

专栏——岛礁环境装备适应性研究

# E420 在南海岛礁海水环境腐蚀行为规律研究

丁康康<sup>1</sup>, 刘亚强<sup>2</sup>, 顾良华<sup>1</sup>, 郭为民<sup>1</sup>, 侯健<sup>1</sup>, 孙明先<sup>1</sup>

(1.中国船舶重工集团公司第七二五研究所 海洋腐蚀与防护重点实验室, 山东 青岛 266237;  
2.北京环佳通信技术有限公司, 北京 100192)

**摘要:** 目的 研究 E420 低合金钢材料在南海岛礁海水环境中的腐蚀行为规律。方法 通过外场暴露试验, 分析 E420 钢在南海岛礁飞溅、潮差和全浸区带暴露 0.5、1、1.5、2 a 后的腐蚀形貌与动力学规律, 并建立腐蚀速率灰色预测模型  $GM(1,1)$ 。结果 随暴露周期的延长, 南海岛礁不同海水区带环境下, E420 的腐蚀速率呈下降趋势, 点蚀深度则整体达到一个较高的水平。飞溅区腐蚀速率数值最大, 远大于一般海域, 潮差次之, 全浸最小。灰色模型  $GM(1,1)$  的腐蚀速率预测值与实测值相对误差低于 25%。结论 南海岛礁不同海水区带 E420 腐蚀严重, 以飞溅尤为严酷, 锈层防护作用有限。腐蚀随时间倾向于不均匀发展。灰色模型  $GM(1,1)$  用于预测岛礁海水环境腐蚀可以取得较好的结果。

**关键词:** 钢; 南海岛礁; 海水环境; 腐蚀

**DOI:** 10.7643/ issn.1672-9242.2020.10.001

**中图分类号:** TG172.5      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)10-0001-07

## Corrosion Behavior of E420 in Seawater Environments of the Reef in the South China Sea

DING Kang-kang<sup>1</sup>, LIU Ya-qiang<sup>2</sup>, GU Liang-hua<sup>1</sup>, GUO Wei-min<sup>1</sup>, HOU Jian<sup>1</sup>, SUN Ming-xian<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute, Qingdao 266237, China; 2. Beijing Huanjia Communication Technology Co., Ltd, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** The work aims to investigate the corrosion behavior and rules of E420 low alloy steel in seawater environments of the reef in the South China Sea. Field exposure test was carried out on E420 steel in the splash, tidal and immersion zones of South China Sea for 0.5 a, 1 a, 1.5 a and 2 a to study its corrosion morphology and law of dynamics and establish a grey prediction model  $GM(1,1)$  about corrosion rates. With the extension of the exposure period, the corrosion rate of E420 in different seawater zones of the reef in South China Sea decreased, while the pitting depth reached a higher level as a whole. The corrosion rates of E420 in the splash zone were the largest, far greater than that in the general sea areas, followed by the tidal zone, and the full immersion zone was the minimum. The relative error between the predicted corrosion rate based on  $GM(1,1)$  model and the measured corrosion rate was less than 25%. The environment in different seawater zones of the reef in South China Sea has severe corrosion property, especially in the splash zone, where formed anti-rust layers have limited protective effect. Corrosion tends to develop unevenly with time, and the grey model  $GM(1,1)$  can be used to predict the seawater corrosion of different zones in the South China Sea reef.

**KEY WORDS:** steel; reefs in the South China Sea; seawater environments; corrosion

收稿日期: 2020-04-07; 修订日期: 2020-04-17

Received: 2020-04-07; Revised: 2020-04-17

作者简介: 丁康康 (1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为材料腐蚀与防护。

Biography: DING Kang-kang (1990—), Male, Master, Engineer, Research focus: corrosion and protection of materials.

随着我国对于南海海洋资源的不断开发,对高强度海洋结构钢的需要不断增加。在工作条件下,除承受重力载荷外,还要考虑风浪<sup>[1-2]</sup>、海流<sup>[3]</sup>等全区带海水环境因素的影响,这就决定了结构钢在具备力学性能的前提下,还必须保证材料安全性,尤其是规避不同海水环境下腐蚀引发的结构失效风险。受南海海域高温、高盐、强风浪等恶劣环境因素的影响<sup>[4]</sup>,岛礁装备及基础设施在服役过程中腐蚀失效问题突出,据统计,其故障率是其他海域的3倍左右,严重影响了其服役性能和使用寿命,因此南海环境适应性研究已成为当前腐蚀研究的一个热点<sup>[5-7]</sup>。

E420作为一种低成本的高强度海洋结构钢,在海洋平台、码头、通讯塔等海洋工程设施中获得广泛应用<sup>[8-9]</sup>。针对其在应用中面临的多区带海水腐蚀的状况,在南海岛礁开展不同区带海水环境下的环境适应性试验,积累腐蚀老化数据,科学合理地评价其在岛礁环境中的腐蚀老化性能,可以为南海岛礁环境下装备及重要结构设施的设计选材、维修维护提供依据<sup>[10-11]</sup>。

由于长周期自然环境试验成本巨大,存在试样丢失风险<sup>[12]</sup>,因此,建立有针对性的材料南海岛礁腐蚀预测模型<sup>[13-14]</sup>,从已有的环境试验结果合理预测材料在南海岛礁海水环境中一定期间内的腐蚀行为和使

用寿命,对于指导新材料快速开发,推动南海岛礁建设及开发具有非常重要的意义。其中,灰色模型GM(1,1)在腐蚀预测领域获得了广泛应用,其本质是一种对原始数据作累加生成(或其他方法生成)得到有规律数据再进行建模的方法<sup>[9]</sup>。GM(1,1)的优点是不需要很多的数据,一般只需要4个数据就够,能解决历史数据少、序列的完整性及可靠性低的问题。因此,该方法非常适合岛礁环境下金属材料不同周期(0.5、1、1.5、2 a)腐蚀速率的预测<sup>[15-16]</sup>。

## 1 试验方法

试验材料为E420低合金钢,样品尺寸为200 mm×100 mm×3.8 mm,试样的长边垂直于板材轧制方向,具体化学成分见表1。试验地点选择南海某岛礁,海水年平均温度为29.1 °C,根据岛礁实际条件设计建立了飞溅、潮差和全浸多区带集成式海水环境试验装置。试验参照GBT 6384—2008《船舶及海洋工程用金属材料在天然环境中的海水腐蚀试验方法》进行,投放前进行去油处理,并对试样尺寸和质量进行精确测量和记录,用尼龙隔套固定在试验架上。试样垂直于海平面,试样投放0.5、1、1.5、2 a后分别进行回收,获取南海岛礁不同区带环境下的材料腐蚀数据。

表1 E420材料主要化学成分  
Tab.1 Main chemical composition of E420

C	Si	Mn	Ni	Cu	Cr	Co	Mo	Nb	%
0.10	0.35	1.52	0.65	0.24	0.085	0.074	0.055	0.026	

回收试样参照GB/T 16545—1996配制除锈液去除腐蚀产物,称量,计算腐蚀速率。采用GB/T 18590—2001中的测微计测量点蚀深度,借助于数码相机记录试样除锈前后形貌,采用3D显微镜选取代表性区域进行微观形貌观察。

基于获取的这些腐蚀数据,建立腐蚀速率灰色预测模型GM(1,1)。该模型通过对原始数据 $x^{(0)}$ 作累加生成有指数规律数据 $x^{(1)}$ 后,建立预测方程。其灰微分方程模型可以表示为 $x^{(0)}(k)+az^{(1)}(k)=b$ 。其中, $k$ 取值1,2,...,n; $z^{(1)}(k)$ 为数列 $x^{(1)}$ 的邻值生成数列,即 $z^{(1)}(k)=\alpha x^{(1)}(k)+(1-\alpha)x^{(1)}(k-1)$ ( $\alpha$ 取值0.5); $x^{(0)}(k)$ 称为灰导数, $a$ 称为发展系数, $z^{(1)}(k)$ 称为白化背景值, $b$ 称为灰作用量<sup>[17]</sup>。

引入矩阵向量记号:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \begin{bmatrix} a \\ b \\ x^{(0)}(2) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} \\ \mathbf{Y} &= \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & \cdots & 1 \\ \vdots & & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & \cdots & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & \cdots & 1 \\ \vdots & & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

于是GM(1,1)模型可表示为 $\mathbf{Y}=\mathbf{Bu}$ 。采用最小二乘法求解 $\mathbf{u}$ 后,对该函数(将时刻 $k=2,3,\dots,n$ 视为连续变量 $t$ )求导可算得 $x^{(0)}$ ,即腐蚀速率随时间演变的预测方程。

## 2 结果与讨论

### 2.1 腐蚀宏观形貌

在岛礁飞溅、潮差和全浸区带环境暴露0.5 a期E420试样除锈前后的宏观形貌,如图1所示。E420在岛礁飞溅区试样表面覆盖一层较厚红褐色锈蚀产物,结构硬而脆,与基体结合较弱,容易整体脱落。潮差和全浸区带E420试样腐蚀形貌较为接近,表面被大量絮状藻类和钙镁沉积物覆盖。锈蚀产物层呈现多层结构,顶部局部呈现出黄褐色凸起,结构疏松易脱落。锈蚀产物层内部表现为黑色锈蚀产物,与基体

结合相对紧密。除锈后, 可见飞溅区试样腐蚀最为严重, 表面呈凹凸不平的坑洼状态, 局部腐蚀坑深度极

大。潮差和全浸试样表面相对平整, 相较于飞溅区, 腐蚀坑尺寸有所减小。

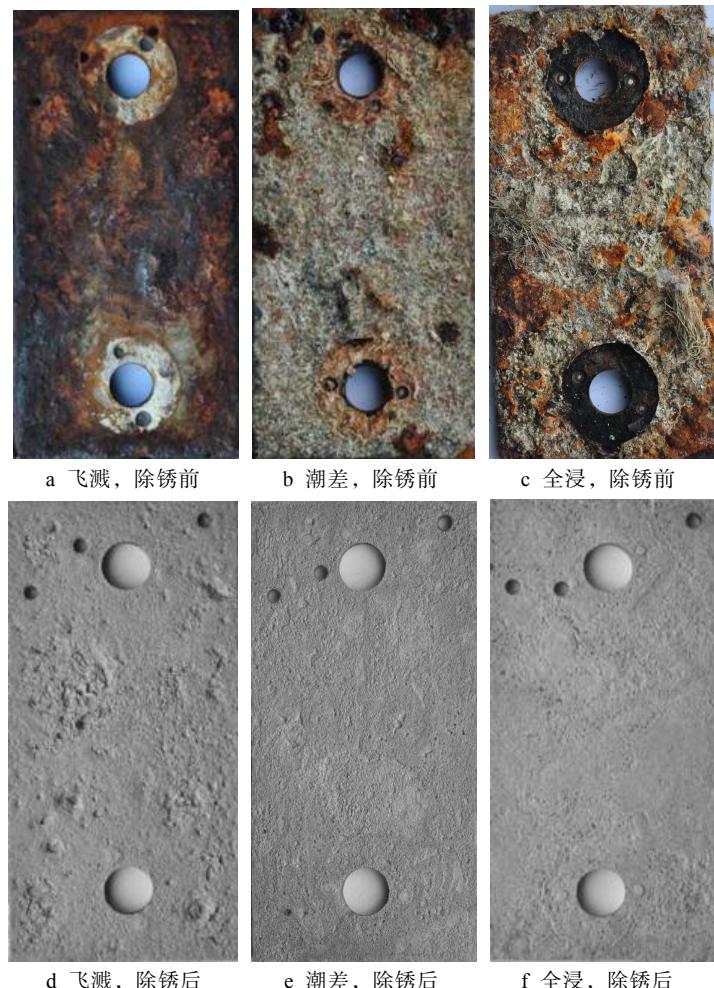


图 1 E420 岛礁不同区带 0.5 a 腐蚀宏观形貌

Fig.1 Macro-morphologies of E420 exposed in different seawater zones of the reef for 0.5a: a) splash zone, before derusting; b) tidal zone, before derusting; c) immersion zone, before derusting; d) splash zone, after derusting; e) tidal zone, after derusting; f) immersion zone, after derusting

E420 钢岛礁不同区带 0.5 a 除锈后的腐蚀微观形貌如图 2 所示。可以看出, 飞溅区试样腐蚀较为严重, 表面分布有大小不一的腐蚀坑洞, 个别腐蚀坑的直径和深度较大, 边界明显。潮差区试样腐蚀形貌与飞溅区较为接近, 但腐蚀坑的直径和深度均明显降低。全浸区试样则局部分布有较大的连续的

溃疡状坑洞, 可能为细小腐蚀坑发展聚合而成, 但深度较小, 与潮差差别不大。整体上, 与宏观形貌相对应, 进一步印证了飞溅区腐蚀最为严重, 且腐蚀发展不均匀程度较大。由潮差到全浸, 腐蚀形貌倾向于由密集腐蚀坑发展成溃疡状, 表面粗糙度有所下降。

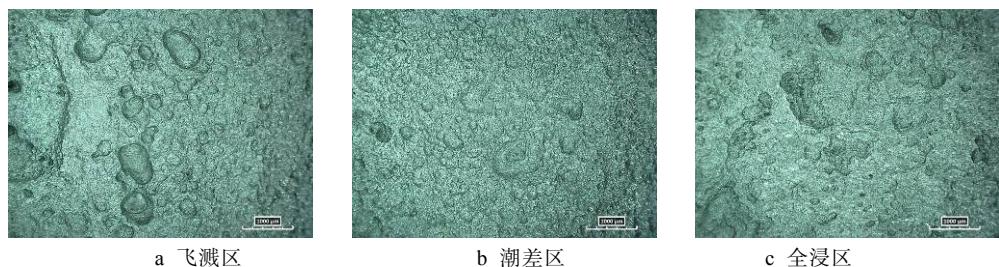


图 2 E420 岛礁不同区带 0.5 a 腐蚀微观形貌

Fig.2 Micro-morphologies of E420 exposed in different seawater zones of the reef for 0.5a: a) splash zone; b) tidal zone; c) full immersion zone

在岛礁飞溅、潮差和全浸区带环境暴露 1、1.5、2 a 期 E420 试样除锈后的宏观形貌（全浸 2 a 试样缺失）如图 3 所示。E420 在岛礁飞溅区试样随试验周期延长，腐蚀厚度迅速减薄，到 2 a 期时，试样局部发生了腐蚀穿孔，边沿腐蚀尤为严重。潮差区试样暴露 2 a 后仍较为完整，表面腐蚀坑深度随时间明显增

加，局部腐蚀坑发展连接成一片，形成浅盘状。全浸区试样随时间推移，局部也生成较大的腐蚀坑洞，但其他部位较为平整，与飞溅和潮差区带试样密布的点蚀坑形貌差别较大。整体上，随试验周期延长，E420 试样不同区带腐蚀形貌虽然存在差别，但腐蚀更倾向于不均匀发展，表面起伏度增大。

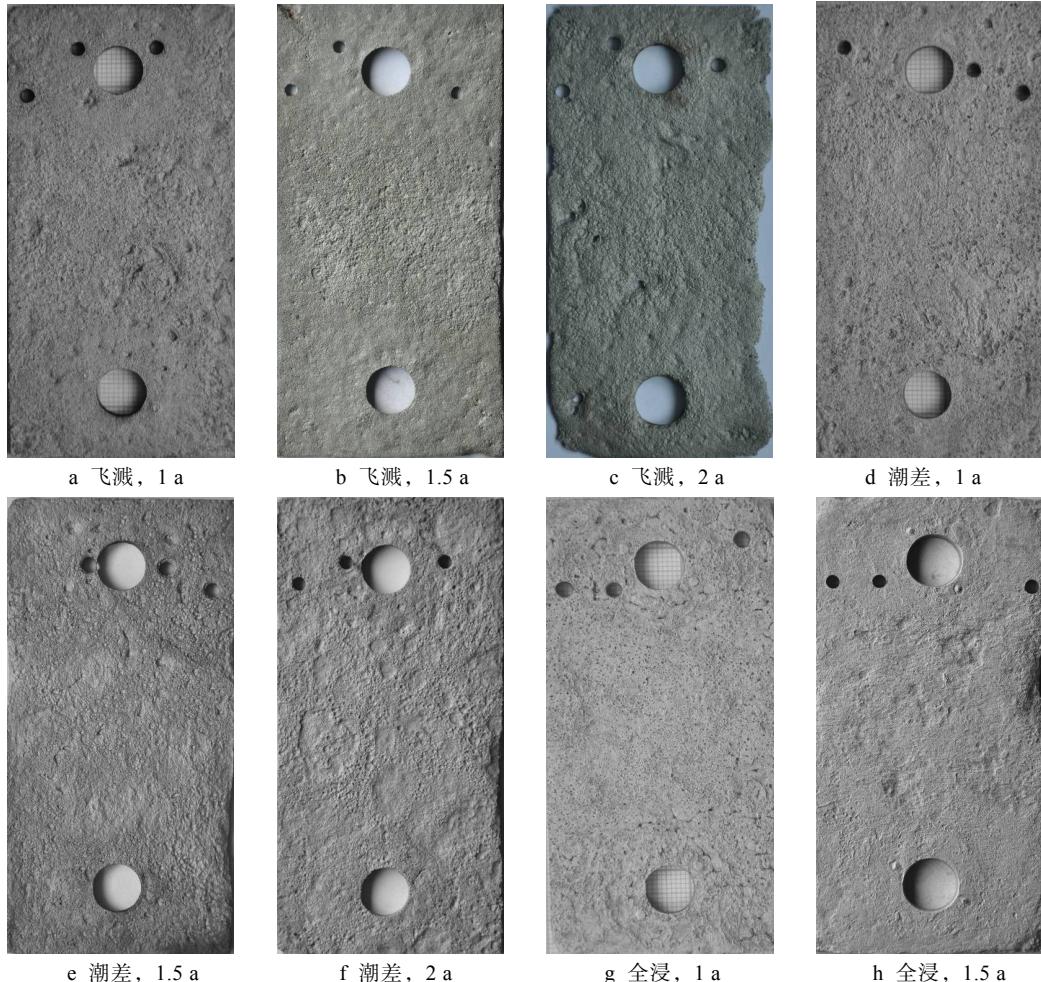


图 3 E420 岛礁海水区带暴露不同周期腐蚀宏观形貌

Fig.3 Macro-morphologies of E420 exposed for different periods in different seawater zones of the reef:  
a) splash zone, 1 a; b) splash zone, 1.5 a; c) splash zone, 2 a; d) tidal zone, 1 a; e) tidal zone, 1.5 a;  
f) tidal zone, 2 a; g) full immersion zone, 1 a; h) full immersion zone, 1.5 a

## 2.2 腐蚀动力学分析

岛礁飞溅、潮差和全浸区带暴露不同周期的 E420 试样腐蚀速率和点蚀深度数据（飞溅 2 a 试样穿孔）如图 4 所示。由图 4a 可以看出，E420 在岛礁各区带腐蚀规律基本一致，随时间的增长，腐蚀速率呈下降趋势，表明腐蚀产物对基体具有一定的保护作用，抑制了后续腐蚀进程。到 2 a 时，飞溅腐蚀速率略有回升，且远大于其他区带，反映了飞溅锈层对基体防护作用相对较弱。整体上，从腐蚀速率角度，腐蚀程度排序为：飞溅>潮差>全浸。由图 4b—c 可知，飞溅区点蚀深度始终维持在较高水平，

到 2 a 时，甚至发生了穿孔。潮差和全浸区带则随时间推移，呈增大趋势，最大点蚀深度均超过了 1 mm，需防范局部穿孔失效风险。一般情况下，钢在飞溅、潮差和全浸区 1 年的腐蚀速率分别为 0.3~0.5 mm/a、0.1~0.37 mm/a 和 0.13~0.25 mm/a<sup>[18-19]</sup>；而 E420 在岛礁对应区带一年的腐蚀速率分别为 0.729 mm/a、0.358 mm/a 和 0.286 mm/a，整体上大于上述数值，尤其是飞溅区带环境。这反映了岛礁腐蚀环境相比大部分海域更为恶劣，E420 钢乃至其他低合金钢材料在岛礁上应用，必须采取合适的防护措施，同时考虑环境的苛刻性，设计更大的腐蚀裕量。

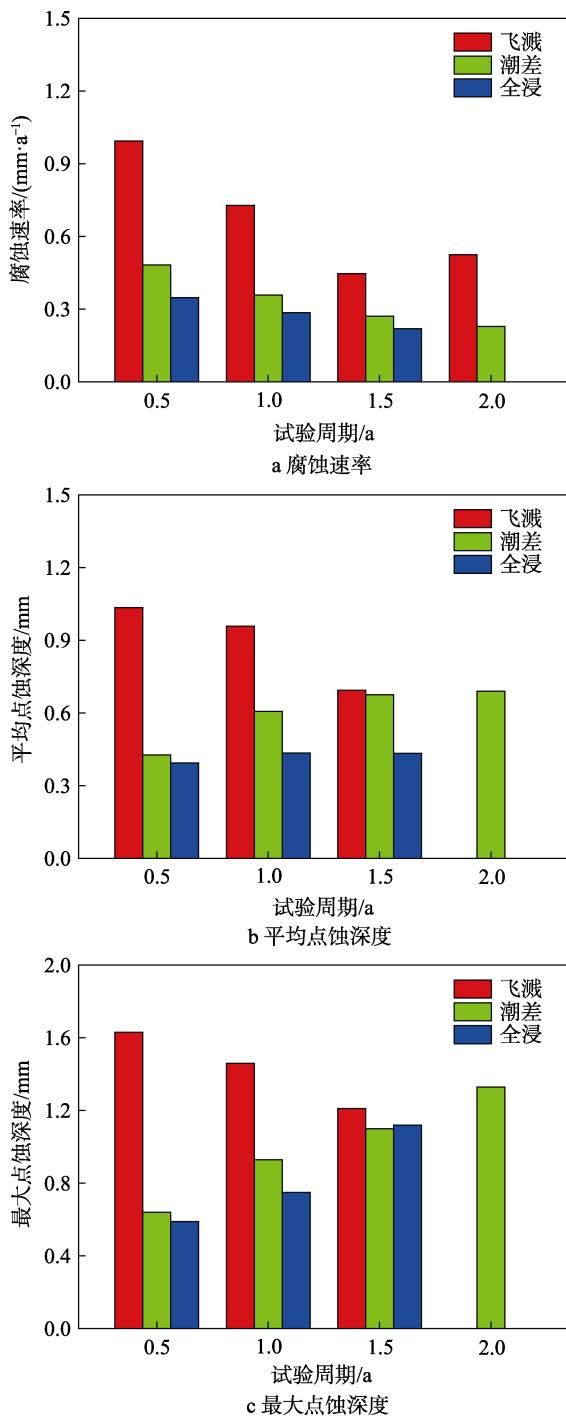


图 4 E420 不同区带环境腐蚀速率与平均、最大点蚀深度数据

Fig.4 Histograms of corrosion rates (a), average pitting depths (b) and maximum pitting depths (c) for E420 exposed in different seawater zones

## 2.3 腐蚀速率灰色预测模型建立

### 2.3.1 潮差区带腐蚀速率灰色预测模型

选取该岛礁潮差区带 E420 钢试样暴露 0.5、1、1.5、2 a 腐蚀速率数据 (单位 mm/a) 为原始数列, 建立腐蚀速率灰色预测模型  $GM(1,1)$ 。令  $x^{(0)}(k)$  等于各个周期 E420 钢的腐蚀速率值, 其中  $k=1, 2, 3, 4$ ,

分别对应 0.5、1、1.5、2 a, 即得原始数列  $x^{(0)}=(0.483, 0.358, 0.270, 0.229)$ 。

1) 级比判断。计算数列的级比  $\lambda(k)=(1.349, 1.326, 1.179)$ , 落在可容覆盖区间  $(e^{-2/(n+1)}, e^{2/(n+1)})^{[20]}$ , 即  $(0.670, 1.492)$  之内, 可以建立  $GM(1,1)$  灰色预测模型。

2) 构建累加数列。对原始数列  $x^{(0)}$  作一次累加, 即  $x^{(1)}=(0.584, 0.841, 1.111, 1.340)$

3) 构造数据矩阵  $B$  及数据向量  $Y$ 。 $GM(1,1)$  模型  $Y=Bu$ , 数据矩阵  $B$  及数据向量  $Y$  代入实际值可得:

$$\begin{aligned} B &= \begin{bmatrix} -0.662 & 1 \\ -0.976 & 1 \\ -1.226 & 1 \\ 0.358 \end{bmatrix} \\ Y &= \begin{bmatrix} 0.270 \\ 0.229 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

4) 计算  $u$ 。求解  $a$  和  $b$  的值, 采用一元线性回归, 即最小二乘法获得它们的估计值<sup>[21]</sup>。

$$u = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y = \begin{bmatrix} 0.2311 \\ 0.5063 \end{bmatrix}$$

5) 建立模型。对于  $GM(1,1)$  的灰微分方程, 如果将时刻  $k=2, 3, \dots, n$  视为连续变量  $t$ , 则之前的  $x^{(1)}$  视为时间  $t$  的函数, 于是灰导数  $x^{(0)}(k)$  变为连续函数的导数  $dx^{(1)}(t)/dt$ , 白化背景值  $z^{(1)}(k)$  对应于导数  $x^{(1)}(t)$ 。于是  $GM(1,1)$  的灰微分方程对应的白微分方程为:

$$dx^{(1)}(t)/dt + 0.2311x^{(1)}(t) = 0.5063$$

求解得:

$$x^{(1)}(k+1) = (x^{(0)}(1) - b/a)e^{-ak} + b/a = -1.708e^{-0.2311k} + 2.191$$

6) 生成模型还原值  $x^{(0)}(k+1)$ 。由上面的时间响应函数求导可算得  $x^{(0)}$ , 即腐蚀速率预测模型:

$$x^{(0)}(k+1) = 0.444e^{-0.2311k}$$

取  $k=1, 2, 3, 4$ , 最终得  $x^{(0)}(1)=(0.483, 0.352, 0.279, 0.222)$ , 此即 E420 钢试样琛航潮差区暴露 0.5、1、1.5、2 a 后腐蚀速率的预测值。

7) 模型检验。计算 E420 钢试样琛航潮差区暴露 0.5、1、1.5、2 a 后腐蚀速率实测值与预测值的残差与相对误差, 依次检验模型精度。由表 2 可知, 相对误差整体上低于 10%, 精度较高。

表 2 E420 钢琛航潮差区腐蚀速率灰色预测模型  
 $GM(1,1)$  精度检验表

Tab.2 Precision inspection of grey prediction model  $GM(1,1)$  for corrosion rates of E420 in the tidal zone in Chenhang Island

暴露时间/a	原始值/ $(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	预测值/ $(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	残差/ $(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	相对误差/%
0.5	0.483	0.444	0.0390	8.08
1	0.358	0.352	0.0057	1.58
1.5	0.270	0.280	-0.0096	-3.57
2	0.229	0.222	0.0071	3.08

### 2.3.2 飞溅和全浸区带腐蚀速率灰色预测模型

参考潮差区带, 对 E420 钢在南海岛礁飞溅和全浸区暴露不同周期后腐蚀速率数据进行建模, 获得的灰色预测模型  $GM(1,1)$  分别为:  $x^{(0)}(k+1)=0.8368e^{-0.2044k}$ ,  $x^{(1)}(k+1)=0.371e^{-0.2653k}$ 。模型精度检验结果见表 3 和表 4。整体上, 不同区带 E420 钢腐蚀速率实测值与预测值相对误差低于 25%, 飞溅区带预测精度略低, 潮差和全浸预测精度较高。

表 3 E420 钢岛礁飞溅区腐蚀速率灰色预测模型  
 $GM(1,1)$ 精度检验

Tab.3 Precision inspection of grey prediction model  $GM(1,1)$  for corrosion rates of E420 steel in the splash zone of the reef

暴露时间/a	原始值/ $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$	预测值/ $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$	残差/ $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$	相对误差/%
0.5	0.994	0.837	0.1572	15.81
1	0.729	0.682	0.0469	6.43
1.5	0.450	0.556	-0.1060	-23.56
2	0.520	0.453	0.0667	12.84

表 4 E420 钢岛礁全浸区腐蚀速率灰色预测模型  
 $GM(1,1)$ 精度检验

Tab.4 Precision inspection of grey prediction model  $GM(1,1)$  for corrosion rates of E420 steel in the full immersion zone of the reef

暴露时间/a	原始值/ $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$	预测值/ $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$	残差/ $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$	相对误差/%
0.5	0.348	0.371	-0.0230	-6.61
1	0.286	0.284	0.0015	0.51
1.5	0.219	0.218	0.0008	0.36

## 3 结论

1) E420 钢在南海岛礁飞溅、潮差和全浸区都腐蚀严重。随暴露周期延长, E420 腐蚀速率呈下降趋势, 腐蚀倾向于不均匀发展。其中, 飞溅区腐蚀程度最为严重, 到 2 a 时已发生穿孔, 潮差腐蚀次之, 全浸最轻。

2) 以南海岛礁不同海水区带暴露 0.5、1、1.5、2 a 的 E420 钢腐蚀速率数据为基础, 分别建立了其腐蚀速率灰色预测模型  $GM(1,1)$ , 并对模型精度进行了检验。结果表明, E420 钢在各区带的灰色预测模型  $GM(1,1)$  腐蚀速率预测值与实测值相对误差低于 25%, 飞溅区带预测精度略低, 潮差和全浸预测精度较高。

## 参考文献:

- [1] ZHU Xiang-rong, HUANG Gui-qiao, LIANG Cai-feng. Study on the Corrosion Peak of Carbon Steel in Marine

- Splash Zone[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1997, 15(4): 378-380.
- [2] 丁康康, 郭为民, 张彭辉, 等. 几种典型金属材料西沙海洋飞溅区腐蚀行为规律研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(2): 51-57.  
DING Kang-kang, GUO Wei-min, ZHANG Peng-hui, et al. Corrosion Behavior of Typical Metal Materials in Xisha Marine Splash Zone[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(2): 51-57.
- [3] 罗小兵, 钱江, 苏航, 等. 海水流速对典型金属管材腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(6): 555-559.  
LUO Xiao-bing, QIAN Jiang, SU Hang, et al. Effect of Flow Velocity on Corrosion Behavior of Typical Metal Materials for Pipes in Seawater[J]. Corrosion and Protection, 2015, 36(6): 555-559.
- [4] 李颖虹, 黄小平, 岳维忠. 西沙永兴岛环境质量状况及管理对策[J]. 海洋环境科学, 2004, 23(1): 50-53.  
LI Ying-hong, HUANG Xiao-ping, YUE Wei-zhong. Environmental Quality and Management Measures in Yongxing Island of Xisha, South China Sea[J]. Marine Environmental Science, 2004, 23(1): 50-53.
- [5] 赵朋飞, 苏晓庆, 吴俊升. 典型岛礁大气环境室内加速腐蚀试验谱研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(12): 14-21.  
ZHAO Peng-fei, SU Xiao-qing, WU Jun-sheng. Accelerated Corrosion Test Spectrum of Typical Reef Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(12): 14-21.
- [6] MA Y, LI Y, WANG F. The Atmospheric Corrosion Kinetics of Low Carbon Steel in a Tropical Marine Environment[J]. Corrosion Science, 2010, 52(5): 1796-1800.
- [7] CUI Zhong-yu, LI Xiao-gang, MAN Cheng, et al. Corrosion Behavior of Field-Exposed 7A04 Aluminum Alloy in the Xisha Tropical Marine Atmosphere[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24(8): 2885-2897.
- [8] 李鑫磊, 狄国标, 杨春卫, 等. 低成本海洋平台用钢 E420 的研制与开发[J]. 钢铁研究, 2012, 40(5): 19-21.  
LI Xin-lei, DI Guo-biao, YANG Chun-wei, et al. Study and Development of Low-cost E420 Offshore Platform Steel[J]. Research on Iron and Steel, 2012, 40(5): 19-21.
- [9] 杨瑞成, 王彬, 张天云. 基于 MATLAB 的灰色算法对 304 不锈钢腐蚀行为的预测[J]. 兰州理工大学学报, 2009, 35(2): 5-8.  
YANG Rui-cheng, WANG Bin, ZHANG Tian-yun. Prediction of Corrosive Behavior of Stainless Steel 304 by Using Grey Algorithm and MATLAB[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2009, 35(2): 5-8.
- [10] 丁康康, 逢昆, 顾良华, 等. 几种典型金属材料西沙海洋全浸区腐蚀行为规律研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(4): 73-79.  
DING Kang-kang, PANG Kun, GU Liang-hua, et al.

- Corrosion Behavior of Typical Metal Materials in Xisha Marine Immersion Zone[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(4): 73-79.
- [11] 李长虹, 苏少燕. 金属材料在西沙的腐蚀速率与腐蚀等级[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2013, 31(a1): 11-14.  
LI Chang-hong, SU Shao-yan. Corrosion Speed and Level of Metal Material in Xisha Natural Environment[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2013, 31(a1): 11-14.
- [12] 林臻, 李国璋, 白鸿柏, 等. 金属材料海洋环境腐蚀试验方法研究进展[J]. 新技术新工艺, 2013(8): 74-80.  
LIN Zhen, LI Guo-zhang, BAI Hong-bai, et al. Review of Research on Experimental Methods for Marine Environmental Corrosion of Metal Materials[J]. New Technology & New Process 2013(8): 74-80.
- [13] 刘威, 赵选民, 邓春龙, 等. 灰色神经网络模型在海水腐蚀预测中的应用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2008, 28(4): 11-14.  
LIU Wei, ZHAO Xuan-min, DENG Chun-long, et al. Grey Neural Network and Its Application to Forecasting Ocean-water Corrosion[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2008, 28(4): 11-14.
- [14] LI S X , AKID R . Corrosion fatigue life prediction of a steel shaft material in seawater[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 34(8): 324-334.
- [15] 牟献良, 田月娥, 汪学华. 碳钢和低合金钢模拟加速试验与大气腐蚀试验的相关性[J]. 环境技术, 2001(4): 14-17.  
MU Xian-liang, TIAN Yue-e, WANG Xue-hua. The Relativity of the Simulated Accelerated Test of Carbon Steel and Low Alloy Steel and Atmospheric Corrosion Test[J]. Environmental Technology, 2001(4): 14-17.
- [16] XING S B , LI L, WANG X M. Research of Accelerated Corrosion Test Method of 7A04 Aluminium Alloy in Xisha Atmospheric Environment[J]. Advanced Materials Research, 2013, 850-851: 111-114.
- [17] 刘建华, 郝雪龙, 李松梅, 等. 基于灰色理论的高强铝合金应力腐蚀开裂预测模型的建立与应用[J]. 材料工程, 2011(3): 64-68.  
LIU Jian-hua, HAO Xue-long, LI Song-mei, et al. Stress Corrosion Cracking Model Based on Experiment and Gray Theory for High Strength Aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2011(3): 64-68.
- [18] 邵怀启, 韩文礼, 王雪莹, 等. 海洋飞溅区钢结构的腐蚀规律与防护措施[J]. 腐蚀与防护, 2008, 29(11): 646-649.  
SHAO Huai-qi, HAN Wen-li, WANG Xue-ying, et al. Corrosion and Protection of offshore Steel Structures in Splash Zone[J]. Corrosion and Protection, 2008, 29(11): 646-649.
- [19] 侯保荣. 海洋环境下钢结构物浪花飞溅区的腐蚀灾害 [J]. 科学中国人, 2006(11): 21-22.  
HOU Bao-rong. Corrosion disaster of steel structures in the splash zone under marine environment[J]. Scientific Chinese, 2006(11): 21-22.
- [20] 陈根霞, 刘皓升. 灰色模型对舟山市国内生产总值的研究和预测 [J]. 昆明民族干部学院学报, 2016(4): 73-75.  
CHEN Gen-xia, LIU Hao-sheng. Research and forecast for GDP of Zhoushan applying grey model[J]. Journal of Kunming National Cadres Academy, 2016(4): 73-75.
- [21] 刘成臣, 徐胜, 王浩伟, 等. 基于灰色模型和神经网络的铝合金腐蚀预测对比[J]. 装备环境工程, 2013, 13 (3): 1-4, 31.  
LIU Cheng-chen, XU Sheng, WANG Hao-wei, et al. Comparative Study of Prediction Models of Aluminum Alloys Based on Gray Model and Artificial Neural Network[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 13 (3): 1-4, 31.