

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.043



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



碳化高温后再生混凝土受压声发射特性与损伤演化

崔正龙, 孙万吉, 费海超, 李正元

(辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要:为研究再生混凝土在碳化高温下的损伤演化规律,对碳化后不同温度梯度(常温 20 °C、中低温 200 °C 及中高温 400 °C)下 C30 再生混凝土(质量分数取代率 0%、50%、100%)进行轴心受压试验并同步采集声发射信号,在分析声发射特征参数的基础上建立再生混凝土的损伤模型。结果表明,通过对声发射损伤定位、累计撞击计数与能量计数分析,可实现再生混凝土轴心受压破坏从初始损伤到微裂缝演变,再到宏观裂缝扩展,最终到试件破坏的全过程动态监测;不同粗骨料取代率再生混凝土试件,加载过程中损伤点的密集集中位置与试件最终破坏位置相符;随着温度梯度增加,3 种不同粗骨料取代率的再生混凝土均呈现初始损伤增大、声发射参数增大、应力减小的现象;基于声发射累计撞击计数建立的混凝土损伤模型可用于分析碳化高温后再生混凝土轴心受压损伤演化规律。

关键词:碳化高温;再生混凝土;声发射;轴心受压;损伤演化

中图分类号:TU528.59 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2024)04-0175-11

Acoustic emission characteristics and damage evolution of recycled concrete after carbonization at high temperature under axial compression

CUI Zhenglong, SUN Wanji, FEI Haichao, LI Zhengyuan

(School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, P. R. China)

Abstract: In order to study the damage evolution of recycled concrete under high temperature of carbonation, the experiments were conducted on C30 recycled concrete (0%, 50% and 100% mass fraction replacement) under different temperature gradients (room temperature 20 °C, medium and low temperature 200 °C, and medium and high temperature 400 °C) after carbonation with axial compression tests and simultaneous acquisition of acoustic emission (AE) signals, and the damage model of recycled concrete was established based on the analysis of acoustic emission characteristic parameters. The test results show that, analyzed AE damage location, cumulative impact count and energy count, dynamic monitoring of recycled concrete (RC) axial compression failure was realized from initial damage to micro fracture evolution, then to macro fracture propagation and finally to specimen failure; for RC specimens with different replacement ratio of coarse

收稿日期:2021-12-28

基金项目:辽宁省教育厅基金(LJ2019JL023);辽宁工程技术大学学科创新团队资助(LNTU20TD-26)

作者简介:崔正龙(1974-),博士,副教授,主要从事固体废弃物再生骨料混凝土研究,E-mail: cui0815@126.com。

Received: 2021-12-28

Foundation items: Liaoning Provincial Education Department Fund (No. LJ2019JL023); Liaoning Technical University Discipline Innovation Team Funding Project (No. LNTU20TD-26).

Author brief: CUI Zhenglong (1974-), PhD, associate professor, main research interest: solid waste recycled aggregate concrete research, E-mail: cui0815@126.com.

aggregate for comparison, the dense and concentrated location of damage points was the same as the failure position during loading process. Furthermore, RC with three different replacement ratios of coarse aggregate have the initial damage increases, the AE parameters increase and the stress decreases with the increase of temperature gradient. As a result, the concrete damage model based on AE cumulative impact count can be used to analyze the damage evolution law of RC after carbonization at high temperature under axial compression.

Keywords: high carbonization temperature; recycled aggregate concrete; acoustic emission; axial compression; damage evolution

自19世纪末问世以来,混凝土材料在土木工程各个领域扮演着至关重要的角色。随着现代化建设步伐的日益推进,混凝土固体废弃物的产生量也在不断增加^[1-2],但资源化利用率非常低,这会导致天然集料资源不断枯竭^[3-4]。放眼未来,混凝土固体废弃物的回收再利用符合可持续发展的方向^[5-6]。

声发射(AE)是在外荷载作用下,因材料局部受力破坏,以弹性波形式释放出应变能的现象^[7]。Josef Kaiser在1950年发现金属变形过程中伴随着声发射现象,1959年Rusch首次将声发射技术用于混凝土中^[8],目前声发射技术在石油化工、材料试验、航空航天损伤监测等领域得到了广泛的应用。在混凝土材料的损伤及断裂过程中,可通过声发射特征参数对其内部演化过程进行描述。

在研究混凝土损伤力学方面,刘琼等^[9]通过再生骨料方位模型研究了再生混凝土损伤演化过程;安新正等^[10]基于超声波波速的衰减来衡量单轴受压下再生混凝土的损伤特性;李建涛等^[11]对含不同初始缺陷的立方体进行单轴压缩,分析声发射事件率、声发射振铃计数随应力、应变的变化特征,揭示了混凝土试块破坏损伤机理;Henry等^[12]应用X射线、CT和图像分析技术对高强混凝土内部结构进行检测,揭示了混凝土受压性能和高温损伤演化规律。在研究再生混凝土强度方面,商效瑛等^[13]基于分形几何理论,建立了分形维数和多重分形谱特征参数与RCA取代率和再生混凝土抗压强度的关系;岳强等^[14]利用数字图像相关技术和有限元模拟相结合的方法,讨论了不同天然骨料、界面过渡区和新老硬化砂浆的力学性能对再生混凝土宏观力学性能的影响;Ryu等^[15]的研究表明,声发射信号可以评估再生混凝土的损伤程度。在研究高温或碳化后混凝土力学性能变化方面,Geng等^[16]研究发现,依据声发射技术可对高温后混凝土的损伤程度做出评定;马腾飞^[17]的研究表明碳化后的素混凝土会提高力学性能;赵东拂等^[18]利用超声、扫描电子显微镜、X射线衍射、汞压力测孔及显微硬度检测等综合手段研究了经历不同温度后混凝土内部微观结构

的变化规律;刘庆等^[19]研究发现,随着作用温度的升高,混凝土剩余抗压强度总体呈现下降趋势。上述学者研究大部分从外部宏观表征现象来分析混凝土结构内部的损伤规律,而再生混凝土由于材料内部新旧砂浆界面过渡区的复杂性决定了以往的研究方法具有一定的局限性,声发射技术能够有效克服这一局限性,从材料内部出发,从本质上阐释再生混凝土的损伤演化过程。试验选用碳化高温后的C30再生混凝土(以质量分数取代0%、50%、100%),结合声发射特征参数和应力-应变关系曲线来描述再生混凝土在轴心受压过程中的损伤演化规律,为高温后再生混凝土的强度评估及实际工程应用提供理论依据。

1 试验

1.1 试验材料

再生粗骨料:拆迁某工厂楼板产生的废弃混凝土块,经反复破碎筛分后粒径调整为4.75~26.5 mm(砂浆附着率(质量分数)为37.3%);天然粗骨料:4.75~26.55 mm花岗岩类碎石,连续级配;天然细骨料:0.16~4.75 mm河沙,洁净,中砂(细度模数2.75);水泥:大鹰牌P·O42.5普通硅酸盐水泥(28 d水泥胶砂强度为48.3 MPa),比表面积为342 m²/kg;减水剂:蔡系高性能减水剂,棕色粉末,含固量97.4%,减水率25%,pH值为8.1;水:普通自来水。表1为使用原材料的基本物理、力学性能。

表1 粗、细骨料的基本性质

Table1 Basic properties of coarse and fine aggregates

材料	表观密度/ (g/cm ³)	24 h吸水 率/%	堆积密度/ (g/cm ³)	压碎指 标/%
再生粗骨料	2.47	6.11	1.37	15.1
天然粗骨料	2.71	0.92	1.51	7.8
天然细骨料	2.62	2.87	1.44	

1.2 混凝土配比设计

以再生粗骨料质量取代率(0%、50%、100%)为变量,设计了C30混凝土。为了不影响施工和易

性能,拌和前根据再生粗骨料 1 h 吸水率对其进行提前润湿。

混凝土试件命名如下:再生混凝土试件编号

RN,再生粗骨料取代率为 0%、50% 和 100%,试件编号 RN0、RN50 和 RN100,具体配合比及 28 d 立方体试件抗压强度见表 2。

表 2 混凝土的配比

Table 2 Mix proportion of concrete

试件编号	水胶比/%	坍落度/mm	混凝土配比(kg/m ³)					28 d 立方体抗压强度/MPa
			水	水泥	砂	粗骨料	外加剂	
RN0	53	92	175	327	799	1 103	2.62	39.6
RN50	53	87	175	327	799	552(552)	2.62	38.4
RN100	53	85	175	327	780	1 077	2.62	36.1

1.3 试验设计

C30 圆柱体混凝土试件,尺寸为 150 mm×150 mm×300 mm。圆柱体试件经 28 d 标养,自然晾干 7 d 后放入碳化箱中模拟自然碳化 40~50 a(RN0、RN50 和 RN100 试件碳化深度分别为 7.4、8.2、8.9 mm)。碳化后的圆柱体试件分别经过不同温度梯度(常温 20℃、中低温 200℃以及中高温 400℃),达到预定温度值后恒温 2 h,自然冷却至室温。混凝土试件命名如下:依据温度梯度不同,再生粗骨料取代率为 0%,即普通混凝土试件分别编号 RN0-20、RN0-200 和 RN0-400;再生粗骨料取代率为 50%,分别编号 RN50-20、RN50-200 和 RN50-400;再生粗骨料取代率为 100%,分别编号 RN100-20、RN100-200 和 RN100-400。为了避免圆柱体试件出现较大的离散性,RN0、RN50 和 RN100 每组各制备了 3 个试件。声发射设备采用北京软岛时代科技有限公司的 DS5-8B 声发射系统,经过断铅试验调试,合理设置声发射采集信号的参数,信号采集门槛 40 dB,采样频率 3 MHz,放大器增益 40 dB。压力机采用济南时代试金有限公司 YAW-2000D 电液伺服万能压力试验机。试验采用位移控制方式,速率为 0.2 mm/min,在试件损伤破坏过程中采集荷载、应变及声发射特征参数。试件加载过程声发射试验装置布置如图 1 所示。

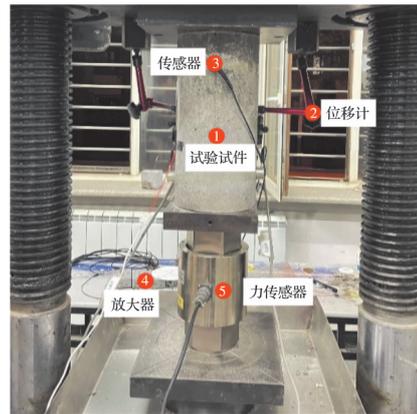


图 1 声发射试验装置布置

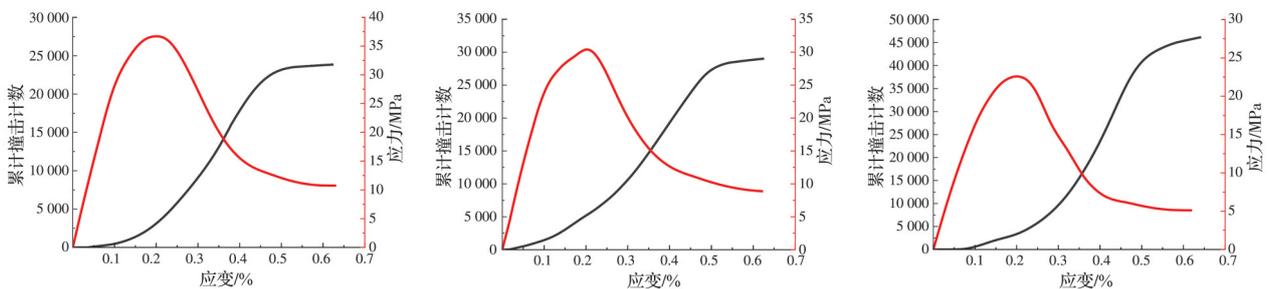
Fig. 1 Arrangement of acoustic emission test device

能储存在材料内,致使局部应力集中,当这种应变能累积到一定程度时就会向低能态过渡,最后导致材料出现裂缝,并在此过程中释放出应变能,即发生声发射现象。试验基于碳化高温再生混凝土 AE 信号历程图,结合应力-应变特征关系,分析 9 组试件的损伤过程(每组以试验中间值试件举例说明)。混凝土声发射参数历程与应力-应变关系如图 2 所示。图中纵坐标分别为累计撞击计数和能量值,累计撞击计数指的是信号采集过程中超过门槛值的各个独立通道获取数据的信号累计数,而能量值是指声发射信号波形包络线下的面积值,受压损伤破坏过程总体上分为 4 个阶段。

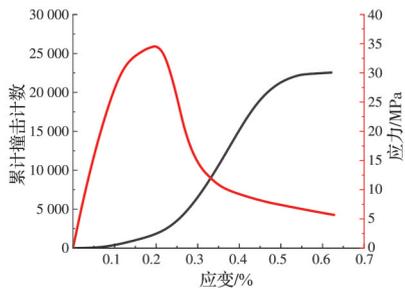
2 结果与讨论

2.1 碳化高温再生混凝土试件 AE 特征参数历程

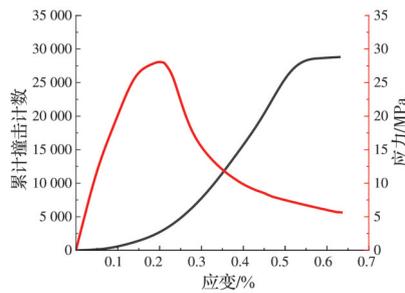
当材料或结构受力时,发生形变并以弹性应变



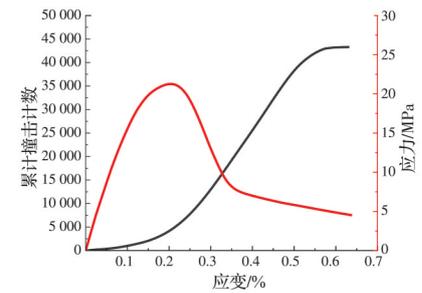
(a) RN0-20 累计撞击计数-应力-应变曲线 (b) RN0-200 累计撞击计数-应力-应变曲线 (c) RN0-400 累计撞击计数-应力-应变曲线



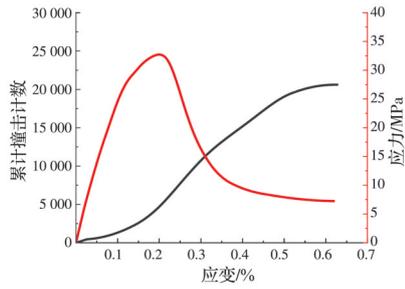
(d) RN50-20 累计撞击计数-应力-应变曲线



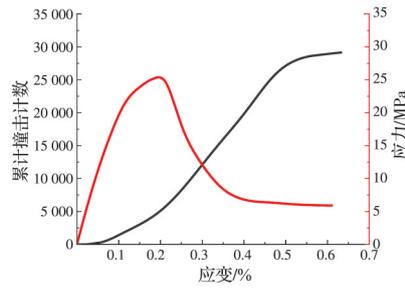
(e) RN50-200 累计撞击计数-应力-应变曲线



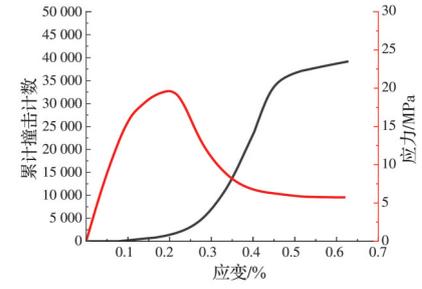
(f) RN50-400 累计撞击计数-应力-应变曲线



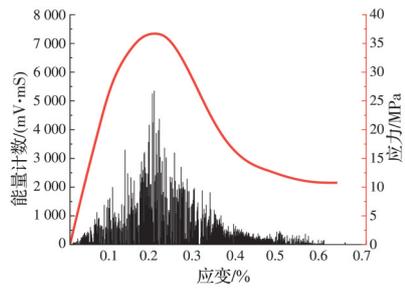
(g) RN100-20 累计撞击计数-应力-应变曲线



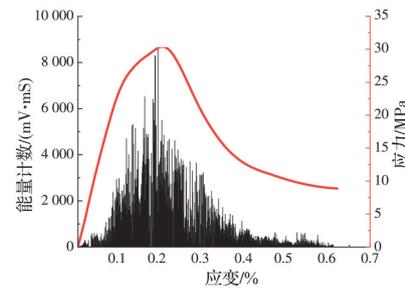
(h) RN100-200 累计撞击计数-应力-应变曲线



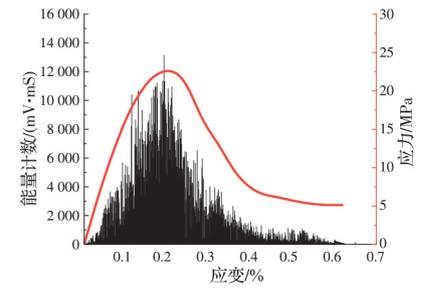
(i) RN100-400 累计撞击计数-应力-应变曲线



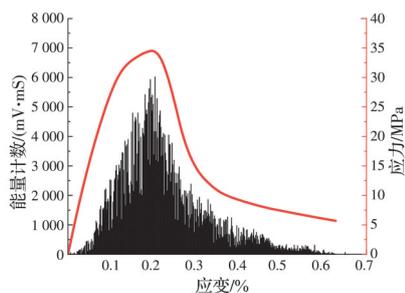
(j) RN0-20 能量计数-应力-应变曲线



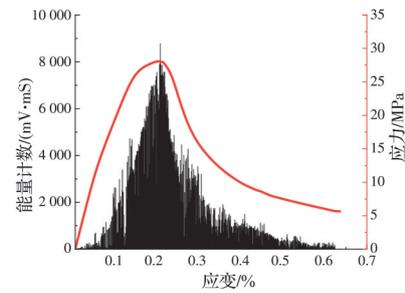
(k) RN0-200 能量计数-应力-应变曲线



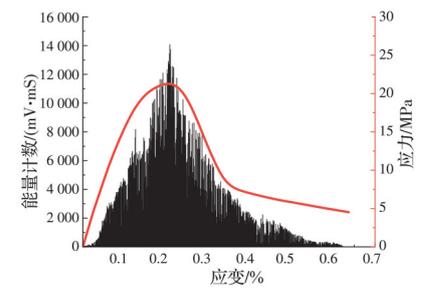
(l) RN0-400 能量计数-应力-应变曲线



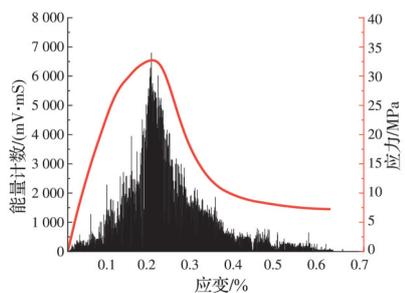
(m) RN50-20 能量计数-应力-应变曲线



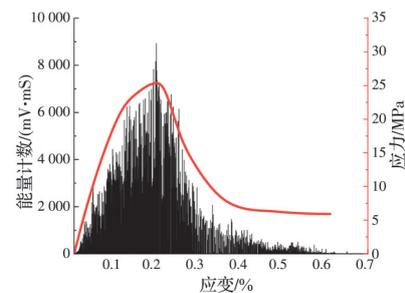
(n) RN50-200 能量计数-应力-应变曲线



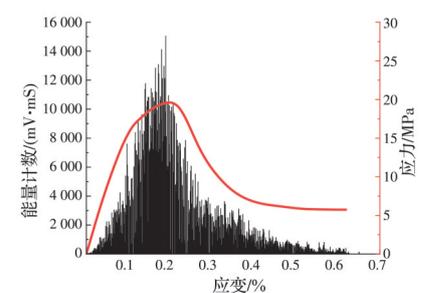
(o) RN50-400 能量计数-应力-应变曲线



(p) RN100-20 能量计数-应力-应变曲线



(q) RN100-200 能量计数-应力-应变曲线



(r) RN100-400 能量计数-应力-应变曲线

图 2 再生混凝土声发射参数历程与应力-应变关系

Fig. 2 Acoustic emission parameter history and stress-strain relationship of recycled concrete

2.2 碳化高温再生混凝土声发射损伤定位分析

图 3 为不同应力环节 3 种不同再生粗骨料取代率的再生混凝土试件在不同应力阶段的声发射损伤定位图(同样每组以试验中间值试件举例说明,图中绿色表示 30% 以内应力损伤定位点,蓝色为 30%~60% 应力损伤定位点,红色为 60%~90% 应力损伤定位点)。从图 3 可以看出,加载到极限应力 30% 左右时,随着温度梯度的增加,3 种粗骨料取代率的再生混凝土试件损伤点位置均从靠近中心区域逐渐向两端零散分布,混凝土内部微裂缝的发展

尚处于萌芽阶段;随着荷载的持续增加,达到极限应力 60% 左右时,不同温度梯度 3 组试件损伤点从中心区域逐渐向两端扩散,且粗骨料取代率越高,再生混凝土试件向两端扩散范围越广。当加载到极限应力 90% 左右时,再生混凝土试件的损伤点位置逐渐向中心聚集,且这种现象随着温度梯度的增加更为显著。不同粗骨料取代率再生混凝土试件在加载过程中,损伤点的密集集中位置与试件最终破坏位置相符。

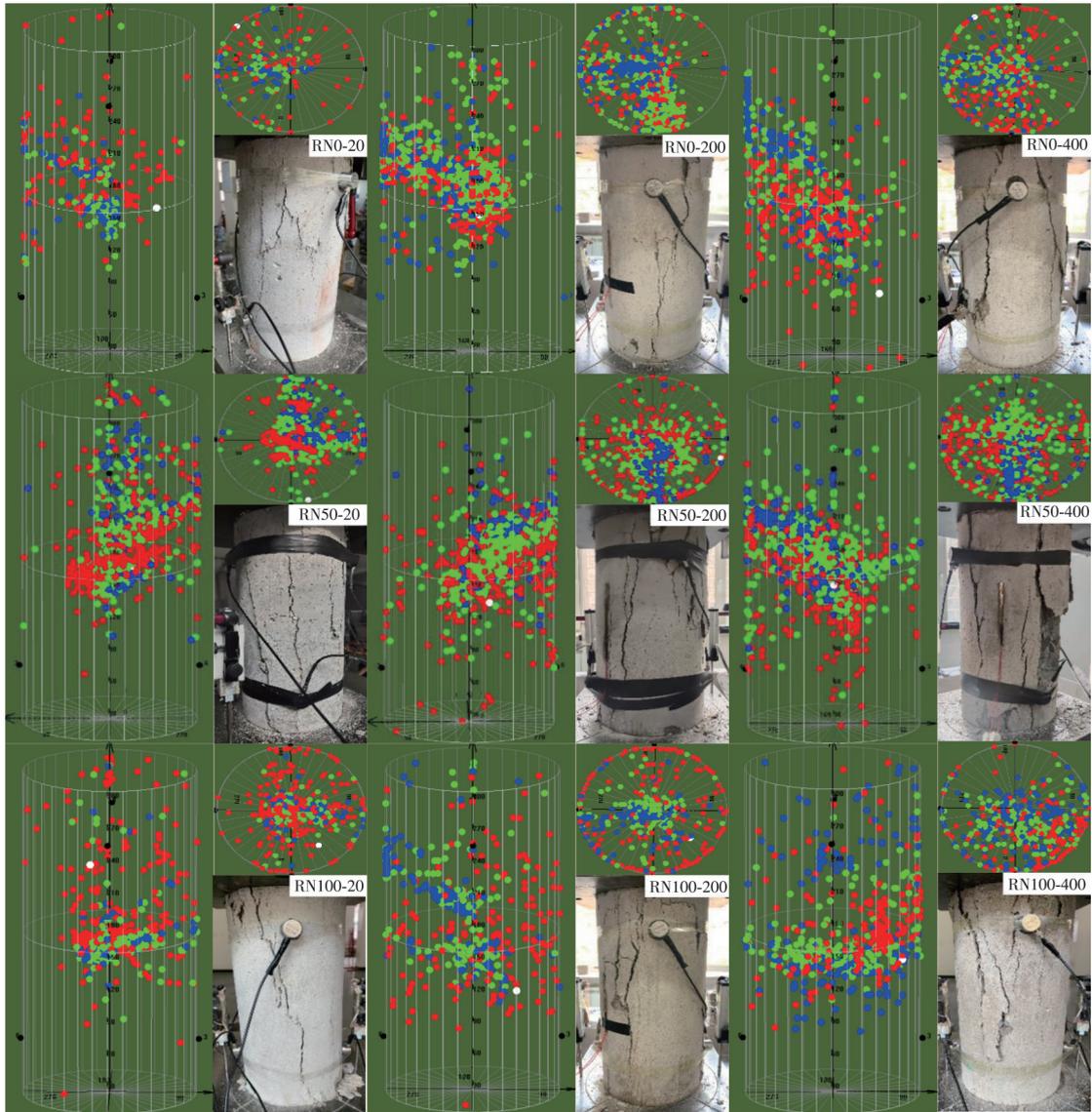


图 3 碳化高温后圆柱体混凝土试件声发射损伤定位图

Fig. 3 Acoustic emission damage location diagram of cylindrical concrete specimens after high temperature carbonation

造成上述现象的主要原因在于,一是再生混凝土试件结构内部存在较多的细微裂缝,空气中的 CO₂ 与混凝土有更大接触面积,促进碳化,使已碳化混凝土强度得到提高,在其表面形成一层“环形”保护层;二是在圆柱体混凝土试件受压过程中,试件上、下表面与钢压板之间会产生摩擦阻力,形成以

试件上下表面为底指向试件中心的双圆锥状约束区域,其约束范围从试件两端到中心部逐渐减小,大约在 $\sqrt{3}/2a$ (a 为试件直径) 处约束作用消失。正因为这种“环箍”效应,试件最终破坏集中在无约束的中心区域^[20]。混凝土中再生粗骨料的加入使其受力性能变得更加复杂。“双重”砂浆界面过渡区间存

在细微的裂痕,随着温度梯度的增加,水泥水化矿物成分也发生相应的变化,受到不同温度梯度热辐射影响,水泥砂浆中的水分在混凝土内部不断蒸发,自由水、化学结合水及毛细管水的状态不断发生变化,导致砂浆结合面的微裂缝受到膨胀作用而不断扩大。同时,骨料和水泥浆的热膨胀系数不同,高温后出现不同程度的变形,进一步加剧了内部结构的破坏,导致初始损伤更大,损伤点分布范围更广,荷载作用时初始损伤周围很可能形成明显的应力集中,前期扩展裂缝多在初始损伤附近产生,也就是初始损伤引起了微裂缝的产生。随着荷载的加大,这种裂缝不断扩展,骨料与砂浆界面过渡区沿开裂面发生相对位移,裂缝在砂浆内部快速发展和延伸,更容易引起试件的破坏^[21-22]。

2.3 再生混凝土损伤模型

根据 Krajcinovic 等^[23]基于材料损伤过程的损伤模型理论,混凝土的应力和损伤变量之间的关系可定义为

$$\epsilon = \frac{\sigma^*}{E} = \frac{\sigma(1-D)}{E} \quad (1)$$

式中: σ 为混凝土的有效应力,MPa; σ^* 为混凝土的名义应力,MPa; E 为混凝土弹性模量,MPa; D 为混凝土损伤变量。

将损伤变量定义为试件中已破坏的界面微元体数目与总界面微元体数目之比。将再生混凝土损伤分为两个阶段,第1阶段为初始损伤,也就是加载前因再生粗骨料的存在以及碳化高温作用形成的原始缺陷,这一缺陷随再生粗骨料取代率和碳化高温程度的增加而增大。取代率为 r 的再生混凝土经历 $T^\circ\text{C}$ 温度后的初始损伤变量 D_1 为

$$D_1 = 1 - \frac{E_{rT}}{E_0} \quad (2)$$

式中: E_{rT} 为取代率 r 的再生混凝土经历 $T^\circ\text{C}$ 温度作用后的弹性模量; E_0 为未经历高温作用的普通混凝土弹性模量。

第2阶段的损伤变量在再生混凝土承受荷载作用过程中形成发展,根据等价应变原理,经历不同温度梯度再生混凝土的本构关系为

$$\sigma = E_{rT}\epsilon(1-D_2) \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)得到优化后再生混凝土受压过程中应力-应变关系

$$\sigma = E_0\epsilon(1-D_1)(1-D_2) \quad (4)$$

则再生混凝土总损伤变量表示为

$$D = D_1 + D_2 - D_1D_2 \quad (5)$$

假设再生混凝土强度满足 Weibull 分布,

Weibull分布下微元强度的概率密度为

$$\varphi(\epsilon) = \frac{m}{\alpha} \left(\frac{\epsilon}{\alpha}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{\epsilon}{\alpha}\right)^m\right] \quad (6)$$

式中: m 、 α 为 Weibull 分布函数中的参数。

对上述 Weibull 分布函数进行积分,可得受荷载时再生混凝土产生的损伤变量 D_2 和试件微元失效的概率密度之间的关系

$$D_2 = \int_0^\epsilon \varphi(\epsilon) d\epsilon = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\epsilon}{\alpha}\right)^m\right] \quad (7)$$

联立式(2)、式(5)、式(7)得到经历不同温度梯度后不同取代率再生混凝土损伤模型

$$D = 1 - \frac{E_{rT}}{E_0} \exp\left[-\left(\frac{\epsilon}{\alpha}\right)^m\right] \quad (8)$$

将式(7)代入式(3)得到经历不同温度梯度后不同取代率再生混凝土本构模型

$$\sigma = E_{rT}\epsilon \exp\left[-\left(\frac{\epsilon}{\alpha}\right)^m\right] \quad (9)$$

Heiple 等^[24]和 Wadley 等^[25]用 AE 技术研究了材料损伤演化过程,发现 AE 撞击计数与材料中界面破坏和基体损伤释放的应变能成正比,能够有效地反映材料性质的变化。通过对本试验结果的分析,发现声发射撞击计数与试件内部裂缝的产生与发展密切相关。根据经历不同温度梯度后不同粗骨料取代率再生混凝土试件在加载过程中的声发射累计撞击计数,通过 Boltzmann 函数对再生混凝土试件累计撞击计数与应变之间的关系进行拟合。

$$N_{rT} = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + \exp\left(\frac{\epsilon - B}{C}\right)} \quad (10)$$

式中: ϵ 为应变; N_{rT} 为经历 $T^\circ\text{C}$ 高温作用后取代率为 r 的再生混凝土试件累计撞击计数,参数 A_1 、 A_2 、 B 和 C 通过拟合获得。结果表明,整体拟合效果较好,各组试件拟合后得到的参数 A_1 、 A_2 、 B 、 C 以及 R^2 见表3。

联立式(8)和式(10)得到经历不同温度梯度后不同取代率再生混凝土试件声发射累计撞击计数与损伤变量之间的函数表达式

$$D = 1 - \frac{E_{rT}}{E_0} \exp\left[-\frac{1}{\alpha^m} \left(C \ln \frac{A_1 - N_{rT}}{N_{rT} - A_2} + B\right)^m\right] \quad (11)$$

高温作用后再生混凝土损伤、本构模型具有 m 、 α 两个未知参数,为了确定参数的取值,取应力-应变曲线峰值点 (ϵ_p, σ_p) ,此处满足 $\epsilon = \epsilon_p$ 、 $\sigma = \sigma_p$,将其代入式(9),得到

表3 拟合参数
Table 3 Fitting parameters

试件编号	A_1	A_2	B	C	R^2
RN0-20	-135.191 53	24 700.581 51	0.334 45	0.067 59	0.998 78
RN0-200	-181.329 26	31 665.489 25	0.355 83	0.089 23	0.997 78
RN0-400	486.391 59	48 025.089 64	0.398 36	0.066 28	0.998 71
RN50-20	92.485 41	23 142.441 48	0.359 02	0.061 69	0.999 69
RN50-200	-165.944 02	31 757.323 77	0.395 19	0.082 54	0.998 15
RN50-400	-569.055 53	46 633.654 12	0.378 49	0.082 93	0.999 45
RN100-20	-1 584.961 97	21 636.921 56	0.294 22	0.101 74	0.998 55
RN100-200	-972.560 57	31 334.310 77	0.337 93	0.093 59	0.999 07
RN100-400	439.520 20	39 378.359 77	0.379 12	0.046 82	0.998 51

$$\frac{\sigma_p}{\epsilon_p} = E_{rT} \exp \left[- \left(\frac{\epsilon_p}{\alpha} \right)^m \right] \quad (12)$$

对式(12)进行求导,得到应力-应变曲线斜率与应变发展的关系

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = E_{rT} \exp \left[- \left(\frac{\epsilon_p}{\alpha} \right)^m \right] \left[1 - m \left(\frac{\epsilon_p}{\alpha} \right)^{m-1} \right] \quad (13)$$

达到峰值应力时曲线斜率为0,由此得到

$$E_{rT} \exp \left[- \left(\frac{\epsilon_p}{\alpha} \right)^m \right] \left[1 - m \left(\frac{\epsilon_p}{\alpha} \right)^{m-1} \right] = 0 \quad (14)$$

联立式(12)、式(14)得到

$$\alpha = \frac{\epsilon_p}{\left(\frac{1}{m} \right)^{\frac{1}{m}}} \quad (15)$$

$$m = \frac{1}{\ln \frac{E_{rT} \epsilon_p}{\sigma_p}} \quad (16)$$

将试验得到的各组试件峰值应力、应变分别代入式(15)、式(16),得到各组所对应的参数 m 、 α 的值(见表4)。

为了研究不同温度梯度以及再生粗骨料取代率对再生混凝土损伤的影响状况,分别将各组混凝土

表4 Weibull分布函数

Table 4 Weibull distribution parameters

试件编号	α	m
RN0-20	0.002 81	1.914 27
RN0-200	0.002 74	1.832 30
RN0-400	0.002 80	1.793 86
RN50-20	0.002 62	1.972 13
RN50-200	0.002 78	1.899 9
RN50-400	0.002 82	1.797 82
RN100-20	0.002 69	1.773 85
RN100-200	0.002 84	2.064 62
RN100-400	0.002 67	1.617 13

土所拟合出来的 Weibull 分布参数代入式(9)进行修正,将经过修正得到的损伤本构模型关系与试验过程曲线进行对比,对比结果见图4。

根据混凝土试件在轴心受压加载过程中的声发射累计撞击计数,分别对不同再生粗骨料取代率再生混凝土试件的位错、滑移和破坏过程进行损伤演化分析,将试验测得的各组试件的 E_{rT} 、 ϵ 和拟合参数 m 、 α 代入式(8),得到应变和损伤变量的关系曲线(见图5)。

从图5可以看出,随着温度梯度的增加,3种再生粗骨料取代率再生混凝土试件的初始损伤均增大,且相同温度下粗骨料取代率越高,再生混凝土试件的初始损伤变量就越大。其主要原因在于,相对于低取代率再生混凝土,高取代率再生混凝土试件在前期未受压时结构内部就存在各种缺陷(如高温后水泥水化矿物成分的变化及再生粗骨料自身的缺陷、新旧砂浆界面过渡区黏结力差等)。各组试件的损伤变量发展过程表现为在应变相对较小时,损伤发展先慢后快,随着试件进入塑性阶段,损伤发展趋势变缓。

用声发射累计撞击计数替代应变,运用式(11)得到各组试件在受压过程中声发射累计撞击计数与损伤变量之间的关系曲线(见图6)。

从图6可以看出,各组再生混凝土试件的损伤变量均呈现出随累计撞击计数的增加而快速增长到缓慢发展的2个阶段,且随着温度梯度的增加,初始损伤变量也更大。同一温度下,与低取代率再生混凝土相比,初始损伤更大的高取代率再生混凝土试件损伤变量增长速度更快。再生混凝土试件的损伤变量在累计撞击计数相对较小的情况下达到了峰值,这是由于高温损伤以及再生混凝土试件内部初始缺陷和细微裂缝导致在较短的时间内发生破坏。

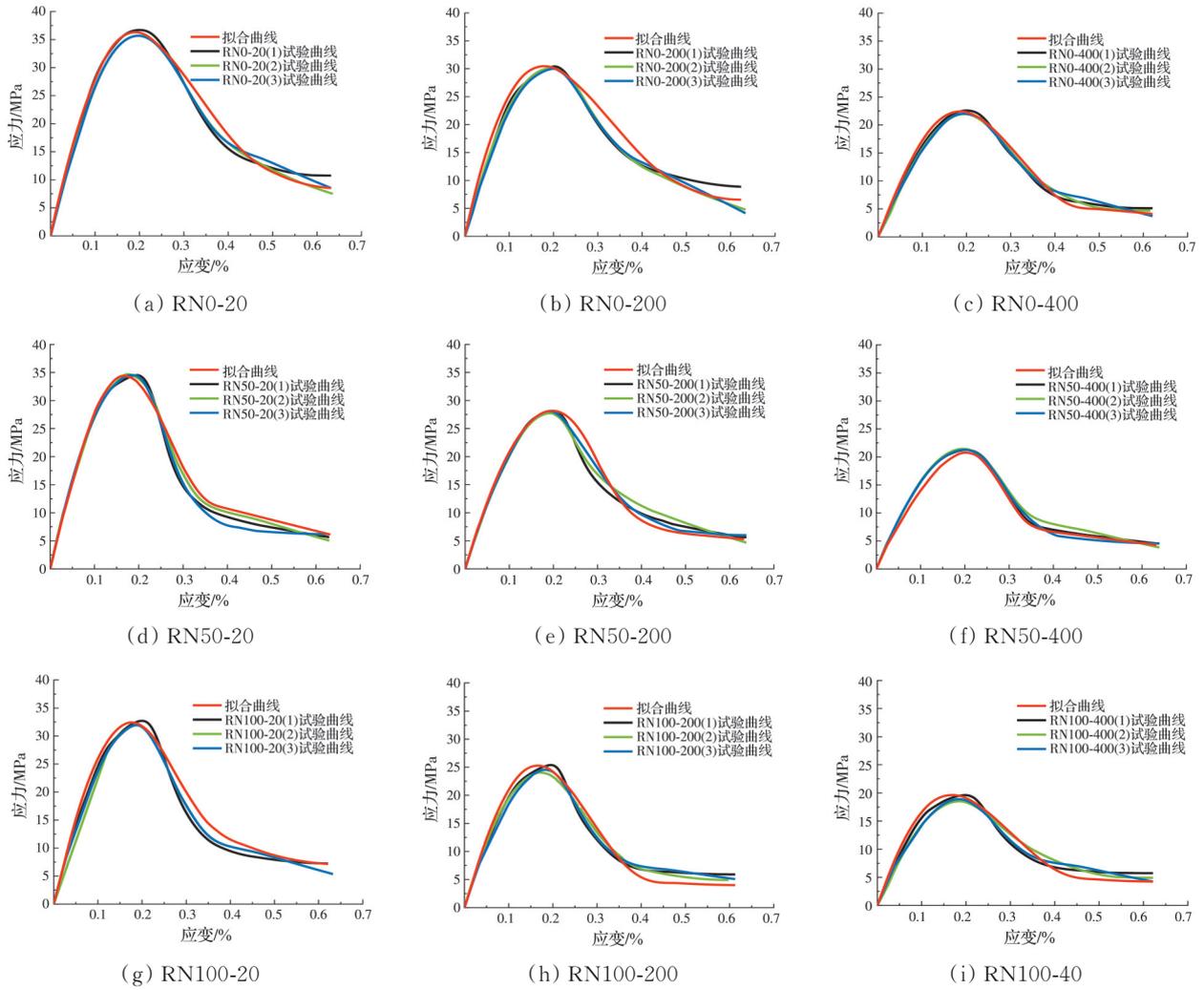


图 4 再生混凝土试件试验值与拟合值对比

Fig. 4 Comparison of test and fitting curves of recycled concrete specimens

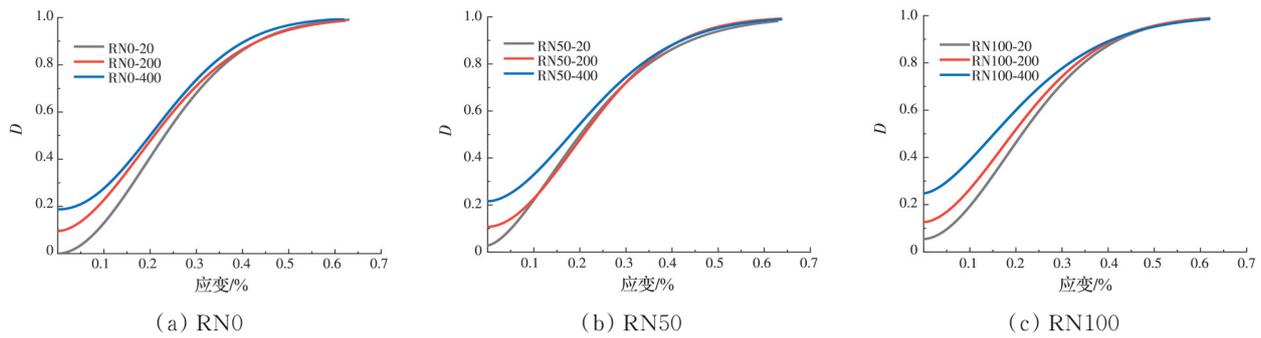


图 5 再生混凝土试件损伤变量与应变关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between damage variable and strain of recycled concrete specimen

2.4 模型验证

为验证运用 Weibull 分布函数得到的混凝土本构模型的可靠性,引入 3 篇经历不同温度作用后(分别为 20、300、400 °C)的混凝土的试验数据进行应力-应变试验结果计算模型拟合,拟合结果如图 7 所示。从拟合结果可以看出,通过 Weibull 分布函数所建立的经历不同温度梯度后的再生混凝土损伤模型的可靠性较高。

3 结论

1)经碳化和高温作用后的再生混凝土轴心受压过程中声发射特征参数与结构内部损伤联系紧密。通过不同应力阶段的声发射损伤定位图能够清晰地看出再生混凝土内部裂缝的形成和发展过程,接近峰值应力的损伤定位图与试件最终破坏位置大致符合。

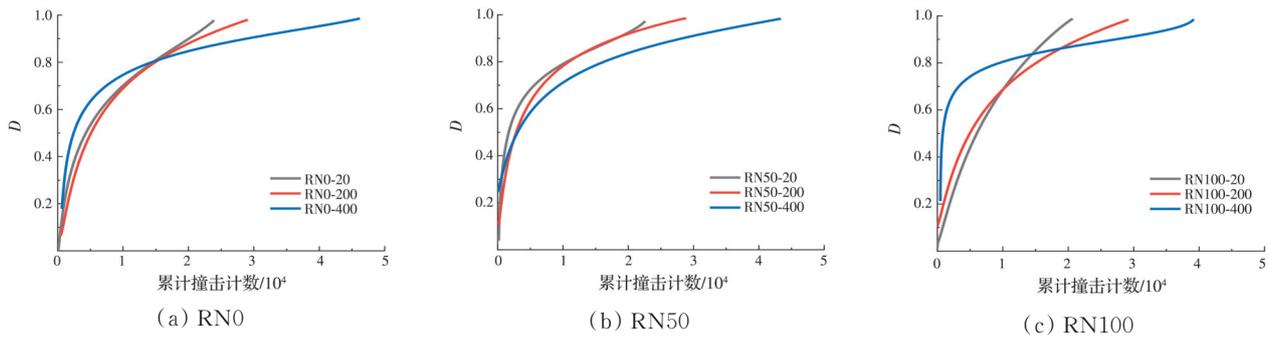


图6 再生混凝土试件损伤变量与累计撞击计数关系曲线

Fig. 6 Relationship curves between damage variable and cumulative hit count of recycled concrete specimen

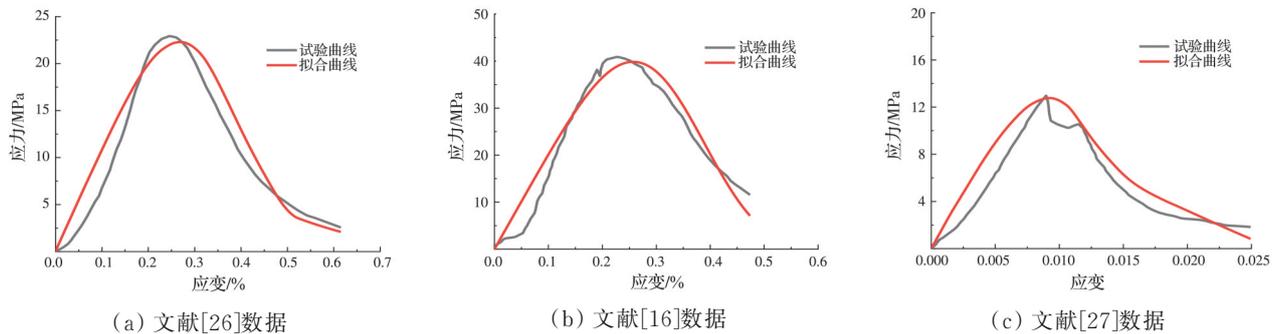


图7 拟合应力-应变曲线与试验曲线的对比

Fig. 7 Comparison between fitting stress-strain curve and test curve

2)依据声发射特征参数与应变关系曲线图,分析了3种不同再生粗骨料取代率再生混凝土试件在不同温度梯度下的参数变化规律。随着温度的升高,再生混凝土试件的初始损伤增大,单轴受压过程中释放的能量和累计撞击计数均增加,而承载力不断减小。

3)运用 Weibull 分布函数建立理论应力-应变曲线模型,拟合得出的曲线趋势与试验过程得到的曲线趋势相近。基于声发射累计撞击计数建立的不同温度梯度下碳化混凝土损伤模型可用于分析再生混凝土轴心受压下的损伤演化规律。

参考文献

- [1] 顾金土, 陈云, 苏杰, 等. 建筑垃圾资源化生产线的设计和实践[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(4): 36-39.
GU J T, CHEN Y, SU J, et al. Design and practice of construction waste recycling production line [J]. New Building Materials, 2021, 48(4): 36-39. (in Chinese)
- [2] 王晓丽, 李秋义, 陈帅超, 等. 工业固体废弃物在新型建材领域中的应用研究与展望[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(11): 3456-3464.
WANG X L, LI Q Y, CHEN S C, et al. Application research and prospect of industrial solid waste in new building materials [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic

Society, 2019, 38(11): 3456-3464. (in Chinese)

- [3] ZHU P H, HAO Y L, LIU H, et al. Durability evaluation of three generations of 100% repeatedly recycled coarse aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 210: 442-450.
- [4] XIAO Q H, CAO Z Y, GUAN X, et al. Damage to recycled concrete with different aggregate substitution rates from the coupled action of freeze-thaw cycles and sulfate attack [J]. Construction and Building Materials, 2019, 221: 74-83.
- [5] KIM Y, HANIF A, USMAN M, et al. Influence of bonded mortar of recycled concrete aggregates on interfacial characteristics - Porosity assessment based on pore segmentation from backscattered electron image analysis [J]. Construction and Building Materials, 2019, 212: 149-163.
- [6] LEI B, LI W G, TANG Z, et al. Durability of recycled aggregate concrete under coupling mechanical loading and freeze-thaw cycle in salt-solution [J]. Construction and Building Materials, 2018, 163: 840-849.
- [7] 阳能军, 姚春江, 袁晓静. 基于声发射的材料损伤检测技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
YANG N J, YAO C J, YUAN X J. Material damage detection technology based on acoustic emission [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2016. (in Chinese)

- [8] 李冬生, 杨伟, 喻言. 土木工程结构损伤声发射监测及评定: 理论、方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
LI D S, YANG W, YU Y. Acoustic emission monitoring and assessment of structural damage in civil engineering: Theory, method and application [M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)
- [9] 刘琼, 肖建庄, 郅晓, 等. 基于再生骨料方位的模型再生混凝土损伤演化分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(10): 1417-1424.
LIU Q, XIAO J Z, ZHI X, et al. Damage evolution study of modeled recycled concrete based on orientation of recycled aggregate [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(10): 1417-1424. (in Chinese)
- [10] 安新正, 王小学, 姜新佩, 等. 单轴受压下再生混凝土的损伤特性研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2012, 29(4): 1-4.
AN X Z, WANG X X, JIANG X P, et al. Experimental study on damage properties of recycled concrete under uniaxial compression [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2012, 29(4): 1-4. (in Chinese)
- [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.
LI J T, YU J, QIN Y J, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of concrete materials with different initial defects under uniaxial compression [J]. Concrete, 2020(1): 7-10, 14. (in Chinese)
- [12] HENRY M, DARMA I S, SUGIYAMA T. Analysis of the effect of heating and re-curing on the microstructure of high-strength concrete using X-ray CT [J]. Construction and Building Materials, 2014, 67: 37-46.
- [13] 商效瑀, 杨经纬, 李江山. 基于CT图像的再生混凝土细观破坏裂纹分形特征[J]. 复合材料学报, 2020, 37 (7): 1774-1784.
SHANG X Y, YANG J W, LI J S. Fractal characteristics of meso-failure crack in recycled coarse aggregate concrete based on CT image [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(7): 1774-1784. (in Chinese)
- [14] 岳强, 王丽, 刘福胜, 等. 基于真实细观模型的再生混凝土破坏数值研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2): 221-228.
YUE Q, WANG L, LIU F S, et al. Numerical study on damage process of recycled aggregate concrete by real meso-scale model [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2): 221-228. (in Chinese)
- [15] RYU S H, LEE Y O, KIM S W, et al. Assessing the fracture and damage process in recycled aggregate concrete under compressive loading by acoustic emission [J]. Advanced Materials Research, 2010, 163-167: 2528-2531.
- [16] GENG J S, SUN Q, ZHANG W Q, et al. Effect of high temperature on mechanical and acoustic emission properties of calcareous-aggregate concrete [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 106: 1200-1208.
- [17] 马腾飞. 混凝土碳化反应的危害及施工中防治分析[J]. 工程技术研究, 2019, 4(23): 107-108.
MA T F. Harm of concrete carbonation reaction and prevention analysis in construction [J]. Engineering and Technological Research, 2019, 4(23): 107-108. (in Chinese)
- [18] 赵东拂, 刘梅. 高强混凝土高温后剩余强度及无损检测试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(S2): 365-372.
ZHAO D F, LIU M. Experimental study on residual strength and nondestructive testing of high strength concrete after high temperature [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(Sup 2): 365-372. (in Chinese)
- [19] 刘庆, 赵铁军, 刘志强, 等. 高温作用下混凝土耐久性劣化性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(3): 897-902.
LIU Q, ZHAO T J, LIU Z Q, et al. Degradation of durability of concrete under elevated temperature [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(3): 897-902. (in Chinese)
- [20] 张亚梅. 土木工程材料[M]. 4版. 南京: 东南大学出版社, 2013.
ZHANG Y M. Civil engineering materials [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2013. (in Chinese)
- [21] 宋少民, 刘娟红. 废弃资源与低碳混凝土[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
SONG S M, LIU J H. Waste resources and low-carbon concrete[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016. (in Chinese)
- [22] 花尉攀, 李凯峰, 谢晓杰. 高温后混凝土抗压强度及细观损伤机理实验研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40 (9): 1317-1321.
HUA W P, LI K F, XIE X J. Experimental study on compressive strength and meso-damage of concrete under high temperature [J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(9): 1317-1321. (in Chinese)
- [23] KRAJCINOVIC D, LEMAITRE J. Continuum damage mechanics theory and application [M]. Vienna: Springer Vienna, 1987.
- [24] HEIPLE C R, CARPENTER S H, CARR M J. Acoustic emission from dislocation motion in precipitation-strengthened alloys [J]. Metal Science, 1981, 15(11/12): 587-598.
- [25] WADLEY H N G, SCRUBY C B, SPEAKE J H. Acoustic emission for physical examination of metals [J]. International Metals Reviews, 1980, 25(1): 41-64.
- [26] 于江, 袁飞, 秦拥军. 不同骨料粒径混凝土声发射特性

分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(5): 61-66, 94.

YU J, YUAN F, QIN Y J. Analysis of acoustic emission characteristics of concrete with different aggregate size [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2020, 42(5): 61-66, 94. (in Chinese)

[27] 周兴宇, 杨鼎宜, 李玉寿, 等. 基于声发射损伤监测技术的高温后混凝土受压本构关系研究[J]. 硅酸盐通报,

2019, 38(12): 3980-3987.

ZHOU X Y, YANG D Y, LI Y S, et al. Constitutive relationship of concrete under compressive after high temperature based on acoustic emission damage monitoring technology [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(12): 3980-3987. (in Chinese)

(编辑 胡玲)