

应力应变下 TC2 钛合金在模拟海水环境中的腐蚀行为

边美华, 彭家宁, 尹立群, 梁庆国, 张兴森

(广西电网有限责任公司 电力科学研究院, 南宁 530023)

摘 要: **目的** 研究 TC2 钛合金在模拟海水中的表面电化学及腐蚀行为, 以及不同形变对其的影响。**方法** 制备 U 形试样, 进行模拟海水浸泡试验, 采用电位测试、交流阻抗及极化曲线测试、扫描电镜 (SEM)、X 射线衍射 (XRD) 等方法进行分析。**结果** 在 240 d 模拟海水中浸泡试验期间, 无形变 TC2 钛合金表面钝化膜阻抗值随时间延长, 先迅速增加, 后缓慢增加, 腐蚀电位持续升高, 因此其表面电化学反应下降, 腐蚀速率较低。45°形变 TC2 钛合金试样的表面钝化膜阻抗值先略微上升, 后下降, 最终低于初始阻抗值。90°形变试样的表面钝化膜阻抗值持续下降。经过 240 d 浸泡后, 无形变的试样表面出现微小的点蚀, 45°形变试样表面点蚀密度增加, 90°形变试样表面垂直压应力方向出现裂纹。XRD 结果显示, 形变处 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子的吸附增加, 这可能与表面粗糙度增大, TC2 钛合金表面活性增加有关。**结论** 在模拟海水环境中, 无应变试样耐腐蚀性较强, 应变导致 TC2 钛合金表面钝化膜破裂, 点蚀增加, 甚至出现裂纹, 增加了 TC2 钛合金的应力腐蚀敏感性。

关键词: TC2 钛合金; 电化学; 形变; 应力腐蚀

中图分类号: TG172.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2019)04-0270-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.04.038

Corrosion Behavior of TC2 Titanium Alloy under Strain-stress in Simulated Seawater

BIAN Mei-hua, PENG Jia-ning, YIN Li-qun, LIANG Qing-guo, ZHANG Xing-sen

(Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd, Nanning 530023, China)

ABSTRACT: The work aims to study the electrochemical and corrosion behavior of TC2 titanium alloy in simulated seawater and the effect of deformation. U-shaped sample was prepared and simulated seawater immersion test was conducted. Potential test, polarization curve test, electrochemical impedance spectroscopy, SEM and XRD were employed for analysis. During 240 d immersion test in simulated seawater, the impedance value of non-shaped sample surface passive film rapidly increased initially and then slowly increased as time prolonged, and the corrosion potential continued to increase, so the surface electrochemical reaction decreased and the corrosion rate was low. The impedance value of 45° deformation sample surface passive film initially increased slightly and then decreased and finally dropped below the initial impedance values. The impedance value of 90° deformation sample surface passive film steady declined during test period. After 240 d immersion test, minor pitting appeared on

收稿日期: 2018-10-26; 修订日期: 2018-12-24

Received: 2018-10-26; Revised: 2018-12-24

基金项目: 广西电网有限责任公司科技项目 (GXKJXM20160322)

Fund: Supported by Research project of Guangxi Power Grid Co., Ltd (GXKJXM20160322)

作者简介: 边美华 (1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为金属部件无损检测及失效分析。邮箱: bian_mh.sy@gx.csg.cn

Biography: BIAN Mei-hua (1980—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: nondestructive testing and failure analysis of metal parts.
E-mail: bian_mh.sy@gx.csg.cn

non-shaped sample surface, the pitting density of 45° deformation sample surface increased, and 90° deformation sample surface had cracks perpendicular to the direction of stress. XRD results showed that the adsorption of Ca^{2+} and Mg^{2+} ion increased at the deformation, which may be related to the surface roughness and surface activity of TC2 titanium alloy increase. In simulated seawater, the non-shaped TC2 titanium alloy has strong anti-corrosion properties and strain causes breakage, pitting and even cracks on passive film of TC2 titanium alloy, thus increasing stress corrosion sensitivity of TC2 titanium alloy.

KEY WORDS: TC2 titanium alloy; electrochemistry; deformation; stress corrosion crack

海洋环境具有极强的腐蚀性,严重威胁着海洋工程机械的安全运行^[1]。在服役过程中,材料除了要承受自身的重力和运行过程中的应力外,还要承受海洋环境(海风、海浪和海流)以及作业过程中的循环应力。这些因素会造成材料的受力及变形,加速材料的腐蚀。钛及其合金的强度高而密度小,具有优良的耐海水腐蚀性、可成型性及可焊性^[2-3],因此被广泛应用于海水淡化、海洋石油生产开采、船舰结构件等^[4-6]。在自然环境中,钛会和氧气反应形成致密的钝化膜,这种钝化膜很薄,通常只有几个分子层的厚度,同时具有良好的稳定性和自愈性,当钝化膜被破坏时能迅速自行修复,可以有效减缓基体的腐蚀^[7-8]。应力腐蚀开裂是造成材料断裂失效的主要原因之一,研究表明,环境对钛合金的应力腐蚀开裂行为有明显的影响^[9]。

发生应力腐蚀开裂的初期,金属材料表面应力应变集中的部位会优先腐蚀,塑性变形对阴极和阳极反应都存在明显的促进作用^[10,13]。研究表明,应力应变对腐蚀速率的影响并非单一增加,而是具有一定的波动性,这主要由应变下金属材料表面活性改变以及位错露头引起^[14]。LIU 等^[10,15]发现应力应变与电化学反应的协同作用,会在表面缺陷部位产生局部附加电位,促进腐蚀反应。另外,高应变会改变金属表面的粗糙度,增加位错密度,同时会促进氢在金属表面的吸附^[16]。不仅如此,应力应变还会破坏表面钝化膜的

完整性。目前 TC2 钛合金在海洋环境下应力腐蚀开裂行为研究处于初步阶段,应力应变条件下的表面电化学腐蚀行为研究尚为盲区。因此研究钛合金表面钝化层在应力应变下的电化学行为,对揭示钛合金钝化膜在海水环境下的破坏特征和机理有重要意义。

综上,本文以 TC2 钛合金为研究对象,采用 U 型弯试样浸泡、电化学测试,并结合 SEM、XRD 等方法研究了不同应变条件下,TC2 钛合金在模拟海水中的电化学行为,并探讨了 TC2 钛合金表面钝化膜的变化过程、表面形貌的变化情况以及表面离子的吸附状况。

1 实验

1.1 实验材料及溶液

实验材料为 TC2 钛合金,其化学成分见表 1。将试样用砂纸湿磨至 2000#(确保前一道划痕抹去后,再打磨下一道),机械抛光后使用酒精清洗吹干。然后用侵蚀液(1 mL HF+2 mL HNO_3 +97 mL 去离子水)腐蚀 1~1.5 min,无水乙醇洗净后吹干,采用 VHX-2000c 体视显微镜观察金相组织(图 1)。由图中可以看出,TC2 钛合金金相组织为均匀的 $\alpha+\beta$ 等轴组织。试验溶液为人工模拟海水,主要成分见表 2^[17]。使用低浓度的 HCl 和 NaOH 溶液调节 pH 值为 8.2。

表 1 实验用 TC2 钛合金化学成分
Tab.1 Chemical composition of TC2 titanium alloy

										wt.%
Element	Al	Fe	Ni	Cr	Mn	C	N	O	H	Ti
Content	4.33	<0.1	<0.1	<0.005	1.5	0.032	0.0051	0.13	0.0024	Bal.

1.2 电化学实验

将试样切割为 10 mm×10 mm×5 mm 的方块,用锡丝将铜导线焊接在测试面背面,采用环氧树脂封装,保留 1 cm²的工作面积。实验前将工作面用水砂纸逐级打磨至 2000#,并用去离子水和酒精清洗,冷风吹干待用。电化学测试采用标准三电极体系^[18],待测试样为工作电极,铂片为辅助电极,饱和甘汞电极

(SCE)为参比电极。

采用美国 Gamry Reference 3000 电化学工作站进行电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)和动电位极化曲线测试。在开路电位稳定后,测试电化学阻抗谱,交流正弦波幅值为 10 mV,频率扫描范围为 10⁵~10⁻² Hz。动电位极化曲线扫描范围为-0.6~6 V(相对于开路电位),扫描速率为 1 mV/s。

表 2 人工海水化学成分
Tab.2 Chemical compositions of simulated seawater

Composition	NaCl	MgCl ₂	Na ₂ SO ₄	CaCl ₂	KCl	NaHCO ₃	H ₃ BO ₃	SrCl ₂	NaF
Concentration	24.53	5.20	4.09	1.16	0.695	0.201	0.027	0.025	0.003

g/L

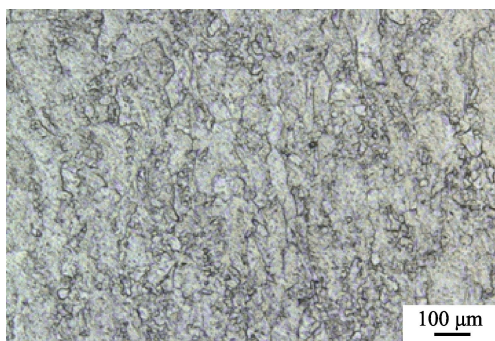


图 1 实验用 TC2 钛合金显微组织形貌
Fig.1 Microstructure of TC2 titanium alloy used in experiment

1.3 U 型弯试样浸泡实验

U 型弯试样的制作参考标准 ASTM G30—2003,

试样制备形状尺寸如图 2 所示。试样依次湿磨至 2000#砂纸, 且最终打磨方向与下压方向垂直。打磨完成后, 用冷风吹干待用。采用标准加载方式加载试样, 压头处于试样中间, 缓慢将其压弯至张角($30 \pm 1^\circ$), 然后用螺栓缓慢加载至张角为 0° , 采用游标卡尺控制内侧间距均为 (24.5 ± 0.2) mm, 试样与螺栓之间采用聚四氟乙烯垫圈隔开, 避免螺栓与试样接触处, 产生电偶腐蚀。

加载后的 U 型弯试样如图 3 所示。以圆弧中心点为圆心点, U 形弯顶端正中心为 90° , 两平行边与弯弧的点为 0° , 以此来标记 U 形弯的不同位置。其中 0° 试样不做处理; 45° 试样采用硅胶密封其他部位, 并在 45° 处外缘留 1 cm 宽度不密封, 用作测试面; 90° 试样采用硅胶密封其他部位, 并在 90° 处外缘留 1 cm 宽度不密封, 用作测试面。

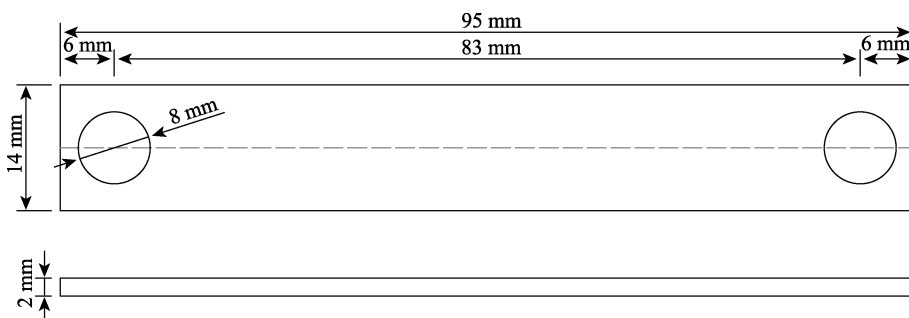


图 2 加载应力前 U 型弯试样尺寸
Fig.2 Size of U-specimens before load stress

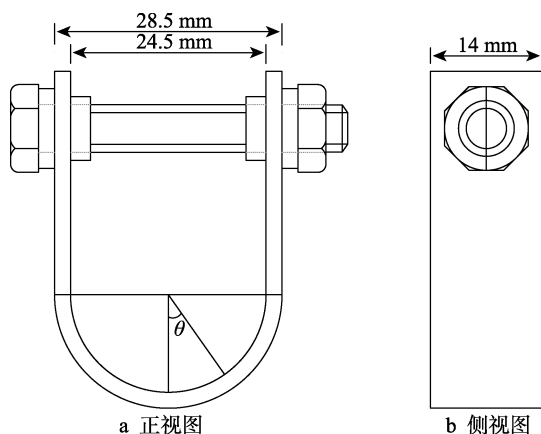


图 3 加载应力后的 U 型弯试样示意图

Fig.3 Schematic diagram of U-specimens after load stress:
a) front view; b) side view

分别间隔 5 h、15 h、27 h、48 h、30 d、60 d、120 d、240 d 对 U 型弯试样平行边两边 (0°)、弧顶方向 (90°) 和弧顶两侧 (45°) 部位进行电化学阻抗

测试, 每隔 15~30 d 进行极化曲线测量。在浸泡过程中观察 U 型弯不同角度处表面形貌的变化, 并对表面沉积物进行 XRD 成分分析。其中阻抗测量在同一个试样表面进行, 测试后继续进行浸泡; 极化曲线在取出的试样上进行, 测试后不再进行浸泡试验, 形貌在取出的试样上截取一段进行观察。同时截取试样在室温、0.01 mol/L 稀盐酸中超声清洗 3 min, 清洗结束后用去离子水冲洗, 冷风吹干后采用 FEI Quanta 250 扫描电镜观察清洗后的表面形貌, XRD 成分分析采用 Rigaku 日本理学 X 射线衍射仪进行。

2 实验结果与讨论

2.1 TC2 钛合金在模拟海水环境中的电化学位行为

图 4 为 TC2 钛合金在模拟海水中开路电位的变化曲线。从图中可以看出, 随着浸泡时间的延长, 开

路电位逐渐上升,且浸泡初期电位上升较快,后期电位变化逐渐减小并趋于稳定。说明在人工海水中,TC2 钛合金钝化膜逐渐变得致密,有效阻碍了电化腐蚀的产生,在浸泡 100 d 后,钝化膜逐渐稳定。

图 5 是 TC2 钛合金在模拟海水中的电化学阻抗谱图。从图 5a 中可以看出,随浸泡时间的延长,容抗弧半径逐渐增大,说明随浸泡时间的增加,离子的交换过程受到抑制。图 5b 中随着测试频率的降低,相位角迅速增加,并且在很宽的频率范围内保持在 80°附近,且随着浸泡时间延长低频区的相位角下降不明显,说明钝化膜比较完整,表现出较好的耐蚀性。

图 6 为电化学阻抗谱拟合的等效电路,因为在浸泡初期,试样表面钝化膜层不完整,且只有一个容抗弧,所以采用 $R(QR)$ 等效电路(图 6a)进行拟合。其中 R_s 代表溶液电阻, CPE_{dl} 为双电层电容, R_{ct} 代表双电层电荷转移电阻。当试样在溶液中浸泡时间超过 5 h 后,试样表面被一层钝化膜覆盖,因此采用如图 6b 所示的等效电路进行拟合,其中 R_s 代表溶液电阻, CPE_{dl} 代表双电层电容, R_{ct} 代表双电层电荷转移电阻, CPE_{dlf} 代表试样和膜层之间的电容, R_f 代表膜层电阻,各电路元件数值拟合结果如表 3 所示。从表 3 中可以

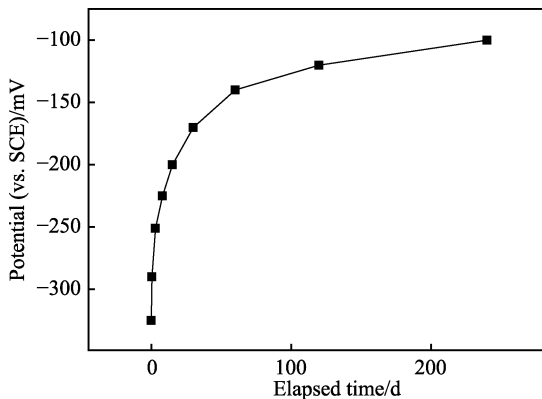


图 4 TC2 钛合金在模拟海水中的开路电位随浸泡时间的变化
Fig.4 Variation of open current potential of TC2 titanium alloy with immersion time in simulated seawater

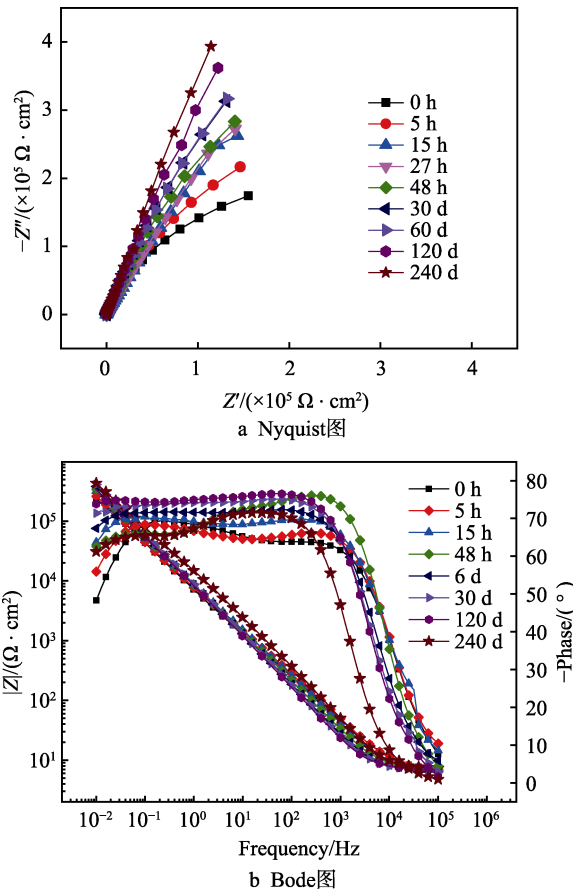


图 5 TC2 钛合金在模拟海水中不同浸泡时间后的电化学阻抗谱
Fig.5 Variation of EIS of TC2 titanium alloy after different immersion time in simulated seawater:
a) Nyquist graph; b) Bode graph

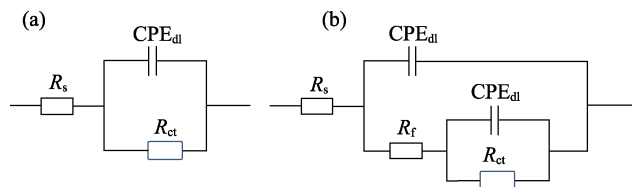


图 6 等效电路
Fig.6 Equivalent circuit

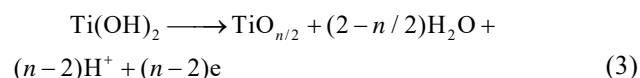
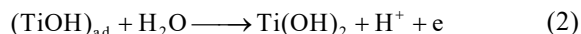
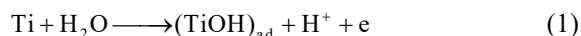
表 3 TC2 钛合金在模拟海水环境中经历不同浸泡时间后的电化学阻抗谱拟合
Tab.3 Electrochemical impedance spectroscopy analysis results of TC2 titanium alloy after different immersion time in simulated seawater

Time/h	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$CPE_{dl}/(\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{n-1})$	$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$CPE_{dlf}/(\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{n-1})$	$R_f/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
0	6.601	22.11	1602	—	—
5	6.481	19.72	2914	11.35	1.126×10^6
15	6.034	20.79	6434	6.743	2.833×10^6
27	6.95	20.39	7408	13.38	5.112×10^6
48	6.73	20.17	8780	14.35	1.405×10^7
720	6.493	24.09	1.511×10^6	15.33	2.135×10^{10}
1440	6.584	26.15	4.64×10^6	16.42	1.213×10^{15}
2880	7.674	25.27	4.767×10^6	14.01	1.421×10^{15}
5760	7.363	23.36	4.918×10^6	15.29	4.927×10^{15}

看出,双电层和膜层电容值变化不大,但是双电层电阻值和膜层电阻值迅速增加,且膜层电阻值远大于双电层电阻值,说明在本实验时间内,随着时间的延长,钝化膜阻抗性增加。该实验结果与图4实验结果相吻合。

图7为TC2钛合金在模拟海水条件下不同浸泡时间后的极化曲线。可以看出,在活化区,随着浸泡时间的延长,腐蚀电位(零电流电位)出现正移,说明其耐腐蚀性增加。当极化电位达到1V时,试样表现出钝化现象。此时钛合金表面的氧化反应,可用反

应式1—4表示:



当扫描极化电位达到2V时,不同浸泡时间的TC2钛合金的极化电流出现差异性,这主要与试样在浸泡后表面出现微小点蚀坑有关。

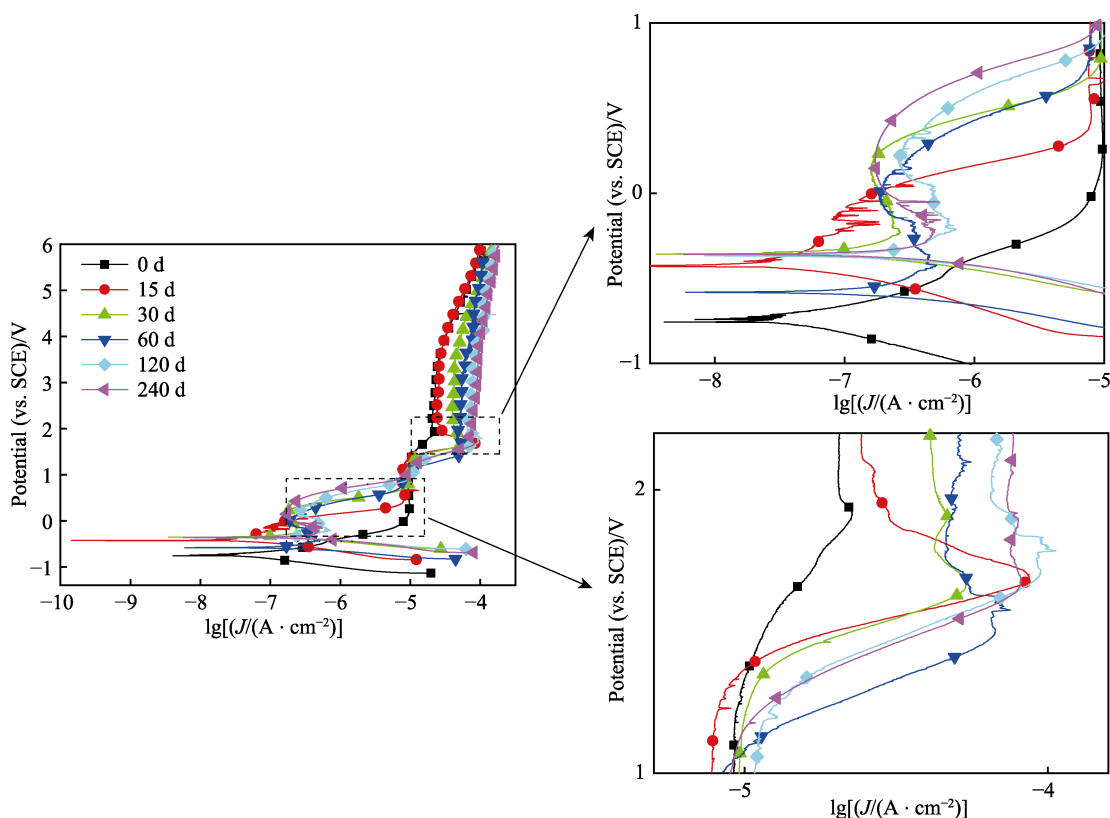


图7 TC2钛合金在模拟海水环境中的极化曲线

Fig.7 Polarization curves of TC2 titanium alloy with different immersion time in simulated seawater

2.2 形变对TC2钛合金在海水环境中的电化学行为的影响

图8是U形弯TC2钛合金试样在模拟海水中的电化学阻抗谱。图8a和b为45°处不同浸泡时间下的Nyquist图和Bode图,图8c和d是为90°处不同浸泡时间下的Nyquist图和Bode图。从图8a和c中可以观察到,两处试样都只有一个容抗弧,且随着浸泡时间的延长,容抗弧半径呈减小趋势。从图8b和d中可以看出,随着浸泡时间的延长,低频区相位角下降,说明形变后,TC2钛合金表面的状态发生了变化。

采用图6的等效电路对图8的结果进行拟合,膜层电阻和电荷转移电阻见图9a和b。在图9a中,对

于未发生形变的试样,双电层电荷转移电阻随着浸泡时间的延长而增加,在60d后趋于稳定。当形变发生后,前60d电荷转移电阻略微增加,随后开始下降减小,在整个试验过程中呈现减小趋势。图9b中,对于未发生形变的试样,膜层电阻值在试验过程中增加,而对于发生形变的试样,膜层电阻值持续减小,说明形变对TC2合金表面钝化膜有一定的破坏作用。

图10是不同浸泡时间下,形变TC2钛合金在模拟海水中的极化曲线,10a和b分别是U型弯45°和90°的测量结果。从图中可看出,随着浸泡时间的延长,发生形变后的试样在活化区没有明显的变化;在钝化区变化趋势与无形变试样的钝化区趋势相同:随着浸泡时间的延长,极化电流上升。

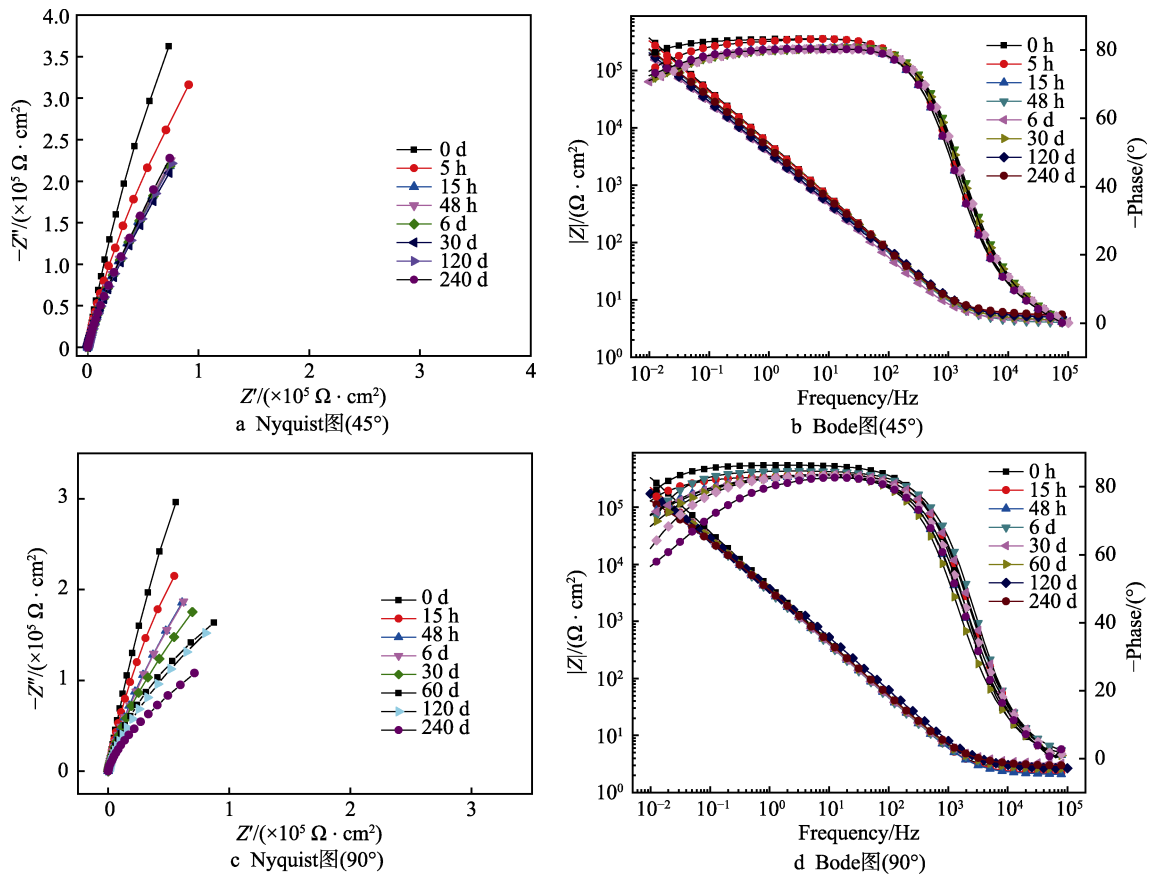


图 8 不同形变下 TC2 钛合金在模拟海水中浸泡不同时间的电化学阻抗谱

Fig.8 Variation of electrochemical impedance spectroscopy of TC2 titanium alloy after different immersion time in simulated seawater: a) Nyquist (45°); b) Bode (45°); c) Nyquist (90°); d) Bode (90°)

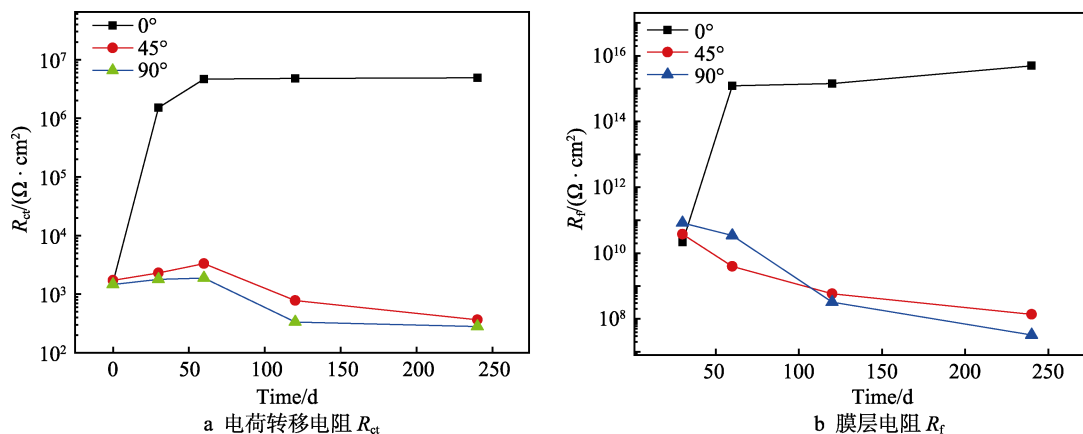
图 9 不同形变处 TC2 钛合金的电荷转移电阻 R_{ct} 和膜层电阻 R_f 随浸泡时间的变化

Fig.9 Variation of (a) charge transfer resistance R_{ct} and (b) film resistance R_f of TC2 titanium alloy under different deformation with immersion time in simulated seawater

2.3 U 型弯不同形变处的微观腐蚀形貌对比

图 11 为 U 型弯 TC2 钛合金在模拟海水环境中浸泡后不同部位的微观形貌。图 11a—c 分别为浸泡前 U 型弯 0°、45°和 90°处的表面形貌, 图 11d—f 为浸泡 60 d 后, U 型弯试样在 0°、45°和 90°处的形貌, 图 11g—i 为浸泡 240 d 后, U 型弯试样在 0°、45°和 90°清洗后的表面形貌。从图 11a—c 中可以看出, 形

变使表面粗糙度增加。从图 11d—f 可以看出, 浸泡 60 d 后试样表面有明显的附着物。浸泡 240 d 后, 清洗掉表面的附着物, 0°试样表面出现微小点蚀坑; 45°处点蚀坑数量增多; 随着形变量的增加, 90°处垂直拉应力方向上有细小的裂纹, 说明形变加速了试样表面的电化学反应, 造成表面钝化膜的破裂, 且在发生形变后, TC2 表面存在一定的应力腐蚀敏感性。因此可以推断, 随着浸泡时间的延长, 试样表面膜层电阻

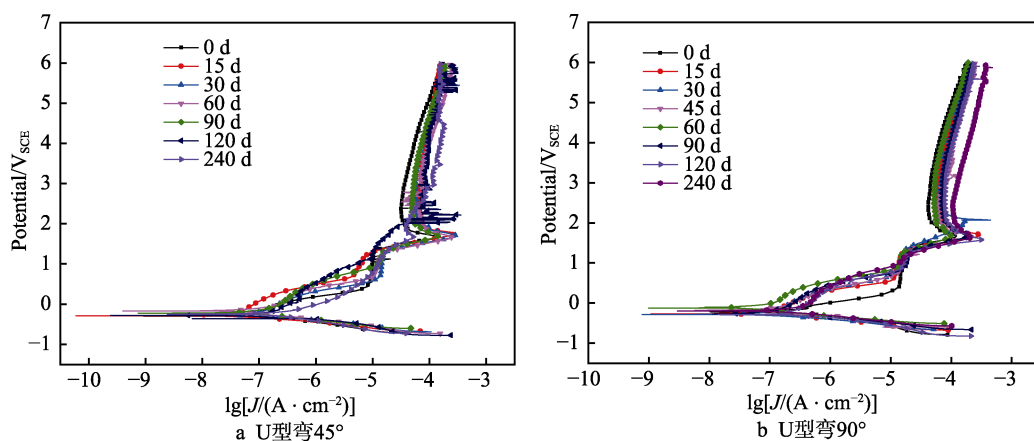


图 10 不同形变下 TC2 钛合金在模拟海水中的极化曲线

Fig.10 Polarization curves of TC2 titanium alloy with different immersion time in simulated seawater:
a) 45° U-specimens; b) 90° U-specimens

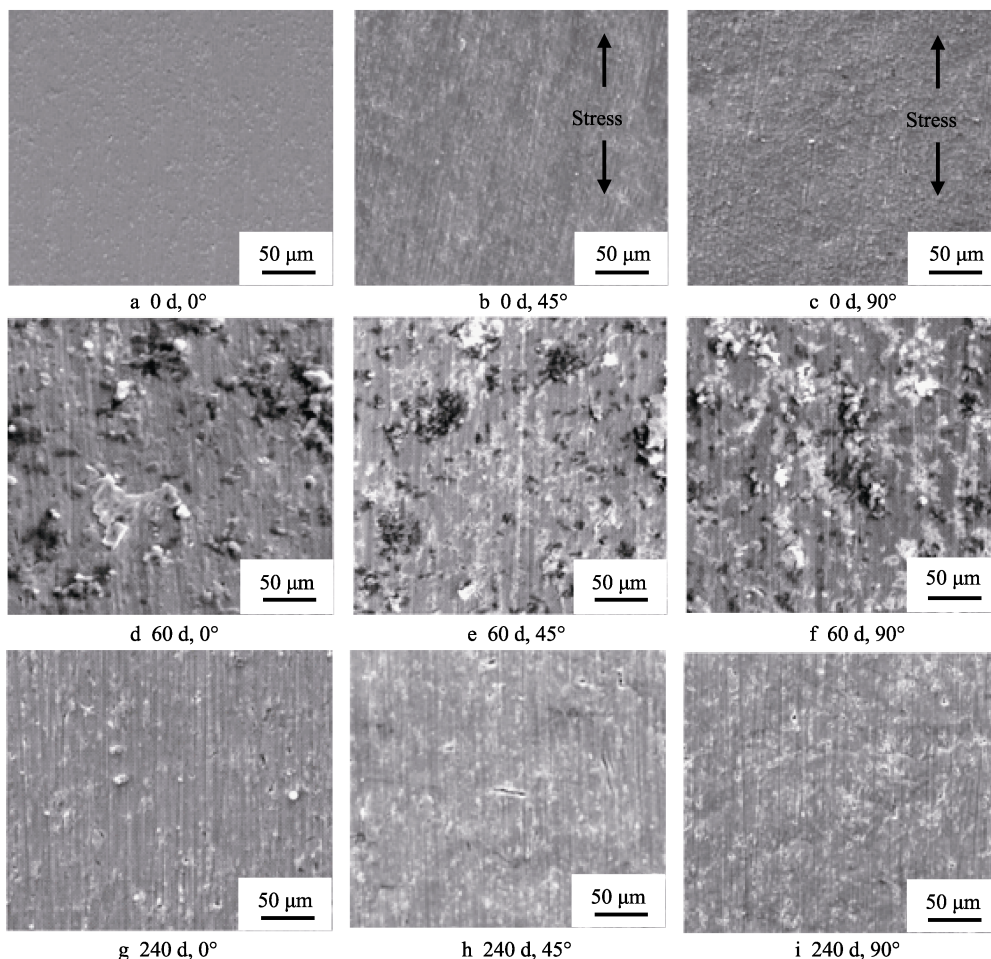


图 11 TC2 钛合金 U 型弯在模拟海水环境中浸泡后不同部位微观形貌对比 (清洗后)

Fig.11 Comparison of morphology of TC2 titanium alloy U-specimens surface with different deformation in simulated seawater (after cleaning)

和电荷转移电阻的减小与形变产生后表面出现的点蚀以及裂纹对钝化膜的破坏作用有直接的关系。

对在模拟海水中浸泡 8 个月的 U 型弯试样表面不同受力部位的成分进行 XRD 分析, 结果如图 12 所示。可以看出, 从 U 型弯两侧到弧顶, 随着试样

形变程度的增大, 其表面成分并未发生太大变化, 弧顶及其两侧部位沉积的钙、镁及 NaCl 更多, 这可能与形变后试样表面粗糙度增加 (图 11a—c)、表面活性增大以及附加电位的产生、点蚀坑和裂纹的出现, 离子在这些部位更易于吸附、结晶和沉积有关。

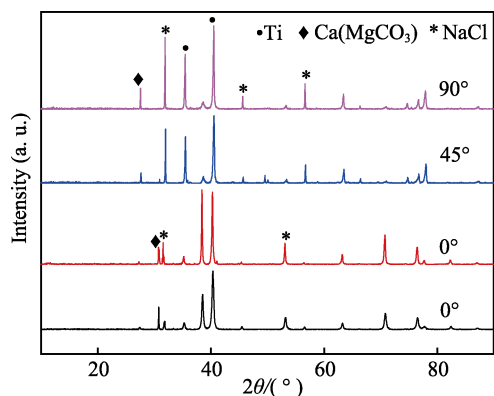


图 12 U 型弯 TC2 钛合金在模拟海水中浸泡 8 个月后不同部位的 XRD 结果

Fig.12 XRD spectra at different location of U-specimens after 8 months immersion in simulated seawater

图 13 为 U 型弯 TC2 钛合金试样不同部位在模拟海水中浸泡 240 d 后的电化学阻抗谱。从图 13a 中可以看出, 容抗弧半径随浸泡时间的延长逐渐减小, 说明形变促进了电极反应。这可能是由于形变区存在的较高的内部能量和位错密度加速了腐蚀进行, 这与 Davis^[19]和 Zhou^[20]等人的研究吻合。图 13b 中随着形变量的增加, 阻抗模值减小, 说明形变量的增加对膜

层的阻抗有影响。阻抗测量结果与图 11 中微观形貌变化吻合。

TC2 合金在模拟海水中生成钛的氧化物如 TiO 、 Ti_2O_3 和 TiO_2 以及非整比氧化物^[21]形成钝化膜, 覆盖在基体表面, 避免基体与腐蚀介质直接接触。存在应力及氯离子的活性吸附时^[22], 钝化膜会产生局部破裂, 在裂纹形成处露出新鲜的基体。应力腐蚀 (SCC) 初期, 此时基体的电位比钝化膜覆盖处低, 发生阳极溶解, 裂纹内溶液中阳离子的聚集造成 Cl^- 电迁移, 使裂缝处形成闭塞电池效应, 加速腐蚀向深处扩展; 随着钛合金在海水中钝化反应的进行, 钛合金与海水界面处溶液的 pH 值下降, 因而阴极会有析氢反应参与。研究表明^[23-24], 钛合金在酸性溶液中的应力腐蚀会有氢的参与。一方面, 钛合金的水解效应与 Cl^- 的富集, 使裂纹尖端裸露钛合金的电位下降, 此时氢会深入裂纹尖端, 钛合金的应力腐蚀以氢致开裂为主。另一方面, 钛合金基体与氧气接触发生再钝化, 形成新的钝化膜。这两方面因素相互竞争, 当裂纹扩展的速度大于再钝化的速度时, 就会加快裂纹的萌生与发展; 反之, 若钝化膜的形成速度大于裂纹扩展速度, 就会对钛合金基体起到很好的保护作用。

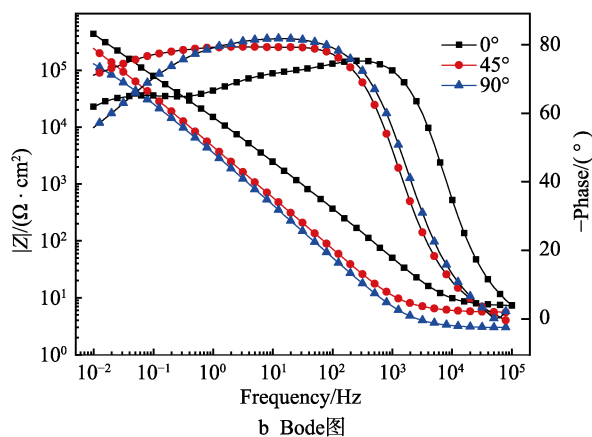
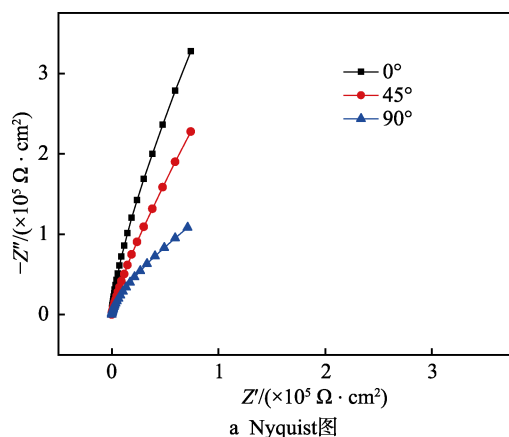


图 13 U 型弯 TC2 钛合金试样在模拟海水中浸泡 240 天后的电化学阻抗谱

Fig.13 Variation of electrochemical impedance spectroscopy of TC2 titanium alloy under different deformation after 240 d immersion time in simulated seawater: a) Nyquist graph; b) Bode diagram

3 结论

在模拟海水环境中, TC2 钛合金表面钝化膜的阻抗值在刚开始时, 随浸泡时间延长而迅速增加, 在 48 d 以后增速变慢, 表面电化学反应减慢, 腐蚀电位升高。随着浸泡时间的延长, 形变后的 TC2 钛合金钝化膜阻抗值下降, 表面的电化学反应速度加快, 随着形变量的增加, 钝化膜阻抗值下降趋势增加。通过对表面形貌的观察, 推测钝化膜阻抗下降主要是由于形变造成表面钝化膜的破裂, 引起点蚀密度增加, 甚至局部出现裂纹, 且随着浸泡时间的延长钝化膜破裂现象越明显。

参考文献:

- [1] LI X G, ZHANG D W, LIU Z Y, et al. Materials science: share corrosion data[J]. Nature, 2015, 527(7579): 441-442.
- [2] 于宇, 李嘉琪. 国内外钛合金在海洋工程中的应用现状与展望[J]. 材料开发与应用, 2018, 33(3): 111-116.
YU Yu, LI Jia-qi. Current application and prospect of titanium alloys in marine engineering[J]. Development and application of materials, 2018, 33(3): 111-116.
- [3] KASUGA T, NOGAMI M, NIINOMI M, et al. Bioactive calcium phosphate invert glass-ceramic coating on beta-type Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr alloy[J]. Biomaterials, 2003, 24(2): 283-290.

- [4] 张文毓. 钛及钛合金在海水淡化中的应用[J]. 新材料产业, 2009(3): 30-33.
ZHANG Wen-yu. Application of titanium and titanium alloy in seawater desalination[J]. Advanced materials industry, 2009(3): 30-33.
- [5] 黄金昌. 钛在滨海石油生产中的应用[J]. 钛工业进展, 1996(6): 34-35.
HUANG Jin-chang. Application of titanium in coastal oil production[J]. Titanium industry progress, 1996(6): 34-35.
- [6] ORYSHCHENKO A S, GORYNIN I V, LEONOV V P, et al. Marine titanium alloys: Present and future[J]. Inorganic materials applied research, 2015, 6(6): 571-579.
- [7] 徐伟. 钛及钛合金在氯碱工业中的应用[J]. 氯碱工业, 1988(6): 40-44.
XU Wei. Application of titanium and titanium alloy in chlor-alkali industry[J]. Chlor-alkali industry, 1988(6): 40-44.
- [8] 余存烨. 耐蚀钛合金的发展[J]. 钛工业进展, 2003(1): 12-19.
YU Cun-ye. Development of corrosion resistant titanium alloys[J]. Titanium industry progress, 2003(1): 12-19.
- [9] 王海杰, 王佳, 彭欣, 等. 钛合金在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2015, 35(1): 75-80.
WANG Hai-jie, WANG Jia, PENG Xin, et al. Corrosion behavior of three titanium alloys in 3.5%NaCl solution[J]. Journal of Chinese society for corrosion and protection, 2015, 35(1): 75-80.
- [10] LIU Z Y, LI X G, DU C W, et al. Local additional potential model for effect of strain rate on SCC of pipeline steel in an acidic soil solution[J]. Corrosion science, 2009, 51(12): 2863-2871.
- [11] XU L Y, CHENG Y F. An experimental investigation of corrosion of X100 pipeline steel under uniaxial elastic stress in a near-neutral pH solution[J]. Corrosion science, 2012, 59(3): 103-109.
- [12] XU L Y, CHENG Y F. Corrosion of X100 pipeline steel under plastic strain in a neutral pH bicarbonate solution[J]. Corrosion science, 2012, 64(8): 145-152.
- [13] LIU Z Y, LI X G, CHENG Y F. Electrochemical state conversion model for occurrence of pitting corrosion on a cathodically polarized carbon steel in a near-neutral pH solution[J]. Electrochimica acta, 2011, 56(11): 4167-4175.
- [14] WANG Y, ZHAO W, AI H, et al. Effects of strain on the corrosion behaviour of X80 steel[J]. Corrosion science, 2011, 53(9): 2761-2766.
- [15] LIU Z Y, LI X G, DU C W, et al. Stress corrosion cracking behavior of X70 pipe steel in an acidic soil environment[J]. Corrosion science, 2008, 50(8): 2251-2257.
- [16] DIETZEL W, PFUFF M, JUILFS G G. Hydrogen permeation in plastically deformed steel membranes[J]. Materials science, 2006, 42(1): 78-84.
- [17] GB/T 15748—2013. 船用金属材料电偶腐蚀试验方法[S]. GB /T 15748—2013. The method of galvanic corrosion test for metallic ship materials[S].
- [18] 杨超, 张慧霞, 郭为民, 等. 添加双氧水对高强度低合金钢在海水中腐蚀影响的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013, 33(3): 205-210.
YANG Chao, ZHANG Hui-xia, GUO Wei-min, et al. Effects of H₂O₂ addition on corrosion behavior of high strength low-alloy steel in seawater[J]. Journal of chinese society for corrosion and protection, 2013, 33(3): 205-210.
- [19] DAVIS J. Corrosion: Understanding the basics[M]. United States: ASM International, 2000.
- [20] ZHOU Y L, NIINOMI M, AKAHORI T, et al. Corrosion resistance and biocompatibility of Ti-Ta alloys for biomedical applications[J]. Materials science & engineering A, 2005, 398(1): 28-36.
- [21] 姜应律, 吴荫顺. 用极化曲线研究钛合金在水、醇中腐蚀机理的差异[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2005, 17(3): 154-158.
JIANG Ying-lyu, WU Yin-shun. Study of mechanism of electrochemical reaction for titanium alloy TC4 in NaCl solution and ethanol by polarization curve[J]. Corrosion science and protection technology, 2005, 17(3): 154-158.
- [22] 易新中, 李德川. 钛合金在含氯离子切削液中的应力腐蚀[J]. 航空工艺技术, 1993(6): 38-39.
YI Xin-zhong, LI De-chuan. Stress corrosion of titanium alloy in chloride containing cutting fluid[J]. Aeronautical manufacturing technology, 1993(6): 38-39.
- [23] HOLLIS A C, SCULLY J C. Stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement of titanium in methanol-iodine solutions[J]. Corrosion science, 1993, 34(5): 821-835.
- [24] EBTEHAJ K, HARDIE D, PARKINS R N. The stress corrosion and pre-exposure embrittlement of titanium in methanolic solutions of hydrochloric acid[J]. Corrosion science, 1985, 25(6): 415-429.