

基于声发射技术的混凝土受压损伤特征*

吴琛¹, 杨金沙¹, 李巧²

(1. 福建理工大学福建省土木工程新技术与信息化重点实验室 福州, 350118)

(2. 中建海峡建设发展有限公司 福州, 350015)

摘要 为研究混凝土在受压过程中的损伤演化特征,开展多种强度混凝土试块受压全过程声发射动态检测。根据声发射撞击数“两峰值、三阶段”的演化特性和波形信号频谱特征,分别对应混凝土在初始压实阶段、裂缝开展阶段、裂缝贯穿阶段的损伤特征,并基于声发射速率过程理论和损伤力学建立以声发射累积撞击数表征的混凝土损伤因子。研究表明:各强度等级的混凝土在受压全过程中低频能量稳定在区间30 kHz~50 kHz内;当能量密集出现在高频区间时代表混凝土进入裂缝开展阶段,受载后期高频信号能量的明显衰减是混凝土破坏的前兆信息;基于累积撞击数所建立的损伤指标能较好地反映混凝土在不同应力水平下的损伤程度。

关键词 声发射; 频谱分析; 速率过程理论; 混凝土受压损伤

中图分类号 TU528

引言

为了不对原有结构产生损坏,工程上常用超声法、回弹法、红外热像技术等无损检测方法对混凝土结构进行检测^[1-2]。但是,这些方法往往会受到被检测构件几何外形限制,且无法动态监测内部损伤发展情况并准确判断损伤程度。随着科技的发展,一种可以实时反映被测物体内部结构变化且能灵敏捕捉材料裂纹的动态检测方法——声发射(acoustic emission,简称AE)开始兴起^[3-5]。

构件的损伤本质是材料的损伤,混凝土受载破坏过程实质上是内部裂缝萌生、扩展的过程,该过程以弹性波形式释放应变能^[6-8]。声发射技术借助微电子技术和计算机技术捕捉弹性波并转化为电信号,通过提取声发射参数分析混凝土的损伤状态,为从材料层面评估构件损伤奠定基础。近年来,国内外学者在不同受力形式、不同破坏模式混凝土声发射的信号规律方面已取得丰硕的研究成果^[9-12]。若要将声发射技术推广应用在工程结构健康监测中,还需进一步揭示混凝土在损伤演化过程中的声发射规律并利用测得的声发射参数量化评估损伤程度。

笔者通过对混凝土受压全过程进行声发射检测,利用声发射参数分析损伤特征,并揭示混凝土损伤不同阶段频率分布规律,在声发射速率过程理论

和损伤力学的基础上采用声发射累积撞击数定量描述混凝土损伤程度。

1 混凝土受压声发射试验

为研究混凝土损伤发展与声发射参数、频谱特征间的规律,定量评估混凝土损伤,笔者采用声发射技术检测混凝土受压损伤全过程。

1.1 试验设计

试验设计了强度等级为C30、C40和C50的混凝土试块,尺寸均为150 mm×150 mm×150 mm,每种强度6个试块。水泥采用标号为42.5的普通硅酸盐水泥,细骨料为中砂,粗骨料为粒径10~20 mm连续级配碎石,拌和用水为饮用水。混凝土材料配合比如表1所示。试块浇注成型24 h后拆模,28 d后进行抗压力学性能及声发射试验。

表1 混凝土材料配合比

Tab.1 Concrete mix ratio

强度等级	水泥	细骨料	粗骨料	水
C30	1	1.47	2.72	0.55
C40	1	1.24	2.52	0.50
C50	1	0.92	1.86	0.40

* 国家自然科学基金资助项目(52378494);福建省自然科学基金资助项目(2022H6032)

收稿日期:2021-10-14;修回日期:2021-12-15

1.2 试验设备及加载

采用最大载荷为1 000 kN的液压式压力试验机对混凝土进行加载,加载制度为应力控制加载,保持恒定加载速度0.5 MPa/s。将声发射传感器粘贴在试块一侧,使用AMSY-6多通道声发射系统进行声发射信号采集。试验装置示意图如图1所示。

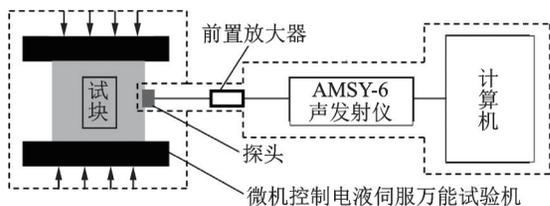


图1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the test device

1.3 声发射时间参数设置

声发射时间参数包括为确定声发射波形信号的上升时间而设定的峰值鉴别时间、为确定撞击信号的终点而设定的撞击鉴别时间和为确定波形信号的终点而设定的撞击闭锁时间。声发射信号如图2所示。

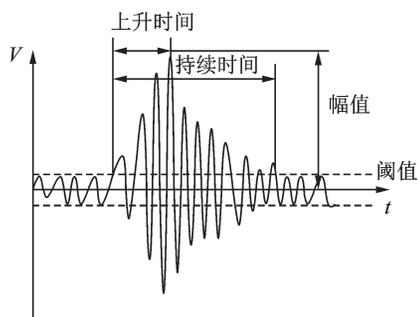


图2 声发射信号

Fig.2 Schematic diagram of acoustic emission signal

为确定混凝土的时间参数,在加载试验开始前分别在3组混凝土试块断铅点处取2.5 mm铅芯。铅笔笔芯装置示意图如图3所示。铅芯与试件表面成30°角进行1次断铅,并连续做5次断铅试验。断铅位置如图4所示。声发射波形信号上升时间如表2所示,根据断铅结果可知,上升时间平均值小于200 μs。为了准确判断波形峰值,将峰值鉴别时间适当放大,取210 μs;撞击鉴别时间取峰值鉴别时间的2倍,即420 μs;撞击闭锁时间略大于撞击鉴别时间,取450 μs。

按照该AE时间参数设定,可进行正式加载,加

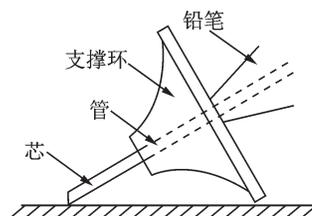


图3 铅笔笔芯装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of pencil refill device

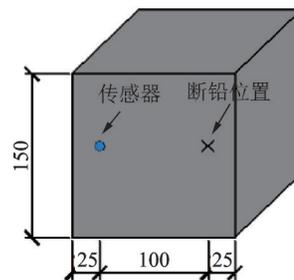


图4 断铅位置(单位:mm)

Fig.4 Location diagram of broken lead (unit:mm)

载过程中同时观测混凝土应力-应变和声发射参数发展历程。

表2 声发射波形信号上升时间

Tab.2 Rising time of acoustic emission waveform signal peak μs

断铅次数	C30	C40	C50
第1次	193.26	180.73	195.33
第2次	185.34	191.34	196.29
第3次	187.65	194.97	188.42
第4次	196.96	187.91	186.51
第5次	194.98	193.26	197.37
平均值	191.64	189.64	192.78

2 混凝土受压损伤全过程声发射特征

2.1 声发射撞击数与应力-应变曲线关系

轴在荷载作用下,混凝土产生变形、裂纹开裂及扩展,这个过程会产生声发射。撞击数是指由一个或多个波形撞击鉴别所得的声发射事件个数,反映了声发射活动的总量和频度。图5为混凝土应力-应变曲线与撞击数关系图。笔者采用图5来研究混凝土内部损伤演化过程。混凝土受压过程根据撞击数的变化可以概括为“两峰值、三阶段”。

第1阶段(初始压密阶段)的应力水平大约在极限强度的0%~20%范围内。由于混凝土中存在初始微裂缝和不稳定界面,在应力作用下逐渐被压实,聚集在微裂纹尖端的能量瞬间释放,混凝土内部微

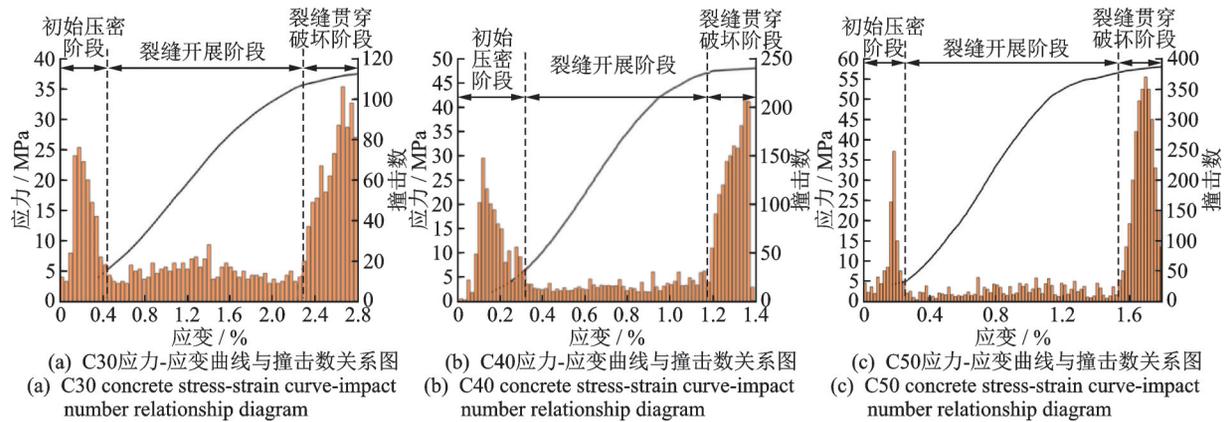


图5 混凝土应力应变曲线-撞击数关系图

Fig.5 Concrete stress-strain curve-impact number relationship diagram

结构发生变化,声发射撞击率较大,形成第1个峰值。

第2阶段(裂缝开展阶段)声发射信号的产生主要是由于裂纹的发展。在内部结构被压实后,应力的增加会导致混凝土裂纹的稳定形成和扩展,是比较稳定的变化,因此该阶段声发射撞击率较小,声发射信号也较为平稳。

第3阶段(裂缝贯穿破坏阶段)是当应力超过极限强度85%时,试块即将破坏。此阶段应力的增加会导致骨料之间的摩擦加剧和砂浆界面的开裂,因此撞击率迅速增大,形成撞击数的第2个峰值。此时混凝土表现为裂缝失稳扩展,贯穿至表面形成较大的宏观裂缝。混凝土强度越高,混凝土破坏时声发射的撞击率越大。

试验现象说明,声发射撞击数的不同变化特征反映了混凝土内部裂纹变形、发展和失稳的整个过程,体现了混凝土材料损伤裂纹的演化规律。

2.2 声发射波形信号频谱特征

对单轴受压加载过程中声发射波形信号进行快

速傅里叶变换,混凝土不同破坏阶段声发射信号频谱图分别如图6~8所示。由图可以看出:

1) 在初始压密阶段,混凝土缺陷的压实主要产生低频弹性波信号。不同强度混凝土能量均稳定分布在30 kHz~50 kHz的低频区间内,高频信号比重较小。

2) 当低频能量频率峰值显著提高且能量开始大量迁移出现在高频区间时,代表混凝土进入裂缝开展阶段。高频段信号由新生裂缝开展产生,混凝土强度越高,频率峰值越大,能量所集中的高频区间也越宽。C30, C40和C50高频能量区间分别为110 kHz~120 kHz, 90 kHz~120 kHz和80 kHz~120 kHz。

3) 当混凝土进入裂缝贯穿破坏阶段时,裂缝进一步扩展形成宏观裂缝,裂缝宽度显著增大。由于声发射高频信号的波长较短,大部分高频信号可能无法穿过裂缝,或穿过裂缝后能量出现明显衰减,故此阶段声发射高频信号能量明显衰减,该规律可以视作混凝土破坏前兆。

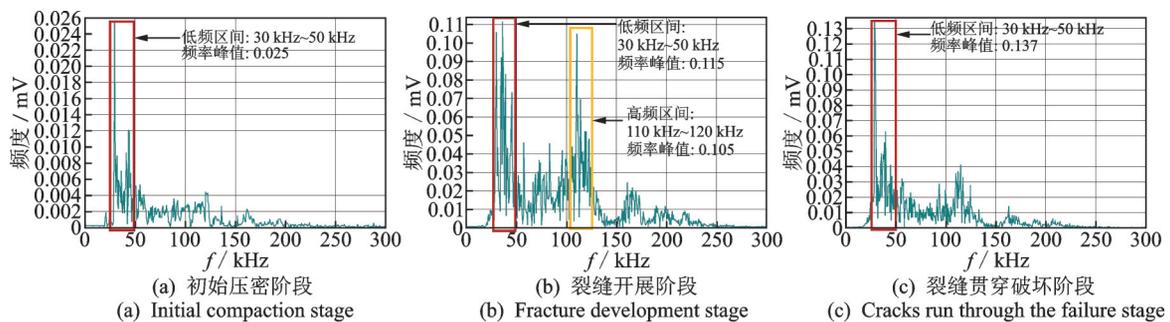


图6 C30不同破坏阶段声发射信号频谱图

Fig.6 Acoustic emission signal spectrum of C30 at different failure stages

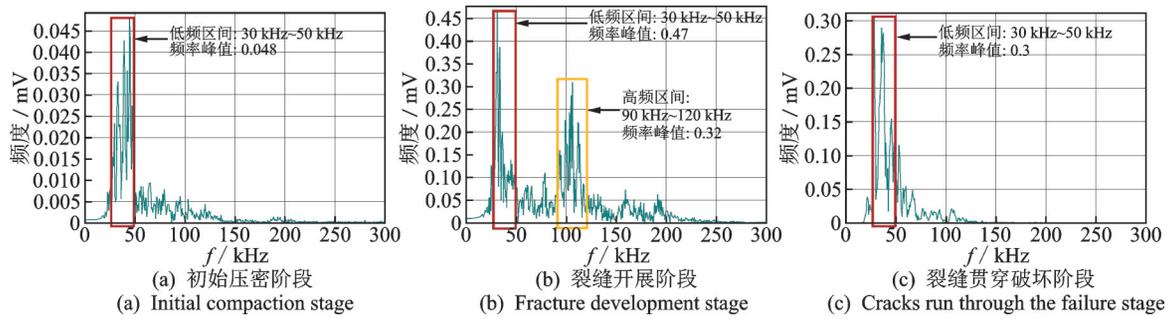


图7 C40不同破坏阶段声发射信号频谱图

Fig.7 Acoustic emission signal spectrum of C40 at different failure stages

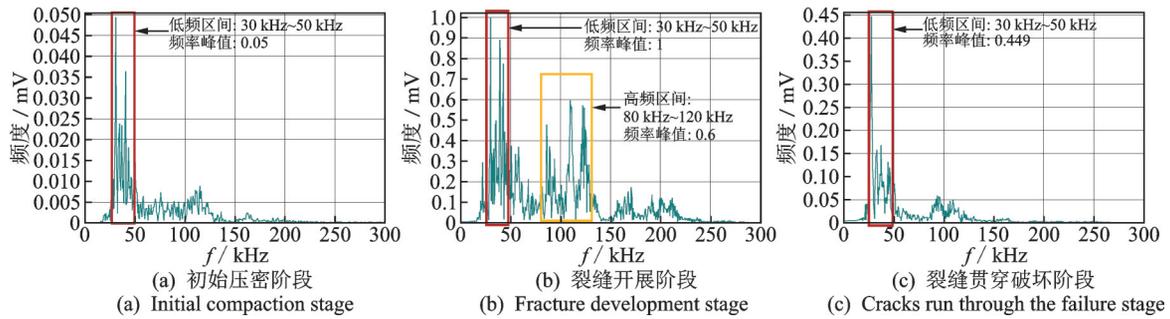


图8 C50不同破坏阶段声发射信号频谱图

Fig.8 Acoustic emission signal spectrum of C50 at different failure stages

3 声发射撞击数与混凝土损伤的关系

基于声发射速率过程理论将声发射累积撞击数与应力水平关系曲线拟合,可用于评估不同应力水平下的损伤量。

3.1 声发射速率过程理论

Ohtsu^[13]提出了利用声发射速率过程参数来评价混凝土的声发射活性,并指出其与混凝土损伤量密切相关。可以用混凝土声发射事件累积数 N 的概率密度函数 $f(\sigma)$ 来描述不同应力下的混凝土声发射特性,即

$$f(\sigma)d\sigma = \frac{dN}{N} \quad (1)$$

其中: N 为荷载达到应力水平 σ 时的声发射事件累积数。

概率密度函数 $f(\sigma)$ 可以理解为不同应力下混凝土试件裂缝的扩展速率,用双曲线函数表示为

$$f(\sigma) = \frac{a}{\sigma} + b \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),对方程进行积分可得

$$N = c\sigma^a \exp(b\sigma) \quad (3)$$

其中: a, b, c 为常数。

常数 a, b, c 均可通过测量混凝土试件在不同应

力水平 σ 时的声发射事件数 N 拟合得到。其中: a 为声发射速率参数, $a > 0$ 表明在较低应力水平下声发射概率密度较高,材料含有较多裂隙; $a < 0$ 表明在较低应力水平下声发射概率密度较低,这种情况常常代表混凝土在加载前有过一定的受力历史,材料在重新加载时声发射活动较为平静^[14]; b 为声发射过程参数, b 值越高说明加载过程中平均概率密度越高; c 为积分常数,由加载条件决定,对于同一批次的试验, c 值一般变化不大。

根据2.1节已得到的混凝土在不同应力水平下的撞击数,将加载过程中的声发射累积数按式(3)进行拟合,由拟合结果可得声发射的特征参数 a, b, c 。累积撞击数拟合曲线如图9所示。

3.2 混凝土损伤因子

根据损伤力学原理,材料的损伤可以用损伤因子 D 来表示

$$D = 1 - E/E^* \quad (4)$$

其中: E^* 为材料初始弹性模量; E 为材料在任意损伤损伤状态下的弹性模量。

已有研究表明,混凝土损伤因子 D 与声发射事件累积计数成正比^[15],即

$$D = kN \quad (5)$$

联立式(3)~(5),可由声发射特征参数表达

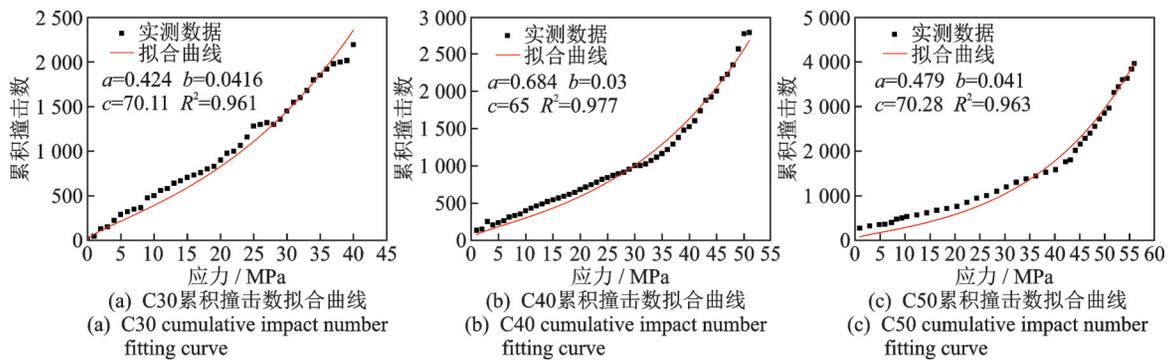


图9 累积撞击数拟合曲线

Fig.9 Fitting curve of cumulative Hits number

的混凝土应力-应变关系

$$\sigma = \epsilon E^* (1 - D) = \epsilon E^* [1 - k c \sigma^a \exp(b \sigma)] \quad (6)$$

其中： k 为与试验条件相关的常数； ϵ 为混凝土的应变。

以C30为例，将其特征参数 a, b, c 代入式(6)，并与实测应力-应变数据进行最小二乘法拟合，可得 $E^* = 4.5 \times 10^4$ ， $k = 3.87 \times 10^{-4}$ 。C30混凝土应力-应变拟合曲线如图10所示。可以看出，实测应力-应变数据和拟合曲线吻合良好，说明采用声发射撞击数表示损伤因子的方法可行。

将 k 代入式(5)即可求出 D 。混凝土损伤因子变化如图11所示。混凝土损伤演化方程能够量化不同应力水平下混凝土材料内部的损伤程度。

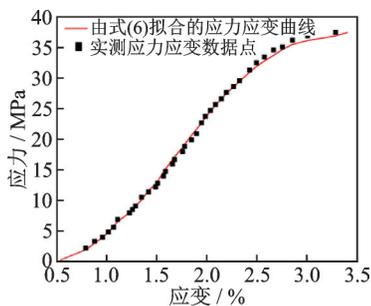


图10 C30混凝土应力-应变曲线拟合

Fig.10 Stress-strain curve fitting of C30 concrete

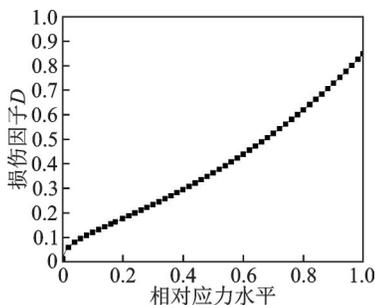


图11 混凝土损伤因子变化

Fig.11 Change of concrete damage factor

4 结论

1) 声发射撞击数可以表征混凝土内部裂缝演化过程。混凝土受压全过程声发射撞击数可以划分为3个阶段，分别对应混凝土在压密阶段、裂缝开展阶段以及裂缝贯穿阶段的发展特点，直观且易辨识。

2) 在混凝土受压全过程，低频能量均集中在30 kHz~50 kHz，卸载过程中该区间频率峰值显著提高，预示着宏观裂缝将要出现。

3) 能量在高频区间的集中出现代表混凝土进入裂缝开展阶段，且混凝土强度越高，高频区间越宽。当高频信号能量明显衰减时，说明混凝土即将被贯穿破坏。该规律可以为混凝土破坏进行预警。

4) 基于累积撞击数所建立的损伤因子可以很好地判断混凝土材料在不同应力阶段的损伤程度，为构件损伤评估提供新途径。

参 考 文 献

- [1] 宋国荣, 徐煜阳, 刘宏实, 等. 一种新型胶体耦合介质在材料弹性常数超声无损检测中的应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(5): 1046-1055.
SONG Guorong, XU Yuyang, LIU Hongshi, et al. The application of a new type colloidal coupling medium in the ultrasonic non-destructive evaluation of elastic constants of materials[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(5): 1046-1055.(in Chinese)
- [2] DU H X, WU H P, WANG F J, et al. The detection of high-strength concrete exposed to high temperatures using infrared thermal imaging technique[J]. Materials Research Innovations, 2015, 19(supp1): 162-167.
- [3] 李婷, 付德义, 薛扬. 基于AE与STFT的变桨轴承裂纹诊断研究[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(2): 299-303.
LI Ting, FU Deyi, XUE Yang. Research on crack di-

- agnosis of pitch bearing based on AE and STFT [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(2): 299-303.(in Chinese)
- [4] 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]. Construction and Building Materials, 2010, 24(12): 2347-2352.
- [5] 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. Acoustic emission characteristics of compression damage of coal gangue concrete after freeze-thaw cycles [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2): 196-201.(in Chinese)
- [6] ISOJEH B, EL-ZEGHAYAR M, VECCHIO F J. Concrete damage under fatigue loading in uniaxial compression[J]. ACI Materials Journal, 2017, 114(2): 225-235.
- [7] SHEN L, REN Q W, XIA N, et al. Mesoscopic numerical simulation of effective thermal conductivity of tensile cracked concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015, 95: 467-475.
- [8] 杨东辉, 赵毅鑫, 滕腾, 等. 砂岩破裂失稳声发射临界特征与 Kaiser 点识别研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(1): 218-230.
YANG Donghui, ZHAO Yixin, TENG Teng, et al. Study on critical characteristics of acoustic emission in sandstone fracture instability and Kaiser point recognition [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(1): 218-230.(in Chinese)
- [9] 王岩, 王瑶, 路桂娟, 等. 变幅循环荷载下混凝土轴拉声发射特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 45-49.
WANG Yan, WANG Yao, LU Guijuan, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of concrete under variable amplitude cyclic tension loading [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(1): 45-49.(in Chinese)
- [10] 王文杰, 磨季云. 尾矿砂改性混凝土的强度与声发射损伤特征研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(10): 3450-3456.
WANG Wenjie, MO Jiyun. Strength and acoustic emission damage characteristics of tailing sand modified concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(10): 3450-3456.(in Chinese)
- [11] 吴胜兴, 王岩, 李佳, 等. 混凝土静态轴拉声发射试验相关参数研究 [J]. 振动与冲击, 2011, 30(5): 196-204.
WU Shengxing, WANG Yan, LI Jia, et al. Parameters of acoustic emission test of concrete under static uniaxial tension [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(5): 196-204.(in Chinese)
- [12] 王余刚, 骆英, 柳祖亭. 全波形声发射技术用于混凝土材料损伤监测研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 803-807.
WANG Yugang, LUO Ying, LIU Zuting. Study on waveform acoustic emission technique for monitoring breakage in concrete materials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 803-807.(in Chinese)
- [13] OHTSU M. Rate process analysis of acoustic emission activity in core test of concrete [J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 1992, 1992(442): 211-217.
- [14] 朱宏平, 徐文胜, 陈晓强, 等. 利用声发射信号与速率过程理论对混凝土损伤进行定量评估 [J]. 工程力学, 2008, 25(1): 186-191.
ZHU Hongping, XU Wensheng, CHEN Xiaoqiang, et al. Quantitative concrete-damage evaluation by acoustic emission information and rate-process theory [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(1): 186-191.(in Chinese)
- [15] 纪洪广, 张天森, 蔡美峰, 等. 混凝土材料损伤的声发射动态检测试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 165-168.
JI Hongguang, ZHANG Tiansen, CAI Meifeng, et al. Experimental study on concrete damage by dynamic measurement of acoustic emission [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 165-168.(in Chinese)



第一作者简介: 吴琛,女,1978年7月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为结构健康监测与抗震性能分析。曾发表《管状压电陶瓷传感器工作机理及在非对称十字形配钢SRC矩形截面柱损伤监测中的应用》(《建筑结构学报》2023年第44卷第1期)等论文。

E-mail:wuchen2001@126.com