

Ti₃SiC₂、不锈钢和 NiCr 合金在人工海水中的摩擦学性能

任书芳, 孟军虎*, 吕晋军, 杨生荣

(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)

摘要: 在 SRV-1 型摩擦磨损试验机上考察了 Ti₃SiC₂、NiCr 合金和不锈钢在干摩擦、蒸馏水和人工海水中的摩擦磨损性能,并用扫描电镜(SEM-EDS)及光电子能谱(XPS)对磨痕形貌及成分进行分析.结果表明:Ti₃SiC₂/Al₂O₃ 摩擦副的摩擦系数对摩擦条件变化不敏感,在液体介质中磨损稍有降低.3种摩擦条件下存在机械磨损和摩擦氧化磨损竞争,但机械磨损始终为主要磨损机制,因此摩擦和磨损较大.不锈钢/Al₂O₃和NiCr合金/Al₂O₃两摩擦副对摩擦条件变化较敏感,摩擦系数和磨损率在干摩擦、蒸馏水和海水中依次降低,其中NiCr合金降低幅度最大.干摩擦条件下两者以机械磨损为主要磨损机制,表现为黏着磨损和材料转移;蒸馏水中机械磨损和摩擦氧化磨损并存;海水中以腐蚀磨损为主导,腐蚀产物FeCl₂、CrCl₃或CrO₂²⁻或CrO₄²⁻等具有减摩抗磨作用.

关键词: Ti₃SiC₂; 不锈钢; NiCr 合金; 海水; 摩擦磨损性能

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2013)04-0363-09

Tribological Properties of Ti₃SiC₂, Stainless Steel and NiCr Alloy in Artificial Seawater

REN Shu-fang, MENG Jun-hu*, LU Jin-jun, YANG Sheng-rong

(State Key Laboratory of Solid Lubrication,

Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The tribological properties of Ti₃SiC₂, stainless steel and NiCr alloy under dry sliding, in distilled and sea water were investigated on an SRV-1 tribometer. The worn surfaces were analyzed by using scanning electron microscopy and X-ray photoelectron spectrometer. The results show that the friction coefficient of Ti₃SiC₂/Al₂O₃ tribo-pair was insensitive to sliding condition. The wear rate of Ti₃SiC₂ in liquids (distilled water and sea water) was one order of magnitude lower than that under dry sliding. In the competition between the two wear mechanisms of mechanical wear and tribo-oxidation wear, mechanical wear was the dominant mechanism, which was independent on the sliding condition. So the friction coefficient and wear were high for Ti₃SiC₂/Al₂O₃ tribo-pair under the three sliding conditions. Tribological properties of stainless steel/Al₂O₃ and NiCr alloy/Al₂O₃ were sensitive to sliding condition. The friction coefficient and wear rate of stainless steel and NiCr alloy successively decreased in the order of dry sliding, distilled water, and sea water. The degree of decrease was the largest for NiCr alloy/Al₂O₃ tribo-pair. Under dry sliding mechanical wear was the dominant wear mechanism for both the tribo-pairs. In distilled water both mechanical wear and tribo-oxidation wear worked. In the sea water corrosion wear was the main wear mechanism. The tribo-corrosive products (FeCl₂, CrCl₃ or CrO₂²⁻ and CrO₄²⁻)

Received 21 November 2012, revised 21 January 2013, accepted 7 March 2013, available online 28 July 2013.

* Corresponding author. E-mail: jhmeng@licp.cas.cn, Tel: +86-931-4968378.

The project was supported by the Hundred Talent Program (Junhu Meng) of Chinese Academy of Sciences and the National Natural Science Foundation of China (51075382).

中国科学院“百人计划”(孟军虎)和国家自然科学基金(51075382)资助.

were lubricants to decrease the friction and wear.

Key words: Ti_3SiC_2 , stainless steel, NiCr alloy, sea water, tribological property

随着海洋开发的蓝色革命在世界范围内的兴起,各种材料在海洋环境中的使役性能,包括抗腐蚀性能与摩擦磨损性能,越来越受到人们的关注.海洋摩擦学是一个正在建立与发展中的新的摩擦学研究领域.海水环境中摩擦学的研究对于海洋开发具有重要的意义,它为海洋开发设备的发展,尤其是为海水液压传动系统提供了关键的技术支持.海水液压传动系统对摩擦副材料要求极高,用于海水润滑的摩擦材料必须具有优异的耐磨损和耐腐蚀性能.目前海水中广泛应用抗腐蚀性能较强的合金(如TC11, Ti6Al4V)及各种涂层材料,但在同时存在机械摩擦磨损工况条件下,这些合金材料在海水中的减摩和抗腐蚀性能并不理想^[1-4].许多聚合物也已作为水环境下的摩擦材料使用,但聚合物材料会由于吸水膨胀引起的尺寸精确度下降等问题,限制了其在水环境中的应用^[5].

Ti_3SiC_2 是一种三元层状可加工陶瓷材料,其晶体结构中含有金属、共价和离子3种价键,这种特殊的价键结构使其具有金属和陶瓷材料的双重性能.自Crossley发现 Ti_3SiC_2 具有优异的微观摩擦学性能后^[6],人们从晶体结构推测其具有优异的摩擦学性能.在干摩擦条件下, Ti_3SiC_2 的宏观摩擦学性能得到了广泛的关注和研究^[7-17].同时有研究^[18-21]表明 Ti_3SiC_2 在腐蚀性溶液中具有较好的抗腐蚀性能,如在硫酸等溶液中其表面生成富二氧化硅层,阻止材料进一步腐蚀.

基于 Ti_3SiC_2 良好的机械性能和抗腐蚀性能,我们考察了其在海水环境中的摩擦学性能,并与NiCr合金和不锈钢进行了对比,以期拓展 Ti_3SiC_2 材料在海水环境中的应用奠定一定的基础.

1 实验部分

1.1 材料

Ti_3SiC_2 材料由粉末冶金中频热压工艺制备,原料粉为Ti粉(纯度不小于99.0%,粒径60 μm)、Si粉(纯度不小于99.0%,粒径75 μm)、石墨粉、Al

(烧结助剂)(纯度不小于99.0%)按Ti: Si: C: Al = 3: 1.2: 2: 0.2摩尔比称量,湿法球磨混料24 h,待粉末晾干后,装入内壁涂有BN的石墨模具中,采用中频热压烧结,压力为20 MPa,升温速率为30~40 $^{\circ}C/min$.在1500 $^{\circ}C$ 保温5 min,后降温至1400 $^{\circ}C$ 保温1 h.所得 Ti_3SiC_2 样品用XRD测的纯度为97%,杂质相主要为TiC. NiCr合金也是由粉末冶金制备,体积比为Ni: Cr = 80: 20,同样采用中频热压烧结,1050 $^{\circ}C$ 保温15 min,压力为20 MPa.所得块体为 $\phi 25 mm \times 8 mm$ 的圆柱,表面经机加工打磨抛光.两个材料的维氏硬度分别为5.28和2.07 GPa.选用不锈钢进行了相同条件下的对比试验.不锈钢(1Cr18Ni9Ti)为商品购买,布氏硬度HB180.

1.2 极化曲线

极化曲线测试在CHI660C型电化学工作站上进行,采用三电极模式,铂丝为对电极,Ag/AgCl为参比电极.试验前,将样品表面打磨抛光至粗糙度 R_a 为0.04 μm .液体介质为人工海水,配置方法根据ASTM 1141-98,成分如表1.

1.3 摩擦磨损试验

摩擦磨损试验在SRV-1型微动摩擦磨损试验机上进行,采用球-盘接触模式,盘试样为 Ti_3SiC_2 、NiCr合金和不锈钢,样品尺寸为 $\phi 24 mm \times 8 mm$,磨损表面粗糙度 R_a 分别为0.06、0.04和0.03 μm ,上试样为 Al_2O_3 球(G18,表面粗糙度 R_a 0.025 μm),直径为9.525 mm.试验中,盘试样固定不动,球做振幅为1 mm的左右振动,频率为15 Hz,摩擦试验持续时间为30 min,载荷为20 N.摩擦试验开始前,向球盘-接触界面处滴加约0.05 mL液体介质,使得摩擦试验过程中,摩擦接触界面始终处于液体介质中.摩擦系数由计算机自动记录,磨损体积由三维轮廓仪自动记录,磨损率采用公式(1)计算:

$$\omega = \frac{V}{LP} \quad (1)$$

其中 ω 为磨损率; V 为磨损体积; L 为滑动距离;

表1 海水成分*

Table 1 Chemical composition of sea water*

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

* Chlorinity is 19.38, pH is 8.2.

P 为载荷. 盘试样的磨损体积由表面轮廓仪(2206型表面轮廓仪)测得磨痕横断面轮廓后经计算得到. 球试样的磨损体积通过测量球上磨斑直径计算得到. 每组摩擦试验重复至少3次,平均摩擦系数和磨损率均取平均值.

1.4 表征手段

采用JSM-5600LV型扫描电子显微镜(SEM)/KEVEX能量色散谱对样品磨损表面及磨屑形貌和元素成分进行分析. 由于该能谱仪对C和O等轻元素检测信号较差,所以本试验中未对C和O等轻元素进行分析. 采用PHI-5702X-射线光电子能谱(XPS)对磨痕元素的化学态进行分析.

2 试验结果

2.1 极化曲线

图1为Ti₃SiC₂、NiCr合金和不锈钢在海水中的动电位极化曲线,3种材料的腐蚀电位相差不大,在-1.0V左右. 但腐蚀电位由低到高依次为Ti₃SiC₂、不锈钢和NiCr合金,说明材料在海水中的抗腐蚀性由弱到强依次为Ti₃SiC₂、不锈钢和NiCr合金. 电势高于腐蚀电位后,NiCr合金和不锈钢的电流变化趋势类似,均出现平台或降低趋势,电动势大于0.2,电流迅速升高,说明材料发生钝化,但发生钝化的电位区间较短. Ti₃SiC₂的电流随电位的增大呈缓慢增大趋势,也发生了钝化.

从腐蚀后的表面形貌来看(图2),Ti₃SiC₂表面生出很多“疤节”,其成分尚不清楚,而NiCr合金和不锈钢表面表现为典型的点蚀坑. 研究表明,虽然Cr的加入可以在Ni基合金表面生成钝化膜,但仍然不能阻止缝隙腐蚀和点蚀的发生^[22].

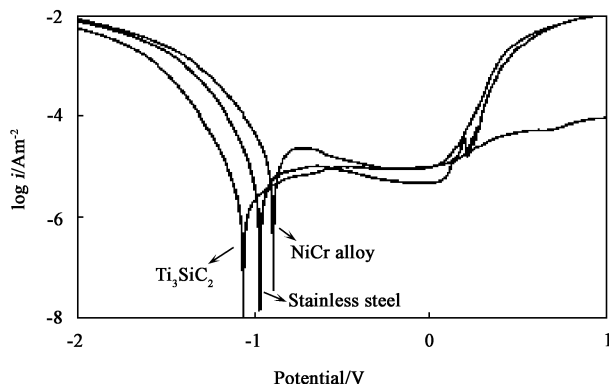
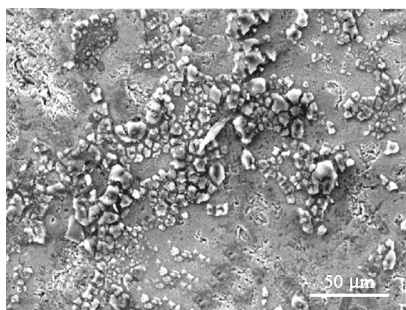


Fig. 1 Potentiodynamic polarization curves for Ti₃SiC₂, NiCr alloy, and stainless steel

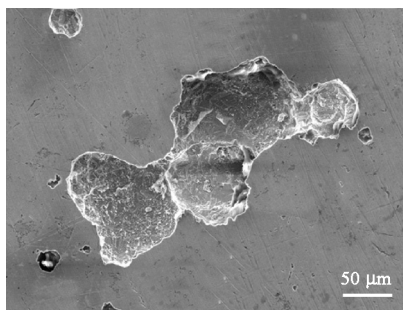
图1 Ti₃SiC₂、NiCr合金和不锈钢在海水中的动电位极化曲线

2.2 摩擦系数和磨损率

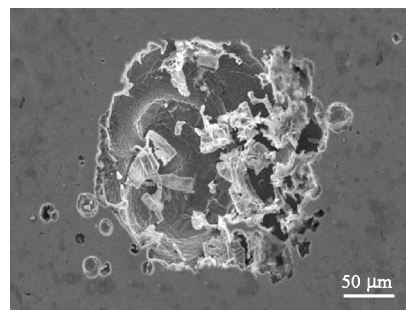
如图3所示,Ti₃SiC₂/Al₂O₃摩擦副在蒸馏水和海水中的摩擦系数较干摩擦稍有降低,但变化不大(0.40~0.55);与蒸馏水相比,海水减摩作用不明显. 不锈钢/Al₂O₃摩擦副在干摩擦和蒸馏水中摩擦



(a) Ti₃SiC₂



(b) NiCr alloy



(c) Stainless steel

Fig. 2 SEM micrographs of surfaces after polarization curves

图2 极化曲线试验后的腐蚀表面形貌

系数相差不大,在海水中降低了约0.2,但摩擦系数在5~15min波动较大;NiCr合金/Al₂O₃摩擦副在蒸馏水和海水中的摩擦系数较干摩擦时显著降低,海水中的摩擦系数前10min时较高,为0.2左右,之后降至0.1.3种配副干摩擦时具有相当的平均摩擦系数[见图4(a)],在蒸馏水和海水中的平均摩擦系数由大到小依次为Ti₃SiC₂/Al₂O₃、不锈钢/Al₂O₃和NiCr合

金/Al₂O₃.3种配副中的盘在干摩擦时具有最大的磨损率[见图4(b)],水中次之,海水中最小. Ti₃SiC₂盘干摩擦时的磨损率在所有实验条件和配副中最大,为 $10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,NiCr合金盘在海水中的磨损率最小,仅为 $10^{-7} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$.

2.3 磨损形貌

从Ti₃SiC₂/Al₂O₃摩擦副的磨损形貌照片上来看

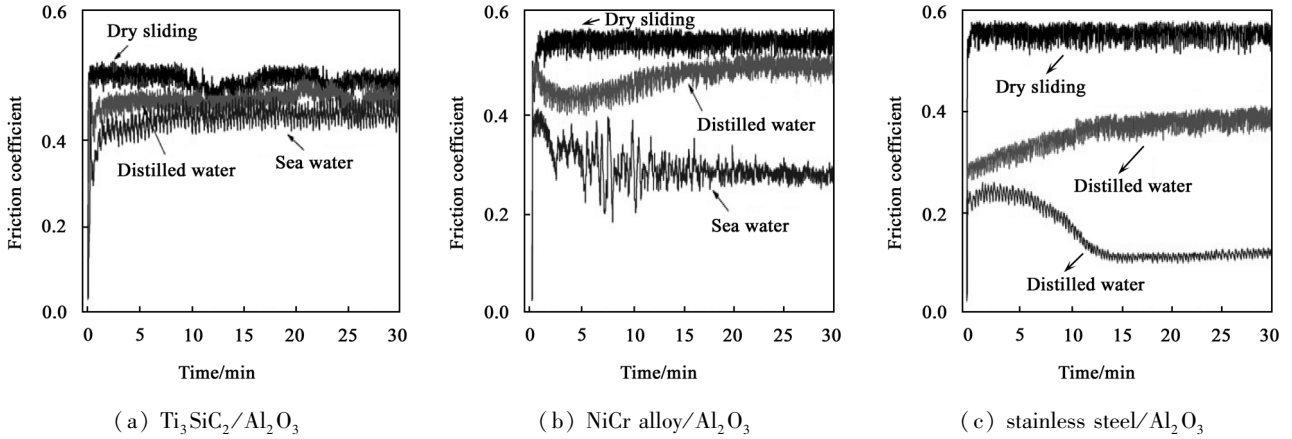
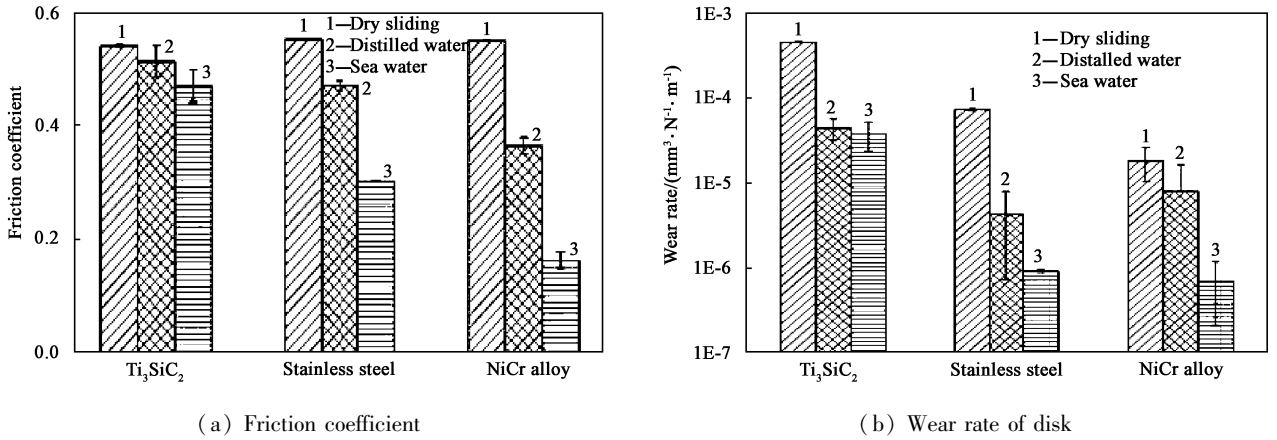


Fig. 3 Friction coefficient as a function of time for tribo-pairs under dry sliding, in distilled water and sea water

图3 不同摩擦副在干摩擦、蒸馏水、海水中摩擦系数随摩擦时间的变化关系



(a) Friction coefficient

(b) Wear rate of disk

Fig. 4 Friction coefficient and wear rate of disk for Ti_3SiC_2/Al_2O_3 , NiCr alloy/ Al_2O_3 , stainless steel/ Al_2O_3 tribo-pairs under dry sliding, in distilled water and sea water

图4 不同条件下摩擦副的摩擦系数和盘磨损率

(图5),干摩擦条件下, Ti_3SiC_2 表面较粗糙,布满了晶粒脱落后留下的凹坑[图5(a)],说明摩擦过程中发生了晶粒拔出和断裂脱落. 与之对磨的 Al_2O_3 球磨损表面也较粗糙[图5(d)],元素分析(EDS)表明球表面有大量来自 Ti_3SiC_2 的 Ti 元素[图5(g)],说明摩擦过程中发生了严重的材料转移. 蒸馏水中 Ti_3SiC_2 表面表现为晶粒脱落后留下的凹坑[图5(b)],伴有少量粘附的摩擦层. 对偶球表面较光滑[图5(e)],有轻微的磨粒磨损沟槽,EDS 表明 Al_2O_3 磨损表面没有发现来自 Ti_3SiC_2 材料转移[图5(h)]. 海水条件下磨痕表面较平滑[图5(c)],但仍有小的凹坑分散在磨痕表面,说明也有晶粒拔出与脱落. 对偶球表面有极少量的材料转移[图5(i)].

不锈钢和 NiCr 合金的磨损表面形貌如图6所示. 干摩擦条件下,不锈钢磨痕较大[图6(a)],表面较粗糙,表现为严重的黏着磨损. 并且表面附着由

细小颗粒组成的摩擦层. 说明摩擦过程中接触界面的磨屑经反复碾压形成晶粒细化的机械混合层. 在对偶 Al_2O_3 球表面也发现了明显的材料转移[图7(a)]. 蒸馏水中,磨痕较光滑,有轻微的摩擦沟槽,磨痕两端有材料堆积现象[图6(b)],没有发现明显的材料转移现象. 海水中磨痕表面更加光滑,有轻微犁沟沟槽,没有黏着和材料转移发生[图6(c)]. NiCr 合金在干摩擦条件下磨痕表面粗糙,表现为塑性流动和黏着效应,有岛状摩擦层附着,有材料转移发生[图7(b)]. 蒸馏水和海水中的磨痕较光滑,犁沟效应也比较轻微,没有发生材料转移[图6(e~f)]. 可以看出,对这两种金属材料来说,流体介质(蒸馏水及海水)有效地防止了黏着摩擦磨损和材料转移的发生.

2.4 磨损表面化学成分分析

对 Ti_3SiC_2 磨损表面元素价态分析(XPS)如图8

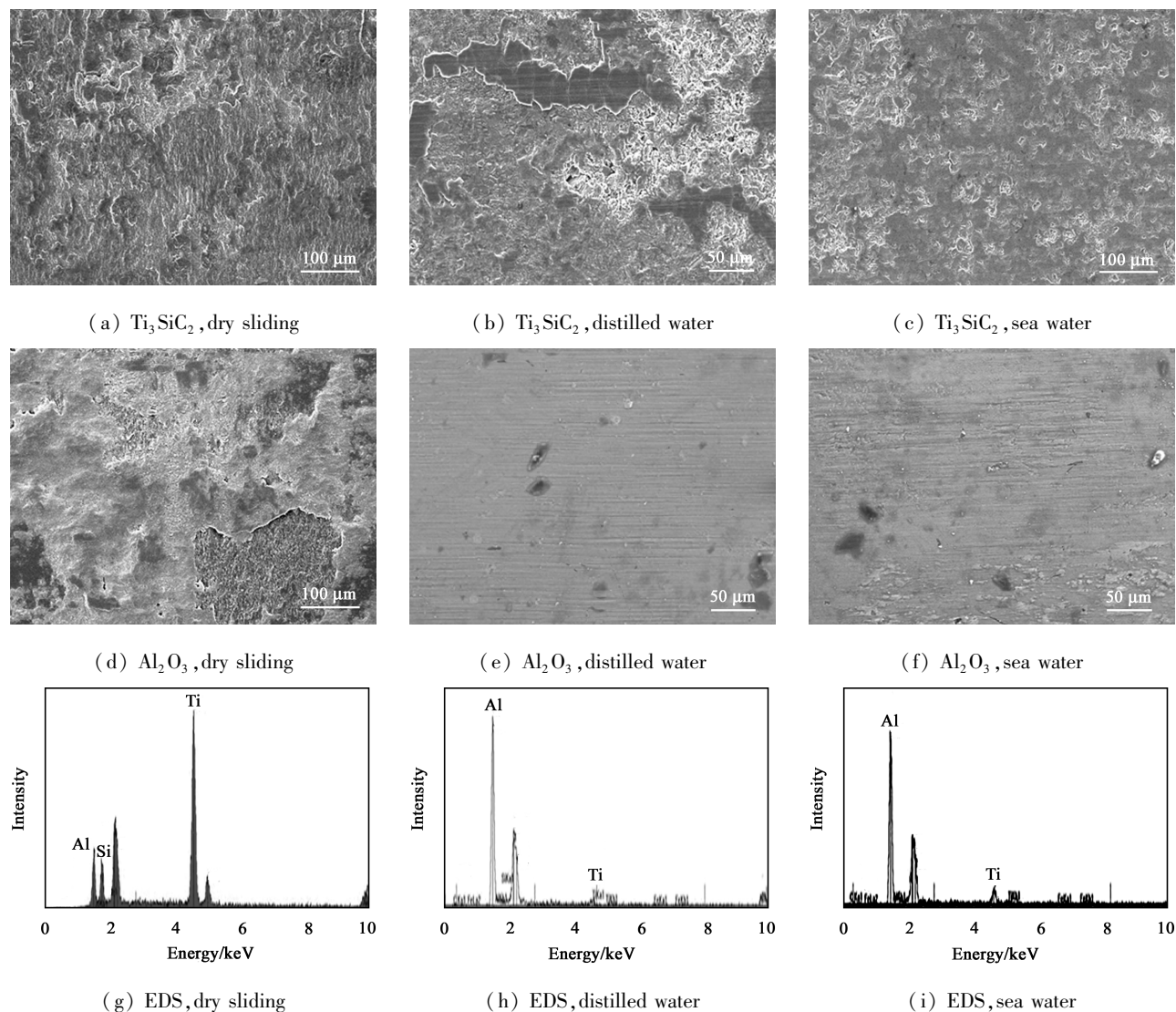


Fig. 5 SEM micrographs of worn surfaces of Ti₃SiC₂ and Al₂O₃ and EDS analysis for worn surfaces on Al₂O₃ under dry sliding, distilled water, and sea water

图5 Ti₃SiC₂/Al₂O₃ 摩擦副在干摩擦、蒸馏水和海水条件下的磨损形貌照片及对偶球表面磨痕元素分析

所示. 3 种条件下 Ti 和 Si 元素价态区别不大, Ti2p_{3/2} 在 458.7 eV 处的强峰为 TiO₂ 的结合能峰, 在 454.9 ± 0.2 eV 处的峰为 Ti₃SiC₂ 中 Ti 的结合能峰, 464.4 eV 为 TiO₂ 中 Ti2p_{1/2} 的峰. 对于硅元素 [图 8(b)], 102.0 eV 处的峰为硅的氧化物 SiO_x 中 Si 的结合能峰, 而 98.9 eV 处的峰为 Ti₃SiC₂ 中 Si 的结合能峰. 可以看出干摩擦、蒸馏水和海水条件下, 磨损表面均有 Ti 和 Si 的氧化物生成, 且相对含量差别不大. 3 种条件下均发生了摩擦氧化磨损. 海水润滑条件下, 两种元素的能谱中没有发现氯化物等其他物质的峰, 因此磨损表面没有和海水发生摩擦化学反应.

不锈钢磨损表面, 对 Fe2p_{3/2} 峰而言, Fe₂O₃ 的峰在 710.7 ~ 710.9 eV 之间, 而 FeCl₂ 的结合能

710.5 ~ 710.9 eV, FeCl₃ 为 711.0 ~ 711.4 eV. 可见氯化铁的结合能峰范围较宽, 包含了氧化铁的结合能范围. 图 9(a) 中干摩擦和蒸馏水中, Fe2p_{3/2} 在 710.8 ± 0.1 eV 处的峰为 Fe₂O₃ 的结合能峰, 而在海水中 Fe2p_{3/2} 的峰形明显宽化, 且向低结合能偏移, 说明 Fe 和海水中的 Cl 发生了摩擦化学反应, 生成了 FeCl₂. 对于 Cr 元素 [见图 9(b)], 3 种条件下峰位置和峰形相差不大, 756.5 eV 处的峰为 Cr₂O₃ 中 Cr2p_{3/2} 的结合能峰. CrCl₃ 的峰应该在 577.5 ± 0.2 eV, 海水条件下 Cr 元素没有发生氯化, 即使发生量也很小, 超出了能谱的检测分辨率. 干摩擦和蒸馏水中不锈钢发生摩擦氧化磨损, 而在海水中则发生了摩擦氯化反应.

对镍铬合金, 其中 Ni 单质结合能峰在 852.5 ±

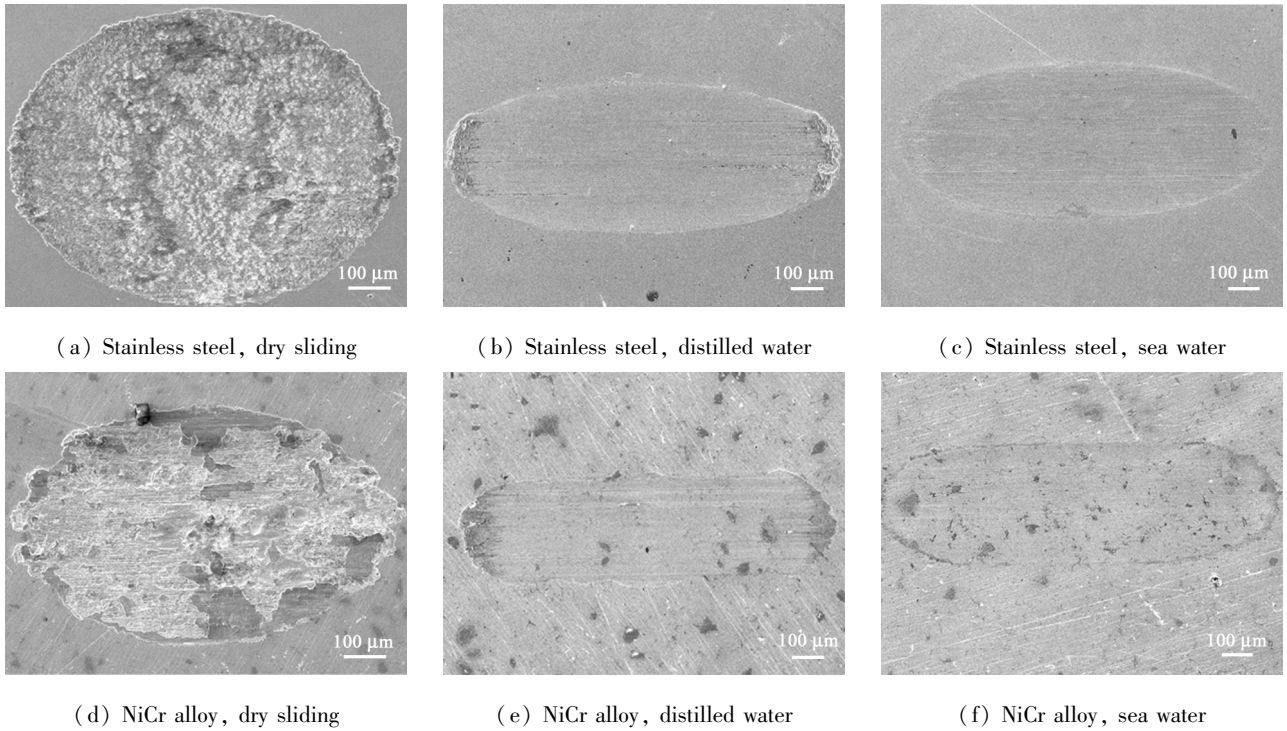


Fig. 6 Worn surfaces of stainless steel and NiCr alloy under dry sliding, distilled water and sea water

图6 不锈钢以及 NiCr 合金在干摩擦、蒸馏水和海水中的磨损表面形貌照片

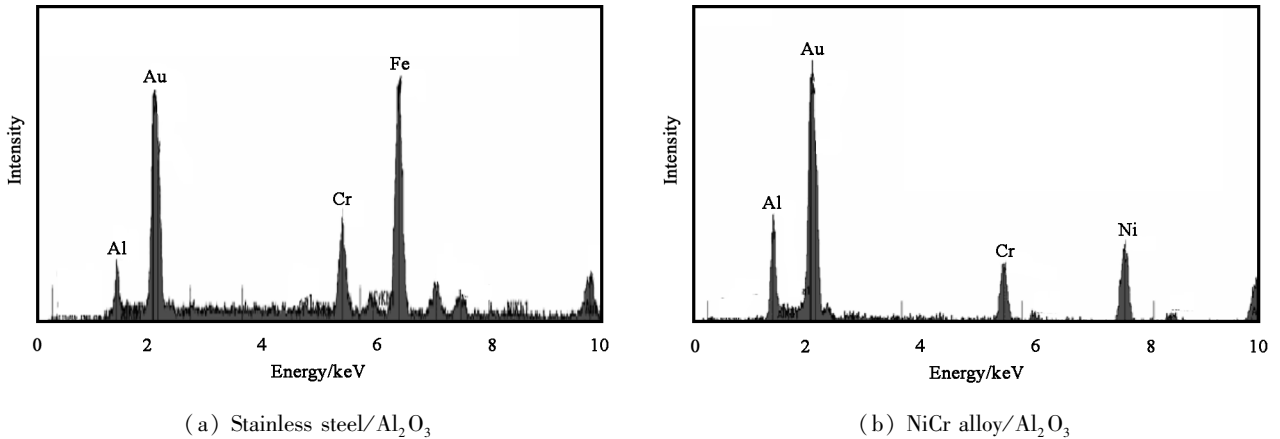


Fig. 7 EDS analysis for worn surfaces of Al₂O₃ for stainless steel/Al₂O₃ and NiCr alloy/Al₂O₃ tribo-pairs under dry sliding

图7 不锈钢/Al₂O₃ 和 NiCr 合金/Al₂O₃ 摩擦副在干摩擦条件下 Al₂O₃ 球磨痕表面成分分析

0.2 eV, NiO 在 853.5 ~ 854.3 eV 之间, 氯化物在 855.4 ~ 857.6 eV 之间. 可见 3 种摩擦条件下 Ni 元素没有发生任何化学反应, 仍然是 Ni 单质. 而 Cr 元素则不同, 3 种摩擦条件下 Cr2p3/2 结合能峰区别很大, 为了辨别其中的化合物的峰, 我们将 Cr2p3/2 的峰进行了拟合, 如图 10 所示. 3 种摩擦条件下均有 Cr 和 Cr₂O₃ 的峰, Cr 单质的峰出现在 574.0 ± 0.2 eV, Cr₂O₃ 的峰在 576.2 ± 0.2 eV. 而海水条件下在 577.5 eV 的峰可能是 CrCl₃ 的峰, 或者是铬酸盐 CrO₂²⁻ 或 CrO₄²⁻ 的峰[图 10(c)]. 因此, 干摩擦

和蒸馏水中 NiCr 合金发生摩擦氧化反应, 而在海水中除氧化反应外, 磨损表面和海水发生了氯化反应或成盐反应.

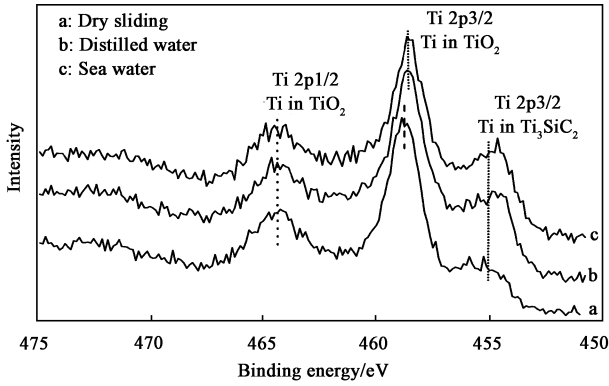
3 结果分析与讨论

3.1 摩擦磨损机理

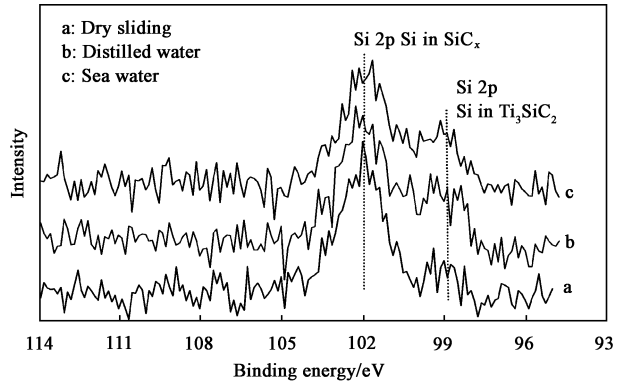
Ti₃SiC₂ 在干摩擦条件下的磨损特征表现为晶粒拔出与脱落和材料转移, 这是陶瓷材料典型的磨损特征^[23]. 在往复式摩擦试验中, Ti₃SiC₂ 表面也附着了 1 层疏松龟裂的摩擦层, 这是因为脱落的

Ti₃SiC₂ 材料在往复摩擦作用下未能及时从磨痕排出,而是被碾压后黏着在磨损表面上. 在液体条件下,晶粒拔出与脱落仍然是主要磨损机制,与干摩擦不同的是脱落的晶粒被液体带走,没有在磨痕表面形成黏着摩擦层. 液体介质中没有发生材料转移,这是区别于干摩擦的主要特征,因此液体介质阻止了

材料转移的发生从而起到了一定的降低磨损的作用. 以上分析可以归结为 Ti₃SiC₂ 在 3 种条件下均表现为机械磨损特征. 从磨痕成分分析上看,3 种条件下均发生了摩擦氧化磨损. 海水中并没有使 Ti₃SiC₂ 表面发生有别于蒸馏水的腐蚀化学反应,因此 Ti₃SiC₂ 在两种液体介质中的磨损率相近.



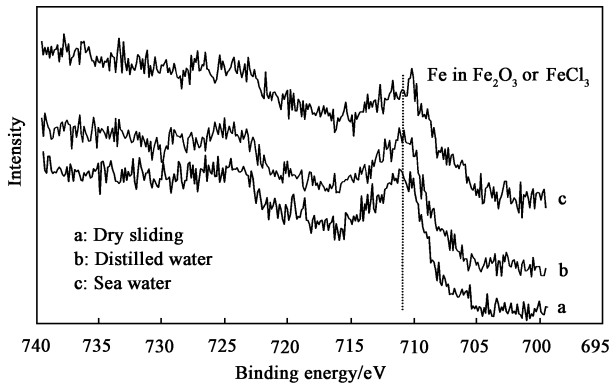
(a) Ti₃SiC₂/Al₂O₃, Ti2p



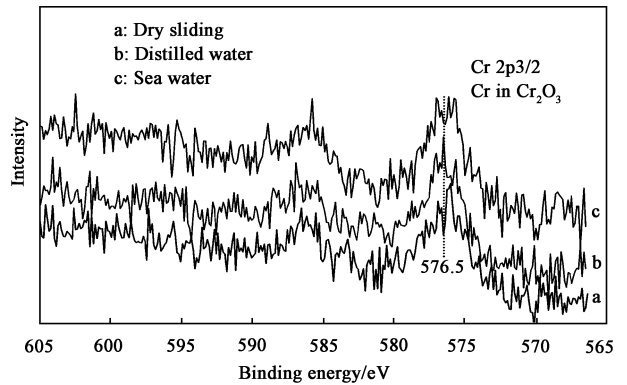
(b) Ti₃SiC₂/Al₂O₃, Si2p

Fig. 8 XPS spectra for Ti2p and Si2p on the worn surfaces of Ti₃SiC₂ under three different sliding conditions

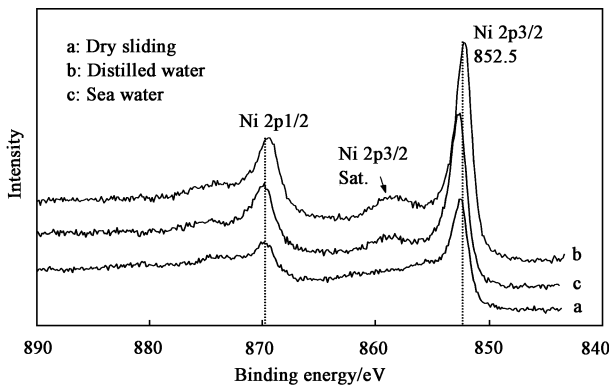
图 8 不同摩擦条件下 Ti₃SiC₂ 磨痕表面 Ti2p 和 Si2p 的结合能分析



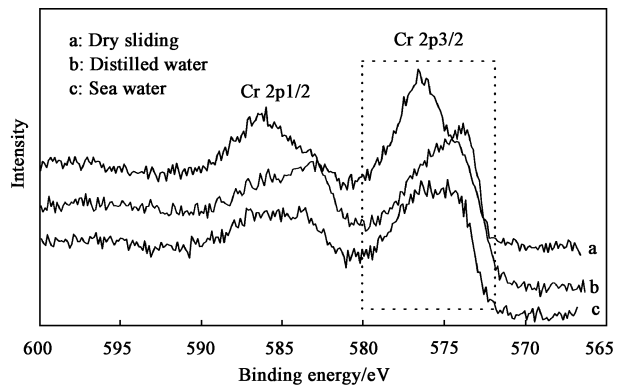
(a) Stainless steel/Al₂O₃, Fe2p



(b) Stainless steel/Al₂O₃, Cr2p



(c) NiCr alloy/Al₂O₃, Ni2p



(d) NiCr alloy/Al₂O₃, Cr2p

Fig. 9 XPS spectra for Fe2p and Cr2p on worn surface of stainless steel and Ni2p and Cr2p on worn surface of NiCr alloy under three sliding conditions

图 9 不同摩擦条件下不锈钢磨痕表面 Fe、Cr 以及 NiCr 合金表面 Ni 和 Cr 元素价态分析

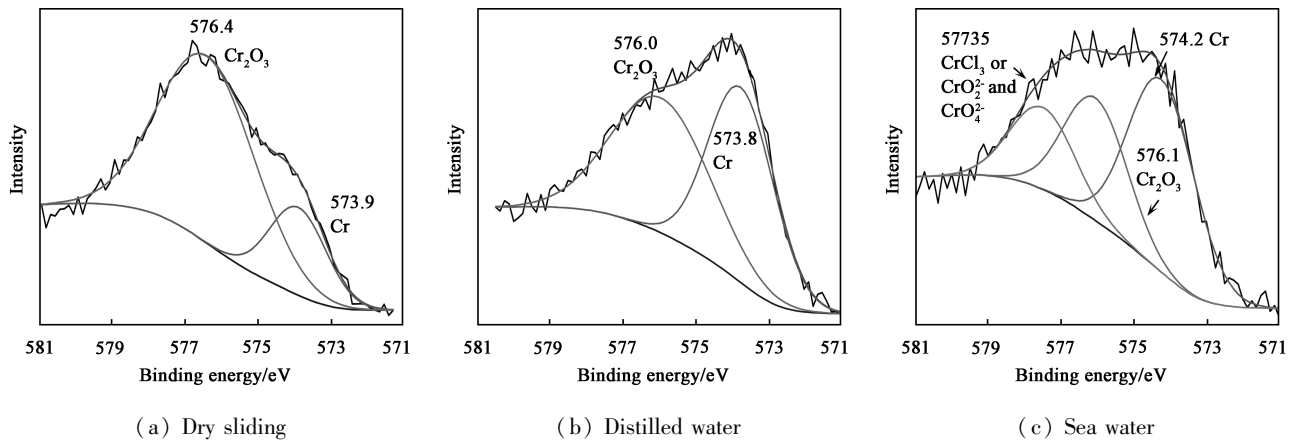


Fig. 10 Fitted peaks for Cr2p3/2 under dry sliding, in distilled water and sea water

图10 NiCr合金中Cr2p3/2峰在干摩擦、蒸馏水和海水中的拟合峰

对不锈钢,干摩擦条件下表现为黏着磨损和材料转移,伴有摩擦氧化磨损,摩擦磨损较高.液体介质一定程度上抑制了塑性流动、黏着磨损和防止了材料转移,摩擦磨损较干摩擦要低.而海水中摩擦磨损比蒸馏水中更低,这可能是因为海水和Fe反应生成的FeCl₂起到了减摩抗磨作用.对金属材料来说,摩擦界面处液体介质的存在一方面可以降低由摩擦热导致的摩擦闪温,从而降低金属材料的塑性流动和黏着;另一方面,随着摩擦作用的进行,接触应力降低,液体介质也有一定的承载能力,起到边界润滑的作用.

3种摩擦副中,介质影响最明显的是NiCr合金/Al₂O₃摩擦副.干摩擦条件下表现为黏着磨损和材料转移,同时伴有氧化磨损(Cr元素氧化).同不锈钢类似,蒸馏水和海水也起到了抑制黏着和材料转移的作用.不同的是,海水中合金中的Cr元素在摩擦作用下和海水反应生成了CrCl₃或铬酸盐(CrO₂²⁻或CrO₄²⁻),而铬酸盐是一类宽温域固体润滑剂^[24],干摩擦时的摩擦系数在0.3~0.4之间.CrCl₃的减摩抗磨作用有待进一步验证.

3.2 摩擦化学磨损和机械磨损竞争机制

本试验中观察到两种摩擦化学反应:一种是摩擦氧化反应,这种摩擦化学磨损在3种摩擦副3种摩擦条件下均有发生,是一种比较普遍的磨损机制,但在本试验条件下它并非主导磨损机制.比如Ti₃SiC₂/Al₂O₃摩擦副,在机械磨损和摩擦氧化磨损两种机制中除非极端条件,比如高速(20 m/s)^[9]或强氧化介质(浓硫酸)^[25],摩擦氧化磨损才能主导磨损机理.否则机械磨损是Ti₃SiC₂的最常见的主导机制.另一种是摩擦腐蚀反应,即摩擦材料和海水发生

化学反应,比如FeCl₂、CrCl₃或CrO₂²⁻或CrO₄²⁻等,腐蚀反应本身可能会促使材料变质造成磨损增大.但如果反应产物附着在磨损表面不易脱落,又具有低剪切能,那么反应产物反过来也可以降低材料磨损,例如本试验中的NiCr合金在海水中的摩擦化学磨损.

同一摩擦副在不同摩擦条件下的摩擦化学磨损和机械磨损存在竞争性.3种摩擦副的机械磨损表现为晶粒拔出脱落和黏着磨损,摩擦化学磨损则表现为摩擦氧化磨损和腐蚀磨损.对不锈钢和NiCr合金,干摩擦条件下两摩擦副均存在机械磨损和摩擦氧化磨损,但机械磨损为主导;蒸馏水中不锈钢和NiCr合金的机械磨损和摩擦氧化磨损共同起作用;海水中腐蚀磨损是主导磨损机制.对Ti₃SiC₂/Al₂O₃摩擦副,3种摩擦条件下机械磨损始终是主导磨损机制,摩擦氧化磨损不起主要作用.

4 结论

a. Ti₃SiC₂/Al₂O₃摩擦副在干摩擦、蒸馏水和海水中的摩擦系数大小相当.液体介质中的磨损率较干摩擦低一个数量级;不锈钢摩擦副和NiCr合金摩擦副对液体介质较敏感,摩擦系数和磨损率在干摩擦、蒸馏水和海水中依次降低,其中NiCr合金降低最明显.

b. Ti₃SiC₂/Al₂O₃摩擦副3种条件下的磨损机理主要是机械磨损伴有摩擦化学磨损.液体介质抑制了材料转移,一定程度上降低了摩擦磨损.不锈钢/Al₂O₃和NiCr合金/Al₂O₃摩擦副干摩擦条件下主要是黏着磨损和材料转移,液体介质阻止了材料转移.海水中不锈钢和合金均发生了摩擦化学反应,

生成的金属氯化物和铬酸盐具有减摩抗磨作用。

c. 机械磨损和摩擦化学磨损存在竞争机制,对不锈钢和 NiCr 合金,干摩擦条件下机械磨损为主导;蒸馏水中机械磨损和摩擦氧化磨损共同起作用,海水中腐蚀磨损是主导磨损机制。对 Ti₃SiC₂/Al₂O₃ 摩擦副,3 种摩擦条件下机械磨损始终是主导磨损机制,摩擦氧化磨损不起主要作用。

参考文献:

- [1] Ding H Y, Dai Z D. Corrosion wear character istic of TC11 alloy in artificial seawater[J]. Tribology, 2008, 28(2): 139 - 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):139 - 144].
- [2] 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: 711 - 718.
- [3] Lee H, Mall S, Allen WY. Fretting fatigue behavior of shot - peened Ti - 6Al - 4V under seawater environment[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 420: 72 - 78.
- [4] Ding H Y, Dai Z D, Zhou F, *et al.* Sliding friction and wear behavior of TC11 in aqueous condition[J]. Wear, 2007, 263: 117 - 124.
- [5] Wang H B, Yang D Z, Wu G J. Material and design of water lubricated bearings[J]. Lubrication Engineering, 2002, 151: 82 - 84(in Chinese)[王海宝,杨大壮,吴光杰. 水润滑轴承材料设计[J]. 润滑与密封,2002,151:82 - 84].
- [6] Crossley A, Kisi E H, Bennett Summers J W, *et al.* Ultra - low friction for a layered carbide - derived ceramic, Ti₃SiC₂, investigated by lateral force microscopy (LFM)[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 1999 32: 632 - 638.
- [7] El - Raghy T, Blau P, Barsoum M W. Effect of grain size on friction and wear behavior of Ti₃SiC₂[J]. Wear, 2000, 238: 125 - 130.
- [8] Zhai H, Huang Z, Zhou Y, *et al.* Oxidation layer in sliding friction surface of high - purity Ti₃SiC₂[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39: 6 635 - 6 637.
- [9] Huang Z Y, Zhai H X, Zhou W, *et al.* High - speed friction and wear behaviors of bulk Ti₃SiC₂[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2005, 15: 266 - 269.
- [10] Huang Z Y, Zhai H X, Zhou Y, *et al.* Sliding friction behavior of bulk Ti₃SiC₂ under difference normal pressures [J]. Key Engineering Materials, 2005,280 - 283: 1 353 - 1 356.
- [11] Zhai H X, Huang Z Y, Zhou Y, *et al.* Frictional layer and its antifriction effect in high - purity Ti₃SiC₂ and TiC - contained Ti₃SiC₂[J]. Key Engineering Materials, 2005, 280 - 283: 1 347 - 1 352.
- [12] Zhang Z L, Zhai H X, Huang Z Y, *et al.* Self - lubricant effect of tri - oxidizing layer in surface of bulk Ti₃SiC₂ materials, Pricm 5: The Fifth Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing, Pts 1 - 5, 2005, 475 - 479: 1 259 - 1 262.
- [13] Huang Z Y, Zhai H X, Guan M L, *et al.* Oxide - film - dependent tribological behaviors of Ti₃SiC₂[J]. Wear, 2007, 262: 1 079 - 1 085.
- [14] Sarkar D, Basu B, Cho S J, *et al.* Tribological properties of Ti₃SiC₂[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2005, 88: 3 245 - 3 248.
- [15] Sarkar D, Kumar B V M, Basu B. Understanding the fretting wear of Ti₃SiC₂[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2006, 26: 2 441 - 2 452.
- [16] Zhang Y, Ding G P, Zhou Y C, *et al.* Ti₃SiC₂ - a self - lubricating ceramic [J]. Materials Letters, 2002, 55: 285 - 289.
- [17] Souchet A, Fontaine J, Belin M, *et al.* Tribological duality of Ti₃SiC₂[J]. Tribology Letters, 2005, 18: 341 - 352.
- [18] Travaglini J, Barsoum M W, Jovic V, *et al.* The corrosion behavior of Ti₃SiC₂ in common acids and dilute NaOH [J]. Corrosion Science, 2003, 45: 1 313 - 1 327.
- [19] Abdel - Karim R. Corrosion behaviour of nanolaminated polycrystalline Ti₃SiC₂ in acidic media [J]. Corrosion Engineering Science and Technology, 2007, 42: 168 - 173.
- [20] Jovic V D, Jovic B M, Gupta S T, *et al.* Corrosion behavior of select MAX phases in NaOH, HCl and H₂SO₄ [J]. Corrosion Science, 2006, 48: 4 274 - 4 282.
- [21] Jovic V D, Barsoum M W. Corrosion behavior and passive film characteristics formed on Ti, Ti₃SiC₂, and Ti₄AlN₃ in H₂SO₄ and HCl [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2004, 151: B71 - B76.
- [22] Liu Ru Tie. Study on the high - temperature and anti - seawater - corrosion solid self - lubricating anti - friction nickel based materials[D]. Changsha: Central South University, 2006 (in Chinese)[刘如铁. 镍基高温及耐海水腐蚀固体自润滑减摩材料的研究[D]. 长沙:中南大学,2006].
- [23] Ren S F, Meng J H, Lu J J, *et al.* Tribological behavior of Ti₃SiC₂ sliding against Ni - based alloys at elevated temperatures [J]. Tribology Letters, 2008, 31: 129 - 137.
- [24] Allam I M. Solid lubricants for applications at elevated - temperatures - a review [J]. Journal of Materials Science, 1991, 26: 3 977 - 3 984.
- [25] Ren S F, Meng J H, Wang J B, *et al.* Tribocorrosion behavior of Ti₃SiC₂ in the dilute and concentrated sulfuric acid solutions [J]. Wear, 2010, 269: 50 - 59.