

SO₄²⁻ 浓度对 304 不锈钢在 NaCl 溶液中点蚀行为影响的研究

Effect of SO₄²⁻ Concentration on 304 Stainless Steel Pitting Corrosion in NaCl Solution

杜楠¹, 田文明¹, 赵晴¹, 孟保利²

(1 南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 南昌 330063;

2 中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司, 西安 710089)

DU Nan¹, TIAN Wen-ming¹, ZHAO Qing¹, MENG Bao-li²

(1 National Defence Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology Institute, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2 AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Company Ltd., Xi'an 710089, China)

摘要: 利用动电位极化、电化学阻抗谱(EIS)和激光电子散斑干涉(ESPI)研究了 3.5%NaCl 溶液中, SO₄²⁻ 浓度对 304 不锈钢点蚀行为的影响。使用 0.3V(*vs* SCE)极化条件下的计时电流法结合 ESPI 确定了点蚀诱导时间。结果表明: 当 SO₄²⁻ 浓度为 0.5% 时, 不锈钢的耐蚀性最差; 当 SO₄²⁻ 浓度低于 1% 时, 不锈钢的耐蚀性较不存在 SO₄²⁻ 时的耐蚀性差; 当 SO₄²⁻ 浓度高于 1% 时, 不锈钢的耐蚀性较不存在 SO₄²⁻ 时的耐蚀性好。在 3.5%NaCl+0.5%Na₂SO₄ 溶液中, 点蚀诱导时间是 4s, 在 3.5%NaCl 溶液中和 3.5%NaCl+4%Na₂SO₄ 溶液中点蚀诱导时间分别是 9s 和 94s。

关键词: 304 不锈钢; 点蚀; 激光电子散斑干涉技术; 硫酸根离子

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2012)07-0064-07

Abstract: Effect of SO₄²⁻ concentration on 304 stainless steel pitting corrosion in 3.5%NaCl solution was investigated by means of dynamic potential polarization, electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and electronic speckle pattern interferometer (ESPI). The pitting induction time τ under 0.3V (*vs* SCE) polarization was detected by means of ESPI and chronoamperometry. The results showed that the stainless steel corrosion resistance was the worst when the SO₄²⁻ concentration was 0.5%. When the SO₄²⁻ concentration was below 1%, the corrosion resistance was worse than that having no SO₄²⁻. When the SO₄²⁻ concentration was beyond 1%, the corrosion resistance was better. The pitting induction time τ of the 304 stainless steel were 4s, 9s and 94s in 0.5%NaCl+0.5%Na₂SO₄ solution, 3.5%NaCl solution and 3.5%NaCl+4%Na₂SO₄ solution respectively.

Key words: 304 stainless steel; pitting; ESPI; SO₄²⁻

304 不锈钢是应用最为广泛的一种铬-镍不锈钢, 具有优良的不锈耐腐蚀性能和较好的抗晶间腐蚀性, 耐热性、低温强度和力学性能优良, 同时具有良好的加工性和可焊性, 广泛应用于家庭用品、建材、化学、食品等工业。但在海水和其他含氯介质中则容易发生点蚀。点蚀^[1,2]是不锈钢失效的主要形式之一, 严重时能导致设备穿孔, 在实际生产中存在很大的隐患。研究表明, 点蚀主要由侵蚀性阴离子 Cl⁻ 引起, 当溶液中还存在其他离子时, 可能加速材料的腐蚀, 也可能减缓材料的腐蚀。Sherbini 等^[3]发现阴离子抑制剂对 Zn 溶解和点蚀发生的抑制程度与离子种类和浓度有关; 葛红花等^[4]研究了冷却水中 SO₄²⁻ 对不锈钢冷凝

器的缓蚀作用, 认为 SO₄²⁻ 在金属氧化物表面上发生竞争性吸附, 置换出表面的 Cl⁻, 从而使点蚀受到抑制; Lee 等人^[5]通过 SO₄²⁻ 与 Cl⁻ 的协同效应对纯 Al 点蚀电位影响的研究, 发现 SO₄²⁻ 会阻碍点蚀的发生, 但会加速点蚀的发展。SO₄²⁻ 对钝性金属在含 Cl⁻ 水溶液中点蚀行为的影响, 存在加速点蚀和抑制点蚀两种情况, 并且加速或者抑制与 SO₄²⁻ 的浓度密切相关。

激光电子散斑干涉 (Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI) 是 20 世纪 70 年代初发展起来的以激光、光电子技术及数字图像处理为基础的现代光学测量方法^[6-8]。ESPI 可以对材料表面形变进行原位、全场、高精度、动态连续的监测。王梅丰等人利

用 ESPI 监测 45[#] 碳钢在 0.5mol/L NaHCO₃ + 0.05mol/L NaCl 体系中的局部腐蚀行为时发现,当电极表面发生点蚀时,ESPI 图像上会出现亮斑,亮斑由电极表面点蚀产物扩散引起,它与电极表面蚀点一一对应^[9,10]。从 ESPI 视频中可以确定电极材料表面发生点蚀的时刻和位置^[11]。本工作采用动电位极化法、电化学阻抗技术(EIS)和 ESPI 研究了不同浓度的 SO₄²⁻ 对 304 不锈钢在 3.5%(质量分数,下同)NaCl 溶液中点蚀行为的影响。

表 1 304 不锈钢的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of 304 stainless steel (mass fraction/%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Fe
304	0.049	0.573	1.283	0.033	0.001	17.49	8.19	0.045	0.006	Bal

电化学测试采用三电极体系,辅助电极为铂片,参比电极为饱和甘汞电极(SCE),通过盐桥与工作电极连接。研究采用的设备为电化学工作站 Autolab PG-STAT30,通过设备附带软件完成实验控制。EIS 测试在开路电位稳定后进行,激励信号是幅值为 5mV 的正弦交流电,测量频率范围为 10⁵~10⁻² Hz。动电位极化测试在开路电位稳定后进行,先阴极极化,后阳极极化,扫描速率为 20mV/min。

ESPI 监测系统由迈克尔逊干涉光路、图像采集卡和相应的数据处理软件组成。其中迈克尔逊干涉光路由氦氖激光器,散斑测量光路系统和 CCD 摄像头等部分组成^[12]。所有光学器件及电解池装置都固定在防震水平台上。

采用分析纯 NaCl,Na₂SO₄ 和二次蒸馏水配置成含有不同浓度 SO₄²⁻ 的 3.5%的 NaCl 溶液。EIS、动电位极化曲线和 ESPI 测试实验温度分别为 35,30,28℃。实验溶液未经除氧处理,溶液 pH 值用 NaOH 水溶液和稀盐酸调整。

2 结果与讨论

2.1 动电位极化曲线

图 1 是 304 不锈钢在 Cl⁻ 浓度为 3.5%,SO₄²⁻ 浓度分别为 0%,0.3%,0.5%,0.8%,1%,2%,3.5%,4%溶液中的动电位极化曲线。由曲线得到的点蚀破裂电位 E_b 与 SO₄²⁻ 浓度的关系见图 2。

不锈钢在含 Cl⁻ 的介质中,电极电位朝正方向扫描到钝化区的某一电位时,由于发生点蚀,会出现电流密度突增的现象,则该点电位称为点蚀破裂电位

1 实验方法

研究电极为 304 不锈钢,化学成分由 QSN750 直读光谱测出,如表 1 所示。用线切割技术将电极加工成 φ10mm 的圆片。电极用酚醛树脂镶嵌,焊接导线,非工作面用环氧树脂密封。实验前工作面依次用 150[#],400[#],600[#],800[#] Al₂O₃ 水砂纸打磨平整,经去离子水洗并吹干后,依次用酒精、丙酮擦拭,然后放入干燥皿中备用。

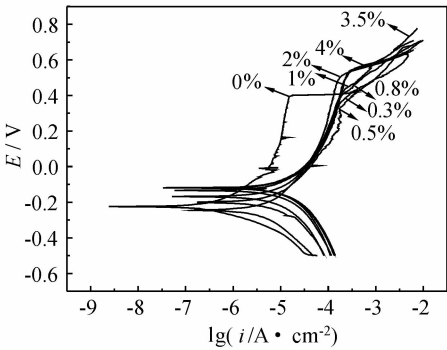


图 1 304 不锈钢电极在含不同浓度 SO₄²⁻ 的 3.5% NaCl 溶液中的动电位极化曲线(T=30℃)

Fig.1 Dynamic potential polarization curves of 304 stainless steel in 3.5% NaCl solution with different SO₄²⁻ concentration(T=30℃)

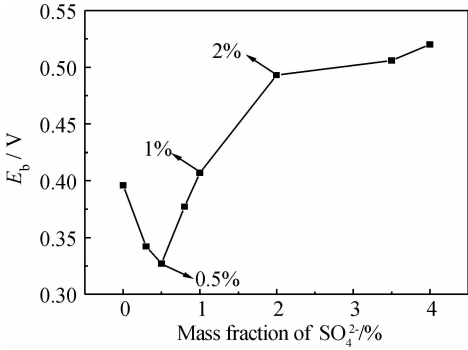


图 2 304 不锈钢点蚀破裂电位 E_b 与 SO₄²⁻ 浓度的关系
Fig.2 Curve of E_b and SO₄²⁻ concentration for 304 stainless steel in 3.5% NaCl solution

E_b^[13]。其值越正,材料的耐点蚀性能越好。由图 1 和图 2 可知,在 SO₄²⁻ 浓度低于 0.5%时,304 不锈钢的

点蚀破裂电位 E_b 随 SO_4^{2-} 浓度的增加而减小;当 SO_4^{2-} 浓度大于 0.5% 时,随着 SO_4^{2-} 浓度的增加,304 不锈钢的 E_b 逐渐正移; E_b 值在 SO_4^{2-} 浓度为 0.5% 时取得极小值。当 SO_4^{2-} 浓度小于 1% 时,不锈钢的 E_b 低于不存在 SO_4^{2-} 时的 E_b ;当 SO_4^{2-} 浓度大于等于 1% 时,不锈钢的 E_b 高于不存在 SO_4^{2-} 时的 E_b 。当 SO_4^{2-} 浓度大于 2% 时,随着 SO_4^{2-} 浓度的继续增加, E_b 增大较为平缓。

一般认为,在含有 Cl^- 的腐蚀体系中,点蚀的诱发动力学过程分为三步: Cl^- 的吸附,吸附的 Cl^- 与钝化膜中的金属阳离子形成氯化物,该氯化物快速溶解。如果存在其他离子能够影响上述过程,就能影响点蚀的发生。在不存在 SO_4^{2-} 的 NaCl 溶液中, Cl^- 均匀地吸附在不锈钢表面,造成钝化膜的加速溶解,个别薄弱处最先露出基体。在 SO_4^{2-} 和 Cl^- 共存的水溶液中, SO_4^{2-} 和 Cl^- 在金属表面发生竞争吸附^[5,14],此吸附过程是一个动态平衡过程,存在离子吸附与脱附现象。当 SO_4^{2-} 浓度较低时(0%~1%), Cl^- 是主要的吸附离子,但吸附在不锈钢表面的少量 SO_4^{2-} 由于在脱附与迁移过程中与 Cl^- 碰撞会使 Cl^- 分布随机性增大,引起不锈钢表面局部 Cl^- 浓度远大于 Cl^- 平均浓度,使该区域钝化膜破裂更加迅速,点蚀敏感性增加,即材料的 E_b 负移。实验结果表明, SO_4^{2-} 浓度为 0.5% 时, Cl^- 局部浓度增大的效果最明显,即 E_b 最负。当 SO_4^{2-} 浓度较高时(1%~4%), SO_4^{2-} 成为主要吸附离子,随着 SO_4^{2-} 浓度的增加,吸附在不锈钢表面的 Cl^- 越来越少。在 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的竞争吸附过程中,虽然 Cl^- 也在不锈钢表面迁移,但是由于其有效浓度较低,不易引起 Cl^- 在不锈钢表面局部区域瞬时集中,此时不锈钢的点蚀敏感性降低,即材料的 E_b 逐渐正移。由图 2 亦可知,当 SO_4^{2-} 浓度在 1%~2% 之间时,点蚀破裂电位 E_b 迅速升高,表明不锈钢表面局部区域 Cl^- 浓度瞬间升高的可能性迅速降低;当 SO_4^{2-} 浓度大于 2% 时, E_b 变化较为平缓,表明 SO_4^{2-} 与 Cl^- 碰撞引起 Cl^- 分布趋于平均。

2.2 不同浓度 SO_4^{2-} 对 304 不锈钢电化学阻抗谱的影响

图 3 是 304 不锈钢在 SO_4^{2-} 浓度分别为 0%,0.3%,0.5%,0.8%,1%,2%,3.5%,4% 的 NaCl 溶液中浸泡不同时间的电化学阻抗谱复数平面图。通过等效电路拟合得到的电极在这 8 种溶液中的电荷转移电阻 R_t 随浸泡时间的变化曲线见图 4。

由图 3 可知,304 不锈钢电极在这 8 种溶液中的阻抗图谱均表现为一单容抗弧,表明电极表面均处于

稳定的钝化状态^[15]。随着浸泡时间的延长,304 不锈钢电极在这 8 种溶液中的单容抗弧半径均逐渐减小,表明耐蚀性不断降低。

R_t 表示电极电化学反应过程中的电荷转移电阻,其大小与不锈钢腐蚀速率成反比,它能一定程度上反映不锈钢的腐蚀速率。由图 4 可知,在这 8 种溶液中,304 不锈钢的 R_t 均随着浸泡时间的延长不断降低,表明材料的腐蚀速率不断增加。在相同的浸泡时间内,当溶液中 SO_4^{2-} 浓度为 4% 时, R_t 最大,表明材料在该溶液中耐蚀性最好;当溶液中 SO_4^{2-} 浓度为 0.5% 时,其 R_t 最小,表明材料在该溶液中耐蚀性最差;当溶液中 SO_4^{2-} 浓度为 1%,2%,3.5% 时,其 R_t 均比不含 SO_4^{2-} 的 NaCl 溶液高,表明在这三种溶液中,材料的耐蚀性较不含 SO_4^{2-} 的 NaCl 溶液好;当 SO_4^{2-} 浓度为 0.3% 时,其 R_t 比不含 SO_4^{2-} 的 NaCl 溶液低,表明材料在该溶液中耐蚀性较不含 SO_4^{2-} 的 NaCl 溶液差。以上分析结果印证了动电位极化曲线的分析结果。

2.3 激光电子散斑干涉测试

图 5 是 304 不锈钢在 3.5% NaCl,3.5% NaCl+0.5% Na_2SO_4 ,3.5% NaCl+4% Na_2SO_4 溶液中,施加 0.3V(v_s SCE)恒电位极化时的计时电流曲线。三组曲线对应的 ESPI 图像分别见图 6~8。

由图 5(a)可知,在 3.5% NaCl 溶液中,304 不锈钢在 0.3V(v_s SCE)恒电位极化下,极化电流先下降,然后产生小幅度上升。极化至 6s 左右时,极化电流呈锯齿形缓慢波动,表明电极表面可能在经历钝化膜破裂与修复的交替过程。极化 9s 时,极化电流为 0.3mA,ESPI 图(图 6(b))上出现两个亮斑,表明电极表面在相应位置有点蚀产生。极化 15s 时,ESPI 图(图 6(c))上原有的两个亮斑一个略有长大且更加清晰,另一个亮度相对变弱。极化 29s 时,ESPI 图(图 6(d))上原来亮度变弱的亮斑消失,无腐蚀产物扩散现象,这可能是由于电极表面相应位置的蚀孔发生了再钝化。另一亮斑继续长大并有向下扩散的趋势,表明该处蚀孔不断生长,腐蚀产物不断积累并在重力作用下向下移动。极化 50s 时,ESPI 图(图 6(e))上亮斑扩散趋势变大,蚀孔继续生长,腐蚀产物不断向外扩散。极化 120s 时,ESPI 图(图 6(f))上亮斑范围继续扩大,腐蚀产物扩散到了较大的范围。

由图 5(b)可知,在 3.5% NaCl+0.5% Na_2SO_4 溶液中,304 不锈钢在 0.3V(v_s SCE)恒电位极化下,极化电流先下降,然后随时间呈锯齿形上升,表明电极表面可能在经历钝化膜破裂与修复的交替过程。

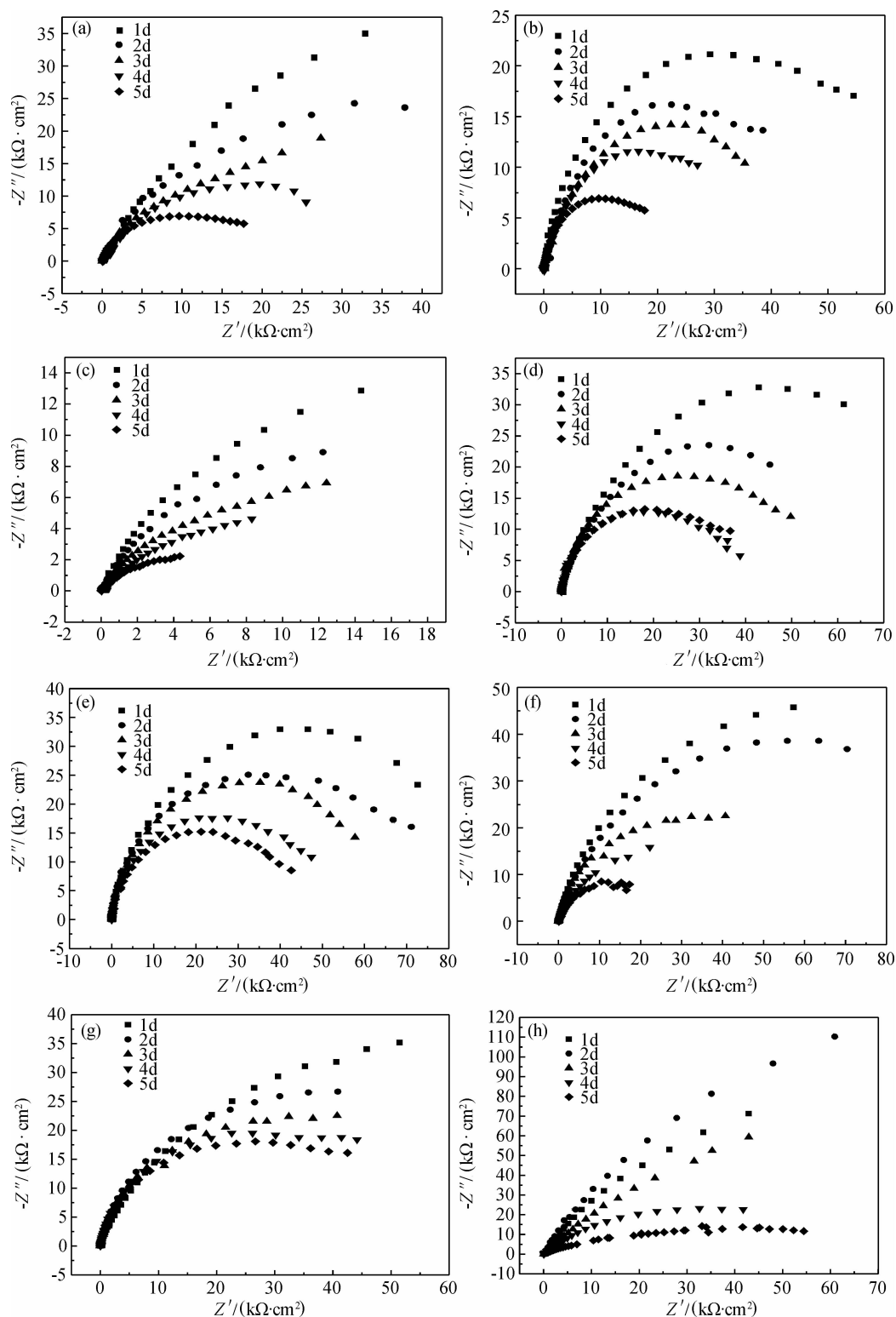


图 3 304 不锈钢电极在不同浓度 SO₄²⁻ 的 3.5%NaCl 溶液中浸泡不同时间后的电化学阻抗谱复数平面图 ($T=35^{\circ}\text{C}$)

(a)0%;(b)0.3%;(c)0.5%;(d)0.8%;(e)1%;(f)2%;(g)3.5%;(h)4%

Fig. 3 Nyquist plots at different immersion time for 304 stainless steel in 3.5%

NaCl solution with different SO₄²⁻ concentration ($T=35^{\circ}\text{C}$)

(a)0%;(b)0.3%;(c)0.5%;(d)0.8%;(e)1%;(f)2%;(g)3.5%;(h)4%

304 不锈钢极化 4s 时,极化电流为 0.2mA,ESPI 图(图 7(b))上出现了一个亮斑,表明电极表面在该位

置处产生了一个蚀孔。极化 17s 时,ESPI 图(图 7(c))上的亮斑略有长大,变得更加清晰,表明该蚀孔在继

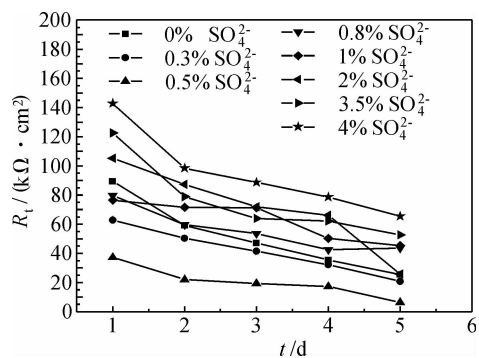


图 4 304 不锈钢电极在不同浓度 SO_4^{2-} 的 3.5%NaCl 溶液中电荷转移电阻 R_t 随浸泡时间的变化曲线

Fig. 4 Curves of charge transfer resistance R_t and immersion time for 304 stainless steel in 3.5%NaCl solution with different SO_4^{2-} concentration

续生长,同时腐蚀产物在不断向外扩散。极化 67s 时, ESPI 图(图 7(d))上在原有亮斑的左方又出现了一个亮斑,表明又有一个新的蚀孔在该处产生。极化 91s 时, ESPI 图(图 7(e))上两个亮斑继续增大,并有向下扩散的趋势。极化 120s 时,激光散斑干涉图(图 7(f))上两个亮斑变得更大,表明随着极化反应的进行,蚀孔内不断向外释放出腐蚀产物,腐蚀产物在重力的作用下不断向下方扩散。

由图 5(c)可知,在 3.5% NaCl+4% Na_2SO_4 溶液中,304 不锈钢在 0.3V(vs SCE)恒电位极化下,极化电流随时间呈锯齿形上升。极化 94s 时,极化电流为 0.3mA, ESPI 图(图 8(b))上出现了一个亮斑,表明电极表面在相应位置产生了一个蚀孔。极化 120s 时,

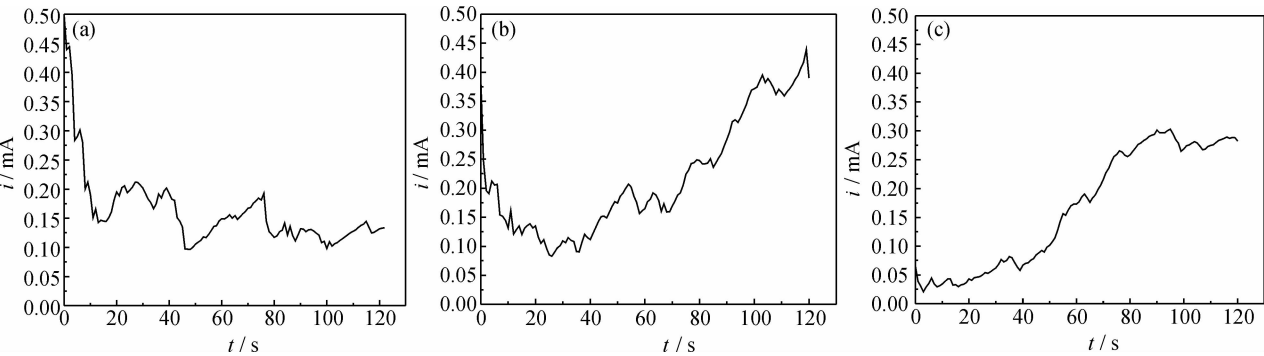


图 5 外加电位为 0.3V (vs SCE) 时 304 不锈钢在 3.5%NaCl (a), 3.5%NaCl+0.5% Na_2SO_4 (b), 3.5%NaCl+4% Na_2SO_4 (c) 三种溶液中的计时电流曲线($T=28^\circ\text{C}$)

Fig. 5 Chronoamperometry curves of 304 stainless steel at an applied potential of 0.3V (vs SCE) in different solution($T=28^\circ\text{C}$)
(a)3.5%NaCl; (b)3.5%NaCl+0.5% Na_2SO_4 ; (c)3.5%NaCl+4% Na_2SO_4

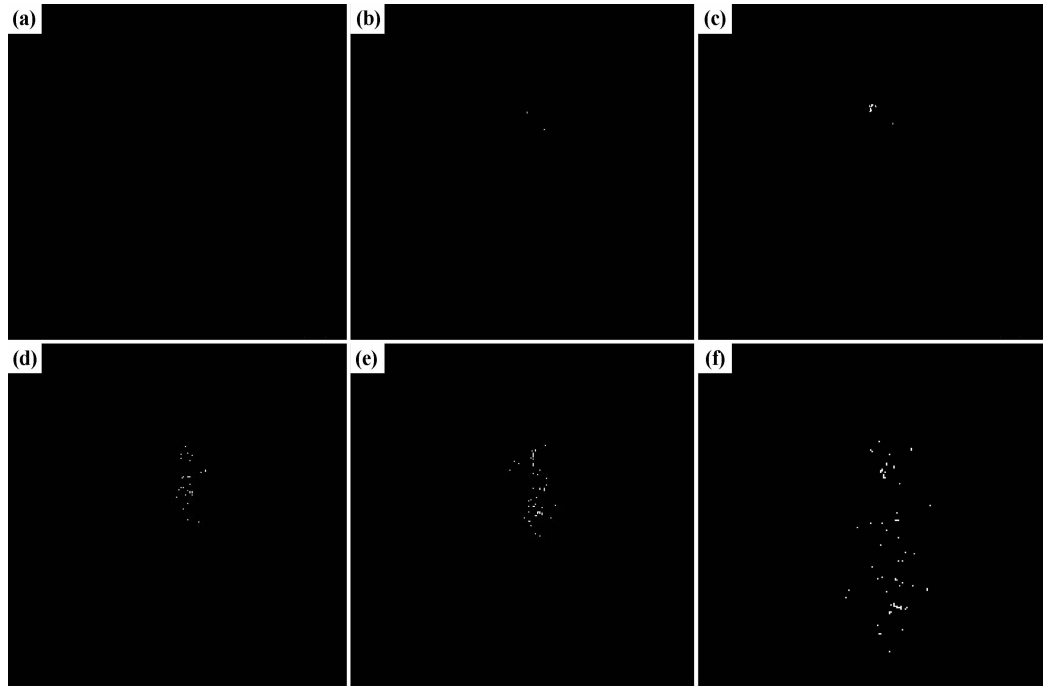


图 6 在外加电位为 0.3V (vs SCE) 时 304 不锈钢在 3.5% NaCl 溶液中的 ESPI 图像($T=28^\circ\text{C}$) (a)0s;(b)9s;(c)15s;(d)29s;(e)50s;(f)120s

Fig. 6 ESPI plots of 304 stainless steel in 3.5% NaCl solution at an applied potential of 0.3V (vs SCE) ($T=28^\circ\text{C}$)
(a)0s;(b)9s;(c)15s;(d)29s;(e)50s;(f)120s

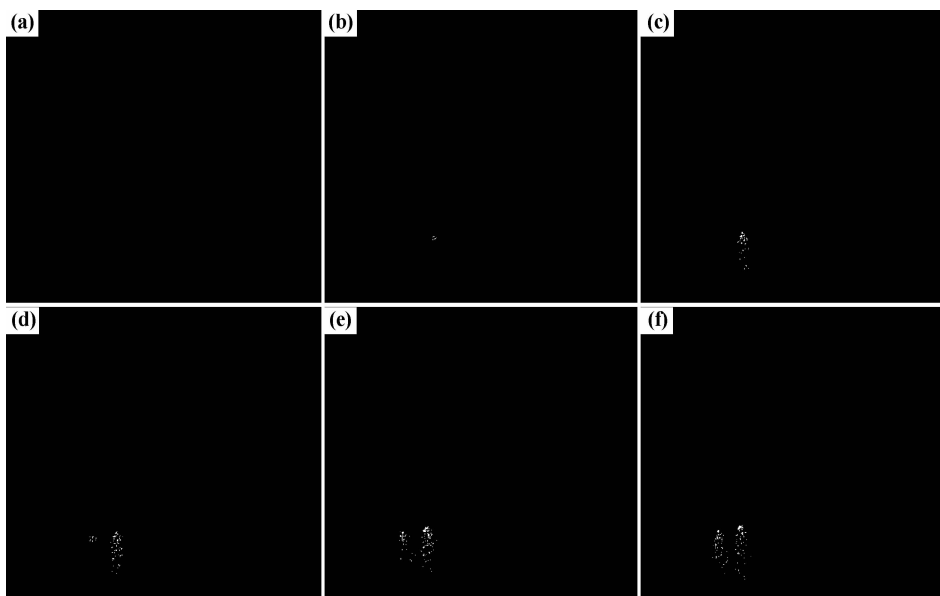


图 7 在外加电位为 0.3V (*vs* SCE) 时 304 不锈钢在 3.5%NaCl+0.5%Na₂SO₄ 溶液中的 ESPI 图像 ($T=28^{\circ}\text{C}$)

(a)0s; (b)4s; (c)17s; (d)67s; (e)91s; (f)120s

Fig. 7 ESPI plots of 304 stainless steel in 3.5%NaCl+0.5%Na₂SO₄ solution at an applied potential of 0.3V (*vs* SCE) ($T=28^{\circ}\text{C}$)

(a)0s; (b)4s; (c)17s; (d)67s; (e)91s; (f)120s

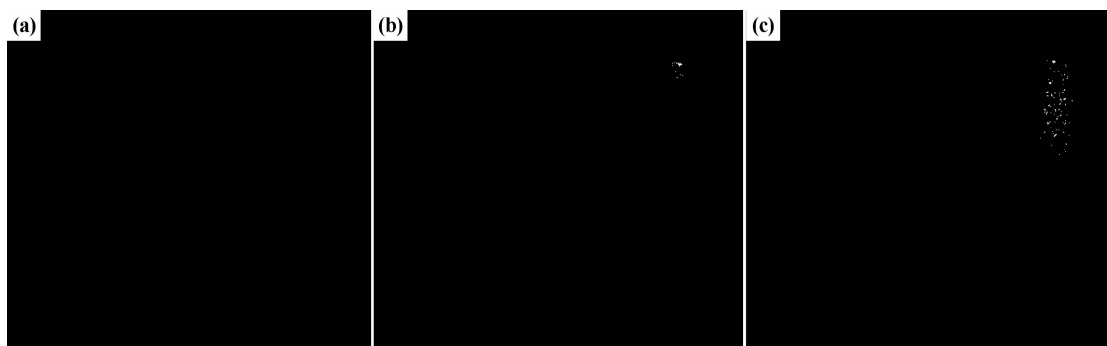


图 8 在外加电位为 0.3V (*vs* SCE) 时 304 不锈钢在 3.5%NaCl+4%Na₂SO₄ 溶液中的 ESPI 图像 ($T=28^{\circ}\text{C}$)

(a)0s; (b)94s; (c)120s

Fig. 8 ESPI plots of 304 stainless steel in 3.5%NaCl+4%Na₂SO₄ solution at an applied potential of 0.3V (*vs* SCE) ($T=28^{\circ}\text{C}$)

(a)0s; (b)94s; (c)120s

ESPI 图(图 8(c))上亮斑长大,变得更加清晰,表明该蚀点在继续长大,同时腐蚀产物不断地向外扩散。

点蚀感应时间(τ)是指在恒电位极化条件下蚀孔开始形成所需要的时间。 τ 值的大小随实验所使用的溶液成分不同而不同,溶液的腐蚀性越强,孔蚀感应时间越短。由以上 ESPI 监测结果可知,在 0.3V (*vs* SCE)恒电位极化下,304 不锈钢在 3.5%NaCl+0.5%Na₂SO₄ 溶液中,点蚀感应时间 τ 为 4s;在 3.5%NaCl 溶液中, τ 为 9s;在 3.5%NaCl+4%Na₂SO₄ 溶液中,点蚀感应时间 τ 为 94s;由此可以得出结论,在这三种溶液中,304 不锈钢的耐蚀性大小依次为(3.5%NaCl

+4%Na₂SO₄)>(3.5%NaCl)>(3.5%NaCl+0.5%Na₂SO₄)。这一结果印证了动电位极化和 EIS 的分析结果。

3 结论

(1)不同浓度的 SO₄²⁻ 对 304 不锈钢的点蚀破裂电位 E_b 有不同的作用效果。当 SO₄²⁻ 浓度为 0.5% 时,不锈钢的 E_b 最负;当 SO₄²⁻ 浓度低于 1% 时,不锈钢的 E_b 比不存在 SO₄²⁻ 离子时的 E_b 负;当 SO₄²⁻ 浓度高于 1% 时,不锈钢的 E_b 比不存在 SO₄²⁻ 离子时的

E_b 正。

(2)304 不锈钢在 8 种溶液中的 EIS 复数平面图均为单容抗弧,电极表面处于稳定的钝化状态。电荷转移电阻 R_t 都随着浸泡时间的延长而降低。在相同的浸泡时间内,当 SO_4^{2-} 浓度为 0.5% 时, R_t 最小;当 SO_4^{2-} 浓度为 4% 时, R_t 最大。

(3)利用 ESPI 监测溶液中不锈钢点蚀行为时,如果散斑图上出现亮斑,表明材料表面对应位置发生了点蚀。由 ESPI 结果可知,304 不锈钢在 3.5% NaCl + 0.5% Na_2SO_4 溶液中的点蚀感应时间 τ 为 4s;在 3.5% NaCl 溶液中的 τ 为 9s;在 3.5% NaCl + 4% Na_2SO_4 溶液中的 τ 为 94s。

参考文献

- [1] 周本省. 工业冷却水系统中金属的腐蚀与防护[M]. 北京: 化学工业出版社, 1993. 25.
- [2] 刘道新. 材料的腐蚀与防护[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006. 119—120.
- [3] SHERBINI E E, REHIM S S. Pitting corrosion of zinc in Na_2SO_4 solutions and the effect of some inorganic inhibitors[J]. Corros Sci, 2000, 42(5): 785—789.
- [4] 解群, 葛红花. 冷却水中 SO_4^{2-} 对不锈钢管的缓蚀作用[J]. 上海电力学院学报, 2002, 2(6): 33—36.
- [5] LEE W J, PYUN S I. The effect of prior Cl^- ion incorporation into native oxide film on pure aluminium in neutral chloride solution on pit initiation[J]. Corrosion Science, 2001, 43(2): 353—363.
- [6] PETZING J N, TYRER J R. Recent development and applications in electronic speckle pattern interferometry [J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1998, 33(2): 153—169.
- [7] HABIB K, MUHANA K. Holographic interferometry as electrochemical emission spectroscopy of a carbon steel in 5-20 ppm

TROS C-70 inhibited seawater[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2002, 38: 577—588.

- [8] HABIB K, BOURESLE K. Detection localized corrosion of stainless steels by optical interferometry [J]. Electrochemical Acta, 1999, 44(25): 4635—4641.
- [9] 王梅丰, 杜楠, 李晓刚, 等. 利用电子散斑干涉技术研究 45 碳钢在 $\text{NaHCO}_3 + \text{NaCl}$ 体系中的早期点蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2009, 29(3): 210—214.
- [10] WANG M F, LI X G, DU N, et al. Direct evidence of initial pitting corrosion [J]. Electrochemistry Communications, 2008, 10(7): 1000—1004.
- [11] DU Nan, LIU Gang, ZHAO Qing. Monitoring initial pitting behaviors of 30CrMnSi steel in NaHCO_3 -NaCl solution by ESPI and electrochemical noise [J]. Material Science, 2008, 2(3): 326—329.
- [12] WANG M F. Study on initial pitting corrosion behaviors and mechanisms of metals using electronic speckle pattern interferometry [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2008.
- [13] 李狄. 电化学原理 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008. 275—276.
- [14] WU J W, LI X G, DU C W, et al. Effects of Cl^- and SO_4^{2-} ions on corrosion behavior of X70 steel [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2005, 21(1): 28—32.
- [15] 胡丽华, 杜楠, 王梅丰, 等. 1Cr18Ni9Ti 不锈钢在酸性 NaCl 溶液中的点蚀电化学特征 [J]. 失效分析与预防, 2006, 1(3): 6—9.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51071083)

收稿日期: 2011-10-08; 修订日期: 2012-03-26

作者简介: 杜楠(1956—), 男, 教授, 主要从事金属腐蚀与防护方面的研究工作, 联系地址: 南昌市丰和南大道 696 号南昌航空大学国防科技研究院 318 室(330063), E-mail: d_unan@sina.com

(上接第 63 页)

- [14] STONE D E W, CLARKE B. Ultrasonic attenuation as a measure of void content in carbon-fiber reinforced plastics [J]. NDT, 1975, 8(3): 137—139.

收稿日期: 2011-08-15; 修订日期: 2011-11-29

作者简介: 高晓进(1987—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无损检

测、材料失效分析及预测预防, 联系地址: 北京市海淀区学院路 37 号北京航空航天大学 1 系 8 研(100191), E-mail: gao19870311@163.com

通讯作者: 张峥, 教授, 主要从事失效分析预测预防研究, 联系地址: 北京市海淀区学院路 37 号北京航空航天大学 1 系 8 研(100191), E-mail: zhangzh@buaa.edu.cn