

恒电位对 TiAlN 涂层在海水环境中磨蚀性能的影响

单磊^{1,2,3}, 汪陇亮^{1,2,3}, 孙润军², 王永欣³

(1.浙江纺织服装职业技术学院, 浙江 宁波 315211; 2.西安工程大学 纺织与材料学院, 西安 710048;
3.中国科学院宁波材料技术与工程研究所 中国科学院海洋新材料与应用技术重点实验室 浙江省海洋
材料与防护技术重点实验室, 浙江 宁波 315201)

摘要:目的 研究不同恒电位对 TiAlN 涂层在海水环境中磨蚀性能的影响, 分析其腐蚀磨损行为。方法 用 PVD 多弧离子镀技术在 316 不锈钢上沉积 TiAlN 涂层。通过 XRD 测试、硬度测试、结合力测试、电化学工作站测试、不同恒电位下磨蚀测试及磨痕截面轮廓测试, 分别评价 TiAlN 涂层的相结构、表面硬度、结合力、电化学性能、摩擦系数和磨损率, 通过扫描电子显微镜观察涂层磨痕形貌并分析其磨蚀损伤机理。结果 TiAlN 涂层在海水环境下的抗腐蚀性优于基体 316 不锈钢。在阴极电位下, 恒电位增加使涂层的摩擦系数逐渐降低。阳极电位为 0.5 V 时, 摩擦形成的 TiO₂ 基含水化合物颗粒可作为润滑剂, 使涂层的摩擦系数迅速降低至 0.45。TiAlN 涂层在干摩擦条件下的磨损率为 $5.5678 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 在阴极保护电位为 -1 V 下的磨损率为 $2.2909 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 在开路电位 (OCP) 下的磨损率为 $7.4881 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。结论 随着加载电位 (SCE) 的升高, 涂层的腐蚀效应愈发明显。涂层在阴极电位下的磨蚀机理主要为塑性变形, 在阳极电位下的磨蚀机理主要为疲劳点蚀。

关键词: TiAlN 涂层; 摩擦系数; 磨损率; 电化学; 海水; 磨蚀

中图分类号: TG174.442; TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)11-0165-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.11.023

Effects of Constant Potentials on Abrasion Resistance of TiAlN Coating in Seawater

SHAN Lei^{1,2,3}, WANG Long-liang^{1,2,3}, SUN Run-jun², WANG Yong-xin³

(1.Department of Mechanical, Zhejiang Textile and Fashion College, Ningbo 315211, China; 2.School of Textile and Materials, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China; 3.Key Laboratory of Marine Materials and Related Technologies of Chinese Academy of Sciences, Zhejiang Key Laboratory of Marine Materials and Protective Technologies, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effects of different constant potentials on abrasion resistance of TiAlN coating in artificial seawater. TiAlN coating was deposited on 316 stainless steel by adopting multi-arc ion plating technology. Phase structure, surface hardness, adhesion, electrochemical property, friction coefficient and wear rate of the TiAlN coating was evaluated

收稿日期: 2017-08-18; 修订日期: 2017-10-17

Received: 2017-08-18; Revised: 2017-10-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51605433); 浙江省教育厅科研项目 (Y201534852); 宁波市自然科学基金 (2016A610221); 宁波产业技术创新重大专项-科技创新团队 (2015B11009); 973 科技支撑计划 (2014CB643302)

Fund: Supported by the National Natural Science Fund Project Research Project (51605433), the Zhejiang Province Department of Education (Y201534852), Ningbo Natural Science Foundation (2016A610221), Ningbo Industry Major Projects of Technical Innovation-Science and Technology Innovation Team (2015B11009), 973 Science and Technology Support Plan (2014CB643302)

作者简介: 单磊 (1982—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为硬质涂层及其摩擦学性能。

Biography: SHAN Lei (1982—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: hard coating and tribological performance.

by performing XRD test, hardness test, adhesion test, electrochemical workstation test, abrasion test under different constant potentials and grinding crack section profile test, respectively. SEM was used to observe grinding crack morphology of the coating and analyze abrasion damage mechanism. Corrosion resistance of the TiAlN coating was superior to that of the substrate 316 stainless steel in seawater. Under the cathode potential, friction coefficient of the coating decreased as constant potential increased. Under the anode potential of 0.5 V, TiO_2 -based aquo-compound particles generated by friction could reduce the friction coefficient rapidly to 0.45 as a lubricant. Wear rate of the TiAlN coating under dry friction was $5.5678 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$. The wear rate was $2.2909 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ under -1 V cathode protection potential, and $7.4881 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ under open circuit potential (OCP). With the increase of load potential (SCE), the coating had more obvious corrosion effect. Abrasion mechanism of the coating under cathode potential was mainly plastic deformation, and the abrasion mechanism under anode potential was mainly fatigue pitting.

KEY WORDS: TiAlN coating; friction coefficient; wear rate; electrochemical; seawater; abrasion

海水液压系统是海洋工程装备中的一个关键部件, 广泛应用于深海潜水、水下机器人和海底石油生产等系统^[1], 该系统需要高性能摩擦副材料^[2]。然而海水中大量的氯离子促进了海洋装备工件表面的局部腐蚀^[3], 腐蚀和磨损的交互作用大大缩短了海工装备的使用寿命^[4]。PVD 法制备的 TiAlN 涂层具有高硬度、优异的化学稳定性以及良好的耐磨性, 可用来改善工件的机械性能, 广泛应用于金属成形工业^[5-7]。在干摩擦条件下, TiAlN 涂层在室温和高温环境下的磨损率和摩擦系数比较低, 抗氧化性能好^[8]。有研究表明, TiAlN 涂层在人工海水环境中表现出良好的耐腐蚀性能^[9]。摩擦磨损改变了材料对腐蚀的敏感性^[10], 腐蚀也会影响材料的磨损行为^[11]。因此深入地研究涂层在海水环境中的腐蚀磨损行为是十分必要的^[12]。

316 不锈钢在腐蚀介质下的抗蚀性能良好^[13], 在海洋领域具有很广阔的应用潜力^[14]。本文采用多弧离子镀膜系统在 316 不锈钢上沉积 TiAlN 涂层, 通过实时监测 TiAlN 涂层在不同电位下的电化学和摩擦学特性, 研究 TiAlN 涂层在人工海水环境不同恒电位下的腐蚀行为及磨蚀机理。

1 实验

1.1 涂层的制备

本实验采用的 316 不锈钢硬度为 2.5 GPa, 屈服强度和抗拉强度分别为 245 MPa 和 485 MPa。316 不锈钢基片的尺寸为 30 mm×20 mm×2 mm。将基片表面抛光至表面粗糙度 30 μm 以下, 依次用丙酮和无水乙醇分别超声清洗 10 min, 吹干后放入腔体内, 弧靶与基片的距离为 100 mm。由多弧离子镀膜系统 (Hauzer Flexicoat 850) 制备涂层, 靶电流设置为 60 A, 基体负偏压为 40 V。将腔体内真空抽至低于 $5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 后进行涂层沉积。样品台旋转速度为 3 r/min, 在

通入纯 Ar (0.2 Pa) 的条件下, 将基片依次在 900、1100、1200 V 的负偏压下刻蚀 2 min。涂层沉积的过程中, 通氮气的流量为 600 sccm, 在沉积温度为 450 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下连续沉积 3 h。其中氮气 (纯度 $\geq 99.99\%$) 气压控制在 4 Pa, 通过溅射 TiAl 靶 (两种组分质量比为 1:1) 完成沉积。

1.2 涂层的表征

用 XRD (Bruker D8 X-ray) 对 TiAlN 涂层的相组成进行表征, 采用 Cu 靶 ($\lambda=0.1541 \text{ nm}$), 参数设置为 40 kV、40 mA, 扫描速度为 4 ($^{\circ}$)/min, 步长为 0.02 $^{\circ}$, 扫描范围为 20 $^{\circ}$ ~90 $^{\circ}$ 。涂层的表面形貌以及截面特征使用场发射扫描电镜热场 (Quanta 250) 设备分析。由 EDS 点扫描分析涂层的磨痕成分, 由表面轮廓仪 Alpha-Step IQ 测试样品的磨痕形貌。采用 MTS Nano Indenter@G200 系统, 外加 Berkovich 压头, 进行纳米压痕测试, 分别采集样品上 10 个不同区域的压痕, 最大压痕深度为 1000 nm。涂层的结合力由划痕仪 (CSM Revetest) 测定, 所用金刚石针尖圆锥形半径为 0.2 mm, 锥角为 120 $^{\circ}$ 。探针滑动速率为 3 mm/min, 划痕长度为 3 mm, 加载速率为 99 N/min, 加载范围为 0~100 N。

1.3 磨蚀实验

磨蚀试验用往复式滑动接触的球-盘往复式摩擦磨损试验机 (RTEC MFT5000) 进行测试, 室温控制在 (20 \pm 5) $^{\circ}\text{C}$ 。摩擦试验机的参数设置为: 恒定加载力 10 N, 滑动距离 5 mm, 滑动频率 2 Hz, 总滑动时间 3600 s。传感器实时监测样品滑动时的摩擦系数。由样品 (316 或者 TiAlN) 连接工作电极, 铂电极作为对电极, 饱和甘汞电极 (SCE) 作为参比电极, 组成三电极体系并进行电化学测试。将人工海水滴加在用 ABS 制作的抗腐蚀槽^[12]内进行磨蚀实验, 夹具对人工海水的抗蚀性良好, 因此可以忽略摩擦时腐蚀对夹具的影响。将样品在海水中浸泡 3600 s, 稳定开路

电位（OCP）之后进行测试。实验选用直径为 6 mm 的 Si₃N₄ 对磨球，Si₃N₄ 具有高抗蠕变性以及优良的抗腐蚀性。实验所用人工海水的成分根据标准 ASTM D 1141-98 配制，化学成分见表 1。

表 1 人工海水的化学成分
Tab.1 Chemical composition of artificial seawater

Constituent	NaCl	Na ₂ SO ₄	MgCl ₂	CaCl ₂	SrCl ₂	KCl	NaHCO ₃	KBr	H ₃ BO ₃	NaF
Concentration/(g·L ⁻¹)	24.53	4.09	5.20	1.16	0.025	0.695	0.201	0.101	0.027	0.003

为了进一步研究 TiAlN 涂层在海水环境下的腐蚀磨损行为，本文进行了以下测试：（1）分别测试在接触状态下滑动和未接触状态下滑动时样品的开路电位（OCP）和极化曲线，扫描范围为-1~0.5 V，扫描的速率为 1 mV/s；（2）分别在不同的恒定电位下进行磨损实验，涂层与人工海水接触的实际面积为 1 cm²，腐蚀电流密度由电化学工作站测得；（3）分别在干摩擦和开路电位下，通过 EDS 测试涂层表面磨痕的成分；（4）由表面轮廓仪 Alpha-Step IQ 分别测试在干摩擦条件下，开路电位和极化电位为-1 V 时，涂层表面的磨痕形貌，每道磨痕取 5 处不同位置进行测量并求平均值。由经典磨损方程计算磨损率 ω ：

$$\omega=V/(S\cdot F) \tag{1}$$

式中： V 为样品的磨损体积； S 为滑动距离； F 为施加载荷。

2 结果与讨论

2.1 涂层的微观结构

图 1 为 TiAlN 涂层的 X 射线衍射分析图谱。结果表明，TiAlN 涂层呈现明显的(200)择优取向，具有这种择优取向的 TiAlN 涂层硬度略高于呈现(111)择优取向的 TiAlN 涂层。TiAlN 与 TiN 都为面心立方结构，(111)面为密排面，存在(220)和(311)所对应的衍射峰，形成的涂层峰形相似，但 TiAlN 整体峰形更靠右^[15]。图 2 为 TiAlN 涂层的表面形貌和截面形貌。通过图 2a 可以观察到 TiAlN 涂层表面出现大颗粒状的金属液滴，这是多弧离子镀涂层典型的特征^[16]。TiAlN 涂层的厚度约为 3.49 μm，结构致密，厚度均匀。

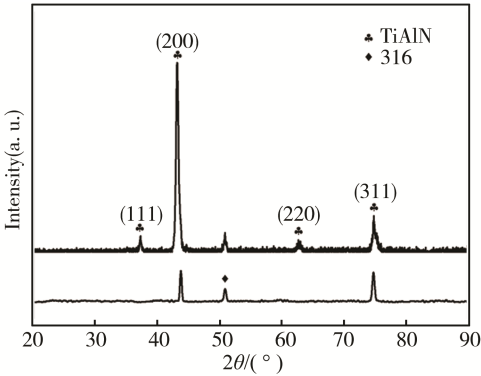


图 1 TiAlN 涂层的 XRD 图谱
Fig.1 XRD pattern of TiAlN coating

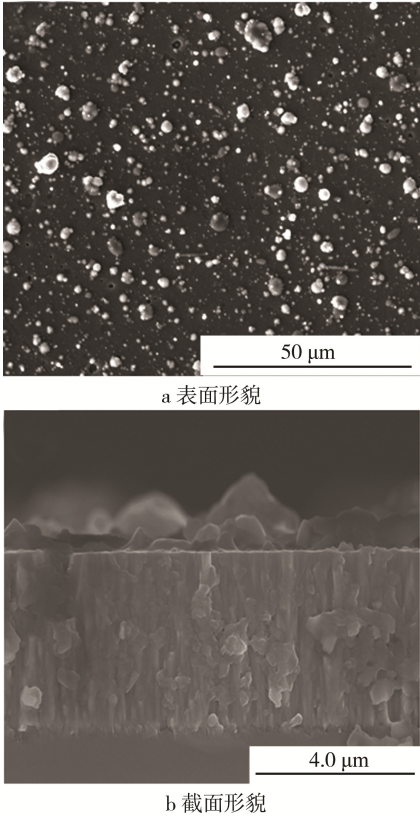


图 2 TiAlN 涂层的表面和截面形貌
Fig.2 (a) Surface morphology and (b) cross-sectional morphology of the TiAlN coating

2.2 涂层的机械性能

图 3 为 TiAlN 涂层的测试硬度，最大压痕深度为 1000 nm。随着压痕深度的增加，涂层的测试值受基体的影响非常明显，呈下降趋势。根据连续刚度法的测试准则，涂层硬度取 10%涂层厚度较高平台处的值，因此 TiAlN 涂层的硬度为(25±2) GPa。图 4 为 TiAlN 涂层声音信号（AE）随划痕距离和加载大小（ F_n ）的变化曲线。观察涂层在加载过程中表面划痕形貌的变化，发现 TiAlN 涂层在整个加载阶段出现明显的“犁沟”特征。结合声音信号分析发现，TiAlN 涂层在 19 N（ L_{c1} ）开始产生垂直于划痕方向的微裂纹，声音信号在 34 N（ L_{c2} ）处，涂层开始出现局部剥落的现象，但整个加载阶段没有出现整体剥落，说明 TiAlN 涂层与基底材料之间的结合力较好，同时也说明涂层抵抗塑性变形的能力较强。

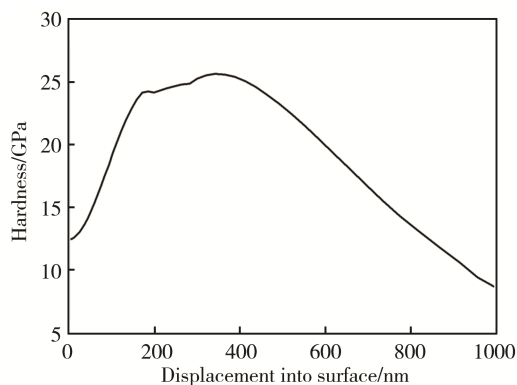


图3 TiAlN涂层的纳米硬度

Fig.3 Nano-indentation hardness of the TiAlN coating

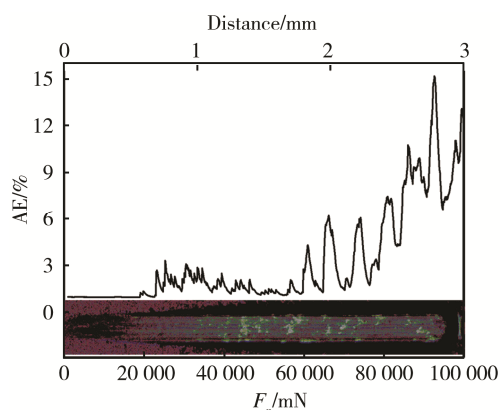


图4 TiAlN涂层的划痕形貌和声学信号

Fig.4 Scratch morphology and acoustic signal of the TiAlN coating

2.3 滑动接触对腐蚀反应的影响

图5为316基体和TiAlN涂层在人工海水环境中滑动前后的开路电位和摩擦系数随时间变化的过程。开路电位(OCP)用来监测海水环境中金属表面钝化膜的形成与破坏^[17]。316基体和TiAlN涂层在摩擦条件下开始滑动时,前1800 s左右,开路电位缓慢降低,这是因为钝化膜被破坏,新鲜表面在电解液中的润湿面积增加所致^[18];后1800 s,316基体和TiAlN涂层的开路电位保持稳定,这与316基体和TiAlN涂层在海水环境中的滑动距离和滑动方式有关^[19]。316基体的摩擦系数随滑动时间的增加逐渐增大,平均摩擦系数为0.52。TiAlN涂层的摩擦系数随滑动时间的增加逐渐降低,平均摩擦系数为0.45。整个滑动过程中,TiAlN涂层的摩擦系数和开路电位都低于316基体。在开路电位下,TiAlN涂层在开路电位下的摩擦系数低于在阴极保护电位为-1 V下的摩擦系数(见后文图7),但在开路电位下的磨损量要大于阴极电位为-1 V下的磨损量(见后文图9)。这表明TiAlN涂层在开路电位下的腐蚀促进了磨损^[19]。

图6为316不锈钢和TiAlN涂层在未接触和接触状态下滑动时的极化曲线。较之于接触状态下滑动

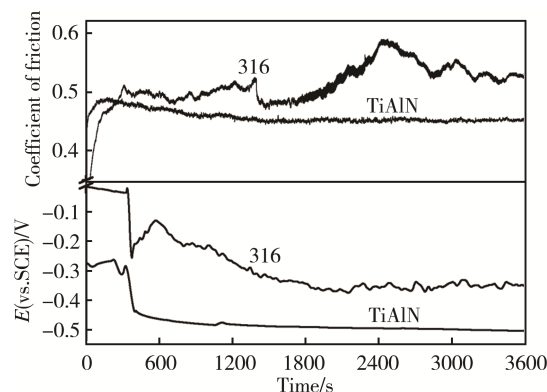


图5 开路电位和摩擦系数与时间的关系

Fig.5 OCP and COF as a function of time

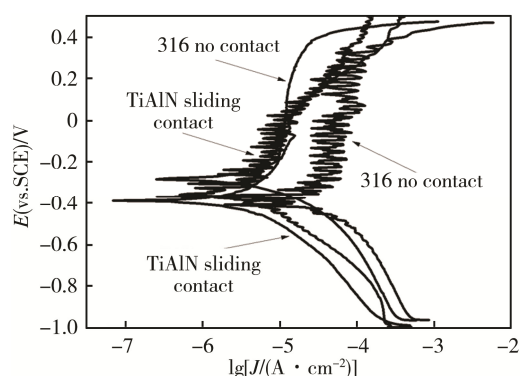


图6 316和TiAlN涂层在接触及未接触状态下滑动时的极化曲线

Fig.6 Polarization curves for 316 and the TiAlN coating under contact and without contact

时,316不锈钢在未接触状态下的腐蚀电位更低且自腐蚀电流更高。在未接触状态下滑动时,316基体在极化曲线阳极区域的钝化电流密度(J_{pass})几乎保持恒定。然而在接触状态下滑动时,316基体在极化曲线阳极区域的电流密度开始增大。电流密度的增加反映出316基体表面并没有形成完整的钝化层,这是由于316基体表面的钝化层在摩擦过程中被破坏所致^[20]。TiAlN涂层在未接触状态下与在接触状态下滑动相比,涂层的腐蚀电位和自腐蚀电流差别不大。在极化曲线的阳极区域,TiAlN涂层的电流密度小于316基体的,这是由于涂层与其钝化膜的耐腐蚀性相差不大,而316的耐蚀性主要依靠钝化膜的存在^[21]。这表明TiAlN涂层提高了316基体的抗腐蚀性。

2.4 加载电位对磨蚀行为的影响

为了进一步研究TiAlN涂层在海水环境中的磨蚀行为,分别在不同恒定电位(-1、-0.5、-0.25、OCP、0、0.25、0.5 V)下进行磨蚀实验。图5显示TiAlN涂层在摩擦条件下的开路电位逐渐降低,但都高于-1 V,因此-1 V为阴极保护电位,该电位下材料的总损失量等同于材料的纯机械磨损量^[22]。

2.4.1 不同电位下的摩擦系数

图 7 为 TiAlN 涂层在不同恒定电位下海水环境中的摩擦系数。不同电位在下, 在摩擦试验机加载荷的初始阶段, TiAlN 涂层的摩擦系数迅速升高。TiAlN 涂层在 -1 、 -0.5 、 -0.25 、OCP、 0 、 0.25 、 0.5 V 下的平均摩擦系数分别为 0.53 、 0.51 、 0.50 、 0.48 、 0.49 、 0.50 、 0.45 。可以发现, TiAlN 涂层在阴极电位下的摩擦系数略高于阳极电位下的摩擦系数。在阴极电位 (-1 、 -0.5 、 -0.25 V) 下, 随着电位 (SCE) 的增大, 摩擦系数逐渐降低。这是由于在 TiAlN 涂层表面形成了具有润滑效果的氧化物颗粒所致^[23]。在 0 V 和 0.25 V 下, TiAlN 涂层的摩擦系数非常接近, 这表明在摩擦过程中没有产生明显的点状腐蚀。然而, 在阳极电位 0.5 V 下, TiAlN 涂层的摩擦系数显著降低, 这表明 TiAlN 涂层在该电位下表面发生腐蚀, 涂层表面产生的蚀坑和周围产生的磨屑对 Si_3N_4 小球边界起到了润滑效果, 使摩擦系数迅速降低^[24]。

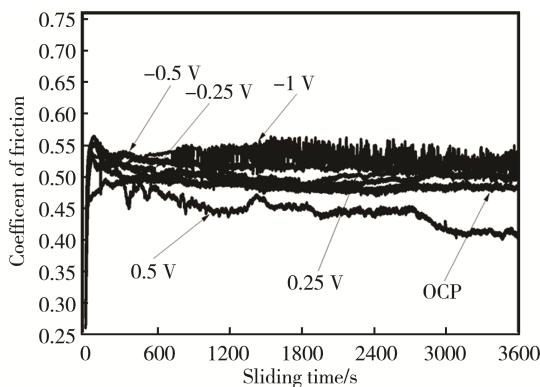


图 7 TiAlN 涂层在不同电位下海水环境中的摩擦系数
Fig.7 Friction coefficient of the TiAlN coating in seawater under different potentials

2.4.2 涂层的腐蚀磨损行为

图 8 为 TiAlN 涂层在不同电位下滑动时, 摩擦过程中的腐蚀电流密度随时间的变化关系。在海水环境中, 随着极化电位 (SCE) 的增大, TiAlN 涂层的腐蚀电流密度也逐渐增加。阴极电位为 -1 V 时, 随着滑动摩擦时间的增加, 腐蚀电流密度缓慢下降, 这表明 TiAlN 涂层在 -1 V 电位下处于良好的阴极保护状态; 阴极电位为 -0.5 V 时, 涂层的腐蚀电流密度在阴极区域随滑动摩擦时间的增加而缓慢增加; 阴极电位为 -0.25 V 时, 随着滑动摩擦时间的增加, 在阳极区域的腐蚀电流密度逐渐增大, 这表明 TiAlN 涂层在摩擦过程中开始产生由磨损促进腐蚀的现象。在阳极电位 0.25 、 0.5 V 下, 腐蚀电流密度随滑动摩擦时间的增加迅速增大。这是由于随着阳极电位 (SCE) 的上升, 涂层表面产生点蚀现象, 大大增加了腐蚀电流^[19]。

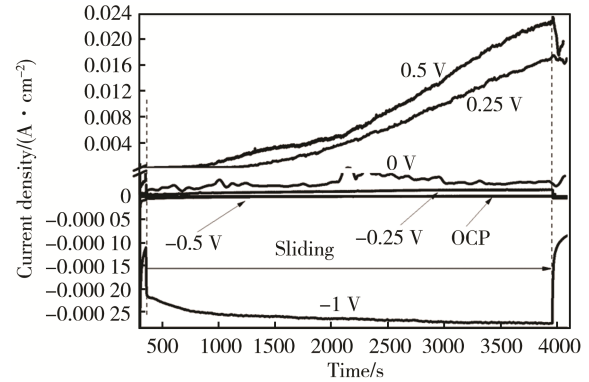


图 8 TiAlN 涂层在不同电位下海水环境中的腐蚀电流密度
Fig.8 Corrosion current density of the TiAlN coating in seawater under different potentials

图 9 为 TiAlN 涂层在不同摩擦环境下的磨痕形貌。通过经典磨损率方程式 (1) 计算, 可以发现 TiAlN 涂层在不同的摩擦条件下的磨损量差别很明显。其中, TiAlN 涂层在干摩擦条件下的磨损率为 $5.5678 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。阴极保护电位为 -1 V 时的磨损率为 $2.2909 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 在开路电位 (OCP) 下的磨损率为 $7.4881 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 涂层在开路电位下的磨损率略大于干摩擦条件下的磨损率。TiAlN 涂层在干摩擦条件下的磨损率是在海水环境中处于阴极保护电位为 -1 V 下的 24.3 倍, 而在开路电位下的磨损率是阴极保护电位为 -1 V 下的 32.68 倍。这进一步表明在开路电位下, 摩擦过程中产生的腐蚀效应促进了涂层的磨损, 磨损率上升。

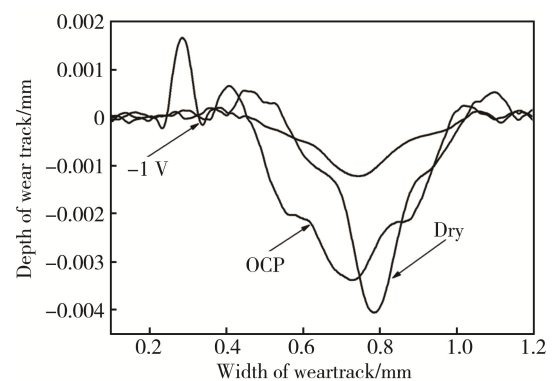


图 9 TiAlN 涂层在不同摩擦环境下的磨痕形貌
Fig.9 Grinding crack morphology of the TiAlN coating in different friction environments

为了进一步研究涂层在摩擦过程中磨痕产物的形成过程, 对 TiAlN 涂层分别在干摩擦和开路电位 (OCP) 下摩擦时磨痕的成分进行 EDS 分析发现, TiAlN 涂层在干摩擦条件下的磨痕成分主要包含 Ti、Al、N 和 O 四种元素, 这可能是通过球-盘往复式摩擦机摩擦后, TiAlN 涂层表面形成了含有 Al_2TiO_5 的磨屑^[26]。涂层在海水环境中也出现类似的现象。在海

水环境(OCP)下滑动摩擦时的平均摩擦系数为0.48, 远远低于在干摩擦条件下涂层的平均摩擦系数0.67。这可能是在海水环境下摩擦的过程中, TiAlN 涂层表面形成 TiO_2 基含水化合物颗粒作为一种润滑剂, 使得摩擦系数迅速降低^[27]。

图10为TiAlN涂层在不同恒定电位下海水环境中的磨蚀形貌。阴极电位为-1 V时, TiAlN 涂层表面的磨痕处出现划伤现象。在阴极电位(-0.5、-0.25 V)和开路电位(OCP)下, 涂层表面也出现条纹状的划伤痕迹。这表明 TiAlN 涂层在阴极电位和开路电位

(OCP)下, TiAlN 涂层的磨损机理主要为塑性变形。电位为0 V时, TiAlN 涂层的磨痕处开始出现分布不均的细小孔洞, 这表明在摩擦过程中, 涂层表面开始发生腐蚀磨损。随着极化电位(SCE)的升高, 磨痕表面形成大小不一的点蚀凹坑, 磨蚀过程中产生的磨屑随滑动的进行被挤压到磨痕边界处, 涂层表面的腐蚀效应非常明显并出现剥落。在阳极电位(0.25 V和0.5 V)下, 这种腐蚀现象愈发明显。这表明 TiAlN 涂层在阳极电位下的磨损机理主要为疲劳点蚀。

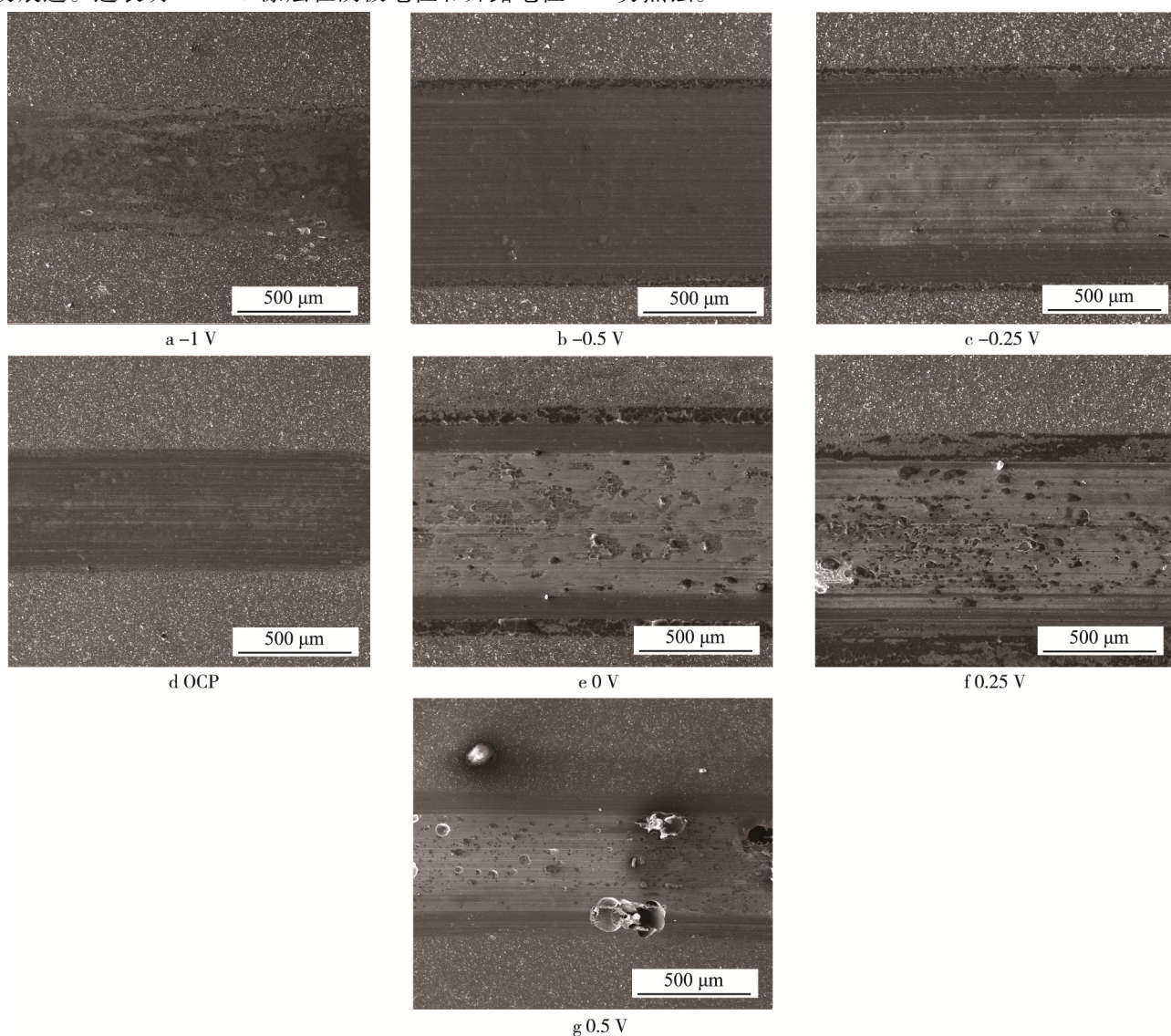


图10 TiAlN涂层在不同电位下的磨蚀形貌

Fig.10 Abrasion morphology of TiAlN coating under different potentials

3 结论

1) 在摩擦条件下, 316 不锈钢的开路电位随加载时间的增加而逐渐降低, 腐蚀加剧。TiAlN 涂层的开路电位随加载时间的增加而逐渐下降, 在极化曲线的阳极区域出现比较明显的钝化现象。在接触状态以及未接触状态下滑动时, TiAlN 涂层的腐蚀电位和腐

蚀电流密度都没有明显差异。

2) 开路电位(OCP)下, 316 基体的摩擦系数随加载时间的增加而逐渐增大, 而 TiAlN 涂层则相反。在阴极电位(-1、-0.5、-0.25 V)下, 随着极化电位(SCE)的增大, 摩擦系数逐渐降低。阳极电位为0.5 V时, TiAlN 涂层磨痕处形成 TiO_2 基含水化合物颗粒作为一种润滑剂, 摩擦系数迅速降低至0.45。

3) 阴极电位为-0.25 V 时, 随着滑动摩擦时间的增加, 逐渐产生由磨损促进腐蚀的磨损量。随着极化电位 (SCE) 的升高, 腐蚀效应愈发明显。TiAlN 涂层在海水环境中的磨蚀机理主要为塑性变形和疲劳点蚀。

参考文献:

- [1] CHEN J, YAN F Y. Tribocorrosion Behaviors of Ti-6Al-4V and Monel K500 Alloys Sliding against 316 Stainless Steel in Artificial Seawater[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012(2): 1356-1365.
- [2] PRASAD B K, MODI O P. Slurry Wear Characteristics of Zinc-based Alloys: Effects of Sand Content of Slurry, Silicon Addition to Alloy sSystem and Traversal Distance[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009(19): 277-286.
- [3] DING X Z, TAN A L, ZENG X T, et al. Corrosion Resistance of CrAlN and TiAlN Coatings Deposited by Lateral Rotating Cathode Arc[J]. Thin Solid Films, 2008, 516: 5716-5720.
- [4] JEMMELY P, MISCHLER S, LANDOLT D. Tribocorrosion Behaviour of Fe-17Cr Stainless Steel in Acid and Alkaline Solutions[J]. Tribology International, 1999, 32: 295-303.
- [5] BROMARK M, LARSSON M, HEDENQVIST P, et al. Influence of Substrate Surface Topography on the Critical Normal Force in Scratch Adhesion Testing of TiN-coated Steels[J]. Surface and Coatings Technology, 1992, 52: 195-203.
- [6] LONG Y, ZENG J, YU D, et al. Microstructure of TiAlN and CrAlN Coatings and Cutting Performance of Coated Silicon Nitride Inserts in Cast Iron Turning[J]. Ceramics International, 2014, 40: 9889-9894.
- [7] BOELEN S, VELTROP H. Microstructure of TiAlN and CrAlN Coatings and Cutting Performance of Coated Silicon Nitride Inserts in Cast Iron Turning[J]. Surface and Coatings Technology, 1987, 33: 63-71.
- [8] ZHOU Z, RAINFORTH W M, LUO Q, et al. Wear and Friction of TiAlN/VN Coatings against Al₂O₃ in Air at Room and Elevated Temperatures[J]. Acta Materialia, 2010, 58: 2912-2925.
- [9] MATEI A A, PENCEA I, BRANZEI M, et al. Corrosion Resistance Appraisal of TiN, TiCN and TiAlN Coatings Deposited by CAE-PVD Method on WC-Co Cutting Tools Exposed to Artificial Sea Water[J]. Applied Surface Science, 2015, 358: 572-578.
- [10] MISCHLER S. Triboelectrochemical Techniques and Interpretation Methods in Tribocorrosion: A Comparative Evaluation[J]. Tribology International, 2008, 41: 573-583.
- [11] LANDOLT D, MISCHLER S, STEMP M. Electrochemical Methods in Tribocorrosion: A Critical Appraisal[J]. Electrochimica Acta, 2001, 46: 3913-3929.
- [12] ZHANG Y, YIN X Y, YAN F Y. Tribocorrosion Behaviour of Type S31254 Steel in Seawater: Identification of Corrosion-Wear Components and Effect of Potential[J]. Materials Chemistry and Physics, 2016, 179: 273-281.
- [13] SHAN L, WANG Y, ZHANG Y, et al. Tribocorrosion Behaviors of PVD CrN Coated Stainless Steel in Seawater[J]. Wear, 2016, 362-363: 97-104.
- [14] SCHALK N, WEIRATHER T, POLZER C, et al. A comparative Study on Ti_{1-x}Al_xN Coatings Reactively Sputtered from Compound and from Mosaic Targets[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205: 4705-4710.
- [15] ALAT E, MOTTA A T, COMSTOCK R J, et al. Multilayer (TiN,TiAlN) Ceramic Coatings for Nuclear fuel Cladding[J]. Journal of Nuclear Materials, 2016, 478: 236-244.
- [16] BOXMAN R L, GOLDSMITH S. Macroparticle Contamination in Cathodic Arc Coatings: Generation, Transport and Control[J]. Surface and Coatings Technology, 1992, 52: 39-50.
- [17] AL-MUHANNA K, HABIB K. Marine Bio-fouling of Different Alloys Exposed to Continuous Flowing Fresh Seawater by Electrochemical Impedance Spectroscopy [J]. Journal of Saudi Chemical Society, 2016(20): 391-396.
- [18] KOK Y N, AKID R, HOVSEPIAN P E. Tribocorrosion Testing of Stainless Steel (SS) and PVD Coated SS Using a Modified Scanning Reference Electrode Technique[J]. Wear, 2005, 259: 1472-1481.
- [19] SUN Y, RANA V. Tribocorrosion Behaviour of AISI 304 Stainless Steel in 0.5 mol/L NaCl Solution[J]. Materials Chemistry and Physics, 2011, 129: 138-147.
- [20] ZHAO Y, ZHOU F, YAO J, et al. Erosion-Corrosion Behavior and Corrosion Resistance of AISI 316 Stainless Steel in Flow Jet Impingement[J]. Wear, 2015, 328-329: 464-474.
- [21] MENDIBIDE C, STEYER P, MILLET J P. Formation of a Semiconductive Surface Film on Nanomultilayered TiN/CrN Coatings and Its Correlation with Corrosion Protection of Steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200: 109-112.
- [22] LÓPEZ A, BAYÓN R, PAGANO F, et al. Tribocorrosion Behaviour of Mooring High Strength Low Alloy Steels in Synthetic Seawater[J]. Wear, 2015, 338-339: 1-10.
- [23] MOHAMMED M, KHAN Z, SIDDIQUEE A. Tribocorrosion Behaviour of Mooring High Strength Low Alloy Steels in Synthetic Seawater[J]. Procedia Materials Science, 2014(6): 1610-1618.
- [24] ZHOU F, WANG Y, LIU F, et al. Friction and Wear Properties of Duplex MAO/CrN Coatings Sliding against Si₃N₄ Ceramic Balls in Air, Water and Oil[J]. Wear, 2009, 267: 1581-1588.
- [25] ZHANG T, JIANG X, LI S, et al. A Quantitative Estimation of the Synergy between Corrosion and Abrasion[J]. Corrosion Science, 1994, 36: 1953-1962.
- [26] VANCOILLE E, CELIS J, ROOS J. Dry Sliding Wear of TiN Based Ternary PVD Coatings[J]. Wear, 1993, 165: 41-49.
- [27] HUQ M, CELIS J. Fretting Wear of Multilayered (Ti,Al)N/TiN Coatings in Air of Different Relative Humidity[J]. Wear, 1999, 225-229: 53-64.