

中央带裂缝混凝土循环拉伸断裂试验 Felicity 效应

范向前*, 刘决丁, 胡少伟, 陆俊

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

摘要: 混凝土的声发射特性是其在受载过程中的伴生现象, 具有对应力或应变历史的记忆性, 可以利用声发射记忆性评价混凝土结构损伤历史。通过中央带裂缝混凝土试件循环拉伸断裂试验, 分析了不同声发射参量与循环荷载历程之间的关系, 建立了循环拉伸状态下混凝土声发射损伤模式, 揭示了初始裂缝宽度对 Felicity 比的影响规律。结果表明, 动态轴向循环荷载作用下, 随着初始预制裂缝宽度的增加, 混凝土棱柱体试件 Felicity 比逐渐增大。主要试验成果为采用声发射记忆性来评判混凝土的损伤历史提供了一种新的方法。

关键词: 混凝土; 声发射; 记忆性; Felicity 效应; 循环荷载; 初始裂缝宽度

中图分类号: TB302 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2019)12-2968-07

Cyclic tensile fracture test of concrete with central crack and Felicity effect

FAN Xiangqian*, LIU Jueding, HU Shaowei, LU Jun

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China)

Abstract: As an accompanying phenomenon, the acoustic emission of the concrete has memory of the stress-strain history, which could be used to evaluate the concrete damage history. The cyclic tensile failure experiment of the concrete specimen with central crack was conducted. Relationships between parameters of acoustic emission and cyclic loading process were analyzed. The acoustic emission damage mode of concrete under cyclic tension was established. The influence of initial width of crack on the Felicity rate was revealed. The results indicate that the Felicity rate of the concrete prisms gradually increase with the initial width of the crack under dynamic axial cyclic loading. The key outcomes of this article provide a new process of evaluating the concrete damage history with acoustic emission memory.

Keywords: concrete; acoustic emission; memory; Felicity effect; circle load; initial width of crack

对具有受荷历史的混凝土结构, 经过较长时间的使用(如水位变化、温度变化等)或经历某种自然灾害(如地震、飓风、火灾等)后, 其结构性能则主要取决于结构的损伤或破坏程度。

混凝土的声发射特性是其在受载过程中的伴生现象, 其内部由于局部应变能的快速释放而产生瞬时弹性波^[1-3]。

声发射在一个力学过程中与应力参量、应变参量之间是相互耦合的^[4-5], 且声发射所具有的某些

特性, 譬如记忆性(或者称不可逆性), 正好可以弥补这一欠缺。试验表明^[6-7], 混凝土材料的声发射过程具有不可逆性。在试验中, 这种记忆性可以表现为声发射对于应力或应变历史的记忆性, 而在实质上, 这种记忆性是由其损伤过程的不可逆性决定的。

从国内外的研究成果来看, 声发射技术可以有效地监测混凝土裂纹的产生与扩展。Georg 等^[8]基于声发射凯塞(Kaiser)效应的荷载比和卡姆比等方法得出了混凝土损伤程度等级的分类。Santosh 等^[9]利

收稿日期: 2018-12-06; 录用日期: 2019-01-15; 网络出版时间: 2019-03-07 10:48

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190305.001>

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401907); 国家自然科学基金(51679150; 51579153; 51739008; 51879168); 国家重大科研仪器研制项目(51527811); 江苏省优秀青年科学基金(BK20180051); 南京水利科学研究院基金(Y417015)

通讯作者: 范向前, 博士, 高工, 硕士生导师, 研究方向为基于声发射技术的混凝土损伤断裂 E-mail: xqfan@nhri.cn

引用格式: 范向前, 刘决丁, 胡少伟, 等. 中央带裂缝混凝土循环拉伸断裂试验 Felicity 效应[J]. 复合材料学报, 2019, 36(12): 2968-2974. FAN X Q, LIU J D, HU S W, et al. Cyclic tensile fracture test of concrete with central crack and Felicity effect[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(12): 2968-2974 (in Chinese).

用声发射事件数和声发射能量研究了混凝土界面断裂行为。季文玉等^[10]采用宽频传感器对声发射信号和波形进行了采集,在对波形进行信号处理的基础上对波形频谱进行了深入研究,并通过分析传感器之间互相发射和接受信号,对钢纤维增强活性粉末混凝土(SF/RPC)材料的声发射波速进行了测定。吴胜兴等^[11]在 MTS 材料试验机上进行相同尺寸的混凝土、骨料(花岗岩)、砂浆和骨料、砂浆界面 4 种试件的轴拉试验,利用声发射技术识别混凝土损伤断裂过程的物理机制。朱宏平等^[12]利用声发射信号和速率过程理论对混凝土损伤进行了定量评估。

利用声发射的记忆性来评价混凝土结构的受力历史和损伤水平,首先需要确定加载历程中的有效声发射^[13-15]。目前,关于有效声发射这一概念尚未有统一的定义,不同的学者都是根据自己的经验和所研究的介质采用相应的判别方法。文献^[16]通过循环往复单轴压缩实验,给出了混凝土材料单轴压缩条件下出现有效声发射的 3 个判别条件,指出声发射记忆性不仅具有应力上限,还具有应力下限。应力上限是由混凝土材料的破坏机制所决定,而应力下限则取决于混凝土材料本身的结构特性,同时提出的 Felicity 效应更加能够反映声发射的记忆性。Felicity 效应又称为反 Kaiser 效应,即对于重复加载的构件,重复荷载达到原先所加最大荷载前发生明显的声发射。重复加载时的声发射起始载荷(P_i)对原先所加最大荷载(P_{max})之比(P_i/P_{max}),称为 Felicity 比^[17]。Felicity 比可较准确地反映材料中原先受损伤或结构缺陷的程度,即可以更好地描述声发射的记忆性^[18-19],在工程中可作为材料缺陷严重性的重要评定判据。然而目前这方面的研究尚不深入,主要体现在:(1)仅考虑单轴压缩状态下混凝土声发射特性的研究,但混凝土结构缺陷多以受拉裂缝形式出现,更多地表征为混凝土的拉伸力学状态,混凝土拉伸状态下声发射的记忆性研究较少;(2)Felicity 比与混凝土结构历史应力水平之间关系的研究尚未见公开报道。

1 带裂缝混凝土试件循环拉伸声发射特性试验

1.1 试验设备

本试验主要采用美国 MTS-810 液压伺服动态试验机(试验机量程为 250 MPa)和美国声学物理公司 SAMOSTM 16 通道声发射测试系统。通过转动

连接件将试验机和棱柱体试件进行连接(参考文献^[20]中图 1 和图 2),并保证棱柱体试件实现轴向拉伸,以初始预制裂缝为中心,将 250 mm 的夹式引伸计对称布置在裂缝两侧,用来准确测量试件中心段应变值随荷载变化情况,其试验系统如图 1 所示。



图 1 混凝土循环拉伸声发射特性试验系统
Fig. 1 Acoustic emission characteristic test system of cyclic tension of concrete

1.2 试件制备

本试验采用尺寸为 550 mm × 100 mm × 100 mm 的棱柱体混凝土试件,混凝土设计强度为 C55,在室温下覆盖透水麻袋养护至 48 h 后拆模,并继续在有透水麻袋覆盖的情况下,定期洒水养护 28 d。试件中央预制裂缝宽度分别为 20 mm、30 mm、40 mm、50 mm,为了保证每组试件至少有 3 个有效数据,每组试件对应设计 5 个,共计 20 个试件,即采用同一个配合比,经过人工拌匀后,按裂缝宽度大小,分批次浇筑。试件初始裂缝是浇筑混凝土时,在模板中间通过预埋钢片进行预制,其具体制作过程如图 2 所示。

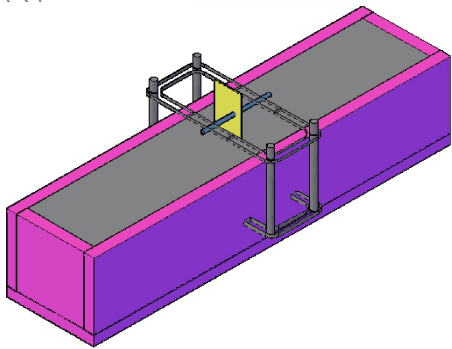


图 2 混凝土预制缝制作装置示意图
Fig. 2 Schematic diagram of prefabricated crack device for concrete

1.3 试验方案

加载时,以荷载为参数,分阶段循环加载,加

载的应变速率为 $1.0\times10^{-3}/s$ ，具体加载过程为(1)荷载从 0 kN 加载至 4 kN；(2)荷载保持在 4 kN 处稳定 10 s；(3)荷载从 4 kN 降低至 2 kN；(4)荷载保持在 2 kN 处稳定 10 s；(5)荷载从 2 kN 加载至 6 kN；(6)荷载保持在 6 kN 处稳定 10 s；(7)荷载从 6 kN 降低至 4 kN；(8)荷载保持在 4 kN 处稳定 10 s；(9)荷载从 4 kN 加载至 8 kN，依照上述加载过程，依次循环加载，直至试件被拉断，具体加载方案如图 3 所示。

声发射采集混凝土损伤破坏过程中，为了避免外界噪音等干扰，依据声发射使用手册，根据预实验结果，声发射阈值设计为 40 dB，从而确保本次试验过程中采集到的声发射数据均为有效参数。

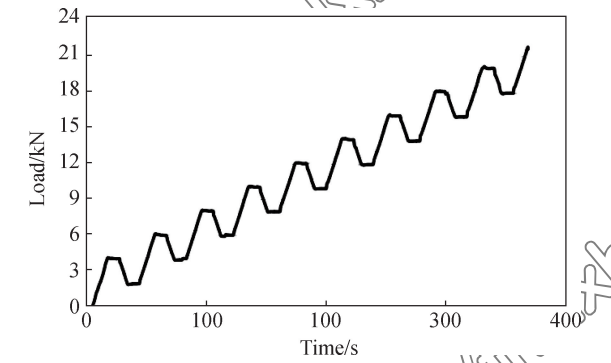


图 3 中央带裂缝混凝土试件循环拉伸断裂试验加载方案
Fig. 3 Test load plan of cyclic tensile failure experiment of concrete specimen with central crack

2 试验结果与分析

2.1 带裂缝混凝土试件循环拉伸声发射特性试验现象

除个别中央带裂缝混凝土试件(初始裂缝较小)断裂位置偏离预制裂缝外，其他试件均在预制裂缝位置处断开，断裂面齐整。由于试验采用循环加载方式，且中央带裂缝混凝土试件带有初始裂缝，裂缝有充足的时间沿砂浆界面扩展。根据图 3 所示的加载方案，中央带裂缝混凝土试件被拉断时的情况如图 4(a)所示，破坏后断面如图 4(b)所示。

以中央带初始裂缝宽度为 20 mm(即初始缝高比为 0.2)的混凝土棱柱体试件为研究对象，选取声发射信号中的振铃计数(信号超过阈值的次数)和幅值(信号的最大振幅)为研究参量，循环拉伸试验中混凝土声发射振铃计数和声发射幅值与荷载历程关系曲线如图 5 和图 6 所示。可知，随着混凝土棱柱体试件动态荷载的变化，声发射信号(振铃计数、

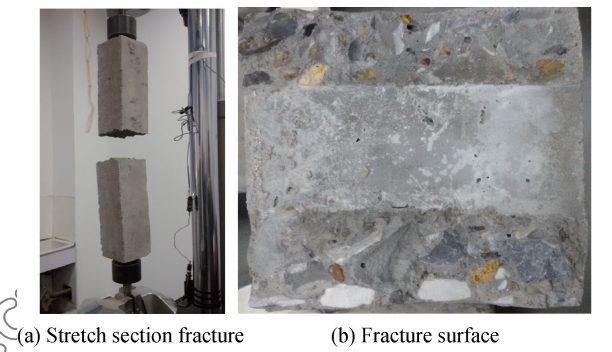


图 4 中央带裂缝混凝土试件循环拉伸断裂试验现象
Fig. 4 Experimental phenomena of cyclic tensile failure experiment of concrete specimen with central crack

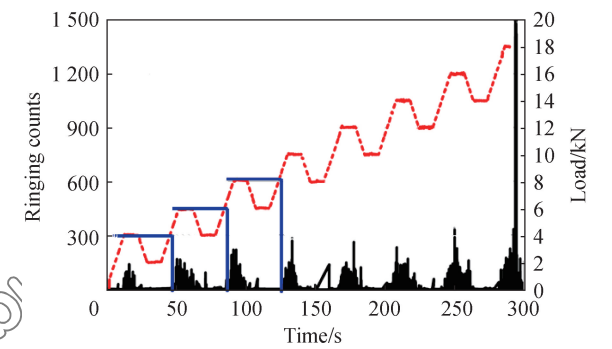


图 5 循环拉伸试验中混凝土声发射振铃计数与荷载历程关系曲线
Fig. 5 Curves of acoustic emission ringing counts and load of concrete in cyclic tensile failure experiment

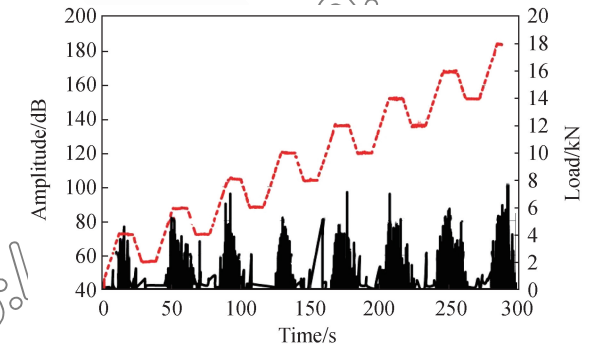


图 6 循环拉伸试验中混凝土声发射幅值与荷载历程关系曲线
Fig. 6 Curves of acoustic emission amplitude and load of concrete in cyclic tensile failure experiment

幅值)均表现出一致的变化规律。动态荷载增加阶段，声发射信号持续产生；荷载稳定阶段，由于损伤需要时间累积，故仍然有声发射信号产生；动态荷载减小阶段，声发射信号持续减弱，更多情况下不产生声发射信号。当动态荷载经过减小并稳定一段时间继续增加时，声发射信号的产生规律发生巨大变化，不同于第一个动态加载循环开始加载便有

声发射信号产生,而是动态荷载增加到一定程度后,才出现声发射信号。

为了更加准确表述声发射信号的变化规律,在图 5 中绘出了 3 条实线折线,在混凝土棱柱体动态加载的第二个循环中,随着动态荷载的增加,并没有很快产生声发射信号,而是当第二个循环动态荷载值达到并超过第一个循环荷载最大值后,才出现有明显的声发射信号,依次类推,在第三个、第四个……第 n 个循环荷载降低和降低后的稳定阶段,均没有产生明显的声发射信号,只有下一个动态循环荷载超过前一个动态荷载最大值后,才出现明显的声发射信号。对比混凝土静态循环荷载破坏时的声发射信号特征^[21-22],在循环动态荷载作用下,棱柱体混凝土试件声发射信号同样具有明显的 Kaiser 效应。

2.2 中央带裂缝混凝土试件的初始裂缝宽度对 Felicity 比的影响

中央带预制裂缝不同宽度(20 mm、30 mm、40 mm、50 mm)混凝土棱柱体试件动态轴向拉伸试验声发射上升时间、幅值与荷载历程关系曲线如图 7 和图 8 所示。可知,混凝土棱柱体动态轴向拉伸声发射上升时间和幅值均表现出明显的 Kaiser 效应。由于 Kaiser 效应仅能定性描述,为此, Felicity 在研究复合材料的声发射特性时发现,复合

材料在循环加载过程中,声发射过程的不可逆程度与材料在前期荷载作用下所产生的损伤程度有关。在较高的应力水平下,损伤较严重时, Kaiser 效应失效,当前应力小于前期所受过的最高应力水平时声发射信号就开始显著增多,即出现 Felicity 效应。在往复加载过程中,不同循环的声发射不可逆程度是不一样的。这种不可逆程度可通过不可逆比表示,在每一次循环中,声发射过程的不可逆比(又称为 Felicity 比)为^[23]

$$FR_i = \frac{\sigma_{i+1}}{\sigma_i} \tag{1}$$

式中: FR_i 为第 i 次循环中的 Felicity 比; σ_i 为第 i 次加载所达到的应力水平; σ_{i+1} 为第 $i+1$ 次加载过程中恢复有效声发射时的应力水平。 FR_i 又可表示为

$$FR_i = \frac{\sigma_{i+1}}{\sigma_i} = \frac{\frac{F_{i+1}}{A}}{\frac{F_i}{A}} = \frac{F_{i+1}}{F_i} \tag{2}$$

式中: F_i 为第 i 次加载所达到的荷载水平; F_{i+1} 为第 $i+1$ 次加载过程中恢复有效声发射时的荷载水平; A 为试件的截面积。

根据 Kaiser 效应的定义,只有当 $FR_i = 1$ 时, Kaiser 效应才是严格有效的,而当 $FR_i < 1$ 时可以认为 Kaiser 效应失效。

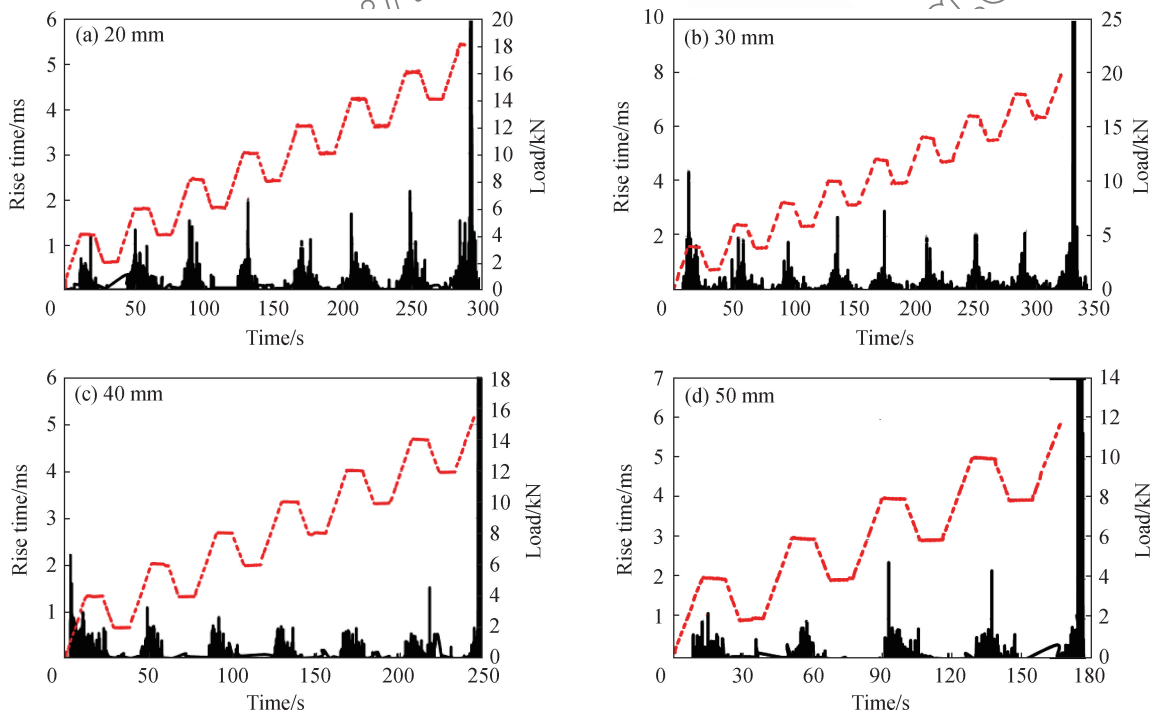


图 7 不同中央带预制裂缝宽度混凝土动态拉伸试验声发射上升时间与荷载历程关系曲线

Fig. 7 Curves of acoustic emission rise time and load of dynamic tensile experiment of concrete with different central crack width

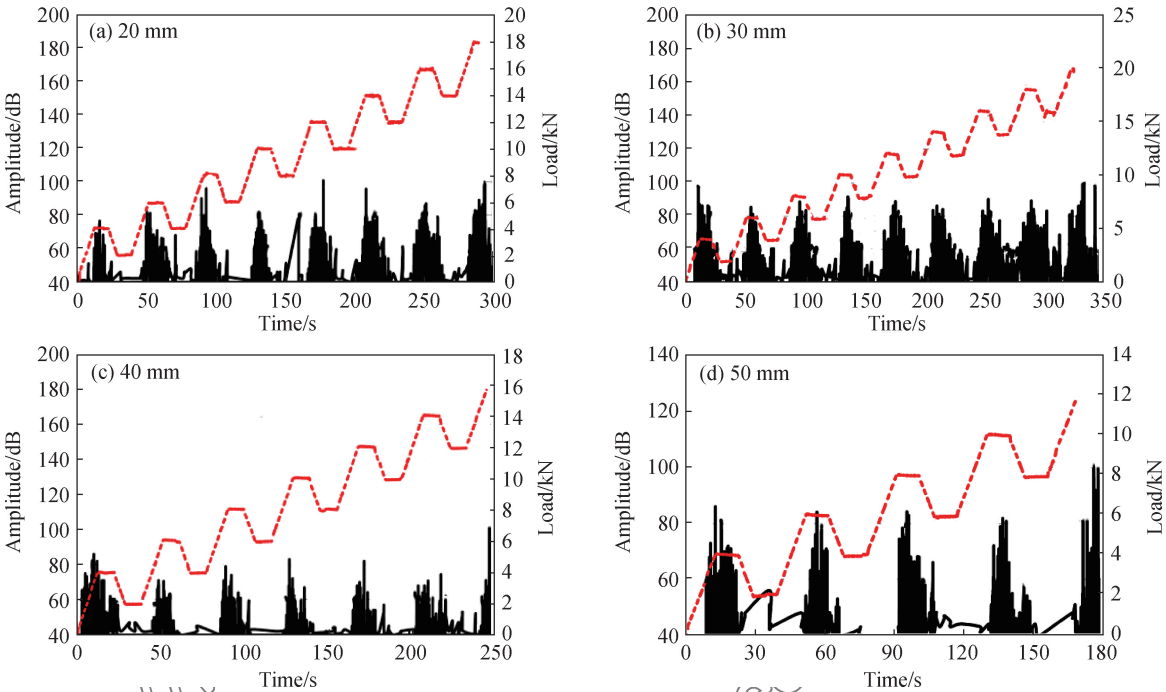


图8 不同中央带预制裂缝宽度混凝土动态拉伸试验声发射幅值与荷载历程关系曲线

Fig. 8 Curves of acoustic emission amplitude and load of dynamic tensile experiment of concrete with different central crack width

通过上述分析可得中央带不同预制裂缝宽度混凝土棱柱体试件轴向拉伸 Felicity 比, 如表 1 所示。图 9 为混凝土棱柱体试件轴向动态拉伸声发射 Felicity 比随中央带预制裂缝宽度变化曲线。可知, 随着中央预制裂缝宽度的增加, Felicity 比呈增加趋势。采用本文循环加载方式时, 荷载超过上一循环最大值之前, 混凝土内部的损伤有足够的时间得到充分发展, 因此, 在下一循环荷载值达到前一循环的最大值之前, 混凝土试件不会产生声发射信号。对于预制裂缝相对较宽的混凝土试件, 由于混

凝土结构内部遭受损伤程度更加严重, 产生声发射信号的时间较上一次将逐渐推迟, 故 Felicity 比逐渐增大。

但由于试验难免会存在一定的误差, 因此在 Kaiser 效应研究领域, 研究者一般认为只要 Felicity 比不小于 0.90, Kaiser 效应依然有效^[24-26]。Felicity 比作为一种定量参数, 较好地反映材料中原先所受损伤或结构缺陷的严重程度, 可以作为材料缺陷严重性的重要评定判据。因此, Felicity 比不仅可以

表 1 不同裂缝宽度混凝土动态拉伸 Felicity 比

Table 1 Felicity ratios of dynamic uniaxial tension of concrete with different crack width

Crack width/mm	Cycle times	1	2	3	4	5	Average value
20	$F_i(n)$	4.00	6.00	8.00	10.00	12.00	—
	$F_i(n+1)$	4.32	6.38	8.53	10.85	12.24	—
	FR_i	1.080	1.063	1.066	1.085	1.020	1.063
30	$F_i(n)$	4.00	6.00	8.00	10.00	12.00	—
	$F_i(n+1)$	4.84	7.30	8.92	11.16	13.46	—
	FR_i	1.210	1.217	1.115	1.116	1.122	1.156
40	$F_i(n)$	4.00	6.00	8.00	10.00	12.00	—
	$F_i(n+1)$	4.86	6.88	9.14	11.38	12.85	—
	FR_i	1.215	1.147	1.143	1.138	1.071	1.143
50	$F_i(n)$	4.00	6.00	8.00	10.00	—	—
	$F_i(n+1)$	5.41	7.38	9.65	11.68	—	—
	FR_i	1.353	1.230	1.206	1.168	—	1.239

Notes: $F_i(n)$ —Cycle numbers of the (n)th time; $F_i(n+1)$ —Cycle numbers of the (n+1)th time; FR_i —Felicity ratios.

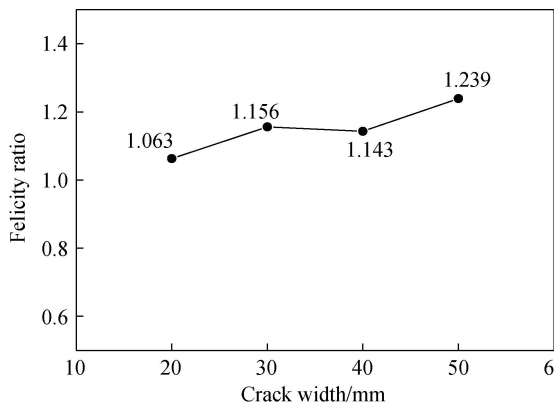


图9 混凝土 Felicity 比与中央带预制裂缝宽度变化曲线

Fig. 9 Curves of Felicity ratios and crack width of concrete

所承载的最高应力水平,还可以推断混凝土结构前期的最高应变水平和损伤水平。

3 结 论

通过试验建立了循环拉伸状态下混凝土声发射损伤模式,提出一种利用声发射记忆性评价混凝土结构安全性的新方法。

(1) 声发射特征参量有效表征混凝土试件的受力历史和损伤程度,可用于实时监测试件的受载变化过程。

(2) 循环动态荷载作用下,轴向拉伸棱柱体混凝土试件声发射信号具有明显的 Kaise 效应。

(3) 动态轴向循环荷载作用下,随着初始预制裂缝宽度的增加,混凝土棱柱体试件 Felicity 比逐渐增大。

参考文献:

[1] HADDA H, JEAN FRANCOIS T, MOHAMED C. Comparative study of acoustic emission and scanning electron microscope to evaluate fracture process zone in concrete beams[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(11): 1156-1163.

[2] FAN X Q, HU S W, LU J, et al. Acoustic emission properties of concrete on dynamic tensile test[J]. Construction and Building Materials, 2016, 114: 66-75.

[3] 李旭, 霍林生, 李宏男. 基于声发射的钢筋混凝土梁承载力评估[J]. 振动与冲击, 2013, 32(5): 6-9.

LI Xu, HUO Linsheng, LI Hongnan. Carrying capacity assessment of reinforced concrete beam based on acoustic emission[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(5): 6-9 (in Chinese).

[4] 周伟, 孙诗茹, 冯艳娜, 等. 风电叶片复合材料拉伸损伤破坏声发射行为[J]. 复合材料学报, 2013, 30(2): 240-246.

ZHOU Wei, SUN Shiru, FENG Yanna, et al. Acoustic emission behavior on tensile failure of composite for wind turbine blades[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(2): 240-246 (in Chinese).

[5] FAN X Q, HU S W, LU J. Damage and fracture processes of concrete using acoustic emission parameters[J]. Computers and Concrete, 2016, 18(2): 267-278.

[6] OHNO K, OHTSU M. Crack classification in concrete based on acoustic emission[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(12): 2339-2346.

[7] 胡少伟, 陆俊, 范向前. 混凝土损伤断裂性能试验研究进展[J]. 水利学报, 2014, 45(S1): 10-18.

HU Shaowei, LU Jun, FAN Xiangqian. Summary of experimental study on fracture properties of concrete[J]. Shuili Xuebao, 2014, 45(S1): 10-18 (in Chinese).

[8] GEORG K K, THOMAS V. Classification of the damage condition of preloaded reinforced concrete slabs using parameter-based acoustic emission analysis[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(12): 2332-2338.

[9] SANTOSH C S, CHANDRA K J M. Fracture behavior of concrete-concrete interface using acoustic emission technique[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 77(6): 908-924.

[10] 季文玉, 李旺旺, 付尧, 等. 预应力活性粉末混凝土受弯过程声发射特性[J]. 复合材料学报, 2018, 35(10): 2860-2870.

JI Wenyu, LI Wangwang, FU Yao, et al. Acoustic emission behavior of prestressed reactive powder concrete under flexural loads[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(10): 2860-2870 (in Chinese).

[11] 吴胜兴, 王岩, 沈德建. 混凝土及其组成材料轴拉损伤过程声发射特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(7): 21-27.

WU Shengxing, WANG Yan, SHEN Dejian. Experimental study on acoustic emission characteristics of the damage process of concrete and its components under uniaxial tension[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(7): 21-27 (in Chinese).

[12] 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).

[13] AGGELIS D G, SHIOTANI T, TERAZAWA M. Assessment of construction joint effect in full-scale concrete beams by acoustic emission activity[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 136(7): 906-912.

- [14] 龙小江, 李秋锋, 何才厚, 等. 不同拉伸速率下钢材损伤的声发射监测评价[J]. 振动与冲击, 2017, 36(7): 219-225.
LONG Xiaojiang, LI Qiufeng, HE Caihou, et al. Acoustic emission monitoring and evaluation for rolled steel damage under different tensile rates[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(7): 219-225 (in Chinese).
- [15] 李冬生, 侯吉林, 曹海. 聚乙烯醇纤维混凝土温度疲劳损伤演化声发射监测技术研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(24): 93-97.
LI Dongsheng, HOU Jilin, CAO Hai. Polyvinyl alcohol fiber concrete temperature fatigue damage evolution and evaluation with acoustic emission technique[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(24): 93-97 (in Chinese).
- [16] 纪洪广, 李造鼎. 混凝土材料 Kaiser 效应与 Felicity 效应关系的试验研究[J]. 应用声学, 1997, 16(6): 30-33.
JI Hongguang, LI Zaoding. Experiment study on the relationship of Kaiser and Felicity effect in concrete material[J]. Acta Acoustica, 1997, 16(6): 30-33 (in Chinese).
- [17] PRASAD B K R, SAGAR R V. Relationship between AE energy and fracture energy of plain concrete beams: Experimental study[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008(3): 212-220.
- [18] SCHECHINGER B, VOGEL T. Acoustic emission for monitoring a reinforced concrete beam subject to four-point bending[J]. Construction and Building Materials, 2007(24): 483-490.
- [19] 魏俊, 赵建华. 纤维增强复合材料声发射的 Felicity 效应[J]. 复合材料学报, 1992, 9(1): 65-69.
WEI Jun, ZHAO Jianhua. The Felicity effect of the acoustic emission in composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1992, 9(1): 65-69 (in Chinese).
- [20] 范向前, 胡少伟, 陆俊, 等. 混凝土静动态轴向拉伸力学性能[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(11): 1349-1354.
FAN Xiangqian, HU Shaowei, LU Jun, et al. Static and dynamic axial tension properties of concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 42(11): 1349-1354 (in Chinese).
- [21] KAISER J. An investigation into the occurrence of noises in tensile tests or a study of acoustic phenomena in tensile tests [D]. Munich: Technische Universität München, 1950.
- [22] 纪洪广. 混凝土材料声发射性能研究与应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
JI Hongguang. Some problems on parameter statistics in rock mechanics[M]. Beijing: China Coal Industry Press, 2004 (in Chinese).
- [23] American Society for Testing Materials. Standard terminology for nondestructive examinations, annual book of ASTM standards, nondestructive testing: ASTM E 1316[S]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 2014.
- [24] 吴胜兴, 张顺祥, 沈德建. 混凝土轴心受拉声发射 Kaiser 效应试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(4): 31-39.
WU Shengxing, ZHANG Shunxiang, SHEN Dejian. An experimental study on Kaiser effect of acoustic emission in concrete under uniaxial tension loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(4): 31-39 (in Chinese).
- [25] 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).
- [26] KOCUR G K, VOGEL T. Classification of the damage condition of preloaded reinforced concrete slabs using parameter-based acoustic emission analysis[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(12): 2332-2338.