

声发射测试方法及其用于水泥基材料劣化过程的评估

苏怀智, 姚可夫, 杨立夫, 闫潇群

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 河海大学水利水电学院, 南京 210098)

摘 要: 中国修建于 20 世纪的大批基础设施工程正逐渐达到高龄服役期, 随之带来了较突出的水泥基材料劣化问题。声发射作为一种材料在能量释放下所表现出的本征物理现象, 其蕴含的丰富信息为精敏感知材料及结构性态提供了有益基础。在简要阐述声发射感测基本原理与主要分析方法的基础上, 重点围绕水泥基材料的碱骨料反应、锈胀开裂、疲劳、冻融剥落等劣化行为, 评述了基于声发射现象进行水泥基材料劣化行为表征、性态判识评估、劣化致因剖析方面的研究现状, 考虑水工大尺度结构时变服役特征, 给出了声发射在水泥基材料劣化研究方面今后需着力加强的方向。

关键词: 水泥基材料; 劣化; 表征; 评估; 声发射

中图分类号: TV43 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)11-2971-10

网络出版时间: 2022-10-08



Application of Acoustic Emission Method for Evaluation of Cement-Based Materials Degradation: A Short Review

SU Huaizhi, YAO Kefu, YANG Lifu, YAN Xiaoqun

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,

College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Degradation of cement-based materials with the infrastructure engineering constructed in 20 th century for the end of service-life is increasingly concerned. Acoustic emission (AE) as an intrinsic physical phenomenon of energy emission happening inside material or structure can effectively support a precise sensation of health of material and structure based on its spatiotemporal information. This review briefly introduced the sensing principle and analysis method of AE and summarized the supports from AE to description of degradation process, influence factors, and cement-based material degradation such as alkali aggregate reaction, corrosion induced cracking, fatigue damage, and freeze-thaw spalling. In addition, the potential aspects to enrich AE research on the degradation of cement-based materials were also discussed *via* considering the time-dependent and large-scale feature of hydraulic structure.

Keywords: cement-based materials; degradation; characterization; evaluation; acoustic emission

水泥基材料劣化涉及力学性能降低、损伤累积、耐久性减弱、变形加大、渗漏加剧、开裂增多等, 是工程服役风险的主要来源^[1-3]。目前, 在国家水网的近 10 万座水库和 30 余万公里江河堤防中, 有相当一部分进入高龄服役期的大坝、面板、隧洞、帷幕等水泥基材料构件或结构发生了不同程度的冻融剥落、碱骨料反应、锈胀开裂等劣化现象, 逐渐成

为工程稳定安全运行的潜在隐患^[4-6]。因此, 精细掌握材料与结构在劣化过程中的性态变化, 精准定位工程隐患病变, 对于保障工程安全, 节约国家资源有着重要意义。

从早期的裂缝计、应变计、回弹仪, 到探地雷达、压电陶瓷、分布式光纤, 再到近年来的无人机、水下机器人、红外热成像, 应用于涉水建筑物安全

收稿日期: 2022-04-22。 修订日期: 2022-04-28。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979093); 国家重点研发计划课题(2019YFC1510801; 2018YFC0407101)。

第一作者: 苏怀智(1973—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2022-04-22. Revised date: 2022-04-28.

First author: SU Huaizhi (1973—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: su_huaizhi@hhu.edu.cn

评估的主被动分析技术在不断更新, 感测范围也呈现出点–线–面的发展趋势。值得注意的是, 上述方法主要围绕材料的力学、热力学和唯象学特征展开, 侧重于实现材料劣化行为感知或者材料损伤定位的单一需求^[7]。

近年来, 材料的主动声学特征, 即材料在外部扰动、微裂纹萌生与扩展、塑性变形、耐久性降低等过程中, 局部应变能快速释放并以弹性波形式传播的声发射现象, 在铁路^[8]、土木^[9]、航空^[10]等领域得到广泛关注。声发射通常受到材料性质、服役环境、传播路径等因素的影响, 所反映出的声发射信号亦包含不同形式的信息, 如到时信息可推演声发射源空间位置^[11]; 波形信息可表征断裂类型^[12]; 幅值信息可描述损伤状态^[13]等。

鉴于声发射信息丰富, 解译用途多样的优势, 在混凝土、砂浆、桥梁等材料或结构性态的研究中, 试验或现场的声发射历史常被作为重要参考依据。已有多位学者对该方面的声发射研究进行了回顾总结, 总体上侧重于梳理声发射数据的分析处理方法^[9, 14]; 材料断裂的声发射特征^[15–16]; 结构健康监

测中的声发射应用^[17–19], 然而对于水泥基材料在冻融、碱骨料反应、疲劳等长期劣化行为下的声发射研究及应用的关注则较为欠缺。该方向研究的必要性在于, 一方面, 材料劣化的持续时间、环境与劣化机制复杂程度、声发射数据量均高于常规断裂试验, 这既是对现有声发射分析方法与设备的全面检验, 也是对水泥基材料声发射基础特性研究的综合应用; 另一方面, 结构失效多是一个涉及环境变化、材料劣化、性能退化的长期累积渐进过程, 因此长期复杂环境下材料劣化行为声发射研究的可行性与基本规律, 将是声发射长期应用于结构健康监测的重要基础。

本工作着眼于声发射在水工大尺度结构健康评估中的长期高效应用, 通过较为全面梳理复杂环境下水泥基材料的声发射特性, 剖析该发展道路上的主要障碍。主要包括: 声发射现象基本感测原理与主要分析方法; 声发射在图 1 所示水泥基材料劣化行为表征、性态判识评估、劣化致因剖析方面的研究进展; 声发射应用于水工结构的主要障碍与未来潜在的发展趋势。

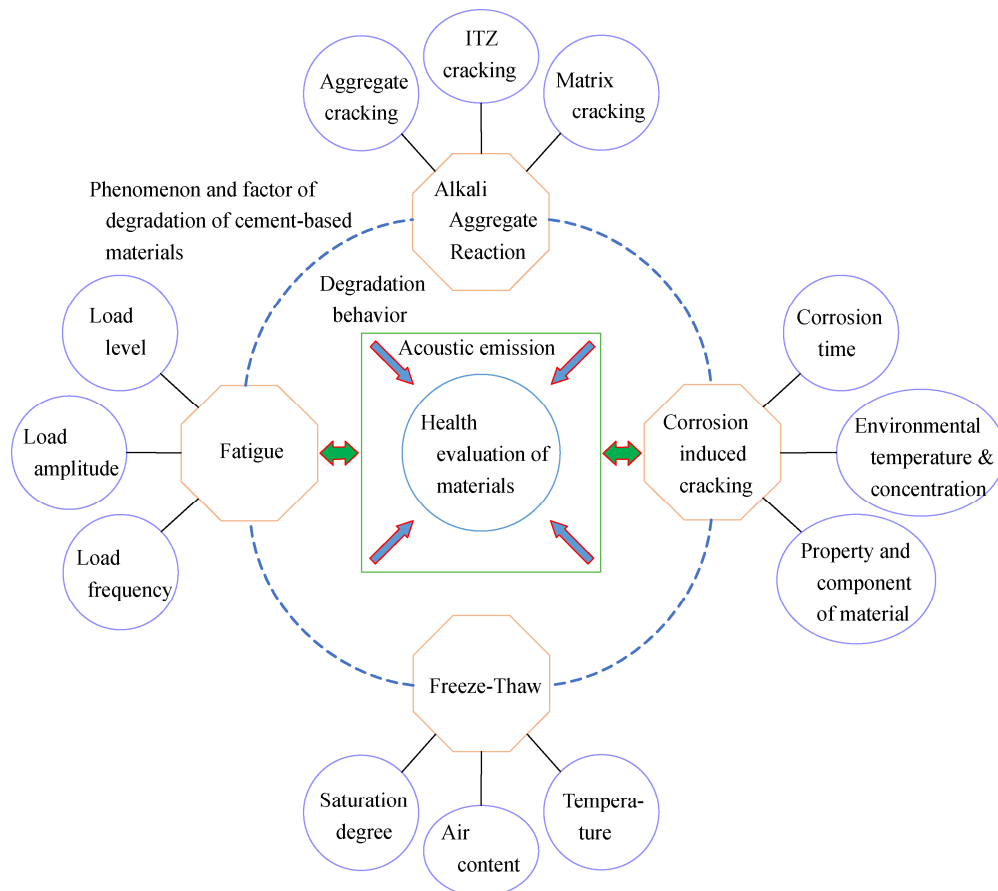


图 1 基于声发射的水泥基材料劣化评估

Fig. 1 Acoustic emission (AE)-aided evaluation for cement-based materials

1 声发射

1.1 感测原理

声发射可被视为一场发生在材料基体上的微型地震^[20]。如图 2 所示,材料基体受到荷载作用会产生一定的弹性变形,并伴随应变能在基体内的累积;当荷载持续增大,材料内累积的能量进一步增加,并最终达到储能上限时,材料发生塑性屈服或开裂,部分所储能量以热或声的形式被释放。其中,以声形式释放的能量将通过弹性波在基体介质内传播,引起基体发生微震动,此即声发射现象。进一步地,在传感器与被监测对象间具有良好耦合或波导设置的前提下,根据式(1)所示压电转换本构关系,传播至材料表面或内部的弹性波会使传感器中的压敏介质产生直接压电效应,发出微弱的电响应时间序列信号,信号经前端放大器放大后,传输至采控主机进行滤波和存储,此即声发射感测过程中关键的感

知-转换-传输-采控链路。

$$\begin{cases} T_{\lambda} = c_{\lambda\mu}^E S_{\mu} - e_{j\lambda} E_j \\ D_i = \epsilon_{ij}^S E_j + e_{i\mu} S_{\mu} \end{cases} \quad (1)$$

式中: i, j, λ, μ 表示方向变量; T_{λ} 为弹性波产生的微应力; S_{μ} 为应变; D_i 和 E_j 分别为电位移和电场强度; $c_{\lambda\mu}^E$ 为弹性刚度常数; ϵ_{ij}^S 为介电常数; $e_{j\lambda}$ 与 $e_{i\mu}$ 为压电应力系数。

1.2 分析方法

采集到的原始声发射信号通常具有较强的背景噪声,需对其进行降噪预处理以提高信号质量,常用的信号降噪方法有小波分析、经验模态分解、Kalman 滤波等。根据研究目标的不同,声发射信号降噪后又可进行不同形式的解译,图 3 梳理了当前主要的解译分析方法,其中参数分析方法的各类参数多基于信号波形建立,本质上是对信号波形及变化趋势的一种简化定量描述。

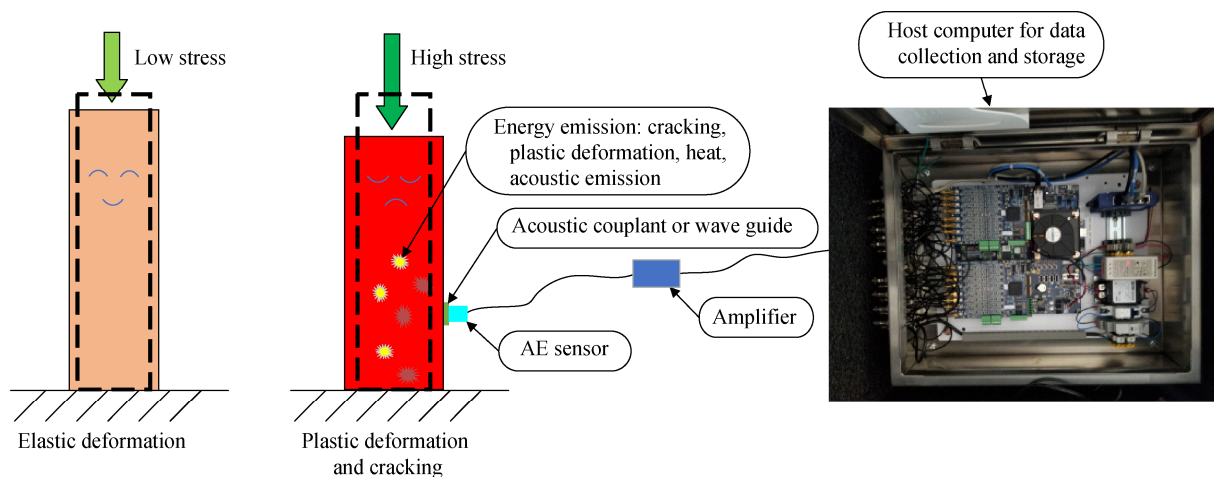


图 2 声发射感测示意图

Fig. 2 Schematic of sensing AE

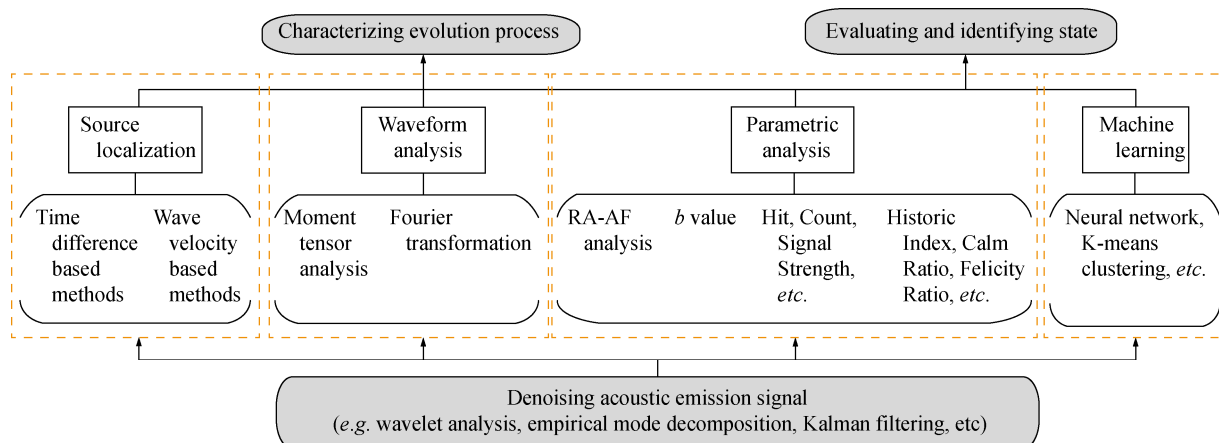


图 3 声发射信息主要解译分析方法

Fig. 3 Analysis methods for AE information

2 材料劣化行为的声发射表征

结合碱骨料反应、锈胀开裂、疲劳、冻融剥落等水泥基材料具体劣化行为, 梳理讨论声发射在表征材料劣化进程方面的有效支撑。

2.1 碱骨料反应

碱骨料反应是一种碱活性骨料与碱性孔隙液发生化学反应, 致使水泥基材料膨胀开裂的长期劣化现象, 根据反应物和生成物的不同, 碱骨料反应可细分为碱硅酸反应和碱碳酸盐反应^[21–23]。目前声发射在碱骨料反应评估中的应用主要集中在碱硅酸反应, 以文献[24–28]为代表的研究显示, 试件在膨胀变形过程中会产生长期持续且局部密集的声发射活动。以图 4 所示声发射累积信号强度与混凝土膨胀率的时序变化为例, 伴随碱骨料反应持续的膨胀变形, 混凝土的声发射累积信号强度总体上呈现出长期增长趋势, 且混凝土中骨料、界面过渡区、水泥浆基体的开裂、滑动、变形等能量释放行为均可引起声发射累积信号强度的增长。此外, 前期累积信号强度增长速率较大, 表明碱骨料反应较为剧烈, 材料细观结构的调整变化较为密集; 后期累积速率减小, 表明反应活跃程度降低, 材料劣化进程减缓。上述现象与通过宏观膨胀率描述的碱骨料反应在潜伏期后先快后慢的发展规律相一致, 证明了声发射在精敏表征水泥基材料碱骨料反应劣化方面的有效性。

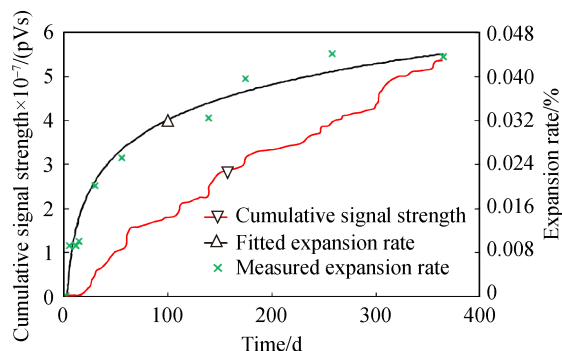


图 4 声发射累积信号强度和试件膨胀率的时序变化^[28]

Fig. 4 AE cumulative signal strength and expansion rate^[28]

2.2 锈胀开裂

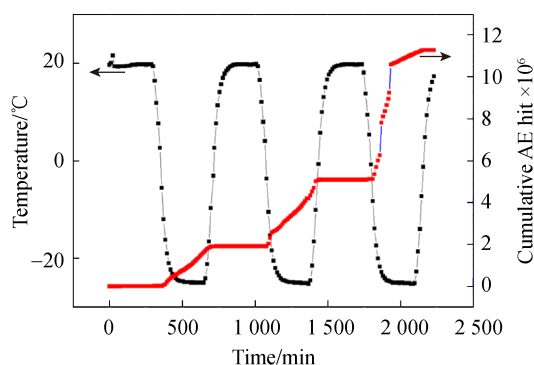
钢筋混凝土的锈胀开裂一般分为 2 个阶段, 第 1 阶段为氯离子、水、氧气通过连通孔隙进入材料内部, 并富集到钢筋表面, 当钢筋表面的氯离子浓度达到锈蚀阈值时, 钢筋表面钝化膜破裂并产生锈蚀产物; 第 2 阶段, 锈蚀产物填充孔隙阻碍水和氧气进入, 从而厌氧锈蚀开始并持续产生大量锈蚀产物, 锈蚀产物吸水膨胀引起混凝土开裂破坏。在锈

胀开裂过程中, 钢筋锈蚀产生的声发射撞击以较为稳定速率累积, 而半电池电位在 28 d 前无明显变化, 后期随着材料基体微开裂活动增多, 声发射撞击有所加快^[29]。结合文献[30]研究可知, 钢筋钝化膜破裂产生的声发射信号峰值频率为 100~150 kHz, 钢筋点蚀的峰值频率为 20~70 kHz。与极化电阻、质量损失、应变、电流等常规锈蚀评估指标相比, 声发射参变量对钢筋-混凝土结合面的劣化更为敏感^[31–34]。由此可知声发射现象不仅能精敏表征材料劣化进程, 而且因源而异。

2.3 疲劳与冻融

水泥基材料的疲劳劣化涉及内外因素在多个物理尺度下的共同作用, 纳观尺度分子的无序热运动推动了材料微颗粒间的随机断裂和愈合, 而外部荷载引起的势能差则决定了微颗粒间被破坏的速度^[36]。尽管轴拉、轴压、弯曲等循环施荷方案有所不同, 但水泥基材料疲劳劣化过程中的力学性能和声发射活动仍表现出一定共性^[37–43]。循环加载下, 随着应力幅值和加载频率的增大, 材料的刚度和弹性模量逐步下降, 声发射活动亦随之增多, 且试件失效前会出现力学性能和声发射活动变幅增大的现象, 有效捕捉了材料的失效前兆。另一方面, 不同类型的水泥基材料, 在上述疲劳行为演化的共性基础上, 亦存在一定的差异, 如 Kaiser 效应不适用于沥青混凝土的疲劳劣化^[42]; 随试件尺寸增大, 声发射撞击与能量相应增大^[44]; 相较于普通混凝土, 橡胶混凝土疲劳劣化过程中的声发射信号数量、能量、幅度等有所降低^[45]。

进一步地, 考虑疲劳-冻融耦合作用, 混凝土梁的声发射活动与温度变化历史间呈现出较高的相关性^[35, 46]。降温冰冻阶段, 材料内冰晶体不断生长的同时也驱动了液态孔隙水在多孔介质骨架内的流动与重分布, 致使材料基体承受较大内压力, 具体到如图 5 所示的声发射累积撞击曲线则呈现出陡升态势, 说明材料发生了密集的能量释放, 即活跃的微裂纹萌生与扩展; 升温融化阶段, 同样有数量可观的声发射活动出现, 结合文献[47]关于高浓度氯化钠溶液中砂浆存在非相变冻融剥落的描述, 材料在升温期间的潜在劣化同样值得关注。然而现有以静水压理论^[48]、渗透压理论^[49]、粘结剥落理论^[50]为代表的冻融模型, 主要侧重于描述降温受冻对材料的影响, 较少关注升温受融时材料的行为机制, 因此有必要通过辨识声发射源特征, 进一步讨论升温过程对材料的影响。

图 5 混凝土声发射累积撞击和温度的时序变化^[35]Fig. 5 AE cumulative hit and temperature of concrete^[35]

3 材料性态判识评估

在梳理总结水泥基材料劣化所产生的声发射现象基础上, 本节将介绍声发射信息解译用于材料性态判识评估的主要分析方法。

3.1 基于声发射的裂纹类型判识

RA-AF 法是一种开裂模式识别方法, 其主要参数包括相对幅度(RA)和平均频率(AF), 结合图 6, RA 和 AF 的计算可如下表示。

$$\begin{cases} \text{RA} = \text{Rise time} / \text{Amplitude} \\ \text{AF} = \text{Ring count} / \text{Duration} \end{cases} \quad (2)$$

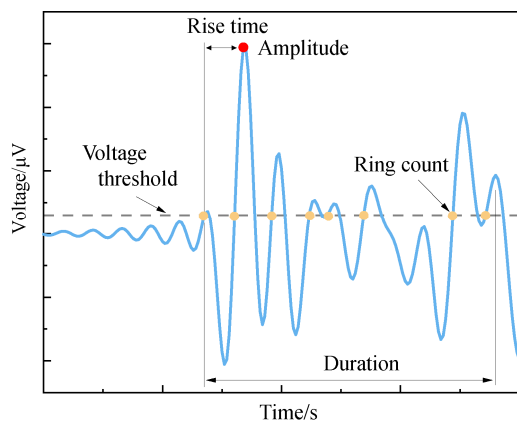


图 6 声发射信号示例

Fig. 6 Example of acoustic emission signal

剪切型和混合型裂纹通常产生低频高幅度的声发射信号, 故 AF 值低, RA 值高; 张拉型裂纹通常产生高频低幅度的声发射信号, 故 AF 值高, RA 值低^[51-53]。基于此判据, Farnam 等^[25]应用 RA-AF 法分析了碱骨料反应过程中的微开裂活动类型, 结果显示反应前期以骨料、界面过渡区、水泥浆基体张拉型微开裂为主; 中后期在既有开裂面间的剪切滑移现象增多, 相应的剪切型与混合型微裂纹比例逐步提高。Elfergani 等^[54]结合 RA-AF 分析与声发射

源定位, 确定了 PCCP 管开裂的主导裂纹为张拉型, 且在裂纹交叉区域存在一定的剪切型微裂纹。Nor 等^[39]对钢筋混凝土梁疲劳劣化过程中的声发射信号进行 RA-AF 分析后发现, 随着损伤的累积, 试件中剪切型微裂纹比例逐渐升高, 而张拉型微裂纹比例相应下降。

除基于 RA-AF 的裂纹类型判识方法外, 矩张量分析^[55-56]也可实现微裂纹开裂模式的识别, 但由于计算中需要至少 6 个声发射传感器捕捉到同一声发射事件, 因此实际运用中可利用的数据量有限, 限制了其进一步发展。

3.2 基于声发射的损伤量化评估

通过对比不同时段声发射信号幅度、能量、数量、强度等指标变化趋势, 进而判识材料是否损伤加剧的核心思想。近年来, 以声发射 b 值、历史指数(H)、静压比(R_c)、松弛比(R_r)等为代表的损伤评估指标, 在材料劣化引起的声发射活动评估方面得到了较为广泛的应用。其中, b 值主要用于描述信号幅度分布中斜率的梯度, 具体到基于声发射信号的 b 值则可表示为。

$$b = \frac{a - \lg N(W)}{W} \quad (3)$$

式中: W 为声发射信号幅度; $N(W)$ 为幅度不小于 W 的声发射撞击或事件的数量; a 为经验常数。

一般情况下, 健康材料或结构释放的能量规模有限, 所监测到的声发射信号幅度较小且差异不大, 因此 b 值大于 1, 而随着损伤发展, 材料总体的能量释放规模加大, b 值逐渐降低, 且愈接近失效状态, b 值愈趋向于 1。具体到碳纤维钢筋混凝土梁冻融损伤状态的量化评估中, 试件经历的冻融循环次数愈多, 试件受载时的初始 b 值愈小, 且破坏过程中的 b 值下降速率有所增大, 表明冻融循环次数的增加加剧了材料的劣化^[57]。在热损伤的量化评估中, 随环境温度升高, 混凝土表面的爆裂剥落现象增多, b 值随之渐趋下降, 且热损伤试件在劈裂试验中的 b 值由脆性失效时的突变, 转为弹塑性失效时的渐变^[58-59]。

类似地, 在 ASTM E1067 规范中介绍了一种声发射强度分析法, 该方法涉及历史指数 H 和严重度 S_r 2 个主要参数。其中, H 用于描述分析时段内声发射信号平均强度与完整测试周期内声发射信号平均强度的比值; S_r 则是分析时段内信号强度正序排列前 50 位信号的强度平均值。二者的计算可如下表示。

$$\begin{cases} H(t) = \frac{N}{N-K} \frac{\sum_{i=K+1}^N S_{oi}}{\sum_{i=1}^N S_{oi}} \\ S_r = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} S_{oi} \end{cases} \quad (4)$$

式中: N 为总的声发射撞击; K 为所选时段的声发射撞击; S_{oi} 为信号强度。若历史指数和严重度随时间增大, 表明声发射活跃, 损伤加剧, 反之, 材料或结构的状态较为稳定。基于该准则, Abdelrahman 等^[24]以基于有损岩相检验的碱骨料反应损伤评估结果作为对照, 比较并证明了无损形式的声发射强度分析法在碱骨料反应损伤量化评估方面的可行性。Vélez 等^[60]通过声发射历史指数 H 与严重度 S_r 组成的坐标系将锈胀开裂过程分为钝化膜未破裂区、钝化膜破裂区、早期锈蚀损伤区、严重锈蚀损伤区, 结果显示各试件在该坐标系中所处的损伤区域与试件实际劣化状态相一致。在疲劳劣化的损伤评估中, 累积信号强度比适用于微损伤识别, Felicity 比、RTRI 比、静压比 R_c 适用于中至重度的损伤识别, 松弛比 R_r 则适用于出现宏观裂纹后的损伤识别^[61–63]。

除比较材料声发射的活跃程度外, 还可通过损伤力学与速率过程理论相结合的方式, 量化材料可能出现声发射的概率来表征损伤状态, 如速率 β 为负时, 表示在低应变状态下大概率出现声发射活动, 材料储能能力较弱, 原子键断裂与恢复的能量势垒较低, 有较大可能出现损伤; β 值为正则表示在低应变状态下小概率出现声发射活动, 材料或结构处于较为健康的状态^[64–65]。

3.3 基于声发射的机器学习模型

机器学习在深度挖掘和学习声发射信息所蕴含的潜在关联模式与特征, 辅助评估水泥基材料性能方面展现了较大潜力。Calabrese 等^[66]在应用单变量方法识别锈胀开裂主要劣化阶段的基础上, 建立了由主成分分析、 k 均值聚类、轮廓系数组成的多变量分析组合, 有效区分了各劣化阶段声发射信号的主要特征。Van Steen 等^[67]发展了一种基于声发射信号的等级聚类算法, 与 CT 影像结果的比较表明, 该聚类算法可有效识别锈胀开裂过程中锈蚀产物生成、砂浆基体开裂等不同劣化阶段。Zheng 等^[68]引入人工神经网络, 以分形维数、声发射历史指数、严重度作为输入层, 以质量损失率作为输出层, 合理预测了静水和潮汐状态对试件锈胀开裂进程的影响。Ongpeng 等^[69]应用计算几何凸包体理论研究了试件受载过程中的损伤演化, 结果表明声发射源的

凸包体体积与加载应力间呈现出正相关性。

4 材料劣化致因与声发射的关联模式剖析

上述材料劣化行为的影响因素较多, 作用机制较为复杂, 本节将进一步剖析各劣化模式下, 材料具体劣化现象及致因与声发射间的关联模式。

4.1 骨料、界面过渡区、水泥浆基体开裂与声发射的关联模式

碱骨料反应点位主要围绕在活性骨料周围, 致使骨料膨胀开裂并形成反应环, 随着反应的持续进行, 反应环由骨料向界面过渡区和水泥浆基体扩展, 造成更大范围的膨胀开裂。该劣化模式可通过声发射方法从细微观尺度进行证明, 如图 7 所示, 骨料、界面过渡区、水泥浆基体的开裂行为具有不同的声发射特征, 碱骨料反应前期声发射信号的重心频率在 300~400 kHz, 这与骨料开裂所释信号频率接近; 后期声发射信号的重心频率转为 100~300 kHz, 而该频率则与界面过渡区和水泥浆基体开裂所释信号频率接近^[25]。

除深色反应环外, 骨料开裂是碱骨料反应区别于其它水泥基材料劣化模式的主要特征之一。因此, 通过辨识骨料开裂的声发射特征, 有望在无损状态下甄别出结构内部隐蔽的碱骨料反应活动, 解决该类劣化模式难以被无损侦测的技术瓶颈。类似基于波形重心频率的损伤识别方法, 在岩土领域亦有成功应用, 如 Ban 等^[70]将声发射信号波形特征与裂纹几何形态相关联, 实现了对层状页岩裂纹几何形态与损伤成因的正反分析。

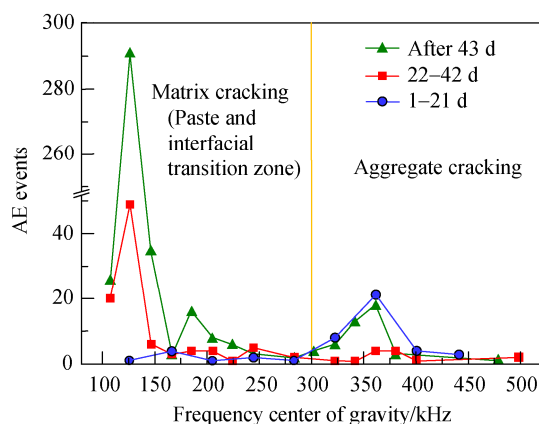


图 7 碱活性混凝土在不同时期的声发射重心频率^[25]
Fig. 7 AE frequency center of gravity of concrete with alkaline activity in different periods^[25]

4.2 锈蚀环境及材料与声发射的关联模式

锈蚀环境和材料作为锈胀开裂的主控致因, 其所涉及的众多参变量在改变材料劣化进程的同时, 也影响着材料的声发射活动。

锈蚀时间方面, 钢筋混凝土梁经历 15~45 d 不等的加速锈蚀后, 试件循环受载时的力学强度和声发射累积信号强度均低于无锈胀开裂的对照组, 且试件经历的锈胀开裂时间愈长, 试件所能承受的极限荷载愈小^[61]。钢筋混凝土柱长达 1 a 的干湿循环试验显示, 声发射的出现伴随材料半电池电位和极化电阻的下降, 且锈胀开裂过程中预应力试件的声发射活动少于非预应力试件^[60]。

环境温度方面, Lyons 等^[32]比较了单日短期和单季长期温度循环下钢筋混凝土锈蚀的声发射能量变化, 结果显示相较于长期季节性环境, 声发射对材料每天短期的锈蚀速率变化更为敏感。环境物质浓度方面, Farnam 等^[71]发现随氯化钙浓度升高, 水泥砂浆在冻融循环过程中的声发射活动逐渐增多, 时序分布渐趋离散。

材料性能及组成方面, 随混凝土强度提高, 锈胀开裂产生的声发射累积撞击减少, 且抗压强度每提高 10 MPa, 每克钢材锈蚀释放的声发射绝对能量增加 3.5 倍^[72]; 随水灰比提高, 试件锈胀开裂过程中产生的声发射信号能量和峰值频率相应降低^[73]。此外, 钢筋与混凝土间过于紧密的粘结则会降低钢筋锈蚀声发射源的定位精度^[74]。水泥基材料中掺入磷酸盐基抑制剂后, 加速锈蚀试验中产生的声发射事件总量减少, 声发射密集出现的时刻延后^[34, 75-76]。

4.3 加载频率、应力水平与声发射的关联模式

疲劳劣化过程中加载频率的提高会使水泥基材料疲劳寿命相应延长, 产生这一现象的主要原因是材料存在明显的徐变效应和一定的速率效应, 而声发射累积振铃计数、撞击、能量的变化趋势则大致相同, 呈现出指数形式的非线性增长, 主要分为快速增长、稳定增长、失效 3 个阶段, 其中在失效阶段, 各参数最终状态均随加载频率的提高有所增加^[38]。

提高疲劳应力水平且增加间歇时间, 沥青混凝土疲劳寿命有所提升但总的声发射能量变化不大^[43]。逐步增幅的循环加载下, 钢筋混凝土配筋率的提升可使钢筋屈服和失效时的加载次数相应减少, 而声发射密集出现的时刻则会提前到来^[44]。

变应力幅值的循环加载下, 水泥基材料的声发射会发生 Kaiser 效应和 Felicity 效应, 其中 Kaiser

效应是指材料在弹性变形阶段, 未承受到所经历的历史最大荷载前, 无明显声发射, 而超出历史最大荷载后, 出现明显声发射的现象, Felicity 效应则是指材料出现塑性变形或开裂时, 发生的一种反 Kaiser 效应现象。上述现象可概括总结为式(5)以 Felicity 比为评估指标的判别准则。

$$\begin{cases} F(p) = p_{AE} / p_{max} \\ F \geq 1, \text{ Kaiser effect} \\ F < 1, \text{ Felicity effect} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $F(p)$ 为关于荷载 p 的 Felicity 比; p_{AE} 为出现声发射时的荷载; p_{max} 为历史最大荷载。

除材料尺度外, 混凝土结构尺度中亦存在 Kaiser 效应, 如混凝土桥梁接缝的剪应力与其声发射信号强度间具有强相关性, 且受载时出现了 Kaiser 效应^[77]。值得注意的是, 大坝结构在服役过程中需承受与疲劳劣化环境相似的水荷载作用, 产生周期性的大坝变形行为, 因此有必要进一步讨论库水与坝体流固耦合作用下的声发射现象, 引入以 Felicity 比为代表的声发射信息指标, 并基于 Kaiser 效应和 Felicity 效应有益补充大坝运行性态预警。

4.4 材料含气量、饱水度与声发射的关联模式

材料含气量与饱水度是冻融劣化产生与发展的重要致因。冻融环境下, 局部区域的声发射累积能量越高, 表征该区域损伤愈严重, 相应的吸水量与吸水速率也愈大, 且在相同阻抗水平时, 冻融试件的吸水能力高于轴拉损伤试件, 表明冻融劣化在材料内产生了更广泛的裂纹分布^[78]。试验研究还显示, 随着冻融循环次数增加, 材料储能能力减弱, 受载过程中的声发射能量释放形式也由缓慢释放转为失效前的集中释放^[79-81]。当材料饱水度大于发生冻融劣化的临界饱水度时, 材料会密集发出高幅度的声发射信号, 且随着含气量的提高, 声发射活动密集出现的时刻有所延后, 即引气延缓了材料到达临界饱水度的时间^[82-83]。进一步地, Shiels 等^[84]分别基于声发射和三维 CT 影像评估了水泥砂浆的临界饱水度, 结果显示声学技术预估的材料临界饱水度为 83.8%, 影像学技术为 85.3%, 二者评估合理且均接近实际值。值得注意的是, 以冻融为代表的水泥基材料劣化普遍存在弥散性裂纹分布, 常规点式或线式的监测技术难以即时感测到材料及结构的此类劣化活动, 而声发射、热传导、应力重分布等多孔介质体系内的活动变化现象, 则为监测此类水泥基材料劣化提供了有益基础。

5 亟待解决的问题和发展趋势

尽管声发射在水泥基材料劣化评估方面已取得了一批有价值的研究成果,但距离声发射在水工结构健康评估中的长期高效应用,仍有一定差距,尤其在以下几方面值得进一步探讨:

1) 盲源分离技术。裂纹扩展涉及短时大量的声发射活动,导致声发射信号重叠现象较为严重,而如何高效准确地分离声发射源,将是开展声发射解译分析的技术前提。

2) 感测设备及其布设阵列。高渗压、高应力、高水化热的复杂水工程环境,超出了现有多数声发射感测设备的正常运行区间和可感测范围,因此,提升感测设备三防(防水、防侵蚀、防干扰)能力,优化传感器布设阵列,将是工程现场声发射应用的硬件基础。

3) 声发射—材料—损伤本构关系。现有声发射解译评估方法仍停留在声发射活动趋势和分布的概化描述层面,既缺少与断裂能量释放等损伤机制的关联,也缺乏精细甄别材料劣化行为模式的能力。因此,深入剖析不同劣化模式下声发射的多尺度孕发机制,将是精细甄别与评估材料劣化的理论基础。

4) 非线性定位计算方法。现有线性恒速定位方法尚未考虑声发射弹性波在非均质多相混凝土中以非线性路径进行传播,且随材料性态变化传播速度具有时变性和各向异性的工程实际,造成定位效率与精度偏低。因此,发展自适应的搜索域划分方法与非线性的时差反分析方法,将是精准定位大尺度工程隐患病变的技术支撑。

5) 实时智能分析平台。声发射数据量大,处理难度高,专家经验依赖性强,造成现有分析平台难以即时解译声发射信息,因此,开发无监督或半监督的实时在线智能分析平台,将是解译工程声发射行为的应用载体。

6) 跨尺度递阶评估。材料尺度的声发射,结构尺度的动力响应,区域尺度的地震,均是弹性波在传播过程中所引起的现象,因此,精细甄别材料劣化与其它行为模式间机制与诱因的差异,跨越不同研究领域间尺度的障碍,实现材料—结构—区域(如混凝土—大坝—库盘)健康状态的多尺度递阶评估,将是声发射的发展趋势之一。

6 结论

水泥基材料劣化的声发射研究是一个多学科交

叉和融合的复杂课题,其突破了传统基于唯象学特征的健康评估模式,通过感测材料或结构的本征物理现象,客观解译现象的活动信号,分析对象可能所处的损伤状态,实现对材料或结构性态较为全面的掌握。尽管国内外在该领域已取得一定成果,但距离在水工结构健康评估中的长期高效应用,仍需从硬件设备、基础理论、应用平台等方面不断改进和创新。

参考文献:

- [1] MORI Y, ELLINGWOOD B R. Reliability-based service-life assessment of aging concrete structures[J]. *J Struct Eng*, 1993, 119(5): 1600–1621.
- [2] GLASSER F P, MARCHAND J, SAMSON E. Durability of concrete—degradation phenomena involving detrimental chemical reactions[J]. *Cem Concr Res*, 2008, 38(2): 226–246.
- [3] 顾冲时, 苏怀智, 王少伟. 高混凝土坝长期变形特性计算模型及监控方法研究进展[J]. *水力发电学报*, 2016, 35(5): 1–14.
GU Chongshi, SU Huaizhi, WANG Shaowei. *J Hydroelectr Eng (in Chinese)*, 2016, 35(5): 1–14.
- [4] 中华人民共和国水利部. 2020年全国水利发展统计公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021: 8–9.
- [5] JIA J. A technical review of hydro-project development in China[J]. *Engineering*, 2016, 2(3): 302–312.
- [6] 顾冲时, 苏怀智, 刘何稚. 大坝服役风险分析与管理研究述评[J]. *水利学报*, 2018, 49: 26–35.
GU Chongshi, SU Huaizhi, LIU Hezhi. *J Hydraul (in Chinese)*, 2018, 49: 26–35.
- [7] DAS A K, LAI T T, CHAN C W, et al. A new non-linear framework for localization of acoustic sources[J]. *Struct Health Monit*, 2019, 18(2): 590–601.
- [8] ZHANG X, FENG N Z, WANG Y, et al. Acoustic emission detection of rail defect based on wavelet transform and Shannon entropy[J]. *J Sound Vib*, 2015, 339(17): 419–432.
- [9] BEHNIA A, CHAI H K, SHIOTANI T. Advanced structural health monitoring of concrete structures with the aid of acoustic emission[J]. *Constr Build Mater*, 2014, 65: 282–302.
- [10] JUNG B H, KIM Y W, LEE J R. Laser-based structural training algorithm for acoustic emission localization and damage accumulation visualization in a bolt joint structure[J]. *Struct Health Monit*, 2019, 18(5-6): 1851–1861.
- [11] 姚可夫, 苏怀智, 杨立夫, 等. 堆石坝面板声发射源组合定位方法[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(7): 131–140.
YAO Kefu, SU Huaizhi, YANG Lifu, et al. *J Hydroelectr Eng (in Chinese)*, 2021, 40(7): 131–140.
- [12] LI W, JIANG Z, YANG Z. Acoustic characterization of damage and healing of microencapsulation-based self-healing cement matrices[J]. *Cem Concr Compos*, 2017, 84: 48–61.
- [13] SAGAR R V, PRASAD B K R, KUMAR S S. An experimental study on cracking evolution in concrete and cement mortar by the b-value analysis of acoustic emission technique[J]. *Cem Concr Res*, 2012, 42(8): 1094–1104.
- [14] HASSAN F, MAHMOOD A K, YAHYA N, et al. State-of-the-art review on the acoustic emission source localization techniques[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 101246–101266.

- [15] NEJATI H R, NAZERIGIVI A, IMANI M, et al. Monitoring of fracture propagation in brittle materials using acoustic emission techniques-A review[J]. *Comput Concr*, 2020, 25(1): 15–27.
- [16] TSANGOURI E, AGGELIS D G. A review of acoustic emission as indicator of reinforcement effectiveness in concrete and cementitious composites[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 224(10): 198–205.
- [17] GHOLIZADEH S, LEMAN Z, BAHARUDIN B T H T. A review of the application of acoustic emission technique in engineering[J]. *Struct Eng Mech*, 2015, 54(6): 1075–1095.
- [18] NAIR A, CAI C S. Acoustic emission monitoring of bridges: Review and case studies[J]. *Eng Struct*, 2010, 32(6): 1704–1714.
- [19] VERSTRYNGE E, LACIDOGNA G, ACCORNERO F, et al. A review on acoustic emission monitoring for damage detection in masonry structures[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 268(25): 121089.
- [20] NAKAMURA H, OHTSU M, ENOKI M, et al. Practical acoustic emission testing[M]. Tokyo: Springer, 2016: 5–12.
- [21] YANG L, PATHIRAGE M, SU H, et al. Computational modeling of temperature and relative humidity effects on concrete expansion due to alkali-silica reaction[J]. *Cem Concr Compos*, 2021, 124: 104237.
- [22] YANG L, PATHIRAGE M, SU H, et al. Computational modeling of expansion and deterioration due to alkali-silica reaction: Effects of size range, size distribution, and content of reactive aggregate[J]. *Int J Solids Struct*, 2022, 234: 111220.
- [23] 唐明述. 碱硅酸反应与碱碳酸盐反应[J]. *中国工程科学*, 2000(1): 36–42.
- TANG M. Strategic Study of CAE (in Chinese), 2000(1): 36–42.
- [24] ABDELRAHMAN M, ELBATANOUNY M K, ZIEHL P, et al. Classification of alkali-silica reaction damage using acoustic emission: A proof-of-concept study[J]. *Constr Build Mater*, 2015, 95: 406–413.
- [25] FARNAM Y, GEIKER M R, BENTZ D, et al. Acoustic emission waveform characterization of crack origin and mode in fractured and ASR damaged concrete[J]. *Cem Concr Compos*, 2015, 60: 135–145.
- [26] SOLTANGHARAEI V, ANAY R, HAYES N W, et al. Damage mechanism evaluation of large-scale concrete structures affected by alkali-silica reaction using acoustic emission[J]. *Appl Sci*, 2018, 8(11): 2148.
- [27] ZAPAŁA-SŁAWETA J, ŚWIT G. Monitoring of the impact of lithium nitrate on the alkali-aggregate reaction using acoustic emission methods[J]. *Materials*, 2018, 12(1): 20.
- [28] ABDELRAHMAN M, ELBATANOUNY M, SERRATO M, et al. Classification of alkali-silica reaction and corrosion distress using acoustic emission[C]//42nd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Minneapolis, USA, 2016, 1706(1): 140001.
- [29] KAWASAKI Y, WAKUDA T, KOBARAI T, et al. Corrosion mechanisms in reinforced concrete by acoustic emission[J]. *Constr Build Mater*, 2013, 48: 1240–1247.
- [30] 徐港, 曾臻, 张瑞, 等. 水泥基材料中钢筋锈蚀初期的声发射信号特征[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(3): 385–393+423.
- XU Gang, ZENG Zheng, ZHANG Rui, et al. *J Build Eng* (in Chinese), 2019, 22(3): 385–393+423.
- [31] LI W, XU, HO S C M, et al. Monitoring concrete deterioration due to reinforcement corrosion by integrating acoustic emission and FBG strain measurements[J]. *Sensors*, 2017, 17(3): 657.
- [32] LYONS R, ING M, AUSTIN S. Influence of diurnal and seasonal temperature variations on the detection of corrosion in reinforced concrete by acoustic emission[J]. *Corros Sci*, 2004, 47(2): 413–433.
- [33] PATIL S, KARKARE B, GOYAL S. Corrosion induced damage detection of in-service RC slabs using acoustic emission technique[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 156: 123–130.
- [34] PEI H, LI Z, ZHANG J, et al. Performance investigations of reinforced magnesium phosphate concrete beams under accelerated corrosion conditions by multi techniques[J]. *Constr Build Mater*, 2015, 93: 989–994.
- [35] QIAO Y, SUN W, JIANG J. Damage process of concrete subjected to coupling fatigue load and freeze/thaw cycles[J]. *Constr Build Mater*, 2015, 93: 806–811.
- [36] 丁兆东, 李杰. 混凝土疲劳分析方法综述[J]. *力学与实践*, 2015, 37(1): 40–48.
- DING Zhaodong, LI Jie. *Mech Eng* (in Chinese), 2015, 37(1): 40–48.
- [37] CARPINTERI A, GRAZZINI A, LACIDOGNA G, et al. Durability evaluation of reinforced masonry by fatigue tests and acoustic emission technique[J]. *Struct Control Health Monit*, 2014, 21(6): 950–961.
- [38] CHEN C, CHEN X, GUO S. Experimental study on acoustic emission characteristic of fatigue crack growth of self-compacting concrete[J]. *Struct Control Health Monit*, 2019, 26(4): e2332.
- [39] NOR N M, IBRAHIM A, BUNNORI N M, et al. Acoustic emission signal for fatigue crack classification on reinforced concrete beam[J]. *Constr Build Mater*, 2013, 49: 583–590.
- [40] THUMMEN F, OLAGNON C, GODIN N. Cyclic fatigue and lifetime of a concrete refractory[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2005, 26(15): 3357–3363.
- [41] ZHOU M, LIAO J, AN L, et al. Analysis of stress-induced cracks in concrete and mortar under cyclic uniaxial compression[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 187: 652–664.
- [42] 王昊鹏, 杨军. 声发射监控沥青混凝土的疲劳损伤及愈合[J]. *中外公路*, 2014, 34(3): 221–226.
- WANG Haopeng, YANG Jun. *J China Foreign Highway* (in Chinese), 2014, 34(3): 221–226.
- [43] 王立燕, 王超, 张亚梅, 等. 运用声发射技术研究橡胶混凝土疲劳损伤过程[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2009, 39(3): 574–579.
- WANG Liyan, WANG Chao, ZHANG Yamei, et al. *J Southeast Univ* (Nat Sci Ed, in Chinese), 2009, 39(3): 574–579.
- [44] PRASHANTH M H, SINGH P, KISHEN J M C. Role of longitudinal reinforcement on the behavior of under reinforced concrete beams subjected to fatigue loading[J]. *Int J Fatigue*, 2019, 125: 271–290.
- [45] ZHANG Y, ZHAO Z. Internal stress development and fatigue performance of normal and crumb rubber concrete[J]. *J Mater Civ Eng*, 2015, 27(2): A4014006.
- [46] LI W, SUN W, JIANG J. Damage of concrete experiencing flexural fatigue load and closed freeze/thaw cycles simultaneously[J]. *Constr Build Mater*, 2010, 25(5): 2604–2610.
- [47] FARNAM Y, BENTZ D, HAMPTON A, et al. Acoustic emission and low-temperature calorimetry study of freeze and thaw behavior in cementitious materials exposed to sodium chloride salt[J]. *Transp Res Rec*, 2014, 2441(1): 81–90.
- [48] POWERS T C. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete[J]. *J Am Concr Inst*, 1945, 16(4): 245–272.
- [49] POWERS T C, HELMUTH R A. Theory of volume changes in hardened Portland cement pastes during freezing[C]//Proceedings of the Highway Research Board Annual Meeting. Washington, D. C., USA, 1953: 285–297.
- [50] VALENZA II J J, SCHERER G W. A review of salt scaling: II. Mechanisms[J]. *Cem Concr Res*, 2007, 37(7): 1022–1034.
- [51] SOULIOTI D, BARKOULA N M, PAIPETIS A, et al. Acoustic emission behavior of steel fibre reinforced concrete under bending[J]. *Constr Build Mater*, 2009, 23(12): 3532–3536.
- [52] OHNO K, OHTSU M. Crack classification in concrete based on

- acoustic emission[J]. *Constr Build Mater*, 2010, 24(12): 2339–2346.
- [53] AGGELIS D G. Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters[J]. *Mech Res Commun*, 2011, 38(3): 153–157.
- [54] ELFERGANI H A, PULLIN R, HOLFORD K M. Damage assessment of corrosion in prestressed concrete by acoustic emission[J]. *Constr Build Mater*, 2013, 40: 925–933.
- [55] UDDIN F A K M, SHIGEISHI M, OHTSU M. Fracture mechanics of corrosion cracking in concrete by acoustic emission[J]. *Meccanica*, 2006, 41(4): 425–442.
- [56] OHTSU M. Acoustic emission theory for moment tensor analysis[J]. *Nondestruct Test Evaluation*, 1995, 6(3): 169–184.
- [57] CHOI W-C, YUN H-D. Acoustic emission activity of CFRP-strengthened reinforced concrete beams after freeze-thaw cycling[J]. *Cold Reg Sci Technol*, 2015, 110: 47–58.
- [58] OZAWA M, UCHIDA S, KAMADA T, et al. Study of mechanisms of explosive spalling in high-strength concrete at high temperatures using acoustic emission[J]. *Constr Build Mater*, 2012, 37: 621–628.
- [59] HEAP M J, LAVALLEET Y, LAUMANNAL A, et al. The influence of thermal-stressing (up to 1000°C) on the physical, mechanical, and chemical properties of siliceous-aggregate, high-strength concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2013, 42: 248–265.
- [60] VÉLEZ W, MATTA F, ZIEHL P. Acoustic emission monitoring of early corrosion in prestressed concrete piles[J]. *Struct Control Health Monit*, 2015, 22(5): 873–887.
- [61] SHAHID K A, BUNNORI N M, JOHARI M A M, et al. Assessment of corroded reinforced concrete beams: Cyclic load test and acoustic emission techniques[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 233: 117291.
- [62] ELBATANOUNY M K, MANGUAL J, ZIEHL P H, et al. Early corrosion detection in prestressed concrete girders using acoustic emission[J]. *J Mater Civ Eng*, 2014, 26(3): 504–511.
- [63] COLOMBO S, FORDE M C, MAIN I G, et al. Predicting the ultimate bending capacity of concrete beams from the “relaxation ratio” analysis of AE signals[J]. *Constr Build Mater*, 2005, 19(10): 746–754.
- [64] SUZUKI T, SHIOTANI T, OHTSU M. Evaluation of cracking damage in freeze-thawed concrete using acoustic emission and X-ray CT image[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 136: 619–626.
- [65] SUZUKI T, OGATA H, TAKADA R, et al. Use of acoustic emission and X-ray computed tomography for damage evaluation of freeze-thawed concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2010, 24(12): 2347–2352.
- [66] CALABRESE L, CAMPANELLA G, PROVERBIO E. Identification of corrosion mechanisms by univariate and multivariate statistical analysis during long term acoustic emission monitoring on a pre-stressed concrete beam[J]. *Corros Sci*, 2013, 73: 161–171.
- [67] 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]. *Constr Build Mater*, 2019, 197: 21–29.
- [68] ZHENG Y, ZHOU Y, ZHOU Y, et al. Localized corrosion induced damage monitoring of large-scale RC piles using acoustic emission technique in the marine environment[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 243: 118270.
- [69] ONGPENG J M C, ORETA A W C, HIROSE S. Monitoring damage using acoustic emission source location and computational geometry in reinforced concrete beams[J]. *Appl Sci*, 2018, 8(2): 189.
- [70] BAN Y, FU X, XIE Q. Revealing the laminar shale microdamage mechanism considering the relationship between fracture geometrical morphology and acoustic emission power spectrum characteristics[J]. *Bull Eng Geol Environ*, 2020, 79(2): 1083–1096.
- [71] FARNAM Y, DICK S, WIESE A, et al. The influence of calcium chloride deicing salt on phase changes and damage development in cementitious materials[J]. *Cem Concr Compos*, 2015, 64: 1–15.
- [72] ING M, AUSTIN S, LYONS R. Cover zone properties influencing acoustic emission due to corrosion[J]. *Cem Concr Res*, 2004, 35(2): 284–295.
- [73] SHI F, WANG J, CUI W, et al. The influence of different factors on acoustic emission signal in the process of monitoring steel corrosion[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2019, 612(3): 032071.
- [74] YUYAMA S, YOKOYAMA K, NIITANI K, et al, et al. Detection and evaluation of failures in high-strength tendon of prestressed concrete bridges by acoustic emission[J]. *Constr Build Mater*, 2007, 21(3): 491–500.
- [75] NAHALI H, DHOUBI L, IDRISSE H. Effect of Na₃PO₄ addition in mortar on steel reinforcement corrosion behavior in 3% NaCl solution[J]. *Constr Build Mater*, 2015, 78: 92–101.
- [76] MANSOUR H B, DHOUBI L, IDRISSE H. Effect of Phosphate-based inhibitor on prestressing tendons corrosion in simulated concrete pore solution contaminated by chloride ions[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 171: 250–260.
- [77] LIU S, LIU T, ZHOU J, et al. Relationship between shear-stress distribution and resulting acoustic-emission variation along concrete joints in prefabricated girder structures[J]. *Eng Struct*, 2019, 196: 109319.
- [78] YANG Z, WEISS W J, OLEK J. Water transport in concrete damaged by tensile loading and freeze-thaw cycling[J]. *J Mater Civ Eng*, 2006, 18(3): 424–434.
- [79] 黄超, 彭刚, 肖洋, 等. 冻融混凝土基于声发射技术的单轴动态劈拉损伤特性研究[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(6): 198–203.
- HUANG Chao, PENG Gang, XIAO Yang, et al. *Water Resour Hydropower Eng (in Chinese)*, 2018, 49(6): 198–203.
- [80] 邱继生, 潘杜, 关斌, 等. 冻融后煤矸石混凝土受压损伤声发射特性[J]. *建筑材料学报*, 2018, 21(2): 196–201.
- QIU Jisheng, PAN Du, GUAN Xiao, et al. *J Build Mater (in Chinese)*, 2018, 21(2): 196–201.
- [81] 徐童淋, 彭刚, 杨乃鑫, 等. 混凝土冻融劣化后动态单轴抗压特性试验研究[J]. *水利水运工程学报*, 2017(6): 69–78.
- XU Tonglin, PENG Gang, YANG Naixing, et al. *Hydro-Sci Eng (in Chinese)*, 2017(6): 69–78.
- [82] TODAK H N, TSUI M, LEY M T, et al. Evaluating freeze-thaw damage in concrete with acoustic emissions and ultrasonics[M]//SHEN G, WU Z, ZHANG J. *Advances in acoustic emission technology*. Cham: Springer, 2017: 175–189.
- [83] LI W, POUR-GHAZ M, CASTRO J, et al. Water absorption and critical degree of saturation relating to freeze-thaw damage in concrete pavement joints[J]. *J Mater Civ Eng*, 2012, 24(3): 299–307.
- [84] SHIELDS Y, GARBOCZI E, WEISS J, et al. Freeze-thaw crack determination in cementitious materials using 3D X-ray computed tomography and acoustic emission[J]. *Cem Concr Compos*, 2018, 89: 120–129.