DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.4156

渗碳处理对 TA31 钛合金组织及性能影响

田喜明[1],闫　钊[2,3],张晨辉[2,3],吴天栋[2,3],张利军[2,3]

(1. 海军装备部,陕西 西安 710021;2. 西安超晶科技股份有限公司,陕西 西安 710200;3. 陕西省先进金属结构材料精确热成形重点实验室,陕西 西安 710200)

摘　要:TA31 钛合金是一种常用的海洋工作装备用钛合金,因其硬度低耐磨性差导致实际使用寿命较低。为提高 TA31 钛合金的表面硬度进而改善耐磨性,对其进行渗碳处理,并研究渗碳处理对 TA31 钛合金组织及性能的影响。分别对未渗碳和渗碳的 TA31 钛合金试样显微组织、显微硬度、室温拉伸、冲击吸收功进行对比测试。结果表明,渗碳前后TA31 钛合金的显微组织均为双态组织,但渗碳后次生 α 相发生粗化。渗碳处理后 TA31 钛合金表面最高硬度达到 945 HV,有效硬化层超过 100 μm,提高了合金表面耐磨性。渗碳处理后 TA31 钛合金的抗拉强度降低,同时材料的塑性增高、缺口敏感性降低。

关键词:渗碳处理;TA31 钛合金;显微组织;力学性能;耐磨性

中图分类号:TG146.2+3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2025)03-0296-05

Effect of Carburizing Treatment on the Microstructure and Properties of TA31 Titanium Alloy

TIAN Ximing[1], YAN Zhao[2,3], ZHANG Chenhui[2,3], WU Tiandong[2,3], ZHANG Lijun[2,3]

(1. Naval Equipment Department, Xi'an 710021, China; 2. Xi'an Super Crystal Sci-Tech Development Co., Ltd., Xi'an 710200, China; 3. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Precision Hot Stamping of Advanced Metal Structural Materials, Xi'an 710200, China)

Abstract: As a commonly used titanium alloy for marine work equipment, the TA31 titanium alloy has a low actual service life because of its low hardness and poor wear resistance. Carburizing treatment was carried out to increase the surface hardness of the TA31 titanium alloy and thus improve its wear resistance. Moreover, the effects of carburizing treatment on the microstructure and properties of the TA31 titanium alloy were studied. The microstructure, microhardness, and room temperature tensile and impact absorption work of uncarburized and carburized TA31 titanium alloy samples were compared and analysed. The results show that the microstructure of the TA31 titanium alloy before and after carburizing is a bimorphic structure, but the secondary α phase is coarsified after carburizing. After carburizing treatment, the maximum surface hardness of the TA31 titanium alloy reaches 945 HV, and the effective hardening layer exceeds 100 μm, which effectively improves the surface wear resistance of the TA31 titanium alloy. After carburizing treatment, the tensile strength of the TA31 titanium alloy decreases, whereas the plasticity of the material increases and the notch sensitivity decreases.

Key words: carburizing treatment; TA31 titanium alloy; microstructure; mechanical properties; abrasion resistance

TA31 钛合金是一种名义成分为 Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo 的近 α 型钛合金,除具备钛合金传统的高比强度外,该牌号钛合金还具备突出的耐海水、海洋大气腐蚀性能[1]。因此 TA31 钛合金发展成为海洋工程装备中常用的一种钛合金。但在实际应用过程中,TA31 钛合金遇到与其他牌号钛合金相同的挑战。因 TA31 钛合金硬度较低导致表面耐磨性较差,产品实际使用寿命较低。随着全球航空航天和航海事业的快速发展,以及金属加工制造领域的技术迭代,提高钛合金表面硬度可以通过表面处理的工艺实现,钛合金表面处理方式发展至今,主要包括表面渗氮、表面渗碳、阳极氧化、微弧氧化等技术[2-4]。

收稿日期:2024-08-20

基金项目:陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设(2023KXJ-252)

作者简介:田喜明,1977 年生,硕士,高级工程师. 主要从事航空发动机装备及材料研究方面的工作. Email: txm77@163.com

通信作者:闫　钊,1996 年生,硕士,中级工程师. 主要从事金属材料研究方面的工作. Email: yanzgtr@163.com

引用格式:田喜明,闫钊,张晨辉,吴天栋,张利军. 渗碳处理对 TA31 钛合金组织及性能影响[J]. 铸造技术,2025,46(3): 296-300.

TIAN X M, YAN Z, ZHANG C H, WU T D, ZHANG L J. Effect of carburizing treatment on the microstructure and properties of TA31 titanium alloy[J]. Foundry Technology, 2025, 46(3): 296-300.

中国知网　https://www.cnki.net

渗碳处理是钛合金工件常用的一种表面处理方式，根据具体渗碳工艺的不同可细分为固体渗碳、气体渗碳、离子渗碳法，其目的均是通过表面渗碳的方式提高钛合金表面硬度，从而提高钛合金工件整体的耐磨性[5-8]。Ji 等[9]将 Ti6Al4V 合金样品放入专用设备中进行氧碳共渗，发现渗层表面硬度比基体硬度提高了 3.8 倍，且渗层硬度呈梯度变化。张赫[10]将 TA1、TC4 和 TC21 3 种合金进行固体渗碳处理，其表面硬度与原始合金硬度相比分别提升了 350.99%、163.67%、175.39%。但是目前针对 TA31 钛合金耐磨性差的问题进行表面处理的研究较少，为改善海洋工程装备中常用的 TA31 钛合金的表面耐磨性，本文在其他牌号钛合金渗碳处理的基础上进行，研究 TA31 钛合金的渗碳处理。对比渗碳处理前后 TA31 钛合金显微组织、显微硬度、室温拉伸性能及冲击性能，研究渗碳处理过程对 TA31 钛合金显微组织及力学性能的影响。

1　实验材料与方法

实验选用西安超晶科技股份有限公司生产的 TA31 钛合金锻造棒材作为材料，棒材通过七火次自由锻造制备完成。选取制作两件同等状态的 ϕ200 mm×30 mm 的试样块，标记为 1# 和 2#，其中 1# 试样为对比试样，不进行任何处理，对 2# 试样进行固体渗碳处理。2# 试样的渗碳处理采用上海麦克林生化科技有限公司生产的 50 目石墨粉、99.99%的碳酸钡作为原材料，按 9∶1 的质量比配制成专用渗碳剂。2# 试样块与渗碳剂放置真空热处理炉中，执行 900 ℃保温 420 min 后随炉冷却的工艺进行渗碳处理。

渗碳处理完成后对 1# 及 2# 试样块按同样的取样方式进行取样，取样位置及试样规格如图 1所示。其中显微硬度、显微组织及 X 射线衍射试样按图 1 所示在试样块表面取样，试样表面均有渗碳层，用以表征试样表面特性。但室温拉伸及冲击试样按图 1 在相应位置截面中心厚度处取样，所取试样为 ϕ200 mm×30 mm 试样块的内部试样，因渗碳深度有限，所以室温拉伸及冲击试样两类力学试样的表面无渗碳层。在截面中心厚度处取样是为了使力学性能测试更具代表性，反映材料基体本身的力学性能，研究长时间高温处理对 TA31 钛合金基体材料的力学性能有无明显影响。

取样后分别通过 ICX41M 型金相显微镜、FHVW-1Z 显微维氏硬度仪、UTM5105SYXL 万能拉伸试验机、JBS-300 型冲击试验机、X'Pert PRO 型 X 射线衍射仪等设备对相应试样进行检测，对比渗碳前后 TA31 钛合金显微组织及力学性能的差异。

2　实验结果及讨论

2.1　显微组织

为研究持续高温渗碳后 TA31 钛合金基材的显微组织变化，对两种试样的显微组织进行对比，图 2 是渗碳处理前后 TA31 钛合金基材的显微组织照片。对比图 2a 和 b 可以看出，渗碳前后 TA31 钛合金的显微组织均为双态组织，组织类型未发生变化。但渗碳后 TA31 钛合金的次生 α 相发生粗化，由渗碳前的 40 μm 粗化到 60 μm 左右。这是由于渗碳过程有超过持续 420 min 以上的高温过程，次生 α 相在高温能量驱动下逐渐长大，导致渗碳后 TA31 钛合金的次生 α 相发生粗化。

2.2　显微硬度

鉴于渗碳处理是通过提高材料表面硬度进而提高材料耐磨性这一特性，对渗碳前后 TA31 钛合金试样表面硬度进行测试。对未进行渗碳处理的 1# 试样及渗碳处理的 2# 试样按图 1 所取的显微硬度试样进行表面显微硬度测试，首先分别在 2 个试样表面

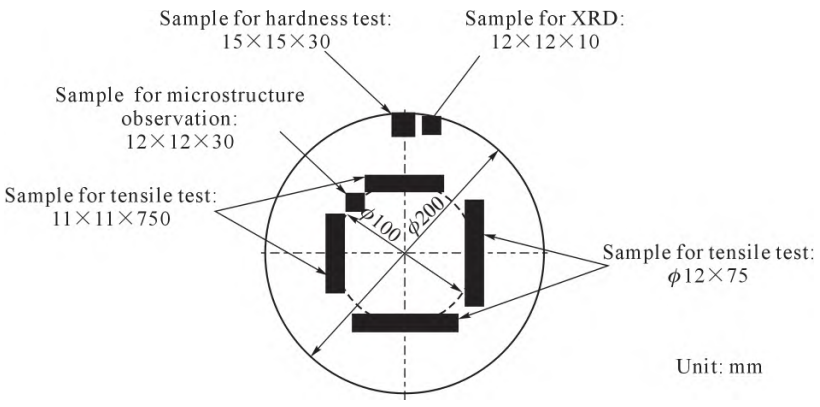

图 1　取样示意图

Fig.1　Schematic diagram of sampling

中国知网　https://www.cnki.net

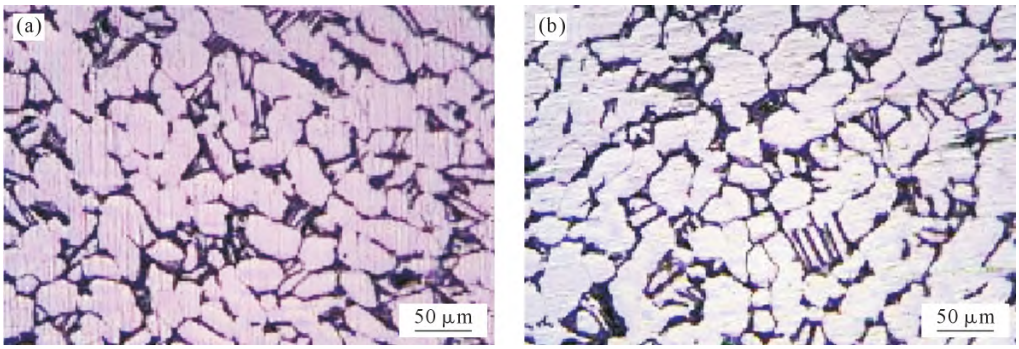

图 2 TA31 钛合金试块 1/2 厚度处的显微组织:(a) 渗碳前; (b)渗碳后

Fig.2 Microstructure at the 1/2 thickness position of the TA31 titanium alloy test block: (a) before carburizing; (b) after carburizing

任选 3 点测试表面硬度，以对比表征渗碳处理对 TA31 钛合金表面硬度的提高程度,测试数据如表 1 及图 3 所示。

表 1 渗碳处理前后 TA31 钛合金表面硬度

Tab.1 Surface hardness of the TA31 titanium alloy before and after carburizing

Hardness(HV)	Before carburizing	After carburizing
Surface hardness	307.0	945.0
	313.0	938.0
	312.0	936.0
Average	310.4	939.7

由表 1 可以看出，渗碳处理后 TA31 钛合金表面硬度平均值可达 939.7 HV,比原钛合金基体表面的平均硬度 310.4 HV 提升了 203%，渗碳处理后 TA31 钛合金的表面硬度得到显著强化。图 3 是渗碳处理前后 TA31 钛合金表面硬度对比，可以看到 2 种试样的硬度数据分布集中，表明两种状态材料的硬度均匀性良好,且渗碳处理对 TA31 钛合金表面硬度提升明显。

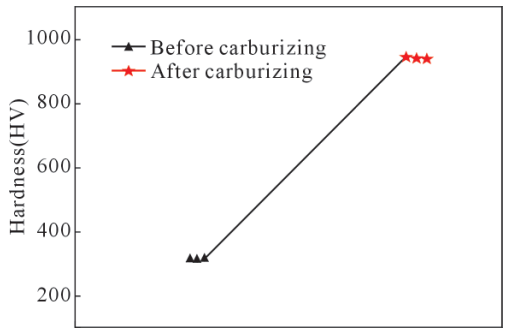

图 3 渗碳处理前后 TA31 钛合金表面硬度对比图

Fig.3 Comparison of the surface hardness of the TA31 titanium alloy before and after carburizing treatment

为探究 TA31 钛合金渗碳后表面的物相组成，对渗碳试样块表面取样进行 XRD 分析，如图 4 所示。从 XRD 测试结果可以看出,试样表面除了 α-Ti 的衍射峰外,出现了 TiC 的衍射峰,证明在渗碳处理后 TA31 钛合金表面有 TiC 相生成。TiC 相的硬度比钛合金材料的硬度高,所以 TiC 相的生成会使

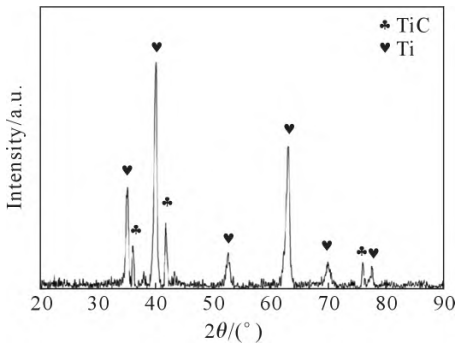

图 4 渗碳处理后表面 XRD 谱

Fig.4 XRD patterns of the surface after carburizing

材料表面硬度有较为明显的提高。其他牌号钛合金渗碳处理的相关研究也对渗碳后碳原子进入钛合金基体后形成的物相进行研究，一致认为是碳原子与钛基体形成新的 TiC 相进而提高钛合金的表面硬度,同时碳原子进入钛基体会对钛合金的位错运动起“钉扎”作用,这 2 种作用共同导致 TA31 钛合金的表面硬度提高,同时其表面耐磨性有明显提升[11-15]。

为进一步研究本次渗碳层的有效深度，对渗碳后试样的渗碳截面进行梯度显微硬度测试，沿渗碳截面测试距离端面 10、30、50、70、100 μm 处的显微硬度。图 5 为梯度显微硬度测试结果,可以看出在距表面 100 μm 时的显微硬度达到 362 HV，相比表 1 中未渗碳 1# 试样最高表面硬度 313 HV 高 49 HV,因

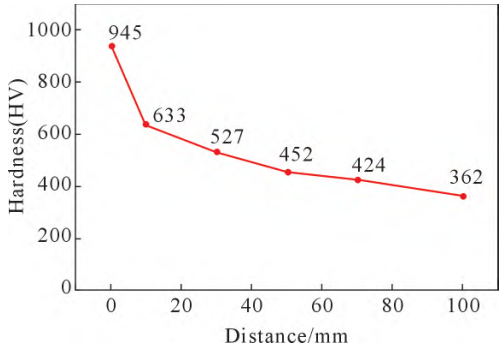

图 5 渗碳处理后截面显微硬度梯度曲线

Fig.5 Gradient curve of the microhardness of the section after carburizing

中国知网 https://www.cnki.net

此可以得出本次渗碳处理的有效深度超过100 μm[16-18]。

2.3 力学性能变化研究

对渗碳处理前后的 TA31 钛合金材料按图 1 取样进行弦向室温拉伸及弦向冲击性能对比测试，表 2 是具体测试结果。从表 2 可以看出，渗碳处理前TA31 钛合金的抗拉强度及屈服强度为 858、773 MPa，渗碳处理后的抗拉强度及屈服强度为 839、763 MPa，渗碳后 TA31 钛合金的强度出现小幅降低。渗碳后 TA31 钛合金的断后伸长率出现 0.5%的较小幅度增高，断面收缩率从未渗碳的 38%提高到渗碳后的 48%，表明渗碳后 TA31 钛合金的塑性有较为明显的提高。同时渗碳后 TA31 钛合金的冲击吸收功由 111 J 下降到 95.4 J，表明材料的缺口敏感性降低。

表2 渗碳处理前后TA31钛合金拉伸及冲击性能

Tab.2 Tensile and impact properties of the TA31 titanium alloy before and after carburizing treatment

Treatment	R_m/MPa	$R_{p0.2}$/MPa	A/%	Z/%	KV_2/J
Before carburizing	858	773	16.5	38	111.0
After carburizing	839	763	17.0	48	95.4

渗碳后 TA31 钛合金的强度降低、塑性提高、缺口敏感性降低，这些力学性能的变化规律结合渗碳后 TA31 钛合金次生 α 相粗化情况分析其变化原因为由于渗碳后 TA31 钛合金的次生 α 相生长变大，基体内晶界减少，对室温下塑性变形的晶粒滑移阻碍作用减弱，导致 TA31 钛合金的力学性能会出现强度降低、塑性提高、缺口敏感性降低的变化[19-21]。因此在实际工程应用中要结合工况性能要求，适当调整渗碳处理工艺参数，可以在强度性能较少降低、塑性略微提高的基础上有效提高 TA31 钛合金的表面硬度，进而提高其耐磨性。

3 结论

(1)固体渗碳处理后 TA31 钛合金的显微组织会发生次生 α 相粗化，该变化导致渗碳后 TA31 钛合金强度略微降低、塑性提高、缺口敏感性降低。

(2)通过固体渗碳处理后 TA31 钛合金表面最高硬度达到 945 HV，较基体硬度提升约 203%，有效硬化层超过 100 μm。渗碳处理可有效提高 TA31 钛合金的表面硬度，改善其耐磨性。

参考文献：

[1] 缪顿. 氧元素对 TA31 合金热变形行为及热锻组织力学性能的影响研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2019.
MIAO D. Study on the effect of oxygen contents on hot deformation behavior and mechanical properties of hot forged structure of TA31 alloy[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.

[2] WU X P, KALIDINDI S R, NECKER C, SALEM A A. Prediction of crystallographic texture evolution and anisotropic stress-strain curves during large plastic strains in high purity α-titanium using a Taylor-type crystal plasticity model[J]. Acta Materialia, 2007, 55(2): 423-432.

[3] ASK M, ROLANDER U, LAUSMAA J, KASEMO B. Microstructure and morphology of surface oxide films on Ti-6Al-4V[J]. Journal of Materials Research, 1990, 5(8): 1662-1667.

[4] KHAN R H U, YEROKHIN A, LI X, DONG H, MATTHEWS A. Surface characterisation of DC plasma electrolytic oxidation treated 6082 aluminium alloy: Effect of current density and electrolyte concentration[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205(6): 1679-1688.

[5] KIM T S, PARK Y G, WEY M Y. Characterization of Ti-6Al-4V alloy modified by plasma carburizing process[J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 361(1-2): 275-280.

[6] TESSIER P Y, PICHON L, VILLECHAISE P, LINEZ P, ANGLERAUD B, MUBUMBILA N, FOU QUET V, STRABONI A, MILHET X, HILDEBRAND H F. Carbon nitride thin films as protective coatings for biomaterials: Synthesis, mechanical and biocompatibility characterizations[J]. Diamond and Related Materials, 2003, 12(3-7): 1066-1069.

[7] 董帮柱. 钛合金表面微织构/渗碳化调控 DLC 涂层膜基界面及磨损行为的机理研究[D]. 苏州：苏州大学，2022.
DONG B Z. Mechanism study on Ti-alloy surface micro-texture/carburizing regulation DLC coatings film-substrate interface and wear behavior[D]. Suzhou: Soochow University, 2022.

[8] KONKHUNTHOT N, PHOTONGKAM P, WONGPANYA P. Improvement of thermal stability, adhesion strength and corrosion performance of diamond-like carbon films with titanium doping[J]. Applied Surface Science, 2019, 469: 471-486.

[9] JI S C, LI J L, WANG S P, YANG H Y, CHANG C Y. Performance of oxygen-carbon Co-cementation coating on titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(11): 3956-3963.

[10] 张赫. 钛合金的磨损行为与渗碳层的生长机制研究[D]. 长春：吉林大学，2024.
ZHANG H. Investigation on wear behavior and carburized layer growth mechanism of Ti alloys[D]. Changchun: Jilin University, 2024.

[11] 代燕，吴旋，杨峰，李坤茂，刘静，欧梅桂. TC6 钛合金渗碳层在不同介质环境中的腐蚀磨损性能[J]. 中国表面工程，2020, 33(2): 47-56.
DAI Y, WU X, YANG F, LI K M, LIU J, OU M G. Corrosion and wear properties of carburized layer on TC6 titanium alloy in different environments[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(2): 47-56.

[12] YUE H C, GAO S S, LI Y, YU H Y. Nano-friction properties research of pure titanium surface by means of nitrogen plasma ion implantation technique[J]. International Journal of Stomatology, 2012, 39(3): 317-320.

[13] XING Y Z, JIANG C P, HAO J M. Time dependence of microstructure and hardness in plasma carbonized Ti-6Al-4V alloys[J]. Vacuum, 2013, 95: 12-17.

[14] LUO Y, RAO X, YANG T, ZHU J H. Effect of solid carburization

中国知网 https://www.cnki.net

on the tribological behaviors of Ti13Nb13Zr alloy[J]. Journal of Tribology, 2018, 140(3): 031604.

[15] 姬寿长,李争显,罗小峰,杜继红,华云峰,王彦锋. TC21 钛合金表面无氢渗碳层耐磨性分析[J]. 稀有金属材料与工程,2014, 43(12): 3114-3119.
JI S C, LI Z X, LUO X F, DU J H, HUA Y F, WANG Y F. Wearability analysis of hydrogen-free carburized coating on TC21 titanium alloy surface[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(12): 3114-3119.

[16] TSUJI N, TANAKA S, TAKASUGI T. Effect of combined plasma-carburizing and deep-rolling on notch fatigue property of Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 499(1-2): 482-488.

[17] 汪旭东,陈康敏,周飞,全成. 渗碳时间对 TC4 钛合金显微组织和强化效果的影响[J]. 金属热处理,2017, 42(10): 16-22.
WANG X D, CHEN K M, ZHOU F, QUAN C. Effect of carburizing time on microstructure and strengthening effect of TC4 titanium alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(10): 16-22.

[18] ATAR E, SABRI KAYALI E, CIMENOGLU H. Characteristics and wear performance of borided Ti6Al4V alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(19): 4583-4590.

[19] 李振鹏. TA2 钛合金快速渗碳工艺及组织演变规律研究[D]. 贵阳:贵州师范大学,2019.
LI Z P. Research on rapid carburizing process and microstructure evolution of TA2 titanium alloy[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2019.

[20] 赵瑞博. 双辉等离子无氢渗碳对 TC4 钛合金力学性能的影响[D]. 南京:南京航空航天大学,2020.
ZHAO R B. Effect of double glow plasma hydrogen-free carburizing on mechanical properties of TC4 titanium alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.

[21] 邹勇. 钛合金表面强化处理工艺及其性能研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.
ZOU Y. Study on the process and properties of titanium alloy after surface strengthen [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.

中国知网 https://www.cnki.net