

基于PZT的钢筋锈蚀监测方法及脱钝损伤演化机理研究

何肖斌¹, 王 威^{2,3*}, 查 忍⁴, 姜绍飞^{2,3}, 宋华霖^{2,3,5}

(1. 福州市公路事业发展中心, 福州 350005; 2. 福州大学 土木工程学院, 福州 350108; 3. 福州大学 福建省土木工程多灾害防治重点实验室, 福州 350108; 4. 合肥信息技术职业学院 建筑工程学院, 合肥 230601; 5. 桂林电子科技大学 建筑与交通工程学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 钢筋锈蚀脱钝会使保护膜破坏, 生成的锈蚀产物导致混凝土发生胀裂, 降低了钢筋混凝土(RC)结构的安全性与使用寿命。为揭示混凝土结构中钢筋锈蚀与脱钝过程, 本文基于波动理论, 引入钢筋锈蚀损伤指标, 提出了基于压电陶瓷(PZT)的钢筋锈蚀损伤监测方法, 并开展了相关试验研究。首先, 根据法拉第定律计算理论锈蚀率, 对RC试件进行通电加速锈蚀并修正理论锈蚀率, 研究了不同锈蚀率试件中的应力波传播特性; 其次, 对比钢筋材料锈蚀演化的4个阶段, 明晰了脱钝和脱黏阶段的锈蚀率区间; 最后, 提出以信号能量为指标的钢筋脱钝损伤演化模型, 实现了钢筋锈蚀损伤的量化与动态监测。研究表明: 理论锈蚀率与实际锈蚀率最大误差为5.4%, 通过监测所揭示的锈蚀演化机理与钢筋材料锈蚀的四阶段规律吻合较好, 损伤指标与服役年限呈二次函数关系。这些表明本文提出的方法能够有效监控RC结构的锈蚀演化, 所提出的模型可预测钢筋脱钝年限, 可为整体RC结构的安全性及耐久性评估提供技术支撑。

关键词: 压电陶瓷; 钢筋锈蚀; 损伤演化模型; 钢筋脱钝年限; 锈蚀率; 信号能量

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)04-0085-09

DOI: 10.13969/j.jzgigjz.20241011001

Monitoring Method of Reinforcement Corrosion and Evolution Mechanism of Depassivation Damage Based on PZT

HE Xiaobin¹, WANG Wei^{2,3*}, CHA Ren⁴, JIANG Shaofei^{2,3}, SONG Hualin^{2,3,5}

(1. Fuzhou Highway Development Center, Fuzhou 350005, China; 2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 3. Fujian Provincial Key Laboratory on Multi-Disasters Prevention and Mitigation in Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 4. College of Civil Engineering and Architecture, Hefei Information Technology University, Hefei 230601, China; 5. School of Architecture and Transportation Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

*Corresponding author: w_wei77@163.com

Abstract: The corrosion depassivation of reinforcement leads to the surface protective film failure and the resulting corrosion products cause the expansion and cracking of concrete, which reduces the safety and service life of RC structures. To reveal the corrosion and depassivation process of reinforcement in concrete structures, this paper proposes a PZT-based reinforcement corrosion damage monitoring method by introducing a reinforcement corrosion damage factor based on stress wave theory, and conducts relevant experiments. Firstly, the theoretical corrosion rate was calculated

收稿日期: 2024-10-11

基金项目: “十四五”国家重点研发计划(2023YFF0906102), 福建省交通运输科技项目(202301)

作者简介:

何肖斌(1972—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事钢筋混凝土结构智能监测与寿命预测方面的研究。E-mail: hxbb77@126.com。

通信作者:

王 威(1999—), 男, 博士研究生, 主要从事结构健康监测与安全运维方面的研究。E-mail: w_wei77@163.com。

using Faraday's law to accelerate the corrosion of RC specimens, and was subsequently corrected. The propagation characteristics of stress waves in specimens with different corrosion rates were investigated. Secondly, by comparing the monitoring results with the four stages of reinforcement corrosion evolution at the material level, the corrosion rate intervals corresponding to the depassivation and debonding stages were clarified. Finally, a reinforcement depassivation damage evolution model using signal energy as an indicator was proposed, which realizes the quantification and dynamic monitoring of reinforcement corrosion damage. The research results indicate that the maximum error between the theoretical and actual corrosion rate is 5.4%. The corrosion evolution mechanism revealed by the reinforcement corrosion monitoring test matches well with the four stages of reinforcement corrosion at the material level. The damage indicator exhibits a quadratic functional relationship with the service life. These findings indicate that the proposed method can effectively monitor the corrosion evolution process of RC structures, and the established model is capable of predicting the reinforcement depassivation time, which provides technical support for assessing the safety and durability of the overall RC structure.

Keywords: piezoelectric lead zirconate titanate; reinforcement corrosion; damage evolution model; reinforcement depassivation time; corrosion rate; signal energy

钢筋混凝土结构凭借承载能力高、延性良好等优异力学性能,在建筑、核电站、桥梁、隧道等重大工程结构中得到广泛应用^[1]。随着服役年限增长,钢筋锈蚀问题日益突出,严重影响混凝土结构的承载力与耐久性^[2]。钢筋发生锈蚀时,有效截面面积减小,导致承载力下降;同时,锈蚀产物会显著削弱钢筋与混凝土间的黏结性能,破坏二者协同工作机制,最终影响混凝土构件的耐久性与适用性^[3]。因此,开展滨海地区钢筋锈蚀监测及其演化机理研究,具有重要的理论价值与现实意义。

当前钢筋锈蚀监测的主要方法有物理法和电化学法。物理法主要包括电阻探针法、光纤传感法和声发射法^[4-5];电化学法主要包括半电池电位法、交流阻抗法、线性极化法、电化学噪声法^[6-7]。由于压电陶瓷(piezoelectric lead zirconate titanate, PZT)具有响应速度快、能耗低、成本低且易加工成型等优点^[8],基于PZT的结构健康监测技术已在土木工程领域得到大量应用,为钢筋锈蚀监测提供了便捷、高效、高灵敏度的技术手段^[9]。WU等^[10]利用压电陶瓷技术对钢筋锈蚀中的脱黏现象进行试验研究,发现脱黏现象的存在影响了应力导波的传播。在此基础上,高志玉等^[11]采用电化学锈蚀方法对钢筋混凝土试件进行通电锈蚀,并通过分析得到了钢筋波幅衰减系数变化规律,但无法精确量化钢筋锈蚀的具体阶段与演化过程。朱劲松等^[12]采用PZT波传播法对变形钢筋进行了试验研究,分析其在无锈蚀钢筋中的传播衰减规律,并对18个钢筋混凝土试件进行PZT监测以评价锈蚀对应力波传播特性的影响。钢筋在锈蚀过程中发生的脱钝与脱黏现象使得结构内部钢筋与混凝土更容易受到外界环境的影响,进而直接影响了RC结构的承载能力和耐久性。虽然以上研究改进了基于PZT的监测技术,并提升了其在钢筋锈蚀监测中的有效性和敏感性,但是对于实际钢筋锈蚀过程中脱钝阶段(钢筋表面钝化膜破坏,锈蚀产物开始产生)与脱黏阶段(钢筋锈蚀

产物的产生使钢筋与混凝土之间无法共同工作)缺乏精细化监控与演化过程预测,难以在实际工程中对RC结构的管养与维护给出有效的决策和建议。

为此,本文提出了一种面向工程应用的钢筋锈蚀监测与损伤演化分析方法,制作了4个RC试件进行通电加速锈蚀试验,并采用PZT监测其锈蚀发展全过程。从时域特征与信号能量两方面开展锈蚀演化机理研究,并对比了钢筋材料锈蚀的4个演化阶段,验证了所提出锈蚀监测方法的有效性,明晰了钢筋锈蚀过程中在脱钝和脱黏发生时的锈蚀率区间。最后建立了钢筋脱钝的损伤演化模型,该模型能够用来预测RC结构中的钢筋脱钝年限,其一阶导数能够推测脱钝阶段的损伤发展速度,可为RC结构的安全性与耐久性评估提供依据。

1 基于PZT的钢筋锈蚀监测方法

1.1 钢筋锈蚀模拟

钢筋自然锈蚀是一个长期且缓慢的过程,锈蚀结果因受多种环境耦合作用的影响而差异较大。实验室中通常采用电化学锈蚀法、干湿循环浸泡法和盐雾腐蚀法^[13]来加速RC试件锈蚀。本文选择电化学通电锈蚀方法对构件中的钢筋进行加速锈蚀。具体来说,采用全浸泡通电加速锈蚀的方式,并使用3.5% NaCl溶液来模拟自然条件下的钢筋锈蚀环境,该浓度能够有效模拟海洋环境中常见的氯离子浓度,符合滨海工程结构的实际腐蚀环境^[14]。

为了让每个试件达到目标的理论锈蚀率,在确定通电电流的情况下,需要计算每个试件的锈蚀通电时间 t 。

$$t = \frac{M_{\text{loss}} Z_{\text{Fe}} F}{M_{\text{Fe}} I_{\text{corr}}} \quad (1)$$

式中: M_{loss} 为目标锈蚀率下的质量差,由理论锈蚀率乘以钢筋质量所得; M_{Fe} 为铁元素的摩尔质量, M_{Fe} 取 $56 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; I_{corr} 为锈蚀电流,文中取 1 A ,以避免电流过高导致不均匀锈蚀,并且保障试验场地与人员的安全; Z_{Fe}

为铁离子的化学价位,在电化学中铁被氧化为二价亚铁离子,故 Z_{Fe} 取2; F 为法拉第常数, F 取 $96\,500\text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$; t 为锈蚀时间。

在达到理论锈蚀时间后将试件取出静置,等待试件水分蒸发之后对其进行称重,通过锈蚀前后的质量损失计算出在此次通电锈蚀过程中的实际锈蚀率:

$$\varphi = \frac{\Delta m}{m_0} \quad (2)$$

式中: Δm 为试件在锈蚀前后的质量差; m_0 为试件的原质量; φ 为实际锈蚀率。

1.2 PZT监测装置

压电陶瓷(PZT)具有正压电效应和逆压电效应,可以实现电能与机械能之间的相互转化。故此将PZT粘贴于钢筋表面,使其发射的应力波能够在钢筋内部进行传播。本文进行钢筋锈蚀监测的装置主要包含:上海联能科技有限公司生产制造的PZT-5A压电陶瓷、DG1022函数信号发生器、USB-6363NI采集卡(含有32路16位AI、4路AO、48路DIO)、深圳兆信公司的可调直流电源(型号RXN-3010-D-II,可输出电压 $0\sim 30\text{ V}\times 2$ 路,可输出电流 $0\sim 10\text{ A}\times 2$ 路)。监测装置如图1所示。

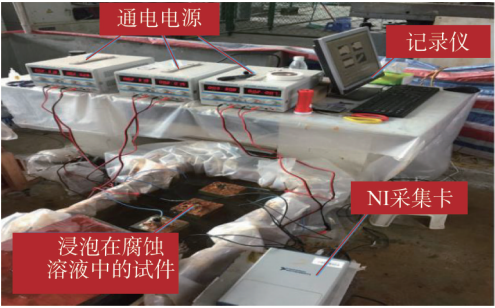


图1 钢筋锈蚀监测装置

Fig. 1 Reinforcement corrosion monitoring device

1.3 锈蚀钢筋监测方法与监测系统

钢筋锈蚀过程中,由于锈蚀产物在不同锈蚀阶段对黏结界面会产生不同的影响。因此,应力导波在固体中进行传播的过程中,当传播介质发生改变后,会引起应力波的某些特征参数发生变化,而PZT正好可以捕捉这种变化,因此本文提出了基于PZT的钢筋锈蚀监测方法,并研发了监测系统以监控钢筋锈蚀与损伤演化过程。

本文研发的钢筋锈蚀监测系统架构如图2所示。该架构主要包含传感器系统、数据采集系统、数据传输系统、数据处理与分析系统这4个部分。首先,在传感器系统中把PZT片在试件浇筑前预先粘贴于钢筋表面并采用环氧树脂防护;其次,在数据采集系统中采集环境信号、激励信号及结构响应信号等,该数据采集系统主要通过NI采集卡采集。试验在恒定环境条件下进行,重点采集并记录不同锈蚀率对应的时域信号变化。然后,由NI采集卡所记录下的数据经数据采集线传输到记录仪中进行保存以进一步分析,在这一步中,本文增加了模拟钢筋加速锈蚀的系统,将数据传输系统与数据监控系统进行合并,以便在试验期间实时观察由钢筋锈蚀率变化导致的信号变化情况。最后,将采集到的信号导入数据处理与分析系统中进行处理。本文在现有数据处理与分析的基础上,通过把时域信号转换为能量值来判断钢筋锈蚀的不同阶段,并建立钢筋脱钝损伤演化模型,从而进一步推导出实际锈蚀年限下的信号特征指标变化规律,详见下文3.2和3.3节。

综上所述,本文在现有的结构健康监测系统中进行了改进与调整,使其更适配钢筋锈蚀监测需求,并且在数据处理与分析系统这一部分进行了优化,将时域信号数据进行处理,从而提出了基于信号能量的钢筋脱钝损伤指标,为钢筋锈蚀全过程监测及结构安全运维提供支撑。

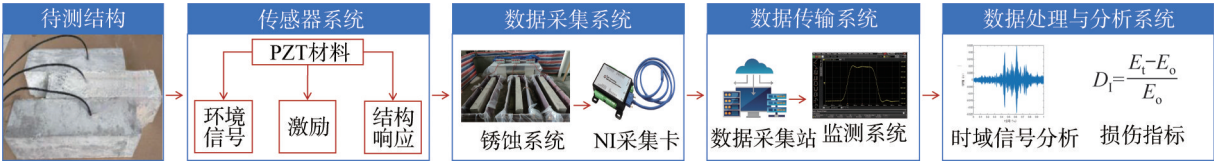


图2 钢筋锈蚀监测系统

Fig. 2 Reinforcement corrosion monitoring system

2 基于PZT的钢筋锈蚀监测试验

2.1 试件设计

试验设计并制作了4个棱柱体试件,长宽高分别为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 300\text{ mm}$,试件编号依次为1#、2#、3#、4#。混凝土强度采用C30,纵筋选用 $\varphi 12\text{ HRB335}$ 钢筋,混凝土保护层厚为 20 mm 。压电陶瓷采用PZT-5A

型,为保证与钢筋表面贴合,选用正负极在同一面的翻边极式压电陶瓷片,尺寸为 $15\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 0.3\text{ mm}$,在每个试件的钢筋上粘贴两个压电陶瓷片。具体步骤如下所示:

(1) 定点:截取适当长度的钢筋,并在间距 20 cm 的位置做好标记;

(2) 打磨:采用打磨机对标记区域打磨,提高表面平整度,增强PZT与钢筋的黏结效果;

(3) 称重:对打磨后的钢筋进行初始称重,即锈蚀前钢筋质量;

(4) 粘贴:将打磨处用丙酮擦拭后,用速干胶水将压电陶瓷片粘贴至钢筋上,并按压5 min;

(5) 保护:使用浸透环氧树脂的纱布对粘贴位置进行包裹保护,防止在混凝土浇筑过程中压电陶瓷片发生破坏。



图3 粘贴PZT传感器的钢筋试件

Fig. 3 Reinforcement specimen with PZT sensors

2.2 材性试验

试验中所采用的混凝土强度等级为C30。其中,混凝土相关配合比数据以及经标准养护后实测28 d立方体抗压强度 $f_{cu,28}$ 如表1所示。试验所采用的钢筋力学性能指标如表2所示。

表1 混凝土配合比

Table 1 Concrete mix proportion

强度等级	水泥/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	砂/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	碎石/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	水/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	水灰比	$f_{cu,28}$ / MPa
C30	435	588	1 164	196	0.45	31.2

表2 钢筋的力学性能

Table 2 Mechanical properties of reinforcement

钢筋类型	直径/mm	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
HRB335	12	346	451

2.3 试件锈蚀模拟与锈蚀率修正

试验采用前文1.1节中所述的全浸泡通电法进行钢筋加速锈蚀,通过公式计算出理论锈蚀率所需的通电时长,预估不同的通电时长下钢筋的锈蚀率。由于理论计算与实际锈蚀存在偏差,通过通电结束后钢筋实测质量计算实际锈蚀率,并以此对理论锈蚀率进行修正,减小理论值与实测值之间的误差。各试件锈蚀率修正参数见表3。

将各试件理论锈蚀率与实际锈蚀率进行对比,可以发现:受混凝土包裹作用影响,实际锈蚀率整体低于理论锈蚀率,二者差值约为5%。

表3 试件锈蚀率的修正

Table 3 Correction of corrosion rate of specimens

锈蚀率修正	试件编号			
	1#	2#	3#	4#
通电前钢筋质量/g	165.83	213.33	211.76	210.03
理论钢筋损失质量/g	49.75	64.00	63.53	63.01
理论锈蚀率/%	30.0	30.0	30.0	30.0
通电后钢筋质量/g	124.20	160.30	158.40	158.90
钢筋实际损失质量/g	41.63	53.03	53.36	51.13
实际锈蚀率/%	25.1	24.9	25.3	24.6

3 钢筋锈蚀损伤与脱钝损伤演化模型

本节首先采用1.3节中所提出的钢筋锈蚀监测系统对RC试件的锈蚀过程进行监测,并采集锈蚀过程中的时域信号数据;然后,将时域信号数据通过公式换算得到信号能量值,根据监测信号对钢筋锈蚀的4个阶段进行划分,并与钢筋材料层面的锈蚀机理进行比较;最后,建立了基于信号能量值的钢筋脱钝损伤演化模型。

3.1 基于时域信号的钢筋锈蚀演化

以信号幅值为主要特征参数,通过时域信号可直观分析钢筋锈蚀对监测信号的影响。本文以1#试件为例,对钢筋通电加速锈蚀过程中不同锈蚀率下的信号进行时域信号分析,选取8个典型锈蚀率工况下的时域信号进行分析,如图4所示,各工况时域信号最大幅值见表4。

从图4和表4中可以看出,1#试件的信号随锈蚀率的增大出现了较为明显的变化,主要表现在:

(1) 1#试件在不同锈蚀率下的信号幅值呈现“先减小后增大”的变化过程;

(2) 随着锈蚀率的增大,信号的波形发生较大的变化,由最初的“双峰型”信号逐渐演变成“单峰型”信号,最后又演变成“多峰型”信号;

(3) 通过对比图3中b)和c)发现:第一次出现“双峰型”向“单峰型”转变是在锈蚀率约为6%时;对比图3中e)和f)发现:第一次出现由“单峰型”向“多峰型”转变是在锈蚀率为16%时。

3.2 基于信号能量的钢筋锈蚀演化与验证

3.2.1 钢筋锈蚀演化阶段

钢筋发生锈蚀后会产生大量的锈蚀产物。而锈蚀产物的化学成分较为复杂,通常含有多种氧化物。当氧气

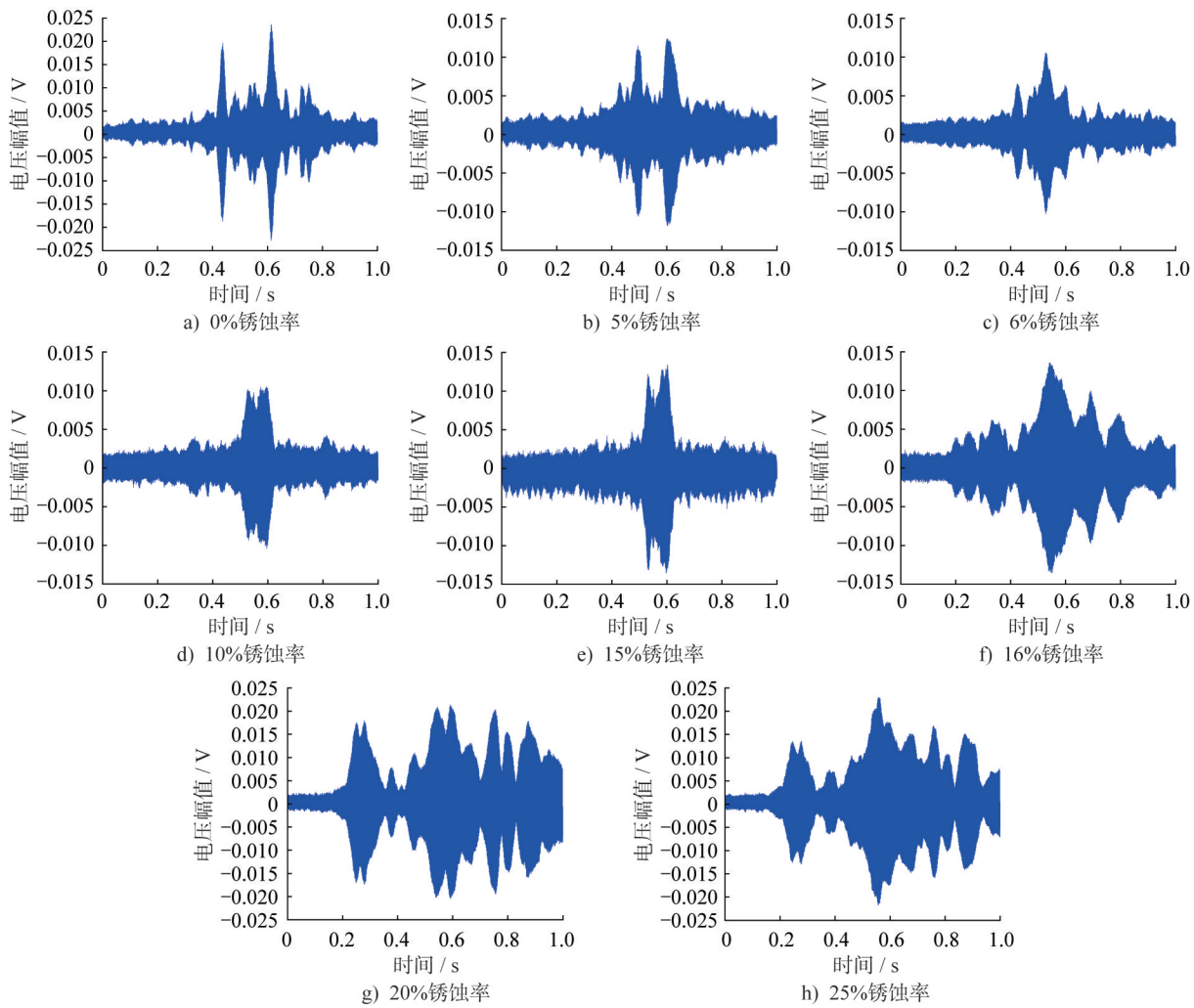


图4 试件在不同锈蚀率下的信号时域

Fig. 4 Signal time-domain of specimens under different corrosion rates

表4 不同锈蚀率下的信号幅值

Table 4 Signal amplitude under different corrosion rates

锈蚀率/%	0	5	10	15	20	25
幅值/V	0.025	0.012	0.011	0.011	0.021	0.022

充足时生成 Fe_2O_3 (红锈),当氧气不足时会生成 Fe_3O_4 (黑锈),而且锈蚀产物的出现会使体积膨胀,较原钢筋的体积膨胀2~6倍,使得钢筋与混凝土处的黏结界面发生变化,继而影响了导波在钢筋中的传播。信号能量值能够准确地反映出这一过程。离散信号的能量表达式为:

$$E = \sum_{N=-\infty}^{\infty} |x(n)|^2 \quad (3)$$

式中: $x(n)$ 为信号对应的离散序列, n 为采样点。

根据式(3)计算出4个试件在不同锈蚀率下的能量值,如图5所示。

从图5中可以看出4个试件在信号能量方面表现出一致的变化规律,结合试件锈蚀样貌(图6),将钢筋锈蚀

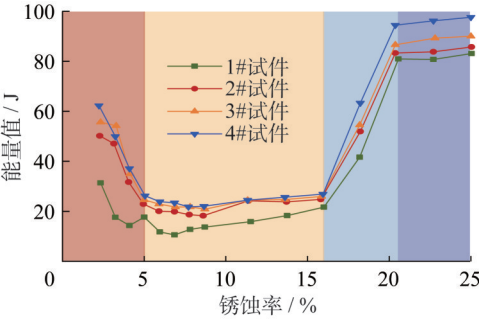


图5 各试件信号能量随锈蚀率的变化

Fig. 5 Signal energy variation of specimens with corrosion rate

过程分为4个阶段:

(1) 第1阶段:脱钝起锈(锈蚀率约为0~5%)

钢筋的脱钝过程在此阶段之前已经完成,钢筋表面失去了氧化膜的保护,锈蚀产物开始在钢筋表面产生(图6a))。本阶段钢筋锈蚀开始出现并逐步加重,导致信号

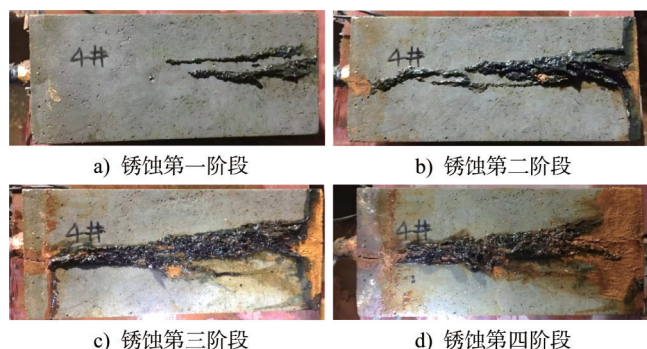


图6 不同锈蚀阶段的试件展示

Fig. 6 Specimens at different corrosion stages

能量大幅下降;1#、2#、3#、4#试件能量值分别下降了72.51%、65.22%、68.69%、67.13%。

(2) 第2阶段:产生裂缝(锈蚀率约为5%~15%)

随着钢筋的锈蚀率继续加大,锈蚀产物逐渐增多,并开始填补混凝土与钢筋之间的间隙,导致混凝土内部膨胀,并产生微小的锈胀裂缝,锈胀产物会随着裂缝逐渐流出(图6b))。由于锈蚀产物继续填补钢筋和混凝土黏结界面的微小孔隙和裂缝,使导波能量向外扩散减少,信号能量基本保持稳定并略有回升(图5)。

(3) 第3阶段:胀裂脱黏(锈蚀率约为15%~20%)

锈蚀产物大量产生,微小裂缝持续不断地扩展,钢筋在此阶段产生大面积的脱黏现象(图6c))。各试件的能量值均大幅上涨,1#、2#、3#、4#试件的能量值分别达到初始能量的2.27倍、1.77倍、1.61倍、1.66倍。在这一阶段信号能量值上升是因为脱黏现象使得钢筋与混凝土之间产生大量裂缝,阻碍了压电信号导波在黏结界面的折射,增强了压电信号在黏结界面处的反射效应,使接收能量显著提高。

(4) 第4阶段:裂缝贯通(锈蚀率约为20%~25%)

锈蚀产物进一步产生,从钢筋表面向混凝土挤压,原有的许多微小裂缝继续延展、扩大,直至形成贯通裂缝(图6d))。在这一阶段,贯通裂缝所造成的间隙会导致信号能量值在此阶段略有增加,锈蚀率为25%较锈蚀率为20%时4个试件的信号能量分别提升了2.75%、2.96%、3.94%、3.36%,整体增幅较小。

3.2.2 钢筋材料锈蚀验证

许多学者对于钢筋锈蚀在材料层面的演化过程进行了相关研究^[15]:在锈蚀的过程中,当锈胀应力达到混凝土的极限抗拉强度时,混凝土会出现锈胀裂纹,并最终导致整体开裂。随着混凝土保护层的开裂,钢筋失去了原有的混凝土保护,进而暴露在外界环境中,这将会加快其锈蚀速率。随着锈蚀的演化发展,锈蚀产物会累积在钢筋表面,钢筋与混凝土之间的孔隙会被锈蚀产物所填充。

当锈蚀达到一定程度时,产生的锈胀力最终导致混凝土的开裂。此后,裂缝宽度会沿着开裂位置逐渐增大,锈胀开裂的过程如图7所示。

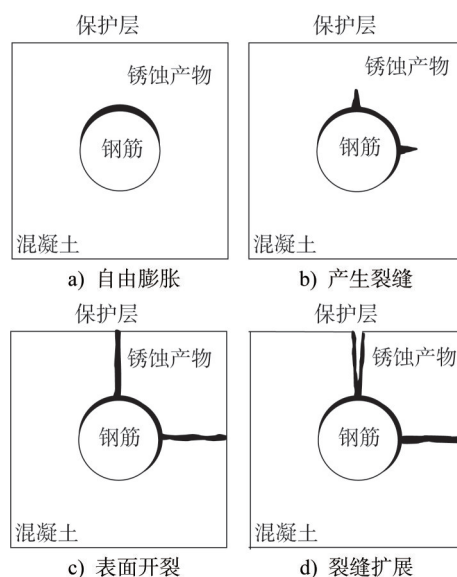
图7 锈胀裂缝发展过程示意图^[15]

Fig. 7 Schematic diagram of corrosion crack development process

OHTSU等^[16]认为当环境中的氯离子达到一定水平后,钢筋表面的钝化膜破坏,即发生脱钝现象,由于内部有水分与氧气的存在,钢筋的锈蚀将会持续不断地进行。钢筋锈蚀归纳为以下4个阶段(图8):

(1) 钢筋起锈阶段:氯离子侵蚀导致钢筋钝化膜破坏,钢筋脱钝,锈蚀产物开始形成;

(2) 加速锈蚀阶段:随着钝化膜的消失,所产生的锈蚀产物填补混凝土与钢筋之间的间隙,混凝土开始产生裂缝;

(3) 厌氧锈蚀阶段:随着试件内部氧气的减少,锈蚀产物大量增加,锈蚀速度减缓,但裂缝进一步加深,钢筋与混凝土发生脱黏;

(4) 裂缝贯通阶段:锈蚀持续发展,锈蚀产物将微小裂缝胀大,最终导致裂缝贯通整个试件。

分析对比图5~图8,发现钢筋材料锈蚀机理与基于PZT的钢筋锈蚀监测试验过程存在以下相似点:

(1) 第1阶段均为钢筋表面保护膜脱钝,锈蚀产物开始产生,对应本文中监测的信号能量值下降;

(2) 第2阶段均为锈蚀产物初步产生,开始填充混凝土与钢筋之间的间隙,对应本文中监测的信号能量在此阶段保持稳定不变;

(3) 第3阶段均为钢筋发生脱黏,此时锈蚀产物大量产生,试件锈胀到不允许程度^[16],钢筋在此阶段产生脱黏导致试件内部生成大量微小裂缝,对应本文中监测的

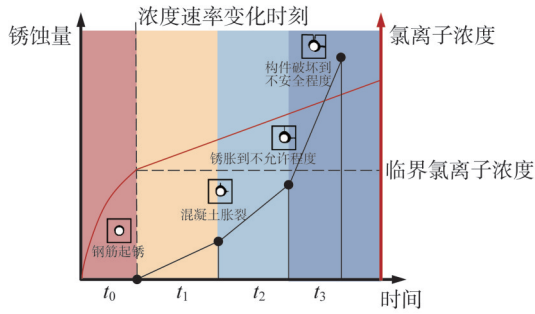
图8 钢筋锈蚀过程^[16]

Fig. 8 Reinforcement Corrosion Process

信号能量值开始上升;

(4) 第4阶段均为裂缝开始贯通整个RC试件,此时锈蚀产物继续产生,将原有大量微小裂缝胀大,进而形成较大裂缝贯通整个试件,对应本文中监测的信号能量值较前一阶段有所提高,但变化不大。

综上,本文锈蚀监测试验划分的“脱钝起锈”、“产生裂缝”、“胀裂脱黏”、“裂缝贯通”4个阶段与钢筋材料层面的锈蚀演化4个阶段基本吻合。这说明基于PZT的监测方法能够有效反映钢筋锈蚀损伤演化过程,进一步验证了本文方法的有效性,为后续的工程维护和结构加固提供了重要参考。

3.3 钢筋脱钝损伤演化模型

混凝土结构中的钢筋脱钝是钢筋由钝化状态转变为活化状态的一个关键转折点,因此钢筋脱钝对于整个钢筋锈蚀过程极为重要。本文参照中国珠江流域内河码头浪溅区混凝土结构中钢筋锈蚀率与实际服役年限的统计关系^[17]:

$$C_R = -0.01t^2 + 1.1462t - 2.7681 \quad (4)$$

式中: C_R 为钢筋锈蚀率; t 为实际服役年限,单位为年, $0 \leq t \leq 40$ 。

根据式(4)将图5中的锈蚀率与实际服役年限做变量代换,继而得到各试件能量值与实际服役年限的关系,见图9。

从上述结果分析中可以发现:基于PZT的信号能量值对于钢筋腐蚀过程中的“脱钝”和“脱黏”段(第1阶段的下降段与第3阶段的上升段)非常敏感。因此,本文以钢筋锈蚀为损伤因子,建立基于信号能量值的钢筋锈蚀“脱钝”区段损伤演化模型。首先以信号能量值作为损伤变量来定义损伤指标 D_1 如下:

$$D_1 = \left| \frac{E_t - E_0}{E_0} \right| \quad (5)$$

式中: E_0 为初始能量值; E_t 为区段内某一时刻能量值。

结合上文的研究结果:将式(5)中的 E_0 设定为锈蚀率为0时的能量值, E_t 设定为锈蚀率在0~5%之间某一

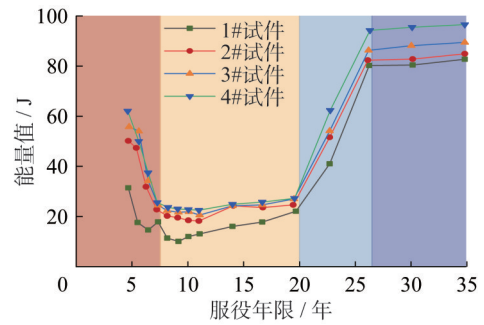


图9 各试件信号能量随服役年限的变化

Fig. 9 Signal energy variation of specimens with service life

时刻的能量值。将4个混凝土试件压电信号的能量值代入式(5)得到不同服役年限下的损伤指标,如图10所示,进而拟合得到钢筋锈蚀脱钝区间内的损伤演化方程:

$$D_1 = 0.06368t^2 - 0.27815t + 0.29796 \quad (6)$$

其中, t 的取值为2.5~5.5,单位为年。

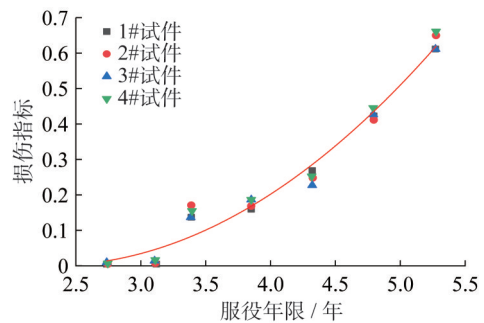


图10 损伤指标随服役年限的变化

Fig. 10 Damage index variation with service life

钢筋锈蚀速率是评估混凝土结构性能中的一个重要参数,但是由于钢筋锈蚀速率受多种因素共同影响而具有时变特性,因而难以直接测量。本文在得到构件脱钝区间的损伤演化方程以后,根据损伤指标的物理意义,进一步分析即可得到损伤速度方程和损伤加速度方程,见式(7)和式(8):

$$V_{D_1}(t) = \frac{dD_1}{dt} \quad (7)$$

$$A_{D_1}(t) = \frac{d^2D_1}{dt^2} \quad (8)$$

上述得到的钢筋锈蚀脱钝区间的损伤演化方程是损伤指标关于实际服役年限 t 的二次函数,对式(6)中时间 t 求一阶导数和二阶导数,即可得到:

$$V_{D_1}(t) = 0.12736t - 0.27815 \quad (9)$$

$$A_{D_1}(t) = 0.12736 \quad (10)$$

由此可以发现:钢筋锈蚀脱钝区间损伤速度方程为线性递增函数,损伤速度随着时间的增大而增大,增大速

率为0.127 36/年。结合钢筋脱钝的发展过程来看:氯离子需要渗透混凝土保护层才能到达钢筋表面,当钢筋表面的氯离子浓度超过阈值,且在有水分和氧气的环境下时,钢筋的氧化膜才开始破坏,之后钢筋发生锈蚀。氯离子在整个钢筋锈蚀反应的过程中发挥催化剂的作用。钢筋表面的氯离子含量是不断累积的,继而造成钢筋锈蚀脱钝过程的加速。通过所提出的损伤演化模型实现了钢筋锈蚀损伤的量化与动态监测,从而可有效预测钢筋脱钝过程,对结构的安全性和耐久性进行评估,进而制定更加合理的维护与加固方案。

4 结论

通过系统试验与理论分析,本文主要结论如下:

(1) 提出了一种基于PZT的钢筋锈蚀监测方法,并通过锈蚀监测试验对其进行验证,证明了该方法适用于监测RC结构中的钢筋锈蚀过程。

(2) 从时域、信号能量两个方面揭示了钢筋锈蚀的演化机理,与钢筋材料锈蚀的4个阶段吻合较好。本文试验结果与相关文献结果一致,充分验证了所提出监测方法、系统与数据处理方法的可行性和有效性。

(3) 建立了基于信号能量值的钢筋脱钝损伤演化模型,该模型不仅能够预测钢筋脱钝时的服役年限,其一阶导数还可预测钢筋在脱钝阶段的损伤发展速度,为结构维护与加固提供监测依据。

综上,本文所提出的基于PZT的钢筋锈蚀监测方法可以有效地对RC结构进行监测,且能够充分反映钢筋锈蚀过程中各个阶段的演化状态,从而可进一步评估整体RC结构的安全性与耐久性。但本研究的结论来自有限的试验结果,仍需进一步的实例验证和数值仿真来确保这些结论的可靠性。

参考文献:

- [1] LIU Z H, GAN L Q, RONG H. Durability of concrete exposed to laboratory-simulated marine microbe-induced corrosion [J]. Construction and Building Materials, 2023, 400: 132563. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.132563.
- [2] 姜绍飞, 林金星, 宋华霖, 等. 基于多物理场耦合的大气环境下碳钢点蚀演化及速率预测模型[J]. 材料导报, 2024, 38(19): 235-241.
JIANG Shaofei, LIN Jinxing, SONG Hualin, et al. Evolution and rate prediction model of pitting of carbon steel in atmospheric environment based on multiphysical fields[J]. Materials Reports, 2024, 38(19): 235-241. (in Chinese)
- [3] 王威, 姜绍飞, 宋华霖, 等. 基于轻量化网络与迁移学习的桥梁水下桩墩结构表观病害轮廓提取[J]. 中国公路学报, 2024, 37(2): 88-99. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2024.02.008.
- WANG Wei, JIANG Shaofei, SONG Hualin, et al. Extracting surface defect contours of bridge underwater pile-pier structures based on lightweight network and transfer learning[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(2): 88-99. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2024.02.008. (in Chinese)
- [4] 潘坦博, 郑永来, 许旭兵, 等. 声发射监测锈蚀混凝土梁受弯的损伤与裂缝特征[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 350-359. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.23110.
PAN Tanbo, ZHENG Yonglai, XU Xubing, et al. Damage characteristics and crack monitoring of corroded reinforced concrete beams in bending process based on acoustic emission techniques [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2024, 52(3): 350-359. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.23110. (in Chinese)
- [5] 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. DOI:10.11918/202105092.
WANG Juan, JIANG Shaofei, CUI Erjiang, 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. DOI: 10.11918/202105092. (in Chinese)
- [6] CAINES S, KHAN F, ZHANG Y H, et al. Simplified electrochemical potential noise method to predict corrosion and corrosion rate [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 47: 72-84. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.02.023.
- [7] 施锦杰, 孙伟. 等效电路拟合钢筋锈蚀行为的电化学阻抗谱研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2011, 23(5): 387-392.
SHI Jinjie, SUN Wei. Equivalent circuits fitting of electrochemical impedance spectroscopy for corrosion of reinforcing steel in concrete [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2011, 23(5): 387-392. (in Chinese)
- [8] 李旭, 霍林生, 李宏男, 等. 混凝土结构中PZT传感器的多功能性分析及应用[J]. 振动测试与诊断, 2015, 35(4): 709-714, 799. DOI: 10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2015.04.018.
LI Xu, HUO Linsheng, LI Hongnan, et al. The analysis and application of multi-functional PZT sensors for health monitoring of concrete structures [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(4): 709-714, 799. DOI: 10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2015.04.018. (in Chinese)
- [9] 高莉宁, 丁思晴, 余江江, 等. 压电技术在智能道路中应用研究现状[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(27): 11486-11495. DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2023.27.002.
GAO Lining, DING Siqing, SHE Jiangjiang, et al. Research status of piezoelectric technology application in intelligent road [J]. Science Technology and Engineering,

- 2023, 23 (27): 11486-11495. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2023.27.002. (in Chinese)
- [10] WU F, CHAN H L, CHANG F K. Ultrasonic guided wave active sensing for monitoring of split failures in reinforced concrete [J]. *Structural Health Monitoring*, 2015, 14 (5): 439-448. DOI:10.1177/1475921715591876.
- [11] 高志玉, 朱劲松. 混凝土内部钢筋锈蚀监测及黏结滑移性能研究[J]. *工业建筑*, 2016, 46(2): 95-99. DOI:10.13204/j.gyjs201602020.
- GAO Zhiyu, ZHU Jinsong. Monitoring of reinforcement corrosion within concrete and research on bond slip performance [J]. *Industrial Construction*, 2016, 46(2): 95-99. DOI:10.13204/j.gyjs201602020. (in Chinese)
- [12] 朱劲松, 高志玉. 基于PZT波传播法的混凝土内部钢筋锈蚀监测方法[J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(1): 166-170. DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2016.01.028.
- ZHU Jinsong, GAO Zhiyu. Monitoring method for corrosion of reinforcement in concrete based on wave propagation method with PZT [J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19 (1): 166-170. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2016.01.028. (in Chinese)
- [13] 姜绍飞, 郑臻弘, 宋华霖, 等. 氯盐干湿循环作用下表面开槽CFRP-混凝土界面抗剪性能试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2024, 56(10): 14-23.
- JIANG Shaofei, ZHENG Zhenhong, SONG Hualin, et al. Experimental study on interfacial shear behavior of CFRP-concrete with surface groove subjected to chloride wet-dry cycles [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2024, 56(10): 14-23. (in Chinese)
- [14] 赵卓英, 田孟安, 孙浩, 等. 标准海水研究现状及其应用[J]. *海洋通报*, 2011, 30(3): 283-286.
- ZHAO Zhuoying, TIAN Meng'an, SUN Hao, et al. Research status and application of standard seawater [J]. *Marine Science Bulletin*, 2011, 30(3): 283-286. (in Chinese)
- [15] SONG G, SHAYAN A. Corrosion of steel in concrete: causes, detection and prediction: a state-of-the-art review [J]. *Engineering, Materials Science*, 1998(7): 77.
- [16] OHTSU M, TOMODA Y. Phenomenological model of corrosion process in reinforced concrete identified by acoustic emission [J]. *ACI Materials Journal*, 2008, 105 (2): 194-199. DOI: 10.14359/19764.
- [17] 李燕兵. 内河在役直立式码头构件承载力的弱化规律的研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- LI Yanbing. Study on the degradation of bearing capacity of the vertical high pile wharf structure in inland river [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)