

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.151



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



钢筋混凝土结构状态监测技术研究新进展

张方^{a,b}, 丛龙宇^a, 王雨辰^a, 杨倩^a, 钱永久^a

(西南交通大学 a. 土木工程学院; b. 桥梁智能与绿色建造全国重点实验室, 成都 611756)

摘要:对钢筋混凝土结构状态进行监测是保障其性能水平的本质需求,相关领域的技术进步给这个传统方向带来了新的发展契机。对近年来钢筋混凝土结构中钢筋锈蚀监测和混凝土耐久性监测新技术进行综述。在钢筋锈蚀监测方面,综述了半电池及自然电位监测法、极化电阻技术、电流噪声评估法等化学监测方法和超声波监测法、物理成像技术、电磁学监测技术等物理监测技术以及基于人工智能的新监测方法;在混凝土状态与耐久性监测方面,综述了超声波监测、数字成像技术监测、损伤评价指标体系研究等基于混凝土自身劣化的监测技术和基于裂缝评估混凝土状态的监测技术以及基于人工智能的新技术;在传感器及信号处理技术方面,综述了光纤传感器和其他新型传感器技术在钢筋锈蚀监测和混凝土状态监测的最新研究进展。随着状态感知层前端技术的发展,人工智能技术的融入是未来钢筋混凝土结构状态监测跨学科发展的一个趋势。

关键词:钢筋混凝土结构;结构监测;传感器;评估;加固;维修

中图分类号: TU196.1; U445.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)02-0150-13

New advances in condition monitoring technology study for reinforced concrete structures

ZHANG Fang^{a,b}, CONG Longyu^a, WANG Yuchen^a, YANG Qian^a, QIAN Yongjiu^a

(a. School of Civil Engineering; b. National Key Laboratory of Bridge Intelligent and Green Construction, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, P. R. China)

Abstract: The need for monitoring the condition of RC structures is imperative in order to safeguard their performance level, and this conventional approach has engendered novel development opportunities due to technological advances in related fields. In this paper, new technologies for reinforcing steel corrosion monitoring and concrete durability monitoring in reinforced concrete structures in recent years are reviewed: in the aspect of reinforcing steel corrosion monitoring, chemical monitoring methods such as the half-cell and natural potential monitoring method, polarisation resistance technology, current noise assessment method and physical monitoring techniques such as the ultrasonic monitoring method, physical imaging technology, electromagnetism monitoring technology and new monitoring methods based on artificial intelligence are

收稿日期: 2023-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(51778532); 中国工程院重点咨询项目(2015-05-ZD-002)

作者简介: 张方(1973-), 男, 博士, 主要从事既有桥梁结构评估、诊断与加固理论、桥梁文化遗产规划和保护以及大跨度桥梁施工监控和健康监测研究, E-mail: fangzhang@home.swjtu.edu.cn。

Received: 2023-10-17

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51778532); Key Consultancy Projects of the Chinese Academy of Engineering (No. 2015-05-ZD-002)

Author brief: ZHANG Fang (1973-), PhD, main research interests: assessment, diagnosis and reinforcement of existing bridge structures, planning and preservation of cultural heritage of bridges, construction monitoring and health monitoring of large-span bridges, E-mail: fangzhang@home.swjtu.edu.cn.

reviewed; in the aspect of concrete condition and durability monitoring, the ultrasonic monitoring, digital imaging technology monitoring, damage evaluation index system research and other monitoring technologies based on the deterioration of concrete itself, and monitoring technologies based on the crack assessment of the concrete condition and new technologies based on artificial intelligence are reviewed; in the area of sensors and signal processing technology, an overview of optical fiber sensors and other new sensor technologies in the monitoring of corrosion of reinforcing bars and the latest research progress in the monitoring of the condition of concrete is presented. In conjunction with the advancement of front-end technologies at the condition-aware layer, the integration of artificial intelligence technologies is a prevailing trend in the future interdisciplinary development of RC structure condition monitoring.

Keywords: reinforced concrete structures; structural monitoring; sensors; evaluation; reinforcement; repair

为保证土木工程结构功能正常、持续有效,需定期开展状态监测和维护保养,“终生成本”才是土木工程需要评估和优化的。钢筋混凝土(RC)结构是土木工程中占比最大的结构,而钢筋锈蚀、混凝土开裂碳化是其最大的两类状态劣化类型。据统计,全球范围内每年用于腐蚀钢筋混凝土建筑结构维修加固的总投入达1 000亿美元^[1],由于混凝土腐蚀而耐久性不足所带来的经济损失已经占到国民生产总值的2%~4%,其中,由于钢筋锈蚀而引发的经济损失占到40%以上^[2]。

钢筋锈蚀是位于海洋环境^[3]或抛撒除冰盐^[4]等地区的钢筋混凝土结构提前劣化和使用寿命降低的重要因素^[5]。研究表明:钢筋锈蚀一方面会降低钢筋自身的截面面积与截面强度^[6],造成其力学性能下降;另一方面锈蚀还会使钢筋与混凝土之间的黏结性能下降^[7-8],对结构的承载能力和延性产生不可逆的不利影响。最新研究资料表明,腐蚀速率对黏结强度的影响并非单纯的线性关系,而是随着腐蚀速率的增加,黏结强度先上升后下降,当腐蚀率为1.0%~1.5%时,黏结强度将达到峰值^[9]。

混凝土对于钢筋有包裹保护作用,但裸露在潮湿空气中,其自身常受到二氧化碳和氯酸盐等酸性物质的侵蚀,侵蚀物与混凝土中碱性物质发生反应,从而导致了混凝土的碳化,造成混凝土性能、成分、结构的变化^[10]。钢筋混凝土交界处的腐蚀速率要大于其他部位,随着时间的流逝,各部分的腐蚀速率将趋于一致^[11]。最新研究发现,钢筋的不均匀腐蚀会导致混凝土保护层出现两条裂缝发展路径,即沿混凝土保护层径向的锈蚀开裂方向和沿锈蚀区割线方向的两条开裂分支,且粗骨料对裂缝发展路径影响较大^[12]。

要保证RC结构的功能,就必须及时有效地感知其钢筋和混凝土的状态,也称之为状态监测。高效且精准的状态监测技术对于开展钢筋混凝土结构的损伤程度评估,及时对无法满足承载需求的建

筑进行预警,保障RC结构的耐久性和服役期间的安全性十分必要^[13]。对钢筋锈蚀、混凝土性能劣化的监测并不是新兴的研究方向,相反,其几乎是伴随RC结构的发展而产生、发展的。然而,近年来随着传感器及信号处理技术的进步,其技术有了新的进展。

1 钢筋锈蚀监测技术的研究进展

依据腐蚀介质的不同,钢筋锈蚀可以分为两种:第1种是由二氧化碳水化引起的腐蚀,也称为均匀腐蚀或广义腐蚀,可以观察到截面损失沿钢筋的均匀分布^[14];第2种是由氯化物渗透形成氯离子引起的腐蚀,也称为点蚀或局部腐蚀,被腐蚀的钢筋形貌常常表现为截面的局部损失^[15]。最新的研究资料表明,相比碳酸腐蚀,氯离子引起的腐蚀对钢筋混凝土结构危害更大^[14-16]。

不同的方法可以得到不同表征腐蚀状况的参数或指标,用以对钢筋的锈蚀程度进行评价。例如,钢筋瞬时腐蚀速率通常通过极化电阻技术等电化学测量来获得,而累积的腐蚀程度可以通过电磁法^[17-18]、电阻法^[19]、3D激光扫描和X射线微计算机断层扫描^[20-22]等物理方法来计算。除此之外,有时还通过测量氯离子浓度^[23-24]、混凝土孔溶液pH值^[25]、碳化深度^[26]、混凝土电阻率^[25]等影响钢筋腐蚀电化学反应的因素来间接估计腐蚀状况。

1.1 电化学监测法

由于混凝土的不透明性,常用电化学方法获得混凝土中钢筋腐蚀电流密度,进而洞悉钢筋锈蚀状态。目前,钢筋锈蚀的电化学监测方法主要有3种类型。

1)半电池或自然电位法。原理是测定由钢筋锈蚀产生的电化学反应引起的电位变化,用以计算出钢筋锈蚀产物的质量^[27],进而判断钢筋的腐蚀程度,实现对钢筋锈蚀的监测,其也被现行检测技术标准所采纳^[28-29]。该方法设备简单,成本低廉,操作

方便,且可以快速定位高腐蚀风险的区域,然而半电池电位法只能提供预测腐蚀发生的概率,而无法提供任何关于腐蚀水平的信息^[30],且容易受到环境温度和相对湿度、氯离子浓度、混凝土碳化、水泥成分、水灰比等因素的影响,难以获得较为准确的量化数据。

2) 线性极化电阻技术。这是一种无损监测钢筋锈蚀速率的方法,钢筋的电流-电压图在腐蚀电位附近的形状近似为直线^[31],其斜率被称为线性极化电阻 R_p 。根据 R_p 即可利用式(1)求出腐蚀速率 i ,式中 B 为 Stern-Geary 系数。

$$i = \frac{B}{R_p} \quad (1)$$

虽然线性曲线只在特殊情况下才会出现,用线性化方法计算电阻产生一些误差^[32],但该方法可以快速获得腐蚀电流,适合在线监测,而且可以进行定量计算,是目前测量钢筋瞬时腐蚀速率的唯一方法^[33]。由于该方法容易受环境因素影响,造成结果的不稳定性,因此对其的研究聚焦于减小测量误差和探究环境因素对测量结果的影响方面。Chen 等^[34]发现,采用线性极化电阻法估算高度腐蚀钢的腐蚀速率时,由于 B 值随环境因素和混凝土成分不同而具有显著差异,所以腐蚀速率 i_c 难以准确计算得到,而且真实极化电阻 $\Delta E_a / \Delta I_{pc}$ 和测量值 $\Delta E / \Delta I_p$ 之间同样存在误差,如图1所示;而宏电池腐蚀对极化电阻测量的影响适中,相对误差较小;Galvanostatic 极化技术可以消除扩散电阻的影响,从而可靠地测量极化电阻,得到相对准确的腐蚀速率。

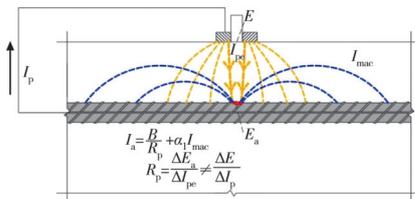


图1 氯离子诱导的腐蚀速率测量中可能存在的误差^[34]

Fig. 1 Possible errors during corrosion rate measurement ions induced by chloride^[34]

3) 电流噪声评估法。指腐蚀电极表面出现的一种电位或电流随机自发波动的现象,这种波动称为电化学噪声,分析这些噪声谱不仅能给出腐蚀的过程,而且还能给出腐蚀的特点,如点蚀特征。该方法在没有施加可能改变被测材料自然腐蚀反应电压的情况下表现出很高的灵敏度,并且具有非侵入式和连续监测的优点,被认为是一种具有实际应用前景的在线监测技术^[35-36]。Thoriya 等^[19]使用新型早期损伤电流噪声监测技术——机电阻抗(EMI)技

术,在 高强混凝土的预埋钢筋上粘贴电陶瓷传感器,以获取其电化学参数,基于电导特征和均方根偏差对钢筋进行定性和定量的腐蚀评价,可以有效地识别腐蚀阶段以及量化由此引起的结构刚度和质量损失。Chen 等^[37]将改进的近似熵(M-APEN)引入到电化学噪声评估数据处理中,并成功用于镁在 NaCl 溶液中的腐蚀分析。这一研究不仅提供了一个 M-APEN 的描述符来量化体系的腐蚀活性,而且为腐蚀监测提供了一种新的高时间分辨率的 ENM 数据分析方法。

在与力学分析模拟集成技术相结合方面,Wang 等^[38]发现,钢结构腐蚀后的力学性能退化不仅与腐蚀深度有关,而且与三维空间中腐蚀形貌和位置分布不均匀也密切相关,因此,建立了钢结构表面三维腐蚀演化预测模型,并通过电化学腐蚀理论和水平集方法实现了钢结构表面损伤界面实时跟踪与拟合,如图2所示。该方法可为评估腐蚀环境下钢结构剩余使用寿命、合理选择维修时间和防止钢结构突然倒塌提供技术支持。

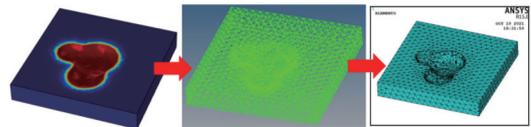


图2 三维演化预测模型向力学分析模型转化的过程^[38]

Fig. 2 Transformation process from a 3D evolution prediction model to a mechanical analysis model^[38]

目前,在原有理论和技术的基础上,电化学监测在信号的处理、噪声的评估、与力学分析模型的结合等方面呈现出加速发展的势头。

1.2 物理监测法

钢筋锈蚀的其他监测方法也常被称为物理监测技术,其通过监测由钢筋腐蚀引起的钢筋应力变化和混凝土表面裂缝等对腐蚀程度进行评估。

超声波技术原理如图3所示,该方法能无损监测保护层下的钢筋锈蚀,不需要提前埋入传感器,相对便宜,应用广泛,近年来有新的进展。Farin 等^[39]提出了一种基于尾波干涉法的互补灵敏超声监测方法,该方法能够以亚微米精量化实验过程中的实时平均腐蚀速率,适用于监测和定量分析因盐水腐蚀引起的钢材厚度损失。Wang 等^[40]提出了一种基于超声波的钢筋混凝土顶杆效应腐蚀无损监测技术,可用于钢筋锈蚀的现场评估,对钢筋混凝土资产的修复与修复设计有一定指导作用。Zhang 等^[41]利用超声监测数据训练了6个机器学习模型,根据超声特征预测钢材的腐蚀程度。研究表明,除线性模型外,其余机器学习模型能够在异常值幅度

和训练集大小的干扰下准确稳健地预测腐蚀程度。此外,基于腐蚀程度,通过中尺度模拟计算腐蚀诱发钢材劣化的过程,从而定量评价试件的损伤程度。

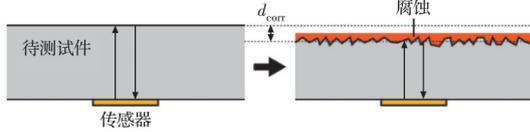


图3 声学监测钢材腐蚀原理示意图^[39]

Fig. 3 Schematic diagram of the principle of acoustic detection of steel corrosion^[39]

在借助物理成像技术对钢筋进行锈蚀监测方面,Ding等^[42]提出了一种基于涡流脉冲热成像(ECPT)的钢筋腐蚀监测方法,如图4所示。该方法利用每个点的热响应曲线偏度来揭示腐蚀区域,适用于早期腐蚀监测,但复杂的化学成分会改变被腐蚀钢材的物理性质,因此不适用于中度腐蚀评价。Dong等^[43]提出了一种多视觉扫描系统来监测和表征钢筋表面腐蚀及其分布,原理是利用高清图像扫描硬件和全景图像拼接处理算法,对钢筋表面二维纹理进行自动扫描,然后,利用深度学习对腐蚀进行精确识别,得到表征表面腐蚀的不均匀性指标。经验证该系统经济有效,具有良好的应用前景,可以作为钢材腐蚀研究和结构评估的有效工具。

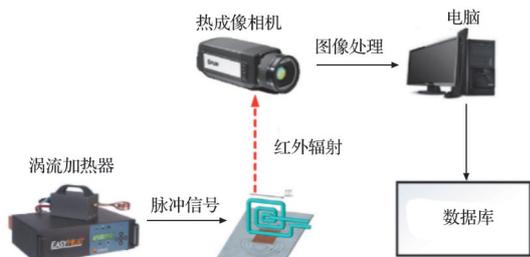


图4 涡流热成像技术示意图^[42]

Fig. 4 Schematic diagram of the ECPT system^[42]

在电磁学监测技术方面,王娟等^[44]在钢筋表面布设电陶瓷传感器(PZT),以获取电信号,对信号进行基4FFT变化并提取频谱特征,建立频域信号与腐蚀速率的定量关系,最后使用概率成像方法实现钢筋锈蚀的全过程监测,确定锈蚀损伤的位置并量化评估钢筋的锈蚀程度。Li等^[45]发明了一种新型的电磁监测仪,其原理是钢筋锈蚀时磁通量发生变化,进一步导致钢筋混凝土截面霍尔电压升高。利用变化的霍尔效应电压信息,可以记录混凝土的损伤和损伤方向。Fu等^[46]开发了一种新的外置电磁传感器,钢筋被腐蚀的质量损失与外置电磁传感器监测到的磁感应强度变化呈线性关系,可以较准确

地估计混凝土中锈蚀钢筋的质量损失。

还有一些其他物理监测钢材锈蚀技术的进展,如基于自发漏磁监测技术实现对钢筋锈蚀程度的分级评估^[47];基于电磁感应技术的无损监测方法^[48];基于探地雷达(GPR)监测钢筋锈蚀技术^[49]等,这里不再展开论述。

总之,目前关于钢筋锈蚀监测的物理方法研究热点主要集中在声学监测技术、物理成像监测技术、电磁学监测技术等方面。随着人工智能的出现,机器学习等技术开始用于对腐蚀的预测等。

1.3 基于人工智能的钢筋锈蚀新监测方法

近年来,人工智能技术被越来越多用于钢筋锈蚀监测。通过机器学习、深度学习等技术建立钢筋参数与锈蚀状态之间的关系。其参数可分为基本参数与特征参数,基本参数的选取与钢筋腐蚀类型有关,由碳酸引起的钢筋锈蚀常选择养护条件、混凝土配合比、试件龄期、CO₂浓度等作为基本参数,而由氯离子引起的钢筋锈蚀常选择水灰比、粉煤灰和硅灰含量、氯离子渗透试验结果、环境因素等作为基本参数^[50]。除与结构自身相关的基本参数外,还需利用监测设备所测量数据作为特征参数,进一步分析钢筋的锈蚀情况。Jiang等^[51]提出了一种基于机器学习的通过裂纹体积预测钢筋锈蚀的方法,该方法利用钢筋表面点蚀引起的粗糙度特性与混凝土保护层开裂的相关性,提出两种表征钢筋表面粗糙度的特征参数,实现了对钢筋腐蚀深度和面积的评价。Zhang等^[52]将X射线计算机层析成像技术与深度学习相结合,通过大量训练数据集内的数据,显著提高学习模型的性能,从而使其能够识别钢筋腐蚀诱发的裂缝和孔隙并三维重建了混凝土内部钢腐蚀过程。Sheikh等^[53]将机器学习与声发射监测数据相结合,以高频采样率采集声发射信号,选择AE均值、AE均方根值、AE能量和峰度为特征参数,寻找其与腐蚀过程的线性关系。

尽管借助人工智能技术的新监测方法在评估混凝土中钢筋锈蚀的实际应用中表现出了巨大的潜在价值^[50],但仍有一些问题导致其分析结果不准确:1)深度学习、机器学习等算法依赖于对数据库的学习,数据库样本过少会影响分析结果;2)算法是人工智能学习的结果,缺乏对实际腐蚀过程机制的理解;3)部分研究的模型属于黑箱模型,无法了解其计算过程,也无法对算法做出科学的解释。

2 混凝土状态监测技术研究进展

从直接和间接两方面,可以把混凝土损伤监测技术分为两种类型:一种是直接基于混凝土自身性

能参数监测的方法,主要包括回弹法^[54]、超声法^[55-57]、超声回弹综合法、数字图像技术^[58]等;另一种是基于对混凝土裂缝监测从而评估混凝土健康状况的方法^[59],主要借助电阻应变片^[60]、光纤传感器^[61-62]、嵌入式智能骨料^[63-64]等传感器技术获取电信号,结合信号处理技术来实现。

2.1 基于混凝土自身劣化的监测技术

超声波法是一种使用较多的无损监测技术,其原理是测量混凝土的声学参数,如声速、振幅、频率等,如表1所示,根据这些参数可以判断混凝土的损伤情况。

表1 声学参数与混凝土性能的关系

Table 1 Relationship between acoustic parameters and concrete properties

声学参数	与声速的关系	与振幅的关系	与频率的关系
弹性模量	正比		
孔隙率	反比		
密实度	正比		
强度	正比	正比	
存在内部缺陷	下降	下降	下降

近年来,相关研究取得了一些新的进展。Kim等^[56]研究并开发了一套非接触式超声系统,提出了一种基于超声波波速的混凝土损伤评估算法。通过冻融试验证明了该算法所参照指标DI(退化指数)相对于现有的评价指标(相对动弹性模量)在冻融循环初期对混凝土损伤的探测效果更好。Ai等^[57]提出了一种基于声发射(AE)监测和集成学习框架的时域ASR评价方法,通过附着在试件上的声发射传感器对试件进行监测。根据信号强度、裂纹宽度和扩展应变,将声发射信号进行滤波,并将其划分为4个相位。采用包含卷积神经网络(CNN)和随机森林模型的异构集成网络对不同特征声发射信号进行学习,得到具有较高分析精度的计算模型。

在数字成像技术方面,为解决传统的混凝土损伤数字成像技术(DAS)空间分辨率低的问题,Gao等^[58]提出了一种改进的基于多小波分解的空间分辨率可调DAS成像方法,如图5所示。该方法通过对嵌入压电陶瓷换能器阵列接收到的散射应力波进行分解,并根据激励信号的频谱特征进行重构,结合各发射机和传感器对之间重建的散射信号,设计成像函数,提高了传统DAS方法的空间分辨率。为选取适当的损伤指标来表征湿法连接的预制混凝土结构疲劳损伤提供了新的研究方向。

将数字图像技术与传统的超声监测技术相结合,诞生了一种新的技术。Xu等^[65]采用数字图像关

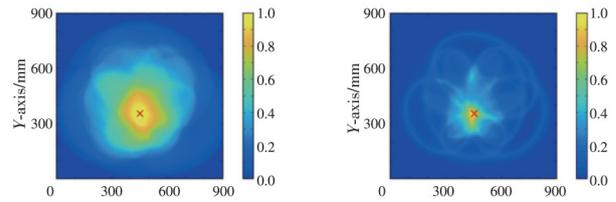


图5 传统 DAS 成像(左)和改进后 DAS 成像(右)^[58]

Fig. 5 Conventional DAS image (left) and modified DAS image (right)^[58]

联(DIC)和声发射(AE)技术研究了超高性能混凝土(UHPC)在加载过程中的损伤模式,如图6所示。研究发现DIC与AE相结合能有效识别UHPC内部损伤源,并能够探测出UHPC表面裂纹。

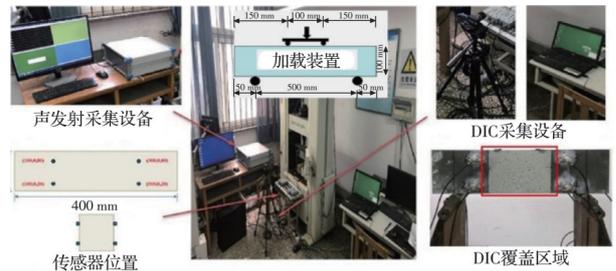


图6 DIC与AE共用实验原理示意图^[65]

Fig. 6 Schematic diagram of the principle of the DIC and AE co-operation experiment^[65]

评价混凝土损伤的关键是选择灵敏度较高且数据稳定的损伤指标,声波法的损伤指标是声学参数,而数字成像技术的损伤指标则基于图像识别。在探索新的损伤指标方面,通过12个预制混凝土组合梁试件3种不同截面类型的循环荷载试验,Zhang等^[66]提出了一种新的损伤指标——压磁信号。相比挠度、刚度、能耗、界面变形、钢应变等传统损伤指标,压磁信号技术具有长期监测可证明性和非破坏性的优点。Burd等^[67]利用声发射能量评估普通混凝土的损伤,选取3种损伤变量,即表面损伤变量、声发射能量损伤变量和FPZ体积损伤变量,建立了断裂力学功与声发射能量的全局和局部相关性,实现对混凝土的损伤评估。

2.2 基于裂缝评估混凝土状态的监测技术

通过混凝土裂缝评估混凝土劣化程度的监测技术也有一些新的进展。

为了通过混凝土裂缝评估混凝土的劣化程度,Zhang等^[63]设计了一种基于嵌入式智能骨料(SAs)的水下混凝土结构裂缝宽度和深度监测方法,如图7所示。在水下混凝土梁中预埋两个SAs,以实现信号的激励和采集,然后找出信号与混凝土损伤的对应关系,最终定义了一种基于裂缝深度的水下混凝土梁损伤指标来描述裂缝深度损伤。Luo等^[68]将表面波透射法(SWT)应用于混凝土裂缝监测,即通

过研究不同信噪比和特性信号实现对混凝土裂缝的监测,具有广阔的应用前景。

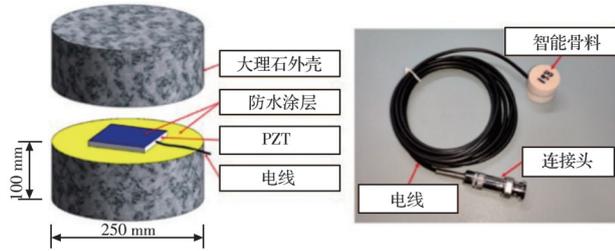


图 7 嵌入式智能骨料(SAs)示意图^[63]

Fig. 7 Schematic diagram of embedded smart aggregates (SAs)^[63]

基于传统的机电阻抗技术(EMA)难以量化应力和损伤,对此,Ai等^[69]提出了一种集成EMA的简单二维卷积神经网络(2D CNN),该算法无需复杂的数据转换或人工特征提取即可自动解析原始的EMA特征,如图8所示。该EMA特征对混凝土的应力变化及其开裂、扩展十分敏感。与传统的基于均方根偏差(RMSD)的方法相比,该方法具有良好的精度和效率。

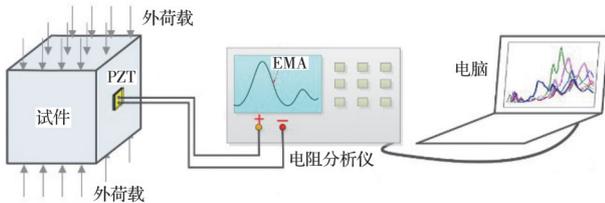


图 8 EMA 数据测量系统^[69]

Fig. 8 EMA data measurement system^[69]

2.3 基于人工智能的混凝土监测新技术

在混凝土监测技术中,基于图像识别的混凝土裂缝监测技术是人工智能在混凝土监测领域应用的开端,相较于标准的数字图像处理算法,利用自动化裂纹检测技术深度学习的算法则更加精准^[70-71]。基于深度学习的裂缝图像研究更多地关注某一时刻的裂缝,而忽略了全时间的裂缝扩展,Xu等^[72]提出了一种基于改进的YOLOv7算法、裂纹扩展基准法、改进的DeepLabv3+算法和图像处理技术相结合的新方法,用以监控裂纹发展的整个过程,包括裂纹的实时识别和裂纹动态扩展的实时监测。Zhang等^[73]提出了一种混合概率深度学习方

成功实现了混凝土强度发展的定量预测。

3 传感器及信号处理技术研究进展

在RC结构监测领域,作为感知层的前端,传感器是获取结构体物理、化学等参数指标的重要元器件,其研究的深入促进了监测技术实质性发展。传统的电阻式、电容式或晶体管式机械传感器会持续地消耗电量,而压电式和摩擦电式传感器则是选择性地对动态或瞬态机械刺激做出响应,两种传感器都离不开外部电源。而Liang等^[75]开发了一种不需要外部电源就能够监测静态机械刺激的机械传感器,弥补了现有传感设备的不足。该传感器在灵敏度、恢复/响应速度和重现性等方面与传统传感器相当,而在简单性、成本效益方面则明显优于传统传感器。

近年来,随着对更好更快通讯技术的迫切需求,光纤传输技术得到了极大程度开发,目前已经成为传输技术的首选^[76]。受惠于光纤技术的进步,研究者将光纤技术与传感器技术相结合,设计并制造出各种类型光纤光栅传感器(见图9),广泛应用于土木工程领域^[77]。光纤传感器具有轻量化、可靠、稳定、体积小、抗外部电磁扰动、低功耗、高灵敏度、多路复用和宽带宽等优点^[78]。此外,一个显著优势是光纤传感器更容易嵌入复合材料基体或黏接在其表面^[79],当受到应变作用时,光纤的伸长或缩短,折射率调制(光栅间距)之间的空间发生变化,使反射在FBG位置的布拉格波长发生偏移,通过数据反算即可长期监测结构体的应变数据。

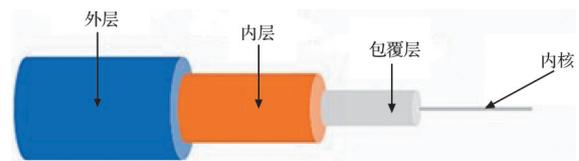


图 9 光纤传感器示意图

Fig. 9 Schematic diagram of a fiber optic sensor

3.1 利用光纤传感器监测钢筋锈蚀

基于不同的工作原理,用于钢筋锈蚀监测的光纤传感器可以分为点腐蚀传感器和分布式腐蚀传感器^[80]。在点腐蚀光纤传感器监测钢筋锈蚀方面,秦疆伟^[81]开发了一种基于多模干涉的单模-无芯-单模光纤传感器,该传感器具有制作简单、灵敏度高、经济、抗电磁干扰等优点,适用于水泥结构中的钢筋锈蚀监测。Lin等^[82]提出了一种将机器学习与单模-多模-单模光纤腐蚀传感器相结合的钢筋腐蚀自动监测方法,基于整个光谱数据库或部分光谱数据库,对12种算法进行了训练和比较,只有7种算法表现出良好的性能。由于钢筋的腐蚀质量损失与

SMS 光纤腐蚀传感器传输谱的位移之间存在非线性关系,基于腐蚀时间顺序的部分数据库性能较基于整个数据库的差。为实现对海上钢桩的实时和原位监测,Shen 等^[83]研发了一种能够监测被防腐材料包裹的钢管桩的不均匀腐蚀。该传感器可以用于测量腐蚀产物的应变变化、量化钢桩表面任意位置的非均匀腐蚀引起的质量损失、分析不同环境因素对腐蚀不均匀性的影响。Luo 等^[84]提出了一种新型的钢筋腐蚀无损监测方法,如图 10 所示,其利用 Fe-C 薄膜涂层聚合物的光纤传感器,在模拟腐蚀试验中研究了该传感器的传感性能。结果表明,不同 Fe-C 薄膜厚度的传感器具有相似的输出曲线特性,但对相同腐蚀状态的灵敏度不同;在加速腐蚀条件下,将传感器嵌入加固结构的砂浆试件中进行测试,传感器的输出信号与前期实验结果一致,且表现出 Fe-C 薄膜越薄腐蚀敏感性越高的特性。

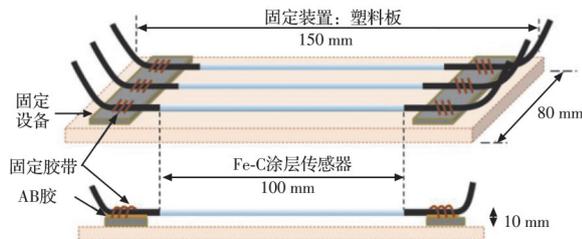


图 10 Fe-C 传感器示意图^[84]

Fig. 10 Schematic diagram of an Fe-C sensor^[84]

由于传感点多,分布式光纤传感器能够同时监测多个部位的钢筋锈蚀,是钢筋混凝土结构变形和裂缝监测的有效工具。通过试验,Fan 等^[85]开发了一种分布式光纤传感器,用于钢筋混凝土腐蚀现场监测,分布式光纤传感器以螺旋形布置在钢筋上,利用传感器测得的应变来评估钢筋周围腐蚀产物的体积,并预测混凝土保护层的开裂。Liu 等^[86]提出基于机器学习的分布式光纤传感器应变分布的裂纹自动识别、定位、量化和可视化方法。基于这些功能,开发了基于建筑信息建模的实时数字孪生模型来可视化裂缝,数据具有较高精度。

3.2 光纤传感器在状态监测领域的广泛使用

光纤传感器不仅在监测钢筋锈蚀和混凝土性能劣化方面发挥着重要作用,而且在钢筋裂纹监测^[87]、钢材焊接损伤^[88]、沉降监测^[89]、位移监测^[90-91]、压力监测^[92]、结构振动特性监测^[93],甚至加固结构中水泥基复合材料与混凝土黏结关系的监测^[94]等方面都有了新的研究进展,也催生了深度学习和健康监测系统相结合的新的研究方向^[77]。近年来,有学者将光纤传感器与深度学习相结合,开发了基于深度学习的健康监测系统^[95]。在该系统中,光纤传感网

络作为数字化双智能装配系统实时参数采集模块,利用残差模块的卷积神经网络计算出测试区域内任意位置的偏移量,以提供装配结构虚拟模型所需补偿参数,通过迭代学习不断修正数据表,最终实现了测量数据实际状态的预测功能。

近年来,随着研究的不断深入,光纤传感器的研究更多地聚焦于适用于特定场景下的结构健康监测新型光纤传感器的开发和测试。Chang 等^[96]提出了一种基于 3 层芯-少模(TL-FMF)的环形光纤传感器,如图 11 所示。由于具有特殊的有效模式差和不同模式的平衡功率,该光纤传感器不仅具有良好的温度不敏感特性,而且具有高度均匀的干扰频谱和抗交叉灵敏度双参数测量的特点,为光纤加工监测、变形测量和弯曲监测提供了一个非常有前景的候选器件。

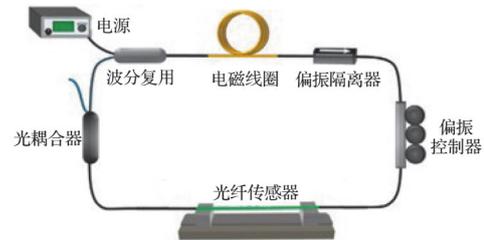


图 11 3 层芯-少模环形光纤传感器原理图^[96]

Fig. 11 Schematic diagram of a TL-FMF fiber optic sensor^[96]

Li 等^[97]提出了一种基于光频域反射法(OFR)的分布式光纤传感器测量方法,如图 12 所示。该方法能够可视化预应力混凝土圆柱管(PCCP)荷载和应变响应,能以 1 cm 的空间分辨率监测混凝土芯层和砂浆涂层上的裂缝。该分布式传感技术可在管道结构的健康监测领域中发挥作用。

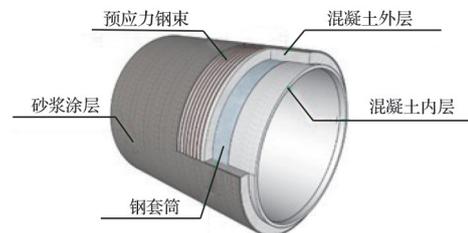


图 12 预应力混凝土圆柱管(PCCP)监测原理图^[98]

Fig. 12 Schematic diagram of prestressed concrete cylinder pipe (PCCP) monitoring^[98]

Bai 等^[98]基于脉冲预泵布里渊光时域分析(PPP-BOTDA)的分布式光纤传感器研究了钢-混凝土组合楼板的抗弯性能,提出了一种适用于土木工程结构实际施工的传感器部署方法。研究表明,伴随着钢梁的屈服和混凝土与钢筋之间的滑移,组合楼板因混凝土裂缝而失效,而分布式传感器捕获

了复合板损伤演化过程中混凝土板的复杂裂纹模式。Buda-Ozóg 等^[99]将分布式光纤传感器和单片复合传感器相结合,实现了对混凝土所有裂缝的监测,能够在所有加载阶段反映其行为模式,直到结构破坏。Xie 等^[100]利用长尺度光纤传感器测量了桥梁墩柱的残余应变,获得试件的残余横向位移和旋转角分布,为土木工程中混凝土墩柱的状态评估提供了一种新的方法。

3.3 其他传感器研究进展

除传统的传感器和光纤传感器,学者们也致力于开发新的传感器。以压电陶瓷铅锆钛酸盐(PZT)贴片为代表的压电材料传感器就是一种,由于其成本低、带宽高、响应快、信号发射和采集能力强等优点而受到越来越多的关注。PZT 传感器、胶黏剂层和钢板组合成新型传感单元,利用机电阻抗(EMI)技术进行损伤识别^[101],可以嵌入混凝土中,用于混凝土损伤研究,且表现出较高的灵敏度。Tuloup 等^[102]使用 PZT 技术对 GFRP(玻璃纤维)加固混凝土梁进行监测,研究 PZT 电容响应与所发生的物理现象之间的关系发现,PZT 对聚合物基复合材料内部的损伤产生和发展非常敏感,适用于被加固混凝土梁的监测。

此外, Yang 等^[78]设计了一种多传感器集成的混凝土可植入模块(CIM),其外观为墙壁插座,以提供混凝土中的应力波扫描能力。一个菱形的球形压电陶瓷外壳(SPS)阵列被嵌入到 CIM 中,使得探测信号能量能够叠加在模块表面。该传感器能够利用接收到的数据全面描述结构的损伤程度。Zhang 等^[64]采用在混凝土中嵌入压电智能骨料传感器的监测方法,对混凝土进行实时监测,如图 13 所示。与传统的湿度监测方法相比,该方法无需人工外部激励,尤其适用于深海环境下混凝土的实时、无损和长时间监测。



图 13 压电智能骨料传感器示意图^[64]

Fig. 13 Schematic diagram of a piezoelectric smart aggregate sensor^[64]

4 结论

随着 RC 结构保有量的持续增加和不断老龄化,对其状态的监测有了更大的市场和技术更新需求。

1)在钢筋锈蚀监测方面,钢筋锈蚀的电化学监测技术容易受到环境因素的影响,造成测量结果的不稳定性。因此,稳定性较好的极化电阻技术和电流噪声评估法成为了研究热点,其中电流噪声评估法因具有高灵敏度和能够连续监测的特点,被认为是一种具有工程应用前景的监测方法;对钢筋锈蚀物理监测技术的研究主要集中在声学监测、物理成像监测、电磁学监测等方面,核心在于提高监测数据的精度和建立监测数据与钢筋锈蚀的对应关系。越来越多的深度学习、机器学习等计算机技术被用于研究监测数据与钢筋锈蚀的对应关系,使数据的利用效率更高,结论可信度更高。

2)在混凝土状态监测方面,监测技术仍主要集中在物理监测方法的研究,其重点仍然围绕损伤评价指标和混凝土实际损伤之间的关系,一些新的损伤评价指标被提出来;而更多人工智能技术的加入会使得物理监测技术数据预测上的局限性得到一定程度解决。未来基于机器学习、深度学习等技术的监测系统开发会成为一个持续发展的新方向。

3)在传感器及信号处理方面,光纤传感器成为研究的热点方向,预计未来将有更多适用于特定场景下的传感器被研发,用于分析的参数指标也将逐步增多,监测结果的精确性将不断提升。除光纤传感器外,已研发出集成化的可植入式传感器,为 RC 结构在线监测技术的发展提供了新的契机。

参考文献

- [1] LU C H, YUAN S Q, CHENG P, et al. Mechanical properties of corroded steel bars in pre-cracked concrete suffering from chloride attack [J]. Construction and Building Materials, 2016, 123: 649-660.
- [2] 洪乃丰. 混凝土中钢筋腐蚀与结构物的耐久性[J]. 公路, 2001, 46(2): 66-69.
HONG N F. Corrosion of steel in concrete and structure durability [J]. Highway, 2001, 46(2): 66-69. (in Chinese)
- [3] ZHANG L, NIU D T, WEN B, et al. Corrosion rate models of reinforcement in modified coral aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021, 288: 123099.
- [4] 张海龙, 王社良, 袁晓洒. 混凝土冻融循环退化过程中的孔隙发展与钢筋锈蚀试验研究[J]. 材料保护, 2022, 55(7): 102-109.
ZHANG H L, WANG S L, YUAN X S. Experimental study on pore formation and reinforcement corrosion in concrete during freeze-thaw cycles [J]. Materials Protection, 2022, 55(7): 102-109. (in Chinese)
- [5] MEHTA P K. Durability of concrete-Fifty years of progress [C]//Durability of Concrete. Second International

- Conference. August 4-9, 1991, Montreal, Canada.
- [6] 郝昌言, 周小姿, 周清勇. 钢筋锈蚀对混凝土结构影响研究[J]. 江西水利科技, 2022, 48(4): 280-284.
HAO C Y, ZHOU X Z, ZHOU Q Y. Study on the influence of steel bar corrosion on hydraulic concrete structure [J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2022, 48(4): 280-284. (in Chinese)
- [7] VAN NGUYEN C, HIEU BUI Q, LAMBERT P. Experimental and numerical evaluation of the structural performance of corroded reinforced concrete beams under different corrosion schemes [J]. Structures, 2022, 45: 2318-2331.
- [8] LIU Y, HAO H, HAO Y F, et al. Experimental study of dynamic bond behaviour between corroded steel reinforcement and concrete [J]. Construction and Building Materials, 2022, 356: 129272.
- [9] WANG D H, HAN L, KANG M X, et al. Influence of corrosion on the bond performance of reinforcements and basalt fibre high strength concrete [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01394.
- [10] 胡川. 钢筋混凝土腐蚀状态无损监测系统研究[D]. 山东 青岛: 青岛理工大学, 2022.
HU C. Study on nondestructive monitoring system of reinforced concrete corrosion state [D]. Qingdao, Shandong: Qingdao Tehcnology University, 2022. (in Chinese)
- [11] WANG J, WANG Z T, DU J S. Corrosion characteristics of tapered sleeve locking-type splicing reinforcement in precast segmental bridge piers [J]. Structures, 2023, 48: 1907-1919.
- [12] LUO G, ZHANG K, ZHU W J, et al. Effect of non-uniform corrosion on the cracking propagation of the RC specimens [J]. Construction and Building Materials, 2021, 270: 121460.
- [13] 张冉. 基于光纤布拉格光栅(FBG)的钢筋混凝土腐蚀监测系统的研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2019.
ZHANG R. Study on corrosion monitoring system of reinforced concrete based on fiber Bragg grating (FBG) [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [14] LEJOUAD C, RICHARD B, MONGABURE P, et al. Assessment of the seismic behavior of reinforced concrete elements affected by corrosion: An objective comparison between quasi-static and dynamic tests [J]. Structures, 2022, 39: 653-666.
- [15] 漆亮, 赵士斌, 冷春晓, 等. 濒海环境中钢筋混凝土横向裂缝处钢筋锈蚀的试验研究[J]. 公路, 2022, 67(12): 336-340.
QI L, ZHAO S B, LENG C X, et al. Research on reinforcement corrosion at transverse cracks of reinforced concrete in coastal environment [J]. Highway, 2022, 67(12): 336-340. (in Chinese)
- [16] HUYEN VU T, DANG L C, KANG G, et al. Chloride induced corrosion of steel reinforcement in alkali activated slag concretes: A critical review [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e01112.
- [17] 钟景阳. 基于极化探地雷达的钢筋早期锈蚀检测方法研究初探[D]. 广州: 广州大学, 2021.
ZHONG J Y. Preliminary study on early corrosion detection method of steel bars based on polarization ground penetrating radar [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2021. (in Chinese)
- [18] HONG S X, WIGGENHAUSER H, HELMERICH R, et al. Long-term monitoring of reinforcement corrosion in concrete using ground penetrating radar [J]. Corrosion Science, 2017, 114: 123-132.
- [19] THORIYA A, VORA T, MAKWANA V. Corrosion assessment in rebars of high-strength concrete using electromechanical impedance technique [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 57: 2234-2241.
- [20] ROBUSCHI S, TENGATTINI A, DIJKSTRA J, et al. A closer look at corrosion of steel reinforcement bars in concrete using 3D neutron and X-ray computed tomography [J]. Cement and Concrete Research, 2021, 144: 106439.
- [21] DONG B Q, FANG G H, LIU Y Q, et al. Monitoring reinforcement corrosion and corrosion-induced cracking by X-ray microcomputed tomography method [J]. Cement and Concrete Research, 2017, 100: 311-321.
- [22] MICHEL A, PEASE B J, GEIKER M R, et al. Monitoring reinforcement corrosion and corrosion-induced cracking using non-destructive X-ray attenuation measurements [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(11): 1085-1094.
- [23] ANGST U M, ELSENER B, LARSEN C K, et al. Chloride induced reinforcement corrosion: Electrochemical monitoring of initiation stage and chloride threshold values [J]. Corrosion Science, 2011, 53(4): 1451-1464.
- [24] HEMKEMEIER T A, ALMEIDA F C R, SALES A, et al. Corrosion monitoring by open circuit potential in steel reinforcements embedded in cementitious composites with industrial wastes [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e01042.
- [25] TIAN Z S, YE H L. Mechanisms underlying the relationship between electrical resistivity and corrosion rate of steel in mortars [J]. Cement and Concrete Research, 2022, 159: 106867.
- [26] MELO P, ECHAGÜE M, GUERRA C, et al. On the effect of simulated contamination of chlorides and sulfates on steel rebar corrosion: Electrochemical behavior and surface analysis [J]. Construction and Building Materials, 2022, 359: 129337.

- [27] 秦一琦, 金祖权, 李师财, 等. 砂浆内钢筋锈胀应力监测与数值模拟研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(1):179-186.
- QIN Y Q, JIN Z Q, LI S C, et al. Experimental and numerical simulation study on corrosion evolution of steel bar in mortar [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 45(1):179-186. (in Chinese)
- [28] ASTM International. Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete: ASTM C876-15 [S]. West Conshohocken: ASTM, 2015.
- [29] 建筑结构检测技术标准: GB/T 50344—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- Technical standard for inspection of building structure: GB/T 50344—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020. (in Chinese)
- [30] ZOU Z H, WU J, WANG Z, et al. Relationship between half-cell potential and corrosion level of rebar in concrete [J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2016, 51(8): 588-595.
- [31] NEUFELD P. Application of the polarization resistance technique to corrosion monitoring [J]. Corrosion Science, 1964, 4(1-4): 245-251.
- [32] KOUŘIL M, NOVÁK P, BOJKO M. Limitations of the linear polarization method to determine stainless steel corrosion rate in concrete environment [J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 28(3): 220-225.
- [33] WANG Y K, MUKHERJEE A, CASTEL A. Non-destructive monitoring of incipient corrosion in reinforced concrete with top-bar defect using a combination of electrochemical and ultrasonic techniques [J]. Construction and Building Materials, 2022, 360: 129346.
- [34] CHEN L J, SU R K L. On the corrosion rate measurement of reinforcing steel in chloride induced macrocell corrosion [J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 134: 104775.
- [35] ZAKI A, CHAI H K, AGGELIS D G, et al. Non-destructive evaluation for corrosion monitoring in concrete: A review and capability of acoustic emission technique [J]. Sensors, 2015, 15(8): 19069-19101.
- [36] XIA D H, SONG S Z, QIN Z B, et al. Review-electrochemical probes and sensors designed for time-dependent atmospheric corrosion monitoring: fundamentals, progress, and challenges [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2020, 167(3): 037513.
- [37] CHEN J L, HE J X, LI L J. Modified approximate entropy analysis for data processing of electrochemical noise with high time resolution toward corrosion monitoring [J]. Corrosion Science, 2022, 205: 110425.
- [38] WANG H J, QIU F, QIAN H L, et al. Integrated analysis method of 3D corrosion evolution and mechanics of steel based on electrochemical corrosion mechanism [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 165: 295-306.
- [39] FARIN M, MOULIN E, CHEHAMI L, et al. Monitoring saltwater corrosion of steel using ultrasonic coda wave interferometry with temperature control [J]. Ultrasonics, 2022, 124: 106753.
- [40] WANG Y K, MUKHERJEE A, CASTEL A. Ultrasonic guided waves for monitoring incipient corrosion in reinforced concrete with top-bar defect [J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 141: 105116.
- [41] ZHANG J R, ZHANG M X, DONG B Q, et al. Quantitative evaluation of steel corrosion induced deterioration in rubber concrete by integrating ultrasonic testing, machine learning and mesoscale simulation [J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 128: 104426.
- [42] DING S, TIAN G Y, ZHU J Z, et al. Characterisation and evaluation of paint-coated marine corrosion in carbon steel using eddy current pulsed thermography [J]. NDT & E International, 2022, 130: 102678.
- [43] DONG Y Q, PAN Y, WANG D L, et al. Corrosion detection and evaluation for steel wires based on a multi-vision scanning system [J]. Construction and Building Materials, 2022, 322: 125877.
- [44] 王娟, 姜绍飞, 崔二江, 等. RC梁钢筋锈蚀监测与概率成像定位[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(4): 161-170.
- WANG J, JIANG S F, CUI E J, et al. Corrosion monitoring and probabilistic imaging location of steel bars in RC beams [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(4): 161-170. (in Chinese)
- [45] LI Z, JIN Z Q, ZHAO T J, et al. Use of a novel electromagnetic apparatus to monitor corrosion of reinforced bar in concrete [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 286: 14-27.
- [46] FU C Q, HUANG J H, DONG Z, et al. Experimental and numerical study of an electromagnetic sensor for non-destructive evaluation of steel corrosion in concrete [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 315: 112371.
- [47] 周建庭, 夏乾文, 杨茂, 等. 基于自发漏磁效应的钢筋锈蚀分级评估研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(10): 93-99.
- ZHOU J T, XIA Q W, YANG M, et al. Grading assessment of steel corrosion based on spontaneous magnetic flux leakage effect [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2022, 41(10): 93-99. (in Chinese)
- [48] DIOGENES A G, DE MOURA E P, SILVEIRA MACHADO ADA, et al. Corrosion evaluation of carbon steel bars by magnetic non-destructive method [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2022, 37

- (3): 315-331.
- [49] HONG S X, CHEN D Z, DONG B Q. Numerical simulation and mechanism analysis of GPR-based reinforcement corrosion detection [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 317: 125913.
- [50] JIA H X, QIAO G F, HAN P. Machine learning algorithms in the environmental corrosion evaluation of reinforced concrete structures - A review [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 133: 104725.
- [51] JIANG C, ZHANG X G, LUN P Y, et al. Quantitative characterization of reinforcement cross-sectional roughness and prediction of cover cracking based on machine learning under the influence of pitting corrosion [J]. *Measurement*, 2023, 220: 113322.
- [52] ZHANG M Y, WANG W L. Deep learning-based extraction and quantification of features in XCT images of steel corrosion in concrete [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 20: e02717.
- [53] SHEIKH M F, KAMAL K, RAFIQUE F, et al. Corrosion detection and severity level prediction using acoustic emission and machine learning based approach [J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2021, 12(4): 3891-3903.
- [54] 回弹法检测混凝土抗压强度技术规程: JGJ/T 23—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Technical specification for inspecting of concrete compressive strength by rebound method: JGJ/T 23—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [55] 陈韵竹. 声发射系统的研发及混凝土损伤监测研究 [D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2022.
CHEN Y Z. Research and development of acoustic emission system and concrete damage monitoring [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [56] KIM R, MIN J, AHN E, et al. Assessment of degradation index in freeze-thaw damaged concrete using multi-channel contactless ultrasound [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 349: 128815.
- [57] AI L, SOLTANGHARAEI V, ZIEHL P. Developing a heterogeneous ensemble learning framework to evaluate Alkali-silica reaction damage in concrete using acoustic emission signals [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 172: 108981.
- [58] GAO W H, KONG Q Z, LU W S, et al. High spatial resolution imaging for damage detection in concrete based on multiple wavelet decomposition [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 319: 126057.
- [59] 朱珊, 周文杰, 李晓莹. 混凝土健康监测技术综述[J]. *建筑结构*, 2022, 52(增刊 1): 2248-2252.
ZHU S, ZHOU W J, LI X Y. A review of concrete health monitoring techniques [J]. *Building Structures*, 2022, 52(Sup 1): 2248-2252. (in Chinese)
- [60] SINGH I, DEV N, PAL S. Impedance based damage assessment of concrete under the combined effect of impact and temperature using different piezo configurations [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 345: 113763.
- [61] 黄凤英, 林龙滨, 瞿思聪. 基于光纤传感技术的大体积混凝土温度监测[J]. *龙岩学院学报*, 2022, 40(5): 47-51.
HUANG F Y, LIN L B, QU S C. Temperature monitoring of mass concrete based on fiber optic sensing technology [J]. *Journal of Longyan University*, 2022, 40(5): 47-51. (in Chinese)
- [62] 牛文, 唐永圣, 刘红伟, 等. 基于分布式光纤传感的混凝土梁关键指标监测方法研究[C]//2022年工业建筑学术交流会议. 北京. 2022.
NIU W, TANG Y S, LIU H W, et al. Research on the monitoring method of key indicators of concrete beams based on distributed fiber optic sensing [C]//Industrial Building Colloquium 2022. Beijing, China: 2022: 5. (in Chinese)
- [63] ZHANG H, LI J J, KANG F, et al. Monitoring depth and width of cracks in underwater concrete structures using embedded smart aggregates [J]. *Measurement*, 2022, 204: 112078.
- [64] ZHANG H, LI J J, KANG F. Real-time monitoring of humidity inside concrete structures utilizing embedded smart aggregates [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 331: 127317.
- [65] XU X B, JIN Z Q, YU Y, et al. Damage source and its evolution of ultra-high performance concrete monitoring by digital image correlation and acoustic emission technologies [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 65: 105734.
- [66] ZHANG D W, XIE Z Y, UEDA T, et al. Assessment of fatigue damage of prefabricated concrete composite beams with piezomagnetic signal [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, 547: 168931.
- [67] BURUD N B, CHANDRA KISHEN J M. Response based damage assessment using acoustic emission energy for plain concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 269: 121241.
- [68] LUO G H, WANG J T, PAN J W. A frame work for concrete crack monitoring using surface wave transmission method [J]. *Measurement*, 2023, 218: 113211.
- [69] AID M, MO F, HAN Y H, et al. Automated identification of compressive stress and damage in concrete specimen using convolutional neural network learned electro-mechanical admittance [J]. *Engineering Structures*, 2022, 259: 114176.
- [70] XIANG C, WANG W, DENG L, et al. Crack detec-

- tion algorithm for concrete structures based on super-resolution reconstruction and segmentation network [J]. *Automation in Construction*, 2022, 140: 104346.
- [71] CUI X N, WANG Q C, DAI J P, et al. Pixel-level intelligent recognition of concrete cracks based on DRACNN [J]. *Materials Letters*, 2022, 306: 130867.
- [72] XU G, YUE Q R, LIU X G. Real-time monitoring of concrete crack based on deep learning algorithms and image processing techniques [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2023, 58: 102214.
- [73] ZHANG Y, NI Y Q, JIA X Y, et al. Identification of concrete surface damage based on probabilistic deep learning of images [J]. *Automation in Construction*, 2023, 156: 105141.
- [74] LI G P, LUO M Z, HUANG J P, et al. Early-age concrete strength monitoring using smart aggregate based on electromechanical impedance and machine learning [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 186: 109865.
- [75] LIANG C, JIAO C Y, GOU H R, et al. Facile construction of electrochemical and self-powered wearable pressure sensors based on metallic corrosion effects [J]. *Nano Energy*, 2022, 104: 107954.
- [76] FAN L, BAO Y. Review of fiber optic sensors for corrosion monitoring in reinforced concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 120: 104029.
- [77] JAYAWICKREMA U M N, HERATH H M C M, HETTIARACHCHI N K, et al. Fibre-optic sensor and deep learning-based structural health monitoring systems for civil structures: A review [J]. *Measurement*, 2022, 199: 111543.
- [78] YANG Z Q, CHEN Q J, LI X Q, et al. Crack identification in concrete structures using implantable sensors [J]. *Measurement*, 2022, 202: 111780.
- [79] ALVAREZ-MONTOYA J, CARVAJAL-CAS-TRILLÓN A, SIERRA-PÉREZ J. In-flight and wireless damage detection in a UAV composite wing using fiber optic sensors and strain field pattern recognition [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 136: 106526.
- [80] 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.
- [81] 秦疆伟. 基于单模-无芯-单模光纤结构的钢筋锈蚀监测技术研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2022.
- QIN J W. Research on monitoring technology of steel corrosion based on single mode-coreless-single mode optical fiber structure [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [82] LIN S Y, TANG F J, DANG J, et al. Automatic detection of steel rebar corrosion based on machine learning and light spectrum of fiber optic corrosion sensors [J]. *Optical Fiber Technology*, 2023, 79: 103379.
- [83] SHEN W, PANG Q, FAN L, et al. Monitoring and quantification of non-uniform corrosion induced mass loss of steel piles with distributed optical fiber sensors [J]. *Automation in Construction*, 2023, 148: 104769.
- [84] LUO D, LI Y Y, LIM K S, et al. Development of Fe-C film coated polymer optical fiber sensor for steel bar corrosion monitoring [J]. *Measurement*, 2023, 210: 112561.
- [85] FAN L, TAN X, ZHANG Q H, et al. Monitoring corrosion of steel bars in reinforced concrete based on helix strains measured from a distributed fiber optic sensor [J]. *Engineering Structures*, 2020, 204: 110039.
- [86] LIU Y M, BAO Y. Automatic interpretation of strain distributions measured from distributed fiber optic sensors for crack monitoring [J]. *Measurement*, 2023, 211: 112629.
- [87] YE H W, LIU J L, ZHOU Y, et al. Monitoring of crack opening displacement of steel structure by PPP-BOTDA-distributed fiber optical sensors: Theory and experiment [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, 262: 108275.
- [88] HYER H C, SWEENEY D C, PETRIE C M. Functional fiber-optic sensors embedded in stainless steel components using ultrasonic additive manufacturing for distributed temperature and strain measurements [J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 52: 102681.
- [89] ZHENG Y, LI Z, YU J, et al. Experimental research on a novel spring-shaped fiber-optic displacement sensor for settlement monitoring [J]. *Measurement*, 2022, 191: 110754.
- [90] CAI L, AI X, ZHAO Y. A displacement sensor based on balloon-like optical fiber structure [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 338: 113469.
- [91] TERASAKA Y, WATANABE K, URITANI A. First demonstration of a novel single-end readout type position-sensitive optical fiber radiation sensor based on wavelength-resolved photon counting [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2022, 1034: 166793.
- [92] ZI X H, CHEN J, ZHANG S C, et al. Ultrasensitive and stable pressure sensor based on tapered optical fibres [J]. *Optics Communications*, 2022, 518: 128337.
- [93] SUN Z S, XU Y Z, YU W X, et al. Optical fiber distributed vibration sensor based on dual Mach-Zehnder interferometer using an improved phase generated carrier algorithm [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022,

- 127: 104440.
- [94] SAIDI M, REBOUL N, GABOR A. Analysis of bond behaviour of textile-reinforced cement (TRC) applied to masonry using distributed fibre optic sensors and acoustic emission [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 247: 110327.
- [95] LIU Z C, YANG J H, WANG J, et al. Design of modified model of intelligent assembly digital twins based on optical fiber sensor network [J]. *Digital Communications and Networks*, 2022
- [96] CHANG Y B, PEI L, WANG J S, et al. Strain and curvature optical fiber laser sensor based on an accurate RI-regulated FMF with high modal power balance [J]. *Optics Communications*, 2023, 531: 129183.
- [97] LI K P, LI Y L, DONG P, et al. Pressure test of a prestressed concrete cylinder pipe using distributed fiber optic sensors: Instrumentation and results [J]. *Engineering Structures*, 2022, 270: 114835.
- [98] BAI H, GUO D P, WANG W B, et al. Experimental investigation on flexural behavior of steel-concrete composite floor slabs with distributed fiber optic sensors [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 54: 104668.
- [99] BUDA-OŻÓG L, ZIEBA J, SIENKOWSKA K, et al. Distributed fibre optic sensing: reinforcement yielding strains and crack detection in concrete slab during column failure simulation [J]. *Measurement*, 2022, 195: 111192.
- [100] XIE J F, YANG H T, JING Z Y, et al. Condition assessment of concrete piers subjected to impact load using fiber optic sensing [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17: e01597.
- [101] GAYAKWAD H, THIYAGARAJAN J S. Structural damage detection through EMI and wave propagation techniques using embedded PZT smart sensing units [J]. *Sensors*, 2022, 22(6): 2296.
- [102] TULOUP C, HARIZI W, ABOURA Z, et al. Structural health monitoring of polymer-matrix composite using embedded piezoelectric ceramic transducers during several four-points bending tests [J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(12): 125011.

(编辑 王秀玲)