文章编号: 0253-374X(2024)03-0350-10

声发射监测锈蚀混凝土梁受弯的损伤与裂缝特征

潘坦博¹,郑永来¹,许旭兵¹,蓝 鑫¹,周玉珏² (1. 同济大学土木工程学院,上海200092;2. 三明学院建筑工程学院,福建三明 353000)

摘要:钢筋锈蚀一直是钢筋混凝土结构退化的主要原因之一,识别锈蚀混凝土结构内部损伤信号,将为既有建筑物的结构健康监测提供理论依据。采用声发射(AE)技术在微观裂缝水平上研究钢筋锈蚀对钢筋混凝土(RC)梁弯曲特性的影响。声发射信号的上升时间/峰值幅值(*R*/A)、振铃计数/持续时间(AF)和改进后的b值分析将用以反映钢锈蚀作用下钢筋混凝土试件裂纹模式和破坏模式的变化。结果表明,随着钢筋锈蚀率的增加,锈蚀钢筋混凝土梁的极限承载力显著降低;声发射信号与混凝土损伤之间有很好的对应关系,试件的损伤过程可以分为3个损伤阶段:初始损伤阶段,损伤演化阶段、持续损伤增长阶段。b值曲线的变化趋势可以反映裂缝的形成和发展。随着荷载的增加,试件的剪切裂缝比例逐渐上升,且在持续损伤阶段,试件锈蚀程度越高,剪切裂缝比例越高。

关键词: 声发射;*b*值;钢筋锈蚀;混凝土开裂;弯曲特征 **中图分类号**: TU375 **文献标志码**: A

Damage Characteristics and Crack Monitoring of Corroded Reinforced Concrete Beams in Bending Process Based on Acoustic Emission Techniques

PAN Tanbo¹, ZHENG Yonglai¹, XU Xubing¹, LAN Xin¹, ZHOU Yujue²

School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
 College of Architecture and Engineering, Sanming College, Sanming 353000, China)

Abstract: Reinforcement corrosion has been one of the major causes of degradation of reinforced concrete structures. Identifying the internal damage signals of corroded RC structures will provide a theoretical basis for structural health monitoring of existing buildings. This study investigated the effect of steel corrosion on the flexural characteristics of RC beams at the microscopic crack level using acoustic emission (AE) technique. The

rise time/peak amplitude (R/A), ringing count/duration (AF) and improved $b(I_{b})$ values of the acoustic emission signal were calculated for reflecting the changes in cracking patterns and damage modes of corroded RC beams. The results show that the ultimate load capacity of rusted reinforced concrete beams decreases significantly with the increase of reinforcement corrosion rate. there is a good correspondence between acoustic emission signal and concrete damage, and the damage process of the specimen can be divided into three damage stages: initial damage stage, damage evolution stage, and sustained damage growth stage. Besides, the trend of b-value curve can reflect the formation and development of cracks. Moreover, with the increase of load, the proportion of shear cracks in the specimen gradually increases, and the higher the degree of corrosion of the specimen in the sustained damage stage, the higher the proportion of shear cracks.

Keywords: acoustic emission; *b* value; steel corrosion; concrete cracking; flexural characteristics

钢筋混凝土结构中钢筋的锈蚀是一个世界性的 问题,其对钢筋混凝土结构的使用性和耐久性都有 不利影响^[1-2]。一般来说,钢筋锈蚀会导致钢筋混凝 土出现严重的耐久性损伤,如混凝土保护层的开裂、 剥落以及锈胀裂缝的产生。这些损伤极大地削弱了 箍筋的约束力,降低了钢筋和混凝土之间的黏结力, 不可避免地造成了严重的结构破坏^[3]。混凝土结构 因耐久性损伤导致结构发生破坏的事故时有发生, 造成的损失更是难以估量,全世界每年用于锈蚀钢 筋混凝土结构的维护及修复加固的费用总和已超过 1000亿美元^[4]。因此,在钢筋混凝土结构功能严重 受损之前,必须在早期检测阶段采用有效的评估方 法评估钢筋混凝土结构中的钢筋锈蚀影响。



收稿日期: 2023-03-31

基金项目: 福建省自然科学基金面上项目(2022J011185)

第一作者:潘坦博,博士生,主要研究方向为结构耐久性,结构健康监测。E-mail: 1830149@tongji.edu.cn

通信作者:许旭兵,博士生,主要研究方向为结构健康监测。E-mail:xxb@tongji.edu.cn

声发射技术是近年来迅速发展起来的一种新型 无损检测技术^[56],其原理是利用声发射传感器被动 接收材料损伤产生的弹性波信号;随后,由声发射系 统收集信号,对材料的各种损伤进行客观评估,如裂 缝、蜂窝、锈蚀等^[7-8]。声发射技术具有高灵敏度和 实时检测损伤的能力的优点,使其成为监测钢筋混 凝土结构损伤的有效工具^[9]。

目前,国内外对钢筋混凝土声发射信号相关方 面进行了较多研究:武丹等^[10]用声发射技术分析不 同锈蚀率钢筋混凝土柱轴心受压荷载下的断裂损伤 特性。Kawasaki 等^[11]应用声发射(AE)技术评估了 受钢筋锈蚀影响的试件的抗震能力,并比较了力学 性能和AE参数之间的关系。Abouhussien等^[12]利用 AE技术评估了钢筋混凝土棱柱样品中被锈蚀的钢 筋在拉拔试验下的黏结行为,结果证实了AE累计命 中数和AE信号强度参数与因锈蚀而导致的钢筋与 混凝土之间的黏结退化之间存在着良好的相关性, 其在宏观开裂阶段AE累计命中数和AE信号强度 参数随着钢筋锈蚀程度的升高而下降。 Abdelrahman 等^[13]人建立了 AE 累积能量与钢筋混 凝土梁损坏程度之间的关系,并提出了一个改进的 损伤指数来检测锈蚀梁的屈服点。Li等^[14]通过四点 弯曲试验分析了钢纤维混凝土的声发射行为,采用 声发射事件的平均频率和总事件数等参数来描述断 裂过程和断裂模式。总之,AE参数可以反映不同荷 载下混凝土的特性,混凝土的声发射活动与混凝土 内部缺陷之间有很强的相关性[15-16]。因此,声发射特

征参数可以在微观裂缝水平上监测钢筋混凝土的开 裂和破坏过程。然而,很少有研究通过声发射技术 从微观层面上研究钢筋锈蚀对钢筋混凝土梁的力学 性能和开裂过程的影响,应通过实验和先进的分析 方法对该主题进行足够详细的分析。

本文对4根不同锈蚀程度(0、5%、10%、20%) 的钢筋混凝土梁进行4点弯曲试验,并采用声发射 技术监测锈蚀梁的损伤演化过程。采用通电锈蚀法 对试件进行加速锈蚀,以在较短时间获取所需锈蚀 程度的钢筋混凝土梁。通过试件的锈蚀特征、破坏 形态、力学性能、声发射信号进行综合分析,开展锈 蚀梁的裂缝发展过程、裂缝类型和损伤演化分析。

1 试验方法与过程

1.1 试件设计

试验共浇筑4根的钢筋混凝土梁,梁的长度为 1600mm,横截面尺寸150mm×200mm(宽×高),混凝 土保护层厚度为25mm。梁底部纵向受拉钢筋采用直 径为14mm的HRB400带肋钢筋,总长度1800mm;架 立筋采用直径为8mm的HRB400带肋钢筋,长度为 1800mm;箍筋为双肢箍筋,采用直径为6mm的HPB235 光圆钢筋,间距按80mm布置。在箍筋角部和纵向受 拉钢筋的接触位置涂抹一层环氧树脂,避免纵向受拉 钢筋将电流传导至箍筋使得锈蚀程度不可控。钢筋混 凝土梁的几何尺寸以及配筋情况如图1所示。



Fig.1 Schematic diagram of steel bar arrangement of reinforcement concrete beams (Unit: mm)

1.2 材料性能

试验所用材料中水泥为海螺牌复合硅酸盐42.5 水泥,最大石子粒径不大于30mm,沙子采用中砂, 混凝土内配合比如表1所示。混凝土的材料性能试 验依据现行《普通混凝土拌合物性能试验方法标 准》^[17](GB/T50080-2002)有关规定进行。在浇筑混 凝土构件同时,制作3组尺寸为150mm×150mm× 150mm的立方体试块,按照试验混凝土配合比,在 标准钢膜中对混凝土进行浇筑并振捣密实后放置24 小时,将试块与浇筑完成的混凝土梁同期养护。龄 期为28d时,混凝土的立方体抗压强度标准值为 42.5±3.6MPa。

试验梁的受拉钢筋和架立筋为HRB400级带肋 钢筋,公称直径分别为14mm和8mm。根据现行《金 属材料拉伸试验:室温试验方法》(GB/T228.1-2010)^[18]的有关规定,分别截取5段长度40 cm的 HRB400级钢筋试样进行拉拔试验,钢筋基本性能 试验结果见表2。

表 1 混凝土梁的配合比 Tab.1 Mix proportions of concrete beams

基体强度	水灰比	水泥/ (kg•m ⁻³)	石子/ (kg•m ⁻³)	砂/ (kg•m ⁻³)	水/ (kg•m ⁻³)
C40	0.41	426	1 184	728	148

表 2 钢筋材料性能

Tab.2 Material properties of steel reinforcement

钢筋 等级	直径/ mm	屈服强度fy/ (N•mm ⁻²)	极限强度 f_u /(N•mm ⁻²)	弹性模量E _s / (10 ⁵ N•mm ⁻²)
HRB400	8	408.91	611.34	2.00
HRB400	14	462.15	615.72	2.01

1.3 加速锈蚀试验

采用电化学法对钢筋混凝土梁进行快速通电锈 蚀,试件底部设置一个定制水槽,并填充了5% Nacl 溶液作为锈蚀介质。为保证锈蚀区域含有充足的 Nacl溶液,加速锈蚀前需对试件进行7d的预浸泡。 采用 eTM-305F型可调控稳压直流电源,电源最大 输出电压是30V,最大输出电流是5A。将浸入NaCl 的混凝土受拉钢筋作为电化学反应的阳极和电源正 极连接,混凝土外包裹一层铁丝网,将铁丝网作为阴 极与电源的负极连接,和NaCl溶液共同作用形成电 解池。

为了模拟自然锈蚀,避免在混凝土和钢筋的界 面出现黏结损失,试验中电流密度应当小于200μA• cm⁻²。因此,试验采用了205mA的恒定电流,电流 密度为180μA•cm⁻²。受拉钢筋的理论质量损失可 根据式(1)中的法拉第第二定律来计算,即

$$m_{\rm s} = \frac{MiS_{\rm a}T}{ZF} \tag{1}$$

式中: m_s 为钢筋的锈蚀质量;M为铁原子摩尔质量(56); i为电流密度; S_s 为钢筋面积;T为时间;Z为锈蚀过程 中交换的电子(+2);F为法拉第常数(96 500A·s⁻¹)。

通过设置加速锈蚀试验系统的钢筋截面积、直 流电源大小,可以定量计算出一定通电锈蚀时间内 钢筋锈蚀程度。本研究的目标锈蚀率分别为5%、 10%和20%,相应的锈蚀年龄分别为25、50和100d。 4类不同锈蚀率构件分别编号为C0、C5、C10、C20。

1.4 加载方案及声发射量测

试件通电加速锈蚀后,通过工字钢分配梁采用 四点弯曲加载法进行直接加载,见图 2。集中载荷 是由一个 500kN 的伺服液压驱动器以 1.0 mm•min⁻¹ 的速度施加到测试的 RC 梁上的,并由 MTS 闭环系 统控制。采用线性可变位移传感器(LVDTs)测量 加载过程中试件梁的跨中和两个加载点位置的 挠度。

试验采用美国物理声学公司 SAMOS-48 型声 发射仪来收集加载过程中采集区域内的声发射信 号。每个试件安装4个多谐振 VS45-H型压电传感 器。在确定好传感器位置后,需使用砂纸将试件表 面打磨平整,并且在传感器表面涂抹凡士林以确保 与混凝土表面的耦合接触^[19]。声发射传感器的频率 范围约为10~100 kHz。试验过程中设置了40 dB的 阈值水平,以消除测试中的噪声干扰。在进行声发 射监测试验之前,应进行铅笔断裂试验,以检查传感 器对试样的灵敏度和耦合特性。为减少加载装置带 来的噪音干扰,加载装置与试件的接触面需要放置 刚性垫块以及石棉。



图 2 试验加载装置图 Fig. 2 Diagram of the test loading device.

2 主要试验结果及其分析

2.1 锈蚀特征分析

随着锈蚀产物的累积,混凝土保护层开始开裂, 出现锈胀裂缝。每根梁完成相应的加速锈蚀后,从 锈蚀水槽中取出,清洗干净混凝土表面裂缝处的红 褐色锈蚀产物,并将其放置在自然环境中24h,使混 凝土表面的水分蒸发。每根梁底部和侧面的所有裂 缝都按照裂缝方向描绘在方形网格纸上,每个网格 对应现实中梁的50mm×50mm区域,用裂缝测量仪 测量每条裂缝的最大宽度。纵向裂缝的总体趋势沿 着梁底纵向受拉钢筋的方向。梁底纯弯曲区的裂缝 长度最长,裂缝宽度较大,且裂缝最宽处一般在梁的 跨度位置附近。通过裂缝宽度的统计,C5梁最大裂 缝宽度为0.64 mm,C10梁最大裂缝宽度为1.08 mm,C20梁最大裂缝宽度为1.42 mm,可以发现最 大裂纹宽度随着锈蚀程度的增加而成比例增加。

2.2 弯曲特征分析

图 3为控制梁(C0)和锈蚀梁(C5,C10,和C20) 的荷载一挠度曲线。极限抗弯荷载从控制梁的 125.3 kN降低至锈蚀梁(C5,C10,C20)的119.3、 111.3和102.6 kN。随着钢筋锈蚀率的增加,锈蚀 钢筋混凝土梁的极限弯曲荷载显著降低。所有试件 在靠近钢筋屈服处的挠度都在2.47~5.12 mm之 间。从钢筋混凝土梁的破坏形式可以看出,锈蚀钢 筋会使混凝土表面开裂,降低钢筋与混凝土之间的 黏结力,以及混凝土材料的力学性能,从而降低钢筋 混凝土梁的抗弯强度。



图 4为4点弯曲试验后钢筋混凝土试件的破坏 形式。从试验期间的观察结果来看,控制梁与5%锈 蚀梁的混凝土在两个加载点被压碎,纯弯段出现多条 弯曲裂缝,弯剪区域出现两条剪切裂缝,且裂缝沿对 角线方向向上延伸至加载点。10%锈蚀梁仅在右侧 加载点出现混凝土压碎现象,纯弯段的弯曲裂缝数量 远少于锈蚀程度较低的控制梁与5%锈蚀梁,弯剪区 域仅有一条剪切裂缝。20%锈蚀梁有一加载点附近 出现混凝土压碎现象,但程度较低,且由于锈蚀程度 较高,试件中加载之初便具有较大裂缝宽度的裂缝, 在荷载的作用下,先是侧边混凝土保护层脱落,最终 底部的混凝土保护层剥离导致结构失效。由此可以 推断,钢筋锈蚀导致混凝土内部严重损坏。





3 声发射监测结果及其分析

3.1 声发射振铃计数特征

声发射振铃计数表示单次超过阈值的声发射信 号总数,通常用于评估声发射信号的活性,其容易受 到阈值的影响^[20]。图 5给出了不同锈蚀程度的梁加 载全过程的声发射振铃计数演化曲线。由图可见, 随着试件锈蚀程度的增加,其最终的累计声发射振 铃数也在减少。这是由于随着锈蚀程度的加深,产 生了更多的微观和宏观裂缝,导致锈蚀梁断裂面的 净面积减少,裂缝的发展空间也因此变小。此外,单 个的声发射振铃计数与钢筋锈蚀程度之间没有明显 的变化规律,而是呈现出高于和低于某一数值的波 动。在实际的实验观察中,一旦混凝土产生大的断 裂,声发射振铃数就会出现阶段性的增加。因此,可 以得出结论,较大的声发射振铃数的出现是裂缝扩 展和聚集过程中能量释放的结果,声发射信号和混 凝土损伤之间存在良好的对应关系^[21]。



图 5 试验梁加载全过程的声发射振铃计数演化以及累积声发射振铃计数曲线 Fig. 5 Evolution curves of AE ringing counts and cumulative AE ringing counts during the whole loading process of beams

图 6给出了相对累积振铃计数、荷载与时间的曲 线图,说明了所有测试的 RC 梁的时间和损伤指数之 间的关系,用来分析整个加载过程中试件的损伤演 变。可以看出,所有四条曲线都呈现出上升趋势。如 图 6所示,在相对累积振铃计数一时间曲线上划分为 三个阶段,以表示试件的不同损伤情况。具体来说, A、B、C点是由被试 RC 梁的累计 AE 振铃数种荷载一 挠度的趋势决定的。A 点是 AE 振铃数持续快速增长 的起始点;B 点对应钢筋屈服点;C 点对应试验梁的破 坏点。因此,试验梁的加载过程可以分为三个破坏阶 段:初始损伤阶段(即 A 点之前)、损伤演化阶段(即 M

图 7展示了不同加载阶段的声发射振铃计数和 持续时间的占比。在初始损伤阶段,声发射振铃计数 水平较低。试验梁C0、C5、C10和C20的第1阶段持 续时间分别占整个加载过程的18.5%、11.5%、 12.7%和7.6%,AE振铃数只占整个阶段累计AE振 铃数的18.7%、16.9%、7.9%和3.1%。这表明初始 损伤阶段试验梁内部裂纹活动较弱,损伤较低,且随 着钢筋锈蚀程度的增加,初始损伤阶段的持续时间变 短。就梁CO和轻度锈蚀梁C5而言,在A点附近出现 了较多的AE振铃次数,与首次出现的可见混凝土裂 缝有关。对于中度锈蚀梁C10和重度锈蚀梁C20,由 于混凝土表面已经存在明显的裂缝,可以得出结论混 凝土内部的锈蚀裂缝在荷载作用下逐渐闭合,表现出 较少的AE振铃计数响应和较短的持续时间。

在损伤演化阶段,监测到数量较多的AE振铃计数,表明混凝土裂缝的发展处于活跃状态。在实际 实验观察中,试验梁的宏观裂缝已经出现,并在混凝 土表面延伸,AE振铃计数的响应明显增加,此阶段 试验梁的相对累计声发射振铃计呈线性增长。

在持续损伤增长阶段(从钢筋屈服开始到最终破坏),AE信号增长放缓。值得注意的是,这个阶段的持续时间较长,占总持续时间的68.6%到75.3%。对于未锈蚀梁C0和轻微锈蚀梁C5,第3阶段表现出比第2阶段占比更高的AE振铃数比例;而对于中度锈蚀的梁C10和严重锈蚀的梁C20,第3阶段的AE振铃数比例较第2阶段低。这表明未锈蚀

梁与轻度锈蚀的梁的损伤主要发生在第3阶段,而 锈蚀程度超过10%的严重锈蚀梁的损伤主要集中 在第2阶段。



图 6 试验梁的相对累计振铃计数和荷载随时间的变化特征





图 7 不同加载阶段的声发射振铃计数和持续时间的占比图 Fig 7 The accounting of AE signals and duration at different loading stages.

3.2 声发射b值特征

b值最初由Gutenberg和Richter提出,被用于分析地震产生的地震波,从而量化地震活动^[22]。脆性材料断裂时产生的声发射信号与自然地震活动之间有很大的相似性。因此,b值也可以应用于声发射监

测领域,以评估结构的损伤程度。在AE领域,G-R 公式修改如下^[23]:

$$\log_{10} N = a - b \left(\frac{A_{\rm dB}}{20} \right) \tag{2}$$

式中:A_B是AE信号的振幅;N是振幅大于A_B的

AE信号的数量;a和b是线性拟合参数,其中a是回 归线的截距,b是回归线的斜率,也被称为这些AE 事件的b值。

由于试验过程中声发射的振幅分布不同,需要 考虑每个振幅集的平均值和标准差等统计值。因 此,有人提出了一个改进的b值I_b,并应用于评估边 坡破坏和混凝土断裂过程^[24]。I_b值被定义为

$$I_{b} = \frac{\log_{10} N(\mu - \alpha_{1}\sigma) - \log_{10} N(\mu + \alpha_{2}\sigma)}{(\alpha_{1} + \alpha_{2})\sigma}$$
(3)

式中:µ和σ是最近N个AE信号中振幅分布的平均值

和标准差;通常 α_1 和 α_2 是介于0和1之间的常数,在本 文中,这两个参数的值分别为0和1;N设为200。

*I*_{*i*}值是一个瞬态特征,该值将随着材料开裂过程 中记录的每个新AE信号而更新。当微裂纹(较小的 尺寸和较弱的损伤)开始形成时,可以获得较大的*I*_{*i*} 值。这是因为在微裂纹的开裂过程中,裂纹表面相 互摩擦,尽管声发射事件的数量很大,但声发射信号 的振幅很小。相反,当宏观裂纹(更大范围和更强的 损伤)形成时,可以获得更小的*I*_{*i*}值。

图 8 为加载过程中试件的 I。值曲线及幅值分布



Fig. 8 Variation of I_b values and amplitude of RC beams in AE during failure process.

图。控制梁CO和轻微锈蚀梁C5的I₄值曲线表现出 相似的趋势。在初始损伤阶段,声发射的I₄值较高, 声发射信号的幅值较低,一般在50 dB左右,信号的 产生主要是由材料中的空隙和裂隙等缺陷的压实所 致。在损伤演化阶段,I₄值点相对密集,且基本在一 个相对稳定的范围内波动,表明材料处于一种相对 稳定的损伤扩展阶段;其中每一个I₄值的下降都是 损伤扩展的外在反映,较大尺度的裂缝的生成,期间 伴随有较多高幅值信号生成。在持续损伤阶段,随 着结构破坏的迅速扩大,试件表面出现大量新的裂 缝,裂缝宽度急剧增加。临界斜裂缝上部的混凝土 在剪切压缩作用下被压碎,剪切弯曲段的混凝土发 生剪切压缩破坏。此阶段,控制梁CO的I。值波动较 平缓,而轻度锈蚀梁C5的波动较大,表明锈蚀对钢 筋混凝土内部产生一定影响。

此外,对于梁C10和C20,L值曲线第一阶段呈现较少声发射数据。这是由于钢筋锈蚀的影响,混凝土本身存在内部的混凝土孔洞、微裂缝和明显的锈蚀裂缝。因此,RC梁在加载初期微裂缝向宏观裂缝转化的现象较少,并且RC梁在加载初期并没有出





现微裂缝向宏观裂缝转化的现象,这与L。曲线是一致的。进入损伤演化阶段,L。曲线波动相对剧烈,与控制梁与轻度锈蚀梁一致。然而,持续损伤阶段高幅值声发射信号相较于梁C0与C5明显变少。这表明对于锈蚀程度较高的梁,锈蚀导致混凝土内部严重损坏,其在第三阶段主要为锈蚀裂缝与弯曲裂缝的发展与贯通。

3.3 基于RA/AF的裂纹类型分析

混凝土裂缝大致可分为拉伸裂缝和剪切裂缝, 其声发射参数特征存在明显差异。RA-AF关联分 析已被证明是区分混凝土结构破坏模式的有效方 法^[24]。RA值定义为上升时间与振幅之比,单位为 μs•V⁻¹;AF值定义为振铃计数与持续时间的比率,单 位为kHz;其方程式如式(4)~(5)所示。 (4)

RA = Rise time/Amplitude

AF = Ringing counts/Duration (5)

拉伸裂纹具有较低的RA值和较高的AF值,而 剪切裂纹具有较低的AF值和较高的RA值。此外, 当RA值和AF值之间的比例设置为1~100时,可以 对混凝土试样中的拉伸裂缝和剪切裂缝进行分类。 然而,声发射信号是非线性相对独立的随机数据,区 分裂缝类别的RA与AF的比例并没有一个明确界 定,发展一个更加有效的分类算法对声发射数据进 行数据分析十分重要。

本文采用高斯聚类将试件破坏过程所得的声发

射信号分类成两组明确的群集,以便进一步分析和 理解裂纹的类型及其演化过程。图9为试验梁在不 同损伤阶段RA-AF的散点分布图。

RA值主要集中分布在 0~10 000 ms·V⁻¹范围 散乱分布,平均频率 AF 值主要集中分布在 0~200 kHz,数据主要集中在张拉裂缝区域,剪切裂缝处相 比较张拉裂缝较为稀疏,且声发射信号主要呈现再 损伤演化阶段与持续损伤阶段。

表3为试件不同阶段拉伸裂缝与剪切裂缝的 比例。

	表 3	试件不同阶段拉伸裂缝与剪切裂缝的比例	
Tab.3	The ratio of tensil	le cracks to shear cracks at different stages of the specimen	L

试件	初始损伤阶段		损伤演化阶段		持续损伤阶段	
	拉伸裂缝率/%	剪切裂缝率/%	拉伸裂缝率/%	剪切裂缝率/%	拉伸裂缝率/%	剪切裂缝率/%
C0	82.96	17.04	79.98	20.02	75.03	24.97
C5	82.36	17.64	79.24	20.76	72.48	27.52
C10	85.31	14.69	83.01	16.99	68.35	31.65
C20	85.02	14.98	82.97	17.03	68.38	31.62

可以看出,锈蚀梁和未锈蚀梁在剪切裂纹率随 荷载的变化方面具有相似的变化;在初始损伤阶段, 声发射信号数目远少于其他两阶段,且未锈蚀梁与 锈蚀梁的剪切裂缝所占比例均小于20%,说明裂缝 主要为拉伸裂缝,对应此阶段为微裂缝的发展。在 损伤发展阶段,控制梁表面出现宏观裂纹,剪切裂纹 的比例逐渐增加:控制梁C0、轻微锈蚀梁C5的剪切 裂缝率由初始损伤阶段的17.04%、17.64%逐步上 升到损伤演化阶段的20.02%、20.76%,中度锈蚀 梁 C10 与重度锈蚀梁 C20 分别由 14.69% 与 14.98%上升到16.99%、17.03%。持续损伤阶段, 锈蚀严重的梁 C10 与 C20 的剪切裂缝比例为 31.65%与31.62%,其剪切裂缝率大于控制梁CO 与轻微锈蚀梁C5损伤破坏阶段的剪切裂缝比例,说 明钢筋锈蚀进一步的加剧了剪切裂缝的拓展,这与 梁表面宏观裂纹分布情况相一致。

4 结论

本文利用声发射技术研究了不同腐蚀程度的钢筋混凝土梁在弯曲试验条件下的损伤演化过程。深入进行了声发射振铃计数分析,*b*值分析和RA-AF 关联分析。主要结论总结如下:

(1)钢筋锈蚀会使混凝土表面开裂,降低钢筋与 混凝土之间的黏结力,其极限抗弯荷载从控制梁的 125.3 kN降低至锈蚀梁(C5,C10,C20)的119.3、 111.3和102.6 kN。

(2)I_a值分析结果表明,其曲线的趋势可以反映 控制梁与锈蚀梁的裂纹的形成和扩展,这与实际的 失效过程和模式高度一致。说明声发射I_a值分析可 以预测构件中裂纹的形成时刻。

(3)RA-AF关联分析结果表明,在初始损伤阶段,声发射信号数目远少于其他两阶段,且未锈蚀梁与锈蚀梁的剪切裂缝所占比例均小于20%,说明裂缝主要为拉伸裂缝。随着加载的继续,剪切裂纹的比例逐渐增加。并且在持续损伤阶段,锈蚀严重的梁 C10 与 C20 的剪切裂缝 比例为 31.65% 与 31.62%,其剪切裂缝率大于控制梁 C0 与轻微锈蚀 梁 C5 损伤破坏阶段的剪切裂缝比例。

作者贡献声明:

潘坦博:构思研究方向,设计研究方法,监督研究进展, 撰写和编辑文稿;

郑永来:开展实验调查,设计研究方法,起草原始文稿; 许旭兵:构思研究方向,参与实验; 蓝 鑫:开展实验调查; 周玉珏:文稿的编辑和审阅。

参考文献:

孙俊祖,黄侨,任远.锈蚀疲劳后混凝土中钢筋力学性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2016,48(3):89.
 SUN Junzu, HUANG Qiao, REN Yuan. Mechanical properties test of steel reinforcement in concrete after corrosion

fatigue [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(3): 89.

- [2] YADETA K F, SIRIWARDANE S C, MOHAMMED T A. Service life prediction of reinforced concrete structures subjected to corrosion: a comparative study [J]. International Journal of Structural Integrity, 2023, 14(3):480.
- [3] HWANG W, ANN KY. Determination of rust formation to cracking at the steel-concrete interface by corrosion of steel in concrete [J]. Construction and Building Materials, 2023, 367:107.
- [4] AHMAD S. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review [J]. Cement Concrete Composites, 2003, 25(4): 459.
- [5] NOORSIHADA M N. An overview on fatigue damage assessment of reinforced concrete structures with the aid of acoustic emission technique [J]. Construction and Building Materials. 2016,112:424.
- [6] RATHERL A I, MIRGAL P, BANERJEE S, et al. Application of Acoustic Emission as Damage Assessment Technique for Performance Evaluation of Concrete Structures: A Review [J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction. 2023, 28(3): 73.
- [7] PAN T B, ZHENG Y L, ZHOU Y B, et al. Damage pattern recognition for corroded beams strengthened by CFRP anchorage system based on acoustic emission techniques [J]. Construction and Building Materials. 2023, 406: 83.
- [8] MA G, LI H. Acoustic emission monitoring and damage assessment of FRP-strengthened reinforced concrete columns under cyclic loading [J]. Construction and Building Materials. 2017, 144:86.
- [9] ZHAI C, XU JZ, LIU SM, et al. Fracturing mechanism of coal-like rock specimens under the effect of non-explosive expansion [J]. International Journal of Rock Mechanics And Mining Sciences, 2018, 103:145.
- [10] 武丹,金贤玉,付传清,等.锈蚀钢筋混凝土柱荷载损伤的声发射b值研究[J]. 混凝土, 2016 (12):5.
 WU Dan, JIN Xianyu, FU Chuanqing, *et al.* Study on acoustic emission b-value of load damage in corroded reinforced concrete columns [J]. Concrete, 2016 (12):5.
- [11] KAWASAKI Y, WASADA S, OKAMOTO T, et al. Evaluation for RC specimen damaged from rebar corrosion by acoustic emission technique [J]. Construction and Building Materials, 2014, 67: 157.
- [12] ABOUHUSSIEN A A, HASSAN A A A. Acoustic emissionbased analysis of bond behavior of corroded reinforcement in existing concrete structures [J]. Structural Control & Health Monitoring, 2017, 24(3): 1893.
- [13] ABDELRAHMAN M, ELBATANOUNY M K, ZIEHL P H. Acoustic emission based damage assessment method for prestressed concrete structures: Modified index of damage [J].

Engineering Structures, 2014, 60: 258.

- [14] LI B A, XU L H, SHI Y C, *et al.* Effects of fiber type, volume fraction and aspect ratio on the flexural and acoustic emission behaviors of steel fiber reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 181: 474.
- [15] TAM N T, RANAIVOMANANA N, BALAYSSAC J P. Characterization of damage in concrete beams under bending with Acoustic Emission Technique (AET) [J]. Construction and Building Materials, 2018, 187: 487.
- [16] ABOUHUSSIEN A A, HASSAN A A A, ABDELALEEM B H. Acoustic emission analysis of self-consolidating rubberized concrete beam-column connections under cyclic loading [J]. ACI Structural Journal. 2019, 116(6):41.
- [17] 中国建筑科学研究院,清华大学,同济大学,等.普通混凝土 力学性能试验方法标准[S].北京:国家质检总局,2003.
 China Academy of Building Research, Tsinghua University, Tongji University, *et al.* Standard of test methods for mechanical properties of ordinary concrete [S]. Beijing: AQSIQ, 2003.
- [18] 高怡斐,梁新帮,邓星临.〈金属材料拉伸试验第1部分:室温 试验方法〉实施指南[J].品牌与标准化,2014,18:95.
 GAO Yifei, LIANG Xinbang, DENG Xinlin. Implementation guideline for tensile testing of metallic materials part 1: room temperature test methods [J]. Branding and Standardization, 2014, 18: 95.
- [19] ZHENG Y L, ZHOU Y J, ZHOU Y B, et al. Localized corrosion induced damage monitoring of large-scale RC piles using acoustic emission technique in the marine environment [J]. Construction and Building Materials, 2020, 243: 118270.
- [20] ZHA E, ZHANG R, ZHANG Z T, et al. Acoustic emission characteristics and damage evolution of rock under different loading modes [J]. Energies, 2020, 13(14):1
- [21] 纪洪广,裴广文,单晓云.混凝土材料声发射技术研究综述[J]. 应用声学,2002(4):1.
 JI Hongguang, PEI Guangwen, SHAN Xiaoyun. A review on acoustic emission technology of concrete materials[J]. Applied Acoustics,2002(4):1.
- [22] SAGAR R V, RAO M V M S. An experimental study on loading rate effect on acoustic emission based b-values related to reinforced concrete fracture [J]. Construction and Building Materials, 2014, 70: 460.
- [23] JUNG D, YU W R, AHN H, et al. New b-value parameter for quantitatively monitoring the structural health of carbon fiber-reinforced composites [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 165:108328.
- [24] LI S L, ZHANG L G, GUO P, et al. Characteristic analysis of acoustic emission monitoring parameters for crack propagation in UHPC-NC composite beam under bending test [J]. Construction and Building Materials, 2021, 278: 122401.