

EH36 钢在黄海的初期腐蚀速率的空间变异特征的地统计分析

王 昭^{1,2,3}, 孙虎元^{1,3}, 孙立娟^{1,3}, 田国东^{1,2,3}

(1. 中国科学院 海洋研究所 海洋环境腐蚀与生物污损重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋腐蚀与防护开放工作室, 山东 青岛 266237)

摘要: 以黄海海域为研究区, 通过动电位极化曲线法获取了出海实测的 EH36 钢材在 2017 年 8 月及 12 月黄海 43 个站位的初期腐蚀速率的数据, 并以地统计学方法对数据进行分析, 探索研究区内 EH36 钢材的腐蚀速率的空间分布及其变异特征, 绘制初期腐蚀速率预测图。结果表明: 初期腐蚀速率的分布状况在夏季、冬季呈现不同的特征, 夏季分布呈现近岸低、远岸高, 中心高、周围低的特点, 冬季分布呈现中心及东南部分低、周围高的特征。同时, 统计分析表明, EH36 钢在黄海的平均初期腐蚀速率, 夏季为 0.11 mm/a, 冬季为 0.25 mm/a, 并且在夏季和冬季里, EH36 钢在黄海初期腐蚀速率分布的空间变异特征明显, 空间自相关性强, 其中 8 月的块金值/基台值为 0.062, 12 月的块金值/基台值为 0.138, 变程在 100 km 左右。

关键词: 黄海; 腐蚀; EH36 钢; 地统计分析; 空间变异特征

中图分类号: P734

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2020)01-0067-08

DOI: 10.11759/hyxx20190718002

海洋用钢在人类探索海洋, 进入远海的过程中起着重要的作用, 但是海洋用钢面临着严重的腐蚀问题^[1]。基于此, 人们开始进行材料在海水中的腐蚀实验, 探究腐蚀的内在规律。自 20 世纪 30 年代以来, 美欧等发达国家在材料的天然海水腐蚀领域开展了大量研究并有大量的数据积累, 我国于 1958 年建设海水腐蚀站, 并开始积累材料的海水腐蚀数据^[1]。侯保荣等^[2]通过连续挂片实验, 发现钢材在海洋的浪花飞溅区腐蚀最严重。王佳等^[3]通过神经网络、电化学及数据库方法研究了五种海洋工程钢材在深海的腐蚀行为, 表明溶解氧是深海影响腐蚀的关键因素。Al-Muhanna^[4]使用电化学阻抗法研究了金属腐蚀在科威特海峡中受季节及温度变化的影响, 发现海水的季节性变化会改变 304 和 316 不锈钢的极化电阻。Toloei 等^[5]研究了湍流条件下温度、pH、盐度在海水中对碳钢的影响, 结果表明流速对于腐蚀有着确切的影响, 同时多因素的协同影响会对单个因素的影响进行抵消、改善或减弱。Venkatesan 等^[6]在印度洋进行了 5 种钢材的深海挂片实验, 侯建等^[7]在南海进行了 A3 钢的腐蚀挂片实验, 这两个研究均表明溶解氧是深海环境中对钢铁的腐蚀的主要影响因素。高杨等^[8]研究了 X80 管线钢在黄海的初期腐蚀分布与环境因素的关系, 发现在次表层海水中

X80 的腐蚀速度受海水的密度、盐度、溶解氧的影响显著。Zou 等^[9]的研究表明, 极化曲线法能很好的反映钢材在海水中的初期腐蚀速率。

传统的海洋腐蚀的调查方法是岸基实验站或者实海的挂片投放试验^[1, 10, 11], 缺少对于离岸海水的腐蚀状况的调查和研究。EH36 钢具有强度高、韧性高的特点, 广泛应用于船舶建造及海洋工程的建设中。充分了解 EH36 钢材在离岸海水的腐蚀状况, 对于海洋航行及工程建设有着重要的意义。地统计学是以区域化变量理论为基础, 以变异函数为主要工具, 研究在空间分布上既有随机性, 又有结构性, 或空间相关和依赖性的自然现象的科学^[12], 已广泛应用于生态、地质、地化、遥感等领域^[13-17]。使用地统计学方法, 掌握 EH36 钢在黄海的腐蚀的宏观空间分布状况, 具有很大的现实意义。本文根据出海实测

收稿日期: 2019-07-18; 修回日期: 2019-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(41476067); 中国科学院科学号高端用户项目(KEXUE2018G13)

[Foundation: National Natural Science Foundation, No. 41476067; Senior User Project of RV KEXUE of Chinese Academy of Sciences, No. KEXUE2018G013]

作者简介: 王昭(1995-), 男, 山东省青岛人, 硕士研究生, 研究方向为地统计学腐蚀应用研究, oucwangzhao@163.com; 孙虎元, 通信作者, 研究员, 博士生导师, 主要从事腐蚀监测、检测及海洋腐蚀大数据研究, sun@qdio.ac.cn

的数据,计算 EH36 钢在黄海的初期腐蚀速率的半变异函数,利用其特征参数来定量分析研究区内 EH36 钢的初期腐蚀速率的空间分布特征,并根据克里格插值法给出 EH36 钢在黄海的初期腐蚀速率预测图。

1 试验

1.1 研究区域概况

于 2017 年 8 月及 12 月乘坐“东方红 2 号”科考船对黄海海域进行调查,站位的具体分布如图 1 所示。

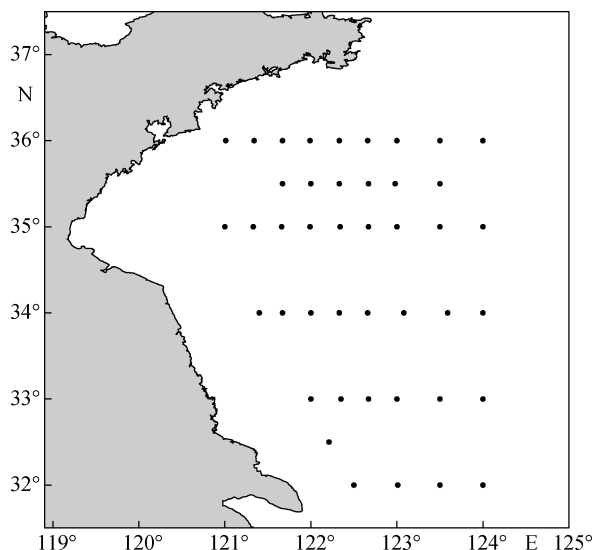


图 1 黄海调查站位分布图

Fig. 1 Sampling stations in the Yellow Sea

采用 Niskin 采水器在各站位采集次表层海水作为电化学实验中的腐蚀介质,并立刻在船载实验室中进行电化学测试。温度、溶解氧数据均来自于 CTD 传感器。

1.2 试样

试样材料为 EH36 钢材,将其切割成 10 mm×10 mm×10 mm 的立方体试样,在试样背面焊接引出铜导线,非工作面部分使用环氧树脂封装在 PVC 管中,放置 48 小时以上使其固化。试验前用 SiC 水磨砂纸(240#、800#、1500#、2000#)对电极的工作面进行逐级打磨,然后用无水乙醇清洗、吹干后,置于新鲜海水中,待开路电位稳定后进行电化学测试。

1.3 电化学测试方法

电化学测试试验在 Garmy1000E 电化学工作站上完成。采用三电极体系,使用上述 EH36 电极为工作电极,饱和甘汞电极(SCE)为参比电极,铂电极为

辅助电极,工作电极和参比电极之间采用盐桥相连以去除液接电势。各电极的试验介质为各调查站位现场采集的新鲜海水。极化曲线测试的扫描速率为 0.5 mV/s,扫描范围为相对于开路电位的 -180 mV~180 mV,采用 fitting 软件对极化曲线测试的数据进行弱极化拟合分析。试样的年腐蚀速率通过公式(1)计算得出:

$$v = \frac{A \times I_{\text{corr}}}{n \times F \times \rho} \times 87600 (\text{mm/a}), \quad (1)$$

式中, A 为原子量, I_{corr} 为腐蚀电流密度,单位为 A/cm^2 ; n 为反应过程中的转移电子数; F 为法拉第常数; ρ 为金属密度,单位为 g/cm^3 。

1.4 数据分析

研究区域内 EH36 钢的初期腐蚀速率的空间变异性是在地统计学的相关理论下完成的。使用 Global Mapper 将地理坐标系(WGS84)转换为投影坐标系[Beijing1954, Gauss Krueger(3 degree zones, 121.5°E~124.5°E)]。使用各个站位的 EH36 钢在次表层的初期腐蚀速率计算半变异函数,计算公式见公式(2)。然后使用理论半变异函数模型进行拟合,从而进行 EH36 钢的初期腐蚀速率的空间分布特征分析。在本研究中,利用 GS+ 9.0 软件进行半变异函数的分析,对于黄海的 EH36 钢的初期腐蚀速率分布的预测图使用普通克里格插值法计算得出。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(y_i) - Z(y_i + h)]^2, \quad (2)$$

式中, $\gamma(h)$ 为样本间距为 h 的半方差; h 为样本间距; $Z(y_i)$ 为位置在 y_i 处的腐蚀速率的值; $Z(y_i + h)$ 为距离为 $y_i + h$ 处的腐蚀速率的值; $N(h)$ 为间距为 h 的样本对的个数。

2 结果与讨论

2.1 空间分布变异性分析

通过对 EH36 钢的初期腐蚀速率数据进行经典统计描述来分析研究区的变异特征,结果如表 1 所示。

变异系数反映了数据的离散程度,其计算公式为标准差与平均值的比值。一般认为,变异系数小于 10% 为弱变异,10%~30% 之间为中等程度变异,大于 30% 为强变异。由表可以看出, EH36 钢的初期腐蚀速率在黄海的分布具有很大的季节性差异,夏季的平均腐蚀速率为 0.11 mm/a,冬季的平均腐蚀速率为 0.25 mm/a,夏季的腐蚀速率明显小于冬季;变异系

数夏季为 70%，冬季为 40%，说明在研究区内，腐蚀速率的空间变异程度上，冬季明显小于夏季。同时可以看出，夏冬两季的腐蚀速率数值离散程度均较大。

数据离散程度较大的原因为不同位置的海洋环境差异较大，因此 EH36 钢在不同位置的海域受到的环境影响不同，故其腐蚀速率的离散程度较大。

表 1 研究区 EH36 钢初期腐蚀速率的变异性统计

Tab. 1 Statistics of the variability characteristics of the initial corrosion rate of EH36 steel in the study area

月份	站位数	最大值/(mm/a)	最小值/(mm/a)	平均值/(mm/a)	标准差	变异系数/%
8 月	43	0.35	0.02	0.11	0.083	70
12 月	38	0.54	0.08	0.25	0.10	40

2.2 空间分布异质性分析

半方差本质上是给定距离的数据对的平均方差。理论上，半方差随着分隔距离的增加而增加，最后到达一个定值，这个常数叫做基台值(sill)。基台值代表了不再具有空间相关性时的分隔距离上的最大样本方差^[12]。当半方差达到基台值时的滞后距称为变程(range)。变程描述了在该间隔内样点的空间相关特征，

若某点与已知点距离大于变程，则这两点不存在相关性，此时该点数据不能用于数据内插或者外插。当样本间距为 0 时的半方差称为块金值(nugget)。块金值表示在现有采样尺度下的随机性变化。计算 8 月、12 月 EH36 钢的初期腐蚀速率的半变异函数，并对半变异函数进行球状、指数、高斯和线性拟合，得到决定系数最大、剩余平方和最小的最优拟合模型，结果见表 2。

表 2 研究区 EH36 钢的初期腐蚀速率半变异函数模型类型及参数

Tab. 2 Models and parameters of the semivariable function of the initial corrosion rate of EH36 steel in the study area

月份	模型	块金值(C ₀)	基台值(C ₀ +C ₁)	块金值/基台值	变程(a, 单位 m)	决定系数
8	球状	0.000 42	0.006 73	0.062	133 700	0.600
12	指数	0.001 51	0.010 92	0.138	95 700	0.562

结合相应的模型，可以得出半方差函数。8 月份

的半方差函数为：

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ 0.00042 + 0.00631 \times \left(\frac{3h}{2} \times 133700 - \frac{h^3}{2} \times 133700^3 \right) & 0 < h \ll 133700, \\ 0.00673 & h > 133700 \end{cases} \quad (3)$$

12 月的半方差函数为：

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ 0.00151 + 0.00941 \times \left(1 - e^{-\frac{h}{95700}} \right) & h > 0 \end{cases} \quad (4)$$

从表 2 中可以看出，8 月份的最优拟合模型为球状，12 月份的最优拟合模型为指数。给出了最优拟合模型的模型参数进行分析，能较好的反映 EH36 钢的初期腐蚀速率的空间结构特征。根据最优模型的参数，8 月的块金值为 0.000 42，12 月的块金值为 0.001 51，数值均偏小，说明了在较小的尺度下，黄海研究区域的 EH36 的初期腐蚀速率采样误差和数值的空间变化较小。度量变量总体的空间自相关性强弱可以使用块金值与基台值的比值，通常认为，比值小于 25% 时空间自相关性较强，比值介于 25%~75% 时，为中等程度的空间自相关性，比值大于 75%

时为弱的空间自相关性。从表中可以看出，EH36 钢在黄海的初期腐蚀速率在 8 月和 12 月的比值均在 25% 以下，说明具有强烈的空间自相关性，空间分布上具有明显的规律性。变程表示半变异函数由块金值增大至基台值时所需的空间距离。研究区内 8 月及 12 月的变程均较大，在 100 km 上下，这说明了 EH36 钢的初期腐蚀速率的空间自相关变化的范围较大，这也与变量在研究区域内强烈的空间自相关性有关。

分形是其组成部分以某种方式与整体相似的形。分形理论的提出为揭示隐藏于混乱复杂现象中的精细结构和对其进行定量刻画描述提供了理论基础。分形地统计学不仅能反映分形几何特征，同时能揭示其内在的规律，即随机变量存在的分形关系。

分形的维度可以理解为一个分形被放大 a 倍后，其占有空间比原来增加了 aⁿ 倍，那么这个分形

的维度为 n 。分维值受半变异函数的斜率影响, 对于各向分维值的分析可以得到腐蚀速率的各向异性特征。以正北为 0° , 正东为 90° , 计算的分维值见表 3。

表 3 研究区不同季节不同方向的分维分析
Tab. 3 Directional and seasonal analyses of the fractal dimension in the study area

月份	方向	分维数	月份	方向	分维数
8	全局	1.776	12	全局	1.898
	0°	1.968		0°	1.951
	45°	1.646		45°	1.683
	90°	1.890		90°	1.815
	135°	1.841		135°	1.632

由表 3 可以看出, 研究区内的分维值在 1.63~1.96, 8 月的全局分维值为 1.776, 小于 12 月的全局分维值 1.898。分维数的不同反映了不同时间随机性和结构因素的不同引起空间异质性程度的不同。分维数低意味着空间异质性程度低。8 月的分维数低, 结合块金值可以看出由测量误差引起的空间异质性程度也低, 占了约 0.062, 具有较强的空间自相关性。12 月的分维数高, 由测量误差引起的空间异质性程度高于 8 月, 为 0.138, 也具有较强的空间自相关性。

EH36 钢的初期腐蚀速率受到海水温度、化学成分、盐度等多方面因素影响, 当分维数低时, 意味着

数据分布简单, 变化低, 空间异质性程度低, 也表明影响因素的变动小。从表中可以看出, 8 月及 12 月的东北-西南方向分维数较低, 表明 EH36 钢的初期腐蚀速率的异质性强度在东北-西南方向较低。说明在研究区内的东北-西南方向的腐蚀速率变化偏小, 这与黄海冷水团的分布有部分贴合^[18], 因此可能与近海的水团的影响因素相关。夏季, 在东北西南方向上, 研究区域有大部分与黄海冷水团相重合。在水团的影响下, 大范围的海水在东北-西南方向上的物理化学性质趋同, 导致了腐蚀速率在水团区域内较其它区域更呈现趋同的趋势, 使得该方向上的相关性距离增大, 因此分维数降低。在冬季, 黄海暖流在研究区域内有多个呈现西北-东南方向方向的流^[18], 因此推测其是这个方向的分维值偏低的原因。

夏季的空间自相关性强于冬季, 其原因可能是黄海的冬季风况强于夏季^[18], 大风对于海水表层的扰动, 使得浅层海水化学成分的空间分布上更加复杂, 因此降低了冬季的空间相关性。同时, 冬季的全局分维数大于夏季, 也是有这方面的原因。冬季全局的分维数较高, 说明影响因素的变化比较频繁。

2.3 腐蚀速率的空间分布特征

根据地统计的参数, 使用克里格法进行插值, 拟合出 EH36 钢在黄海的初期腐蚀速率预测图, 结果如图 2 所示。

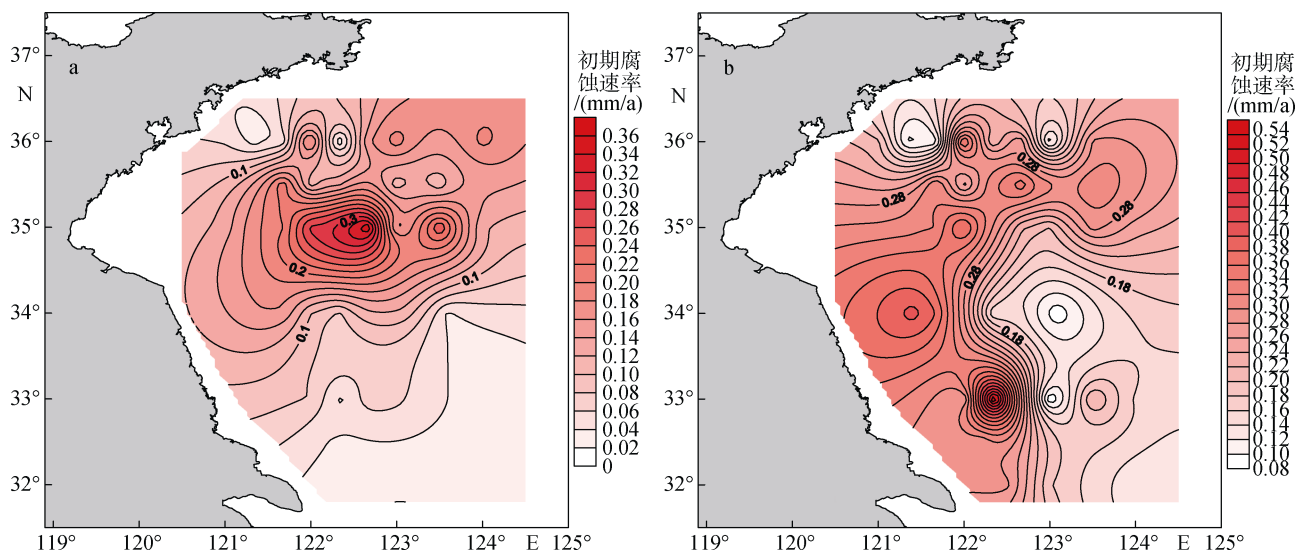


图 2 黄海研究区内 EH36 钢的初期腐蚀速率预测图
Fig. 2 Initial corrosion rate prediction map of EH36 steel in the Yellow Sea
注: a: 8 月; b: 12 月

从图 2 中可以看出, 夏季近岸腐蚀速率小于远岸, 冬季近岸腐蚀速率略大于远岸。夏季 EH36 钢在

南黄海的初期腐蚀速率, 具有比较明显的空间差异, 表现为中间高, 南北低的特点, 并且南黄海的腐蚀

速率要显著低于北黄海。在冬季, EH36 钢的初期腐蚀速率的空间分布呈现较明显的中间及东南部分低、其余部分高的特点。同时冬季的空间分布更为杂乱, 与空间自相关性弱于夏季、异质性强于夏季相吻合。

选取较为典型的纬度断面北纬 36°和北纬 35.5°, 使用实测数据绘制腐蚀速率的折线图如图 3 所示。可以明显的看出夏季的腐蚀速率普遍低于冬季腐蚀速率, 同时, 在同一纬度断面上, 夏季和冬季腐蚀速率在水平距离上的变化情况比较相似。

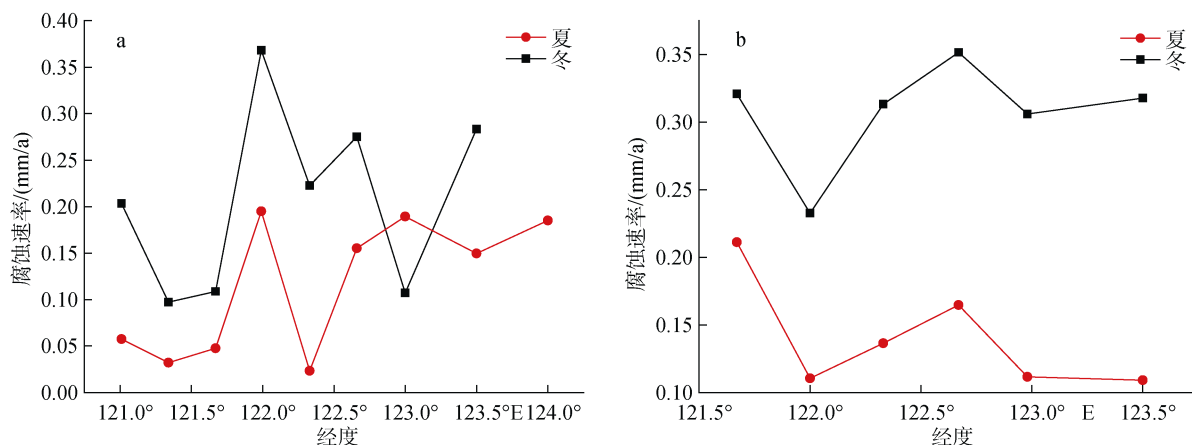


图 3 EH36 钢在不同纬度断面的初期腐蚀速率分布图
Fig. 3 Initial corrosion rate distribution of EH36 steel at different latitudes
注: a: 36°N; b: 35.5°N

根据初期腐蚀速率预测图可以看出, 夏冬两季 EH36 钢在研究区的初期腐蚀速率的空间分布及变异具有明显的差异, 这可能与研究区域内的物理、化学因素变化相关^[8]。为讨论温度及溶解氧与 EH36 钢初期腐蚀速率的关系, 分别给出了海水温度及溶解氧含量与 EH36 钢初期腐蚀速率的散点图, 如图 4、图 5 所示。

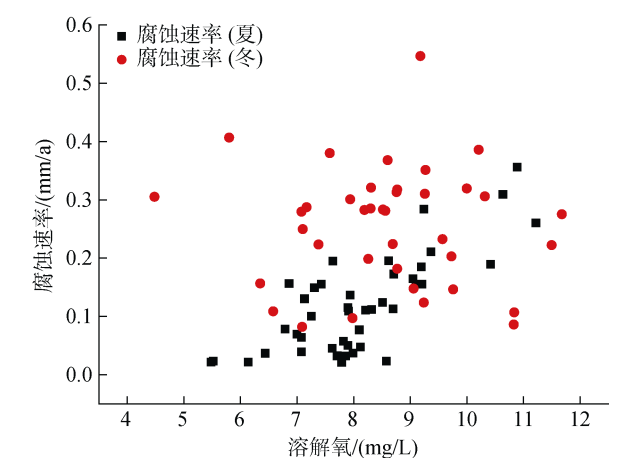


图 5 黄海 EH36 钢初期腐蚀速率与溶解氧浓度的关系图
Fig. 5 Relationship between the initial corrosion rate of EH36 steel and dissolved-oxygen content in the Yellow Sea

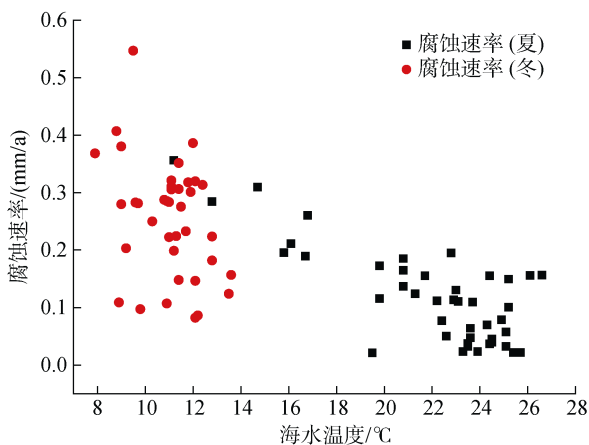


图 4 黄海 EH36 钢初期腐蚀速率与海水温度的关系图
Fig. 4 Relationship between the initial corrosion rate of EH36 steel and seawater temperature in the Yellow Sea

从图 4 可以看出, 在次表层海水中, 随着温度的上升, EH36 钢的初期腐蚀速率呈下降趋势, 这与通常所认知的海水温度上升, 腐蚀速率上升有偏差^[19-21], 说明其腐蚀速率的降低很可能受溶解氧扩散的影响^[21]。通常认为, 温度升高有利于氧的扩散以及界面反应的进行, 但也减少了水中的溶解氧的含量, 因此温度和溶解氧对于腐蚀呈竞争作用^[23]。高杨等^[8]通过对

次表层 X80 钢的初期腐蚀速率的研究,认为温度升高,导致溶解氧含量降低,因此腐蚀速率降低,这与图 5 中夏季的腐蚀速率与溶解氧成较好的线性关系相吻合。对比冬季腐蚀速率与温度及溶解氧的关系,可以看出图 4 中冬季腐蚀速率与温度有一定的线性关系,但是图 5 中冬季腐蚀速率与溶解氧无明显关系,这说明了季节的变化削弱了溶解氧对 EH36 钢的腐蚀的影响。

在黄海海域,夏季溶解氧的分布呈现南部低、中北部高的趋势,这与 EH36 钢在研究区的夏季初期腐蚀速率的空间分布有一定吻合。夏季,受黄海冷水团及长江冲淡水的影响,中层水体表现出中央海域低温高盐高溶解氧的特点^[22],因此在南北黄海中部,初期腐蚀速率较高。图 5 中夏季的腐蚀速率与溶解氧呈现出比较明显的线性关系也可以佐证这一点。

夏季 EH36 钢的初期腐蚀速率小于冬季,这主要是由于腐蚀速率受到温度、溶解氧等多种因素耦合的影响。在黄海研究区,夏季气温高,溶解氧含量低,尤其 8 月是黄海全年溶解氧含量的最低值,溶解氧含量显著小于冬季^[24]。在本次调查中,冬季黄海水温比夏季低约 10~13℃,8 月黄海次表层溶解氧含量平均在 8.08 mg/L,12 月溶解氧含量平均为 8.59 mg/L,而溶解氧对于腐蚀的影响大于温度对于腐蚀的影响^[8],从而导致夏季腐蚀速率小于冬季。

3 结论

(1) 根据地统计学原理绘制了 EH36 钢在黄海的初期腐蚀速率预测图, EH36 钢在黄海研究区域内初期腐蚀速率夏季为 0.02~0.35 mm/a, 冬季为 0.08~0.54 mm/a。空间分布趋势上,呈现夏季近岸低、远岸高,中心高、周围低,冬季中心及东南部分低、周围高的趋势。

(2) EH36 钢在研究区内的初期腐蚀速率变异程度上夏冬两季均为强变异,且夏季变异程度高于冬季,夏冬两季东北-西南方向变异程度均稍低于其他方向;异质性特征表现为夏冬两季均属于强的空间自相关性,且空间自相关性的范围在 100 km 左右。

(3) 夏季在研究区内的初期腐蚀速率空间分布与黄海的溶解氧空间分布特点比较吻合,腐蚀速率与溶解氧浓度的相关性较高。冬季在研究区内的初期腐蚀速率与溶解氧浓度的相关性低于夏季。

致谢:感谢国家自然科学基金基金委共享航次渤海黄航

次(资助编号:41649901)给予的大力支持,感谢“东方红 2 号”、“科学三号”科考船在出海工作上的支持,感谢宝钢研究院的王巍老师提供的 EH36 样品。

参考文献:

- [1] 夏兰廷,王录才,黄桂桥.我国金属材料的海水腐蚀研究现状[J].中国铸造装备与技术,2002(6):1-4.
Xia Lanting, Wang Lucai, Huang Guiqiao. Present status of research on sea-water corrosion of metal in China[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2002(6): 1-4.
- [2] 侯保荣,张经磊.钢材在潮差区和全浸区的腐蚀行为[J].海洋科学,1980,4(4):16-19.
Hou Baorong, Zhang Jinglei. Corrosion behavior of steel in tidal zone and full immersion zone[J]. Marine Sciences, 1980, 4(4): 16-19.
- [3] 王佳,孟洁,唐晓,等.深海环境钢材腐蚀行为评价技术[J].中国腐蚀与防护学报,2007,27(1):1-6.
Wang Jia, Meng Jie, Tang Xiao, et al. Assessment of corrosion behavior of steel in deep ocean[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2007, 27(1): 1-6.
- [4] Al-Muhanna K. Corrosion behavior of different stainless steel alloys exposed to flowing fresh seawater by electrochemical impedance spectroscopy (EIS)[J]. Desalination and Water Treatment, 2011, 29: 227-235.
- [5] Toloei A, Atashin S, Pakshir M. Corrosion rate of carbon steel under synergistic effect of seawater parameters including pH, temperature, and salinity in turbulent condition[J]. Corrosion Reviews, 2013, 3-6(31): 135-144.
- [6] Venkatesan R, Venkatasamy M A, Bhaskaran T A, et al. Corrosion of ferrous alloys in deep sea environments[J]. British Corrosion Journal, 2002, 37(4): 257-266.
- [7] 侯健,郭为民,邓春龙.深海环境因素对碳钢腐蚀行为的影响[J].装备环境工程,2008,5(6):82-84.
Hou Jian, Guo Weimin, Deng Chunlong. Influences of deep sea environmental factors on corrosion behavior of carbon steel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(6): 82-84.
- [8] 高杨,孙虎元,孙立娟. X80 管线钢在黄海海水中的初期腐蚀行为[J].腐蚀与防护,2018(5):327-331.
Gao Yang, Sun Huyuan, Sun Lijuan. Initial Corrosion behavior of X80 pipeline steel in the Yellow Sea[J]. Corrosion & Protection, 2018(5): 327-331.
- [9] Zou Y, Wang J, Zheng Y Y. Electrochemical techniques for determining corrosion rate of rusted steel in seawater[J]. Corrosion Science, 2011, 53(1): 208-216.
- [10] 朱相荣,黄桂桥,林乐耘,等.金属材料长周期海水腐蚀规律研究[J].中国腐蚀与防护学报,2005(3):142-148.
Zhu Xiangrong, Huang Guiqiao, Lin Leyun, et al. Re-

- search Progress on the long Period Corrosion Law of Metallic Materials in Seawater[J]. Journal of Chinese Society For Corrosion and Protection, 2005(3): 142-148.
- [11] 孔德英, 宋诗哲. 人工神经网络技术探讨碳钢、低合金钢的实海腐蚀规律[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1998(4): 51-58.
Kong Deying, Song Shizhe. Analysis of corrosion data for carbon steel and low-alloy steels in seawater by artificial neural network[J]. Journal of Chinese Society For Corrosion and Protection, 1998(4): 51-58.
- [12] 吕君伟, 刘湘南. 香港近岸海域悬浮固体浓度空间变异特征的地统计分析[J]. 中国环境科学, 2014, 34(3): 734-741.
Lü Junwei, Liu Xiangnan. Geostatistical analysis on spatial variability of suspended solids concentration in the coast water of Hongkong[J]. China Environmental Science, 2014, 34(3): 734-741.
- [13] 杨静, 肖天昀, 李海波, 等. 江汉平原地下水中硝酸盐的分布及影响因素[J]. 中国环境科学, 2018, 38(2): 710-718.
Yang Jing, Xiao Tianyun, Li Haibo, et al. Spatial distribution and influencing factors of the NO₃-N concentration in groundwater in Jianghan Plain[J]. China Environmental Science, 2018, 38(2): 710-718.
- [14] Castillo-Santiago M Á, Ghilardi A, Oyama K, et al. Estimating the spatial distribution of woody biomass suitable for charcoal making from remote sensing and geostatistics in central Mexico[J]. Energy for Sustainable Development, 2013, 17(2): 177-188.
- [15] 袁峰, 白晓宇, 张颖慧, 等. 典型矿集区土壤中重金属元素的多维分形空间分布特征研究——以铜陵矿集区土壤中 Cd 为例[J]. 土壤通报, 2009, 40(1): 167-170.
Yuan Feng, Bai Xiaoyu, Zhang Yinghui, et al. Multi-Fractal distribution of soil Cd in Tongling[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(1): 167-170.
- [16] Rossi R E, Mulla D J, Journel A G, et al. Geostatistical Tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence[J]. Ecological Monographs, 1992, 62(2): 277-314.
- [17] Lai Y S, Biedermann P, Ekpo U F, et al. Spatial distribution of schistosomiasis and treatment needs in sub-Saharan Africa: a systematic review and geostatistical analysis[J]. Lancet Infectious Diseases, 2015, 15(8): 927-940.
- [18] 孙湘平. 中国近海区域海洋[M]. 北京: 海洋出版社, 2006.
Sun Xiangping. China's Offshore Regional Oceans[M]. Beijing: China Ocean Press, 2006.
- [19] Melchers R E, Jeffrey R. Early corrosion of mild steel in seawater[J]. Corrosion Science, 2005, 47(7): 1678-1693.
- [20] Melchers R E. Mathematical modelling of the diffusion controlled phase in marine immersion corrosion of mild steel[J]. Corrosion Science, 2003, 45(5): 923-940.
- [21] Takasaki A, Yamada Y. Effects of temperature and aggressive anions on corrosion of carbon steel in potable water[J]. Corrosion Science, 2007, 49(1): 240-247
- [22] 江蓓洁, 鲍献文, 吴德星, 等. 北黄海冷水团温、盐多年变化特征及影响因素[J]. 海洋学报(中文版), 2007(4): 1-10.
Jiang Beijie, Bao Xianwen, Wu Dexing, et al. Interannual variation of temperature and salinity of northern Huanhai Sea Cold Water Mass and its probable cause[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007(4): 1-10.
- [23] Zhang G A, Cheng Y F. Electrochemical corrosion of X65 pipe steel in oil/water emulsion [J]. Corrosion Science, 2009, 51(4): 901-907
- [24] 贾瑞丽, 孙璐. 渤海、黄海冬夏季主要月份的海温分布特征[J]. 海洋通报, 2002(4): 1-8.
Jia Ruili, Sun Lu. Distribution features of the Yellow and Bohai Seas temperature in winter and summer[J]. Marine Science Bulletin, 2002(4): 1-8.

Geostatistical analysis of the spatial variability of the initial corrosion rate of EH36 steel in the Yellow Sea

WANG Zhao^{1, 2, 3}, SUN Hu-yuan^{1, 3}, SUN Li-juan^{1, 3}, TIAN Guo-dong^{1, 2, 3}

(1. Key Laboratory of Marine Environmental Corrosion and Bio-fouling, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Open Studio for Marine Corrosion and Protection, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

Received: Jul. 18, 2019

Key words: Yellow Sea; corrosion; EH36 steel; geostatistical analysis; spatial variability

Abstract: This study investigated the spatial distribution and variability of the initial corrosion rate of EH36 steel in the Yellow Sea. The initial corrosion rate data of EH36 steel in 43 stations in the Yellow Sea in August and December 2017 were obtained using the dynamic potential polarization curve. The geostatistical method was used to analyze the spatial distribution and variation characteristics. Through data analysis, the spatial distribution and variation characteristics of the initial corrosion rate of EH36 steel in the study area were investigated. Then, the initial corrosion rate prediction map was drawn. The results show that the initial corrosion rate shows different distribution characteristics in summer and winter. The distribution in summer is high in the middle area and low in the surrounding area. The distribution in winter is low in the middle and southeast areas and high in the surrounding area. At the same time, the statistical data show that the initial corrosion rate of EH36 steel in the Yellow Sea is 0.11 mm/a in summer and 0.25 mm/a in winter, and the spatial variation characteristics of EH36 steel in the Yellow Sea are obvious in summer and winter. Moreover, the initial corrosion rate showed a strong autocorrelation in the spatial dimension, in which the values of nugget/sill in August and December are 0.062 and 0.138, respectively, and the range is approximately 100 km.

(本文编辑: 杨 悦)