

· 综述 ·

## 海洋环境下桥隧结构腐蚀监/检测技术进展

雷鹰<sup>1\*</sup>, 陈智光<sup>2</sup>, 黄璜<sup>3</sup>, 林理文<sup>4</sup>, 王林燊<sup>2</sup>, 林毅标<sup>2</sup>

(1. 厦门大学建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005; 2. 福建省高速公路达通检测有限公司, 福建 福州 350113;  
3. 河南工业大学土木工程学院, 河南 郑州 450001; 4. 厦门乐钢材料科技有限公司, 福建 厦门 361021)

**摘要:** [背景] 腐蚀是海洋环境下桥梁与隧道工程常见的失效破坏方式之一, 对腐蚀状态的监/检测, 有助于对桥隧结构的安全性能进行评估。[进展] 本文对海洋环境下桥隧结构腐蚀监/检测常用的电化学方法和物理方法进行了总结, 分析了各类方法的监/检测原理、研究进展和应用。电化学方法主要有半电池电位法、线性极化法、电化学阻抗谱、混凝土电阻率法、宏电池电流法、电化学噪声和电化学多功能腐蚀传感器等。物理方法主要有电阻探针、声发射、超声检测、光纤传感监测、长标距光纤光栅传感腐蚀监测和基于计算机视觉与机器学习的腐蚀监测技术等。每种方法都有各自的适用范围和局限性。电化学方法根据周边混凝土环境中各参数的变化, 间接地推断钢筋的腐蚀状况, 一般给出腐蚀的定性信息。物理方法通过测定与钢筋腐蚀相关的物理特性变化, 给出钢筋的腐蚀位置与程度, 具有直接性与直观性。本文对平潭海峡大桥主桥墩进行腐蚀监测, 采用了融合物理与电化学的监测方法, 利用多功能电化学腐蚀探头实时监测6个电化学参数, 根据参数的变化进行腐蚀预警; 利用长标距光纤光栅传感技术监测宏应变, 构建基于宏应变模态的腐蚀损伤指标, 进行腐蚀定位与定量识别。物理与电化学方法融合互补, 为平潭海峡大桥的腐蚀监测提供了技术保障。[展望] 在复杂严酷的海洋环境下, 对桥隧结构的腐蚀进行准确的监/检测还面临很多挑战。未来的研究方向应集中在: 物理和电化学技术的综合应用; 与计算机视觉、深度学习和机器学习算法等先进计算方法的协同结合; 开发用于海洋环境下桥隧结构腐蚀评估的新型智能监/检测系统。

**关键词:** 腐蚀监/检测; 电化学方法; 物理方法; 融合方法; 多功能腐蚀传感; 长标距光纤光栅传感

中图分类号: U 447; U 459.5

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)04-0555-13

## Development of corrosion monitoring/detection technology for bridge and tunnel structures in marine environment

LEI Ying<sup>1\*</sup>, CHEN Zhiguang<sup>2</sup>, HUANG Huang<sup>3</sup>, LIN Liwen<sup>4</sup>,  
WANG Linshen<sup>2</sup>, LIN Yibiao<sup>2</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Fujian Expressway Datong Testing Co., LTD, Fuzhou 350113, China; 3. School of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 4. Xiamen Legang Material Technology Co., LTD., Xiamen 361021, China)

**Abstract:** [Background] As the most prevalent failure mechanism in bridge and tunnel engineering in marine environments, the corrosion has attracted considerable research attention. Consequently, its monitoring and detecting play a critical role in assessing the safety performance of such infrastructures. [Research Progress] Electrochemical methods and physical methods for corrosion monitoring/detection of bridge and tunnel structures in marine environment are summarized. Monitoring/detection principles, research progress and application of various methods are analyzed. Electrochemical methods primarily include half-cell potential, linear

收稿日期: 2024-08-22 录用日期: 2024-12-24

基金项目: 海洋环境桥墩腐蚀识别技术研究项目(XDHT2020708A)

\* 通信作者: yleil@xmu.edu.cn

引文格式: 雷鹰, 陈智光, 黄璜, 等. 海洋环境下桥隧结构腐蚀监/检测技术进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(4): 555-567.

Citation: LEI Y, CHEN Z G, HUANG H, et al. Development of corrosion monitoring/detection technology for bridge and tunnel structures in marine environment[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(4): 555-567. (in Chinese)



polarization persistence, electrochemical impedance spectroscopy, concrete resistivity method, macrocell current method, electrochemical noise and electrochemical multifunctional corrosion sensor. Also, physical methods mainly include resistance probe, acoustic emission, ultrasonic detection, optical fiber sensing monitoring, long-gauge fiber optical grating sensing monitoring technology based on computer vision and machine learning. Each approach secures its own scope of application, advantages, and limitations. Based on changes of various parameters in the surrounding concrete environment, those electrochemical methods indirectly deduce the corrosion status of the steel bar and generally give the qualitative information of corrosion. By measuring the change of physical characteristics related to steel corrosion, those physical methods identify the position and the degree of steel corrosion directly and intuitively. The corrosion monitoring of the main pier of Pingtan Straits Rail-cum-Road Bridge is carried out by combining physical and electrochemical monitoring methods. Multifunctional electrochemical corrosion probes are used to monitor 6 electrochemical parameters in real time, and early warning of corrosion is carried out according to the change of parameters. The corrosion damage index based on macro strain mode is constructed by using the macro strain monitored by long-gauge fiber optical grating sensing technology, and the corrosion location and quantitative identification are carried out. The fusion of physical and electrochemical methods provide technical support for corrosion monitoring of Pingtan Straits Rail-cum-Road Bridge. [Outlook] In complex and harsh marine environments, significant challenges remain in achieving accurate corrosion monitoring and detection for bridge and tunnel structures. Future research directions should focus on integrated application of physical and electrochemical technologies, synergistic combination with advanced computational approaches including computer vision, deep learning and machine learning among others, so that novel intelligent monitoring/detecting systems for corrosion assessment of bridge and tunnel structures in marine environment can be further developed.

**Keywords:** corrosion monitoring/detection; electrochemical method; physical method; fusion method; multi-function corrosion sensing; long-gauge fiber optical grating sensing

海洋环境下,桥梁和隧道工程因腐蚀破坏导致结构损伤甚至失效的问题非常突出,原本设计年限为上百年服役寿命的结构工程,部分在建成 10~30 年就会发生腐蚀<sup>[1-2]</sup>.长期的腐蚀会严重削弱结构构件的力学性能和承载能力,这不仅存在重大安全隐患,严重影响桥隧的使用寿命,还带来了巨大的经济损失<sup>[3-4]</sup>.因此,准确地监测和掌握海洋恶劣环境下桥隧结构的腐蚀发生、腐蚀定位、腐蚀速率变化和腐蚀程度的发展,可为桥隧的腐蚀防护提供科学的参考数据,有助于进行结构状态评估、剩余寿命预测和制定维护策略.目前,针对桥隧结构常用的腐蚀监/检测方法主要分为两类:电化学方法和物理方法<sup>[5-6]</sup>.本文将主要针对海洋环境下桥梁与隧道工程腐蚀监/检测中常用的各种方法的原理、进展和工程应用进行总结.

## 1 基于电化学方法的腐蚀监/检测技术

海洋环境下,桥隧工程无论是钢筋混凝土结构还是钢结构,其腐蚀本质上是一个电化学过程.因此,利用电化学方法对结构件的腐蚀状态进行测量判定,可以反映腐蚀的本质过程,是常用的一类监/检测方法,主要包括:半电池电位(half-cell potential, HCP)法、线性极化(linear polarization resistance, LPR)法、电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)法、混凝土电阻率法、宏电池电流法、电化学噪声

(electrochemical noise, EN)和电化学多功能腐蚀传感器等.

### 1.1 HCP 法

HCP 法也称为开路电位或静止电位,是基于参考电极和钢筋之间的电压/电位差预测钢筋腐蚀概率的技术.电位差取决于参考电极和腐蚀条件,电压表上的电位读数表明在特定位置腐蚀的可能性<sup>[4]</sup>.由 HCP 技术发展的半电池电位计已成为一种较成熟的腐蚀监测设备,如瑞士的 CANIN 钢筋锈蚀仪和英国易高的 Elcometer331 锈蚀仪都可测量大面积钢筋的腐蚀电位.

HCP 对钢筋混凝土腐蚀判断是通过腐蚀概率实现的,属于定性判断,被广泛地应用于腐蚀定位的判定<sup>[7-8]</sup>.王彦明等<sup>[9]</sup>对日照港煤码头浪溅区构件进行 HCP 检测,结果在  $-200 \sim -100$  mV 内,腐蚀概率小于 5%.杨博乔<sup>[10]</sup>采用 HCP 法对渤海湾某高桩码头浪溅区的钢筋进行腐蚀检测,分析了温度对腐蚀检测的影响,并开凿混凝土构件,验证了 HCP 法的可靠性. Capasso 等<sup>[11]</sup>结合 HCP 法和电阻率法,对罗马的弗拉米尼奥桥的腐蚀状态进行了腐蚀概率评估,对桥墩柱进行了原位检测 HCP 的概率退化、电阻率原位测量概率退化,并分析了桥墩的总概率退化.虽然 HCP 操作方便,可定位易发生腐蚀的区域,但由于检测原理的限制和实际应用中的影响因素众多,只能定性地

给出腐蚀发生的概率,不能给出腐蚀速率信息<sup>[5]</sup>。

## 1.2 LPR 法

LPR 法是利用腐蚀电位附近极化电位与极化电流呈线性关系来测定金属腐蚀速度的方法<sup>[12]</sup>,能够检测瞬时平均腐蚀速率<sup>[4]</sup>。混凝土结构中钢筋的腐蚀监测通常采用恒电位和恒电流法进行 LPR 曲线的检测。该方法需要提前利用极化阻抗谱法、恒电流阶跃法对混凝土电阻进行测量,并通过补偿来消除混凝土电阻产生的欧姆压降,以提高其测试的准确性<sup>[7]</sup>。由 LPR 法发展的一些便携式腐蚀速率测量仪已应用于现场检测,但仍存在一些局限性,如不能直接检测混凝土内部钢筋电阻数值,以及因极化电流小和混凝土孔隙溶液欧姆压降的存在会增大测量误差等,因此,该方法还需进一步改良以补偿欧姆压降,从而提高测量精度<sup>[12]</sup>。

## 1.3 EIS 法

EIS 法的原理是对电极施加小的交流信号不改变电极体系性质,则输入与输出信号呈线性关系。EIS 法是一种频域方法,除了能测得极化电阻,还能得到 LPR 等方法无法获得的其他电化学腐蚀信息<sup>[1]</sup>。EIS 法能提供腐蚀反应的动力学信息,适用于高阻抗介质,能产生稳定的腐蚀电位,重现性良好,可准确地反映电化学控制机制,适合长期对钢筋的腐蚀状态进行非扰动监测<sup>[7]</sup>。已有研究<sup>[13]</sup>用低频容抗弧的半径大小表征判断钢筋的锈蚀,对水下混凝土的钢筋锈蚀程度进行检测,结果表明钢筋在低频区明显收缩,容抗弧半径明显减小,钢筋因腐蚀造成的质量损失率与电化学表征参数呈正相关。实际应用中,EIS 在测量钢筋腐蚀程度时,因测量阻抗较大而存在响应信号弱、信噪比低、误差较大、结果分析复杂等局限性。为解决这一问题,林旭海和刘振东等<sup>[14-15]</sup>将改进的自适应滤波算法应用于 EIS 测量钢筋腐蚀,通过提高信号信噪比,以实现钢筋腐蚀测量精度的提高。Ribeiro 等<sup>[16]</sup>提出了一种基于每种现象的特征弛豫角频率和典型电容与频率关联的分析方法来提高测量精度,但仅在实验室进行了验证。

EIS 分析依赖于等效电路模型的建立,因此该方法更适合实验室研究。实际应用中,由于等效电路模型会随着腐蚀环境和混凝土的非均质性而变化,导致分析结果非常复杂,存在误差,这使得测量更加耗时和具有挑战性<sup>[1]</sup>。此外,现场应用还需考虑阻抗空间分布条件及技术设备昂贵等问题<sup>[12]</sup>。

## 1.4 混凝土电阻率法

当钢筋发生腐蚀电化学反应时,电流由阳极通过

混凝土流向阴极,因此,混凝土的电阻率与钢筋的腐蚀速率相关<sup>[7,17-18]</sup>。混凝土电阻率越小,其钢筋越易腐蚀。所以,混凝土电阻率法主要是通过测量混凝土中的电阻率,间接反映钢筋的腐蚀速率。基于以上原理,目前已开发了较为成熟的混凝土电阻率测试仪,用于无损检测混凝土的电阻率。

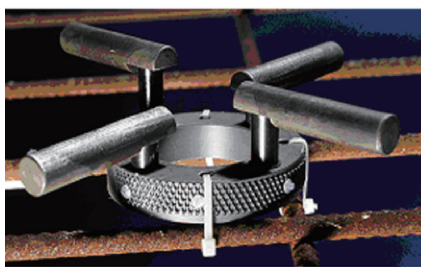
混凝土电阻率法分为直流电法和交流电法,工程常用交流电测试法。薛亮亮<sup>[19]</sup>提出了对微小采集信号的巴特沃斯滤波算法,设计了以 STM32 芯片为控制核心的钢筋混凝土腐蚀远程检测系统硬件和软件设计方案。董臻等<sup>[20]</sup>研究混凝土电阻率、渗透系数,电通量和氯离子迁移系数的相关性关系,验证了电阻率法的可靠性。Xiao 等<sup>[21]</sup>基于变压器原理测量混凝土电阻率,以非接触方式消除接触电容和电阻的影响,研发了非接触式电阻率测量方法。但该方法还不能对钢筋腐蚀进行定量监测<sup>[7]</sup>。

## 1.5 宏电池电流法

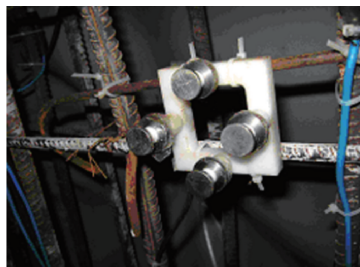
宏电池电流法是通过在保护层不同深度下预埋阳极,与阴极形成宏电池,以宏电流的改变确定不同深度处阳极的腐蚀状态和腐蚀时间,来预测混凝土内钢筋的腐蚀速率<sup>[22-23]</sup>。基于此原理发展了监测钢筋腐蚀的阳极梯传感器系统,已成为成熟的钢筋锈蚀监测设备,分为预埋式和后装式锈蚀监测传感器,分别适用于新建和既有混凝土结构的钢筋锈蚀监测。预埋式锈蚀监测传感器,如丹麦的 CorroWatch<sup>[24]</sup>和德国的 Sensortec 阳极梯,可长期监测混凝土中钢筋锈蚀的程度及深度,已应用于厦门翔安海底隧道(图 1(a))、港珠澳大桥、苏通大桥等重要工程。后装式锈蚀监测传感器,如丹麦的 CorrRisk 和德国的膨胀阳极环,已被应用于欧洲的一些桥梁和港口的腐蚀监测<sup>[25]</sup>。

厦门大学周志东等<sup>[26]</sup>研发的阶梯型电化学腐蚀传感器,包含一个参比电极和四对按照高度梯度分布的阴阳极传感探头,探头和混凝土表面之间的距离可调,通过测量阴阳极宏电流和与参比电极的相对电位,可监测氯离子扩展峰面的位置,来预测钢筋混凝土结构的腐蚀。与商用传感器相比,该传感器克服了数据出现的不稳定和不可比性<sup>[24]</sup>,已应用于厦门翔安海底隧道(图 1(b))。

宏电池电流法一般监测钢筋的平均腐蚀速率,无法监测局部腐蚀速率,在现场应用中还可能会受到混凝土的干湿循环和高电阻等因素的干扰<sup>[1]</sup>。因此,运用宏电池电流监测腐蚀速率来预测钢筋剩余寿命还存在一定误差<sup>[7]</sup>。



(a) 丹麦Force公司的CorroWatch



(b) 厦门大学研发的阶梯型电化学腐蚀传感器

图1 宏电池电流法在厦门翔安海底隧道钢筋腐蚀监测的应用<sup>[24]</sup>

Fig. 1 Reinforcement corrosion monitoring of Xiang'an Subsea Tunnel in Xiamen

### 1.6 EN 法

EN 是电化学信号随时间发生的随机非平稳波动现象. 自然电位下, 当钢筋发生局部腐蚀(如坑蚀), 电极表面的电位或电流会自发地产生随机波动<sup>[27]</sup>, 其中包含了腐蚀发展过程的重要信息<sup>[28]</sup>. EN 法无需建立电化学模型、操作简单, 是一种原位无损且无干扰的电化学检测技术, 已广泛应用于均匀腐蚀、局部腐蚀等多种类型的腐蚀监测, 是一种检测局部腐蚀的有效工具<sup>[29-31]</sup>.

EN 是宏电池电流技术的改进, 可测量由随机腐蚀事件产生的电位和电流信号的低幅度波动<sup>[1]</sup>. 利用 EN 法对钢筋腐蚀过程进行监测的重点是信号分析, 通过比较自发瞬态噪声电流和电位特征、时域噪声统计分析、功率谱密度和散粒噪声分析等, 从而得到腐蚀过程的极化电阻和不同阶段噪声信号的电压和电

流<sup>[1]</sup>. 最近, Hou 等<sup>[32]</sup>利用 EN 和递归定量分析监测钢材的腐蚀, 结果证明基于循环量化和主成分分析生成的腐蚀监测图是一种有效的连续腐蚀监测方法. Hou 等<sup>[33]</sup>还提出了一种基于 EN 的递归量化分析和机器学习方法的腐蚀监测方法, 能区分点蚀和均匀腐蚀.

由于噪声信号的电压在  $\mu\text{V} \sim \text{mV}$ 、电流在  $\text{nA} \sim \mu\text{A}$  范围内, 因此需考虑数据采集系统的噪声、混叠和量化误差等具体问题. 从腐蚀信号中提取的参数与腐蚀速率或腐蚀过程中不同阶段之间的关系还尚未很好地建立<sup>[1]</sup>.

### 1.7 电化学多功能腐蚀传感器

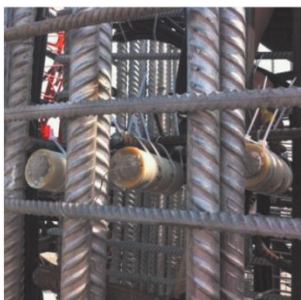
以上电化学方法, 大多仅对一种电化学指标进行监/检测, 存在一定的局限性. 为此, 厦门大学林昌健等<sup>[34-35]</sup>研制开发了 XMUCT-08 钢筋混凝土结构腐蚀安全多功能监测探头(图 2(a)), 其由一个 pH 值探



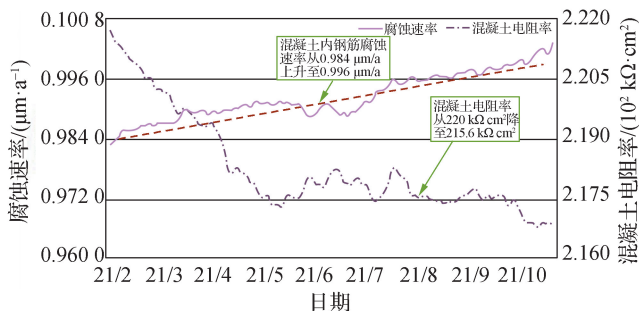
(a) XMUCT-08多功能探头



(b) 东吾洋大桥桩基腐蚀监测



(c) 港珠澳大桥CB05标段腐蚀监测



(d) 港珠澳大桥腐蚀监测数据

图2 XMUCT-08 电化学多功能腐蚀传感器及其工程应用

Fig. 2 Electrochemical multifunctional corrosion sensor of XMUCT-08 and its engineering application

针、氯离子探针、钢制工作电极、全固态  $\text{MnO}_2$  参比电极和不锈钢顶针组成。将所有电极组装在不锈钢顶针中,用环氧树脂固定在其指定位置。不锈钢顶针直径约为 30 mm,既用作电化学测量的对电极,又用作多功能传感器的主支架。pH 值探针、氯离子探针分别对混凝土孔隙溶液的 pH 和氯离子浓度有较好的响应。钢筋的腐蚀速率主要取决于混凝土中的化学环境。该多功能传感器可同时长期监测钢筋混凝土内部化学环境(混凝土中 pH 值,氯化物浓度、混凝土电阻率)和钢筋在混凝土中的腐蚀状态及安全性(钢筋的自腐蚀电位,钢筋腐蚀电流和腐蚀速率),实现了钢筋混凝土结构腐蚀的精准、高效和全过程监测<sup>[24,34-35]</sup>。

该技术已在厦门翔安海底隧道、大亚湾核电站、沪昆高铁、港珠澳跨海大桥、平潭公铁大桥、东吾洋大桥(国内第一超水深大桥)等多个重大工程应用(图

2)。其中,港珠澳跨海大桥于 2016 年竣工,其工程设计中的主要技术挑战之一就是需要在严酷的海洋环境中保证工程整体 120 年的设计年限。该工程 CB05 标段桥墩钢筋混凝土的腐蚀监测工作,共安装 48 支 XMUCT-08 多功能传感器,8 台采集仪。图 2(e)为港珠澳跨海大桥在 2021 年 2 月至 10 月的部分监测数据,图中显示混凝土电阻率从  $220 \text{ k}\Omega \text{ cm}^2$  降低到  $215.6 \text{ k}\Omega \text{ cm}^2$ ,钢筋的锈蚀速率从  $0.984 \mu\text{m/a}$  上升到  $0.996 \mu\text{m/a}$ 。监测数据说明在严酷的海洋环境下,混凝土电阻发生了微弱的降低,钢筋的锈蚀速率也出现了微弱的上升,多功能传感器能够敏锐地监测到重要的电化学参数的变化。虽然参数发生了微弱变化,但都在安全范围。

综上,表 1 对以上基于电化学腐蚀监/检测技术进行了总结。

表 1 基于电化学的腐蚀监/检测方法总结

Tab. 1 Summary of electrochemistry-based corrosion monitoring and detecting techniques

监测方法	优点	不足
半电池电位法	操作方便,可定位易发生腐蚀的区域。	只能定性给出腐蚀发生的概率,不能给出腐蚀速率信息。
线性极化法	检测瞬时平均腐蚀速率。	不能直接检测混凝土内部钢筋电阻数值,测量误差较大。
电化学阻抗谱法	适用于高阻抗介质;长期对钢筋的腐蚀状态进行非扰动监测。	依赖于等效电路模型,适合实验室研究;测量耗时;需考虑阻抗空间分布条件、技术设备昂贵。
混凝土电阻率法	可用于无损检测混凝土的电阻率。	不能对钢筋腐蚀进行定量监测。
宏电池电流法	监测钢筋的平均腐蚀速率,可长期监测混凝土中钢筋锈蚀的程度及深度。	无法监测局部腐蚀速率,易受到混凝土的干湿循环和高电阻等因素的干扰。
电化学噪声法	无需建立电化学模型、操作简单;可应用于均匀腐蚀、局部腐蚀等多种类型的腐蚀监测。	需考虑数据采集系统的噪声、混叠和量化误差等具体问题。
电化学多功能腐蚀传感器	同时长期监测钢筋混凝土内部化学环境(混凝土中 pH 值,氯化物浓度、混凝土电阻率)和钢筋在混凝土中的腐蚀状态及安全性(钢筋的自腐蚀电位,钢筋腐蚀电流和腐蚀速率)。	只能监测探头附近腐蚀环境的参数。

## 2 基于物理方法的腐蚀监/检测技术

腐蚀监/检测的物理方法主要是通过直接监/检测与钢筋腐蚀相关的物理特性的变化来反映钢筋的腐蚀程度<sup>[36]</sup>。主要包括:电阻探针技术、声发射(acoustic emission, AE)技术、超声检测技术、光纤传感监测技术、长标距光纤光栅传感腐蚀监测和基于计算机视觉与机器学习的腐蚀监测技术等。

### 2.1 电阻探针技术

电阻探针是一种监测腐蚀速率的方法,其原理是

利用导电材料的电阻与其截面积成反比,钢筋腐蚀导致其截面积减小而引起电阻增大。电阻探针通常预埋在需监测的混凝土区域,探针与钢筋材质相同,根据电阻与截面积的线性关系即可计算出腐蚀速率。电阻探针法可实时在线监测,且操作简单、信号反应快,不受腐蚀介质的影响。但探针的金属丝阻值很小,腐蚀过程中产生的变化也非常微小,需要对微小电阻值变化具有高分辨率的测量系统。为此,将双激励交流源驱动与自平衡补偿相结合,可进行高分辨的腐蚀速率实时监测<sup>[37]</sup>。已有学者<sup>[38-39]</sup>在悬索桥主缆安装多组电阻腐蚀监测探针,实时监测钢丝的腐蚀状态和速率。但

电阻探针法也需将电阻探针预埋在需要监测的区域。

## 2.2 超声波检测技术

超声波检测是利用超声波在金属内部反射的响应关系,检测金属裂纹的方法,其穿透力强,能检测大尺寸结构,检测灵敏度高,适用于多种环境。超声导波具有传播距离远、衰减小的特性,在腐蚀检测中具有很大的优势<sup>[36]</sup>。

已有研究<sup>[40]</sup>建立了导波信号与钢筋锈蚀全阶段的数学模型,用以监测混凝土中钢筋在服役过程中的锈蚀变化。Yan 等<sup>[41]</sup>提出了一种基于压电导波分形特征的混凝土结构钢筋局部锈蚀监测方法。姚媛媛<sup>[42]</sup>建立了锈蚀层厚度与导波信号之间的数值关系,提出了量化锈蚀程度的指标。Sharma 等<sup>[43]</sup>将超声导波和声发射监测技术结合起来构建主被动无损监测系统,可有效监测钢筋混凝土结构的腐蚀,且测量结果较电化学方法更精确。吴彬林等<sup>[44]</sup>运用磁致伸缩(MsS)超声导波检测技术进行桥梁缆索的腐蚀检测,以缆索的横截面损失率来表征其检测精度。MsS 超声导波系统的检测范围主要受频率影响,低频可实现长距离检测,但检测精度会降低,故需要平衡测量范围与测量精度。超声检测技术需要贴合试件表面,对试件的表面粗糙度以及规则性有较高要求,且对于腐蚀的定量分析较为困难。此外,超声导波需要特定的设备产生超声激励,费用较高。

## 2.3 声发射检测技术

声发射(acoustic emission, AE)是通过检测腐蚀引起的混凝土开裂释放的噪声来间接监测钢筋腐蚀<sup>[45]</sup>,对材料内部缺陷产生和扩展所释放的瞬态能量较为敏感,不受混凝土覆盖层的影响,能快速对腐蚀进行识别,具有动态、实时的特点<sup>[46]</sup>。

已有研究表明,AE 累积信号强度(CSS)作为 AE 的技术参数,可表征钢筋腐蚀过程的钝化膜破裂和裂缝产生的两个阶段,进而监测因腐蚀导致的钢筋混凝土损伤的进展<sup>[47]</sup>。虞爱平等<sup>[48]</sup>验证了 AE 监测可有效地反映混凝土中钢筋锈蚀的分布。Patil 等<sup>[49]</sup>验证了 CSS 是量化钢筋腐蚀的有效参数,证明了最大 CSS 与钢筋锈蚀质量损失之间的关系为自然指数生长函数。武丹<sup>[50]</sup>发现钢筋的锈蚀程度可用累积撞击数和累积能量来表示。Appalla 等<sup>[51]</sup>通过实验证明 AE 能够准确识别腐蚀速率,且相比电化学方法能更早地检测腐蚀的发生。

然而,随着时间的推移,声发射波在混凝土中会出现高衰减。嵌入式声发射传感器又称智能骨料(smart aggregates, SA)是一个很好的补充, Van

Steen 等<sup>[52]</sup>证明了 SA 传感器在腐蚀损伤早期检测中的潜力,但是高噪音水平仍然是一个重要的挑战。因此,未来的工作将集中在 SA 传感器的灵敏度提高和噪声水平的降低上。

## 2.4 光纤传感监测技术

光纤腐蚀监测技术利用光的传播特性来检测金属的腐蚀,具有体积小、质量轻、灵敏度高、抗电磁干扰、耐腐蚀性强等优点,已应用于钢筋、管道和钢索的腐蚀监测<sup>[53-55]</sup>。光纤布拉格光栅腐蚀(FBG)传感器是基于布拉格光栅的反射原理,将 FBG 固定在钢筋表面,通过监测 FBG 的波长位移来测量腐蚀引起的体积变化。当钢筋发生腐蚀时,腐蚀产物沉积在钢筋表面,钢筋体积不断膨胀,最终混凝土开裂。在腐蚀过程中,光纤光栅的拉伸应变随钢筋直径的增大而增大。本课题组<sup>[24,36]</sup>开展了钢筋混凝土试块加速腐蚀试验(图 3(a)),并给出了 FBG 波长随时间的增长的曲线。在初始 AB 阶段,混凝土孔隙较多,腐蚀产物堆积在孔隙中使钢筋体积膨胀较明显,故波长随时间迅速增加;BC 阶段,因混凝土因腐蚀产物的堆积而较之前密实,且钢筋腐蚀的继续膨胀,使混凝土开始产生微裂纹,波长增加相对较小且有波动。C 点以后混凝土已出现较大裂缝<sup>[36]</sup>。本课题组<sup>[24]</sup>还在厦门翔安海底隧道安装了自制的 FBG 传感器,采用与隧道二次衬环向相同的钢筋、中心波长均为 1 550 nm 左右的 FBG 制作传感器,安装在隧道不同断面拱顶及左侧拱腰位置,对隧道不同断面的钢筋进行腐蚀监测(图 3(b)~3(c)),图 3c 中给出了安装的 16 个传感器的监测数据,数据显示波长随时间增长呈平稳趋势,说明隧道监测区域尚未发生腐蚀。此外,翔安海底隧道实际埋设了各类腐蚀传感器(电化学和物理),能多角度地、较为全面地反映了混凝土内的环境和钢筋的腐蚀状况,比单一的监测手段更具有可靠性。

此外,还发展了用于腐蚀监测的其他类型光纤传感器<sup>[53]</sup>。监测钢筋附近或涂层的 FBG 传感器,其灵敏度和监测范围主要取决于光纤与腐蚀部位的距离或涂层(如 Fe-C 涂层)的厚度和性能,适用于混凝土结构中钢筋的早期腐蚀监测。监测钢筋因腐蚀膨胀产生应变的 FBG 传感器,其灵敏度取决于光纤应变传递系数,与光纤的缠绕松紧有关,适用于混凝土结构中钢筋的后期腐蚀监测<sup>[53]</sup>。长周期光纤光栅(LPFG)腐蚀传感器测量的是折射率的变化,其灵敏度取决于包裹的酚醛树脂或 Fe-C 涂层的厚度和性能,LPFG 对环境变化非常敏感,适合于混凝土中钢筋早期腐蚀监测,但使用寿命有限,不适合钢筋的长期腐蚀监测。分布

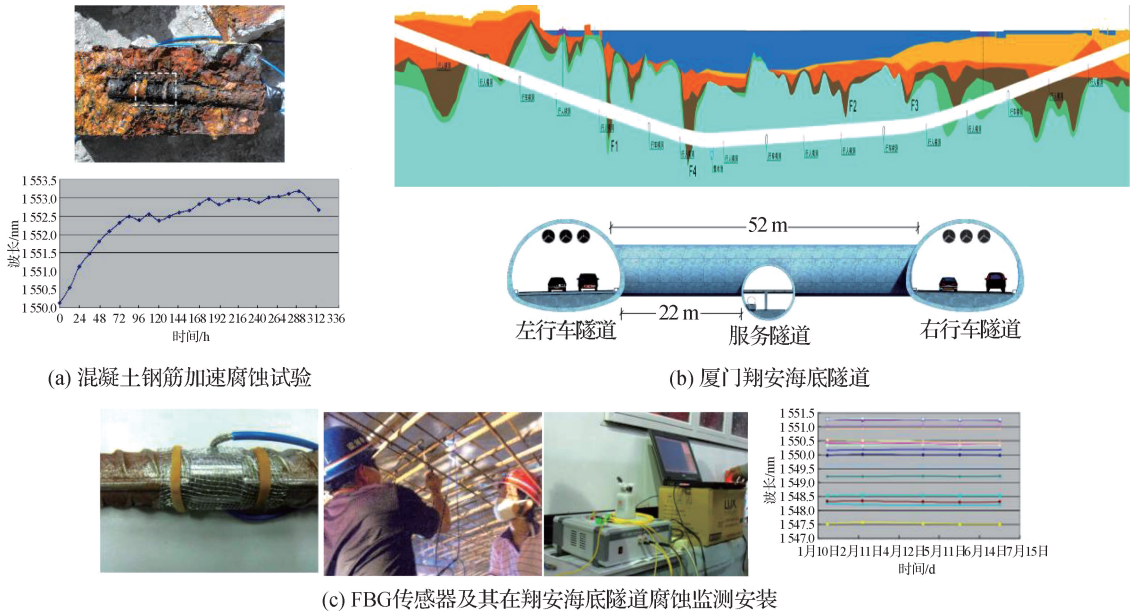


图 3 FBG 传感器监测混凝土钢筋加速腐蚀试验及其在翔安海底隧道腐蚀监测的应用<sup>[24]</sup>

Fig. 3 FBG sensor monitoring accelerated corrosion test of concrete reinforcement and its application in corrosion monitoring of Xiang'an Subsea Tunnel<sup>[24]</sup>

式光纤腐蚀传感器通过测量钢筋体积膨胀或腐蚀引起的混凝土膨胀/开裂产生的应变来监测钢筋的腐蚀. 其灵敏度和监测范围取决于腐蚀产物体积膨胀与光纤之间的传递系数, 且与安装方式、安装材料性能和光学仪器解调能力有关<sup>[53]</sup>.

### 2.5 长标距光纤光栅传感监测技术

光纤传感器因多方面优势, 已被广泛应用于土木工程监测. 然而对于长大跨桥隧工程, 特别是传统的“点式”光纤传感器, 只能测量传感器附近的局部信息, 难以捕捉整个桥隧结构的局部腐蚀损伤, 而加速度计测量的是宏观信息, 与结构腐蚀损伤的关联性太弱. 此外, 传统的光纤传感器还存在易脆断、易滑移、耐久性差等问题, 影响测量精度和灵敏度等<sup>[56]</sup>.

面对结构腐蚀点数量多范围广的特点, 传统监测技术难以覆盖整个结构. 为了克服上述传统光纤传感器腐蚀测量的局限, 满足实际工程腐蚀监测的需求, 吴智深等<sup>[54, 57]</sup>提出了长标距光纤光栅传感技术(如图 4), 该技术测量结构在标距范围内的平均应变, 建立应变与转角的关系, 将宏观和微观信息关联, 实现腐蚀损伤覆盖监测的目的<sup>[58]</sup>. 此外, 吴智深还为长标距光纤光栅传感研发了多个关键技术<sup>[54, 58]</sup>: 1) 玄武岩纤维复合材料封装技术提高其耐久性和施工性; 2) 温度自补偿增敏技术提高灵敏度; 3) 高性能长寿命刻栅技术; 4) 变刚度锚固技术提高锚固段应力传递长度. 长标距光纤传感技术能同时获得结构的局部和全局信

息, 具有宏微观、动静态、高精度测量以及长期耐久性的特点, 适合于混凝土结构中钢筋腐蚀的实时监测.

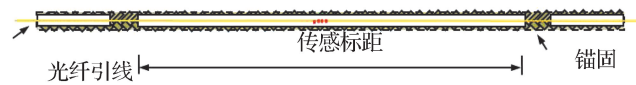


图 4 长标距光纤光栅传感器<sup>[58]</sup>

Fig. 4 Long-gauge fiber optical grating sensor<sup>[58]</sup>

利用长标距光纤光栅传感技术进行腐蚀定位识别, Fouad 等<sup>[59]</sup>以等截面受弯钢筋混凝土构件为研究对象, 通过比较两个不同传感器在两个不同位置的应变, 一个在待识别的目标位置, 另一个在不易腐蚀的位置(参考位置), 提出了基于分布应变比(DSR)的腐蚀识别方法, 并考虑混凝土梁内部钢筋的有效腐蚀开始于服务荷载作用下的裂缝萌生之后, 在此之前钢筋的应变没有明显变化.

完整状态下, 任意截面的应变仅取决于弯矩值, 参考应变  $\epsilon_r$  与目标应变  $\epsilon_i$  的比值为<sup>[59]</sup>

$$\left(\frac{\epsilon_i}{\epsilon_r}\right)_0 = \frac{M_i y / EI_i}{M_r y / EI_r} = \frac{M_i}{M_r} = \alpha_1. \quad (1)$$

混凝土处于开裂的临界状态以及钢筋腐蚀状态, 参考应变  $\epsilon_r$  与目标应变  $\epsilon_i$  的比分别为:

$$\left(\frac{\epsilon_i}{\epsilon_r}\right)_{cr} = \frac{M_i y / EI_i^{cr}}{M_r y / EI_r} = \frac{M_i}{M_r} \frac{I_r}{I_i^{cr}} = \alpha_1 \frac{1}{\beta_i^{cr}} = \alpha_2; \quad (2)$$

$$\left(\frac{\epsilon_i}{\epsilon_r}\right)_{co} = \frac{M_i y / EI_i^{co}}{M_r y / EI_r} = \frac{M_i}{M_r} \frac{I_r}{I_i^{co}} = \alpha_1 \frac{1}{\beta_i^{co}} = \alpha_3. \quad (3)$$

腐蚀指标定义为:

$$\varphi = \left[ \frac{(\epsilon_i/\epsilon_r)_{co}}{(\epsilon_i/\epsilon_r)_{cr}} - 1 \right] = \frac{\alpha_3}{\alpha_2} - 1. \quad (4)$$

因此,将长标距光纤光栅传感器件覆盖到结构可能发生腐蚀的区域,如果目标应变周围发生腐蚀,则腐蚀指标>0,即可进行腐蚀的定位。

此外,也有学者开展了腐蚀的定量研究.程玉瑶等<sup>[56]</sup>基于长标距应变传感器在冲击力作用下的动态宏观应变响应,识别钢筋混凝土梁的宏观应变柔度来进行腐蚀定位,再通过宏观应变柔度的灵敏度分析,根据钢筋截面刚度的降低来定量腐蚀程度.赵晨阳<sup>[58]</sup>基于长标距光纤传感技术,在静荷载下,利用应变比及其对数损伤指数来定位腐蚀位置,并推导应变比与截面刚度的关系来估计腐蚀程度;在移动荷载下,将宏观应变响应进行时程积分来构建损伤指标,利用得到的宏观应变时程积分来反演截面的刚度进行腐蚀定量的识别。

### 2.6 基于计算机视觉与机器学习的腐蚀检测技术

随着计算机视觉技术和机器学习的发展,使得桥梁腐蚀的智能化检测成为一种新的腐蚀检测技术,一些学者已经在这方面开展了相关研究<sup>[60-64]</sup>。

徐阳<sup>[60]</sup>通过对腐蚀过程和表观图像统计特征的概率建模,建立了腐蚀特征空间与疲劳寿命控制参数

的关系,提出了基于图像的在役拉索腐蚀状态识别及疲劳寿命评估方法,并对某桥服役近 20 年的腐蚀钢丝的疲劳寿命进行了预测.冯东明等<sup>[61]</sup>利用无人机建立悬索桥的三维模型,采用基于区域的快速卷积神经网络(faster R-CNN)网络模型识别主缆图像中的表观病害,并利用图像融合的数据增强方法提高目标检测的准确率.彭卫兵等<sup>[62]</sup>对采集的腐蚀图像建立钢桥病害图像库,引入掩膜区域卷积神经网络构建钢桥病害识别模型,以实现钢桥腐蚀病害的自动识别.吴乐谋等<sup>[63]</sup>提出了一种融合自适应光照预处理方法和深度学习的钢桥腐蚀检测方法,修复并增强了图像细节和纹理特征,较好地解决了桥梁腐蚀图像的光照问题.Gao 等<sup>[64]</sup>依据钢桥腐蚀图像的锈迹特征构建深度神经网络模型,通过无监督学习的稀疏自编码对深度神经网络进行自编码来减少重构偏差,实现了对锈蚀状态的准确检测.在未来的研究中,进一步开发更高效的数图像处理方法,从大量的监测图像中提取腐蚀特征信息,才能更准确地识别结构腐蚀的状态,包括腐蚀定位、腐蚀速率和腐蚀程度,并预测结构腐蚀发展趋势和预警潜在的腐蚀风险。

综上,表 2 对以上基于物理的腐蚀监测检测技术进行了总结。

表 2 基于物理的腐蚀监/检测技术总结

Tab. 2 Summary of physics-based corrosion monitoring and detecting techniques

监测方法	优点	不足
电阻探针技术	实时在线监测,且操作简单、信号反应快,不受腐蚀介质的影响.	需要对微小电阻值变化具有高分辨率的测量系统.
超声波检测技术	能检测大尺寸结构,检测灵敏度高,适用于多种环境.	腐蚀的定量分析困难;需要特定的设备产生超声激励,费用较高.
声发射检测技术	不受混凝土覆盖层的影响,能快速对腐蚀进行识别,具有动态、实时的特点.	随时间退役,声发射波在混凝土中会出现高衰减;噪音对智能骨料影响大.
光纤传感监测技术	体积小、质量轻、灵敏度高、抗电磁干扰、耐腐蚀性强.	只能测量传感器附近的局部信息,易脆断、易滑移、耐久性差.
长标距光纤光栅传感监测技术	具有宏微观、动静态、高精度测量及长期耐久性的特点,适合于混凝土结构中钢筋腐蚀的实时监测.	需进一步研究钢筋腐蚀和混凝土劣化耦合情况下腐蚀量化分析.
基于计算机视觉与机器学习的腐蚀检测技术	无接触式的无损监/检测技术.	需进一步开发更高效的数图像处理方法,更准确地识别结构腐蚀的状态.

### 3 综合物理与电化学方法的腐蚀监测技术应用

以上基于电化学和物理的腐蚀监/检测方法都有

各自的适用范围,但单一的腐蚀监测技术难以全面反映出桥隧结构的腐蚀现状和风险,因此有必要发展融合多方法协同的腐蚀监测技术,各技术之间取长补短,以实现对接腐蚀进行准确可靠的监/检测的目的。

### 3.1 腐蚀监测机理

#### 1) 基于分布式应变的钢筋混凝土腐蚀传感技术

采用长标距光纤传感器(图 4). 基于分布式光纤应变传感的灵敏性,通过结构外贴分布式应变传感,识别各传感单元的应变模态,基于应变模态对结构微小损伤敏感与抗噪性,以单元的应变模态变化,定位结构内发生钢筋腐蚀与混凝土劣化位置. 通过构件加速腐蚀标定试验,定量监测钢筋混凝土内部钢筋的腐蚀及混凝土的劣化.

比较腐蚀前后结构的归一化宏应变模态向量,构建结构的腐蚀指纹向量为:

$$\{\lambda_{1r}, \lambda_{2r}, \dots, \lambda_{ir}, \dots\}^T, \quad \lambda_{ir} = \frac{\bar{\delta}_{ir}^* - \bar{\delta}_{ir}}{\bar{\delta}_{ir}}, \quad (5)$$

$$\{\bar{\delta}_{1r}, \bar{\delta}_{2r}, \dots, \bar{\delta}_{ir}, \dots\}^T = \left\{ \frac{\delta_{1r}}{\delta_{1r}}, \frac{\delta_{2r}}{\delta_{1r}}, \dots, \frac{\delta_{ir}}{\delta_{1r}}, \dots \right\}^T. \quad (6)$$

其中,  $\lambda_{ir}$  为第  $S_i$  个长标距单元的第  $r$  阶腐蚀指纹,“\*”表示腐蚀后结构的参数.  $\{\bar{\delta}_{1r}, \bar{\delta}_{2r}, \dots, \bar{\delta}_{ir}, \dots\}^T$  是第  $S_n$  个长标距单元,记为参考单元,得到归一化后的宏应变模态向量.

#### 2) 基于电化学多参数的钢筋混凝土腐蚀传感

厦门大学研发的 XMUCT-08 电化学多功能传感器探头(图 2(a)),采用全固态二氧化锰电极作为参比电极,可测得腐蚀电位  $E_{corr}$ 、腐蚀速率及腐蚀电阻  $R_p$ 、氯离子浓度  $[Cl^-]$ 、pH 值、混凝土电阻率  $R$  等多个参数,技术指标见表 3.

#### 3) 综合应变传感与多功电化学传感器的结构腐蚀传感

基于多源信息的综合分析,研究分布式应变传感与多功电化学传感对钢筋混凝土腐蚀的协同作用,根据多功电化学传感器监测的多个混凝土化学环境指标与基于分布式应变传感的钢筋腐蚀监测不仅可以互相验证补充,而且可建立相关参数的相关性,从而基于分布的长标距应变传感,分析未安装多功电化学

传感器部分的混凝土化学环境.

表 3 多功能钢筋混凝土腐蚀检测探头技术指标

Tab. 3 Technical specifications of multifunctional corrosion detection probe

参数	测量范围
$[Cl^-]$	$\geq 10^{-4}$ mol/L
pH	2~14
电阻率	1 000~19 000 $\Omega \cdot cm$
极化电阻	1 k $\Omega \cdot cm^2$ ~ 1 M $\Omega \cdot cm^2$
开路电位	-2.0~2.0 V

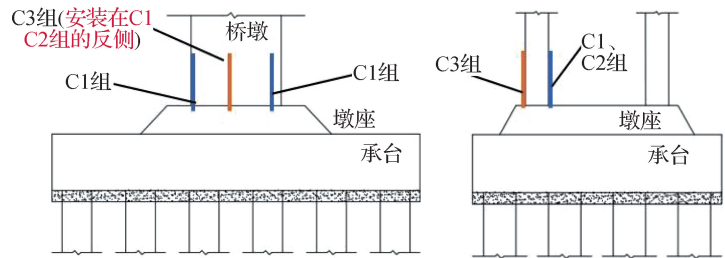
### 3.2 综合物理与电化学方法的平潭大桥主桥墩腐蚀监测

本课题组融合长标距光纤光栅传感腐蚀监测技术和厦门大学研发的电化学腐蚀安全多功能腐蚀传感监测技术,针对平潭海峡大桥(图 5(a))通航主桥桥墩实施腐蚀在线监测.

考虑到浪溅区是桥墩最容易发生腐蚀的区域,选择 43# 墩单侧柱墩墩身与墩座交界区域进行监测. 桥墩混凝土表面开槽布设共安装 12 个长标距应变传感器(图 5(b)),将封装用树脂涂覆于传感器外部,传感器完全固化后,使用聚合物砂浆等封装充填沟槽及预制孔(图 6(a)). 采用东南大学自主研发高性能化光纤光栅波长解调仪(图 6(b)). 该设备通过特有的系统温度自补偿与误差自校准技术(图 6(c)),极大提高了系统在各种野外恶劣环境下的生存能力以及长期稳定性与可靠性,实现了高速测量频率下对波长变化的高分辨率与高精度解析. 由于在对区域分布传感方案进行布设时要使用到多个传感单元,因此需要妥善处理各个传感单元之间的接合处. 长标距光纤传感器与光纤光栅波长解调仪之间采用有线连接方式,由于现场传感器布设于桥墩底部,为保障解调仪稳定运行和供



(a) 平潭海峡公铁大桥



(b) 长标距光纤光栅传感器安装位置

图 5 平潭海峡公铁大桥桥墩腐蚀监测

Fig. 5 Corrosion monitoring in Pingtan Straits Rail-cum-Road Bridge

电,所使用的设备集成于太阳能机柜中. 光纤光栅波长解调仪与监控中心之间,通过无线组网器进行数据

传输. 监测信息上传至运营管理部门监控系统,监测元件实现自动化监控.



图 6 长标距光纤光栅传感的腐蚀监测

Fig. 6 Corrosion monitoring by long-gauge fiber optical grating sensing

同时将电化学腐蚀安全多功能腐蚀探头预埋在电化学腐蚀试件,外挂固定在目标桥墩的外侧(图 7),从而避免对桥墩进行打孔嵌入探头. 本电化学系统采取太阳能发电板蓄电的方式供电,并采用数据传输单

元进行无线数据传输. 多功能腐蚀监测探头预埋在钢筋与混凝土接触的界面上,能够实时监测极化电阻、腐蚀速率、腐蚀电流、腐蚀电位、pH 值和氯离子浓度等 6 个电化学参数.

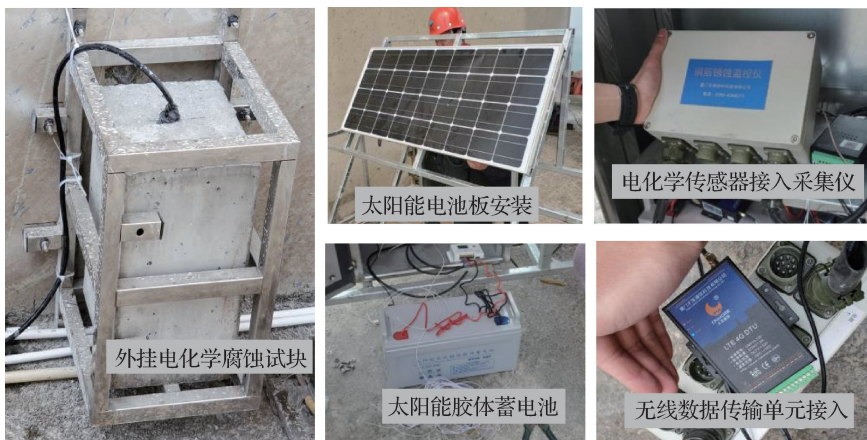


图 7 外挂电化学腐蚀传感试件

Fig. 7 External electrochemical corrosion sensing specimen

本课题组采用融合物理和电化学方法,利用长标距光纤光栅传感技术,获取结构宏应变响应,利用宏应变能量谱传递率方法识别宏应变模态,构建基于宏应变模态的腐蚀损伤指标(公式(5)和(6)),对平潭海峡大桥的通航主桥桥墩的腐蚀进行了定位与定量监测. 同时,结合电化学多功能腐蚀探头,监测的多个电化学参数,作为对基于宏应变模态损伤指纹的腐蚀定位方法的补充. 电化学方法可给出钢筋混凝土结构内钢筋腐蚀的定性信息,长标距传感技术能够进行腐蚀

定位与定量,且长标距传感器也只需粘贴在试件表面,工程应用更为便捷.

### 4 总 结

本文总结和分析常用的基于电化学和物理方法的海洋环境下桥隧结构腐蚀监/检测技术的进展. 基于电化学方法主要有半电池电位法、线性极化法、电化学阻抗谱、混凝土电阻率法、宏电池电流法、电化学

噪声和电化学多功能腐蚀传感器等. 其中, 电化学多功能腐蚀传感器能实时监测多个电化学参数, 为监测钢筋混凝土内部化学环境提供了较全面信息指标和可靠的技术. 基于物理方法技术主要有电阻探针、声发射、超声检测、光纤传感监测、长标距光纤光栅传感监测和基于计算机视觉与机器学习等技术. 其中, 长标距光纤光栅传感腐蚀监测技术能同时获得结构的局部和全局信息, 具有宏微观、动静态、高精度测量以及长期耐久性的特点, 适合于混凝土结构中钢筋腐蚀的识别和评估.

单一的腐蚀监测技术难以全面准确反映出海洋环境下桥隧结构的腐蚀现状和风险, 发展融合多方法协同的腐蚀监测技术, 各技术之间取长补短, 以实现结构腐蚀准确可靠的监/检测. 本课题组初步开展了融合长标距光纤光栅传感技术与电化学腐蚀安全多功能传感技术, 多功能腐蚀探头监测6个电化学参数的变化, 而长标距光纤传感技术通过测得的宏应变, 构建基于宏应变模态的腐蚀损伤指标, 对钢筋腐蚀进行分布式监测与腐蚀定位与定量, 二种技术的监/检测结果相互补充, 为平潭海峡大桥的桥墩腐蚀监测提供技术保障.

虽然目前海洋环境下桥隧结构腐蚀监/检测技术方法已有很大发展, 但在实际工程与复杂严酷的海洋环境下, 对结构的腐蚀进行准确的监/检测还面临很多挑战, 例如: 1) 电化学方法只能在已知腐蚀位置进行局部电化学环境的监/检测, 尚需要研究分布式检测; 2) 物理方法虽然直接对钢筋腐蚀进行监测, 但在面对钢筋腐蚀和混凝土劣化、钢筋和混凝土耦合弱化等复杂情况下的腐蚀量化分析还面临困难; 3) 物理与电化学方法的融合的腐蚀监/检测技术更需要进一步研究等. 因此, 在后续的研究中, 需要进一步解决上述技术难题, 并且开展物理与电化学各类腐蚀监测技术与计算机视觉技术和深度学习、机器学习等相结合, 发展海洋环境下桥隧结构腐蚀智能化的监/检测新技术.

## 参考文献:

- [1] FAN L, SHI X M. Techniques of corrosion monitoring of steel rebar in reinforced concrete structures: a review[J]. *Structural Health Monitoring*, 2022, 21(4): 1879-1905.
- [2] 李哲, 金祖权, 邵爽爽, 等. 海洋环境下混凝土中钢筋锈蚀机理及监测技术概述[J]. *材料导报*, 2018, 32(23): 4170-4181.
- [3] DUVNJAK I, KLEPO I, SERDAR M, et al. Damage assessment of reinforced concrete elements due to corrosion effect using dynamic parameters: a review[J]. *Buildings*, 2021, 11(10): 425.
- [4] PAGADALA M, MUNDRA S, BANSAL S. Corrosion monitoring techniques for concrete in corrosive environments[J]. *Corrosion Reviews*, 2022, 40(5): 409-425.
- [5] SHEETAL, KUNDU S, THAKUR S, et al. A review of electrochemical techniques for corrosion monitoring: fundamentals and research updates [J]. *Crit Rev Anal Chem*, 2025, 55(1): 161-186.
- [6] KOMARY M, KOMARIZADEHASL S, TOŠIĆ N, et al. Low-cost technologies used in corrosion monitoring[J]. *Sensors*, 2023, 23(3): 1309.
- [7] 杨璐嘉. 海水环境下混凝土结构中钢筋腐蚀问题与防护方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [8] 栗宝鹃, 张美多, 王志豪, 等. 水工混凝土结构钢筋分布及锈蚀检测[J]. *工程地球物理学报*, 2021, 18(2): 257-264.
- [9] 王彦明, 徐宗顺, 刘克, 等. 半电池电位法评估海港混凝土钢筋腐蚀状态的可靠性研究[J]. *中国港湾建设*, 2017, 37(12): 15-18.
- [10] 杨博乔. 半电池电位法检测混凝土钢筋锈蚀实例分析[J]. *中国水运*, 2020, 4: 265-266.
- [11] CAPASSO M, CARUSI V, FORTE A, et al. A probabilistic interpretation of corrosion state through half-cell potential and electrical resistivity measures: the Flaminio Bridge in Rome[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 20: e03197.
- [12] 王培玉. 桥梁混凝土钢筋腐蚀检测技术的应用[J]. *建筑技术开发*, 2022, 49(6): 76-78.
- [13] 隋伟, 巴恒静, 代苗苗, 等. 电化学方法测试混凝土钢筋锈蚀的研究[J]. *工程质量*, 2016, 34(2): 7-9.
- [14] 林旭梅, 刘振东, 马士强, 等. 基于变步长 LMS 算法的交流阻抗测钢筋腐蚀[J]. *测控技术*, 2019, 38(7): 93-96, 103.
- [15] 刘振东. 基于变步长 LMS 的交流阻抗法在钢筋混凝土腐蚀检测中应用[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- [16] RIBEIRO D V, ABRANTES J C C. Application of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) to monitor the corrosion of reinforced concrete: a new approach[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 111: 98-104.
- [17] 董晓强, 白晓红, 吴植安, 等. 电阻率技术在混凝土钢筋锈蚀测试中的应用研究[J]. *混凝土*, 2007(9): 9-12.
- [18] 赵恒宝, 赵尚传. 混凝土电阻率研究现状与进展[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2010, 6(3): 163-167.
- [19] 薛亮亮. 钢筋混凝土腐蚀检测研究与应用[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- [20] 董臻. 基于电阻率的混凝土抗渗性测试方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.

- [21] XIAO L Z, REN Z, SHI W C, et al. Experimental study on chloride permeability in concrete by non-contact electrical resistivity measurement and RCM [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 123: 27-34.
- [22] 李佳祺, 熊建波, 范志宏, 等. 混凝土中钢筋的宏电池腐蚀研究进展与展望[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(8): 1631-1641.
- [23] 王斌, 于金山, 李天, 等. 修复混凝土内部钢筋纵向腐蚀行为研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 55(4): 520-527.
- [24] ZHENG Z P, LEI Y. Structural monitoring techniques for the largest excavation section subsea tunnel: Xiamen Xiang'an subsea tunnel [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2017, 30(2): B4016002.
- [25] RUTH E S, BIRIT B, THOMAS F. 腐蚀监测传感器在丹麦的应用[EB/OL]. [2024-08-01]. [https://www.hbzhan.com/st41266/Article\\_202729.html](https://www.hbzhan.com/st41266/Article_202729.html).
- [26] 周志东, 郑巧明, 程璇. 一种钢筋混凝土埋入式腐蚀传感器: 中国, ZL 200910112880. 0[P]. 2011-12-28.
- [27] 董臻. 基于电阻率的混凝土抗渗性测试方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.
- [28] XIAO L Z, REN Z, SHI W C, et al. Experimental study on chloride permeability in concrete by non-contact electrical resistivity measurement and RCM [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 123: 27-34.
- [29] 左俊卿, 房震宸, 朱敏涛. 钢筋混凝土腐蚀防护的电化学噪声检测[J]. *科技视界*, 2019(4): 237-238.
- [30] 韩难难. 两种基于电化学噪声技术的腐蚀监测传感器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [31] PERMEH S, LAU K. Identification of steel corrosion associated with sulfate-reducing bacteria by electrochemical noise technique [J]. *Materials and Corrosion-Werkstoffe Und Korrosion*, 2023; 74: 20-32.
- [32] HOU Y, ALDRICH C, LEPKOVA K, et al. Monitoring of carbon steel corrosion by use of electrochemical noise and recurrence quantification analysis [J]. *Corrosion Science*, 2016, 112: 63-72.
- [33] HOU Y, POJTANABUNTOENG T, IANNUZZI M. Use of electrochemical current noise method to monitor carbon steel corrosion under mineral wool insulation[J]. *NPJ Materials Degradation*, 2020, 4: 39.
- [34] LIN C J. Novel electrochemical techniques with spatial resolution and its application in the investigation of localized corrosions [J]. *Trends in Physical Chemistry*, 2004, 10(3): 207-213.
- [35] DONG S G, LIN C J, HU R G, et al. Effective monitoring of corrosion in reinforcing steel in concrete constructions by a multifunctional sensor [J]. *Electrochimica Acta*, 2011, 56(4): 1881-1888.
- [36] 雷鹰, 郑翥鹏. 厦门翔安海底隧道钢筋腐蚀监测技术[J]. *工程力学*, 2016, 33(5): 1-10.
- [37] 王选择, 郑焯, 张瑜灿, 等. 应用于腐蚀监测的金属探针阻值测量方法[J]. *仪表技术与传感器*, 2022(11): 34-39.
- [38] 倪雅, 陈焕勇, 康壮苏, 等. 腐蚀监测在悬索桥主缆中的应用设计[J]. *流体测量与控制*, 2022, 3(6): 83-86.
- [39] 陈炳耀, 刘迪, 盛建军, 等. 基于电阻探针的悬索桥主缆腐蚀监测传感器设计[J]. *工程建设与设计*, 2023, 164-168.
- [40] 马骋. 混凝土中钢筋腐蚀损伤的超声导波监测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [41] YAN S, WANG X N, CHEN Y Y, et al. Rebar local corrosion monitoring of RC structures based on fractal characteristics of piezoelectric guided waves[C]// *European Workshop on Structural Health Monitoring*. Cham: Springer International Publishing, 2021: 569-579.
- [42] 姚媛媛. 基于压电超声导波的近海钢筋混凝土结构中钢筋锈蚀监测研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.
- [43] SHARMA A, SHARMA S, SHARMA S, et al. Investigation of deterioration in corroding reinforced concrete beams using active and passive techniques [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 161: 555-569.
- [44] 吴彬林, 何岩, 王敏. MsS 超声导波检测系统在桥梁缆索检测中的应用[J]. *金属制品*, 2023, 49(6): 48-51.
- [45] PATIL S, KARKARE B, GOYAL S. Corrosion induced damage detection of in-service RC slabs using acoustic emission technique [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 156: 123-130.
- [46] VAN STEEN C, PAHLAVAN L, WEVERS M, et al. Localisation and characterisation of corrosion damage in reinforced concrete by means of acoustic emission and X-ray computed tomography [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 197: 21-29.
- [47] DI BENEDETTI M, LORETO G, MATTA F, et al. Acoustic emission historic index and frequency spectrum of reinforced concrete under accelerated corrosion [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(9): 04014059.
- [48] 虞爱平, 赵艳林, 王磊. 锈蚀钢筋混凝土声发射在线监测试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(2): 291-297.
- [49] PATIL S, GOYAL S. Acoustic emission-based mathematical procedure for quantification of rebar corrosion in reinforced concrete [J]. *Current Science*, 2015, 109(5): 943.
- [50] 武丹. 钢筋混凝土锈胀及荷载作用全过程损伤劣化的声发射特性[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [51] APPALLA A, ELBATANOUNY M K, VELEZ W, et

- al. Assessing corrosion damage in posttensioned concrete structures using acoustic emission[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 28(2):04015128.
- [52] VAN STEEN C, PAHLAVAN L, VERSTRYNGE E. Smart aggregates for acoustic emission monitoring of concrete cracking and reinforcement corrosion [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 443:137644.
- [53] TANG F J, ZHOU G S, LI H N, et al. A review on fiber optic sensors for rebar corrosion monitoring in RC structures [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 313:125578.
- [54] LI S Z, WU Z S. Development of distributed long-gage fiber optic sensing system for structural health monitoring [J]. *Structural Health Monitoring*, 2007, 6(2):133-143.
- [55] WU B T, WU G, YANG C Q, et al. Damage identification and bearing capacity evaluation of bridges based on distributed long-gauge strain envelope line under moving vehicle loads[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2016, 27(17):2344-2358.
- [56] 程玉瑶, 基于长标距光纤传感技术的结构健康监测方法研究[D]. 南京:东南大学, 2019.
- [57] 吴智深, 张建. 结构健康监测先进技术及理论[M]. 北京:科学出版社, 2015.
- [58] 赵晨阳. 基于长标距光纤传感的结构区域分布监测与损伤识别[D]. 南京:东南大学, 2020.
- [59] FOUAD N, SAIFELDEEN M A, HUANG H, et al. Corrosion monitoring of flexural reinforced concrete members under service loads using distributed long-gauge carbon fiber sensors[J]. *Structural Health Monitoring*, 2018, 17(2):379-394.
- [60] 徐阳. 基于计算机视觉的桥梁结构局部损伤识别方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
- [61] 冯东明, 余星宇, 黎剑安, 等. 基于无人机的悬索桥主缆自动巡检及小样本表观病害识别[J]. *中国公路学报*, 2024, 37(2):29-39.
- [62] 彭卫兵, 张明见, 全柳萌, 等. 基于改进 Mask R-CNN 的钢桥多病害智能识别[J]. *中国公路学报*, 2024, 37(2):100-109.
- [63] 吴乐谋, 张清华, 郑秋松, 等. 融合自适应光照预处理和深度学习的钢桥腐蚀检测方法[J]. *中国公路学报*, 2024, 37(2):110-124.
- [64] GAO J Y. Accurate detection method of corrosion state of steel structure bridge in Internet of Things environment based on visual image characteristics [J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2024, 52(3):1351-1362.

(责任编辑:汪 军)