

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202009045



高强自密实再生块体混凝土 单轴受压声发射特性

洪铁东^{1,2}, 张大山^{1,2}, 王卫华^{1,2}, 蔡敏伟^{1,2}

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 厦门市抗火综合防灾工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

摘要: 为研究高强自密实再生块体混凝土单轴受压声发射特性,对取代率分别为 0%,10%,20%的立方体混凝土试块进行轴心受压试验.将受压破坏过程分为 4 个阶段,引入活跃系数对能量进行分析,并通过 b 值-能量分析判断裂纹的开展程度和试块的损伤情况.结果表明:随着取代率的提高,峰值应力前声发射活动强度显著增加,能量越早出现爆炸性增长;活跃系数随应力进程先升高后降低,活跃系数可作为混凝土是否适合继续服役的判断标准;通过 b 值-能量分析能够准确地判断裂纹的开展程度和试块的损伤情况.

关键词: 声发射; 自密实再生块体混凝土; 能量; 活跃系数; b 值

中图分类号: TU 375.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2021)03-0351-07

Acoustic Emission Characteristics of High-Strength Self-Compacting Recycled Lump Concrete Under Uniaxial Compression

HONG Tiedong^{1,2}, ZHANG Dashan^{1,2},
WANG Weihua^{1,2}, CAI Minwei^{1,2}

(1. College of Civil Engineer, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Xiamen Engineering Research Center for Fire Resistance and Disaster Prevention,
Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to study the acoustic emission characteristics of high-strength self-compacting recycled lump concrete under uniaxial compression, the axial compression tests were carried out on the cube concrete specimens with replacement rates of 0%, 10% and 20% respectively. The compression failure process was divided into four stages, the active coefficient was introduced to analyze the energy, and according to the b value energy analysis, the crack development degree and the damage condition of the specimens were judged. The results show that: with increasing the replacement rates, the intensity of acoustic emission activity before peak stress increases significantly, and the energy increases explosively earlier. The active coefficient initially increases and then decreases with the stress process, which could be used as a criterion to judge whether the concrete is suitable for continuous service. According to the b value energy analysis, the crack development degree and the damage condition of the specimens could be accurately judge.

收稿日期: 2020-09-29
通信作者: 王卫华(1980-),男,副教授,博士,主要从事钢-混凝土组合结构的研究. E-mail:whwang@hqu.edu.cn.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208217);福建省泉州市科技计划项目(2017T002);华侨大学研究生科研创新基金资助项目(18013086011)

Keywords: acoustic emission; self-compacting recycled lump concrete; energy; active coefficient; *b* value

声发射(AE)是材料在外部荷载作用下发生变形或损坏时释放的应变能产生瞬态弹性波的现象. 每一个声发射信号对应材料损伤的产生或状态的变化,通过对声发射信号的采集、记录和分析,可以实现对材料破坏源机制的分析与追踪. 声发射技术作为一种无损检测技术,具有实时性强、动态度和灵敏度高优点,已广泛地应用于金属、岩石及各种复合材料的破坏机理研究中^[1-5].

Rusch^[6]首次将声发射技术应用于混凝土材料中,而后国内外学者也对混凝土材料的声发射特性进行研究. 郭庆华等^[7]对抗压强度为 10~40 MPa 的 4 种混凝土进行声发射特性分析,对混凝土声发射事件进行三维空间定位,从微观上探明受载混凝土裂纹的萌生、发展和贯通的演化规律. Ohno 等^[8]基于声发射理论对混凝土进行裂缝分类,通过对振幅比值-平均频率(RA-AF)关联分析和基于信号的矩张量分析格林函数方法进行裂缝的断裂模式辨别,发现在一定比例下后者的分析方法比前者更加准确. 任会兰等^[9]结合改进的时差定位算法和矩张量理论对声发射信号进行分析,反演混凝土巴西劈裂破坏中裂纹位置、裂纹类型和裂纹面运动方向,揭示混凝土宏观拉伸破坏的细观裂纹扩展机制. 段力群等^[10]通过声发射技术研究 2 种不同抗压强度的泡沫混凝土单轴压缩下的内部损伤演化规律,发现下降阶段的事件累计、事件率和能率都急剧增加,相较于峰值应力,声发射事件率和能率峰值具有时间滞后性. 李建涛等^[11]对不同初始缺陷的混凝土单轴压缩下内部损伤破坏的影响规律进行声发射试验,随着初始损伤的逐渐增大,压密阶段的时间不断增加,双峰特征逐渐不明显,立方体抗压强度显著降低. Xu 等^[12]利用声发射技术对 4 种不同骨料取代率的再生骨料混凝土和肋筋之间的粘结进行声发射撞击和能量分析、事件定位、平均频率分析、*b* 值分析和 RA-AF 关联分析等.

目前,已有的研究对大部分不同类型混凝土的声发射特性均有涉及,但对高强自密实再生块体混凝土进行声发射特性的研究尚未报导. 自密实再生块体混凝土是指将废弃混凝土进行破碎、清洗后,把特征尺寸范围为 60~300 mm^[13]的旧混凝土块状物作为旧混凝土块体,再将旧混凝土块体与自密实混凝土混合搅拌、振捣形成自密实再生块体混凝土. 目前,已有学者将再生块体混凝土应用于梁、板和柱的研究中^[14-16]. 基于此,本文对高强自密实再生块体混凝土受载破坏过程的声发射特性进行研究.

1 试验设计 及 方法

1.1 试验设备及方法

试验采用华侨大学结构实验室的电液伺服万能试验机及 Micro-II 型多通道数字声发射系统(美国 MISTRAS 公司). 试验系统示意图,如图 1 所示.

试验过程采用位移加载,按照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行试验,加载速度为 0.18 mm·min⁻¹. 布置 4 个传感器(R6-A 谐振式,门槛为 40 dB),分别置于试块 4 个侧面的中部;前置放大器增益为 40 dB.

1.2 试块制样

自密实混凝土配合比的水泥、水、砂、石子、减水剂、粉煤灰、矿粉的质量浓度分别为 293.0,166.0,798.0,892.0,7.3,63.0,21.0 kg·m⁻³. 自然养护 28 d 后,自密实混凝土的实测抗压强度为 64.63 MPa.

制作旧混凝土块体的取代率分别为 0%,10%,20%的 3 组立方体混凝土试块(即高强自密实再生块体混凝土,编号为 C0~C2),每组 2 个试块(C0 组的编号为 C0-1,C0-2,其他类似),试块尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm(长×宽×高). 浇筑前,将旧混凝土块体于清水中浸泡 24 h,以充分吸收水分. 制作试块时,先在模具底部加入厚度约 20 mm 的自密实混凝土;然后,交替放入旧混凝土块体(抗压强度为 87.60 MPa)和自密实混凝土,并用自密实混凝土把模具

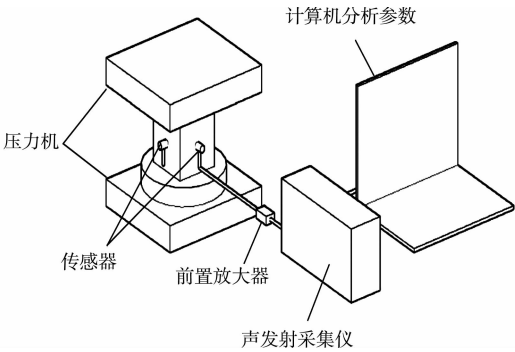


图 1 试验系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of test system

填满;最后,在振动台上机械振捣 30 s. 完成试块浇筑后进行自然养护,试验龄期为 60 d,测得立方体混凝土试块的抗压强度,如表 1 所示. 表 1 中: η 为取代率; f_c 为抗压强度.

2 受压过程的声发射信号分析

声发射能量(简称能量)是声发射信号波形包络下的面积,与上升时间和幅值有关,可反映声发射信号的强度,从而评价材料的损伤程度. 声发射能量能够较好地反映混凝土结构的损伤变化情况.

在试验中,虽然每个试块采用 4 个通道收集声发射信号,但 4 个通道采集的声发射信号并无明显差异,故只取通道 1 的数据进行分析. 通过应力(σ)、时间(t)、能量(E)、累计能量(E_{acc})等参数分析高强自密实再生块体混凝土的受压过程,并根据能量的变化趋势将整个受压过程分为 4 个阶段(阶段 I ~ IV),如图 2 所示.

表 1 立方体混凝土试块的抗压强度
Tab. 1 Compressive strength of cube concrete specimens

| 试块编号 | $\eta/\%$ | f_c/MPa |
|------|-----------|------------------|
| C0-1 | 0 | 70.79 |
| C0-2 | 0 | 68.20 |
| C1-1 | 10 | 72.73 |
| C1-2 | 10 | 73.82 |
| C2-1 | 20 | 70.13 |
| C2-2 | 20 | 67.67 |

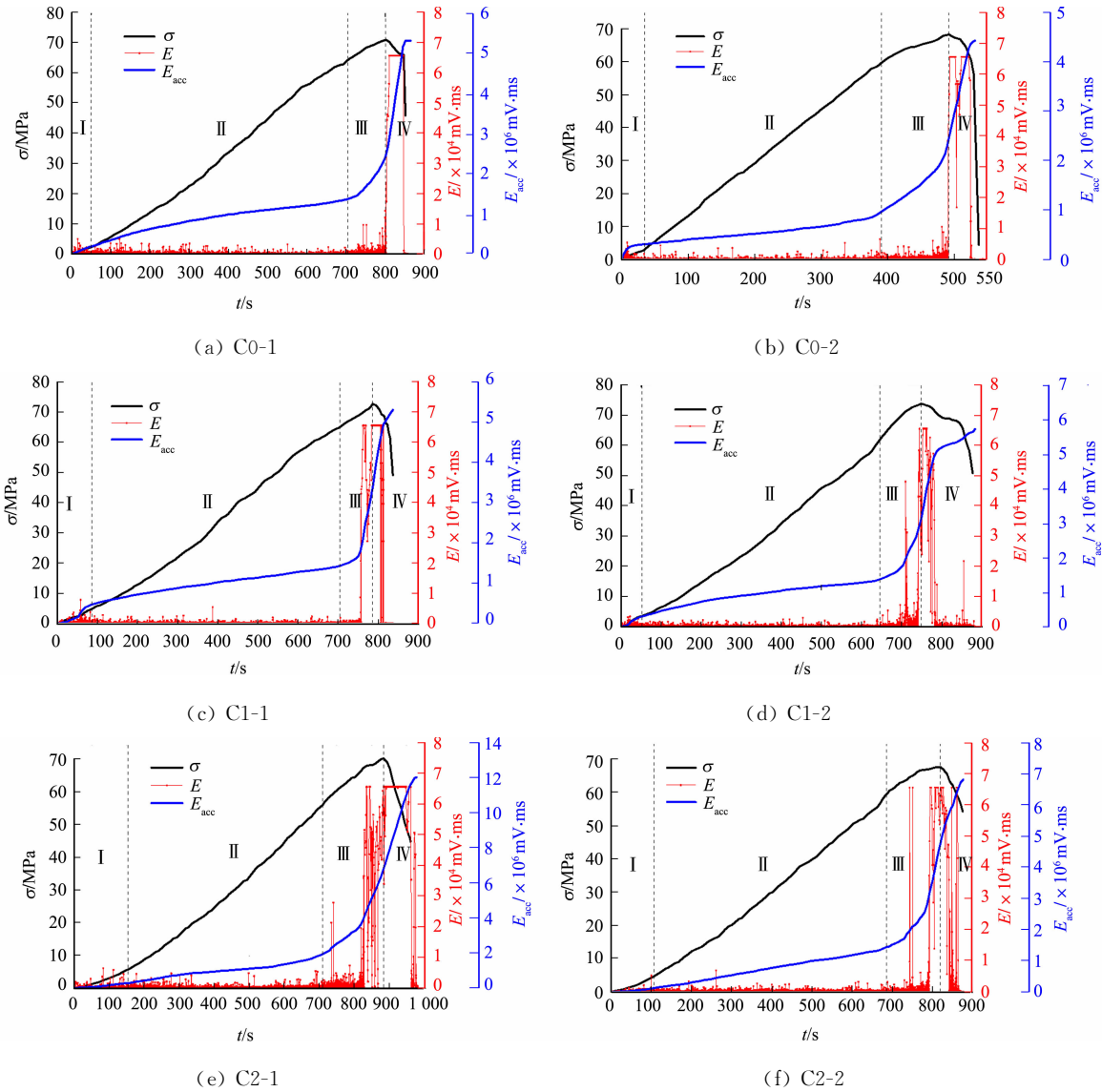


图 2 能量、应力、累计能量与时间的变化关系

Fig. 2 Relationship among energy, stress, accumulation energy and time

1) 压实阶段(阶段 I),荷载为峰值荷载的 8% 以内. 此阶段,应力随时间的变化呈现出凹函数曲线,混凝土内部的微孔隙、微裂缝被压实,在压实过程中,微颗粒出现相对错位、滑移,并产生声发射信

号. 声发射能量整体呈先上升后下降的趋势, 在下降阶段, 大部分微孔隙、微裂缝已经基本被压实, 声发射活动逐渐趋于平缓.

2) 裂缝稳定发展阶段(阶段Ⅱ), 荷载约为峰值荷载的 8%~90%. 此阶段, 混凝土内部持续受荷, 应力随时间的变化呈近线性上升, 声发射能量整体较为平稳, 累计能量随荷载的变化呈近线性增加. 此时, 混凝土内部产生细微裂纹, 但结构尚未出现较大损伤, 观察试验现象未出现明显裂缝.

3) 破坏阶段(阶段Ⅲ), 荷载约为峰值荷载的 90%~100%. 此阶段, 声发射能量开始增大, 进入活跃期, 累计能量快速上升, 斜率显著增加, 试块持续产生微裂纹, 并在内部扩大连通成较大尺度的裂纹, 但试件表面仍未出现明显裂缝. 此时, 混凝土内部的结构已出现较大损伤.

4) 下降阶段(阶段Ⅳ), 峰值荷载后至试验结束. 此阶段, 应力开始下降, 声发射能量保持在较高水平, 微裂纹持续扩大、扩宽, 直至形成贯穿试块的宏观裂缝, 混凝土内部的裂缝快速贯穿, 试块突然崩裂.

自密实混凝土流动性高、均匀性好, 胶凝材料之间的内聚力及胶凝材料和骨料之间的粘结都很好, 混凝土初始微孔隙、微裂纹较少. 当应力约为峰值应力的 8% 时, 自密实再生块体混凝土被压实, 而普通混凝土在荷载约为峰值荷载的 20% 时被压实; 当应力约为峰值应力的 90% 时, 自密实再生块体混凝土进入破坏阶段.

3 组试块在阶段Ⅰ, Ⅱ 无较大差异; 在阶段Ⅲ时, 试块 C0 的微裂纹增多, 累计能量曲线迅速上升, 能量较前两个阶段略有增加, 但未出现较大能量. 由于旧混凝土块体本身存在一定数量的微裂纹等固有缺陷, 且新、旧混凝土界面的粘结效果劣于自密实混凝土, 因此, 试块在峰值荷载前微裂纹扩展为较大的裂纹, 使试块 C1, C2 在峰值荷载前就出现能量的爆炸性增长, 且试块 C2 比试块 C1 出现得更早, 而试块 C0 在峰值荷载后才出现能量突增. 因此, 随着取代率的提高, 块体自身的开裂及块体与砂浆的界面连接处的开裂开始增多, 使累计能量增大.

综上所述, 3 组试块抗压强度较高, 添加高强块体对自密实混凝土的抗压强度影响不大, 试块破坏时带有明显的脆性破坏特征, 突然崩裂并伴随着巨大响声; 随着取代率的提高, 能量突增现象会提前, 在能量突增前, 试块表面未发现明显裂缝, 但其内部已有较大的损伤积累; 通过声发射监测技术能够在试块发生破坏前监测到能量突增, 可以此进行预警.

3 声发射能量参数的统计分析

为了更加具体地对声发射活动的活跃程度进行探究, 采用时域统计方法对能量均值(E_{ave})、能量峰值(E_p)和活跃系数(λ)等声发射能量参数进行分析.

当观测时间 T 趋于无穷时, T 期间信号的时间平均值(能量均值)是观测时间内任意信号 $x(t)$ 的平均值, 即

$$E_{ave} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt. \tag{1}$$

在观测时间 T 内, 信号 $x(t)$ 的值高于其他信号($x_i(t)$), 即信号峰值(能量峰值), 有

$$\left. \begin{aligned} E_p &= x(t), \\ x(t) - x_i(t) &\geq 0. \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

为了反映声发射的活跃程度, 引入活跃系数, 有

$$\lambda = \frac{E_p}{E_{ave}}. \tag{3}$$

以峰值应力的 10% 作为一个阶段进行分析, 到峰值应力的 90% 时, 由于能量增长较快, 取应力进程的 5% 作为一个阶段, 直至达到峰值应力. 由于试块强度较高, 在峰值应力后承载能力迅速下降, 下降阶段不作为分析对象, 故只取前 3 个阶段进行分析. 能量均值、能量峰值随应力进程的数值表, 如表 2 所示. 表 2 中: p_s 为应力进程.

活跃系数与应力进程的变化关系, 如图 3 所示.

由表 2 和图 2, 3 可知: 活跃系数随应力的变化呈先升后降的趋势, 在峰值应力的 90% 处, 活跃系数最大, 旧混凝土块体的添加对活跃系数的变化趋势没有影响; 应力进程为 10% 时的能量均值比应力进

表 2 能量均值、能量峰值随应力进程的数值表

Tab. 2 Numerical table of energy mean, energy peak with stress process

mV · ms

| $p_s/\%$ | C0-1 | | C0-2 | | C1-1 | | C1-2 | | C2-1 | | C2-2 | |
|----------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
| | E_{ave} | E_p | E_{ave} | E_p | E_{ave} | E_p | E_{ave} | E_p | E_{ave} | E_p | E_{ave} | E_p |
| 10 | 46.9 | 4 952 | 49.2 | 5 430 | 36.5 | 4 363 | 38.3 | 4 493 | 50.7 | 6 397 | 41.8 | 5 164 |
| 20 | 38.6 | 5 008 | 43.2 | 5 430 | 33.2 | 4 363 | 33.7 | 4 493 | 40.8 | 6 397 | 32.6 | 5 164 |
| 30 | 31.6 | 5 008 | 35.1 | 5 430 | 28.3 | 4 363 | 27.4 | 4 493 | 35.5 | 6 397 | 37.0 | 6 799 |
| 40 | 24.5 | 5 008 | 30.1 | 5 430 | 25.3 | 4 363 | 24.1 | 4 493 | 31.5 | 6 397 | 35.0 | 6 799 |
| 50 | 24.1 | 5 008 | 26.6 | 5 430 | 26.0 | 5 421 | 21.7 | 4 493 | 29.5 | 6 397 | 29.9 | 6 799 |
| 60 | 22.1 | 5 008 | 23.3 | 5 430 | 23.9 | 5 421 | 20.2 | 4 493 | 28.1 | 6 397 | 29.0 | 6 799 |
| 70 | 20.4 | 5 008 | 22.3 | 5 430 | 22.5 | 5 421 | 18.8 | 4 493 | 26.6 | 6 397 | 27.8 | 6 799 |
| 80 | 19.3 | 5 008 | 21.7 | 5 430 | 20.5 | 5 421 | 17.6 | 4 493 | 25.5 | 6 397 | 26.3 | 6 799 |
| 90 | 18.4 | 5 008 | 24.6 | 6 542 | 20.1 | 5 421 | 19.4 | 5 323 | 24.0 | 6 397 | 24.8 | 6 799 |
| 95 | 19.2 | 5 008 | 25.8 | 6 542 | 22.7 | 5 421 | 23.1 | 5 323 | 126.3 | 27 839 | 129.4 | 28 748 |
| 100 | 87.3 | 17 475 | 48.7 | 10 623 | 1 910.7 | 65 535 | 3 101.8 | 65 535 | 2 819.7 | 65 535 | 1 963.3 | 65 535 |

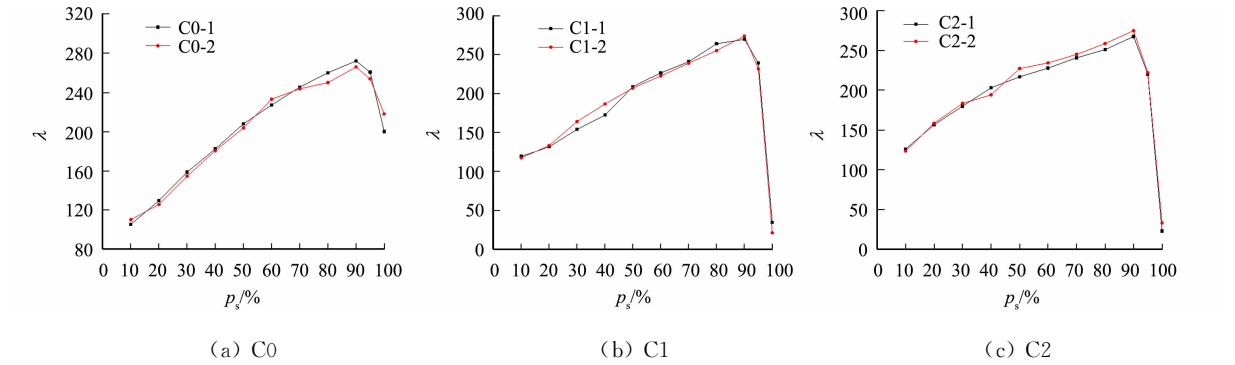


图 3 活跃系数与应力进程的变化关系

Fig. 3 Relationship between active coefficient and stress process

程为 90% 时的能量均值更大, 能量均值整体呈下降趋势, 应力进程为 10% 时达到能量峰值后, 能量峰值没有显著地变化, 因而活跃系数随应力进程呈上升趋势; 在活跃系数的上升阶段, 试块 C0~C2 的活跃系数变化范围分别为 106~272, 117~274 和 124~275, 随着取代率的提高而略有升高, 但差别不大; 到达应力峰值后, 3 组试块的活跃系数开始变小, 试块 C0 的活跃系数由 272 左右快速下降到 200 左右, 而试块 C1, C2 的活跃系数分别从 274, 275 左右快速下降到 21, 23 左右, 试块 C1, C2 的活跃系数下降幅度比试块 C0 更大; 随着取代率的提高, 再生块体或砂浆界面处的开裂增多, 能量均值增大, 活跃系数在应力进程为 95% 处的下降幅度增大; 应力进程为 90% 后, 试块出现开裂, 声发射信号能量开始普遍增大, 特别是试块 C1, C2 出现持续的高能量, 能量均值显著增大, 活跃系数变小。

活跃系数随应力进程先增大后减小, 活跃系数最大时, 继续承受荷载会使试块出现致命损伤, 活跃系数的快速持续降低可作为混凝土是否适合继续服役的判断标准; 当荷载超过峰值荷载的 90% 时, 活跃系数由上升阶段进入快速下降阶段, 即可判定高强自密实再生块体混凝土不适合继续服役。

4 b 值-能量分析

b 值分析法起源于地震学, b 值的变化可反映地震的震级与频度的关系。材料脆性破坏产生的弹性波与地震波具有相似性, 故 b 值分析法在声发射信号分析中得到了广泛的应用。b 值定义为

$$\lg N = a - b \cdot \lg A. \tag{4}$$

式(4)中: N 为声发射的事件数; A 为声发射的撞击幅值; a 为常数; b 为线性拟合数, 可用于表征自密实再生块体混凝土裂纹开展和损伤程度, b 值较高时, 表示裂纹的开展规模和损伤程度较小, b 值较低时, 表示裂纹的开展规模和损伤程度较大。

结合 b 值分析和能量分析两者的优点可以准确判定裂纹的开展程度和试块的损伤情况。每隔 12.8 s 计算声发射信号的 b 值。能量、b 值与时间的变化关系, 如图 4 所示。由于凯塞(Kaiser)效应, 在峰值荷

载后基本测不到声发射事件数,故只计算阶段Ⅰ~Ⅲ的 b 值。

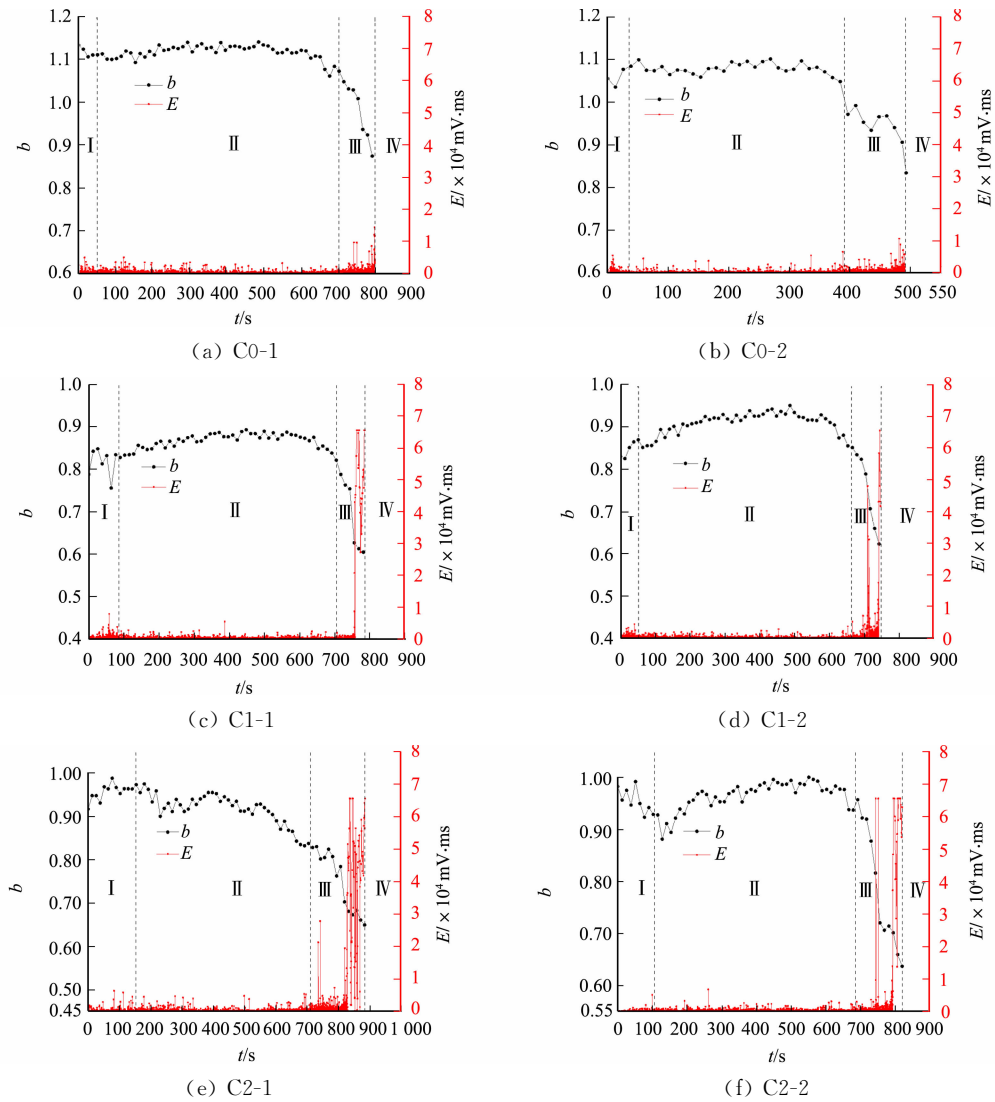


图4 能量、 b 值与时间的变化关系

Fig. 4 Relationship between energy, b value and time

由图4可得以下3点结论. 1) 在阶段Ⅰ,Ⅱ中, b 值的整体变化幅度较小,声发射能量整体较低也较稳定;试块C0的 b 值范围为1.035~1.140,变化幅度为9.2%~10.1%;试块C1,C2的 b 值范围分别为0.756~0.950,0.833~0.992,变化幅度分别为20.4%~25.7%,16.0%~19.1%. 2) 在阶段Ⅲ中,试块C0~C2的 b 值范围分别为0.834~1.048,0.604~0.855,0.637~0.957,变化幅度分别为20.4%~25.7%,29.4%~41.6%,33.4%~50.2%;相较于前两个阶段,阶段Ⅲ的变化幅度增大, b 值整体呈下降趋势,声发射能量变化明显,特别是能量突增处的 b 值下降显著. 3) 相较于阶段Ⅰ,Ⅱ,阶段Ⅲ的 b 值变小且变化幅度更大,说明试块开始出现较大裂纹,损伤程度增大。

整体而言,试块C1,C2的 b 值比C0更小,这是因为加入旧混凝土块体后,骨料与砂浆的连接界面破坏时产生的声发射信号增多, b 值变小;在阶段Ⅰ,Ⅱ中,试块处于弹性阶段,微裂纹较少,产生的信号幅值也较小,故 b 值较大,进入阶段Ⅲ后,试块开始产生较大、较多的裂纹,声发射事件数增多且幅值增大,故 b 值变小;试块的最小 b 值均在峰值应力处,说明到达峰值应力时试块有较大损伤。

5 结论

1) 不同取代率的高强自密实再生块体混凝土的受压破坏都经过压实阶段、裂缝稳定发展阶段、破坏阶段和下降阶段,取代率对试块抗压强度的影响较小,随着取代率的提高,累计能量增大,能量的突增现象在峰值应力之前更早出现,可作为破坏前的预警信息,以便及时采取措施。

2) 引入活跃系数对应力进程的能量参数进行统计分析,活跃系数随应力进程先增大后减小,在峰值应力约90%处,活跃系数快速下降;随着取代率的提高,活跃系数由270左右迅速下降至20左右。活跃系数的快速持续降低可作为混凝土是否适合继续服役的判断标准。

3) b 值-能量分析可准确判断高强自密实再生块体混凝土轴压破坏过程中裂纹的开展程度和试块的损伤情况,在阶段Ⅰ,Ⅱ中, b 值较大且变化幅度较小,裂纹的开裂程度与试块的损伤较小;在阶段Ⅲ中, b 值变小,裂纹的开裂程度与试块的损伤较大。随着取代率的提高, b 值变小, b 值的变化幅度增大。

参考文献:

- [1] WOO S C, KIM J T, KIM J Y, *et al.* Correlation of fracture processes and damage mechanisms of armor structural materials under high strain rates with acoustic emission characteristics[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 63: 29-42. DOI: 10. 1016/j. ijimpeng. 2013. 07. 007.
- [2] CHANG S H, LEE C I. Estimation of cracking and damage mechanisms in rock under triaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41 (7): 1069-1086. DOI: 10. 1016/j. ijrmms. 2004. 04. 006.
- [3] FARHIDZADEH A, DEHGHAN-NIRI E, SALAMONE S, *et al.* Monitoring crack propagation in reinforced concrete shear walls by acoustic emission[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139(12): 4013010(1-10). DOI: 10. 1061/(ASCE)ST. 1943-541X. 0000781.
- [4] 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: 460-472. DOI: 10. 1016/j. constrbuildmat. 2014. 07. 076.
- [5] 张建春, 张大山, 董毓利, 等. 火灾下钢-混凝土组合楼盖的声发射监测及分析[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(2): 156-163. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 201809041.
- [6] RUSCH H. Physical problems in testing of concrete[J]. *Zement Kalk Gips*, 1959, 12(1): 1-9.
- [7] 郭庆华, 邵保平, 李志伟, 等. 混凝土声发射信号频率特征与强度参数的相关性试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(4): 1482-1488. DOI: 10. 11817/j. issn. 1672-7207. 2015. 04. 040.
- [8] OHNO K, OHTSU M. Crack classification in concrete based on acoustic emission[J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24: 2339-2346. DOI: 10. 1016/j. constrbuildmat. 2010. 05. 004.
- [9] 任会兰, 宁建国, 宋水舟, 等. 基于声发射矩张量分析混凝土破坏的裂纹运动[J]. *力学学报*, 2019, 51(6): 1830-1840. DOI: 10. 6052/0459-1879-19-170.
- [10] 段力群, 董璐, 马林建, 等. 泡沫混凝土单轴压缩下声发射特征试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(4): 742-747. DOI: 10. 13247/j. cnki. jcumt. 000882.
- [11] 李建涛, 于江, 秦拥军, 等. 含不同初始缺陷混凝土单轴压缩条件下声发射特性试验研究[J]. *混凝土*, 2020(1): 7-10, 14. DOI: 10. 3969/J. ISSN. 1002-3550. 2020. 01. 002.
- [12] XU Jie, SHU Shenrui, HAN Qinghua, *et al.* Experimental research on bond behavior of reinforced recycled aggregate concrete based on the acoustic emission technique[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 191: 1230-1241. DOI: 10. 1016/j. constrbuildmat. 2018. 10. 054.
- [13] 广东省住房和城乡建设厅. 再生块体混凝土组合结构技术规程: DBJ/T 15-113—2016[S]. 北京: 中国城市出版社, 2016.
- [14] 吴波, 许喆, 刘琼祥, 等. 再生混合钢筋混凝土梁受剪性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(6): 99-106. DOI: 10. 14006/j. jzjgxb. 2011. 06. 002.
- [15] 吴波, 骆志成. 压型钢板再生混合混凝土组合楼板受力性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(5): 29-38. DOI: 10. 14006/j. jzjgxb. 2016. 05. 004.
- [16] 吴波, 刘伟, 刘琼祥, 等. 钢管再生混合短柱的轴压性能试验[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(2): 32-38. DOI: 10. 15951/j. tmgcxb. 2010. 02. 016.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)