

外加电位对 Monel400 合金海水环境腐蚀磨损性能的影响

马付良^{1,2}, 李金龙¹, 曾志翔¹, 高义民²

(1.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; 2.西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049)

摘要:目的 研究不同恒电位对 Monel400 合金海水环境腐蚀磨损性能的影响。方法 将试样加工成圆柱试样, 通过设计的特殊夹具夹紧试样, 利用摩擦试验机和电化学工作站做不同恒电位下的磨蚀实验, 通过开路电位极化曲线的变化评价合金的电化学性能, 通过磨损量的变化评价合金的摩擦性能。通过扫描电镜揭示磨损机理, 探讨交互作用机制。结果 摩擦过程中的开路电位比静态腐蚀时的低。随着外加电位的增加, 腐蚀电流密度增加, 摩擦系数降低, 总的体积损失量增加。腐蚀磨损存在明显的交互作用。结论 摩擦能够破坏合金表面的钝化膜, 导致具有更高电化学活性的新表面暴露于溶液中, 因此促进了表面腐蚀。而腐蚀产生的腐蚀产物层比较粗糙和疏松, 其剪切强度比基底合金低得多, 因此当氧化铝块摩擦过合金表面时, 很容易去除腐蚀产物层, 进而促进了材料损失。腐蚀磨损条件下材料的损失量明显比纯磨损条件下的高。

关键词: Monel 400 合金; 腐蚀磨损; 摩擦系数; 外加电位; 电化学; 交互作用

中图分类号: TG172; TH117.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2017)11-0158-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.11.022

Effect of Applied Potential on the Tribocorrosion Behaviors of Monel 400 Alloy in Seawater

MA Fu-liang^{1,2}, LI Jin-long¹, ZENG Zhi-xiang¹, GAO Yi-min²

(1.Key Laboratory of New Marine Materials and Applied Technologies, 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; 2.National Key Laboratory of Metallic Material Strength, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

ABSTRACT: The work aims to research the effects of different constant potentials on the tribocorrosion behaviors of Monel400 alloy in seawater. The samples were processed into cylindrical samples and clamped by the special fixtures designed. The abra-

收稿日期: 2017-06-02; 修订日期: 2017-06-22

Received: 2017-06-02; Revised: 2017-06-22

基金项目: 国家重点研发项目 (2016YFB0300604); 国家 973 计划项目 (2014CB643302)

Fund: Supported by National Key R&D Program of China (2016YFB0300604), National Basic Research Program of China (973 Program, Grant No.2014CB643302)

作者简介: 马付良 (1987—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为材料的腐蚀磨损。

Biography: MA Fu-liang (1987—), Male, Doctor candidate, Research focus: tribocorrosion behaviour of metal materials.

通讯作者: 李金龙 (1974—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为材料表面改性、薄膜材料、金属材料及其表面防护技术。

Corresponding author: LI Jin-long (1974—), Male, Doctor, Professor, Research focus: material surface modification, thin film materials, metal material and its surface protection technology.

sion experiment under various constant potentials was carried out by friction testing machine and electrochemical workstation. The electrochemical performance of the alloy was evaluated based on the change in the open-circuit potential polarization curve. The friction property of the alloy was evaluated based on the change in the abrasion loss. The wear mechanism was revealed by scanning electron microscope and the interaction mechanism was discussed. The open-circuit potential in the friction process was lower than that in the static corrosion. As the applied potential increased, the corrosion current density increased, the friction coefficient decreased and the total volume loss increased. The corrosion and wear had obvious interaction. The friction can damage the passive film of the alloy surface, causing the new surface with higher electrochemical activity to be exposed to the solution; therefore, the surface corrosion is accelerated. The corrosive product layer generated by the corrosion is quite coarse and loose. Its shear strength is much lower than that of the base metal alloy. Therefore, when alumina block slides across the alloy surface, such layer is easily peeled off, finally resulting in the acceleration of material loss. The loss amount of materials under corrosion and wear is apparently higher than that under the pure wear.

KEY WORDS: Monel 400 alloy; tribocorrosion; friction coefficient; applied potential; electrochemical; interaction

Monel 400 合金主要由 Ni 和 Cu 组成, 在多种环境下服役时, 合金表面能够生成一层 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 钝化膜, 因此其具有非常优异的耐腐蚀性^[1-2]。Monel 400 合金的强度较高, 而且加工成形性良好, 这些优异的性能使其经常被用作螺旋桨、叶轮、蜗杆、阀垫、泵轴等。海洋环境是一种高腐蚀性环境, 在海洋环境下服役的装备不可避免地会遭受到腐蚀及磨损损伤, 当腐蚀和磨损同时发生时, 由于复杂的力学及电化学交互作用, 导致零部件的损伤比静态腐蚀和纯磨损更严重^[3-4]。摩擦会导致合金表面的钝化膜被破坏, 从而加速合金的腐蚀。从材料保护和应用的角度来看, 区分腐蚀磨损过程中腐蚀和磨损对材料总腐蚀磨损损失量的贡献非常重要。如果磨损损失量所占的比例较大, 应该从强化材料耐磨性的角度来提高材料的耐腐蚀磨损性能; 如果腐蚀损失量占了更大的比例, 则应该首先考虑提高材料的耐腐蚀性^[5-7]。

随着 Monel 400 合金在海洋环境下的广泛应用, Monel 400 合金的腐蚀磨损研究变得越来越有必要。然而目前关于 Monel 400 合金的研究集中在耐腐蚀性, 其耐腐蚀磨损性能的研究还非常少见^[8-11]。在本工作中, 研究了 Monel 400 合金在不同外加电位下的海水环境腐蚀磨损行为, 并计算其交互作用, 分析腐蚀磨损机理, 为 Monel 400 合金在海洋腐蚀磨损环境下的应用提供一些理论基础。

1 实验

1.1 材料

实验所用材料为 Monel 400 合金, 其主要化学成分 (以质量分数计) 为: 31.7% Cu, 0.17% C, 1.67% Fe, 1.04% Mn, 其余为 Ni。为了进行腐蚀磨损实验, 合金被加工成圆柱状试样 (直径 6 mm, 高度 4 mm)。

进行滑动磨损实验前, 用一系列的 SiC 砂纸打磨样品的测试端, 砂纸磨到 2000 目, 而后用 1 μm 的金刚石研磨膏抛光至表面粗糙度 R_a 为 0.05 μm , 然后依次在肥皂水、去离子水以及丙酮中超声清洗 10 min, 最后真空干燥。

1.2 腐蚀磨损实验

磨蚀试验采用滑动接触的球-盘往复摩擦磨蚀试验机 (RTEC MFT5000), 并连接电化学工作站 (Modulab, Solartron Analytical) 进行测试。选用 Al_2O_3 块 (18 mm×18 mm×5 mm) 作为对磨材料, Al_2O_3 陶瓷具有高硬度、高耐腐蚀性且不导电, 对电化学测试结果的影响较小。 Al_2O_3 块的表面粗糙度为 0.3 μm 。样品的暴露面积为 0.28 cm^2 。为了更容易地研究合金的腐蚀磨损, 设计了一种圆柱试样磨蚀夹具, 测试时, 样品的一段暴露于测试溶液中, 另一段通过上部压力自密封, 这种试验方式避免了样品需要封样的麻烦, 详细的实验装置见参考文献[12]。测试期间, 固定的样品作上试样, 而固定于测试槽内的 Al_2O_3 块作下试样。为了提高实验的重复性, 用人工海水代替天然海水来研究 Monel 400 合金的腐蚀磨损行为, 因为天然海水会随着海域和季节的变换而变化。

人工海水根据 ASTM D1141-98 来制备, 化学成分如表 1 所示, 海水的 pH 用 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液调节到 8.2。电化学实验采用三电极体系: Monel 400 合金作为工作电极, 铂电极作为对比电极, Ag/AgCl (3.5 mol/L KCl 溶液) 电极作为参比电极。测试溶液为人工海水, 在聚四氟乙烯测试槽内加入 40 mL 人工海水。摩擦试验机的参数设置: 恒定加载力 200 N, 滑动距离 5 mm, 滑动频率 2 Hz。传感器实时监测样品滑动时的摩擦系数。

为了研究恒电位对 Monel 400 合金腐蚀磨损的影响, 做了以下 3 个系列的实验:

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

1) 开路电位 (OCP)。摩擦前, 样品先在开路电位下稳定 10 min, 然后开始摩擦, 摩擦持续 60 min, 摩擦停止后再稳定浸泡 10 min, 全程记录开路电位的变化。

2) 动电位极化实验。动电位极化实验包括测试不摩擦和摩擦状态下的极化曲线, 做极化曲线测试前, 先记录开路电位的变化, 等开路电位稳定后开始做极化测试, 电位扫描范围为 -0.8~+1 V, 扫描速率为 1 mV/s。自腐蚀电位 (E_{corr}) 和自腐蚀电流密度 (J_{corr}) 等参数通过塔菲尔外推法得到。

3) 恒电位下的磨蚀。在恒定的外加电位下进行磨蚀实验, 同时记录电流密度和摩擦系数的变化。外加恒电位总共持续 80 min: 摩擦开始前加 10 min, 摩擦 60 min, 摩擦结束后加 10 min。

为了验证实验的重复性, 相同条件下的实验至少重复 3 次。本文所有的电位值都是相对于 Ag/AgCl 参比电极。

1.3 表征

使用场发射扫描电镜 (FEI Quanta FEG 250) 观察磨痕的表面形貌, 并做 EDS 分析。不同电位下的磨蚀实验完成后, 将样品在丙酮中超声清洗, 然后用分辨率为 0.1 mg 的分析天平称量并计算材料的体积损失量, 计算公式为:

$$V = \frac{m_0 - m_1}{\rho} \quad (1)$$

式中: V 为总的体积损失量 (mm^3); m_0 为磨蚀前样品的质量 (mg); m_1 为磨蚀后样品的质量 (mg); ρ 为材料密度。

2 结果与讨论

2.1 滑动接触对腐蚀反应的影响

利用腐蚀磨损试验机和电化学工作站, 对腐蚀磨损过程中的 Monel 400 合金的开路电位变化进行分析, 图 1 为 Monel 400 合金在 200 N 载荷下, 滑动前、滑动过程中和滑动后的开路电位变化。滑动开始前, 随浸泡时间的增加, 开路电位出现缓慢增大, 这是由于浸泡导致 Monel 400 合金表面生成了致密和完整的钝化膜, 一旦摩擦开始, 开路电位急剧降低并逐渐达到稳定, 滑动停止后开路电位逐渐升高, 并逐渐达到了初始滑动前的电位值。开路电位反映材料在腐蚀性

溶液的电化学状态, Monel 400 合金浸入海水时会形成钝化膜, 因此初始浸泡时开路电位逐渐增加。摩擦导致表面钝化膜的破坏甚至去除, 新露出的表面电化学活性更高^[13-14], 因此耐腐蚀性下降, 表现出的电信号即是开路电位的降低。摩擦停止后, 表面发生了再钝化, 重新生成了钝化膜, 因此开路电位又增加到了初始值。开路电位的变化表明摩擦促进了腐蚀。

为了进一步研究摩擦对 Monel 400 合金在海水中的腐蚀行为的影响, 测试了静态极化曲线和摩擦状态下的极化曲线, 如图 2 所示。自腐蚀电位 (E_{corr}) 和自腐蚀电流密度 (J_{corr}) 通过塔菲尔外推法从极化曲线上得到, 结果如表 2 所示。静态极化曲线和摩擦状态的极化曲线最明显的不同在于: 静态极化曲线存在明显的钝化区, 而摩擦状态的极化曲线不存在钝化区。主要原因是摩擦去除了表面钝化膜, 在摩擦状态下极化金属表面不能形成钝化层, 因此极化曲线不存在钝

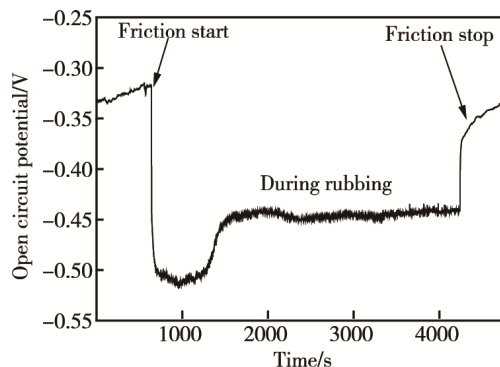


图 1 Monel 400 合金开路电位随时间的变化
Fig.1 The open-circuit potential of Monel 400 alloy changing with the time

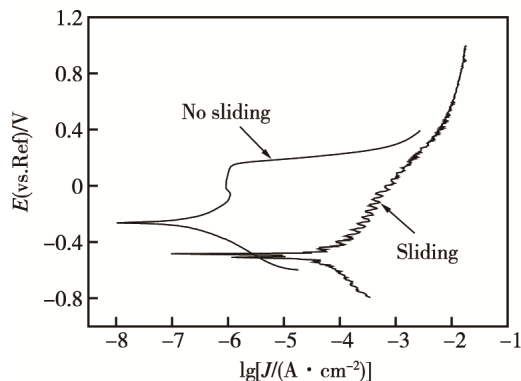


图 2 Monel 400 合金在静态及滑动时的极化曲线
Fig.2 Polarization curves for Monel 400 alloy under static state and sliding

化区。滑动磨蚀状态下的极化曲线阳极区出现了电流波动，原因是摩擦破坏了合金表面的钝化膜，而 Monel400 合金的再钝化能力较强，因此表面钝化膜的去除和再恢复导致了电流波动。相比于静态时的参数，摩擦状态下的自腐蚀电位明显降低，并且自腐蚀电流密度明显增加。极化曲线的数据也表明摩擦促进了腐蚀。

表 2 Monel 400 合金的电化学参数

Tab.2 Electrochemical parameters for Monel 400 alloy

Condition	$J_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	E_{corr}/V
No sliding	0.04	-0.2617
Sliding	34.96	-0.4783

2.2 外加恒电位对腐蚀磨损行为的影响

为了研究恒电位对 Monel400 合金腐蚀磨损行为的影响，在恒电位下进行摩擦实验，记录每一个恒电位下磨蚀实验的腐蚀电流密度和摩擦系数。在 5 个电位下（-0.6 V，OCP，+0.3 V，+0.6 V，+0.9 V）进行磨蚀实验。-0.6 V 是阴极保护电位，此时电位值比极化曲线的自腐蚀电位低，在此电位下进行磨蚀实验，材料只存在磨损，外加此电位的目的是为了计算磨蚀损失量中的纯磨损量。开路电位下磨蚀是为了模拟材料在工作条件下的电化学状态。外加阳极电位的目的是为了促进腐蚀，凸显腐蚀磨损的交互作用。

2.2.1 不同电位下摩擦电流密度的变化

图 3 为外加不同恒电位时，Monel 400 合金在腐蚀磨损过程中电流密度的变化。外加-0.6 V 电位时，电流密度为负值，表明没有腐蚀发生，此时合金处于良好的阴极保护状态下。当外加阳极电位时，电流密度变为正值，并且电位越正，腐蚀电流密度越大，表明外加电位的增加促进了合金的腐蚀。外加阳极电位下，摩擦开始前的电流密度比摩擦过程中的电流密度低，主要由于摩擦开始前表面存在钝化膜，摩擦导致

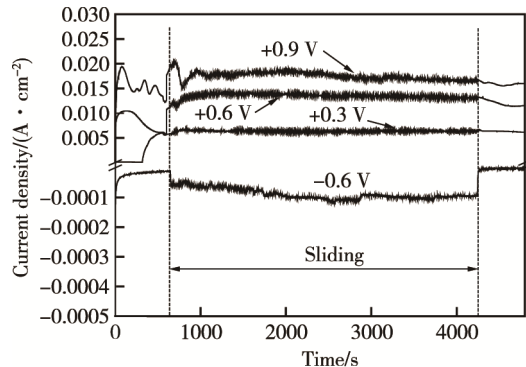


图 3 Monel 400 合金在海水环境中不同电位下的腐蚀电流密度

Fig.3 The corrosion current density of Monel 400 alloy in seawater under different potentials

钝化膜破坏，新的金属表面的电化学活性更高，因此腐蚀电流密度更大，这表明摩擦促进了腐蚀。Monel 400 合金在不同外加电位下的电流变化与其他学者研究钝化材料的结果相似^[13,15-16]。

2.2.2 不同电位下摩擦系数的变化

图 4a 和 b 分别为 Monel 400 合金在海水环境中不同恒定电位下的摩擦系数曲线和平均摩擦系数。从摩擦系数曲线可以看出，初始摩擦系数较高，然后逐渐降低到稳态值。所用对磨材料为 Al₂O₃ 块，对磨块表面存在微凸体，因此初始摩擦时的摩擦系数较高，随着摩擦的进行，表面微凸体受正应力的影响逐渐产生屈服疲劳，最终剥落成小磨屑，这些小磨屑在有限的接触区域内扮演着“滚珠润滑”的作用，因此随着摩擦的进行，摩擦系数降低并逐渐趋于稳定。如图 4b 所示，随外加电位的增加，平均摩擦系数逐渐降低。外加电位越正，金属阳极反应越快，反过来又促进了阴极氧的去极化反应，导致产生了更多的 OH⁻，海水中的活性元素（比如 Mg²⁺、Ca²⁺）会与 OH⁻反应生成 Mg(OH)₂ 及 CaCO₃ 沉淀，它们在海水具有良好的润滑性^[17-19]，因此摩擦系数随着电位的增加而降低。

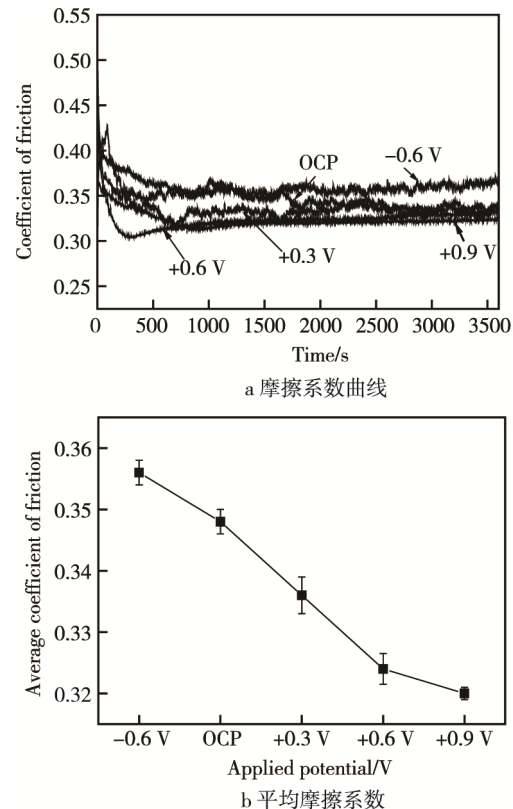


图 4 Monel 400 合金在海水环境中不同电位下的摩擦系数曲线和平均摩擦系数

Fig.4 The friction coefficient curve and average friction coefficient for Monel 400 alloy in seawater under different potentials

2.3 磨损行为

图 5 为不同电位的 Monel 400 合金在人工海水中

的磨损体积损失量,发现随着外加电位的增加,磨损体积损失量增加,在-0.6 V的电位下,材料处于阴极保护状态,金属的腐蚀溶解可以忽略,此时合金的体

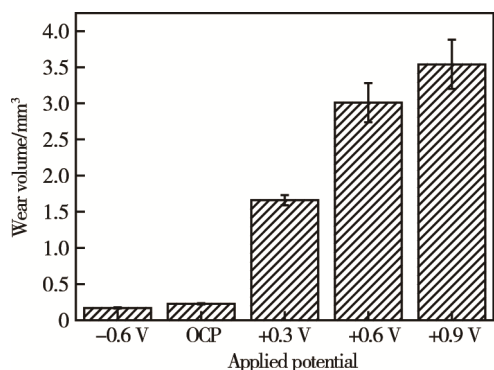


图5 不同电位下的总体积损失量

Fig.5 The total volume loss under different potentials

积损失全部来自磨损损失。在阳极电位和开路电位的条件下,材料损失量明显增加,此时存在着腐蚀,表明腐蚀促进了磨损,腐蚀与磨损存在着明显的交互作用。

图6为Monel 400合金在不同外加电位下磨蚀后的表面形貌及相关区域的能谱分析。-0.6 V阴极保护的磨损表面出现了明显犁沟,表明主要的磨损机制为磨粒磨损,此时合金处于阴极保护状态,金属腐蚀可以忽略,材料的去除主要来自于力学作用。在开路电位及阳极电位下,表面也存在明显的犁沟,同时腐蚀区域也出现在磨损表面,电位越正,腐蚀越严重。+0.9 V电位下的磨损面出现了明显的腐蚀裂纹和腐蚀坑,腐蚀区域的能谱分析表明存在大量氧化物,腐蚀非常严重,并且Ni含量相对较少,而Cu含量非常高,这是因为Ni(-0.72 V)的标准电极电位比铜(-0.22 V)低,发生腐蚀时会选择性地优先腐蚀Ni^[20-22]。

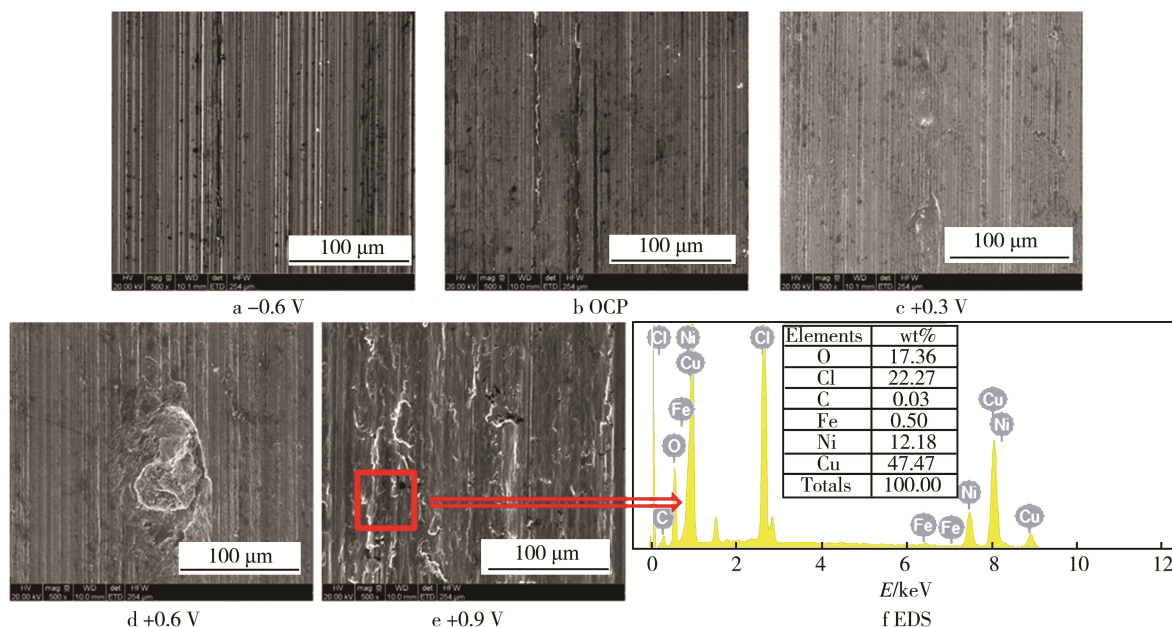


图6 不同外加电位下磨蚀后表面的扫描电镜形貌及相关的能谱分析

Fig.6 SEM morphologies of worn surface after tribocorrosion under different applied potentials and corresponding EDX spectrums

2.4 腐蚀磨损交互作用

腐蚀磨损导致材料的总体积损失量可以分为纯磨损量(V_w)、纯腐蚀量(V_c)以及腐蚀磨损交互作用量,可表示成:

$$V_T = V_w + V_c + \Delta V \quad (2)$$

式中: V_T 为腐蚀磨损中总的体积损失量; V_w 为纯磨损量; V_c 为纯腐蚀量; ΔV 为腐蚀磨损交互作用量。 ΔV 又可以分为磨损对腐蚀的促进量(ΔV_{wc})和腐蚀对磨损的促进量(ΔV_{cw})。由于Monel 400合金具有非常好的耐腐蚀性,因此纯腐蚀量非常小,因此 V_c 可以忽略。

公式(2)可以改写为:

$$V_T = V_w + \Delta V_{wc} + \Delta V_{cw} \quad (3)$$

磨损对腐蚀的促进量可以用法拉第公式计算:

$$\Delta V_{wc} = ItM / (nF\rho) \quad (4)$$

式中: I 为摩擦期间的平均电流,开路电位下的电流通过塔菲尔外推法从滑动过程中的极化曲线获得; t 为摩擦时间; F 为法拉第常数(96 500 C/mol); ρ 为Monel 400合金的密度(8.83 g/cm³); M 为合金的摩尔质量, $M = \sum X_i M_i$ 计算,其中 X_i 为摩尔分数, M_i 为合金元素的摩尔质量(Ni和Cu); n 为阳极反应的价电子数,其值为2。本实验中, V_T 根据称量法得到, V_w 根据-0.6 V阴极保护的材料损失量得到, ΔV_{cw} 根据公式(3)得到。+0.6 V和+0.9 V超过了合金的点蚀电位,并且从磨损面的扫描电镜图也可以发现存在

着点蚀区域，因此法拉第定律已不适用。本文没有计算这两个电位的交互作用。腐蚀磨损交互作用的量如表 3 所示。从交互作用量的数据来看，电位越正，交互作用量所占的比例越大，尤其表现在腐蚀对于磨损的促进量上，腐蚀对于磨损的促进量是主要的交互作用机制。

表 3 不同电位下的腐蚀磨损交互作用数据
Tab.3 Wear and corrosion interactive data under different potentials

Poten- tial/V	$V_T /$ mm^3	$V_w /$ mm^3	$V_{cw} /$ mm^3	$V_{wc} /$ mm^3	$\Delta V /$ mm^3	$\Delta V / V_T$
-0.6	0.17	0.17	0	0	0	0
OCP	0.23	0.17	0.06	1.25×10^{-4}	0.06	0.26
0.3	1.66	0.17	1.22	0.279	1.49	0.89

摩擦能够破坏合金表面的钝化膜，导致具有更高电化学活性的新表面暴露于溶液中，因此促进了表面腐蚀，而腐蚀产生的腐蚀产物层比较粗糙和疏松，其剪切强度比基底合金低得多，因此当氧化铝块摩擦过合金表面时，很容易去除腐蚀产物层，进而促进了材料损失。腐蚀磨损条件下材料的损失量明显比纯磨损条件下的高。

3 结论

- 1) 由于表面生成钝化膜，Monel 400 合金在海水 中浸泡时开路电位缓慢增加，在摩擦过程中的开路电 位比未摩擦时的低。摩擦导致更低的自腐蚀电位和更 高的自腐蚀电流密度。
- 2) 随外加电位的增加，腐蚀电流增加，而摩擦 系数降低。外加正电位促进阳极反应导致电流增加， 氧的去极化反应产生氢氧根离子，海水中的活性元素 （比如 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} ）会与 OH^- 反应生成 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 及 CaCO_3 沉淀，它们在海水具有良好的润滑性，导致 摩擦系数随电位的增加而降低。
- 3) 腐蚀磨损存在交互作用，腐蚀对于磨损的促 进量是主要的交互作用机制。

参考文献：

[1] SHERIF E S M. Effects of Exposure Time on the Anodic Dissolution of Monel-400 in Aerated Stagnant Sodium Chloride Solutions[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2012, 16(3): 891-899.

[2] RANGARAJAN S, BERA S, NARASIMHAN S V. Electrochemical and Surface Analytical Study of the Formation of Oxide Films on Monel-400 and Copper in Alkaline Media[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 1998, 2(2): 94-98.

[3] SALASI M, STACHOWIAK G B, STACHOWIAK G W. New Experimental Rig to Investigate Abrasive-corrosive Characteristics of Metals in Aqueous Media[J]. Tribology Letters, 2010, 40(1): 71-84.

[4] SALASI M, STACHOWIAK G. Tribo-electrochemical Behaviour of 316L Stainless Steel: The Effects of Contact Configuration, Tangential Speed, and Wear Mechanism[J]. Corrosion Science, 2015, 98: 20-32.

[5] CHEN J, WANG J, CHEN B, et al. Tribocorrosion Behaviors of Inconel 625 Alloy Sliding Against 316 Steel in Seawater[J]. Tribology Transactions, 2011, 54 (4): 514-522.

[6] LANDOLT D, MISCHLER S, STEMP M. Electrochemical Methods in Tribocorrosion: A Critical Appraisal[J]. Electrochimica Acta, 2001, 46(24): 3913-3929.

[7] MISCHLER S. Triboelectrochemical Techniques and Interpretation Methods in Tribocorrosion: A Comparative Evaluation[J]. Tribology International, 2008, 41 (7): 573-583.

[8] SINGH V B, GUPTA A. The Electrochemical Corrosion and Passivation Behaviour of Monel (400) in Concentrated Acids and Their Mixtures[J]. Journal of Materials Science, 2001, 36(6): 1433-1442.

[9] ALI J A, AMBROSE J R. The Relationship between Copper Component Dissolution Kinetics and the Corrosion Behaviour of Monel-400 Alloy in De-aerated NaCl Solutions[J]. Corrosion Science, 1992, 33(7): 1147-1159.

[10] SHERIF E S M. Effects of Exposure Time on the Anodic Dissolution of Monel-400 in Aerated Stagnant Sodium Chloride Solutions[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2012, 16(3): 891-899.

[11] RANGARAJAN S, BERA S, NARASIMHAN S V. Electrochemical and Surface Analytical Study of the Formation of Oxide Films on Monel-400 and Copper in Alkaline Media[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 1998, 2(2): 94-98.

[12] 朱禄发. 316L、2205 不锈钢的海水腐蚀磨损行为研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2016.

ZHU Lu-fa. Study on the Tribocorrosion Behavior of 316L Stainless Steel and 2205 Duplex Steel in Seawater[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016

[13] ZHANG Y, YIN X, YAN F. Effect of Halide Concentration on Tribocorrosion Behaviour of 304SS in Artificial Seawater[J]. Corrosion Science, 2015, 99: 272-280.

[14] MAHDI E, RAUF A, ELTAI E O. Effect of Temperature and Erosion on Pitting Corrosion of X100 Steel in Aqueous Silica Slurries Containing Bicarbonate and Chloride Content[J]. Corrosion Science, 2014, 83: 48-58.

[15] SUN Y, HARUMAN E. Tribocorrosion Behaviour of Low Temperature Plasma Carburised 316L Stainless

- Steel in 0.5 mol/L NaCl Solution[J]. Corrosion Science, 2011, 53(12): 4131-4140.
- [16] CHEN J, WANG J, YAN F, et al. Effect of Applied Potential on the Tribocorrosion Behaviors of Monel K500 Alloy in Artificial Seawater[J]. Tribology International, 2015, 81: 1-8.
- [17] YAN J F, WHITE R E, GRIFFIN R B. Parametric Studies of the Formation of Calcareous Deposits on Cathodically Protected Steel in Seawater[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1993, 140(5): 1275-1280.
- [18] DESLOUIS C, FESTY D, GIL O, et al. Characterization of Calcareous Deposits in Artificial Seawater by Impedance Techniques-I. Deposit of CaCO_3 without $\text{Mg}(\text{OH})_2$ [J]. Electrochimica Acta, 1998, 43(12): 1891-1901.
- [19] REFAIT P, JEANNIN M, SABOT R, et al. Corrosion and Cathodic Protection of Carbon Steel in the Tidal Zone: Products, Mechanisms and Kinetics[J]. Corrosion Science, 2015, 90: 375-382.
- [20] ALI J A, AMBROSE J R. The Relationship between Copper Component Dissolution Kinetics and the Corrosion Behaviour of Monel-400 Alloy in De-aerated NaCl Solutions[J]. Corrosion Science, 1992, 33(7): 1147-1159.
- [21] SHERIF E, ALMAJID A, BAIRAMOV A, et al. Corrosion of Monel-400 in Aerated Stagnant Arabian Gulf Seawater after Different Exposure Intervals[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2011, 6: 5430-5444.
- [22] BLUNDY R G, PRYOR M J. The Potential Dependence of Reaction Product Composition on Copper- Nickel Alloys[J]. Corrosion Science, 1972, 12(1): 65- 75.