

基于声发射技术的装配式混凝土建筑结构裂缝检测方法

顾俊
江苏信息职业技术学院，江苏 无锡 214153

摘要：在装配式混凝土建筑快速发展的背景下，裂缝监测成为保障结构安全和耐久性的重要手段。声发射（AE）技术作为一种有效的无损检测工具，因其实时、动态、灵敏的特点，日益受到关注。本研究将结合装配式混凝土结构的特性，探索基于声发射技术的裂缝检测方法，并依托对装配式结构裂缝特征和 AE 参数的分析，提出一种适用于现场监测的检测方法。

关键词：声发射技术；装配式混凝土；裂缝检测；实时监测；损伤识别

Crack Detection Method of Assembled Concrete Building Structure Based on Acoustic Emission Technology

Gu,Jun
Jiangsu Vocational College Of Information Technology, Wuxi, Jiangsu, 214153, China

Abstract: With the rapid development of prefabricated concrete buildings, crack monitoring has become an important means to ensure the safety and durability of structures. Acoustic emission (AE) technology, as an effective nondestructive testing tool, has attracted increasing attention due to its real-time, dynamic and sensitive characteristics. In this study, the crack detection method based on acoustic emission technology will be explored by combining the characteristics of assembled concrete structure, and a detection method suitable for on-site monitoring will be put forward by analyzing the crack characteristics and AE parameters of assembled concrete structure.

Keywords: Acoustic emission technology; Assembled concrete; Crack detection; Real-time monitoring; Damage identification

DOI: 10.62639/sspis14.20240104

随着建筑行业向装配式方向发展，混凝土建筑的结构连接性和裂缝控制问题愈发引人关注。装配式混凝土结构在运输、安装和运营中易受到多种因素影响，产生结构裂缝^[1]。裂缝的存在不仅影响结构美观和耐久性，还可能降低其整体承载能力。因此，如何高效、精确地检测和监测裂缝，成为维护装配式混凝土建筑安全的关键。声发射技术作为一种被广泛应用于金属、复合材料的无损检测方法，可以检测到材料内部释放的应力波，实时、动态地反映裂缝发展过程。在装配式混凝土建筑中应用声发射技术，对裂缝的扩展情况进行实时监测，能够为施工、维护和安全评估提供数据支持。

一、声发射技术的概述

声发射技术主要依靠捕捉材料在受载或受损时释放的声发射波，监测裂缝的产生与扩展。混凝土中的微观裂缝在荷载作用下产生并释放应变能，形成声发射信号。声发射技术的优势在于其灵敏度较高，能够在结构未出现宏观裂缝之前捕捉到微小的裂缝信号^[2]。此外，AE 传感器布置简单，能进行非接触式检测，适用于装配式结构现场应用。在装配式混凝土建筑中，节点连接处和构件边缘等是裂缝高发区域。使用声发射技术可以实时监测这些关键部位，预警潜在的裂缝发

展，减少安全隐患。

二、裂缝检测方法设计

（一）声发射设备及参数设置

在装配式混凝土建筑结构的裂缝检测中，声发射设备的设计和参数设置直接影响检测的准确性和信号的可靠性。声发射系统主要由传感器、前置放大器和信号采集仪组成。这些组件协同工作，实时捕捉、放大和处理混凝土结构中裂缝扩展所产生的声发射信号。以下将从设备选择、技术参数、AE 信号的特征提取及优化等方面，详细探讨设备及参数的设计。

1. 传感器的频率范围选择

传感器是声发射系统中的核心部件，其频率响应范围需与裂缝扩展过程中产生的声波特征相匹配。基于现有的研究，混凝土裂缝扩展通常会在 60~400kHz 范围内产生明显的声发射信号^[3]。因此，适宜选择频率响应在此范围内的传感器，可捕获更有效的裂缝信号。具体而言：

频率响应选择：传感器的频率响应范围为 60~400kHz。这一频率段能够覆盖混凝土裂缝从微裂缝到宏观裂缝的声波特征。

灵敏度：传感器的灵敏度选择需符合声发射信号的微小特征。推荐灵敏度为 40~60 dB，这样即便是初始微裂缝，也能在背景噪声中准确识别。

（稿件编号：IS-24-4-1015）

作者简介：顾俊（1980-11），男，民族：汉，籍贯：江苏省无锡市，硕士研究生，副教授，研究方向：地质工程，建筑智能化工程，建筑新材料。

布置位置: 根据结构的应力集中区域布置传感器, 例如关键节点、连接部位等。合理布置传感器有助于获取更多的有效信号, 提高信号的空间分辨率。

2. 前置放大器的增益设置

在声发射过程中, 微裂缝的信号强度较弱, 因此信号需要被放大以便后续的数字化处理。应关注前置放大器的增益选择, 在保证信号质量的前提下适度放大, 以免引入过多的噪声。具体参数建议为:

增益设置: 根据实验环境选择 20 dB、40 dB 或 60 dB 的增益设置。在混凝土结构的检测中, 40 dB 增益是较为常见的选择, 既能放大微弱信号又能有效抑制低频噪声。

前置放大器布置: 为了减少信号损耗, 应尽量将放大器置于靠近传感器的位置, 减少电缆带来的信号衰减和噪声干扰。

3. 信号采集仪的阈值与采样频率

信号采集仪是系统中将模拟信号转化为数字信号的设备, 其阈值和采样频率直接影响数据的真实性与精确性。在裂缝监测中, 合适的阈值能够有效过滤背景噪声, 而采样频率则决定了信号细节的捕捉能力^[4]。

阈值设定: 阈值 (Threshold) 是决定是否记录信号的关键参数。阈值应设定在噪声水平的 2-3 倍以上, 以有效过滤环境噪声。假设现场环境噪声为 20 dB, 则可将阈值设为 40 dB。

采样频率: 采样频率的选择需至少是信号最高频率的两倍以上 (奈奎斯特采样定理)。考虑到 60400kHz 的信号频段, 推荐采样频率设定在 12 MHz 范围内。采样频率较高时, 能够获取更细致的信号波形数据, 提高后续分析的精度。

4. AE 信号特征参数的设置与应用

在混凝土裂缝扩展过程中, 不同的声发射特征参数能够表征裂缝的不同发展阶段。因此, 必须对声发射信号的参数化进行分析, 常见的 AE 参数包括撞击计数、能量计数、持续时间、事件频率等^[5]。

(1) 撞击计数 (Hit Count): 撞击计数用于描述声发射事件的发生频率。撞击计数的增加通常反映裂缝的初始产生过程, 尤其在微裂缝阶段最为明显。

(2) 能量计数 (Energy Count): 能量计数能够表征声发射事件的强度, 主要用于评估裂缝扩展的程度。在实际操作中, 较高的能量值通常意味着裂缝的进一步扩展或新裂缝的产生。能量值的计算公式可表示为: $E = \sum_{i=1}^n A_i^2$

其中, A_i 为信号振幅, n 为采样点数。能量计数可用于区分微裂缝 (低能量值) 和宏观裂缝 (高能量值)。

(3) 持续时间 (Duration): 持续时间是指每次声发射事件的持续时间, 通常与裂缝的大小和扩展速度相关。较长的持续时间通常意味着裂缝的快速扩展。

(4) 事件频率 (Event Frequency): 事件频率是单位时间内检测到的声发射事件数, 能够反

映裂缝的活跃程度。较高的事件频率意味着裂缝处于活跃状态, 可视为结构即将进入更严重损伤阶段的预警指标。

5. 数据存储与分析

在现场裂缝检测中, 信号采集系统需具备高效的数据存储和分析能力。推荐采用实时波形存储方式, 完整地记录下每个声发射事件的原始波形数据, 以便后续深入分析。

存储方式: 选择波形存储与参数存储结合的方式。对每个关键事件, 存储完整的波形数据, 而对于一般事件则存储参数即可。

数据分析: 基于 AE 信号特征参数, 结合事件频率和能量变化趋势, 依靠设置累积能量和撞击计数阈值, 判断裂缝的扩展程度。使用历史指数 (Historical Index, HI) 和严重程度指数 (Severity Index, SI) 等参数能够更全面地进行损伤评估。

(二) 传感器布置与监测点选择

在装配式混凝土建筑结构中, 由于不同部位的受力特性各异, 传感器布置的合理性直接关系到裂缝检测的准确性和效率。节点和边缘等应力集中区域往往是裂缝的高发部位, 因此需精确布置传感器, 形成合理的监测网络。以下将从布置原则、传感器间距、布置密度等方面详细论述传感器的布置方案, 并逐步剖析如何优化监测点选择以实现对裂缝的早期预警。

1. 布置原则与目标部位的确定

传感器布置的首要原则是使应力集中的关键区域得到充分监测。装配式混凝土结构的特点在于其由预制构件拼装而成, 这些连接部位通常是结构承载力的薄弱环节, 因此在连接节点、边缘以及应力集中区域布置传感器可以提高检测的敏感性。

关键区域布置: 在装配式结构的节点和连接处, 因应力集中易引发裂缝。建议在这些部位布置密集的传感器, 如在连接螺栓周围、预制板连接处、梁柱节点等位置, 每个节点布置 2-3 个传感器, 全方位监测裂缝动态。

边缘区域布置: 边缘区域 (如梁的边缘、板的外缘) 因受弯和剪切作用较大, 也是裂缝易发区域。在此处布置传感器可以检测因弯曲或剪切引起的裂缝, 建议每隔 0.5~1.0 米布置一个传感器。

2. 传感器间距与覆盖密度

传感器间距决定了监测网络的覆盖密度, 合理的传感器间距应在捕捉裂缝产生的初期信号与保持成本效益之间取得平衡。一般而言, 传感器间距应控制在裂缝产生源能够覆盖的最小范围内, 使信号能够被相邻传感器及时检测到。

传感器间距计算: 可利用声波在混凝土中的传播速度 (约 3500-4500 m/s) 结合结构的应力分布特性计算传感器的间距。假设声发射信号的有效传播距离为 1.5 米, 建议在节点区域的传感器间距设定在 1.5 米以下, 使裂缝信号能够被相邻传感器捕获。

布置密度: 在应力较小的区域, 例如板的中部或梁的中段, 可以适当减少传感器布置密度, 但间距应不大于 3 米, 以保证整体结构监测的均

匀性。

3. 多层次监测网络的构建

在装配式混凝土结构的不同部位, 可以根据结构的应力特征设计多层次级的监测网络, 实现对裂缝产生和扩展的分层级监控。以下是两种主要监测层级的布置策略:

(1) 一级监测(高密度): 主要针对结构关键连接节点区域及应力集中区域, 如梁柱连接、板与板的拼接处。每个关键节点布置至少 2 个传感器, 一方面增加信号覆盖范围, 另一方面可以借助多点数据交叉验证提高信号的可靠性。

(2) 二级监测(中密度): 针对结构中应力相对较低、但存在潜在裂缝风险的区域, 如梁的中段或板的中心区域。二级监测的传感器间距可适当放大至 2~3 米, 形成覆盖全结构的次密集监测网络, 既能补充一级监测的盲区, 也能对整体结构健康提供数据支持。

4. 传感器的安装方式与数据传输优化

传感器的安装对信号的准确性具有重要影响, 应结合结构特点选用合适的安装方法, 以提高信号传递效率和稳定性。此外, 信号传输的优化可以有效减少数据损耗。

传感器安装: 可采用环氧树脂粘贴的方式将传感器固定在结构表面, 为避免信号被外部噪声干扰, 安装前需对结构表面进行打磨清洁, 使传感器与混凝土表面接触紧密。

信号传输与布线: 传感器经同轴电缆连接至数据采集系统, 布线时应避免长距离传输, 尽量减少信号衰减。建议在信号传输距离较长时使用放大器, 提高信号的强度和清晰度。

5. 裂缝早期预警的布置策略与判定标准

在传感器布置过程中, 需考虑到裂缝的早期预警机制, 即实时监测关键区域的 AE 参数, 以便在裂缝扩展之前发出预警信号。

监测参数选择: 可以将撞击计数和能量计数作为裂缝早期预警的核心参数。当监测到较高撞击计数或能量计数值持续上升时, 应将该信号标记为预警信号, 提示潜在的裂缝产生。

阈值设置: 依据结构应力分布特性和历史数据, 设定合理的报警阈值。例如, 在连接节点区域, 一旦某传感器的撞击计数连续超过 100 次/分钟, 或能量计数值明显上升, 则触发预警, 提示该节点可能有裂缝产生风险。

6. 数据校准与传感器精度维护

为增强监测数据的准确性和一致性, 需定期对传感器进行校准, 特别是在长期监测环境中, 更要做好传感器精度的定期维护工作。

数据校准: 可在传感器布置初期和每季度定期进行数据校准, 在已知裂缝位置产生标准声发射信号, 以此确认各传感器的响应灵敏度。采用信号模拟器发出标准信号, 测定传感器的响应频率和能量计数, 保持在正常范围内。

传感器维护: 根据环境条件(如温度、湿度等), 进行传感器定期检查与维护。如在潮湿环境中, 建议每 6 个月检查传感器密封性, 以防止信号劣化。

三、基于 AE 信号的裂缝特征分析

(一) 单调荷载和疲劳荷载下的裂缝行为

混凝土结构在单调荷载和疲劳荷载作用下的裂缝行为有显著差异。在单调荷载的作用下, 裂缝的生成和扩展呈现出逐步积累的过程, 裂缝随着荷载增加而逐渐增大, 这一过程通常可以利用 AE(声发射)参数的突增变化来捕捉和识别。而在疲劳荷载条件下, 由于长期的循环荷载作用, 裂缝的萌生、闭合和摩擦行为频繁出现, 因此其 AE 信号表现为较低强度的信号波动。然而, 当裂缝扩展至接近结构失效的阶段时, AE 信号的强度会突然增大, 提示裂缝扩展已达到失效临界点。

在装配式混凝土结构中, 由于构件经常受到动态荷载和环境侵蚀的影响, 疲劳裂缝现象较为普遍。分析疲劳荷载下的 AE 信号强度变化, 可以有效地识别裂缝的发展阶段。这种强度分析能够提供裂缝扩展的预警依据, 帮助判断结构健康状况, 从而提前采取相应的防护措施, 避免结构失效。

(二) AE 信号参数的分级判定

在裂缝发展过程中, 不同的 AE 信号参数有助于识别裂缝所处的阶段。根据 AE 参数变化趋势的分析结果, 可将裂缝划分为微裂缝、裂缝扩展和裂缝失效三个发展阶段。在裂缝扩展阶段, AE 信号的能量和振幅明显增大, 信号频率也随之增多, 这表明裂缝活动进入了更活跃的状态。而在裂缝失效阶段, AE 信号的强度达到峰值, 能量急剧上升, 这通常是裂缝即将贯通的标志。

实时监测 AE 信号参数的变化趋势, 可以对裂缝发展进行分阶段的判定, 有助于在现场实现风险控制。在设定不同阶段的阈值后, 监测系统能够发出预警信号, 指导工程人员及时采取加固或维护措施, 从而在裂缝失效之前控制风险。

四、结语

声发射技术在装配式混凝土建筑裂缝检测中的应用具有显著优势, 尤其在实时、动态监测方面, 能够为结构的健康监测提供及时、有效的数据支撑。对 AE 信号实施分级判定, 并合理步骤传感器, 可以清晰地展示裂缝扩展过程, 为裂缝控制和结构养护提供科学依据。未来, 结合人工智能和大数据分析, 声发射技术有望进一步提高装配式混凝土建筑的裂缝检测效率和智能化水平。

参考文献:

- [1] 方振民. 基于超声波和声发射技术的套筒灌浆缺陷主被动检测研究 [D]. 桂林理工大学, 2023.
- [2] 李晓壮. 基于声发射技术的预制箱梁吊装阶段开裂分析 [D]. 北京交通大学, 2020.
- [3] 孙威, 阎石, 蒙彦宇, 吴建新. 基于压电波动法的混凝土裂缝损伤主被动监测对比试验 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28 (02): 193-199.
- [4] 陈宸. 预制装配式混凝土结构连接界面钢筋承剪性能试验研究 [D]. 北方工业大学, 2017.
- [5] 汪兴源. 基于声发射的装配式梁桥铰缝剪应力分布检测技术研究 [D]. 重庆交通大学, 2020.