

DOI: 10.16078/j.tribology.2018086

TC4钛合金在模拟海水中腐蚀-磨损交互行为研究

王林青¹, 周永涛², 王军军^{2,3}, 王忠维², 黄伟九^{2,3*}

(1. 重庆理工大学 理学院, 重庆 400054;

2. 重庆理工大学 材料科学与工程学院, 重庆 400054;

3. 重庆市制动摩擦材料协同创新中心, 重庆 400054)

摘要: 采用自制摩擦腐蚀装置研究了TC4钛合金在模拟海水中电化学腐蚀与机械磨损间的交互作用, 探究了不同电化学状态对TC4钛合金腐蚀磨损行为的影响. 在摩擦腐蚀过程中, TC4钛合金的腐蚀电位发生负偏移, 腐蚀电流随着外加电位升高而增大, 在零电流电势(OCP)附近TC4钛合金获得最低摩擦系数. TC4钛合金总体积损失随着外加电位的增加而增大, 证实了腐蚀磨损交互作用随着外加电位的增加而增强; 当电位从-0.5 V增大至0.8 V时, 腐蚀磨损交互作用导致材料损失占总材料损失的比例由12%增加至66%, 其中腐蚀诱导磨损导致的损失量占比由7%增加至44%. OCP及其以下外加电位条件下, TC4钛合金的磨损机制为磨粒磨损; 0 V电位下TC4钛合金磨损机制为磨粒磨损和疲劳磨损; 0.8 V电位下TC4钛合金的磨损机制为磨粒磨损和摩擦诱导的腐蚀磨损.

关键词: TC4; 外加电位; 腐蚀磨损; 交互作用; 磨损机制

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2019)02-0206-07

Corrosion-Wear Interaction Behavior of TC4 Titanium Alloy in Simulated Seawater

WANG Linqing¹, ZHOU Yongtao², WANG Junjun^{2,3}, WANG Zhongwei², HUANG Weijiu^{2,3*}

(1. Chongqing University of Technology, School of Science, Chongqing 400054, China

2. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

3. Chongqing Collaborative Innovation Center for Brake Tribological Materials, Chongqing 400054, China)

Abstract: The interaction between electrochemical corrosion and mechanical wear of TC4 titanium alloy in simulated seawater was studied by using a self-made tribocorrosion device. The effects of electrochemical parameter on the corrosion and wear of TC4 titanium alloy were discussed. During the tribocorrosion process, the corrosion potential of TC4 titanium alloy shifted toward more negative values, and the corrosion current increased along with the increase of the applied potential, and the lowest friction coefficient of TC4 titanium alloy was obtained under the current potential of about zero (OCP). The fact that the loss of TC4 titanium alloy volume increased along with the increase of the applied potential, confirming that the interaction between corrosion and wear was enhanced along with the increase of the applied potential. When the potential increased from -0.5 V to 0.8 V, the material loss caused by the interaction of

Received 16 July 2018, revised 24 December 2018, accepted 11 January 2018, available online 28 March 2019.

*Corresponding author. E-mail: huangweijiu@cqut.edu.cn, Tel: +86-23-62563089.

The project was supported by the Natural Science Foundation of China (51505050), Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2017jcyjAX0075), the Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJ1500942) and the Education Reform Project for Professional Degree Graduate of Chongqing University of Technology (ZSSD103).

国家自然科学基金项目(51505050), 重庆市科委基础与前沿研究一般项目(cstc2017jcyjAX0075), 重庆市教委科学技术研究基础/应用基础研究项目(KJ1500942)和重庆理工大学专业学位研究生教育改革试点项目(ZSSD103)资助.

corrosion and wear increased from 12% to 66%, and the loss caused by corrosion-induced wear increased from 7% to 44%. Under applied potential equal or lower than OCP, the wear mechanism of TC4 titanium alloy was abrasive wear. The wear mechanism of TC4 titanium alloy at a potential of 0 V was abrasive wear and fatigue wear. The wear mechanism of TC4 titanium alloy at a potential of 0.8 V was abrasive wear and friction-induced corrosion wear.

Key words: TC4; applied potential; corrosion-wear; interaction; wear mechanism

钛金属具有质量轻、强度高、极强的耐腐蚀性能^[1-4], 特别对海水和海洋大气环境有很强的抵御能力, 被誉为“海洋金属”。TC4钛合金是当前应用最为广泛的钛合金之一, 在船舶行业、海洋勘探等其他海洋制造业有着很重要的用途, 如耐压壳体、阀、泵、螺旋桨及桨轴、发动机零件等^[5-6]。随着TC4钛合金的应用由结构件向运动件拓展, 海洋极端环境制约着TC4钛合金的应用和推广, 主要表现在部件在海洋苛刻环境下的腐蚀行为、电化学腐蚀以及材料在载荷和腐蚀环境下的耦合摩擦学行为^[7-8]。

腐蚀磨损相互作用使材料的腐蚀和摩擦行为变得更加复杂^[9-12], 一般来说由摩擦可以改变材料表面反应层特性从而直接影响材料的腐蚀性能。Chen等^[13]研究了 AISI 316不锈钢和Ti6Al4V合金在海水中与Al₂O₃陶瓷对磨时的腐蚀磨损, 发现摩擦导致Ti6Al4V合金开路电位下降, 腐蚀磨损过程中的电流密度远高于静态腐蚀时的电流密度, 摩擦破坏了表面钝化膜导致材料耐腐蚀性能下降。近年来, 人们越来越关注通过电化学方法研究材料组合腐蚀磨损降解的可能性。Barril等^[14]采用恒电位极化手段研究了Ti6Al4V在0.9% NaCl溶液中的微动腐蚀行为。结果表明, Ti6Al4V合金的磨损率与电极电位密切相关。Henry等^[15]研究了在0.5 mol/L H₂SO₄溶液中, 316 L不锈钢和Ti6Al4V钛合金与氧化铝球在不同电化学电位下的腐蚀磨损行为, 发现在阳极条件下三种合金的磨损量明显高于在阴极和自由电位条件下的磨损量, 这说明电化学状态对合金的腐蚀磨损行为有着重要的影响。在海水环境中, 不同电化学状态下TC4钛合金表面会产生独特各异的化学表面层, 腐蚀磨损的交互作用也会随着腐蚀速率的增加而变得更加强烈, 最终影响着TC4钛合金在海水环境中的服役寿命。然而, 目前对不同电化学状态下TC4钛合金在海水环境中的腐蚀磨损协同作用和磨损机制尚未完全了解。所以, 本文作者研究了模拟海水中不同电化学状态对TC4钛合金腐蚀磨损行为的影响, 期望为钛合金在海洋环境中的应用提供理论基础。

1 试验部分

1.1 试验材料

试验中使用的材料是TC4钛合金, 其化学成份(质

量百分数计)为6.25% Al, 4.21% V, 0.22% Fe, 0.19% O, 0.007 3% H, 其余为Ti, 加工状态为轧制退火态。试样首先被切割成尺寸为30 mm×20 mm×3 mm的小块, 再依次用180[#]、400[#]、600[#]、800[#]、1 000[#]和1 200[#]砂纸打磨表面, 之后使用1.5 μm粒径的金刚石抛光剂抛光至镜面, 依次使用丙酮、酒精超声清洗, 冷风吹干。在进行腐蚀磨损试验之前, 首先对样品进行封样处理, 暴露面积为10 mm×20 mm。溶液介质为模拟海水, 按ASTMD1141-98标准配制。

1.2 腐蚀-磨损试验

研究腐蚀磨损交互作用需要对电化学腐蚀行为和摩擦学行为同时进行测试, 图1为自制腐蚀磨损试验装置示意图。试验中采用球-盘往复摩擦磨损试验机(MFT-R4000), 对偶球选用φ6 mm的Si₃N₄陶瓷球, 施加载荷10 N, 往复运动频率1 Hz, 往复长度10 mm, 试验时间为60 min。采用双单元电化学工作站(CS2350)检测电化学信号。在腐蚀摩擦试验中, 以试样作为工作电极(We), 以Ag/AgCl电极(饱和KCl)为参比电极(Re), 铂丝为对电极(Ce)。首先对TC4钛合金分别在静态条件下和摩擦条件下的进行动电位极化测试, 扫描范围相对开路电位为-1.0~1.5 V。在开路电位测试中, 摩擦前30 min和摩擦后20 min只监测样品表面的开路电位的变化, 中间60 min试验过程同时监测开路电位和摩擦系数的变化, 总试验时间为110 min。在恒电位测试中, 外加电位分别设置为-1.0、-0.5、0和0.8 V。摩擦前10 min和后10 min监测无摩擦行为下腐蚀电流的瞬变, 中间60 min试验过程同时检测腐蚀电流和摩擦

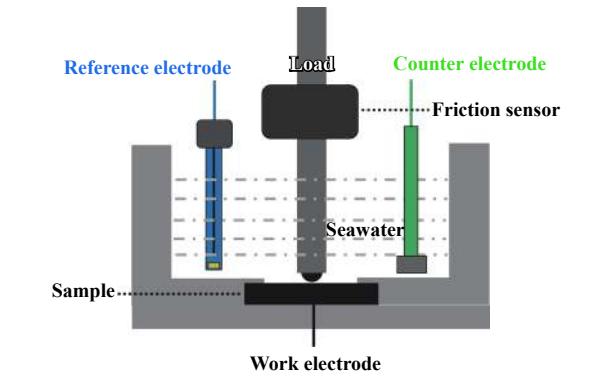


Fig. 1 Schematic diagram of corrosion wear experimental device

图1 腐蚀磨损试验装置示意图

系数的变化.

1.3 测试方法

采用扫描电镜观察TC4钛合金腐蚀磨损后的表面形貌. 采用探针式表面轮廓仪测量磨痕轮廓, 以计算磨损损失量.

腐蚀磨损协同作用已被探索和使用, 以下列一般方法量化腐蚀磨损协同效应^[16-17]. 各体积损失可以解释如下:

$$V_T = V_{M0} + V_{CM} + V_{C0} + V_{MC} \quad (1)$$

式(1)中: V_T 代表腐蚀磨损总体积损失, V_{M0} 代表无腐蚀纯磨损体积损失, V_{CM} 代表腐蚀引起的磨损增量, V_{C0} 代表无摩擦静态腐蚀体积损失, V_{MC} 代表摩擦引起的腐蚀增量.

$$V_C = V_{C0} + V_{MC} \quad (2)$$

式(2)中: V_C 代表腐蚀磨损试验中腐蚀引起的金属总体积损失, 可由Faraday方程计算:

$$V = \frac{MIt}{nF\rho} \quad (3)$$

式(3)中: M 代表材料的相对原子质量; I 腐蚀过程中的电流强度, 可以考虑通过取电流强度的平均值来计算; t 为腐蚀过程的总时间; n 为得失电子数; F 为法拉第常数, 数值为96 500 C/mol; ρ 为材料的密度. 同理可计算出 V_{C0} . 最终利用式(1~3)计算得出 V_{MC} 和 V_{CM} 值.

2 结果和讨论

2.1 电化学试验

图2显示了TC4钛合金在静态腐蚀和摩擦腐蚀试验中的极化曲线. 从图2中可知, 静态腐蚀和摩擦腐蚀过程中均可观察到材料的钝化现象, 这说明在摩擦条件下, 即使钝化膜因为作用力被破坏, 钛合金表面也

会在较短时间内再次发生钝化^[18]. 在静态腐蚀过程中, TC4钛合金的腐蚀电位为-0.4 V, 腐蚀电流为 1.76×10^{-7} A. 在腐蚀磨损过程中, TC4钛合金的腐蚀电位为-0.65 V, 腐蚀电流为 2.03×10^{-5} A, 即在滑动摩擦作用下TC4钛合金的自腐蚀电位下降, 腐蚀电流增大. 腐蚀电流增大的原因可能是由于钝化膜在接触区域中的不断破坏和恢复过程, 摩擦使金属的溶解速率提高, 腐蚀反应加剧. 另外, 腐蚀磨损过程中极化曲线表现出明显的电流震荡, 这可能是由于氧化膜的破坏和再形成所致^[19-20].

图3显示了海水中TC4钛合金在摩擦前、摩擦过程和摩擦后的开路电位(OCP)变化. 摩擦之前进行的开路电位测试是为了使钛合金表面趋于稳定, 摩擦测试中的开路电位(OCP)反映的是未磨损区域和磨损区域的混合电位. 从图3中可知, 开始加载时, 钛合金的OCP急剧下降, 这可能是由于钝化膜的去除使新鲜活性表面暴露于腐蚀液中^[21], 钝化膜破坏以后, 在钝化表面和钝化损伤表面之间形成了电偶腐蚀对, 钝化膜的损伤会增加阳极反应, 使周围表面有组织地极化. 随着时间的增加, 电位仍然呈缓慢下降趋势. 这可能是由于持续的摩擦过程导致材料表面磨损区域的面积增大, 磨损轨道中有更大活性区域. 当摩擦停止时, OCP开始突然增加, 钝化状态又重新建立.

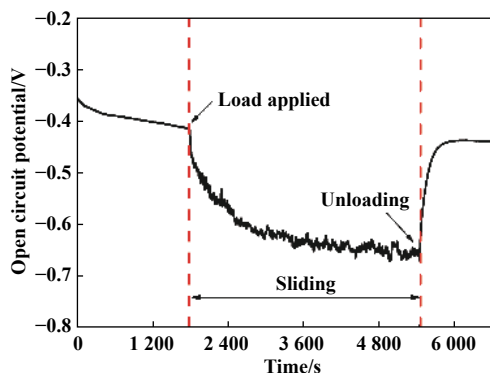


Fig. 3 Open circuit potential measurement of TC4 titanium alloy

图 3 TC4钛合金的开路电位测试

2.2 腐蚀磨损交互试验

图4显示了摩擦前、摩擦中和摩擦后, 钛合金在模拟海水中的摩擦系数和腐蚀电流的演变. 为了评估机械磨损和电化学腐蚀对材料总损失的贡献, 所选电位是-1.0、-0.5、0和0.8 V. 首先在-1 V阴极电位下进行腐蚀磨损试验, 从图2可知, -1 V电位下对基体具有阴极保护作用, 可认为在该电位下TC4钛合金不发生腐蚀

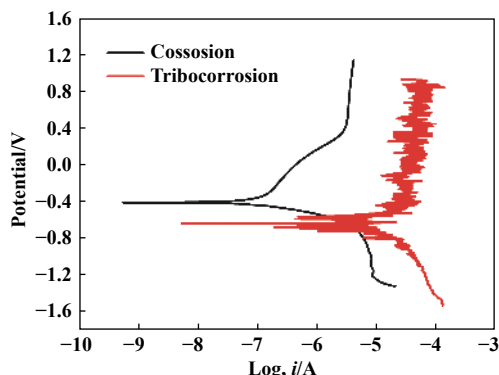


Fig. 2 Polarization curve of TC4 titanium alloy in static corrosion and tribocorrosion

图 2 TC4钛合金在静态腐蚀和摩擦腐蚀试验中的极化曲线

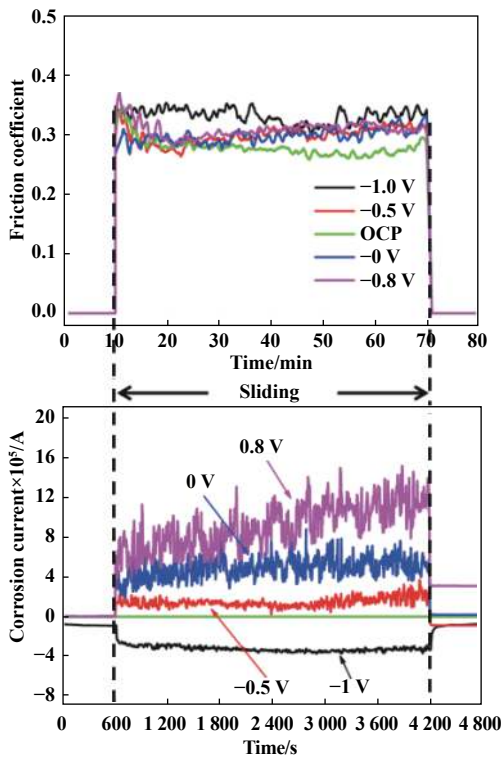


Fig. 4 Evolution of friction coefficient and corrosion current recorded before, during and after sliding

图4 摩擦前、摩擦中和摩擦后摩擦系数和腐蚀电流的演变

行为^[16, 22-23]. 在阴极外加电位-1.0 V时的摩擦系数约为0.34. 当外加电位升高至-0.5 V时, 观察到摩擦系数略微下降, 摩擦系数为0.30. 这可能是由于摩擦破坏了材料表面的钝化膜, 新鲜基体暴露溶液中会生成钝化膜, 钝化膜的去除和生成是个不断连续的过程, 而钝化膜的剪切强度低于钛合金本身, 导致摩擦系数降低^[18]. 同时腐蚀电流突增至 1.78×10^{-5} A, 也证实钝化膜的损伤. 随着外加电位的增大, TC4钛合金在零电流电势(OCP)附近摩擦系数最低(0.28). 摩擦系数最小的原因可能是磨痕表面因腐蚀作用而产生了钝化膜, 钝化膜较致密且厚度适中, 能起到较好的润滑作用. 随着外加电位增大至0.8 V, TC4钛合金的摩擦系数增加, 这可能是由于腐蚀速率的快慢影响了TC4钛合金摩擦系数的变化. 若腐蚀速率较快, 摩擦过程中钝化膜会更容易被压入, 钝化膜则不能起到很好的润滑作用, 持续摩擦导致对偶球和材料表面接触面积增加, 材料表面的剪切力增加, 摩擦系数增加. 针对不同电位下的腐蚀电流值的变化, 可以看出即使在高外加电位条件下(静态)材料的腐蚀也较小. 当施加载荷时, 由于表面钝化膜被破坏失去了保护作用, 腐蚀电流会突然增大, 并且在持续摩擦的过程中, 随着外加电位的增加, 材料发生腐蚀的速率也在加快. 高外加电位0.8 V条件

下腐蚀电流增加最为明显, 并且随着摩擦试验的进行, 腐蚀电流还在逐渐上升并保持在较高的数值 9×10^{-5} A左右.

2.3 腐蚀磨损交互作用

TC4钛合金在不同外加电位下的材料总体积损失如图5所示. 从图5中可以看出, 材料的体积损失量随着外加电位的增加而逐渐增大. 在-1.0 V电位下磨损量为 3.23×10^{-2} mm³, 在0.8 V阳极电位下的材料损失量达到最大值为 7.25×10^{-2} mm³, 增加了55.45%. 可能是由于在高外加电位条件下, 钛合金表面的腐蚀和钝化速率较快, 腐蚀磨损过程中同时发生着快速钝化和持续磨损, 摩擦过程中钝化膜会被再次破坏和去除, 这种恶性循环导致腐蚀面积增加, 导致体积损失增大.

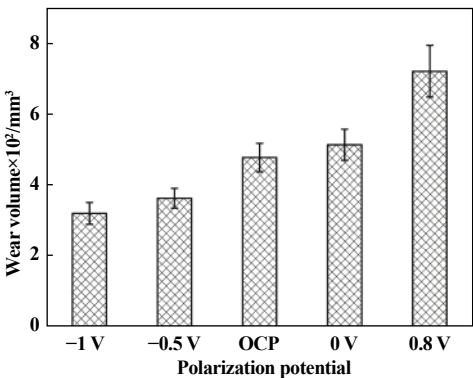


Fig. 5 Total volume loss at different applied potentials

图5 不同外加电位下的总体积损失量

为了评估机械磨损和电化学腐蚀对材料总损失的贡献, 在所选电位-1.0、-0.5、0和0.8 V条件下, 可分别计算各腐蚀磨损分量. 表1列出了TC4钛合金在腐蚀磨损过程中的各分量的贡献值. 由于静态腐蚀下所计算出的腐蚀体积损失对总材料的贡献非常小, 所以 V_{C0} 对材料总损失的贡献可忽略不计. 通过表1中数值可分析, V_{CM} 和 V_{MC} 随着外加电位的升高而增大, 即腐蚀引起的磨损增量和摩擦引起的腐蚀增量同时增加, 表明了钛合金在模拟海水溶液中的腐蚀磨损交互作

表1 不同外加电位下的各腐蚀磨损分量
Table 1 The components of corrosion and wear under different applied potentials

Potential	Corrosion and wear components				
	V_T/mm^3	V_{M0}/mm^3	V_{CM}/mm^3	V_{MC}/mm^3	V_{C0}/mm^3
-1.0 V	3.23×10^{-2}	3.23×10^{-2}	0	0	0
-0.5 V	3.66×10^{-2}	3.23×10^{-2}	2.57×10^{-3}	1.73×10^{-3}	0
OCP	4.81×10^{-2}	3.23×10^{-2}	1.38×10^{-2}	1.98×10^{-3}	1.72×10^{-5}
0 V	5.17×10^{-2}	3.23×10^{-2}	1.49×10^{-2}	4.47×10^{-3}	6.27×10^{-5}
0.8 V	7.25×10^{-2}	3.23×10^{-2}	3.18×10^{-2}	8.37×10^{-3}	7.40×10^{-5}

用增强. 在外加0.8 V电位条件下, V_{CM} 的数值最大, 即腐蚀引起的磨损增量最大, 体积损失量也为最大值.

为了更为清晰地了解各分量贡献所占的比例, 不同外加电位下材料损耗中各分量的占比如图6所示. 由图6中可得, 纯机械磨损对总体积损失的相对贡献随着外加电位的增加而明显减小, 腐蚀引起磨损分量的贡献随着外加电位的增加而逐渐增加. 当外加电位由-0.5 V增加到0.8 V时, 腐蚀磨损交互行为所占总材料损失比例由12%增加到66%, 说明腐蚀磨损的相互

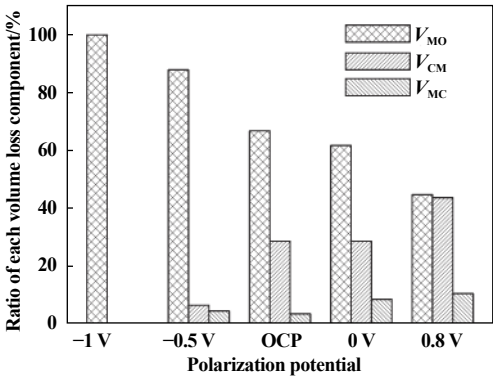


Fig. 6 Proportion of V_{M0} , V_{CM} , V_{MC} to total material loss at different applied potentials

图 6 不同外加电位下 V_{M0} 、 V_{CM} 和 V_{MC} 所占总材料损失的比例

作用增强. 此外, 腐蚀诱导磨损损失量占比由7%增加到44%, 尤其在阳极电位下, 腐蚀诱导磨损的贡献是显著的, 说明随着腐蚀速率的增加, 腐蚀引起的磨损分量越来越占据主导地位.

图7显示了TC4钛合金腐蚀磨损后的表面形貌图. 从图7中可知, 不同外加电位条件下TC4钛合金的磨痕表面都存在着较多平行磨痕方向的沟槽, 这是由于表面钝化膜被磨损破坏, 表面氧化物或金属磨屑未被及时排出, 颗粒状磨屑对摩擦表面进行犁削作用的结果. 在OCP条件下[见图7(c)]材料表面摩擦区域较为平整, 这可能是由于在此条件下产生了较为致密的钝化膜. 在施加OCP以下外加电位条件下, 外加电位对材料具有阴极保护作用, 腐蚀作用对钛合金的影响较小, TC4钛合金在海水中以机械磨损为主, 磨损机制为磨粒磨损机制. 随着电位升高到0 V时[见图7(d)], 可观察到平行于划痕方向的大区域的凹坑, 磨痕表面存在一定数量的疲劳裂纹, 这可能是由于模拟海水的腐蚀作用加速了裂纹的扩展, 在载荷的持续作用下, 部分区域出现了大面积剥落区, 这是疲劳磨损的特征. 另外, 腐蚀引起的磨损分量占材料损失的比重为28.9%, 也证实了腐蚀加速了磨损这一行为, 磨损机制为磨粒磨损和疲劳磨损. 比较0.8 V电位和OCP的磨痕形貌, 此时磨痕

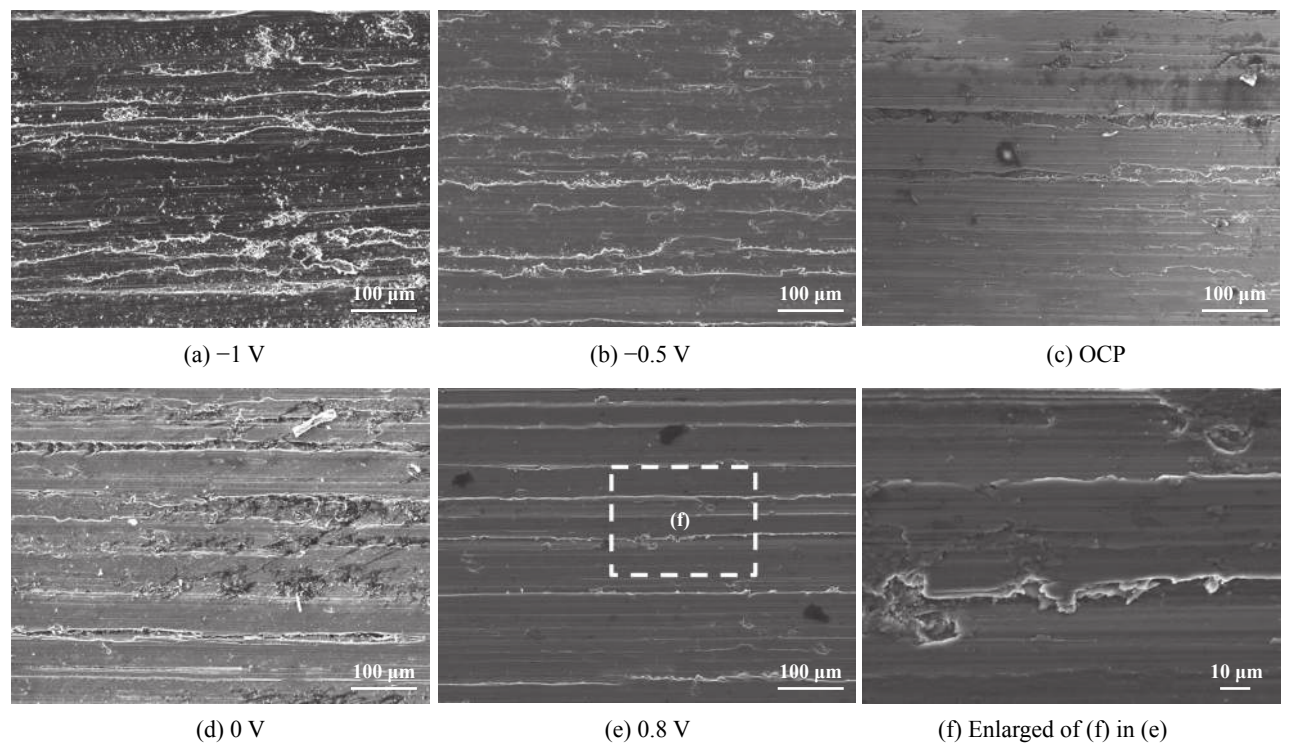


Fig. 7 Wear trace morphology of TC4 titanium alloy after corrosion and wear at (a)-1.0 V、(b)-0.5 V、(c)OCP、(d)0 V、(e)0.8 V and partial enlarged drawing (f)

图 7 TC4钛合金腐蚀磨损之后的磨痕形貌图 (a)-1.0 V、(b)-0.5 V、(c)OCP、(d)0 V、(e)0.8 V和(f)局部放大图

形貌中观察到更多划痕.可能是在高电位条件下,钝化膜的去除和修复过程促进了TC4钛合金的失效,材料表面摩擦区域由于腐蚀速率较高,在该区域会产生更多的腐蚀和摩擦产物,磨粒磨损程度增加.另外,在图7(e)的局部放大图[图7(f)]中很清晰地观察到腐蚀坑洞,这是由摩擦诱导的腐蚀行为造成的.摩擦载荷作用使得TC4钛合金表面产生塑性变形,局部变形区域产生更多数量位错等缺陷,在腐蚀溶液中该区域具有高的腐蚀活性,会形成微观的“应变差异电池”,同时摩擦作用加快腐蚀的进行,在摩擦表面产生局部小孔腐蚀^[24].此时,摩擦引起的腐蚀增量占比为11.5%,因此该磨损机制是磨粒磨损和摩擦诱导的腐蚀磨损.

3 结论

a. TC4钛合金在模拟海水条件下腐蚀磨损测试中,自腐蚀电位和OCP均发生负偏移,腐蚀电流大幅增加.

b. 恒外加电位摩擦腐蚀过程中,腐蚀电流随外加电位的增加而增大.在零电流电位(OCP)附近获得最低摩擦系数.

c. 材料总损失量会随外加电位的增加而增大,磨损与腐蚀之间的交互作用导致高磨损速率.随着外加电位从-0.5 V增大至0.8 V,腐蚀磨损交互行为所占总材料损失比例由12%增加到66%,尤其腐蚀诱导磨损损失量占比由7%增加到44%.OCP及其以下外加电位条件下,TC4钛合金的磨损机制为磨粒磨损;0 V电位下TC4钛合金磨损机制为磨粒磨损和疲劳磨损,0.8 V电位下钛合金磨损机制为磨粒磨损和摩擦诱导的腐蚀磨损.

参考文献

- [1] Wang Lan, Wang Shuqi, Chen Kangmin, et al. A comparison on the wear performance of TC4 and TC11 alloys[J]. Tribology, 2015, 32(2): 214–220 (in Chinese) [王兰, 王树奇, 陈康敏, 等. TC4和TC11合金磨损性能的对比研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 32(2): 214–220]. doi: 10.16078/j.tribology.2015.02.013.
- [2] Yu Pengcheng, Liu Xiubo, Lu Xiaolong, et al. High-temperature tribological properties of laser clad composite coatings on Ti6Al4V alloy[J]. Tribology, 2015, 35(6): 737–745 (in Chinese) [余鹏程, 刘秀波, 陆小龙, 等. Ti6Al4V合金表面激光熔覆复合涂层的高温摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(6): 737–745]. doi: 10.16078/j.tribology.2015.06.013.
- [3] Wu Songbo, Ca Zhenlin, Lin Yu, et al. Effect of hard sand on the impact wear behavior of TC4 alloy[J]. Tribology, 2018, 38(4): 14–21 (in Chinese) [吴松波, 蔡振兵, 林禹, 等. 硬质沙粒对TC4钛合金冲击磨损的损伤行为的研究[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(4): 14–21]. doi: 10.16078/j.tribology.2018.04.002.
- [4] Li Zhenhua, Hua Chen, Cheng Xianhua. Erosion mechanism evolution of Ti5553 treated by equal channel angular extrusion[J]. Tribology, 2015, 35(1): 45–52 (in Chinese) [李振华, 华晨, 程先华, 等. 等径角挤压后Ti5553钛合金的冲蚀磨损机理演变[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(1): 45–52]. doi: 10.16078/j.tribology.2015.01.007.
- [5] Xia Shenlin, Wang Gang, Yang Xiao, et al. Application of titanium and titanium alloy in ships[J]. Cold Machining of Metal Processing, 2016, (19): 40–41 (in Chinese) [夏申琳, 王刚, 杨晓, 等. 钛及钛合金在船舶中的应用[J]. 金属加工(冷加工), 2016, (19): 40–41]. doi: 10.3969/j.issn.1674-1641.2016.19.015.
- [6] Chen Jun, Wang Tingxun, Zhou Wei, et al. Domestic and foreign marine titanium alloy and its application[J]. Titanium Industry Progress, 2015, 32(6): 8–12 (in Chinese) [陈军, 王廷询, 周伟, 等. 国内外船用钛合金及其应用[J]. 钛工业进展, 2015, 32(6): 8–12].
- [7] Gao Pu, He Dongqing, Zheng Shaoxian, et al. In-situ study of tribocorrosion behavior of carbon-based and nitride-based coatings[J]. Tribology, 2015, 32(2): 138–146 (in Chinese) [高溥, 何东青, 郑韶先, 等. 碳基和氮化物基涂层的摩擦-腐蚀交互行为的原位研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 32(2): 138–146]. doi: 10.16078/j.tribology.2015.02.003.
- [8] Chen Jun, Li Quanan, Zhang Qing, et al. Effect of corrosion on wear resistance of several metals in seawater[J]. Transactions of Materials & Heat Treatment, 2014, 35(12): 166–171 (in Chinese) [陈君, 李全安, 张清, 等. 海水腐蚀对几种金属材料耐磨性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(12): 166–171].
- [9] Ding H, Dai Z, Zhou F, et al. Sliding friction and wear behavior of TC11 in aqueous condition[J]. Wear, 2007, 263(1-6): 117–124. doi: 10.1016/j.wear.2007.01.106.
- [10] Wang Z, Huang W, Li Y, et al. Tribocorrosion behaviour of a biomedical Ti-25Nb-3Mo-3Zr-2Sn alloy in Ringer's solution[J]. Materials Science & Engineering C, 2017, 76: 1094–1102.
- [11] Wang Z, Zhou Y, Wang H, et al. Tribocorrosion behavior of Ti-30Zr alloy for dental implants[J]. Materials Letters, 2018, 218: 190–192. doi: 10.1016/j.matlet.2018.02.008.
- [12] Priya R, Malika C, Mudali U K. Wear and tribocorrosion behaviour of 304L SS, Zr-702, Zircaloy-4 and Ti-grade2[J]. Wear, 2014, 310(1-2): 90–100. doi: 10.1016/j.wear.2013.11.051.
- [13] Chen J, Zhang Q. Effect of electrochemical state on corrosion-wear behaviors of TC4 alloy in artificial seawater[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(4): 1011–1018. doi: 10.1016/S1003-6326(16)64164-X.
- [14] Barril S, Mischler S, Landolt D. Electrochemical effects on the fretting corrosion behaviour of Ti6Al4V in 0.9% sodium chloride solution[J]. Wear, 2005, 259(1-6): 282–291. doi: 10.1016/j.wear.2004.12.012.
- [15] Henry P, Takadoum J, Berçot P. Tribocorrosion study of 316L stainless steel and TA6V4 alloy in various electrolytes[J]. Corrosion

- Science, 2009, 51(6): 1308–1314. doi: [10.1016/j.corsci.2009.03.015](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.03.015).
- [16] Ye Y, Wang Y, Ma X, et al. Tribocorrosion behaviors of multilayer PVD DLC coated 304L stainless steel in seawater[J]. *Diamond & Related Materials*, 2017, 79: S0925963517302066.
- [17] Stack M M, Rodling J, Mathew M T, et al. Micro-abrasion-corrosion of a Co-Cr/UHMWPE couple in ringer's solution: An approach to construction of mechanism and synergism maps for application to bio-implants[J]. *Wear*, 2010, 269(5): 376–382.
- [18] Li Xinxing, Li Yixian, Wang Shuqi. Wear behavior and mechanism of TC4 alloy in different environmental media[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2015, 39(9): 793–798 (in Chinese) [李新星, 李奕贤, 王树奇. TC4合金在不同环境介质中的磨损行为及磨损机制研究[J]. *稀有金属*, 2015, 39(9): 793–798].
- [19] Ponthiaux P, Wenger F, Drees D, et al. Electrochemical techniques for studying tribocorrosion processes[J]. *Wear*, 2004, 256(5): 459–468. doi: [10.1016/S0043-1648\(03\)00556-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00556-8).
- [20] Totolin V, Pejaković V, Csanyi T, et al. Surface engineering of Ti6Al4V surfaces for enhanced tribocorrosion performance in artificial seawater[J]. *Materials & Design*, 2016, 104: 10–18.
- [21] Azzi M, Paquette M, Szpunar J A, et al. Tribocorrosion behaviour of DLC-coated 316L stainless steel[J]. *Wear*, 2009, 267(5): 860–866.
- [22] Sun Y, Rana V. Tribocorrosion behaviour of AISI 304 stainless steel in 0.5 M NaCl solution[J]. *Materials Chemistry & Physics*, 2011, 129(1): 138–147.
- [23] Tekin K C, Malayoglu U. Assessing the tribocorrosion performance of three different nickel-based superalloys[J]. *Tribology Letters*, 2010, 37(3): 563–572. doi: [10.1007/s11249-009-9552-1](https://doi.org/10.1007/s11249-009-9552-1).
- [24] Chen Jun, Yan Fengyuan, Wang Jianzhang. Corrosion wear properties of TC4 titanium alloy in artificial seawater[J]. *Tribology*, 2012, 32(1): 1–6 (in Chinese) [陈君, 阎逢元, 王建章. 海水环境下 TC4钛合金腐蚀磨损性能的研究[J]. *摩擦学学报*, 2012, 32(1): 1–6]. doi: [10.16078/j.tribology.2012.01.001](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2012.01.001).