TC4 合金在不同环境介质中微动磨损行为研究

宋 伟，尘 强，俞树荣，何燕妮，景鹏飞

(兰州理工大学，甘肃 兰州 730050)

摘 要：采用 SRV-IV 微动磨损试验台，研究 TC4 钛合金在空气和纯水介质中不同位移幅值下的微动磨损行为及其在模拟海水中的微动腐蚀特性，利用扫描电子显微镜和激光共聚焦显微镜分别对磨痕表面形貌、磨损体积及磨痕轮廓进行表征，分析了钛合金在不同环境介质中的微动磨损机制。结果表明：摩擦系数随位移幅值的增大呈现出先增大后减小的趋势，磨损体积随位移幅值的增大而增大；干摩擦条件下，摩擦系数较高且波动剧烈，磨损体积较小，磨损机制主要为磨粒磨损、粘着磨损并伴有氧化磨损；与干摩擦相比，水介质中的摩擦系数较低，磨损体积显著增大，且模拟海水中的摩擦系数更低更稳定，磨损轮廓更深，说明腐蚀与磨损之间存在“正”交互作用；TC4 合金在纯水介质中的微动磨损机制主要为疲劳磨损和磨粒磨损，而在模拟海水中的微动磨损机制主要为磨粒磨损和腐蚀磨损。

关键词：TC4 钛合金；微动磨损；环境介质；位移幅值

中图法分类号：TG146.23; TH117.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1002-185X(2020)07-2393-07

微动是指摩擦副接触表面间发生极小振幅的相对运动，其振幅一般为微米量级，通常存在于一个振动工况（如疲劳载荷）下的“近似紧固”的机械配合件之中[1-4]。机械配合件间长期微动会造成微动损伤，这种损伤形式具有隐蔽性、复杂性，广泛存在于航空、船舶、化工等领域[5,6]。微动损伤可以使构件萌生疲劳裂纹并加速裂纹扩展，显著降低配合件的服役寿命，已成为关键零部件失效的主要原因之一[1,7]。

钛及钛合金具有密度小、比强度高、耐蚀性强、机械加工及可焊性好等优异性能，在航空航天、海洋装备和石油化工等领域得到越来越广泛的应用[8,9]。然而，钛及其合金硬度低、耐磨性差，对微动损伤极为敏感，给钛制装备的安全使用带来诸多挑战；尤其是应用于海洋环境中的钛制装备极易发生微动损伤，此时，力学、化学、电化学因素共同存在并相互影响，使装备提前失效[10-14]。丁红燕[15,16]等人研究了 TC11 合金在水介质中的微动磨损特性，发现钛合金在水介质中形成的表面膜可以降低其摩擦系数，在小振幅时微动磨损机制主要为疲劳脱层伴有磨粒磨损，在大振幅下磨损机制为磨粒磨损；陈君[12,17,18]等人研究了 TC4 钛合金在海水环境下的微动腐蚀性能，发现腐蚀促进磨损，磨损促进腐蚀，腐蚀磨损交互作用不可忽视；俞树荣[19,20]等人研究了在不同环境介质中配副材料对 TC4 合金微动行为的影响，指出在微动过程中纯水只有润滑作用，而氯化钠溶液中还存在腐蚀与磨损的交互作用，同时指出在腐蚀介质中 GCr15/TC4 的耐磨性优于 Si_3N_4/TC4。由于影响微动磨损行为的因素较多，诸多学者针对一种或多种因素进行了一系列的研究，但并未形成完整的理论体系。鉴于此，本研究选用海洋装备最常用的 TC4 合金，分别在空气、纯水和模拟海水环境中进行微动磨损试验，了解钛合金在不同环境介质中微动磨损行为的特点，分析磨损机制，以期为钛合金在涉海装备领域的应用提供理论数据支持。

1 实 验

微动实验在 SRV-IV 微动摩擦磨损试验机（德国 Optimol 公司生产）上完成，其工作区结构示意图如图 1 所示，上下摩擦副采用球—平面接触方式，切向式微动运行模式。上试样为 Φ10 mm 的 GCr15 钢球（硬度 HV 约 6800 MPa），表面粗糙度小于 0.02 μm；下试样采用尺寸为 Φ24 mm×7.8 mm 的 TC4 钛合金（硬度 HV 约 3000 MPa），用 SiC 砂纸对其进行逐级打磨，随后用粒度为 0.04 μm 的 SiO_2 抛光液进行机械抛光，表面粗糙度 R_a 为 0.03～0.04 μm。依次用丙酮和无水乙醇将上、下试样进行超声清洗，除去材料表面的油脂和污染物，干燥备用。上下试样材料的化学成分如表 1 所示。

试验分别在空气、纯水、模拟海水(3.5%NaCl 溶液，质量分数，下同)中进行，设置载荷为 100 N，频率为 50 Hz，位移幅值分别为 100、125 和 150 μm，试

收稿日期：2019-07-20

基金项目：国家自然科学基金 (51275225)

作者简介：宋 伟，男，1979 年生，博士生，讲师，兰州理工大学石油化工学院，甘肃 兰州 730050，电话：0931-2973728，E-mail: songwei@lut.edu.cn

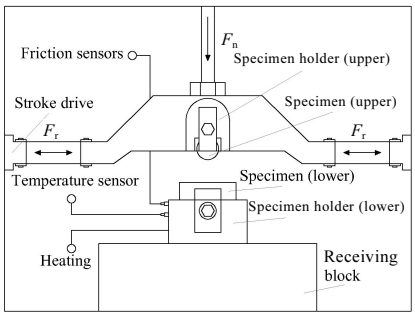


图 1　微动磨损试验机结构示意图

Fig.1　Schematic of the fretting wear test rig

表 1　TC4 合金、GCr15 轴承钢的化学成分

Table 1　Chemical composition of TC4 and GCr15 (*ω*/%)

TC4	Ti	Al	V	O	Fe	N
	Bal.	6.5	4.3	0.08	0.06	0.01
GCr15	Fe	Cr	C	Mn	Si	Mo
	Bal.	1.6	1.0	0.3	0.3	0.08

验时间为 30 min，试验温度 25 ℃。试验前用腐蚀剂（氢氟酸:硝酸:蒸馏水=1:3:16）对 TC4 合金进行擦拭腐蚀，腐蚀时间约为 20 s，用清水和无水乙醇清洗吹干后备用，其微观组织结构如图 2 所示。安装试样时用无水乙醇棉球对上下试样擦拭，保证接触面清洁。每隔 5 min 将溶液介质用注射器注射到接触区，以保证接触区完全被溶液介质封闭。试验完成后，用丙酮和无水乙醇超声清洗试样，采用 QUANTA FEG 450 场发射扫描电子显微镜（SEM）观察磨损表面微观形貌并用能谱（EDS）仪分析磨损表面的元素分布，采用 OLYMPUS OLS 5000 3D 测量激光显微镜测量磨损体积和磨痕轮廓。在室温条件下，采用电化学工作站测量 TC4 基体、微动磨损试样及微动腐蚀试样的动电位极化曲线，试验采用标准三电极体系，参比电极为饱和甘汞电极，辅助电极为 Pt 片，电解液为 3.5% NaCl 溶液。

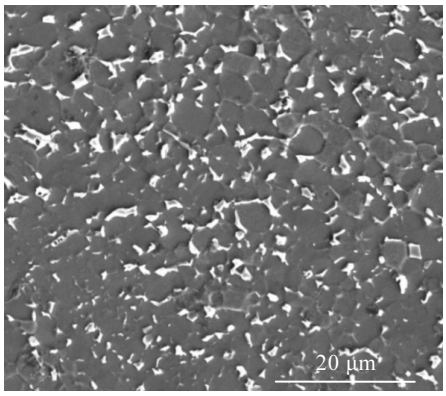


图 2　TC4 合金微观结构

Fig.2　Microstructure of TC4 alloy

2　结果与讨论

2.1　摩擦系数分析

图 3a 为 TC4 合金在相同位移幅值(D=125 μm)下、不同环境介质中摩擦系数随时间的变化曲线。摩擦系数曲线大致可分为 3 个阶段：快速上升期、剧烈波动期和稳定期。模拟海水中，TC4 合金在 600 s 时达到稳定磨损状态；空气和纯水中的摩擦系数一直大幅波动，约 1500 s 时基本稳定。起始阶段，TC4 合金表面的氧化膜或污染膜起到一定减摩作用，摩擦系数较小；经过数个微动循环，表面膜受剪切和挤压作用而破坏，新鲜金属露出，表面凹凸不平，上下试样真实接触面积小，接触应力较大，使材料发生局部塑性变形[21]，接触点处发生“焊合”，粘着倾向增大，摩擦系数增大；当摩擦系数达到极大值后突然降低，此时粘着点被剪切断裂，接触区发生材料的转移；塑性变形—粘着—粘着断裂—再粘着过程反复出现，摩擦系数一直处于波动状态，呈现出类似于锯齿的形状。随着磨屑的不断累积，磨痕表面形成具有阻隔作用的第三体层，摩擦系数相对稳定。

图 3b 为 TC4 合金在不同环境介质中平均摩擦系数随位移幅值的变化曲线。GCr15/TC4 平均摩擦系数随位移幅值的增大呈现先上升后下降的趋势。位移幅值较小时，微动接触区面积小，磨屑不能及时排出而堆积在接触区，阻隔了对磨件的直接接触，摩擦系数较小；随着位移的增大，接触面重叠区变大，磨屑被推出接触区，金属与金属直接接触，摩擦系数变大；位移幅值较大时，微动过程中产生更多摩擦热，促进了接触区氧化膜的形成，氧化膜的剪切强度比金属低，使摩擦系数下降。

与空气中相比，水溶液介质中的摩擦系数明显降低，且纯水中的摩擦系数比模拟海水中的大。这是因为水溶液可以在接触区形成具有润滑作用的水膜，减少了粘着的发生，同时使磨粒磨损更为流畅[22]，从而降低了摩擦系数；在水溶液中，微动产生的磨屑颗粒更容易脱离接触区，有助于摩擦系数的降低。模拟海水中的氯活性成分易与对磨材料中的铁生成氯化铁软质易剪切的表面膜，由于外载荷的作用，表面膜在磨损表面铺展而形成完整的润滑膜，起到润滑和阻隔作用[15,23]。两接触表面不是严格的镜面，溶液介质会在凸起的地方形成边界润滑，在凹陷的地方形成流体润滑[19]，并且总的摩擦力由微凸体和液体膜层共同承担，摩擦系数较低。随着微动过程的进行，润滑膜和钝化膜逐渐遭到破坏，接触区产生大量磨屑，未随溶液介质溢出接触区的磨屑加剧了磨粒磨损，使摩擦系数略有上升。

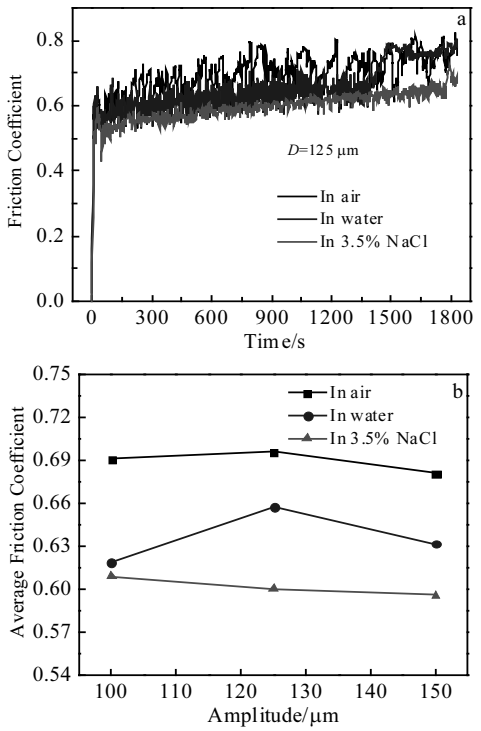


图 3　TC4 合金在不同环境介质中的摩擦系数随时间的变化曲线和平均摩擦系数随位移幅值的变化曲线

Fig3　Friction coefficient as a function of time (a) and average friction coefficient as a function of displacement amplitude (b) of TC4 alloy in different environmental media

2.2　磨损特性分析

以磨损体积和磨损率为衡量 TC4 合金耐磨性能的指标。磨损率 K 可由（1）式得到。

$$K = \frac{V}{NDF} \tag{1}$$

式中：V 为磨损体积（μm^3），由 OLYMPUS OLS 5000 3D 测量激光显微镜直接测得；N 为循环次数；D 为位移幅值（μm）；F 为载荷（N）；K 为磨损率（$\mu m^3/N{\cdot}\mu m$）。

图 4a、4b 分别是 TC4 合金在不同环境介质中磨损体积、磨损率随位移幅值的变化曲线。由图 4 可知，在任一环境介质中，磨损体积随位移幅值的增加而增大，而磨损率随位移幅值的增大而减小；在相同运动参数下，水溶液介质中的磨损率明显大约空气中的磨损率，且模拟海水中的磨损率比纯水中的大。例如，位移幅值为 125 μm 时，模拟海水中的磨损率约为空气中的 4.91 倍，纯水中的 1.14 倍。

位移幅值较小时，微动接触区的面积比较小，产生的磨屑不能及时排出接触区，形成具有阻隔垫作用的第三体层，材料流失相对较少；位移幅值较大时，微动过程中重叠区域增多，接触区面积增大，磨屑被排出接触区域相对容易，使得摩擦配副处于直接接触状态，材料损失更为严重。水溶液的存在易将磨屑冲走，磨损表面难以形成第三体层，在交变载荷的作用下，残留的不规则片层材料被压入摩擦面，使表面产生沿微动方向的犁沟，造成严重的材料损失；GCr15/TC4 配副在水溶液介质的冷却、润滑作用下两接触面间易发生相对滑移，真实相对滑移距离增大[22]，磨痕更深、更宽，磨损体积更大。

图 5 为 TC4 合金在不同环境介质中三维磨损形貌和二维轮廓曲线。在空气中磨痕中心的轮廓曲线呈“W”形，而在水溶液介质中均呈“U”形，不同线型的磨痕轮廓曲线说明环境介质对微动磨损机制有较大影响。一方面，微动过程中产生的摩擦热促进接触区氧化反应进行，加速氧化膜的形成；另一方面，Cl^- 具有极强的渗透性，可以从氧化膜的缺陷处深入内部，使组成膜的氧化物变成可溶性盐，造成氧化膜的破坏[24]；氧化膜形成—破坏的过程不断重复，加剧了材料的流失。

2.3　腐蚀特性分析

图 6 为 TC4 合金微动磨损试样、微动腐蚀试样及其基体在 3.5% NaCl 溶液中的动电位极化曲线。由图

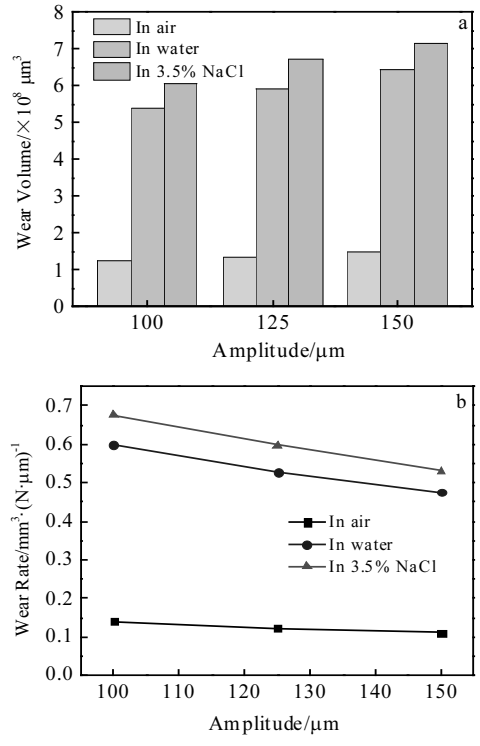


图 4　环境介质对 TC4 合金磨损性能的影响

Fig.4　Effect of environmental medium on wear resistance of TC4 alloy: (a) wear volume and (b) wear rate

可知，在阴极极化区，3 种试样的极化曲线基本一致；在阳极极化区，3 种试样均出现钝化现象；当电压达到 0 V 后，试样表面的钝化膜均被击穿，试样发生腐蚀；微动腐蚀试样的阳极极化曲线变的不光滑，在较低的电流密度下率先发生腐蚀。与基体相比，微动腐蚀和微动磨损试样的自腐蚀电位均出现不同程度的负移，说明微动作用加剧了试样的腐蚀倾向；结合表 2 中的数据可知，微动腐蚀和微动磨损试样的自腐蚀电流密度均有大幅提升，微动腐蚀试样的自腐蚀电流密度最大，其发生腐蚀时的腐蚀速率也最大。由此可知，微动磨损和微动腐蚀均使合金的耐蚀性降低。

TC4 合金是一种极易钝化的金属，在 NaCl 溶液中易形成致密的钝化膜，使其表现出优良的耐蚀性，但当钝化态被破坏时，易发生点蚀和缝隙腐蚀等局部腐蚀；GCr15 是一种高碳钢，耐腐蚀性差，在 NaCl 溶液中的自腐蚀电位较低，与钛合金接触时易发生电偶腐蚀，此时钛合金作为阴极，有助于减少钛合金的腐蚀。但钛合金的耐磨性较差，钝化膜易被破坏，当钝化膜被机械作用破坏后，暴露在电解质溶液中新鲜金属的面积增大，同时由微动引起的循环载荷会使表层发生塑性变形、增加位错缺陷甚至诱发微裂纹，使之处于高度无序状态，材料表面活性增大，化学反应更容易进行，材料溶解加速[25]。腐蚀会破坏晶界的完整性，降低晶粒间结合强度，使材料表面疏松多孔，在机械作用下易被磨掉而增加材料损失。这解释了在相同条件下，模拟海水中的磨损率明显比空气、纯水中的高，见图 4b。腐蚀与磨损共同存在时，同时发生，相互促进，二者之间存在复杂的“正”交互作用。

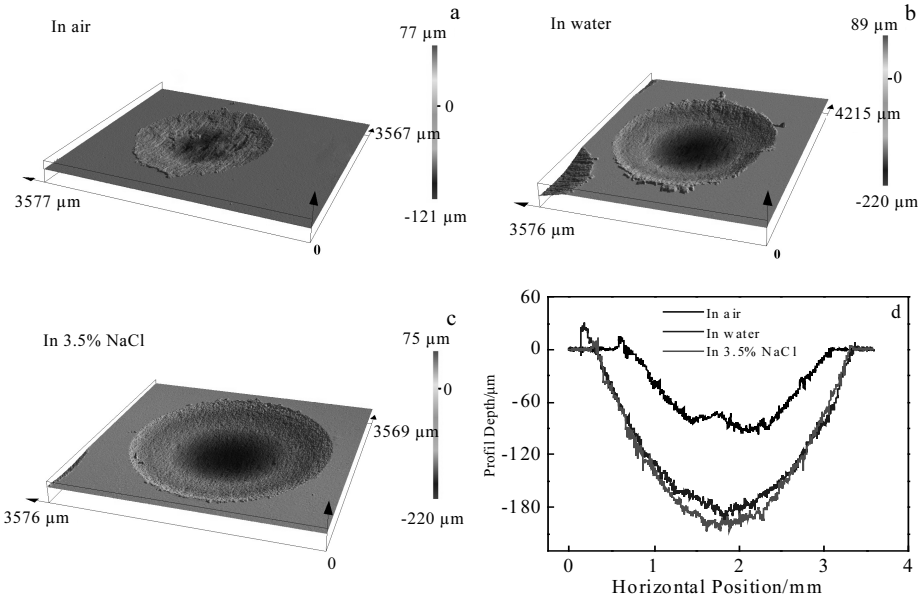


图 5　TC4 合金在空气、纯水、3.5% NaCl 溶液中的磨痕三维形貌和二维轮廓曲线

Fig.5　3D profiles (a~c) and 2D profiles (d) of wear scars on TC4 alloy in air, water, 3.5% NaCl solution

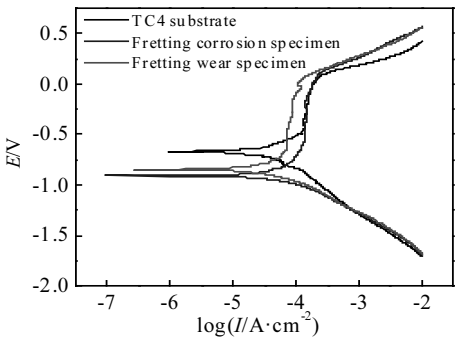


图 6　不同试样在 3.5% NaCl 溶液中的极化曲线

Fig.6　Polarization curves of different samples in 3.5% NaCl solution

表 2　不同试样在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀电位、腐蚀电流

Table 2　Corrosion potential and corrosion current of different samples in 3.5% NaCl solution

Sample	E/V	I_{corr}/×10^{-6} A·cm^{-2}
TC4 substrate	-0.670	4.375
Fretting corrosion specimen	-0.847	7.852
Fretting wear specimen	-0.909	6.561

2.4　磨损形貌及磨损机制分析

图 7 为 TC4 合金在不同环境介质中的表面微观形貌。从整体上看，同一位移幅值下，GCr15/TC4 配副在不同环境介质中的微动形貌完整，轮廓清晰，见图 7a、7d、7g。在空气和纯水介质中，磨痕中心可见垂直微动方向的黑色压实区，且空气介质中压实区的面

积比纯水介质中的大，在 3.5% NaCl 溶液介质中，磨痕中心未发现压实区。空气介质中的磨损表面散布大量细小的磨屑，见图 7b，而在水溶液环境下的磨损表面散布的磨屑较少，见图 7e、7f，可能是因为微动过程中产生的磨屑会弥散在水溶液中，未能附着在磨损表面或经超声清洗后被去除；3 种环境介质中，磨损表面均有沿微动方向的犁沟分布，边缘尤其明显，同时在磨损斑外围可见因上试样推挤而造成的材料堆积，这是典型的磨粒磨损特征。

由于试验系统刚度问题，真实的位移幅值会小于设定值[26]，弹性变形增大，有利于粘着的发生；随着平整的表面被破坏，接触区变的高低不平，局部接触应力变大，使摩擦表面发生粘着撕脱，形成小的剥落坑，见图 7b；脱落的材料在后续的微动过程中充当磨粒，在摩擦表面留下沿微动方向的尺寸各异的犁沟；在对磨球的反复挤压下，接触区发生严重的塑性变形，出现层状舌形楔，见图 7c。

在纯水介质中，材料表面可见深浅不一的豆状凹坑、鳞片状的材料脱落和不规则的犁削痕迹，见图 7e、7f，这是因为在切向载荷的作用下，TC4 合金内部拉应力和压应力一直处于快速交替状态，材料表面及亚表面均萌生疲劳裂纹，随循环次数的不断增加，表面裂纹与亚表面裂纹相交汇，造成材料表面出现点蚀和层状剥落。在模拟海水中形成的微动斑更大更圆，表面主要为分布不均，长宽各异的犁沟，见图 7h、7i。经 EDS 能谱分析发现表面主要含有 Ti、Al、V、Fe、Cl 等元素，见图 8，说明磨损表面含有腐蚀产物，TC4 合金在模拟海水中发生了腐蚀。

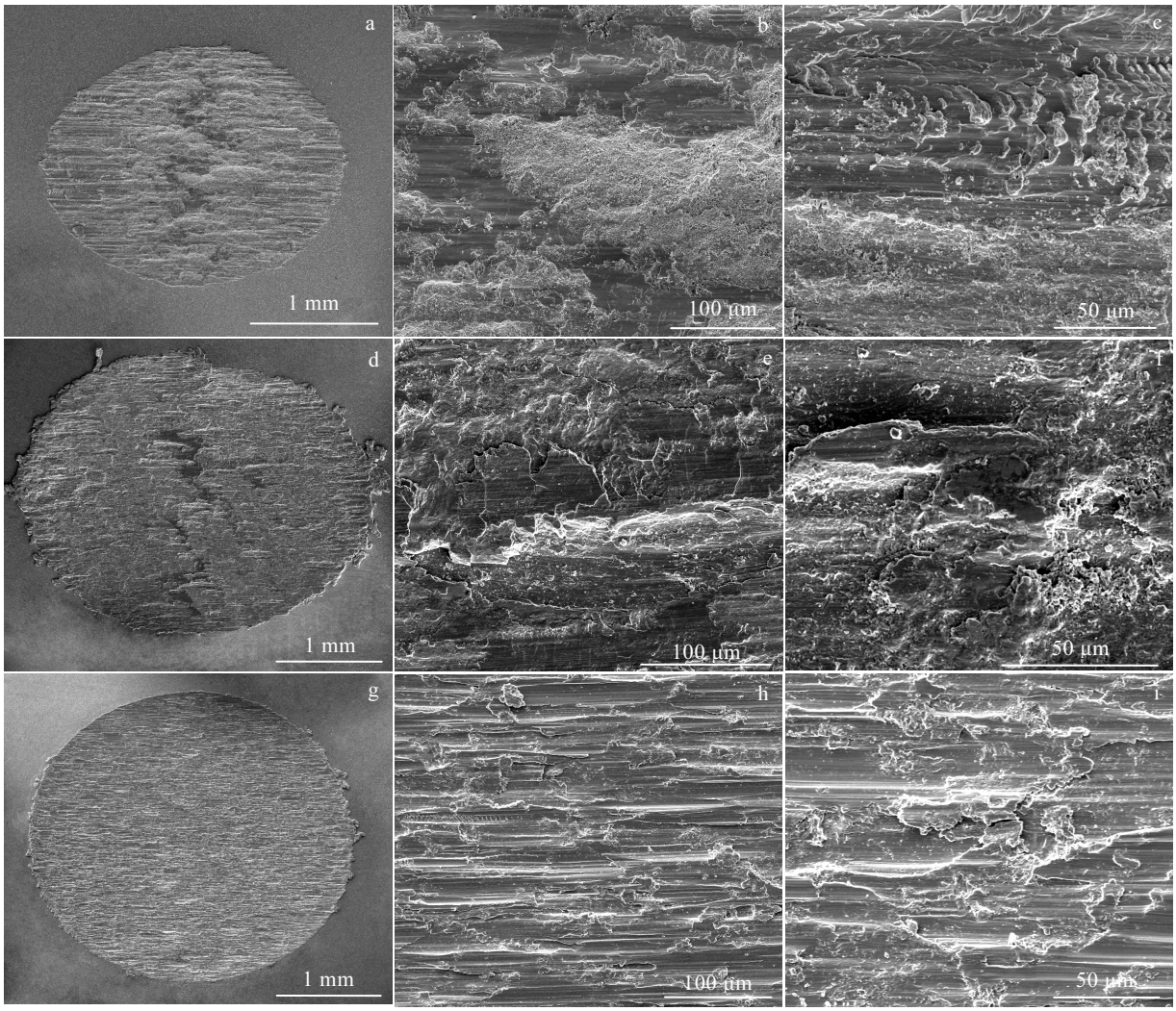


图 7　TC4 合金在不同环境介质中的表面微观形貌

Fig.7　Surface morphologies of TC4 alloy in different environmental media (F=100 N, D=125 μm): (a~c) air; (d~f) water; (g~i) 3.5% NaCl solution

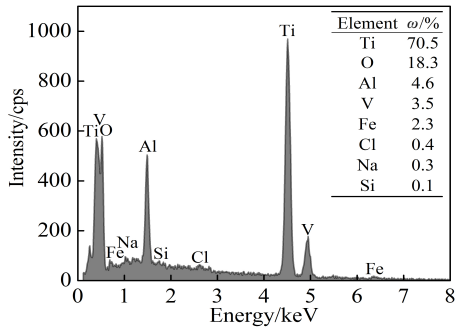


图 8　3.5% NaCl 溶液中 TC4 合金表面 EDS 能谱分析

Fig 8　EDS analysis of TC4 alloy surface in 3.5% NaCl solution

3　结　论

1) 在任一环境介质中，GCr15/TC4 配副的摩擦系数随位移幅值的增大呈现出先增大后减小的趋势，磨损体积随位移幅值的增大而增大，而磨损率随之减小。

2) 在干摩擦条件下，摩擦系数波动较大，磨损体积较小，磨损轮廓较浅，磨损机制主要为磨粒磨损、粘着磨损并伴有氧化磨损。

3) 在纯水介质中，由于水介质的润滑与冷却作用，抑制了粘着磨损的发生，摩擦系数显著下降；水介质存在有助于磨粒磨损的发生，磨损体积显著增大，磨损轮廓较深；磨损机制主要为磨粒磨损和疲劳磨损。

4) 在模拟海水中，溶液中的 Cl^-在摩擦过程中形成润滑膜使其具有比纯水更优异的润滑性能，摩擦系数进一步减小；在机械和 Cl^-渗透的共同作下用，材料流失加剧，与纯水相比磨损体积进一步增大，磨损与腐蚀间体现出复杂的“正”交互作用；磨损机制主要为磨粒磨损和腐蚀磨损。

参考文献　　References

[1] Zhou Zhongrong(周仲荣), Leo Vincent. *Fretting Wear*(微动磨损)[M]. Beijing: Science Press, 2002

[2] Zheng J F, Luo J, Mo J L *et al*. *Tribology International*[J], 2010, 43(5): 906

[3] Fan Na(范　娜), Wang Yunxia(王云霞), Wang Qiufeng(王秋凤) *et al*. *Tribology*(摩擦学学报)[J], 2016, 36(5): 555

[4] Kirk A M , Shipway P H , Sun W *et al*. *Wear*[J], 2019, 426-427: 694

[5] Tang C B, Liu D X, Tang B *et al. Applied Surface Science*[J], 2016, 390: 946

[6]Yang Q, Zhou W L, Niu Z Q *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2018, 349: 1098

[7] Shen F, Hu W, Voyiadjis G Z *et al*. *Wear*[J], 2015, 338-339: 394

[8] Chang Hui(常　辉), Liao Zhiqian(廖志谦), Wang Xiangdong (王向东). *Titanium Alloys for Marine Applications*(海洋工程钛金属材料)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017

[9] Mao Y S, Wang L, Chen K M *et al*. *Wear*[J], 2013, 297(1-2): 1032

[10] Barril S, Mischler S, Landolt D. *Wear*[J], 2005, 259(1): 282

[11] He Qian(何　倩), Sun Deen (孙德恩), Zeng Xianguang(曾宪光). *China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2018, 31(1): 74

[12] Chen J, Zhang Q. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2016, 26(4): 1011

[13] He Yafeng(何亚峰), Lu Wenzhuang(卢文壮), Gan Weimin (干为民). *Journal of South China University of Technology, Natural Science Edition*(华南理工大学学报，自然科学版)[J], 2017(6): 124

[14] Wang Linqing(王林青), Zhou Yongtao(周永涛), Wang Junjun(王军军) *et al*. *Tribology*(摩擦学学报)[J], 2019, 39(2): 206

[15] Ding Hongyan(丁红燕), Dai Zhendong(戴振东). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(5): 778

[16] Ding Hongyan(丁红燕), Dai Zhendong(戴振东), Xu Tao(徐洮). *Lubrication Engineering*(润滑与密封)[J], 2005(6): 28

[17] Chen Jun(陈　君), Yan Fengyuan(闫逢元), Wang Jianzhang (王建章). *Tribology*(摩擦学学报)[J], 2012, 32(1): 1

[18] Chen J, Yan F Y. *Transactions of the Nonferrous Metals Society of China*[J], 2012, 22(6): 1356

[19] Yu Shurong(俞树荣), Sun Lu (孙　璐), Song Wei(宋　伟) *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(4): 1183

[20] Song Wei(宋　伟), Sun Lu(孙　璐), Jing Pengfei(景鹏飞) *et al*. *Journal of Central South University, Science and Technology*(中南大学学报，自然科学版)[J], 2019(2): 328

[21] Li J, Lu Y H. *Wear*[J], 2013, 304(1-2): 223

[22] Wang Mengjiao(王梦娇), Wang Yunxia(王云霞), Fan Na(范娜) *et al*. *Lubrication Engineering*(润滑与密封)[J], 2019, 44(2): 14

[23] Li Xinxing(李新星), Li Yixian(李奕贤), Wang Shuqi(王树奇). *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2015, 39 (9): 793

[24] Zheng Chao(郑　超), Wei Shicheng(魏世丞), Liang Yi (梁　义) *et al*. *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2018

(10): 1018

[25] Deng Kai(邓 凯), Yu Min(于 敏), Dai Zhendong(戴振东) *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(5): 1099

[26] Fan N, Wang Y X, Wang Q *et al*. *Lubrication Science*[J], 2018, 30(3): 116

Fretting Wear Behavior of TC4 Alloy in Different Environmental Media

Song Wei, Chen Qiang, Yu Shurong, He Yanni, Jing Pengfei

(Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The fretting wear behaviors of TC4 titanium alloy under different displacement amplitudes in air, pure water and the artificial seawater of 3.5% NaCl were studied by SRV-IV fretting wear test rig. Scanning electron microscopy and laser scanning confocal microscopy were used to characterize the surface morphology, wear volume and wear profile of the wear scar. Fretting wear mechanism of the titanium alloy in different environmental media was analyzed. The results show that the friction coefficient increases first and then decreases with the increase of the displacement amplitude, while the wear volume increases. Under the dry friction condition, the friction coefficient is higher and unstable, and the wear volume is smaller. The wear mechanism is mainly abrasive wear, adhesive wear and oxidative wear. Compared with dry friction, the friction coefficient in the aqueous water is lower, the wear volume is significantly increased, and the friction coefficient in the artificial seawater is lower and more stable, and the wear profile is deeper, indicating that there is a “positive” interaction between corrosion and wear. The fretting wear mechanism of TC4 alloy in pure water is mainly fatigue wear and abrasive wear; while the fretting wear mechanism in artificial seawater is mainly abrasive wear and corrosion wear.

Key words: TC4 titanium alloy; fretting wear; environmental medium; displacement amplitude

---

Corresponding author: Yu Shurong, Ph. D., Professor, College of Petrochemical Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China, Tel: 0086-931-2973728, E-mail: yusr@lut.cn