

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.01.003

冲击荷载下碳纳米管对混凝土 劈裂拉伸性能的影响*

李智峰¹, 陆凤鸣²

(1. 山西工程科技职业大学, 晋中 030619; 2. 太原理工大学 建筑学院, 太原 030000)

摘要: 利用分离式霍普金森压杆(SHPB)试验装置, 对不同碳纳米管体积掺量(0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%)的碳纳米管增强混凝土进行了平台巴西圆盘动态劈裂拉伸试验, 通过分析碳纳米管掺量和冲击速率对混凝土破坏形态、强度、耗散能等行为特征的影响, 研究了冲击荷载下碳纳米管增强混凝土的劈裂拉伸性能, 并分析了碳纳米管的强韧化效应。结果表明: 随着冲击速率的增大, 混凝土的破坏程度等级不断增大。混凝土的动态劈裂拉伸强度、动态劈裂拉伸强度增长因子(DIF)和耗散能均具有冲击速率强化效应。碳纳米管可以提高混凝土的抗冲击破坏能力和动态劈裂拉伸性能, 可以增强混凝土动态劈裂拉伸强度和耗散能的冲击速率强化效应。随着碳纳米管掺量的增大, 混凝土的动态劈裂拉伸强度、DIF和耗散能均先增大后减小, 混凝土动态劈裂拉伸强度和耗散能的冲击速率强化效应均先增强后减弱。碳纳米管的最佳掺量为0.3%。碳纳米管对混凝土动态劈裂拉伸强度和耗散能的最大增幅分别为49.76%、212.45%。

关键词: 混凝土; 碳纳米管; 冲击速率; 动态劈裂拉伸性能; 强度

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2026)01-0020-09

Effect of Carbon Nanotube on Splitting Tensile Properties of Concrete under Impact Load

LI Zhi-feng¹, LU Feng-ming²

(1. Shanxi Vocational University of Engineering Science and Technology, Jinzhong 030619, China;

2. College of Architecture, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030000, China)

Abstract: Dynamic splitting tensile behavior of carbon nanotube-reinforced concrete was investigated using a split Hopkinson pressure bar (SHPB) system with Brazilian disc specimens at varying carbon nanotube volume content (0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%). By analyzing the effects of carbon nanotube content and impact rate on the failure morphology, strength, and dissipated energy of concrete, the splitting tensile properties of carbon nanotube-reinforced concrete under impact loading were studied, and the toughening effect of carbon nanotubes was analyzed. The experimental results demonstrate that concrete damage severity exhibits a positive correlation with dynamic splitting tensile strain rate. Both dynamic splitting tensile strength and its corresponding dynamic increase factor (DIF), along with energy dissipation capacity, display significant strain-rate dependency, revealing pronounced rate-strengthening effects. The dynamic splitting tensile strength, DIF, and dissipated energy of concrete exhibit a non-monotonic relationship with carbon nanotube content, initially increasing before reaching an optimal threshold and subsequently decreasing. Similarly, the strain-rate strengthening effects on both dynamic splitting tensile strength and energy dissi-

收稿日期 (Date of reception): 2025-08-19

网络首发日期 (Published online): 2025-10-27

作者简介: 李智峰(1981-), 男, 山西阳城人, 硕士、讲师, 主要从事建筑材料研究, (E-mail) lixianglanjxkjxy@163.com。

基金项目: 山西省高等学校科技创新项目(2024L418)

About the author: LI Zhi-feng (1981-), male, born in Yangcheng city, Shanxi province, master's degree, lecturer, mainly engaged in research on building materials, (E-mail) lixianglanjxkjxy@163.com.

Fund Programs: Science and Technology Innovation Project of Higher Education Institutions in Shanxi Province(2024L418)

pation capacity exhibit a comparable trend; an initial enhancement followed by attenuation with increasing carbon nanotube concentration. The optimal carbon nanotube content is determined to be 0.3%, demonstrating maximum enhancements of 49.76% in dynamic splitting tensile strength and 212.45% in energy dissipation capacity.

Key words: concrete; carbon nanotube; impact rate; dynamic splitting tensile property; strength

自混凝土问世以来,由于其易成型、强度高、造价低廉等诸多优点,被人们广泛应用于军事工程及民用建筑工程中^[1]。然而,混凝土是一种典型的多相脆性材料,其抗拉性能较差,抗拉强度远小于抗压强度^[2]。房屋、桥梁、隧道等工程领域的混凝土结构大多处于复杂的应力状态,受荷混凝土内部往往会形成一定范围的受拉区域,一旦拉应力达到极限值,混凝土便会开裂破坏^[3]。此外,混凝土结构不仅承受自身重力等静态荷载,而且不可避免地会遭受动态荷载的作用,如地震、海啸、高速碰撞、爆炸等^[4]。在动态荷载作用下,拉伸应力波会对混凝土结构造成巨大的损伤,这是当前工程建设中不可忽视的问题。因此,混凝土在冲击荷载下的拉伸力学性能研究已经成为学者关注的重点之一。

混凝土抗压强度远大于抗拉强度的特性使得其在失效时的破坏模式主要表现为拉伸破坏。通常而言,许多建筑结构性能的衰退及使用寿命的缩短都与混凝土的抗拉强度较小以及韧性不足有关^[5]。相关研究表明,添加纤维是提高混凝土抗拉强度和改善混凝土韧性的有效途径之一^[6]。到目前为止,许多类型的纤维被应用于混凝土中,工程中常见的纤维主要有钢纤维^[7]、玄武岩纤维^[8]、碳纤维^[9]、聚丙烯纤维等^[10]。其中,碳纳米管是一种纳米级纤维状碳系材料,其具有优异的力学、电学和化学特性^[11]。将碳纳米管掺入混凝土中,不仅可以赋予混凝土优异的力学性能和耐久性,而且还可以使混凝土具有导电、电磁屏蔽与吸收、自感知等多功能/智能特性^[12]。因此,碳纳米管增强混凝土具有广阔的应用前景。

目前有关碳纳米管增强混凝土的研究主要集中在静态力学性能^[13]、动态压缩力学性能^[14]、耐久性^[15]、吸波性能^[16]、电磁屏蔽效能^[17]、自感知性能等方面^[18],而有关其动态劈裂拉伸力学性能的研究

则相对较少。鉴于此,本文采用分离式霍普金森压杆(SHPB)试验装置,对不同碳纳米管掺量(0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%)的碳纳米管增强混凝土进行了不同冲击速率(4.0、5.0、6.0、7.0、8.0 m/s)的平台巴西圆盘动态劈裂拉伸试验,通过分析混凝土破坏形态、强度、耗散能等的变化规律,研究了冲击荷载下碳纳米管增强混凝土的劈裂拉伸性能。

1 试验

1.1 试件材料及配合比

试验所用原材料包括水泥、细骨料、粗骨料、水、减水剂和碳纳米管。水泥:强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥,其 28 d 抗压、抗折强度分别为 53.5 MPa、8.0 MPa。细骨料:洁净的河砂,其堆积密度为 1470 kg/m³,细度模数为 2.7,属于 II 区中砂。粗骨料:连续级配的石灰岩碎石,其粒径为 5 ~ 20 mm,堆积密度为 1650 kg/m³。水:符合国家标准的洁净自来水。减水剂:FDN-C 高效减水剂,其减水率为 25%,掺量为 1.0% (与水泥的质量比)。碳纳米管:江苏先丰纳米材料科技有限公司生产的 XFM01 型多壁碳纳米管,如图 1 所示,其基本技术参数如表 1 所示。

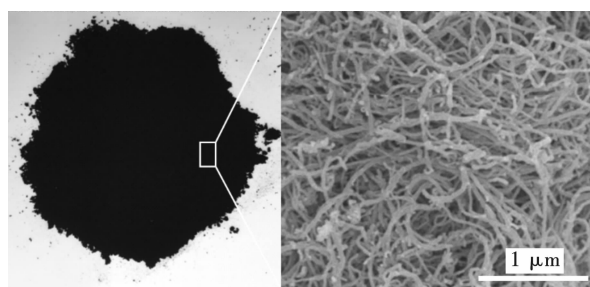


图 1 碳纳米管

Fig. 1 Carbon nanotube

表 1 碳纳米管的技术参数

Table 1 Technical parameters of carbon nanotube

外观 Appearance	纯度 Purity/%	长度 Length/ μm	比表面积 Specific surface area/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	密度 Density/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	管径 Pipe diameter/nm	
					外径 External diameter	内径 Inner diameter
黑色粉末 Black powder	>95	10 ~ 30	300	2.1	5 ~ 15	2 ~ 5

采用外掺法制备碳纳米管增强混凝土,碳纳米管在混凝土中的掺量按体积率进行计算,共设计了0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%五种碳纳米管体积掺量。碳纳米管增强混凝土的配合比如表2所示。

表2 混凝土的配合比(单位:kg/m³)
Table 2 Mix ratio of concrete(unit:kg/m³)

试件编号 Specimen No.	水泥 Cement	砂 Sand	碎石 Gravel	水 Water	减水剂 Water reducer	碳纳米管 Carbon nanotube
PC						-
CNTMC ₁						2.1
CNTMC ₂	440	562	1250	154	4.4	4.2
CNTMC ₃						6.3
CNTMC ₄						8.4
CNTMC ₅						10.5

1.2 试件制备及加工

根据表2所示配合比,基于“裹砂石法”制备混凝土试件,具体制备流程如下:(1)将减水剂和水混合搅拌均匀后,向其中加入碳纳米管并搅拌均匀,而后再将混合液体超声波分散1 h,超声波频率和功率分别为40 kHz、400 W,制得碳纳米管分散液,如图2所示;(2)将砂、碎石倒入搅拌机中,搅拌60 s;(3)将一半碳纳米管分散液倒入搅拌机中,搅拌60 s;(4)将水泥倒入搅拌机中,搅拌60 s;(5)将剩余的一半碳纳米管分散液倒入搅拌机中,搅拌120 s,制得混凝土拌合物;(6)将混凝土拌合物装入模具中,将模具置于振动台上振捣密实,而后移入标准养护室内静置24 h拆模,拆模后继续标准养护至28 d龄期。

制备两种尺寸的试件,100×100×100 mm³的试件用于静态劈裂拉伸试验,φ100 mm×50 mm的试件用于平台巴西圆盘动态劈裂拉伸试验。待养护至规定龄期后,利用混凝土磨平机对φ100 mm×50 mm的试件进行精细打磨、抛光处理,最终将其加工成高径比为0.5,上下两表面不平行度在0.05 mm以内,中心夹角为20°的平台巴西圆盘试件(如图3所示),以满足动态劈裂拉伸试验的要求。



图2 碳纳米管分散液

Fig. 2 Carbon nanotube dispersion

示,其中PC表示未掺加碳纳米管的普通混凝土,CNTMC₁~CNTMC₅分别表示碳纳米管掺量为0.1%~0.5%的碳纳米管增强混凝土。

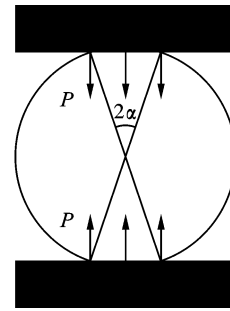


图3 平台巴西圆盘试件

Fig. 3 Platform brazilian disc specimen

1.3 试验原理及方法

静态劈裂拉伸试验按照《普通混凝土力学性能实验方法标准》采用混凝土压力试验机实施,如图4所示。依托直径为100 mm的分离式霍普金森压杆(SHPB)试验装置进行碳纳米管增强混凝土的平台巴西圆盘动态劈裂拉伸试验,SHPB试验装置如图5所示。为减小应力波在传播过程中的横向弥散效应和惯性效应,采用波形整形技术,在入射杆杆端(被子弹撞击的断面)粘贴铜质圆片作为波形整形器。在试验过程中,通过调节冲击气压驱动子弹以不同的速度发射。对每组试件每种工况下进行3次有效试验,基于“三波法”能够获得试件在动态劈裂拉伸荷载作用下的力学参数。

2 结果与分析

2.1 破坏形态

PC和CNTMC的动态劈裂拉伸破坏形态如图6所示。根据混凝土的动态劈裂拉伸破坏形态,可将其破坏程度由低到高分三个等级。一级:混凝土沿加载中心破坏成两部分;二级:混凝土破坏除主裂

缝外,平台巴西圆盘试件的平台区域出现“三角形”破坏;三级:混凝土除平台区域破坏外,主裂缝两侧也出现破损。由图 7 可知,随着冲击速率的增大,PC 和 CNTMC 的破坏程度逐渐增大。当冲击速率分别为 4.0、5.0、6.0 m/s 时,PC 的破坏等级分别为一级、二级、三级。当冲击速率分别为 5.0、6.0、7.0 m/s 时,CNTMC₁ 的破坏等级分别为一级、二级、三级。冲击速率越大,入射杆携带的能量越多,所以混凝土的破坏程度越严重。整体上,CNTMC 的破坏程度较 PC 有所减弱。当冲击速率为 6.0 m/s 时,PC 的破坏等级为三级,而 CNTMC₁ ~ CNTMC₅ 的破坏等级均为二级。由此可见,碳纳米管可以提高混凝土的动态劈裂拉伸性能。随着碳纳米管掺量的增大,CNTMC 的破坏程度先减小后增大。当冲击速率为 7.0 m/s 时,CNTMC₁ 的破坏等级就达到三级,而 CNTMC₂ 在冲击速率为 8.0 m/s 时破坏等级才达到三级。对于 CNTMC₃ 而言,其最大破坏等级才为二级。CNTMC₄ 和 CNTMC₅ 分别在冲击速率为 8.0、7.0 m/s 时破坏等级为三级。当碳纳米管掺量为 0.3% 时,CNTMC₃ 的破坏程度最小。当冲击速率为 8.0 m/s 时,CNTMC₁、CNTMC₂、CNTMC₄、CNTMC₅ 的破坏等级均为三级,而 CNTMC₃ 的破坏等级为二级。综上所述,在动态劈裂拉伸荷载下,掺加碳纳米管可以提高混凝土的抗冲击破坏能力,且当碳纳米管掺量为 0.3% 时,提高效果最佳。

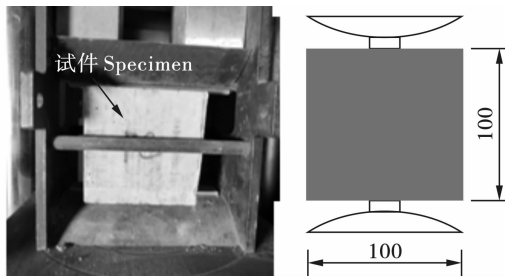


图 4 静态劈裂拉伸试验(单位:mm)

Fig. 4 Static splitting tensile test(unit:mm)



图 5 SHPB 试验装置

Fig. 5 SHPB test device

2.2 动态劈裂拉伸强度

混凝土动态劈裂拉伸试验结果如表 3 所示,PC

和 CNTMC 的动态劈裂拉伸强度如图 7 所示。由图可知,PC 和 CNTMC 的动态劈裂拉伸强度均具有冲击速率强化效应。随着冲击速率的增大,PC 和 CNTMC 的动态劈裂拉伸强度均不断增大。当冲击速率相同时,CNTMC 的动态劈裂拉伸强度均较 PC 大。由此可见,碳纳米管可以提高混凝土的动态劈裂拉伸强度。随着碳纳米管掺量的增大,CNTMC 的动态劈裂拉伸强度先增大后减小。当碳纳米管掺量为 0.3% 时,CNTMC₃ 的动态劈裂拉伸强度最大。当冲击速率分别为 4.0、5.0、6.0、7.0、8.0 m/s 时,CNTMC₃ 的动态劈裂拉伸强度分别较 PC 增大了 27.98%、39.76%、49.32%、49.76%、41.23%。碳纳米管属于纳米尺寸的纤维状碳系材料,在混凝土中既可以发挥纳米材料的填充和纳米成核作用,又可以发挥纤维材料的阻裂作用。碳纳米管可以填充混凝土内部的孔隙,且碳纳米管可以作为纳米晶核吸引水化产物沉积聚集,从而促进水化和调节水化产物晶体结构。在碳纳米管的填充作用和纳米成核作用下,混凝土内部结构更加密实,且内部缺陷显著减少。此外,在混凝土内部,碳纳米管可以限制裂缝的扩展。因此,碳纳米管可以提高混凝土的动态劈裂拉伸强度。当碳纳米管掺量较大时,其在混凝土中不易均匀分散,且会发生团聚。而碳纳米管团聚区域会成为混凝土内部的新缺陷,裂缝易在此区域萌生和扩展。因此,当碳纳米管掺量较大时,CNTMC 的动态劈裂拉伸强度较最佳掺量时有所减小。

将 PC 和 CNTMC 的动态劈裂拉伸强度(f_{td})与冲击速率(v)进行线性拟合,如式(1)所示。由式(1)可知,PC 和 CNTMC 的动态劈裂拉伸强度与冲击速率具有良好的线性关系,拟合直线的相关系数 R^2 均大于 0.96。定义拟合直线的斜率为冲击速率强化因子,拟合直线的斜率越大,混凝土动态劈裂拉伸强度随冲击速率的变化速率越大,冲击速率对混凝土动态劈裂拉伸强度的强化效应越显著。随着碳纳米管掺量的增大,混凝土动态劈裂拉伸强度的冲击速率强化因子先增大后减小。当碳纳米管掺量为 0.3% 时,CNTMC₃ 动态劈裂拉伸强度的冲击速率强化因子最大,其动态劈裂拉伸强度的冲击速率强化效应最强。整体上,CNTMC 动态劈裂拉伸强度的冲击速率强化因子均较 PC 大,CNTMC 动态劈裂拉伸强度的冲击速率强化效应均较 PC 更强。碳纳米管的填充作用、纳米成核作用和阻裂作用使得混凝土的密实度增强,整体性提高。因此,CNTMC 动态劈裂拉伸强度的冲击速率强化效应更佳。

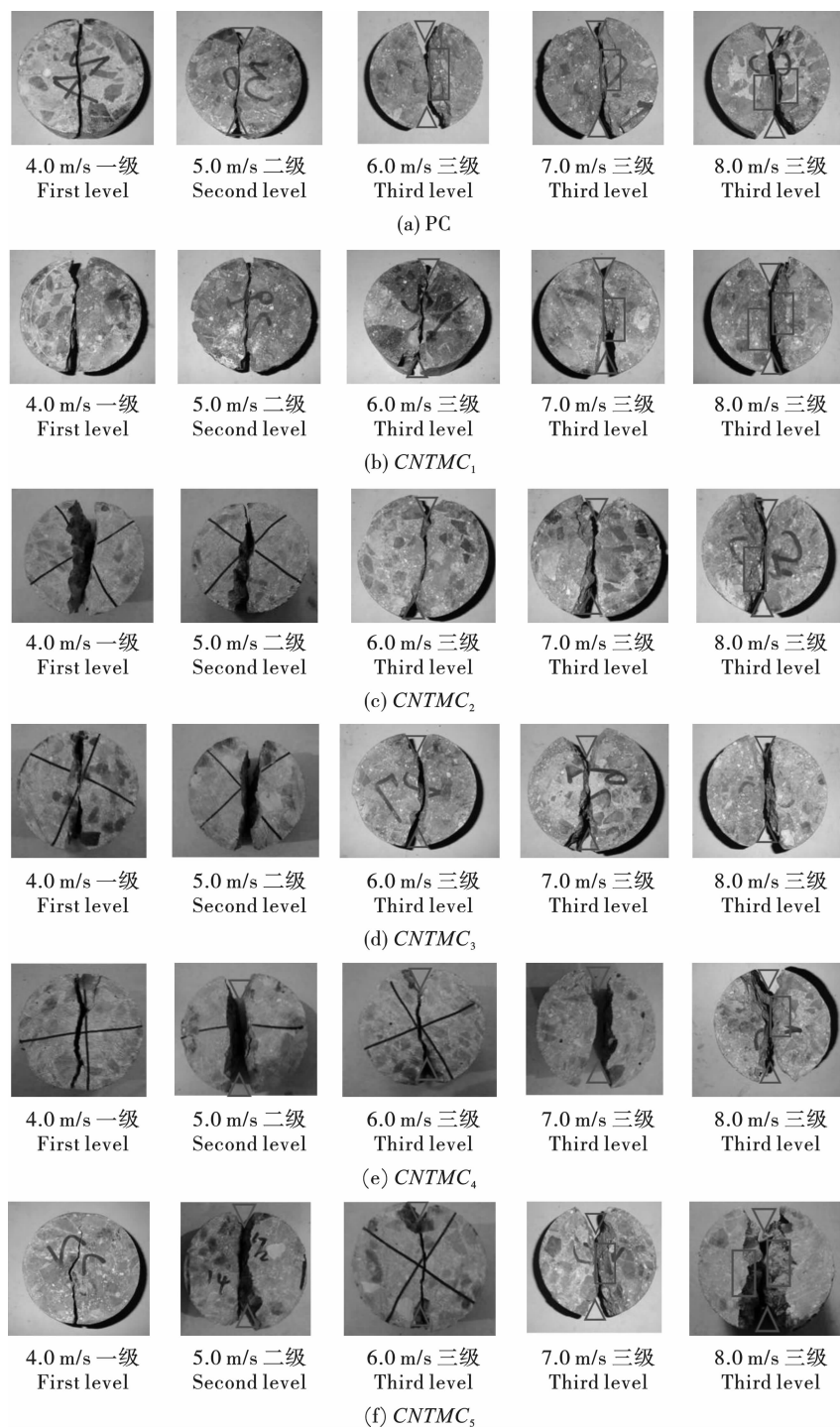


图6 PC和CNTMC的动态劈裂拉伸破坏形态

Fig. 6 Dynamic splitting tensile failure morphology of PC and CNTMC

$$\begin{aligned}
 \text{PC} & f_{td} = 1.874 + 1.528v & R^2 = 0.994 \\
 \text{CNTMC}_1 & f_{td} = 1.626 + 1.835v & R^2 = 0.973 \\
 \text{CNTMC}_2 & f_{td} = 1.338 + 2.149v & R^2 = 0.980 \\
 \text{CNTMC}_3 & f_{td} = 0.78 + 2.494v & R^2 = 0.967 \\
 \text{CNTMC}_4 & f_{td} = 0.89 + 2.324v & R^2 = 0.968 \\
 \text{CNTMC}_5 & f_{td} = 2.232 + 1.849v & R^2 = 0.980
 \end{aligned} \quad (1)$$

2.3 动态劈裂拉伸强度增长因子

定义动态劈裂拉伸强度增长因子(DIF)为混凝土动态劈裂拉伸强度与静态劈裂拉伸强度的比值,其表征着动态劈裂拉伸荷载对混凝土强度的增强效果^[19,20]。PC和CNTMC的静态劈裂拉伸强度如图8所示。由图可知,碳纳米管可以提高混凝土的静态劈裂拉伸强度,CNTMC的静态劈裂拉伸强度均较PC大。混凝土静态劈裂拉伸强度随碳纳米管掺量

的变化趋势与动态劈裂抗拉强度一致。随着碳纳米管掺量的增大,混凝土的静态劈裂拉伸强度先增大后减小。当碳纳米管掺量为 0.3% 时, $CNTMC_3$ 的静态劈裂拉伸强度为 4.35 MPa, 较 PC 增大了 20.17%。当冲击速率为 4.0 m/s 时, 掺量为 0.3% 的碳纳米管对混凝土动态劈裂拉伸荷载的提高效果最小, 但仍达到 27.98%。由此可见, 在动态劈裂拉伸荷载下, 碳纳米管对混凝土劈裂拉伸强度的提高效

果优于静态劈裂拉伸荷载。在静态劈裂拉伸荷载下, 裂缝发展相对较缓。当裂缝扩展遇上碳纳米管时, 裂缝会发生偏转, 绕过碳纳米管继续扩展。而在动态劈裂拉伸荷载下, 裂缝扩展速度快。当裂缝扩展遇上碳纳米管时, 裂缝直接扩展, 碳纳米管从混凝土基体中拔出或被拉断。碳纳米管被拔出和拉断需消耗更多的能量, 因此碳纳米管对混凝土动态劈裂拉伸强度的提高效果优于静态劈裂拉伸强度。

表 3 混凝土动态劈裂拉伸试验结果

Table 3 Dynamic splitting tensile test results of concrete

冲击速率/ Impact rate/ ($m \cdot s^{-1}$)	试件编号 Specimen No.	动态劈裂拉伸强度 Dynamic splitting tensile strength/MPa	DIF	耗散能 Dissipated energy/J	试件编号 Specimen No.	动态劈裂拉伸强度 Dynamic splitting tensile strength/MPa	DIF	耗散能 Dissipated energy/J
4.0	PC	8.15	2.25	14.87	$CNTMC_3$	10.43	2.40	30.86
5.0		9.28	2.56	18.68		12.97	2.98	49.82
6.0		11.11	3.07	36.25		16.59	3.81	92.24
7.0		12.48	3.45	40.24		18.69	4.30	125.73
8.0		14.19	3.92	60.32		20.04	4.61	148.71
4.0	$CNTMC_1$	8.92	2.30	17.24	$CNTMC_4$	9.95	2.36	26.32
5.0		10.45	2.69	24.54		12.16	2.89	46.21
6.0		13.35	3.44	48.36		15.79	3.75	85.29
7.0		14.28	3.68	70.23		17.24	4.10	100.41
8.0		16.18	4.17	88.95		19.03	4.52	128.53
4.0	$CNTMC_2$	9.75	2.35	22.35	$CNTMC_5$	9.56	2.37	23.89
5.0		11.85	2.86	40.59		11.25	2.79	32.42
6.0		14.97	3.61	78.49		13.95	3.46	58.01
7.0		16.34	3.94	89.62		14.88	3.69	79.46
8.0		18.25	4.40	118.62		16.99	4.22	104.29

注: DIF, 动态劈裂拉伸强度增长因子。

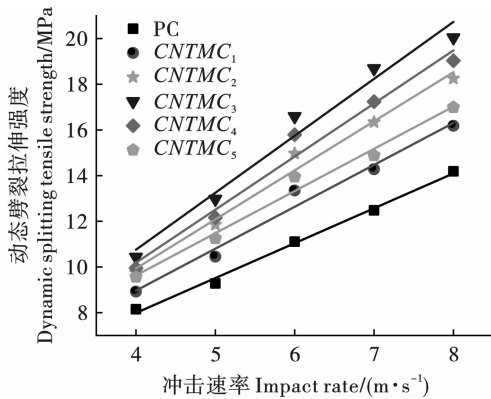


图 7 PC 和 CNTMC 的动态劈裂拉伸强度

Fig. 7 Dynamic splitting tensile strength of PC and CNTMC

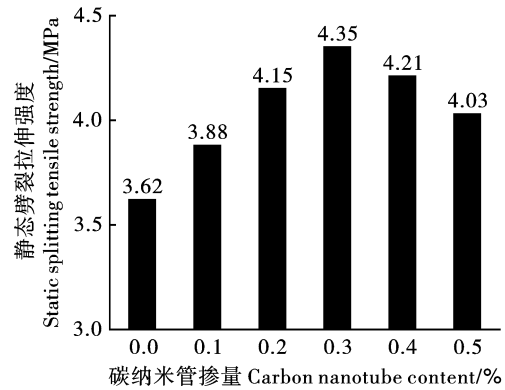


图 8 PC 和 CNTMC 的静态劈裂拉伸强度

Fig. 8 Static splitting tensile strength of PC and CNTMC

PC 和 CNTMC 的动态劈裂拉伸强度增长因子 (DIF) 如图 9 所示。由图可知, PC 和 CNTMC 的 DIF

表现出明显的冲击速率强化效应。随着冲击速率的增大, PC 和 CNTMC 的 DIF 不断增大, 且 PC 和 CNT-

MC 的 DIF 均大于 2.0。在静态荷载下,混凝土内部的裂缝沿薄弱区域扩展。混凝土内部水泥浆体被破坏,而骨料一般保持完好。而在动态劈裂拉伸荷载下,加载速率快,混凝土内部的裂缝直接沿最短路径扩展。在沿最短路径扩展时,混凝土内部的骨料也被破坏。因此,混凝土的动态劈裂拉伸强度显著大于静态劈裂拉伸强度。随着冲击速率的增大,PC 和 CNTMC 的破坏程度逐渐增大。因此,PC 和 CNTMC 的 DIF 随冲击速率的增大而增大。碳纳米管可以提高混凝土的 DIF,且随着碳纳米管掺量的增大,混凝土的 DIF 先增大后减小。当碳纳米管掺量为 0.3% 时, CNTMC₃ 的 DIF 最大。当冲击速率为 8.0 m/s 时, CNTMC₃ 的 DIF 为 4.61,较 PC 增大了 17.53%。

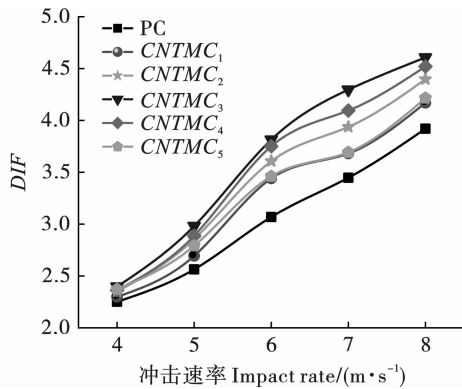


图9 PC 和 CNTMC 的动态劈裂拉伸强度增长因子(DIF)

Fig. 9 Dynamic splitting tensile strength increase factor(DIF) of PC and CNTMC

2.4 耗散能

根据一维应力波理论,动态劈裂拉伸试验中的入射波能量 W_I 、反射波能量 W_R 和透射波能量 W_T 可分别表示为

$$\begin{aligned} W_I(t) &= AC/E \int_0^{\tau} \sigma_I^2(t) dt \\ W_T(t) &= AC/E \int_0^{\tau} \sigma_R^2(t) dt \\ W_T(t) &= AC/E \int_0^{\tau} \sigma_T^2(t) dt \end{aligned} \quad (2)$$

式中, σ_I 、 σ_R 、 σ_T 分别为入射应力波、反射应力波和透射应力波; A 、 C 、 E 分别为杆件的横截面面积、杆件中应力波传播速度和杆件的弹性模量。根据能量守恒原理,动态劈裂拉伸试验中试件的耗散能 W_S 可表示为

$$W_S = W_I - W_R - W_T \quad (3)$$

根据式(2)和式(3),求得 PC 和 CNTMC 的耗散能如图 10 所示。由图可知,PC 和 CNTMC 的耗散能具有冲击速率强化效应。随着冲击速率的增大,

PC 和 CNTMC 的耗散能呈现线性增大趋势。当冲击速率相同时, CNTMC 的耗散能均较 PC 大。随着碳纳米管掺量的增大, CNTMC 的耗散能先增大或减小。当碳纳米管掺量为 0.3% 时, CNTMC₃ 的耗散能最大。当冲击速率分别为 4.0、5.0、6.0、7.0、8.0 m/s 时, CNTMC₃ 的耗散能分别为 30.86 J、49.82 J、92.24 J、125.73 J、148.71 J,较 PC 分别增大了 107.53%、166.70%、154.46%、212.45%、146.54%。由混凝土的破坏形态可知,冲击速率越大,混凝土的破坏程度等级越大。混凝土破坏越严重,其耗散的能量就越多。因此,随着冲击速率的增大,混凝土的耗散能不断增大。与 PC 相比, CNTMC 中多了碳纳米管相。在动态劈裂拉伸荷载下,碳纳米管从混凝土基体中被拔出或拉断,也需要耗散能量。因此, CNTMC 的耗散能较 PC 大。

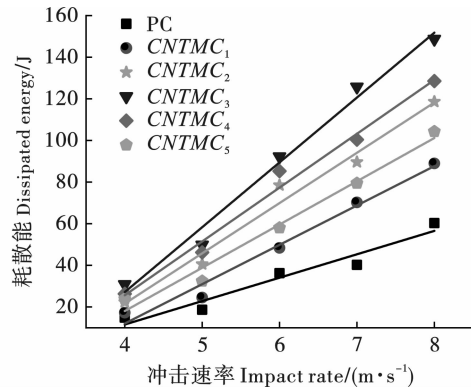


图10 PC 和 CNTMC 的耗散能

Fig. 10 Dissipated energy of PC and CNTMC

将 PC 和 CNTMC 的耗散能 (W_S) 与冲击速率 (v) 进行线性拟合,如式(4)所示。需要注意的是,该式为试验冲击速率范围内(4~8 m/s)的经验公式。由式(4)可知,拟合直线的相关系数 R^2 均大于 0.92,表示 PC 和 CNTMC 的耗散能与冲击速率线性关系良好。拟合直线的斜率为混凝土耗散能的冲击速率强化因子,表征冲击速率对混凝土耗散能强化效应的强弱。随着碳纳米管掺量的增大,混凝土耗散能的冲击速率强化因子先增大后减小。当碳纳米管掺量为 0.3% 时, CNTMC₃ 耗散能的冲击速率强化因子最大,为 31.161,较 PC 增大了 177.09%。在此掺量下,碳纳米管对混凝土耗散能的强化效应最强。CNTMC 耗散能的冲击速率强化因子均较 PC 大。由此可见,碳纳米管可以增强混凝土耗散能的冲击速率强化效应。碳纳米管可使混凝土内部缺陷减少,且在裂缝扩展时可发挥阻裂作用。因此,碳纳米管可增强混凝土动态劈裂拉伸性能指标的冲击速率

强化效应。

$$\begin{aligned}
 \text{PC} \quad W_s &= -33.404 + 11.24v \quad R^2 = 0.928 \\
 \text{CNTMC}_1 \quad W_s &= -63.602 + 18.911v \quad R^2 = 0.973 \\
 \text{CNTMC}_2 \quad W_s &= -75.008 + 24.157v \quad R^2 = 0.973 \\
 \text{CNTMC}_3 \quad W_s &= 97.494 + 31.161v \quad R^2 = 0.983 \\
 \text{CNTMC}_4 \quad W_s &= -77.820 + 25.862v \quad R^2 = 0.980 \\
 \text{CNTMC}_5 \quad W_s &= -65.090 + 20.784v \quad R^2 = 0.973
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

2.5 碳纳米管的强化韧化效应

为了定量分析动态劈裂拉伸荷载下碳纳米管对混凝土强化韧化效应, 定义 CNTMC 的强度增长率和耗散能增长率, 其分别表示 CNTMC 的动态劈裂

拉伸强度和耗散能较 PC 的增大幅度。CNTMC 的强度增长率和耗散能增长率如图 11 所示。由图可知, CNTMC 的强度增长率和耗散能增长率均大于 0, 表明在动态劈裂拉伸荷载下碳纳米管对混凝土具有强化韧化效应。随着碳纳米管掺量的增大, CNTMC 的强度增长率和耗散能增长率均先增大后减小。当碳纳米管掺量为 0.3% 时, CNTMC3 的强度增长率和耗散能增长率最大, 分别为 27.98% ~ 49.76%、107.53% ~ 212.45%。CNTMC 的最大强度增长率和最大耗散能增长率分别为 49.76%、212.45%。由此可见, 碳纳米管对混凝土动态劈裂拉伸强度和耗散能的最大增幅分别为 49.76%、212.45%。

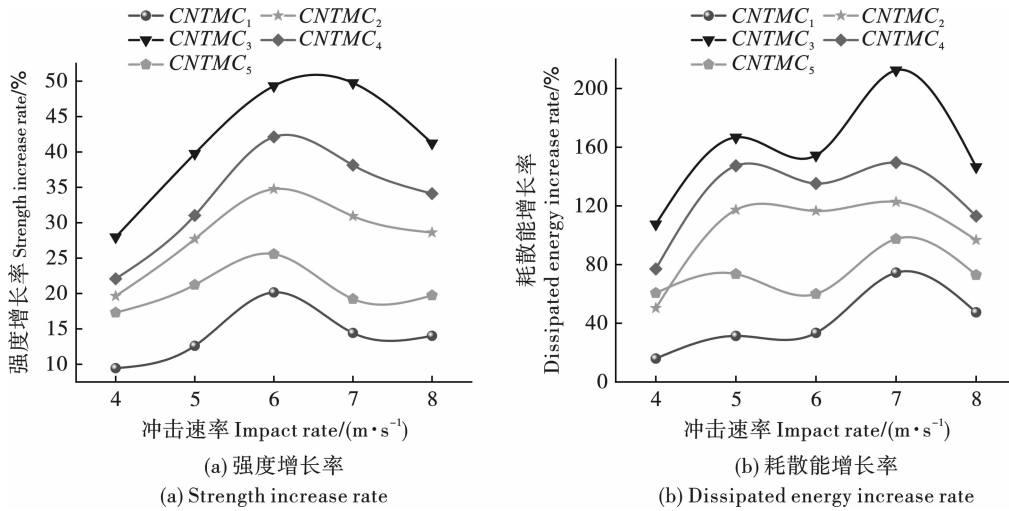


图 11 CNTMC 的强度增长率和耗散能增长率

Fig. 11 Strength increase rate and dissipated energy increase rate of CNTMC

3 结论

(1) 随着冲击速率的增大, 混凝土的破坏等级不断增大。混凝土的动态劈裂拉伸强度、动态劈裂拉伸强度增长因子 (DIF) 和耗散能均具有冲击速率强化效应。

(2) 碳纳米管可以提高混凝土的抗冲击破坏能力和动态劈裂拉伸性能, 可以增强混凝土动态劈裂拉伸强度和耗散能的冲击速率强化效应。

(3) 随着碳纳米管掺量的增大, 混凝土的动态劈裂拉伸强度、DIF 和耗散能均先增大后减小, 混凝土动态劈裂拉伸强度和耗散能的冲击速率强化效应均先增强后减弱。

(4) 碳纳米管的最佳掺量为 0.3%。在此掺量下, 混凝土的破坏程度最小, 动态劈裂拉伸强度、DIF 和耗散能最大, 动态劈裂拉伸强度和耗散能的

冲击速率强化效应最强。

(5) 碳纳米管对混凝土具有强化韧化效应, 碳纳米管对混凝土动态劈裂拉伸强度和耗散能的最大增幅分别为 49.76%、212.45%。

参考文献 (References)

[1] 李力剑, 刘素梅, 徐凡丁, 等. 含粗骨料超高性能混凝土的单轴受拉力学性能 [J]. 建筑材料学报, 2024, 27(2): 167-173.

[1] LI Li-jian, LIU Su-mei, XU Fu-ding, et al. Uniaxial tensile properties of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate [J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(2): 167-173. (in Chinese)

[2] 黄秋月, 钟冬望, 李腾飞, 等. 不同防护敷设材料对钢筋混凝土板抗动力冲击性能影响的试验研究 [J]. 爆破, 2025, 42(2): 120-128.

[2] HUANG Qiu-yue, ZHONG Dong-wang, LI Teng-fei, et al.

- Experimental study on the influence of different protective laying materials on the dynamic impact resistance of reinforced concrete slabs [J]. *Blasting*, 2025, 42 (2): 120-128. (in Chinese)
- [3] 王志航,白二雷,潘璐,等. 纳米碳纤维增强混凝土动态劈拉破坏的能耗规律研究[J]. *工程爆破*, 2023, 29(4):10-17.
- [3] WANG Zhi-hang, BAI Er-lei, PAN Lu, et al. Study on energy consumption of nano-carbon fiber reinforced concrete in dynamic split-tensile failure [J]. *Engineering Blasting*, 2023, 29(4):10-17. (in Chinese)
- [4] 王志航,白二雷,许金余,等. 聚合物改性碳纤维增强混凝土的动态压缩力学性能[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(3):1586-1597.
- [4] WANG Zhi-hang, BAI Er-lei, XU Jin-yu, et al. Dynamic compressive mechanical properties of polymer modified carbon fiber reinforced concrete [J]. *Journal of Composite Materials*, 2023, 40(3):1586-1597. (in Chinese)
- [5] XIE Fa-xiang, JIN Zi-heng, YANG Teng-fei, et al. Experimental study of dynamic splitting-tensile properties of precast concrete samples under different strain rates [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 372:130748.
- [6] 王志航,白二雷,黄河,等. 碳纤维增强水泥基材料界面改性研究进展[J]. *材料导报*, 2025, 39(5):136-144.
- [6] WANG Zhi-hang, BAI Er-lei, HUANG He, et al. Research progress on interface modification of carbon fiber reinforced cement-based materials [J]. *Materials Review*, 2025, 39(5):136-144. (in Chinese)
- [7] MUHAMMAD F J, MAJID K, MONCEF L N, et al. Application of metaheuristic algorithms for compressive strength prediction of steel fiber reinforced concrete exposed to high temperatures [J]. *Materials Today Communications*, 2024, 39:108832.
- [8] 王志航,白二雷,周俊鹏,等. 玄武岩纤维增强地质聚合物混凝土的动态力学性能[J]. *振动与冲击*, 2024, 43(19):134-144.
- [8] WANG Zhi-hang, BAI Er-lei, ZHOU Jun-peng, et al. Dynamic mechanical properties of basalt fiber reinforced geopolymer concrete [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(19):134-144. (in Chinese)
- [9] MA Yan-xuan, ZHAO Fei, LIU Jin, et al. Dynamic mechanical properties, interface structure evolution and deformation behaviors of PVA-carbon fiber reinforced concrete with negative Poisson's ratio design [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 391:131897.
- [10] 杨国梁,毕京九,董智文,等. 基于数字图像相关技术的混杂纤维混凝土动态抗拉性能试验研究[J]. *材料导报*, 2023, 37(21):297-305.
- [10] YANG Guo-liang, BI Jing-jiu, DONG Zhi-wen, et al. Experimental study on dynamic tensile properties of hybrid fiber concrete based on digital image correlation technology [J]. *Materials Review*, 2023, 37(21):297-305. (in Chinese)
- [11] 雷龙坚,郝勇,袁满,等. 基于声发射和 DIC 的碳纳米管水泥基材料抗压力学性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(12):4233-4241.
- [11] LEI Long-jian, HAO Yong, YUAN Man, et al. Study on stress resistance of carbon nanotubes cement-based materials based on acoustic emission and DIC [J]. *Chinese Journal of Ceramics*, 2023, 42(12):4233-4241. (in Chinese)
- [12] 张立卿,占小静,韩宝国,等. 静电自组装碳纳米管/二氧化钛水泥基复合材料的自感知性能[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(9):5225-5240.
- [12] ZHANG Li-qing, ZHAN Xiao-jing, HAN Bao-guo, et al. Self-sensing Properties of static self-assembly carbon nanotubes/Titanium dioxide cementitious composites [J]. *Journal of Composite Materials*, 2023, 40(9):5225-5240. (in Chinese)
- [13] LIU Gui-feng, ZHANG Hua-di, KAN De-yuan, et al. Experimental study on physical and mechanical properties and micro mechanism of carbon nanotubes cement-based composites [J]. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 2022, 30(12):1252-1263.
- [14] 王志航,白二雷,任彪,等. 氧化石墨烯接枝碳纤维增强体改性混凝土的力学性能[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(10):5504-5515.
- [14] WANG Zhi-hang, BAI Er-lei, REN Biao, et al. Mechanical properties of concrete modified with graphene oxide grafted carbon fiber reinforcement [J]. *Journal of Composite Materials*, 2024, 41(10):5504-5515. (in Chinese)
- [15] HEEYOUNG L, SEONGHO J, WONSEOK C. Enhancing bond performance: Carbon fiber reinforced polymer bar interaction with multi-walled carbon nanotubes cementitious composites in chloride-exposed conditions [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 412:134763.
- [16] 王志航,白二雷,刘俊良,等. 碳纤维及碳纳米材料改性水泥基材料电磁屏蔽及吸波性能研究进展[J]. *材料导报*, 2025, 39(13):88-96.
- [16] WANG Zhi-hang, BAI Er-lei, LIU Jun-liang, et al. Research progress on electromagnetic shielding and wave absorption properties of cement-based materials modified by carbon fiber and carbon nanomaterials [J]. *Materials Review*, 2025, 39(13):88-96. (in Chinese)