

本刊专稿

腐蚀大数据技术及其智慧工程应用

李众, 张晓虎, 程学群, 张达威, 李晓刚*

摘要 腐蚀是威胁材料服役安全与使用寿命的核心因素。腐蚀数据具备多源异构、时间长、跨尺度、非线性等复杂特征。针对这些特性,腐蚀大数据技术通过融合各类传感器技术和建立多维智能关联数据库等方法,对材料腐蚀大数据进行挖掘建模与可视化,最终实现共享服务平台建设和在工程中的应用。在智慧工程应用场景中,腐蚀大数据技术实现3大核心功能:一是通过实时监测技术对桥梁钢结构、油气输送管网等关键设施的腐蚀状态进行动态追踪,结合多源异构腐蚀数据高通量采集即时捕捉腐蚀速率、环境参数对腐蚀大数据进行系统收集;二是通过多源数据挖掘技术,解析腐蚀数据与环境因子、运行工况的耦合规律,支撑防腐策略的动态优化;三是基于神经网络等人工智能模型,结合历史积累数据与机器学习算法,实现了对材料的剩余服役寿命的精准预测,为工程安全运维提供量化依据。此外,腐蚀大数据通过与数字孪生结合,通过构建腐蚀演化的三维虚拟模型,实现了工程结构健康状态的可视化预警与维护资源的智能调度,实现了腐蚀大数据共享与物联网平台的共同建设,最终推动传统防腐向“受击—诊断—决策—执行”的闭环管理升级。腐蚀大数据技术不仅推动了传统防腐技术向智能化、精准化转型,更成为智慧工程安全运维体系的核心支撑,在海洋工程、能源互联网等领域展现出广阔的应用前景。

关键词 腐蚀大数据;高通量采集;智能分析;实时监测;防护优化

材料作为装备和设施的基本构成部分,在服役时最主要的失效模式之一就是腐蚀。腐蚀是指材料在自然环境或人为因素的作用下,通过化学、电化学或物理反应,导致其结构、性能和外观的退化过程^[1]。从化工、石油、电力等重工业领域,到食品加工、造纸、纺织等轻工业范畴,乃至航空航天、海洋工程等高端科技行业,腐蚀现象广泛存在且危害巨大^[2]。在化工与石化行业,管道、反应釜、储罐等设备长期接触各类具有强腐蚀性的化学物质,极易因腐蚀而导致设备

损坏,不仅频繁引发停工停产,造成高昂的维修与更换成本,还可能因有害物质泄漏带来严重的环境污染与安全事故^[3-4]。据估算,腐蚀在全球范围内造成直接和间接的经济损失约占全球GDP(国内生产总值)的3%~4%^[5]。此外,腐蚀还带来了严重的环境污染和健康问题,间接损失更是难以忽视。因此,腐蚀不仅影响装备和设施的运行效率,还直接关系到生命财产和公共安全。因此,对材料的腐蚀现象进行有效的监测、预警,从而防止事故发生,显得尤为迫切。

对材料腐蚀数据进行收集、分析,从而对材料的腐蚀寿命进行评价和预测,目前面临一系列复杂的挑战和尚未解决的空白。首先,材料的腐蚀过程受多种

北京科技大学国家材料腐蚀与防护科学数据中心,北京
100083

收稿日期: 2024-12-16; 修回日期: 2025-06-08

基金项目: 中国兵器装备集团西南技术工程研究所 HDH 合作基金项目(HDHDW59A010301); 国家自然科学基金青年科学基金项目(C类)(52401074)

作者简介: 李众, 副研究员, 研究方向为腐蚀大数据及其应用, 电子信箱: zhongli@ustb.edu.cn; 李晓刚(通信作者), 教授, 研究方向为腐蚀大数据及其应用, 电子信箱: lixiaogang99@263.net

引用格式: 李众, 张晓虎, 程学群, 等. 腐蚀大数据技术及其智慧工程应用[J]. 科技导报, 2025, 43(17): 22-33; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.12.01747

因素共同制约,包括材料自身的组织结构、机械性能,以及材料所处的环境条件和应用场景等。复杂多变的制约因素使材料腐蚀的行为、速率和机理难以准确预测^[6]。腐蚀过程的多影响因素、数据的不确定性和提取困难,以及复杂的腐蚀行为和环境因子的综合作用,使得腐蚀评估和风险管理成为难题。在保证安全的前提下,平衡腐蚀防护和维护的经济成本与风险管理,仍是亟需解决的关键问题。解决问题的关键是如何进行大量的腐蚀数据积累,并在此基础上,深入理解材料的腐蚀速率、行为及其主要影响因素,并深入探讨其作用规律和演变机理,为预测材料的剩余寿命、延长服役时间提供坚实的基础。

中国材料腐蚀研究已历经 60 余年的发展和积累。从 20 世纪 50 年代起,中国便开始了材料自然环境腐蚀试验数据的积累与腐蚀机理的初步研究,建立了“全国大气、海水、土壤腐蚀试验站网”,为后续的研究奠定了前期的建设基础^[7]。20 世纪 90 年代,国家

科学技术委员会(国家科委)和国家自然科学基金委员会的重大项目支持,进一步推动了中国腐蚀研究的深入开展。随后,科技部专项支持建设,使得中国逐步形成了完善的环境腐蚀试验与评价技术体系。体系涉及 22 项试验规程和 13 项管理规程,通过了国家标准和行业标准的修订,全面支撑了中国材料腐蚀标准的制定。进入 21 世纪后,材料腐蚀研究平台在 2011 年成功通过科技部和财政部的认定,成为全球开放的公益性试验研究基地,建设成为了由 30 个国家野外试验站和 1 个平台中心组成的国家级自然环境腐蚀野外试验新平台^[8]。材料腐蚀研究平台构建了一个涵盖 30 余个国家及“一带一路”沿线的全球材料环境腐蚀与防护数据生产资源。通过长期的野外腐蚀试验和观测,27 个国家野外站及“一带一路”沿线 150 余个典型材料服役环境总计超过 2000 万条数据,持续开展 5 大类 800 余种材料、最长达 35 年的材料腐蚀数据积累,基本支撑了国家建设的需要(图 1)。

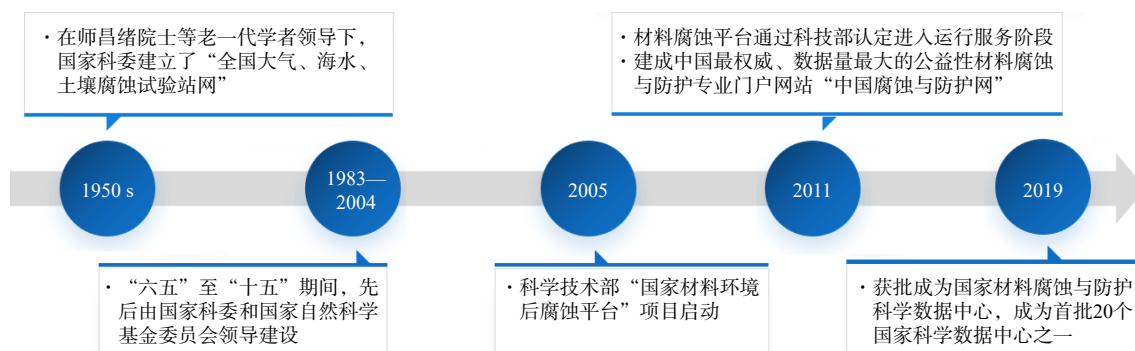


图 1 腐蚀大数据技术发展历程

长期以来,传统腐蚀监测方法在应对腐蚀问题中发挥了一定作用,但随着工业生产规模的不断扩大与环境复杂性的提升,其局限性日益凸显。挂片失重法作为较为原始且常用的监测手段,虽具有成本低、能观察腐蚀沉积物等优点,但其监测周期漫长,一般需 30~90 d,难以捕捉短期内腐蚀情况的波动变化,无法及时反映工艺参数快速调整对腐蚀速率的影响。并且,在高压、有毒等危险环境下,挂片的安装需在管道开孔,存在物料泄漏风险,同时该方法仅能间接推算管道均匀腐蚀状况,对局部腐蚀与坑蚀等监测无能为力,应用场景受到极大制约。以美国研制的 COR-TEN 钢为例,耗时 20 a 才得到极少量的腐蚀数据,为后续材料的耐蚀性设计与应用带来了挑战^[9]。

为突破传统腐蚀监测技术的瓶颈,满足各行业对腐蚀精准监测与防控的迫切需求,腐蚀大数据技术应运而生。2015 年,中国学者在《Nature》发表文章,首次提出材料腐蚀大数据概念及理论框架,为全球材料腐蚀学科迈入大数据时代奠定了理论基石^[10]。随着材料腐蚀大数据理论的深入发展,材料腐蚀科研模式逐渐从依赖个人经验向依托大数据的科研第 4 范式转变,涵盖高通量腐蚀数据采集、多元异构数据库构建、数据挖掘与建模以及实际应用等多个层面。在数据采集环节,基于电偶技术、电阻技术等多种腐蚀监测传感器不断推陈出新,配合多维智能关联数据库技术的进步,实现了海量腐蚀数据的高效获取与存储管理。国家材料腐蚀与防护科学数据中心在这一过程

中发挥了关键作用^[1],其历经国家科委腐蚀学科组时期、全国腐蚀网站建设时期等多个发展阶段,逐步构建起完善的数据管理与应用体系。截至2023年,国家材料腐蚀与防护科学数据中心依据相关的政策和技术标准,在全国建成30个野外实验站点进行腐蚀大数据监测系统布设,实现了每年TB量级的材料腐蚀数据在线采集、实时传输与共享,为各行业和区域基础设施以及重大装备建设工程提供了坚实的数据支撑^[12]。

通过自主研发技术并不断更新迭代,自行积累数据且不断整理深化,中国已逐步成为全球材料腐蚀研究的重要参与者,为全球材料腐蚀与防护领域提供了强有力的数据支持和理论指导。本文对腐蚀大数据的理论和技术创新、数据资源汇聚与整合,以及智慧工程应用进行系统总结。不同行业、不同环境下腐蚀数据的多样性、复杂性与海量性,对数据的高效处理、精准分析与深度挖掘提出了极高要求。如何将腐蚀大数据技术与先进的人工智能算法、物联网技术等深度融合,实现腐蚀的实时监测、精准预测与智能防控,仍是当前研究的重点与难点。在此背景下,深入开展腐蚀大数据技术相关研究,对于提升各行业腐蚀

防护水平,保障设备安全稳定运行,降低经济损失与环境风险,具有重要的现实意义与应用价值。

1 理论与技术创新

腐蚀大数据技术是指通过对先进的传感器、监测设备和信息技术进行系统性整合后,收集与腐蚀相关的多维度、高通量数据并进行整合、识别、清洗、分析、建模、预测等处理的新技术^[13]。腐蚀大数据具有多源异构性、动态性和复杂性等特点,能够有效监控腐蚀过程的演变趋势,并对潜在的腐蚀风险进行预测,为决策提供科学依据。这些数据涵盖了腐蚀速率、环境因素、材料特性及设备运行状态等多个维度。通过对采集来的海量数据进行深度分析,优化腐蚀防护策略,提高设备的安全性 with 运行效率,从而减少因腐蚀造成的事故和经济损失。如图2所示,材料腐蚀大数据由以下4个部分组成:多源异构腐蚀数据的高通量采集、多维智能关联数据库建设、腐蚀大数据挖掘建模与可视化、腐蚀大数据共享与物联网平台建设。



图2 腐蚀大数据的4个主要组成部分

本研究致力于为10大行业(石油、化工、电力、建筑、交通、航空、航天、钢铁、冶金、船舶)研发36种腐蚀监测传感器应用技术,如图3所示。通过采用多种探针技术(如电化学探针、电磁探针、光学探针等),结合传感器网络和智能化数据采集系统,可以

实现对不同材料在复杂环境下的实时监测。这些技术包括但不限于:基于电化学反应的腐蚀速率测量、表面损伤监测、电磁响应分析、腐蚀形貌成像及应力腐蚀监测等。根据不同腐蚀类型和工作环境对传感器技术进行了相应的优化,以适应各行业中材料腐蚀

检测的特定需求。例如,石油和天然气行业采用抗酸碱腐蚀传感器,航天与航空领域则需关注高温高压下

的应力腐蚀传感器;化工行业则重点关注针对化学腐蚀的智能探针。



图3 36种腐蚀检测传感器应用技术

1.1 多源异构腐蚀数据的高通量采集

腐蚀是材料在环境因素作用下逐渐退化的复杂过程,传统的腐蚀监测方法主要依赖手动检测或单一的传感技术,无法实现实时、全面的监控。因此,发展高通量数据采集技术成为解决这一问题的关键。为了解决这一难题,基于电偶探针、电阻探针等12种材料腐蚀监测原理与方法,研发出了能大幅度提高腐蚀监测效率和精度的腐蚀大数据高通量采集技术^[14]。针对工业设备腐蚀监测中的数据碎片化难题,创新性构建物联网技术驱动的腐蚀大数据高通量采集体系。通过部署针对实际工况和使用条件的传感器,实现金属构件腐蚀电流采集。同时,依靠多源开放式系统,可同时融合大气、土壤、水环境及工业环境等多种环境因子的在线实时采集,包括温度、湿度、氧含量、二氧化碳、 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 、大气压力、降雨量、凝露指数、土壤含盐量、土壤接地电位、土壤氧化还原电位、交直流杂散电流、土壤含水率、土壤电导率、pH值、电导率、氯离子含量、二氧化硫、硫化氢、二氧化氮、氨气等。该系统集成了多种类型的传感器,并通过无线网络或者实时存储将数据实时上传至云平台或者存储硬件中,能够高频次、大容量地采集多源异构大数据。多源开放式系统,能够同时融合来自大气、土壤、水环境及工业环境等多个环境因子的实时数据,全面监测和分析腐蚀过程。通过集成多

种传感器和监测设备,系统能够实时采集并处理大气中的温度、湿度、气压、污染物浓度等信息,土壤中的水分、盐分、酸碱度等数据,水体中的pH值、电导率、溶解氧等水质指标,以及工业环境中的化学气体、温度、压力等工业影响因子。可以同时采集近20种多源异构的腐蚀数据信息,1d数据信息远超过去10a,且具有尺寸范围小(毫米级~直径3m)、重量轻(毫克级)、寿命长,更换简单的优势。2015年,世界上首条腐蚀大数据流在阳坊采集,在国家材料腐蚀与防护科学数据中心诞生,涵盖了腐蚀电流、温度、湿度、污染指数、二氧化硫。直至2023年,已建成最大的联网观测腐蚀数据库,采集数据超过50亿条。通过融合这些多维环境数据,能够全面评估腐蚀的外部环境条件,进而对不同类型的腐蚀(如化学腐蚀、电化学腐蚀、机械腐蚀等)进行更加精确的监测和预测。腐蚀大数据技术不仅提高了腐蚀监测的精度和响应速度,通过大数据分析、人工智能等技术还可以对腐蚀趋势进行动态预测,及时发现潜在的腐蚀风险,为防护措施和设备维护提供科学依据。多源开放式系统的实施,将大大增强腐蚀管理的全面性、智能化和精确化,为各行各业提供更加可靠的腐蚀防护支持。

1.2 多维智能关联数据库建设

腐蚀智能数据库能够实现腐蚀数据的自动归类

和整理,通过整合多种传感器设备和监测系统,结合开放数据源,系统实时采集到的来自大气、土壤、水环境及工业环境等多个维度的腐蚀相关数据都可以在腐蚀智能数据库的框架下进行分类和储存。在数据采集过程中,腐蚀智能数据库能够自动进行数据清洗与预处理,确保数据的时效性、准确性与完整性,进而将其存储并结构化管理,以便后续高效查询与分析。知识推理是腐蚀智能数据库的核心功能之一。通过对腐蚀知识库中的数据进行图谱化建模,揭示不同腐蚀类型与环境因子之间的内在联系。例如,基于温湿度等环境条件自动推导出某种材料的腐蚀速率;同时评估防腐措施在特定条件下的效果,或预测某一材料在长期使用过程中可能出现的腐蚀风险。此外,通过智能推理挖掘潜在的未知关联,深入了解腐蚀过程中的复杂机理,为腐蚀防护提供新的理论依据。腐蚀智能数据库具备智能决策能力。通过结合机器学习算法和深度学习模型,能够根据历史数据、实时监测数据及推理结果,自动为用户提供个性化的防护建议和优化方案。这些决策涵盖材料选择、腐蚀监测周期、维护计划等方面,能够帮助不同行业有效应对腐蚀问题,降低维护成本,提升设备的安全性与使用寿命。

基于该智能数据库平台,并结合大数据分析 with 人工智能技术,为构建腐蚀科学大模型提供关键技术支持。腐蚀智能数据库综合多个领域的腐蚀数据与知识,全面描述腐蚀过程的演变规律,并对腐蚀的未来发展进行预测。随着数据资源的不断积累和采集技术的不断进步,腐蚀科学大模型将逐步实现从静态描述到动态预测的转变,能够对多材料、多环境条件下的腐蚀行为进行全方位分析。该模型在全球范围内为腐蚀防护的理论研究与实际应用提供强有力的技术保障。

1.3 腐蚀大数据挖掘建模与可视化

多源异构腐蚀大数据具有复杂性与多样性等既有属性,收集多源异构腐蚀大数据需要对材料服役过程进行大数据挖掘、建模与可视化研究。腐蚀大数据来源广泛,包括传感器监测数据、实验室数据、现场数据等多种形式,这些数据之间存在明显的异构性和复杂性。因此,本研究将探索高效的数据挖掘方法,识别和提取隐藏在大量数据中的潜在规律和特征,进

而构建数学模型,揭示材料成分、微观结构与耐蚀性能之间的内在关系。

通过结合材料的合金成分、微观结构特征及外部环境因素(如温度、湿度、压力和腐蚀介质等),构建多维度的模型框架。借助数据挖掘与建模,重点分析材料在不同服役环境下的腐蚀行为。该方法能够在一定程度上预测材料在长期服役过程中的耐蚀性能及其服役寿命。通过这些模型,不仅能够为设施装备的服役安全提供科学依据,还能为新型耐蚀材料研发提供理论支持,从而推动材料设计与优化的进程。

此外,腐蚀大数据技术涵盖图像识别与连续仿真,利用现有知识探索如何补充缺失的物理信息,从而实现腐蚀动力学过程的全面模拟与可视化。腐蚀过程通常具有非线性、时空变异性,且长期连续演变部分难以通过传统实验方法直接观测。在此背景下,借助腐蚀大数据中蕴含的丰富信息,结合高效的数值仿真技术填补实验观察中的空白,实现对腐蚀过程的多时空连续仿真,不仅能够动态展现腐蚀演化过程的时序变化,还能模拟不同环境因素对腐蚀行为的影响,揭示腐蚀形成的内在机制与规律。腐蚀大数据技术有效预测和控制腐蚀过程的发生与发展,为腐蚀控制策略的制定提供科学依据,为工业设备和基础设施的预防性维护与管理提供数据支持,降低腐蚀引发的安全隐患和经济损失。

1.4 腐蚀大数据共享与物联网平台建设

通过建立物联网监测平台与大数据智能系统,实现对设施装备材料腐蚀过程的全面监控与共享分析。物联网平台集成多种传感器与监测设备,能够实时采集不同材料在多种环境下的腐蚀数据,如温度、湿度、气体成分和电化学信号等,并通过无线网络将数据实时传输至云端数据库,在腐蚀大数据联网观测平台展示系统供各相关方共享。利用大数据技术对海量数据进行存储、处理与分析,利用机器学习与数据挖掘算法提取腐蚀演化的关键特征,进行趋势预测和风险评估,确保数据的共享与利用最大化。此外,平台结合智能决策支持系统,基于实时监测数据和历史趋势生成腐蚀风险预警,辅助决策者制定科学的维护与防护措施。物联网监测平台与大数据智能系统不仅提升了设施设备的安全性和运行效率,还通过共享数据与协同分析,推动了新型耐蚀材料研发和腐蚀

防护技术的创新与应用,为设备管理和维护决策提供了强有力的支持。

2 数据资源汇聚与整合

通过构建以“国家级野外台站-重点行业观测点-海外联合观测点”为核心的腐蚀大数据观测网络与数据采集平台,成功实现了腐蚀数据的全面监测与共享。研究成果包括以下3个方面。(1)联合自然环境腐蚀联网观测体系的建立。通过联合大气、水环境、土壤腐蚀等国家级野外台站,团队搭建了材料自然环境腐蚀的联网观测体系。不仅整合了多个领域的观测数据,还推动了数据资源的有效整合与共享服务,为材料腐蚀的多维度研究提供了全面的数据支持^[15]。(2)分中心与联合实验室的建设。团队进一步建立了多个分中心和联合实验室,旨在支撑重点区域和重点行业的腐蚀数据汇交与共享应用服务。通过这种方式,团队能够在不同领域和地区高效汇总、分析及共享关键的腐蚀数据,推动腐蚀防护技术的快速应用与推广。(3)全球合作与国际化数据共享平台的搭建。为推动全球范围内的腐蚀监测与研究合作,团队成立了国际顾问委员会,并组建了“一带一路”材料腐蚀科学数据联盟。通过这一平台,团队开展了全球材料腐蚀联网观测,并建设了一个国际化的数据共享服务平台,旨在促进跨国界的数据交流与技术合作,进一步推动腐蚀科学的全球发展与应用。

2.1 粤港澳大湾区分中心

国家材料腐蚀与防护科学数据中心粤港澳大湾区分中心的建设,旨在为国家和地方建设提供直接服务。粤港澳大湾区分中心的主要任务是围绕广东省,辐射粤港澳大湾区以及“一带一路”共建国家和地区,开展材料腐蚀与防护数据资源的汇聚、基础理论研究与共享。粤港澳大湾区分中心致力于发展基于高技术的材料腐蚀与防护“大数据”系列化采集技术,并构建全球领先的材料腐蚀大数据联网观测与研究平台,推动装备设施服役安全在线智能诊断技术的发展。

广州市南沙区商务局、广东省科技厅及广州市区科技局的支持确保了粤港澳大湾区分中心的高效运作。此外,粤港澳大湾区分中心在学术委员会和国际顾问委员会的指导下进行决策与建设,保证技术研发

的前瞻性和国际化水平。同时,粤港澳大湾区分中心与电网、风电、桥梁等行业的数据生产单位紧密合作,保障数据的及时采集与上报。

在国际合作方面,粤港澳大湾区分中心负责非洲、南美洲葡语国家的腐蚀大数据联网观测与数据共享工作。在区域合作方面,粤港澳大湾区分中心也积极开展合作,推动区域之间的腐蚀大数据的联网观测与共享。2021年,粤港澳大湾区分中心与澳门发展及质量研究所联合成立了实验室,主要开展数字化腐蚀监测技术和多环境耦合腐蚀加速试验方法等研究,服务大湾区及“一带一路”建设的重大需求。粤港澳大湾区分中心服务于多个企业,包括南方电网、虎门大桥、大唐电力、华为、美的及澳门发展及质量研究所等。4年来,分中心已发展为年产值过千万的高科技企业,成功实施了100多套腐蚀大数据监测系统,广泛应用于桥梁等基础设施的实时监测,通过实时数据采集与分析,提前预警潜在的腐蚀风险,并采取及时维护措施,从而有效延长设施的使用寿命并减少维护成本。澳门四桥重点工程,如图4所示,整桥采用了腐蚀大数据监测系统百余套,覆盖5个区域、36个桥梁位置、62个监测点位。通过实时采集和分析桥梁结构的腐蚀数据,提前预警潜在的腐蚀风险,及时采取维护措施,从而有效延长澳门四桥的使用寿命并降低维护成本。

2.2 海上风电分中心

腐蚀问题成为海上风电产业亟待解决的技术难题。目前,海上风电腐蚀监测的分散化与数据范式不统一,导致尚未形成统一的腐蚀数据汇聚平台,亟需在此领域抢抓机遇,突破现有瓶颈。因此,建设海上风电分中心并建立标准化的数据资源体系、统一的数据汇聚与共享平台显得尤为重要。自2021年起,联合国家电网福建省电力有限公司,建立了海上风电分中心。致力于推动覆盖全国的海上风电腐蚀监测体系建设,并打造海上风电腐蚀数字孪生平台(图5)。建设海上风电分中心的必要性体现在以下2个方面。首先,在“数字中国”战略框架下,亟需打通数字基础设施的关键环节,促进数据资源的高效流通与共享。其次,海上风电作为能源转型的重要组成部分,对新型电力系统的构建具有重要意义。该平台为耐腐蚀材料的研发与应用提供有力支撑,推动福建省海上

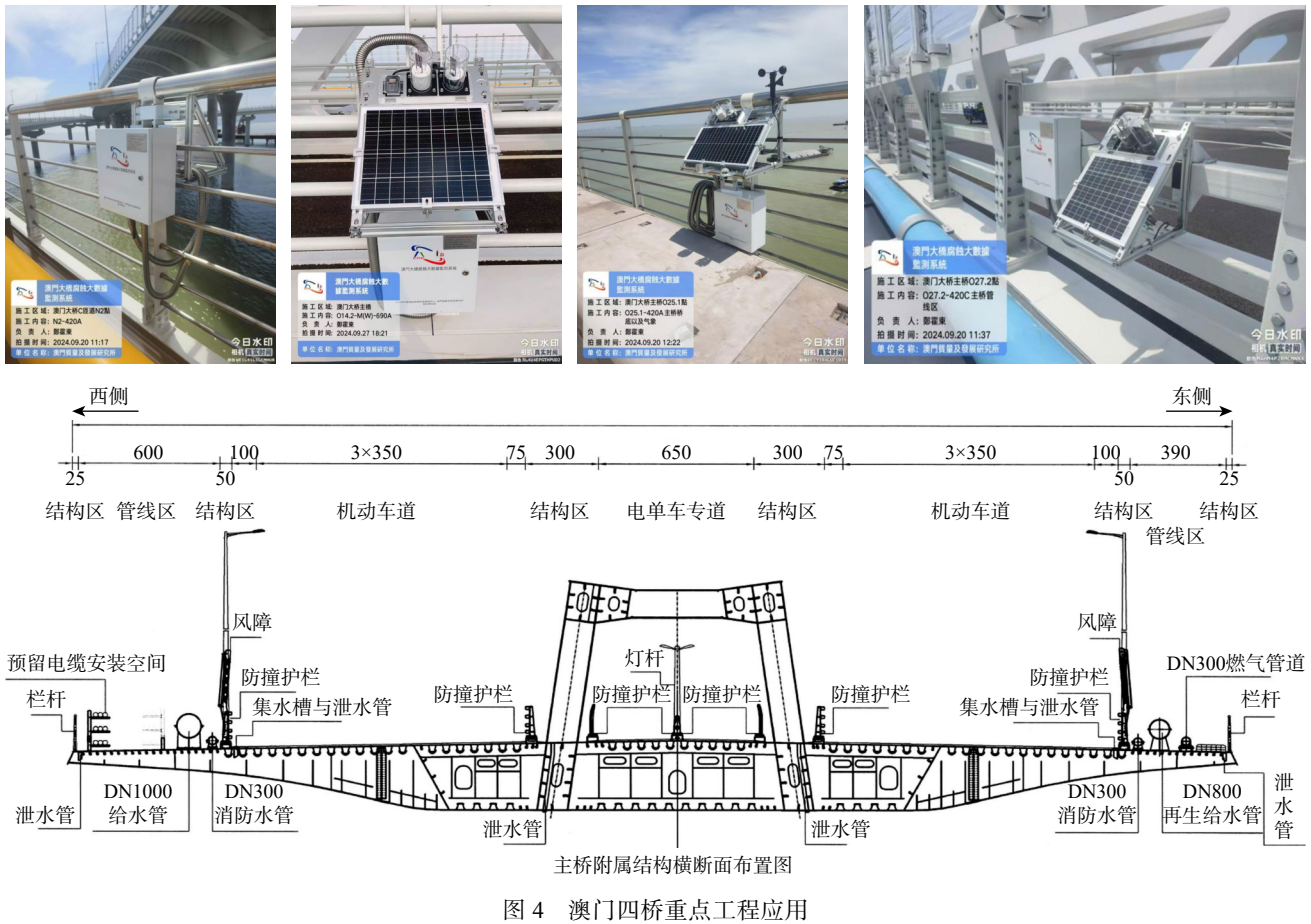


图 4 澳门四桥重点工程应用

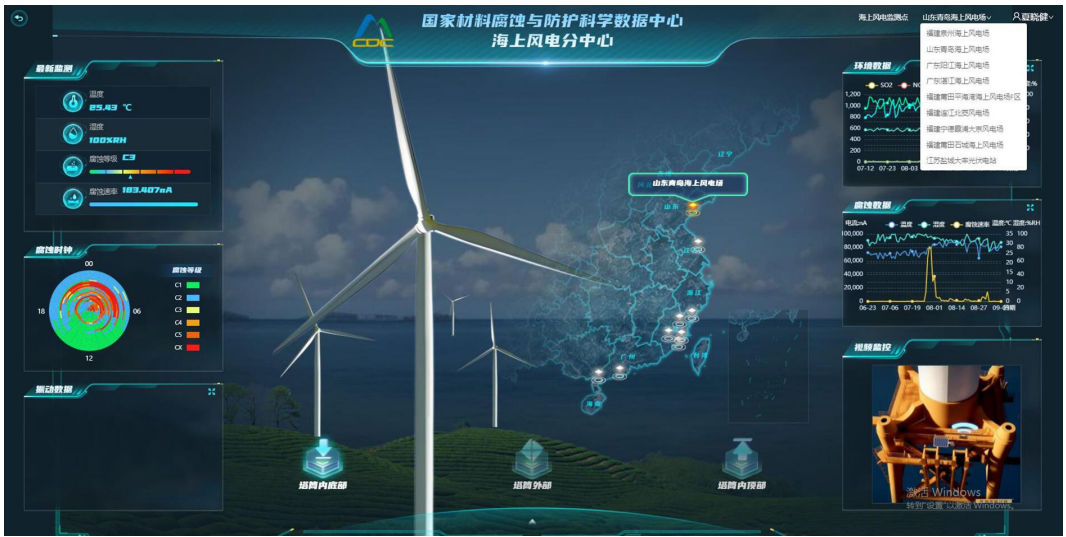


图 5 海上风电分中心

风电产业的高质量发展,保障设备的防护安全。海上风电分中心具备先进的腐蚀大数据采集、管理、分析和预警能力,成为具备全球影响力的大数据中心。

该分中心的建设任务包括:(1) 收集并服务海上风电腐蚀数据资源;(2) 建设腐蚀试验站点及联网观

测能力;(3) 构建数据信息资源的标准化及质量体系;(4) 研发数据分析、挖掘工具与数据产品研制;(5) 推动数据资源的开放及共享服务。通过这些任务的实施,目标是实现覆盖福建、广东、江苏、浙江、山东及辽宁 6 省,并辐射东南亚地区,为国家新能源出海及

“一带一路”倡议提供服务。分中心还有规模化的野外试验场,包括湄洲岛与东岙试验场,占地面积达13000 m²。依托全省输变电工程,已建成100个动态大气腐蚀监测点、62个现场暴露腐蚀试验点、104个土壤腐蚀监测点和30个输电杆塔气象监测点,形成了“一站多点”的联网观测系统。该系统自投入使用以来已稳定运行7年,并积累了6626.61万条试验数据和8863.94万条气象环境数据。该站点不仅是福建省内唯一的大气腐蚀野外科学观测研究站,也是全国唯一专注于电力设备腐蚀监测的站点,具有显著的环境代表性和行业代表性。

海上风电分中心建设的成果涵盖了多个层面。在数据层面,分中心整合了环境数据、腐蚀数据、气象数据与运行数据;在模型层面,建立了环境演化模型和环境效应模型;在应用层面,开展了虚拟仿真实验、关键特性预测、服役寿命评价与故障诊断预警等工作。这些研究成果填补了国家海上风电领域的野外观测空白,支撑了海上风电腐蚀防护与智慧运维学科的发展,促进了先进耐蚀材料的研发,并为重大工程建设提供了技术支撑。福建省在海上风电分中心建设中的优势不可忽视。作为“数字中国”的源头和实践起点,福建省在新型电力系统升级示范区的建设中发挥了重要作用。同时,福建省拥有全国最为丰富的海上风电资源,并且国网福建电力公司承建了国家级海上风电检测与试验研究基地,为该分中心的建设与运营提供了坚实的保障。

2.3 智慧铸管-耐蚀钢铁材料数据中心

2023年,联合新兴铸管股份有限公司,建立了中国首个耐蚀钢铁数据中心,并成功构建了钢材环境适应性快速评价技术,为耐蚀钢铁材料的研发和生产提供了有力保障。这一创新性的技术平台,显著提升了钢铁行业特别是在腐蚀防护和材料研发领域的竞争力。

智慧铸管-耐蚀钢铁材料数据中心通过集成多种传感器、监测设备以及实验室测试数据,为钢铁材料的腐蚀行为提供了实时、全面的监控能力。该数据中心的核⻯优势之一是能够在材料使用过程中实时预警腐蚀问题,及时进行有效应对,从而延长钢铁设施的使用寿命,并有效降低维修和替换成本。这种实时监控和预警机制显著提升了钢铁设施的运营效能。数据中心采用大数据分析技术和机器学习算法,对耐

蚀钢铁材料的性能进行精准建模和预测。通过分析长期积累的腐蚀数据,数据中心能够深入理解不同环境条件对材料耐蚀性能的影响,从而为新型耐蚀材料的研发、优化设计以及防护措施的制定提供科学依据。基于这一技术,数据中心能够准确预测不同材料在特定环境中的腐蚀趋势,支持材料选择、设计优化及防护策略的科学决策。智慧铸管数据中心还利用物联网和智能化监控技术,实现了材料腐蚀过程的实时跟踪与自动化反馈。这一智能化管理模式能够根据设备状态的变化,自动调整防护策略,从而减少人工干预,提高系统的响应速度与运行效率,显著提升设备的安全性和运行稳定性。

智慧铸管-耐蚀钢铁材料数据中心为钢铁行业带来前所未有管理效能。提升了材料研发的精准度和效率,优化了设施设备的维护策略。通过这一技术平台,行业能够提高铸管和耐蚀钢材料的腐蚀防护水平,降低运营成本,并保障设备安全。其在全球范围内耐蚀钢筋市场表现突出,具体体现在亚洲、欧洲、非洲及其他地区的广泛应用和销售,覆盖了中国、泰国、新加坡、印度尼西亚、越南、巴基斯坦等15个亚洲国家和地区,欧洲的12个国家,以及非洲和其他地区多个国家和地区,体现了这一技术的全球影响力。

3 智慧工程应用

3.1 数据中心服务与应用成效

2021年7月,国家材料腐蚀与防护科学数据中心应用理事会正式成立,旨在推动中国材料腐蚀与防护领域的数据共享与技术创新。自成立以来,数据中心在国内外基础设施与交通运输、能源与石化、军事与国防、航天与海洋工程、电子与通信及文化遗产保护多个领域取得了显著成就,并为各类用户提供了高效的服务。2021年,数据中心服务了112个用户单位,其中104个国内用户单位,8个国外用户单位,服务用户总人次为935;2022年,服务单位增至119个,其中106个国内用户单位,13个国外用户单位,服务总人次达到1027;2023年,数据中心服务了141个单位,其中126个国内用户单位,15个国外用户单位,服务用户总人次为1355,实现了全方位的增长。服务对象涵盖了国有企业(如首钢集团股份有限公司、南京钢

铁股份有限公司、中船重工第七二五研究所等)、科研机构(如清华大学、北京大学、中国科学院海洋研究所等)、民营企业(如华为技术有限公司、厦门双瑞船舶涂料有限公司、陕西凌雷电气有限公司等),以及多个海外用户(如比利时布鲁塞尔自由大学、荷兰代尔夫特理工大学、瑞典皇家理工学院等)。

3.2 腐蚀大数据在多个领域的应用与技术成果

数据中心在多个领域取得显著成果,推动了腐蚀大数据技术的应用与发展(图 6)。在耐蚀钢研发领域,数据中心依托前沿技术架构与海量数据积累,创新性地构建了一套融合腐蚀大数据分析、多维度性能模拟及全生命周期评估的高效评价技术体系。这套技术体系通过建立跨尺度腐蚀数据库,整合材料成分、环境参数、服役工况等多维数据,运用机器学习算法实现腐蚀机理的精准预测,从而将钢铁企业耐蚀新材料的研发周期缩短 40% 以上,研发效率实现质的飞跃。借助这一高效评价技术体系的强大支撑,数据中心目前已成功研发出 8 大核心系列、总计 150 余种高性能耐蚀钢产品。免涂装桥梁钢凭借优异的耐候

性能与免维护特性,在国内桥梁建设领域占据 95% 以上的市场份额;海洋耐蚀钢则针对复杂海洋环境优化合金配比,成为行业标杆产品。近 3 年来,耐蚀钢产品市场表现强劲,累计销售量达 1227 万 t,创造了显著的经济效益与社会效益。这些产品不仅成功应用于北京冬奥场馆设施、港珠澳大桥等 24 个国家级与省级重点工程项目,更在能源、交通、基建等关键领域发挥重要作用。与此同时,该技术体系已在首钢集团有限公司、鞍钢集团有限公司、南京钢铁集团有限公司、涟源钢铁集团有限公司、包头钢铁(集团)有限责任公司等 30 余家国内大型钢铁企业实现规模化推广,通过技术赋能推动整个钢铁行业向高端化、智能化方向转型升级,为中国耐蚀钢产业的技术进步与国际竞争力提升奠定了坚实基础。在“一带一路”重大工程方面,数据中心基于材料腐蚀大数据技术,实现了针对复杂气候环境的新钢种耐蚀性能高效评价。研发的系列耐蚀钢及配套技术已广泛应用于中马友谊大桥等国内外重点工程项目,满足了钢铁“走出去”战略需求。



图 6 智慧工程应用领域

在高速铁路领域,数据中心基于前沿技术研发的“材料服役行为在线监测系统”,已成功应用于路网实际运行的动车组全生命周期管理。这套系统依托分布式传感网络与智能数据处理平台,构建起覆盖高铁材料服役全场景的监测体系,创新性实现了材料腐蚀

速率、应力疲劳程度等关键参数的实时采集与动态分析。该系统在应用过程中完成了国际上规模最大的高铁材料腐蚀试验工程,通过部署于全国 26 个气候区的监测站点,持续追踪不同环境下材料的微观性能演变。截至目前,系统已累计采集国内外 132 万余条

有效数据,涵盖温度、湿度、盐雾浓度等 38 项环境因子与材料力学性能参数。基于这些海量数据,研发团队运用机器学习算法首次绘制出精细化的高铁运维环境腐蚀等级图,将全国高铁线路划分为 5 个腐蚀风险等级区域,为材料选型与维护策略制定提供了精准的数据支撑。这项研究成果凭借其技术前瞻性与工程实用性,已在川藏铁路、粤港澳大湾区城际铁路等 28 项国家级重大高铁工程中实现示范应用。在川藏铁路建设中,系统针对高原强紫外线与干湿交替的特殊环境,优化了桥梁钢结构的防腐涂层体系,使材料服役寿命提升 40% 以上;在沿海线路运维中,通过腐蚀等级图的精准指引,实现了接触网零部件的差异化检修,运维效率提高 35%。该系统的规模化应用,不仅推动了高铁材料领域从经验化运维向数字化、智能化管理的跨越,更在保障高铁基础设施服役安全与全生命周期成本控制方面发挥了关键作用,为全球高速铁路材料工程领域提供了可复制的中国方案。

在地下管网领域,数据中心融合物联网、大数据与人工智能技术,成功开发出中国首套地下管网腐蚀大数据智能监测系统,并同步构建起覆盖多维度数据的地下管网腐蚀数据库。该系统突破传统单点监测的技术瓶颈,通过部署分布式光纤传感网络与边缘计算终端,实现了地下管网全生命周期腐蚀状态的实时感知与智能预警。这套监测系统已全面应用于中国地下热力管网、城市自来水管网、海水淡化管网等复杂管线场景,可精准采集水压、流速、流量、温度、腐蚀电流等 20 余项关键运行参数。在城市自来水管网监测中,系统通过分析腐蚀电流密度与水质参数的关联性,提前预判管道内壁的电化学腐蚀风险;在海水淡化管网运维中,依托氯离子浓度实时监测数据,构建出沿海地区管网腐蚀速率预测模型,使腐蚀预警准确率提升至 92% 以上。截至目前,地下管网腐蚀数据库已累计汇聚全国 32 个省市的管网运行数据,形成包含材料属性、环境参数、腐蚀形态等维度的 860 万条专业数据记录。这些数据通过深度学习算法的持续训练,构建出适用于不同地质条件与介质环境的腐蚀预测模型,为管网防腐材料选型、阴极保护系统优化提供了量化决策依据。该技术体系不仅为智慧城市建设中地下基础设施的运维安全提供了数字化保障,更通过腐蚀风险的精准管控,使管网运维成本降

低 30% 以上,为城市生命线的智能化管理开辟了技术新路径。

在海上平台、舰船、管线及风电等重大装备领域,数据中心构建起覆盖全产业链的海洋材料腐蚀数据共享与联网观测体系,针对海上风电装备关键材料开展长期动态监测,系统积累海洋极端环境下的材料环境适应性数据。该观测网络整合了分布式传感器阵列、浮标监测站与海底数据采集终端,实现了从大气飞溅区、潮差区到海水全浸区的全海域腐蚀环境实时感知。目前,数据中心已完成 Q345C、Q345NH、S355ML 等低合金高强钢,以及钢材、紧固件钢、镀锌钢板、304 不锈钢等多类材质的长期暴露试验。在南海岛礁风电项目中,通过实时采集盐雾浓度、海浪冲击频率等环境参数,结合材料表面腐蚀电位变化数据,建立起海洋大气区钢材腐蚀速率预测模型;在渤海油气平台监测中,利用光纤光栅传感技术,实现了镀锌钢板镀层破损后的电化学腐蚀过程动态追踪,使腐蚀缺陷识别精度达到 0.1 mm 级。截至当前,该体系已累计获取海洋环境下材料腐蚀数据 480 万余条,涵盖温度、湿度、氯离子浓度、洋流速度等 30 余种环境因子及材料力学性能退化参数。通过数据共享平台,研发团队与宝武钢铁、中集来福士等企业协同优化耐蚀钢成分设计,成功开发出适用于不同海洋区域的新型耐蚀钢种。其中,应用于海上风电塔筒的 Q355NHGJ 耐候钢,经实海验证其腐蚀速率较传统材料降低 55%,使用寿命延长至 30 年以上。该技术体系不仅推动了海洋工程材料从“经验选型”向“数据驱动”的跨越,更通过全生命周期腐蚀数据的深度挖掘,为海上重大装备的安全服役与运维提供了核心技术支持。

在跨海大桥建设领域,数据中心为世界首座跨径超大的双层悬索桥——狮子洋大桥提供全链条技术支持。针对珠江口强台风、高盐雾的严苛海洋环境,团队通过构建材料服役性能数据库,模拟锚碇系统在干湿交替、氯离子渗透等复杂工况下的腐蚀行为,优化了锚固区高强度螺栓的防腐涂层体系与阴极保护方案,经加速腐蚀试验验证,使锚固系统服役寿命突破百年标准。同时,数据中心研发的智能腐蚀监测系统化身虎门大桥安全运维的“数字哨兵”。该系统通过布设光纤传感器阵列,实时采集钢箱梁焊缝腐蚀电位、桥面支座湿度盐雾浓度等参数,结合 AI(人工智

能)预警模型提前 72 h 预判局部腐蚀风险。应用以来,虎门大桥钢构件检修效率提升 40%,关键节点腐蚀隐患发现率达 100%,为粤港澳大湾区交通动脉的安全运营构建起数字化防护屏障。

在文物保护领域,数据中心深度融合材料科学与信息技术,创新开发出专为文物保护设计的腐蚀监测系统。该系统集成表面高通量表征、远程传感器测量与健康状况评估 3 大核心技术,构建起“微观-宏观-动态”三位一体的文物保护监测体系,为解决文物在存储、展陈环境中的腐蚀难题提供了数字化解决方案。相关技术在国家博物馆、三星堆博物馆等重要文物保护项目中均被应用。

在电子通信领域,数据中心为华为搭建起电子通信关键材料腐蚀数据库及共享系统,构建起覆盖材料腐蚀全生命周期的数字化管理体系。以等效加速模拟腐蚀试验为基础,结合机器学习算法,打造出具备环境适配性预测能力的智能平台。系统通过模拟全球不同地区的大气环境特征,如沿海高盐雾、工业污染区酸性气体等复杂工况,对芯片封装材料、电路板镀层等关键电子材料开展加速腐蚀试验,为国产通信设备的全球化布局提供了材料腐蚀防护的核心技术支撑。

在载人航天领域,数据中心针对空间站高真空、强辐射、极端温差的特殊环境,研发出材料腐蚀等效加速模型。在“天宫一号”腐蚀事故归零工程中,团队利用模型复现了舱外涂层老化机理,优化了防护体系;在“天宫二号”与“天和”核心舱选材时,通过加速试验预测材料在 15 年服役周期内的性能退化规律,确保了关键密封件、热控涂层等部件的可靠性,为中国空间站长期在轨安全运行提供了材料腐蚀防护的技术保障。

4 结论

腐蚀大数据技术已经成为材料腐蚀防护领域的重要研究范式,推动了国内外材料腐蚀监测网络和数据共享平台的建设,并促进了全球范围的合作研究与技术创新,推动了腐蚀防护学科的标准化、技术创新和理论研究的深入发展。随着科技的发展,尤其是物联网、大数据和人工智能等前沿技术的广泛应用,腐蚀大数据技术正在加速行业智能化、数字化转型,成

为解决腐蚀问题的重要工具。

该技术依托全国 30 个野外台站,年采集数据超 10 亿条,构建起 50 亿条多源异构数据的全球最大腐蚀数据库。物联网驱动系统实现关键参数毫秒级同步采集,多维智能关联数据库基于知识图谱技术实现全链条智能决策,如川藏铁路桥梁钢结构防腐涂层体系优化,使材料寿命提升 40%。利用先进的传感器和物联网技术,腐蚀大数据采集系统能够实时收集多维环境下的腐蚀数据,进行精确分析和趋势预测。通过数据的多源融合与智能分析,腐蚀大数据技术不仅提升了腐蚀监测的精度与效率,还为各行业提供了科学依据,优化了腐蚀防护策略。在应用上,其为国家战略工程提供支撑:高铁领域覆盖 26 个气候区,沿海线路运维效率提升 35%;地下管网在 32 个省市建数据库,预警准确率达 92%,运维成本降 30%;海洋工程开发的耐候钢使海上风电塔筒寿命延至 30 年以上。此外,其推动“一带一路”国际合作,推动 8 项行业标准制定。随着“一带一路”倡议的推进,跨区域、跨国界的腐蚀防护合作也愈加紧密,推动了全球腐蚀防护技术的共享和应用。随着 5G、物联网技术和大数据的不断进步,腐蚀大数据技术在未来将更加依赖于这些技术的综合应用,物联网多传感器的野外实时大数据采集和智能化数据处理代表了技术发展的新方向。通过对腐蚀大数据的深入挖掘与分析,能够更加精准地揭示腐蚀机理和过程演变,推动新型耐蚀材料和防护技术的研发。这些技术将为解决跨地区、跨行业的重大腐蚀问题提供强有力的技术支持,推动重大工程的安全建设。

在这一背景下,腐蚀大数据技术作为推动腐蚀防护领域发展的关键驱动力,肩负着促进技术转型和跨领域合作的重要使命。通过传感器、物联网和人工智能等技术,推动全球腐蚀防护数据网络建设,建设形成高效的数据采集、分析和共享平台。未来,腐蚀大数据技术将向极端环境防护、智能化监测、绿色防护等方向发展,构建多场耦合模拟平台和全球腐蚀环境数字地图。腐蚀大数据技术将促进国内外资源整合与信息共享,引领腐蚀监测和防护技术的创新,推动新型耐蚀材料的研发及智能防护系统的应用,形成腐蚀大数据产业集群,为智慧社会建设和可持续发展提供强有力的技术支持。

参考文献(References)

- [1] 黄国亮, 薛蔓凌, 字映竹. 金属材料腐蚀与防护机理研究述评[J]. 世界有色金属, 2018(6): 217-218.
- [2] Wang L, Zhang F, Jiao Z J, et al. Advances in LDHs for corrosion-resistant protection of Mg and Al alloys: A review[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2025, 13(3): 923-947.
- [3] Fayomi O I, Akande I G, Odigie S. Economic impact of corrosion in oil sectors and prevention: An overview[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1378(2): 022037.
- [4] Jin H Z, Wang M X, Xiang H Y, et al. A PSO-RBF prediction method on flow corrosion of heat exchanger using the industrial operations data[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 183: 11-23.
- [5] Iannuzzi M, Frankel G S. The carbon footprint of steel corrosion[J]. *NPJ Materials Degradation*, 2022, 6: 101.
- [6] Katayama H, Noda K, Masuda H, et al. Corrosion simulation of carbon steels in atmospheric environment[J]. *Corrosion Science*, 2005, 47(10): 2599-2606.
- [7] 徐迪, 杨小佳, 李清, 等. 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.
- [8] 李晓刚. 国家材料环境腐蚀野外科学观测研究平台绩效评估[J]. 中国科技投资, 2011, 12: 30-32.
- [9] 董瀚, 廉心桐, 胡春东, 等. 钢的高性能化理论与技术进展[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 558-582.
- [10] Li X G, Zhang D W, Liu Z Y, et al. Materials science: Share corrosion data[J]. *Nature*, 2015, 527: 441.
- [11] 叶春波. “国家材料腐蚀与防护科学数据中心”正式成为20个国家科学数据中心之一[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2020, 37(1): 41.
- [12] Pei Z B, Zhang D W, Zhi Y J, et al. Towards understanding and prediction of atmospheric corrosion of an Fe/Cu corrosion sensor via machine learning[J]. *Corrosion Science*, 2020, 170: 108697.
- [13] Wang B Q, Mu Y Q, Shen F M, et al. Identification of corrosion factors in blast furnace gas pipe network with corrosion big data online monitoring technology[J]. *Corrosion Science*, 2024, 230: 111906.
- [14] Wang B Q, Li Y R, Cheng X Q, et al. Data-driven optimization model customization for atmospheric corrosion on low-alloy steel: Incorporating the dynamic evolution of the surface rust layer[J]. *Corrosion Science*, 2023, 221: 111349.
- [15] 徐波, 吴俊升, 王瑞丹, 等. 材料腐蚀野外站联网观测研究工作进展与展望[J]. 中国科技资源导刊, 2023, 55(1): 25-34.

Corrosion big data technology and applications in intelligent engineering

LI Zhong, ZHANG Xiaohu, CHENG Xuequn, ZHANG Dawei, LI Xiaogang*

National Materials Corrosion and Protection Data Center, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Abstract This paper reviews corrosion big data technology and its applications in the intelligent engineering, in systematically. Corrosion serves as an essential factor, which threatening the service safety and service life of engineering materials. Corrosion data exhibits complicated characteristics, such as multi-source heterogeneity, long duration, cross-scale, and non-linearity. These characteristics, corrosion big data technology integrate various sensor technologies and establishing multi-dimensional intelligent correlation databases, which can support the mining and visualizing of material corrosion big data to achieving the construction of corrosion big data sharing platform and engineering applications services. In intelligent engineering applications, corrosion big data technology possesses three core functions. First, real-time monitoring technologies had been applied on recording the corrosion status of facilities such as bridge steel structures and oil-gas transmission pipeline sin dynamically, combined with high-throughput collection of multi-source heterogeneous corrosion data, to instantly record corrosion rates and environmental parameters for systematic data gathering; Analyzing the coupling laws between corrosion data, environmental factors, and operational conditions through multi-source data mining technology to support dynamic optimization of anti-corrosion strategies; Achieving precise prediction of the service life of engineering, based on artificial intelligence models (e.g., neural networks), combined with accumulated corrosion big data and machine learning algorithms, providing quantitative basis for engineering safety operation and maintenance. Furthermore, by integrating with digital twin technology, corrosion big data constructs a 3D virtual model of corrosion process to achieve visual warning of engineering maintenance status. The joint construction of corrosion big data sharing platforms is promoted and advancing the traditional anti-corrosion technology towards to closed-loop management system, "perception-diagnosis-decision-execution". Corrosion big data technology supports and promotes the intelligent and precise transformation of traditional anti-corrosion technologies, and support the safety operation and maintenance system of smart engineering, demonstrating broad application prospects in fields such as marine engineering and energy internet.

Keywords corrosion big data; high-throughput data collection; intelligent analysis; real-time monitoring; protection optimization ●



(责任编辑 王微)