



废弃碳纤维混凝土力学性能及表面应变演化特性试验研究

陈俊宏¹, 傅军¹, 熊厚仁², 单鸿猷²

(1. 浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018; 2. 嘉兴大学建筑工程学院, 浙江嘉兴 314000)

摘要: 为实现废弃碳纤维的资源化利用并提升混凝土力学性能, 将废弃碳纤维与混凝土相结合, 分析废弃碳纤维的纤维长度、体积掺量对不同水胶比混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度的影响; 采用数字图像相关 (Digital image correlation method, DIC) 法对混凝土表面应变场的损伤演变过程进行监测, 并结合正交实验法, 对混凝土试件的抗压强度、劈裂抗拉强度试验结果进行极差分析, 以确定废弃碳纤维混凝土的最佳配比; 通过场发射扫描电镜对废弃碳纤维混凝土微观结构进行表征。结果表明: 废弃碳纤维通过桥接裂缝和物理填充效应提升混凝土密实度, 28 d 抗压强度和劈裂抗拉强度最高分别提高 19.5% 和 44.7%; 影响废弃碳纤维混凝土抗压强度及劈裂抗拉强度的因素, 按影响程度由大到小依次为水胶比、体积掺量、纤维长度, 最优配比为水胶比 0.45、体积掺量 0.2% 与纤维长度 6 mm; 抗压条件下, 试件表面存在明显的端部效应以及回弹效应, 劈裂抗拉条件下, 试件表面的最大横向应变集中于试件中部。该研究结果可为废弃碳纤维的绿色再生利用及高性能混凝土开发提供数据支撑。

关键词: 废弃碳纤维; 混凝土; 数字图像相关方法; 抗压强度; 劈裂抗拉强度; 应变演化

中图分类号: TU599

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2025) 09-0688-09

引文格式: 陈俊宏, 傅军, 熊厚仁, 等. 废弃碳纤维混凝土力学性能及表面应变演化特性试验研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2025, 53(5): 688-696.

Reference Format: CHEN Junhong, FU Jun, XIONG Houren, et al. An experimental study on mechanical properties and surface strain evolution characteristics of waste carbon fiber-reinforced concrete[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2025, 53(5): 688-696.

An experimental study on mechanical properties and surface strain evolution characteristics of waste carbon fiber-reinforced concrete

CHEN Junhong¹, FU Jun¹, XIONG Houren², SHAN Hongyou²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Jiaxing University, Jiaxing 314000, China)

Abstract: To achieve the resource utilization of waste carbon fibers and enhance the mechanical properties of concrete, this study combined waste carbon fibers with concrete to analyze the effects of fiber length and volume content on the compressive strength and splitting tensile strength of concrete with different water-to-binder ratios. The digital image correlation (DIC) method was employed to monitor the damage evolution of surface strain fields in concrete, while orthogonal experimental design and range analysis were applied to determine the optimal mix proportion of waste carbon fiber-reinforced concrete based on compressive and splitting tensile strength test results. The microstructure of the waste carbon fiber-reinforced concrete was characterized using field emission scanning electron microscopy. The results demonstrated that waste carbon fibers improved concrete compactness through crack bridging and physical filling effects, achieving maximum increases of 19.5% in 28-day compressive strength and 44.7% in

收稿日期: 2025-01-25 网络出版日期: 2025-04-29

基金项目: 嘉兴市科技计划项目(2023AY40013)

作者简介: 陈俊宏(2001—), 男, 湖南邵东人, 硕士研究生, 主要从事纤维混凝土方面的研究。

通信作者: 傅军, E-mail: fujun@zstu.edu.cn

splitting tensile strength. The influencing factors were ranked by significance as follows: water-to-binder ratio (most influential), volume content, and fiber length (least influential). The optimal mix proportion was identified as water-to-binder ratio 0.45, volume content 0.2%, and fiber length 6 mm. Under compressive loading, significant end effects and rebound effects were observed on specimen surfaces, while maximum transverse strain during splitting tensile tests concentrated in the central region. These findings provide valuable data support for green recycling of waste carbon fibers and development of high-performance concrete.

Key words: waste carbon fibers; concrete; digital image correlation method; compressive strength; splitting tensile strength; strain evolution

0 引言

混凝土是现代建筑的核心材料^[1],但存在全生命周期高碳排放以及抗拉强度与抗压强度失衡等缺点^[2],在全球推进低碳可持续发展背景下,开发兼具性能提升与环境友好的混凝土改性技术已成为行业的迫切需求^[3]。碳纤维具有卓越的力学性能与独特的电化学特性^[4-5],所制备的复合材料已在航空航天等高端领域获得广泛应用^[6-7]。碳纤维复合材料服役周期大约为20年,导致每年产生大量废弃碳纤维(Waste carbon fibers, WCFs);据预测,2050年全球该类废弃物总量达98万t^[8-9]。然而,采用传统的填埋法或焚烧法会产生环境毒素,现已被国际公约限制^[10-11];而主流回收技术(如热解法、溶剂法)又存在高能耗与经济性差等问题^[12]。在碳达峰背景下,将废弃碳纤维作为混凝土增强材料,通过构建纤维-基体协同增强体系,既可以实现固废资源化利用,又可以提升混凝土的综合性能,成为破解“高性能材料-环境负荷”悖论的新路径。

将废弃碳纤维作为混凝土改性材料已展现出显著的技术优势。Akbar等^[13]证实,0.25%~1.50%体积掺量的废弃碳纤维可同步提升水泥基体的抗折强度和抗压强度,其中抗折强度增幅更为显著;Nguyen等^[14]采用体积掺量3.0%、长度为6mm的废弃碳纤维制备混凝土试件,发现其抗压强度与抗折强度分别提升了13%和20%;De Souza Abreu等^[15]发现废弃碳纤维通过桥接裂缝效应优化了骨料-基体界面过渡区结构,显著提升了混凝土的力学性能。Wang等^[16]通过酸改性处理显著改善了废弃碳纤维界面结合性能,在0.3%~1.0%掺量区间内抗压强度提升了18.1%,抗折强度提升了74.93%。上述文献表明,废弃碳纤维混凝土在力学性能提升方面具有显著优势,但目前关于废弃碳纤维的体积掺量、纤维长度对不同水胶比混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度的研究报道不多,也没

有体积掺量、纤维长度、水胶比最佳配比以及废弃碳纤维混凝土在抗压、劈裂抗拉条件下试件表面应变演化特性研究。

表面应变演化特性与混凝土的结构可靠性相关,研究废弃碳纤维混凝土的表面应变演化特性显得尤为重要。数字图像相关(Digital image correlation method, DIC)法具有试样制备简单、测量精度高等优点,已成为监测材料变形的可靠工具^[17-18]。该方法通过跟踪变形前后图像中参考子集的灰度分布特征,并利用相关算法进行匹配计算,能够精确确定像素的位移矢量,进而得到被观测区域内全场各点的位移和应变^[19-20]。基于这种全场变形信息的获取优势,采用DIC法可对材料表面损伤演变过程进行非接触式测量分析^[21-22]。

本文研究不同体积掺量、不同长度的废弃碳纤维对不同水胶比条件下的混凝土在抗压、劈裂抗拉试验下的力学性能和表面应变演化规律,系统评估废弃碳纤维长度、体积掺量在不同水胶比条件下对混凝土力学性能的影响。在此基础上,对混凝土试件的抗压强度、劈裂抗拉强度试验结果进行极差分析,以确定废弃碳纤维混凝土的最优配比;采用DIC法对混凝土表面应变场的损伤演变过程进行监测;最后采用场发射扫描电镜微观测试技术对废弃碳纤维混凝土微观结构展开分析。本文研究结果可为废弃碳纤维在混凝土中的再生利用及力学性能提升等相关研究提供实验依据,相关数据可为废弃碳纤维混凝土的材料配比设计提供参考。

1 试验

1.1 材料

废弃碳纤维来源于盐城祥盛碳纤维科技有限公司提供的边角料,经过机械回收法加工为短切型碳纤维,短切型碳纤维照片如图1所示,其相关参数详见表1。P·O 42.5普通硅酸盐水泥来源于无锡市江淮建材科技有限公司生产,其化学成分

如表2所示,基本性能如表3所示。细骨料为中国ISO标准砂来源于厦门艾思欧标准砂有限公司生产;粗骨料为9~12 mm碎石;拌合水为嘉兴地区自来水。

1.2 样品制备

本文采用正交试验法优化配合比,考察水胶比(因素A:0.45、0.50、0.55)、体积掺量(因素B:0.2%、0.4%、0.6%)及纤维长度(因素C:3、6、12 mm)3种因素。体积掺量为0,即表示普通混凝土,作为基准对照组(CM1、CM2、CM3),其余9组采用正交表 $L_9(3^3)$ 表进行组合设计,正交试验方案与基准对照组如表4所示。

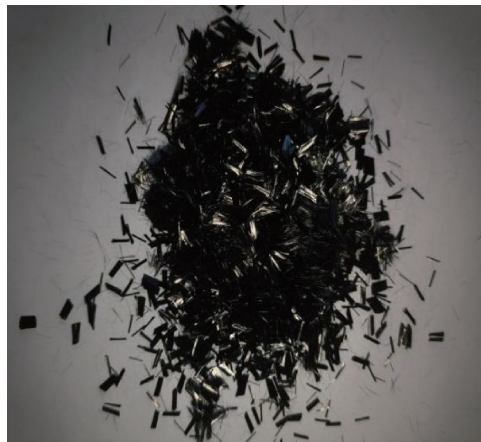


图1 短切型碳纤维照片

表1 废弃碳纤维参数

直径/ μm	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	抗拉强度/MPa	拉伸模量/GPa	延伸率/%	石墨化比值(I_D/I_G)
7	1.49	3530	230	1.50	1.10

表2 水泥化学成分

化学成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	SO ₃	TiO ₂	其他
质量分数/%	61.83	19.68	4.72	3.66	0.43	1.27	1.31	0.05	2.73	4.32

表3 水泥基本性能

性能参数	烧失量/%	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
标号	1.2	126	246	3.9	7.1	19.8	44.6
规范要求	≤ 5.0	≥ 45	≤ 600	≥ 3.5	≥ 6.5	≥ 17.0	≥ 42.5

表4 正交试验方案与基准对照组

试验组	A:水胶比	B:体积掺量/%	C:纤维长度/mm	试验方案
L1	0.45	0.2	3	A ₁ B ₁ C ₁
L2	0.45	0.4	6	A ₁ B ₂ C ₂
L3	0.45	0.6	12	A ₁ B ₃ C ₃
L4	0.50	0.4	12	A ₂ B ₂ C ₃
L5	0.50	0.6	3	A ₂ B ₃ C ₁
L6	0.50	0.2	6	A ₂ B ₁ C ₂
L7	0.55	0.6	6	A ₃ B ₃ C ₂
L8	0.55	0.2	12	A ₃ B ₁ C ₃
L9	0.55	0.4	3	A ₃ B ₂ C ₁
CM1	0.45			
CM2	0.50			
CM3	0.55			

参考 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》,考虑到试件尺寸与测试仪器的匹配性,试验采用非标准试件(边长为100 mm的立方体)进行废弃碳纤维混凝土力学性能测试。为提升废弃碳纤维在混凝土中的分散效果,试验制定了以下搅拌工艺规程:将水泥、标准砂及石子投入强制式搅拌机,干拌60 s;随后加入经高速分散处理的废弃碳纤维水溶液,继续搅拌120 s;搅拌完成后,将混合料注入100 mm立方体模具,并在振动台上振捣密

实1 min。

试件成型24 h后进行脱模处理,随后置于标准养护室(温度 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度 $\geq 95\%$)中养护28 d。为满足DIC法的测试要求,试件表面采用分层喷涂法制备散斑:先用磨砂纸对表面进行打磨处理,以确保平整度;均匀喷涂白色哑光漆,形成基层层;待基底完全干燥后,通过随机点喷方式施加黑色哑光漆,最终形成如图2所示的制斑后表面。

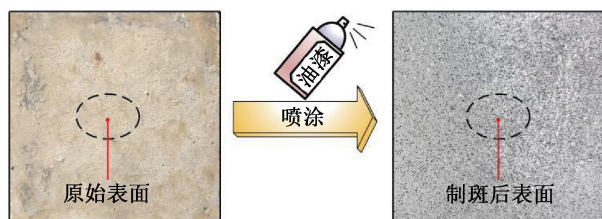


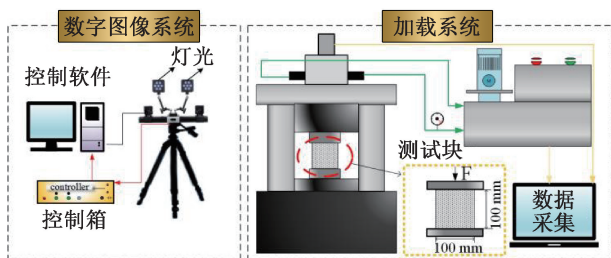
图 2 试件表面制斑处理示意图

1.3 测试方法

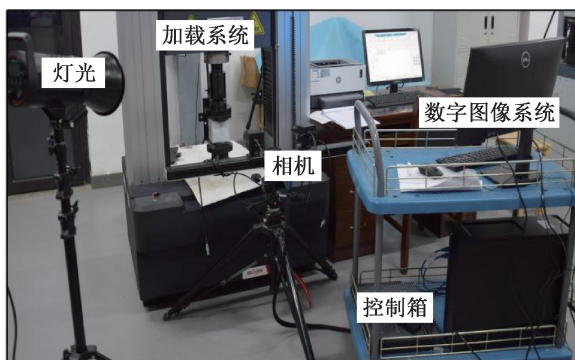
抗压强度测试:参考 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行抗压强度测试,每组 3 个试件。采取连续均匀加荷,加荷速度设置为 0.5 MPa/s。试验装置由加载系统与数字图像系统组成,抗压试验装置图示意图如图 3 (a)所示。在试件表面散斑场区域设置均匀照明后,通过数字图像系统同步采集加载过程中的动态变形场数据。非标准试件抗压强度按照式(1)计算:

$$f_{cc} = \frac{F}{A} \times 0.95 \quad (1)$$

其中: f_{cc} 表示抗压强度,MPa; F 表示破坏时的最大荷载,N; A 表示承压面积, mm^2 。



(a) 抗压试验装置示意图



(b) 劈裂抗拉试验现场布置图

图 3 试验装置图

劈裂抗拉强度测试:参考 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行劈裂抗拉强度测试,每组 3 个试件。采取连续均匀加荷,加荷速度设置为 0.5 MPa/s。试验装置由加载系统与数字图像系统组成,劈裂抗拉试验现场布置图如图 3

(b)所示。在试件表面散斑场区域设置均匀照明后,通过数字图像系统同步采集加载过程中的动态变形场数据。非标准试件劈裂抗拉强度按照式(2)计算得出:

$$f_{ts} = \frac{2F}{\pi A} \times 0.85 \quad (2)$$

其中: f_{ts} 表示劈裂抗拉强度,MPa; F 表示破坏时的最大荷载,N; A 表示劈裂面面积, mm^2 。

DIC 法测试:试件加载过程中,采用工业相机以 0.25 s 的时间间隔对试件表面应变场进行连续采集,图像处理与分析通过新维三维公司的 3D-DIC 软件完成,软件参数设置如下:计算步长为 20 像素(根据相机标定结果,1 像素对应实际尺寸 0.01 mm),其余参数采用软件默认推荐值。

2 结果与讨论

2.1 抗压强度及劈裂抗拉强度

抗压及劈裂抗拉试验结果如表 5 所示。表 5 显示:在相同水胶比条件下,试验组 L2 的抗压强度和劈裂抗拉强度相较于基准混凝土分别提升了 19.5% 和 44.7%,增幅最显著,其中劈裂抗拉强度的提升幅度显著高于抗压强度,表现出明显的拉伸性能改善特征;L2 的抗压强度与劈裂抗拉强度分别达到试验组 L7 对应指标的 1.3 倍和 1.6 倍;试验组 L7 提升幅度不及其他组别,与同水胶比基准混凝土相比,仍展现出抗压强度提升 8.9%、劈裂抗拉强度提升 16.4% 的显著增长,后者增幅尤为突出。上述结果表明,废弃碳纤维的掺入显著增强了混凝土材料的抗压强度和劈裂抗拉强度,且增强效果在不同配比条件下呈现明显差异。本文观测到的混凝土抗压强度与劈裂抗拉强度提升效应主要源于以下 3 方面机制:a)废弃碳纤维具有超强的力学性能,并能与 C-S-H 凝胶形成强韧的界面黏结体系^[14]。受压时,纤维主要发挥微裂纹扩展阻滞效应;劈裂抗拉时,废弃碳纤维凭借高长径比特征可直接桥接宏观裂缝,重构基体拉应力场。这种差异化机制使得劈裂抗拉强度提升率达 44.7%,显著高于抗压强度的 19.5% 增幅。b)水胶比调控对孔隙结构具有决定性影响。当水胶比不在合理范围时,未完全水化的自由水形成连通的毛细孔隙,导致孔隙率增大和密实度下降,使材料在承受荷载时更易发生应力集中和微裂纹扩展,最终造成整体强度下降^[23-24]。c)体积掺量优化是发挥增强效应的关键因素。体积掺量不合

理时,废弃碳纤维因自身特性,易产生纤维团聚现象^[25]。导致水泥浆体对纤维表面的有效包裹厚度下降,并易产生界面气泡,削弱了纤维的增强作用,在基体内形成局部薄弱区,导致材料的结构连续性下降。

表5 抗压及劈裂抗拉试验结果

试验号	抗压强度/MPa	劈裂抗拉强度/MPa
L1	40.98	5.14
L2	42.58	5.31
L3	36.37	4.02
L4	38.31	4.60
L5	35.91	3.84
L6	37.86	4.28
L7	32.68	3.48
L8	35.81	4.05
L9	33.01	3.5
CM1	35.62	3.67
CM2	33.17	3.38
CM3	30.01	2.99

2.2 废弃碳纤维混凝土配比优化

基于正交试验设计的极差分析结果如表6和表7所示。参考文献[26]所报道的方法,通过计算各因素水平下试验指标的和值(K_1 、 K_2 、 K_3)与均值(k_1 、 k_2 、 k_3),结合极差 R 值来定量评估各因素对抗压强度和劈裂抗拉强度的影响程度,其中, k 值越大表明该水平对性能指标的提升效应越显著, R 值越大则表明对应因素对试验结果的调控作用越强。对抗压强度极差分析结果(见表6)表明:水胶比(因素A)在0.45水平时 k_1 值达到峰值(39.98 MPa),显著高于其他水平;体积掺量(因素B)和纤维长度(因素C)的最优水平分别为0.2%(B1)和6 mm(C2)。根据极差 R 值排序为A:6.14、B:2.90和C:1.02,确定影响抗压强度的影响程度为水胶比、体积掺量、纤维长度。据此可知抗压强度最优配比为 $A_1B_1C_2$,即水胶比0.45、体积掺量0.2%、纤维长度6 mm。进一步分析劈裂抗拉强度极差数据(表7)可以发现:各因素最优水平组合与抗压强度完全一致,影响大小的排序为水胶比、体积掺量、纤维长度的规律,这证实水胶比对废弃碳纤维混凝土的力学性能具有双重调控作用,通过控制水化产物致密度影响抗压强度,又经由孔隙结构优化提升抗裂性能。综合以上极差分析结果,废弃碳纤维混凝土的最优配比确定为:水胶比0.45,体积掺量0.2%,纤维长度6 mm。

表6 抗压强度极差分析结果

项目	A:水胶比	B:体积掺量	C:纤维长度
K_1	119.93	114.65	110.90
K_2	113.08	113.90	113.12
K_3	101.50	105.96	110.49
k_1	39.98	38.22	36.96
k_2	37.69	37.97	37.71
k_3	33.83	35.32	36.83
极差 R	6.14	2.90	1.02

表7 劈裂抗拉强度极差分析结果

项目	A:水胶比	B:体积掺量	C:纤维长度
K_1	14.47	13.47	12.48
K_2	12.72	13.41	13.07
K_3	11.03	11.34	12.67
k_1	4.82	4.49	4.16
k_2	4.24	4.47	4.36
k_3	3.68	3.78	4.22
极差 R	1.15	0.71	0.20

2.3 抗压及劈裂抗拉条件下表面应变演化

为精准表征L2试件的应变分布情况,本文采用DIC法开展全场应变分析,所采用的虚拟引伸计计算区域及布置方式如图4所示,其中:本文所选用的计算区域如图4(a)所示;虚拟引伸计系统按正交网格布置,正交网格布置如图4(b)所示。坐标系的原点设定在试件底部的中心位置,水平方向为 X 轴(横向变形方向),竖直方向为 Y 轴(加载方向)。在水平应变测量组(X 方向):沿 Y 轴等间距(25 mm)布置A1、A2、A3等3条虚拟引伸计,其中A1位于 $Y=50$ mm的中性轴位置,A2($Y=25$ mm)、A3($Y=75$ mm)分别监测下、上压板接触区变形;竖向应变测量组(Y 方向):沿 X 轴等间距(25 mm)布置B1、B2、B3等3条虚拟引伸计,其中B1位于 $X=0$ mm的加载中心线,B2($X=25$ mm)、B3($X=-25$ mm)对称地监测横向应变。

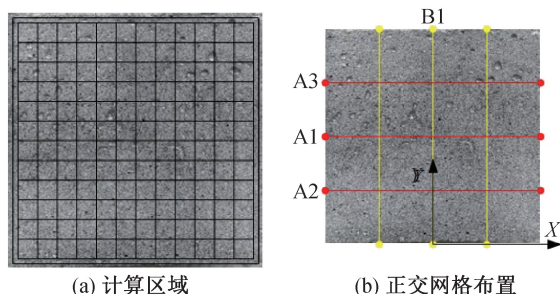
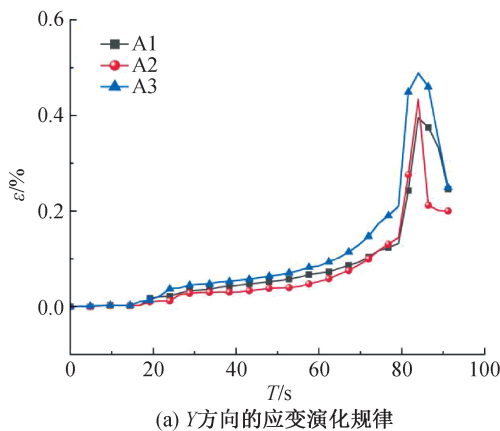


图4 计算区域及布置方式示意图

通过DIC法获取的抗压条件下混凝土表面应变场演化曲线如图5所示。 Y 方向的应变演化规律曲线如图5(a)所示,从图中可以看出:在加载初期

($t < 50$ s), 各测点应变值均维持在 $0 \sim 0.2\%$ 范围内, 表明材料处于线弹性变形阶段。当荷载达到峰值强度的 85% ($t = 70$ s) 时, A3 测点 ($Y = 75$ mm) 应变增速显著提升, 其应变速率达 $0.09 / (\% \cdot s^{-1})$, 较 A1 测点高约 3 倍。至破坏时刻 ($t = 85$ s), A3 区域累积应变达到 0.49% , 分别是 A1、A2 区域应变的 1.25 倍和 1.13 倍。测点的应变差异表明, 试件在端部区域 (特别是 A3 测点) 产生了明显的应变集中现象; 这种应变分布特征与试件同压力机接触面因摩擦约束引起的端部效应^[27-28] 相关。破坏后阶段 ($t > 85$ s), 各测点应变值均减小, 表现出弹性回弹效应。对比类似研究^[29] 可知, 这与裂纹面间残余摩



擦应力有关。X 方向的应变演化规律曲线如图 5 (b) 所示, 从图中可以看出: 在加载早期, X 方向应变同试件 Y 方向应变类似均维持在 $0 \sim 0.2\%$ 范围内, 但 B2 测点 ($X = 25$ mm) 在各时间段都明显高于其他区域的应变。这说明试件表面右侧存在薄弱面, 产生这种现象可能是因为纤维团聚造成^[30] 应力集中, 破坏后 B2 测点仍保持应变增长率, 这与贯穿裂缝直接相关。上述应变演化规律曲线完整描述了废弃碳纤维混凝土的 3 阶段破坏机制: a) 均匀弹性变形 ($\epsilon < 0.2\%$); b) 应变局部化发展 ($0.2\% \leq \epsilon < 0.4\%$); c) 宏观裂纹主导的非连续变形 ($\epsilon \geq 0.4\%$)。

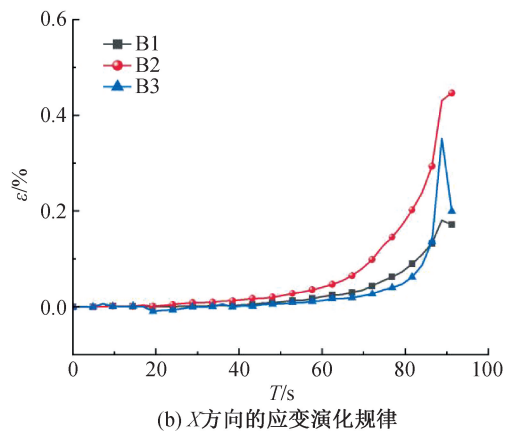


图 5 抗压条件下混凝土表面应变场演化规律曲线

通过 DIC 法获取的劈裂抗拉条件下混凝土表面应变场演化曲线如图 6 所示。Y 方向的应变演化规律曲线如图 6(a) 所示, 从图中可以看出: 劈裂抗拉试验中 Y 方向各区域应变在加载初期均较小, 表明在加载初期试件表面应变呈均匀分布; 随着荷载持续增加, 至峰值破坏阶段时, 试件各区域 Y 向应变产生显著差异, 其中 A3 区域应变较 A1、A2 区域呈现异常增大现象, 该现象揭示了裂缝最先萌生于试件上端部的破坏机制。X 方向的应变演化规律

曲线如图 6(b) 所示, 从图中可以看出: 早期 B1~B3 区域应变值保持均匀分布且量值较低, 表明试件在初始加载阶段 X 向变形具有空间均匀性; 随着荷载持续增加, X 向应变分布呈现明显的非均匀特性, B1 区域 (中部) 应变增量显著超越 B2、B3 区域 (两侧), 这与劈裂抗拉破坏时最大横向应变集中于试件中部的现象相吻合^[31]。上述应变演化规律曲线清晰显示了劈裂抗拉条件下试件表面全过程损伤演化过程和破坏特征。

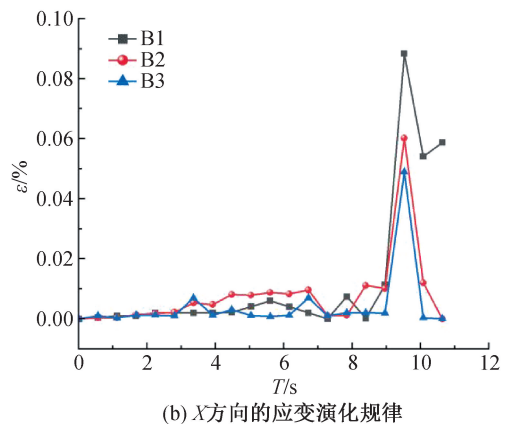
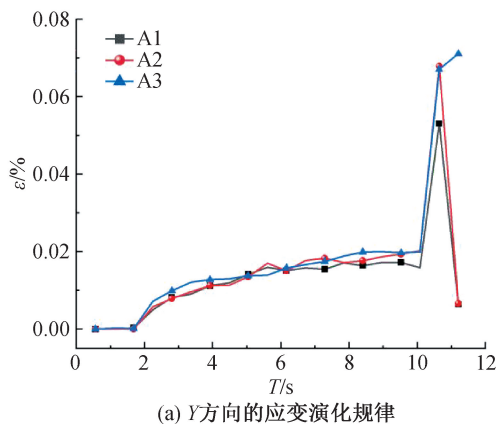
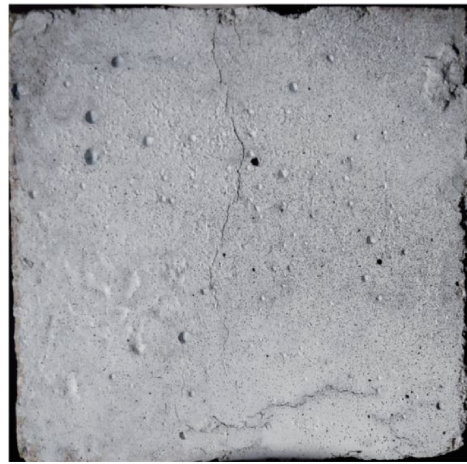


图 6 劈裂抗拉条件下混凝土表面应变场演化规律曲线

L2 试验组破坏后的照片如图 7 所示,从图可以看出:抗压条件下试件破坏后仍保持相对完整的宏观形貌,表明废弃碳纤维的掺入显著增强了混凝土



(a) 抗压条件下



(b) 劈裂抗拉条件下

图 7 试件破坏形态照片

3 废弃碳纤维混凝土力学性能增强机理

本文通过扫描电镜 SEM 对 L2 组试件的微观结构进行观察,以分析废弃碳纤维对混凝土的增强作用效应,L2 组试件 SEM 图如图 8 所示。从图 8 可以看出:废弃碳纤维在混凝土基体裂缝间形成了有效的桥接作用;水泥水化产物与废弃碳纤维紧密结合形成界面过渡区,使得随机分布的废弃碳纤维通过桥接受力过程中产生的微裂缝,延缓宏观裂缝扩展,部分纤维在破坏过程中被拔出基体;废弃碳纤维与水泥基体界面形成交错网状结构,具有一定的物理填充效应,提高了混凝土的密实度。

废弃碳纤维的作用机理图示意图如图 9 所示。在混凝土基体材料与废弃碳纤维的协同作用过程中,随机分布的废弃碳纤维通过桥接裂缝的方式延

缓裂缝扩展。当混凝土承受外部荷载时,废弃碳纤维与混凝土材料之间的黏结强度是影响作用效果的关键因素,其能量耗散机制主要源于纤维从基体拔出。

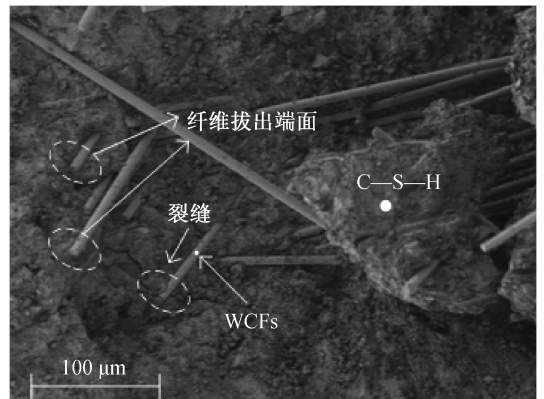


图 8 L2 组试件 SEM 图

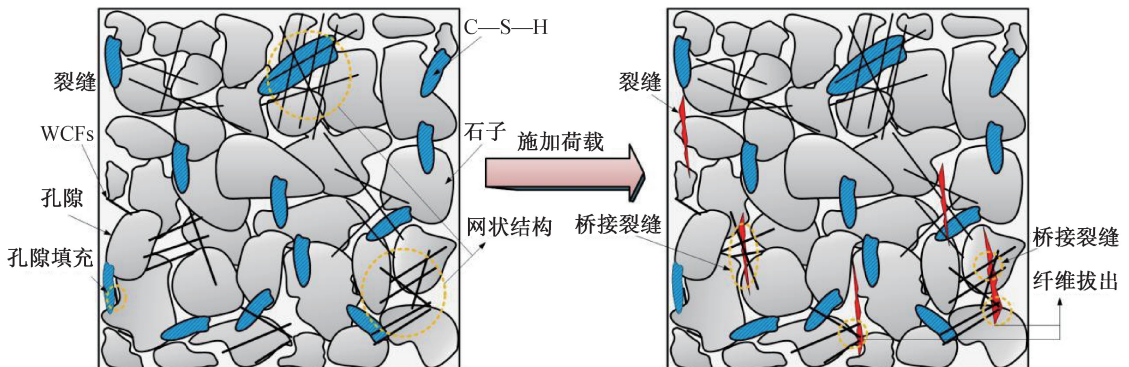


图 9 作用机理示意图

综上所述,废弃碳纤维在混凝土中起到以下积极作用:a)废弃碳纤维在混凝土中能形成的网状结

构,具有一定的物理填充效应,提高了混凝土的密实度;b)废弃纤维在混凝土中作为跨越孔隙和缝隙的

桥梁,起到桥接裂缝的作用,当混凝土受到外界荷载时,废弃碳纤维与混凝土材料之间的黏结强度是影响作用效果的关键因素,起到消耗部分能量的作用。

4 结 论

本文对不同长度(3、6、12 mm)和不同体积掺量(0.2%、0.4%、0.6%)的废弃碳纤维对不同水胶比(0.45、0.50、0.55)的混凝土进行了抗压、劈裂抗拉试验,并采用DIC法对混凝土表面应变损伤演化过程进行了监测,主要得到以下结论:

a) 在抗压劈裂抗拉方面,不同掺量、不同长度的废弃碳纤维对不同水胶比条件下的混凝土在龄期28 d时的抗压、劈裂抗拉强度均有所提高,特别对劈裂抗拉强度的提升显著,其中L2在28 d的抗压强度和劈裂抗拉强度分别提高19.5%、44.7%。

b) 正交试验极差分析结果显示,影响废弃碳纤维混凝土抗压、劈裂抗拉强度的因素主次依次为水胶比、体积掺量、纤维长度;废弃碳纤维混凝土最优配比为水胶比0.45、体积掺量0.2%、纤维长度6 mm。

c) 借助图像分析手段发现,废弃碳纤维混凝土的三阶段破坏机制表现为:均匀弹性变形($\epsilon < 0.2\%$);应变局部化发展($0.2\% \leq \epsilon < 0.4\%$);宏观裂纹主导的非连续变形($\epsilon \geq 0.4\%$)。通过非接触测量发现:抗压条件下,试件表面存在明显的端部效应以及回弹效应;劈裂抗拉条件下,试件表面的最大横向应变集中于试件中部。

d) 场发射扫描电镜微观测试结果表明:掺入水泥基材料中的废弃碳纤维通过桥接作用连接基体裂缝,抑制裂缝扩展;该纤维在混凝土中形成的网状结构具有物理填充效应,从而提高混凝土的密实度。废弃碳纤维与混凝土材料之间的黏结强度是影响其作用效果的关键因素。

本文研究了影响废弃碳纤维混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度的因素,获得了废弃碳纤维混凝土的最佳配比,并探讨了废弃碳纤维混凝土力学性能增强机理,研究结果可为废弃碳纤维在混凝土中的再生利用技术开发、力学性能提升研究提供实验数据支撑,同时为其材料配比优化提供理论参考依据。

参考文献:

[1] Wang F, Kan L L, Yu J T, et al. Systematic studies on behaviors of ultra-high performance concrete subject to freezing and thawing cycles combining DIC technology[J]. Construction and Building Materials, 2023, 388: 131580.

[2] Huang H L, Peng C H, Luo J, et al. Micromechanical properties of interfacial transition zone between carbon fibers and UHPC matrix based on nano-scratching tests[J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 139: 105014.

[3] Zhao C G, Wang Z Y, Zhu Z Y, et al. Research on different types of fiber reinforced concrete in recent years: An overview [J]. Construction and Building Materials, 2023, 365: 130075.

[4] Cao X, Li J. Enhanced interfacial property of carbon fiber reinforced epoxy composite based on carbon fiber treated by supercritical water/nitrate system [J]. Journal of Composite Materials, 2021, 55(25): 3719-3727.

[5] Fu Y, Gan Q. Experimental and analytical investigation of the potential of carbon fibres for use in multifunctional batteries[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2023, 27(2): 345-355.

[6] Van De Werken N, Reese M S, Taha M R, et al. Investigating the effects of fiber surface treatment and alignment on mechanical properties of recycled carbon fiber composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 119: 38-47.

[7] Zheng H, Zhang W J, Li B W, et al. Recent advances of interphases in carbon fiber-reinforced polymer composites: A review [J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 233: 109639.

[8] 胡侨乐, 端玉芳, 刘志, 等. 碳纤维增强聚合物基复合材料回收再利用现状[J]. 复合材料学报, 2022, 39(1): 64-76.

[9] Wang Y, Li A, Zhang S, et al. A review on new methods of recycling waste carbon fiber and its application in construction and industry [J]. Construction and Building Materials, 2023, 367: 130301.

[10] 刘尧, 吴震华, 张芝芳, 等. 回收碳纤维复合材料用于增强水泥基材料的研发现状[J]. 复合材料科学与工程, 2022(8): 110-116.

[11] Jeong J S, Kim K W, An K H, et al. Fast recovery process of carbon fibers from waste carbon fibers-reinforced thermoset plastics [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 247: 816-821.

[12] Nie W D, Liu J, Liu W B, et al. Decomposition of waste carbon fiber reinforced epoxy resin composites in molten potassium hydroxide [J]. Polymer Degradation and Stability, 2015, 111: 247-256.

[13] Akbar A, Kodur V K R, Liew K M. Microstructural changes and mechanical performance of cement composites reinforced with recycled carbon fibers [J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 121: 104069.

[14] Nguyen H, Carvelli V, Fujii T, et al. Cement mortar reinforced with reclaimed carbon fibres, CFRP waste or prepreg carbon waste [J]. Construction and Building Materials, 2016, 126: 321-331.

[15] De Souza Abreu F, Ribeiro C C, Da Silva Pinto J D, et al. Influence of adding discontinuous and dispersed carbon fiber waste on concrete performance [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 273: 122920.

- [16] Wang Y, Sun L L, Li A Y, et al. Effect of modified recycled carbon fibers on the conductivity of cement-based materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 415: 135033.
- [17] Li D, Wei X, Gao Y, et al. Investigations on tensile mechanical properties of rigid insulation tile materials at elevated temperatures based on digital image correlation algorithm [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 413: 134925.
- [18] Liu D K, Chen H N, Su R K L, et al. Influence of initial crack length on fracture properties of limestone using DIC technique [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 403: 133020.
- [19] Miarka P, Cruces A S, Lopez-Crespo P, et al. Fracture process zone development and length assessment under the mixed-mode I/II load analysed by digital image correlation technique[J]. *Cement and Concrete Research*, 2023, 173: 107261.
- [20] Song Z, Li S, Cheng L, et al. Corrosion-induced deterioration and fracture mechanisms in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 423: 135886.
- [21] Allain M, Ple O, Prime N, et al. In situ DIC method to determine stress state in reinforced concrete structures [J]. *Measurement*, 2023, 210: 112483.
- [22] Xu Y J, Chen H N, Liang Y H, et al. Study on fracture characteristics and fracture mechanism of fully recycled aggregate concrete using AE and DIC techniques [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 419: 135540.
- [23] Xu B W, Winnefeld F, Kaufmann J, et al. Influence of magnesium-to-phosphate ratio and water-to-cement ratio on hydration and properties of magnesium potassium phosphate cements[J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 123: 105781.
- [24] Kim M J, Yoo D Y, Kim S, et al. Effects of fiber geometry and cryogenic condition on mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 107: 30-40.
- [25] 邓友生, 孟丽青, 郑云方, 等. 基于响应面回归模型的纤维混凝土力学性能分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2024, 51(9): 177-187.
- [26] 李佳鑫, 舒志乐, 孙启明, 等. 不同活化方式对煤矸石胶砂力学性能的影响研究[J]. *材料导报*, 2022, 36(S2): 252-257.
- [27] Yao X P, Han Y, Shen L, et al. Experimental study on the effect of polypropylene fiber on compressive strength and fracture properties of high-strength concrete after elevated temperatures[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 86: 108860.
- [28] 郭文婧, 马少鹏, 康永军, 等. 基于数字散斑相关方法的虚拟引伸计及其在岩石裂纹动态观测中的应用[J]. *岩土力学*, 2011, 32(10): 3196-3200.
- [29] 范杰, 朱星, 胡桔维, 等. 基于3D-DIC的砂岩裂纹扩展及损伤监测试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(4): 1009-1019.
- [30] Shen X J, Brühwiler E. Influence of local fiber distribution on tensile behavior of strain hardening UHPFRC using NDT and DIC[J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 132: 106042.
- [31] Zhang Z, Hu Y C, Xiong L Y, et al. The influence of portlandite, calcite, quartz and ettringite inclusions on the multiscale mechanical behaviors of C-S-H matrix[J]. *Cement and Concrete Research*, 2025, 189: 107781.

(责任编辑:康 锋)