

海水微生物对 Zn-Al-Cd 牺牲阳极 腐蚀性能的影响

Effects of Microorganism on Corrosion of Zn-Al-Cd
Sacrificial Anode in Natural Seawater

宋秀霞^{1,2}, 张 杰², 杨东方¹, 段继周²

(1 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306;

2 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071)

SONG Xiu-xia^{1,2}, ZHANG Jie², YANG Dong-fang¹, DUAN Ji-zhou²

(1 College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, Shandong, China)

摘要: 通过电化学阻抗(EIS)、扫描电镜(SEM)和荧光显微镜技术等方法对 Zn-Al-Cd 牺牲阳极在灭菌和天然海水中的腐蚀行为进行了对比研究。结果表明:在实验前期,试样在天然海水中的腐蚀电位高于灭菌海水中的腐蚀电位,在实验后期,结果相反。EIS 测试结果表明,灭菌海水中试样的 R_{ct} 值要比天然海水中试样小很多,原因是在天然海水中,试样表面附着的细菌通过代谢活动形成一层生物膜,在一定程度减缓了试样的腐蚀速率。SEM 结果表明,灭菌海水中的试样表面发生了局部腐蚀,而在天然海水中试样的腐蚀较均匀。荧光显微镜结果表明:细菌先是在试样上以单体形式附着,然后形成局部的团聚,进而形成生物膜,随着营养物质的耗尽,生物膜最后从试样表面脱落。

关键词: Zn-Al-Cd 阳极; 海水; 电化学阻抗谱; 荧光显微镜技术

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.01.012

中图分类号: TG171 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2013)01-0058-06

Abstract: The effects of the sterile seawater and natural seawater on corrosion of Zn-Al-Cd sacrificial anode were investigated by using electrochemical impedance spectroscopy (EIS), scanning electron microscopy (SEM) and fluorescence microscopy. The results show that the corrosion potential of sample in the sterile seawater is lower than that in the natural seawater at the beginning of experiment, but at the late of experiment, the result is opposite. The EIS results show that the R_{ct} value in the sterile seawater is much smaller than that of anode in natural seawater, which is because in the natural seawater, a layer of biofilm through the metabolic activities of bacteria is formed on the sample surface. The biofilm could prevent the sample from contacting with seawater directly and slow down the corrosion rate. SEM images reveal the presence of localized corrosion morphologies on the sample in the sterile seawater, while in natural seawater, the corrosion is much uniform. Fluorescence microscopy results show that the bacteria uniformly attach to the sample first, and then reunite uneven. About fourteen days later, the local biofilm forms, and it detaches from the sample finally because of the exhaustion of nutrients.

Key words: Zn-Al-Cd anode; seawater; EIS; fluorescence microscopy

在海洋环境中使用的设备和材料,有些由于各种微生物和海洋生物附着造成生物污损和腐蚀,会显著减低其使用性能和寿命,不仅造成巨大的经济损失和严重的事故,甚至危及生命安全^[1]。近年来,微生物腐蚀已被越来越多的科学工作者所关注。当一种材料或物体浸于海水中后,表面很快就被细菌黏附,细菌分泌胞外多聚物(如胞外多糖),使细菌与基体之间、细菌与

细菌之间相互粘接形成复杂的生物膜^[2]。关于金属在海水中的微生物腐蚀的研究,已有研究学者做了很多工作,其中研究最多的是微生物对碳钢和不锈钢腐蚀的影响^[3-5]。

牺牲阳极阴极保护法由于具有电流分散能力好,易于管理和维护,费用相对较低等优点,已被广泛用于各种海洋设备的腐蚀防护^[6]。其中,Zn-Al-Cd 牺牲阳

极具有较高的电流效率,对金属设施保护效果较好,目前已成为应用最广的牺牲阳极材料之一^[7]。关于该阳极材料在热海水的腐蚀机理和微量元素对其性能的影响,国内已有相关报道^[8,9],而关于海水环境中微生物膜对 Zn-Al-Cd 阳极材料腐蚀性能的影响,鲜有报道。

本工作主要采用电化学阻抗谱、扫描电镜以及荧光显微镜技术等方法,通过对比研究灭菌和天然海水中 Zn-Al-Cd 牺牲阳极材料腐蚀行为,探讨了阳极材料表面微生物膜对其性能的影响,该研究对海水中牺牲阳极的性能评价,牺牲阳极寿命预测以及污损生物群落对牺牲阳极阴极保护的影响等方面具有重要意义。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验材料为 Zn-Al-Cd 合金,其化学成分(质量分数/%)如下:Al 0.36, Cd 0.045, Pb 0.00092, Cu 0.0012, Fe 0.0021, 余量为 Zn。电化学测试、表面分析实验以及荧光显微镜观察所用试片规格均为 10mm×10mm×6mm。根据实验要求,电化学测试试片一端用铜导线焊接后,保留一面作为工作面,其余用环氧树脂密封在 PVC 管中;表面分析实验试片和荧光观察试片分别在其一面用硅橡胶固定一段棉线。所有试片参照国标 GB5776—86 进行表面处理,试样的工作面用水磨砂纸逐级打磨到 1200[#],先用蒸馏水冲洗干净,然后乙醇超声清洗,再用无水乙醇冲洗,实验前放在超净工作台中,在距紫外灯 30cm 处紫外灭菌 30min。

1.2 实验用海水介质

实验用海水介质取自青岛汇泉湾,经粗砂过滤净化,在室温下静置 5d,取一部分天然海水经 121℃ 高温高压蒸汽灭菌 30min,冷却至室温后取 200mL 作为灭菌海水体系;另取 200mL 天然海水作为未灭菌海水体系。灭菌海水冷却后的各项指标与天然海水可以认为是相同的^[10]。

1.3 电化学实验

电化学实验采用 SI 1287 恒电位仪和 SI 1260 频率分析仪进行测试,测试体系为三电极体系。工作电极为 Zn-Al-Cd 试样,对电极为铂电极,参比电极为饱和甘汞电极(SCE)。开路电位和交流阻抗谱测试都在室温下进行,周期为 23d。交流阻抗谱的激励信号为 10mV 正弦波电压,扫描频率范围为 10mHz ~ 100kHz。采用 Zplot 软件进行数据采集,采用 ZSimpWin 电化学分析软件对实验结果进行拟合分析。

1.4 表面分析实验

取两个经 121℃ 高温高压灭菌处理的 250mL 广

口瓶,在超净工作台中分别加入上述的灭菌和天然海水各 200mL,每个广口瓶中分别放入两个按 1.1 节中方法处理的试样,橡胶瓶盖周围用石蜡密封后置于室温下。在 9d 和 17d 后,分别在洁净工作台中迅速取出灭菌和天然海水中的各一个试样,进行预处理。无菌试样用 50%乙醇(溶剂为 PBS)浸泡 15min,75%乙醇浸泡 15min,100%乙醇浸泡 15min 进行逐级脱水处理;有菌试样用 5%戊二醛溶液(溶剂为 PBS)浸泡 2h 后,然后采用上述不同浓度的乙醇溶液逐级脱水。真空临界干燥后,采用 SEM 观察腐蚀形貌,加速电压为 20kV。

1.5 细菌的荧光显微镜观察

取 4 个按 1.1 节中方法处理好的试样,悬挂于盛有天然海水的广口瓶,橡胶瓶盖周围用石蜡密封后置于室温下,周期性地从天然海水中取出试样作微生物荧光显微镜观察。实验前,用灭菌海水冲洗试样 3 次,用 5%戊二醛(用 PBS 稀释)固定 30min,然后用 0.1%的 4,6-二脒基-2-苯基吡啶(DAPI)避光染色 15min。在避光下空气中自然风干后,将染色的试样放在载玻片上,放到 Zeiss Axioplan 荧光显微镜下观察。

1.6 失重实验

失重实验试样规格为 10mm×10mm×6mm,在试样的一面打号,按照 1.1 节中方法处理。然后用高精度电子分析天平准确称重并记录,在超净台中紫外灯灭菌 30min 后,将各组挂片分别浸泡在灭菌海水和天然海水中。失重实验周期为 9d,每组采用 3 个平行样。

实验周期结束后取出挂片,用毛刷除掉表面的杂物,再参照国标 GB11112—89 去除腐蚀产物。取出用自来水冲洗干净后放入无水酒精中干燥。最后,取出吹干,放入干燥器 24h 后再称重。

腐蚀产物去除后,采用单位时间内的平均腐蚀速率(mm/a)来表征试样的腐蚀速率,计算公式如下:

$$v = 8.76 \times \frac{w_0 - w_1}{AT\rho} \quad (1)$$

式中: v 为试样的平均腐蚀速率,mm/a; w_0 为试样的起始量,g; w_1 为去除腐蚀产物后的试样量,g; A 为试样面积,m²; T 为试样周期,h; ρ 为金属密度,g/cm³。

2 实验结果与讨论

2.1 开路电位

测得开路电位与时间曲线如图 1 所示,可以看出,Zn-Al-Cd 阳极在灭菌和天然海水中的腐蚀电位变化趋势明显不同。灭菌海水中试样腐蚀电位在整个实验期缓慢正移了 20mV,考虑随着反应的进行,腐蚀产物在试样表面逐渐变得致密,导致电位正移。

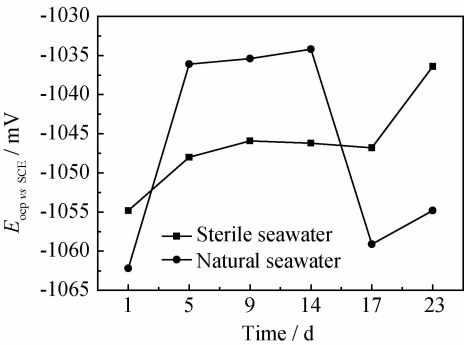


图 1 试样分别在灭菌和天然海水中开路电位随时间的变化曲线

Fig. 1 Time dependence of E_{ocp} for sample in sterile seawater and natural seawater

对于天然海水中试样,在实验的 1~5d,腐蚀电位迅速正移近 30mV,这是由于海水中细菌逐渐附着在材料表面,其产生的代谢产物也吸附在电极表面,使电位出现了正移;在 5~14d,试样的腐蚀电位变化缓慢,这是因为细菌在试样表面逐渐形成稳定的生物膜。在 14~23d,试样腐蚀电位负移了 25mV,这是因为在封闭的体系中,随着氧气和营养物质的消耗,细菌逐渐死亡,从试样表面脱落,腐蚀速率增加。

从开路电位变化的趋势来看,在实验前期,试样在天然海水并有生物膜存在下,其腐蚀电位高于灭菌海水中的腐蚀电位。研究者在研究天然海水对不锈钢和高钼钢的影响时也发现同样规律,且更明显^[6,11,12]。

2.2 交流阻抗谱分析

2.2.1 灭菌海水中的交流阻抗谱分析

图 2 为试样在灭菌海水中测试 23d 的 Nyquist 阻

抗图,根据体系自身特点,选用图 4(a)为本实验条件下的等效电路模型。其中, R_s 表示溶液电阻, C_f 表示表面层电容, R_f 表示表面层电阻, C_{dl} 表示界面双电层电容, R_{ct} 表示电荷传递电阻。 R_{ct} 可以用来表征金属的腐蚀速率,其值越小则表明金属腐蚀速率越大^[13]。

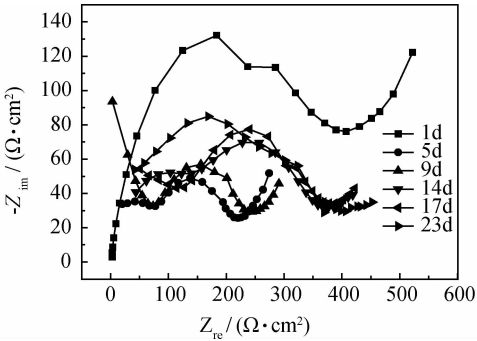


图 2 试样在灭菌海水中的交流阻抗谱

Fig. 2 Nyquist plots for samples in sterile seawater

表 1 显示了试样在灭菌海水中的电化学参数随时间的变化情况。从表 1 可以看出, R_{ct} 值第 5d 出现了迅速下降,这可能是由于试样表面的氧化膜被破坏,作为活性阳极材料的试样直接暴露在海水中,腐蚀增加。到 14d 开始, R_{ct} 值又出现了逐渐增大的趋势,这是由于腐蚀产物不断增多,使得表面腐蚀产物层逐渐变得致密,从而在一定程度上导致腐蚀减慢。至第 23d, R_{ct} 值又出现了减小的趋势,可能是随着时间的进行,腐蚀产物膜逐渐变得疏松,从而腐蚀速率增大。在整个实验过程中,试样在灭菌海水中的腐蚀速率经历了增大,减小,再增大的变化过程。

表 1 试样在灭菌海水的电化学阻抗模型的参数分析

Table 1 Results of the fit with the EIS model for the sterile seawater

Time/d	$C_f / (F \cdot m^{-2})$	$R_f / (\Omega \cdot cm^2)$	$C_{dl} / (F \cdot m^{-2})$	$R_{ct} / (\Omega \cdot cm^2)$
1	1.204×10^{-6}	401.7	7.616×10^{-3}	590.3
5	5.325×10^{-8}	86.05	3.143×10^{-6}	198.3
9	2.281×10^{-8}	112.8	5.036×10^{-6}	187.5
14	4.826×10^{-8}	131.2	2.312×10^{-6}	235.0
17	3.057×10^{-8}	118.4	2.170×10^{-6}	263.6
23	4.096×10^{-8}	178.5	1.657×10^{-6}	214.5

2.2.2 天然海水中的交流阻抗谱分析

图 3 为试样在天然海水中的阻抗谱图。根据体系自身特点,选用了图 4(b)为天然海水体系的等效电路模型。 Q_f 表示表面层电容, Q_{dl} 表示界面双电层电容。常相位角组件 Q 的阻抗值 $Z_{CPE} = Y_0^{-1} (j\omega)^{-n}$, 其中, n 为弥散指数, $0 < n < 1$, 可用来判断金属表面的粗糙程度^[14]。

表 2 显示了试样在天然海水中的电化学参数随时

间的变化情况。从表 2 可知,在 1~23d, n_1 值逐渐由 0.82 减小到 0.5458,这可能是由于随着试样表面腐蚀的加速,电极表面逐渐变得粗糙。

在实验的 1~9d, R_{ct} 值从 $9561 \Omega \cdot cm^2$ 迅速减小到 $1883 \Omega \cdot cm^2$,这是因为作为活性阳极的试样,在海水中发生自身快速腐蚀造成的。这段时间虽然细菌逐渐在金属表面吸附并形成局部的团聚,但细菌吸附对腐蚀的抑制与该阳极自身的快速腐蚀相比,仍是非常

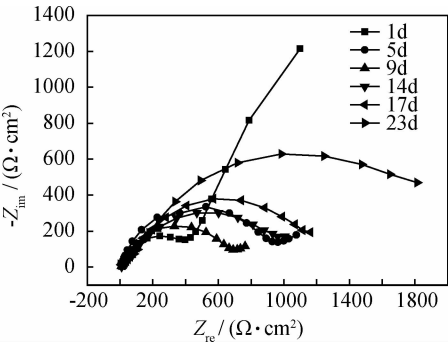


图 3 试样在天然海水中的交流阻抗谱

Fig. 3 Nyquist plots for samples in natural seawater

表 2 试样在天然海水中的电化学阻抗模型的参数分析

Table 2 Results of the fit with the EIS model for the natural seawater

Time/d	$Q_f/(F \cdot m^{-2})$	n_1	$R_f/(\Omega \cdot cm^2)$	$Q_{dl}/(F \cdot m^{-2})$	n_2	$R_{ct}/(\Omega \cdot cm^2)$
1	1.027×10^{-5}	0.82	440.7	3.831×10^{-4}	0.7727	9561
5	7.66×10^{-6}	0.814	875.5	2.801×10^{-3}	0.4198	7925
9	2.575×10^{-5}	0.7072	715.9	6.042×10^{-3}	0.6358	1883
14	6.952×10^{-5}	0.6065	1093	8.682×10^{-3}	0.7555	2819
17	9.35×10^{-5}	0.5873	1379	2.231×10^{-2}	0.8861	2169
23	1.103×10^{-4}	0.5458	389.6	4.122×10^{-6}	0.9939	2170

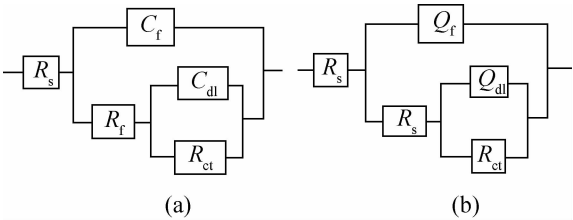


图 4 试样在灭菌(a)和天然(b)海水中的阻抗等效电路模型

Fig. 4 Equivalent circuits of the impedance diagrams of the sample in the sterile seawater (a) and natural seawater (b)

灭菌海水中试样的 R_{ct} 值要比天然海水中试样的 R_{ct} 值小很多,原因可能是在灭菌海水中的试样直接与海水介质接触,海水中的氯离子等腐蚀介质加速了 Zn-Al-Cd 的腐蚀,同时,天然海水中的细菌消耗水中的氧气在一定程度上也抑制了腐蚀的发生。在天然海水中,试样表面附着的细菌通过代谢活动形成一层生物膜,这层膜使试样不能与海水直接接触,减缓了试样的腐蚀。有研究表明试样的生物膜的扩散屏障作用能有效阻隔溶液对基体的腐蚀,在一定程度上能减缓试样的腐蚀速率,抑制了腐蚀^[4,15,16]。

2.3 腐蚀速率测定

失重实验所得 Zn-Al-Cd 阳极试样在灭菌海水和天然海水中浸泡 9d 的腐蚀速率分别为 0.1071, 0.09811mm/a。由此可以看出,试样在灭菌海水中的腐蚀速率大于试样在天然海水中的腐蚀速率,表明天

微弱的,所以金属的腐蚀速率逐渐增大。第 14d, R_{ct} 值又逐渐增大,这是因为随着细菌在金属表面越来越多的聚集,逐渐在试样表面形成了局部稳定的生物膜,在一定程度上阻挡了试样的腐蚀,使腐蚀速率减小。到实验后期, R_{ct} 值又逐渐减小,这是因为在密闭的体系中,随着营养物质及氧气的耗尽,细菌逐渐死亡,细菌代谢产物逐渐减少,生物膜逐渐脱落,所以试样的腐蚀速率又增大。在整个实验过程中,试样在天然海水中的腐蚀速率经历了先增大,后减小,再次增大的变化过程。

2.4 SEM 和荧光显微镜结果分析

然海水中由于细菌的作用,在一定程度上减缓试样的腐蚀,这与前面交流阻抗结果相一致。

图 5 显示了 Zn-Al-Cd 在灭菌海水中分别浸泡 9d 和 17d 的 SEM 形貌。从图 5(a)可以看出,试样在灭菌海水中浸泡 9d,试样表面分布着一些白色的腐蚀产物,局部出现了腐蚀坑,试样发生了不均匀腐蚀。分析可能存在的原因如下:(1)实验初期,由于试样表面的合金元素分布不均,发生了局部富集,这样电位高于基体金属的合金元素所组成的相与基体金属构成了微腐蚀电池,使得金属发生局部溶解^[17],龙萍等^[8]认为试样的局部腐蚀与铝偏析相的存在有直接的关系,因为对于几乎不含铝的锌阳极就不存在穿晶腐蚀和晶间腐蚀的问题。同时,在试样表面,含有 Al 等电负性较高微量元素时,富 Al 区作为阳极优先溶解,锌基局部表面发生如下析氢反应:



伴随 OH^- 产生,锌基表面局部 pH 值上升,这也是发生局部腐蚀的必要条件^[8]。(2)渗氢的作用。渗氢是由于在牺牲阳极的表面处理过程中,氢以原子状态渗入工件基体或镀层中造成的^[18]。因为渗氢引起表面的机械损伤也会加剧阳极表面的局部腐蚀,尤其是晶间腐蚀^[8]。

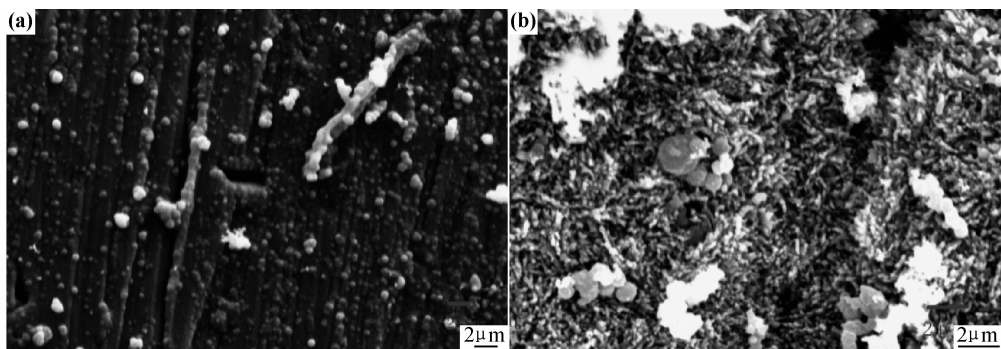


图 5 Zn-Al-Cd 试样在灭菌海水中分别浸泡 9d(a) 和 17d(b) 的 SEM 形貌

Fig. 5 SEM morphology of the Zn-Al-Cd samples immersed in the sterile seawater for 9 days (a) and 17 days (b)

由图 5(b) 可以看出, 试样在灭菌海水中浸泡 17d 后, 表面沉积了一层较厚的腐蚀产物, 在一定程度上减缓了腐蚀, 这也与前面电化学结果相一致。

图 6 显示了 Zn-Al-Cd 在天然海水中分别浸泡 9d 和 17d 的 SEM 形貌。从图 6(a) 可以看出, 细菌在试样表面局部团聚, 结合电镜及荧光结果显示, 发现附着在

试样表面的大部分是杆状细菌, 这个结果同马士德在青岛中港实海挂片得到的结果一致^[19]。图 6(b) 显示试样浸泡 17d, 在密闭的体系中, 随着氧气和营养物质的消耗, 细菌逐渐死亡, 大部分已经从试样表面脱落掉, 这与前面开路电位的结果也是一致的, 由于细菌的脱落, 开路电位发生了负移, 腐蚀速率增加, 试样发生的是均匀腐蚀。

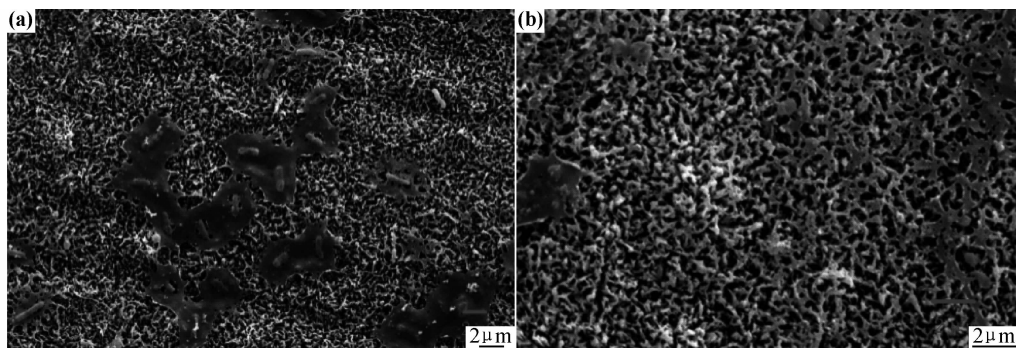


图 6 Zn-Al-Cd 试样在天然海水中分别浸泡 9d(a) 和 17d(b) 的 SEM 形貌

Fig. 6 SEM morphology of the Zn-Al-Cd samples immersed in the natural seawater for 9 days (a) and 17 days (b)

图 7 显示了 Zn-Al-Cd 试样在天然海水中浸泡不同时间的荧光显微镜照片。可以看出, 第 5d 细菌以单体的形式均匀地附着在试样表面; 到第 9d 出现了不均匀的团聚现象, 这与扫描电镜结果相符; 随着细菌的繁殖代谢, 到第 14d, 细菌的聚集团逐渐变大, 生成局部的生物膜。由于本实验体系中使用的是密闭体系, 没有出现许凤玲^[12]等文章中提到的致密厚膜, 他们每天更换新鲜的海水, 由此也说明了致密生物膜的形成离不开海水中的氧气和营养物质的存在。在密闭的体系中, 随着氧气和营养物质的消耗, 细菌逐渐死亡, 第 17d 荧光显微镜的结果显示, 试样表面生物膜基本已脱落, 这个结果也与开路电位所测的趋势是一致的。

3 结论

(1) 交流阻抗谱实验结果表明: 试样在灭菌和天然海水中的腐蚀速率都经历了增大, 减小, 再次增大的变化过程。整个实验过程中灭菌海水中的 R_{ct} 值要远远小于天然海水中的 R_{ct} 值, 这是由于天然海水中的试样表面附着的细菌通过代谢活动形成一层生物膜, 同时消耗了水中的氧气, 在一定程度上减缓了试样的腐蚀速率。

(2) SEM 和荧光显微镜结果表明: 在灭菌海水体系中的试样发生了局部腐蚀, 而在天然海水体系中的试样腐蚀比较均匀。在天然海水中细菌先是在试样上均匀附着, 然后又形成团聚, 进而形成局部的生物膜, 最后由于氧气和营养物质的耗尽从试样表面上脱落。

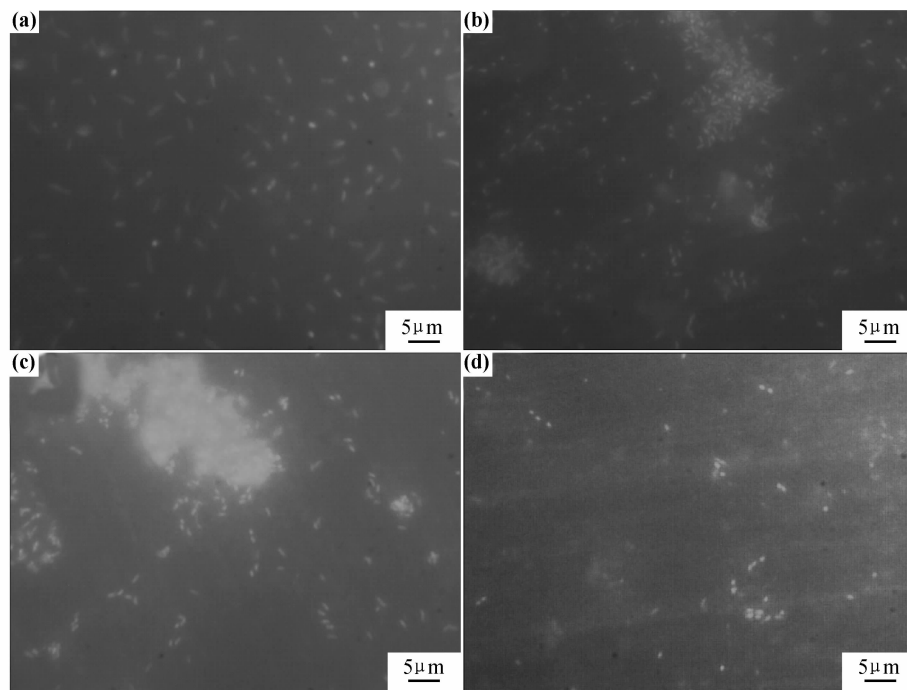


图7 Zn-Al-Cd 试样在天然海水中分别浸泡 5d(a), 9d(b), 14d(c), 17d(d) 的荧光显微镜照片

Fig. 7 Fluorescence micrographs of Zn-Al-Cd immersed in the natural seawater for 5 days (a), 9 days (b), 14 days (c) and 17 days (d)

参考文献

- [1] 黄宗国, 蔡如星. 海洋污染生物及其防除[M]. 北京: 海洋出版社, 1984. 127.
- [2] 付玉彬. 生物膜对金属材料腐蚀性能影响的研究进展(上)[J]. 材料开发与应用, 2006, 21(1): 34—39.
- [3] 武素茹, 段继周, 杜敏, 等. 硫酸盐还原细菌和铁还原细菌混合生物膜对碳钢腐蚀的影响[J]. 材料开发与应用, 2008, 23(3): 53—56.
- [4] 许昆明. 海洋生物膜的形成及其对金属腐蚀的影响[J]. 海洋科学, 2008, 32(9): 71—75.
- [5] 林晶. 海水中微生物膜下金属材料初期腐蚀行为[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [6] DICKINSON W H, CACCAVO F, LEWANDOWSKI Z. The ennoblement of stainless steel by manganic oxide biofouling [J]. Corros Sci, 1996, 38(8): 1407—1422.
- [7] 李昇. 锌合金牺牲阳极在海水的性能及应用[J]. 化工腐蚀与防护, 1997, (2): 21—26.
- [8] 龙萍, 李庆芬. 热海水中 Zn-Al-Cd 阳极腐蚀机理的探讨[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 19(4): 235—238.
- [9] 符岩, 翟秀静, 王杰, 等. 添加稀土元素的锌合金牺牲阳极的研究[J]. 稀土, 2005, 26(1): 49—52.
- [10] 王伟. 海洋环境中微生物膜与金属电化学状态相关性研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2003. 29.
- [11] SCOTTO V, LAI M E. The ennoblement of stainless steels in seawater: a likely explanation coming from the field [J]. Corros Sci, 1998, 40(6): 1007—1018.
- [12] 许凤玲. 海洋生物膜的活性及其在微生物燃料电池中的应用基础研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2009. 36—40.
- [13] WAN Yi, ZHANG Dun, LIU Huai-qun, et al. Influence of sul-

phate-reducing bacteria on environmental parameters and marine corrosion behavior of Q235 steel in aerobic conditions [J]. Electrochim Acta, 2010, 55(5): 1528—1534.

- [14] CUI X Y, MARTIN D C. Electrochemical deposition and characterization of poly (3, 4-ethylenedioxythiophene) on neural microelectrode arrays [J]. Sens Actuators B: Chem, 2003, 89 (1—2): 92—102.
- [15] 洪雪宝, 林瑞木, 李德楷, 等. 几种海洋附着生物对海洋用钢影响的电化学研究[J]. 海洋学报, 1989, 11(5): 645—649.
- [16] 杜娟, 李松梅, 刘建华, 等. A3 钢在芽孢杆菌作用下的腐蚀行为[J]. 物理化学学报, 2010, 26(6): 1527—1534.
- [17] MA J, WEN J. The effects of lanthanum on microstructure and electrochemical properties of Al-Zn-In based sacrificial anode alloys[J]. Corrosion Science, 2009, 51 (9): 2115—2119.
- [18] 邓正平. 表面处理渗氢浅谈[J]. 电镀与精饰, 2000, 22(2): 33—34.
- [19] 马士德. 海洋微型生物与金属腐蚀关系的初步探讨[A]. 1979 年腐蚀与防护学术报告会议论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1982. 376—380.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41006054); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-205)

收稿日期:2011-06-20; **修订日期:**2012-04-12

作者简介:宋秀霞(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事微生物腐蚀方面研究工作, 联系地址: 山东青岛市南海路 7 号中国科学院海洋研究所(266071), E-mail: songxiuxia55@163.com

通讯作者:张杰(1976—), 男, 副研究员, 博士, 联系地址: 山东青岛市南海路 7 号中国科学院海洋研究所(266071), E-mail: zhangjie@qdio. ac. cn