

文章编号:1007-9629(2026)03-0310-08

# 掺碳纳米管固废混凝土的声发射损伤本构模型分析

刘京红<sup>1</sup>, 刘轩<sup>1</sup>, 冯鹏龙<sup>2</sup>, 李兵兵<sup>3</sup>, 张凌博<sup>1,\*</sup>

(1.天津城建大学土木工程学院,天津 300384; 2.邢台路桥建设集团有限公司,河北邢台 054001;  
3.中铁建设集团有限公司,北京 100040)

**摘要:**为明确掺加碳纳米管固废混凝土声发射参数与损伤演化关系,对不同再生骨料取代率和碳纳米管(CNT)掺量的固废混凝土进行单轴压缩声发射试验,根据声发射参数构建了损伤本构模型,通过应变-损伤变量进行固废混凝土内部损伤分析。结果表明:当CNT掺量为0.10%时,固废混凝土抗压强度最大,能量、累计振铃计数及 $b$ 值变化相对密实;碳纳米管固废混凝土失稳破坏伴随能量、累计振铃计数和 $b$ 值的突变。所建立的损伤本构模型有效拟合了试件的应力-应变全曲线,损伤变量随应变的增加呈现S型增长趋势,该模型可准确描述碳纳米管固废混凝土的损伤演化过程。

**关键词:**固废混凝土;声发射;碳纳米管;损伤模型

中图分类号:TU528.44

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2026.03.004

## Research on Acoustic Emission Constitutive Model of Solid Waste Concrete Incorporated with Carbon Nanotubes

LIU Jinghong<sup>1</sup>, LIU Xuan<sup>1</sup>, FENG Penglong<sup>2</sup>, LI Bingbing<sup>3</sup>, ZHANG Lingbo<sup>1,\*</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Xingtai Road Bridge Construction Group Co., Ltd., Xingtai 054001, China; 3. China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing 100040, China)

**Abstract:** To investigate the relationship between acoustic emission parameters and damage evolution in solid waste concrete, uniaxial compression tests were conducted with different substitution ratios of recycled aggregates and different dosages of carbon nanotubes(CNT). The entire testing process was monitored for damage using acoustic emission technology, and a damage constitutive model based on the stress-strain curve was established. Internal damage analysis of the solid waste concrete was performed using strain-damage variables. The results indicate that when the CNT incorporation rate is 0.10%, the compressive strength of the solid waste concrete reaches the highest value. Meanwhile the changes in energy, cumulative ring count, and  $b$ -value are relatively dense. Through the analysis of acoustic emission parameters, it is found that the unstable failure of solid waste concrete occurs with the abrupt change stages of energy and cumulative ring count. The established damage constitutive model effectively fits the entire stress-strain curve of the specimen. In this model, the damage variable exhibits an S-shaped growth trend with the increase of strain, which can accurately describe the damage evolution process of solid waste concrete within a specific time.

**Key words:** solid waste concrete; acoustic emission; carbon nanotube; damage model

为推进绿色建材可持续发展,加快资源循环利用 进程,推广固废混凝土成为有效缓解环境与资源压力

收稿日期:2025-05-21; 修订日期:2025-09-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(12102295);天津市自然科学基金资助项目(23JCQNJC00850,21JCYBJC00730)

第一作者:刘京红(1975—),女,河北保定人,天津城建大学教授,硕士生导师,博士。E-mail: liujinghongfree@sina.com

通讯作者:张凌博(1989—),男,河北唐山人,天津城建大学讲师,硕士生导师,博士。E-mail: lbzh@tcu.edu.cn

的重要举措。但是固废混凝土强度相对较低,易因各种不利因素而产生内部裂缝<sup>[1-5]</sup>。现有研究显示<sup>[6-8]</sup>,掺加碳纳米管(CNT)能显著提升固废混凝土性能。掺入固废易导致混凝土强度下降、脆性增大,而CNT可桥连微裂纹、优化界面过渡区,既能够增强固废混凝土密实度以提高其抗压和抗折强度,又能够改善材料韧性与耐久性,从而助力固废高效资源化利用,兼顾环保与力学性能优化,具有重要工程价值。

声发射(AE)检测作为高效准确的无损检测技术,可用于固废混凝土裂缝的早期监测诊断<sup>[9-11]</sup>。研究<sup>[12-15]</sup>表明,固废混凝土的损伤及变形特征与材料的力学性能密切相关。过镇海<sup>[16]</sup>通过受压试验建立了应力-应变标准曲线方程。Ouyang等<sup>[17]</sup>和Ohtsu等<sup>[18]</sup>发现了声发射事件率与混凝土损伤变量之间的关系,并采用声发射参数估计了混凝土损伤程度。现有研究多基于试验数据与经验模型相关联,对碳纳米管固废混凝土的细观损伤和声发射之间的关联机制仍需深入探索。

本文对不同CNT掺量下固废混凝土进行单轴受压声发射试验,以声发射参数和 $b$ 值(混凝土破裂过程中声发射小事件数与大事件数的比值)为特征,基于Lemaitre应变等效原理与Weibull分布特性,构

建损伤本构模型以实现无量纲应力-应变全曲线的拟合分析,建立应变与损伤变量的关系,为碳纳米管固废混凝土的细观结构损伤机制研究提供理论依据,以期为其在工程领域的高效应用奠定科学基础。

## 1 试验概况

水泥采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥;细骨料为天然河砂和铁尾矿砂(T);天然粗骨料(NCA)采用连续级配5~25 mm碎石;再生粗骨料(RCA)来自废弃混凝土梁、柱,粒径5~25 mm,连续级配;多壁碳纳米管(CNT)购自苏州碳丰石墨烯科技有限公司;减水剂为聚羧酸高性能减水剂(PC);分散助剂为聚乙烯吡咯烷酮(PVP)<sup>[19]</sup>;水为实验室自来水。

设计水灰比<sup>1)</sup>为0.52,再生粗骨料取代率为50%,铁尾矿砂取代率为50%,碳纳米管掺量分别为0%,0.05%,0.10%,0.15%和0.20%,制备5组尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的固废混凝土试件,每组9个。同时制备1组未掺加再生粗骨料和碳纳米管的对照组。具体配合比见表1。混凝土试件浇筑成型24 h后脱模,随后放入标准养护箱内分别养护3、7、28 d,养护环境控制为(20±2)℃、相对湿度不低于95%。

表1 固废混凝土的配合比  
Table 1 Mix proportions of solid waste concretes

Group	Cement	Water	Sand	NCA	RCA	CNT	PC
R0-T50-C0	373	194	322	1 207.50	0	0	1.492
R50-T50-C0	373	194	322	603.75	603.75	0	1.492
R50-T50-C5	373	194	322	603.75	603.75	0.186 5	1.492
R50-T50-C10	373	194	322	603.75	603.75	0.373 0	1.492
R50-T50-C15	373	194	322	603.75	603.75	0.559 5	1.492
R50-T50-C20	373	194	322	603.75	603.75	0.746 0	1.492

Unit: kg/m<sup>3</sup>

采用以下设备进行试验:混凝土卧式搅拌机;标准恒温恒湿养护箱;中国科学院武汉岩土力学研究所生产的RMT150C岩石压力试验机;江阴市威恒工业技术有限公司产超声波细胞破碎仪;北京软岛时代科技有限公司产DS5-8B声发射仪。

通过添加聚乙烯吡咯烷酮PVP,发挥其物理化学作用打破CNT的团聚,并使CNT稳定、均匀地分散在溶剂中,从而充分发挥CNT的优异性能。采用的PVP、PC和CNT质量比为4:4:1。首先按配比称量PVP和PC,加入含有定量水的烧杯中;然后加入CNT,设定超声波功率300 W,持续分散30 min;采

用紫外-可见分光光度法表征CNT分散液,测得不同时间下特定波长吸光度变化率均小于5%,表明其分散均匀且稳定性良好。将各原料按表1称量好,按顺序(粗骨料、水泥、细骨料)加入搅拌机中混合均匀。并在搅拌过程中加入前述CNT分散液。成型试件并养护至规定龄期。设定DS5-16B型声发射系统采样频率为3.0 MHz,门槛值为45 dB。在探头传感器上涂抹凡士林作为耦合剂,将4个探头分别安装于试件4个侧面以构建空间三维声音定位系统。对养护3、7 d的试件,仅开展单轴抗压试验,对28 d试件在进行单轴抗压试验的同时全程进行声发射信号采集。

1)文中涉及的水灰比、取代率、掺量等除特别说明外均为质量比或质量分数。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 单轴抗压试验结果

为研究不同龄期、不同碳纳米管掺量对铁尾矿砂固废混凝土抗压强度的影响,对养护至设定龄期的试件进行抗压试验,结果如图1所示。

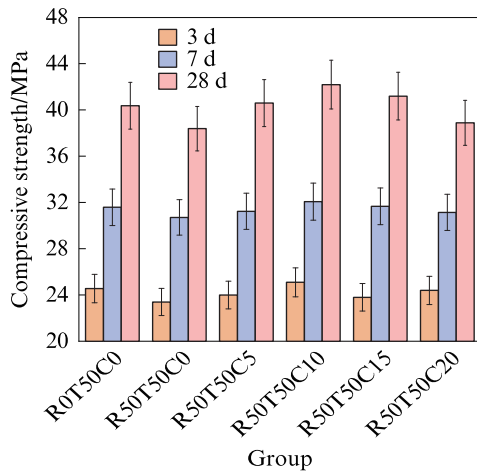


图1 不同CNT掺量下固废混凝土的抗压强度

Fig. 1 Compressive strength of solid waste concretes with different CNT contents

由图1可知:加入适量CNT可提高固废混凝土的抗压强度;当CNT掺量为0.10%时,固废混凝土的3、7、28 d抗压强度分别达到25.10、32.07、42.20 MPa,较R50-T50-C0对照组分别提高了7.26%、4.43%和9.92%,较R0-T50-C0对照组分别提高了2.20%、1.52%和4.53%。推测CNT的掺入会细化混凝土孔隙结构,从而显著提升固废混凝土的抗压强度。

### 2.2 声发射特征参数

#### 2.2.1 累计振铃计数和能量

声发射是指材料中局部源能量迅速释放所产生的瞬态弹性波现象,亦被称为“应力波发射”。声发射累计振铃计数与能量能够反映混凝土试件内部裂缝的发展过程。图2呈现了试件所受荷载与声发射参数(累计振铃计数、能量)随时间的变化曲线。因各组试件强度不同,采用归一化时间能减少误差。本文将时间轴映射到[0, 1.0]区间,0代表开始(加载始点),1.0代表结束(试件破坏)。

由图2可知,不同CNT掺量固废混凝土试件在单轴压缩过程中,声发射信号的演变历程大致可划分为3个阶段,即初始压缩阶段(阶段I)、塑性变形阶段(阶段II)和破坏阶段(阶段III)。在阶段I,随着荷载增加,混凝土通过裂隙闭合和裂隙之间的摩擦作用释放应变能,导致累计振铃计数变化明显,初

始孔隙被压缩,能量波动明显,阶段I能量峰值出现并伴随产生一定量的声发射信号。在阶段II,声发射活动程度随荷载提升而增强,该阶段声发射信号持续累积。在阶段III初期,在接近峰值应力时,宏观和微观裂纹扩展,试件内部摩擦效应与新裂纹产生都会导致声发射信号增加。在阶段III后期,达到峰值应力后,试件破裂,表面剥脱并伴随断裂声,声发射计数进入稳态期,直到试件完全破坏。综上,固废混凝土内部裂纹萌生、发展、扩展和失稳的整个过程可以由声发射信号的不同变化特征反映,因此声发射信号可作为试件失稳破坏的预兆。

#### 2.2.2 声发射b值

声发射b值可以反映混凝土受载时的应力状态及混凝土内部微裂纹尺度变化情况。应用改进地震学中的G-R公式,得到混凝土b值计算式如下:

$$\lg N_A = a - b \times \frac{A_{dB}}{20} \quad (1)$$

式中: $N_A$ 为声发射事件数; $A_{dB}$ 为振幅值,dB; $a$ 为经验系数。

依照声发射的采样频率,确定1000个声发射样本作为计算窗口,取样步长为100个数据,震级间隔取5,运用最小二乘法求解声发射b值。图3为单轴受压下固废混凝土b值随时间的变化曲线。

由图3可见,在应力水平约为峰值应力的10%附近才开始有b值数据得出。试件损伤过程分为3个阶段,即微裂纹形成和聚集阶段(阶段1)、宏观裂缝形成和扩展阶段(阶段2)和裂缝失稳扩展阶段(阶段3)。在阶段1,b值波动范围较小,初始孔隙被压缩,试件内部出现新的裂缝,并且该阶段由微裂纹主导。在阶段2,b值波动平缓,反映混凝土内部损伤稳定发展。随着应变能持续积累,试件内部微裂纹发展为宏观裂纹,大振幅事件不断发展,从而推动b值提升。在阶段3,b值出现较大波动,试件破坏。之后b值迅速降低到最低状态,微裂纹发展为宏观裂纹,试件失稳破坏。对比图3(a)和图3(d)可知,当CNT掺量为0.10%时,b值在加载中期出现小幅度波动,伴随着少量不稳定裂纹的产生,这会改善混凝土的内部结构使其更加密实。从b值的变化趋势可以推测固废混凝土的内部损伤过程。例如,b值的突增代表固废混凝土内部裂纹失稳破坏,故其可以作为固废混凝土破坏的前兆。

### 2.3 损伤本构模型

#### 2.3.1 模型构建

基于Lemaitre应变等效原理,损伤材料本构关系在特定条件下可等效为无损本构模型。当固废混

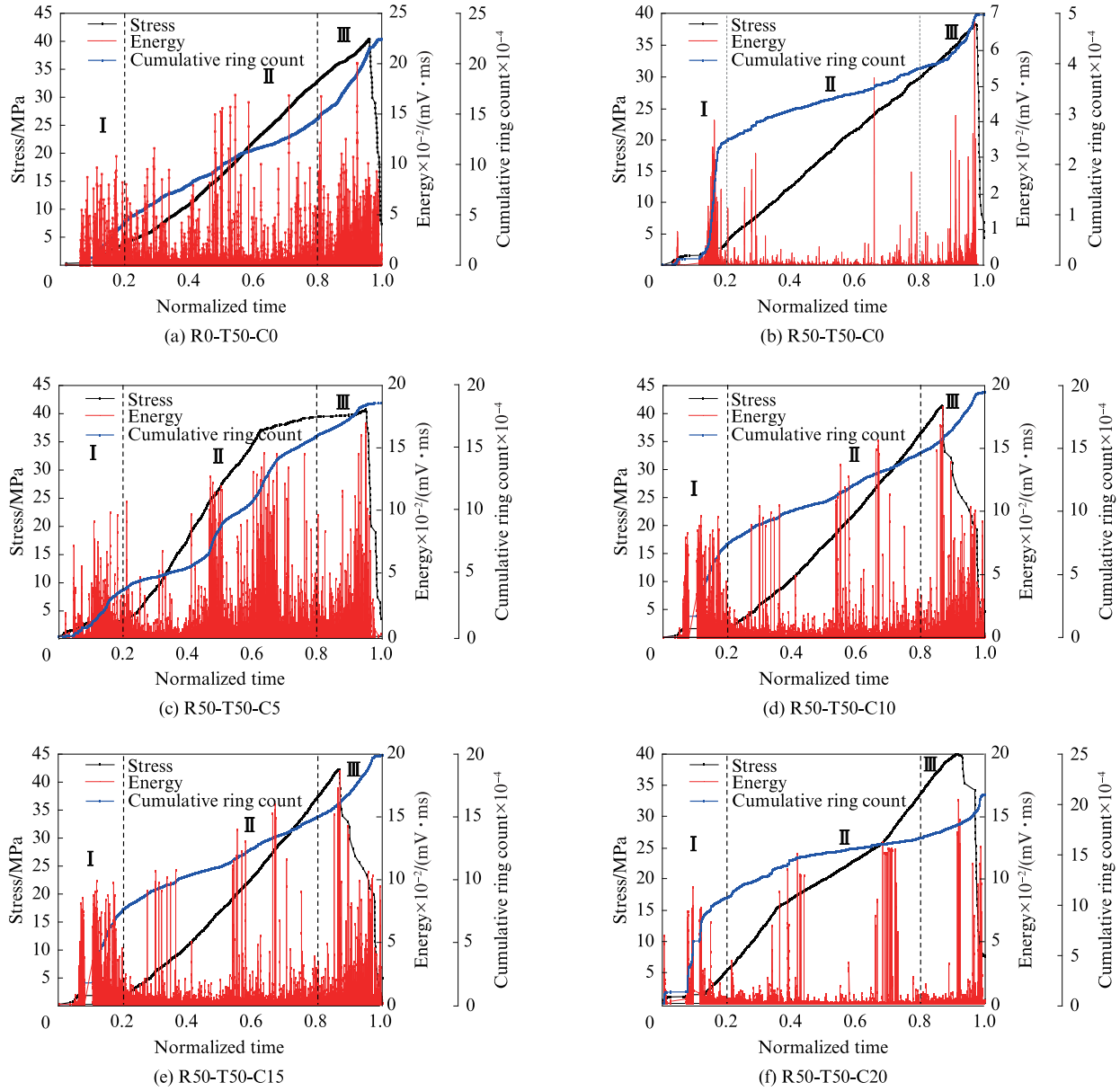


图2 单轴受压下试件的荷载、能量和累计振铃计数随时间的变化曲线

Fig. 2 Variation curves of load, energy, and cumulative ring count over time for specimens under uniaxial compression

混凝土承受单轴压力时,损伤材料在名义应力 $\sigma$ 作用下产生的应变 $\epsilon$ 可等效为未损伤材料在有效应力 $\sigma_n$ 作用下的应变,据此建立固废混凝土受压状态下的本构方程,如式(2)所示。

$$\epsilon = \frac{\sigma_n}{E} \quad (2)$$

式中: $E$ 为未损伤材料的弹性模量。

有效应力与名义应力的关系由式(3)确定。

$$\sigma_n = \frac{\sigma}{1-D} \quad (3)$$

式中: $D$ 为损伤变量。

联立式(2)、(3),得到固废混凝土的损伤本构方程,如式(4)所示。

$$\epsilon = \frac{\sigma}{(1-D)E} \quad (4)$$

在固废混凝土受压破坏过程中,其细观单元体破坏表现为随机分布的特征。细观单元体在发生破坏前遵循线弹性本构关系,且其强度特性服从Weibull分布,对应的概率密度函数 $\varphi(F)$ 如式(5)所示。

$$\varphi(F) = \frac{k}{m} \left(\frac{F}{m}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{F}{m}\right)^k\right] \quad (5)$$

式中: $F$ 为细观单元体强度的分布变量; $m$ 和 $k$ 为Weibull分布的尺度参数和形状参数。

将发生破坏的细观单元体数量记为 $n$ ,总细观单

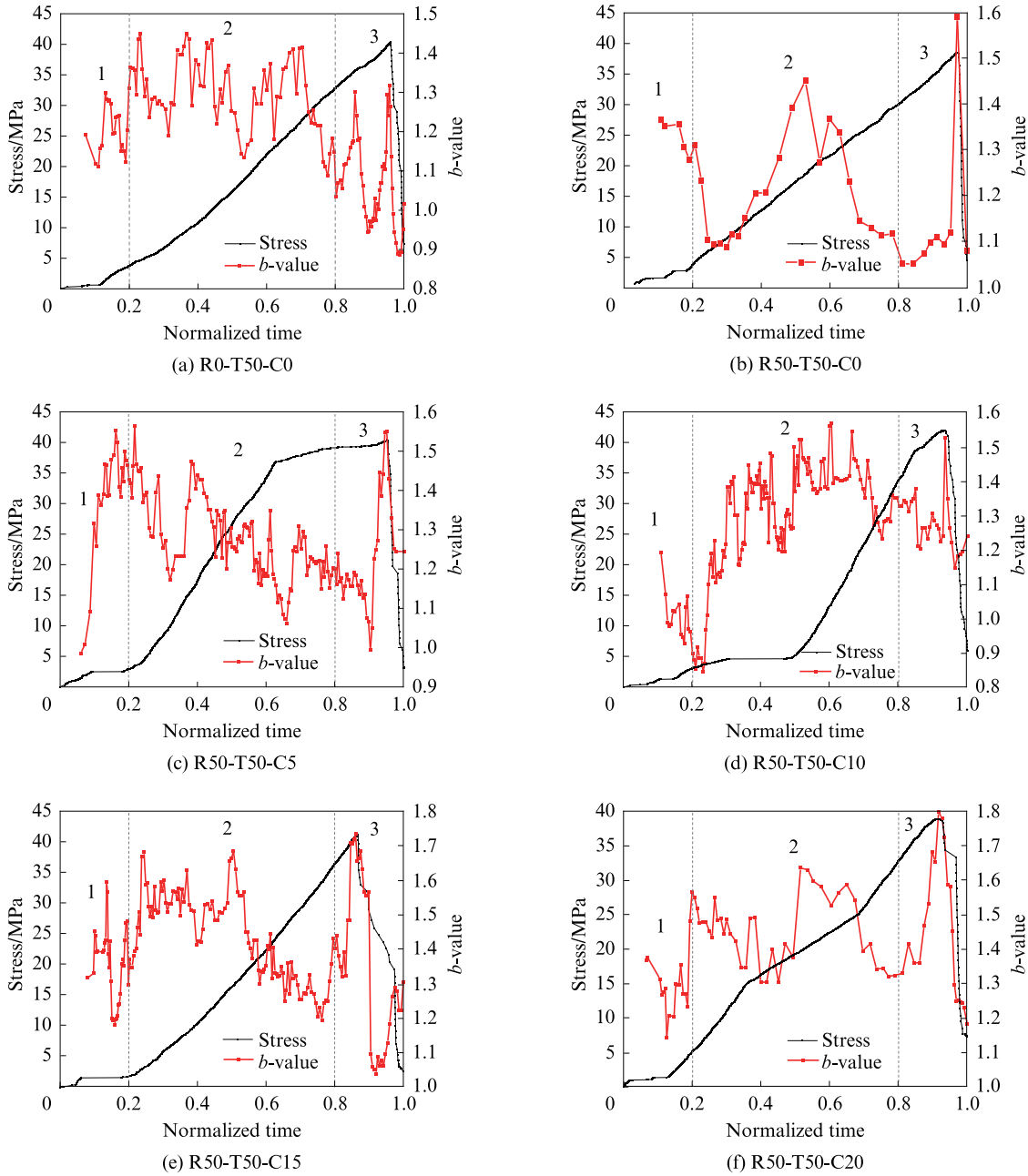


图3 单轴受压下固废混凝土b值随时间的变化曲线

Fig. 3 Variation curves of *b*-value for solid waste concretes under uniaxial compression over time

元体数量记为  $N$ , 随着轴向应变的增加,  $n$  呈递增趋势, 当满足初始边界条件时:

$$n = N \int_0^\epsilon F dF = -N \exp \left[ - \left( \frac{\epsilon}{a} \right)^k \right] + C \quad (6)$$

式中:  $C$  为初始条件确定的积分常数。

当  $\epsilon=0$  时,  $n=0, N=C$ , 则有:

$$\frac{n}{N} = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\epsilon}{a} \right)^k \right] \quad (7)$$

损伤变量  $D$  定义为在荷载作用下发生破坏的细观单元体数量与总细观单元体数量的比值:

$$D = \frac{n}{N} \quad (8)$$

将式(7)、(8)联立求解, 可推导出固废混凝土的损伤演化方程和损伤本构方程, 分别如式(9)、(10)所示。

$$D = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\epsilon}{a} \right)^k \right] \quad (9)$$

$$\sigma = E \cdot \epsilon \cdot \exp \left[ - \left( \frac{\epsilon}{a} \right)^k \right] \quad (10)$$

基于应力-应变曲线特征, 对峰值点(峰值应变  $\epsilon_0$ ,

峰值应力 $\sigma_0$ )处的切线斜率进行计算,应力-应变曲线在峰值点的导数为零,得到参数 $a$ 和 $k$ 的表达式:

$$a = \frac{\epsilon_0}{\left(\frac{1}{k}\right)^{\frac{1}{k}}} \quad (11)$$

$$k = \frac{1}{\ln\left(\frac{E\epsilon_0}{\sigma_0}\right)} \quad (12)$$

2.3.2 损伤模型曲线

将求得的参数 $a$ 和 $k$ (表2),代入固废混凝土损伤本构模型,推导出对应的方程表达式。图4为试验曲线和理论模型曲线对比图。

由图4可知,总体上试验曲线与理论模型曲线拟

合度较高。在峰值前,试验曲线与理论模型曲线偏差较小。在峰值后,两者偏差则相对明显。再生粗骨料的掺入使固废混凝土试验曲线与理论模型曲线

表2 损伤本构方程 $a, k$ 参数取值

Table 2 Parameter $a, k$ values of damage constitutive equation			
Group	$a$	$k$	$R^2$
R0-T50-C0	0.018 1	1.859	0.924 945
R50-T50-C0	0.019 5	1.460	0.919 134
R50-T50-C5	0.017 4	1.530	0.955 609
R50-T50-C10	0.019 3	1.886	0.953 310
R50-T50-C15	0.017 7	1.297	0.921 774
R50-T50-C20	0.019 3	1.614	0.948 712

Note:  $R^2$  represents the regression sum of squares under the fitted function.

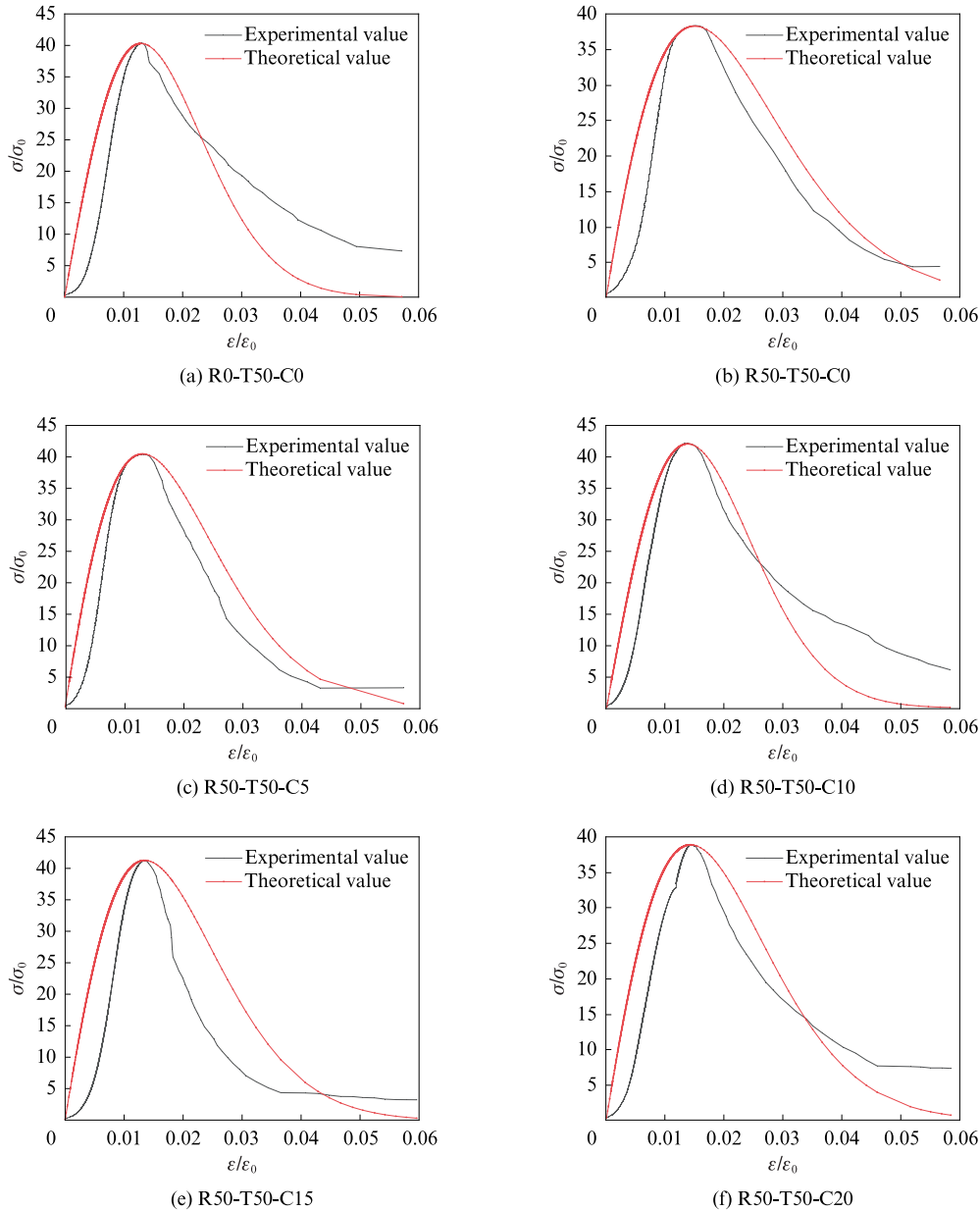


图4 试验曲线和理论模型曲线对比

Fig. 4 Comparison of experimental curve and theoretical model curve

在峰值应力后迅速下降。当CNT掺量为0.10%时,理论模型曲线下降段反弯点出现最早。加载后期试验曲线与理论模型曲线存在差异的主要原因为:损伤累积至特定临界值,导致材料性能加速退化,承载力急剧下降。

### 2.3.3 损伤变量演化特性

损伤的持续发展与累积是引发材料性能劣化的核心因素。基于固废混凝土的损伤演化方程,推导出其损伤变量随应变的变化关系,如图5所示。

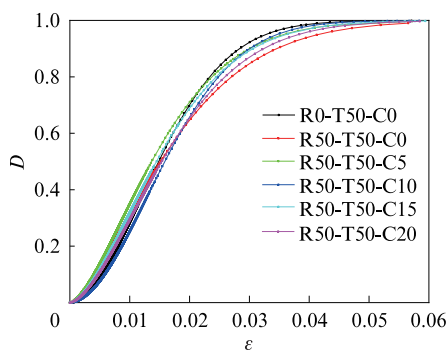


图5 固废混凝土损伤变量随应变的变化关系

Fig. 5 Variation relationship between damage variable and strain of solid waste concrete

由图5可知,固废混凝土的损伤变量随应变近似呈S型曲线增长。初始高加载速率促使损伤快速积累,导致弹性压缩变形受限。随着荷载的增加,固废混凝土的内部新裂纹增多,进入裂缝发展和失稳阶段,损伤变量突破阈值后急剧上升。在持续加载下,微裂纹扩展贯通为宏观裂纹,损伤持续积累但增速缓慢,最终曲线趋于平稳,试件完全破坏。

## 3 结论

(1)当铁尾矿砂掺量为50%时,随着CNT掺量的增加,再生粗骨料取代率为50%的固废混凝土的各龄期抗压强度先增加后降低。当CNT掺量为0.10%时,固废混凝土的抗压强度达到峰值,较未掺再生粗骨料的空白对照组提升了4.53%。

(2)固废混凝土单轴压缩损伤过程分为3个阶段。通过单轴抗压过程中试件的累计振铃计数、能量和 $b$ 值的变化,发现在破坏阶段这3个参数都出现了数值的突增并达到最大值,与之对应的是荷载达到最大值、试件破坏,因此可把声发射信号的瞬间突变作为试件破坏的前兆。

(3)依据Lemaitre应变等效原理,建立固废混凝土应力-应变的损伤本构模型,并构建损伤演化方程,得出损伤变量与应变的关系。该模型更清晰地揭示了碳纳米管固废混凝土材料损伤破坏的关键机

理,为其细观结构损伤机制研究提供了理论依据。

### 参考文献:

- [1] 黄虎,刘赵涵,邱庆明,等.基于声发射检测CSG材料损伤演变及裂纹识别[J].建筑材料学报,2024,27(6):565-572.  
HUANG Hu, LIU Zhaohan, QIU Qingming, et al. Damage evolution and crack identification of CSG material based on acoustic emission detection technology[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(6):565-572.(in Chinese)
- [2] 夏冬桃,喻诗汀,李彪,等.钢纤维增强碱矿渣再生混凝土的力学性能及碳排放评价[J].建筑材料学报,2024,27(10):938-945.  
XIA Dongtao, YU Shiting, LI Biao, et al. Mechanical properties and carbon emission assessment of steel fiber reinforced alkali-activated slag recycled aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(10):938-945.(in Chinese)
- [3] AMIN M S, EL-GAMAL S M A, HASHEM F S. Fire resistance and mechanical properties of carbon nanotubes-clay bricks wastes (Homra) composites cement[J]. Construction and Building Materials, 2015, 98:237-249.
- [4] 张永芳,文镜茜,董丽虹,等.基于碳纳米管及其复合材料的柔性应变传感器研究进展[J].材料导报,2024,38(14):70-80.  
ZHANG Yongfang, WEN Jingqian, DONG Lihong, et al. Research progress of high performance strain sensors based on carbon nanotubes and their composite[J]. Materials Reports, 2024, 38(14):70-80.(in Chinese)
- [5] 刘昱,周静海,吴迪,等.冻融循环下废弃纤维再生混凝土与钢筋的黏结性能[J].建筑材料学报,2023,26(9):1031-1038.  
LIU Yu, ZHOU Jinghai, WU Di, et al. Bond behavior between waste fiber-recycled concrete and reinforcement under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(9):1031-1038.(in Chinese)
- [6] AHMAD J, ZHOU Z. Properties of concrete with addition carbon nanotubes: A review[J]. Construction and Building Materials, 2023, 393:132066.
- [7] 程续,田威.基于Weibull分布多壁碳纳米管混凝土盐冻损伤分析[J].建筑材料学报,2025,28(3):202-209.  
CHENG Xu, TIAN Wei. Salt freezing damage analysis of multi-walled carbon nanotubes concrete based on Weibull distribution[J]. Journal of Building Materials, 2025, 28(3):202-209.(in Chinese)
- [8] FARDOUN H, SALIBA J, SAIYOURI N. Evolution of acoustic emission activity throughout fine recycled aggregate earth concrete under compressive tests[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022, 119:103365.
- [9] 刘金涛,崔娇伟,周煜,等.三维石墨烯-碳纳米管对超高性能混凝土机敏性能的影响[J].材料导报,2024,38(11):132-139.  
LIU Jintao, CUI Jiaowei, ZHOU Yu, et al. Effect of three-dimensional graphene-carbon nanotubes on the smart performance of ultra-high performance concrete[J]. Materials Reports, 2024, 38(11):132-139.(in Chinese)
- [10] SAMAL D K, RAY S. Wavelet entropy-based damage characterization and material phase differentiation in concrete

- using acoustic emissions[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 160:108144.
- [11] REN H L, LI T, NING J G, et al. Analysis of damage characteristics of steel fiber-reinforced concrete based on acoustic emission[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 148:107166.
- [12] 康玉梅,佟佳欣.多壁碳纳米管对钢渣混凝土力学及耐久性能的影响[J].*中南大学学报(自然科学版)*,2023,54(8):3070-3078. KANG Yumei, TONG Jiixin. Effect of multi-walled carbon nanotubes on the mechanical and durability of steel slag concrete [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2023, 54(8):3070-3078(in Chinese)
- [13] 刘京红,石文发,王伟,等.氧化石墨烯改性固废混凝土的制备及性能研究[J].*安全与环境学报*,2024,24(10):4022-4030. LIU Jinghong, SHI Wenfa, WANG Wei, et al. Manufacture and performance study of graphene oxide-modified solid waste concrete [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2024, 24 (10) : 4022-4030.(in Chinese)
- [14] 张国辉,魏雄,杨振东,等.细观初始孔隙缺陷对混凝土力学性能的影响[J].*建筑材料学报*,2024,27(5):425-431. ZHANG Guohui, WEI Xiong, YANG Zhendong, et al. Influence of mesoscopic initial pore defects on mechanical properties of concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2024, 27(5):425-431.(in Chinese)
- [15] 刘京红,冯鹏龙,杨晋荣,等.碳纳米管改性固废混凝土的制备及其工作性能研究[J].*功能材料*,2025,56(1):1223-1229. LIU Jinghong, FENG Penglong, YANG Jinrong, et al. Preparation and performance study of carbon nanotube modified solid waste concrete[J]. *Journal of Functional Materials*, 2025, 56(1):1223-1229.(in Chinese)
- [16] 过镇海.混凝土的强度和本构关系[M].北京:中国建筑工业出版社,2004. GUO Zhenhai. *Strength and constitutive relationship of concrete* [M]. Beijing:China Architecture and Building Press, 2004.(in Chinese)
- [17] OUYANG C S, LANDIS E, SHAH S P. Damage assessment in concrete using quantitative acoustic emission[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1991,117(11):2681-2698.
- [18] OHTSU M, ISODA T, TOMODA Y. Acoustic emission techniques standardized for concrete structures[J]. *Journal of Acoustic Emission*, 2007, 25:21-32.
- [19] 刘巧玲,李汉彩,彭玉娇,等.多壁碳纳米管增强水泥基复合材料的纳米力学性能[J].*复合材料学报*,2020,37(4):952-961. LIU Qiaoling, LI Hancan, PENG Yujiao, et al. Nanomechanical properties of multi-wall carbon nanotubes/cementitious composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(4): 952-961.(in Chinese)