高压物理学报

碳纳米管混凝土三点弯曲梁的声发射及损伤演化特征

李慧宽 黄山秀 陈小羊 郭佳奇

Acoustic Emission and Damage Evolution Characteristics of Carbon Nanotube Concrete Three-Point Bending Beam

LI Huikuan, HUANG Shanxiu, CHEN Xiaoyang, GUO Jiaqi

引用本文:
李慧宽, 黄山秀, 陈小羊, 等. 碳纳米管混凝土三点弯曲梁的声发射及损伤演化特征[J]. 高压物理学报, 2025, 39(1):014101. DOI: 10.11858/gywlxb.20240850
LI Huikuan, HUANG Shanxiu, CHEN Xiaoyang, et al. Acoustic Emission and Damage Evolution Characteristics of Carbon Nanotube Concrete Three-Point Bending Beam[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(1):014101. DOI: 10.11858/gywlxb.20240850

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240850

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

不同含水状态下裂隙砂岩的声发射及裂纹扩展试验研究
Experimental Study on Acoustic Emission and Crack Propagation of Fissured Sandstone with Different Moisture States
高压物理学报. 2023, 37(5): 054103 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230665

不同应变率和碳纳米管掺量下混凝土的力学性质与能量演化特征
Mechanical Properties and Energy Evolution Characteristics of Concrete under Different Strain Rates and Content of MWCNTs
高压物理学报. 2023, 37(1): 014101 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20220654

不同试验条件和含水状态下花岗岩的声发射与破裂演化特征
Acoustic Emission and Fracture Evolution Characteristics of Granite under Different Testing and Moisture Conditions
高压物理学报. 2022, 36(6): 064102 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20220577

混凝土界面过渡区对裂纹扩展过程的影响
Influence of Interfacial Transition Zone on Crack Propagation Process in Concrete
高压物理学报. 2023, 37(4): 044207 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230606

不同卸围压速率下花岗岩的力学性质及声发射特征
Mechanical Properties and Acoustic Emission Characteristics of Granite under Different Unloading Rates of Confining Pressures
高压物理学报. 2021, 35(1): 014102 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20200608

冲击载荷下平板玻璃裂纹扩展和破坏形态的数值模拟
Numerical Simulation of Crack Propagation and Damage Behavior of Glass Plates under Impact Loading
高压物理学报. 2022, 36(5): 054203 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20220558

DOI: 10.11858/gywlxb.20240850

碳纳米管混凝土三点弯曲梁的声发射及损伤演化特征

李慧宽[1], 黄山秀[1], 陈小羊[2], 郭佳奇[3]

（1. 河南理工大学化学化工学院, 河南 焦作 454003;
2. 中建七局交通建设有限公司, 河南 郑州 454004;
3. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454003）

摘要: 为研究碳纳米管掺量对混凝土梁损伤演化过程及裂纹扩展规律的影响，制备了质量分数分别为 0、0.1%、0.3%、0.5% 的碳纳米管混凝土三点弯曲梁试件。采用搭载声发射测试系统的 YNS300 电液伺服万能试验机开展三点弯曲试验，得到了声发射能量、振铃计数和幅值等声学信息，并基于声发射参数对裂纹类型、损伤演化过程进行分析。结果表明：碳纳米管混凝土三点弯曲梁破坏时产生的声发射能量明显高于素混凝土梁，但随着碳纳米管掺量的增加，其破坏时产生的声发射能量逐渐减小；碳纳米管的掺入可以提高混凝土三点弯曲梁的承载能力，但超过某一界限后，其承载能力随着碳纳米管掺量的增加而降低；碳纳米管的掺入使得混凝土三点弯曲梁第一次声发射幅值突变的时间提前，试样破坏前，振铃计数及累计振铃计数增长缓慢，近似直线，试样断裂瞬间，两者均急剧上升；声发射信号源隶属于拉伸裂纹，碳纳米管混凝土三点弯曲梁断裂属于 Ⅰ 型断裂，拉伸裂纹和剪切裂纹占比与碳纳米管掺量之间没有明显关系，但声发射平均频率、上升角度信号源数量与碳纳米管掺量之间具有显著的相关性。不同碳纳米管掺量下，混凝土三点弯曲梁试样的损伤演化规律基本保持一致，试验前期损伤曲线基本为水平直线，破坏阶段损伤变量首先处于快速增长阶段，而后呈陡增式增长。

关键词: 碳纳米管；混凝土梁；损伤演化；裂纹扩展；声发射

中图分类号: O347.4; TU.45; O521.9 **文献标志码:** A

经过 2 个世纪的发展，混凝土已成为基础设施建设中使用最为广泛的建筑材料之一[1−3]。然而，传统混凝土作为一种高脆性、低韧性的人工材料，在水化过程中会产生大量微观缺陷和不规则的水化产物，使得混凝土自身结构存在明显的局限性，突出表现为抗拉强度低、变形能力差、易开裂、易受腐蚀等。在建筑工程中，材料缺陷必将极大地影响工程结构的安全性和耐久性。因此，以智能化、多功能化、可持续性、超耐久性等为发展方向的高性能水泥基材料成为工程材料研究的热点[4−5]。目前，大量研究致力于通过添加各类纤维材料改善水泥基材料的微观结构，从而增强混凝土的宏观力学性能，获得了较好的结果。Wang 等[6] 制备了体积分数为 0.1% 和 0.2% 的玄武岩纤维混凝土梁，并对其进行了抗弯试验，结果表明，随着纤维特性参数的增大，对试验梁裂缝和挠度控制作用逐渐增强。周振君等[7] 通过研究带有碳涂层的尼龙纤维混凝土的应力-应变行为发现，随着尼龙纤维含量的升高，混凝土断裂模

* **收稿日期:** 2024-07-10； **修回日期:** 2024-08-20

基金项目: 国家重点研发计划（2023YFC3805903）；河南理工大学博士基金（B2024-34）；中建七局交通建设有限公司委托项目（H22-661）

作者简介: 李慧宽（1998—），男，硕士研究生，主要从事碳材料、高性能混凝土及固废资源化利用研究. E-mail: huikuan0707@163.com

通信作者: 黄山秀（1984—），女，博士，讲师，主要从事碳材料、高性能混凝土及固废资源化利用研究. E-mail: hsx3168@163.com

式从脆性断裂演变为准脆性断裂，最终表现出假延性断裂特征。Li 等[8] 研究纤维体积分数、温度梯度和冻融循环次数对玄武岩纤维混凝土抗压强度、韧性指数和抗弯强度等的影响时发现：添加玄武岩纤维可以减小对混凝土微观结构的破坏，在一定程度上改善其塑性降解特性；在低温冻融环境下，随着纤维含量增加，玄武岩纤维混凝土的劈裂拉伸强度和抗弯强度均有所提高。Liu 等[9] 探讨了聚丙烯、玻璃纤维对混凝土耐久性能和力学性能的影响发现，与玻璃纤维混凝土相比，聚丙烯纤维混凝土在力学和耐久性方面的性能更好。

然而，水泥水化会生成尺寸微小的纳米级 C—S—H 凝胶。传统纤维是在水泥基体开裂后通过纤维拔出效应与桥联作用增加材料的韧性，不能有效抑制纳米尺度微裂纹的形成，因此，纳米尺度改性混凝土基体才是更为行之有效的方法。碳纳米管作为新型纳米纤维材料，具有高模量、高强度和高韧性等特点，在混凝土改性中得到了广泛应用[10−12]。Jung 等[13] 对多壁碳纳米管（multi-walled carbon nanotubes, MWCNTs）混凝土开展了单轴压缩试验，结果表明，碳纳米管通过更致密的 C—S—H 结构优化了混凝土的力学性能和电导性。Sindu 等[14] 研究发现，碳纳米管质量分数为 0.08% 混凝土试样的抗压强度相较于素混凝土提升了 10%。Rocha 等[15] 通过试验研究了质量分数分别为 0.05% 和 0.10% 的碳纳米管对水泥基复合材料弯曲性能和拉伸性能的影响，结果表明，0.10% 碳纳米管掺入使得水泥基复合材料的断裂能、抗折强度和抗拉强度分别提高了 90%、46% 和 47%。Cwirzen 等[16] 将聚丙烯酸聚合物加入碳纳米管水溶液中，并进行超声分散处理，得到的碳纳米管悬浮液具有较好的分散性。Makar 等[17] 研究发现，碳纳米管在水泥基体中的分散性受分散剂与碳纳米管比例的影响显著。秦煜等[18] 对使用表面活性剂的碳纳米管悬浮液的稳定性进行了量化。Xu 等[19] 通过扫描电子显微镜观察到了碳纳米管在混凝土基体中的脱粘、桥联和网孔填充现象。Wang 等[20] 研究了碳纳米管水泥基材料的微观结构，发现 MWCNTs 起到了跨越裂缝和空洞的桥梁作用。

上述研究主要集中在碳纳米管在混凝土中的分散性、对水泥基材料的静态力学性能增强效应及其对微观结构的影响等方面，关于碳纳米管混凝土（carbon nanotube concrete, CNTC）复合材料声发射（acoustic emission, AE）参数及其弯拉破坏过程中损伤演化特征的研究相对较少。基于此，本研究将利用配备声发射监测系统的 YNS300 电液伺服万能试验系统对不同碳纳米管含量的混凝土梁试样进行三点弯曲试验，通过对混凝土梁破裂的 AE 能量、幅值、振铃计数等特征参数深入分析，揭示不同碳纳米管掺量下混凝土梁弯拉破坏过程中损伤的演化规律。研究成果将对碳纳米管混凝土的广泛应用及土木工程基础设施耐久性和安全性提升具有重要意义。

1　试验方案

1.1　试验材料

碳纳米管混凝土三点弯曲梁的制备材料：MWCNTs，中国科学研究院成都有机化学有限公司研制，呈黑色粉末状，直径 10～20 nm，长度不超过 30 μm，比表面积为 230～280 m^2/g，纯度大于 90%；聚乙烯吡咯烷酮（polyvinylpyrrolidone, PVP），白色粉末状，国药集团化学试剂（上海）有限公司生产；粗骨料为连续级配碎石，粒度为 5～20 mm，比重为 2.56；细骨料为天然中粗河砂，细度模数为 2.6，粒度为 0.15～4.75 mm；硅酸盐水泥，焦作千业水泥公司生产，品质与性能均达到行业标准；配合水为焦作市自来水有限公司供应的饮用水，杂质较少，对试样性能无不良影响。

1.2　试样制备

由于碳纳米管的长径比极大，管壁间的范德华力极强，易发生团聚现象，难以在混凝土基体中均匀分布，从而影响碳纳米管混凝土的性能。基于此，采用表面活性剂法和超声波法，制备均匀稳定的 MWCNTs 水性分散液[21]，具体步骤如下：(1) 向装有蒸馏水的烧杯中添加 PVP 表面活性剂粉末，用玻璃棒充分搅拌至完全溶解；(2) 向上述溶液中加入适量 MWCNTs，搅拌进行初步混合；(3) 对初步混匀的 MWCNTs 水性分散液进行超声处理，将超声波细胞破碎仪的超声分散时间设为 20 min，超声功率设为

390 W, PVP 与 MWCNTs 的质量比为 4∶1。

按表 1 中的碳纳米管混凝土梁配比将原材料按碎石、河砂、水泥的顺序依次加入拌和机中进行 2 min 慢拌, 再进行 3 min 高速搅拌; 然后, 缓慢加入碳纳米管分散液和水, 同时对拌合物浆体进行充分搅拌, 将搅拌均匀的浆体倒入内壁涂刷脱模油的长方体模具内, 进行 30 s 振动后抹平; 最后, 在标准环境中养护 24 h, 脱模继续养护 28 d。碳纳米管混凝土梁的尺寸为 400 mm×100 mm×100 mm, MWCNTs 的质量分数 w 分别为 0、0.1%、0.3% 和 0.5%。碳纳米管混凝土梁试样的制备过程如图 1 所示。

表 1　碳纳米管混凝土三点弯曲梁的配合比

Table 1　Mix proportion for CNTC in three-point bending beam test

Mass/g					w/%
Cement	Water	River sand	Coarse aggregate	MWCNTs	
1 728	692	2 232	4 968	0	0
1 728	692	2 232	4 968	1.728	0.1
1 728	692	2 232	4 968	5.184	0.3
1 728	692	2 232	4 968	8.640	0.5

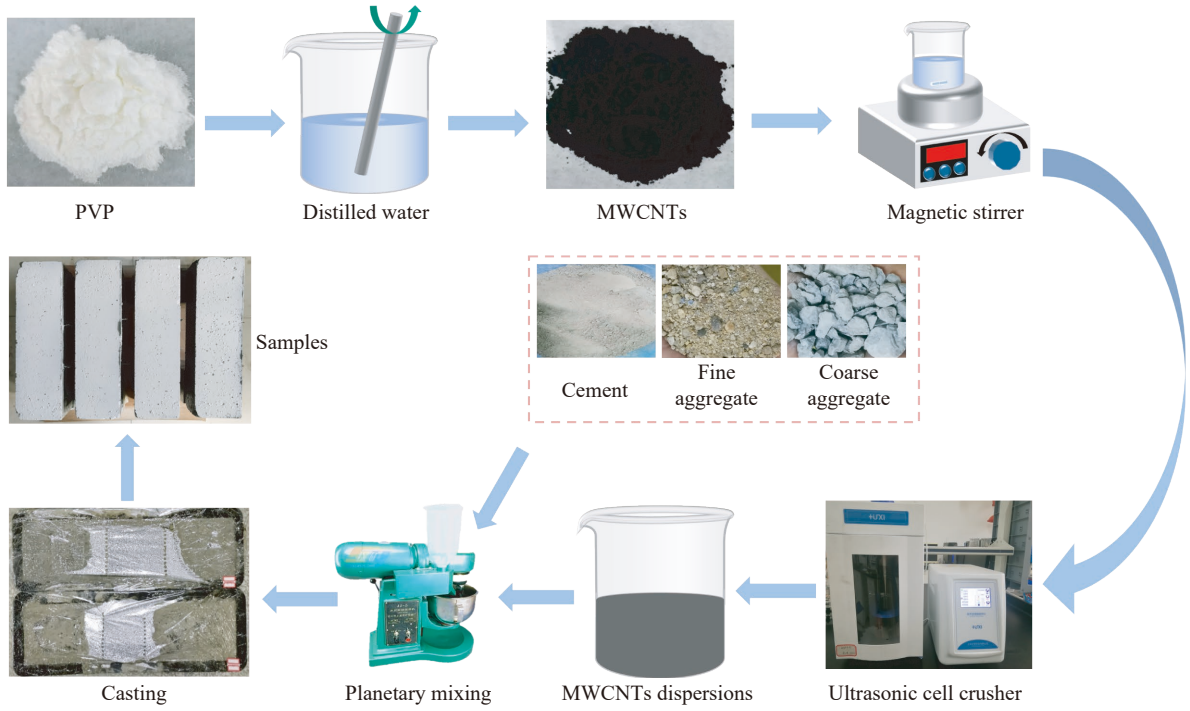


图 1　碳纳米管混凝土梁的制备流程

Fig. 1　Preparation process of CNTC beam

1.3　试验设备和方法

试验设备主要包括 YNS300 电液伺服万能试验系统和声发射监测系统。采用 YNS300 电液伺服万能试验系统开展不同碳纳米管掺量下混凝土梁的三点弯曲试验。该系统最大荷载为 300 kN, 可采用应变和位移(应变速率和位移速率在 0.2～100.0 mm/min 范围可调)两种伺服控制方式。试验机活塞的行程为 150 mm, 支柱间距为 430 mm, 拉伸长度和压缩长度空间分别为 650 和 500 mm, 上压头和下压头的半径均为 20 mm, 可实时采集试验过程中的应力、应变、荷载、位移等试验数据。DS-5 型 8 通道声发射监测系统核心组件囊括声发射探头、数据采集主机及信号放大器等, 能够实时监测、收集混凝土梁在

加载过程中的声发射信号，并通过声发射监测系统程序实时显示和保存，便于后期数据导出。

在三点弯曲试验开始前，将 2 个声发射探头与梁耦合对称布置在梁的两侧，距离为 250 mm，试样内部发生损伤产生声发射信号，由声发射探头捕获信号后，经信号放大器强化处理，采集主机存储和分析放大后的信号，从中提取出声发射特征参数等关键实时数据。系统设置采样频率为 5 MHz、阈值为 40 dB，从而确保数据的准确性和可靠性。在试验过程中，将 2 支点间的距离设为 300 mm，加载方式为位移控制加载。在实验进行时，首先采用力控制加载，给试样预加初始力，之后以 0.5 mm/min 的加载速率进行试验，直至试样破坏，出现宏观裂缝，停止试验。试验设备如图 2 所示。

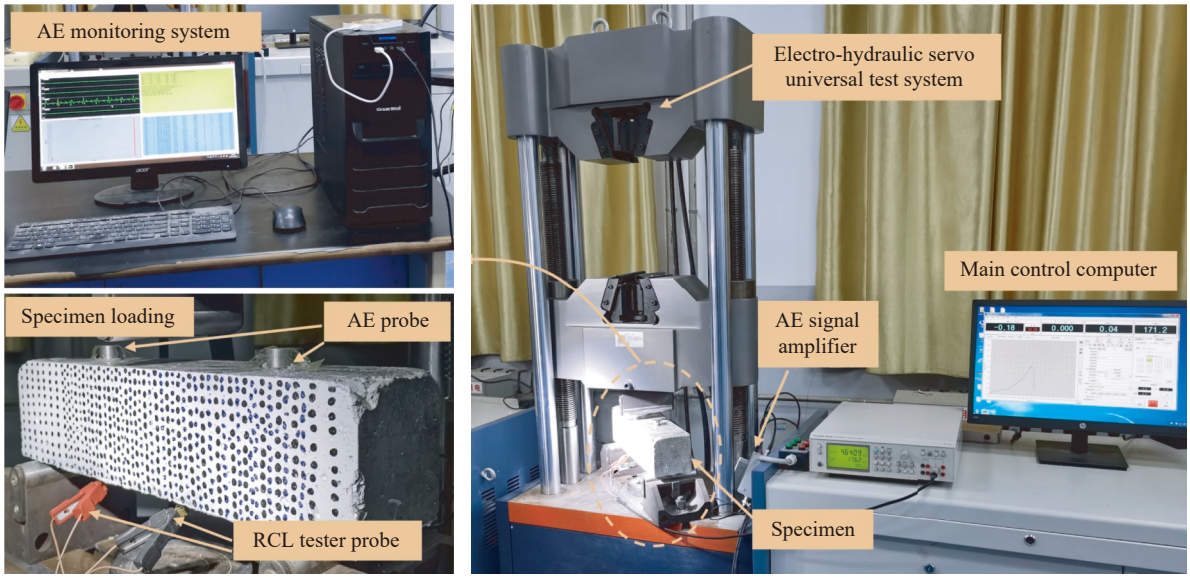


图 2　碳纳米管混凝土三点弯曲梁试验系统

Fig. 2　Three-point bending beam test system of CNTC

2　碳纳米管混凝土三点弯曲梁断裂行为的声发射特征

2.1　声发射能量

在混凝土试样经历变形破坏的过程中，伴随着能量的吸收和释放。声发射能量源自混凝土内部裂缝形成和扩展时释放的高频弹性振动能，可以通过计算信号包络面积的方法进行量化。声发射监测设备捕获并分析试样内部传递的声发射信号，从而实现对试样内部裂隙从产生、扩展直至相互贯通的连续、非接触式实时监测。不同碳纳米管掺量下，混凝土三点梁加载过程中声发射能量、累计能量、荷载与时间的关系如图 3 所示。可以看出，在三点弯曲试验前期的加载过程中，即混凝土梁试样弹性压缩阶段，其内部裂纹主要为微裂纹，声发射能量较低，监测到的各碳纳米管掺量混凝土梁的声发射能量均处于较低水平。累计能量曲线的斜率保持稳定，表明声发射能量的变化趋于平稳。当加载荷载达到峰值时，碳纳米管混凝土梁发生破坏，此时产生的能量极大。碳纳米管质量分数为 0、0.1%、0.3% 及 0.5% 的混凝土梁破坏时产生的声发射能量分别为 32 011.44、46 100.83、45 538.73 和 35 591.21 mV·ms。这验证了碳纳米管的阻裂作用，显著提升了混凝土梁的性能，使混凝土梁裂缝发生进一步扩展破坏所需能量明显提高。随着碳纳米管掺量的增加，混凝土梁破坏产生的声发射能量逐渐减小。在混凝土梁断裂前，碳纳米管质量分数 0、0.1%、0.3% 和 0.5% 的混凝土梁累计能量分别为 7 973.92、6 235.97、49 814.08 和 4 162.31 mV·ms。未掺碳纳米管的混凝土梁在弹性压缩阶段积累了更多能量，这可能与微裂纹的广泛形成有关。对于不同碳纳米管掺量的混凝土梁而言，其累计能量无明显变化规律，这归因于碳纳米管在混凝土中的分散效果存在差异，使得碳纳米管团聚的数量和位置不尽相同[22−23]，微裂纹产生的数量和规律也不同，进而影响声发射能量的释放特性。

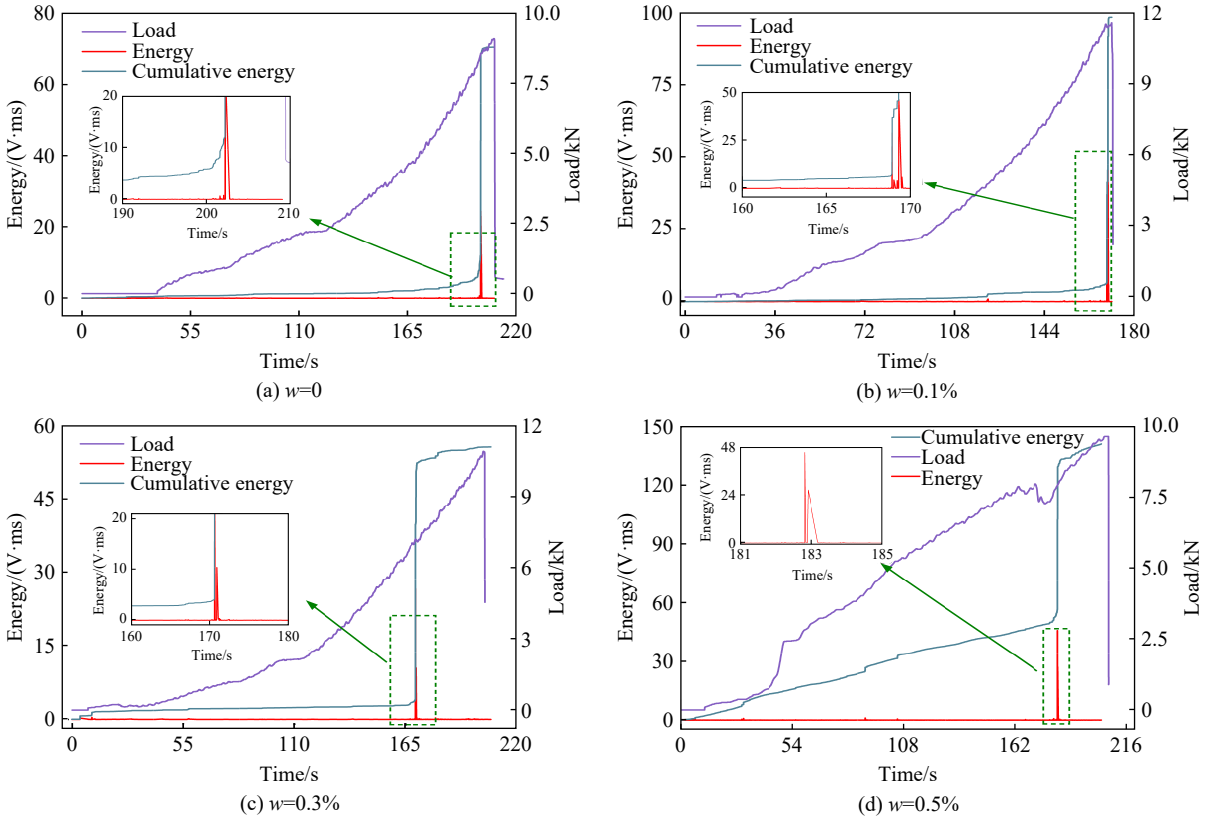


图 3　声发射能量、累计能量、荷载与时间的关系

Fig. 3　AE energy, cumulative energy, load versus time

2.2　声发射振幅与振铃计数

图 4 为碳纳米管混凝土三点弯曲梁声发射幅值、荷载与时间的关系。由图 4 可知：各碳纳米管掺量的混凝土梁在加载初期均经历压密阶段，此时幅值相对较小；但在裂纹闭合过程中，幅值均显著上升。值得注意的是，当 w 为 0.1% 时，由于 MWCNTs 在混凝土梁中的优异分散性和对裂隙的有效填充，便得试样在裂纹闭合过程中的声发射幅值较小。随着荷载递增，混凝土梁内部能量积聚，微裂纹萌生并扩展，最终形成宏观裂纹，声发射信号幅值增加。鉴于碳纳米管分布差异，混凝土梁内部微裂隙产生的时间和位置也不同，幅值突变的时间也不尽相同。对于碳纳米管质量分数为 0.1% 的混凝土梁，第 1 次声发射幅值突变的时间为 120 s，幅值达到 7 600 mV；随着 w 增加至 0.3% 和 0.5%，幅值第 1 次突变的时间分别为 105 和 57 s，幅值分别为 3 700 和 1 600 mV。上述现象表明，碳纳米管掺量的增加促使裂缝提前形成，降低了所需的能量阈值。随着荷载的进一步增加，混凝土梁发生破坏，声发射幅值在破坏之前出现明显的波动[24]。w=0.1% 的混凝土梁破坏前幅值为 8 994 mV；随着碳纳米管掺量的增加，混凝土梁破坏前的幅值逐渐降低。但碳纳米管混凝土梁的声发射幅值明显高于素混凝土梁的声发射幅值，表明碳纳米管的填充有效提高了混凝土梁的整体性能，改善了材料的声学特性，从而增强了声发射信号强度。

荷载、振铃计数及累计振铃计数与时间的关系如图 5 所示。从图 5 中可以看出，碳纳米管混凝土梁的振铃计数、累计振铃计数随时间的变化关系与能量、累计能量随时间的变化关系基本一致[25]。在压密阶段，声发射活动呈较平稳的态势，累计振铃计数曲线基本为水平直线，此时试件内部的裂纹逐渐闭合，因此振铃计数较低。之后试样进入弹性压缩阶段，混凝土梁内部开始产生微裂隙，开始出现声发射信号，累计振铃计数曲线开始缓慢增长，且曲线斜率基本保持不变。达到峰值荷载时，混凝土梁内部积聚的弹性应变能在短时间内快速释放，混凝土梁发生断裂，声发射信号陡增，振铃计数和累计振铃计数急剧增加[26]。碳纳米管掺量对混凝土三点弯曲梁振铃计数有显著影响：素混凝土梁振铃计数为 10255，

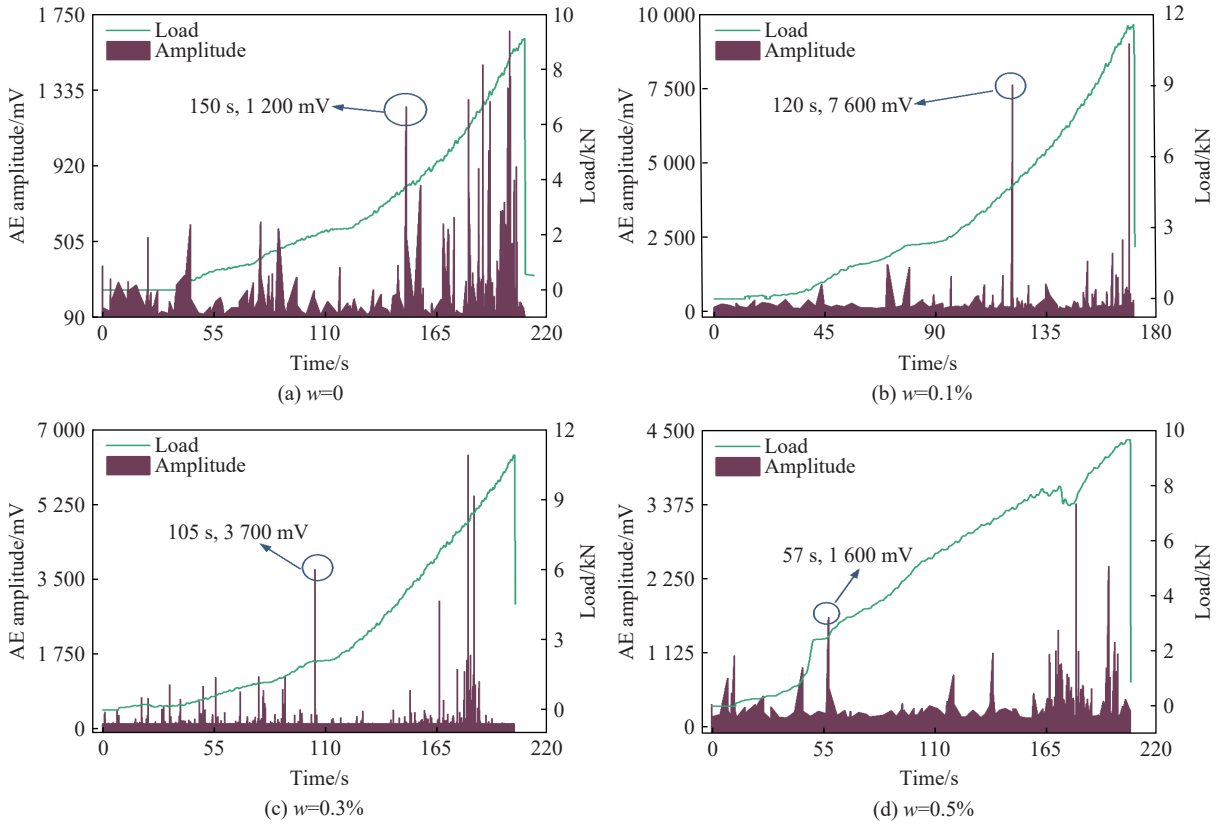


图 4　振幅、荷载与时间的关系

Fig. 4　Amplitude, load versus time

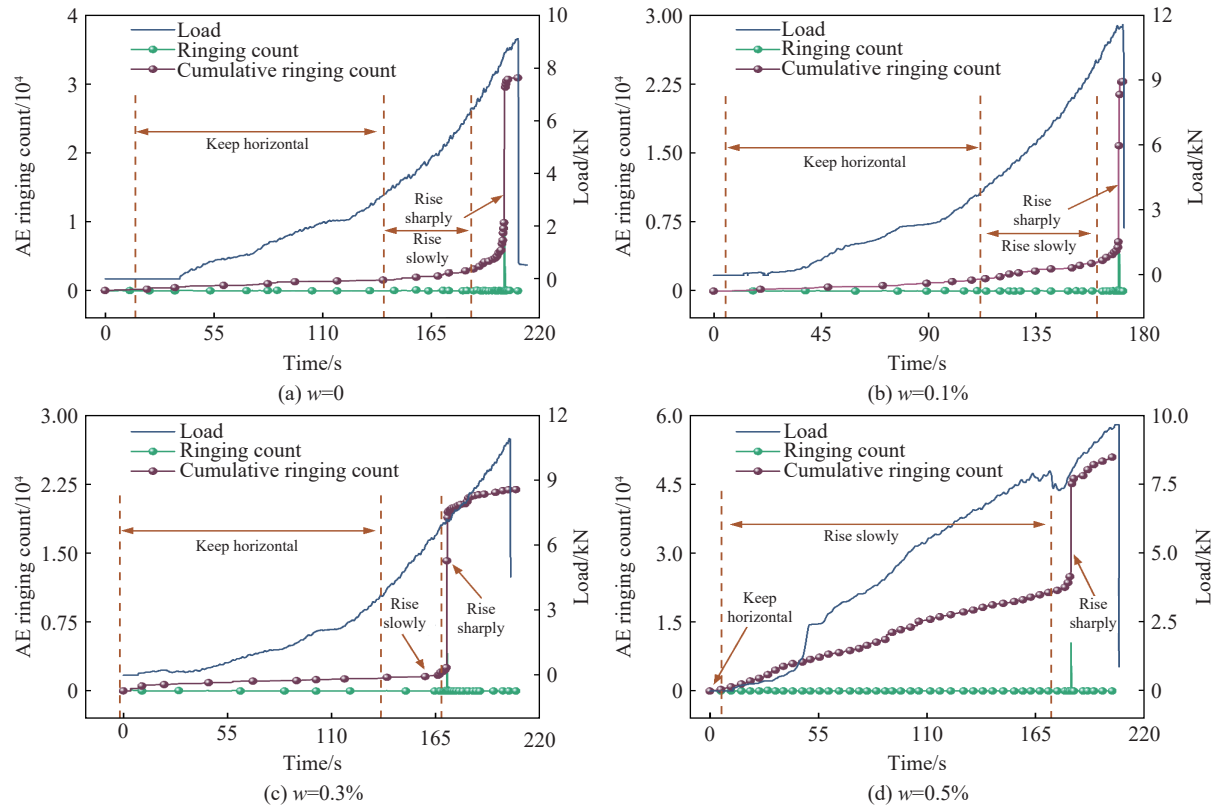


图 5　振铃计数、累计振铃计数、荷载与时间的关系

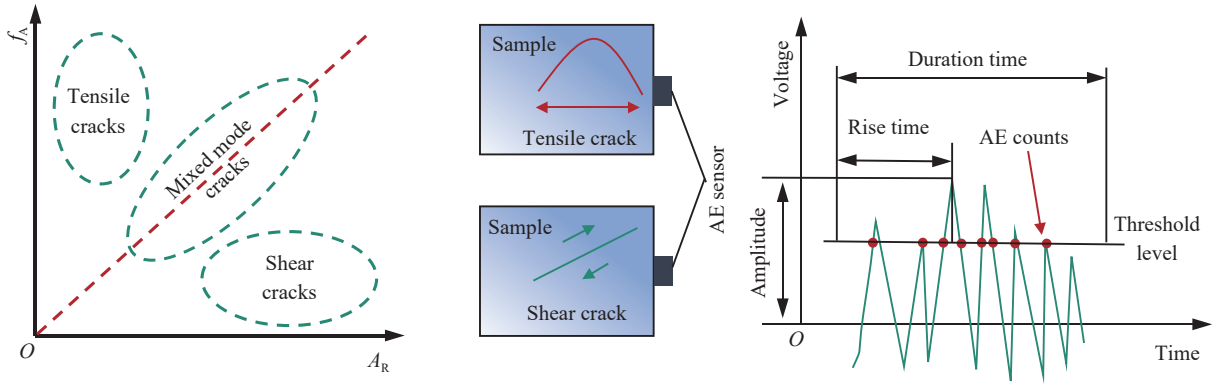
Fig. 5　Ringing count, cumulative ringing count, load versus time

w 为 0.1% 和 0.3% 的碳纳米管混凝土三点弯曲梁的振铃计数分别为 8 110 和 4 097，当 w 增大至 0.5% 时，振铃计数继续增大至 10 454。该规律表明，掺入适量的碳纳米管有助于改善混凝土的内部结构，减少因微裂纹或应力集中导致的声发射事件，从而降低振铃计数，但掺量超过某一阈值时，混凝土的性能反而出现了一定程度的劣化，表现为振铃计数上升。

3　基于声发射参数的裂纹类型与损伤演化过程分析

3.1　裂纹类型分析

在声发射监测过程中发现，剪切破坏与拉伸破坏的波形特征存在明显差别。如图 6(a) 所示，f_A 为声发射振铃计数与持续时间的比，A_R 为上升时间与幅度的比，各声发射参数表征如图 6(b) 所示。一般而言，A_R 越大，则 f_A（即平均频率）越小，越符合剪切破坏模式下的声发射特征；相反，f_A 越大，A_R 越小，越符合拉伸破坏模式下的声发射特征。然而，现有研究对 A_R 与 f_A 比值的选取尚未形成统一标准，多依赖于经验判断。Ohno 等[27] 基于格林函数矩张量分析认为，A_R/f_A 为 1～200 时可以较好地划分裂纹的类型，按照确定的 A_R/f_A 绘制三点弯曲试验过程中不同碳纳米管掺量混凝土梁的 f_A-A_R 关系，如图 7 所示。标线上部为拉伸裂纹产生的信号源，下部为剪切裂纹产生的信号源。根据图 7 中数据可知，大部分信号源隶属于拉伸裂纹，判定混凝土梁断裂属于 Ⅰ 型断裂，结果符合 Hillerborg 等[28] 的虚拟裂缝断裂理论。进一步对比不同碳纳米管掺量混凝土梁的拉伸裂纹与剪切裂纹的比例变化发现，拉伸裂纹和剪切裂纹占比与碳纳米管掺量之间没有明显的关系，值得注意的是，声发射 f_A-A_R 信号源数量与碳纳米管掺量之间具有显著的相关性。碳纳米管混凝土梁声发射信号源数量明显低于素混凝土梁声发射信号源数量，说明素混凝土梁在失稳破坏过程中的持续时间更长，添加碳纳米管能够显著提高混凝土梁的抗裂性能。但随着碳纳米管掺量的提升，声发射信号源数量却逐渐减少，说明混凝土梁的抗弯强度对声发射信号源的产生具有调控作用。



(a) Classification of crack　　(b) Characterization of AE parameters

图 6　拉剪裂纹分类方法及声发射参数表征

Fig. 6　Classification of tensile-shear cracks and characterization of AE parameters

3.2　损伤演化过程分析

对于碳纳米管混凝土梁，在荷载作用下，组成混凝土梁的细观单元将发生破坏，并以能量的形式释放出来，产生声发射。因此，声发射特征参数与混凝土梁损伤变量（D）之间存在一定的相关性。杨永杰等[29] 和张强星等[30] 的研究表明，声发射振铃计数和声发射能量能更好地反映材料的损伤破坏。因此，本研究分别采用声发射累计振铃计数和声发射累计能量对碳纳米管混凝土梁的损伤演化过程进行分析。混凝土梁损伤变量 D[31] 为

$$D = \frac{S_d}{S} \tag{1}$$

式中：S_d 为材料产生损伤后的有效承载面积，S 为材料无损伤时的承载面积。

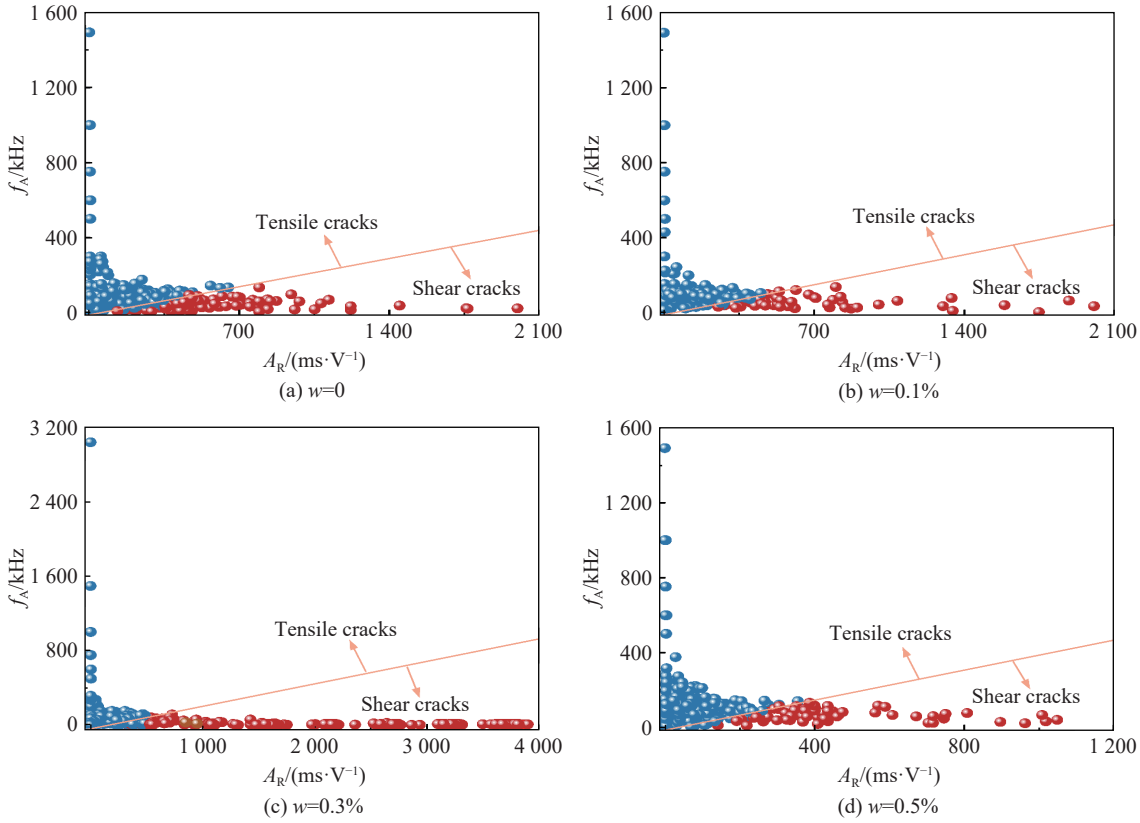


图 7　CNTC 梁三点弯曲试验过程中的 f_A-A_R 关系

Fig. 7　f_A-A_R of CNTC beam during three-point bending test

设碳纳米管混凝土梁破坏时的累计声发射参数(即能量与声发射振铃计数)为 N_0, 则试样破坏过程中单位面积的声发射参数 N_w 为

$$N_w = \frac{N_0}{S} \tag{2}$$

与碳纳米管混凝土梁损伤面积 S_d 相关的累计声发射参数 N_d 为

$$N_d = \frac{N_0 S_d}{S} \tag{3}$$

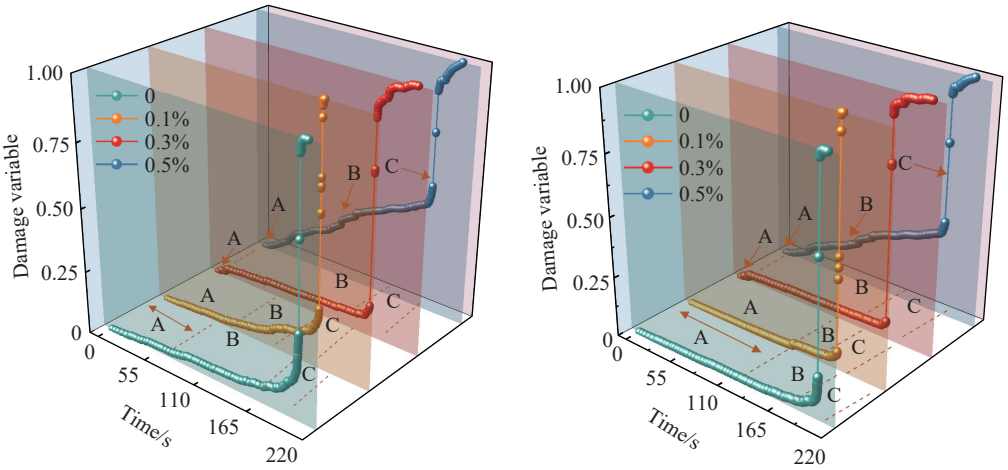
将式 (1) 和式 (2) 代入式 (3), 得到用声发射参数表示的损伤变量

$$D = \frac{N_d}{N_0} \tag{4}$$

根据式 (4) 计算得到不同碳纳米管掺量混凝土三点弯曲梁的损伤演化过程, 如图 8 所示。由图 8 可知, 以能量和振铃计数表示的碳纳米管混凝土三点弯曲梁的损伤演化规律基本保持一致, 可分为 A、B、C 共 3 个阶段。在 A 阶段, 试样基本没有损伤, 损伤曲线基本为水平直线; 在 B 阶段, 试样开始出现微损伤并逐渐累积; 在 C 阶段, 试样微裂隙扩展逐渐形成宏观裂隙, 并在载荷的作用下裂隙继续扩展, 直至达到峰值荷载, 混凝土梁突然断裂破坏, 裂隙宽度急剧增加[32], 损伤变量先快速增长, 其后陡增式增长。以能量和振铃计数表示的碳纳米管混凝土三点弯曲梁的损伤演化规律变化趋势不尽相同, 能量损伤变量的变化趋势更加平滑和连续, 而振铃计数损伤变量则可能因单个事件的触发而表现出更明显的波动。

不同碳纳米管掺量的混凝土三点弯曲梁的损伤变量各阶段时长占比及损伤发展速率有所差异。以图 8(a) 为例: 素混凝土三点弯曲梁在 A、B、C 3 个阶段的时长分别为 0～60 s、60～160 s 和 160～209 s, 0.1% 碳纳米管掺量试样在 A、B、C 阶段的时长分别为 0～80 s、80～140 s 和 140～170 s。

0.1% 掺量试样在 A 阶段的时长比素混凝土梁试样更长，表明碳纳米管的加入在一定程度上延缓了微裂隙的产生和扩展，提高了混凝土的初始抗损伤能力。然而，当 w 增大至 0.5% 时，其损伤演化过程显著区别于其余试样，其 A 阶段的时长极短，仅持续 10 s，随后迅速进入 B 阶段，时间跨度为 10～180 s，达到峰值荷载后的断裂过程更加迅速，在 180～204 s 较短时间内完成。其原因可能是，0.5% 碳纳米管在混凝土基体中发生团聚，导致试样性能下降，使其在荷载作用下迅速过渡至 B 阶段，损伤逐渐加剧。



(a) Represented by ringing count　　(b) Represented by energy

图 8　不同碳纳米管掺量混凝土三点弯曲梁的损伤演化过程

Fig. 8　Damage evolution of concrete three-point bending beams with different content of carbon nanotube

4　结　论

采用配备声发射监测系统的 YNS300 电液伺服万能试验机，对碳纳米管混凝土三点弯曲梁进行试验，研究碳纳米管掺量对混凝土三点弯曲梁声发射能量、幅值、振铃计数及损伤演化过程的影响，并基于 AE 特征参数对裂纹类型进行分析，得出以下主要结论。

(1) 三点弯曲试验初期，声发射能量较低；而碳纳米管混凝土三点弯曲梁破坏时，产生了极大的能量。碳纳米管卓越的阻裂能力显著增强了混凝土梁的性能，使裂缝发生进一步扩展破坏所需的能量明显提高。但随着碳纳米管掺量的增加，试样破坏所需能量逐渐减小。

(2) 不同掺量碳纳米管混凝土三点弯曲梁出现首次幅值的突变时间分别为 150、120、105 和 57 s。碳纳米管掺量的增加促进了裂缝的提前形成，降低了能量阈值。在压密阶段，累计振铃计数曲线保持平稳；进入弹性阶段后开始缓慢增长，且曲线斜率基本保持不变；达到峰值荷载时，振铃计数和累计振铃计数均急剧增加。

(3) 碳纳米管混凝土三点弯曲梁声发射信号源隶属于拉伸裂纹，判定碳纳米管混凝土梁断裂属于Ⅰ型断裂。声发射 f_A-A_R 信号源数量与碳纳米管掺量显著相关，且碳纳米管混凝土梁的声发射信号源数量明显少于素混凝土梁。不同碳纳米管掺量下，混凝土梁试样的损伤演化规律基本保持一致，但各阶段时间占比有所差异。

参考文献：

[1] LI V C. High-performance and multifunctional cement-based composite material [J]. Engineering, 2019, 5(2): 250–260.

[2] 胡少伟, 张润, 范冰, 等. 基于 DIC 法的混凝土三点弯曲梁断裂性能试验研究 [J]. 人民长江, 2019, 50(10): 197–202, 228.
HU S W, ZHANG R, FAN B, et al. Experimental study on fracture property of three-point bending concrete beam based on DIC method [J]. Yangtze River, 2019, 50(10): 197–202, 228.

[3] 陆春华, 杨钰婷, 平安, 等. 冻融作用下海工高性能混凝土梁受弯承载力试验与理论分析 [J]. 土木工程学报, 2022, 55(7): 47–56.
LU C H, YANG Y T, PING A, et al. Experimental and theoretical investigation on flexural capacity of marine high performance concrete beams under freeze-thaw action [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(7): 47–56.

[4] 周菊萍, 李鹏, 王一超. 单向混杂碳纤维增强复合材料在三点弯曲载荷下的力学性能 [J]. 复合材料科学与工程, 2023(3): 112–119.
ZHOU J P, LI P, WANG Y C. Mechanical properties of unidirectional hybrid carbon fiber reinforced composites under three-point bending load [J]. Composites Science and Engineering, 2023(3): 112–119.

[5] WEN S H, CHUNG D D L. Carbon fiber-reinforced cement as a strain-sensing coating [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(4): 665–667.

[6] WANG J, YE H J, SUN Z W, et al. Experiment on the crack and deflection of basalt fiber reinforced concrete beams [J]. Advanced Materials Research, 2011, 243: 1058–1061.

[7] 周振君, 杨正方. 带有碳涂层的尼龙纤维增强混凝土的机敏性研究 [J]. 硅酸盐学报, 2001, 29(2): 192–195.
ZHOU Z J, YANG Z F. Study on the smart property of carbon coated nylon fiber-reinforced concrete composites [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2001, 29(2): 192–195.

[8] LI Y, GU Z C, ZHAO B, et al. Experimental study on mechanical properties of basalt fiber concrete after cryogenic freeze-thaw cycles [J]. Polymers, 2022, 15(1): 196.

[9] LIU J L, JIA Y M, WANG J. Experimental study on mechanical and durability properties of glass and polypropylene fiber reinforced concrete [J]. Fibers and Polymers, 2019, 20(9): 1900–1908.

[10] MOHSEN M O, AL-NUAIMI N, AL-RUB R K A, et al. Effect of mixing duration on flexural strength of multi walled carbon nanotubes cementitious composites [J]. Construction and Building Materials, 2016, 126: 586–598.

[11] RAMEZANI M, KIM Y H, SUN Z H. Mechanical properties of carbon-nanotube-reinforced cementitious materials: database and statistical analysis [J]. Magazine of Concrete Research, 2020, 72(20): 1047–1071.

[12] YAZDANBAKHSH A, GRASLEY Z, TYSON B, et al. Distribution of carbon nanofibers and nanotubes in cementitious composites [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2010, 2142(1): 89–95.

[13] JUNG M, LEE Y S, HONG S G, et al. Carbon nanotubes (CNTs) in ultra-high performance concrete (UHPC): dispersion, mechanical properties, and electromagnetic interference (EMI) shielding effectiveness (SE) [J]. Cement and Concrete Research, 2020, 131: 106017.

[14] SINDU B S, SASMAL S. Properties of carbon nanotube reinforced cement composite synthesized using different types of surfactants [J]. Construction and Building Materials, 2017, 155: 389–399.

[15] ROCHA V V, LUDVIG P, TRINDADE A C C, et al. The influence of carbon nanotubes on the fracture energy, flexural and tensile behavior of cement based composites [J]. Construction and Building Materials, 2019, 209: 1–8.

[16] CWIRZEN A, HABERMEHL-CWIRZEN K, NASIBULIN A G, et al. SEM/AFM studies of cementitious binder modified by MWCNT and nano-sized Fe needles [J]. Materials Characterization, 2009, 60(7): 735–740.

[17] MAKAR J M, MARGESON J C, LUH J. Carbon nanotube/cement composites-early results and potential applications [J] 3rd International Conference on Construction Materials: Performance, Innovation and Structural Implications, 2005: 1–10.

[18] 秦煜, 唐元鑫, 阮鹏臻, 等. 碳纳米管悬浮液分散质量影响因素试验研究 [J]. 应用化工, 2022, 51(5): 1285–1290.
QIN Y, TANG Y X, RUAN P Z, et al. Experimental study on influencing factors of dispersion quality of carbon nanotubes in aqueous solution [J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(5): 1285–1290.

[19] XU S L, LIU J T, LI Q H. Mechanical properties and microstructure of multi-walled carbon nanotube-reinforced cement paste [J]. Construction and Building Materials, 2015, 76: 16–23.

[20] WANG B M, HAN Y, LIU S. Effect of highly dispersed carbon nanotubes on the flexural toughness of cement-based composites [J]. Construction and Building Materials, 2013, 46: 8–12.

[21] 卜路霞, 李京京, 高琳琳, 等. SDBS 对多壁碳纳米管悬浮液分散性的影响 [J]. 电镀与精饰, 2019, 41(7): 10–13.
BU L X, LI J J, GAO L L, et al. Dispersion of multi-walled carbon nanotubes in solution with surfactant SDBS [J]. Plating and Finishing, 2019, 41(7): 10–13.

[22] SHAO H Y, CHEN B M, LI B, et al. Influence of dispersants on the properties of CNTs reinforced cement-based materials [J]. Construction and Building Materials, 2017, 131: 186–194.

[23] LIU J X, SUH H, JEE H, et al. Synergistic effect of carbon nanotube/TiO_2 nanotube multi-scale reinforcement on the mechanical properties and hydration process of Portland cement paste [J]. Construction and Building Materials, 2021, 293: 123447.

[24] 李冬生, 曹海. 聚乙烯醇纤维混凝土损伤演化声发射监测及其评价 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(9): 29–32, 43.
LI D S, CAO H. Acoustic emission monitoring and evaluation of damage evolution for polyvinyl alcohol fiber concrete [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(9): 29–32, 43.

[25] 张力伟. 混凝土损伤检测声发射技术应用研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
ZHANG L W. Research on concrete damage detection by using acoustic emission technology [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012.

[26] XIANG Y, CHEN K, ZHENG Z, et al. Damage mechanism of Al_2O_3/Al_2O_3 composites by acoustic emission technology [J]. Ceramics International, 2023, 49(2): 2730–2737.

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

[28] HILLERBORG A, MODÉER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements [J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(6): 773–781.

[29] 杨永杰, 王德超, 郭明福, 等. 基于三轴压缩声发射试验的岩石损伤特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 98–104.
YANG Y J, WANG D C, GUO M F, et al. Study of rock damage characteristics based on acoustic emission tests under triaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 98–104.

[30] 张强星, 刘建锋, 曾寅, 等. 膏岩三轴压缩声发射特征及损伤演化研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(5): 1323–1330.
ZHANG Q X, LIU J F, ZENG Y, et al. Investigation on deformation characteristics and damage evolution of gypsum rock under triaxial loading test [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(5): 1323–1330.

[31] 周露林, 刘建锋, 鲁功达, 等. 热损伤花岗岩三轴压缩蠕变破坏声发射及损伤演化特征 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2023, 54(6): 2360–2369.
ZHOU L L, LIU J F, LU G D, et al. Creep acoustic emission and damage evolution of thermally-damaged granite under triaxial stress [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(6): 2360–2369.

[32] CHEN Y J, JIAO Y B, YANG H, et al. Fracture characteristics and damage evolution of manufactured sand-based ultra-high performance concrete using tensile testing and acoustic emission monitoring [J]. Construction and Building Materials, 2024, 430: 136477.

Acoustic Emission and Damage Evolution Characteristics of Carbon Nanotube Concrete Three-Point Bending Beam

LI Huikuan[1], HUANG Shanxiu[1], CHEN Xiaoyang[2], GUO Jiaqi[3]

(1. *College of Chemistry and Chemical Engineering*, *Henan Polytechnic University*, *Jiaozuo* 454003, *Henan*, *China*;
2. *Transportation Company of China Construction Seventh Engineering Division Co., Ltd.*, *Zhengzhou* 450004, *Henan*, *China*;
3. *College of Civil Engineering*, *Henan Polytechnic University*, *Jiaozuo* 454003, *Henan*, *China*)

Abstract: To study the impact of the content of carbon nanotubes (CNTs) on the damage evolution and crack propagation in concrete beams, concrete three-point bending beam specimens containing 0, 0.1%, 0.3%, and 0.5% CNTs were prepared. The three-point bending tests were conducted by using the YNS300 electro-hydraulic servo universal testing machine equipped with an acoustic emission (AE) testing system. Acoustic information such as AE energy, ringing count, and amplitude were obtained. The crack type and damage evolution process were analyzed based on AE parameters. The results show that the AE energy of carbon nanotube concrete (CNTC) three-point bending beam is significantly higher than that of plain

concrete beams. However, as the content of carbon nanotubes increases, the AE energy generated during failure gradually decreases. The addition of CNTs can improve the bearing capacity of concrete beam. However, after exceeding a certain threshold, the load-bearing capacity decreases as the CNTs increases. The incorporation of carbon nanotubes advances the time of the first amplitude mutation in the concrete three-point bending beams. Prior to the failure of the specimens, the ringing count and cumulative ringing count increase slowly, approximating a straight line. However, at the instant of specimen fracture, both of them rise sharply. The AE signal sources belong to the tensile crack. The fracture of carbon nanotube-reinforced concrete three-point bending beams is classified as Mode Ⅰ fracture. There is no significant relationship between the proportions of tensile-shear cracks and the CNTs content. However, the number of AE average frequency and angle of rise of signal sources is significantly correlated with the CNTs content. The damage evolution law of concrete beam samples with different CNTs is basically consistent. In the early stage of the test, the damage curve is basically horizontal, and the damage variable in the failure stage is in a rapid growth stage at first, and then abruptly increases.

Keywords: carbon nanotube; concrete beam; damage evolution; crack propagation; acoustic emission