

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0424

# 基于 SHPB 试验的碳纳米管增强混凝土 动态压缩行为研究\*

夏伟<sup>1</sup>, 陆松<sup>1</sup>, 白二雷<sup>1</sup>, 赵德辉<sup>1</sup>, 许金余<sup>1,2</sup>, 杜宇航<sup>3</sup>

(1. 空军工程大学航空工程学院, 陕西 西安 710038;

2. 西北工业大学力学与土木建筑学院, 陕西 西安 710072;

3. 中国建筑西北设计研究院有限公司, 陕西 西安 710018)

**摘要:** 为探究碳纳米管增强混凝土在冲击荷载作用下的动态压缩行为, 采用 $\varnothing 100$  mm 大直径分离式霍普金森压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 对其进行了冲击试验, 对比分析了不同冲击速度和碳纳米管掺量条件下混凝土的动态抗压强度、受压形变以及能量耗散特征的演化规律。试验结果表明: 碳纳米管增强混凝土的动态强度特性具有显著的加载速率敏感性, 动态抗压强度和动态强度增长因子均与冲击速度呈线性正相关的关系, 当加载水平相同时, 动态抗压强度随碳纳米管掺量的增大呈先上升后略有下降的变化趋势, 且与普通混凝土相比增幅可达 23.7%。碳纳米管增强混凝土的极限应变与冲击韧度的变化特点相似, 均随冲击速度的增大而逐渐提高, 具有一定的冲击速度强化效应, 但与冲击速度之间并没有表现出明显的线性关系。在同一加载水平下, 当碳纳米管掺量为 0.30% 时, 混凝土的冲击韧度达到相对最大, 较之普通混凝土提升约 10%。掺入适量的碳纳米管能够有效强化混凝土内部结构的整体性和致密性, 进而改善混凝土的动态力学性能以及能量耗散特征。

**关键词:** 混凝土; 碳纳米管; 分离式霍普金森压杆 (SHPB); 动态力学特性; 冲击能量耗散

中图分类号: O347.3; TU528.57

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

## A study of dynamic compression behavior of carbon nanotubes reinforced concrete based on SHPB test

XIA Wei<sup>1</sup>, LU Song<sup>1</sup>, BAI Erlei<sup>1</sup>, ZHAO Dehui<sup>1</sup>, XU Jinyu<sup>1,2</sup>, DU Yuhang<sup>3</sup>

(1. Aviation Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, Shaanxi, China;

2. College of Mechanics and Civil Architecture, Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;

3. China Northwest Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710018, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to investigate the dynamic compression behavior of carbon nanotubes reinforced concrete under impact loading, the impact compression tests were carried out by using a split Hopkinson pressure bar (SHPB) test device with a diameter of 100 mm. The impact velocities in the SHPB tests were about 6.8, 7.8, 8.8, 9.8 and 10.8 m/s, respectively. The contents of carbon nanotubes in concrete (as a percentage of cement mass) were 0% (i.e. ordinary concrete, as a baseline of comparison), 0.10%, 0.20%, 0.30% and 0.40%, respectively. Then, based on the test results, the evolution laws of dynamic compressive strength, compression deformation, and energy dissipation characteristics of concrete under different impact velocities and carbon nanotubes contents were compared and analyzed. The experimental results show that the dynamic strength characteristics of carbon nanotubes reinforced concrete have significant loading rate sensitivity. The dynamic compressive strength and dynamic enhancement factor show linear positive correlations with impact velocity. When the

\* 收稿日期: 2023-11-27; 修回日期: 2024-01-25

基金项目: 国家自然科学基金 (51908548)

第一作者: 夏伟 (1996—), 男, 博士研究生, xiaweiafe@163.com

通信作者: 陆松 (1990—), 男, 博士, 讲师, lusong647@163.com

loading level remains the same, the dynamic compressive strength increases first and then decreases slightly with the increase of carbon nanotubes content, and the growth rate can reach 23.7% compared to ordinary concrete. The variation characteristics of ultimate strain and impact toughness of carbon nanotubes reinforced concrete are similar, which gradually increase with the increase of impact velocity, and have a certain impact velocity strengthening effect, but there is no obvious linear relationship with the impact velocity. Toughness is a comprehensive reflection of material strength and deformation. Therefore, at the same loading level, when the content of carbon nanotubes was 0.30%, the impact toughness of concrete achieved a relative maximum, being about 10% higher than that of ordinary concrete. The appropriate addition of carbon nanotubes can effectively enhance the integrity and compactness of the internal structure of concrete, thereby improving its dynamic mechanical properties and energy dissipation performance.

**Keywords:** concrete; carbon nanotubes; split Hopkinson pressure bar (SHPB); dynamic mechanical properties; impact energy dissipation

混凝土在土木工程建设中使用广泛,但随着各种建(构)筑物的服役环境日趋复杂化和极端化,传统混凝土材料由于脆性较大、韧性较差,容易受损开裂,对整体结构造成不利影响,因此难以适应国防、工业等工程领域的现实需要<sup>[1-2]</sup>。此外,混凝土结构在承受自身质量、人员设备等静态荷载作用的同时,还可能会遭到由车辆冲撞、武器打击、弹药爆炸等偶然因素引起的动态荷载作用,这些均对混凝土材料的抗冲击性能提出了更加严苛的要求<sup>[3-5]</sup>。因此,有必要进一步研制和设计新型混凝土材料,并针对其动力性能展开深入研究。

纳米材料和纳米技术的蓬勃发展为混凝土带来了崭新的生命力。在众多纳米材料中,碳纳米管(carbon nanotubes, CNTs)凭借优异的力学、电学、化学特性而备受关注,在对复合材料进行改性方面具有极大潜力<sup>[6-7]</sup>。碳纳米管是一种具有一维管状结构的纳米级纤维,其强度、韧性俱佳,长径比可达 1000 以上,抗拉强度约为钢的 100 倍,弹性模量约为钢的 5 倍,被视作水泥基材料的理想填料和增强体<sup>[8-10]</sup>。近年来,碳纳米管的生产成本有所降低,生产规模逐步扩大,碳纳米管增强水泥基材料成为学者们聚焦的研究热点。Collins 等<sup>[11]</sup>发现使用聚羧酸盐外加剂可以改善碳纳米管在低水灰比水泥浆体中的分散性,减少碳纳米管团聚现象的发生,从而使得硬化水泥浆体的抗压强度提高了 25%。Rocha 等<sup>[12]</sup>探讨了碳纳米管对水泥浆体断裂能、弯曲和拉伸性能的影响,发现当碳纳米管的掺量达到 0.10%(占胶凝材料的质量比例)时,水泥浆体的断裂能提高了 90%,抗弯强度和抗拉强度的增长幅度超过了 45%,碳纳米管可以作为水泥水化产物的成核位点,抑制微裂纹的形成与扩张。Parveen 等<sup>[13]</sup>以 Pluronic F-127 为分散剂制备出碳纳米管增强水泥砂浆,试验结果表明,与普通水泥砂浆相比较,碳纳米管增强水泥砂浆表现出更优越的物理力学性能。Li 等<sup>[14]</sup>利用硫酸和硝酸混合液对碳纳米管进行改性处理,进而将其添加到水泥浆体中,力学试验结果显示,水泥浆体的强度和破坏应变均获得了显著提高,碳纳米管通过发挥填充效应和桥接效应保证了水泥浆体内部荷载的传递。Gao 等<sup>[15]</sup>针对碳纳米管直径对水泥基材料基本力学性能和微观结构的影响进行了研究,发现水泥基材料的抗压强度随碳纳米管直径的增大而减小,抗折强度则随碳纳米管直径的增大而增大,微观测试表明,直径为 10~20 nm 的碳纳米管更有助于优化水泥基材料的孔隙结构。郑冰森等<sup>[16]</sup>制备了不同碳纳米管掺量(0.05%、0.10%、0.15%)的混凝土,并对碳纳米管增强混凝土的断裂性能进行了系统分析,结果表明,碳纳米管在混凝土内部具有一定的桥接作用,对混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度、起裂韧度、失稳韧度以及断裂能均具有良好的增强效果。黄山秀等<sup>[17]</sup>进行了碳纳米管增强混凝土的单轴压缩试验,研究了碳纳米管掺量(0.05%、0.10%、0.30%、0.50%)和应变率( $5 \times 10^{-3}$ 、 $2 \times 10^{-4}$ 、 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )对混凝土力学性能与能量演化特征的影响规律,指出当碳纳米管掺量相同时,混凝土的单轴抗压强度随应变率的增大而增大,在相同应变率条件下,混凝土峰值应力处各能量随碳纳米管掺量的增加先增大后减小。

从上述研究成果可知,碳纳米管能够通过填充、桥接和成核效应改善水泥基材料的宏观性能和微观结构。然而,目前有关碳纳米管增强水泥基材料的研究对象主要为水泥净浆或砂浆,且大多数研究集中

于静态荷载作用下改性水泥基材料的基本力学特性,关于碳纳米管增强混凝土(含有粗骨料的改性混凝土体系)特别是其中高应变率冲击荷载作用下动态响应的探索和认知仍然比较缺乏。基于此,本文中采用直径为100 mm的分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)试验装置,分别对普通混凝土和4种掺入碳纳米管的混凝土(掺量分别为0.10%、0.20%、0.30%、0.40%)进行不同加载水平(冲击速度依次约6.8、7.8、8.8、9.8、10.8 m/s)的冲击压缩试验,探究碳纳米管掺量和冲击速度对混凝土动态压缩行为的影响。以期提供碳纳米管增强混凝土的相关动力学参数,为揭示其在冲击压缩荷载作用下的力学性能以及能耗特征提供参考。

## 1 试验原料与方法

### 1.1 原材料

混凝土是由胶凝材料、粗骨料、细骨料以及水等组分构成的复合材料。在本试验中:胶凝材料采用海螺牌P·O 42.5普通硅酸盐水泥,其化学组成如表1所示。粗骨料采用连续级配的石灰岩碎石,其粒径为5~20 mm。细骨料采用天然河砂,其细度模数为2.68,表观密度为2640 kg/m<sup>3</sup>。拌合用水采用普通自来水。减水剂采用聚羧酸高性能减水剂,其减水率为27%。消泡剂采用W-803型磷酸三丁酯消泡剂。碳纳米管为江苏先丰纳米材料科技有限公司生产的羧基化多壁碳纳米管,其主要性能参数如表2所示;同时采用该公司提供的碳纳米管水分散剂,分散剂类型为非离子表面活性剂。

表1 水泥的化学组成(质量分数)

CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	其他
60.54	21.74	4.23	4.61	2.88	2.45	3.55

表2 碳纳米管的主要性能参数

羧基含量(质量分数)/%	纯度/%	长度/ $\mu\text{m}$	直径/nm	内径/nm	振实密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	比表面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )
3.86	>95	0.5~2	5~15	2~5	0.27	>200

### 1.2 配合比及试件制作

基于文献[18-19],分别制备了普通混凝土(作为对照组)以及4种加入碳纳米管进行改性的混凝土(作为试验组)。碳纳米管在混凝土中的掺量按照水泥的质量分数进行计算,根据控制变量法原则,碳纳米管掺量依次取为0.10%、0.20%、0.30%和0.40%,最终设计的混凝土配合比如表3所示。在制备混凝土之前,需要预先分散碳纳米管:将称量好的碳纳米管粉末、分散助剂、减水剂、消泡剂置于烧杯中,按比例添加水并使用玻璃棒充分搅拌,初步获得碳纳米管分散液;采用超声波清洗机对碳纳米管分散液进

表3 混凝土的配合比

试样编号	水泥	河砂	碎石	水	减水剂	消泡剂	碳纳米管
PC	340	640	1360	130	1.7	0.2	0
CNRC1	340	640	1360	130	1.7	0.2	0.34
CNRC2	340	640	1360	130	1.7	0.2	0.68
CNRC3	340	640	1360	130	1.7	0.2	1.02
CNRC4	340	640	1360	130	1.7	0.2	1.36

注:PC表示未掺加碳纳米管的普通混凝土,CNRC1表示碳纳米管掺量为0.1%的碳纳米管增强混凝土,其余编号代表的含义以此类推。

行水浴式超声处理,如图 1 所示,适时(5 min)取出烧杯并将其放入冰水混合物中冷却降温,然后继续进行超声分散。重复 6 次超声-降温处理,即可得到均匀稳定且不易再次团聚的碳纳米管悬浮液。

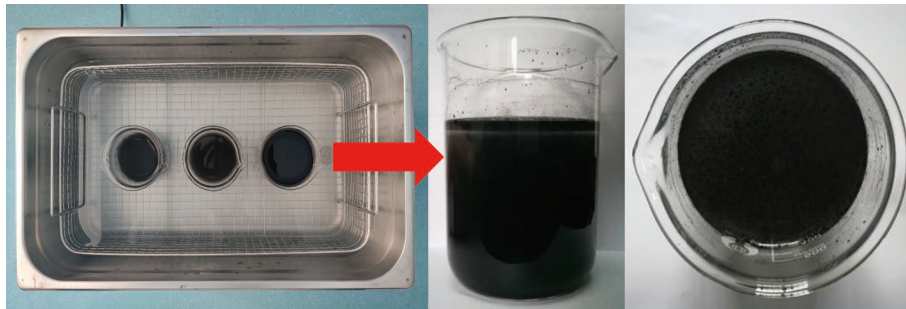


图 1 碳纳米管超声分散处理

Fig. 1 Ultrasonic dispersion treatment of carbon nanotubes

试验所需混凝土试件的制作步骤如下:将砂、碎石、水泥倒入搅拌机中干拌 2 min;加入碳纳米管悬浮液以及另外的减水剂、消泡剂与水的混合液,开机搅拌 2 min;将混凝土拌合物装入圆柱体模具,放置在振动台上振捣密实,随后将其移入温度为 $(20\pm 2)$ ℃、相对湿度(RH)大于 95%的养护室,静置 24 h 拆模,继续标准养护至 28 d 龄期。养护结束后,为满足 SHPB 试验要求,将试件的两个端面打磨光滑,确保其平整度误差在 0.02 mm 以内,加工完毕的试件尺寸约为 $\varnothing 98\text{ mm}\times 48\text{ mm}$ 。

### 1.3 试验方法

为更加准确地反映材料真实的动力性能,采用直径为 100 mm 的 SHPB 试验装置进行混凝土冲击压缩试验。如图 2 所示, SHPB 试验设置主要由主体试验系统、能源动力系统以及数据采集系统三部分组成<sup>[20]</sup>。 SHPB 试验原理为:空气压缩机将气体存放于储气罐中,借助操纵台可调节压缩气体传输至发射装置,开启阀门后,高压气体在瞬间释放,推动炮膛内的子弹快速射出并撞入射杆,产生入射波 $\varepsilon_i(t)$ 。安放在入射杆与透射杆之间的试件在入射波的加载作用下发生形变,并同时向入射杆与透射杆分别传播反射波 $\varepsilon_r(t)$ 和透射波 $\varepsilon_t(t)$ 。子弹的冲击速度由激光测速仪测试,波形信息由超动态应变仪以及波形存储器采集。根据一维弹性应力波理论及 SHPB 试验技术的基本假定,通过“三波法”处理试验数据<sup>[21]</sup>,从而获得混凝土的动力学基础参数。

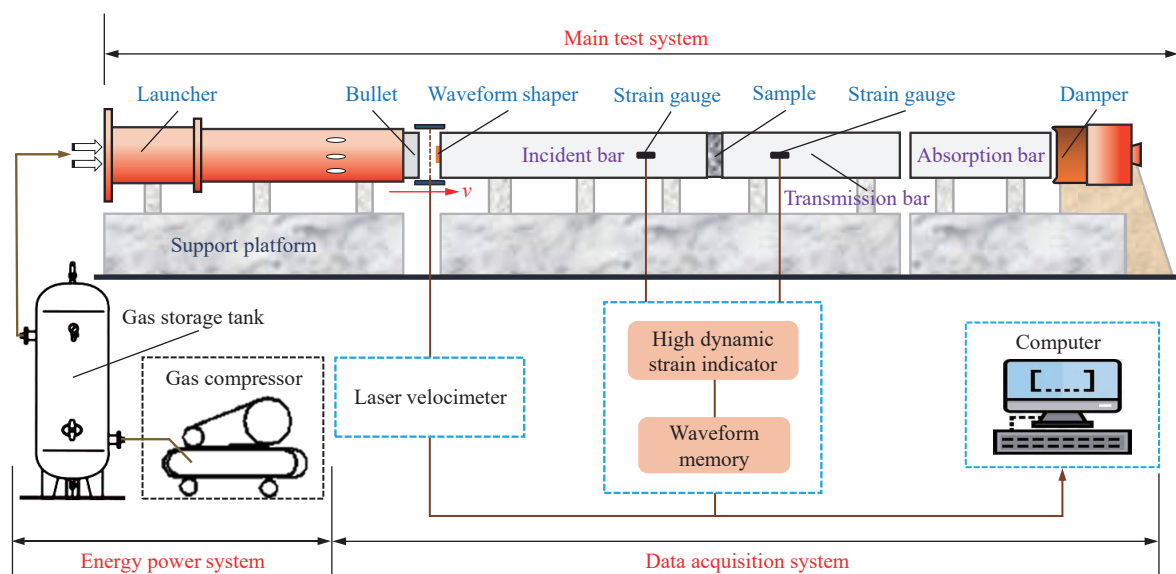


图 2 SHPB 试验装置组成

Fig. 2 Schematic diagram of an SHPB test device



“三波法”涉及的计算公式如下:

$$\varepsilon(t) = \frac{c_e}{L_s} \int_0^{\tau} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{c_e}{L_s} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{E_c A_c}{2A_s} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \quad (3)$$

式中:  $c_e$  为杆件中的应力波波速,  $E_c$  和  $A_c$  分别为杆件的弹性模量和横截面积;  $\sigma(t)$ 、 $\varepsilon(t)$ 、 $\dot{\varepsilon}(t)$ 、 $A_s$ 、 $L_s$  分别为试件的应力、应变、应变率、横截面积和长度;  $\tau$  为应力波在杆件中的持续时间。

在 SHPB 试验过程中, 将混凝土试件夹持在入射杆和透射杆之间, 并确保试件及各个杆件的中心在同一轴线。采用铜片作为波形整形器, 优化初始应力波的形状, 减小波形的高频震荡, 降低应力波在传播过程中的“弥散效应”, 从而满足 SHPB 试验的应力均匀性要求<sup>[18,22]</sup>。同时, 在试件与杆件的接触面处均匀涂抹一层凡士林(起润滑作用), 以减小端部摩擦效应造成的不利影响<sup>[2]</sup>。本试验共设置 5 种加载水平, 通过调节输入气压的大小(0.25~0.45 MPa)进而控制子弹的冲击速度, 实际测得的子弹冲击速度由低到高分别约 6.8、7.8、8.8、9.8、10.8 m/s。为保证试验结果的可靠性, 对每种工况下的平行试件进行 3 次重复测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 应力-应变曲线

图 3 为不同试验条件下混凝土的动态应力-应变曲线, 能够直观地反映试件在冲击压缩荷载作用下应力与应变之间的变化关系。综合对比普通混凝土试件和碳纳米管增强混凝土试件的动力学应力-应变曲线, 可以看出, 曲线上升部分的初始阶段略微凸向应变轴, 这是由于试件内部的原始孔洞和裂隙等微缺陷在动态受压状态下会有一定程度的收缩闭合<sup>[23]</sup>; 之后动态应力-应变曲线大致呈直线上升趋势, 试件处于线弹性阶段, 应力随着应变的增加持续增大; 接近峰值应力时, 试件内部的局部屈服程度加剧, 动态应力-应变曲线斜率有所减小, 试件应力缓慢增加; 经过峰值点后, 动态应力-应变曲线开始进入下降段, 此时混凝土已经破坏, 失去承载能力, 随着应变的增加, 应力逐渐减小。动态应力-应变曲线受冲击速度的影响显著, 冲击速度越大, 曲线的形状越“高宽”, 试件应力达到的峰值越大。还可以发现, 虽然普通混凝土试件和碳纳米管增强混凝土试件的动力学应力-应变曲线几何形状相似, 但是在特征数值、变化幅度等方面的差别较大。例如, 在同一加载水平下, 碳纳米管增强混凝土的最高应力值、最大应变值基本均大于普通混凝土。这表明掺入碳纳米管对混凝土的动态受压应力-应变关系具有一定影响, 与普通混凝土相比较, 碳纳米管的加入可以提升混凝土抵抗冲击荷载的能力。

### 2.2 动态强度特性

为更有效地阐述混凝土在冲击荷载作用下的强度特性, 分别对试件的动力学抗压强度和动态强度增长因子进行分析。动态抗压强度是指混凝土在冲击压缩过程中达到的峰值应力, 图 4(a)展示了混凝土动态抗压强度随冲击速度的变化规律。分析可知, 普通混凝土试件和碳纳米管增强混凝土试件的动力学抗压强度均随冲击速度的增大而增加, 即动态抗压强度表现出加载速度强化效应。原因在于混凝土受冲击发生破坏的过程极短, 试件无法依靠裂纹的迅速萌生和发育积累能量, 只有通过增加应力的途径实现能量平衡<sup>[24]</sup>。将图 4(a)中的试验数据按照  $y=kx+b$  的函数形式进行拟合, 拟合后的参数列于表 4,  $R^2$  为拟合优度。可以看出, 混凝土动态抗压强度与冲击速度之间的线性相关性较强。整体而言, 当加载水平相同时, 较之普通混凝土试件, 碳纳米管增强混凝土试件的动力学抗压强度有所提升, 并且提升效果与碳纳米管掺量有关, 当碳纳米管掺量为 0.30% 时, 提升效果相对最佳, 碳纳米管增强混凝土动态抗压强度的最大增长幅度可达 23.7%。另外, 以加载速度为 8.8 m/s 为例, PC 的动态抗压强度为 62.7 MPa, CNRC1~CNRC4 的动态抗压强度分别为 63.2、68.8、72.5 及 66.3 MPa。这说明在同一加载水平下, 混凝土的动态

抗压强度随碳纳米管掺量的增大呈现出先逐渐升高而后有所下降的趋势。这是由于当碳纳米管掺量过大时,其在混凝土中的分散效果欠佳,引入了较多的裂隙等缺陷,反而对试件的动态抗压强度产生了消极作用。

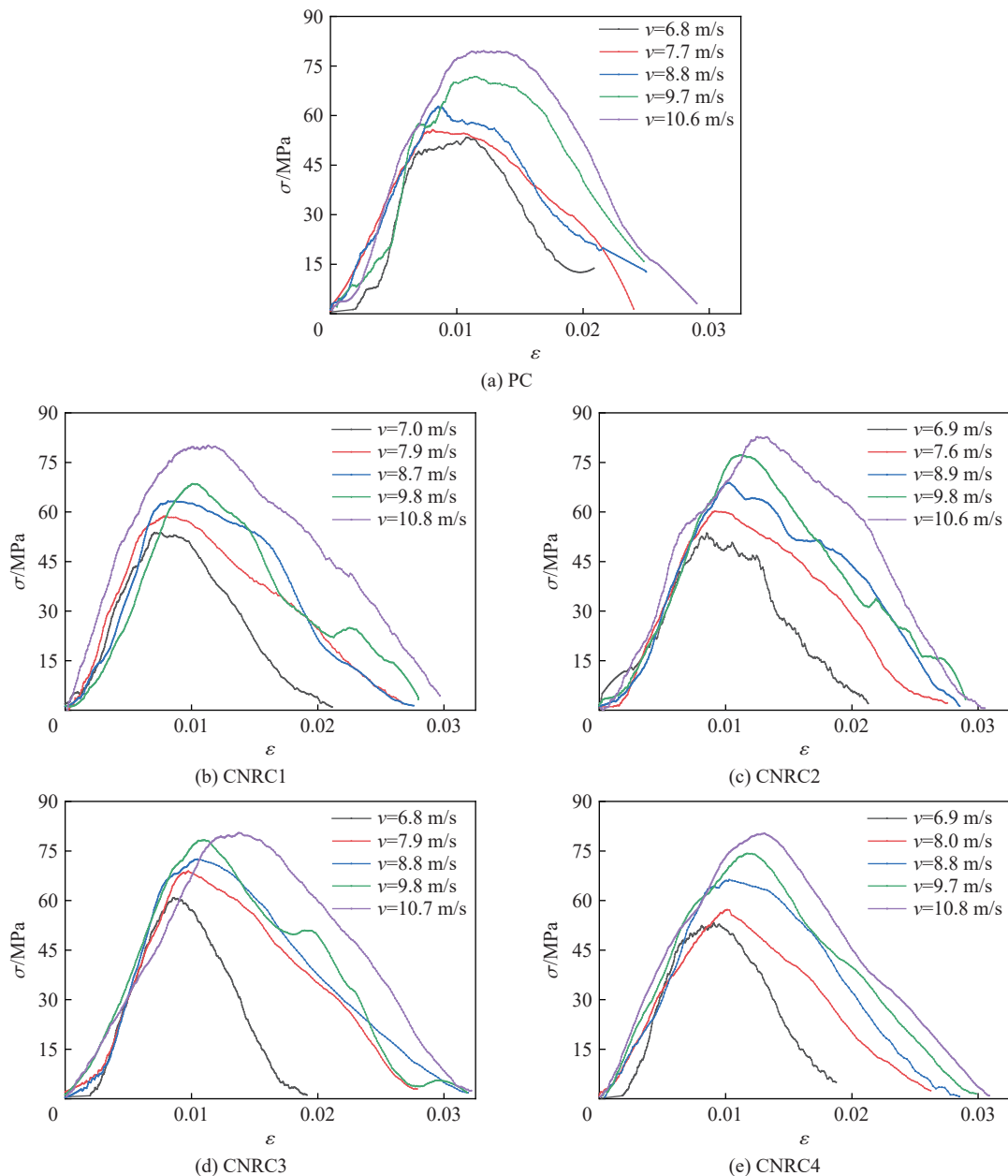


图 3 混凝土动态应力-应变曲线

Fig. 3 Dynamic stress-strain curves of concrete

动态强度增长因子是指混凝土动态抗压强度与静态抗压强度的比值(本文动态强度增长因子的计算以文献 [19] 中的静力强度为比例基准),图 4(b)展示了混凝土动态强度增长因子随冲击速度的变化规律。可以看出,随冲击速度的增大,普通混凝土试件和碳纳米管增强混凝土试件的动态强度增长因子也随之增加。经过分析,混凝土动态强度增长因子与冲击速度之间存在正相关的线性关系,拟合结果列于表 5。线性拟合之后,CNRC4 的曲线斜率为 0.156,大于其他组试件,这表明 CNRC4 强度特性的加载速度强化效应更加明显,即掺加 0.40% 碳纳米管的改性混凝土率敏感性更高。

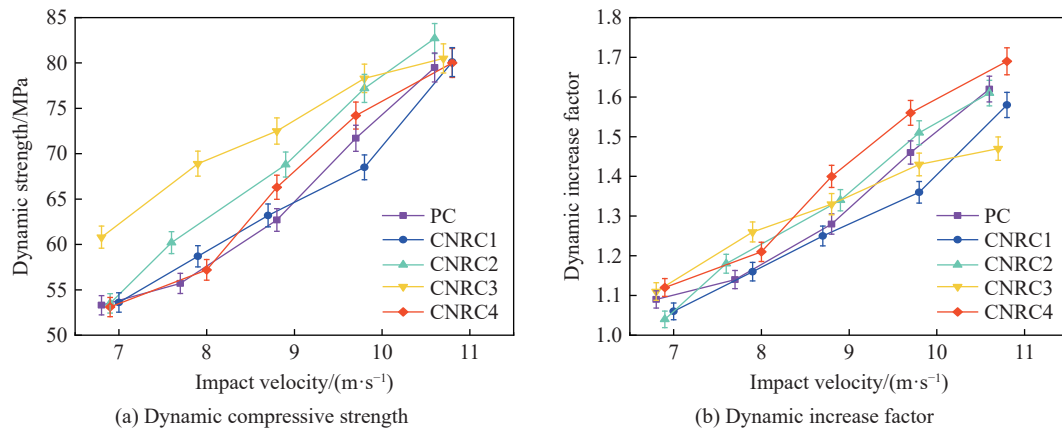


图 4 混凝土动态压缩强度特性与冲击速度的关系

Fig. 4 Relationship between concrete's dynamic compressive strength characteristics and impact velocity

表 4 混凝土动态抗压强度与冲击速度的拟合结果

Table 4 Fitting results between concrete's dynamic compressive strength and impact velocity

拟合参数	PC	CNRC1	CNRC2	CNRC3	CNRC4
$k$	7.11	6.64	7.83	5.06	7.39
$b$	2.59	6.12	-0.11	27.69	0.83
$R^2$	0.9654	0.9663	0.9968	0.9753	0.9751

表 5 混凝土动态强度增长因子与冲击速度的拟合结果

Table 5 Fitting results between concrete's dynamic enhancement factor and impact velocity

拟合参数	PC	CNRC1	CNRC2	CNRC3	CNRC4
$k$	0.143	0.131	0.152	0.092	0.156
$b$	0.067	0.123	-6.026	0.508	0.020
$R^2$	0.9657	0.9717	0.9946	0.9729	0.9783

### 2.3 动态受压变形

通过峰值应变和极限应变对冲击荷载作用下混凝土的动态受压变形进行分析。峰值应变是指动态应力-应变曲线中与峰值应力相对应的应变,图 5(a)展示了混凝土峰值应变与冲击速度之间的关系。分析可知,随冲击速度的提高,碳纳米管增强混凝土试件的峰值应变呈递增趋势,表现出率敏感性;普通混凝土试件峰值应变的离散程度较大,在 6.8 m/s 加载水平下,其峰值应变明显高于其他组试件,在 7.8 和 8.8 m/s 加载水平下,其峰值应变反而低于 6.8 m/s 加载水平(普通混凝土试件峰值应变的离散不排除因数据采集或处理误差所致)。此外,在同一加载水平下,混凝土峰值应变随碳纳米管掺量的增大逐渐增加,但是 CNRC1 的峰值应变相对最小,且低于 PC,这可能是因为当碳纳米管掺量较小时,其在局部随机形成了薄弱区域。极限应变是指动态应力-应变曲线中的最大应变,图 5(b)展示了混凝土极限应变与冲击速度之间的关系。可以看出,普通混凝土试件和碳纳米管增强混凝土试件的极限应变均随冲击速度的增大而逐渐增加,具有一定的加载速度强化效应,但极限应变与冲击速度之间的线性关系较差,加载水平从 6.8 m/s 增大到 7.8 m/s 时,极限应变的增幅较大,加载水平从 7.8 m/s 增大到 10.8 m/s 时,极限应变的增幅变小。较之普通混凝土,在加载水平达到 7.8 m/s 之后,碳纳米管的加入能够有效提高混凝土的极限应变,在同一加载水平下,随碳纳米管掺量的增大,混凝土峰值应变先增加后减小, CNRC3 表现出相对最高的极限应变。上述情况表明,整体而言,在冲击压缩荷载作用下,加入碳纳米管能够改善混凝土的变形能力。

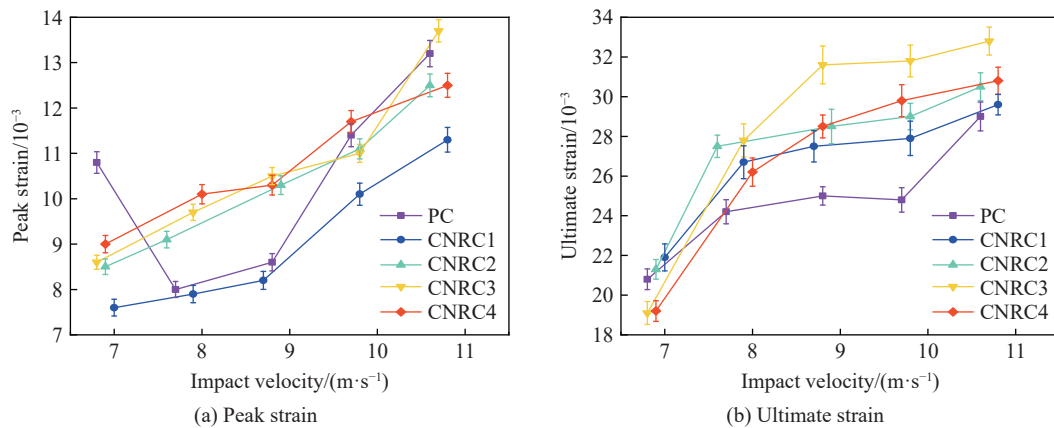


图 5 混凝土动态受压变形与冲击速度的关系

Fig. 5 Relationship between concrete's dynamic compression deformation and impact velocity

## 2.4 能量耗散特征

混凝土承受动态荷载直至破坏的过程中伴随着非常活跃的能量输入、转化、吸收和释放。韧度能够反映材料吸收能量的能力,可用应力-应变曲线与坐标轴包围的面积表示<sup>[25]</sup>。在冲击受压状态下,混凝土达到峰值应力之前处于微裂纹稳定扩展阶段,之后微裂纹开始发生不稳定扩张,直至出现贯通的宏观裂缝,最终使得混凝土破坏失效<sup>[20]</sup>。因此,本文分别以峰前韧度(峰值应变之前范围内的动态应力-应变曲线与坐标轴所围成的面积)和冲击韧度(动态应力-应变全过程曲线与坐标轴所围成的面积)作为指标,针对受荷混凝土冲击破坏过程中不同阶段的能量耗散特征进行分析。

图 6(a)为混凝土峰前韧度随冲击速度的变化趋势。可以发现,随冲击速度的提高,除普通混凝土试件存在个别波动的数据点外,其他组混凝土试件的峰前韧度总体呈现出逐渐上升的趋势,但峰前韧度与冲击速度并没有表现出非常明显的线性相关性。此外,混凝土峰前韧度和碳纳米管掺量之间的关系与峰值应变和碳纳米管掺量之间的关系相似。图 6(b)为混凝土冲击韧度随冲击速度的变化规律。分析可知,普通混凝土试件和碳纳米管增强混凝土试件的冲击韧度均随冲击速度的增大而提高,冲击韧度与冲击速度表现出正相关性,即冲击韧度具有冲击速度强化效应。这是因为在较大的冲击速度下,荷载输入的能量变大,混凝土内部发育的损伤裂纹数目有所增加,从而会形成许多个微开裂面,试件破碎程度加剧,对能量的耗散也相应增加。当加载水平相同时,CNRC3 的冲击韧度相对最大,与 PC 相比较,提升幅度约为 10%。这说明适量碳纳米管的掺入可以提升混凝土的冲击韧度。韧度是混凝土强度特性和变形能力的综合反映,由于 CNRC3 的动态抗压强度和极限应变增幅较大,因此其冲击韧度的提高更加显著。

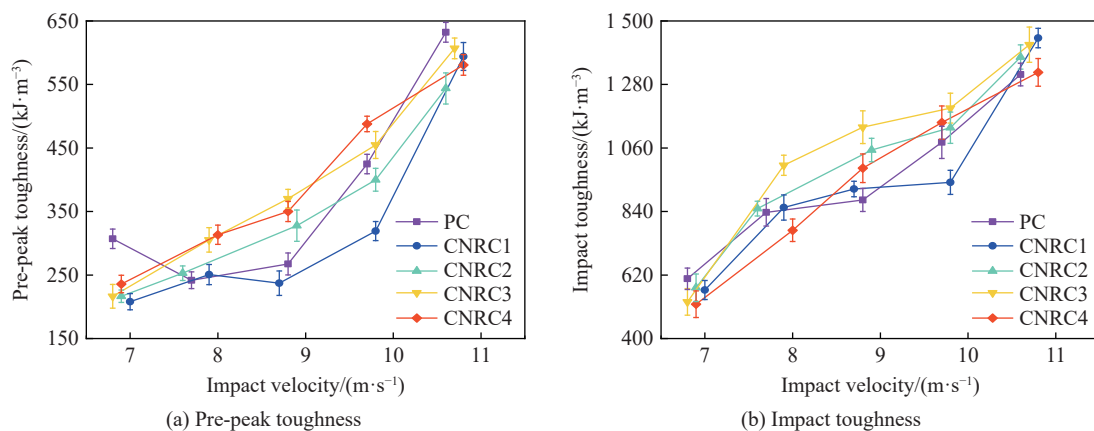


图 6 混凝土能量耗散特征与冲击速度的关系

Fig. 6 Relationship between concrete's energy dissipation characteristics and impact velocity



碳纳米管能够通过填充、桥接、成核等作用对混凝土进行强化,提高内部结构的整体性和致密性<sup>[3,15]</sup>,同时其自身在受荷拔出及断裂失效的过程中也需要消耗能量,这些都有利于改善碳纳米管增强混凝土的抗冲击性能。

### 3 结 论

利用 SHPB 试验装置开展了碳纳米管增强混凝土的冲击压缩试验,分析了碳纳米管掺量和冲击速度对混凝土动态强度特性、受压变形以及能量耗散特征演化规律的影响,得到以下主要结论。

(1) 碳纳米管增强混凝土和普通混凝土的动态抗压强度以及动态强度增长因子均随着冲击速度的增大而逐渐增加,并且表现出非常强的线性正相关关系,即混凝土强度特性具有显著的率敏感性。在同一加载水平下,碳纳米管增强混凝土的动态抗压强度随碳纳米管掺量的增大呈先升后降的变化趋势,且与普通混凝土相比有所提升,当碳纳米管掺量为 0.30% 时,提升效果最佳,增幅可达 23.7%。

(2) 碳纳米管增强混凝土的峰值应变随着冲击速度的增大呈递增趋势,具有一定的冲击速度强化效应,然而当碳纳米管掺量为 0.10% 时,其峰值应变低于普通混凝土。碳纳米管增强混凝土和普通混凝土的极限应变均随着冲击速度的增大而提高,极限应变与冲击速度之间表现出非线性正相关性;在同一加载水平下,随着碳纳米管掺量的增大,混凝土极限应变先增大后减小。

(3) 碳纳米管增强混凝土和普通混凝土的冲击韧度均随冲击速度的增大而提高,即冲击韧度具有冲击速度强化效应,但冲击韧度与冲击速度之间并没有表现出明显的线性关系。混凝土峰前韧度的变化规律与峰值应变相似。韧度是混凝土强度特性和变形能力的综合反映,在同一加载水平下,当碳纳米管的掺量为 0.30% 时,混凝土的冲击韧度相对最大,较之普通混凝土提升约 10%。

(4) 在冲击压缩荷载作用下,碳纳米管增强混凝土和普通混凝土大致会经历原始裂隙收缩闭合、近似弹性受压发展、局部区域开始屈服以及完全破坏失效并失去承载能力等阶段。适量碳纳米管的掺入有效提高了混凝土抵抗冲击荷载的能力,碳纳米管能够通过填充、桥接、晶核、拔出作用对混凝土的内部结构进行加固强化,进而改善混凝土的动态力学特性以及能量耗散特征。

### 参考文献:

- [1] KONSTA-GDOUTOS M S, METAXA Z S, SHAH S P. Multi-scale mechanical and fracture characteristics and early-age strain capacity of high performance carbon nanotube/cement nanocomposites [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2010, 32(2): 110–115. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.10.007.
- [2] 党发宁, 李玉涛, 任劼, 等. 混凝土冲击破坏动力学及能量特性分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(8): 083202. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0444.  
DANG F N, LI Y T, REN J, et al. Analysis of dynamic mechanics and energy characteristics of concrete impact failure [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(8): 083202. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0444.
- [3] LU S, XIA W, BAI E L, et al. Interfacial modification: The dynamic compression properties and enhancement mechanism of concrete added with micro-nano hierarchical carbon-based fiber [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 247: 110340. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.110340.
- [4] WANG J L, DONG S F, PANG S D, et al. Tailoring anti-impact properties of ultra-high performance concrete by incorporating functionalized carbon nanotubes [J]. *Engineering*, 2022, 18: 232–245. DOI: 10.1016/j.eng.2021.04.030.
- [5] 胡时胜, 王道荣. 冲击载荷下混凝土材料的动态本构关系 [J]. *爆炸与冲击*, 2002, 22(3): 242–246.  
HU S S, WANG D R. Dynamic constitutive relation of concrete under impact [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, 22(3): 242–246.
- [6] 徐阳晨, 邢国华, 黄娇, 等. 聚乙烯醇纤维和碳纳米管改性对混凝土力学性能的影响 [J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(7): 809–815, 822. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.07.014.  
XU Y C, XING G H, HUANG J, et al. Effect of PVA fiber and carbon nanotubes modification on mechanical properties of

- concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(7): 809–815, 822. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.07.014.
- [7] 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. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2023.08.011.
- KANG Y M, TONG J X. Effect of multi-walled carbon nanotubes on mechanical and durability of steel slag concrete [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2023, 54(8): 3070–3078. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2023.08.011.
- [8] CARRIÇO A, BOGAS J A, HAWREEN A, et al. Durability of multi-walled carbon nanotube reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 164: 121–133. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.221.
- [9] 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. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.11.049.
- [10] NOCHAIYA T, CHAIPANICH A. Behavior of multi-walled carbon nanotubes on the porosity and microstructure of cement-based materials [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(6): 1941–1945. DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.09.030.
- [11] COLLINS F, LAMBERT J, DUAN W H. The influences of admixtures on the dispersion, workability, and strength of carbon nanotube-OPC paste mixtures [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2012, 34(2): 201–207. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.09.013.
- [12] 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. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.003.
- [13] PARVEEN S, RANA S, FANGUEIRO R, et al. Microstructure and mechanical properties of carbon nanotube reinforced cementitious composites developed using a novel dispersion technique [J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 73: 215–227. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.03.006.
- [14] LI G Y, WANG P M, ZHAO X H. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes [J]. *Carbon*, 2005, 43(6): 1239–1245. DOI: 10.1016/j.carbon.2004.12.017.
- [15] GAO F F, TIAN W, WANG Z, et al. Effect of diameter of multi-walled carbon nanotubes on mechanical properties and microstructure of the cement-based materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 260: 120452. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120452.
- [16] 郑冰森, 陈嘉琪, 施韬, 等. 多壁碳纳米管增强混凝土的断裂性能 [J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(11): 2502–2508. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.20210054.
- ZHENG B M, CHEN J Q, SHI T, et al. Fracture properties of multi-walled carbon nanotubes reinforced concrete [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(11): 2502–2508. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.20210054.
- [17] 黄山秀, 陈小羊, 张传祥, 等. 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 [J]. *高压物理学报*, 2023, 37(1): 014101. DOI: 10.11858/gywlxb.20220654.
- HUANG S X, CHEN X Y, ZHANG C X, et al. Mechanical properties and energy evolution characteristics of concrete under different strain rates and content of MWCNTs [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2023, 37(1): 014101. DOI: 10.11858/gywlxb.20220654.
- [18] 任韦波, 许金余, 白二雷, 等. 高温后玄武岩纤维增强混凝土的动态力学特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(1): 36–42. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)01-0036-07.
- REN W B, XU J Y, BAI E L, et al. Dynamic mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete after elevated temperatures [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(1): 36–42. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)01-0036-07.
- [19] 夏伟, 陆松, 许金余, 等. 碳纳米管/碳纤维对混凝土静力特性的影响及微观机理分析 [J]. *化工新型材料*, 2022, 50(9): 278–281. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2022.09.055.
- XIA W, LU S, XU J Y, et al. Influence of CNTs/CF on the static characteristics of concrete and analysis of its micro-mechanism [J]. *New Chemical Materials*, 2022, 50(9): 278–281. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2022.09.055.
- [20] XIA W, LU S, BAI E L, et al. Strengthening and toughening behaviors and dynamic constitutive model of carbon-based hierarchical fiber modified concrete: cross-scale synergistic effects of carbon nanotubes and carbon fiber [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 63: 105482. DOI: 10.1016/j.job.2022.105482.

- [21] KHOSRAVANI M R, WEINBERG K. A review on split Hopkinson bar experiments on the dynamic characterisation of concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 190: 1264–1283. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.187.
- [22] 吕太洪. 基于 SHPB 的混凝土及钢筋混凝土冲击压缩力学行为研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.  
LV T H. Studies on the shock compression behaviors of concrete and steel reinforced concrete based on the split Hopkinson pressure bar [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [23] 方士正, 李炜煜, 杨阳, 等. 静水压状态下深部岩石动态压缩力学行为及能量耗散特征试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2023, 42(6): 280–288. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2023.06.034.  
FANG S Z, LI W Y, YANG Y, et al. Experimental study on the dynamic mechanical behavior and energy dissipation characteristics of deep rock under coupled impact loading and hydrostatic pre-stress [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(6): 280–288. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2023.06.034.
- [24] 王道荣, 胡时胜. 骨料对混凝土材料冲击压缩行为的影响 [J]. *实验力学*, 2002, 17(1): 23–27. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4888.2002.01.004.  
WANG D R, HU S S. Influence of aggregate on the compression properties of concrete under impact [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2002, 17(1): 23–27. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4888.2002.01.004.
- [25] 胡金生, 杨秀敏, 周早生, 等. 碳纤维混凝土与聚丙烯纤维混凝土材料冲击荷载下纤维增韧特性试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2005, 26(2): 101–105. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2005.02.015.  
HU J S, YANG X M, ZHOU Z S, et al. Experimental study on tenacity increase characteristics of steel fiber reinforced concrete and polypropylene fiber reinforced concrete under impact load [J]. *Journal of Building Structures*, 2005, 26(2): 101–105. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2005.02.015.

(责任编辑 曾月蓉)