

钛合金-不锈钢作动部件耐磨性能提升研究

胡波, 姜英欣, 刘斌, 闫晓锋

(航空工业庆安集团有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 为提升钛合金耐磨性能以满足新一代航空作动系统部件的服役需求, 对 TC6 钛合金试块分别进行无氢渗碳和微弧氧化强化处理, 研究钛合金试块-不锈钢试环摩擦副的摩擦磨损性能。结果表明, 在载荷及摩擦时间相同的条件下, 未经处理的钛合金试块与不锈钢试环发生了严重的黏着摩擦, 摩擦系数为 0.82, 磨损率达到 $1.34 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$; 无氢渗碳处理的钛合金试块与不锈钢试环发生滑动摩擦, 摩擦系数约为 0.30, 磨损率为 $1.56 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$; 微弧氧化处理钛合金试块与不锈钢试环首先发生磨粒摩擦, 随后膜层失效发生黏着摩擦, 摩擦系数约为 0.58, 磨损率为 $5.86 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。综上知, TC6 钛合金表面硬度低, 耐磨性差, 经无氢渗碳处理后形成的强化层耐磨性良好, 优于微弧氧化强化层。

关键词: 钛合金; 无氢渗碳; 微弧氧化; 表面改性; 摩擦磨损

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2023)06-31-05

Research on Improving Wear Resistance of Titanium Alloy and Stainless Steel Actuating Parts

Hu Bo, Jiang Yingxin, Liu Bin, Yan Xiaofeng

(Aviation Industry Qing'an Group Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to improve the wear resistance of titanium alloy and meet the service requirements of the new generation aviation actuator system components, TC6 titanium alloy test blocks were subjected to hydrogen-free carburizing and micro-arc oxidation strengthening treatments, and the friction and wear performance of titanium alloy test block and stainless steel test ring friction pair was studied. The results show that under the same load and friction time conditions, the untreated titanium alloy test block experienced severe adhesive friction with the stainless steel test ring, with a friction coefficient of 0.82 and a wear rate of $1.34 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$. The titanium alloy test block without hydrogen-free carburizing treatment experiences sliding friction with the stainless steel test ring, with a friction coefficient of about 0.30 and a wear rate of $1.56 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$. Micro-arc oxidation treatment of titanium alloy test blocks and stainless steel test rings first undergoes abrasive friction, followed by adhesive friction due to film failure. The friction coefficient is about 0.58, and the wear rate is $5.86 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$. TC6 titanium alloy has low surface hardness and poor wear resistance. The strengthened layer formed after hydrogen-free carburizing treatment has good wear resistance, which is superior to the micro-arc oxidation strengthened layer.

Keywords: titanium alloy; hydrogen-free carburizing; micro-arc oxidation; surface modification; friction and wear

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性好等特点, 被广泛应用于航空领域, 但钛合金硬度低、耐磨性差, 易发生黏着磨损, 限制了其使用寿命和应用范围^[1]。通过表面改性可以提升钛合金表面的耐磨性、耐蚀性、生物相容性等性能, 使其满足不同服役环境下的使用要求^[2]。目前, 提高钛合金耐磨性的表面改性技术主要有离子注入、

激光熔覆、热喷涂、气相沉积、化学镀和微弧氧化等^[3-6], 每一种强化技术在设备条件、制备效率、环境友好程度以及对基材力学性能的影响等方面都有着各自的适用性与局限性。因此, 根据制造工况选择适合的钛合金强化方式尤为重要。姬寿长等^[7]发现 Ti6Al4V 合金经渗碳处理后, 整个渗层由附着层、渗碳层和扩渗层组成, 硬度呈梯度变化, 渗层中存在 TiC 相, 未发现氢化物及含氢相。李争显等^[8]将经过预处理的钛合金试样置入真空渗

收稿日期: 2023-05-26

通信作者: 胡波 (1988—), 男, 工程师。

碳炉中进行渗碳处理,并采用球-盘摩擦进行摩擦磨损性能测试。研究表明,经渗碳处理后,钛合金表面出现了TiC等碳化物相,硬度提高了2.6倍,摩擦系数由0.6下降到0.23。Yerokhin等^[9]利用交流电源对不同电解溶液条件下的Ti6Al4V合金表面进行微弧氧化,并采用钢球对磨实验研究了摩擦磨损性能。结果表明,微弧氧化层的形成使Ti6Al4V合金的磨损机制由原来的磨粒/黏着磨损机制变为粗糙变形磨损机制。

钛合金表面强化技术可归结为湿法和干法两类,湿法包括电镀、化学镀、微弧氧化等,干法包括氮化、渗碳、热喷涂等^[10-12]。摩擦磨损性能测试一般采用球-盘磨损的形式,该工况主要适用于齿轮、摇臂、衬套、接头、轴承等耐磨的结构零件,鲜有针对作动系统部件往复活塞运动耐磨性的研究报道。本研究以航空作动系统部件实际工程化应用中的钛合金试块-不锈钢试环摩擦副为研究对象,分别选用湿法和干法强化技术对钛合金试块进行强化,并结合产品特点设计出摩擦磨损实验装置,研究强化处理对钛合金筒体摩擦磨损行为的影响,以期不同使用要求下钛合金筒体-活塞等相关摩擦副的设计、处理工艺的制定提供数据及实验支持,推动钛合金作动系统部件产品的工程化应用。

1 实验

1.1 试样加工及制备

实验所用试块材料为TC6钛合金,尺寸为6 mm×7 mm×30 mm,化学成分(质量分数, w%)为: Al 6.50, Mo 2.50, Cr 1.20, Fe 0.50, Si 0.25, 余量为Ti。钛合金试块经热处理后,表面硬度为350HV0.1。试环材料为15-5PH沉淀硬化不锈钢,其外径为φ40 mm,内径为φ16 mm,主要化学成分(质量分数, w%)为: Cr 14.50, Ni 4.00, Cu 3.50, Mn 1.00, Si 1.00, Nb 0.45, C 0.07, 余量为Fe。不锈钢试环经固溶热处理后,表面硬度为410HV0.1。对钛合金试块和不锈钢试环进行机械抛光,使表面粗糙度Ra达到0.4 μm后,用乙醇和丙酮进行超声波清洗。分别采用无氢渗碳和微弧氧化(MAO)技术对钛合金试块进行表面强化处理。无氢渗碳处理设备为高效真空渗碳炉,以钛合金试块作为阴极,石墨靶材作为阳极,以氩气为工作气体,依靠石墨阳极和钛合金试块阴极之间的辉光放电得到渗碳层。其中,真空渗碳炉真空度0.1~2 Pa,炉温890~930 °C,处理时间12~16 h。微弧氧化处理则以钛合金试块为阳极,不锈钢槽体为阴极,采用铝酸钠电解液体系制备微弧氧化层。微弧氧化通电方式为直流叠加脉冲,脉冲频率60 Hz,占空比30%~100%,平均电流密度2~8 A/dm²,处理时间15~20 min。

1.2 检测及表征方法

采用ZEISS-40MAT型扫描电子显微镜(SEM)观察无氢渗碳和微弧氧化钛合金试块的截面形貌,以及钛合金试块-不锈钢试环摩擦磨损面的微观形貌。采用X-max20能谱仪(EDS),按GB/T 3620.1—2016标准对钛合金试块表面的无氢渗碳层和微弧氧化层进行成分分析。采用PHILIPS-DW2700型X射线衍射仪(XRD)对钛合金试块表面的无氢渗碳层和微弧氧化层进行物相分析。采用Wilson-TURON-2500硬度测试仪,按ASTM E384—2019标准对钛合金试块表面的无氢渗碳层和微弧氧化层进行硬度测量。

1.3 摩擦磨损实验

采用M2000磨耗仪,按GB/T 3960—2016标准对钛合金试环-不锈钢试块进行摩擦磨损实验,示意图见图1。实验压力为196 N,施加压力后试块与试环的接触面积约为9.6 mm²(试块宽度6 mm,与试环的接触长度约为1.6 mm)。试块与平面最大接触压力计算公式^[13]如下:

$$\delta_{\max} = 0.418 \left(\frac{PE}{lR} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中: $\delta_{\max}$ 为最大接触压力, MPa; P 为集中载荷, N; R 为半径, mm; E 为弹性模量, MPa; l 为轴长, mm。根据式(1)可计算出磨损接触面的压力约为28 MPa。实验转速为200 r/min,试环直径为40 mm,则摩擦线速度为418.67 mm/s。在120 min的磨损时长下,试环、试块的磨损距离为3014.42 m。采用15#航空液压油间歇润滑,润滑油流量为0.1 mL/s。本实验可用于模拟活塞与筒体侧向压力不大于28 MPa、相对线速度不大于418.67 mm/s的钛合金作动筒内部钢制活塞与筒体内孔的摩擦磨损情况。

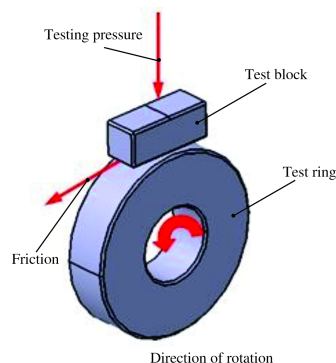


图1 试块-试环摩擦磨损实验示意图

Fig.1 Schematic diagram of block-ring friction wear test

为对比不同强化状态钛合金试块与不锈钢试环摩擦副耐磨性能的差异,将试块-试环摩擦副试件分为A1~A3共3组。其中,A1组试块不进行强化处理,A2、A3组试块分别进行无氢渗碳及微弧氧化处理。3组试块-试环

分别进行 120 min 摩擦磨损实验,检测摩擦系数、磨痕宽度、质量损失量及磨损率等摩擦磨损性能数据(每组重复 3 次,取平均值作为实验结果)。

2 结果与讨论

2.1 钛合金试块强化层的基本特征

图 2 为钛合金试块经无氢渗碳和微弧氧化工艺强化处理后的截面形貌。从图 2a 可以看到,钛合金试块经无氢渗碳处理后,自表面向基体内部呈现为渗碳层、扩散层、基体 3 部分。渗碳层组织结构与基体有明显差别,为细密的等轴晶。扩散层呈条状,具有一定的方向性,表现为沿渗碳层向基体“钉扎”^[7]。从图 2b 可以看出,钛合金试块经微弧氧化处理后,形成由基体向外生长的微弧氧化层,表现为靠近基体侧致密,外侧疏松的结构。该结构的形成是由于放电通道封闭后残留在涂层表面的微孔造成的,因此微弧氧化层相比渗碳层较为粗糙。目前针对降低钛合金微弧氧化层粗糙度的措施主要有机械法和柔性抛光法,但技术尚不成熟,未在工程化中取得有效应用。

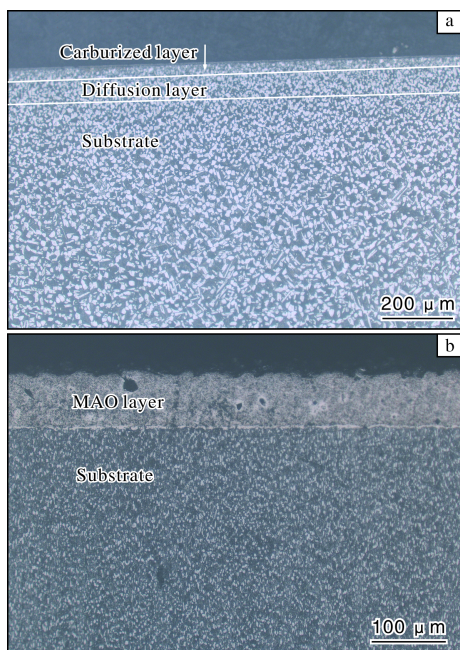


图 2 经不同工艺强化的钛合金试块截面形貌

Fig.2 Cross section morphologies of titanium alloy test block strengthened by different processes: (a) hydrogen-free carburizing; (b) micro-arc oxidation

图 3 为钛合金试块经不同工艺强化处理后强化层的 XRD 图谱及 EDS 成分分析结果。从图 3 可以看出,钛合金试块经渗碳处理后,表面渗碳层形成了 TiC 相, C 元素质量分数约为 21.6%, 主要以 TiC 形式存在, 少量以固溶态存在。钛合金试块经微弧氧化处理后, 形成的

强化层主要由 TiO_2 (锐钛矿相及金红石相) 组成^[13], O 元素质量分数约为 40.4%。图 4 为钛合金试块经不同工艺处理后强化层硬度随层深的变化曲线。由图 4 可知, 钛合金试块经微弧氧化处理后, 表层硬度约为 800HV0.1, 硬度提升层厚度约为 50 μm 。渗碳层的硬度沿层深呈梯度分布^[14], 表层硬度达到了 1100HV0.1, 硬度提升层厚度约为 80 μm 。TiC 的生成有利于渗碳层硬度的提高^[15]。与微弧氧化相比, 钛合金经无氢渗碳处理后强化层硬度更高, 且厚度更大。

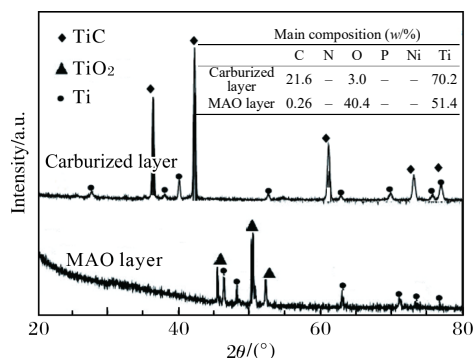


图 3 钛合金试块强化层的 XRD 图谱及主要成分

Fig.3 XRD patterns and main composition of strengthening layers of titanium alloy test blocks

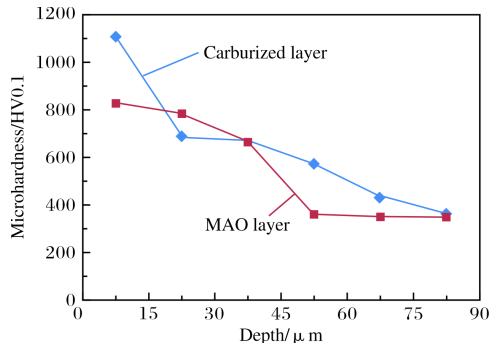


图 4 钛合金试块强化层硬度随层深变化曲线

Fig.4 Curves of strengthening layers hardness vs. layer depth of titanium alloy test blocks

2.2 试块-试环摩擦磨损情况

图 5 为 3 组钛合金试块-不锈钢试环摩擦副摩擦 120 min 后的磨损面形貌。从图 5 可以看出, 未经强化处理的 A1 钛合金试块磨损面磨痕宽度最大, 其次为经过微弧氧化处理的 A3 试块, 磨损最小的是经无氢渗碳处理的 A2 试块。

表 1 为 3 组钛合金试块-不锈钢试环摩擦副的摩擦实验结果。由表 1 可知, 未经强化处理的钛合金试块 (A1) 摩擦系数为 0.82, 120 min 后磨痕量达到 355.3 mg, 磨损率为 $1.34 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$; 经微弧氧化处理的钛合金试块 (A3) 摩擦系数约为 0.58, 120 min 后的磨痕量约

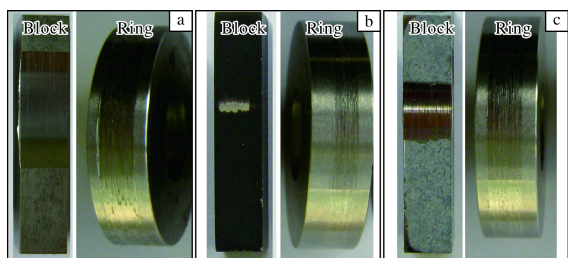


图5 3组钛合金试块-不锈钢试环摩擦副的磨损面形貌

Fig.5 Wear surface morphologies of friction pairs between titanium alloy test block and stainless steel test ring: (a) A1; (b) A2; (c) A3

表1 3组钛合金试块-不锈钢试环摩擦副的摩擦实验结果

Table 1 Wear test results of three group friction pairs between titanium alloy test block and stainless steel test ring

	A1	A2	A3
Friction coefficient	0.82	0.30	0.58
Width of grinding marks/mm	14.53	1.23	5.69
Mass loss/mg	355.3	0.14	37.7
Volume wear/mm ³	79.31	0.201	8.214
Wear rate/mm ³ (N·m) ⁻¹	1.34×10^{-4}	1.56×10^{-7}	5.86×10^{-6}

为 37.7 mg; 经无氢渗碳处理的钛合金试块 (A2) 摩擦系数约为 0.30, 是未经强化处理的钛合金试块的 30% 左右, 120 min 后的磨损量仅为 0.14 mg, 磨损率相比处理前下降约 3 个数量级, 为 $1.56 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。由于渗碳处理后钛合金表面存在高硬度的 TiC 相, 而且摩擦过程中产生的含 C 磨屑具有自润滑作用^[16], 因而表面渗碳处理可以大幅改善钛合金的耐磨性。图 6 为 3 组钛合金试块-不锈钢试环摩擦副的摩擦系数随时间的变化曲线。从图 6 可以看出, 经微弧氧化处理后, 摩擦实验初期, 钛合金试块与不锈钢试环的摩擦系数只有 0.35~0.40, 这主要是由于微弧氧化涂层粗糙多孔的表面为引入固体

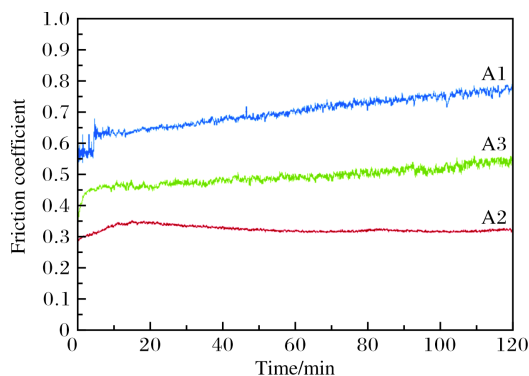


图6 钛合金试块-不锈钢试环摩擦副的摩擦系数随时间变化曲线

Fig.6 Curves of friction coefficient vs. time of friction pairs between titanium alloy test block and stainless steel test ring

润滑剂创造了条件, 其表面形成的陶瓷粒子也有利于降低摩擦系数^[17]。但是在载荷的作用下, 微弧氧化层消耗过快, 逐渐暴露出钛基材, 随之摩擦系数增大到约 0.58, 由磨粒摩擦转变为黏着摩擦, 耐磨性减弱。

2.3 试块-试环摩擦磨损表面微观形貌

为进一步分析试块-试环摩擦磨损形式, 分别采用 SEM 观察了试块、试环的磨损面形貌。图 7 为未经强化处理的钛合金试块与不锈钢试环摩擦副摩擦 120 min 后的磨损面形貌。从图 7 可以看出, 钛合金试块相对于不锈钢试环磨损痕迹宽且深, 黏着磨损严重 (图 7a); 不锈钢试环磨损面存在大量的黏着层 (图 7b), 已经观察不到不锈钢基体。TC6 钛合金中的 α -Ti 是六方结构, $c/a=1.588$, 远小于理想值 (1.633), 致使其组织更易产生滑移, 表现为与不锈钢配副发生黏着磨损。在相同载荷条件下, 钛合金的硬度小, 赫兹接触压力大, 因此磨削区域大, 影响层深^[18]。在航空液压油中与不锈钢对磨时, 钛合金基体不仅摩擦系数较大, 而且质量损失也远大于 15-5PH 不锈钢。

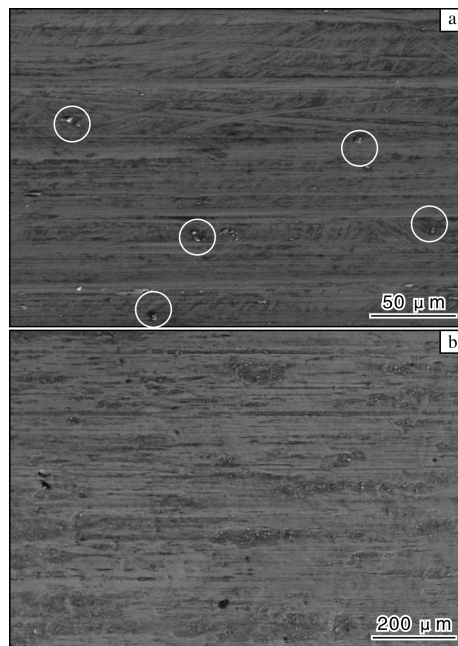


图7 未经强化钛合金试块与不锈钢试环摩擦副的磨损面形貌

Fig.7 Morphologies of worn surfaces of friction pair: (a) unstrengthened titanium alloy test block; (b) stainless steel test ring

图 8 经为不同工艺强化处理的钛合金试块与不锈钢试环摩擦副摩擦 120 min 后的磨损面形貌。无氢渗碳钛合金试块与不锈钢试环摩擦 120 min 后, 强化层有损失但没有失效 (图 8a), 依然具有强化作用, 因此未达到磨损寿命极限。这归因于强化层中形成的 TiC 相, 其硬度较高, 对镀层耐磨性能起到了主导作用, 尤其是在重载条件下, 镀层硬度越高, 抵抗摩擦力作用的能力越强, 镀

层表面承担的机械摩擦力分量就会相应减小,使镀层磨损量减小,在摩擦过程中消耗的强化层颗粒与航空液压油形成混合润滑状态,可进一步减小摩擦系数,使耐磨性能增强。微弧氧化钛合金试块与不锈钢试环摩擦 120 min 后,摩擦位置的强化层已完全损失,随之消耗基材,与其周围的微弧氧化层出现了明显的分界现象(图 8b)。

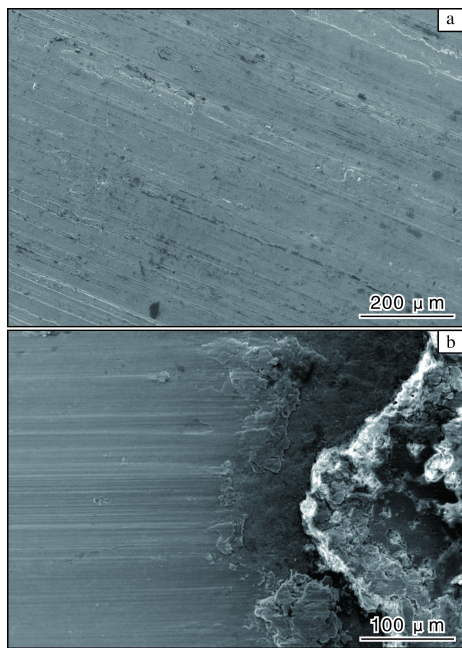


图 8 经不同工艺强化的钛合金试块磨损面形貌

Fig.8 Morphologies of worn surfaces of titanium alloy test block strengthened by different processes: (a) hydrogen-free carburizing; (b) micro-arc oxidation

3 结 论

(1) 在航空液压油和设定的载荷下与 15-5PH 不锈钢试环对磨时,钛合金试块不耐磨,摩擦系数为 0.82,相对不锈钢摩擦副自身质量损失较高,为 355.3 mg,磨损率为 $1.34 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

(2) TC6 钛合金试块表面硬度低,经无氢渗碳和微弧氧化工艺强化处理后表面硬度均有所增加。经微弧氧化处理后,强化层主要由 TiO_2 (锐钛矿相及金红石相) 组成,硬度约为 800HV0.1,硬度提升层厚度约为 50 μm ;经无氢渗碳处理后,表面渗碳层形成了 TiC 相,硬度达到了 1100HV0.1,硬度提升层厚度约为 80 μm 。

(3) 经无氢渗碳处理后,TC6 钛合金试块与 15-5PH 不锈钢试环之间的摩擦系数约为 0.30,磨损率相比处理前下降约 3 个数量级,为 $1.56 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,其耐磨性优良且优于微弧氧化处理。

参考文献 References

- [1] 刘金刚, 杨建花, 王高升, 等. TC4 钛合金表面激光熔覆 WC 增强镍基复合涂层的组织及耐磨性[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(8): 2907-2914.
- [2] 秦成, 侯红苗, 郭萍, 等. 钛合金表面激光熔覆涂层及工艺研究进展[J]. 钛工业进展, 2023, 40(4): 44-48.
- [3] 屠振密, 李宁, 朱永明. 钛及钛合金表面处理技术和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [4] 赫家禹, 吴向清, 谢发勤, 等. 钛合金表面激光重熔微弧氧化层的组织结构及摩擦磨损性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(7): 2424-2433.
- [5] 黄小晓, 涂赣峰, 王术新, 等. TiB_2 涂层的制备及其应用研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(3): 1087-1099.
- [6] 白雪寒, 范林, 赵铭钰, 等. 医用钛及钛合金表面涂层研究进展[J]. 钛工业进展, 2022, 39(3): 33-40.
- [7] 姬寿长, 李争显, 杜继红, 等. Ti6Al4V 合金表面无氢渗碳层分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(12): 2152-2156.
- [8] 李争显, 姬寿长, 杜继红, 等. 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): 3114-3118.
- [9] Yerokhin A L, Nie X, Leyland A, et al. Characterisation of oxide films produced by plasma electrolytic oxidation of a Ti-6Al-4V alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2000, 130(2/3): 195-206.
- [10] 李争显, 张雪峰, 陈敏, 等. 钛金属表面气体元素扩散耐磨处理技术的发展[J]. 钢铁钒钛, 2021, 42(6): 28-35.
- [11] 杨闯, 刘静, 马亚琴, 等. Ti6Al4V 钛合金表面真空渗氧处理[J]. 表面技术, 2017, 46(5): 165-170.
- [12] 李崇桂, 王斌, 潘斌, 等. 钛合金表面改性技术研究进展[J]. 热加工工艺, 2018, 44(16): 22-26.
- [13] 傅文恺, 崔学军, 杨帆, 等. 粗糙度对微弧氧化/类金刚石复合涂层结构及性能的影响[J]. 材料保护, 2022, 55(10): 1-10.
- [14] 魏超, 罗勇, 强颖怀, 等. 钛合金的表面渗碳工艺及其耐磨性能[J]. 机械工程材料, 2010, 32(1): 31-35.
- [15] 赵润宇, 杨峰, 刘静, 等. TA2 钛合金真空渗碳层组织及性能研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2017, 35(6): 99-103.
- [16] 谢凤宽, 章浩, 刘谦. 钛合金微弧氧化膜层摩擦学性能的研究进展[J]. 材料保护, 2022, 55(5): 167-178.
- [17] 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.
- [18] 柴琛, 汪华月, 陈兆祥, 等. 钛微弧氧化膜层在不同摩擦工况下的摩擦磨损行为研究[J]. 表面技术, 2021, 50(7): 266-275.
- [13] 诗铸, 黄平, 田煜, 等. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.