

# 兵器用 TC4 钛合金装甲板表面改性工艺研究

王艺潼,周宇君,杨胜参,金 露,赵 玥,苏 丽,于宏宝

(桂林电子科技大学 材料科学与工程学院 广西 桂林 541004)

**摘要:**钛合金因密度小、比强度高、耐腐蚀等性能,在国防工业领域备受青睐,已广泛应用于坦克装甲车、火炮等兵器设备。但因其表面硬度低、耐磨性差,限制了钛合金的使用范围。本研究以 TC4 钛合金板材为研究对象,对其表面实施离子渗氮处理,旨在提高合金的表面硬度并探究其在渗氮后组织结构和性能变化。利用 X 射线衍射仪和扫描电子显微镜对离子渗氮后的组织进行观察,通过维氏显微硬度仪测定试样的硬度,分析离子渗氮工艺对组织、结构和性能的影响。结果表明,当渗氮工艺参数为 450 °C、保温 8 h 时,TC4 钛合金试样呈现金黄色,其表面形成的渗氮层主要含有高硬度的 TiN 相,使得 TC4 钛合金在平面和厚度两个方向的表面硬度都得到了提升,且厚度方向上的硬度提升效果更为显著。

**关键词:**TC4 钛合金;离子渗氮;表面硬度;显微组织

中图分类号: TG178

文献标识码:A

文章编号:1000-8365(2025)11-1125-06

## Research on the Surface Modification Process of a TC4 Titanium Alloy Armor Plate for Weapons

WANG Yitong, ZHOU Yujun, YANG Shengcan, JIN Lu, ZHAO Yue, SU Li, YU Hongbao

(School of Materials Science and Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Titanium alloys, which are favoured by the national defense industry for their excellent properties, such as low density, high specific strength and corrosion resistance, are used in tanks, armored vehicles, artillery and other weapons and equipment. However, owing to their low surface hardness and poor wear resistance, the application range of titanium alloys is limited. On this basis, the surface of the TC4 titanium alloy sheet was treated by ion nitriding to improve the surface hardness of the alloy and to explore the changes in microstructure and properties after nitriding. The microstructure after ion nitriding was observed via X-ray diffraction and scanning electron microscopy. The hardness of each sample was measured via a Vickers microhardness tester, and the effects of the ion nitriding process on the microstructure, structure and properties were analysed. The results show that the surface of the TC4 titanium alloy sample is golden yellow after nitriding at 450 °C for 8 h. The nitriding layer formed on the surface mainly contains a TiN phase with high hardness, which improves the surface hardness of the TC4 titanium alloy in both the plane and thickness directions, and the effect of increasing hardness in the thickness direction is more significant.

**Key words:** TC4 titanium alloy; ion nitriding; surface hardness; microstructure

钛合金作为一种重要的高性能结构材料,因其具有比强度高、优良的耐腐蚀、低密度和生物相容性好等优点,在国防工业、航空航天、医疗器械等领域得到广泛应用<sup>[1]</sup>。凭借其自身卓越的性能已成为武器装备性能提升与轻量化的首选材料。目前,在

军用陆基武器领域,其最具代表性的应用案例包括 M1A1 主战坦克、M2 布雷德利战车以及轻型 155 mm 火炮 M777 等<sup>[2]</sup>。随着科学技术的发展,武器装备对高性能及轻量化水平的要求日益增高。但钛合金普遍存在硬度低、耐磨性差等问题限制了其在军事活

收稿日期: 2025-03-16

基金项目: 广西壮族自治区创新训练项目(S202310595271)

作者简介: 王艺潼,2004 年生,硕士生。研究方向为钛合金表面处理。Email: 980253344@qq.com

通信作者: 于宏宝,1977 年生,博士,工程师。研究方向为 TiAl 合金、Ti 基复合材料热成形技术、组织性能研究。

Email: yuhongbao@guet.edu.cn

引用格式: 王艺潼,周宇君,杨胜参,金露,赵玥,苏丽,于宏宝. 兵器用 TC4 钛合金装甲板表面改性工艺研究[J]. 铸造技术, 2025, 46(11): 1125-1130.

WANG Y T, ZHOU Y J, YANG S C, JIN L, ZHAO Y, SU L, YU H B. Research on the surface modification process of a TC4 titanium alloy armor plate for weapons[J]. Foundry Technology, 2025, 46(11): 1125-1130.

动中的应用<sup>[3-5]</sup>。因此,开发设计合理的改性技术提升钛合金的性能,对拓展其应用价值具有重要意义。

由于钛合金硬度低、耐磨性,学者对钛合金表面处理的研究集中在渗氮技术上<sup>[6-11]</sup>。李永康等<sup>[7]</sup>通过探究不同温度下TC4钛合金离子渗氮层,不同温度下TC4钛合金渗层主要都由TiN、Ti<sub>2</sub>N相组成,其合金试样硬度和耐腐蚀性都得到提高,渗层随着渗氮温度的升高而增厚。Yang等<sup>[8]</sup>采用电子熔炼技术(electron beam melting, EBM)对Ti6Al4V钛合金进行等离子渗氮处理,成功制备得到PN-EBM钛合金试样,且PN-EBM钛合金在天然海水中的耐腐蚀性显著优于电子束钛合金。闫计文<sup>[9]</sup>采用空心阴极等离子体技术SLM-TC4钛合金进行表面渗氧处理,将研究结果与测试结果进行相互验证,渗氮处理后得到试样电化学性能摩擦性能都得到提高,渗氧处理后的试样的抗腐蚀性能优于渗氮试样。吴国龙等<sup>[10]</sup>在不同的氮气气氛下激光选区熔化成形TC4合金,不仅实现了TC4钛合金的耐磨性能提升,而且有效提高了高耐磨性能钛合金的制备效率。高鸿等<sup>[11]</sup>研究了高频电源与活性屏离子渗氮对表面纳米TC4钛合金渗氮层结合力的影响,发现高频电源抑制了传统直流电源渗氮过程中的打弧现象并缓解渗氮层内部的热应力聚集,提高了渗氮层的表面性能,对渗氮层载荷承受力和结合力有一定的提升作用。采用高频电源与活性屏组合工艺,优化后渗氮试样的渗氮动力学条件更好,Ti<sub>2</sub>N层厚度显著增加,提高了基体中氮扩散层的性能。同时,Ti<sub>2</sub>N厚度的增加可以减缓TiN层与基体的成分与性能的突变,从而提升渗氮层与基体的结合力。

本文采用离子渗氮技术,开展TC4钛合金的表面改性研究,研究TC4钛合金试样在不同渗氮面上经过离子渗氮处理后试样表面的结构、组织和性能变化。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 材料制备

实验选用的材料为退火态TC4钛合金,其化学成分如表1所示。如图1所示试样尺寸为9 mm×3 mm×15 mm,表面无氧化、无锈蚀、无裂纹、无划伤等缺陷。

表1 TC4钛合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of the TC4 titanium alloy  
(mass fraction/%)

| Element | Al  | V   | Fe   | C    | N     | H       | O     |
|---------|-----|-----|------|------|-------|---------|-------|
| Content | 6.1 | 4.0 | 0.18 | 0.03 | 0.009 | <0.0003 | <0.16 |

选取TC4钛合金试样两个表面,分别是平面方

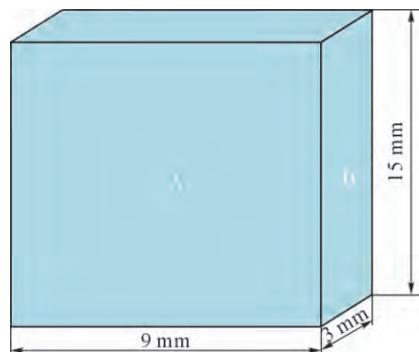


图1 钛合金试样

Fig.1 Size of the titanium alloy sample

向的A表面与厚度方向的B表面(以下简称A、B面)。用1000、1500、2000、2500和3000号砂纸打磨至表面光滑,用超声波清洗机清洗10 min后,再用MP-1B研磨抛光机加W2.5金刚石研磨膏抛光。随后将试样放入多功能离子化学热处理炉中,将炉内真空中度至10~20 Pa,调节工作电压为900 V,占空比为14.4%~16.2%,随后打开氮气瓶,调节流量计使气压维持在200 Pa,在450 °C温度下渗氮8 h。

### 1.2 表征方法

将渗氮处理后的TC4钛合金试样用D8-ADVANCE型号的X射线衍射仪对经渗氮处理的钛合金进行物相分析(腐蚀液:50 mL去离子水+1.5 mL氢氟酸+2.5 mL硝酸溶液,蚀刻10 s);用Quanta FEG 450型FEG(FE-SEM)的电子显微镜对离子渗氮后的试样进行微观组织形貌分析;采用维氏HT-1000显微硬度机对样品进行硬度测试,试验力300 g,负荷保持时间10 s。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 表面形貌分析

图2展示了TC4钛合金在平面和厚度两个方向上渗氮前后的样品宏观形貌特征。其中未进行渗氮处理的TC4钛合金试样表面呈现出带有金属光泽的银灰色,经离子渗氮处理后的TC4钛合金试样表面呈现出金黄色,该颜色的形成可能因其表面形成一层连续且相对较薄的硬质氮化物薄膜中含有TiN,金黄色是TiN所特有的颜色<sup>[3]</sup>。与TC4钛合金的常规渗氮工艺相比,采用离子渗氮工艺制备的钛合金渗氮层均匀性更优,且未出现常规渗氮过程中常见的边缘效应<sup>[12-13]</sup>。

### 2.2 渗氮层的物相分析

图3为TC4钛合金经不同方向(平面方向和厚度方向)渗氮处理后的XRD图谱,结果表明,TC4钛合金经离子渗氮处理后,在平面和厚度方向上均出现了TiN和Ti<sub>2</sub>N相。在平面方向上,Ti、TiN和Ti<sub>2</sub>N

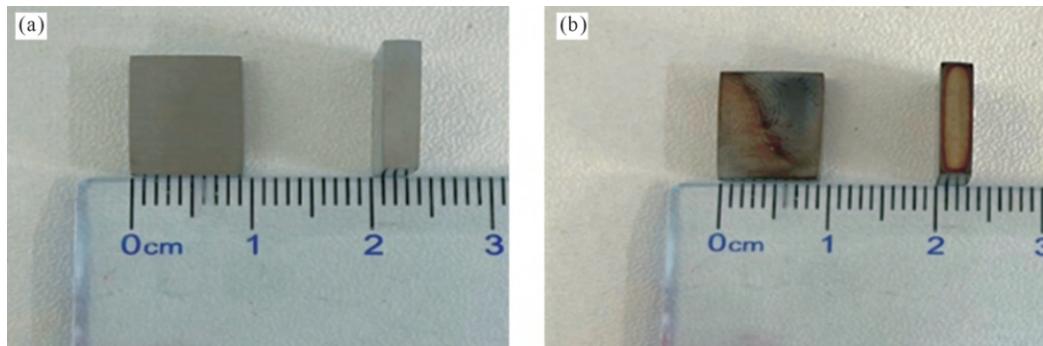


图 2 TC4 钛合金宏观形貌:(a) 渗氮前;(b) 渗氮后  
Fig.2 Macroscopic morphology of the TC4 titanium alloy: (a) before nitriding; (b) after nitriding

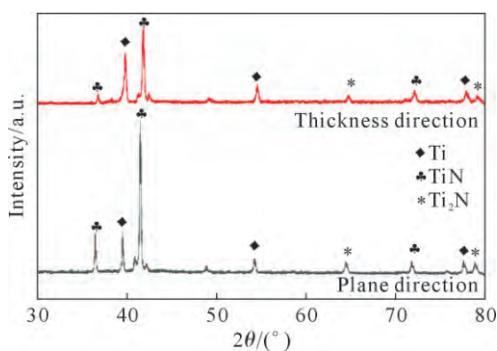


图 3 平面、厚度方向渗氮后 TC4 的 XRD 谱  
Fig.3 XRD patterns of TC4 after nitriding in the plane and thickness directions

的衍射峰都比较明显且强度较高,这表明钛合金的表面 A 经过离子渗氮处理后,形成了较为明显的 TiN 和  $Ti_2N$  相,且这些相的晶体结构较为完整和有序。在厚度方向上,虽然也能观察到 Ti、TiN 和  $Ti_2N$  的衍射峰,但强度相对较低。这说明在厚度方向上,B 面尽管也形成了这些相,但由于渗氮过程中的某些因素如扩散速率、应力分布等,导致这些相的生长不如平面方向上完整和有序,晶体结构存在更多的缺陷或不均匀。同时衍射峰强度不同主要与离子渗氮过程中的扩散机制、应力分布等因素有关<sup>[1,14-18]</sup>。

### 2.3 渗氮层的显微结构分析

图 4 为 TC4 钛合金试样渗氮前后的截面形貌和能谱线扫图。图中 A1 表示 TC4 钛合金试样已在平面 A 上进行渗氮处理;A2 表示 TC4 钛合金试样在平面 A 上没有进行渗氮处理;B1 表示 TC4 钛合金试样已在表面 B 上进行渗氮处理;B2 表示 TC4 钛合金试样在表面 B 上未进行渗氮处理。在未渗氮试样的截面形貌图(图 4b 和 d)中,其显微组织由等轴  $\alpha$ -Ti(图中可见较暗区域)和残留  $\beta$ -Ti 晶粒(图中可见的较亮区域)构成。在渗氮试样的截面形貌图(图 4a 和 c)中,渗氮层的组织主要由  $\alpha$ -Ti(N)和  $\beta$ -Ti 晶粒组成的氮固溶体,但在样品表面稍亮的区域可能存在  $Ti_2N$  组成的脆性层,这一现象主要归因于较低工艺温度下形成的致密均匀组织,低温条件下主

要生成高硬度的 TiN 相,可显著提高渗氮层硬度,该结论与宏观形貌观察结果一致。在渗氮过程中,氮原子从气相扩散到固相,在表面产生了一个致密的氮化物层<sup>[19]</sup>。这层致密的氮化物层构成了氮原子进一步扩散的能垒,需克服特定能量势垒才能继续渗入。其均匀致密的组织与清晰界面,在保障钛合金表面性能提升的同时,有效维持了基体韧性等性能,进而规避渗氮处理可能引发的脆化风险<sup>[20-26]</sup>。

### 2.4 硬度分析

图 5 是 TC4 钛合金渗氮前后分别在平面、厚度两个不同方向上的表面硬度,其中 A1 表示 TC4 钛合金试样已在平面方向上进行渗氮处理;A2 表示 TC4 钛合金试样在平面方向上未进行渗氮处理;B1 表示 TC4 钛合金试样已在厚度方向上进行渗氮处理;B2 表示 TC4 钛合金试样在厚度方向上未进行渗氮处理。结果表明,在平面方向上,未经渗氮处理的 TC4 钛合金试样的平均硬度 348.76 HV, 渗氮处理后平均硬度 421.15 HV, 较基体硬度提升 20.76%;厚度方向上,渗氮后平均硬度 441.04 HV, 较基体硬度提升了 29.10%。显然可见经过渗氮处理后 TC4 钛合金在平面和硬度方向上的硬度都得到了提高,且在厚度方向上的硬度提升效果更为显著,相关硬度数据详见表 2。

据相关研究显示<sup>[27-28]</sup>,钛合金 TC4 的表面硬度显著提高,这可能归因于温度对氮原子扩散行为的促进作用以及氮化物层的形成,离子渗氮过程中,氮原子会在材料表面形成具有较高的硬度的氮化物层,有效地提高了钛合金表面的硬度。经低温渗氮处理后,TC4 钛合金表面形成了由 TiN 和  $Ti_2N$  组成的氮化物层,钛的氮化物具有极高的硬度,同时氮化物层较为致密,其在钛合金表面的形成与积累使得表面硬度的提升。

## 3 结论

(1)TC4 在离子渗氮后,在平面和厚度方向上均形成了 TiN 和  $Ti_2N$  相,渗氮处理后在钛合金表面生

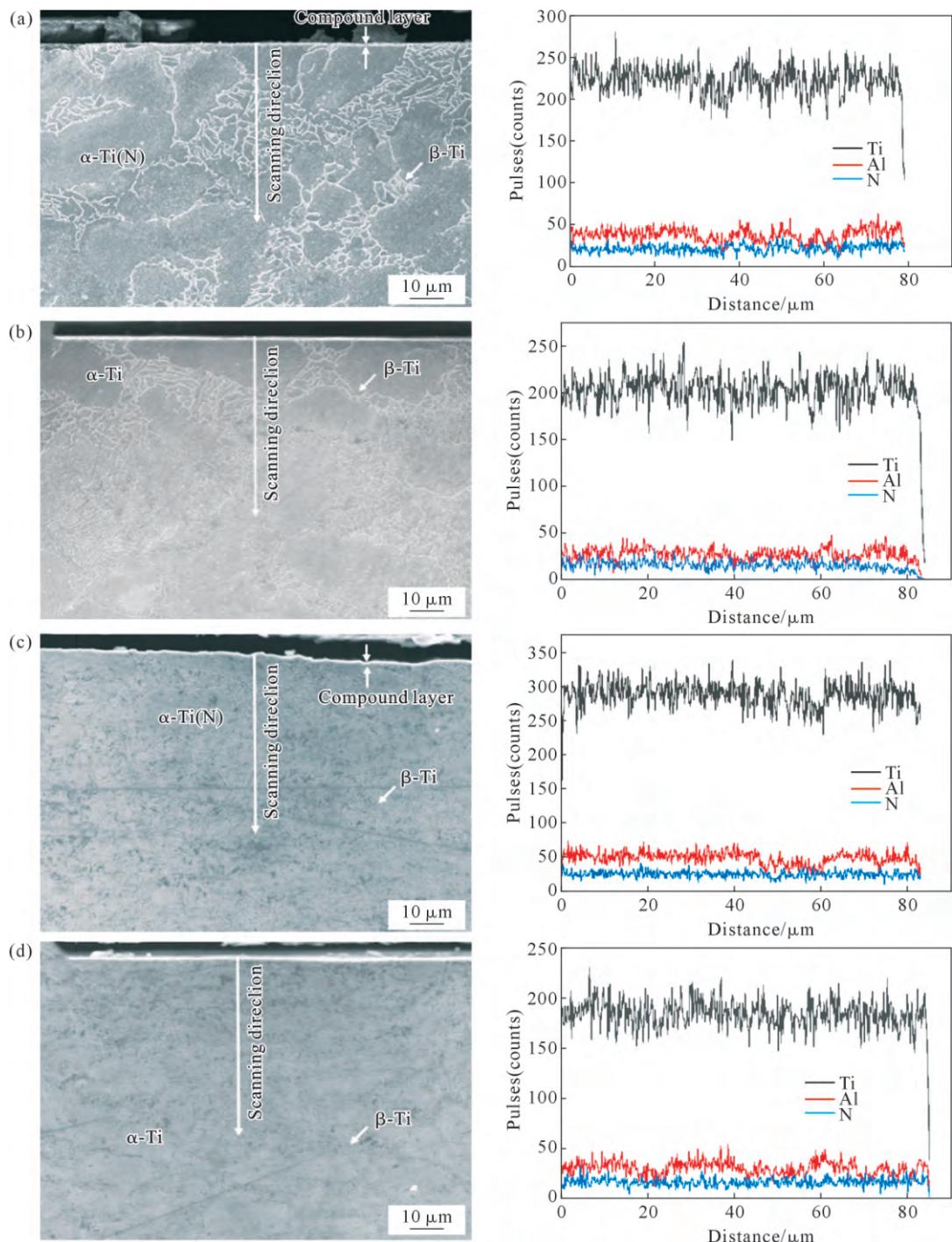


图4 试样截面形貌和能谱线扫图:(a)平面已渗;(b)平面未渗;(c)厚度已渗;(d)厚度未渗

Fig.4 Cross-sectional morphology and spectral line scan results of the sample: (a) plane infiltrated; (b) plane not infiltrated; (c) thickness infiltrated; (d) thickness not infiltrated

表2 TC4 钛合金不同方向渗氮前后表面硬度

Tab.2 Surface hardness of the TC4 titanium alloy before and after nitriding in different directions

| Name | Hardness(HV) |        |        |        |        |        |        |        | Mean    | Error |
|------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|-------|
| A1   | 428.17       | 419.40 | 432.05 | 414.50 | 425.96 | 421.18 | 431.54 | 421.66 | 424.31  | 6.18  |
| A3   | 347.49       | 352.35 | 348.85 | 331.94 | 350.25 | 342.30 | 330.11 | 336.31 | 342.45  | 8.67  |
| B1   | 450.82       | 440.50 | 435.12 | 445.52 | 451.66 | 425.31 | 434.29 | 446.34 | 438.70  | 9.14  |
| B3   | 338.12       | 341.47 | 341    | 336.39 | 336.55 | 331.79 | 334.67 | 336.13 | 337.015 | 3.19  |

成了氮化层。在平面方向上,Ti-TiN 和 Ti<sub>2</sub>N 的衍射峰明显且强度较高,晶体结构较为完整有序;而在平面方向上渗氮效果不如厚度方向上显著。

(2)渗氮层结构密集且均匀,其与基体之间的界面清晰光滑,无明显缺陷。氮化物颗粒均匀分布在基体内,增强了氮化层硬度,与未渗氮的钛合金相比,

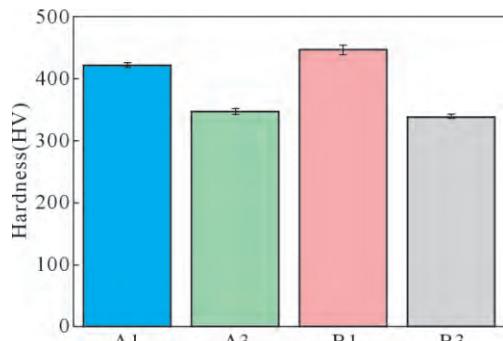


图 5 TC4 钛合金不同方向渗氮表面硬度

Fig.5 Surface hardness of the TC4 titanium alloy samples nitrided in different directions

硬度显著提高,能有效增强耐磨性,同时保证了基体的韧性等性能不受损,避免因渗氮导致脆性增加。

(3)TC4 钛合金经离子渗氮处理后,在平面与厚度两个方向上的表面硬度都得到提升,在平面方向上渗氮处理后平均硬度可达到 421.154 HV,比基体硬度提高了 72.392 HV,厚度方向上渗氮后平均硬度达到 441.039 HV,比基体硬度提高了 99.422 HV。在厚度方向上的硬度提升效果更为显著。

## 参考文献:

- 杨闯,刘静,马亚芹,洪流,王华. TC4 钛合金表面低压渗氮层的显微组织与耐磨性能[J]. 机械工程材料,2016,40(6): 98-101.  
YANG C, LIU J, MA Y Q, HONG L, WANG H. Microstructure and wear resistance of low pressure nitrided layer on TC4 titanium alloy surface[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2016, 40 (6): 98-101.
- 杜树芳. 离子渗氮技术的发展[J]. 热处理,2018, 33(4): 55-59.  
DU S F. Development of plasma nitriding technology[J]. Heat Treatment, 2018, 33(4): 55-59.
- 朱全意,李双喜,赵少甫,孙启峰. 离子渗氮技术在工程应用中的研究进展[J]. 热加工工艺,2019, 48(10): 35-38.  
ZHU Q Y, LI S X, ZHAO S F, SUN Q F. Research progress of ion nitriding technology in engineering applications[J]. Hot Processing Technology, 2019, 48(10): 35-38.
- 陈京生,孙葆森,安康. 钛合金在兵器装备上的应用[J]. 兵器装备工程学报,2020, 41(12): 14-20.  
CHEN J S, SUN B S, AN K. Titanium alloys for ordnance equipment applications[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(12): 14-20.
- 郜峥. 高强度装甲防护钢板 AP500 组织性能控制与应用[D]. 沈阳:东北大学,2020.  
GAO Z. Microstructure control and application of high strength armor protective steel plate AP500[D]. Shenyang: Northeastern University, 2020.
- 李聪,莫帆,肖辉,陈汪林. 钛合金的渗氮工艺及机理研究进展[J]. 表面技术,2024, 53(19): 14-26.  
LI C, MO F, XIAO H, CHEN W L. Research progress on nitriding technology and mechanism of titanium alloys[J]. Surface Technology, 2024, 53(19): 14-26.
- 李永康,赵亚晴,邵明昊,赵福帅,王政伟,毕永洁,董永康,姜晓雪,李杨. TC4 钛合金离子渗氮层的微观结构和性能[J]. 热处理,2021, 36(5): 23-27.  
LI Y K, ZHAO Y Q, SHAO M H, ZHAO F S, WANG Z W, BI Y J, DONG Y K, JIANG X X, LI Y. Microstructure and property of ion nitrided layer in TC4 titanium alloy[J]. Heat Treatment, 2021, 36 (5): 23-27.
- LI Y, ZHOU Z L, YI X N, YAN J W, XIU J J, FANG D Z, SHAO M H, REN P, HE Y Y, QIU J X. Improved seawater corrosion resistance of electron beam melting Ti6Al4V titanium alloy by plasma nitriding[J]. Vacuum, 2023, 216: 112463.
- 闫计文. TC4 钛合金空心阴极离子渗氮与摩擦、腐蚀性能研究[D]. 烟台:烟台大学,2024.  
YAN J W. Study on the friction and corrosion properties of TC4 titanium alloy treated by plasma nitriding and oxidizing[D]. Yantai: Yantai University, 2024.
- 吴国龙,王杰,张天亮,王晔,张群莉,姚建华. 含氮气氛下激光选区熔化 TC4 组织与性能研究[J]. 中国激光,2025, 52(12): 198-208.  
WU G L, WANG J, ZHANG T L, WANG Y, ZHANG Q L, YAO J H. Study on microstructure and properties of TC4 by selective laser melting under nitrogen-containing atmosphere [J]. Chinese Journal of Lasers, 2025, 52(12): 198-208.
- 高鸿,文凯,张乘玮,高岩. 高频电源与活性屏离子渗氮对表面纳米化 TC4 钛合金渗氮层结合力的影响[J]. 表面技术,2024, 53 (17): 157-169.  
GAO H, WEN K, ZHANG C W, GAO Y. Effect of high frequency power supply and active screen plasma nitriding on the adhesion of surface nano-sized TC4 titanium alloy nitriding layer [J]. Surface Technology, 2024, 53(17): 157-169.
- 李杨,何永勇,朱宜杰,邱剑勋,修俊杰. 2Cr13 马氏体不锈钢活性屏离子渗氮技术[J]. 金属热处理,2017, 42(5): 163-167.  
LI Y, HE Y Y, ZHU Y J, QIU J X, XIU J J. Active screen plasma nitriding of 2Cr13 martensitic stainless steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(5): 163-167.
- 王亮,杨闯,杨玲,段志光,杨易鑫. 低压真空渗氮处理 TC4 钛合金的腐蚀性能研究[J]. 铸造技术,2014, 35(3): 503-505.  
WANG L, YANG C, YANG L, DUAN Z G, YANG Y X. Corrosion performance of TC4 titanium alloy nitrided in low pressure vacuum[J]. Foundry Technology, 2014, 35(3): 503-505.
- 王琳,孙枫,王赟,佟小军. TC4 钛合金的离子渗氮工艺[J]. 金属热处理,2018, 43(9): 171-175.  
WANG L, SUN F, WANG Y, TONG X J. Plasma nitriding of TC4 titanium alloy[J]. Heat Treatment of Metals. 2018, 43(9): 171-175.
- QAZI J I, RACK H J, MARQUARDT B. High-strength metastable beta-titanium alloys for biomedical applications[J]. JOM, 2004, 56: 49-51.
- 贺瑞军,孙枫,王琳,佟小军. 钛合金离子渗氮后的组织及耐磨性能[J]. 金属热处理,2016, 41(4): 25-29.  
HE R J, SUN F, WANG L, TONG X J. Microstructure and wear resistance of ion-nitrided titanium alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(4): 25-29.

- [17] 成亦飞,王琳,贺瑞军,王赟.钛合金离子渗氮层的摩擦磨损行为[J].金属热处理,2019,44(10): 170-172.  
CHENG Y F, WANG L, HE R J, WANG Y. Friction and wear behavior of titanium plasma nitrided layer[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(10): 170-172.
- [18] 李景阳,王文波,秦林,贺龙宾,刺玲敏,张建林,段星路. TD3 钛合金离子渗氮层的摩擦磨损性能[J]. 金属热处理,2021, 46(9): 258-261.  
LI J Y, WANG W B, QIN L, HE L B, LA L M, ZHANG J L, DU-AN X L. Friction and wear properties of nitrided layer of TD3 titanium alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(9): 258-261.
- [19] BATORY D, SZYMANSKI W, PANJAN M, ZABEIDA O, KLEMBERG-SAPIEHA J E. Plasma nitriding of Ti6Al4V alloy for improved water erosion resistance[J]. Wear, 2017, 374-375: 120-127.
- [20] 李子哲,袁兴栋,方同辉,姜文韬,王学刚.纳米化诱导 TC4 合金表面低温等离子渗氮研究[J].山东建筑大学学报,2023, 38(5): 98-104.  
LI Z Z, YUAN X D, FANG T H, JIANG W T, WANG X G. Study on surface low temperature plasma nitriding of TC4 alloy induced by nanocrystallization[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2023, 38(5): 98-104.
- [21] 彭旭,刘静,张纯,潘大超,李坤茂.TC4 钛合金负压真空脉冲渗氮层的组织与性能[J].材料热处理学,2017, 38(1): 146-151.  
PENG X, LIU J, ZHANG C, PAN D C, LI K M. Microstructure and properties of negative pressure pulse vacuum nitriding layer of TC4 titanium alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2017, 38(1): 146-151.
- [22] 朱小硕.冷变形 Ti6Al4V 合金低温渗氮及时效组织演变研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.  
ZHU X S. Effects of deformation to microstructure of low temperature nitriding and aging of Ti6Al4V alloy[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [23] 王一龙,俞伟元,尚凯. TC4 表面激光渗氮研究[J]. 真空与低温, 2015, 21(3): 173-176, 180.  
WANG Y L, YU W Y, SHANG K W. Studies on laser gas nitriding the surface of titanium TC4[J]. Vacuum and Cryogenics, 2015, 21(3): 173-176, 180.
- [24] 闫峰. 变形 TC4 合金 500 °C 等离子渗氮及时效研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.  
YAN F. Study on microstructure and wear properties of the deformed TC4 alloy treated by 500 °C plasma nitriding and ageing [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [25] 蒋泽儒,杨闯,谢敏娣,朱黄晓舟,袁宗军. TC4 钛合金低压渗氮研究[J]. 现代机械, 2015(2): 81-84.  
JIANG Z R, YANG C, XIE M D, ZHU H X Z, YUAN Z J. Study on low pressure nitriding of TC4 titanium alloy[J]. Metal Materials, 2015(2): 81-84.
- [26] GVOZDEVA O N, SHALIN A V, STEPUSHIN A S, OVCHINNIKOV A V. Influence of concentration-time parameters on nitride coatings formation on VT6 titanium alloy and their stability during subsequent treatment[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 971(5): 052016.
- [27] 胡鹏飞,李洪涛. N<sub>2</sub> 流量对 TiN 镀层组织结构与力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(16): 102-105, 108.  
HU P F, LI H T. Influence of N<sub>2</sub> flow rate on microstructure and mechanical properties of TiN coatings[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(16): 102-105, 108.
- [28] ZHU X S, FU Y D, LI Z F, LENG K. Wear resistance of TC4 by deformation accelerated plasma nitriding at 400 °C [J]. Journal of Central South University, 2016, 23: 2771-2776.

(责任编辑:宫文婧)