

DOI: 10.11973/jxgccl202310011

基于扫描电化学显微镜研究 316L 不锈钢的局部腐蚀行为

饶思贤^{1,2}, 郭祥钦¹, 华晓春¹, 张 鹏¹, 王孝义¹

(1. 安徽工业大学机械工程学院, 马鞍山 243032; 2. 合肥通用机械研究院有限公司, 合肥 230031)

摘要: 通过电化学试验获得 316L 不锈钢在 NaCl 溶液中的动电位极化曲线, 确定了特征电位; 采用扫描电化学显微镜研究了不锈钢在 NaCl 溶液中不同特征电位下的局部腐蚀行为。结果表明: 在开路电位 (-0.1 V) 下极化后, 面扫描图像中未见明显的电化学活性点, 基底背景电流变化较小, 钝化膜具有较好的稳定性; 在自腐蚀电位 (-51.2 mV) 下极化后, 面扫描图像中存在一个电化学活性点, 但峰值电流降低, 基底背景电流稳中有降, 不锈钢发生自钝化; 在典型钝化电位 (100 mV) 下极化后, 表面发生亚稳态点蚀的不断萌生与钝化, 基底背景电流先降低后保持稳定, 表面自钝化程度更高; 在点蚀电位 (568 mV) 下极化后, 表面出现稳态点蚀坑, 极化停止后点蚀坑被钝化, 基底背景电流较极化前下降, 表明未发生点蚀处钝化膜的稳定性增强。

关键词: 扫描电化学显微镜; 316L 不锈钢; 钝化膜; 点蚀

中图分类号: TG172

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2023)10-0068-06

Local Corrosion Behavior of 316L Stainless Steel Studied by Scanning Electrochemical Microscope

RAO Sixian^{1,2}, GUO Xiangqin¹, HUA Xiaochun¹, ZHANG Peng¹, WANG Xiaoyi¹

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'an Shan 243032, China;

2. Hefei General Machinery Research Institute Co., Ltd., Hefei 230031, China)

Abstract: The potentiodynamic polarization curve of 316L stainless steel in NaCl solution was obtained by electrochemical test, and the characteristic potential was determined. The local corrosion behavior of stainless steel at different characteristic potentials in NaCl solution was studied by scanning electrochemical microscope. The results show that after polarization at the open circuit potential (-0.1 V), no obvious electrochemical active point was found in the surface scan image, and the substrate background current changed little, indicating good stability of the passivation film. After polarization at the self corrosion potential (-51.2 mV), there was an electrochemical active point in the surface scan image, but the peak current decreased and the substrate background current was stable with a slight decrease, indicating the existence of self passivation behavior in stainless steel. After polarization at a typical passivation potential (100 mV), the surface underwent continuous initiation and passivation of metastable pitting; the background current of the substrate first decreased and then remained stable; the degree of surface self passivation was higher. After polarization at the pitting potential (568 mV), steady-state pitting pits appeared on the surface, and after polarization stopped, the pits were passivated; the substrate background current decreased compared to that before polarization, indicating an enhanced stability of the passivation film in the non-pit areas.

Key words: scanning electrochemical microscope; 316L stainless steel; passivation film; pitting

收稿日期: 2022-08-10; 修订日期: 2023-08-23

基金项目: 安徽省教育厅重大自然科学基金项目 (KJ2016SD09); 安徽省自然科学基金资助项目 (1908085ME148); 特殊服役环境的智能装备制造国际科技合作基地基金资助项目 (ISTC2021KF02)

作者简介: 饶思贤 (1978—), 男, 湖北武穴人, 教授, 博士

0 引言

传统电化学方法以整个试样为研究对象, 得出的是试样表面耐腐蚀性能的统计数据, 即整个试样的电化学信息的平均值。然而, 金属腐蚀中电子转移是不均匀的, 点蚀形核于某些微观位置, 因此采用

传统电化学方法不能对材料表面的局部腐蚀行为进行研究与分析。传统的显微测试设备(扫描电镜等)只能观测腐蚀前后的组织和形貌信息。扫描电化学显微镜(scanning electrochemical microscopy, SECM)作为一种新型的微区电化学测试仪器,可以得到传统电化学方法无法得出的探针逼近曲线、线扫描曲线和面扫描图像,还可以实现连续观测并得到局部氧化还原反应中的实时电流变化,提供反映电化学信息和物理信息综合结果的三维微区图像,以研究点蚀萌生和扩展的动态过程。目前,国内外已经有很多利用 SECM 来研究铝及其合金、铜、钛、铁、不锈钢以及表面覆盖涂层的金属材料的局部腐蚀行为的报道^[1-10]。IZQUIERDO 等^[11]结合 SECM 与扫描振动电极技术明确了局部腐蚀过程中生成的铁离子种类及其在点蚀孔上方的分布; LISTER 等^[12]结合局部电场研究和 SECM 来监测 304 不锈钢在恒电流诱导腐蚀时材料表面的电化学活性,发现随着基底电流密度的增大,基底表面硫化物夹杂溶解处的局部电场增大,使得探针位于腐蚀点上方时的电位发生改变,从而导致腐蚀部位电化学活性发生反转;李桐^[13]以医用高氮无镍奥氏体不锈钢为研究对象,利用 SECM 表征材料在仿体液中浸泡不同时间后的表面电化学活性分布,分析了浸泡时间及氮元素对材料局部腐蚀的影响。

目前,利用传统电化学方法对 316L 不锈钢的钝化膜以及亚稳态点蚀萌生的腐蚀机理的研究报道很多,但是利用 SECM 来表征 316L 不锈钢微观腐蚀机理的研究少有报道。因此,作者通过 SECM 得到的 316L 不锈钢循环伏安曲线、探针逼近曲线、线扫描曲线确定面扫描中探针尖端与不锈钢基底的间距,并通过电化学试验获得的动电位极化曲线确定特征电位;基于面扫描图像对 316L 不锈钢在 NaCl 溶液中不同特征电位下的局部腐蚀行为进行研究,以期工业上的设备选材与腐蚀防护提供理论支持。

1 试样制备与试验方法

试验材料为市售 316L 不锈钢,热处理状态为 1 100 ℃固溶态,其化学成分如表 1 所示,显微组织如图 1 所示,可见由奥氏体组成。用线切割方法加工出尺寸为 25 mm×25 mm×2 mm 的试样,用 600#~3000#的水磨砂纸逐级打磨工作面,再用粒径 1 μm 的金刚石喷雾抛光剂抛光至镜面,用去离

表 1 316L 不锈钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of 316L stainless steel

元素	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	Fe
质量分数/%	0.02	0.92	0.005	0.025	1.42	12.95	17.86	2.79	余

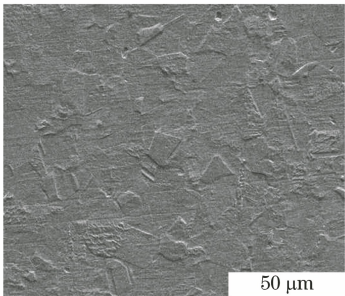


图 1 316L 不锈钢的固溶态显微组织

Fig.1 As-soluted microstructure of 316L stainless steel

子水洗净,冷风吹干后放入干燥皿中空气钝化。采用 HEKA-EIProScan-ELP1 型扫描电化学显微镜进行电化学腐蚀试验,工作原理如图 2 所示,当探针与基底距离非常接近时,由于探针尺寸与其尖端扩散层的尺寸相当,此时探针尖端的扩散层受到基底干扰,导致探针的电化学信号随基底电化学活性的变化而变化,从而获得微区电化学信息。试验时采用四电极体系,其中直径 10 μm 的铂探针为第一工作电极,待测试样为第二工作电极(基底),Ag/AgCl 电极为参比电极,铂丝为对电极。测试溶液为 1 mmol·L⁻¹二茂铁甲醇(FcMeOH)+1 mol·L⁻¹ NaCl 溶液,其中 FcMeOH 为氧化还原介质。在扫描速率为 10 mV·s⁻¹条件下得到的循环伏安曲线如图 3 所示(图中 E_T 为施加的电位, i_T 为探针电流),可知探针性能良好,确定在探针逼近曲线和面

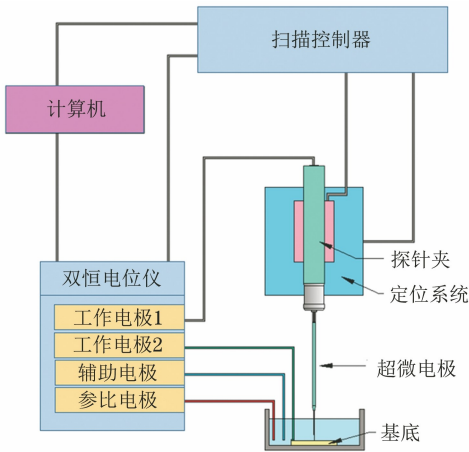


图 2 扫描电化学显微镜工作原理示意

Fig.2 Schematic of scanning electrochemical microscope working principle

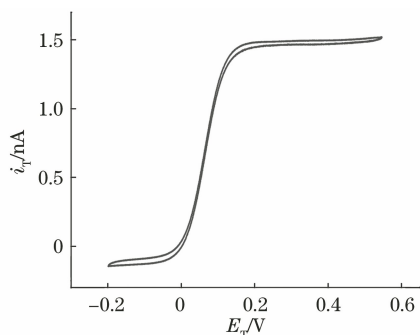
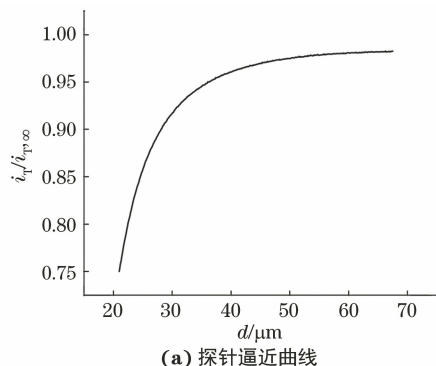


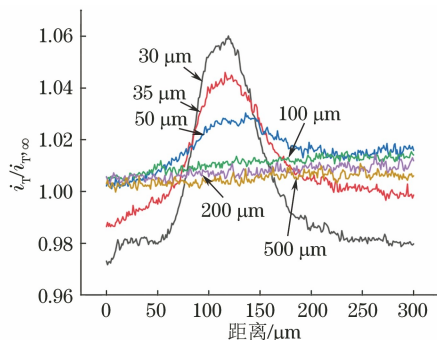
图3 探针在 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{FcMeOH} + 1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 溶液中的循环伏安曲线

Fig.3 Cyclic voltammetry curve of probe in $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{FcMeOH} + 1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ solution

扫描成像过程中探针所施加的电位为 $+0.5 \text{ V}$ 。以已萌生部分微小点蚀的 316L 不锈钢试样为基底，将探针在 z 轴(垂直方向)上逼近至基底试样表面，



(a) 探针逼近曲线



(b) 不同探针尖端与不锈钢基底间距下的线扫描曲线

图4 探针逼近曲线以及不同探针尖端与不锈钢基底间距下的线扫描曲线

Fig.4 Probe approaching curve (a) and line scan current curves under different spacings between probe top and stainless steel substrate

2 试验结果与讨论

2.1 动电位极化曲线

由图 5 可见,316L 不锈钢在 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 溶液中的动电位极化曲线分为明显的活化区、钝化区与过钝化区。根据 GB/T 17899—1999,以阳极极化曲线上对应电流密度达 $10 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的电位中最正的电位 E_{blo} 作为点蚀电位。选取的具有代表性的特征电位分别为开路电位、自腐蚀电位(位置 A)、典型钝化电位(位置 B)以及点蚀电位(位置 C),即分别为 -0.1 V , -51.2 mV , 100 mV , 568 mV 。

2.2 不同特征电位下的局部电化学活性

由图 6 可见,316L 不锈钢基底试样在开路电位下于 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{FcMeOH} + 1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 溶液中浸泡 5 h 后仍未检测到明显的电化学活性点,这说明在浸泡过程中基底的被测区域钝化膜仍是致密

得出探针逼近曲线,然后进行线扫描,得到的探针逼近曲线和线扫描曲线分别如图 4 所示,图中 d 为探针尖端和基底试样之间的距离, $i_{\text{T},\infty}$ 为探针不受基底影响时的稳态极限扩散电流。通过分析逼近曲线和线扫描曲线得到,面扫描中探针尖端与不锈钢基底的间距为 $30 \mu\text{m}$,此时线扫描曲线存在一个显著的电化学活性峰,这说明基底试样表面此处的钝化膜不再完整,微观点蚀在此处萌生。在 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 溶液中利用 Zahner Zennium 电化学工作站测试出 316L 不锈钢的动电位极化曲线。从动电位极化曲线中选定不同的特征电位对试样表面的某个微米级区域进行 SECM 三维面扫描,扫描范围为 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$,扫描速度为 $50 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,试验温度为 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (室温),浸泡时间为 $0 \sim 5 \text{ h}$ 。

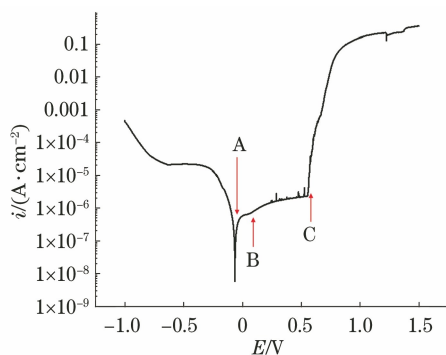


图5 316L 不锈钢在 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 溶液中的动电位极化曲线
Fig.5 Potentiodynamic polarization curve of 316L stainless steel in $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ solution

完整的。随着浸泡时间的延长,基底背景电流略有上升,这可能是由于基底表面的钝化膜稳定性随浸泡时间的延长而逐渐变差,钝化膜的离子导电性增加,使得探针尖端 FcMeOH 的氧化还原反应速率增大,最终表现为探针电流的略微增大。

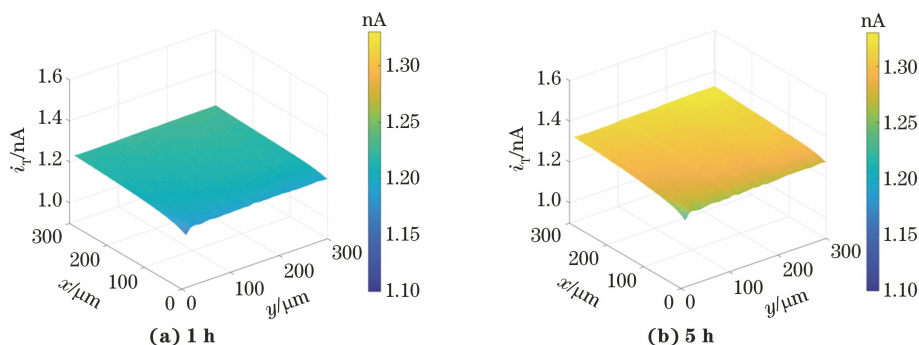


图 6 316L 不锈钢在开路电位下于 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ FcMeOH + $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 溶液中浸泡不同时间后的 SECM 面扫描图像

Fig.6 SECM surface scan images of 316L stainless steel immersed in $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ FcMeOH + $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl solution at open circuit potential for different time intervals

由图 7 可见,在自腐蚀电位下于 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ FcMeOH + $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 溶液中浸泡后,316L 不锈钢基底试样面扫描图像中存在一个比较明显的电流峰,说明被测区域内存在一个电化学活性点。当浸泡时间为 1 h 时,电化学活性点的峰值电流为 1.3 nA,此时基底发生局部溶解,反应生成的 Fe^{2+} 扩散到探针尖端并在此被氧化为 Fe^{3+} ,从而使得局部探针电流增大;该电化学活性点的出现意味着微观点蚀的萌生。随着浸泡时间的延长,电化学活性

点的位置没有发生改变,但此处的最大探针电流逐渐降低,当浸泡时间达到 5 h 后,电化学活性点的峰值电流已经降低至 1.118 nA,这是由电化学活性点处局部溶解反应的反应速率降低所致,这也说明在外加自腐蚀电位下 316L 不锈钢在溶液中存在自钝化行为,对点蚀的萌生与发展产生了抑制作用。同时,在整个浸泡过程中,基底背景电流保持略微下降的趋势,这也证明在外加自腐蚀电位下,316L 不锈钢表面钝化膜的稳定性提高,表现出自钝化特征。

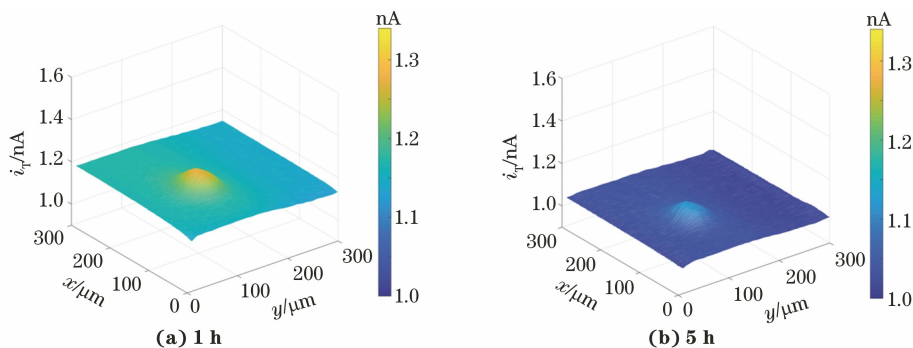


图 7 316L 不锈钢在自腐蚀电位下于 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ FcMeOH + $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 溶液中浸泡不同时间后的 SECM 面扫描图像

Fig.7 SECM surface scan images of 316L stainless steel immersed in $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ FcMeOH + $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl solution at self corrosion potential for different time intervals

由图 8 可见,当在典型钝化电位下于 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ FcMeOH + $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 溶液中浸泡 1 h 时,被检测区域检测到电化学活性点,电化学活性点处的峰值电流达 0.962 nA,说明此处发生了局部溶解。随着浸泡时间的延长,被检测区域已有的电化学活性点消失,并伴随着新的电化学活性点生成,同时基底背景电流随浸泡时间延长而降低,当浸泡时间为 5 h 时,基底背景电流降低至 0.55 nA。可知在典型钝化电位下,316L 不锈钢表面有整体被钝化的趋势,但个别位置萌生了亚稳态点蚀。与自腐蚀电位下的面扫描结果相比,在典型钝化电位下,试样表面发生电化学活性点的局部溶解并钝化的概率更

高。这说明即使在钝化电位下,316L 不锈钢表面依然会发生亚稳态点蚀,但由于此时电化学活性点局部溶解所产生的溶解电流不足以引起亚稳态点蚀向稳态点蚀转变,因此亚稳态点蚀坑会很快被重新钝化。

在点蚀电位下,316L 不锈钢表面会快速生成稳态点蚀并扩展,同时产生较多的腐蚀产物。由于面扫描过程中探针尖端与基底试样的间距仅为 $30 \mu\text{m}$,为了保护探针不受腐蚀产物的过度污染而失去电化学灵敏性,本试验缩短了恒电位极化时间,仅对基底试样在点蚀电位极化下 5 min。由图 9 可见,在点蚀电位极化前基底试样被检测区域未监测到明显的电化学活性点,极化 5 min 后,被检测区域

出现一个电化学活性点,同时基底背景电流明显下降,这说明极化后在基底试样未发生点蚀的部位点蚀萌生倾向被抑制;极化后电化学活性点的峰值电流小于极化前的基底背景电流,这可能是由于此处

曾萌生点蚀,但在极化停止后点蚀坑被钝化,探针扫描至此处时溶解反应已经停止,仅留下钝化后的点蚀坑,导致此处探针尖端与基底试样的实际距离大于 $30\text{ }\mu\text{m}$ 。

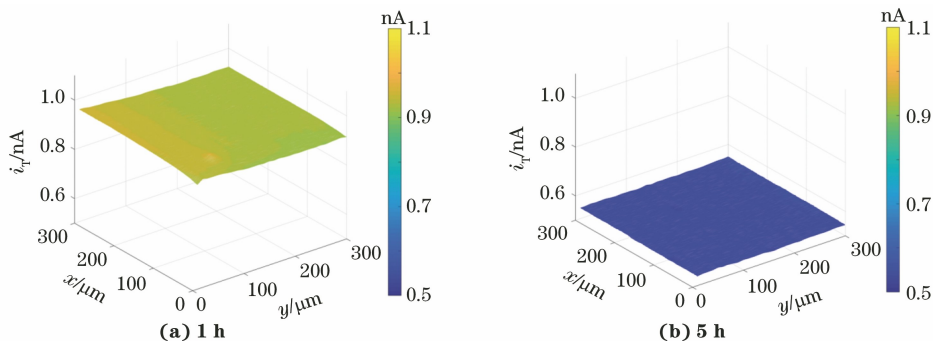


图 8 316L 不锈钢在典型钝化电位下于 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ FcMeOH}+1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$ 溶液中浸泡不同时间后的 SECM 面扫描图像

Fig. 8 SECM surface scan images of 316L stainless steel immersed in $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ FcMeOH}+1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$ solution at typical passivation potential for different time intervals

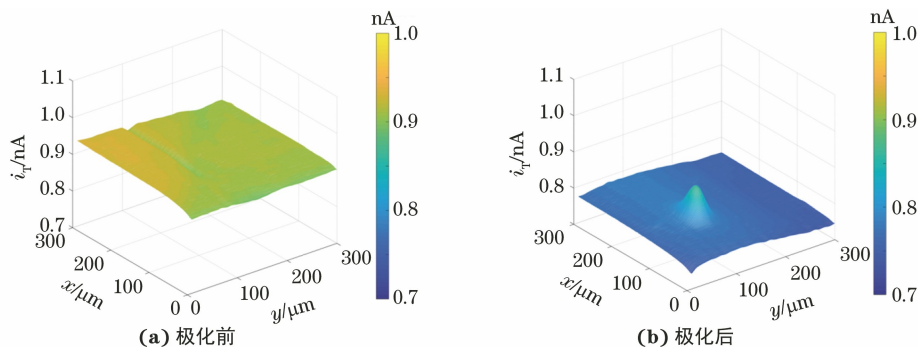


图 9 316L 不锈钢在点蚀电位下于 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ FcMeOH}+1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$ 溶液中极化前后的 SECM 面扫描图像

Fig. 9 SECM surface scan images of 316L stainless steel before (a) and after (b) polarization in $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ FcMeOH}+1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$ solution at pitting potential

2.3 不同极化条件下的钝化膜稳定性

图 10 中 i_{tm} 为基底背景电流。由图 10 可见,极化电位、极化时间与钝化膜状态之间存在一定的相关性。在开路电位下,基底背景电流始终保持较高的水平,仅有微小的上升趋势,说明 316L 不锈钢在开路电位下于 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ FcMeOH}+1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$ 溶液中表现出较好的耐腐蚀性能,但 Cl^{-} 介质在一定程度上削弱了不锈钢钝化膜的稳定性。由钝化膜局部破坏模型可知,在含 Cl^{-} 环境中,钝化膜中存在的 MnS 夹杂物会与 Cl^{-} 发生反应而容易脱落,形成点蚀的形核点,从而出现 SECM 面扫描图像中的峰值电流^[2,14-15]。在自腐蚀电位下极化后,基底背景电流稳中有降,不锈钢表面总体的电化学活性比较稳定,表现出自钝化的特征,钝化膜的稳定性加强。在典型钝化电位下极化后,基底背景电流在极化的前 3 h 内大幅度降低,3 h 后基本保持稳定,说明整个极化过程中不锈钢表面先被钝化,在钝

化至一定程度后钝化趋势放缓,不锈钢表面钝化膜的稳定性进一步加强。

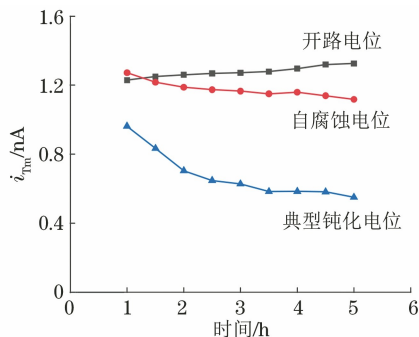


图 10 不同极化条件下基底背景电流的变化曲线

Fig. 10 Curves of substrate background current under different polarization conditions

3 结 论

(1) 316L 不锈钢在 NaCl 溶液中的动电位极化曲线分为明显的活化区、钝化区与过钝化区,选取的

特征电位分别为开路电位(-0.1 V)、自腐蚀电位(-51.2 mV)、典型钝化电位(100 mV)以及点蚀电位(568 mV)。

(2) 316L 不锈钢在开路电位下于 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{FcMeOH}+1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaCl}$ 溶液中极化后,SECM 面扫描图像中未见明显的电化学活性点,基底背景电流较高,呈略微升高趋势,表面钝化膜具有较好的稳定性;在自腐蚀电位下极化后,面扫描图像中存在一个电化学活性点,但是峰值电流降低,基底背景电流稳中有降,说明不锈钢存在自钝化行为,钝化膜的稳定性加强;在典型钝化电位下极化后,表面出现亚稳态点蚀的不断萌生与钝化,基底背景电流先降低后保持稳定,表面自钝化程度更高,钝化膜的稳定性进一步加强;在点蚀电位下极化后,不锈钢迅速发生腐蚀,表面出现稳态点蚀坑,极化停止后点蚀坑被钝化,基底背景电流较极化前明显下降,表明未发生点蚀处钝化膜的稳定性增强。

参考文献:

- [1] ZHANG Q H, LI X R, LIU P, et al. Quantitative study of the kinetics of hydrogen evolution reaction on aluminum surface and the influence of chloride ion[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(80): 39665-39674.
- [2] 刘增威. SECM 对 7075 铝合金在 NaCl 溶液中的电化学腐蚀行为研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2017.
LIU Z W. Electrochemical corrosion behavior of SECM on 7075 aluminum alloy in NaCl solution[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2017.
- [3] ZHANG Q H, LIU P, ZHU Z J, et al. Quantitative analysis of the polarization behavior of iron in an aerated acidic solution using SECM[J]. Electrochemistry Communications, 2018, 93: 143-147.
- [4] INDIRA K, NISHIMURA T. SECM study of effect of chromium content on the localized corrosion behavior of low-alloy steels in chloride environment[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(10): 4157-4170.
- [5] ASSERGHINE A, MEDVIDOVIĆ-KOSANOVIĆ M, NAGY L, et al. In situ monitoring of the transpassivation and repassivation of the passive film on nitinol biomaterial by scanning electrochemical microscopy [J]. Electrochemistry Communications, 2019, 107: 106539.
- [6] LI X R, ZHANG Q H, MENG X Z, et al. Effect of pretreatments on the hydrogen evolution kinetics of pure titanium using impedance and SECM technologies [J]. Corrosion Science, 2021, 191: 109726.
- [7] SIMÕES A, BATTOCCHI D, TALLMAN D, et al. Assessment of the corrosion protection of aluminium substrates by a Mg-rich primer: EIS, SVET and SECM study [J]. Progress in Organic Coatings, 2008, 63(3): 260-266.
- [8] 周亚茹. 电沉积 Ni 金属涂层和 Ni-P 合金涂层失效过程的宏观-微区电化学比较研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
ZHOU Y R. Macro-micro electrochemical comparative study on failure process of electrodeposited Ni metal coating and Ni-P alloy coating[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [9] XIA D H, WANG J Q, WU Z, et al. Sensing corrosion within an artificial defect in organic coating using SECM[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019, 280: 235-242.
- [10] 舒明勇. 选钛尾矿制备搪瓷涂层及腐蚀电化学行为研究[D]. 上海: 上海大学, 2019.
SHU M Y. Preparation of enamel coating from titanium tailings and its corrosion electrochemical behavior [D]. Shanghai: Shanghai University, 2019.
- [11] IZQUIERDO J, MARTÍN-RUIZ L, FERNÁNDEZ-PÉREZ B M, et al. Scanning microelectrochemical characterization of the effect of polarization on the localized corrosion of 304 stainless steel in chloride solution [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2014, 728: 148-157.
- [12] LISTER T E, PINHERO P J. The effect of localized electric fields on the detection of dissolved sulfur species from type 304 stainless steel using scanning electrochemical microscopy [J]. Electrochimica Acta, 2003, 48(17): 2371-2378.
- [13] 李桐. 医用高氮无镍奥氏体不锈钢在仿体液中的腐蚀电化学研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
LI T. Corrosion electrochemical study of medical high nitrogen nickel-free austenitic stainless steel in simulated body fluid[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [14] 刘增威. SECM 对 7075 铝合金在 NaCl 溶液中的电化学腐蚀行为研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2017.
LIU Z W. Electrochemical corrosion behavior of SECM on 7075 aluminum alloy in NaCl solution[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2017.
- [15] 石林, 郑志军, 高岩. 不锈钢的点蚀机理及研究方法[J]. 材料导报, 2015, 29(23): 79-85.
SHI L, ZHENG Z J, GAO Y. Mechanism and research methods of pitting corrosion of stainless steels[J]. Materials Review, 2015, 29(23): 79-85.