

# 硫酸盐还原菌对海底泥中 Al-Zn-In-Mg-Ti 阳极的腐蚀影响

Effect of Sulphate Reducing Bacteria on Corrosion of Al-Zn-In-Mg-Ti Anode in Marine Sediment

张 杰<sup>1,2</sup>, 刘奉令<sup>1,2,3</sup>, 李伟华<sup>1,2</sup>, 段继周<sup>1,2</sup>, 翟慎宝<sup>4</sup>, 侯保荣<sup>1,2</sup>  
(1 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2 山东省腐蚀科学重点实验室, 山东 青岛 266071; 3 重庆大学 化学化工学院, 重庆 400044; 4 淄博宏泰防腐有限公司, 山东 淄博 256100)  
ZHANG Jie<sup>1,2</sup>, LIU Feng-ling<sup>1,2,3</sup>, LI Wei-hua<sup>1,2</sup>, DUAN Ji-zhou<sup>1,2</sup>, ZHAI Shen-bao<sup>4</sup>, HOU Bao-rong<sup>1,2</sup>  
(1 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, Shandong, China; 2 Key Laboratory of Corrosion Science of Shandong Province, Qingdao 266071, Shandong, China; 3 College of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 4 Zibo Hongtai Antiseptic Co., Ltd., Zibo 256100, Shandong, China)

摘要: 通过电化学交流阻抗(EIS)、扫描电镜(SEM)和表面能谱(EDS)等方法测试 Al-Zn-In-Mg-Ti 牺牲阳极在不含和含硫酸盐还原菌(Sulphate Reducing Bacteria, SRB)两种海泥中的腐蚀行为,研究海泥中 SRB 对其腐蚀行为的影响。电化学研究表明:试样在不含 SRB 海泥中的腐蚀电位一直高于在含 SRB 海泥中的腐蚀电位;实验的初始阶段,含菌海泥中的试样腐蚀速率相对较大;实验后期,试样在含菌海泥中的腐蚀速率远大于在无菌海泥中的腐蚀速率,SRB 明显促进了试样在海泥中的腐蚀。SEM 分析显示,在不含和含 SRB 海泥体系中的试样都发生了局部腐蚀,但在含 SRB 海泥中的试样局部腐蚀更为严重。EDS 结果显示了含 SRB 试样表面的 Al、Zn 的含量明显低于无 SRB 试样。

关键词: Al-Zn-In-Mg-Ti 合金;电化学阻抗谱;硫酸盐还原菌;海泥

中图分类号: TG171 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2011)04-0043-06

**Abstract:** A comparative study about the corrosion behavior of Al-Zn-In-Mg-Ti sacrificial anode in marine sediment without and with sulphate reducing bacteria (SRB) was carried out using electrochemical impedance spectroscopy (EIS), scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS). The electrochemical studies showed that the corrosion potential for samples exposed to sterile marine sediment was higher than that for samples exposed to the SRB-containing marine sediment during the whole experiment; the corrosion of the sample was enhanced sharply in the presence of SRB. SEM images revealed that the presence of localized corrosion morphologies on the surface of sample immersed in the sterile medium as well as in the biotic medium, but the damage in the biotic medium was more severe than that in the sterile medium. EDS analysis showed that the concentration of Al and Zn in the surface film for the sample with SRB was much lower than that for the sample without SRB.

**Key words:** Al-Zn-In-Mg-Ti alloy; electrochemical impedance spectroscopy (EIS); sulphate reducing bacteria (SRB); marine sediment

SRB 广泛存在于海水、河水、地下管道以及油气井等环境中,是主要的腐蚀性细菌之一,它几乎能促进所有常用金属材料及其合金的腐蚀<sup>[1-3]</sup>。在厌氧环境中,SRB 能够利用吸附在金属表面上的有机物作为碳源,将介质中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 还原成 S<sup>2-</sup> 或 H<sub>2</sub>S,并可进一步与金属离子反应形成金属硫化物,这些代谢产物是诱发金属腐蚀的重要因素<sup>[4]</sup>。海泥中由于含氧量低且富含有机物质,存在大量的 SRB<sup>[5]</sup>,它们是引起海泥环境

腐蚀的一个主要因素。

铝合金牺牲阳极由于具有高电流效率, 价格低廉等优点, 被广泛用于海洋环境的阴极保护<sup>[6]</sup>。但在实际应用中, 不可避免要置于海泥环境, 可能会遭到微生物活动的影响而导致失效。虽然国内外已对 SRB 诱发金属腐蚀行为进行了广泛的研究, 但是关于海泥环境中 SRB 影响金属腐蚀的研究还较少。一些研究者已开始探讨牺牲阳极的抗微生物污损的性能<sup>[7]</sup>, 但是关于厌氧条件下微生物对 Al-Zn-In-Mg-Ti 牺牲阳极影响的相关报道较少。

本工作采用 EIS, SEM 和 EDS 等方法, 通过测试 SRB 一个生长周期内, Al-Zn-In-Mg-Ti 牺牲阳极在不和含 SRB 两种海泥中的腐蚀行为, 研究 SRB 对其腐蚀的影响。以期对牺牲阳极的抗微生物污损技术的开发及性能评价提供重要的理论和实际依据。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

实验材料为 Al 合金, 其化学成分(质量分数/%, 下同)为 Zn 3.21, In 0.016, Mg 0.76, Ti 0.045, Si 0.058, Fe 0.082, Cu 0.00025, 余量为 Al。根据实验需要, 电化学测试试样规格为 10mm × 10mm × 5mm, SEM 和 EDS 分析试样规格为 10mm × 10mm × 3mm。所有试样参照国标 GB5776-86 进行表面处理, 工作面用水砂纸逐级打磨至 1200<sup>#</sup>, 然后用蒸馏水超声清洗后, 再用无水乙醇干燥, 最后保存在干燥器内。实验前, 采用紫外灯对试样灭菌 30min 以确保无污染。

### 1.2 SRB 富集、分离纯化培养

实验菌种来源于青岛胶州湾海泥, 使用修正的 Postgate's C 培养基对 SRB 进行富集培养。培养基成分: 0.5g KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 1g NH<sub>4</sub>Cl, 0.06g CaCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O, 0.06g MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O, 6mL 70% 乳酸钠, 1g 酵母膏, 0.3g 柠檬酸钠, 1000mL 陈海水。培养基经高温(121℃)高压灭菌锅灭菌 30min, 冷却后, 加入经细菌过滤器抽滤灭菌的 0.004g/L Fe(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> · 7H<sub>2</sub>O。然后将约 1g 海泥加入 50mL 培养基中, 置于 30℃生化培养箱培养。培养 1~3d 后, 培养基颜色变黑, 并散发出臭鸡蛋气味。

将新鲜的液体培养基中添加琼脂粉(每 100mL 培养基加 1.5g)后经高温(121℃)灭菌 30min, 然后冷却至 60℃, 倒平板制成固体培养基。在洁净工作台中, 移取已培养 5d 的菌液 1mL, 然后用已灭菌的液体培养基将其从 10<sup>-2</sup>逐级稀释至 10<sup>-6</sup>, 分别涂于新制的固体培养基上, 最后放入厌氧盒中置于 30℃恒温培养箱

中培养。3~5d 后, 培养基上会出现黑色菌落, 挑取单一菌落接种于液体培养基中, 再次进行富集培养。通过 3~5 次反复培养, 即可分离出纯的菌种。所有含菌实验体系接种的均为已培养 5d 的菌液, 以尽量使初始接种菌量具有一致性。

### 1.3 实验介质

实验海泥取自青岛胶州湾, 经高温(121℃)高压灭菌锅灭菌 30min 后, 取 400mL 海泥与 100mL 灭菌 Postgate's C 培养基, 以及 8mL 已培养 5d 的 SRB 菌液均匀混合, 作为含 SRB 的海泥体系; 取 400mL 海泥与 100mL 灭菌 Postgate's C 培养基均匀混合, 作为不含 SRB 的海泥体系。

### 1.4 SRB 生长曲线的测定

由于细菌悬液的浓度与光密度(OD 值)成正比, 本工作通过分光光度计测光密度来研究 SRB 的生长曲线<sup>[8]</sup>。首先配置 450mL Postgate's C 培养基, 分装到 30 个 20mL 的试剂瓶中, 每瓶装 15mL 无菌 Postgate's C 培养基, 然后置于保鲜盒中经高温(121℃)高压灭菌锅灭菌 30min 后, 冷却备用。取其中 15 瓶无菌 Postgate's C 培养基用做参比溶液, 每天使用一瓶, 以便保持测试所用参比溶液的一致性。另外 15 瓶分别编号为 1d 到 15d, 然后在洁净工作台中, 用 5mL 无菌注射器分别注入已培养 5d 的 SRB 菌液 1.2mL 后, 置于(28±2)℃下静置培养。用光度扫描法测定实验所用的 SRB 在紫外-可见光范围的最大特征吸收波长为 415nm。对不同生长时间的已接种 SRB 的培养液从 1d 开始依次进行测定, 每次取出 3mL 的培养液在 415nm 处进行吸光度测量, 对浓度大的菌液用无菌 Postgate's C 培养基适当稀释后测定, 使其 OD 值在 0.2~0.8 以内, 然后将稀释后测得的 OD 值乘以稀释倍数即可以得培养液实际的 OD 值。每天做三个平行测试实验, 取平均数。

### 1.5 电化学实验

电化学实验采用 PARSTAT 2273 电化学工作站测试, 测试体系为三电极体系。工作电极为 Al 合金牺牲阳极试样, 对电极为铂电极, 参比电极为饱和甘汞电极(SCE)。工作电极用铜导线焊接, 保留工作面(10mm × 10mm), 其余用环氧树脂密封。实验研究细菌的一个生长周期, 因此实验过程中不再添加新的培养基。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 ZSimpWin Version 3.21 分析软件对实验结果进行分析。

### 1.6 SEM 和 EDS 分析

SEM 和 EDS 分析试样分别在含 SRB 和不含 SRB 海泥中浸泡 15d 后, 在洁净工作台中迅速取出进

行预处理。无菌试样分别用体积分数为 50%, 70% 和 100% 乙醇(溶剂为 PBS, 即磷酸盐缓冲溶液)各浸泡 15min 进行逐级脱水处理; 有菌试样用体积分数为 5% 戊二醛的 PBS 溶液浸泡 2h 后, 然后采用上述不同浓度的乙醇溶液逐级脱水。采用 SEM, EDS 分别对腐蚀形貌和腐蚀产物成分进行观察和分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 生长曲线的测定

SRB 在培养基中一个生长周期内的生长曲线如图 1 所示。可以看出, 在培养基中 SRB 生长变化大致分为 4 个阶段: 1~ 3d 为指数生长阶段, SRB 迅速增长, 在第 3d 数量达到最大。4~ 7d 为稳定阶段, SRB 数量比较稳定; 8~ 10d 为衰亡阶段, 由于有限的营养物质被耗尽, 活性 SRB 数量迅速减少。第 11d 后为残余阶段, 活性 SRB 的数量很少。这个结果与朱永艳<sup>[9]</sup>的关于青岛海域海泥一个周期内的生长曲线一致。

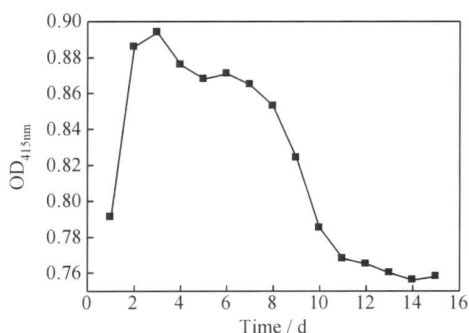


图 1 SRB 的生长曲线

Fig. 1 Growth curve of SRB

### 2.2 开路电位

图 2 显示了试样分别在含和不含 SRB 海泥中腐蚀电位随时间的变化曲线。由图 2 可知, 不含 SRB 海泥中的试样, 1~ 10d 的腐蚀电位正移了 53mV, 考虑是腐蚀产物在表面沉积, 逐渐变得致密引起的; 10~ 16d, 腐蚀电位稳定在 -952~ -957mV 之间, 此时表面腐蚀产物比较稳定。对于含 SRB 海泥体系, 在 1~ 4d 内腐蚀电位迅速正移 30mV, 考虑原因是附着在试样表面的细菌数成指数级增长, 细菌在金属表面形成了生物膜引起。4~ 8d, 腐蚀电位出现了短暂波动, 可能是表面生物膜和腐蚀产物层在生成过程的不稳定引起。8~ 16d, 腐蚀电位再次出现正移, 这是腐蚀产物在试样表面不断增厚所致。从腐蚀电位变化总趋势看, 试样在不含 SRB 海泥中的腐蚀电位一直高于含 SRB

海泥中的试样电位。

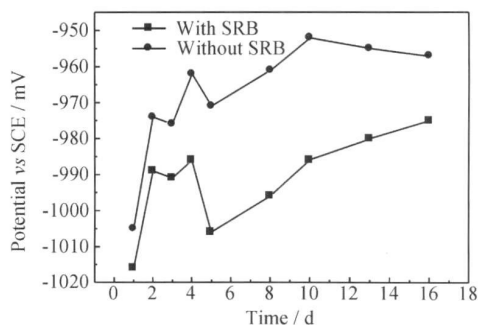


图 2 试样在不含和含 SRB 海泥中的开路电位随时间变化曲线

Fig. 2 Time dependence of  $E_{ocp}$  for the sterile marine sediment and SRB-containing marine sediment

### 2.3 交流阻抗谱分析

交流阻抗谱结果如图 3 所示。图 3(a) 为试样在不含 SRB 海泥中 1~ 16d 的部分 Nyquist 谱图, 可以看出, 阻抗谱半圆直径先在 5d 内迅速变小, 随后逐渐变大, 初步推断试样的腐蚀速率随浸泡时间先快速增大后缓慢减小。根据实验数据与拟合数据之间的平均方差  $\chi^2$  值达到  $10^{-3}$ <sup>[10]</sup>, 选用了图 4(a) 不含 SRB 海泥体系的等效电路模型。其中,  $R_s$  表示溶液电阻。  $Q_f$  表示表面层电容。常相位角元件  $Q$  的阻抗值  $Z_{CPE} = Y_0^{-1}(j\omega)^{-n}$ , 其中  $0 < n < 1$ ,  $n$  值可用来反映双电层电容变化情况, 也可以用来判断金属表面的不均一性,  $n$  值越小则反映金属的表面越粗糙<sup>[3]</sup>。  $R_f$  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。  $R_d$  可以用来表征金属的腐蚀速率, 其值越小表明金属腐蚀速率越大<sup>[11]</sup>。通过拟合求得试样在不含 SRB 海泥中的电化学参数随时间的变化情况, 如表 1 所示。从表 1 可知,  $n$  值开始阶段略有波动, 然后逐渐减小, 考虑是随着腐蚀反应的进行, 金属表面受破坏程度逐渐增大而变得越来越粗糙。在实验开始的 5d 内,  $R_{ct}$  值迅速变小。这表明试样表面的氧化膜很快就被腐蚀介质破坏, 从而导致试样的腐蚀速率迅速增大。5~ 16d 内,  $R_{ct}$  值随时间逐渐变大。这可能由于, 随着试样表面的腐蚀产物逐渐增多且变得比较致密, 厚的腐蚀产物层成了金属与腐蚀介质直接接触的屏障, 所以试样的腐蚀速率逐渐变小<sup>[12]</sup>。

图 3(b) 为试样在含 SRB 海泥中 1~ 16d 的部分阻抗谱图。选用了图 4(b) 含 SRB 体系的等效电路模型。其中,  $Q_{dl}$  表示界面双电层电容。表 2 显示了试样在含 SRB 海泥中的电化学参数随时间的变化情况。从表 2 可知,  $n_1$  值先略有变大, 又逐渐减小。在实验

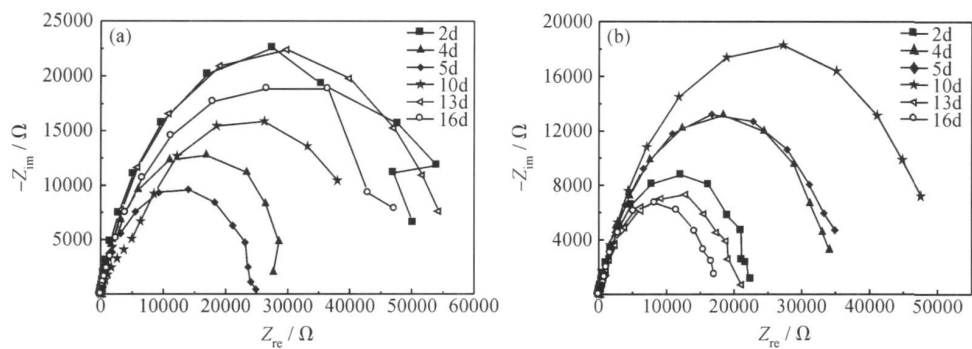


图 3 试样在不含(a)和含(b)SRB 海泥中的 EIS 谱图

Fig. 3 Nyquist plots for the sterile marine sediment (a) and SRB-containing marine sediment (b)

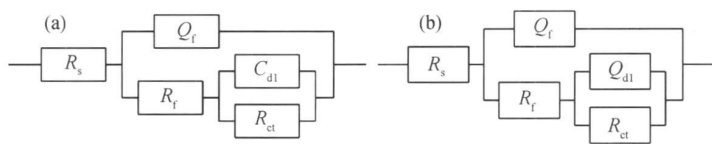


图 4 在不含(a)和含(b)SRB 海泥中等效电路模型

Fig. 4 Equivalent circuits of the sample in marine sediment without SRB (a) and with SRB (b)

表 1 试样在不含 SRB 海泥中的电化学阻抗模型的参数分析

Table 1 Results of the fit with the equivalent circuit for the sterile marine sediment

Time/d	$R_s / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_f / (\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$n$	$R_f / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_{dl} / (\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$R_{ct} / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$
2	7.66	$1.74 \times 10^{-5}$	0.8476	152.10	$5.15 \times 10^{-7}$	$5.70 \times 10^4$
4	8.38	$1.67 \times 10^{-5}$	0.8708	196.60	$5.76 \times 10^{-7}$	$3.07 \times 10^4$
5	11.03	$1.85 \times 10^{-5}$	0.8446	$1.00 \times 10^4$	$6.18 \times 10^{-6}$	$1.47 \times 10^4$
10	12.08	$2.72 \times 10^{-5}$	0.8090	9499	$7.95 \times 10^{-5}$	$3.16 \times 10^4$
13	11.86	$2.40 \times 10^{-5}$	0.8183	$1.21 \times 10^4$	$4.99 \times 10^{-6}$	$4.58 \times 10^4$
16	10.33	$2.75 \times 10^{-5}$	0.7796	131.40	$7.68 \times 10^{-7}$	$5.27 \times 10^4$

表 2 试样在含 SRB 海泥中的电化学阻抗模型的参数分析

Table 2 Results of the fit with the equivalent circuit for the SRB-containing marine sediment

Time/d	$R_s / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_f / (\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$n_1$	$R_f / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_{dl} / (\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$n_2$	$R_{ct} / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$
2	13.19	$2.03 \times 10^{-5}$	0.8201	3983	$8.00 \times 10^{-6}$	0.8288	$1.90 \times 10^4$
4	13.67	$1.84 \times 10^{-5}$	0.8356	3977	$1.11 \times 10^{-5}$	0.7452	$3.16 \times 10^4$
5	15.71	$2.32 \times 10^{-5}$	0.8104	4816	$1.04 \times 10^{-5}$	0.7898	$3.17 \times 10^4$
10	17.88	$2.18 \times 10^{-5}$	0.8126	9854	$9.80 \times 10^{-6}$	0.7791	$4.08 \times 10^4$
13	24.32	$1.91 \times 10^{-5}$	0.8247	2616	$2.30 \times 10^{-5}$	0.7771	$1.82 \times 10^4$
16	21.14	$2.80 \times 10^{-5}$	0.7744	1213	$3.84 \times 10^{-5}$	0.9550	$1.60 \times 10^4$

的初始阶段, 由于吸附在金属上的细菌大量繁殖, 试样表面逐渐形成了生物膜, 所以金属表面的粗糙度稍有降低。实验后期, 由于腐蚀产物的沉积, 表面层变得疏松多孔, 导致了试样表面的粗糙度增加。在实验的2~10d,  $R_{ct}$  值从  $1.90 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$  增加到  $4.08 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。可能是在这段时间内, 金属表面的生物膜和腐蚀产物混合层不断增厚且变得比较致密, 使得试样的腐蚀速率变小。在 10~16d 内,  $R_{ct}$  值又逐渐减小到  $1.60 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 说明试样腐蚀速率又逐渐增大。

腐蚀加速的原因可能是以下因素共同引起的: 一种因素是, 由于 SRB 的代谢产物(如, 有机酸,  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{S}^{2-}$  等)在体系中积累的量不断增多, 这些产物对试样的腐蚀作用不断增强<sup>[4]</sup>; 另一种因素可能是, 由于表面腐蚀产物层变的疏松多孔, 一方面使金属基体再次暴露在腐蚀介质中而导致腐蚀加速, 另一方面疏松的腐蚀产物能与金属基体构成无数个微型腐蚀电池, 这些腐蚀产物往往成为腐蚀电池的阴极促进金属的腐蚀<sup>[13]</sup>。

通过分别对不含 SRB 和含 SRB 海泥体系的阻抗

结果进行计算求得极化电阻  $R_p$  值<sup>[14]</sup>, 比较试样在这两种海泥体系中的腐蚀行为, 结果如图 5 所示。由图 5 可知, 在实验的开始阶段, 试样在含 SRB 海泥中的  $R_p$  值小于不含 SRB 海泥中的  $R_p$  值。这是因为在实验初期, SRB 的生命活动非常旺盛, 产生了大量的代谢产物, 所以在含 SRB 海泥中的试样腐蚀速率相对较大。4~10d, 两种体系的  $R_p$  值比较接近。在这段时间内, 两种体系中的试样都因表面腐蚀产物层不断增厚而受到了一定的保护, 两者的腐蚀速率比较接近且都在逐渐变小, 结合图1可知, 含SRB海泥的试样此

时 SRB 生长也处于一个比较稳定的时期。10~16d, 含 SRB 海泥体系的  $R_p$  值远小于不含 SRB 海泥体系的  $R_p$  值。这可能是 SRB 的代谢活动使得金属表面的腐蚀产物层形态发生了转变<sup>[15]</sup>, 一旦腐蚀产物变的疏松多孔, 就会明显加速金属的腐蚀。 $R_p$  值的对比分析结果说明 SRB 对 Al 合金阳极的腐蚀起加速作用。

2.4 SEM 和 EDS 分析

图 6 为试样分别在不含 SRB 和含 SRB 海泥环境中 15d 的 SEM 图。图 6(a) 显示无菌试样表面出现了腐蚀相对较重的局部区域, 这表明试样发生了局部腐蚀。从高倍图 6(b) 可知, 大量的腐蚀产物均匀地分布在试样表面且比较致密。这正好验证了前面所述, 试样的腐蚀速率变小是因为腐蚀产物层对试样的保护作用。图 6(c) 显示有菌试样表面出现了两个比较深的腐蚀孔, 并且周围附着了大量的 SRB 菌株。将腐蚀孔周围的局部区域放大如图 6(d) 所示, 可知试样表面生成疏松, 呈珊瑚状的物质, 并且能清晰地看到 SRB 分布在这些物质中。这恰好验证了在实验的 10~16d 内, 含 SRB 海泥中试样表面的腐蚀产物呈疏松多孔的形状。根据 SEM 图分析比较可知, 在这两种海泥体系中, 试样都发生了局部腐蚀, 但在含 SRB 海泥中的试样局部腐蚀更为严重。

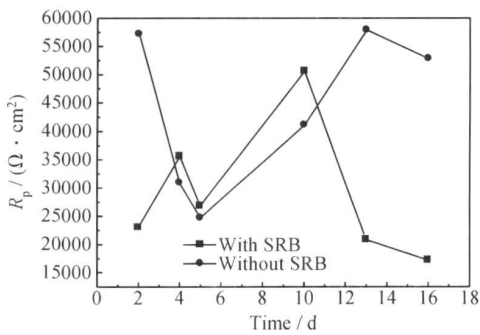


图 5 试样在不含 SRB 和含 SRB 海泥中极化电阻  $R_p$  随时间的变化曲线

Fig.5 Variation curve of  $R_p$  with time of the sample in marine sediment without and with SRB

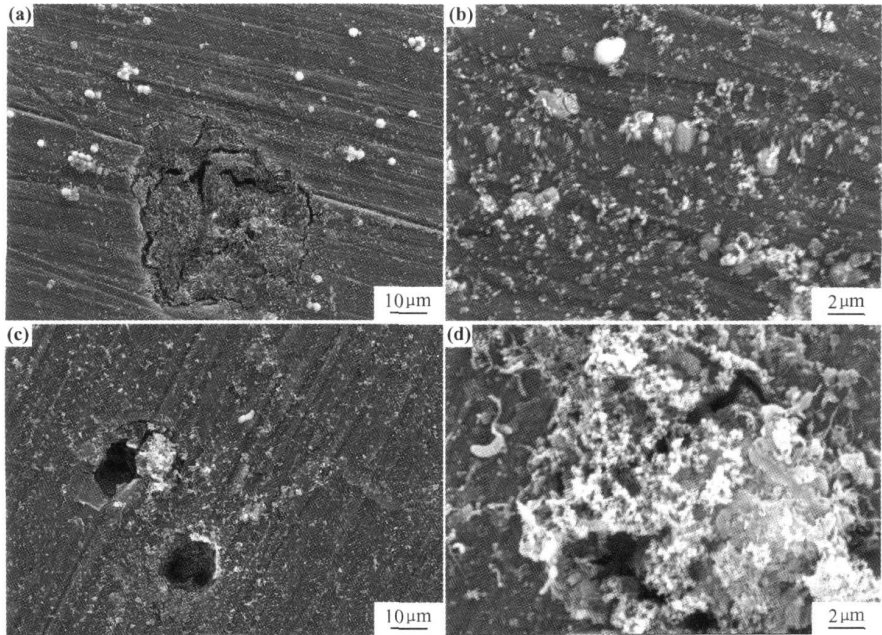


图 6 试样在不含 SRB(a, b) 和含 SRB(c, d) 海泥中 15d 的 SEM 图

Fig. 6 Surface morphology of sample in marine sediment without (a, b) and with SRB (c, d) for 15d

图 7 为试样在不含 SRB 和含 SRB 海泥中 15d 的 EDS 分析结果。从图 7 可知, 无菌试样表面没有检测

到 C, 含菌试样表面 C, O 的含量较高, 这表明含菌试样表面附着了大量 SRB, 其代谢活动产生了有机物,

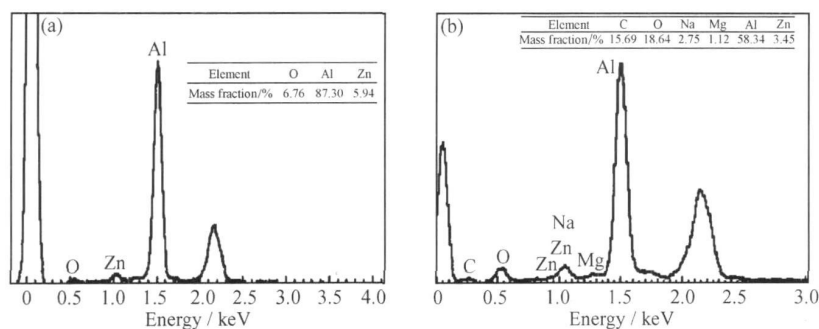


图 7 试样在不含 SRB(a) 和含 SRB(b) 海泥中 15d 的 EDS 图

Fig. 7 EDS analysis of the sample in marine sediment without (a) and with SRB (b) for 15d

C, O 含量明显高于无菌试样。含菌试样表面的 Al, Zn 含量明显低于无菌试样, 表明试样在含 SRB 海泥中的腐蚀速率相对较快。

### 3 结论

(1) 电化学结果表明: 试样在不含 SRB 海泥中腐蚀电位一直高于含 SRB 海泥中腐蚀电位; 含菌海泥中试样在实验初始阶段的腐蚀速率较大; 随后, 两者腐蚀速率比较接近且都在不断变小; 实验后期, 在含菌海泥中的腐蚀速率远大于在无菌海泥中的腐蚀速率。

(2) SEM 和 EDS 结果表明: 含 SRB 和不含 SRB 海泥中的试样都发生了局部腐蚀, 但是含菌试样更严重; 含菌试样表面的 Al, Zn 元素含量明显低于无菌试样。

#### 参考文献

- [1] STAROSVETSKY D, KHASELEV O, STAROSVETSKY J, et al. Effect of iron exposure in SRB media on pitting initiation [J]. Corrosion Science, 2000, 42(2): 345–359.
- [2] RAO T S, KORA A J, ANUPKUMAR B, et al. Pitting corrosion of titanium by a freshwater strain of sulphate reducing bacteria (desulfovibrio vulgaris) [J]. Corrosion Science, 2005, 47(5): 1071–1084.
- [3] SHENG Xiao-xia, TING Ye-peng, PEHKONEN S O. The influence of sulphate-reducing bacteria biofilm on the corrosion of stainless steel AISI 316 [J]. Corrosion Science, 2007, 49(5): 2159–2176.
- [4] ANTONY P J, CHONGDAR S, KUMAR P, et al. Corrosion of 2205 duplex stainless steel in chloride medium containing sulfate reducing bacteria [J]. Electrochim Acta, 2007, 52(12): 3985–3994.
- [5] HUAN Yao-liang. Corrosion failure of marine steel in sea mud containing sulfate reducing bacteria [J]. Mater Corros, 2004, 55(2): 124–127.
- [6] MA Jing-jing, WEN Ji-ba. 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.

- [7] SHIBLI S, ARCHANA S, MUHAMED ASHRAF P. Development of nano cerium oxide incorporated aluminium alloy sacrificial anode for marine applications [J]. Corrosion Science, 2008, 50(8): 2232–2238.
- [8] 刘建华, 刘芳, 李松梅. 新型季磷盐型缓蚀杀菌剂的合成及其特性[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2001, 13(2): 85–88.
- [9] 朱永艳. 硫酸盐还原菌和极化电位对海洋结构用钢在海泥中的应力腐蚀开裂敏感性的影响[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2007. 34–35.
- [10] SANTANA R J, SANTANA H F, J. GONZÁLEZ G. Comparative study of the behaviour of AISI 304 SS in a natural seawater hopper, in sterile media and with SRB using electrochemical techniques and SEM [J]. Corrosion Science, 2006, 48(5): 1265–1278.
- [11] WAN Yi, ZHANG Dun, LIU Hua-qun, et al. Influence of sulphate-reducing bacteria on environmental parameters and marine corrosion behavior of Q235 steel in aerobic conditions [J]. Electrochim Acta, 2010, 55(5): 1528–1534.
- [12] ZUO Rong-jun, KUSE, MANSFELD F, et al. The importance of live biofilms in corrosion protection [J]. Corrosion Science, 2005, 47(2): 279–287.
- [13] LEE A, NEWMAN D. Microbial iron respiration: impacts on corrosion processes [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2003, 62(2): 134–139.
- [14] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008. 184.
- [15] DUAN Ji-zhou, HOU Bao-rong, YU Zhi-gang. Characteristics of sulfide corrosion products on 316L stainless steel surfaces in the presence of sulfate reducing bacteria [J]. Materials Science and Engineering C, 2006, 26(4): 624–629.

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资助(KZCX2-EW-205)

收稿日期: 2010-10-27; 修订日期: 2011-01-28

作者简介: 张杰(1976-), 男, 博士, 副研究员, 从事海洋腐蚀与微生物方面的研究, 联系地址: 山东青岛市市南区南海路 7 号中国科学院海洋研究所(266071), E-mail: zhangjie@ms.qdio.ac.cn