

激光熔覆 NiCrBSi/Ag 复合涂层 结构及空间摩擦学性能

郭纯¹, 马明亮², 陈丰¹, 魏宝丽¹

(1.安徽科技学院 机械工程学院, 安徽 凤阳 233100;
2.中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471000)

摘 要: 目的 提高钛及钛合金的空间摩擦学性能, 拓展钛及钛合金在空间技术领域的应用范围。方法 用激光熔覆技术在纯钛基材表面制备了 NiCrBSi/Ag 复合涂层。用 X-射线衍射仪、扫描电镜和高分辨透射电镜分析涂层的物相组成、显微组织结构和晶体结构。用空间摩擦学实验系统对 NiCrBSi/Ag 复合涂层在真空、原子氧和紫外辐照三种模拟空间环境以及大气环境下的摩擦学性能进行系统的研究。采用扫描电镜和能量色散光谱仪对摩擦测试后 NiCrBSi/Ag 复合涂层的磨痕形貌和对偶不锈钢钢球的磨痕形貌及元素面分布进行分析。深入探讨 NiCrBSi/Ag 复合涂层在三种模拟空间环境及大气环境下的磨损机理。结果 在纯钛基材表面通过激光熔覆制备的 NiCrBSi/Ag 复合涂层主要物相组成为 NiTi、Ni₃Ti、Cr₂Ni₃、Cr₃Si、TiB₂、Cr-Ni-Ti-Fe、Ag 相, 显微结构主要为等轴晶和枝状晶组织。复合涂层具有较高的显微硬度, 涂层截面平均显微硬度约为 830HV_{0.2}, 约是钛基材硬度的 4.4 倍。复合涂层在真空、原子氧和紫外辐照模拟空间环境下的摩擦系数和磨损率均小于大气环境下的值。在三种模拟空间环境下, 相对于纯钛基材, 复合涂层的磨损率约小 2 个数量级。复合涂层在真空、原子氧和紫外辐照模拟空间环境下的磨损机理为粘着磨损和磨粒磨损, 在大气环境下的磨损机理主要为磨粒磨损。结论 NiCrBSi/Ag 复合涂层可以显著提高纯钛基材在真空、原子氧和紫外辐照三种模拟空间环境以及大气环境下的摩擦学性能。

关键词: 钛; 钛合金; 复合涂层; 激光熔覆; 空间; 摩擦学性能; 磨损机理

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2019)09-0177-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.09.019

Microstructure and Space Tribological Properties of NiCrBSi/Ag Composite Coating Prepared by Laser Cladding

GUO Chun¹, MA Ming-liang², CHEN Feng¹, WEI Bao-li¹

(1.School of Mechanical Engineering, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, China; 2.Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471000, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the tribological properties of titanium and titanium alloys in space environments and expand the application range of titanium and titanium alloy in space technology. NiCrBSi/Ag composite coating was prepared

收稿日期: 2019-02-23; 修订日期: 2019-04-22

Received: 2019-02-23; Revised: 2019-04-22

基金项目: 安徽省自然科学基金项目 (1908085QE174); 安徽科技学院人才项目 (100005)

Fund: Supported by Anhui Provincial Natural Science Foundation (1908085QE174) and the Talent Program of Anhui Science and Technology University (100005)

作者简介: 郭纯 (1984—), 男, 博士, 副教授, 高级工程师, 主要研究方向为表面工程、增材制造、焊接。邮箱: guochun@ahstu.edu.cn

Biography: GUO Chun (1984—), Male, Doctor, Associate professor, Senior engineer, Research focus: surface engineering, additive manufacture, welding. Email: guochun@ahstu.edu.cn

on pure titanium substrate by laser cladding technology. The phase composition, microstructure and crystal structure of the coating were analyzed by X-ray diffraction, scanning electron microscopy and high resolution transmission electron microscopy. The tribological properties of NiCrBSi/Ag composite coating under high vacuum, atomic oxygen and ultraviolet irradiation in simulated space environment and atmospheric environment were studied by space tribology experiment system. The wear marks of NiCrBSi/Ag composite coating and the antithesis stainless steel ball were analyzed by SEM and EDS. The wear mechanism of NiCrBSi/Ag composite coatings in three simulated space and atmospheric environments was investigated. The main phases of NiCrBSi/Ag composite coating prepared by laser cladding on the surface of pure titanium substrate were NiTi, Ni₃Ti, Cr₂Ni₃, Cr₃Si, TiB₂, Cr-Ni-Ti-Fe and Ag. The microstructure of composite coating was mainly composed of equiaxed crystal and dendritic crystal. The composite coating had high microhardness and the average microhardness of coating section was about 830 HV_{0.2}, which was about 4.4 times of that of titanium substrate. The friction coefficient and wear rate of the composite coating under high vacuum, atomic oxygen and ultraviolet radiation were smaller than those under atmospheric environment. The wear rate of composite coating in three simulated space environments was about 2 orders of magnitude smaller than that of pure titanium substrate. The wear mechanism of composite coating under high vacuum, atomic oxygen and ultraviolet radiation was adhesive wear and abrasive wear, while the wear mechanism in atmospheric environment was abrasive wear. NiCrBSi/Ag composite coating can significantly improve the tribological properties of pure titanium substrate under high vacuum, atomic oxygen and ultraviolet irradiation space environments.

KEY WORDS: titanium; titanium alloy; composite coating; laser cladding; space; tribological properties; wear mechanism

随着空间科学技术和载人航天工程的快速发展,对各种运行速度快、体积大、结构紧凑、可靠性高的航天设备的需求越来越迫切。典型的航天设备,如对地观测卫星、通讯卫星、测地卫星、空间站等,多数运行区域为近地轨道(LEO),距地面距离为 200~1000 km^[1-4]。LEO 空间环境非常复杂和恶劣,航天设备在 LEO 运行时,其运动系统会受到各种空间环境因素的影响,如真空、紫外线辐照、原子氧辐照、高低温热循环、微重力、空间碎片等^[5-7]。航天设备能否正常运行,并达到预期寿命,在很大程度上取决于航天设备机械部件的摩擦磨损性能。此外,NASA 的研究表明,航天设备机械运动部件相当大比例的失效与空间润滑有关。随着航天技术的飞速发展,对航天设备机械摩擦学系统的一般要求可以概括为低摩擦磨损、低摩擦噪声和长寿命^[8-10]。因此,航天设备机械摩擦副的摩擦学特性必然对整个航天计划的实施产生重大影响,成为国内外空间摩擦材料与技术领域的研究热点。

钛及钛合金因其比强度高、耐蚀性能好、生物相容性好等优点,在航空航天、化工、食品、汽车、生物医学、体育运动等领域有着广泛的应用^[11-14]。鉴于钛及钛合金的上述优点,航空航天行业对钛及钛合金的需求持续增长。但钛及钛合金的摩擦学性能较差,限制了钛及钛合金的服役工况和使用寿命,特别是在真空环境下,钛及钛合金表面硬度低,耐磨性差,摩擦系数高,粘着磨损严重,这一问题尚未得到解决^[15-17]。A. F. Yetim^[18]研究发现,CP-Ti 在真空环境中的摩擦系数不仅非常高,而且由于没有润滑膜和水分的存在,摩擦系数非常不稳定,容易出现“冷焊”现象。此外,也有研究人员发现,摩擦速度和载

荷对钛合金的真空摩擦学性能有重要影响,会引起结构和相的变化,引起严重的变形和粘着磨损。因此,采用表面处理技术来改善钛及钛合金的摩擦学性能具有十分重要的意义。目前,已经在研究及应用的钛及钛合金表面处理技术主要有:物理气相沉积、化学气相沉积、电火花沉积、脉冲激光沉积、电泳沉积、离子渗碳渗氮、微弧氧化、热喷涂、表面金属镀层(化学镀及电镀)、激光表面处理等^[19-21]。其中,激光表面处理技术是先进的表面处理技术之一,具有能量密度高、冷却速率快、处理速度快、稀释率低、热影响区小等优点。此外,激光表面处理技术制备的涂层致密,与基材结合强度高。激光表面处理技术使用的激光束光斑可调,可以进行微区精密加工,非常适合对航天设备上运行的精密零件进行表面处理。国内外学者对钛及钛合金的激光表面处理技术及应用进行了大量的研究,主要集中于钛及钛合金的激光表面硼化、氮化,复合合金化,激光熔覆镍、钴、铁基涂层和钛铝金属间化合物涂层等^[22-24]。在上述多种涂层中,镍基涂层因具有良好的耐磨性、耐腐蚀性、抗高温氧化性等优点,具有抗磨损工程应用的价值^[25-28]。然而在钛及钛合金表面通过激光熔覆技术制备镍基耐磨润滑涂层,以提高钛及钛合金空间摩擦学性能的研究报道相对较少。

本文通过激光熔覆技术在纯钛基材表面制备了 NiCrBSi/Ag 复合涂层,对涂层的组成、组织结构及模拟空间环境下的摩擦磨损性能进行了较系统的试验研究。目的是提高钛及钛合金的空间摩擦学性能,拓展钛及钛合金在航天领域的应用,同时希望通过该研究,为激光熔覆镍基耐磨润滑涂层在航天领域的工程应用提供技术和理论支持。

1 试验

1.1 涂层制备

以工业纯钛(牌号 TA2)为基材, 主要成分(质量分数): Fe<0.30%, C<0.10%, N<0.05%, O<0.25%, 余量为 Ti。采用电火花线切割加工成圆柱形试样, 试样直径为 31 mm, 厚度为 10 mm。在激光熔覆前, 对试样表面进行喷砂处理, 使其表面粗糙, 以增加表面对激光的吸收, 然后用丙酮对试样表面进行超声清洗。涂层的原材料为 NiCrBSi 和 Ag 的混合粉(Ag 在混合粉中的质量分数为 15%), 采用高能球磨机(Fritsch Pulverisette P-4)对混合粉进行高能球磨处理, 使粉末部分合金化, 成分均匀, 从而确保激光熔覆制备的涂层成分均匀。球磨参数: 转速为 400 r/min, 球磨 10 h, 球粉质量比约为 5:1。采用预置粉末的方法在试样表面预铺上一层厚度约为 1.0 mm 的 NiCrBSi 和 Ag 的混合粉。激光熔覆处理过程采用 10 kW 的横流 CO₂ 激光成套加工设备(DL-HL-T10000B)。激光熔覆处理的工艺参数: 激光功率为 2 kW, 光斑尺寸为 3 mm, 扫描速度为 800 mm/min, 搭接率为 50%。为了避免激光熔覆处理过程中裂纹的产生, 激光熔覆前试样用电炉预热, 预热温度约 400 °C。为防止激光熔覆过程中涂层氧化, 采用半开式氩气保护装置保护, 保护气体流量约为 20 L/min。

1.2 组成、组织结构分析及性能测试

激光熔覆后, 将制备的涂层试样冷却至室温, 采用电火花线切割将熔覆试样加工成空间摩擦测试试样(试样尺寸为 $\phi 24$ mm×8 mm)、金相试样、SEM 试样、XRD 试样。为了便于金相试样和 SEM 试样的后续抛光处理, 将切割后的试样采用环氧树脂进行镶嵌。镶嵌后的样品用碳化硅砂纸进行抛光处理(砂纸顺序为 80[#]、120[#]、80[#]、120[#]、800[#]、1000[#]、1500[#]、2000[#]), 然后用 1.0 μ m 的氧化铝研磨膏抛光处理, 消除表面划痕。用于金相组织结构分析的试样用金相腐蚀溶液在室温下进行刻蚀, 腐蚀液为 4%HF+2%HNO₃+94%H₂O(体积分数)。复合涂层的物相组成用 Philips D/max 2400 X 射线衍射仪(XRD)进行分析, 条件为: 40 kV, 100 mA, Cu-K α , 扫描范围 $2\theta=20^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。采用 JEOL JSM-5600LV 扫描电镜(SEM)对复合涂层的截面微观结构进行观察分析。采用 FEI Tecnai-G2-F30 型高分辨透射电镜(HRTEM)分析表征复合涂层的晶体结构, 加速电压为 300 kV。复合涂层横截面沿深度方向的显微硬度分布用 MH-5 维氏显微硬度计测定, 载荷为 1.96 N, 保压时间为 5 s, 每个深度点测量 5 次, 取平均值。

采用中科院兰州化学物理研究所自主研制的空间摩擦学测试系统测试涂层的空间摩擦学性能。测试条件为大气环境(AR)、原子氧辐照(AO)、紫外线

辐照(UV)和真空(VC)四种不同环境条件。大气环境条件: 温度为 25 °C, 相对湿度为 45%。原子氧辐照(AO)环境条件: 真空度为 2.0×10^{-4} Pa, 原子氧动能为 5 eV, 原子氧通量密度为 5.0×10^{15} atom/(cm²·s), 原子氧辐照时间为 240 min。紫外辐照(UV)环境条件: 真空度为 2.0×10^{-4} Pa, 紫外辐照度为 300 W/m², 波长为 115~400 nm, 紫外线辐照时间为 240 min。真空(VC)环境条件: 真空度为 2.0×10^{-4} Pa。模拟空间环境实验条件的选择是依据典型空间飞行器所处轨道空间环境经理论计算换算而来。四种环境下其他摩擦测试条件统一如下: 摩擦对偶为直径 3.175 mm、硬度为 700 HV 的市售 AISI52100 钢球, 法向加载的载荷为 5 N, 旋转直径为 12 mm, 滑动速度为 0.1884 m/s, 摩擦测试时间为 30 min。摩擦系数由连接试验台的计算机自动记录, 磨损量由三维表面轮廓仪(AEP, USA)计算。磨损率由公式(1)计算:

$$W = V / (F_n d) \quad (1)$$

式中: V 为磨损体积, mm³; F_n 为载荷, N; d 为摩擦距离, m; W 为磨损速率, mm³/(N·m)。

为了保证测量的重复性和结果的准确性, 在相同的摩擦测试条件下, 每个摩擦试验重复 3 次。利用扫描电镜(SEM)和 EDS 对磨损表面形貌进行分析, 并利用与扫描电镜相连接的 EDS 对 AISI52100 钢球的元素面分布进行分析。

2 结果及分析

2.1 复合涂层的组成与结构

激光熔覆复合涂层的 XRD 图谱如图 1 所示。从图 1 可以看出, 复合涂层主要成分是 NiTi、Ni₃Ti、Cr₂Ni₃、Cr₃Si、TiB₂、Cr-Ni-Ti-Fe 和 Ag 相。经过激光熔覆处理后, 预置的镍基混合粉末和基材钛反应, 生成了涂层主要组成物相。组成物相的生成是由于激光束具有较高的能量密度, 可以在极短的时间内使材料表面达到较高的温度, 从而使激光熔池内的元素发生化学反应, 生成新的物相。

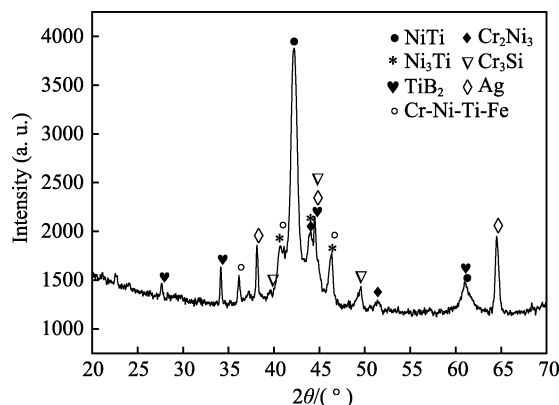


图 1 涂层的 XRD 图谱

Fig.1 XRD pattern of NiCrBSi/Ag composite coating

激光熔覆 NiCrBSi/Ag 复合涂层截面的 SEM 照片和对应元素的面分布如图 2 所示。从图 2 可以看出,涂层的底部,即涂层和基材界面处,有明显的激光熔池的“月牙”形貌。这是因为本试验采用多道搭接扫描模式,所以可以看到多道搭接产生的涟漪状界面。涂层与基材之间呈现良好结合,看不出明显的分界面,

没有气孔和裂纹出现,说明涂层质量较好。涂层厚度约 1.2 mm。另外,从图 2 对应的 Ti、Ni、Ag 元素的面分布图可看出,涂层中物相元素分布相对较均匀,没有出现大面积的元素富集或偏析现象,这也进一步说明涂层整体质量较好。

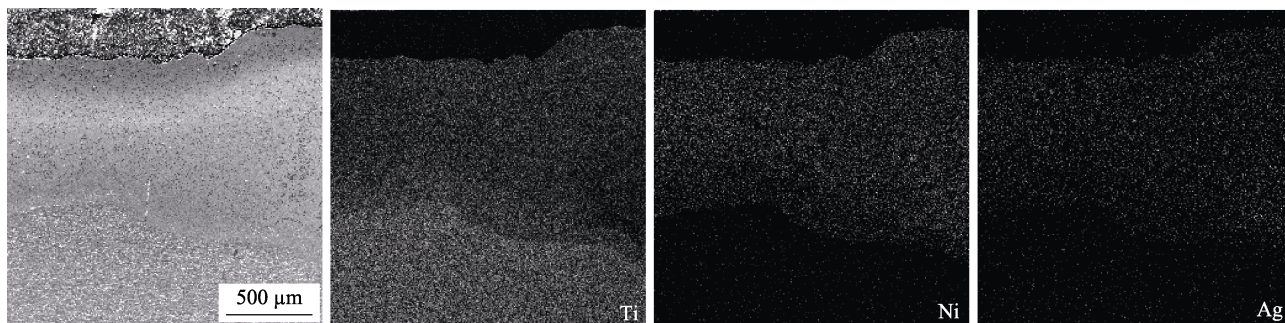


图 2 涂层的截面形貌及元素面分布

Fig.2 Cross-section morphology and corresponding EDS element surface distribution of the composite coating

NiCrBSi/Ag 复合涂层刻蚀后的 SEM 图如图 3 所示,可以看出,复合涂层宏观的组织结构主要为等轴晶和枝状晶。从对应标尺可以看出,涂层组织结构尺寸细小,这与激光熔覆处理过程的快速加热和快速冷却特点相对应。

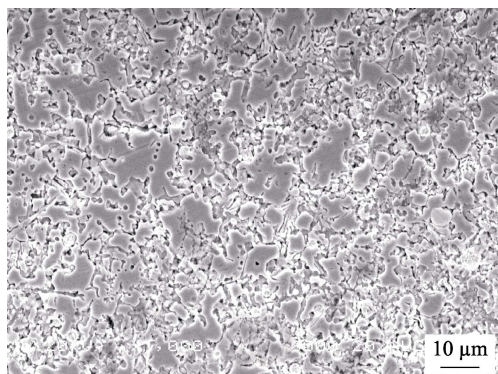


图 3 涂层截面刻蚀后的形貌

Fig.3 Microstructure of the composite coating

激光熔覆 NiCrBSi/Ag 复合涂层的 TEM 照片和相应的选区电子衍射图谱 (SAD) 如图 4 所示。从图 4 可以看出,在高倍的透射电镜下,激光熔覆复合涂层晶体结构为块状和近球状的晶粒,并且出现了纳米级晶粒。相应的 SAD 图结果分析标定表明,此对应于 NiTi 相,从而进一步证明了 XRD 谱图中 NiTi 相的存在。复合涂层中,由于激光熔覆是一个快速加热、快速冷却的过程,冷却速度可达到 10^6 °C/s^[26],在如此高的冷却速度下,激光熔池凝固时间极短,从而晶粒来不及长大,使凝固组织细化,因此生成了纳米级晶粒。为了进一步分析复合涂层的晶体结构,图 5 给出了复合涂层晶体结构的高分辨透射电镜图 (HRTEM)。分析晶面间距可知,图 5a 中的晶面间距对应 NiTi 相的

(110) 晶面,晶面间距 $d \approx 0.213$ nm。图 5b 中的晶面间距对应 Ag 相的 (111) 晶面,晶面间距 $d \approx 0.236$ nm。这与 XRD 图和低倍 TEM 图得出的结果相一致。

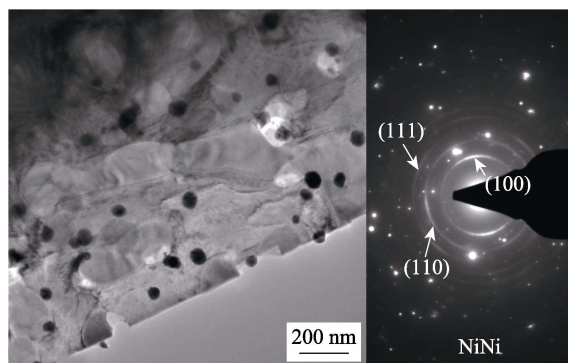
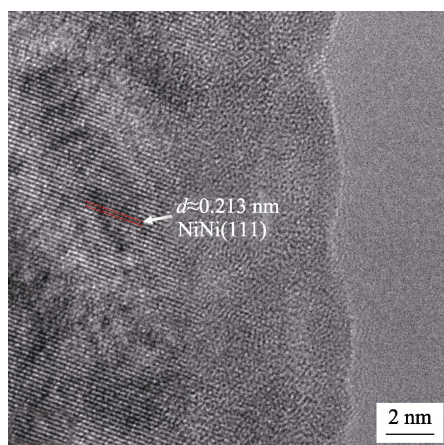


图 4 涂层的透射和选区电子衍射图

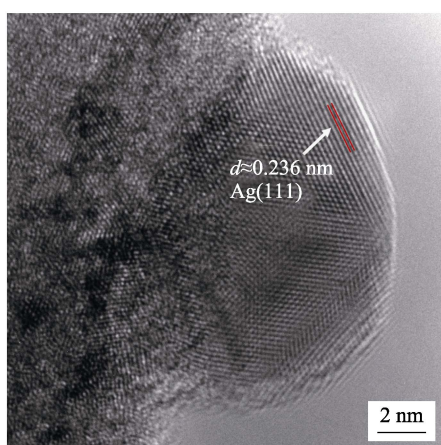
Fig.4 TEM micrographs and corresponding SAED image of the coating

2.2 复合涂层截面硬度

激光熔覆 NiCrBSi/Ag 复合涂层的横截面显微硬度如图 6 所示。从硬度变化趋势可以推测出,复合涂层的平均厚度约为 1.2 mm,这与图 2 SEM 截面图中涂层的厚度值基本相符。复合涂层截面的平均显微硬度约为 830HV_{0.2},约是 TA1 钛基材的 4.4 倍 (TA1 的显微硬度约 190HV_{0.2}),说明制备的复合涂层硬度较高。另外,从硬度变化曲线上还可以看出,复合涂层和钛基材之间在显微硬度上存在明显的界面。在界面处约 50 μm,涂层的硬度从 634HV_{0.2} 陡然降到 263 HV_{0.2},接近基材硬度。界面处基材的显微硬度高于钛基材的原始显微硬度,原因可能为激光熔覆过程中,涂/基界面处的基材表面层受熔池的热影响,发生了相变硬化,即形成了很薄的热影响区,从而提高了硬度。



a NiTi相



b Ag相

图 5 涂层的高分辨率透射电镜图
Fig.5 HRTEM micrographs of the composite coating: a) NiTi phase; b) Ag phase

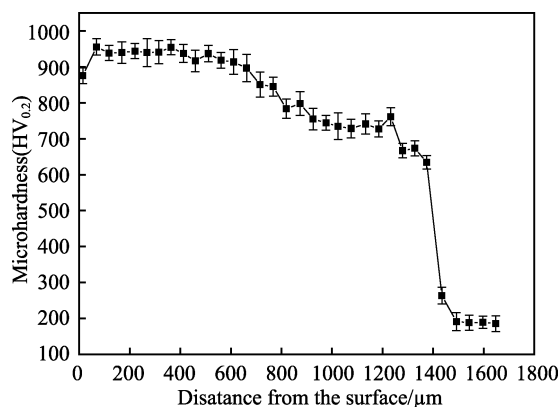


图 6 复合涂层的截面硬度

Fig.6 Microhardness of composite coating section

2.3 复合涂层的空间摩擦学性能

NiCrBSi/Ag 复合涂层在大气环境 (AR)、原子氧 (AO)、紫外线照射 (UV) 和真空 (VC) 环境下的摩擦系数如图 7 所示。从图 7 可以看出, 复合涂层在大气环境 (AR) 中的摩擦系数最大, 为 0.407; 在真空环境下的摩擦系数最小, 为 0.160; 在紫外辐照 (UV) 和原子氧辐照 (AO) 环境下的摩擦系数分

别为 0.188、0.172。前期的研究结果表明^[29], TA2 基材在大气环境、原子氧、紫外线辐照和真空中的摩擦系数分别为 0.436、0.672、0.689 和 0.692。显然, 在相同的试验条件下, 激光熔覆技术制备的 NiCrBSi/Ag 复合涂层摩擦系数要比基材摩擦系数小得多, 且涂层摩擦系数在三种模拟空间环境下均小于 0.3。摩擦系数较小, 可以认为具有一定的自润滑性能, 这可能与复合涂层中 Ag 的润滑性能有关。涂层的润滑性比纯钛基材的润滑性有了很大的提高。另外还可以看出, NiCrBSi/Ag 复合涂层在原子氧辐照、紫外辐照和真空环境条件下的摩擦系数小于大气环境中的值。

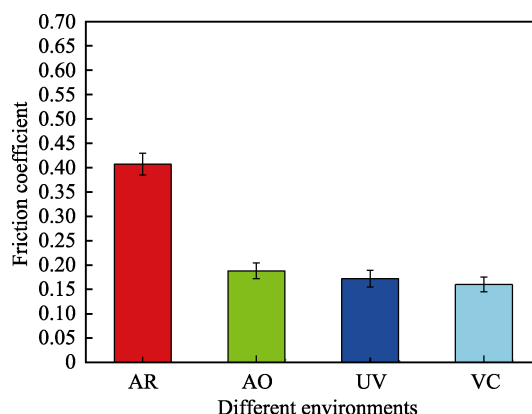


图 7 不同环境测试条件下复合涂层的摩擦系数

Fig.7 Friction coefficient of the composite coating in different environment

NiCrBSi/Ag 复合涂层在大气环境、原子氧、紫外线照射和真空环境下的磨损率如图 8 所示, 与摩擦系数变化趋势几乎一致: 大气环境下涂层的磨损率最大, 为 $3.28 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$; 在真空环境条件下的磨损率最小, 为 $1.29 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$; 在紫外辐照和原子氧辐照环境下的磨损率分别为 2.05×10^{-6} 、 $2.13 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。TA2 基材在大气环境、原子氧辐照、紫外线辐照和真空中的磨损率分别为 3.128×10^{-4} 、 1.959×10^{-4} 、 1.876×10^{-4} 、 $1.833 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ^[29]。由此可见, 相比于纯钛基材, 激光熔覆技术制备的

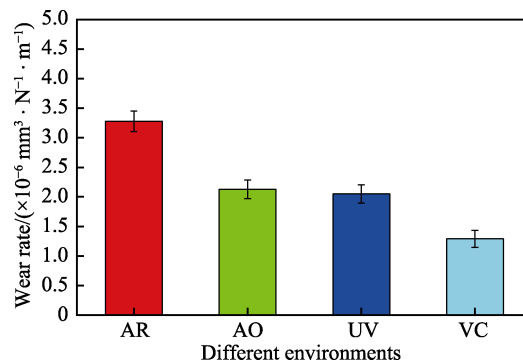


图 8 不同环境测试条件下复合涂层的磨损率

Fig.8 Wear rate of the composite coating in different environment

NiCrBSi/Ag 复合涂层的磨损率约小 2 个数量级, 即 NiCrBSi/Ag 复合涂层可以显著提高纯钛基材在空间环境下的摩擦学性能。同时, NiCrBSi/Ag 复合涂层在模拟空间环境下的磨损率小于大气环境。另外, 对比三种模拟空间环境下 NiCrBSi/Ag 复合涂层的摩擦系数和磨损率结果, 还可以推测出原子氧辐照和紫外线辐照对 NiCrBSi/Ag 复合涂层摩擦系数和磨损率的影响很小, 主要是真空的影响(三种模拟空间环境下真空度相同)。

2.4 复合涂层的磨损机理

如图 9 所示, 采用 SEM 表征了 NiCrBSi/Ag 复合

涂层在不同摩擦测试环境下的磨痕形貌。图 9a 为大气环境下的磨损表面, 可以看出, 大气环境下复合涂层磨损表面出现了磨损产生的磨屑颗粒, 有轻微的犁沟。结合摩擦系数和磨损率结果, 说明复合涂层在大气环境下的磨损机理为轻微的磨粒磨损。图 9b、c、d 分别为 NiCrBSi/Ag 复合涂层在原子氧辐照、紫外线辐照和真空环境下的磨痕形貌。在三种模拟空间环境试验条件下, 复合涂层的磨损表面形貌基本一致, 主要特征为: 轻微的犁沟、磨屑和粘着剥落坑。从涂层磨损形貌分析可以看出, 原子氧辐照、紫外线辐照对 NiCrBSi/Ag 复合涂层的磨损机理影响不大, 与摩擦系数和磨损率结果相吻合。

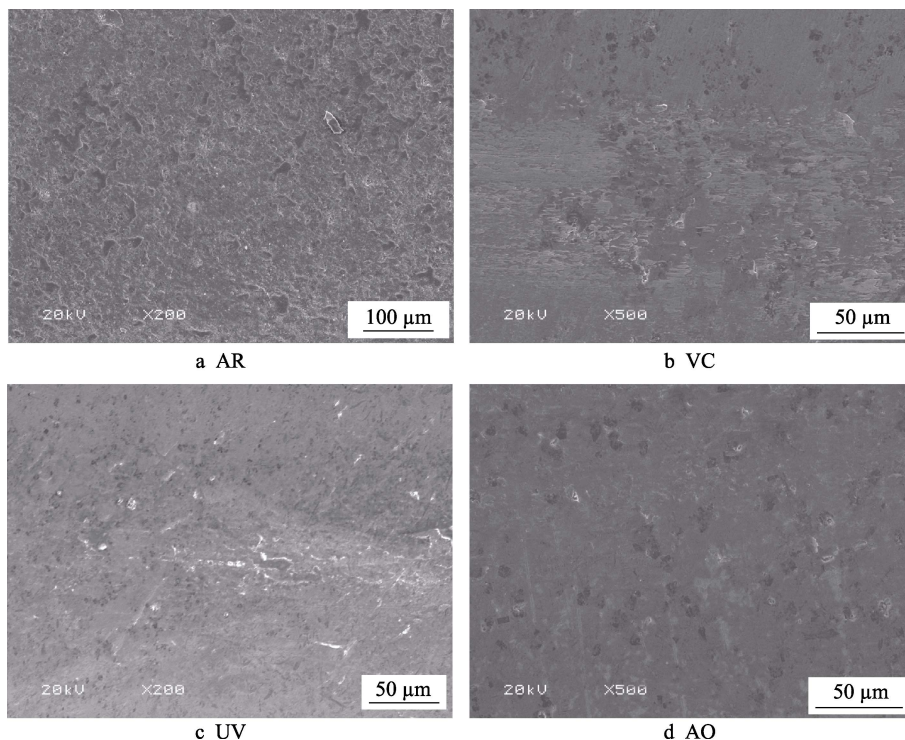


图 9 不同环境测试条件下复合涂层的磨痕形貌

Fig.9 Wear morphologies of composite coatings in different environment

为了进一步分析涂层的磨损机理, 图 10 给出了摩擦副 AISI52100 钢球在不同环境下的磨痕形貌和对应 Fe (钢球主要成分)、Ni、Ti、Ag (复合涂层主要成分) 元素的分布。图 10a 为摩擦副 AISI52100 钢球在大气环境下的磨痕形貌和元素面分布, 可以看出, 钢球磨痕表面平整, 可清晰地看到大量的磨屑, 元素面分布图显示, 几乎没有发生粘着磨损, 进一步证实了 NiCrBSi/Ag 复合涂层在大气环境下的磨损机理主要是磨粒磨损。图 10b、c、d 分别为摩擦副 AISI52100 钢球在原子氧辐照、紫外线辐照和真空环境下的磨痕形貌和元素面分布, 和大气环境下摩擦副的磨痕形貌截然不同, 在三种模拟空间环境下, 摩擦副 AISI52100 钢球磨痕表面呈现明显的粘着凸起。对应的元素面分布分析结果表明, 凸起的主要成分为 Ni、Ti、Ag 元素(复合涂层主要成分)。

说明在摩擦测试过程中, 发生了复合涂层向摩擦副 AISI52100 钢球的粘着转移, 从而证明了 NiCrBSi/Ag 复合涂层在原子氧辐照、紫外线辐照和真空环境下的磨损机理主要是粘着磨损, 涂层上的犁沟和磨屑说明同时存在磨粒磨损。另外, 对比大气环境和三种模拟空间环境下摩擦副 AISI52100 钢球磨痕表面和涂层截面 Ag 元素的面分布, 可以明显发现, 在三种模拟空间环境下, 摩擦副 AISI52100 钢球磨痕表面 Ag 元素在摩擦过程中出现了表面富集。Ag 具有润滑作用, 复合涂层和摩擦副 AISI52100 钢球间 Ag 润滑相的富集, 可以解释 NiCrBSi/Ag 复合涂层在三种模拟空间环境下发生粘着磨损时的摩擦系数和磨损率小于大气环境的原因。因为发生粘着磨损时, 有涂层成分转移到了对偶钢球, 涂层成分中 Ag 可以起到润滑作用, 所以 NiCrBSi/Ag 复合涂层在三种模拟空

间环境下发生粘着磨损时的摩擦系数和磨损率小于大气环境中的值。从 NiCrBSi/Ag 复合涂层在大气环境和三种模拟空间环境下的摩擦系数和磨损率结果

可以看出, NiCrBSi/Ag 复合涂层可以显著提高纯钛基材的空间摩擦学性能, 在航天领域具有潜在的应用价值。

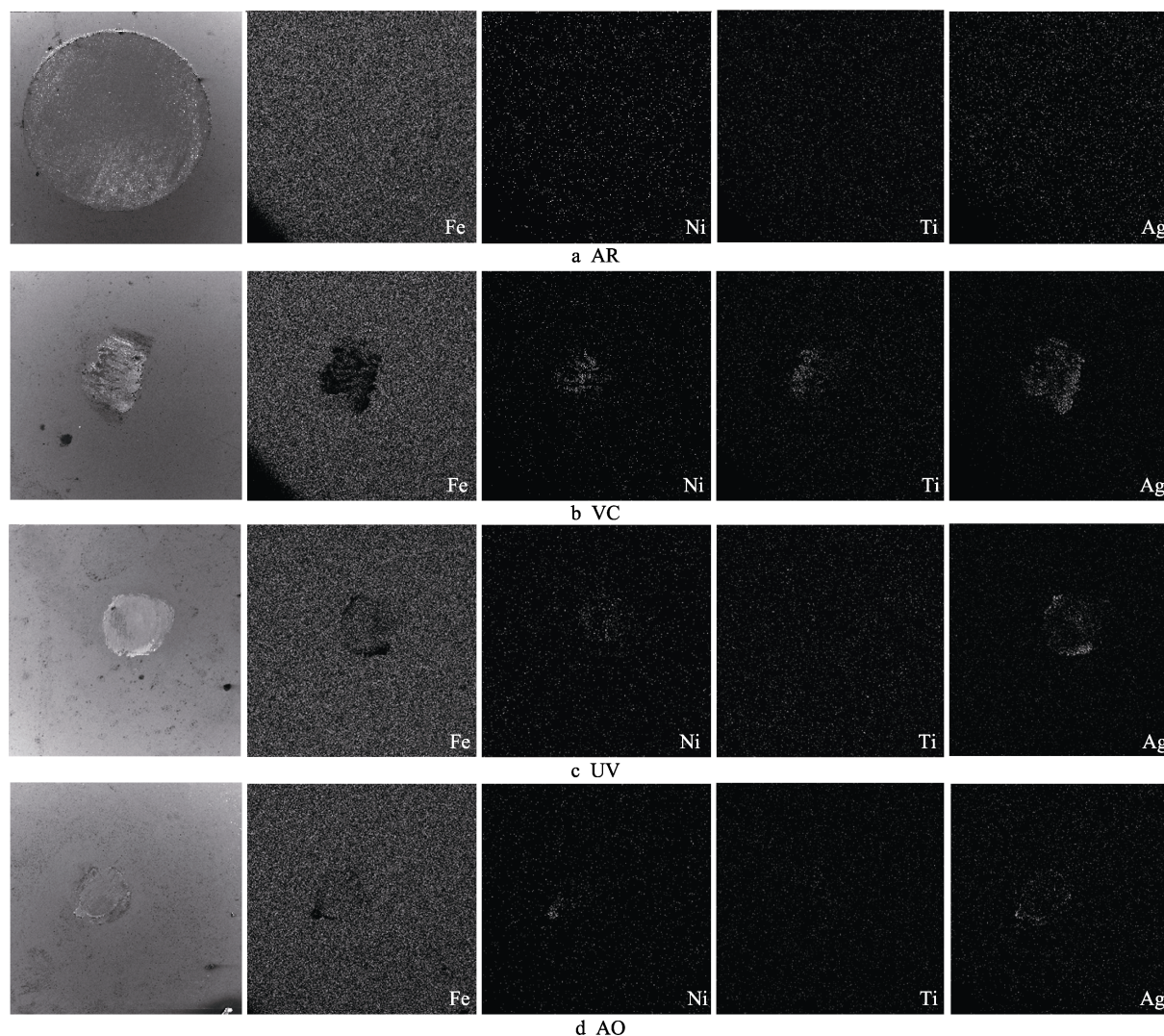


图 10 不同环境测试条件下对偶 AISI52100 不锈钢球的磨痕形貌

Fig.10 Worn morphologies of counterpart AISI52100 steel balls under different environment

3 结论

1) 通过激光熔覆技术在纯钛基材表面制备了 NiCrBSi/Ag 复合涂层, 复合涂层的主要成分为 NiTi、Ni₃Ti、Cr₂Ni₃、Cr₃Si、TiB₂、Cr-Ni-Ti-Fe 和 Ag 相, 涂层与基材钛结合良好, 没有气孔和裂纹等缺陷, 涂层质量较好。

2) NiCrBSi/Ag 复合涂层具有较高的显微硬度, 涂层截面的平均显微硬度约为 830HV_{0.2}, 约为钛基材的 4.4 倍。

3) NiCrBSi/Ag 复合涂层在三种模拟空间环境下的摩擦系数和磨损率均小于大气环境中的值, 可以显著提高纯钛基材在模拟空间环境下的摩擦学性能。NiCrBSi/Ag 复合涂层在三种模拟空间环境下的磨损机理为粘着磨损和磨粒磨损, 在大气环境条件下的磨

损机理主要为磨粒磨损。

参考文献:

- [1] TAGAWA M, YOKOTA K, OCHI K, et al. Comparison of macro and microtribological property of molybdenum disulfide film exposed to LEO space environment[J]. Tribology letters, 2012, 45(2): 349-356.
- [2] GAO X, FU Y, JIANG D, et al. Structural, mechanical, and tribological properties of WS₂-Al nanocomposite film for space application[J]. Tribology letters, 2018, 66(4): 1-12.
- [3] WANG X, LI Y, QIAN Y, et al. Mechanically robust atomic oxygen-resistant coatings capable of autonomously healing damage in low earth orbit space environment[J]. Advanced materials, 2018, 30(36): 1-6.
- [4] 廖小刚, 王岩松. 2018 年国外载人航天发展综述[J]. 载人航天, 2019, 25(1): 122-127.

- LIAO Xiao-gang, WANG Yan-song. Review of human spaceflight development abroad in 2018[J]. Manned Spaceflight, 2019, 25(1): 122-127.
- [5] DUO S, SONG M, LIU T, et al. Atomic oxygen erosion resistance of siloxane/silica hybrid coatings in space environment[J]. Rare metal materials and engineering, 2011, 40: 488-491.
- [6] KAYHAN N, RAZAVI R S, CHOOPANI S. Evaluation of two new white silicone thermal control paints under atomic oxygen[J]. Progress in organic coatings, 2012, 74(3): 603-607.
- [7] 张婷婷, 杨桂民, 魏强, 等. 钛表面夹层薄膜对微小碎片撞击防护的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(5): 15-21.
ZHANG Ting-ting, YANG Gui-min, WEI Qiang, et al. Protection effect of interlayer film on titanium surface against micro-debris impact[J]. Surface technology, 2018, 47(5): 15-21.
- [8] GAO X, FU Y, JIANG D, et al. Constructing WS_2/MoS_2 nano-scale multilayer film and understanding its positive response to space environment[J]. Surface & coatings technology, 2018, 353: 8-17.
- [9] LONGHURST W R, COX C D, GIBSON B T, et al. Development of friction stir welding technologies for in-space manufacturing[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2017, 90(1-4): 81-91.
- [10] TAGAWA M, YOKOTA K, MATSUMOTO K, et al. Space environmental effects on MoS_2 and diamond-like carbon lubricating films: Atomic oxygen-induced erosion and its effect on tribological properties[J]. Surface & coatings technology, 2007, 202(4-7): 1003-1010.
- [11] HUO W T, ZHAO L Z, ZHANG W, et al. In vitro corrosion behavior and biocompatibility of nanostructured Ti6Al4V[J]. Materials science & engineering C—materials for biological applications, 2018, 92: 268-279.
- [12] TOPOLSKI K, GARBACZ H. Manufacturing of nanostructured titanium Grade2 using caliber rolling[J]. Materials science and engineering: A, 2019, 739: 277-288.
- [13] 柯金, 刘秀波, 庄宿国, 等. Ti6Al4V 合金激光熔覆 NiMoSi 复合涂层的高温抗氧化性能[J]. 中国表面工程, 2018, 31(6): 1-9.
KE Jin, LIU Xiu-bo, ZHUANG Su-guo, et al. High temperature oxidation resistance of NiMoSi composite coatings on Ti6Al4V alloy by laser cladding[J]. China surface engineering, 2018, 31(6): 1-9.
- [14] 张飞奇, 陈文革, 田美娇. Ti-6Al-4V 丝材电弧增材制造钛合金的组织与性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(6): 1890-1895.
ZHANG Fei-qi, CHEN Wen-ge, TIAN Mei-jiao. Microstructure and properties of Ti-6Al-4V Alloy by wire+arc additive manufacturing[J]. Rare metal materials and engineering, 2018, 47(6): 1890-1895.
- [15] GUO W, MI G J, ZHANG J L, et al. Friction and wear behavior of Ni-SiC composite coating prepared on TA15 alloy[J]. Journal of inorganic materials, 2016, 31(2): 195-200.
- [16] GUO C, ZHOU J, ZHAO J, et al. Effect of ZrB_2 on the microstructure and wear resistance of Ni-based composite coating produced on pure Ti by laser cladding[J]. Tribology transactions, 2011, 54(1): 80-86.
- [17] 缪倩倩, 陈海燕, 顾伟, 等. 钛合金表面阳极微弧等离子体渗硼层的研究[J]. 材料导报, 2018, 32(18): 3161-3165.
MIAO Qian-qian, CHEN Hai-yan, GU Wei, et al. The anode micro-arc plasma boriding layer on titanium alloy[J]. Materials review, 2018, 32(18): 3161-3165.
- [18] YETIM A F. Investigation of wear behavior of titanium oxide films, produced by anodic oxidation, on commercially pure titanium in vacuum conditions[J]. Surface & coatings technology, 2010, 205(6): 1757-1763.
- [19] PERETTI V, FERRARIS S, GAUTIER G, et al. Surface treatments for boriding of Ti6Al4V alloy in view of applications as a biomaterial[J]. Tribology international, 2018, 126: 21-28.
- [20] CHOUIRFA H, BOULOSSA H, MIGONNEY V, et al. Review of titanium surface modification techniques and coatings for antibacterial applications[J]. Acta biomaterialia, 2019, 83: 37-54.
- [21] 李轩, 李辉, 王凯强, 等. TC4 合金表面 Ni-SiC- Y_2O_3 复合镀层的摩擦磨损性能[J]. 中国表面工程, 2018, 31(2): 94-102.
LI Xuan, LI Hui, WANG Kai-qiang, et al. Wear properties of Ni-SiC- Y_2O_3 composite coating prepared on TC4 alloy[J]. China surface engineering, 2018, 31(2): 94-102.
- [22] GUO C, ZHOU J, ZHAO J, et al. Microstructure and friction and wear behavior of laser boronizing composite coatings on titanium substrate[J]. Applied surface science, 2011, 257(9): 4398-4405.
- [23] GUO B, ZHOU J, ZHANG S, et al. Phase composition and tribological properties of Ti-Al coatings produced on pure Ti by laser cladding[J]. Applied surface science, 2007, 253(24): 9301-9310.
- [24] 张华健, 孙中刚, 李峰, 等. 激光熔覆铁基复合涂层组织与性能影响[J]. 表面技术, 2018, 47(12): 127-133.
ZHANG Hua-jian, SUN Zhong-gang, LI Feng, et al. Effect of microstructure and properties of laser cladding iron-based composite coatings[J]. Surface technology, 2018, 47(12): 127-133.
- [25] GU D D, HAGEDORN Y C, MEINERS W, et al. Selective laser melting of in-situ TiC/Ti₅Si₃ composites with novel reinforcement architecture and elevated performance[J]. Surface & coatings technology, 2011, 205(10): 3285-3292.
- [26] YU F L, BAI Y, WU X Y, et al. Corrosion resistance and anti-wear property of nickel based abrasion resistant coating deposited by plasma spraying[J]. Journal of inorganic materials, 2016, 31(7): 687-693.
- [27] LEI J, SHI C, ZHOU S, et al. Enhanced corrosion and wear resistance properties of carbon fiber reinforced Ni-based composite coating by laser cladding[J]. Surface and coatings technology, 2018, 334: 274-285.
- [28] JIMÉNEZ H, OLAYA J J, ALFONSO J E, et al. Corrosion resistance of Ni-based coatings deposited by spray and fuse technique varying oxygen flow[J]. Surface and coatings technology, 2017, 321: 341-349.
- [29] 郭纯, 陈建敏, 姚润钢, 等. 钛在模拟空间环境下的摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2012, 25(3): 86-91.
GUO Chun, CHEN Jian-min, YAO Run-gang, et al. Tribological properties of titanium in space environment[J]. China surface engineering, 2012, 25(3): 86-91.