

材料腐蚀野外站联网观测研究工作进展与展望

徐 波¹ 吴俊升² 王瑞丹¹ 李晓刚²

(1. 国家科技基础条件平台中心, 北京 100038; 2. 北京科技大学国家材料腐蚀与防护科学数据中心, 北京 100083)

摘要: 联网观测研究是野外站科学观测研究的一种组织形式和运行机制, 已经成为材料腐蚀领域一种普遍的研究范式, 为材料腐蚀基础研究和重大工程建设提供了重要的材料腐蚀联网观测科学数据支撑。在阐述国内外在材料腐蚀野外站联网观测领域的工作进展, 以及我国材料腐蚀野外站联网观测研究与数据共享应用成效的基础上, 探究发展需求与趋势, 探讨材料腐蚀野外站联网观测研究模式, 并对未来材料腐蚀野外站联网观测研究工作提出建议。

关键词: 野外科学观测研究站; 材料腐蚀; 联网观测; 观测试验网络; 数据积累

DOI: 10.3772/j.issn.1674-1544.2023.01.004

CSTR: 15994.14.issn.1674.1544.2023.01.004

中图分类号: T19

文献标识码: A

Research Progress and Prospect of Materials Environmental Corrosion Observation Station Networks

XU Bo¹, WU Junsheng², WANG Ruidan¹, LI Xiaogang²

(1. National Science and Technology Infrastructure Center, Beijing 100038; 2. National Materials Corrosion and Protection Data Center, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract: Networked observation and research is an organizational form and working mechanism of observation and research stations, which has become a common research paradigm in the field of material corrosion observation station network in the world, and established various forms of field observation and research networks of material corrosion. Large-scale international cooperative observation and research projects on atmospheric corrosion of materials have been carried out, as to provide important scientific data for basic research of material corrosion and major engineering construction. This paper mainly introduces the work progress and development trend in the field of materials environmental corrosion observation station networks, and proposes suggestions for future development.

Keywords: observation and research station, materials corrosion, networked observation and research, observation and experiment network, data accumulation

作者简介: 徐波 (1988—), 男, 国家科技基础条件平台中心副研究员, 研究方向为科技资源管理; 吴俊升 (1976—), 男, 北京科技大学教授, 研究方向为材料腐蚀与防护; 王瑞丹 (1965—), 女, 国家科技基础条件平台中心研究员, 研究方向为科技资源管理 (通信作者); 李晓刚 (1963—), 男, 北京科技大学教授, 研究方向为材料腐蚀与防护。

基金项目: 科技基础资源调查专项“‘一带一路’沿线材料腐蚀及典型环境特征科学调查”(2019FY101400); 国家科技基础条件平台中心委托项目“国家野外站数据联网管理与联网研究工作机制研究”(20210624)。

收稿时间: 2022 年 8 月 26 日。

0 引言

野外站联网观测研究是指选取具有代表性的自然区域和环境特征建设的野外科学观测研究站,以长期定位动态观测和野外暴露试验为基本手段,采取统一的观测设备、统一的观测方法和统一的观测时序,通过组站联网在区域或更大空间尺度上联合开展野外观测和试验,获取长期连续、网络化、大尺度的野外观测与试验数据,获得科学认识和发现科学规律,解决区域发展和国家层面的重大科学问题,从而构成多站点、网络式的科学观测研究与数据服务体系。野外站的联网观测研究已经成为国际上各学科领域野外科学观测的一种普遍的研究范式,包括美国、欧洲、日本等发达国家都建立了各种形式的材料腐蚀野外观测试验研究站网络,并集中发起了多项大规模的材料大气腐蚀国际联网观测试验研究计划。我国早在20世纪50年代末,建立了“全国大气、海水、土壤腐蚀试验站网”,开始了材料自然环境腐蚀野外观测试验工作。此后,以“国家材料环境腐蚀网站”牵头组织,长期开展了典型环境下材料腐蚀的野外站联网观测试验与数据积累工作^[1]。

传统基于单个野外站的长期定位观测和试验研究,可以获得该站所代表自然特征环境下的长序列材料环境腐蚀科学数据^[2],这对于野外站所代表的特定观测研究对象是有价值的,也是很有必要的。但从解决重大共性科学问题的角度看,单个野外站所能代表的区域环境特征是有局限的,所揭示的材料腐蚀行为和科学规律也不能无条件地外推。只有经过长期多站点联网观测试验研究才能回答不同材料在不同气候、不同环境和不同地域的腐蚀基础科学问题,并实现对腐蚀环境严酷度的科学划分,为新材料研发和工程装备选材设计和寿命评价提供基础数据支撑。

随着现代科学技术和全球化的发展,材料腐蚀野外科学观测研究更加注重建立区域观测系统和全球化研究网络,更加注重使用自动化、智能化观测仪器设备开展联网观测,通过跨区域联网

观测研究,协同解决材料腐蚀学科共性科学问题或工程设施重大安全问题。本文将重点介绍国内外在材料腐蚀野外站联网观测领域的工作进展和发展趋势,提出发展建议。

1 国外研究工作进展

1.1 国外材料腐蚀野外站网络建设情况

随着全球经济一体化进程的加快及生态环境问题的全球化,国外发达国家在材料环境腐蚀野外观测试验研究领域已逐渐突破区域限制,向全球化联网观测研究方向发展。据不完全统计,目前世界各国已建有具有一定规模的材料腐蚀野外站500多个,且多数都形成了联合试验观测网络体系。

美国国家标准与技术研究院(NIST)领导了全美国内大规模的材料环境腐蚀野外观测试验,建立了由50多个野外台站组成的全美材料环境腐蚀观测研究网络,至今有近120年的历史,其主要工作就是持续对各种材料和装备长时间野外科学观测与研究。由美国ATLAS材料试验技术集团建立的两大暴晒场——佛罗里达暴晒场和菲尼克斯暴晒场分别建于1931年和1948年,暴晒场占地几十万平方米,规模很大,并逐渐形成了国际化的材料腐蚀野外观测试验网络,包括了美洲、欧洲、亚洲和大洋洲的20余个户外试验暴露观测站点。通过对全球典型站点联网试验观测,开展数据比对,极大地支撑了美国的材料产业发展及其全球化扩张。另外,美国军方也建有规模很大的材料环境腐蚀试验网络,包括在世界各军事基地都长期开展关键军工材料的腐蚀试验及数据积累^[3],为其军工产品的全球化发展提供服役安全保障。

欧洲以瑞典、德国、法国、荷兰等国家通过协同合作建立了覆盖欧洲典型地区的腐蚀试验观测网络,组织发起了多项联网观测试验研究计划,为欧盟国家产品质量提升和标准制修订提供了重要的保障。近期,欧洲腐蚀联盟(EFC)组织发布了目前活跃在欧洲的43个材料腐蚀野外站点目录^[4]。其中,德国有12个野外站,瑞典有

6 个野外站, 意大利、捷克、波兰分别有 5 个野外站。欧洲腐蚀野外站所处的环境涵盖了海洋、城市、乡村、工业等多种环境特征, 大气环境腐蚀严酷度从 C1 到 CX 都有体现, 基本覆盖了欧洲全境和典型自然环境特征。亚洲的日本在本岛范围内离海不同距离布设了数十个试验站点组成的试验观测网络, 开展了系统的数据积累工作。而且, 随着日本制造装备产品的全球化发展需求, 日本在全球各地开展了非常系统的材料腐蚀数据积累工作, 如 10 余年前日本在泰国等东南亚地区开展了大范围的材料腐蚀观测试验及数据收集活动, 这为包括日本高铁和汽车等产品出口东南亚提供了强有力的竞争力。印度早在 1993 年就开启了全国各地不同典型环境区域(工业、海洋、城市、乡村等) 40 余个野外站点的材料腐蚀野外联网观测试验, 通过对低碳钢、镀锌钢、锌和铝合金等典型工程材料为期 11 年的野外联网暴晒试验观测, 系统获得了不同种类材料在印度境内的腐蚀规律和主要影响因素, 并开展了腐蚀环境分级分类, 绘制了全国腐蚀地图^[5]。其他国家如东南亚的越南在其境内从南到北的沿海和内陆典型环境建立了由 13 个野外站组成的材料腐蚀观测试验研究网络, 长期开展了各类材料的环境腐蚀野外观测试验研究和数据积累。

1.2 国际重大材料腐蚀野外站联网观测研究计划

从 20 世纪 80 年代起, 国际上集中发起了 ISOCORRAG、ICP/UNECE 和 MICAT 等 3 项大规模的材料大气腐蚀联网观测国际合作研究计划, 吸引欧洲、美洲、亚洲和大洋洲 38 个国家的广泛参与。

(1) ISOCORRAG 合作计划: 由国际标准化组织(ISO)金属和合金腐蚀技术委员会(ISO/TC 156)在 1986 年组织发起的一个为期 12 年的全球化材料腐蚀观测试验合作计划(ISOCORRAG 合作计划)^[6], 共有 13 个国家的 53 个材料腐蚀野外观测试验站点参加了该项合作计划, 涉及工业、城市、乡村、海洋、滨海等多种典型气候环境。该计划所有参与方都按照统一的要求制备加工材料试样, 并尽可能地同步开展

全球化的联网观测试验, 在全球范围内系统积累包括碳钢、铜、锌、铝等典型金属材料不同暴露时间的腐蚀速率。各试验站点还同步观测获取包括温度、湿度、污染物(硫氧化物、氯离子)等环境因素数据。通过长期连续试验观测, 对协作完成的材料腐蚀数据和环境数据进行统一规范化处理, 首次系统地获得了全球典型环境下常用金属材料的环境腐蚀数据。该计划为验证和修正 ISO 大气腐蚀性分级体系提供了详实的全球化联网试验观测数据, 并直接支撑了 ISO 9223 ~ ISO 9226 材料腐蚀环境分级分类和试验方法的系列化标准的修订工作。该套标准已成为材料腐蚀环境划分和选材设计广泛使用的标准依据。

(2) MICAT 合作计划: 1988 年, 国际大气腐蚀计划“伊比利亚美洲大气腐蚀地图合作计划”(MICAT)^[7]启动。该计划为期 6 年, 包括阿根廷、巴西、智利、哥伦比亚、哥斯达黎加、古巴、乌拉圭等 14 个国家, 包含伊比利亚美洲 75 个大气腐蚀暴露试验点。与 ISOCORRAG 计划类似, MICAT 合作计划也是通过在联网试验站点开展长期的联网观测试验, 研究伊比利亚美洲地区典型环境下金属材料的腐蚀机理和规律, 积累典型材料腐蚀数据, 并合作开展伊比利亚美洲地区大气腐蚀地图绘制。

(3) ICP/UNECE 合作计划: 众所周知, 空气中的酸化污染物是造成金属材料腐蚀加剧的主要原因之一, 但还缺乏充分的实验依据来量化研究这些污染物的影响机理和行为。为此,《长程跨界空气污染公约》执行机构决定在联合国欧洲经济委员会(ICP/UNECE)内启动一项材料腐蚀联网观测试验计划——ICP/UNECE 合作计划^[8]。该计划始于 1987 年 9 月, 先后有 24 个国家 55 个材料腐蚀野外观测试验站点加入了这项国际合作计划中。该合作计划的主要观测目的是定量评估硫污染物、NO_x 和其他污染物以及气候参数对典型材料大气腐蚀的影响。

尽管 ISOCORRAG、ICP/UNECE、MICAT 这 3 个著名的国际性材料大气腐蚀联网观测合作研究计划都具有其各自的特点, 但他们都出于共同

的目的,就是通过不同国家和地区的共同协作,全面覆盖了美洲、欧洲、亚洲等典型的自然气候和各种污染环境特征,从全球尺度上充分了解不同环境下金属材料的腐蚀行为,研究建立腐蚀损伤与环境因素定量化的关系和规律,以便人们能更好地了解材料的大气腐蚀问题,并科学划分大气腐蚀环境等级。在三大合作计划推进过程中,形成了良好的协作和互动,不同计划之间互有交叉、互有协作,共享数据和研究成果,充分体现了全球化联网合作研究的重要性^[8]。

1.3 “一带一路”材料腐蚀联网观测研究计划

上述3项区域性和全球化材料大气腐蚀联网观测国际合作研究计划中,整个亚洲地区也仅有日本参与了其中的很少一部分工作。因此,在全球化的材料腐蚀联网观测研究计划中,缺少了代表亚洲等区域性环境腐蚀数据,这项工作的完整性和系统性还有待进一步完善。

近年来,随着“一带一路”建设和全球化的发展,中国工程装备和产品的全球化应用成为趋势。“一带一路”建设是一项宏大的系统工程,横跨亚欧非大陆及附近海洋甚至极地,走出去的中国工程装备从亚欧大陆到非洲甚至延伸到拉美、南太等区域,跨越南海、太平洋、印度洋、红海、地中海等海洋环境。但是长期面临多样化、全球化的复杂服役环境,工程装备材料的环境腐蚀老化失效问题十分严重。

在过去的国际化材料腐蚀观测研究计划中,涉及“一带一路”沿线国家和地区的材料腐蚀联网观测试验研究很少,材料的环境腐蚀数据十分缺乏,对该区域材料腐蚀规律和特征认识不清,导致“一带一路”基础设施和工程装备建设过程中缺乏典型材料的环境适应性基础数据支撑。在此背景下,在科技部科技基础资源调查专项的支持下,于2020年启动了“‘一带一路’沿线材料腐蚀及典型环境特征科学调查”项目,通过开展国际合作,依托布设在东南亚、南亚、中东、东北非等海上丝绸之路沿线的中亚、俄罗斯至欧洲及地中海等丝绸之路经济带沿线以及南极等地区的腐蚀试验观测站点,协作开展典型材料的环境

腐蚀联网观测试验,获取了腐蚀数据和相关资料,对典型材料在“一带一路”沿线不同国家和地区自然环境中的腐蚀行为规律和特征进行深入的研究,并对“一带一路”沿线典型腐蚀环境等级进行划分。这是首次由我国主导开展的区域性国际材料腐蚀野外联网观测研究计划,“一带一路”沿线涉及的自然环境十分复杂严酷,相关研究成果是对其他国际性材料环境腐蚀研究计划的补充完善,也是推动落实共建“一带一路”国际合作倡议的重要举措。

2 国内研究工作进展

2.1 我国材料腐蚀野外站网络建设情况

我国疆域辽阔,自然环境复杂,材料在不同的环境中腐蚀率可以相差数倍乃至几十倍,材料腐蚀数据具有不可引进和不可替代的特征。因此,只有开展长期的材料腐蚀野外试验观测,获取材料腐蚀数据,才能掌握我国典型自然环境条件下材料的腐蚀行为和规律。20世纪50年代,相关部委根据行业发展需要,先后建立了包括大气、水环境、土壤环境的材料腐蚀野外试验站点近200个,持续开展了各类型材料的环境腐蚀试验观测与数据积累工作,为国家重大工程建设和装备制造提供了重要支撑。为了进一步加强野外科学观测研究站的建设水平,科技部从2002年起,在生态系统、大气本底与特殊环境、材料腐蚀、地球物理等领域推动遴选整合国家级野外科学观测研究站的相关工作,到2006年年底,全国共遴选和认定了28个材料腐蚀国家野外科学观测研究站。科技部以国家科技基础条件平台建设专项的形式,对野外站网络建设运行和野外科学观测研究进行了长期资助,极大地提升了国家野外站的建设水平和研究能力。

为推动新时期国家野外站建设发展,科技部于2019年6月优化整合,形成了国家野外科学观测研究站新体系,其中材料腐蚀与设施装备安全领域的野外站共有27个,新时期的国家野外站将进一步加强条件保障能力建设,完善工作和生活条件,提升国家野外站的科学观测和试验

研究水平，促进原创性重大科技成果产出，为科技创新和社会经济可持续发展提供支撑。国家野外科学观测研究站已成为重要的国家科技创新基地，是国家创新体系的重要组成部分。

2.2 全国材料腐蚀联网观测试验研究工作进展

我国材料的自然环境观测试验及数据积累在解放前是空白，新中国成立后在国家经济建设全面发展和科学研究的推动下，成立了全国科学技术委员会机械工业组金属腐蚀及防护协调分组，并于 1957 年 11 月建立了“全国大气、海水、土壤腐蚀试验网”，正式开始了我国材料自然环境腐蚀站网建设与联网观测试验工作。我国材料自然环境腐蚀观测试验与数据积累工作已经持续了 60 余年，集中开展了我国历史上 4 次大规模的材料腐蚀联网观测试验任务，系统积累了 600 余种常用材料在我国典型自然环境下的环境腐蚀数据，全面支撑了我国的经济建设和科技创新发展^[1, 9-10]。

从 1958 年开始，在全国科技委机械工业组金属腐蚀及防护分组的组织与协调下，组织机械部、化工部、冶金部、石油部、交通部等行业部门的相关单位开展了我国历史上第一次全国范围内的大规模材料环境腐蚀联网观测试验与数据积累工作，参与单位按试验规程中的试验周期定期取样，统一进行测试分析和数据处理，获得了一批重要的试验观测研究成果，为我国材料腐蚀野外科学观测研究奠定了坚实的基础。1981 年至 2003 年年底，在全国恢复与新建了 51 个试验站，初步建成了全国环境适应性试验站网体系，开展了我国历史上第二次大规模材料腐蚀野外站联网观测试验与数据积累工作。投试的典型材料共有六大类（包括黑色金属、有色金属、混凝土、高分子材料、保护层、电缆光缆）353 种，经过长期的联网观测试验，系统积累了各种常用材料在我国典型自然环境下的环境腐蚀数据，并首次建立了我国材料环境腐蚀数据库，实现了网络化的数据存储与共享。2005 年，科技部系统地进行遴选整合，建立了由 28 个试验站构成的国家材料环境腐蚀野外试验站网络，并组织开展了我国

历史上第三次大规模材料腐蚀联网观测试验与数据积累工作，共计投试五大类材料（包括黑色金属、有色金属、建筑材料、涂镀层及高分子材料）123 种，共 3 万余件试样。2011 年，科技部和财政部将“国家材料环境腐蚀野外科学观测研究平台”认定为首批国家科技基础条件平台，构建了由国家野外试验站和科学数据中心构成的长期的国家级材料环境腐蚀联网观测和数据生产积累平台体系，持续组织开展了我国历史上第四次大规模材料环境腐蚀联网观测试验与数据积累工作。这次联网观测试验研究主要针对国家重大工程建设和重大科研活动等对材料腐蚀数据需求，先后开展了包括我国典型热带海洋环境下工程材料腐蚀数据和腐蚀规律研究、川藏地区材料腐蚀联网观测研究、京津冀地区材料腐蚀试验研究、深海腐蚀试验研究等专题材料腐蚀试验与数据积累，有效地支撑了各行业对腐蚀数据的迫切需求^[11]。

2.3 基于材料腐蚀大数据监测的联网观测研究

目前，国际上开展材料环境腐蚀研究所需的腐蚀数据和环境参量数据主要来自野外站开展的传统的长期挂片试验观测所积累的数据，无论在时间上还是空间上都具有碎片化的特点，并且存在试验周期长、数据代表性差等缺点。因此，基于多传感器的物联网技术，实时动态采集材料腐蚀及环境参数数据，进而全面系统了解材料腐蚀行为和过程机理，已成为国际上的研究热点。随着物联网及无线通信技术的发展，各种基于先进多传感器的高通量腐蚀大数据采集技术发展迅速，逐渐开启了新时期野外站联网观测研究的一种新范式。

近年来，国内在基于智能传感器物联网技术的材料腐蚀大数据联网观测研究方面取得了很大的进展。以国家材料腐蚀与防护科学数据中心为代表的单位研发了系列化的腐蚀大数据智能感器采集技术，通过开展腐蚀大数据联网观测工程建设，实现了腐蚀数据的实时智能化高通量在线监测。目前，在国家材料腐蚀野外站和重大工程装备设施等布设了由数百个观测站点形成的材料腐

蚀大数据观测研究网络。基于在线传感器的腐蚀大数据监测系统,与传统现场腐蚀挂片数据积累相比,其连续数据采集具有典型的高通量大数据特征,可同时采集包括腐蚀电流、腐蚀电阻、电化学阻抗、温度、湿度、污染物等腐蚀及环境数据,数据采集频率可自由设置,并实现了数据的实时传输、存储和共享应用。借助于新时期的材料腐蚀智能化无线大数据联网观测模式,每个站点每天产生数万条腐蚀监测数据,形成了高度集成的联网观测和数据汇聚模式。腐蚀大数据共享服务平台可为用户提供高质量数据共享;基于腐蚀大数据存储、数据加工、数据挖掘、模拟仿真等研究,对工程装备安全运行及材料服务过程监控具有重要的支撑应用价值^[12]。

3 我国应用成效

3.1 大气环境腐蚀数据为我国典型自然环境腐蚀性分级和选材提供了依据

材料大气环境腐蚀性分级研究一直是国内外大气腐蚀关注的重点,如前所述国际上开展的大气腐蚀联网观测研究计划对全球大气环境腐蚀分级分类研究作出了重要的贡献,并为ISO 9223 ~ ISO 9226 系列标准的制(修)订提供了依据。在此基础上,我国参照ISO相关标准制定了包括GB/T 15957、GB/T 19292等大气环境腐蚀性分级标准。依据相关的标准,经过4次大规模的全国材料腐蚀野外站联网观测试验研究,获得了各种材料在我国典型自然环境中的腐蚀数据和环境因素数据,通过开展数据深入挖掘,建立和完善了材料腐蚀环境数据库,并根据现有标准全面完成了全国材料腐蚀环境区划等级划分。基于11个野外站高分子(三元乙丙橡胶EPDM等)老化联网观测数据,首次绘制了全国高分子老化分布图,并通过聚类分析,将老化程度划分为5个等级,为跨区域工程选材提供参考依据。

依托材料腐蚀野外站网络,选择高铁工程使用最为广泛的4大类25种材料,完成了国际上最大规模的高铁材料长周期大气腐蚀联网观测试验研究,系统获得了覆盖高铁工程关键核心材

料的环境腐蚀数据,阐明了高铁材料在典型大气环境下的腐蚀规律和主要影响因素,积累材料环境和腐蚀数据130余万条,在高铁装备和设施选材、防护设计与寿命评估中进行共享服务。创建了服务于“八纵八横”高铁线路的材料设计选材与运行防护的大气环境腐蚀分级分类图,填补了出口高铁装备选材与防护设计急需的海外环境中材料腐蚀数据的空白。

3.2 土壤多站点联网观测研究数据为跨区域国家重点工程建设提供了数据支撑

材料环境腐蚀野外站网络在跨区域多点系统野外观测试验方面开展了大量的研究工作,全面系统厘清了典型环境腐蚀性分级分类及常用材料在我国典型区域的腐蚀规律和机理。西气东输、青藏铁路以及南水北调等超大型工程都具有跨区域和环境多样性的特征。特别是,西气东输工程沿线经过10多个省份,绝大部分管线都埋于土壤中,要与腐蚀性不同的17种土壤接触,不同土壤腐蚀性的差别达十几倍。通过在西气东输管线沿线13个土壤腐蚀野外站点系统开展了管线钢跨区域多样性土壤环境腐蚀野外联网观测试验,所积累的土壤腐蚀数据在工程管道选材、安全评估及寿命预测等方面提供了重要支撑。基于多站点联网系统观测试验及数据积累,研究制定了国家标准《金属和合金的腐蚀土壤环境腐蚀性分类》(GB/T 39637-2020),并首次建立了八因素的“埋地钢质管道土壤腐蚀性综合评价方法”,且作为标准检测方法广泛应用于西气东输、南水北调、城市燃气和给排水等工程的埋地管道防腐蚀工程中。

3.3 海洋环境腐蚀联网观测研究为海洋工程建设和资源开发提供了科技支撑

我国海域辽阔,各大海域环境特征各异。海洋环境中材料的腐蚀与失效严重威胁着海洋工程装备的服役安全,我国每年因海洋腐蚀造成的经济损失已超过1.5万亿元。与世界发达国家相比,我国在海洋工程材料腐蚀数据积累、腐蚀失效理论与防护技术研发方面还存在较大差距。依托分布在我国四大海域8个试验站组成的我国海洋环

境野外试验站网络，通过长周期、大规模、大范围联网观测试验研究，系统阐明了我国海洋大气腐蚀规律及其主要影响因素，研究确定了新时期我国典型海域大气腐蚀等级，并首次全面阐明了“我国海洋环境腐蚀的四个规律性新认识”。长期的材料海洋腐蚀联网观测试验数据及防护技术在荔湾 3-1 天然气综合处理平台等 30 余座海洋平台以及航空航天等领域获得了广泛应用，海洋腐蚀数据为数千家单位提供了直接服务，并产生了重大的经济和社会效益。

3.4 搭建的数据汇聚共享平台开创了材料腐蚀数据网络化共享服务的新模式

我国材料腐蚀领域的野外科学观测试验研究形成了一套完整的组网联合观测试验、数据整合共享联网观测研究模式。多年来，持续开展了黑色金属、有色金属、建筑材料、涂镀层材料及高分子材料等 5 大类 600 余种材料的野外试验和连续观测，最长试验观测时间达 35 年，获得总数据量超过 1 800 万条。建成了我国数据量最大、内容最丰富的材料腐蚀数据库和数据共享平台。该平台整合汇聚了我国野外台站 50 余年积累的材料腐蚀数据及优势试验条件，并且平台数据信息共享网站加入了国家科技基础条件平台门户“中国科技资源共享网”，持续为门户网站提供了超过 2 万条核心元数据^[13]。通过联网观测试验获取的材料环境腐蚀数据，按计划汇交到国家材料腐蚀与防护科学数据中心，经过数据的汇交、清洗、加工处理后的二次数据全部实现了网上共享。用户可以通过材料腐蚀数据共享平台，方便地查询、浏览、下载使用其中的数据资源。国家材料腐蚀与防护科学数据共享平台自 2005 年上线以来，一直是材料腐蚀与防护领域最重要的专业数据共享平台门户，目前年访问量已经突破 200 万人次，每年为上千家用户提供腐蚀数据和技术支持服务。

4 发展趋势及工作建议

4.1 发展需求与趋势

随着全球化发展，美国主导建立的材料自

然环境观测试验网络，长期在全球范围内开展材料腐蚀数据积累及比对研究，支撑美国装备的全球化应用。在欧洲腐蚀联盟等组织机构的推动下，建立形成了欧洲自然环境试验网络，通过联网观测试验，积累了典型材料在欧洲乃至全球范围内的大量宝贵腐蚀数据，支撑了欧洲相关标准制定，为生产制造业通行全球提供了有力的技术支撑与保障。日本在本土、东南亚及非洲等地，长期开展了系统的材料环境适应性试验及数据积累，为其在高速铁路、海洋工程建设及装备输出提供服务。发达国家建立了较完善的材料环境腐蚀观测试验站网络，并呈现联网协同观测和数据比对研究的全球化协作研究发展趋势^[14-15]。

新时期，我国新材料发展将进入质量和技术提升阶段。随着我国国家重大战略实施以及中国装备“走出去战略”的推进实施，材料及装备将面对更加复杂严酷的服役环境，需要在国家层面上统一部署，进一步加强开展典型材料在我国乃至全球环境下的材料腐蚀野外联网观测试验及数据积累工作。新时期的国家野外站体系，强化了试验站的能力建设，需要在针对国家重大需求的联合协同观测试验与数据积累方面，加强统一的部署和规划，聚焦区域性重大科学问题，集中解决国家重大科技创新需求。

在野外站联网观测研究的工作范式方面，随着物联网、5G 无线通信、AI 技术和大数据等技术的发展，极大地促进了观测能力的跨越式发展。基于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技术代表了未来野外站联网观测研究新的发展趋势。特别是，智能传感器技术的革新使得野外站在观测频度、内容和范围上都获得了极大的提升，随之而来产生了海量的观测大数据。对数据获取、存储、加工与管理的传统方法已经不能满足现代野外科学研究的要求。因此，对大数据时代野外站联网观测大数据的存储、管理与处理技术应开展深入广泛的研究，以适应新时代野外站联网观测研究工作范式的变革。

4.2 未来观测研究模式

根据野外站联网观测研究的内涵，结合实际

联网观测操作过程中的组织形式和协作机制,以及联网观测数据采集和共享模式等,未来材料腐蚀野外站联网观测研究主要有以下3种模式。

(1) 高度互联互通的材料腐蚀大数据联网观测研究模式。在组网观测的野外站集群布设统一的观测网络,采用相同的观测仪器设备,基于智能传感器组建材料腐蚀观测物联网,依托布设在各观测站点的观测终端,按照完全相同的观测方法、观测频度、观测内容进行同步观测,并通过智能物联网实时将材料腐蚀观测数据上传到集中的大数据中心或数据仓库,再根据联网观测协议或约定,统一对数据进行存储、加工、挖掘、分析、研究和共享应用。该模式是野外站联网程度最高的野外科学观测研究组织形式,完全实现了野外站的同步观测和数据互联互通。该类联网观测研究具有实时、动态、快速等特点,可以在较短时间内实现对材料腐蚀过程的原位动态分析研究,并快速进行判断、响应和处置,也可以通过对长周期材料腐蚀观测大数据的归纳和总结,发现和认识材料腐蚀行为和机理等。

(2) 高度统一的资源整合型联网观测研究模式。野外站的联网观测研究有统一的目标和观测计划,通过共同承担野外联网观测研究计划或项目,或按照约定的协同联网工作方案,参照相同的观测技术标准规范,采用尽量一致的观测仪器设备,按照相同的观测频度和时序开展材料腐蚀野外观测,或采用相同的材料或样品等,按照统一的试验技术规范和方法,同步开展野外暴露试验,并按照统一的周期获取实验数据。该类联网观测的特点是有统一的目标任务、有统一的观测技术标准规范、有统一的观测时序、有统一的数据格式要求等,但野外站的野外观测和试验研究是独立开展的,野外站观测研究获取的数据按照相关技术标准进行规范化处理后,需要按照相关要求要求进行数据汇交和共享应用。

(3) 准入式的加盟型材料腐蚀联网观测研究模式。该类野外站联网观测研究通常由特定的学术机构、社会组织或政府机构等组织发起,通过协商约定建立联网协作公约机制,建立统一的

入网资质条件门槛,采取准入式的组织形式开展联网协作研究。该类联网观测研究通常采用自愿加盟的合作方式,按照多方协商制定的观测研究目标任务或围绕某一重大科学问题,参照相关领域的观测技术标准规范,按照尽量一致的观测方法协同开展野外观测和实验研究。相对而言,该类联网观测研究的组织机制较为松散,观测研究没有严格的统一标准和数据汇交要求。从本质上讲,该类联网观测研究属于倡议型联网观测模式,联网观测合作方按照契约机制承担相应的义务,并享有成果共享的权利。

4.3 未来观测工作建议

(1) 加强材料腐蚀联网观测研究网络建设,协同解决国家重大需求。建议在我国原有材料环境腐蚀野外站网络60余年联网观测研究的基础上,以通过认定的国家野外站为主体,联合国内其他野外站,组建新时期的材料环境腐蚀野外站网络或联盟等形式的野外站联网观测研究体系,以新形势下的国家重大需求为导向,有计划、有目的地开展联网观测研究,加强野外站的互联互通,联合承担实施国家野外科学观测研究专项任务或科技计划项目,协同解决国家重大工程建设及科学研究过程中对野外科学数据的迫切需求。

(2) 大力发展材料腐蚀大数据联网观测技术体系,保障重大工程装备建设与服役安全。研发基于腐蚀电化学传感、3D激光扫描器、超声波技术和磁场技术等材料腐蚀研究智能传感器技术,研发集成无人机搭载高通量数据采集技术的材料腐蚀动态巡检监测技术,构建材料服役行为和服役环境的全息数据高通量采集传感器网络,充分利用5G无线通信、大数据和AI技术,研究建立材料腐蚀大数据智能采集和整合的泛在网络观测研究平台。在高速铁路网、国家电网、海上风电等重大工程和装备领域实现有效应用,建设面向重大工程装备的服役安全在线监测预警平台。

(3) 开展材料腐蚀大数据技术研究,完善建设大型材料腐蚀专用数据库及共享平台。随着新材料研发及材料基因组工程等重大科学项目的实施,基于物联网、泛在网大数据和材料高通

量计算技术的发展,面对海量多源异构材料腐蚀“大数据”流,必须研究建立材料腐蚀“大数据”采集生产、加工整理、管理和使用的理论框架与技术流程,建成能够满足新时期材料腐蚀科学领域海量多源异构“大数据”资源畅通有序汇交的超级数据仓库。针对海量多源异构材料腐蚀大数据,开展数据高效处理与利用共性技术及专用软件的研发,建立集数据评估、数据融合、智能关联检索、关键参量筛选、机器学习预测等功能于一体的材料腐蚀大数据共享应用平台。

(4) 加强野外站与数据中心的协同发展,提升数据资源可持续汇聚和共享服务水平。《国家野外科学观测研究站建设发展方案(2019—2025)》明确提出,野外站要加强与国家科技资源共享服务平台,尤其是国家科学数据中心的衔接,开发建立野外站观测数据汇聚和管理系统,提供高水平、专业化共享服务。建议尽快组织野外站和国家数据中心联合研究制定野外科学数据生产、汇交、共享方面的相关机制及实施细则,充分发挥国家数据中心在整合本领域数据资源方面的作用,通过联网观测、数据汇交、数据挖掘、共享利用,为国家重大工程建设和科学研究提供成体系、专业化、规范化的科学数据支撑服务。需要进一步明确野外站和国家数据中心的合作关系和协同工作机制,明晰相关方的责、权、利等方面的基本管理机制,尽快形成一套科学合理的协同发展模式。

(5) 加强国际化材料腐蚀联网观测,推动全球材料腐蚀科学数据资源汇聚共享。依托“一带一路”沿线国家和地区材料腐蚀合作研究项目和其他国际合作计划项目,大力推进区域性和全球化的材料腐蚀联网观测合作研究,积极牵头推动新时期全球材料腐蚀环境分级研究国际合作,组织制(修)订ISO等国际标准,提升我国在材料腐蚀研究领域的国际地位和话语权。积极参与领域内国际学术组织和国际标准组织,努力推动与“一带一路”沿线东南亚、南亚、中东、非洲、欧洲各国以及北美洲等国家和地区开展数据共享合作,通过包括联合试验、数据比对、数据交换

等建立全球开放的多元多边材料腐蚀数据交换合作平台,为“中国装备走出去,世界装备走进来”提供材料环境适应性数据支撑,促进国际交流合作,推进全球化开放共享。

5 结语

野外站的联网观测研究已经成为国际上材料腐蚀学科领域野外科学观测的一种普遍的研究范式,国内外已经在不同层面上建立了形式多样的材料腐蚀野外站联网观测研究体系,并先后启动和开展了多次大规模的跨区域甚至全球化的材料腐蚀联网观测合作研究计划,极大地促进了材料腐蚀学科发展和标准制(修)订等工作。新时期,在强化野外站观测研究能力建设的同时,更加凸显野外站的联网观测研究的重要性,尤其是随着物联网、5G无线通信、AI技术和大数据等技术的发展,基于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技术代表了未来野外站联网观测研究新的发展趋势,通过联网观测大数据的综合分析、数据融合、模拟挖掘等途径可以揭示大尺度宏观自然现象和过程的变化规律,对解决面向跨区域重大科学问题和国家重大工程建设等具有重要的意义。

参考文献

- [1] 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: 1-25.
- [2] 李晓刚. 材料腐蚀与防护概论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 1-20.
- [3] 宣卫芳, 杨晓然. 国内外军工材料环境试验现状及发展趋势[J]. 装备环境工程, 2004(8): 16-22.
- [4] TOMÁŠ P, JOHAN T. Catalogue of atmospheric corrosion field exposure sites in Europe[EB/OL]. [2022-08-20]. https://efcweb.org/Scientific+Groups/WP25_+Atmospheric+Corrosion/Current+Activities/_/Exposure%20site%20catalogue%20EFC%20lores.pdf.
- [5] NATESAN G M, VENKATACHARI N P. Corrosively and durability maps of India[J]. Corrosion prevention and control, 2005, 52(2): 43-55.
- [6] DAGMAR K, KATERINA K, SHELDON W D Jr. ISOCORRAG international atmospheric exposure pro-

- gram: summary of results[M]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2010:1-63.
- [7] MORCILLO M, CHICO B, DE LA FUENTE D, et al. Looking back on contributions in the field of atmospheric corrosion offered by the MICAT Ibero-American testing network[J]. International journal of corrosion, 2012(1): 1-24.
- [8] BELEN C, DE L F D, DIAZ L, et al. Annual atmospheric corrosion of carbon steel worldwide — an integration of ISOCORRAG, ICP/UNECE and MICAT databases[J]. Materials, 2017, 10(6): 601.
- [9] 李晓刚. 我国材料自然环境腐蚀研究进展与展望[J]. 中国科学基金, 2012(5): 257-263.
- [10] 吴护林, 钱一欣, 赵春柳, 等. 军工材料自然环境试验体系建设与应用[J]. 工程研究, 2018, 10(2): 124-132.
- [11] 李晓刚. 国家材料环境腐蚀平台共享服务实践探析[J]. 中国科技资源导刊, 2018, 50(6): 101-107.
- [12] LI Xiaogang, ZHANG Dawei, LIU Zhiyong, et al. Materials science: share corrosion data[J]. Nature, 2015, 527(7579): 441-442.
- [13] 李晓刚. 材料腐蚀信息学: 材料腐蚀基因组工程技术与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014: 1-4.
- [14] 朱玉琴, 陈源, 张燕, 等. 国内外动态自然环境试验技术发展现状[J]. 装备环境工程, 2015, 12(6): 93-99.
- [15] 闫杰, 刘丽红, 纪春阳, 等. 国内外自然大气环境试验的发展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2009, 29(1): 69-75.

(上接第24页)

- 项目和资金管理的若干意见》[EB/OL]. [2022-05-01]. <http://politics.people.com.cn/n/2014/0312/c70731-24614103.html>.
- [2] 国务院. 关于深化中央财政科技计划(专项、基金等)管理改革方案的通知[EB/OL].[2022-05-01]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-01/12/content_9383.htm.
- [3] 新华社. 中共中央办公厅、国务院办公厅印发《关于进一步完善中央财政科研项目资金管理等政策的若干意见》[EB/OL]. [2022-05-01]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-07/31/content_5096421.htm.
- [4] 沈满, 王婕. 高校做好国家重点研发计划项目全过程管理的思考[J]. 教育教学论坛, 2019(8): 9-11.
- [5] 杨帆, 廖爱军. 国家重点研发计划一体化管理的实施举措[J]. 中国高校科技, 2019(S1): 10-11.
- [6] 卢祝华, 李梦茹, 陈军, 等. 中国计量院重点专项项目档案管理初探[J]. 计量技术, 2020(5): 115-118.
- [7] 陈军, 李大博, 杨智君, 等. 计量科学领域科技项目数据汇交管理研究[J]. 中国科技资源导刊, 2021, 53(4): 83-89.
- [8] 科技部办公厅. 科技部办公厅关于印发《国家重点研发计划项目综合绩效评价工作规范(试行)》的通知[EB/OL]. [2022-05-01]. https://www.most.gov.cn/xxgk/xinxifenlei/fdzdgknr/fgzc/gfxwj/gfxwj2018/201812/t20181229_144402.html.
- [9] 陈玲. 科研院所科研信息化管理系统的设计与应用[J]. 数字技术与应用, 2016(9): 135-137.
- [10] 王芳展. 国家重点研发计划项目牵头单位做好综合绩效评价工作的思考与建议[J]. 科教文汇, 2020(17): 10-12.
- [11] 孙珍全, 杨斌, 张阳, 等. 国家重点研发计划重点专项精细化管理与实践[J]. 科技管理研究, 2020, 40(21): 191-196.