

海水环境下 TC4 钛合金腐蚀磨损性能的研究

陈 君^{1,2}, 阎逢元^{1*}, 王建章¹

(1. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: 本文研究了 TC4 钛合金和氧化铝陶瓷摩擦副在模拟海水下的腐蚀磨损行为. 采用失重法测量磨损体积损失, 利用阴极保护和电化学方法测量摩擦过程中腐蚀电流的方法来求得腐蚀磨损之间的交互作用. 结果表明: 在该试验条件下, TC4 钛合金在海水中的腐蚀磨损量明显大于其在阴极保护条件下的磨损量, 证明腐蚀与磨损有交互作用的发生. 纯磨损量占总腐蚀磨损量的比例为 65.9% ~ 89.8%, 在腐蚀磨损过程中磨损作用明显大于腐蚀作用. 腐蚀磨损交互作用量占总腐蚀磨损量的比例 $\Delta V/V$ 为 10.2% ~ 34.1%, 腐蚀磨损交互作用同样不可忽视.

关键词: TC4 钛合金; 腐蚀磨损; 交互作用; 海水

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2012)01-0001-06

Corrosion Wear Properties of TC4 Titanium Alloy in Artificial Seawater

CHEN Jun^{1,2}, YAN Feng-yuan^{1*}, WANG Jian-zhang¹

(1. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Corrosion-wear behaviors of TC4 alloy sliding against alumina in artificial seawater was investigated. The wear volume was determined by weight-loss method. The synergistic effect between corrosion and wear can be obtained by measuring the material loss under cathodic protection and the corrosion rate under sliding condition. In this paper, the wear caused by corrosion wear was higher than that under cathodic protection, and this was the evidence of synergistic effect. The fact that the ratio of the mechanical wear to the total wear ranged from 65.9% to 89.8% indicated mechanical wear prevailed in the corrosion-wear process. The ratio of the synergistic effect between corrosion and wear to the total wear was between 10.2% and 34.1% and therefore can not be neglected.

Key words: TC4 titanium alloy, corrosion-wear, synergistic effect, seawater

钛合金因其优异的机械性能、良好的生物相容性和优异的耐腐蚀性能而成为航空、航天、生物以及航海工业中不可或缺的结构材料. 钛合金表面在大气或者海水中会立即生成 1 层保护膜, 使之处于钝化状态. 在常温海水环境中不发生点蚀和缝隙腐蚀,

是目前已知的抗常温海洋环境腐蚀最优异的金属材料^[1-3]. 虽然钛合金表面易钝化而防腐, 但是在中等载荷和转速下很容易被擦伤从而导致钝化膜的破坏, 加剧腐蚀. 在海水环境中对于摩擦学的研究具有重要的意义, 对于海洋设备的开发和利用, 尤其是能

Received 30 September 2011, revised 14 November 2011, accepted 8 December 2011, available online 28 January 2012.

* Corresponding author. E-mail: fyuan@licp.cas.cn, Tel: +86-931-4968185.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (50823008) and National High-Tech Research and Development Program of China (863) (2009AA03Z105).

国家自然科学基金(50823008)和国家高技术研究发展计划项目(863)(2009AA03Z105)资助.

为海水液压传动系统提供技术指导和理论依据. 海水液压传动系统以海水作为工作介质, 具有环境相容性, 其广泛应用于水下机器人、深海设备、海上采油平台等领域^[4-7]. 当腐蚀和摩擦共同作用于金属时, 机械和电化学因素的共同作用会产生复杂的反应并促进其失效. 腐蚀磨损一般是指发生在腐蚀介质中的磨损现象, 是力学因素、化学因素以及电化学因素及其交互作用的结果^[8-10].

研究腐蚀磨损交互作用需要测量电化学腐蚀作用和摩擦作用各自的速度, 由于它们是同时发生于同一个腐蚀磨损体系中, 因此难以用传统的失重法同时分别地测出材料的磨损和电化学腐蚀速度. 为此研制了1种电化学腐蚀磨损装置, 对腐蚀磨损体系进行电化学控制和监测, 提出了1种研究电化学腐蚀和机械磨损相互作用的分析方法, 对 TC4 钛合金在海水环境下的电化学腐蚀以及耐腐蚀磨损性能进行了研究^[11-12].

1 实验部分

1.1 试验设备

在国产 MMW-1 型立式万能摩擦磨损试验机上进行 TC4 钛合金的腐蚀磨损试验, 采用销-盘滑动接触方式, 由于要对 TC4 钛合金的电位和电流进行监控, 对该试验机进行了部分改装, 将电化学工作站引入腐蚀磨损体系, 图 1 为改装后的腐蚀磨损试

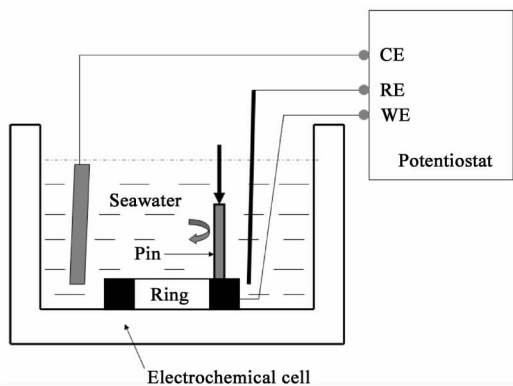


Fig. 1 The schematic of the corrosion-wear apparatus

图1 腐蚀磨损试验机示意图

验机工作原理示意图. 其工作过程为: 圆柱形陶瓷销试样安装在主轴上并随轴转动; 环形下试样固定不动, 并始终浸泡于海水之中, 环试样只有上表面接触海水, 其余表面密封. 在腐蚀磨损过程中, 钛合金下试样作为工作电极, 其腐蚀电化学信号输出至带有电脑测控的 CHI760C 型电化学恒电位仪, 在试验槽

内安装 Pt 辅助电极和鲁金毛细管, 鲁金毛细管通过盐桥连接至饱和甘汞参比电极 (SCE), 组成三电极系统, 从而可进行相应的电化学测量和监控. 在试验中均以以下试样作为研究对象, 测定其在不同试验条件下的腐蚀磨损性能.

1.2 腐蚀磨损定量测试

在腐蚀磨损过程中, 材料的破坏包括材料因素、电化学因素、力学因素和环境因素的共同作用. 在腐蚀介质中, 电化学因素和力学因素对材料产生明显地腐蚀磨损交互作用^[13]. 一般来说材料的总磨损量 V_T 大于纯腐蚀量 V_c 与纯磨损量 V_m 之和, 其增加量可称为腐蚀磨损交互作用量 ΔV :

$$V_T = V_c + V_m + \Delta V \quad (1)$$

而腐蚀磨损交互作用量 ΔV 又可分为两部分: 腐蚀对磨损的促进量 V_{cm} 以及磨损对腐蚀的促进量 V_{mc} , 即:

$$\Delta V = V_{mc} + V_{cm} \quad (2)$$

所以公式(1)可以改写为:

$$V_T = V_c + V_m + \Delta V = V_c + V_m + V_{mc} + V_{cm} \quad (3)$$

1.2.1 V_T 的测定

采用精度为 0.1 mg 的电子天平准确称量在开路电位条件下的腐蚀磨损试验前后 TC4 钛合金试样的失重, 进而得到 TC4 钛合金的体积损失量.

1.2.2 V_m 的测定

采用阴极保护法测定 TC4 钛合金的纯磨损量, 阴极保护电位为 $-1\,000\text{ mV (SCE)}$, 此时腐蚀作用被抑制, 材料的损失可以看作单纯机械磨损失重, 进而得到 TC4 钛合金的体积损失量.

1.2.3 V_c 与 V_{mc} 的测定

采用电化学方法来测定 TC4 钛合金在静态腐蚀条件下以及摩擦过程中的腐蚀电流密度. 按照美国材料与试验协会制定的研究腐蚀和磨损交互作用的标准 ASTM G1119-04^[13], 根据实测塔菲尔极化曲线求得极化电站 R_p 以及阴极和阳极的极化率 b_a 和 b_c , 通过公式(4)计算腐蚀电流密度:

$$i_{\text{corr}} = \frac{b_a b_c}{2.3(b_a + b_c)R_p} \quad (4)$$

然后通过法拉第公式可以将腐蚀电流密度转化为腐蚀作用所产生的体积损失量 V_c 与 V_{mc} , 公式如下:

$$V_{\text{corr}} = \frac{i_{\text{corr}} t M}{n F \rho} \quad (5)$$

其中 t 为腐蚀磨损的持续时间, F 是法拉第常数 ($96\,500\text{ C/mol}$), ρ 是 TC4 钛合金的密度, M 是钛

合金的原子量, n 为 TC4 钛元素的化合价. 腐蚀对磨损的促进量 V_{cm} 不能直接测量出来,但是可以通过公式(3)计算得出.

1.3 试验条件

本试验的研究材料为 TC4 钛合金,其化学成份(质量分数计)为 6. 25% Al, 4. 21% V, 0. 22% Fe, 0. 19% O, 0. 0073% H, Ti 余量. TC4 钛合金加工为环形试样,其尺寸为外径 52 mm,内径 38 mm,高度 10 mm,其暴露在海水中的面积为 11. 5 cm². 为了避免在试验过程中异种金属接触可能产生的电位干扰以及电偶腐蚀,对偶材料选用不导电的氧化铝陶瓷(硬度为 HV 1800),氧化铝试样为圆柱形,其尺寸为 $\phi 4. 8\text{ m} \times 13\text{ m}$. 试验中的腐蚀溶液为按照 ASTM G1148-98 标准配置的人工海水^[14],配置海水的 pH 值用 0. 1 mol/L 的 NaOH 溶液调节至 8. 2.

腐蚀磨损试验在开路电位条件下进行,并且测量了其摩擦过程中的开路电位变化. 为了表征摩擦作用对 TC4 钛合金腐蚀速度的影响,测量了静态腐蚀以及摩擦过程中的极化曲线,扫描范围为 -1 ~ 1 V,扫描速率为 10 mV/s,并用公式(4)计算其腐蚀速度. 对 TC4 钛合金在阴极保护条件下的磨损量进行了测量,其保护电位为 -1 000 mV(SCE). 每次试验前后将下试样清洗干净,烘干并称重,取 3 次试验失重数据的平均值换算为体积磨损量,并用 JSM-5600LV 型扫描电子显微镜(SEM)观察钛合金试样的磨痕表面形貌.

2 结果与讨论

2.1 开路电位测量

图2所示为在海水环境下,TC4钛合金与氧化

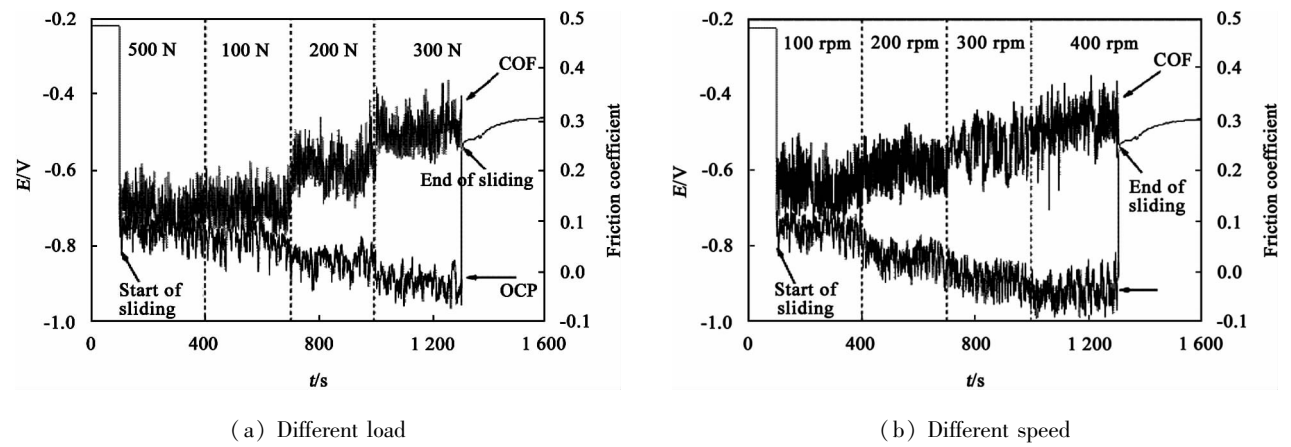


图 2 摩擦系数和开路电位随时间变化曲线

铝陶瓷对摩在不同载荷,转速固定为 100 r/min [图 2(a)]和不同转速,载荷固定为 50 N[图 2(b)]时的开路电位-时间以及摩擦系数-时间曲线. 由图 2 可以看出:未摩擦时,钛合金的电位稳定在 -0. 22 V 附近,摩擦刚一启动,TC4 钛合金的开路电位急剧下降;摩擦过程中,开路电位保持在低值并且有一定的波动;当摩擦结束时,开路电位开始升高. 在摩擦过程中,TC4 钛合金的开路电位随着载荷和转速的升高而明显降低. 在载荷固定为 50 N 时,TC4 钛合金的摩擦系数随着转速的升高而缓慢增加;在转速固定为 100 r/min 时,载荷不超过 100 N 时摩擦系数基本上不随载荷的变化而变化,而当超过 100 N 时,摩擦系数随着载荷的升高明显增加^[15].

TC4 钛合金在海水中具有优异的耐腐蚀性能是由于其表面存在致密的 TiO₂ 钝化膜,但当上下试样

产生摩擦时,表面的钝化膜受到连续的破坏,新鲜表面的产生促进了钛合金的腐蚀,从而导致开路电位急剧下降,摩擦过程中的电位变化实际上是 TC4 钛合金钝化膜破坏-修复的动态平衡过程的结果. 电位的下降是由于阳极区域流过的电流和阴极区域流过的电流要在某一电位位置达到平衡. 在同一载荷下,转速的增加能够导致上下试样滑动接触时间间隔的缩短,从而减少了钝化膜修复的时间,表面钝化膜的破坏严重,所以转速的增加使得开路电位下降的幅度增大. 在同一转速下,随着载荷的增加导致上下试样接触面塑性变形变得严重,从而增加了钝化膜破坏的程度,所以载荷的增加同样使得开路电位下降的幅度增大^[15].

2.2 极化曲线测量

在海水环境下,TC4 钛合金在静态以及摩擦过

程中(100 N,200 r/min)的极化曲线如图 3 所示.从图 3 中可以看出:摩擦作用使得 TC4 钛合金的自腐蚀电位负移,腐蚀倾向加大.在静态以及摩擦过程中 TC4 钛合金均具有明显的钝化现象,表明 TC4 钛合金在海水下钝化能力极强,在磨损过程中由于钝化膜的破坏而产生的新鲜表面能迅速复原.摩擦作用明显增加了钛合金的腐蚀电流密度,摩擦对腐蚀的促进作用非常显著.通过公式(4)对静态以及摩擦过程中的极化曲线处理求得的腐蚀电流密度 i_{corr} 以及腐蚀电位 E_{corr} 如表 1 所示.由表 1 可知静态腐蚀

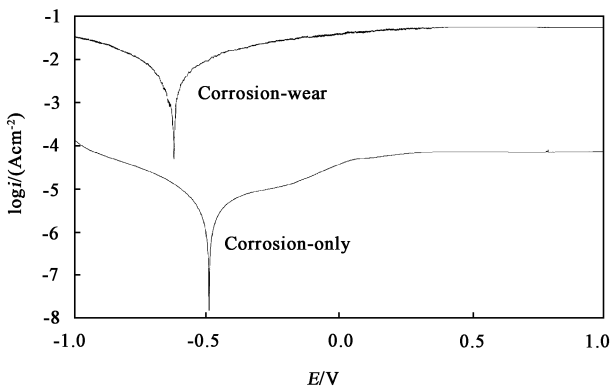


Fig. 3 The polarization curves under corrosion and corrosion – wear conditions
图 3 静态以及摩擦过程中的极化曲线

中 TC4 钛合金的电流密度仅为 $2.97\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$,表明静态下 TC4 钛合金具有优异的耐腐蚀性能,而在摩擦过程中 TC4 钛合金的腐蚀电流密度为 $2.44\sim 3.17\text{ mA}/\text{cm}^2$,提高了 3 个数量级,并且随着摩擦作

表 1 钛合金在静态以及摩擦过程中的 i_{corr} 和 E_{corr}

Table 1 The i_{corr} and E_{corr} values of TC4 titanium alloy under static corrosion and sliding conditions		
Condition	E_{corr}/V	$i_{\text{corr}}/(\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2})$
Static corrosion	-0.49	2.97×10^{-3}
50 N,100 r/min	-0.62	2.00
50 N,200 r/min	-0.63	2.69
100 N,100 r/min	-0.63	2.82
100 N,200 r/min	-0.65	3.17

用的增强(载荷和转速的增加),腐蚀电流密度缓慢增加.这表明摩擦作用明显提高了 TC4 钛合金的腐蚀速度,腐蚀磨损之间存在明显的交互作用^[15-16].

2.3 腐蚀磨损交互作用

通过上述相对应的试验方法得到腐蚀磨损过程中 V_{T} 、 V_{c} 、 V_{cm} 以及 V_{mc} 的结果,然后根据定量计算公式,计算出腐蚀磨损过程中的各个组份分量,进而得出各分量所占的比例,由于 TC4 钛合金在海水中静态下的腐蚀速度非常小, V_{c} 可以忽略不计,数据分析结果见表 2.从表 2 中可以看出,腐蚀磨损交互作用量占总腐蚀磨损量的比例 $\Delta V/V$ 为 $10.2\%\sim 34.1\%$,这说明在本试验工况条件下 TC4 钛合金的损耗 $10.2\%\sim 34.1\%$ 是由于海水的腐蚀磨损交互作用造成的,从而表明在海水环境下 TC4 钛合金的腐蚀与磨损的交互作用不可忽视.纯磨损量占总腐蚀磨损量的比例为 $65.9\%\sim 89.8\%$,这说明在腐蚀磨损过程中磨损作用明显大于腐蚀作用,表明力学因素是造成腐蚀磨损失重的主要因素.另外,随着摩

表 2 腐蚀磨损过程中各组成部分以及所占的比例

Table 2 The components and the proportions of material loss in corrosion wear process							
Condition	V/mm^3	V_{m}/mm^3	$V_{\text{mc}}/\text{mm}^3$	$V_{\text{cm}}/\text{mm}^3$	$\Delta V/\text{mm}^3$	$\Delta V: V/\%$	$V_{\text{m}}: V/\%$
50 N,100 r/min	14.4	9.51	1.76	3.13	5.89	34.1	65.9
50 N,200 r/min	30.8	24.3	1.94	4.56	6.50	20.8	79.2
100 N,100 r/min	37.3	31.33	2.03	3.94	5.97	16.1	83.9
100 N,200 r/min	75.5	67.4	2.28	5.82	8.10	10.2	89.8

擦作用的增强(载荷和转速的增加),交互作用量减小,这表明腐蚀磨损交互作用在低载荷低转速下尤其明显^[16-19].

图 4 显示了腐蚀磨损过程中各分量组成部分以及所占的比例.从图 4 中可以看出:虽然摩擦极大地提高了 TC4 钛合金的腐蚀速度,但是摩擦对腐蚀的促进作用 V_{mc} 占总腐蚀磨损的比例 V_{mc}/V 仅有 $3.1\%\sim 12.2\%$,并且随着摩擦作用的增强而减小.

腐蚀对磨损同样产生了明显地促进作用,其促进量占总腐蚀磨损的比例 V_{cm}/V 为 $7.1\%\sim 21.9\%$,这说明腐蚀介质促进了 TC4 钛合金的脱落,同样 V_{cm}/V 随着摩擦作用的增强而减小^[20-22].

磨损对腐蚀的促进作用可以归结为:摩擦作用使得 TC4 钛合金表面产生塑性变形,并导致局部变形区域位错、空位、晶面等缺陷的密度急剧增大,残留内应力聚集,该区域具有高的腐蚀活性,形成微观

“应变差异电池”,同时摩擦过程中的搅拌作用促进了阴极反应过程,促进腐蚀的进行,在摩擦表面产生了局部小孔腐蚀,使得摩擦过程中的腐蚀电流急剧增大.图 5(a)中清晰可见 TC4 钛合金磨痕表面的腐蚀坑.腐蚀对磨损的促进作用归结如下:腐蚀磨损过

程中磨屑的产生可视为低周疲劳脱落过程,疲劳过程导致磨痕表面形成裂纹[图 5(b)],裂纹尖端附近的位错和空位等缺陷导致裂纹处具有高的腐蚀活性,海水的腐蚀作用加速了裂纹的扩展和繁殖,从而加速了钛合金磨屑的脱落^[23-26].

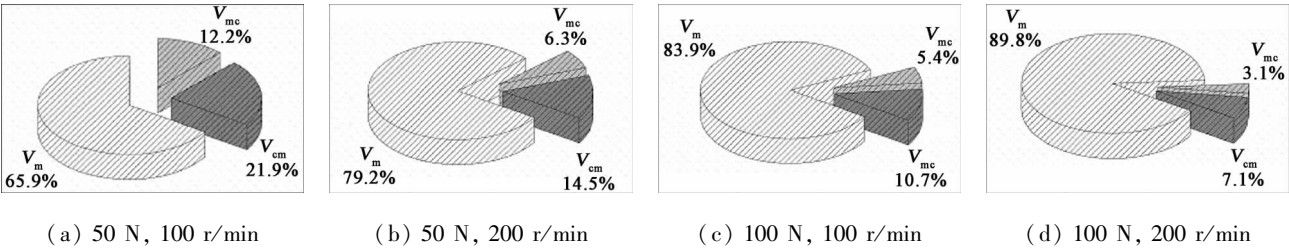


Fig. 4 The proportion of different components in corrosion – wear process
图 4 腐蚀磨损过程中各组成部分以及所占的比例

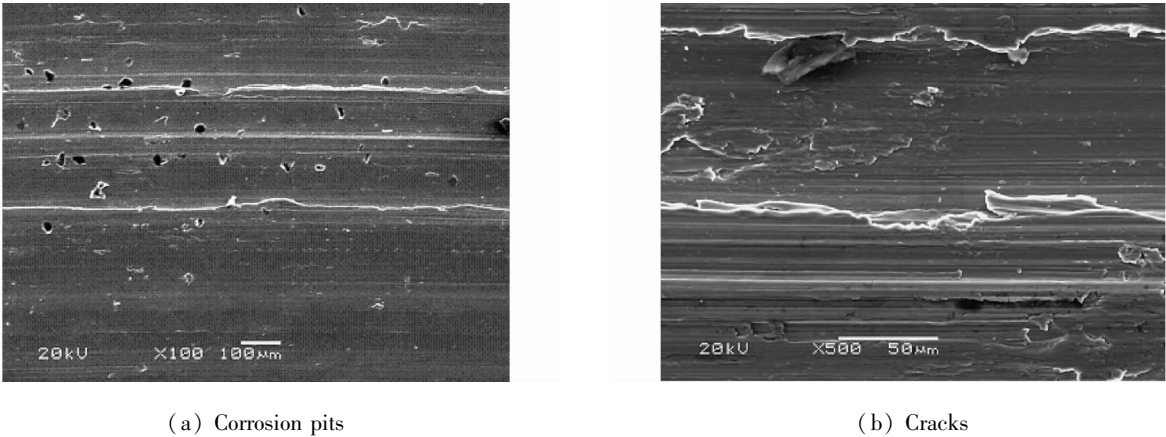


Fig. 5 SEM micrographs of the worn surfaces of TC4 alloy
图 5 钛合金磨损表面 SEM 照片

3 结论

- a. 在人工海水中 TC4 钛合金腐蚀磨损时开路电位降低,腐蚀电流密度大幅增加.
- b. 在本试验工况条件下,腐蚀磨损交互作用量占总腐蚀磨损量的比例 $\Delta V/V$ 为 10.2% ~ 34.1%,腐蚀磨损交互作用不可忽视.
- c. 摩擦对腐蚀的促进作用 V_{mc} 占总腐蚀磨损的比例 V_{mc}/V 仅有 3.1% ~ 12.2%,并且随着摩擦作用的增强而减小. 腐蚀对磨损也产生了明显地促进作用,其促进量占总腐蚀磨损量的比例 V_{cm}/V 为 7.1% ~ 21.9%,同样随着摩擦作用的增强而减小.

参考文献:

[1] Wood R J K. Erosion – corrosion interactions and their effect on marine and offshore materials[J]. Wear,2006,261(9):1 012 – 1 023.

[2] Bertol L S, Júnior W K, Silva F P D, *et al.* Medical design: Direct metal laser sintering of Ti – 6Al – 4V [J]. Materials & Design,2010,31(8):3 982 – 3 988.

[3] Güleriyüz H imenoglu H. Effect of thermal oxidation on corrosion and corrosion – wear behaviour of a Ti – 6Al – 4V alloy [J]. Biomaterials,2004,25(16):3 325 – 3 333.

[4] Li Y, Qu L,Wang F. The electrochemical corrosion behavior of TiN and (Ti, Al) N coatings in acid and salt solution [J]. Corrosion Science,2003,45(7):1 367 – 1 381.

[5] Liu Y, Yang D Z, He S Y, *et al.* Study on dry sliding wear of TC4 alloy in vacuum[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005,34(1):128 – 131.

[6] Tamilselvi S, Raman V, Rajendran N. Corrosion behaviour of Ti – 6Al – 7Nb and Ti – 6Al – 4V ELI alloys in the simulated body fluid solution by electrochemical impedance spectroscopy [J]. Electrochimica Acta,2006,52(3):839 – 846.

[7] Zaveri N, Mahapatra M, Deceuster A, *et al.* Corrosion resistance of pulsed laser – treated Ti – 6Al – 4V implant in

- simulated biofluids [J]. *Electrochimica Acta*, 2008, 53 (15): 5 022 – 5 032.
- [8] Hsu R W – W, Yang C – C, Huang C – A, *et al.* Investigation on the corrosion behavior of Ti – 6Al – 4V implant alloy by electrochemical techniques [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2004, 86(2 – 3): 269 – 278.
- [9] Henry P, Takadoum J, Bercot P. Tribocorrosion of 316L stainless steel and TA6V4 alloy in H₂SO₄ media [J]. *Corrosion Science*, 2009, 51(6): 1 308 – 1 314.
- [10] 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.
- [11] Wharton M H, Waterhouse R B. Environmental effects in the fretting fatigue of Ti – 6Al – 4V [J]. *Wear*, 1980, 62(2): 287 – 297.
- [12] Serre I, Celati N, Pradeilles – Duval R M. Tribological and corrosion wear of graphite ring against Ti6Al4V disk in artificial sea water [J]. *Wear*, 2002, 252(9 – 10): 711 – 718.
- [13] Watson S W, Friedersdorf F J, Madsen B W, *et al.* Methods of measuring wear – corrosion synergism [J]. *Wear*, 1995, 181 – 183(Part 2): 476 – 484.
- [14] Chen J, Wang J Z, Chen B B, *et al.* Tribocorrosion behaviors of inconel 625 alloy sliding against 316 steel in seawater [J]. *Tribology Transactions*, 2011, 54(4): 514 – 522.
- [15] Sun Y, Rana V. Tribocorrosion behaviour of AISI 304 stainless steel in 0.5 M NaCl solution [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2011, 129(1 – 2): 138 – 147.
- [16] Landolt D, Mischler S, Stemp M. Electrochemical methods in tribocorrosion: a critical appraisal [J]. *Electrochimica Acta*, 2001, 46(24 – 25): 3 913 – 3 929.
- [17] Ding H Y, Dai Z D. Corrosion wear characteristic of TC11 alloy in artificial seawater [J]. *Tribology*, 2008, 28(2): 140 – 144 (in Chinese) [丁红燕, 戴振东. TC11 钛合金在人造海水中的腐蚀磨损特性研究 [J]. *摩擦学学报*, 2008, 28(2): 140 – 144].
- [18] Li Q N, Jiang Y H, Lu D H, *et al.* Effect of impact energy on the corrosion wear of high manganese steel [J]. *Tribology*, 2009, 29(1): 75 – 80 (in Chinese) [黎清宁, 蒋业华, 卢德宏. 湿磨工况下冲击功对高锰钢腐蚀磨损交互作用的影响 [J]. *摩擦学学报*, 2009, 29(1): 75 – 80].
- [19] Yang Y S, Qu J X, Shao H S. The interaction of corrosive wear of two metallic materials [J]. *Tribology*, 1996, 16(1): 47 – 53 (in Chinese) [杨院生, 曲敬信, 邵荷生. 两种金属材料腐蚀磨损的交互作用 [J]. *摩擦学学报*, 1996, 16(1): 47 – 53].
- [20] Shen Y, Zhang D K, Wang S Q, *et al.* Fretting behaviors of steel wires as hoisting ropes for coal mine in corrosive media [J]. *Tribology*, 2011, 31(1): 66 – 67 (in Chinese) [沈燕, 张德坤, 王崧全. 矿用钢丝绳在腐蚀介质环境下的微动行为研究 [J]. *摩擦学学报*, 2011, 31(1): 66 – 71].
- [21] Wu H R, Bi Q L, Yang J, *et al.* Tribological performance of tin – based white metal ZChSnSb 8 – 8 under simulated water environment [J]. *Tribology*, 2011, 31(3): 271 – 277 (in Chinese) [吴海荣, 毕秦岭, 杨军, 等. 巴氏合金 ZChSnSb 8 – 8 海水环境下的摩擦学行为研究 [J]. *摩擦学学报*, 2011(3): 271 – 277].
- [22] Li J W. Fretting corrosion property of Zr – 4 alloy in Na₂SO₄ solution [J]. *Tribology*, 2007, 27(5): 406 – 410 (in Chinese) [李积武. Zr – 4 合金在 Na₂SO₄ 溶液中的微动腐蚀磨损特性 [J]. *摩擦学学报*, 2007, 27(5): 406 – 410].
- [23] Zheng J, Yu H Y, Zhou Z R. Comparative study of the three – body abrasive wear behavior of natural human teeth and plastic teeth [J]. *Tribology*, 2004, 24(6): 568 – 571 (in Chinese) [郑靖, 于海洋, 周仲荣. 天然牙和树脂牙体外三体磨粒磨损性能研究 [J]. *摩擦学学报*, 2004, 24(6): 568 – 571].
- [24] Bi H Y, Li S Z, Xia J T. The Effect of deformation strengthening on wear resistance of stainless steel in dry sliding and corrosive environment [J]. *Tribology*, 2004, 24(6): 568 – 571 (in Chinese) [毕红运, 李诗卓, 姜晓霞. 不锈钢腐蚀磨损过程中形变强化能力的研究 [J]. *摩擦学学报*, 1998, 18(4): 327 – 331].
- [25] Lu X C, Li S Z, Jiang X X, *et al.* Effect of polarization potential on corrosive wear and friction behavior of a duplex stainless steel in sulfuric acid solution [J]. *Tribology*, 1996, 16(2): 105 – 111 (in Chinese) [路新春, 李诗卓, 姜晓霞, 等. 外加极化电位对双相不锈钢在硫酸介质中腐蚀磨损行为及摩擦性能的影响 [J]. *摩擦学学报*, 1996, 16(2): 105 – 111].
- [26] Du X D, Ding H F, Wu K, *et al.* Effect of carbon content on impact wear resistance of low carbon high alloy steel in corrosive condition [J]. *Tribology*, 2006, 26(6): 535 – 540 (in Chinese) [杜晓东, 丁厚福, 吴凯, 等. 碳含量对腐蚀条件下低碳高合金钢冲击磨损性能的影响 [J]. *摩擦学学报*, 2006, 26(6): 535 – 540].