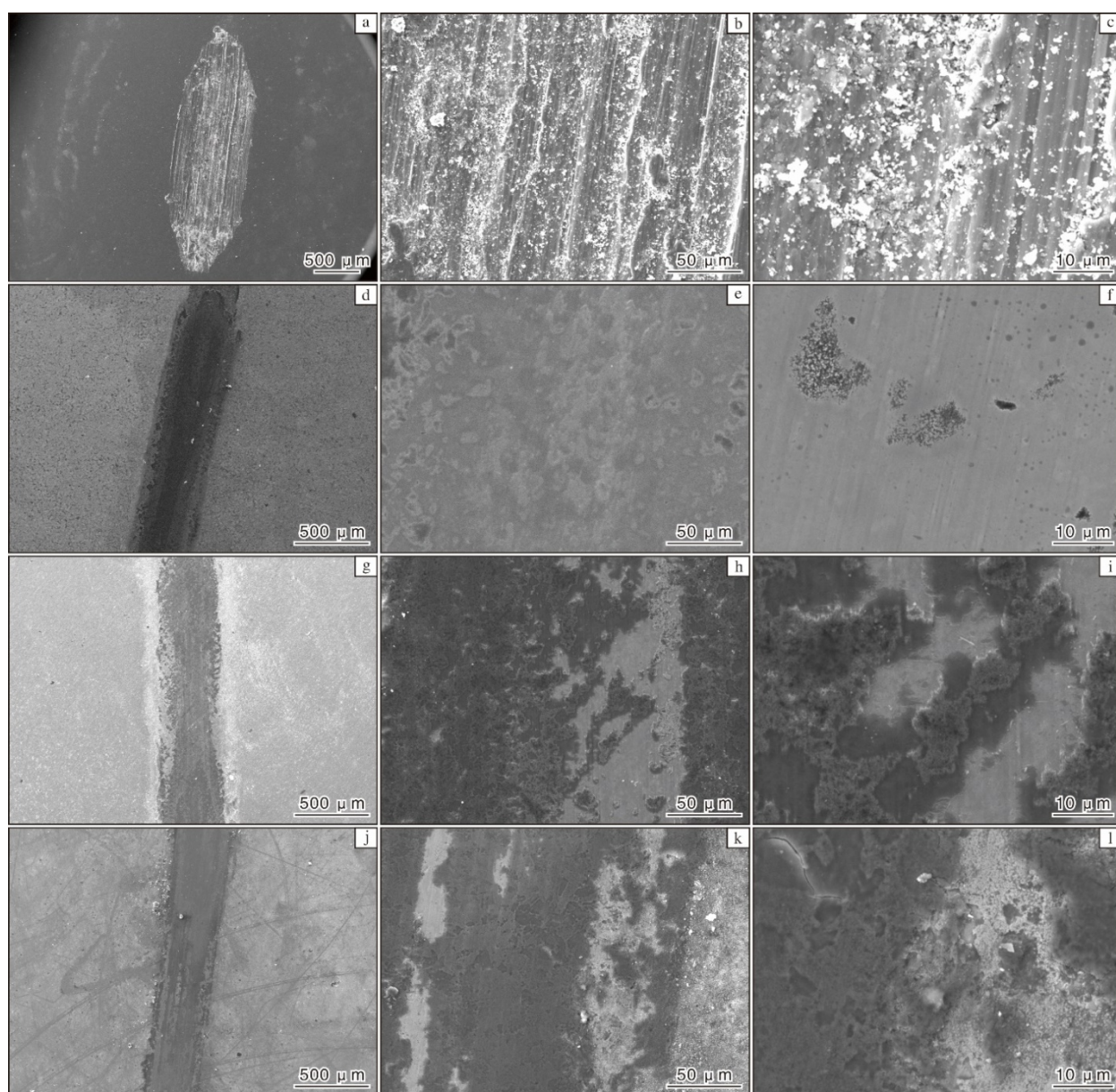


图 5 TC4 基体及不同温度等离子氮氧共渗试样的磨痕形貌

Fig.5 Wear morphologies of TC4 substrate and plasma oxynitriding specimens at different temperatures:  
(a-c) TC4; (d-f) 700 °C; (g-i) 750 °C; (j-l) 800 °C

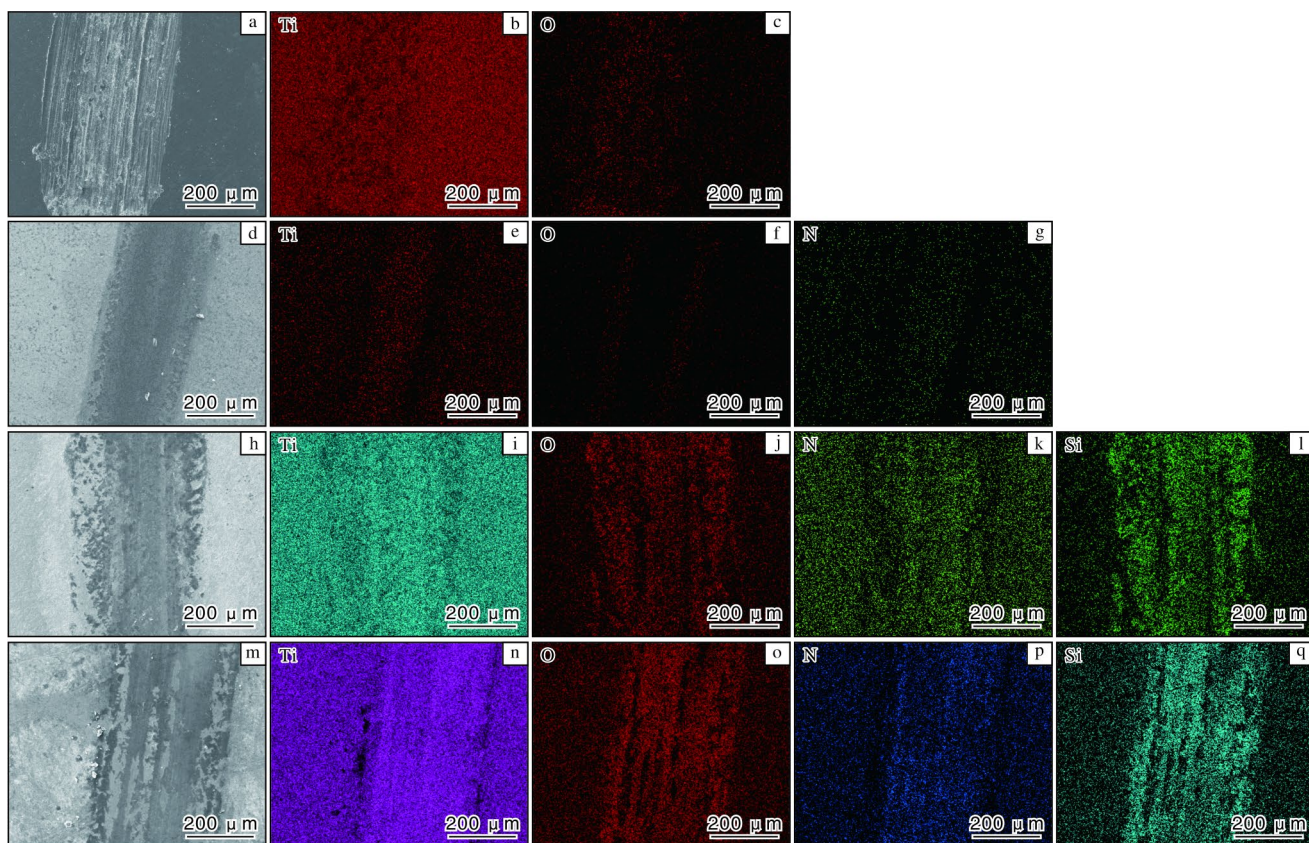


图 6 TC4 基体及不同温度等离子氮氧共渗试样磨痕区域的 EDS 元素面扫描图

Fig.6 EDS element surface scan maps of worn area of TC4 substrate and plasma oxynitriding specimens at different temperatures:  
(a-c) TC4; (d-g) 700 °C; (h-l) 750 °C; (m-q) 800 °C

此时的磨损方式主要为磨粒磨损。同时, 根据 EDS 元素面扫描结果 (图 6b~6c) 可知, 表面形成大量氧化钛, 说明除磨粒磨损外, 还发生了严重氧化。

经 700 °C 等离子氮氧共渗处理后, 试样的磨痕宽度 (图 5d) 相比基体有所减小, 放大观察发现未出现犁沟, 磨痕呈现片状组织 (图 5e、5f), 结合 EDS 元素面扫描结果 (图 6e~6g) 可知, 磨痕最中间区域为 Ti、N 两种元素 (即氮化钛涂层), 说明此时等离子氮氧共渗层未被磨穿, 依然能够有效保护基体。同时, 磨痕两侧 O 元素富集, 说明发生了明显的氧化或最外层的氧化物层已被磨损, 堆积在磨痕两侧。根据磨痕形貌, 此时的磨损方式主要是黏着磨损。

经 750 °C 等离子氮氧共渗处理后, 试样的磨痕宽度 (图 5g) 与 700 °C 试样基本一致, 放大观察发现也未出现犁沟, 磨痕呈现鳞片状组织 (图 5h、5i), 磨损方式依然以黏着磨损为主。结合 EDS 元素面扫描结果 (图 6i~6l) 可以发现, 此时磨痕主要由 Ti、N、O、Si 元素组成。Si 的出现说明此时对磨球自身硬度低于共渗层, 反被共渗层磨损; 只在磨痕中观察到大量的 O 元素, 说明摩擦过程中出现了明显的氧化行为; 磨

痕及磨痕外围出现大量的 N 元素, 说明共渗层主要为氮化物层, 且摩擦过程中氮化物层能够有效保护基体。

经 800 °C 等离子氮氧共渗处理后, 试样的磨痕宽度 (图 5j) 略有减小, 放大观察发现未出现犁沟, 磨痕主要由较平整的深灰色区域和较粗糙的浅灰色区域 (图 5k、5l) 组成, 磨损方式依然以黏着磨损为主。结合 EDS 元素面扫描结果 (图 6n~6q) 可以发现, 此时磨痕主要由 Ti、N、O、Si 元素组成, 与 750 °C 试样类似, Si 的出现也说明氮化硅对磨球被磨损, 部分脱落附着在磨痕表面。但 O 元素除了在磨痕中间区域富集, 也存在于磨痕以外的位置, 这是由于在 800 °C 等离子氮氧共渗过程中最外层形成了明显的  $\text{TiO}_2$  层, 结合图 4 的摩擦系数结果可推测, 在摩擦初期, 氮化硅对磨球与最外层的氧化钛层进行摩擦, 氧化钛层表面光滑, 能有效降低摩擦系数, 起到减磨润滑的效果。但是最外层的氧化钛结构不致密, 经过初期摩擦后被消耗, 随后对磨球与下层的氮化钛层进行摩擦, 该氮化钛层具有优异的耐磨性能, 能有效保护基体材料不被磨损。

综上可知, 等离子氮氧共渗能够有效提高 TC4 基

体的耐磨性能,使磨损方式由磨粒磨损转变为黏着磨损,同时在摩擦过程中会出现明显的氧化行为。

### 3 结 论

(1) 采用等离子氮氧共渗技术在 TC4 基体表面形成了氧化钛/氮化钛/富 Al 扩散层结构的多层复合渗层,并且随着等离子氮氧共渗反应温度的升高,共渗层厚度逐渐增加,700 °C 时渗层厚度为 0.5  $\mu\text{m}$ ,750 °C 时为 1.2  $\mu\text{m}$ ,800 °C 时为 1.6  $\mu\text{m}$ 。

(2) 随着反应温度的升高,等离子氮氧共渗试样的硬度逐渐增大,由 700 °C 时的 490 HV 增大至 800 °C 时的 554 HV。

(3) 700、750 °C 制备的试样摩擦系数显著高于 TC4 基体,而 800 °C 试样的初期摩擦系数较低,随后逐渐增加至约 0.65,与 700、750 °C 试样的摩擦系数基本一致。等离子氮氧共渗能够有效保护基体,提高耐磨性能,并使磨损方式由磨粒磨损变为黏着磨损。

#### 参考文献 References

- [1] 赵永庆,奚正平,曲恒磊.我国航空用钛合金材料研究现状[J].航空材料学报,2003,23(Z1): 215-219.
- [2] 任晓龙,陈宇,张胜,等.航空用超大规格 TC18 钛合金棒材的制备及组织性能研究[J].钛工业进展,2024,41(3): 14-18.
- [3] Song B, Xi H L, Fu Y, et al. Influence of pre-deformation on phase transformations and microstructures in near  $\beta$  Ti alloy during aging[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53(11): 3001-3009.
- [4] 范玉婷,郑友平,秦海旭,等.大截面 TC4 钛合金锻件缺陷形成机理研究[J].钛工业进展,2024,41(6): 27-32.
- [5] Li X, Wang K X, Jiang B, et al. Enhancing corrosion and wear resistance of a 7075 aluminum alloy via depositing TC4 coating[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 32: 1736-1748.
- [6] 刘龙翔,倪陈兵,王优强,等.基于表面微结构的钛合金摩擦学性能研究进展[J].表面技术,2025,54(2): 52-69.
- [7] 王东,张晓静,戴泓源,等.钛及钛合金表面处理技术研究进展[J].中国材料进展,2024,43(10): 924-934.
- [8] 姬寿长,李京龙,李争显,等.TC21 钛合金表面处理技术的研究现状[J].热加工工艺,2021,50(4): 17-20.
- [9] 汤军辉,段峻,纪秀林.以 TC4 钛合金粗粉为原料不同工艺制备涂层的耐腐蚀与耐磨性能[J].机械工程材料,2024,48(5): 74-83.
- [10] 张岚,靳磊,刘洪波,等.冷喷涂 TC4 颗粒撞击 TC4 基体的模拟研究[J].机械研究与应用,2025,38(2): 74-76.
- [11] Ji P F, Lü K, Chen W D, et al. Influence of nano-zirconia on micro-arc oxidation film of TC4 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(5): 1583-1592.
- [12] 庄唯,王耀勉,杨换平,等.钛合金渗碳处理研究进展[J].材料导报,2020,34(S2): 1344-1347.
- [13] Wang Y S, Wang R Y, Xue C, et al. Microstructure, adhesion, and properties of multilayer structure WC/W/MCrAlY coating on  $\gamma$ -TiAl alloy prepared by plasma surface metallizing technique and microwave plasma chemical vapor deposition[J]. Advanced Engineering Materials, 2023, 25(5): 2200560.
- [14] Shayapov V R, Zakharchenko K V, Kapustin V I, et al. Hardness and strengthening effect of low-pressure chemical vapor deposition  $\text{BC}_x\text{N}_y$  coatings deposited on Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31: 3792-3798.
- [15] Lu Y, Guan W, Ye Y, et al. Wear characteristics of PVD coated carbide tools in milling of TA15 titanium alloy[J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 108058.
- [16] Demirov A P, Blinkov I V, Sergevnin V S, et al. Thermal stability and electrochemical behavior of nanostructured Ti-Al(1%(at.)))-Mo-N coatings deposited using the Arc-PVD method[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 929: 167269.
- [17] 黄达,何卫锋,吕长乐,等.离子注入对 TC4 钛合金 TiN/Ti 涂层结合力和抗砂尘冲蚀性能的影响[J].表面技术,2020,49(7): 184-191.
- [18] 李鑫,刘红军,赵宇辉,等.WC 颗粒含量对 TC4 激光沉积耐磨特性的影响机制研究[J].稀有金属材料与工程,2023,52(5): 1861-1868.
- [19] 南榕,孙花梅,蔡建华,等.钛及钛合金表面处理技术研究进展[J].钛工业进展,2025,42(3): 40-47.
- [20] 王婧.钛合金表面处理技术及其对材料耐蚀性的影响[J].冶金与材料,2025,45(4): 107-109.
- [21] 胡林泉.TC4 钛合金表面氮氧共渗及其摩擦行为研究[D].南京:南京航空航天大学,2019.
- [22] Mahboubi F, Fattah M. Duplex treatment of plasma nitriding and plasma oxidation of plain carbon steel[J]. Vacuum, 2005, 79(1/2): 1-6.