

# 海洋环境耐蚀结构钢研究进展

宗方勇<sup>1</sup>, 詹青青<sup>2</sup>

(1. 海军装备部驻广州地区军事代表局, 重庆 401120; 2. 西南技术工程研究所, 重庆 400039)

**摘要:** 以海洋装备主体材料钢铁作为研究对象, 概述了结构钢在海洋环境下的腐蚀与防护研究进展。叙述了结构钢在海洋环境不同区域的各种因素影响下的腐蚀行为和机理。阐述了耐蚀结构钢材料的研究现状和国内外海洋环境用典型耐蚀低合金钢, 目前主要通过微合金化技术和组织调控技术提高合金钢材料的耐蚀性。对比国外相关研究, 我国耐蚀结构钢开发相对滞后, 除了利用微合金化技术、组织调控技术这2种方法提高结构钢材料的耐蚀性外, 采用传统腐蚀研究方法结合基于机器学习技术的新型腐蚀研究方法, 挖掘海洋环境因素、材料成分和组织结构因素对结构钢腐蚀速率的影响规律, 对加强结构钢腐蚀机理研究、加快新型耐蚀结构钢的开发、延长海洋装备的服役寿命具有重要意义。

**关键词:** 结构钢; 海洋环境; 腐蚀与防护; 腐蚀机理; 机器学习; 腐蚀研究方法

**中图分类号:** TG174

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2022)06-0097-09

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2022.06.000

## Research Progress of Corrosion Resistant Structural Steels in Marine Environment

ZONG Fang-yong<sup>1</sup>, ZHAN Qing-qing<sup>2</sup>

(1. The Navy Equipment Guangzhou Bureau, Chongqing 401120, China;

2. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

**ABSTRACT:** In this paper, the main material of marine equipment, the steel is taken as the research object. The research progress on corrosion and protection of structural steels in marine environment is summarized. The corrosion and corrosion mechanism of structural steels under the influence of various factors in the different areas of marine environment are described. The research progress of corrosion resistant structural steels material and typical corrosion resistant low alloy steels used in marine environment at home and abroad are expounded. At present, the corrosion resistance of alloy steel materials is mainly improved by microalloying technology and microstructure control technology. The development of corrosion resistant structural steel in China is relatively backward compared with foreign researches. In addition to the two technologies to improve the corrosion resistance of structural steel materials, traditional corrosion research methods combined with new corrosion research methods based on machine learning technology are used to explore the influence of marine environmental factors, material composition and organizational structure factors on the corrosion rate of structural steel. It is of great significance to study the corrosion

收稿日期: 2022-04-28; 修订日期: 2022-05-27

Received: 2022-04-28; Revised: 2022-05-27

基金项目: 宗方勇(1978—), 男, 博士, 主要研究方向为装备监造。

Fund: ZONG Fang-yong (1978-), Male, Doctor, Research focus: equipment supervision.

通讯作者: 詹青青(1995—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为特种功能金属材料。

Corresponding author: ZHAN Qing-qing (1995-), Female, Master, Engineer, Research focus: special functional metal materials.

引文格式: 宗方勇, 詹青青. 海洋环境耐蚀结构钢研究进展[J]. 装备环境工程, 2022, 19(6): 097-105.

ZONG Fang-yong, ZHAN Qing-qing. Research Progress of Corrosion Resistant Structural Steels in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(6): 097-105.

mechanism of structural steel, accelerate the development of new corrosion resistant structural steel, and prolong the service life of marine equipment.

**KEY WORDS:** structural steels; marine environment; corrosion and protection; corrosion mechanism; machine learning; corrosion research methods

海洋环境是一种复杂多变的环境,随着海洋资源开发向深海领域延伸,国内海洋重要基础设施和装备面临的工作环境越来越严峻。钢铁作为制造海洋装备的主体材料,对开发海洋资源具有重要的战略意义。然而海洋装备用结构钢长期受海洋环境溶解氧、温湿度、微生物等环境因素的影响,发生电化学腐蚀、物理腐蚀和生物腐蚀,导致结构钢发生腐蚀开裂、力学性能降低等问题,最终造成材料失效,缩短海洋装备使用寿命,甚至危及使用安全,每年因海洋腐蚀问题造成巨大经济损失<sup>[1-2]</sup>。因此,在海洋环境中,结构钢除了要满足力学和工艺性能外,还必须具备良好的耐蚀性能<sup>[3]</sup>。为提高结构钢的耐蚀性能,国内外学者开展了大量减缓海洋工程结构钢腐蚀速率方面的研究。目前普遍的防腐技术包括:电化学保护<sup>[4]</sup>、添加缓蚀剂<sup>[5]</sup>、表面处理与改性<sup>[6]</sup>、涂覆防腐涂料<sup>[7]</sup>、采用包覆材料防腐等<sup>[8]</sup>。除对结构钢进行表面防护外<sup>[9]</sup>,研究海洋环境中结构钢的腐蚀行为和机理、开发新型海洋环境耐蚀钢、加快推进我国海洋环境耐蚀钢系列化是今后研究的主要方向。

本文从海洋环境中结构钢的腐蚀行为和机理研究、海洋环境耐蚀结构钢材料研究、海洋环境耐蚀结构钢腐蚀研究方法等方面,对近年来海洋环境耐蚀钢的研究情况进行了总结分析,提出了新型耐蚀结构钢的研究方向与发展趋势。

## 1 海洋环境中结构钢的腐蚀行为和机理研究

影响低合金结构钢开发的其中一个技术难点是腐蚀行为和机理的研究。由于海洋环境条件复杂,影响结构钢在海洋环境下腐蚀的因素众多,如溶解氧浓度、温度、pH、湿度、海洋微生物、流速等。由于海洋环境中含有腐蚀性电解质,因此钢铁材料在海洋环境下主要发生电化学腐蚀,结构钢与海水电解质溶液形成腐蚀电池,使结构件表面受腐蚀。海洋环境不同区域结构钢的腐蚀行为和规律不同。根据结构钢实际服役工况,海洋环境腐蚀区域大致分为海洋大气区、浪花飞溅区、海水潮差区、海水全浸区、海底海泥区<sup>[10]</sup>。

处于海洋大气区的结构钢表面形成强电解质薄膜,在局部形成浓度高的电解质溶液,导致作为阳极的海洋低合金结构钢电化学腐蚀速率加快。氯离子促进结构钢表面生成 $\beta$ -FeOOH,破坏表面锈层的致密

性,促进电解质溶液与钢基体接触,从而加速腐蚀<sup>[11]</sup>。影响浪花飞溅区结构钢腐蚀的因素复杂,该区域属于海洋大气与海水交换界面区,具有溶解氧饱和、干湿交替、海浪冲击频繁等特点,是海洋环境结构钢腐蚀最严重的区域,该区域用低合金高强钢的腐蚀速率可达 $0.5\text{ mm/a}$ <sup>[12]</sup>。陈闽东等<sup>[13]</sup>对海洋环境用E690低合金结构钢在三亚和青岛飞溅区环境的腐蚀行为与规律、锈层离子选择透过性和耐蚀机理等展开了研究。结果表明,E690低合金钢在飞溅区形成阳离子选择透过锈层,由于干湿交替作用,其表面腐蚀阴离子被带入锈层,难以扩散出来,锈层内部发生严重阴离子聚集,阳离子向外扩散,使锈层外部阳离子聚集,正负电荷中心分离,形成微电场,导致浪花飞溅区中低合金钢表面锈层易脱落,加快腐蚀速率。位于海水潮差区的结构钢处于干湿交替环境,高潮位类似于海洋全浸区环境,低潮位类似于海洋大气区和飞溅区,腐蚀速率比大气区和飞溅区小。海水全浸区中,结构钢受多种海洋环境因素影响,腐蚀情况较为复杂。周生璇等<sup>[14]</sup>通过采用不同pH下3.5%NaCl溶液模拟船体钢EH890在海洋环境下的腐蚀行为,发现在pH=3时,TEH890的腐蚀速率最快,在pH为7和11时,船体钢表面生成了 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 腐蚀锈层保护基体,从而腐蚀速率降低,耐腐蚀性增强。傅晓蕾等<sup>[15]</sup>研究发现,结构钢在 $0\sim 25\text{ }^\circ\text{C}$ 时,随温度的增加,腐蚀速率呈线性增大,当温度增加到 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 时,腐蚀速率减缓。他们推断海水温度对海水中结构钢的影响有双重作用,一方面温度升高, $\text{Cl}^-$ 等离子运动速率加快,提高腐蚀速率;另一方面,随温度升高,海水中溶解氧含量降低,减缓结构钢腐蚀。

## 2 海洋环境耐蚀结构钢材料研究

海洋环境的复杂性决定了必须选择耐蚀性能优异的钢铁材料。国内外对于耐蚀性钢铁材料开展了大量的科学研究,但设计开发适用于海洋环境的耐蚀结构钢仍存在巨大挑战。高耐蚀性结构钢的设计原则主要通过以下2种技术实现:微合金化技术<sup>[16-19]</sup>、组织调控技术。通过这2种技术提高合金钢基体的耐蚀性和锈层的均匀致密性,减缓结构钢的腐蚀速率。

### 2.1 微合金化技术

微合金化技术是通过加入耐蚀合金元素,优化低合金钢表面锈层的物理化学结构及成分,或提高钢基体自身的耐蚀性,阻止溶解氧、 $\text{Cl}^-$ 等直接接触钢基

体, 进而减缓钢铁材料的腐蚀速率, 将低合金钢耐蚀性提高 2~8 倍<sup>[20]</sup>。目前提高结构钢耐蚀性的微合金化方法是向钢中添加适量耐蚀性合金元素 (Cr、Cu、Ti、Ni、Mo、Sn 等), 加入合金元素的种类和含量不同, 其耐蚀性差异也很大。可提高钢耐腐蚀性的合金元素必须具备以下条件<sup>[21]</sup>: 元素在结构钢中的溶解度大于锈层溶解度; 能与铁元素形成固溶体; 可提高钢基体的自腐蚀电位。

Cr 元素能加速腐蚀产物向稳定态发展, 是能够显著提高海洋耐候钢耐蚀性的元素之一。宋玉等<sup>[22]</sup>研究发现, 在海洋大气环境下, 含 Cr 结构钢表面形成了稳定的致密锈层。原因是加入的 Cr 元素促进了  $\alpha$ -FeOOH 的形成, 并且 Cr 元素能置换  $\alpha$ -FeOOH 中的 Fe 元素, 生成  $\alpha$ -Fe<sub>1-x</sub>Cr<sub>x</sub>OOH。由于其具有良好的阳离子选择透过性, 阻碍 Cl<sup>-</sup>通过, 提高了钢铁材料耐蚀性。宋春晖等<sup>[23]</sup>研究发现, Cr 元素在腐蚀前期对减缓耐候钢的腐蚀速率有利, 而腐蚀后期 Cr<sup>3+</sup>水解会降低钢表面的 pH 值, 加速腐蚀进程。Cu 元素能够减缓结构钢的腐蚀。刘宏宇等<sup>[24]</sup>设计采用了 2.5% (质量分数) Cu 含量的低碳钢用于海洋环境, 并研究了其在海洋环境下的耐蚀性能。电化学试验研究表明, 0Cu2Cr 钢的腐蚀电流密度比 Q345 钢低, 同时 Cu 元素不仅能促进  $\alpha$ -FeOOH 成核结晶, 增加低碳钢表面腐蚀锈层的致密性, 还能形成 Cu<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, 保护钢基体, 增加耐蚀性。翁镭等<sup>[25]</sup>研究了不同 Ti 含量结构钢在海洋环境下的腐蚀机理, 通过 XRD 等表征手段发现, 添加一定 Ti 含量的耐候钢经过加速腐蚀试验后, 表面生成了细小致密的  $\alpha$ -FeOOH 和  $\gamma$ -FeOOH, 结构钢耐蚀性增强。Ni 元素是钢铁材料完全固溶元素, 具有耐海洋大气腐蚀的作用。Kage 等<sup>[26]</sup>研究发现, 增加 Ni 元素含量可促进  $\alpha$ -FeOOH 相的生成, 耐候钢表面钝化层的致密性提高, 从而提高了钢的耐蚀性。赵柏杰等<sup>[27]</sup>将系列 Mo 含量的低合金钢与 Q235 合金钢在模拟酸性海洋大气环境下的耐蚀性进行对比, 发现加入 0.2%~0.4% Mo 的低合金钢表面产生了较致密的锈层保护, 腐蚀速率有所下降。除此之外, 国外研究发现, Sn 元素能够提高锈层腐蚀电位, 增强对钢基体的保护, 减缓耐候钢在海洋大气环境下的腐蚀速率<sup>[28]</sup>。

## 2.2 组织调控技术

除改变合金钢材料的化学成分外, 材料的组织结构对海洋环境结构钢的耐蚀性也有一定影响<sup>[29]</sup>。组织结构调控的主要目的是实现晶粒细化和组织结构净化。晶粒细化不仅能改善低合金结构钢的力学性能, 还能提升钢铁材料的耐蚀性。晶粒细化主要通过改变晶界结构和化学成分、晶界数量、晶界比例、晶粒取向来提升结构钢的耐蚀性。晶粒度越小, 结构钢

的耐蚀性越好<sup>[30]</sup>。此外, 提高结构钢组织结构的均匀性也能提升耐蚀性。

常见利用组织结构调控技术的工艺有以下 2 种。

1) 控制轧制工艺。该工艺以细化奥氏体晶粒度为目的。其中奥氏体再结晶区轧制可以使轧材形变再结晶, 未再结晶区轧制能提高后续贝氏体铁素体转变过程的形核率和形核速度, 从而细化贝氏体板条。此外, 该工艺通过控制钢中微合金元素 (Nb、Ti 等) 强碳化物形成元素析出, 改变钢中阴极相的形态和比例, 提升结构钢的耐蚀性。

2) 控制冷却工艺。通过控制冷却工艺能获取不同过冷度的原奥氏体, 使贝氏体铁素体相变发生在低温阶段, 抑制贝氏体铁素体板条长大。同时, 该工艺能通过控制微合金化元素析出, 细化钢中析出相尺寸, 使贝氏体转变更完全, 使其中残余的奥氏体及未完全转变的产物含量减小, 实现钢中组织结构纯净化的目的。

国内外已开展通过组织调控提高结构钢海洋环境耐蚀性方面研究。相关研究表明, 钢中存在的复合相影响钢的耐蚀性, 提高耐蚀性的重要调控原则是阴极相均匀弥散分布。由于超低碳贝氏体钢的力学性能和耐蚀性优异, 国内外先后采用以超低碳贝氏体为主相组织的新型耐蚀低合金结构钢。李琳等<sup>[31]</sup>研究发现, 具有低碳贝氏体组织的 Q420qENH 新型耐候桥梁钢的耐腐蚀性能优异。原因是贝氏体组织均匀细密, 钢中微电池数量较少, 模拟海洋环境试验后, 钢表面形成了均匀锈层。Tewary 等<sup>[32]</sup>研究发现, 微量合金元素、较小的晶粒尺寸、均匀的组织结构能够提高桥梁钢的耐蚀性。张宇等<sup>[33]</sup>研究发现, 3 种耐候钢腐蚀初期的显微组织对钢耐蚀性的影响大。Q355NHD、Q450NQR1、Q460q 的显微组织如图 1a—c 所示, Q355NHD 和 Q450NQR1 均由多边形铁素体和珠光体组成, 其中 Q450NQR1 珠光体比例较小, 组织更均匀。Q460q 主要是由粒状贝氏体组成, 组织呈均匀弥散分布。通过 576 h 周浸试验后试验钢锈层的腐蚀截面形貌图发现, Q460q 锈层的致密性最高, 贝氏体耐候钢发生均匀腐蚀, 腐蚀速率相对较小, 以铁素体和珠光体为主的 Q355NHD 和 Q450NQR1 耐候钢锈层出现孔洞和裂纹, 腐蚀较严重。Q355NHD、Q450NQR1、Q460q 的锈层截面形貌如图 1d—f 所示。

近年来, 国外研发了系列海洋环境下耐蚀低合金钢<sup>[34-36]</sup>, 按成分主要分为 P-Cu-Cr-Ni、Cr-Mn-Cu、Cr-Cu-Mo 体系合金钢等, 国内研发了 Q235NH、Q295NH、Q345C-NHY3 等耐蚀低合金钢, 见表 1。与国外相比, 我国缺乏体系化耐蚀低合金钢, 95% 深海耐海水结构钢依赖进口, 同时海洋环境下钢材系统性腐蚀数据不足, 低合金钢耐蚀机理研究不充分<sup>[37]</sup>。

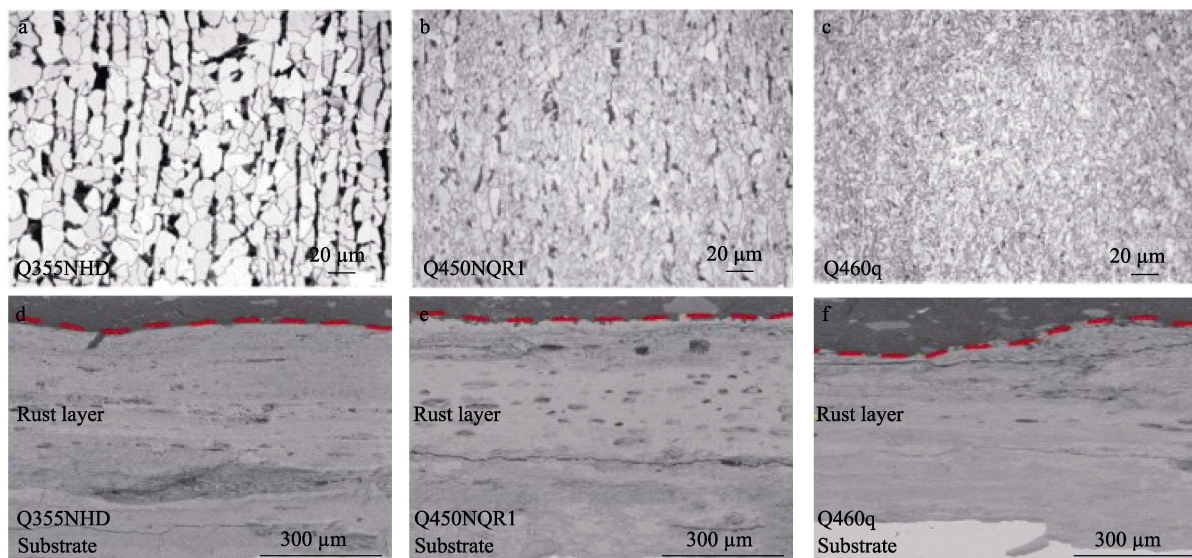


图1 试验钢组织形貌(a—c)与腐蚀截面形貌(d—f)

Fig.1 Microstructures (a—c) and cross-sectional morphology (d—f) of the rust layer of tested steels

表1 国内外海洋环境下典型耐蚀低合金钢

Tab.1 Typical corrosion resistant low alloy steels in marine environment at home and abroad

| 国家 | 耐蚀低合金钢                 | 合金钢体系                | 适用海洋区域      |
|----|------------------------|----------------------|-------------|
| 美国 | COR-TEN A              | P-Cu-Cr-Ni           | 海洋大气区       |
|    | COR-TEN B              | Cr-Mn-Cu             | 海洋大气区       |
|    | Mariner                | Ni-Cu-P              | 浪花飞溅区       |
| 日本 | TAICOR                 | Cr-Cu-Mo             | 浪花飞溅区       |
|    | MARILOY                | Cr-Cu-Mo/Cr-Si-Cu-Mo | 浪花飞溅区/海水全浸区 |
| 韩国 | Poseidon500            | Cr-Cu-Ni             | 浪花飞溅区/海水全浸区 |
| 中国 | Q235NH, Q295NH, Q355NH | Cu-Cr-Ni             | 海洋大气区       |
|    | Q345C-NHY3             | Cr-Cu-Mo             | 海水全浸区       |

### 3 海洋环境耐蚀结构钢腐蚀研究方法

我国耐蚀结构钢开发与国外相比滞后,加快不同海洋环境下耐腐蚀钢的开发对延长海洋装备服役寿命和降低成本具有重要的实践指导意义。由于现阶段采用传统试验方法存在研究周期长、缺乏环境试验数据等问题,导致海洋环境结构钢的腐蚀机理研究不充分,因此在采用微合金化技术和组织调控技术提升结构钢耐蚀性的同时,通过耐蚀钢传统和新型腐蚀研究方法,分析结构钢腐蚀机理是促进系列化耐蚀钢开发的重要环节。

#### 3.1 传统腐蚀研究方法

海洋环境试验法是一种最常用的腐蚀试验方法,将检测样品暴露在海洋大气环境、海水全浸区环境等区域,按一定周期取样,并对外观质量、样品微观腐

蚀形貌以及样品性能进行检测记录,分析样品的腐蚀退化规律。其优点是试验数据可以反映实际海洋环境工况,缺点是周期较长,环境因素复杂多变,可能影响钢铁材料腐蚀规律结果的判断。除此之外,另一种方法是模拟海洋环境工况进行加速试验,主要包括盐雾试验、电化学试验法(电化学阻抗谱、电化学噪声技术、腐蚀电位测定)等。其优点是缩短了研究周期,加快了积累试验数据,缺点是实验室模拟试验不能完全反映实际海洋环境腐蚀情况,准确性不足。研究海洋环境下结构钢的腐蚀行为需要大量试验和测试,增加了耐蚀钢的开发成本。

#### 3.2 新型腐蚀研究方法

目前关于用各种合金元素和组织调控手段提升海洋环境用结构钢的耐蚀性已开展了大量研究。传统结构钢耐蚀性研究主要依靠大量环境试验和室内加速试验腐蚀数据积累,存在研发周期长、环境因素不确定等问题,对于不同合金元素种类和含量、多种合金元素协同作用、微观组织结构对结构钢耐蚀性影响并不明确,一种新型海洋环境用耐蚀钢研发往往需要数年,腐蚀数据不足将影响下一代海洋环境用耐蚀钢的研发<sup>[38-39]</sup>。为降低试验时间和成本,必须在传统试验方法和相关分析手段基础上,结合相关机器学习方法,如人工神经网络<sup>[40-41]</sup>、支持向量机<sup>[42]</sup>、随机森林<sup>[43]</sup>、皮尔森相关系数<sup>[44]</sup>、深度神经网络<sup>[45]</sup>、数值仿真模拟方法<sup>[46]</sup>等,模拟不同环境下结构钢的动态腐蚀过程,研究结构钢的腐蚀规律和提高其耐蚀性的原理,深度挖掘添加微合金元素、调控组织结构以及其他防护技术对提高低合金结构钢不同阶段耐蚀性的机理。

杨小佳等<sup>[47]</sup>以含Cr低合金钢为研究对象,采用机器学习研究了Cr、Mo、Sn合金元素以及组织调控

对合金钢耐蚀机理的影响,采用随机森林模型、支持向量机模型等训练学习得到了影响结构钢耐蚀性的重要参数,挖掘环境因素和材料成分及组织结构因素对低合金钢耐蚀性的影响,建立了采用材料成分和组织结构等因素预测结构钢腐蚀规律的模型。他们采用随机森林模型预测了有无环境因素变量下不同含量微合金元素对合金钢腐蚀电流的影响,如图 2 所示。结果表明,添加 Cr 元素和 Cr、Sn 元素协同作用能提高

高结构钢的耐蚀性,加入适量比例 Mo 元素能进一步提高其耐蚀性。同时预测结果表明,环境因素会影响结构钢的耐蚀性。他们基于随机森林模型,还研究了不同组织结构(以原奥氏体晶粒度、BCC 相比例、贝氏体板条厚度三相组织结构为参数变量)对结构钢耐蚀性的影响,如图 3 所示。结果表明,随原奥氏体晶粒度细化、贝氏体板条厚度增加、BCC 相比例增加,合金钢的耐蚀性提高。

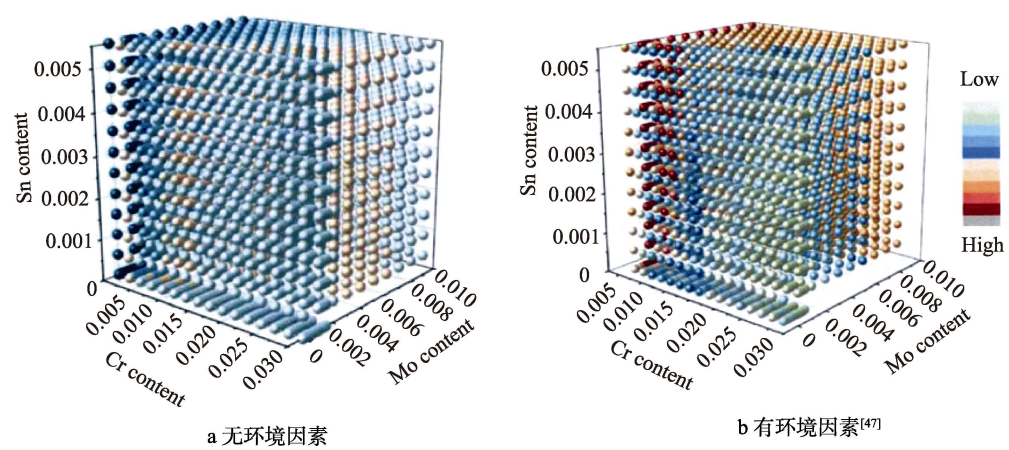


图 2 采用随机森林模型预测合金元素含量对低合金钢腐蚀影响结果  
Fig.2 Random forest model was used to predict the effect of alloying element content on corrosion of low alloy steels: a) without environmental factor; b) with environmental factor<sup>[47]</sup>

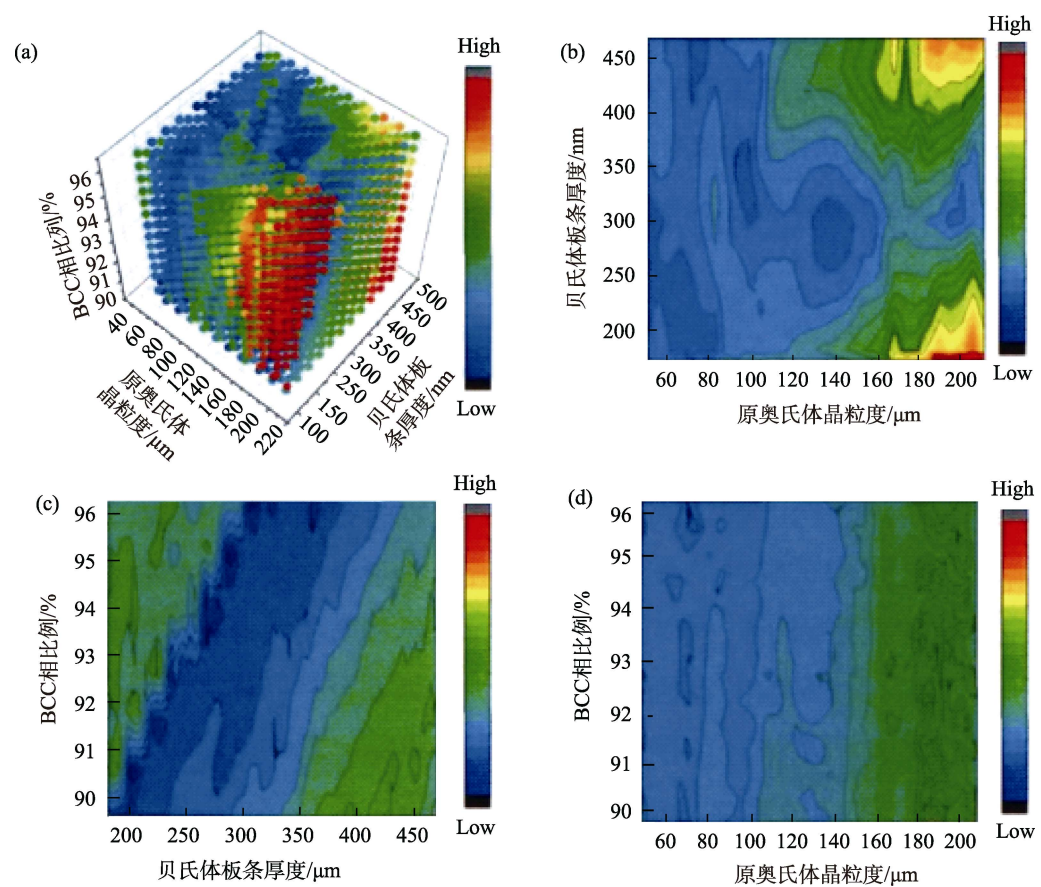


图 3 采用随机森林模型研究不同组织结构对低合金钢腐蚀影响预测结果<sup>[47]</sup>  
Fig.3 Random forest model was used to predict the effect of structure on corrosion of low alloy steels<sup>[47]</sup>

Lan 等<sup>[48]</sup>采用 BEASY 软件,建立了海洋油气平台的牺牲阳极保护模型模拟真实海洋环境。结果表明,模型计算结果与试验结果相差不大,数据最大相对误差约 1.61%,模型仿真结果基本能够反映实际腐蚀状况,如图 4 所示。Wei 等<sup>[49]</sup>采用人工神经网络建立了低合金钢腐蚀电位和影响因素的关系模型,通过皮尔森相关分析研究了相关合金因素对腐蚀电位的影响。Zhi 等<sup>[43]</sup>提出了一种新型深度结构模型 DCCF-WKNNs 实现腐蚀数据挖掘和建模,收集了 409 个低合金结构钢的室外大气腐蚀样本作为试验数据训练模型。结果表明,相比其他机器学习方法,该模型预测结果更优异,如图 5 所示。同时,这种方法还能够预测低合金结构钢腐蚀速率随单个环境因素(如 pH、相对湿度、温度、Cl<sup>-</sup>含量等)的变化情况。

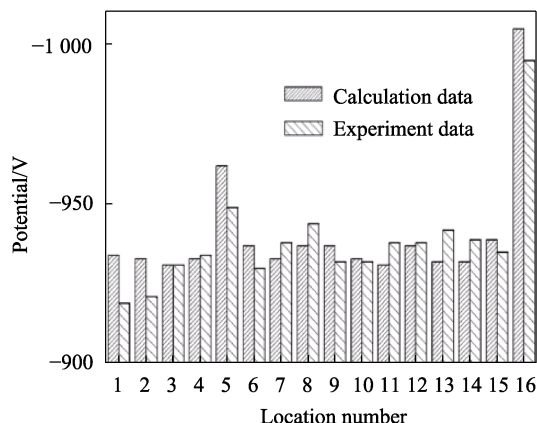


图 4 模型计算电位值与试验电位值比较<sup>[48]</sup>

Fig.4 Comparison of the modeling calculation and experimental data of potential<sup>[48]</sup>

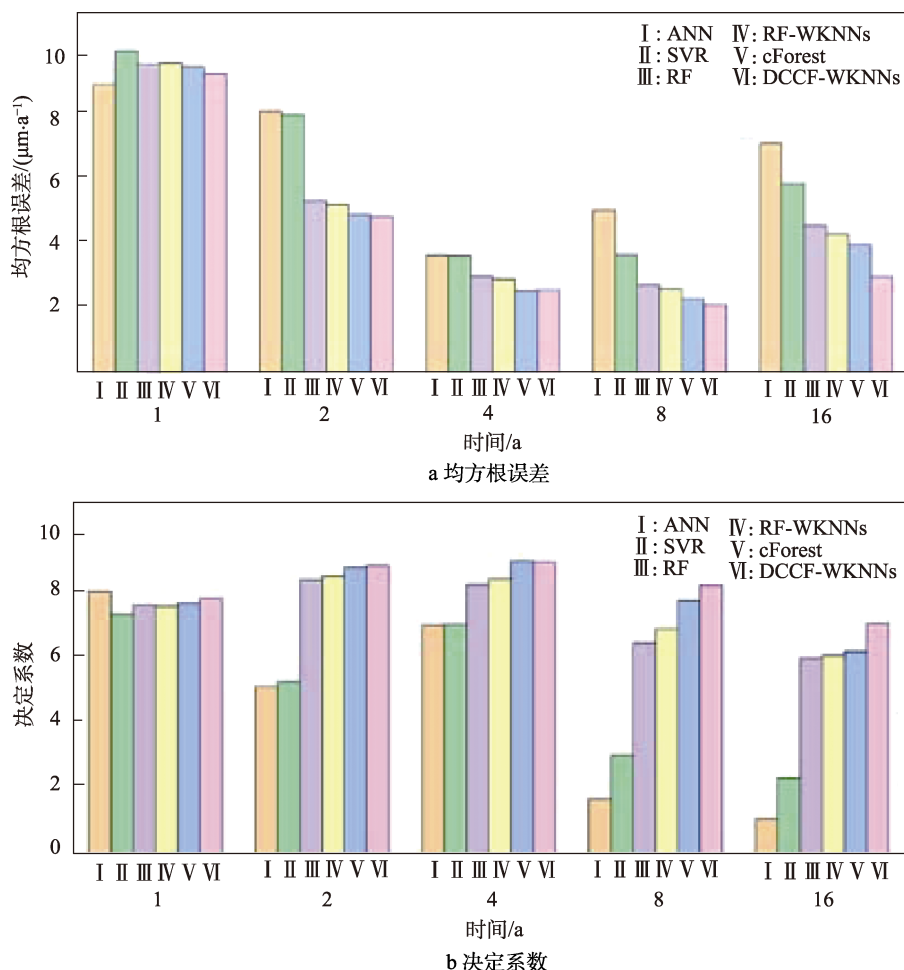


图 5 采用 6 种机器学习算法预测不同阶段腐蚀速率性能比较<sup>[43]</sup>

Fig.5 Performances of the corrosion rate prediction results at different exposure periods with 6 machine learning algorithms<sup>[43]</sup>. a) root mean square error; b) coefficient of determination

## 4 结语

国内外对于海洋环境用结构钢的防腐开展了大量工作,主要包括不同环境因素下结构钢的腐蚀机理与行为研究、耐蚀结构钢材料开发、耐蚀结构钢腐蚀研究方法。随着对海洋环境结构钢耐蚀性要求的提

高,必须加快开展新型耐蚀结构钢材料研究,通过合金化技术和组织调控技术提高合金钢基体的耐蚀性和锈层的均匀致密性,减缓结构钢的腐蚀速率,实现海洋环境高耐蚀结构钢材料的开发。

研究海洋环境结构钢腐蚀机理对开发新型耐蚀结构钢至关重要,由于海洋环境复杂多变,不同区域

结构钢的腐蚀行为和规律不同,耐蚀钢传统腐蚀研究方法周期长,缺乏数据积累,对结构钢腐蚀规律研究不充分。新型腐蚀研究方法基于机器学习方法挖掘海洋环境因素(pH、温度、湿度、盐度等)、材料成分、组织结构因素等对结构钢腐蚀规律的影响,预测相关参数变量影响下海洋环境用结构钢材料的腐蚀行为,对于下一代海洋环境用耐蚀钢研发具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] JEFFREY R, MELCHERS R E. Corrosion of Vertical Mild Steel Strips in Seawater[J]. *Corrosion Science*, 2009, 51(10): 2291-2297.
- [2] 谢瑞珍, 邹娟娟, 林乃明, 等. 熔盐电镀铝技术在钢铁材料腐蚀防护方面的研究现状[J]. *腐蚀与防护*, 2017, 38(8): 619-624.  
XIE Rui-zhen, ZOU Jiao-juan, LIN Nai-ming, et al. Research Status of Molten-Salt Electroplating Aluminum Techniques in Corrosion Protection for Iron and Steel[J]. *Corrosion & Protection*, 2017, 38(8): 619-624.
- [3] 张晓东, 胡裕龙, 卜世超, 等. 船体钢海水腐蚀研究进展[J]. *装备环境工程*, 2018, 15(6): 33-40.  
ZHANG Xiao-dong, HU Yu-long, BU Shi-chao, et al. Research Progress in Seawater Corrosion of Hull Structural Steel[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2018, 15(6): 33-40.
- [4] 池嘉程. 阴极保护下海底管道涂层剥离区金属腐蚀行为研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.  
CHI Jia-cheng. Study on Corrosion Behavior of Steel under Disbonded Coating Area of Submarine Pipeline with Cathodic Protection[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [5] 张大全, 高立新, 周国定. 国内外缓蚀剂研究开发与展望[J]. *腐蚀与防护*, 2009, 30(9): 604-610.  
ZHANG Da-quan, GAO Li-xin, ZHOU Guo-ding. Recent Progress and Prospect for Corrosion Inhibitor Science and Technology[J]. *Corrosion & Protection*, 2009, 30(9): 604-610.
- [6] PETROVA L G, DEMIN P. Surface Modification Techniques for Steel Components Working in Wear and Corrosion Conditions[J]. *Key Engineering Materials*, 2022, 909: 108-114.
- [7] 杨凝, 樊伟杰, 李伟华. 二氧化硅-聚苯胺-氧化石墨烯复合纳米材料改性水性涂层的制备及防腐性能研究[J]. *装备环境工程*, 2020, 17(4): 105-113.  
YANG Ning, FAN Wei-jie, LI Wei-hua. Preparation and Corrosion Resistance of Water-Based Coatings Modified by Graphene Oxide-Polyaniline-Silica Nano-Composite[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2020, 17(4): 105-113.
- [8] 史慧彬, 官华, 刘舟峰, 等. 海洋环境螺栓等异形件防腐现状及应对措施分析[J]. *涂层与防护*, 2021, 42(4): 6-11.
- SHI Hui-bin, GUAN Hua, LIU Zhou-feng, et al. Analysis of Anticorrosion Status and Countermeasures of Specially-Shaped Parts in Marine Environment[J]. *Coating and Protection*, 2021, 42(4): 6-11.
- [9] 沈剑, 丁星星, 宋凯强, 等. 海洋大气环境下装备材料的腐蚀与防护研究进展[J]. *装备环境工程*, 2020, 17(10): 103-109.  
SHEN Jian, DING Xing-xing, SONG Kai-qiang, et al. Research Progress on Corrosion and Protection of Equipment Materials in Marine Atmosphere[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2020, 17(10): 103-109.
- [10] 石泽耀, 刘斌, 刘岩, 等. 典型铜镍合金在海洋环境中腐蚀行为与防护技术研究进展[J]. *装备环境工程*, 2020, 17(8): 38-44.  
SHI Ze-yao, LIU Bin, LIU Yan, et al. Progress of Corrosion Behavior and Anti-Corrosion Technology for Typical Copper-Nickel Alloys under Marine Environment[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2020, 17(8): 38-44.
- [11] FU Gui-qin, ZHU Miao-yong, GAO Xin-liang. Rust Layer Formed on Low Carbon Weathering Steels with Different Mn, Ni Contents in Environment Containing Chloride Ions[J]. *Materials Science*, 2016, 22(4): 501-505.
- [12] 黄彦良, 余秀明. 高强度钢浪花飞溅区点蚀行为与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2016.  
HUANG Yan-liang, YU Xiu-ming. Pitting Behavior and Mechanism of High Strength Steel Spray Splash Zone[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [13] 陈闽东. 海洋工程用 E690 钢浪花飞溅区腐蚀行为及演变[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.  
CHEN Min-dong. Corrosion Behaviors and Evolution of Marine Engineering E690 Steel in Marine Splash Zones[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.
- [14] 周生璇, 车马俊, 马新元, 等. 超高强船体钢 EH890 在不同 pH 海洋环境中的耐蚀性研究[J]. *现代交通与冶金材料*, 2022, 2(1): 78-85.  
ZHOU Sheng-xuan, CHE Ma-jun, MA Xin-yuan, et al. Study on Corrosion Resistance of Ultra High Strength Hull Steel EH890 in Marine Environment with Different pH[J]. *Modern Transportation and Metallurgical Materials*, 2022, 2(1): 78-85.
- [15] 傅晓蕾. 海水环境中船体钢的腐蚀行为及其防护[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.  
FU Xiao-lei. Study on the Corrosion Behaviors and Protection of Hull Steels in Marine Environment[D]. Qingdao: Qingdao University of Tehcnology, 2010.
- [16] MATLOCK D K, SPEER J G. Microalloying Concepts and Application in Long Products[J]. *Materials Science and Technology*, 2009, 25(9): 1118-1125.
- [17] SUN Mei-hui, DU Cui-wei, LIU Zhi-yong, et al. Fundamental Understanding on the Effect of Cr on Corrosion Resistance of Weathering Steel in Simulated Tropical Ma-

- rine Atmosphere[J]. Corrosion Science, 2021, 186: 109427.
- [18] WU Wei, CHENG Xue-qun, HOU Hua-xing, et al. Insight into the Product Film Formed on Ni-Advanced Weathering Steel in a Tropical Marine Atmosphere[J]. Applied Surface Science, 2018, 436: 80-89.
- [19] LIU Chao, REVILLA R I, LIU Zhi-yong, et al. Effect of Inclusions Modified by Rare Earth Elements (Ce, La) on Localized Marine Corrosion in Q460NH Weathering Steel[J]. Corrosion Science, 2017, 129: 82-90.
- [20] DONG Jun-hua, HAN En-hou, KE Wei. Introduction to Atmospheric Corrosion Research in China[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2007, 8(7-8): 559-565.
- [21] 张全成, 吴建生, 郑文龙, 等. 合金元素的二次分配对耐候钢抗大气腐蚀性能的影响[J]. 材料保护, 2001, 34(4): 4-5.
- ZHANG Quan-cheng, WU Jian-sheng, ZHENG Wen-long, et al. Effect of Redistribution of Elements on Corrosion Resistance of Weathering Steel[J]. Materials Protection, 2001, 34(4): 4-5.
- [22] 宋玉, 陈小平, 王向东, 等. Q235B 钢和含 Cr 耐候钢在文昌海洋大气暴露的锈层特征与耐蚀性[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(9): 638-643.
- SONG Yu, CHEN Xiao-ping, WANG Xiang-dong, et al. Rust Characteristics and Corrosion Resistance of Q235B Steel and Cr-Bearing Weathering Steel in Wenchang Marine Atmosphere[J]. Corrosion & Protection, 2019, 40(9): 638-643.
- [23] 宋春晖, 周学俊, 李具中, 等. 合金元素含量对耐候钢在模拟海洋大气环境下耐蚀性的影响[J]. 机械工程材料, 2012, 36(4): 62-66.
- SONG Chun-hui, ZHOU Xue-jun, LI Ju-zhong, et al. Effect of Alloy Elements Content on Corrosion Resistance of Weathering Steels in Simulated Marine Atmosphere Environment[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2012, 36(4): 62-66.
- [24] 刘宏宇, 张喜庆, 滕莹雪, 等. 含铜低碳钢在海洋环境下的耐蚀和防污性能的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2021, 41(5): 679-685.
- LIU Hong-yu, ZHANG Xi-qing, TENG Ying-xue, et al. Corrosion Resistance and Antifouling Performance of Copper-Bearing Low-Carbon Steel in Marine Environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2021, 41(5): 679-685.
- [25] 翁镭, 吴红艳, 杜林秀. 含 Ti 耐候钢在海洋环境中的腐蚀行为[J/OL]. 热加工工艺, <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20192685>.
- WENG Lei, WU Hong-yan, DU Lin-xiu. Corrosion Behavior of Ti-containing Weathering Steel in Marine Environment[J/OL]. Hot Working Technology, <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20192685>.
- [26] KAGE I, SHIOTANI K, TAKEMURA M, et al. Estimation of Corrosion Loss for Ni-Added High Corrosion Resistant Weathering Steel Based on Field Exposure Test[J]. Zairyo-to-Kankyo, 2006, 55(4): 152-158.
- [27] 赵柏杰, 赵俊杰, 范益, 等. 含 Mo 低合金钢在模拟酸性海洋大气环境中的腐蚀规律研究[J]. 材料开发与应用, 2019, 34(6): 86-95.
- ZHAO Bai-jie, ZHAO Jun-jie, FAN Yi, et al. Corrosion Behaviors of Mo-Containing Low Alloy Steels Exposed in Simulated Acidic Marine Atmosphere Environment[J]. Development and Application of Materials, 2019, 34(6): 86-95.
- [28] MELCHERS R E. A New Interpretation of the Corrosion Loss Processes for Weathering Steels in Marine Atmospheres[J]. Corrosion Science, 2008, 50(12): 3446-3454.
- [29] 张杰, 蔡庆伍, 武会宾, 等. E690 海洋平台用钢力学性能和海洋大气腐蚀行为[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(6): 657-665.
- ZHANG Jie, CAI Qing-wu, WU Hui-bin, et al. Mechanical Properties and Marine Atmosphere Corrosion Behavior of E690 Ocean Platform Steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(6): 657-665.
- [30] 徐庭栋. 非平衡晶界偏聚和晶间脆性断裂的研究[J]. 自然科学进展, 2006, 16(2): 160-168.
- XU Ting-dong. Study on Non-equilibrium Grain Boundary Segregation and Intergranular Brittle Fracture Progress in Natural Science[J]. Materials Review, 2006, 16(2): 160-168.
- [31] 李琳, 陈义庆, 艾芳芳, 等. Q420qENH 钢在模拟海洋环境中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(10): 797-801.
- LI Lin, CHEN Yi-qing, AI Fang-fang, et al. Corrosion Behavior of Q420qENH Steel in Simulated Ocean Environment[J]. Corrosion & Protection, 2016, 37(10): 797-801.
- [32] TEWARY N K, KUNDU A, NANDI R, et al. Microstructural Characterisation and Corrosion Performance of Old Railway Girder Bridge Steel and Modern Weathering Structural Steel[J]. Corrosion Science, 2016, 113: 57-63.
- [33] 张宇, 刘静, 黄峰, 等. 三种桥梁耐候钢在模拟海洋大气环境中的耐蚀性能比较[J]. 武汉科技大学学报, 2018, 41(6): 401-409.
- ZHANG Yu, LIU Jing, HUANG Feng, et al. Comparative Study of Corrosion Resistance of Three Weathering Steels for Bridges in Simulated Marine Atmospheric Environment[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2018, 41(6): 401-409.
- [34] 张宇, 郑凯锋, 衡俊霖. 免涂装耐候钢桥梁腐蚀设计方法现状及展望[J]. 钢结构, 2018, 33(9): 116-121.
- ZHANG Yu, ZHENG Kai-feng, HENG Jun-lin. Summary and Enlightenment on Corrosion Design Method of Uncoated Weathering Steel Bridges[J]. Steel Construction, 2018, 33(9): 116-121.
- [35] 杜伟, 李鹤林. 海洋石油平台用钢的现状与发展趋势(一)[J]. 石油管材与仪器, 2016, 2(3): 5-7.

- DU Wei, LI He-lin. Status and Development Trends of Offshore Platform Steels I [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2016, 2(3): 5-7.
- [36] 张国宏, 成林, 李钰, 等. 海洋耐蚀钢的国内外进展[J]. 中国材料进展, 2014, 33(7): 426-435.
- ZHANG Guo-hong, CHENG Lin, LI Yu, et al. Progress on Marine Corrosion Resistant Steels[J]. Materials China, 2014, 33(7): 426-435.
- [37] 陈妍, 许莹, 田玉婷, 等. 海洋环境用耐蚀钢研发现状及发展趋势[J]. 鞍钢技术, 2022(1): 5-10.
- CHEN Yan, XU Ying, TIAN Yu-ting, et al. Research and Development Status on Corrosion Resistant Steels for Service in Marine Environment and Their Development Trend[J]. Angang Technology, 2022(1): 5-10.
- [38] JIA Jing-huan, CHENG Xue-qun, YANG Xiao-jia, et al. A Study for Corrosion Behavior of a New-Type Weathering Steel Used in Harsh Marine Environment[J]. Construction and Building Materials, 2020, 259: 119760.
- [39] RAFFO S, VASSURA I, CHIAVARI C, et al. Weathering Steel as a Potential Source for Metal Contamination: Metal Dissolution during 3-Year of Field Exposure in a Urban Coastal Site[J]. Environmental Pollution, 2016, 213: 571-584.
- [40] ZHU Ya-kun, MACDONALD D D, QIU Jie, et al. Corrosion of Rebar in Concrete. Part III: Artificial Neural Network Analysis of Chloride Threshold Data[J]. Corrosion Science, 2021, 185: 109438.
- [41] WANG Cheng-tao, LI Wei, WANG Yu-qiao, et al. Chloride-Induced Stray Current Corrosion of Q235A Steel and Prediction Model[J]. Construction and Building Materials, 2019, 219: 164-175.
- [42] CHOU J S, NGO N T, CHONG W K. The Use of Artificial Intelligence Combiners for Modeling Steel Pitting Risk and Corrosion Rate[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2017, 65: 471-483.
- [43] ZHI Yuan-jie, YANG Tao, FU Dong-mei. An Improved Deep Forest Model for Forecast the Outdoor Atmospheric Corrosion Rate of Low-Alloy Steels[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 49: 202-210.
- [44] ZHI Yuan-jie, JIN Zhi-hui, LU Lin, et al. Improving Atmospheric Corrosion Prediction through Key Environmental Factor Identification by Random Forest-Based Model[J]. Corrosion Science, 2021, 178: 109084.
- [45] OSSAI C I. A Data-Driven Machine Learning Approach for Corrosion Risk Assessment—A Comparative Study[J]. Big Data and Cognitive Computing, 2019, 3(2): 28.
- [46] PÉREZ-BROKATE C F, DI CAPRIO D, FÉRON D, et al. Three Dimensional Discrete Stochastic Model of Occluded Corrosion Cell[J]. Corrosion Science, 2016, 111: 230-241.
- [47] 杨小佳. 基于腐蚀大数据技术的含Cr低合金钢耐蚀性能调控研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
- YANG Xiao-jia. Research on the Control of Corrosion Resistance of Cr-containing Low-Alloy Steel Based on Corrosion Big Data Technology[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.
- [48] LAN Zhi-gang, WANG Xiu-tong, HOU Bao-rong, et al. Simulation of Sacrificial Anode Protection for Steel Platform Using Boundary Element Method[J]. Engineering Analysis With Boundary Elements, 2012, 36(5): 903-906.
- [49] WEI Xin, FU Dong-mei, CHEN Min-dong, et al. Data Mining to Effect of Key Alloying Elements on Corrosion Resistance of Low Alloy Steels in Sanya Seawater environment Alloying Elements[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 64: 222-232.

责任编辑: 刘世忠