

沿海设施环境适应性试验和评价方法研究进展

李亮¹, 殷文昌¹, 向永华¹, 刘聪², 许斌²

(1.中国人民解放军 92228 部队, 北京 100072; 2.西南技术工程研究所 国防科技
工业自然环境试验研究中心, 重庆 400039)

摘要: 概述了沿海设施所服役的腐蚀环境分类, 主要分为海洋大气、浪花飞溅区及海水浸泡区, 并对其暴露于大气和不同海洋环境位置的环境适应性试验评估方法进行了系统的总结分析。海洋大气环境模拟采用干湿交替加速腐蚀法, 或建立户外大气暴露试验台开展试验; 海水飞溅区试验通过实验室建海水冲刷试验装置进行模拟试验, 或在实际环境中建立腐蚀试验中心开展试验; 海水浸泡环境模拟通过海洋工程深水试验池开展试验。本研究对于开展海洋环境钢结构设施的防护性能考核评估具有重要意义, 对沿海设施的环境适应评估方法发展具有指导意义。

关键词: 沿海设施; 腐蚀; 服役环境; 评价方法

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)11-0107-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.11.014

Research Progress on Environmental Adaptability Test and Evaluation Methods of Coastal Facilities

LI Liang¹, YIN Wen-chang¹, XIANG Yong-hua¹, LIU Cong², XU Bin²

(1. No. 92228 PLA, Beijing 100072, China; 2. Weathering Test and Research Center of Science Technology and Industry for National Defense, Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The work aims to review the corrosion environment of coastal facilities, which is mainly classified into marine atmosphere, splash zone and seawater immersion zone, and systematically summarize and study the environmental adaptability test and evaluation methods of costal facilities exposed to the atmosphere and different marine environment positions. The marine atmospheric environment test was simulated by the dry-wet alternate accelerated corrosion method or carried out by establishing the outdoor atmospheric exposure test bench. The seawater splash zone test was simulated by building seawater erosion experimental device in the laboratory or carried out by establishing corrosion test center in the actual environment. The seawater immersion environment test was simulated through the deep water test pool of marine engineering. These test methods are of great significance for the assessment and evaluation of the protection performance of steel structure facilities in marine environment, and have guiding significance for the development of environmental adaptability evaluation methods of coastal facilities.

KEY WORDS: coastal facilities; corrosion; service environment; evaluation methods

收稿日期: 2021-11-18; 修订日期: 2022-06-24

Received: 2021-11-18; Revised: 2022-06-24

引文格式: 李亮, 殷文昌, 向永华, 等. 沿海设施环境适应性试验和评价方法研究进展[J]. 装备环境工程, 2023, 20(11): 107-114.

LI Liang, YIN Wen-chang, XIANG Yong-hua, et al. Research Progress on Environmental Adaptability Test and Evaluation Methods of Coastal Facilities[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(11): 107-114.

21世纪是海洋的世纪,为推进实施国家海洋战略,维护国家海洋权益,必须大力发展海洋工程装备,建设可靠耐用的海洋装备设施。虽然我国目前在海洋设施建造领域取得长足进步,但依然存在装备设施结构材料腐蚀老化的严重问题,成为影响海洋装备和海洋工程服役安全、寿命、可靠性的最重要因素,每年给国家造成近万亿元的经济损失,已成为制约我们海洋工程发展的重要难题,引起国家的高度重视^[1]。

某海域是我国极为重要的海上战略要地,不仅是亚洲与欧洲、非洲及美洲的航运要道,而且是保卫我国国土安全的重要军力投送基地,对于国家安全具有重要意义。目前,我国已经在某些岛礁开展了大规模建设活动,修建了机场、遥感器/通讯与雷达设备、大型灯塔、船舶起重机、行政中心及必要防御设施^[2-3]。某海域属于热带海洋性季风气候(即高湿热海洋大气环境),其典型气候特征为:终年高温、雨量充沛、季风明显,是我国典型的高温、高湿、高盐雾及强太阳辐照地区。其海域环境就像一个天然腐蚀加速试验场,对在该类环境中部署的军事装备及钢结构设施的服役寿命产生巨大的影响。严酷的服役环境条件对钢结构及设施的防护性能要求很高,必须开展海洋钢结构设施环境适应性试验和评价方法设计研究^[4-9]。

1 设施服役环境特点

1.1 温度高、湿度大

某海域雨量充沛,终年高温高湿,长夏无冬,季节变化很小。年平均温度在26℃左右,月平均最低温度为25℃(1月)。在该海域的大气高温高湿环境下,钢结构设施表面易形成薄液膜,而钢结构设施中存在的密闭不通风空间甚至会发生结露凝水现象,薄液膜或结露凝水会在设施表面形成腐蚀电解液。金属材料表面的有机涂层逐渐吸湿,绝缘阻隔作用逐渐下降,最终引发金属材料腐蚀;非金属材料受潮吸湿后,极易滋生霉菌,造成非金属材料结构损坏、性能的降低或丧失。高湿因素是影响各类电子设备稳定性和可靠性最重要的因素,容易引起电子元器件上金属件的腐蚀,使电子设备发生短路、断路现象,造成电

子设备的损坏。高温高湿因素会极大地影响海上设施及军事装备的可靠性。

1.2 盐雾浓度高

该海域大气中盐雾浓度高,这是由于海风使海水飞溅,部分海水雾化,盐分进入空气,形成含氯化物的气溶胶状体^[4]。根据相关实测数据,海洋大气中的含盐量是内陆地区的50~100倍。在高湿、高盐雾含量的大气环境中,钢结构表面会有一层很薄的液膜,伴随干湿交替,在侵蚀性氯离子的作用下,表面防护涂层的性能会逐渐降低,出现破损,最终使腐蚀介质接触基材表面,然后发生电化学腐蚀。高盐雾环境下,会形成多腐蚀环境因素影响、多侵蚀介质共同作用的严酷服役环境,盐沉积会诱发不锈钢等钝性金属材料局部腐蚀的产生。另外,还会增加材料表面的润湿时间,使电化学腐蚀的时间延长等^[4,7-8]。

1.3 霉菌易生长

研究表明,温度为5~50℃和相对湿度在90%~100%的环境有助于霉菌孢子快速生长。在湿热大气环境条件下,钢结构设施部分位置不通风,为有利于霉菌生长的温湿度环境。霉菌在这样的环境下生长迅速,分解有机材料^[4,6]。霉菌生长过程会吸取和分解有机材料中的某些成分,破坏材料的组成和结构,引发涂层疏松、开裂或起泡^[5],进而影响其性能,同时会分泌酶和有机酸,引发金属的腐蚀现象。此外,霉菌堆积增长会破坏钝性金属表面的钝化膜。

1.4 典型设施服役环境举例

我国某海域钢结构设施分为3类:雷达站,反舰及防空导弹基地等军用设施;深水码头,机场及塔台等军民两用设施;用于维系岛上人民生存的民用设施。考虑到我国必将长期建设和经营该海域,而且由于远海钢结构工程具有战备和平时保障功能,设施设备的完好率和可靠性要求高,对腐蚀防护提出了更高要求。尤其是远海钢结构工程设施远离大陆,建设、维修极为不便,防腐涂装施工应简便易行,防腐效能应更高^[8],钢结构设施环境服役性能评价亟待解决。该海域钢结构典型设施主要材料及服役环境见表1。

表1 某海域钢结构设施分类及服役情况
Tab.1 Classification and service of steel structure facilities in a certain sea area

设施种类	所用材料	服役环境	典型构件部位
机场及塔台	钢筋混凝土	海洋大气区	机场跑道
深水码头	钢筋混凝土	浪花飞溅区及海水浸泡区	码头岸基及路面
	钢铁材料	浪花飞溅区	金属结构栏杆
雷达站	钢筋混凝土	海洋大气区	雷达站基体
	钢铁材料	海洋大气区	雷达主体结构

2 海洋钢结构设施试验方法

2.1 大气环境模拟试验

比利时腐蚀中心采用回转滚筒式的干/湿交替方法对耐候钢进行了腐蚀加速试验, 试验中根据不同的大气环境配制了相应的腐蚀溶液。例如, 直接采用喷洒蒸馏水溶液模拟无污染物的乡村大气, 采用浓度为 10^{-4} mol/L 的 NaHSO_3 溶液模拟含硫化物的工业大气, 采用稀释 100 倍海水 (即含 0.02% Cl^-) 溶液模拟高盐雾含量的海洋大气。在该干湿交替循环试验方法中, 设计湿循环 1 个周期 13 min, 干燥循环 1 个周期 40 min, 并将干循环周期的试验环境温度定为 20°C 或 60°C 。20 世纪 90 年代, 中国铁道科学研究院为模拟金属在自然环境中日晒雨淋的干湿交替情况, 参照上述试验方法起草了 TB/T 2375—93《铁路用耐候钢周期浸润腐蚀试验方法》, 设计的周期浸润试验箱如图 1 所示。夏昕鸣等^[10]按照 GB/T 10125—2012《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》中的中性盐雾试验方法, 结合某海域环境高温、高湿度的特点, 设计了室内模拟海洋大气环境加速腐蚀试验方法, 设定温度为 35°C , 相对湿度为 100%, 试验溶液为 5% 的氯化钠溶液, pH 值为 7, 选用 Q235B、Q355、Q500qE 等 3 种材料进行了耐蚀性研究。韩鹏飞等^[11]设计了模拟某海域海洋大气环境的干湿循环试验方法, 研究了 Q460 建筑结构用耐候钢的耐蚀性能。

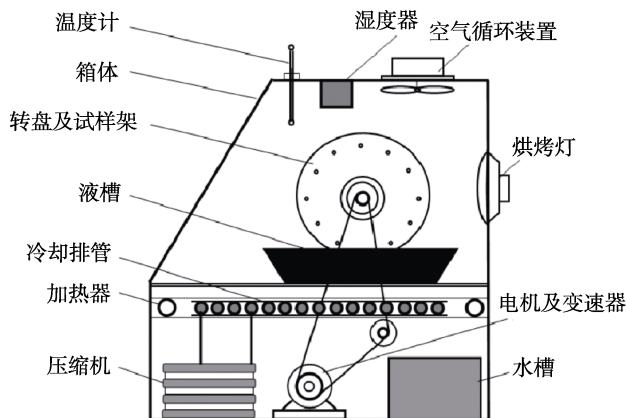


图 1 周期浸润加速腐蚀试验设备^[9]

Fig.1 Schematic representation of periodic immersion accelerated corrosion test equipment^[9]

2.2 海水飞溅环境模拟试验

国内外针对海水飞溅区环境模拟试验主要通过采用不同种类和结构的海水喷淋、冲刷等试验装置实现。梁义等^[12]自主研发的用于模拟海水飞溅区腐蚀环境的 RM-1 型海洋加速腐蚀试验机, 采用质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液在 30°C 下进行周期性喷淋的试验方法。

张斌等^[13]基于 HHS-1 恒温水浴系统设计了旋转式冲刷腐蚀系统, 使用旋转冲刷的方式 (如图 2 所示) 模拟海洋环境, 使用模拟人工海水作为腐蚀介质, 模拟探究了 304 不锈钢在人工模拟海水中的耐冲蚀性能。赵卫民等^[14]通过冲刷腐蚀试验模拟研究了浪花飞溅区钢铁结构的腐蚀行为和防护涂层的防护效果。李春玲等^[15]设计了由飞溅系统、恒温加热系统等组成的试验装置, 通过磁力搅拌器带动转子形成海水飞溅, 调节转子速度和液面高度可以调节飞溅强度, 研究了电弧喷涂铝涂层在模拟海水飞溅区的腐蚀性能。

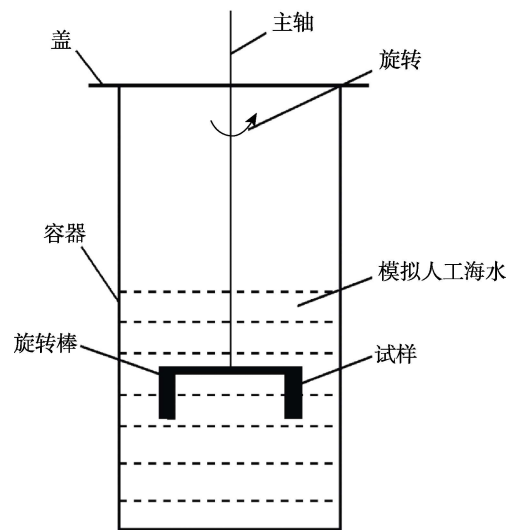


图 2 旋转式冲刷腐蚀系统^[13]

Fig.2 Rotary erosion corrosion system^[13]

还有一种模拟海水飞溅区的腐蚀试验方法为直接在真实海洋环境中建造腐蚀试验场, 如我国已经建立的三亚海水站等, 能够对大批量试验试样同时进行符合实际情况的模拟。在我国某海域真实海洋环境下建立大型腐蚀平台, 能够在海洋腐蚀防护的过程中, 获得长期、真实而稳定的海洋腐蚀试验环境和试验数据, 有利于推动该领域的研究进展。

2.3 海水浸泡环境模拟试验

海水浸泡区腐蚀环境相对较为单一, 服役于该环境的钢结构设施只面临海水的浸泡腐蚀, 因此可以在电化学腐蚀理论基础上使用理论模拟方法进行研究。但是我国领海辽阔, 钢结构设施的服役环境因气候条件不同而种类较多, 且理论计算方法存在缺陷, 不能替代实际试验研究。

船舶与海洋工程深水试验水池可用于研究海洋结构物的尺度、功能、使用性能, 评价安全可靠性能, 成为研究相关基础科学与开发验证必不可少的重要设施, 是海洋环境腐蚀研究过程中的重要试验方法。自 20 世纪 90 年代以来, 国外船舶与海洋工程技术研究相关机构开展了模拟海洋环境试验深水池的研究,

通过设计建造的深水池开展了一系列相关研究,并取得了众多研究成果,对海洋环境领域的研究发展作出了重要贡献^[16]。如1999年荷兰设计的170 m×40 m×5 m

(长×宽×水深)的耐波与操纵水池,配备摇板式分段造波机,可根据试验需求生成短峰波。世界主要海洋工程试验水池相关参数情况见表2。

表2 世界主要海洋工程试验水池数据情况^[13]
Tab.2 Data of the world's major marine engineering test pools^[13]

国家	水池规格/m			深井规格/m			多向造波机	多向造流速度/(m·s ⁻¹)	多向造阵风速度/(m·s ⁻¹)	多向拖车速度/(m·s ⁻¹)	建成年代
	长	宽	水深	长	宽	水深					
加拿大	75	32	3.5	4	4	8.5	短峰波方向谱				1990
挪威	80	50	10	无	无	无	短峰波方向谱	0.2		5	1990
美国	56	30	4.5			16.5	短峰波方向谱				1995
韩国	56	30	4.5	φ5	φ5	12	短峰波方向谱	0.2	10		1998
荷兰	45	36	10.5	5	5	30	短峰波方向谱			6	1998

美国作为传统的海洋霸权国家,很早就设计制造了自己的海洋工程深水试验水池。如美国海洋技术研究中心(OTRC)研发建造的模拟海洋环境的试验深水池,长45 m,宽30 m,水深5.8 m。该试验水池可通过造波机生成各种类型的波浪,风扇在任意方向产生阵风,并可通过相关造流装置在任意方向造水流。依托此深水试验水池,开展了海洋装置、设施在风、浪、流环境条件下的模拟试验。

我国上海交通大学海洋工程国家重点试验室设计建造了一座可开展模拟深水海洋环境装备试验的深水试验池,该水池长50 m,宽30 m,深6 m,能在0~5 m内任意调节水深,通过在深水池中生成风、浪、流等模拟复杂的各种海洋环境。大连理工大学国家重点试验室海岸与近海工程试验室开展了浅水海洋装备的试验研究。目前,通过研发建造模拟海洋环境的深水池在模拟复杂海洋环境条件方面依然存在一定的局限性,并不能替代装备在真实海洋环境下的服役性能考核评价,需要继续深入开展相关技术的攻关研发。

2.4 环境户外暴露试验

考核沿海设施环境适应性最直接且常用的试验方法是直接开展户外暴露试验。目前,大气暴露试验标准常用的有GB/T 14165—2008、JISZ 2381—2001、ASTM G50-10(2015),海水试验常用标准有GJB 8893—2017、GB/T 5576—2005。

段体岗等^[17]开展了304不锈钢在某岛礁大气、飞溅、潮差和全浸区海洋环境下的腐蚀行为研究,分析了其腐蚀行为规律和特征,为该岛礁环境下不锈钢材料的选用与寿命评估提供了数据支持与依据。彭文山等^[18]在某岛礁进行了现场腐蚀试验,研究分析了304、316L、2205不锈钢在浪花飞溅区中的腐蚀行为与规律。宋积文等^[19]研究了2205双相不锈钢在某海域水下170 m环境中的腐蚀行为,研究了2205双相不锈钢在深海环境中的腐蚀规律与腐蚀机理。李慧心

等^[20]利用自主设计的试验装置,研究了316L不锈钢在某海域170 m水深环境中的腐蚀行为。

户外暴露试验是目前较为常用的考核与评价试验方法,通过该方法能比较真实准确地获得相应海洋环境下材料的腐蚀特征与数据,但存在试验周期较长,难以单独分析评估单因素的影响作用等不足^[21]。目前,已有研究机构开展了户外暴露加速试验技术与方法研究,该技术综合试验室快速试验与户外暴露试验的优点,会成为某海域沿海设施环境适应性试验与评价的重要手段。

3 钢结构设施的腐蚀评价方法

在对钢结构设施进行腐蚀防护领域研究过程中,首先应对材料的服役环境进行评估,以确定对材料服役产生主要影响的环境因素,再进行加速模拟试验的设计。同时,还应根据环境复杂程度确定模拟试验进行的场所是位于试验室,还是在相关的真实环境中搭建模拟试验平台。在加速模拟试验环境搭建完成后,随即需要确定采用哪些试验方法来对材料的腐蚀状态进行评估,应针对不同材料采取有针对性的腐蚀评价方法,以得到较为有效的数据。

3.1 钢筋结构的服役性评价

钢筋作为钢结构设施中的混凝土结构的重要原材料,其腐蚀已被确定为导致钢结构设施发生腐蚀失效的重要因素。作为钢结构设施的混凝土结构,整体构造尺寸较大,且在海洋环境中使用场景复杂,因此常采用试验室加速模拟环境结合电化学腐蚀的方法对混凝土材料或金属构件进行试验研究。腐蚀状况直接观察法没有清晰的衡量标准,且不易实测,而显微方法则需要比较复杂的设备。因此,目前对于混凝土中钢筋及钢铁材料主要采用电化学非破坏性技术手段,如开路电位测量、表面电位测量、混凝土电阻率测量等方法^[22]。

3.1.1 开路电位

金属材料在服役环境中会发生钝化或产生腐蚀现象, 可通过测量开路电位变化分析表征其性能退化情况。测量开路电位时, 不施加额外电压, 仅检测自然腐蚀电位。在钢筋混凝土结构中, 混凝土起电解质的作用, 钢筋在混凝土环境发生电化学腐蚀, 电位因腐蚀环境不同而变化。混凝土中钢筋开路电位测量如图 3 所示。

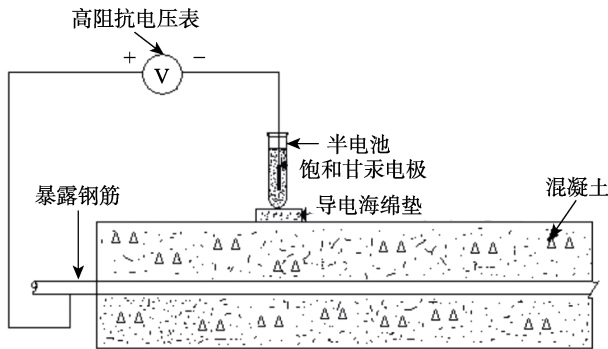


图 3 混凝土中钢筋开路电位测量
Fig.3 Measurement of open circuit potential (OCP) in concrete

通过高阻抗电压表测量混凝土结构中钢铁材料相对于标准参比电极 (饱和甘汞电极、铜/硫酸铜电极、银/氯化银电极等) 的腐蚀电位, 在 ASTM C 876 和文献[22]中进行了较为详细的研究。开路电位测量作为一种非破坏性测量方法, 可以从较大的结构区域收集大量数据, 能够快速找到腐蚀发生的大概区域, 并且对腐蚀状态进行大致评价, 但难以对腐蚀效应进行定量分析, 也难以找到开路电位与腐蚀速率的可靠关系。由于氧气的扩散而产生的极化现象, 混凝土孔隙率和混凝土中高电阻层的存在等影响, 因此通过腐蚀电位评价钢结构设施时, 须采用其他方法进行数据补充。

3.1.2 表面电位

在腐蚀过程中, 混凝土阴极和阳极之间会流过电流, 该电流可以通过测量混凝土中的电位降来进行检测。因此, 表面电位测量可以作为一种无损检测手段, 来识别混凝土结构中的阳极和阴极区域, 并间接检测混凝土中钢筋腐蚀的可能性。如图 4 所示, 2 个参比电极用于表面电位测量。在该技术中, 无需与钢筋进行电气连接。在该测量中, 一个电极在对称点结构上保持固定, 另一个为移动电极, 沿网格节点上的结构移动。当将可移动电极的电位置于节点时, 使用高阻抗电压表对固定电极进行测量。校正的电位读数表示可能腐蚀的阳极区域。阳极和阴极区域之间的电位差越大, 腐蚀的可能性就越大。

3.1.3 混凝土电阻率

混凝土的电阻率是确定引发腐蚀过程强度的重

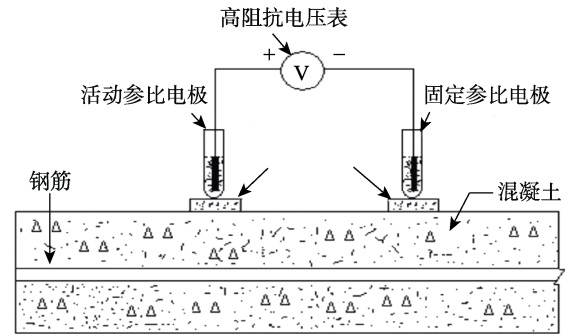


图 4 混凝土中表面电位测量
Fig.4 Measurement of surface potential (SP) in concrete

要参数。与具有低电阻率的混凝土相比, 在具有高电阻率的混凝土材料中, 腐蚀过程将变慢。在低电阻率的混凝土中, 电流很容易在阳极和阴极区域之间通过。交流和直流测量可用于确定电阻率, 使用表面探针和嵌入式探针, 在 2 个嵌入式电极之间施加恒定的电场, 并通过小电阻上的电压降测量所得电流, 即可完成直流测量。交流测量可以通过 2 种和 4 种引脚方法进行。最常见的表面安装探头称为 Wenner 阵列^[22-24]。交流电在外部电极之间通过, 并测量内部电极之间的电势。混凝土电阻率通常通过使用 Wenner 四探针法测量, 如图 5 所示。已知的电流 I 施加在外部探针上, 并且测量内部探针之间的电位降 V , 电阻 R 由 V/I 计算得出。混凝土的电阻率 $\rho=2\pi aR$, 其中 a 为内部电极距离, R 为测量电阻。

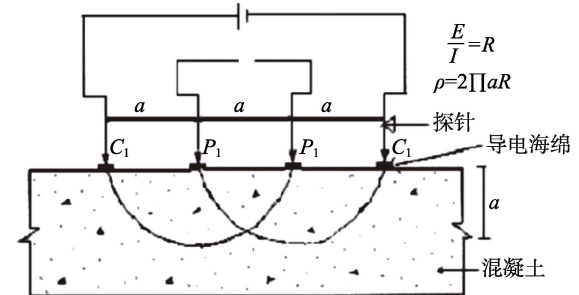


图 5 混凝土电阻率测量^[21]
Fig.5 Measurement of electrical resistivity in concrete^[21]

通过对混凝土材料电阻率的测量, 可以分析混凝土中氯离子扩散率等因素对腐蚀状态的影响。如宋家茂等^[25]使用直流阶跃法评估了混凝土电阻率与抗氯离子渗透性的相关性, 研究表明, 电阻率法与传统电通量法、快速氯离子扩散系数等方法具有十分接近的评价效力。

3.1.4 嵌入式腐蚀监测传感器 (ECI)

嵌入式腐蚀仪监测传感器是一种新提出的电子腐蚀传感器, 主要应用于对服役过程中导致混凝土结构开裂、剥落和其他劣化的情况进行预警。通过监测腐蚀中的 5 个关键因素, 并通过数字网络进行通信, ECI 可提供有关结构状况的全面、实时信息。嵌入式

腐蚀仪监测传感器是将传统的多种混凝土腐蚀检测评价方法集成到一个小型的传感器中,再将这一传感器在混凝土浇筑过程中放入混凝土,就可以在材料服役过程中便捷地获得开路电位、电阻率、氯离子浓度和温度等混凝土腐蚀评价过程中的关键数据。由Virginia技术公司开发的ECI-2腐蚀监测传感器已经在港珠澳大桥中的混凝土结构中得到广泛使用^[22],如图6所示。



图6 工况下的嵌入式腐蚀监测传感器^[21]
Fig.6 ECI sensor during operation^[21]

3.2 混凝土基体的服役性能评价

混凝土基体是一种复杂的多孔材料,具有较强的渗透性,尤其是作为钢结构设施使用的混凝土结构,对混凝土基体主要的腐蚀防护手段是添加防锈剂等对其进行改性^[26]。因此,对钢结构设施的混凝土基体进行腐蚀评价时,最重要的就是对改性处理的混凝土进行服役性能的检测评价,其方法有以下几种^[26-28]。

1) 抗蚀系数。在对添加防锈剂的混凝土基体进行抗腐蚀性能评价的过程通常会使用抗蚀系数,通常采用被检测试样在海水中浸泡侵蚀一定时间后测试其抗压强度与标准试样抗压强度之间的比值来进行表示。

2) 膨胀率以及膨胀系数。通过在水泥中添加防腐阻锈剂,并在其养护成型后测定试样的膨胀变化率,将混凝土的膨胀率及膨胀系数作为性能评价指标,最终确定防腐阻锈剂对膨胀性能的实际影响程度。

3) 硫酸盐侵蚀系数比。按照混凝土性能试验考核方法标准规定,制备标准混凝土。然后对标准混凝土与被检验混凝土试样进行90次干湿循环试验。干湿循环试验结束后,将防腐阻锈剂渗入标准混凝土与检验混凝土试样,分别测定其抗压强度。硫酸盐侵蚀系数为该抗压强度与标准养护条件下混凝土试样的抗压强度比值。标准混凝土试样与被检测混凝土试样的硫酸盐侵蚀系数的比值可以作为服役性能的评价指标。

4 结论

1) 对沿海设施进行环境腐蚀评价需要对大气环

境区、海水飞溅区、海水浸泡区等不同的海洋环境做出模拟。其中,大气环境模拟可以采用干湿交替法加速腐蚀或在大气环境中建立户外大气暴露试验台的方法;海水飞溅区环境模拟可以在试验室中建立海水冲刷试验装置或在真实环境中建立腐蚀试验中心;海水浸泡环境模拟主要使用海洋工程深水试验池进行。

2) 针对沿海设施中的钢筋混凝土结构的腐蚀评价,目前主要采用非破坏的腐蚀电化学技术,无需对其进行破坏。同时,为了提高评价准确可靠性,应结合多种腐蚀评价方法。部署由传感器组成的腐蚀监测系统,对服役中的钢结构设施进行腐蚀评价,已经在很多海洋设施中得到了广泛应用。

3) 对沿海设施用混凝土基体进行服役性能评价最重要的就是评价过改性混凝土的抗蚀系数、膨胀率和硫酸盐侵蚀系数比等参数。

参考文献:

- [1] 侯保荣,张盾,王鹏.海洋腐蚀防护的现状与未来[J].中国科学院院刊,2016,31(12):1326-1331.
HOU Bao-rong, ZHANG Dun, WANG Peng. Marine Corrosion and Protection: Current Status and Prospect[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(12): 1326-1331.
- [2] 刘潇,刁景华.岛礁工程建设生态保护探析[J].资源节约与环保,2019,10(2):19-20.
LIU Xiao, DIAO Jing-hua. Analysis of Ecological Protection in Island and Reef Engineering Construction[J]. Resource conservation and environmental protection, 2019, 4(2): 34-55.
- [3] 王爽,王晓杰.远海岛礁工程建设对生态环境的影响及应对措施探析[J].环境保护前沿,2020,4(5):483-487.
WANG Shuang, WANG Xiao-jie. Influence and Countermeasures of Ecological Environment on Construction of Offshore Islands and Reefs[J]. Advances in Environmental Protection, 2020,4(5): 483-487.
- [4] 曲晓燕,邓力.舰载武器海洋环境适应性分析[J].舰船电子工程,2011,31(4):138-142.
QU Xiao-yan, DENG Li. Analysis of the Environmental Worthiness of Shipborne Weapons in Marine Environment[J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(4): 138-142.
- [5] 吴晗平.舰载电子设备可靠性与环境防护技术[J].装备环境工程,2004,1(2):64-68.
WU Han-ping. Research into Reliability and Environment Proofing for the Shipborne Electronic Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2004, 1(2): 64-68.
- [6] 林琳.机载电子产品的环境适应性研究[J].电子产品可靠性与环境试验,2006,24(4):34-37.
LIN Lin. Environmentad Suitability Analysis of Airborne

- Electronics[J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2006, 24(4): 34-37.
- [7] 张艳辉. 浅析舰载武器海洋环境适应性验证要求[J]. *装备环境工程*, 2017, 14(5): 8-11.
ZHANG Yan-hui. Requirement on Suitability Verification of Shipborne Weapons in Marine Environment[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2017, 14(5): 8-11.
- [8] 王建平, 刘锦红, 侯晓峰. 关于远海岛礁工程腐蚀防护问题的思考[C]//2015年全国海洋工程腐蚀与防护技术研讨会论文集. 海口: 中国腐蚀与防护学会, 2015.
WANG Jian-ping, LIU Jin-hong, HOU Xiao-feng. Consideration on Corrosion Protection of Offshore Island and Reef Engineering[C]//Proceedings of 2015 National Symposium on corrosion and protection technology of Marine Engineering. Haikou: Chinese Society for Corrosion and Protection, 2015.
- [9] 马长李, 马瑞萍, 白云辉. 我国沿海地区大气环境特征及典型沿海地区大气腐蚀性研究[J]. *装备环境工程*, 2017, 14(8): 65-69.
MA Chang-li, MA Rui-ping, BAI Yun-hui. Characteristics of Atmospheric Environment in China's Coastal Areas and Atmospheric Corrosion in Typical Coastal Regions[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2017, 14(8): 65-69.
- [10] 夏昕鸣, 邢路阔, 宋泓清, 等. 模拟海洋大气环境下耐候钢腐蚀性能研究[J]. *装备环境工程*, 2018, 15(3): 39-44.
XIA Xin-ming, XING Lu-kuo, SONG Hong-qing, et al. Corrosion Resistance of Weathering Steels in Simulated Ocean Atmospheric Environment[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2018, 15(3): 39-44.
- [11] 韩鹏飞, 齐章国, 张正贵, 等. 建筑结构用耐候钢Q460在模拟海洋大气环境下的腐蚀性能[J]. *河北冶金*, 2022(3): 5-17.
HAN Peng-fei, LIN Zhang-guo, ZHANG Zheng-gui, et al. Corrosion Performance of Q460 Weathering Steel Used for Building Structure in Simulated Ocean Atmosphere [J]. *Hebei Metallurgy*, 2022(3): 5-17.
- [12] 梁义, 王博, 魏世丞, 等. 海洋浪溅区Zn涂层加速腐蚀实验模拟研究[J]. *材料导报*, 2017, 31(10): 51-55.
LIANG Yi, WANG Bo, WEI Shi-cheng, et al. Simulation Study on the Accelerated Corrosion of Zn Coating in Splash Zone[J]. *Materials Review*, 2017, 31(10): 51-55.
- [13] 张斌, 柳秉毅, 薛忠亮, 等. 304不锈钢在高温高流速模拟海水中的耐冲蚀性能[J]. *材料保护*, 2018, 51(11): 25-28.
ZHANG Bin, LIU Bing-yi, XUE Zhong-liang, et al. Erosion Resistance of 304 Stainless Steel in Artificial Marine Environment at High Temperature and High Flow Velocity[J]. *Materials Protection*, 2018, 51(11): 25-28.
- [14] ZHAO Wei-min, WANG Yong, LIU Cun, et al. Erosion-Corrosion of Thermally Sprayed Coatings in Simulated Splash Zone[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 205(7): 2267-2272.
- [15] 李春玲, 鲁玉祥, 郭娟娟, 等. 电弧喷涂铝涂层海洋飞溅区腐蚀模拟试验研究[J]. *石油化工腐蚀与防护*, 2010, 27(2): 16-20.
LI Chun-ling, LU Yu-xiang, GUO Li-juan, et al. Corrosion Behavior of Aluminum Coating by Arc Spraying in Simulated Marine Splash Zone[J]. *Corrosion & Protection in Petrochemical Industry*, 2010, 27(2): 16-20.
- [16] 田天. 海洋结构物环境适应性物理模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
TIAN Tian. Physical Simulation Investigation of Environmental Adaptability of Offshore Structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.
- [17] 段体岗, 彭文山, 丁康康, 等. 海洋岛礁环境下304不锈钢腐蚀行为分析[J]. *装备环境工程*, 2021, 18(11): 51-57.
DUAN Ti-gang, PENG Wen-shan, DING Kang-kang, et al. Corrosion Behavior of 304 Stainless Steel in the Sea Environment[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2021, 18(11): 51-57.
- [18] 彭文山, 张彭辉, 李开伟, 等. 海洋岛礁海洋环境中典型不锈钢浪花飞溅区腐蚀规律[J]. *装备环境工程*, 2021, 18(11): 35-41.
PENG Wen-shan, ZHANG Peng-hui, LI Kai-wei, et al. Corrosion behavior of typical stainless steels in marine environment of island[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2021, 18(11): 35-41.
- [19] 宋积文, 王毛毛, 张亮, 等. 2205双相不锈钢在海洋深水环境中的腐蚀行为[J]. *腐蚀与防护*, 2019, 40(12): 898-901.
SONG Ji-wen, WANG Mao-mao, ZHANG Liang, et al. Corrosion Behavior of 2205 Duplex Stainless Steel in Deep Seawater[J]. *Corrosion & Protection*, 2019, 40(12): 898-901.
- [20] 李慧心, 李大朋, 王毛毛, 等. 316L不锈钢在海洋环境中的缝隙腐蚀行为研究[J]. *装备环境工程*, 2021, 18(1): 98-103.
LI Hui-xin, LI Da-peng, WANG Mao-mao, et al. Crevice Corrosion of 316L Stainless Steel in Marine Environment[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2021, 18(1): 98-103.
- [21] 黄涛. 耐候钢在海洋大气环境下的腐蚀行为研究[D]. 北京: 钢铁研究总院, 2018.
HUANG Tao. Research on Corrosion Behavior of Weathering Steel in Marine Atmosphere Environment [D]. Beijing: Central Iron and Steel Research Institute, 2018.
- [22] SONG H W. Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures—A Review[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2007, 2(1): 1-28.
- [23] 霍东兴, 梁精龙, 李慧, 等. 腐蚀电化学技术应用研究进展[J]. *热加工工艺*, 2017, 46(10): 18-20.
HUO Dong-xing, LIANG Jing-long, LI Hui, et al. Research Progress of Application of Electrochemical Corrosion Technology[J]. *Hot Working Technology*, 2017, 46(10): 18-20.

- [24] 邓法. 混凝土耐久性无损检测技术应用研究[D]. 广州: 广州大学, 2014.
DENG Fa. The Durability of Concrete Nondestructive Testing Technology Research[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2014.
- [25] 宋家茂, 张勇, 张润, 等. 基于直流阶跃法的混凝土电阻率与抗氯离子渗透性评价[J]. 混凝土, 2020(3): 59-62.
SONG Jia-mao, ZHANG Yong, ZHANG Run, et al. Research on Relation of Anti-Chloride Permeability and Concrete Resistivity Based on DC-Step Input[J]. Concrete, 2020(3): 59-62.
- [26] 黄星, 黄维蓉, 余平. 混凝土电通量与抗蚀系数及抗盐结晶侵蚀系数的相关性分析[J]. 混凝土, 2011(8): 34-36.
HUANG Xing, HUANG Wei-rong, YU Ping. Correlation Analysis about Concrete Flux and Resist Corrosion Coefficient and Resist Erosion of Salt Crystallization Coefficient[J]. Concrete, 2011(8): 34-36.
- [27] 王旭. 混凝土防腐措施及评价方法分析[J]. 全面腐蚀控制, 2019, 33(7): 69-70.
WANG Xu. Analysis of Concrete Anti-Corrosion Measures and Evaluation Methods[J]. Total Corrosion Control, 2019, 33(7): 69-70.
- [28] 靳宝龙, 刘鹏飞, 范建军. 关于混凝土防腐措施和评价方法的研究[J]. 江西建材, 2019(1): 30-31.
JIN Bao-long, LIU Peng-fei, FAN Jian-jun. Research on Anti-Corrosion Measures and Evaluation Methods of Concrete[J]. Jiangxi Building Materials, 2019(1): 30-31.

责任编辑: 刘世忠