

基于元胞自动机的耐候钢腐蚀演化及力化耦合机制研究

曾 淳

湘潭大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年4月27日; 录用日期: 2026年5月19日; 发布日期: 2026年5月29日

摘 要

腐蚀对南海等严苛海洋大气环境中耐候钢结构的耐久性构成重大威胁, 同时受机械应力作用下, 局部腐蚀对基础结构的完整性造成了重大挑战。传统方法难以描述点蚀演化及力学作用的影响, 该文基于元胞自动机方法, 建立腐蚀演化模型, 引入有限元模型, 构建了力化耦合数值模型。通过Gutman机制将应力应变数据引入腐蚀反应概率, 实现应力对腐蚀行为的调控。结果表明: 在应力作用下, 蚀坑形貌由规则对称逐渐向不规则、深窄发展, 最大腐蚀深度随应力增大显著增加。当应力接近材料屈服强度时, 最大腐蚀深度提高约55.6%。

关键词

耐候钢, 元胞自动机模型, 局部腐蚀, 遗传算法, 力化耦合

Study on Corrosion Evolution and Chemo-Mechanical Coupling of Weathering Steel Based on Cellular Automata

Chun Zeng

School of Civil Engineering, Xiangtan University, Xiangtan Hunan

Received: April 27, 2026; accepted: May 19, 2026; published: May 29, 2026

Abstract

Corrosion poses a major threat to the durability of weathering steel structures in harsh marine

atmospheric environments such as the South China Sea. At the same time, under the action of mechanical stress, localized corrosion poses a major challenge to the integrity of the foundation structure. The traditional method is difficult to describe the evolution of pitting corrosion and the influence of mechanical action. In this paper, based on the cellular automata method, the corrosion evolution model is established, and the finite element model is introduced to construct the mechanical coupling numerical model. Through the Gutman mechanism, the stress-strain data are introduced into the corrosion reaction probability to realize the regulation of stress on the corrosion behavior. The results show that under the action of stress, the morphology of the corrosion pit gradually develops from regular symmetry to irregular and deep narrow, and the maximum corrosion depth increases significantly with the increase of stress. When the stress is close to the yield strength of the material, the maximum corrosion depth is increased by about 55.6%.

Keywords

Weathering Steel, Cellular Automata Model, Local Corrosion, Genetic Algorithm, Chemo-Mechanical Coupling

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

腐蚀是一种普遍存在于工业与自然环境中的金属材料劣化现象,对工程结构的安全性和使用寿命造成严重威胁[1]。特别是局部腐蚀(如点蚀),由于其形貌复杂、发展迅速且具有高度随机性,传统单一实验手段往往难以及时捕捉瞬态腐蚀动力学过程,而单纯的数值模拟又缺乏实际环境验证[2][3]。我国南海地区属于典型的海洋性气候环境,具有高温、高湿、高盐雾、强辐射等多重腐蚀加速因素[4][5]。而该区域广泛分布着港口设施、海岸建筑、船舶平台以及风电桩基等关键基础设施,其服役寿命直接受到严苛海洋大气腐蚀的影响[6]。据长期暴露试验和实地监测结果显示,南海沿岸的年平均腐蚀速率远高于内陆和其他海区,局部腐蚀尤为显著[7]。这给该地区基础设施的腐蚀研究带来了双重挑战:一方面,传统的长期暴露试验(通常需要5年以上)难以满足工程实践的时效性需求;另一方面,常规加速试验由于过度简化环境因素,往往无法准确反映实际腐蚀机理。因此,建立能够充分考虑多物理场耦合作用并精确预测腐蚀形貌演化过程与速率规律的数值模拟方法,对于实现材料服役性能的准确评估和工程结构的耐久性设计具有重要的科学意义和工程价值。

目前,有限元法(FEM)、相场法等传统数值方法已被广泛应用于腐蚀过程模拟[3]。然而,这些基于连续场的建模方法在处理高度局部化、非线性且多机制耦合的腐蚀行为时存在一定局限。元胞自动机(Cellular Automaton, CA)是一种基于规则的离散动力学模型,近年来被广泛应用于金属腐蚀过程的模拟[8]。早期如 Taleb 等[9]提出了二维均匀腐蚀 CA 模型,随后 Weeën 等[10]将该方法扩展至点蚀萌生与发展模拟,强调了缺陷位置与 Cl⁻分布对腐蚀坑形成的影响。Perez-Brokate 等[11]通过引入电化学参数与反应条件,对不锈钢的局部腐蚀形貌进行了建模。此外,应力辅助局部腐蚀是工程结构失效的关键诱因,其模拟需兼顾电化学与力学耦合效应。传统经验模型难以捕捉多尺度耦合过程。Wang 和 Han [12]构建了 CA-FEM 跨尺度耦合模型,揭示应力通过提升局部阳极电流密度,促使蚀坑形貌从椭球状向深窄蚀坑演化,显著加速亚稳态向稳定腐蚀的转变。Fatoba 等[13]采用 CA 和 FEM 模拟了 X65 管线钢腐蚀损伤过程,发现塑性应变是应力加速腐蚀的主导因素,溶液流动通过降低腐蚀产物沉积系数使蚀坑深度增长率

提升了 46%。

然而，现有研究多集中于二维模型或未考虑力学因素的影响，对于三维点蚀演化及其与应力场的耦合作用研究仍相对不足。因此有必要建立一种“腐蚀性元胞扩散 - 金属转化 - 离子迁移 - 氧化水解沉积 - 应力场耦合”的三维元胞自动机模型。

2. 模型构建

2.1. 三维元胞自动机模型

在本研究所采用元胞自动机模型中，为了重点研究大气点蚀过程的模拟，并且选择了简化电化学反应过程，非水合形式的腐蚀产物，如 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 被排除在外， FeOOH 型腐蚀产物也不考虑在内，模拟的过程中仅考虑 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 这两种腐蚀产物[13]，因此简化之后的电化学反应由以下反应方程式表示：



本模型采用三维元胞空间，基于冯·诺依曼 6 邻域规则进行相互作用。模型由 $80 \times 80 \times 80$ 的网格构成，边界条件设置为：上下表面为固定边界，前后左右表面为周期性边界，以模拟开放大气环境下的腐蚀过程[14]。元胞空间中包含七种不同类型的单元，具体说明示于表 1 中。依据排他原则，每个位置同时仅能被一种元胞占据。如下图 1 三维元胞自动机整体模型所示，模型上半部分为电解质区域，其中腐蚀性元胞 C 随机分布；下半部分为 Q420NS 耐候钢基体。初始电解质浓度 c 定义为腐蚀性元胞数与腐蚀性元胞及水溶液元胞总数之比，即 $C/(C+W)$ 。

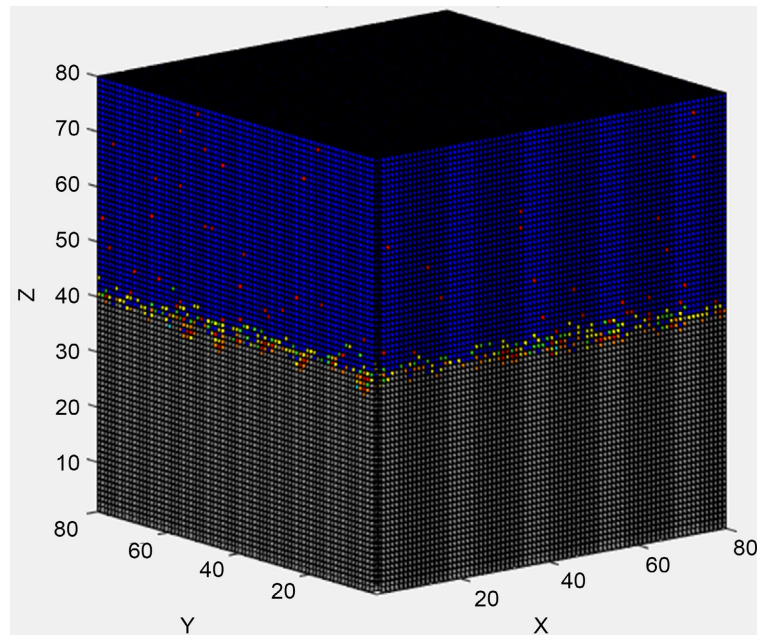


Figure 1. Three-dimensional cellular automata model

图 1. 三维元胞自动机模型

Table 1. Types of cells in cellular automata model
表 1. 元胞自动机模型各元胞的类型

元胞种类	代表类型	自由运动
W	水溶液元胞	是
C	腐蚀性元胞	是
M	金属基体元胞	否
R	活性金属离子元胞 I	是
D	活性金属离子元胞 II	是
P₁	腐蚀产物元胞 I	是
P₂	腐蚀产物元胞 II	是

2.2. 腐蚀演化和扩散规律

根据上述电化学反应式(1)~(4),经过简化后可分别表示为 $M \rightarrow R$, $R \rightarrow D$, $R + 2W \rightarrow P_1 + 2C$, $D + 3W \rightarrow P_2 + 3C$ 。具体腐蚀演化规则和扩散规则如下:

(1) 当腐蚀性元胞 C 遇到金属基体元胞 M 时,以 P_{corr} 的腐蚀概率发生反应,金属基体元胞 M 被腐蚀为 Fe^{2+} 金属离子元胞 R,原位置的 M 将被 R 取代。

(2) 当 Fe^{2+} 金属离子元胞 R 遇到腐蚀性元胞 C 时, Fe^{2+} 金属离子元胞 R 被氧化为 Fe^{3+} 金属离子元胞 D,氧化概率为 P_{ox} ,原位置的 R 被 D 取代。

(3) 当 Fe^{2+} 金属离子元胞 R 周围邻域存在两个水溶液元胞 W 时,被水解成腐蚀产物元胞 $Fe(OH)_2P_1$,水解概率为 P_{Hyd1} ,原位置的 Fe^{2+} 金属离子元胞和两个水溶液元胞分别被 P_1 和两个腐蚀性元胞取代。

(4) 当 Fe^{3+} 金属离子元胞 D 周围邻域存在三个水溶液元胞 W 时,被水解成腐蚀产物元胞 $Fe(OH)_3P_2$,水解概率为 P_{Hyd2} ,原位的 D 和三个 W 分别被 P_2 和三个腐蚀性元胞 C 取代。

(5) 如果金属基体元胞 M 的邻居为腐蚀性元胞 C,但腐蚀性元胞 C 移动的方向不朝向金属基体元胞 M 时,金属基体元胞 M 的状态保持不变。

(6) 如果腐蚀性元胞 C 移动的目标格位为水溶液元胞 W,并且在这一时间步长内目标格位的其他邻居元胞中没有其他腐蚀性元胞 C 视其为目标格位,则该腐蚀性元胞 C 在这一时间步长内向目标格位移动。

(7) 如果 Fe^{2+} 金属离子元胞 R 移动的目标格位为水溶液元胞 W,并且在这一时间步长内 R 元胞周围六邻域不存在腐蚀性元胞 C,则该 Fe^{2+} 金属离子元胞 R 在这一时间步长内向目标格位移动。

(8) 如果 Fe^{3+} 金属离子元胞 D 移动的目标格位为水溶液元胞 W,并且在这一时间步长内 D 元胞周围六邻域不存在腐蚀性元胞 C,则该 Fe^{3+} 金属离子元胞 D 在这一时间步长内向目标格位移动。

(9) 如果腐蚀性元胞 C 移动的目标格位为腐蚀产物元胞 P_2 ,则腐蚀性元胞 C 在这一时间步长内放弃移动,不发生反应或者变换。

(10) 如果腐蚀产物元胞 P_2 位于腐蚀性元胞 C 的上方,则腐蚀产物元胞 P_2 会由于重力作用向下沉淀,替代腐蚀性元胞 C 的位置,并沉积在金属基体元胞 M 顶部。

(11) 如果腐蚀产物元胞 P_2 位于金属基体元胞 M 的上方,则位置保持不变。

(12) 如果腐蚀产物元胞 P_2 位于溶液元胞 W 的上方,则腐蚀产物元胞 P_2 会由于重力作用向下沉淀,替代该水溶液元胞 W 的位置,沉积在金属基体顶部。

鉴于三维元胞自动机模型中的腐蚀过程依赖于反应概率参数的设定，若参数选择不当，将影响模拟效果。为此，引入遗传算法对模型中的初始参数进行连续优化，优化过程使用的主程序和适应度函数分别示于(5)和(6)式。

$$[x, favl] = ga(@fitness, nvars, option) \quad (5)$$

$$fitness = \left\{ \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [d_{sim}(t_i) - d_{exp}(t_i)]^2} \right\}^{-1} \quad (6)$$

式中， x 表示所获得的最优设计变量组合， $favl$ 为该参数组合对应的最小适应度函数值， $nvars$ 表示优化问题中的自变量数量， $option$ 为包含优化控制策略的结构体变量， $fitness$ 为实验数据与模拟数据的偏差量化指标。此外， N 为实验数据点数， $d_{sim}(t_i)$ 和 $d_{exp}(t_i)$ 分别为模拟与试验在第 i 个时间点对应的平均腐蚀深度。

表 2 为耐候钢 Q420NS 的室内盐雾加速试验获得的平均腐蚀深度数据，采用遗传算法对目标参数进行优化，得到的最优参数组总结在表 3 中。

Table 2. Test results of Q420NS weathering steel

表 2. Q420NS 耐候钢试验结果

标本编号	Q420NS-1	Q420NS-2	Q420NS-3	Q420NS-4
质量损失率(g/cm ²)	0.00268	0.01088	0.02412	0.03443
腐蚀率(mm/y)	0.64234	1.27007	1.40633	1.0073
平均腐蚀深度(mm)	0.003414	0.01386	0.030726	0.04386
腐蚀时间(h)	48	96	192	384

Table 3. Using genetic algorithm to optimize the initial parameters of three-dimensional cellular automata

表 3. 用遗传算法优化三维元胞自动机的初始参数

参数	数值
c	0.3004
P_cor	0.0824
P_ox	0.4990
P_Hyd1	0.0569
P_Hyd2	0.3422
s_t	1.2241 h/step
Cell_size	0.0467 mm

2.3. 点蚀模型构建

在均匀腐蚀模型基础上，引入表面钝化层及其局部失效机制，以模拟点蚀的萌生与发展过程。通过在局部区域降低钝化保护能力或提高腐蚀概率，触发点蚀初始缺陷。点蚀发展过程中，腐蚀反应优先在缺陷区域发生，并逐渐形成具有一定深度和宽度的蚀坑结构。

2.4. 力化耦合模型

为实现腐蚀模型与应力场的动态耦合，腐蚀概率的动态修正基于 Gutmann [15] [16]提出的模型，构建了考虑弹性与塑性变形下阳极溶解行为的动力学计算公式。具体来说，当材料处于弹性变形阶段时，

阳极溶解过程遵循式(7); 而在发生塑性变形时, 则采用式(8)描述其溶解动力学。

$$\frac{I}{I_n} = \exp\left(\frac{\Delta PV_m}{RT}\right) \tag{7}$$

$$\frac{I}{I_n} = \left(\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_0} + 1\right) \exp\left(\frac{\sigma_m V_m}{RT}\right) \tag{8}$$

进而修正局部腐蚀概率为:

$$P_a = \frac{I}{I_n} P_{corr} \tag{9}$$

式中, I 表示受力条件下的阳极电流, I_n 表示无应力作用下的阳极电流, I/I_n 代表阳极电流密度的相对变化; ΔP 为静水压力, V_m 为金属的摩尔体积, $\Delta\varepsilon$ 表示等效塑性应变, ε_0 为材料开始发生应变硬化时的应变, σ_m 为流体静应力, R 为气体常数, T 为温度。本模型将仿真模拟温度设定为 27°C , 对应 $T = 300\text{ K}$, 气体常数取 $R = 8.314\text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 金属摩尔体积 $V_m = 7.134 \times 10^{-6}\text{ m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$ 。塑性应变设定为材料总塑性变形的 2%, 此时 ε_0 取值为 0.00379。

使用 Matlab 将 CA 模型与有限元模型(ABAQUS 软件)进行关联, CA 有限元模型如图 2 所示, 通过在模型每 10 个演化步后, 自动导出当前结构体素模型至有限元中进行应力场求解, 在试样左侧施加固定约束, 右侧施加恒拉应力, 获得 Von Mises 应力与等效应变数据, 使用 Python 输出与每个元素相关的质心点的应力与等效应变数据, 随后, 通过 MATLAB 中构建的坐标映射与插值算法, 将应力/应变数据重新映射到元胞自动机网格上, 实现应力/应变场与腐蚀演化耦合。

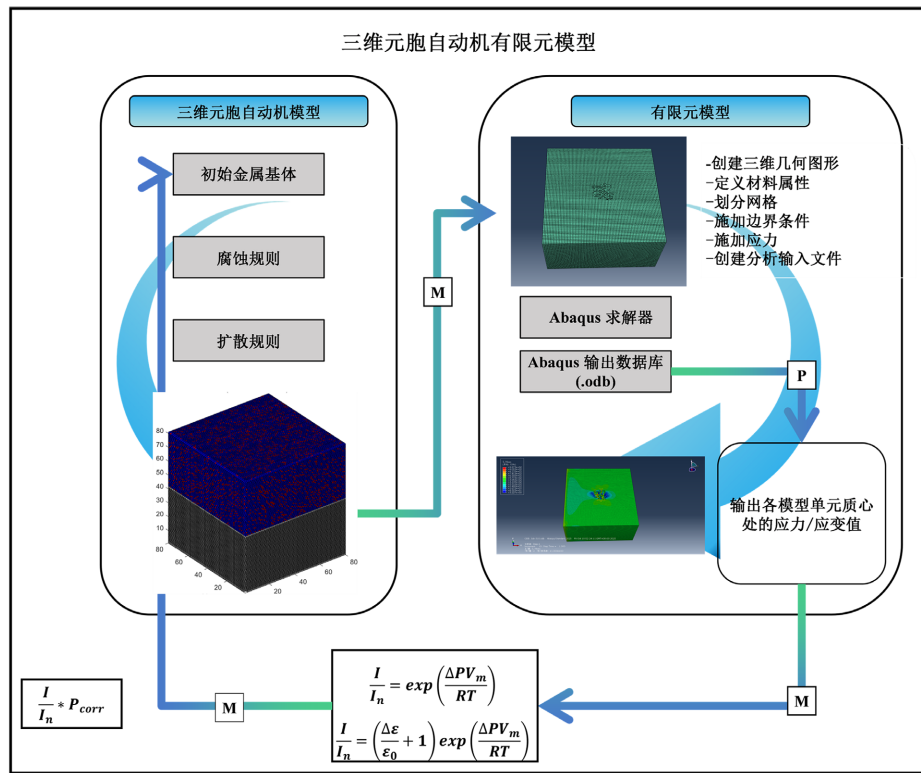


Figure 2. Structure diagram of cellular automata finite element model
图 2. 元胞自动机有限元模型结构示意图

3. 结果与分析

3.1. 均匀腐蚀演化验证

有关研究[17][18]指出,耐候钢的腐蚀过程常呈幂函数形式演化。大量实验大气腐蚀数据表明,大气环境中耐候钢的腐蚀深度与暴露时间满足如下动力学关系[19][20]:

$$d = At^n \quad (10)$$

其中, d 是时间 t 后的腐蚀深度, A 和 n 是常数。

如图 3 所示,在遗传算法优化模型参数下三维元胞自动机模型计算得到的平均腐蚀深度随时间变化情况。平均腐蚀深度可通过体积损失与钢基体与电解质之间的接触面积的比值得到[21]。由图以及拟合公式可见,二者从腐蚀动力学角度看都与前面的经验公式一致,试验值和计算值拟合得到的幂指数 n 一样,为 0.83,说明模型能够较好地反映试验中测得的平均腐蚀深度随着时间逐渐降低的趋势。

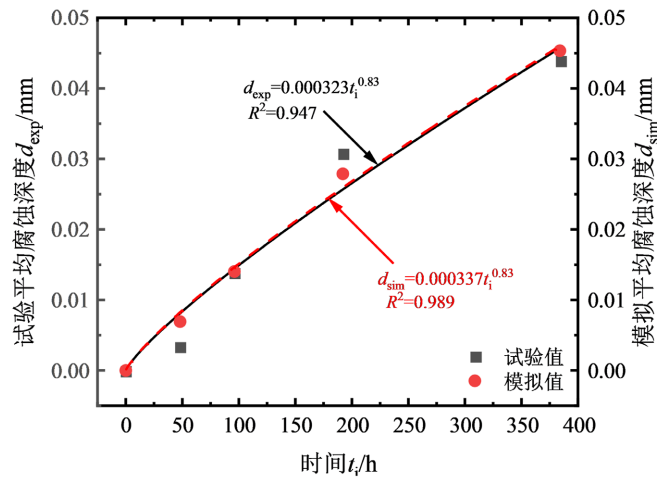


Figure 3. Evolution of average corrosion depth with time under genetic algorithm optimization model parameters

图 3. 遗传算法优化模型参数下平均腐蚀深度随时间的演化

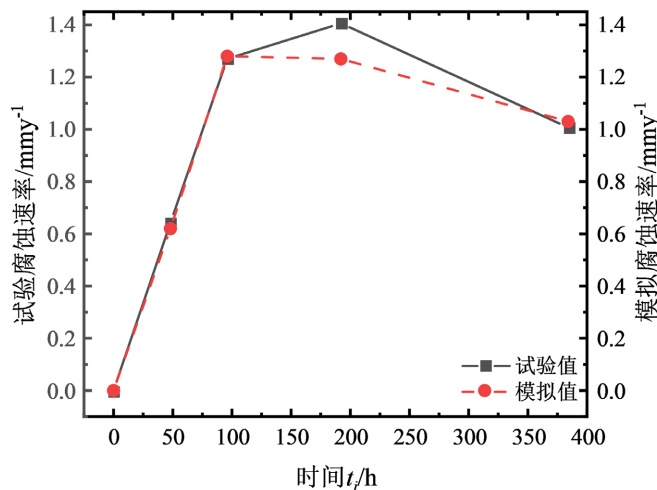


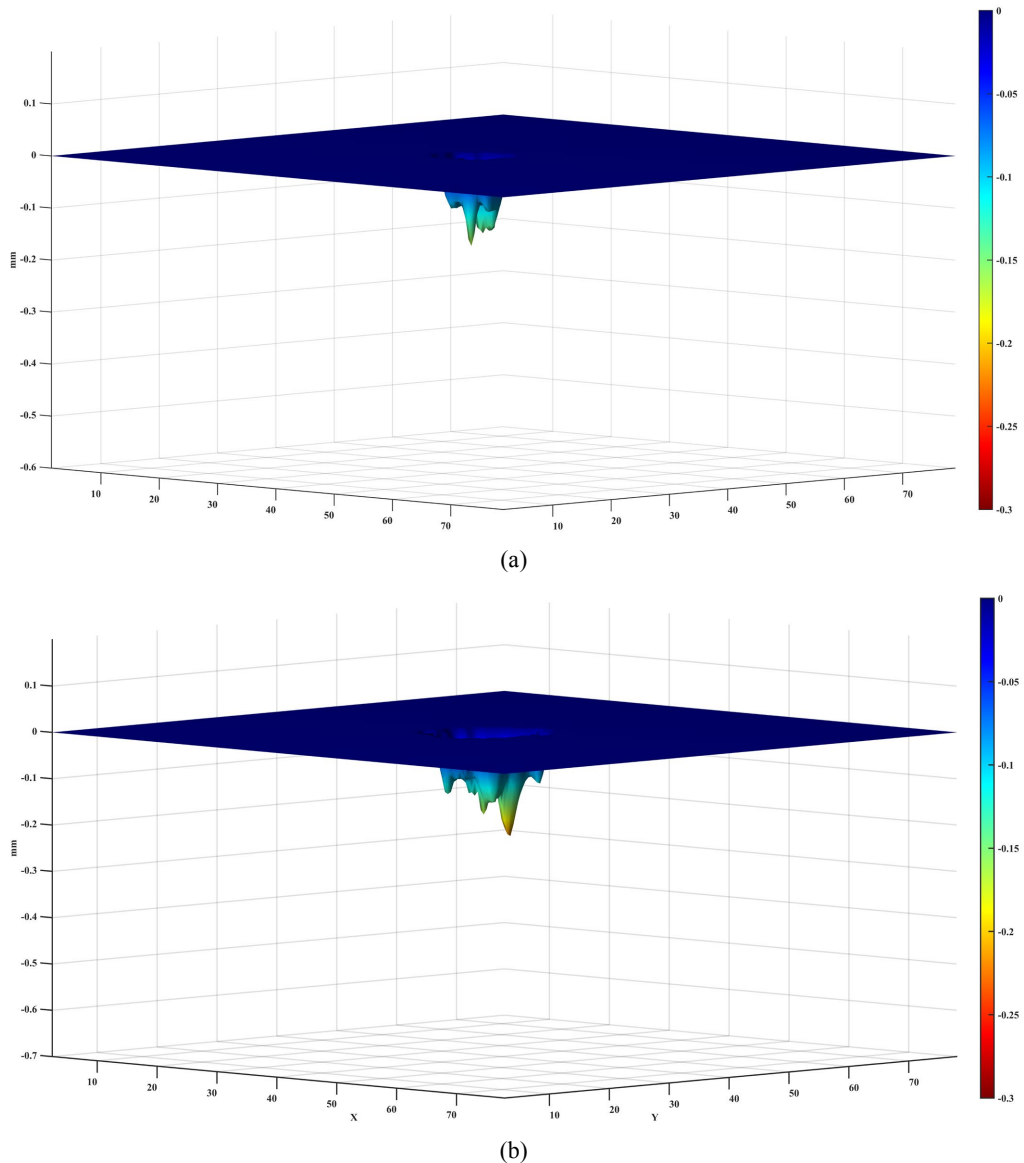
Figure 4. The evolution of corrosion rate with time under the model parameters optimized by genetic algorithm

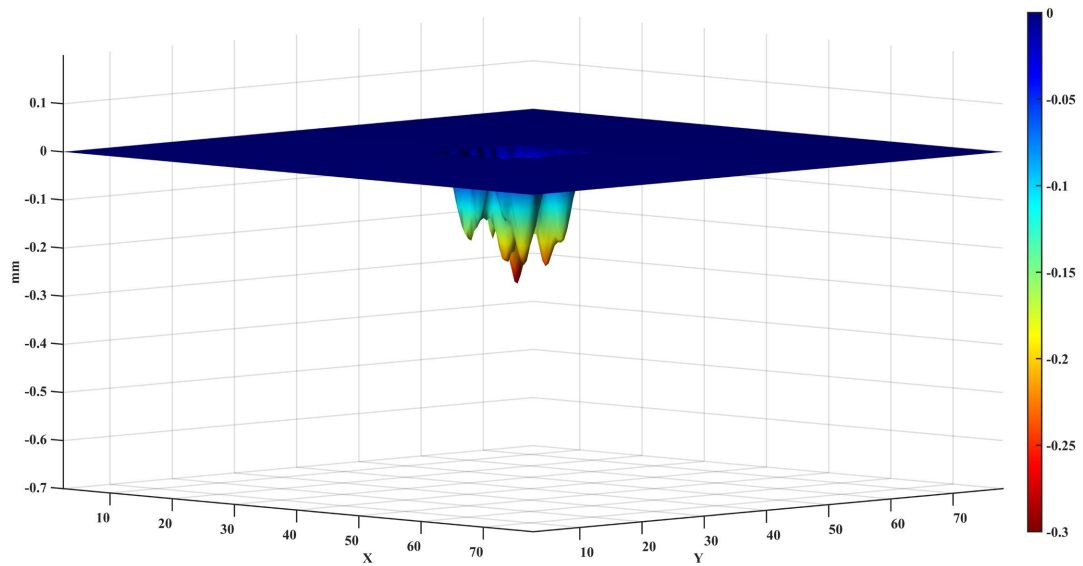
图 4. 遗传算法优化模型参数下腐蚀速率随时间的演化

将模拟结果与实际试验获得的腐蚀速率数据进行了对比分析。如图 4 所示, 两者整体趋势一致, 均表现出先上升、随后趋于平稳。在早期阶段(48 h), 模拟值略低于实验值, 误差为 3.49%; 96 h 时两者几乎完全一致, 误差低于 1%。192 h 时出现较大偏差, 可能与试验样本中腐蚀深度分布的不均性或局部环境波动有关; 而在 384 h 时, 模拟值再次与实验接近, 误差控制在 3% 以内。

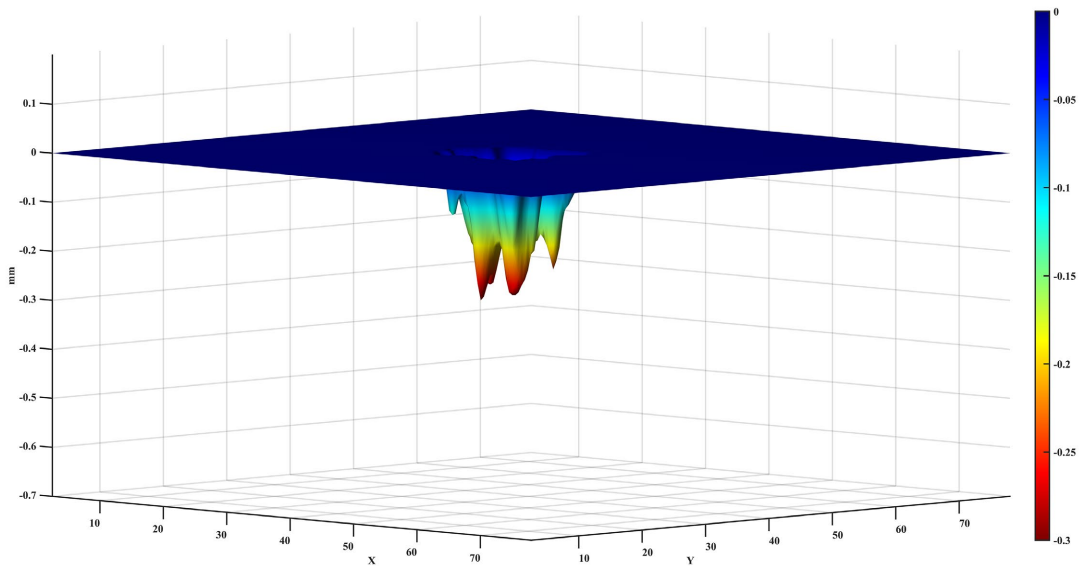
3.2. 不同应力水平下点蚀演化特征

本文选取材料 0.5 倍、0.8 倍及 1.0 倍屈服强度作为不同应力水平进行对比分析。图 5 给出了在相同模拟时间下不同应力条件下单蚀坑的三维腐蚀形貌对比, 随着外加应力水平的提高, 蚀坑形貌发生显著变化。在无应力条件下, 蚀坑形状较为规则且对称; 当施加 0.5 倍屈服强度的应力时, 蚀坑开始出现轻微不对称性; 进一步提高至 0.8 倍屈服强度的应力时, 蚀坑边界明显变得粗糙, 局部区域出现加速腐蚀现象; 当应力达到最大时, 蚀坑呈现出明显的不规则形态, 并向纵深方向快速发展, 表现出典型的深窄型特征。





(c)



(d)

Figure 5. Comparison of three-dimensional corrosion morphology of corrosion pits under different stress conditions at the same simulation time: (a) $F = 0$; (b) $F = 0.5$ times the yield strength; (c) $F = 0.8$ times yield strength and (d) $F = 1.0$ times yield strength

图 5. 相同模拟时间不同应力条件下蚀坑三维腐蚀形貌对比: (a) $F = 0$; (b) $F = 0.5$ 倍屈服强度; (c) $F = 0.8$ 倍屈服强度和(d) $F = 1.0$ 倍屈服强度

图 6 展示了不同应力水平下同一横截面蚀坑形貌随腐蚀时间的演化, 无应力条件下, 不同腐蚀时间的截面曲线整体较为平缓, 蚀坑底部基本位于截面中心, 且具有一定的对称性。在有应力作用下, 蚀坑横截面形态随时间演化表现出更强的不稳定性。相较于无应力情况, 蚀坑底部腐蚀加剧更为明显, 截面逐渐出现不对称特征。在 0.8 倍屈服强度的应力下, 蚀坑随时间发展呈现出明显起伏, 底部出现多处不平区域, 最大腐蚀深度显著增加; 当应力提高至 1.0 倍屈服强度时, 截面形态表现出更强烈的局部加深及波动特征, 不同时间阶段差异显著, 表明高应力条件下应力集中与电化学腐蚀的耦合作用显著增强。

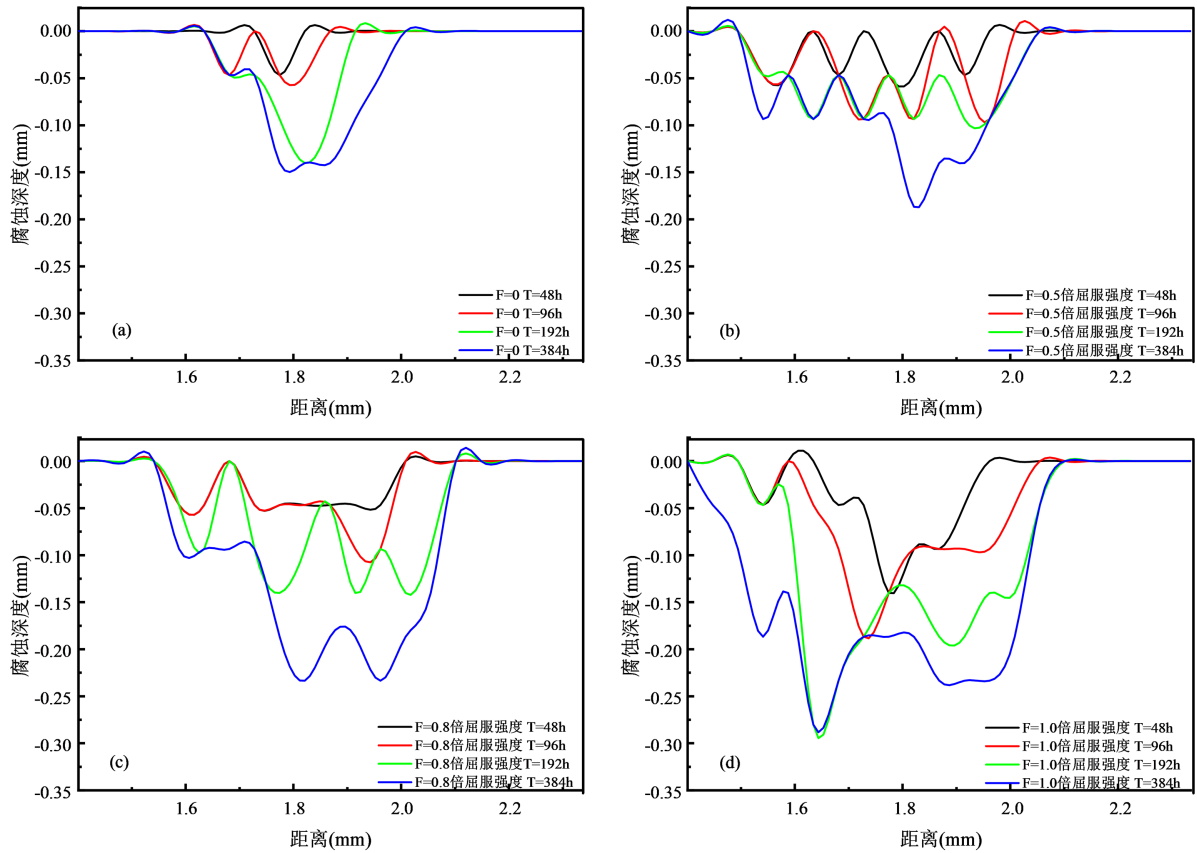


Figure 6. The evolution of the morphology of the same cross section with the corrosion time under different stress levels
图 6. 不同应力水平下同一横截面蚀坑形貌随腐蚀时间的演化

3.3. 点蚀坑几何特征的定量演化规律

选择最大腐蚀深度、最大腐蚀宽度以及深宽比作为指标来表征不同应力条件下蚀坑几何形状的变化。如图 7 所示，整个腐蚀过程中，最大腐蚀深度均随时间增加而持续增大，但在应力作用下增长速率明显提高。当应力接近屈服强度时，相比无应力条件此时最大腐蚀深度提高约 55.6%。最大腐蚀宽度在不同应力下蚀坑在初始阶段都有较快横向发展，有无应力情况下，蚀坑宽度变化的幅度较小。随着应力水平的增加，蚀坑宽深比逐渐减小，说明蚀坑由宽浅型向深窄型转变。

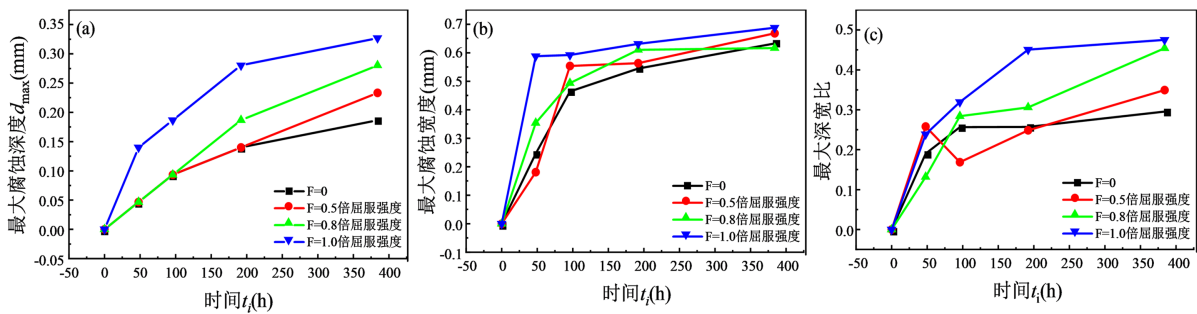


Figure 7. The evolution law of geometric characteristics of single corrosion pit with corrosion time under different stress conditions

图 7. 不同应力条件下单蚀坑几何特征随腐蚀时间的演化规律

3.4. 应力应变分布特征分析

图 8 对比了相同腐蚀模拟时间下应力为 0.5 倍屈服强度和 0.8 倍屈服强度下的应力云图和塑性应变云图。如图所示，应力集中区域与腐蚀加剧区域具有良好对应关系。高应力区域内腐蚀反应更为剧烈，蚀坑发展更快更深，说明应力通过提高局部电化学反应活性，加速金属溶解过程，从而主导腐蚀形貌演化。

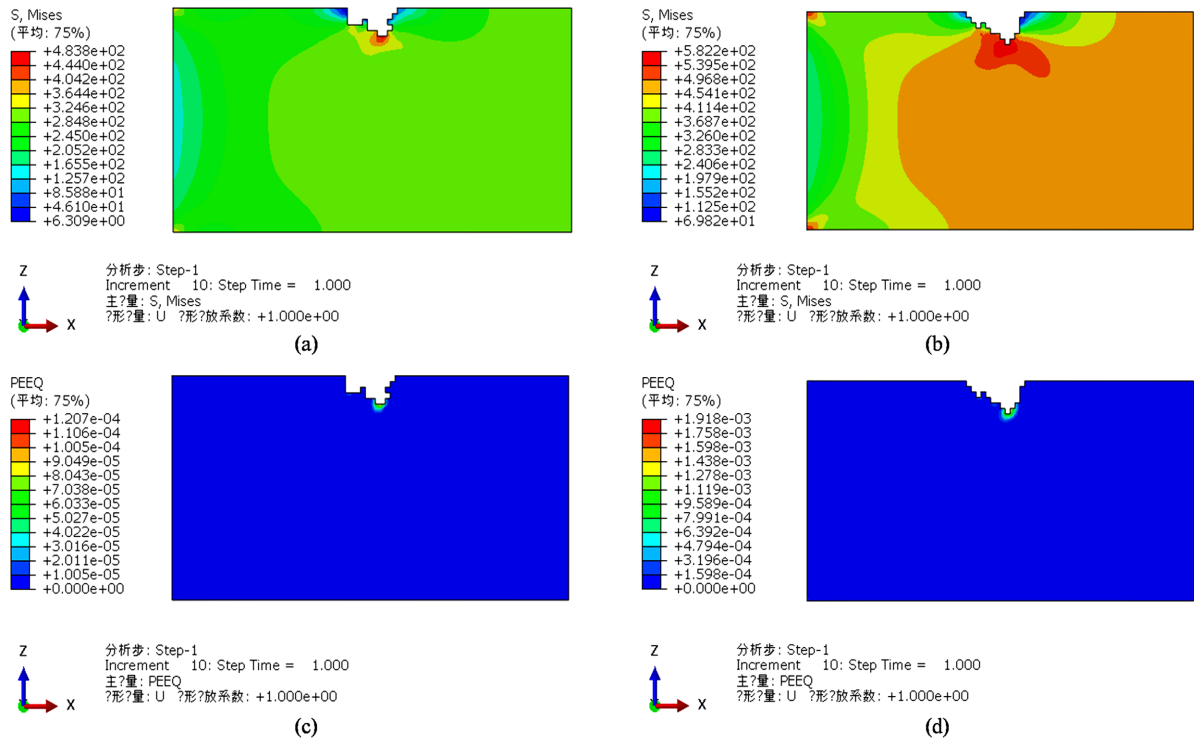


Figure 8. The stress nephogram and equivalent plastic strain nephogram under the stress of 0.5 times yield strength ((a) (c)) and 0.8 times yield strength ((b) (d)) at the same corrosion time are obtained

图 8. 相同腐蚀时间下应力为 0.5 倍屈服强度((a) (c))和 0.8 倍屈服强度((b) (d))下的应力云图和等效塑性应变云图

4. 模型局限性与展望

本研究在建立模型过程中对腐蚀过程进行了简化处理，在一定程度上用概率方法来表示金属被侵蚀、钝化膜破坏以及腐蚀发展情况，而忽视了海洋大气环境变化性。今后可以在该基础上补充考虑腐蚀产物形成及其沉积、多种离子移动以及干湿循环等因素对腐蚀影响，从而提高对于南海海洋大气腐蚀环境模拟程度。

利用一种双向耦合方法，将有限元方法和元胞自动机结合起来，使应力场对腐蚀的影响以及腐蚀对应力场的作用得到体现，更加准确地反映材料服役过程。未来可以在其基础上研究更为复杂的情况，例如多轴应力、残余应力或者循环载荷条件等，还可以在时间尺度和空间两个维度上进一步提高力学场和腐蚀场之间的耦合程度，使得二者之间的作用更为精确，更符合现实中的工程结构服役情况。

5. 结论

(1) 建立了基于三维元胞自动机的耐候钢点蚀演化模型，引入“金属溶解 - 离子迁移 - 腐蚀产物沉积”机制，并结合钝化层局部失效，实现了点蚀从萌生到稳定扩展的全过程模拟，能够有效表征腐蚀形

貌的非均匀演化特征。

(2) 在模型中引入有限元应力场, 并基于 Gutman 机制构建力化耦合关系, 实现了应力对腐蚀反应概率的调控。结果表明, 应力通过增强局部电化学反应活性, 加速金属溶解, 从而改变点蚀演化路径。

(3) 随着应力水平的提高, 蚀坑形貌由规则对称逐渐向不规则发展, 并由浅宽型向深窄型转变, 截面起伏及非对称性显著增强; 当应力接近屈服强度时, 最大腐蚀深度较无应力条件提高约 55.6%, 表明应力对点蚀纵向扩展具有显著促进作用。

(4) 应力场分布与腐蚀形貌演化具有良好对应关系, 应力集中区域与腐蚀加剧区域基本一致, 说明力化耦合作用在局部腐蚀发展过程中起主导作用。

参考文献

- [1] Melchers, R.E. (2003) Modeling of Marine Immersion Corrosion for Mild and Low-Alloy Steels—Part 1: Phenomenological Model. *Corrosion*, **59**, 319-334. <https://doi.org/10.5006/1.3277564>
- [2] 徐迪, 杨小佳, 李清, 程学群, 李晓刚. 材料大气环境腐蚀试验方法与评价技术进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(3): 447-457.
- [3] 李茜, 胡涛, 孙茂钧, 邹锦辉, 李景育. 海洋大气环境多因素组合/综合试验及方法现状分析[J]. 装备环境工程, 2023, 20(3): 84-90.
- [4] Hu, Q., Yang, S., Zhang, W., Da, G., Xu, X. and Wang, X. (2024) Corrosion Failure Analysis of Engineering Structural Steels in Tropical Marine Atmospheres: A Comparative Study of Ordinary and New Weathering Steels. *Engineering Failure Analysis*, **156**, Article ID: 107830. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107830>
- [5] Wu, W., Cheng, X., Hou, H., Liu, B. and Li, X. (2018) Insight into the Product Film Formed on Ni-Advanced Weathering Steel in a Tropical Marine Atmosphere. *Applied Surface Science*, **436**, 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.12.018>
- [6] 周乃鹏, 余昌莲, 柴锋, 罗小兵, 李健. 高湿热海洋环境低合金结构钢腐蚀研究进展[J]. 钢铁, 2022, 57(7): 137-145.
- [7] Morcillo, M., Díaz, I., Cano, H., Chico, B. and de la Fuente, D. (2019) Atmospheric Corrosion of Weathering Steels. Overview for Engineers. Part I: Basic Concepts. *Construction and Building Materials*, **213**, 723-737. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.334>
- [8] Mai, W., Soghrati, S. and Buchheit, R.G. (2016) A Phase Field Model for Simulating the Pitting Corrosion. *Corrosion Science*, **110**, 157-166. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.04.001>
- [9] Taleb, A., Chaussé, A., Dymitrowska, M., Stafiej, J. and Badiali, J.P. (2004) Simulations of Corrosion and Passivation Phenomena: Diffusion Feedback on the Corrosion Rate. *The Journal of Physical Chemistry B*, **108**, 952-958. <https://doi.org/10.1021/jp035377g>
- [10] Van der Weeën, P., Zimer, A.M., Pereira, E.C., Mascaro, L.H., Bruno, O.M. and De Baets, B. (2014) Modeling Pitting Corrosion by Means of a 3D Discrete Stochastic Model. *Corrosion Science*, **82**, 133-144. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.01.010>
- [11] Pérez-Brokate, C.F., di Caprio, D., Féron, D., de Lamare, J. and Chaussé, A. (2017) Probabilistic Cellular Automata Model of Generalised Corrosion, Transition to Localised Corrosion. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, **52**, 186-193. <https://doi.org/10.1080/1478422x.2017.1300748>
- [12] Wang, H. and Han, E. (2013) Simulation of Metastable Corrosion Pit Development under Mechanical Stress. *Electrochimica Acta*, **90**, 128-134. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.11.056>
- [13] Fatoba, O.O., Leiva-Garcia, R., Lishchuk, S.V., Larrosa, N.O. and Akid, R. (2018) Simulation of Stress-Assisted Localised Corrosion Using a Cellular Automaton Finite Element Approach. *Corrosion Science*, **137**, 83-97. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.03.029>
- [14] Xu, Z., Lu, J., Wei, X., Ding, J. and Wang, W. (2022) 2D and 3D Cellular Automata Simulation on the Corrosion Behaviour of Ni-Based Alloy in Ternary Molten Salt of NaCl-KCl-ZnCl₂. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **240**, Article ID: 111694. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111694>
- [15] Gutman, E.M. (1998) Mechanochemistry of Materials. Cambridge International Science Publishing.
- [16] Wang, H., Huang, K., Wang, W. and Guo, L. (2025) Peridynamics Modelling on Corrosion Fatigue Behaviours of an Iron-Based Alloy Considering Mechanochemical Effects. *European Journal of Mechanics—A/Solids*, **114**, Article ID: 105785. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2025.105785>

-
- [17] 曹楚南. 中国材料的自然环境腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 90-103.
- [18] 郭强, 许紫娟, 王至昱, 李昱, 刘崇林, 王斌. 低成本耐候钢 Q500NH 在模拟海洋工业大气下长周期腐蚀行为[J]. 材料开发与应用, 2025, 40(4): 16-27.
- [19] 梁彩凤, 侯文泰. 碳钢、低合金钢 16 年大气暴露腐蚀研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(1): 2-7.
- [20] 萧以德, 张三平, 曹献龙, 萧彧星. 我国大气腐蚀研究进展[J]. 装备环境工程, 2005, 2(5): 3-9.
- [21] 马燕, 张清华, 范传斌, 柴翔雨, 笪乐天, 李明哲. 耐候钢及其焊接节点大气腐蚀经时演化预测方法[J]. 中国公路学报, 2023, 36(2): 141-153.