

引用本文: 蔺鹏杰, 秦拥军, 于江, 等. 再生混凝土临界破坏特征及单轴压缩损伤本构方程[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(6): 19-26.  
LIN Pengjie, QIN Yongjun, YU Jiang, et al. Critical failure characteristics and uniaxial compression damage constitutive equation of recycled concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(6): 19-26.

DOI: 10.19815/j.jace.2022.01102

# 再生混凝土临界破坏特征及单轴压缩损伤本构方程

蔺鹏杰<sup>1</sup>, 秦拥军<sup>2</sup>, 于江<sup>2</sup>, 皮滢杰<sup>2</sup>

(1. 新疆工程学院 土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830023; 2. 新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 制作了5组不同再生粗骨料取代率的再生混凝土棱柱体试件并进行单轴压缩试验, 采集棱柱体试件单轴受压全过程声发射(AE)参数, 绘制单轴压缩应力-应变曲线。通过分析声发射能量参数, 绘制压缩破坏过程中时间-声发射累计能量曲线, 采用幂函数Power公式对该曲线进行拟合, 将试验曲线与拟合曲线进行对比, 结合能量加速释放理论对再生混凝土损伤过程声发射能量释放规律进行分析; 将声发射累计能量突增的时刻视为临界破坏点, 用受压全过程采集的声发射振铃计数定义损伤变量, 考虑再生掺量带来的初始损伤, 用再生粗骨料取代率百分数定义再生参数, 借助Weibull统计方法与损伤理论建立声发射损伤演化模型, 建立考虑再生粗骨料初始缺陷影响的声发射损伤本构方程, 并将新建方程拟合应力-应变曲线与试验曲线进行对比。结果表明: 拟合曲线与试验曲线吻合良好, 新方程能够较好地描述再生混凝土的损伤演化过程。

**关键词:** 再生混凝土; 声发射; 能量加速释放; 损伤本构方程

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)06-0019-08

## Critical failure characteristics and uniaxial compression damage constitutive equation of recycled concrete

LIN Pengjie<sup>1</sup>, QIN Yongjun<sup>2</sup>, YU Jiang<sup>2</sup>, PI Yanjie<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, Xinjiang, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi 830047, Xinjiang, China)

**Abstract:** Five groups of recycled concrete prism specimens with different recycled coarse aggregate replacement rates were made and uniaxial compression tests were carried out. The acoustic emission (AE) parameters of the whole process of uniaxial compression of the prism specimens were collected, and the uniaxial compression stress-strain curves were drawn. By analyzing the acoustic emission energy parameters, the time-acoustic emission cumulative energy curve in the process of compression failure was drawn, and the curve was fitted by the power function Power formula. The test curve was compared with the fitting curve, and the energy release law of acoustic emission energy in the damage process of recycled concrete was analyzed by combining the energy accelerated release theory. The time when the cumulative energy of acoustic emission increased suddenly was regarded as the critical failure point, and the damage variable

收稿日期: 2023-01-30

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金青年科学基金项目(2022D01B134); 国家自然科学基金项目(51668060, 51668061)

作者简介: 蔺鹏杰(1992-), 男, 讲师, E-mail: 1264957196@qq.com。

通信作者: 秦拥军(1970-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: xjulpjed@163.com。

was defined by the acoustic emission ringing count collected in the whole process of compression, considering the initial damage caused by the amount of recycled coarse aggregate, the regeneration parameters were defined by the percentage of recycled coarse aggregate replacement rate. The acoustic emission damage evolution model was established by means of Weibull statistical method and damage theory. The acoustic emission damage constitutive equation considering the influence of initial defects of recycled coarse aggregate was established, and the stress-strain curve fitted by the new equation was compared with the test curve. The results show that the fitting curve is in good agreement with the experimental curve, and the new equation can better describe the damage evolution process of recycled concrete.

**Key words:** recycled concrete; acoustic emission; energy accelerated release; damage constitutive equation

## 0 引言

为了达到保护环境的目的,实现资源的有效利用,建筑垃圾回收再利用是必然选择<sup>[1-2]</sup>,建筑行业为解决建筑垃圾有效利用的问题,展开了再生混凝土研究与应用。范红波等<sup>[3]</sup>研究了含小粒径再生粗骨料预制混凝土的基本力学性能,更好地实现了再生混凝土预制构件的工程应用。王建超等<sup>[4]</sup>研究了再生大骨料堆石混凝土力学性能,发现再生骨料粒径对混凝土力学性能的影响小于再生骨料原始强度。部分学者<sup>[5-6]</sup>将再生骨料应用于高性能混凝土,得出高性能混凝土材料的制备需再生骨料母体强度达到 60 MPa,但若要满足耐久性的要求,再生骨料取代率不宜超过 50%。王雪芳等<sup>[7]</sup>以不同养护龄期为变量,绘制了再生粗骨料混凝土轴向拉伸试验应力-应变全曲线,并建立了拉伸本构模型。

再生混凝土塑性差是阻碍再生混凝土应用发展的核心劣性,在研究如何提高再生混凝土塑性的同时,对于再生混凝土材料破坏预警的研究同样具有重要的应用价值。对于脆性材料的损伤破坏机理与失稳破坏特征的研究应从材料内部出发。声发射(AE)是一种无损检测技术,其特点在于声发射信号产生于内部能量释放转化后的弹性波,具有实时性,不受材料限制,可以很好地表示混凝土破坏过程中内部损伤的发展和力学参数的变化。Prem 等<sup>[8]</sup>将处理后的声发射参数应用在混凝土受弯构件的健康评估中,该参数优化了声发射参数随机性不确定的特点。有学者研究混凝土损伤破坏过程的声发射信号变化规律,结果显示声发射信号特征在混凝土破坏各个阶段具有明显的差异,可以描述混凝土损伤累积发展的过程<sup>[9-11]</sup>。Ohno 等<sup>[12]</sup>制备粗骨料最大粒径不同的多组混凝土试块并进行声发射试验,结

果表明声发射能量与粗骨料粒径大小成正比。赖于树等<sup>[13]</sup>在试件破坏试验过程中通过声发射技术获取机械波,分析了混凝土内部的损伤开裂规律。张昊等<sup>[14]</sup>以 C60 混凝土试件为研究对象,采用声发射和超声波技术联合检测混凝土试件的损伤量。

本文基于声发射技术,结合能量加速释放理论对再生混凝土试件单轴压缩破坏过程中的声发射信号进行分析,探索再生混凝土破坏过程中的临界点;绘制应力-应变曲线,将声发射参数作为损伤变量,建立再生混凝土损伤本构模型,为进一步实现再生混凝土损伤预警提供一定的试验基础。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

本试验再生混凝土设计强度为 C30,分别制备 5 组不同再生粗骨料取代率  $R_c$  的棱柱体试件,每组 5 个试件,再生粗骨料取代率分别为 0%、30%、50%、70%、100%。试件中使用的再生粗骨料为破碎机破碎的乌鲁木齐某建筑固体废弃物,经筛分清洗,使其与天然骨料粒径级配保持一致,试件尺寸及其他材料信息如表 1 所示。

### 1.2 加载系统

本试验为单轴压缩棱柱体试验,加载设备为 WHY-3000 微机控制全自动压力试验机,应变采集设备包括特制位移计架及 DH3816 静态应变采集箱,试验加载装置如图 1 所示。试验加载方式为匀速位移加载,速率为  $0.1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

### 1.3 声发射系统

声发射参数采用北京声华公司生产的 SAEU2S 型声发射仪进行采集,该设备系统由多个平行检测通道构成,能够满足本试验损伤破坏全过程实时监测的要求。声发射系统的参数设置如下:采样频率

表 1 试件尺寸及配合比

Table 1 Specimen size and mix proportion

试件 编号	$R_c/\%$	试件 尺寸	各材料用量/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )				
			水泥	水	砂	天然骨料	再生骨料
R0-1	0	150 mm× 150 mm× 300 mm	433.33	195	523.5	1 221.40	0.00
R3-1	30		433.33	195	523.5	854.98	366.42
R5-1	50		433.33	195	523.5	610.70	610.70
R7-1	70	300 mm	433.33	195	523.5	366.42	854.98
R10-1	100		433.33	195	523.5	0.00	1 221.40



图 1 试验加载装置

Fig. 1 Test loading device

范围为 20~220 kHz,前置放大器增益 40 dB,阈值 45 dB,滤波器带通取 20~100 kHz,峰值鉴别时间 100  $\mu\text{s}$ ,事件鉴别时间 200  $\mu\text{s}$ ,事件锁定时间 300  $\mu\text{s}$ 。试验时确保试样表面平整,凸出部分可用砂纸打磨,表面气泡孔洞利用 AB 胶补平,试件共布置 8 个声发射探头,如图 2 所示。为减小界面之间的空气、填充之间的空隙引起的声发射信号损失,试验前在试件与传感器表面涂适量凡士林<sup>[15]</sup>。

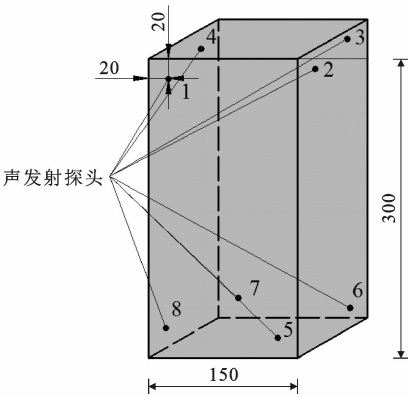


图 2 声发射传感器布置(单位:mm)

Fig. 2 Arrangement of acoustic emission sensor (unit:mm)

## 2 声发射能量临界破坏特征

### 2.1 能量加速释放理论

可以将试件因加载发生的每次裂纹发展活动而释放的声发射信号看做小尺度的地震,而试件的最终破坏是一个完整的地震。由于其失稳破坏过程与地震存在相似性,故借助地震学理论研究其破坏过程的前兆特征是可行的。混凝土材料破坏之前的临界行为表现在其内部微裂纹的产生、扩展、贯通,引起损伤的累积,达到损伤临界点。能量加速释放是临界点理论中可操作性较好的前兆现象,主要表现为临近破坏时,能量呈幂函数形式加速释放。

结合地震学理论,对不同再生粗骨料取代率混凝土单轴抗压试验过程中采集的声发射能量参数进行累加处理,绘制时间-声发射累计能量曲线,采用幂函数 Power 公式对该曲线进行拟合<sup>[16]</sup>,声发射累计能量  $E$  拟合公式为

$$E(t)=A+B|t_c-t|^Z \tag{1}$$

式中: $Z$ 、 $A$ 、 $B$  为拟合参数; $t_c$  为临界时刻。

参数  $Z$  值的大小反映了能量的加速释放程度, $Z$  值的变化范围取决于时间-声发射累计能量曲线的形状,因此  $Z$  值是临界破坏现象的关键指标。与此同时,为了验证幂函数拟合结果的合理性,将破坏过程中的 AE 能量做线性拟合,后将两次拟合结果进行比较,定义参数  $P$  为

$$P=\frac{R_p}{R_l} \tag{2}$$

式中: $R_p$  为 Power 函数拟合的方差; $R_l$  为线性拟合的方差。

同样,线性拟合结果越好,即  $R_l$  越大,说明 AE 能量的释放是阶梯式递进的,临界破坏特征越不明显,AE 能量加速释放越缓慢。如果  $P$  值越大,表明 AE 能量释放越接近幂函数形式,加速现象越突出,临界破坏现象特征越明显。

### 2.2 再生混凝土损伤过程的能量加速释放现象

图 3 为声发射随时间变化的累计能量曲线和能量加速释放拟合曲线。分析可得,混凝土损伤全过程的声发射能量规律与应力-应变曲线有良好的对应关系,即声发射能量信号可以表征再生混凝土材料损伤破坏过程的规律。在加载初期,材料损伤程度较小,偶有 AE 能量信号是由初始孔隙缺陷因受载压密而引起,故前期 AE 能量信号较少,也不会有加速释放的现象。随着荷载的增加,混凝土内部初始裂隙的扩展逐渐加速,内平衡不断被打破,能量渐

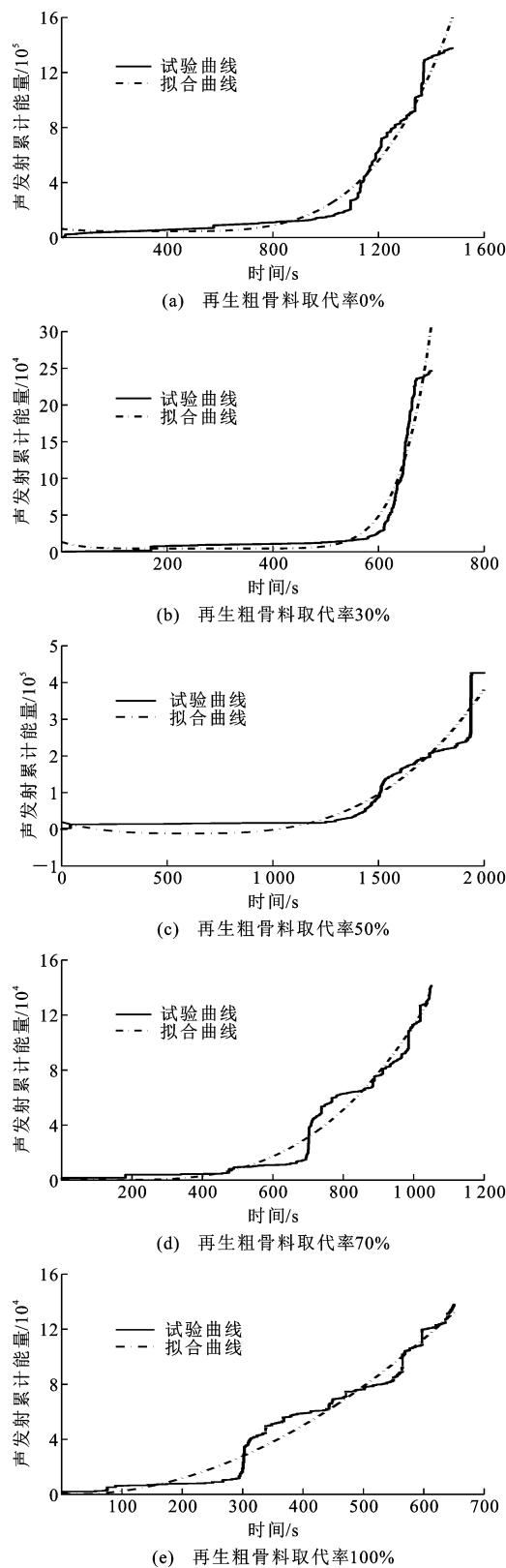


图3 再生混凝土 AE 能量加速释放拟合曲线

Fig. 3 AE energy accelerated release fitting curves of recycled concrete

渐积聚,并随着内部裂纹逐渐向外扩展而释放出来,转化为声发射信号,能量释放时内部损伤有较大发

展。当荷载增加至接近峰值强度时,大量裂纹贯通,此时声发射信号有较大增长,混凝土承受荷载能力开始走下坡趋势,当试件达到破坏临界点,预示着试件即将失稳破坏。因此,根据图 3 规律,将声发射累计能量突增的时刻视为临界破坏时刻。

结合能量加速释放理论,用幂函数 Power 公式对不同再生粗骨料掺量混凝土试件 AE 累计能量进行拟合,拟合曲线参数如表 2 所示。

表 2 混凝土试件 AE 能量加速释放拟合曲线参数

Table 2 Parameters of AE energy accelerated release fitting curve of concrete specimens

序号	再生粗骨料取代率/%	参数 Z	参数 P
1	0	3.861	1.545
2	30	7.344	2.414
3	50	2.953	1.650
4	70	2.878	1.137
5	100	1.891	1.037

根据表 2 中数据可得,参数  $Z$  均大于 1,AE 累计能量拟合曲线符合加速释放规律,且再生混凝土破坏过程中 AE 能量加速释放规律均符合幂函数形态。根据幂函数性质, $Z$  值越大,曲线越远离  $x$  轴(函数增长越快),能量加速释放程度越高。再生粗骨料取代率为 30% 的试件 AE 能量加速释放拟合曲线参数  $Z$  为 8.210,能量加速拟合方差与线性拟合方差之比  $P$  为 2.726, $R_p$  为 0.916, $R_l$  为 0.336。再生粗骨料取代率为 30% 的试件参数  $Z$  较普通混凝土试件大于 1 更多,说明试件破坏过程中 AE 能量加速释放现象更加明显。再生粗骨料中含有未完全水化的水泥颗粒和少量矿物掺和料微粒,当再生粗骨料二次凝结硬化时,再生粗骨料中的水泥颗粒和少量矿物掺和料微粒也进行着二次水化反应,因此增强了粗骨料与新旧砂浆的黏结力,切实提高了密实度,从而优化了再生粗骨料取代率为 30% 的混凝土性能<sup>[17]</sup>。同时再生粗骨料形状多样,可充分填充混凝土内部初始孔隙,使试件更加均匀,因而低应力阶段声发射信号较少,当混凝土损伤达到临界点时,伴随着大量 AE 能量信号的释放,呈现出能量加速释放现象。取代率为 50%、70% 的混凝土试件破坏过程中能量加速释放拟合曲线参数  $Z$  分别为 2.953 和 2.549,能量加速拟合方差与线性拟合方差之比  $P$  分别为 1.650 和 1.223。这两种取代率混凝土试件再生粗骨料取代率超过最优替代率,内部初始缺陷的影响使中低应力阶段也开始出现声发射信号,AE 能量累计曲线呈现递增趋势,因此破坏过程

能量加速释放程度有所下降。当再生粗骨料取代率为 100% 时,完全用再生粗骨料取代天然卵石,使试件内砂浆比例过大,新旧砂浆强度参差不齐,受载过程中损伤扰动较大,因此未达临界时刻便提前释放大声发射能量信号,AE 能量加速释放程度明显下降,此时声发射信号临界点模糊。

再生混凝土单轴受压过程中其 AE 能量加速释放曲线均与幂函数拟合良好,表明该过程均呈现明显的加速释放趋势,但加速释放程度因再生粗骨料取代率的不同而有所不同,其中再生粗骨料取代率为 30% 的混凝土试件声发射能量加速释放的程度最为明显,然而随着取代率的增加,加速释放程度有明显的降低趋势。不同再生粗骨料取代率混凝土试件初始缺陷程度不同,随着混凝土试件初始缺陷的增加,能量加速释放程度趋于平缓。

综上所述,再生混凝土试件在受压破坏过程中,其 AE 能量均呈幂函数形式增长,表现出能量加速释放现象,因此能量加速释放现象可作为试件临界破坏特征,今后可尝试应用于工程评估与预警。

### 3 再生混凝土声发射损伤本构方程

#### 3.1 声发射损伤演化模型

材料因受到荷载等外界因素作用,内部初始孔隙缺陷发生变形、发展、汇合,引起内部结构发生变化,从而改变材料性能,最终劣化致材料整体失稳破坏的现象称之为损伤。损伤是一种劣化因素,与材料本身相关,但损伤并不是材料的物理性质。损伤力学主要研究对象为材料内部微缺陷、刚度退化现象、应变软化现象,用来描述材料的各种非线性本构行为,目前结合损伤力学研究材料的损伤得到了较为广泛的认同<sup>[18]</sup>。

学者们引入损伤变量的概念用以表征材料的损伤程度,例如材料强度、刚度、弹性模量、密度<sup>[19]</sup>。声发射参数记录了混凝土材料内部孔隙、裂纹演化过程,与材料内部损伤变化、本构关系等密切相关。根据相关研究可得<sup>[20]</sup>,声发射参数可以用来表征损伤变量,其统计规律可以用来反映混凝土材料的损伤程度,从而建立材料的损伤本构模型。类比声发射累积事件数表征损伤变量的过程,本文用声发射相对振铃计数表征损伤变量  $D$ ,即

$$D = \frac{N}{N_m} \quad (3)$$

$$dD = \begin{cases} f(\epsilon) d\epsilon & \epsilon = \zeta, d\epsilon > 0 \\ 0 & \epsilon < \zeta, d\epsilon < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $N$  为某一时刻的累计振铃计数; $N_m$  为试件破坏过程累计振铃计数; $f(\epsilon)$  为损伤演化函数; $\zeta$  为损伤应变门槛值。

损伤演化函数形式决定了演化方程的适用性,因此根据混凝土损伤机制,选择适用于混凝土材料的函数。宁喜亮等<sup>[21]</sup>结合材料强度服从 Weibull 分布的特点,得出材料的损伤参数  $D$  也服从该统计分布的结论。因此本文采用 Weibull 分布损伤演化函数描述再生粗骨料混凝土的损伤演化规律,得出声发射损伤演化模型如式(5)所示。

$$D = \frac{N}{N_m} = F(\epsilon) = \int_0^\epsilon f(\epsilon) d(\epsilon) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\epsilon}{\eta}\right)^m\right] \quad (5)$$

式中: $F(\epsilon)$  为概率分布函数; $\eta$ 、 $m$  为未知参数。

图 4 为单轴压缩荷载作用下采集所得再生混凝土损伤过程中损伤参数  $D$  (AE 相对振铃累计计数) 与应变的关系。可以看出,混凝土 AE 相对累计振铃计数随应变的增加呈增长趋势,当应变到达峰值应变以后,这种增长趋势逐渐放缓,这说明随着变形的增加,混凝土内部损伤逐渐加重,到达峰值应变以后,混凝土的损伤减弱,该变化与应力变化一致,从而验证了以 AE 振铃计数为损伤参数建立的损伤模型描述再生混凝土损伤变化过程的合理性。

为了更好地量化再生粗骨料掺量的影响,考虑再生掺量带来的初始损伤,用再生粗骨料取代率百分数定义再生参数  $R$ ,表征混凝土试件的初始损伤程度(即再生粗骨料取代率为 30% 时,则再生参数  $R$  为 0.3)。

对试验数据进行拟合,可得参数  $\eta$ 、 $m$  与再生参数  $R$  之间的关系为

$$\eta = 0.00249 - 0.000869R \quad (6)$$

$$m = 1.76973 - 0.44685R \quad (7)$$

将式(6)、(7)代入式(5)中可得引入再生参数的再生混凝土损伤演化方程式,即

$$D = \frac{N}{N_m} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\epsilon}{0.00249 - 0.000869R}\right)^{1.76973 - 0.44685R}\right] \quad (8)$$

#### 3.2 考虑初始缺陷声发射振铃损伤本构方程

理论上可以对材料产生的损伤进行某一状态下的损伤度测定,但实际中受测量条件等限制,该测定较难实现。Lemaitre 提出了应变等效原理,将损伤变量引入材料本构方程中,完成了损伤的测定,同时也实现了损伤与本构的对接。等效应变假设是指无

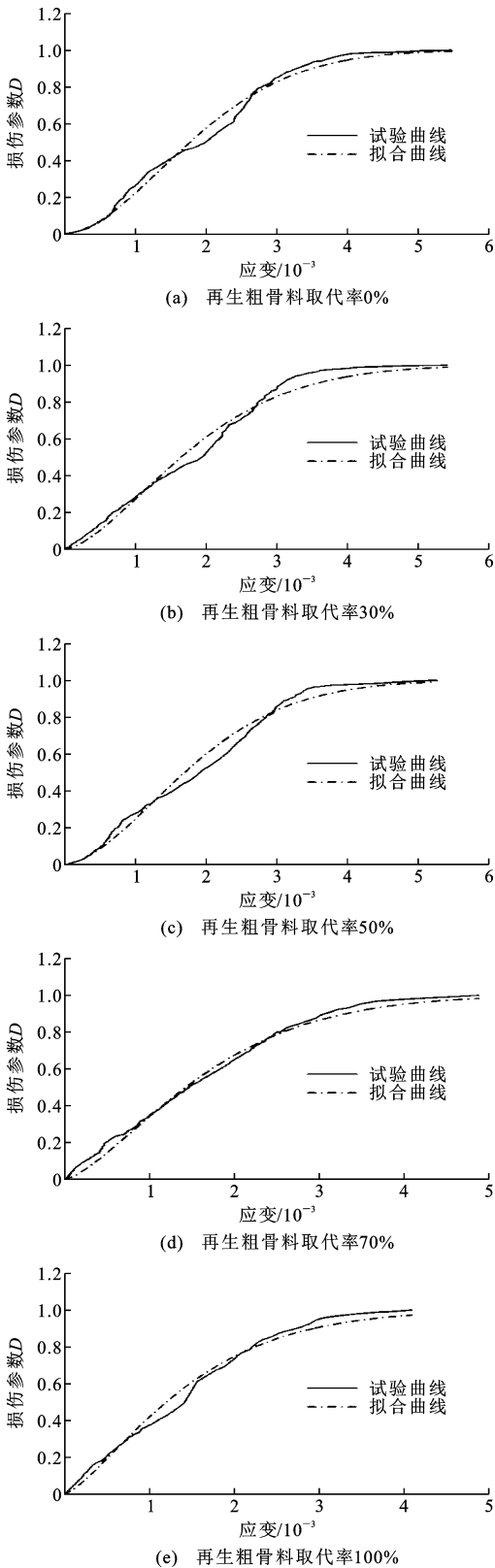


图 4 再生混凝土 AE 累计振铃损伤参数与应变的关系  
Fig. 4 Relationship between AE cumulative ringing damage variable and strain of recycled concrete

损材料受到有效应力  $\bar{\sigma}$  作用后产生的应变与含初始损伤材料受到应力  $\sigma$  作用后产生的应变相等的假

设,表达形式为

$$\sigma = \frac{\bar{\sigma}}{1-D} = (1-D)E\epsilon \tag{9}$$

将考虑了再生参数的累计振铃计数损伤演化模型式(8)代入式(9),得到损伤本构方程为

$$\sigma = E\epsilon \cdot \exp\left[-\left(\frac{\epsilon}{0.002\,49-0.000\,869R}\right)^{1.769\,73-0.446\,85R}\right] \tag{10}$$

图 5 为再生混凝土单轴受压作用下试验所得应力-应变曲线与本文建立的理论方程所得应力-应变曲线的对比。由于在混凝土受压损伤本构模型中考虑了再生粗骨料的影响,引入了再生参数,不但使理论曲线更符合再生粗骨料初始缺陷对材料实际劣化作用,而且理论曲线与试验曲线拟合度较高,说明本文建立的声发射损伤本构方程符合含再生粗骨料混凝土损伤演化过程。

4 结 语

(1)再生混凝土试件在受压破坏过程中 AE 能量加速释放明显,呈幂函数形式增长,因此能量加速释放现象可作为试件临界破坏特征,今后可尝试应用于工程评估与预警。

(2)不同再生粗骨料取代率的混凝土试件初始缺陷程度不同,取代率为 30%的混凝土试件声发射能量加速释放程度最为明显,然而随着取代率的增加,混凝土试件初始缺陷增加,加速释放程度有明显的降低趋势。

(3)基于声发射技术,定义振铃损伤变量,引入再生参数定义初始损伤,借助 Weibull 统计方法与损伤理论,建立的损伤模型符合再生混凝土的损伤变化过程,用以描述不同再生粗骨料取代率混凝土损伤过程是可行的。

(4)结合试验数据,确定模型参数,建立了考虑再生粗骨料初始缺陷影响的混凝土单轴受压损伤本构方程,理论曲线与试验曲线拟合结果较好,表明方程能够有效描述再生粗骨料混凝土的损伤演化过程。

参考文献:

References:

[1] XUAN D X,ZHAN B J,POON C S. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates[J]. Cement and Concrete Composites,2016,65:67-74.  
[2] KOU S C,POON C S,WAN H W. Properties of con-

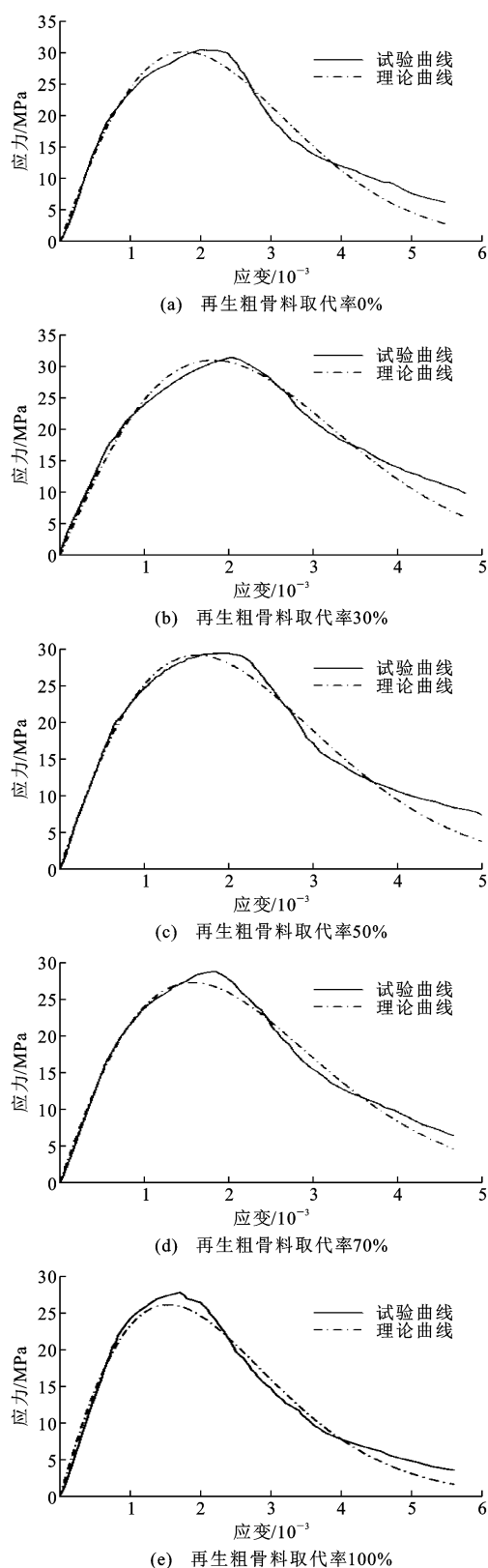


图5 试验曲线与理论曲线对比

**Fig. 5 Comparison between test curve and theoretical curve**  
 concrete prepared with low-grade recycled aggregates  
 [J]. Construction and Building Materials, 2012, 36:  
 881-889.

- [3] 范红波,韩达光,杨宇鹏,等. 小粒径再生粗骨料对预制混凝土力学性能影响的研究[J]. 新型建筑材料, 2020,47(3):1-3,48.  
 FAN Hongbo, HAN Daguang, YANG Yupeng, et al. Effect of small particle size recycled coarse aggregates on mechanical properties of precast concrete[J]. New Building Materials, 2020, 47(3): 1-3, 48.
- [4] 王建超,李华钰,袁子铭. 再生大骨料-自密实砂浆堆石混凝土力学性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2023,40(1):21-27.  
 WANG Jianchao, LI Huayu, QIU Ziming. Study on mechanical properties of recycled large aggregate-self-compacting mortar rock-filled concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(1): 21-27.
- [5] ETXEBERRIA M, GONZALEZ-COROMINAS A, PARDO P. Influence of seawater and blast furnace cement employment on recycled aggregate concretes' properties[J]. Construction and Building Materials, 2016,115:496-505.
- [6] GONZALEZ-COROMINAS A, ETXEBERRIA M, POON C S. Influence of steam curing on the pore structures and mechanical properties of fly-ash high performance concrete prepared with recycled aggregates[J]. Cement and Concrete Composites, 2016,71: 77-84.
- [7] 王雪芳,肖祥栋,方金杰,等. 不同养护龄期下再生粗骨料混凝土拉伸本构关系[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(6):977-983.  
 WANG Xuefang, XIAO Xiangdong, FANG Jinjie, et al. Tensile constitutive relationship of recycled coarse aggregate concrete at different curing ages[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(6): 977-983.
- [8] PREM P R, MURTHY A R. Acoustic emission monitoring of reinforced concrete beams subjected to four-point-bending[J]. Applied Acoustics, 2017, 117: 28-38.
- [9] 卜静武,徐慧颖,羌宇杰,等. 橡胶混凝土轴拉破坏过程中声发射特性[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(2):78-86.  
 BU Jingwu, XU Huiying, QIANG Yujie, et al. Acoustic emission characteristics of rubber concrete in axial tension process[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(2): 78-86.
- [10] 郑艾辰,何兆益,黄 锋,等. 含水缺陷混凝土受压破坏红外辐射与声发射特征试验研究[J]. 混凝土, 2021 (11):1-5.  
 ZHENG Aichen, HE Zhaoyi, HUANG Feng, et al.

- Experimental study on infrared radiation and AE characteristics of concrete with water-containing defects under compression[J]. Concrete, 2021(11): 1-5.
- [11] 杨 康, 李冬雪, 何兆益, 等. 基于声发射的混凝土全时域损伤试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(12): 110-116.
- YANG Kang, LI Dongxue, HE Zhaoyi, et al. Experimental study on full time domain damage of concrete based on acoustic emission[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(12): 110-116.
- [12] OHNO K, UJI K, UENO A, et al. Fracture process zone in notched concrete beam under three-point bending by acoustic emission[J]. Construction and Building Materials, 2014, 67: 139-145.
- [13] 赖于树, 熊 燕, 程龙飞. 混凝土受载试验全过程声发射特性研究与应用[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(3): 380-386.
- LAI Yushu, XIONG Yan, CHENG Longfei. Study of characteristics of acoustic emission during entire loading tests of concrete and its application[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(3): 380-386.
- [14] 张 昊, 隋黎港, 王 军. 声发射与超声波联合测试混凝土构件损伤量试验研究[J]. 中国建材科技, 2019, 28(5): 6-7, 9.
- ZHANG Hao, SUI Ligang, WANG Jun. Experiment research on measurement of concrete damage quantity based on technology with acoustic emission and ultrasonic combined[J]. China Building Materials Science & Technology, 2019, 28(5): 6-7, 9.
- [15] 许 江, 李树春, 唐晓军, 等. 单轴压缩下岩石声发射定位实验的影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 765-772.
- XU Jiang, LI Shuchun, TANG Xiaojun, et al. Influential factors of acoustic emission location experiment of rock under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 765-772.
- [16] YIN X C, MORA P, PENG K, et al. Load-unload response ratio and accelerating moment/energy release critical region scaling and earthquake prediction[J]. Pure and Applied Geophysics, 2002, 159(10): 2511-2523.
- [17] 王瑞骏, 赵 叶, 缙彦强, 等. 不同粒径再生粗骨料混凝土单轴受压应力-应变关系试验研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(5): 193-198.
- WANG Ruijun, ZHAO Ye, GOU Yanqiang, et al. Experimental study on stress-strain relationship of recycled coarse aggregate concrete with different particle size under uniaxial compression[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(5): 193-198.
- [18] 齐 虎, 李云贵, 吕西林. 混凝土弹塑性损伤本构模型的动力扩展[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 324-329.
- QI Hu, LI Yungui, LÜ Xilin. Dynamic extending of elastic plastic damage model for concrete[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(3): 324-329.
- [19] NECHNECH W, MEFTAH F, REYNOUARD J M. An elasto-plastic damage model for plain concrete subjected to high temperatures[J]. Engineering Structures, 2002, 24(5): 597-611.
- [20] 葛若东, 刘茂军, 吕海波. 钢筋混凝土梁破坏过程的声发射特征试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2011, 36(1): 160-165.
- GE Ruodong, LIU Maojun, LU Haibo. Experimental research on acoustic emission characteristics of reinforced concrete beams during failure process[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2011, 36(1): 160-165.
- [21] 宁喜亮, 丁一宁. 钢纤维对混凝土单轴受压损伤本构模型的影响[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(2): 214-220.
- NING Xiliang, DING Yining. Effect of steel fiber on the damage constitutive model of concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(2): 214-220.