

数值仿真技术在腐蚀与防护领域应用研究进展

刘岩, 刘斌, 石泽耀, 曹青敏

(北京化工大学 材料科学与工程学院 材料电化学过程与技术北京市重点实验室, 北京 100029)

摘要: 简要叙述了人工神经网络在大气、海水、土壤腐蚀方面的应用, 系统分析了二维、三维元胞自动机的发展现状和发展趋势, 及其在金属腐蚀与防护领域的应用研究进展。最后提出作为一种新兴的腐蚀与防护研究技术方法, 腐蚀数值仿真技术展示出了强大的发展动力, 未来的腐蚀数值仿真技术应朝着建模网络化、功能智能化、系统集成化方向发展。

关键词: 数值仿真技术; 腐蚀; 防护; 人工神经网络; 元胞自动机

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.12.010

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2020)12-0060-07

Application Progress of Numerical Simulation Technology in the Field of Corrosion and Protection

LIU Yan, LIU Bin, SHI Ze-yao, CAO Qing-min

(a. Beijing Key Laboratory of Materials Electrochemical Process and Technology, b. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

ABSTRACT: The application of artificial neural network in the corrosion of atmosphere, sea water and soil was briefly described. The development status and development trend of two-dimensional and three-dimensional cellular automata as well as the application research progress in the field of metal corrosion and protection were systematically analyzed. Finally, it was proposed that as a new research method of corrosion and protection, corrosion numerical simulation technology showed a strong development momentum. The future corrosion numerical simulation technology needs to develop in the direction of network modeling, intelligent function and system integration.

KEY WORDS: numerical simulation technology; corrosion; protection; artificial neural network; cellular automata

材料腐蚀是我国生产生活中常见的现象, 给国民经济造成巨大的损失。据数据统计, 在 2014 年, 我国腐蚀成本达 21 278.2 亿元人民币, 约占当年国内生产总值的 3.34%。由此可见, 材料腐蚀对资源是一种极大的浪费。因此, 应采取必要的腐蚀控制措施和预

防对策, 如通过实施防腐蚀顶层设计、加强腐蚀与防护研究、开发新型防腐蚀技术、推行防腐蚀经验标准等方式, 使我国腐蚀防护水平得以全面提升^[1]。随着计算机科学技术水平的不断提高, 数值仿真技术也得到了飞速发展。通过计算机模拟, 可以准确预测出材

收稿日期: 2020-02-09; 修订日期: 2020-03-30

Received: 2020-02-09; Revised: 2020-03-30

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (buctrc201730)

Fund: Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(buctrc201730)

作者简介: 刘岩 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为腐蚀仿真。

Biography: LIU Yan (1996—), Male, Master, Research focus: corrosion simulation.

通讯作者: 刘斌 (1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为腐蚀与防护。

Corresponding author: LIU bin(1973—), Male, Doctor, Professor, Research focus: corrosion and protection.

料在特定腐蚀环境下的长期腐蚀行为,有助于及时、准确地提出有效的防腐蚀对策和技术方案。目前,腐蚀数值仿真技术已经越来越广泛地应用于腐蚀防护研究和实际工程中,为解决腐蚀领域的技术难题提供了一种有效的技术手段和技术途径。

数值仿真技术也称为数值模拟技术,其研究领域将多种学科融于一体,包含计算机科学、数学、材料学、力学、工程技术等学科。在解决工程科学问题方面,数值仿真技术与理论分析和实验技术共同被称为三大支柱。数值仿真的基本流程包括:首先基于已有的实验环境数据来设定初始条件,并建立仿真模型,然后在仿真程序中进行模拟实验,并计算出模拟结果,最终通过计算结果探寻规律。相较于传统的试验操作和理论分析方法,数值仿真技术具有实验周期短、可多因素耦合、输出结果直观等优势。尤其是在材料腐蚀与防护领域,采用数值仿真技术与实验研究和理论分析相结合,可以得到更为丰富的信息,在腐蚀防护设计方面上有着非常好的应用前景。文中以应用最为典型的人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)、元胞自动机(Cellular Automata, CA)两种数值模拟技术为核心,综述了其在腐蚀与防护领域中的应用研究进展。

1 人工神经网络

人工神经网络是一种抽象出人脑结构和功能的数学模型,其内部由大量人工神经元节点互相连接构成的复杂网络^[2]。如图 1 所示,其包括输入层、隐含

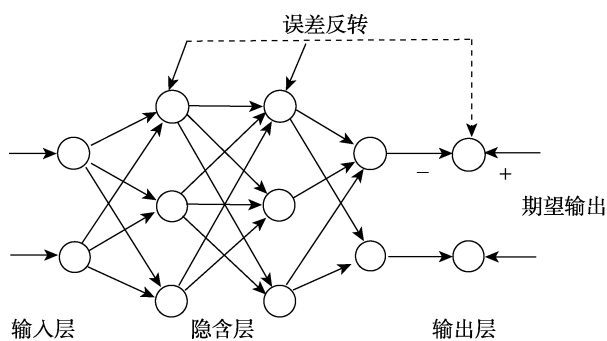


图 1 神经网络结构

Fig.1 Neural network structure

层以及输出层,神经网络能建立从网络输入到网络输出的非线性映射关系。人工神经网络可短时间内完成数据聚类、函数逼近、模式分类、优化计算等功能。针对腐蚀实验数据具有数据采集量大、数据来源广泛、存在大量随机数据等特点,可将人工神经网络应用于不同实际应用中的复杂工程问题,显著降低了成本和时间。人工神经网络将腐蚀影响因素和腐蚀结果的非线性关系蕴含在神经网络拓扑结构之中,成为处理腐蚀实验数据的一个有力工具^[3]。近年来,人工神经网络技术在腐蚀预测研究领域得到飞速的发展,其

基本思想是:基于材料腐蚀数据并建立数据库,为腐蚀数据的开发利用奠定技术基础。与此同时,选择人工神经网络模型工具,开发材料腐蚀速率计算、防腐性能评估等功能,最终实现对材料腐蚀数据的综合利用。

1.1 在大气腐蚀方面的应用

影响金属材料在大气环境中腐蚀的因素较多,如气候条件、气体杂质、尘粒含量等,且各个环境因素之间的作用规律极为复杂。暴露腐蚀试验是大气腐蚀分析中经常使用的方法,但其受实验区域、实验周期及大气环境变化等因素影响,应用往往不具备普适性^[4]。因此,在大气环境下选择人工神经网络技术构建腐蚀模型,建立起各个环境因素之间作用的内在联系,可对接接下来的研究工作发挥关键作用。

萧彧星等^[5]针对不同种钢材在我国典型大气环境下腐蚀数据,并基于贝叶斯正则化算法,建立了四层人工神经网络模型对所选钢材进行腐蚀预测,将所得到的结果运用 MATLAB 进行验证。马小彦等^[6]基于收集的碳钢和低合金钢材料腐蚀及环境数据,选择三层 BP 人工神经网络,建立了不同大气环境中金属腐蚀速率随暴露时间的对应关系模型,结果表明,要根据具体情况合理地选择 BP 人工神经网络算法。李荻等^[7]借助于 RBF 人工神经网络建立起铝合金在大气环境下的腐蚀预测模型,选择时间、材料、环境等作为输入参数,输出结果为腐蚀质量增量。与常规的腐蚀预测模型相比,RBF 腐蚀预测模型具有更简捷、更直观的特点,且满足预测精度,实际应用前景很好。王海涛等^[8]选取铝合金的合金元素和环境因素作为大气腐蚀预测的主要选择参数和考察因素,利用 BP 神经网络搭建 7-5-1 模型,最终得出合金元素铜和镁会推进腐蚀的发生,相对湿度也是不可忽略的因素。

Pintos 等^[9]提出一种基于人工神经网络的大气腐蚀建模方法。该方法包括实验数据集的预处理和划分、神经网络模型体系结构设置、神经网络模型构筑和测试以及运用,有望用于预测在伊比利亚美洲气候和污染条件下碳钢的腐蚀速率。Diaz 等^[10]提出一种碳钢损伤函数模型,设定腐蚀穿透量(μm)为环境变量累积值的函数,设计人工神经网络代替传统线性模型来拟合数据,提出在不同的气候和污染条件下,适当调整神经网络模型能较好地预测腐蚀损伤。调整具有不同输入参数集的人工神经网络,并分析其拟合优度的差异,得出湿润时间、降水、硫酸盐、氯化物等气象污染变量对腐蚀值的相关性。Kenny 等^[11]建立具有线性和 S 形函数的人工神经网络模型,利用从输电线沿线站点收集的低碳钢、铜和铝的腐蚀数据进行训练,定义和分析不同时期三种类型金属中的几组环境和污染物参数与相应的腐蚀值之间的关系,旨在根据环境参数预测巴西圣路易斯·马拉南地区的金属腐蚀速率。

1.2 在海水腐蚀方面的应用

海水中存在着大量的盐类、泥沙、有机化合物等成分,在其环境中,金属会发生腐蚀。一方面受材料成分、表面状态、加工过程等因素影响;另一方面与海水盐度、温度、氧气含量、pH值等海洋环境因素有关。而且各个因素彼此之间密切相关,共同影响金属在海水中的腐蚀行为。因此,将人工神经网络应用于海水环境腐蚀的模型中,可以归纳出金属材料的腐蚀行为及影响因素,为海水环境中金属材料腐蚀的现场勘验提供参考^[12]。

李晓峰等^[13]构建了11-9-1人工神经网络模型,对钢材在海水不同区域的腐蚀行为进行了研究,选取具有一定经验的神经网络拓扑结构对其开展腐蚀速率预测,预测结果与实验数据紧密相符。兰志刚等^[14]构建了三层BP神经网络模型,建立了海水中的盐浓度、氧含量、pH值、温度等影响因素与腐蚀速率之间的关系网络,精准地计算出了A3钢在海水中的腐蚀速率。经建芳等^[15]基于灰色系统理论,采取不等时距GM(1,1)模型对其进行建模,为降低随机性,采用BP神经网络模型对钢材腐蚀速率预测结果开展残差修正,进而使海水环境下金属腐蚀模型的预测精度达到预期要求。陈艳等^[16]基于神经网络建立了环境、材料、流速与腐蚀量之间的关系预测模型,并基于FLUENT平台,对管道海水流速进行了分析,预测复杂形态管道的易破坏敏感部位及冲刷腐蚀速率。Hu等^[17]针对Ni-Cr-Mo-V钢在深海环境下的腐蚀建模,利用“反向传播”方法构建了人工神经网络映射,使神经网络模型无需实验就可以预测不同复杂海洋环境下的极化曲线。该模型的极化曲线可用于预测腐蚀电流、腐蚀电位、点蚀电位等关键电化学参数,并可作为约束条件应用于多金属复杂电蚀模拟。Shi等^[18]建立了合金600裂纹扩展率(CGR)数据库,同时开发一个ANN模型,并对该数据进行了训练,以便对合金一次水应力腐蚀开裂(PWSCC)进行建模。预测出PWSCC CGR对系统每个主要自变量的依赖性,并对合金600裂纹扩展速率进行预测。

1.3 在土壤腐蚀方面的应用

土壤是一个由气体、水分、细小微生物以及多种颗粒状的矿物质等构成的多相环境。金属在土壤中的腐蚀主要受两方面的因素影响:一方面是金属本身的成分、组织、应力及表面状态的不均匀性造成的;另一方面受土壤的物理化学不均匀性所影响。土壤的盐浓度、O₂含量、温度、pH值、电阻率、水含量、微生物等都对金属的腐蚀有着一定的影响,且各因素之间存在相互作用。因为土壤腐蚀的影响因素较繁琐,若采用埋片实验来获取土壤腐蚀数据会有较长的周期,所以选择人工神经网络搭建腐蚀预测模型,将会在土壤腐蚀方面有着很好的应用前景。

李丽等^[19]运用BP神经网络建立了碳钢土壤腐蚀预测模型,选取土壤的pH值、电导率、含水量、盐含量、氯离子、硫酸根离子等6项环境参数作为土壤腐蚀预测的主要选择参数和考察因素,对钢材的腐蚀速率进行了精准的预测。王婉等^[20]运用BP人工神经网络建立了在役埋地燃气管线的腐蚀剩余寿命预测模型,并将数据中存在的规律完整地塑造出来,得出的结果与实测数据很接近。伍欣等^[21]构建了三层BP神经网络模型,建立了土壤含水率、电导率、酸碱度、盐浓度、硫酸根离子含量、碳酸氢根离子含量、Cl⁻含量等环境因子与X70钢材腐蚀速率之间的映射关系,精准地计算出了X70的腐蚀速率。王齐等^[22]运用BP人工神经网络,以土壤的含水量、氧化还原电位、电阻率、pH值、硫酸根离子含量、Cl⁻含量为腐蚀影响因素,进而来搭建油气管道的腐蚀预测模型。向乃瑞等^[23]基于灰色关联度算法分析得出,金属腐蚀速率主要受土壤的电阻率、氧化还原电位以及含水量三个因素影响。同时,应用遗传算法对常用的BP神经网络模型进行优化,并对金属腐蚀速率进行预测。结果显示,与传统的BP网络相比,GA-BP神经网络的误差和精度均有所改善。

在大气、海水、土壤环境中,金属的腐蚀受着多种复杂因素的影响。利用人工神经网络可以建立多种参数与金属腐蚀行为的关系,实现材料腐蚀速率计算、防护性能评估等功能,为金属腐蚀与防护研究提供一种实用的仿真工具。另外,为了提高人工神经网络模型的精确度,关键在于腐蚀数据的准确性和广泛性以及选择合理的模型参数,同时也可将神经网络与其他技术相交融来提高计算精度,如数据库技术、专家系统技术等。同时,也应将神经网络的应用范围进行拓展,例如应用于腐蚀失效分析、腐蚀图像识别等领域^[24]。

2 元胞自动机

元胞自动机(CA)是由John von Neumann建立的一种离散动力系统,具备着许多连续动力系统的性质。如图2所示,元胞自动机由元胞、邻居、元胞空间和演变规则四个基本元素所构成^[25]。元胞自动机数值仿真技术是在规则的网格中散布的每一个元胞在时间和空间上都呈有限离散状态的动力学系统,且每个元胞都遵循着规则进行更新。元胞之间通过相互作用完成动态系统的一步演化,由一系列模型通过局部规则构成,区别于其他的动力学模型。在腐蚀与防护研究领域,科研人员运用元胞自动机构建微观模型,定义元胞状态,且确立元胞之间作用规则,最终将元胞自动机方法成功地应用于金属腐蚀模拟过程。目前,在腐蚀领域的仿真应用,主要有二维元胞自动机和三维元胞自动机。

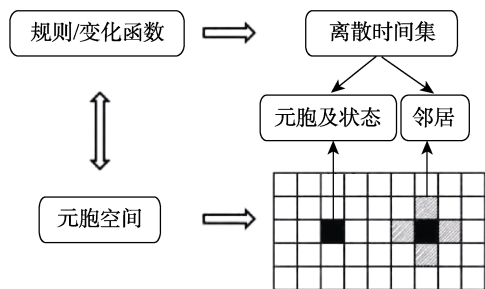


图 2 元胞自动机的构成
Fig.2 Composition of the cellular automata

2.1 二维元胞自动机

近年来,科学问题的深入研究使科研人员所掌握的计算机能力越来越成熟。元胞自动机方法已经在物理、生物以及材料科学众多领域飞速发展,也包括在腐蚀科学领域的应用。很多复杂的问题都可以通过二维元胞进行模拟,使得该仿真技术得到日益广泛的应用。

王宇君等^[26]利用 2D 元胞自动机模拟了飞机蒙皮发生点蚀的过程,将运用元胞自动机模拟结果与实验测得点蚀质量损失结果相比较,模拟结果与点蚀深度变化情况相吻合。陈梦成等^[27]采用概率型二维元胞自动机模拟了钢材在酸雨环境下的腐蚀过程,呈现出钢材表面的坑蚀和深度腐蚀形貌的产生过程,通过 CA 模拟得到的结果与 Komp 计算结果相比较,拟合程度非常高。芦星等^[28]基于二维元胞自动机模拟了在含硫的高温腐蚀气氛中铜镍合金的氧化性腐蚀,以反应时间、反应概率和腐蚀层厚度作为模拟变量,最终结果表明,在氧化和硫化条件下,金属得到的腐蚀层厚度满足 Wagner 抛物线规律。崔艳雨等^[29]利用二维元胞自动机模拟了铝合金点蚀过程、腐蚀产物生成及离子扩展,并通过改变参数 λ 和 ε 可以观测到不同的腐蚀行为和腐蚀结果。何乐儒等^[30]基于二维元胞自动机理论建立了金属表面局部腐蚀模拟模型框架,运用局部规则对金属腐蚀的转化、渗透、扩散等进行定义,并建立了 φ 、 λ 和 ε 参数腐蚀速率模型。运用 MATLAB 对在有防护层条件下的金属表面腐蚀模拟进行了编程,得出元胞自动机方法适用于金属表面局部腐蚀模拟。

Caprio 等^[31]使用介观元胞自动机研究腐蚀表面形态,已被证明是研究粗糙金属-电解质界面的有力工具。该模型考虑了两种腐蚀动力学及其相对空间局域化。结果表明,这两种腐蚀动力学形式之间的竞争再现了几种类型的腐蚀形态。通过仿真和实验结果比较,阐明了动力学和腐蚀形貌间的规律。Wang 等^[32]基于元胞自动机/有限元模型研究了机械化学作用下不锈钢表面亚稳态腐蚀坑的相互作用,亚稳双坑在坑内聚结后的瞬态电流比亚稳单坑增大得快。随着深坑深度的增加,机械化学效应更加显著。对于亚稳双凹

坑,靠近加载侧的腐蚀坑比远离加载侧的腐蚀坑增长更快,且腐蚀坑的增长方向趋于加载侧。蚀坑表面被破坏后,腐蚀坑之间的相互作用使亚稳坑更容易进入稳定的生长状态。O. O. Fatoba 等^[33]采用元胞自动机 (CA) 对局部腐蚀构件进行了建模,并采用有限元方法 (FEA) 对应力集中效应引起的机械构件的腐蚀缺陷进行了分析。同步执行 CA 和 FEA,两者之间的反馈提供近似应力辅助坑的发展过程,得出机械效应特别是塑性应变会加速局部腐蚀的发展速度。Chen 等^[34]建立了不锈钢表面生长和内部氧化的元胞自动机模型,探讨了不锈钢在腐蚀性液态金属环境下的氧化机理和表面动力学,模拟了铁在氧化层中的腐蚀、扩散和析出三个主要过程。Núbia Rosa da Silva 等^[35]研究了合成纹理图像和自然纹理图像的分类问题,将腐蚀的基本机理与元胞自动机的过渡函数相结合,确定了金属点蚀的核心过程,并将其应用于纹理图像,利用元胞自动机的过渡函数对图像的表面形貌进行分析。Chen 等^[36]基于元胞自动机理论建立了金属表面均匀腐蚀损伤演化模型,考虑初始溶液浓度、腐蚀时间、溶解概率等因素,分析了腐蚀损伤的演化过程,将得到的演化结果与实验数据进行比对,证明了模型的可靠性。

2.2 三维元胞自动机

通过对二维元胞自动机模型的使用,并不能将腐蚀微观形貌及萌生过程完美地呈现出来。因此科研人员为了使腐蚀微观形貌及腐蚀过程更加直观地显示出来,在模拟金属腐蚀过程中引用了三维元胞自动机模型。随着计算机领域的越来越完善,直观清晰的三维元胞自动机被应用于模拟工程问题。大量的科研工作者将元胞自动机方法应用于模拟腐蚀现象,定义腐蚀过程中的空间交互作用和扩散作用的局部规则,并进行微观建模。

王慧等^[37]基于三维元胞自动机模型,模拟了金属点蚀生长过程及坑蚀形貌瞬像。结果表明,蚀坑的仿真形貌会在一定程度上达到平稳,对估算结构的疲劳寿命和研究点蚀的生长机理有极大帮助。郭东旭等^[38]借助元胞自动机理论构建了点蚀生长的三维模型,研究了结构表面在不同的温度和浓度溶液中点蚀坑随时间的转变规律,为评估材料的寿命提供参照。冯丽等^[39]运用正向建模和 MATLAB 软件编程方法生成了三维分层表面,同时基于 3D 元胞自动机理论构建了材料的腐蚀微观模型,仿真分析了在海洋环境下分形粗糙表面的腐蚀损伤流程,探寻了腐蚀样貌随分形参数的变化规律。

Qiao 等^[40]建立了一种基于实时电化学噪声分析 (ENA) 的定量三维元胞自动机预测算法,用于钢筋混凝土结构的点蚀监测。利用小波能量谱 (WES) 能量分布比驱动三维 CA 模型,对腐蚀坑的发展进行了

定性预测。Cui 等^[41]采用盐雾腐蚀试验探寻了 Q345 钢点蚀的演变规律, 计算出了腐蚀坑的数量及最大深度, 采用 3D 元胞自动机再现了腐蚀坑的起始和生长过程。结果表明, 在元胞自动机模型中, 最大深度主要由腐蚀反应概率和向下运动概率控制, 而点蚀形状由钝化反应概率控制。S. V. Lishchuk 等^[42]将 3D 元胞自动机应用于晶间腐蚀研究, 生成了适当的 CA 规则, 且该模型与 AA2024 铝合金在氯化物溶液中的晶间腐蚀实验数据具有定性和定量的一致性。Yu 等^[43]通过元胞自动机模拟了富 Cr 碳化物的析出演变和铬浓度分布, 清楚地显示固溶和敏化处理对晶间腐蚀(IGC)的影响。Caprio 等^[44]提出了研究几何形状对晶间腐蚀的影响以及晶间和晶内腐蚀的综合影响的模型。与 2D 几何模型相比, 模型的 3D 扩展显示更多种类的颗粒几何形状以及颗粒分离的情景。一般来说, 预测的腐蚀速度比 2D 模型更快。

元胞自动机是研究复杂的金属腐蚀系统非常重要的一种数值仿真技术, 可以实现模拟点蚀的演变规律、金属钝化膜的形成和溶解等复杂微观过程, 二维元胞模型和三维元胞模型对于金属腐蚀的微观机理研究有着很好的应用前景。另外, 在腐蚀过程的模拟时, 采用自动元胞机方法存在着局限性, 考虑到腐蚀过程中的复杂性, 在元胞自动机中限制因素制约了模拟真实腐蚀过程的能力, 主要表现为元胞转化规则、元胞状态的局限性^[45]。

3 结语

综述了人工神经网络、元胞自动机数值仿真技术的发展现状和发展趋势, 叙述了其在金属腐蚀与防护领域的应用研究进展。人工神经网络是模拟大气、海水、土壤环境下多种条件因素对腐蚀行为影响的有力工具, 通过建立多种参数与腐蚀行为的关系, 实现材料腐蚀速率计算、防腐蚀性性能评估等功能。元胞自动机是探寻点蚀的演变规律、金属钝化膜的形成和溶解等复杂微观过程的高效技术, 并可对金属腐蚀的微观机理研究提供良好的可视化效果。在实际应用中, 依据所处的腐蚀环境、发生的腐蚀类型、探究的腐蚀方向等, 来选择适合的数值模拟技术。尽管计算机技术和数学理论水平发展日益完善, 但由于腐蚀影响因素众多, 且存在相互间的复杂关联, 使得腐蚀仿真结果与实际腐蚀实验结果之间仍存在一定的偏差。作为一种新兴的腐蚀与防护研究技术方法, 腐蚀数值仿真技术展示出了强大的发展动力, 未来的腐蚀数值仿真技术应朝着建模网络化、功能智能化、系统集成化方向发展。随着数值仿真技术的不断发展完善, 数值模拟精度的不断提高, 相信其在腐蚀与防护领域的应用将会日益广泛和成熟, 必将为腐蚀难题的解决和腐蚀综合控制提供更有力的技术支撑。

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): 1-10.
- [2] 阎平凡, 张长水. 人工神经网络与模拟进化计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
YAN P F, ZHANG C S. *Artificial Neural Networks and Simulation Evolutionary Computing*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [3] AMMAR H E, SWELLAM W S. Modeling of Solar Energy Systems Using Artificial Neural Network: A Comprehensive Review[J]. *Solar Energy*, 2019, 18: 622-639.
- [4] 曾佳俊, 周学杰, 吴军, 等. 金属材料大气腐蚀试验相关性与寿命预测研究现状[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2015, 27(1): 90-94.
ZENG J J, ZHOU X J, WU J, et al. Research Status of Correlation and Life Prediction of Atmospheric Corrosion Tests on Metal Materials[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2015, 27(1): 90-94.
- [5] 萧彧星, 吴光海, 孙宁, 等. BP 神经网络在碳钢和低合金钢大气腐蚀数据预测中的应用[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2011(2): 171-174.
XIAO Y X, WU G H, SUN N, et al. Application of BP Neural Network in Prediction of Atmospheric Corrosion Data of Carbon Steel and Low Alloy Steel[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2011(2): 171-174.
- [6] 马小彦, 栾艳冰, 屈祖玉, 等. 神经网络在金属大气腐蚀率预测中的应用[J]. *北京科技大学学报*, 2001, 23(2): 123-126.
MA X Y, LUAN Y B, QU Z Y, et al. Application of Neural Network in Prediction of Metal Atmospheric Corrosion Rate[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2001, 23(2): 123-126.
- [7] 韩德胜, 李获. 用 RBF 人工神经网络构建铝合金大气腐蚀预测模型[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2009, 21(3): 245-246.
HAN D S, LI D. Prediction Model of Aluminum Alloy Atmospheric Corrosion with RBF Artificial Neural Network[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2009, 21(3): 245-246.
- [8] 王海涛, 韩恩厚, 柯伟. 基于人工神经网络模型的铝合金大气腐蚀的预测[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2006, 26(5): 272-274.
WANG H T, HAN E H, KE W. Prediction of Atmospheric Corrosion of Aluminum Alloy Based on Artificial Neural Network Model[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2006, 26(5): 272-274.
- [9] PINTOS S, QUEIPO N V, RINCÓN de O T, et al. Artificial Neural Network Modeling of Atmospheric Corrosion in the MICAT Project[J]. *Corrosion Science*, 2000, 42: 25-52.
- [10] DÍAZ V, LÓPEZ C. Discovering Key Meteorological Variables in Atmospheric Corrosion Through an Artificial Neural Network Model[J]. *Corrosion Science*, 2007, 49: 949-962.

- [11] KENNY E D, PAREDES R, LACERDA de L A, et al. Artificial Neural Network Corrosion Modeling for Metals in an Equatorial Climate[J]. Corrosion Science, 2009, 51: 2266-2278.
- [12] 宋伟伟, 董彩常, 张波. 人工神经网络在我国海水腐蚀中的应用[J]. 腐蚀与防护, 2012(8): 668-671.
SONG W W, DONG C C, ZHANG B. Application of Artificial Neural Network in Seawater Corrosion in China[J]. Corrosion and Protection, 2012(8): 668-671.
- [13] 李晓峰, 王海涛, 邵良杉. 基于人工神经网络的碳钢、低合金钢腐蚀预测[J]. 西安建筑科技大学学报, 2008, 40(6): 885-888.
LI X F, WANG H T, SHAO L S. Corrosion Prediction of Carbon Steel and Low Alloy Steel Based on Artificial Neural Network[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology, 2008, 40(6): 885-888.
- [14] 兰志刚, 侯保荣, 白刚, 等. 海洋环境中平台钢腐蚀速率的三层 BP 神经网络预测[J]. 海洋科学, 2010, 34(12): 75-77.
LAN Z G, HOU B R, BAI G, et al. Three-layer BP Neural Network Prediction of Platform Steel Corrosion Rate in Marine Environment[J]. Marine Science, 2010, 34(12): 75-77.
- [15] 经建芳, 邓富康, 李康春, 等. 海水腐蚀速率的 unequal 灰色模型与 BP 神经网络模型组合预测[J]. 材料保护, 2015(8): 33-36.
JING J F, DENG F K, LI K C, et al. Combined Prediction of Seawater Corrosion Rate with Unequal Isometric Gray Model and BP Neural Network Model[J]. Material protection, 2015(8): 33-36.
- [16] 陈艳, 康伟杰, 姚铭, 等. 基于 FLUENT 和神经网络预测海水弯管冲刷腐蚀的模型[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(6): 436-440.
CHEN Y, KANG W J, YANG M, et al. A Model for Predicting Erosion and Erosion of Bent Seawater Pipe Based on FLUENT and Neural Network[J]. Corrosion and Protection, 2019, 40(6): 436-440.
- [17] HU Q F, LIU Y C, ZHANG T, et al. Modeling the Corrosion Behavior of Ni-Cr-Mo-V High Strength Steel in the Simulated Deep Sea Environments Using Design of Experiment and Artificial Neural Network[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35: 168-175.
- [18] SHI J B, WANG J H, D. MACDONALD D. Prediction of Primary Water Stress Corrosion Crack Growth Rates in Alloy 600 Using Artificial Neural Networks[J]. Corrosion Science, 2015, 92: 217-227.
- [19] 李丽, 李晓刚, 邢士波, 等. BP 人工神经网络对国内典型地区碳钢土壤腐蚀的预测研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013, 25(5): 372-376.
LI L, LI X G, XING S B, et al. Prediction of Carbon Steel Soil Corrosion in Typical Areas of China Using BP Artificial Neural Network[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2013, 25(5): 372-376.
- [20] 王婉, 张俊文, 林铭, 等. 基于 BP 人工神经网络理论对埋地燃气管线腐蚀剩余寿命研究[J]. 现代机械, 2010(3): 44-46.
WANG W, ZHANG Z W, LIN M, et al. Research on Corrosion Remaining Life of Buried Gas Pipelines Based on BP Artificial Neural Network Theory[J]. Modern Machinery, 2010(3): 44-46.
- [21] 伍欣, 吴海燕, 彭波, 等. 基于 BP 神经网络的川气东送管道土壤腐蚀预测[J]. 管道技术与设备, 2015(1): 7-9.
WU X, WU H Y, PENG B, et al. Soil Corrosion Prediction of Sichuan-East China Gas Pipeline Based on BP Neural Network[J]. Pipeline Technology and Equipment, 2015(1): 7-9.
- [22] 王齐, 胡林林. 基于 BP 神经网络的油气长输管道土壤腐蚀性预测[J]. 当代化工, 2016, 45(9): 2198-2200.
WANG Q, HU L L. Soil Corrosion Prediction of Oil and Gas Pipeline Based on BP Neural Network[J]. Contemporary Chemical Industry, 2016, 45(9): 2198-2200.
- [23] 向乃瑞, 闫海, 王炜, 等. GA-BP 神经网络预测金属腐蚀速率[J]. 电力学报, 2018(1): 48-54.
XIANG N R, YAN H, WANG W, et al. GA-BP Neural Network Predicts Metal Corrosion Rate[J]. Journal of Electric Power, 2018(1): 48-54.
- [24] 王海涛, 韩恩厚, 柯伟. 腐蚀领域中人工神经网络的应用进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(3): 245-246.
WANG H T, HAN E H, KE W. Application of Artificial Neural Network to the field of Corrosion[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2004, 16(3): 245-246.
- [25] 段晓东. 元胞自动机理论研究及其仿真应用[M]. 北京: 科技出版社, 2012.
DUAN X D. Research on Cellular Automata Theory and Its Simulation Application[M]. Beijing: Science and Technology Press, 2012.
- [26] 王宇君, 郭安东, 赵爽, 等. 飞机蒙皮点蚀生长的元胞自动机模拟[J]. 全面腐蚀控制, 2017, 31(8): 80-86.
WANG Y J, GUO A D, ZHAO S, et al. Cellular Automata Simulation of Aircraft Skin Pitting[J]. Comprehensive Corrosion Control, 2017, 31(8): 80-86.
- [27] 陈梦成, 温清清. 钢材腐蚀损伤过程的元胞自动机模拟[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2018, 38(1): 68-73.
CHEN M C, WEN Q Q. Cellular Automaton Simulation of Steel Corrosion Damage Process[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and protection, 2018, 38(1): 68-73.
- [28] 芦星, 曾敏, 马挺, 等. 基于元胞自动机法的高温金属腐蚀行为模拟[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2016, 30(9): 2019-2022.
LU X, ZENG M, MANG T, et al. Simulation of High Temperature Metal Corrosion Based on Cellular Automata[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2016, 30(9): 2019-2022.
- [29] 崔艳雨, 赵沉沉. 基于元胞自动机法的铝合金腐蚀行为模拟[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(10): 794-799
CUI Y Y, ZHAO Y Y. Corrosion Behavior Simulation of Aluminum Alloy Based on Cellular Automata[J]. Corrosion and protection, 2018, 39(10): 794-799.

- [30] 何乐儒, 殷之平, 黄其青, 等. 模拟金属表面局部腐蚀的CA方法[J]. 航空材料学报, 2015, 35(2): 54-63.
HE L R, YIN Z P, HUANG Q Q, et al. CA Method for Simulating Local Corrosion on Metal Surfaces[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2015, 35(2): 54-63.
- [31] CAPRIO D, VAUTRIN-UL C, STAFIEJ J, et al. Morphology of Corroded Surfaces: Contribution of Cellular Automaton Modelling[J]. Corrosion Science, 2011, 53: 418-425.
- [32] WANG H T, HAN E H. Computational Simulation of Corrosion Pit Interactions under Mechanochemical Effects Using a Cellular Automaton/Finite Element Model[J]. Corrosion Science, 2016, 103: 305-311.
- [33] FATOBA O O, LEIVA-GARCIA R, LISHCHUK S V, et al. Simulation of Stress-Assisted Localised Corrosion Using a Cellular Automaton Finite Element Approach[J]. Corrosion Science, 2018, 137: 83-97.
- [34] CHEN H J, CHEN Y T, ZHANG J S. Cellular Automaton Modeling on the Corrosion/Oxidation Mechanism of Steel in Liquid Metal Environment[J]. Progress in Nuclear Energy, 2008, 50: 587-593.
- [35] NÚBIA ROSA da S, PIETER VAN der W, BERNARD De B, et al. Improved Texture Image Classification through the Use of a Corrosion-inspired Cellular Automaton[J]. Neurocomputing, 2015, 149: 1560-1572.
- [36] CHEN M C, WEN Q Q, ZHU Q, et al. Simulation of Corrosion Process for Concrete Filled Steel Tubular Columns with the Cellular Automata Method[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 82: 298-307.
- [37] 王慧, 宋笔锋, 王乐, 等. 蚀坑几何形貌的三维模拟[J]. 航空学报, 2009, 30(11): 2185-2192.
WANG H, SONNG B F, WANG L, et al. 3D Simulation of Etch Pit Geometry[J]. Journal of Aviation, 2009, 30(11): 2185-2192.
- [38] 郭东旭, 任克亮, 王燕昌, 等. 金属局部腐蚀的三维元胞自动机模型[J]. 力学与实践, 2014, 36(4): 447-452.
GUO D X, REN K L, WANG Y C, et al. Three-dimensional Cellular Automaton Model of Local Metal Corrosion[J]. Mechanics and Practice, 2014, 36(4): 447-452.
- [39] 冯丽, 蔡琦. 金属分形表面腐蚀过程的数值模拟[J]. 机械制造, 2018, 56(5): 45-47.
FENG L, CAI Q. Numerical Simulation of Metal Fractal Surface Corrosion Process[J]. Machine Made, 2018, 56(5): 45-47.
- [40] QIAO G F, HONG Y, OU J P. Quantitative Monitoring of Pitting Corrosion Based on 3D Cellular Automata and Real-time ENA for RC Structures[J]. Measurement, 2014, 53: 270-276.
- [41] CUI C J, MA R J, CHEN A R, et al. Experimental Study and 3D Cellular Automata Simulation of Corrosion Pits on Q345 Steel Surface under Salt-spray Environment[J]. Corrosion Science, 2019, 154: 80-89.
- [42] LISHCHUK S V, AKID R, WORDEN K, et al. A Cellular Automaton Model for Predicting Intergranular Corrosion[J]. Corrosion Science, 2011, 53: 2518-2526.
- [43] YU X F, CHEN S H, LIU Y, et al. A Study of Intergranular Corrosion of Austenitic Stainless Steel by Electrochemical Potentiodynamic Reactivation, Electron Back-scattering Diffraction and Cellular Automaton[J]. Corrosion Science, 2010, 52: 1939-1947.
- [44] CAPRIO D, STAFIEJ J, LUCIANO G, et al. 3D Cellular Automata Simulations of Intra and Intergranular Corrosion[J]. Corrosion Science, 2016, 112: 438-450.
- [45] 吴海鹏, 王正曦, 梁钊源, 等. 数值模拟在金属腐蚀与防护领域的应用研究现状[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2018(3): 142-148.
WU H P, WANG Z X, LIANG Z Y, et al. Literature Review on Application of Numerical Simulation in Corrosion and Protection of Metallic Materials[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2018(3): 142-148.