硫酸盐还原菌对 EH40 焊接钢海水腐蚀的影响

陈超[1,2,3]，吴佳佳[1,2]，张盾[1,2]

（1.中国科学院海洋研究所，山东 青岛 266071；2. 青岛国家海洋科学与技术实验室，山东 青岛 266237；3. 中国科学院大学，北京 100049）

摘要：目的 研究无菌和 SRB 体系中 EH40 钢焊接接头的母材区、热影响区和焊缝区腐蚀差异。**方法** 利用金相显微镜观察、失重法、电化学测试、扫描电镜和 X 射线光电子能谱仪等分析手段。**结果** 焊缝区微观组织由块状铁素体（BLF）和魏氏组织（W）组成；热影响区可再分为粗晶区（CGHAZ）和细晶区（FGHAZ）两个区；母材区主要由 BLF、AF 和少量珠光体组成。在无菌对照体系中，焊缝区腐蚀速率为 0.0026 mm/a，混合区次之，为 0.0023 mm/a，母材区最小，为 0.0019 mm/a。含 SRB 体系中，各区的腐蚀速率为：焊缝区（0.0037 mm/a）>混合区（0.0034 mm/a）>母材区（0.0030 mm/a）。热影响区腐蚀产物形貌粗大，点蚀孔也较大。**结论** 焊缝区比母材区容易腐蚀，由此易造成小阳极大阴极加速腐蚀，热影响区容易发生点蚀。SRB 能促进三个区域试样腐蚀加速。

关键词：硫酸盐还原菌；EH40 钢；焊接；微生物腐蚀

DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2018.10.009

中图分类号：TG174 **文献标识码：**A

文章编号：1672-9242(2018)10-0051-09

Effects of Sulfate-reducing Bacteria on Marine Corrosion of Weld Joints of EH40

CHEN Chao[1,2,3], *WU Jia-jia*[1,2], *ZHANG Dun*[1,2]

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Qingdao 266071, China;
2. Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China;
3. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

ABSTRACT: Objective To study differences of corrosion of EH40 weld joints in base metal zone, heat affected zone and weld zone in sterile and SRB systems. **Methods** The metallurgical microscope observation, weight loss method, electrochemical methods, scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X ray analysis (EDS) were applied. **Results** Microstructure of weld zone was composed of block lath ferrite (BLF) and widmanstatten structure (W). The heat affected zone was composed of coarse grain heat affected zone (CGHAZ) and fine grain heat affected zone (FGHAZ); the base metal zone was composed of BLF, acicular ferrite(AF) and some pearlite. Corrosion rate decreased in the order of weld zone (0.0026 mm/a)> mixed zone (0.0023 mm/a)>base metal (0.0019 mm/a) when there was no SRB. When SRB was introduced, corrosion rate decreased in the order of weld zone (0.0037 mm/a)>mixed zone (0.0034 mm/a)>base metal (0.0030 mm/a). Furthermore, localized corrosion attack was observed in the heat affected zone. **Conclusion** The weld area is easier to corrode than the base material zone, caus-

收稿日期：2018-07-13；**修订日期：**2018-08-13

基金项目：国家重点研究计划（2016YFB0300604 & 2014CB643304）

作者简介：陈超（1990—），男，博士研究生，主要研究方向海洋腐蚀与防护。

通讯作者：张盾（1965—），女，研究员，博士生导师，主要研究方向为海洋腐蚀与防护。

ing accelerated corrosion from small anode and large cathodes. The heat affected zone is likely to suffer from localized corrosion. SRB could accelerate corrosion in the three zones.

KEY WORDS: sulfate reducing bacteria; EH40 steel; welding; microbiologically influenced corrosion

腐蚀给国民经济带来了重大损失，据调查报告显示，我国 2014 年腐蚀成本占总国内生产总值的 3.34%，总额超过 21 000 亿元人民币[1]。统计表明，海洋微生物腐蚀和污损导致材料失效损失占到了涉海材料总量的 70%~80%，其中微生物造成的损失约为 30~50 亿美元/年[2]。

焊接接头的微生物腐蚀起初并不被人们所重视。近 20 年来，许多异常快速的腐蚀问题引起了人们的注意，发现微生物腐蚀在焊接处大量存在，使得原本腐蚀敏感的部位变得更加薄弱[3-7]。Willian Liu 等[8]对初始厚度为 3.5 mm 服役仅 3 个月就发生了腐蚀穿孔的双相不锈钢管线钢仅进行了分析，发现微生物腐蚀是导致焊缝区快速腐蚀失效的主要原因。进一步研究发现，焊接区含氮量的增加促进了微生物在该区域的吸附和繁殖。K. Nandakumar 等[9]研究发现焊接区晶界比例的增加，也会促进微生物在该区域的吸附和繁殖。顾彩香[10]等研究发现，混合菌作用下，Q235 焊接熔合区与焊缝区相比，前者的耐腐蚀性能更弱，更容易发生点蚀。

硫酸盐还原菌（SRB）造成的腐蚀约占整个微生物腐蚀损失的 1/2，所以长期以来被认为是最重要的厌氧腐蚀微生物[11-14]，其通过自身代谢活动改变生物/金属界面的电化学过程，影响金属材料的腐蚀[15]。近年来，研究者运用先进分子学生物技术以及现代分析技术[16-19]，从微观角度对 SRB 生物膜状态、膜的选择性吸附和局部腐蚀机理等方面做了更深层次的研究。

随着造船行业的快速发展，EH40 钢由于其具有高强度、低温冲击韧性、优异的延展性和焊接性得到广泛关注[20]。研究发现，焊接过程[22-23]和低温环境[24-25]对 EH40 腐蚀开裂都会造成显著影响。到目前为止，尚未有关于 EH40 钢焊接件微生物腐蚀机理的研究报道。研究 EH40 钢焊接接头的微生物腐蚀，对于评定该系列材料耐蚀性、预测使用寿命以及选择防护措施，有重要的理论和现实意义。

文中以 EH40 钢焊接件为研究对象，初步研究 SRB 对 EH40 钢焊接接头不同区域腐蚀行为的影响及作用机理。

1 实验

1.1 材料

实验用钢为 EH40 船板用钢，其化学成分（质量分数）为 C 0.08%，Si 0.36%，Mn 1.47%，P 0.008%，S 0.004%，Al 0.03%，Nb 0.035%，Ti 0.016%。焊接采用埋弧焊，电流为(440±10) A，电压为(30±1) V，焊条型号为 OK Autrod 12.43，焊剂用 OK Flux10.62。钢板厚度为 100 mm。利用线切割得到尺寸为 10 mm × 10 mm×10 mm 的电化学测试试样（混合区工作面选取熔合线开始向母材 10 mm）。然后将铜导线焊接在电化学试样一端，并留出一面作为工作面（工作面积为 1 cm^2），其余表面用环氧树脂密封。线切割成尺寸为 25 mm×12.5 mm×2 mm 的静态失重试样用以测试平均腐蚀速率和观察腐蚀形貌。线切割成尺寸为 25 mm×10 mm×8 mm 的金相试样用以观察微观组织。

实验前工作表面用 $80^{\#}$—$1200^{\#}$水砂纸逐级打磨，然后用丙酮和无水乙醇清洗，冷风吹干。金相试样经 $80^{\#}$—$5000^{\#}$水砂纸打磨后进行机械抛光，最后用去离子水、丙酮、乙醇清洗，在光学显微镜下观察无明显划痕后，经 4%硝酸乙醇溶液侵蚀后观察金相显微组织。

实验中所用试剂均为国药集团化学试剂有限公司生产的分析纯试剂，所用高纯 N_2 (>99.999%)，购自中国青岛海利气体有限公司。

1.2 细菌培养

实验所用 SRB 分离自渤海海泥，隶属于脱硫弧菌属，对应的 16S rRNA 基因序列号为 MF461625。实验中海水来自青岛汇泉湾的净化海水。

采用 Post-gate’s C 培养基进行 SRB 培养，其成分为：0.5 g K_2HPO_4，1 g NH_4Cl，0.1 g $CaCl_2$，2 g $MgSO_4$，0.5 g Na_2SO_4，4 mL 乳酸钠和 1 g 酵母粉，1 L 海水。采用 1 mol/LNaOH 调节培养基 pH 至 7.0，在 121 ℃压力蒸汽灭菌锅灭菌 20 min。接种前，通入高纯氮气除氧 30 min，将培养 4 天的 SRB 在连续通氮气下按 2%接种量接种，密封并于 30 ℃下培养。

1.3 腐蚀速率测定

采用失重法进行腐蚀速率测定。母材区、焊缝区和混合区测试试样在接菌和不接菌各实验体系中浸泡 14 天后，按照 GB/T16545—2015 中方法清洗去除腐蚀产物，然后用蒸馏水冲洗，无水乙醇脱水，冷风吹干，称量。实验设置三个平行样，最后取平均值为最终结果。挂片实验前，用分析天平称量碳钢试样的质量作为初始质量 m_0，用游标卡尺精确测量钢片的长、宽、高，计算出钢片的表面积 S。实验期结束后，碳钢试样表面腐蚀产物和生物膜按照上述步骤清除，

称得钢片的质量记为 m_1，腐蚀速率通过质量损失的方法[38]。腐蚀速率计算公式为：

$$r_{\mathrm{corr}} = \frac{8.76\times10^4\times(m_0-m_1)}{S\cdot t\cdot\rho} \tag{1}$$

1.4　电化学实验

电化学采用三电极体系，石墨电极作为对电极，Ag/AgCl 电极为参比电极，母材区、焊缝区和混合区为工作电极。于不同时间（0、1、3、7、14 天）在开路电位（OCP）下进行电化学阻抗谱（EIS）测试，施加的扰动电位为±5 mV，测量频率范围 10^5~10^{-2} Hz。电化学测试所用仪器为 Gammary 3000，采用 Zview 软件对 EIS 数据进行等效电路拟合，并得出相关元件参数。

1.5　腐蚀产物形貌观察及成分分析

采用扫描电子显微镜（SEM，Hitachi S-3400）对在 SRB 和无菌介质中浸泡 14 天后的 EH40 钢焊接接头母材区、热影响区、焊缝区的形貌进行观察。腐蚀产物形貌观察样品的处理方法：首先用体积分数为 2.5%的戊二醛磷酸缓冲液浸泡样品 2 h；然后依次用体积分数为 30%、50%、70%、90%、100%的乙醇溶液浸泡 15 min；最后采用超临界干燥、喷金。腐蚀后基体的形貌观察样品的处理方法为：采用腐蚀酸洗液超声清洗 5 min，去除腐蚀产物，用去离子水冲洗，并依次在 95 乙醇和无水乙醇中浸泡 5 min，然后冷风吹干。

2　结果与讨论

2.1　金相组织

对 EH40 焊接接头表面侵蚀后，其表面形貌如图 1 所示，焊缝区（WM）、热影响区（HAZ）、母材区（BM）区别明显。对焊接件表面不同区域进行金相观察，对应区域金相组织如图 2 所示。由图 2 可知，WM、HAZ、BM 金属的显微组织存在差异。如图 2a 所示，焊缝区微观组织由块状铁素体（BLF）和魏氏组织（W）组成。热影响区可再分为两个区：粗晶区（CGHAZ）和细晶区（FGHAZ）。靠近熔合线为晶

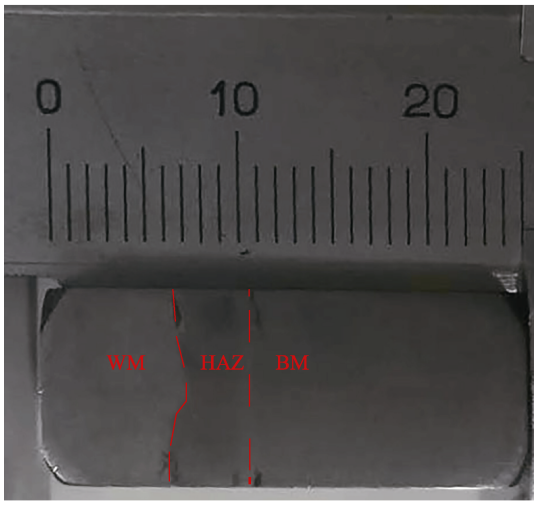
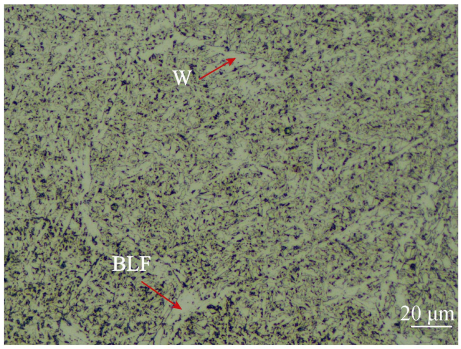
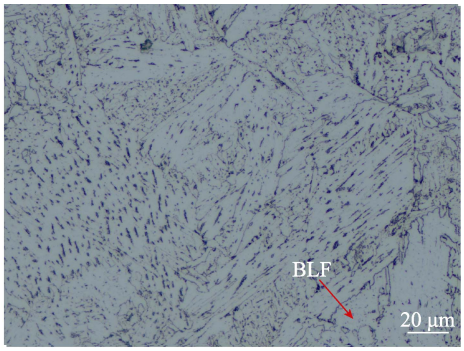


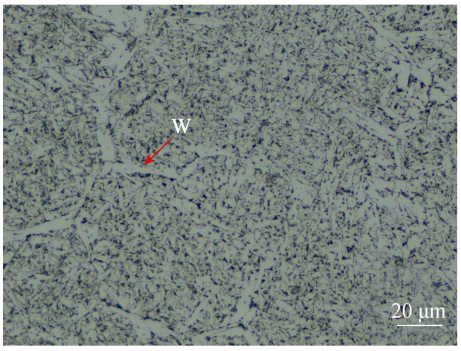
图 1　焊接件金相试样侵蚀后形貌



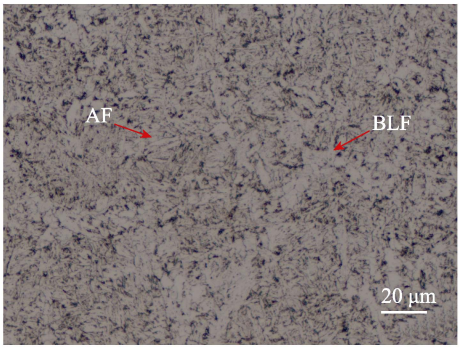
a 焊缝区



b 热影响区粗晶区



c 热影响区细晶区



d 母材区

图 2　焊接件金相组织观察结果

粒粗大的粗晶区，靠近母材的为细晶区。图 2b 中，粗大的奥氏体晶界清晰可见，在奥氏体晶界内部包括 BLF，图 2b 中小黑点和短黑线为碳化物。图 2c 中细晶区的组织较粗晶区细小，为粒状贝氏体、W 和珠光体组成。如图 2d 所示，母材区主要由 BLF、AF 和少量珠光体组成。

由于焊缝区是由焊丝经熔化凝固后形成，所以焊缝与母材金相组织不同。热影响区距离热源远近不同，受到的热影响不同。由图 2 可以看出，与母材相比，热影响区组织明显发生分化，导致热影响区的组织与母材不同。同时可以看出，离焊缝区越远，热影响区组织不均匀性越小。

2.2　腐蚀速率

EH40 钢焊接接头不同区域在无菌和含 SRB 体系中浸泡 14 天的腐蚀速率见表 1。在无菌对照体系中，焊缝区腐蚀速率为 0.0026 mm/a，混合区次之，为 0.0023 mm/a，母材区最小，为 0.0019 mm/a。SRB 体系中腐蚀速率高出无菌体系约 0.0011mm/a，说明 SRB 的存在能促进整个焊接件的腐蚀加速。含 SRB 体系中，不同区域试样腐蚀速率也呈现该趋势，焊缝区（0.0037 mm/a）>混合区（0.0034 mm/a）>母材区（0.0030 mm/a）。从无菌对照和 SRB 介质中均能看出，焊缝区耐蚀性没有母材区强，容易形成小阳极大阴极，加速腐蚀，从而导致整个构件失效。

表 1　14 天后无菌与含 SRB 组母材区（A）、混合区（B）、焊缝区（C）腐蚀速率

	v_A/(mm·a^{-1})	v_B/(mm·a^{-1})	v_C/(mm·a^{-1})
无菌对照	0.001 9±0.000 39	0.002 3±0.000 47	0.002 6±0.000 47
SRB	0.003 0±0.000 51	0.003 4±0.000 47	0.003 7±0.000 10

2.3　开路电位

母材、混合区、焊缝区电极在无菌和含 SRB 介质中测得的开路电位随时间变化的曲线如图 3 所示。浸泡第 1 天，无菌介质中，母材区、混合区、热影响区开路电位依次为–0.6183、–0.6310、–0.6223 V。14 天后，开路电位基本稳定，母材区、混合区、热影响区开路电位依次为–0.5859、–0.5845、–0.5874 V，正移量依次为 32.4、46.5、34.9 mV。在 SRB 介质中，浸泡第 1 天，母材区、混合区、热影响区开路电位依次为–0.6246、–0.6323、–0.6332 V。在 SRB 介质中，随着浸泡时间的增加正移量增加。测试第 7 天，SRB 生长进入稳定生长期，此时母材区、混合区、热影响区开路电位趋于稳定，依次为–0.4857、–0.4762、–0.4878 V，正移量依次为 138.9、156.1、145.4 mV。OCP 的正移，既可能是由于阴极反应速率增大引起，又可能来自阳极反应速率的减小。结合表 1 的腐蚀速率结果可知，SRB 存在所引起的正移与阴极反应速率的增大密切相关。

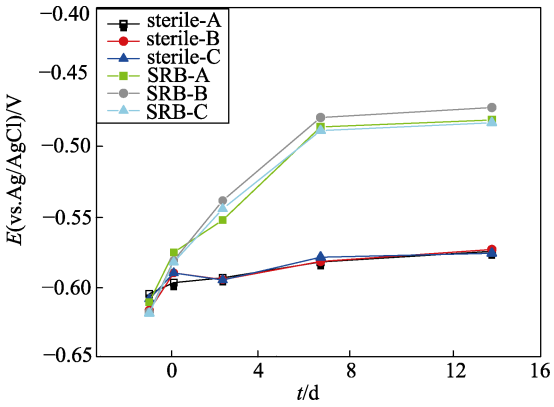


图 3　母材区、混合区、焊缝区在无菌和 SRB 介质中开路电位随时间变化

2.4　EIS

EIS 是研究腐蚀产物膜形成过程的一个强有力的技术手段[26-27]。图 4 和图 5 是母材区、混合区和焊缝区在无菌培养基体系和含 SRB 培养基中浸泡 0、1、3、7、14 天后的 Nyquist 图和 Bode 图。在无菌对照体系中，三个区域容抗弧形状相近，且阻抗模值变化趋势类似。浸泡前 3 天，低频阻抗模值逐渐增大，可能是因为形成的金属腐蚀产物覆盖试样表面，对基体有一定的腐蚀减缓作用。到第 7 天时，低频阻抗模值略减小。14 天时母材区和混合区趋于稳定，焊缝区仍下降。这与质量损失数据结果相一致。

母材区、混合区和焊缝区在含 SRB 培养基中浸泡 0、1、3、7、14 天后容抗弧呈现相近形状，低频阻抗模值变化趋势相似，均先增大后减小。与无菌对照体系相比，前 3 天，低频阻抗模值增大并不明显，则推断 SRB 代谢活动和腐蚀产物膜促进了腐蚀。到第 7 天时，在含 SRB 体系中，三个区域容抗弧形状相近，且阻抗模值变化趋势类似均下降，焊缝区降低不明显。

采用如图 6 所示的等效电路对 EIS 数据进行拟合[28]，其中 R_s 表示溶液电阻，R_f 为腐蚀产物膜电阻，R_{ct} 为双电层电荷转移电阻。CPE_f 为腐蚀产物膜层常相位角元件，CPE_{dl} 为双电层常相位角元件。

无菌体系中，母材区、混合区、焊缝区等效电路拟合的 R_{ct} 数据如图 7 所示。可以看出，母材区、混合区和焊缝区在无菌介质中，随时间的增加，R_{ct} 先逐渐增加，后下降至稳定，而焊缝区 R_{ct} 值始终保持比母材区小。

在 SRB 体系中，母材区、混合区、焊缝区等效电路拟合的 R_{ct} 数据如图 8 所示。可以看出，母材区、混合区和焊缝区在 SRB 介质中，前 3 天 R_{ct} 略有增加。此阶段与无菌介质对比表明，SRB 的对数生长加速了

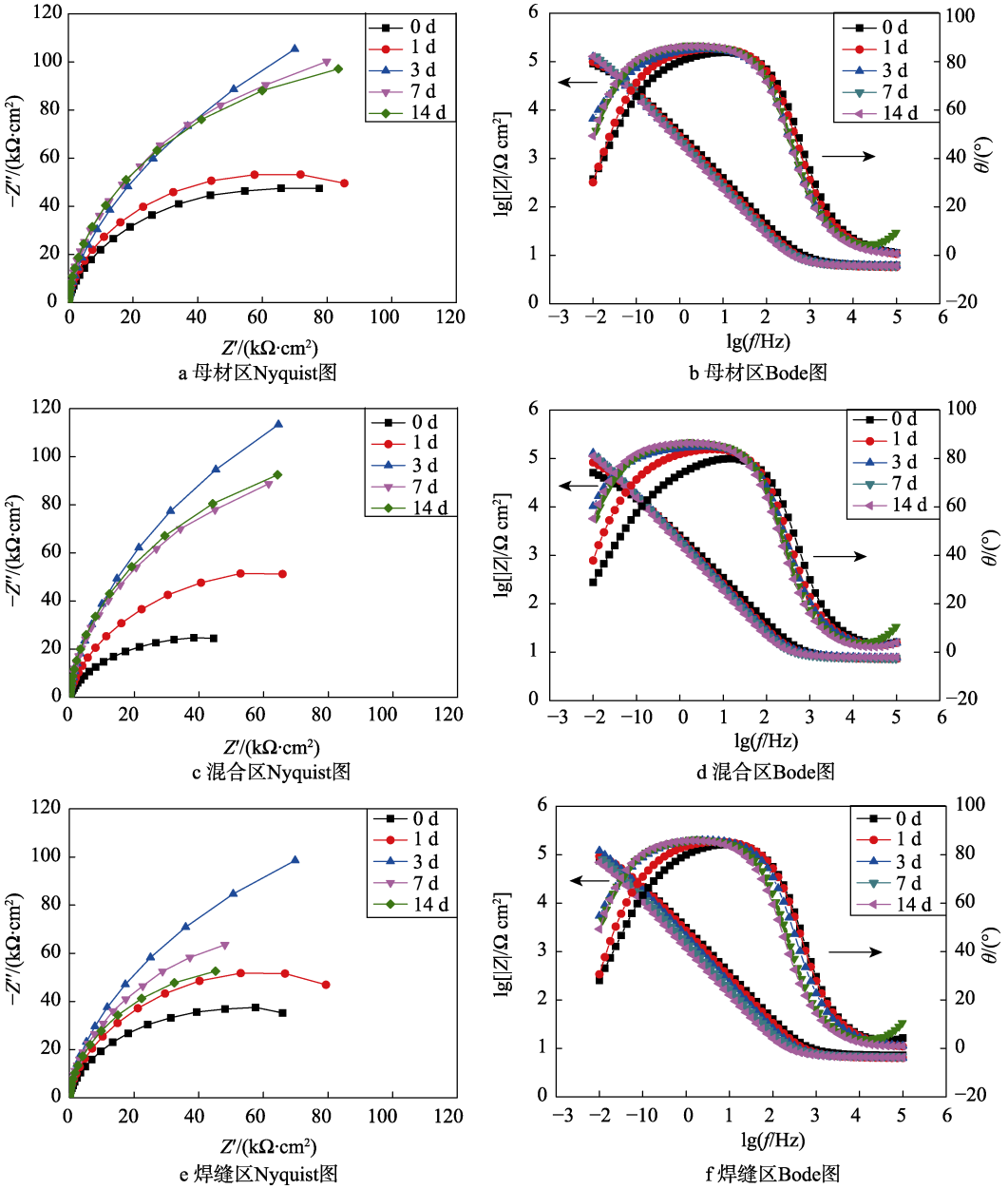


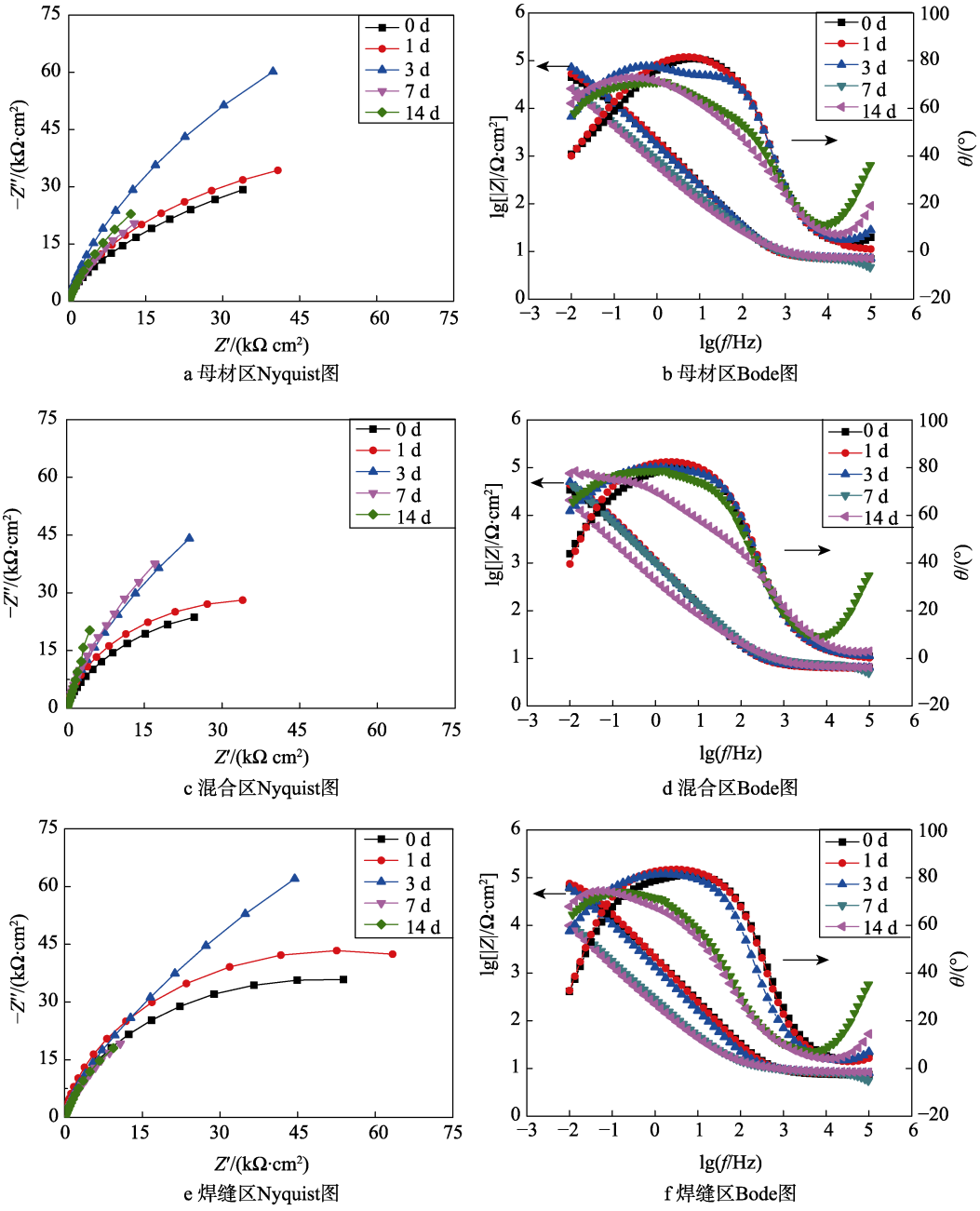
图 4　EH40 钢焊接接头无菌介质中浸泡不同时间的 Nyquist 图和 Bode 图

腐蚀的进行[29]。在 7~14 天，这一阶段 SRB 处于稳定期，R_{ct} 有所增大，相比无菌介质仍然较小，主要是由于 SRB 代谢硫化氢含量达最大值，腐蚀产物膜形成了硫化物导电层，腐蚀机制发生变化[30-31]。因而，随着 SRB 生长周期与代谢情况的变化，腐蚀机理在变化。此阶段，焊缝区 R_{ct} 仍然比母材区小，说明焊缝区比母材区更容易发生腐蚀。

2.5　腐蚀形貌和成分分析

观察含 SRB 培养基中挂片发现，SRB 培养基中挂片表面有一层较厚且疏松的黑色膜状物质。图 9 为母材区、热影响区、焊缝区浸泡在不同体系中 14 天后表面腐蚀产物的微观形貌。可以看出，热影响区附着的腐蚀产物较母材区粗大，说明热影响区晶界铁素体会影响腐蚀产物形貌尺寸[32]，而焊缝区腐蚀产物相对小而致密。SRB 介质中，可见大量交联的胞外多聚物和细菌在试样表面结团沉积。与母材和焊缝区相比，热影响区腐蚀产物块状较大。从图 9d、e、f 的插图中可以看出，SRB 菌株主要分布在靠近基体面或者交杂在腐蚀产物中，腐蚀产物表面很难发现。腐蚀产物成分分析由 EDS 表征如图 10 所示，进一步表明是由于 SRB 代谢硫化物在钢片表面的增加，加速了腐蚀的进行。

图 11 为母材区、热影响区、焊缝区在不同体系中浸泡 14 天去除表面腐蚀产物后基体的微观形貌。在无菌体系中，母材区基体腐蚀最弱，热影响区基体出现点蚀，焊缝区腐蚀程度大，粗糙度大。从图 11a 和 d 整体上看出，无菌对照和 SRB 体系中基体表面



a 母材区Nyquist图　b 母材区Bode图

c 混合区Nyquist图　d 混合区Bode图

e 焊缝区Nyquist图　f 焊缝区Bode图

图 5　EH40 钢焊接接头在 SRB 不同生长阶段的 Nyquist 图和 Bode 图

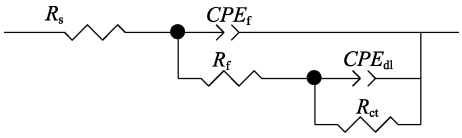


图 6　等效电路

均较为平整，说明 EH40 钢在无菌和 SRB 介质中均表现出较好的耐腐蚀性，但进一步放大可看出，SRB 组母材区表面粗糙度更大。如图 11b 和 e 所示，无菌体系热影响区出现明显的点蚀，SRB 体系中粗糙度明显大于无菌体系。如图 11c 和 f 所示，焊缝区腐蚀较母材严重，SRB 体系中，基体表面形成点蚀，其大小明显小于热影响区。

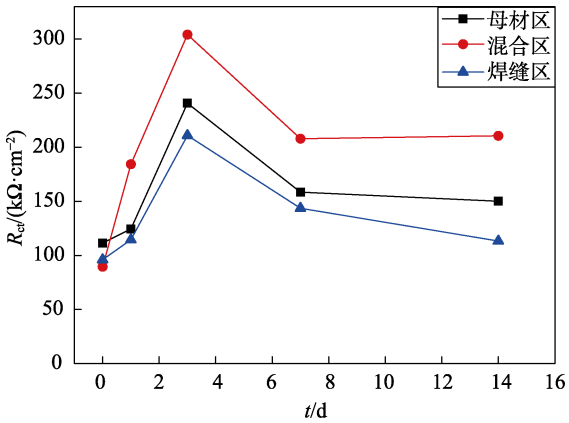


图 7　无菌体系母材区、混合区、焊缝区等效电路拟合 R_{ct} 数据

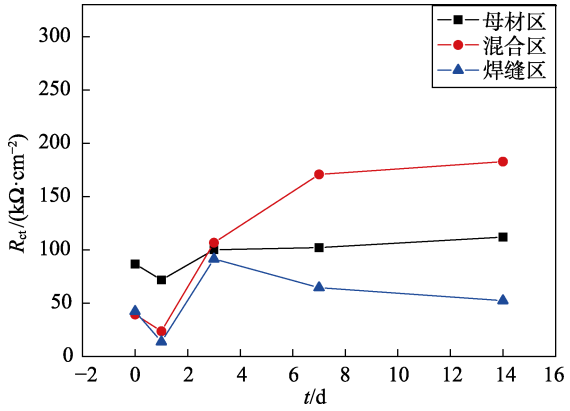


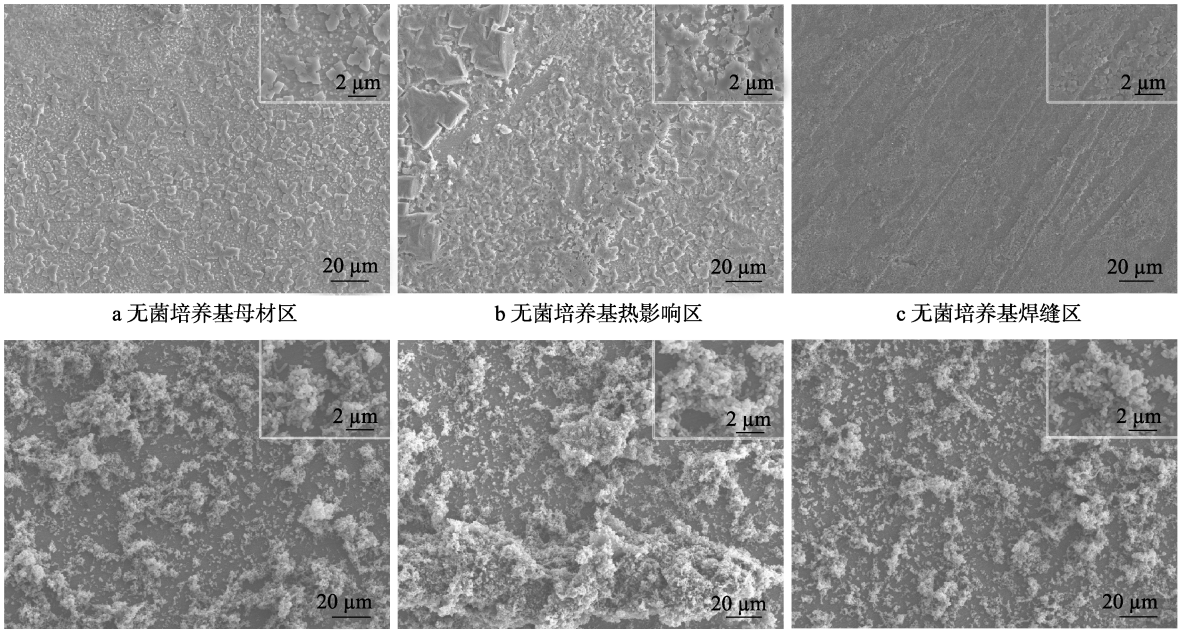
图 8　SRB 体系母材区、混合区、焊缝区等效电路拟合 R_{ct} 数据图

3　结论

1）EH40 钢焊缝的微观结构为魏氏组织和块状铁素体，耐蚀性差；母材区为块状铁素体和集中分布的铁素体，耐蚀性较焊缝区好。

2）从质量损失实验、电化学实验和腐蚀形貌结果分析得到，SRB 能促进三个区域试样腐蚀加速。焊缝区比母材区容易腐蚀，由此易造成小阳极大阴极，从而加速腐蚀失效。

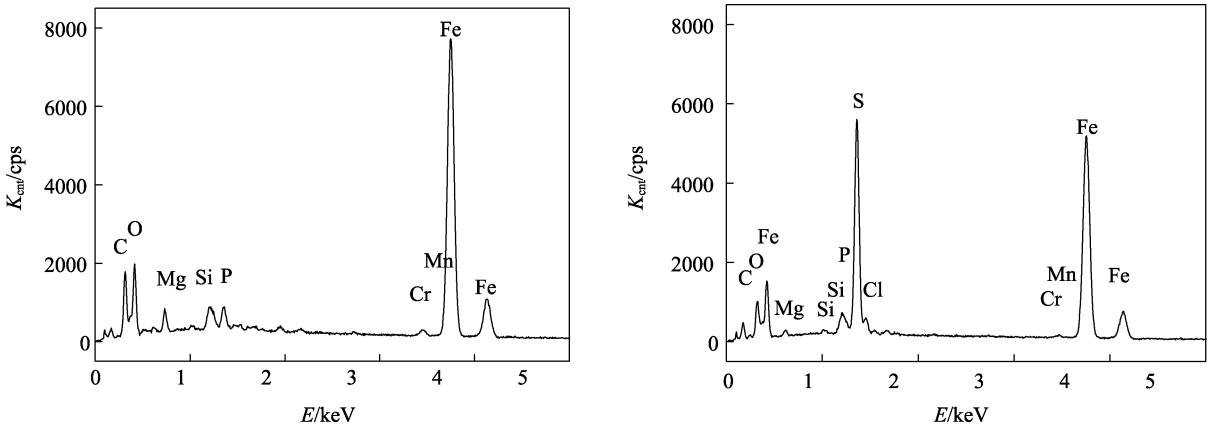
3）从电化学阻抗谱结果可得，在 SRB 对数生长期阶段，在钢片表面形成的生物膜对腐蚀有一定抑制作用，但是与无菌介质相比，细菌本身代谢能加速 EH40 焊接头腐蚀。



a 无菌培养基母材区　b 无菌培养基热影响区　c 无菌培养基焊缝区

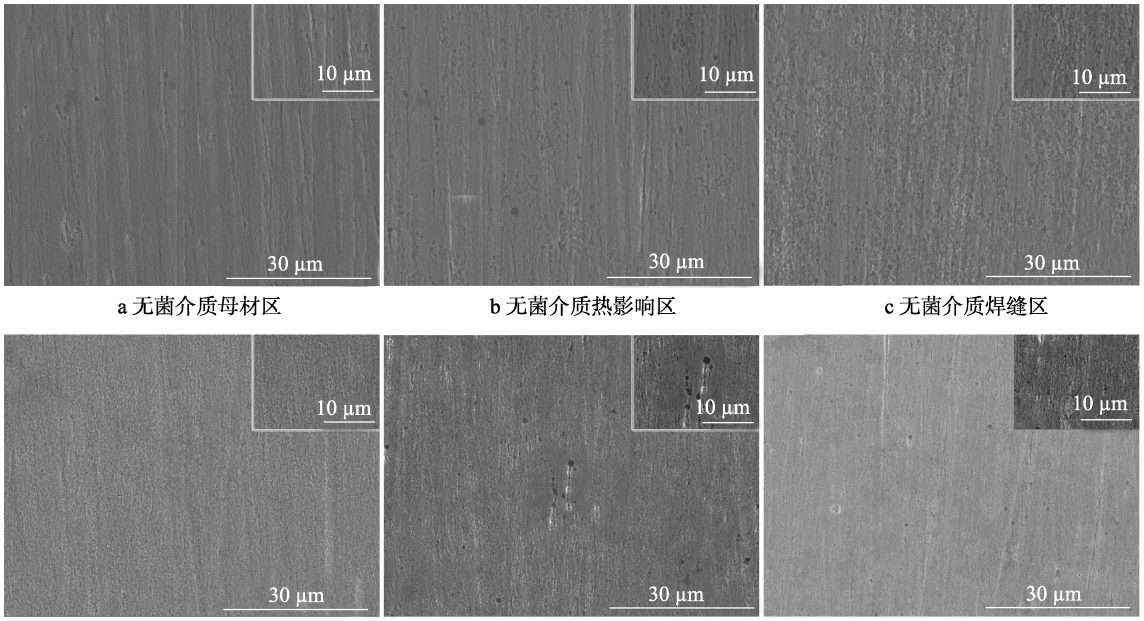
d SRB介质母材区　e SRB介质热影响区　f SRB介质焊缝区

图 9　EH40 钢焊接接头在不同介质中浸泡 14 d 后腐蚀产物形貌 SEM 图



a 无菌　b SRB

图 10　混合区在不同介质中浸泡 14 天后 EDS 图



a 无菌介质母材区　　b 无菌介质热影响区　　c 无菌介质焊缝区

d SRB介质母材区　　e SRB介质热影响区　　f SRB介质焊缝区

图 11　EH40 钢焊接接头在不同介质中浸泡 14 天去除腐蚀产物后形貌表面 SEM 图

参考文献：

[1] HOU B, LI X, MA X, et al. The Cost of Corrosion in China[J]. Npj Materials Degradation, 2017, 1(1):1-4.

[2] KOCH G H, BRONGERS M P H, THOMPSON N G, et al. Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United States[J]. Journal of Endocrinology, 2002, 122(1):23-31.

[3] Anzai T, Nakano K, Nishio K, et al. Biofilm adhesion and microbially influenced corrosion of SUS304 welds exposed to dam water[J]. Welding International, 2006, 20(9): 698-706.

[4] SUVARNA K, UDUPA K R, SURENDRANATHAN A O. Microbial Effects on Heat Treated 316L Weldments in Marine Water[J]. Advanced Materials Research, 2013, 794: 606-617.

[5] TIDE C, HARKIN SR, GEESEY GG, et al. The Influence of Welding Procedures on Bacterial Colonization of Stainless Steel Weldments[J]. Journal of Food Engineering, 1999, 42(2): 85-96.

[6] ANTONY P J, RAMAN R K S, RAMAN R, et al. Role of Microstructure on Corrosion of Duplex Stainless Steel in Presence of Bacterial Activity[J]. Corrosion Science, 2010, 52(4): 1404-1412.

[7] MIYANO Y, YAMAMOTO M, WATANABE K, et al. Case Study on Microbiologically Influenced Corrosion of SUS316L welds (Materials, Metallurgy & Weldability)[J]. Transactions of Jwri, 2002, 31: 213-217.

[8] LIU W. Rapid MIC Attack on 2205 Duplex Stainless Steel Pipe in a Yacht[J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 42(5): 109-120.

[9] NANDAKUMAR K, SREEKUMARI K R, KIKUCHI Y. Grain Boundary Effect on Bacterial Attachment (Materials, Metallurgy & Weldability)[J]. Transactions of Jwri, 2001, 30: 79-88.

[10] 顾彩香，李双明，尹衍升,等. Q235 钢焊接熔合区在混合菌共同作用下的腐蚀行为[J]. 船舶工程，2013(2): 76-79.

[11] MUYZER G, STAMS AJM. The Ecology and Biotechnology of Sulphate-reducing Bacteria[J]. Nature Reviews Microbiology, 2008(6): 441-454.

[12] WU J J, ZHANG D, WANG P. et al. The Influence of Desulfovibrio sp. and Pseudoalteromonas sp. on the Corrosion of Q235 Carbon Steel in Natural Seawater[J]. Corrosion Science, 2016,112: 552-562.

[13] HAMILTON WA. Sulphate-reducing Bacteria and Anaerobic Corrosion[J]. Annu Rev Microbiol, 1985, 39: 195-217.

[14] ANTONY P J, RAMAN RKS,RAMAN R, et al. Role of Microstructure on Corrosion of Duplex Stainless Steel in Presence of Bacterial Activity[J]. Corrosion Science, 2010, 52: 1404-1412.

[15] YI W, ZHANG D, LIU H, et al. Influence of Sulphate-reducing Bacteria on Environmental Parameters and Marine Corrosion Behavior of Q235 Steel in Aerobic Conditions[J]. Electrochimica Acta, 2010, 55(5): 1528-1534.

[16] CHEN SQ, WANG P, ZHANG D. The Influence of Sulphate-reducing Bacteria on Heterogeneous Electrochemical Corrosion Behavior of Q235 Carbon Steel in Seawater[J]. Materials & Corrosion, 2016, 67(4): 340-351.

[17] LI E, WU J J, ZHANG D, et al. D-phenylalanine Inhibits the Corrosion of Q235 Carbon Steel Caused by Desulfovibrio, sp[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2018, 127: 178-184.

[18] BATMANGHELICH F, LI L, SEO Y. Influence of Mul-

tispecies Biofilms of Pseudomonas Aeruginosa, and Desulfovibrio Vulgaris, on the Corrosion of Cast Iron[J]. Corrosion Science, 2017,121: 94-104.

[19] CHEN S, WANG P, ZHANG D. Corrosion Behavior of Copper under Biofilm of Sulfate-reducing Bacteria[J]. Corrosion Science, 2014, 87(5): 407-415.

[20] PARK TG, KIM JM, YOON HY. Impact Toughness and Microstructure of the Weld Metal by Tandem Electro-Gas Welded EH40 Steel[J]. Korean Inst Metals Materials, 2010, 48 (11): 1021-1027.

[21] 陈华, 鲁强, 杨军,等. 海洋平台用钢 EH40-Z35 的开发[J]. 鞍钢技术, 2011(5): 22-25.

[22] 张朋彦, 高彩茹, 朱伏先. 超大热输入焊接用 EH40 钢的模拟熔合线组织与性能[J]. 金属学报, 2012, 48(3): 264-270.

[23] 孙占, 黄继华, 张华,等. 微合金 EH40 型船板钢大热输入焊接接头组织和力学性能[J]. 焊接学报, 2008, 29(3): 41-44.

[24] CHENG X N, DAI Q X, WANG A D. Effect of Alloying Elements and Temperature on Impact Toughness of Cryogenic Austenitic Steels[J]. Materials Science and Engineering: A, 2001, 311: 211.

[25] LI H D, DONG YH, SHEN YY. Influence of Cooling Treatment on Corrosion Behaviour of Steel EH40 in Extremely Cold Seawater[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2017, 12: 11077-11088.

[26] JAMESH M I, WU G, ZHAO Y, et al. Effects of Zirconium and Oxygen Plasma Ion Implantation on the Corrosion Behavior of ZK60 Mg Alloy in Simulated Body Fluids[J]. Corrosion Science, 2014, 82(5): 7-26.

[27] CHEN SQ, WANG P, ZHANG D. The Influence of Sulphate-reducing Bacteria on Heterogeneous Electrochemical Corrosion Behavior of Q235 Carbon Steel in Seawater[J]. Materials & Corrosion, 2016, 67(4): 340-351.

[28] PÉREZ E J, CABRERA-SIERRA R, GONZÁLEZ I, et al. Influence of Desulfovibrio sp. Biofilm on SAE 1018 Carbon Steel Corrosion in Synthetic Marine Medium[J]. Corrosion Science, 2007, 49(9): 3580-3597.

[29] 匡飞. 硫酸盐还原菌对海洋腐蚀行为的影响[D]. 青岛: 中国科学院研究生院, 2008.

[30] CASTANEDA H, BENETTON X D. SRB-biofilm Influence in Active Corrosion Sites Formed at the Steel-electrolyte Interface when Exposed to Artificial Seawater Conditions[J]. Corrosion Science, 2008, 50(4): 1169-1183.

[31] ALABBAS F M, GAVANLUEI A B, KAKPOVBIA A, et al. Effects of Sulfate Reducing Bacteria on the Corrosion of X-65 Pipeline Carbon Steel[J]. NACE International, 2012(1): 734-747.

[32] POHL M, STORZ O, GLOGOWSKI T. Effect of Intermetallic Precipitations on the Properties of Duplex Stainless Steel[J]. Materials Characterization, 2007, 58(1): 65-71.