

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230309004

钢-PE混杂纤维水泥基复合材料动态压缩性能 试验研究*

李堂军¹, 李亮¹, 王子晨¹, 姜锡权²

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124;
2. 合肥姜水动态实验技术有限公司, 安徽 合肥 231200)

摘要: 将钢纤维和PE纤维混杂掺入水泥基基体材料中, 控制纤维体积总掺量为2%, 通过改变两种纤维比例, 制成E2、E1.5S0.5、E1S1、E0.5S1.5和S2试件, 应用分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)装置, 开展了钢-PE混杂纤维水泥基复合材料在高应变率(30~120 s⁻¹)条件下的动态压缩试验, 从试件破坏形态、材料的动态抗压强度、韧性及其应变率效应等方面进行了分析研究。试验结果表明: ①钢-PE混杂纤维水泥基复合材料表现出明显的应变率效应, 其动态抗压强度、韧性以及动态抗压强度增长因子(Dynamic Increase Factor of Compressive Strength, DIF)随着应变率的增加而提高。应变率为60~80 s⁻¹时, PE纤维增韧效果更好; 而应变率为100s⁻¹时, 钢纤维增韧效果更优。②随着PE纤维掺量的增加, 材料应力-应变曲线的应变硬化现象更明显。而钢纤维掺量达到1.5%以上且继续增大时, 材料的动态抗压强度和韧性得到提高, 表明一定掺量的钢纤维可以提高材料动态抗压强度的应变率敏感性。③两种纤维混杂的试件其动态压缩力学性能要优于单掺PE或钢纤维的试件, 综合动态抗压强度、韧性以及DIF, 得出抵抗冲击压缩荷载的最优纤维配比是0.5%的PE纤维+1.5%的钢纤维。

关键词: 钢-PE混杂纤维; 动态压缩; 动态抗压强度增强因子; 应变率效应; 分离式霍普金森压杆
中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)05-1140-09

Experimental Study on Dynamic Compressive Properties of Steel-PE Hybrid Fiber Cement-Based Composites

LI Tangjun¹, LI Liang¹, WANG Zichen¹, JIANG Xiquan²

(1. Key Laboratory of Urban and Engineering Safety and Disaster Reduction of the Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Jiangshui Dynamic Experimental Technology Co., Ltd, Hefei 231200, China)

Abstract: Steel fibers and PE fibers were mixed into cement-based matrix materials, maintaining a total fiber volume fraction of 2%. By varying the proportion of the two fibers, specimens E2, E1.5S0.5, E1S1, E0.5S1.5, and S2 were prepared. Dynamic compression tests were conducted under high strain rates (30-120 s⁻¹) using a Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB). The failure modes, dynamic compressive strength, toughness, and strain rate effects of the steel-PE hybrid fiber cement-

* 收稿日期:2023-03-09;修回日期:2023-05-05

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52278474,52078288)、北京市自然科学基金面上项目(8212001)资助

作者简介:李堂军(1998—),男,硕士研究生。主要从事水泥基复合材料冲击方面的研究。E-mail:624076072@qq.com

通信作者:李亮(1975—),男,教授,博导,博士。主要研究方向为工程结构抗爆炸与冲击的理论及试验技术。

E-mail:liliang@bjut.edu.cn

based composites were analyzed. The experimental results showed that the composites exhibited a distinct strain rate effect, with increases in dynamic compressive strength, toughness, and the Dynamic Increase Factor of Compressive Strength (DIF) as the strain rate increased. PE fibers provided superior toughening performance at strain rates of 60-80 s⁻¹, while steel fibers were more effective at 100 s⁻¹. As the PE fiber content increased, the stress-strain curve showed more prominent strain hardening. When the steel fiber content reached 1.5% or more, both the dynamic compressive strength and toughness improved, indicating that an appropriate amount of steel fibers enhances the strain rate sensitivity of the material's dynamic compressive strength. The hybrid fiber specimens outperformed those with only PE or steel fibers in terms of mechanical properties. A comprehensive analysis of dynamic compressive strength, toughness, and DIF suggested that the optimal fiber ratio for resisting impact loads was 0.5% PE fibers + 1.5% steel fibers.

Keywords: steel-PE hybrid fiber; dynamic compression; dynamic increase factor of compressive Strength; strain rate effect; Split Hopkinson Pressure Bar

0 引言

混凝土是土木工程领域应用最为广泛的建筑材料之一。但混凝土作为一种脆性材料,存在抗拉强度低、易开裂、延性差等缺点,难以满足现代社会建筑结构对抗冲击性能或抗震性能的需求^[1]。基于微观力学和断裂力学,V. C. Li和M. Maalej等^[2-4]研究开发了一种具备应变硬化和多缝开裂特性的水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composites, ECC)。相较于混凝土材料,ECC材料的抗拉强度更高、韧性更好、吸能能力更强^[5-6]。由于ECC在抗爆和冲击领域展现出的优异特性,其在土木工程领域得到了广泛应用,针对其力学性能的研究已得到了较多的关注。

为了改善水泥基复合材料的力学性能,其中一种方法是在基体中掺入各种纤维,如钢纤维、碳纤维、聚乙烯醇(PVA)纤维、聚乙烯(PE)纤维、聚丙烯(PP)纤维和玄武岩纤维等,其可以在基体中起到阻裂、增强和增韧的作用。S. Li^[7]和G. Fischer^[8]测得PVA-ECC和PE-ECC的峰值应变约为0.5%,而混凝土的峰值应变约为0.2%。徐世焯等^[9-11]对超高韧性水泥基复合材料(UHTCC)的静动态力学特性进行了试验研究,UHTCC在拉伸荷载作用下性能优异,出现多缝开裂现象,裂缝宽度稳定在100 μm,峰值拉应变超过3%。赵燕茹等^[12-14]对钢纤维增强水泥基复合材料进行了抗折、四点加载剪切和三点弯曲试验研究,结果表明材料的抗折强度、剪切极限断裂韧度和断裂能随着纤维掺量的增加而提高。

王激扬等^[15]对PE纤维水泥基复合材料静态力学性能进行了试验研究,结果表明PE纤维掺量超过1%,复合材料在弯曲荷载作用下韧性和变形能力突出,纤维掺量大于1.5%时,应变硬化特性显著。徐赛仙等^[16-17]对不同玄武岩纤维掺量的水泥基复合材料进行动态压缩和动态劈裂试验,结果表明随着纤维掺量的增加,BF2%、BF3%试件的动态劈裂强度增强效果优于动态抗压强度,玄武岩纤维可以增强水泥基材料的延性。

在ECC中掺入高弹性模量的纤维(钢纤维、玄武岩纤维等)对基体有增强、增韧效果,但其抗锈性差、耐久性不足;低弹性模量的纤维(PVA纤维、PE纤维、PP纤维等)对基体有增韧、提高耐久性的效果,但增强效果不明显且造价昂贵。部分学者采用混杂纤维的方案,即将两种或两种以上的纤维混杂后加入基体,以获得材料力学性能的改善提升,或在保持材料力学性能稳定的前提下采用低成本的纤维从而降低造价。S. F. Ahmed等^[18]提出了混杂纤维水泥基复合材料应变硬化和多缝开裂行为的解析模型,该模型预测了ECC开裂应力以及桥接应力以及纤维的临界体积分数。丁彦江等^[19-20]将钢纤维和PVA纤维混杂,使用落锤和分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)进行冲击试验,发现两种纤维混杂的抗冲击性能优于单掺钢纤维或PVA纤维,并且1.5%的PVA纤维+0.5%的钢纤维抗弯冲击性能最优,冲击韧性指数是单掺时的1.4倍。C. X. Qian等^[21-23]对钢-PP纤维水泥基复合材料进行了静态和动态拉伸试验,得出动荷载下具有较高拉伸强度和能量吸收的纤维配比是1%

的PP纤维+1%的钢纤维。S. F. V. Ahmed等^[24-27]将钢纤维和PE纤维混杂,试验研究表明:钢纤维的掺入可显著提高材料的开裂应力和峰值应力,0.5%钢纤维+2.0%PE纤维的复合物表现出最高的弯曲韧性和挠度。

工程结构在其服役期内,会受到爆炸和冲击等高速动力荷载的作用。高速动力荷载下混杂纤维水泥基复合材料的力学响应性能须开展研究。本文以高弹性模量的钢纤维和低弹性模量的PE纤维组合的方式制备混杂纤维水泥基复合材料,对其开展高应变率(30~120 s⁻¹)条件下的动态压缩试验,研究其动态压缩性能和破坏机理,并给出最佳的纤维配比。

1 试验材料及方法

1.1 试验原材料及配合比

试验原材料包括:P.O42.5水泥、硅灰、水、聚羧酸高性能减水剂、钢纤维和PE纤维。钢纤维和PE纤维的物理力学参数见表1和表2。

试件的配合比如表3所示,表中字母“S”代表钢纤维,“E”代表PE纤维,字母后面的数字表示纤维的体积掺量。

表1 钢纤维物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of steel fibers

名称	直径/ mm	标准长/ mm	拉伸强度/ MPa	弹性模量/ GPa	密度/ (g·cm ⁻³)
镀铜钢纤维	0.175~ 0.35	12	3000	210	7.8

表2 PE纤维物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of PE fibers

型号	直径/ mm	极限拉伸 强度/GPa	弹性模 量/GPa	伸长 率/%	断裂强 度/lbs	密度/ (g·cm ⁻³)
S-900	0.039	2.18	210	3.5	315	0.97

表3 ECC配合比

Table 3 Mix ratio of ECC

试件 类型	水泥	硅灰	水	减水剂	单位:kg/m ³	
					钢纤维体 积掺量/%	PE纤维体 积掺量/%
基体	1	0.11	0.28	0.013	0	0
E2	1	0.11	0.28	0.013	0	2
E1.5S0.5	1	0.11	0.28	0.013	0.5	1.5
E1S1	1	0.11	0.28	0.013	1	1
E0.5S1.5	1	0.11	0.28	0.013	1.5	0.5
S2	1	0.11	0.28	0.013	2	0

1.2 试件制备

为了忽略试件轴向和横向惯性效应的影响,并考虑此次试验设备的压杆直径,用于动态压缩试验的试件尺寸为Φ70 mm×35 mm。

试件制作时,分别称量水泥、硅灰、水、减水剂以及纤维。先将硅灰、水泥加入搅拌桶中搅拌均匀。再将减水剂和水混合均匀倒入搅拌桶中,搅拌4 min,使浆体的流动性满足要求,然后向搅拌桶均匀加入钢纤维和PE纤维,继续搅拌3 min,直到纤维均匀分布,将搅拌好的拌合物倒入模具并放到振动台上振捣,振捣完成后将试件抹平并盖上保鲜膜。试件浇筑后在室温条件下养护24 h拆模,拆模后对试件进行编号,标准养护28 d,养护完成后需要对试件的两个端面进行打磨,确保满足试验平整度要求。养护后的试件如图1所示。



图1 养护后的试件

Fig.1 Specimen after curing

1.3 试验设备和加载工况

采用安徽合肥姜水动态力学实验室直径为75 mm的分离式霍普金森压杆(SHPB)装置进行混杂纤维水泥基复合材料的动态压缩试验。本次动态压缩试验的加载速率为7、8 m/s和9 m/s。每个加载速率下每种配合比的水泥基复合材料试件均进行5次冲击试验,试件配合比和加载速率组合的工况共18种,共进行90次冲击试验。试验设备的系统组成如图2所示。

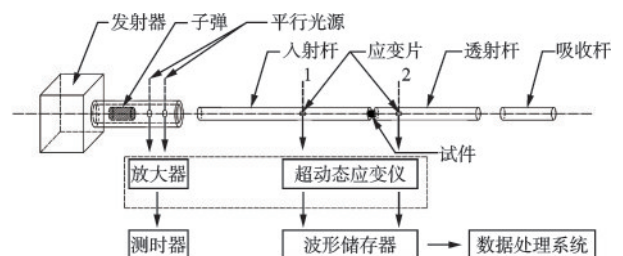


图2 SHPB试验装置系统组成

Fig.2 Components of SHPB experimental setup

SHPB试验需要满足的两个基本假定:(1)一维应力波假定;(2)短试件的应力应变沿其长度均匀分布(动态平衡)假定。基于两个假定采用三波法确定试件在动态压缩下的应力-应变曲线,公式如下:

$$\sigma_s(t) = \frac{EA}{A_s} [\epsilon_l(X_{G1}, t) + \epsilon_r(X_{G1}, t)] \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_s(t) = \frac{2C_0}{l_s} [\epsilon_l(X_{G1}, t) - \epsilon_t(X_{G2}, t)] \quad (2)$$

$$\epsilon_s(t) = -\frac{2C_0}{l_s} \int_0^t [\epsilon_l(X_{G1}, t) - \epsilon_t(X_{G2}, t)] dt \quad (3)$$

式中, E 、 C_0 、 A 分别是压杆的弹性模量、波速和截面积; A_s 、 l_s 分别是试件的截面积和长度; $\epsilon_l(X_{G1}, t)$ 、 $\epsilon_r(X_{G1}, t)$ 、 $\epsilon_t(X_{G2}, t)$ 分别对应入射应力波、反射应力波和透射应力波; $\sigma_s(t)$ 、 $\dot{\epsilon}_s(t)$ 、 $\epsilon_s(t)$ 分别是试件的应力、应变率和应变。

本次试验中应变率的计算方法为:取入射波的上升段来计算材料的应变率。将示波器采集到入射杆和透射杆上应变片上的电信号,导入软件中,设置好杆件系统参数,将入射波、反射波和透射波的起跳点对齐,导出应变-时间曲线,取应变-时间上升段的斜率作为材料的平均应变率。

2 试验结果及分析

2.1 试件破坏状态

不同应变率下试件的破坏状态如表4所示。由表可知,随着应变率的增大,试件的破坏程度也越来越严重。在高应变率下水泥基基体材料完全破碎,表现出脆性破坏的特点;而掺入钢纤维和PE纤维的试件没有完全破坏,表现出一定的完整性,表明纤维起到桥接作用,可阻止试件发生破坏。当应变率在 $35 \sim 62 \text{ s}^{-1}$ 时,试件四周出现微裂缝,端面完好无损。当应变率增大到 80 s^{-1} 以上时,试件周围出现的裂缝宽度增大,裂缝延伸至端面,最后端面裂缝增大,贯穿整个试件,导致试件破坏。随着PE纤维体积掺量的增大,试件表面产生的微裂缝越细密;随着钢纤维体积掺量的增大,试件表面裂缝数量减少,但裂缝宽度变大,由此可知,PE纤维主要桥接裂缝,而钢纤维起到桥接试件宏观大裂缝的作用。

表4 不同应变率下试件的破坏状态

Table 4 Failure states of specimens under different strain rates

试件类型	破坏状态		
基体			
	35 s ⁻¹	68 s ⁻¹	94 s ⁻¹
	E2		
60 s ⁻¹		84 s ⁻¹	108 s ⁻¹
E1.5S0.5			
	50 s ⁻¹	76 s ⁻¹	106 s ⁻¹
	E1S1		
51 s ⁻¹		77 s ⁻¹	120 s ⁻¹
E0.5S1.5			
	62 s ⁻¹	84 s ⁻¹	114 s ⁻¹
	S2		
53 s ⁻¹		81 s ⁻¹	103 s ⁻¹

2.2 动态压缩试验结果

由表5可知,随着应变率的升高,相同纤维掺量的试件动态抗压强度均提高,峰值应变稳定在

表5 动态压缩试验结果

Table 5 Dynamic compression test results

试件类型	平均应变率/	平均峰值应力/	平均峰值应变/
	s ⁻¹	MPa	%
基体	36.6	112.9	0.86
	59.7	115.0	1.02
	89.5	147.5	1.10
E2	60.8	147.8	1.00
	78.0	153.8	1.10
	113.2	163.3	1.05
E1.5S0.5	50.3	138.3	0.93
	76.7	162.3	1.17
	114.0	170.7	1.29
E1S1	49.4	145.4	0.93
	69.0	156.0	1.05
	103.5	157.5	1.15
E0.5S1.5	59.0	124.3	0.90
	86.0	143.3	1.20
	109.6	162.4	1.17
S2	52.7	140.7	0.93
	77.2	156.7	1.07
	99.3	176.7	1.10

0.9%~1.3%。相较于基体试件,添加纤维的各类试件的动态抗压强度均有不同程度的提高。随着钢纤维掺量的增加,试件的动态抗压强度得到提高,表明钢纤维提高水泥基基体的动态抗压强度的效果优于PE纤维。

2.3 动态压缩应力-应变曲线

图3为6种不同配合比的ECC在不同应变率下动态压缩的应力-应变曲线。由曲线形态可知,试件受力过程如下:(1)弹性阶段:在受压初期,荷载由基体和纤维共同承担,应力与应变呈线性关系;(2)裂缝扩展阶段:随着应力的增大,材料内部形成裂

缝并扩展,该阶段试件应力达到峰值,应力-应变曲线进入非线性阶段,裂缝数量随着荷载的增大逐渐增多,纤维开始发挥桥接作用;(3)破坏阶段:多条裂缝不断延伸、相互贯通,随着应变的增大,宏观裂缝相互贯通形成主裂缝,最后试件沿着主裂缝破坏。

PE纤维体积掺量为2%、1.5%、1%的试件会出现明显的应力平台,并且随着PE纤维所占比例的增加,应力平台变长,应力下降速度减慢,而E0.5S1.5和S2没有出现明显的应力平台。表明PE纤维桥接微裂缝的效果更加显著,增强增韧效果优于钢纤维。

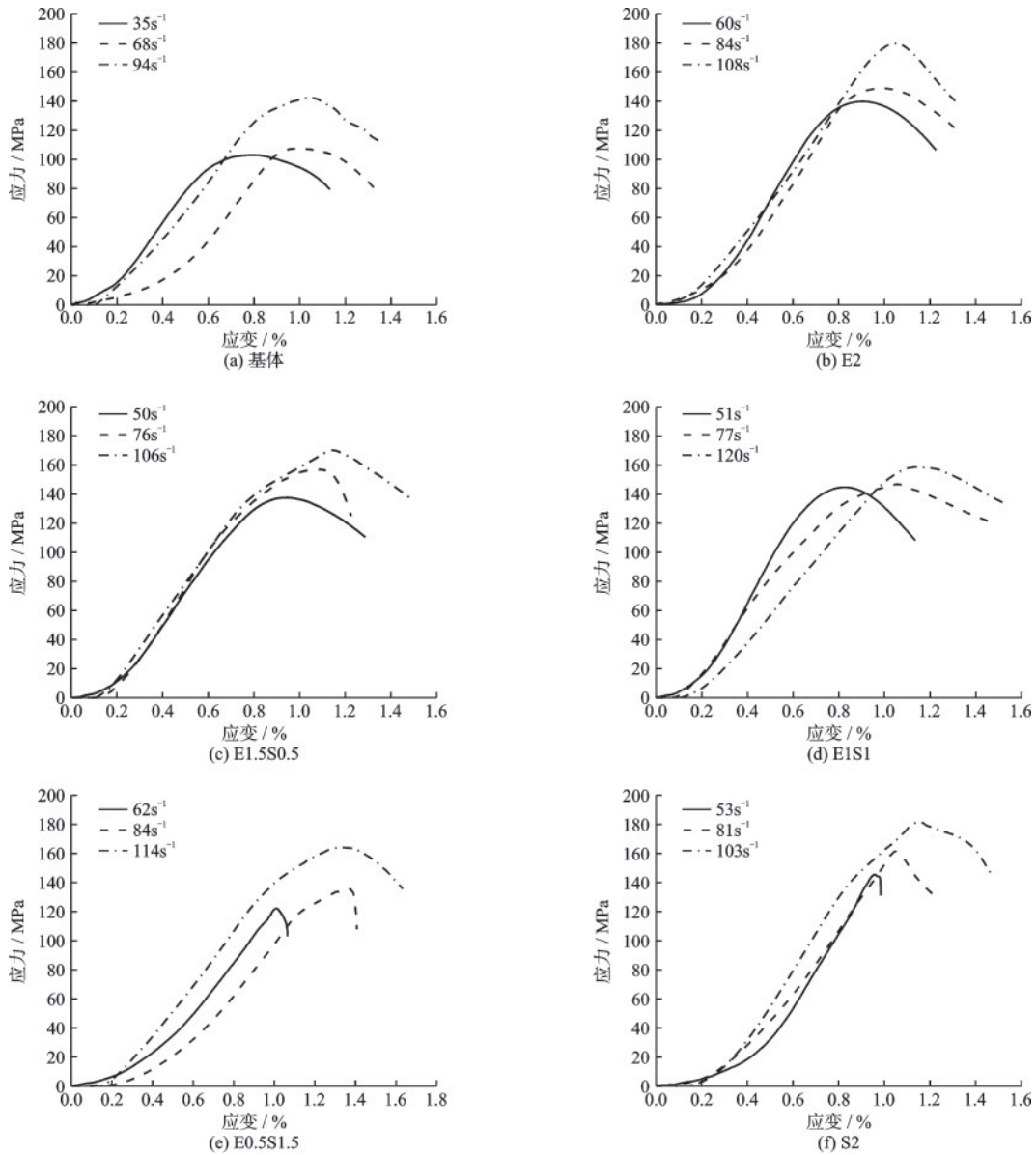


图3 不同应变率下ECC动态压缩应力-应变曲线

Fig.3 ECC dynamic compression stress-strain curves under different strain rates

2.4 应变率效应分析

2.4.1 动态抗压强度

不同应变率下各种配合比试件动态抗压强度变化如图4所示。由图4可知,混杂纤维水泥基复合材料的动态抗压强度表现出明显的应变率效应。这是由于随着应变率的增大,加载时间变短,材料没有足够的时间通过产生裂缝并扩展来消耗能量,只能通过提高应力来达到能量平衡^[28]。两种纤维掺入比例不同,试件的动态抗压强度增长幅度不同。随着掺入钢纤维的比例增加,动态抗压强度提高幅度增大。应变率在70~120 s⁻¹,S2的动态抗压强度均高于E2。应变率为60 s⁻¹、80 s⁻¹和100 s⁻¹,S2的动态抗压强度相比E0.5S1.5分别提高了13.2%、9.4%和8.8%。PE纤维掺量由2%下降到1%,动态抗压强度得到一定的提高,应变率在77 s⁻¹和114 s⁻¹,E1.5S0.5的动态抗压强度相比E2提高了5.5%和4.5%,钢纤维在提高动态抗压强度方面优于PE纤维。由于在受到冲击荷载时,PE纤维主要是拉断破坏,而钢纤维由于其高弹性模量,更多的是发生与基体的粘结破坏,桥接作用更显著,从而能提高材料的动态抗压强度。

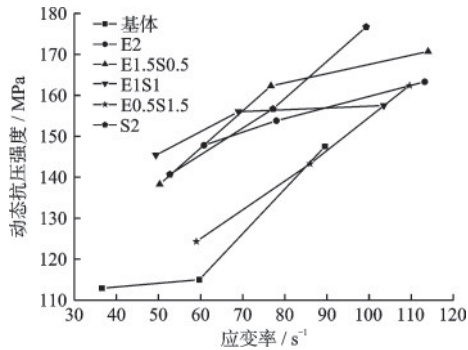


图4 不同应变率下ECC试件动态抗压强度变化

Fig.4 Changes in dynamic compressive strength of ECC specimens under different strain rates

2.4.2 动态应力峰值韧度

韧性是材料从加载到破坏的过程所吸收的能量,表征了材料强度和变形的综合能力。本文采用单位体积材料所吸收的能量,即应变能密度为指标来描述材料的韧性。通过对峰值应力前的应力-应变曲线进行积分,积分所得面积即为应变能密度^[29]。混凝土类材料(混凝土、水泥基材料等)相应的韧性指标称为峰值韧度,一般采用应力峰值前韧度进行表示,如图5所示。不同应变率下各类型试

件应力峰值前韧度的试验结果列于表6中。试件的应力峰值前韧度随应变率的变化如图6所示。

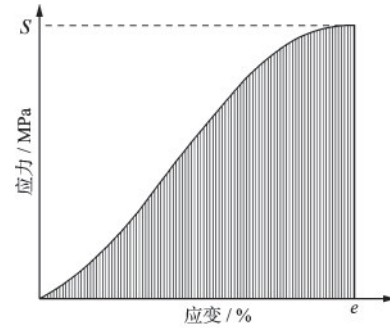


图5 韧度的定义

Fig.5 Definition of toughness

表6 不同应变率下各类型试件应力峰值前韧度

Table 6 Pre-peak toughness of various specimen types under different strain rates

试件类型	应变率/s ⁻¹	应力峰值前韧度
基体	36.6	42.2
	59.7	40.0
	89.5	73.7
E2	60.8	58.3
	78.0	66.6
	113.2	85.1
E1.5S0.5	50.3	61.0
	76.7	87.3
E1S1	114.0	101.3
	49.4	58.3
E0.5S1.5	69.0	84.4
	103.5	82.2
	59.0	45.7
S2	86.0	74.5
	109.6	108.0
	52.7	44.7
	77.2	62.8
	99.3	91.0

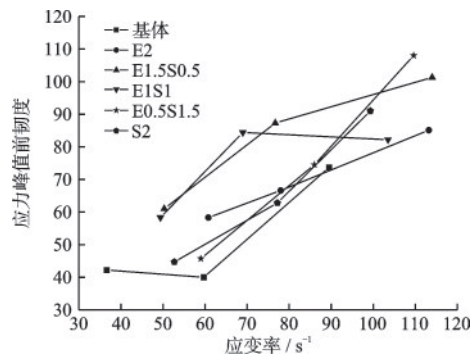


图6 应力峰值前韧度随应变率的变化

Fig.6 Variation of pre-peak toughness with strain rate

由图6可知,不同类型材料的应力峰值前韧度随着应变率的增大而增大,应变率效应明显。平均应变率为 51.5 s^{-1} 时,E1.5S0.5的应力峰值前韧度相比于E0.5S1.5和S2分别提高了33.4%和36.5%;平均应变率为 74.4 s^{-1} 时,E1.5S0.5的应力峰值前韧度相比于E0.5S1.5和S2分别提高了17.2%和39.0%,表明应变率在 $51.5\sim 74.4\text{ s}^{-1}$ 时,PE纤维的增韧效果更好。PE纤维的掺入比例增大,纤维与基体的接触面积变大,破坏的过程中产生更多的裂缝,使基体吸收更多的能量,从而提高了材料的韧性。当平均应变率为 104.9 s^{-1} 时,E0.5S1.5的应力峰值前韧度相比于E2、E1.5S0.5和E1S1分别提高了26.9%、6.6%和31.4%,这表明在应变率为 104.9 s^{-1} 时,钢纤维掺量的增加对材料韧性提高作用明显。

2.4.3 动态抗压强度增长因子

动态抗压强度增长因子(Dynamic Increase Factor of Compressive Strength, DIF)是材料的动态抗压强度与静态抗压强度的比值,反映了材料的动态抗压强度相对于静态抗压强度的提高程度。计算公式为:

$$DIF = \frac{f_{d,c}}{f_{sta,c}} \quad (4)$$

式中, $f_{d,c}$ 为动态抗压强度; $f_{sta,c}$ 为静态抗压强度。钢-PE混杂纤维水泥基复合材料的静态抗压强度试验结果见表7,参照美国材料与试验协会标准ASTM-C39/C39M-12a^[30],试件尺寸选用 $\Phi 70\text{mm} \times 140\text{mm}$ 的圆柱体试样。

六种ECC材料的 DIF 随应变率的变化趋势如

表7 钢-PE混杂纤维水泥基复合材料的静态抗压试验结果
Table 7 Static compressive test results of steel-PE hybrid fiber cement-based composite materials

试件类型	抗压强度/MPa	抗压强度平均值/MPa
基体	61.9	62.6
	63.2	
E2	77.7	79.7
	81.6	
E1.5S0.5	80.6	80.8
	81.0	
E1S1	77.4	77.7
	78.0	
E0.5S1.5	72.5	77.3
	82.1	
S2	71.6	73.7
	75.8	

图7所示。由图可知,随着应变率的增大,各材料的 DIF 均逐渐增大,表现出不同程度的应变率效应。相对而言,E0.5S1.5和S2的应变率效应更为显著。

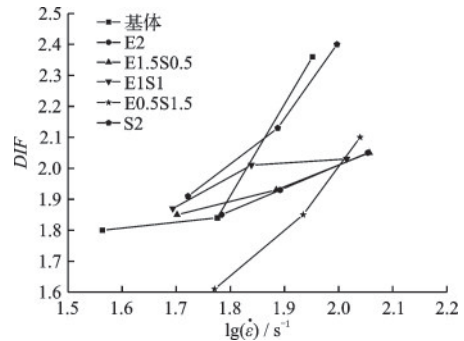


图7 各材料 DIF 与应变率常用对数的关系

Fig.7 Relationship between common logarithms of DIF and strain rates for each material

分别对各组混杂纤维水泥基复合材料的试验数据进行线性拟合,得到各种材料动态抗压强度增长因子与应变率的对数的关系式如下:

$$DIF = A \lg \dot{\epsilon} + B \quad (5)$$

回归直线斜率 A 的大小反映了材料动态抗压强度的应变率敏感性的强弱,斜率越大,材料的动态抗压强度对应变率的敏感性越强。

由表8可知,E0.5S1.5和S2试件的斜率较大,表明其动态抗压强度应变率的敏感性较高,而E2、E1.5S0.5和E1S1试件的动态抗压强度应变率的敏感性较低。当钢纤维掺量达到1.5%时,随着钢纤维掺量的增加, DIF 直线斜率越大,说明一定纤维掺量的钢纤维可以提高动态抗压强度应变率的敏感性。而钢纤维由0%增加到1%时, DIF 直线斜率下降,说明少量的钢纤维能降低动态抗压强度的应变率的敏感性。PE纤维掺量由2%下降到1%时, DIF 直线斜率下降,表明PE纤维对提高动态抗压强度应变率的敏感性有提升作用。

表8 各材料的 DIF 拟合系数

试件类型	A	B	R^2
基体	1.399	-0.468	0.517
E2	0.741	0.528	1
E1.5S0.5	0.561	0.887	0.965
E1S1	0.485	1.074	0.800
E0.5S1.5	1.791	-1.577	0.963
S2	1.744	-1.113	0.938

3 结 论

应用分离式霍普金森压杆(SHPB)装置,开展了钢-PE混杂纤维水泥基复合材料在高应变率($30\sim 120\text{ s}^{-1}$)条件下的动态压缩试验,从试件破坏形态、材料的动态抗压强度、韧性及其应变率效应等方面进行了研究,主要结论如下:

(1)混杂纤维水泥基复合材料的动态抗压强度、韧性以及DIF随着应变率的增加而提高,表现出明显的应变率效应。在 60 s^{-1} 和 80 s^{-1} 应变率下,PE纤维增韧效果更好;而在 100 s^{-1} 时,钢纤维增韧效果更优。

(2)PE纤维掺量由0.5%增加到2%,材料应力-应变曲线的应变硬化现象更明显。由破坏形态可知,PE纤维起到桥接微裂缝的作用,钢纤维桥接宏观大裂缝。钢纤维掺量达到1.5%以上且继续增大时,材料的动态抗压强度和韧性得到提高,并且随着应变率的增大,动态抗压强度增长因子增大,表明一定掺量的钢纤维可以提高材料的动态抗压强度的应变率的敏感性。

(3)两种纤维混杂的动态压缩力学性能要优于单掺PE或钢纤维,在本文的试验条件(钢纤维和PE纤维总掺量为2%,应变率为 $30\sim 120\text{ s}^{-1}$ 的冲击压缩荷载)下,综合考虑动态抗压强度、韧性以及DIF,抵抗冲击压缩的最优纤维配比是0.5%的PE纤维+1.5%的钢纤维。

参考文献:

- [1] 郭伟娜,张鹏,鲍玖文,等.应变硬化水泥基复合材料动力学性能研究现状与进展[J].材料导报,2021,35(17):17199-17209.
Guo W N, Zhang P, Bao J W, et al. Review of dynamic mechanical property of strain-hardening cementitious composite [J]. Materials Reports, 2021, 35 (17) : 17199-17209.(in Chinese)
- [2] Li V C. Advances in ECC research [J]. ACI special publication on concrete: material science to applications SP, 2002, 206(23): 373-400.
- [3] Li V C. From micromechanics to structure engineering—the design of cementitious composites for civil engineering applications [J]. Journal of Structure Mechanics and Earthquake Engineering, 1993, 10(2): 37-48.
- [4] Maalej M, Li V C, Hashida T. Effect of fiber rupture

- on tensile properties of short fiber composites [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1995, 121(8): 903-913.
- [5] 赵文浩,李秀领.绿色高性能水泥基复合材料加固火损RC柱抗震性能研究[J].防灾减灾工程学报,2019,39(1):54-60.
Zhao W H, Li X L. Numerical study on seismic behavior of fire damaged RC columns reinforced by green high-performance fiber-reinforced cementitious composites [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(1): 54-60. (in Chinese)
- [6] 李秀领,蔡帅,闫庆喜,等.GHPFRCC框架梁抗火性能试验研究[J].防灾减灾工程学报,2021,41(5):954-959,986.
Li X L, Cai S, Yan Q X, et al. Experimental study on fire-resistance properties of green high-performance fiber-reinforced cementitious composites frame beams [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(5): 954-959, 986. (in Chinese)
- [7] Wang S, Li V C. Polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites: material design and performances [C]//International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC) in Structural Applications, Honolulu, Hawai'i: [s.n.], 2005:65-73.
- [8] Fisher G. Deformation Behavior of reinforced ECC flexural members under reversed cyclic loading conditions [D]. Ann Arbor: University of Michigan, 2002.
- [9] 徐世焱,蔡向荣.超高韧性纤维增强水泥基复合材料基本力学性能[J].水利学报,2009,40(9):1055-1063.
Xu S L, Cai X R. Experimental study on mechanical properties of ultra-high toughness fiber reinforced cementitious composite [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(9): 1055-1063. (in Chinese)
- [10] Xu S L. Fracture and tensile properties of polyvinyl alcohol fiber reinforced cementitious composites [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2008(1): 7-11.
- [11] 王海超,张玲玲,高淑玲,等.PVA纤维对超高韧性纤维增强水泥基复合材料力学性能的影响[J].混凝土,2013(4):4-7,14.
Wang H C, Zhang L L, Gao S L, et al. Experimental study on influence of PVA fiber on mechanical properties of engineered cementitious composites [J]. Concrete, 2013(4): 4-7, 14. (in Chinese)
- [12] 赵燕茹,喻泊厅,王磊,等.钢纤维增强水泥基复合材料力学性能试验研究[J].混凝土,2019(11):123-126,131.
Zhao Y R, Yu B T, Wang L, et al. Experimental study on mechanical properties of steel fiber reinforced cement composites [J]. Concrete, 2019(11): 123-126,

131. (in Chinese)
- [13] 李琳, 李辉, 慕儒, 等. 定向钢纤维水泥基复合材料抗剪性能试验研究[J]. 混凝土, 2021(7): 52-56.
Li L, Li H, Mu R, et al. Shear properties of aligned steel fiber cementitious composites[J]. Concrete, 2021(7): 52-56. (in Chinese)
- [14] 张金鑫, 卿龙邦, 王娟, 等. 钢纤维增强水泥基复合材料冲击断裂试验研究[J]. 混凝土, 2021(5): 71-74.
Zhang J X, Qing L B, Wang J, et al. Impact fracture tests of steel fiber reinforced cementitious composites [J]. Concrete, 2021(5): 71-74. (in Chinese)
- [15] 王激扬, 马卫强, 胡志华, 等. PE纤维掺量对水泥基复合材料力学性能的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(11): 2130-2135, 2214.
Wang J Y, Ma W Q, Hu Z H, et al. Effect of fiber content on mechanical behavior of cementitious composite [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(11): 2130-2135, 2214. (in Chinese)
- [16] 徐赛仙, 陶燕, 柴栋, 等. 玄武岩纤维水泥基复合材料单轴受拉性能研究[J]. 混凝土, 2021(10): 62-66.
Xu S X, Tao Y, Chai D, et al. Study on uniaxial tensile properties of basalt fiber cement-based composites [J]. Concrete, 2021(10): 62-66. (in Chinese)
- [17] 张娜, 周健, 徐名凤, 等. 玄武岩纤维高延性水泥基复合材料的动态力学性能[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(5): 45-53.
Zhang N, Zhou J, Xu M F, et al. Dynamic cementitious composites [J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(5): 45-53. (in Chinese)
- [18] Ahmed S F, Maalej M, Paramasivam P. Analytical model for tensile strain hardening and multiple cracking behavior of hybrid fiber-engineered cementitious composites [J]. Journal of materials in civil engineering, 2007, 19(7): 527-539.
- [19] 丁彦江. 钢-PVA混杂纤维增强水泥基复合材料冲击压缩动力性能试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
Ding Y J. The shock compression dynamic performance experimental study of Steel and PVA hybrid fiber reinforced cement matrix composites [D]. Canton: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [20] 杨惠贤. 纤维增强水泥基复合材料的动态力学性能及动态本构模型研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
Yang H X. Study on Dynamic Mechanical Behavior and Constitutive model of Fiber Reinforced Cementitious Composites [D]. Canton: South China University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [21] Qian C X, Stroeven P. Development of hybrid polypropylene steel fiber-reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(1): 63-69.
- [22] Guo H, Tao J, Chen Y, et al. Effect of steel and polypropylene fibers on the quasi-static and dynamic splitting tensile properties of high-strength concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 224: 504-514.
- [23] 吴朦, 吴俊, 闫秋实, 等. 钢网片-PE纤维水泥基复合材料静力拉伸性能及其力学模型的研究[J]. 混凝土, 2020(10): 18-24.
Wu M, Wu J, Yan Q S, et al. Experimental and analytical study on the static mechanical property of steel mesh-PE fiber reinforced cementitious composites under direct tensile loading[J]. Concrete, 2020(10): 18-24. (in Chinese)
- [24] Ahmed S F U, Maalej M, Paramisvam P. Flexural responses of hybrid steel-polyethylene fiber reinforced cement composites containing high volume fly ash [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(5): 1088-1097.
- [25] Maalej M, Quek S T, Zhang J. Behavior of hybrid-fiber engineered cementitious composites subjected to dynamic tensile loading and projectile impact [J]. Journal of materials in civil engineering, 2005, 17(2): 143-152.
- [26] Maheswaran J, Chellapandian M, Sivasubramanian M V R, et al. Experimental and numerical investigation on the shear behavior of engineered cementitious composite beams with hybrid fibers[J]. Materials, 2022, 15(14): 5059.
- [27] 柴鑫伟, 谢群, 王欣, 等. 混杂纤维高韧性水泥基复合材料拉伸性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(增1): 353-361.
Chai X W, Xie Q, Wang X, et al. Experimental study on tensile performance of hybrid fiber high toughness cementitious composite [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(Sup1): 353-361. (in Chinese)
- [28] 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(1): 23-27.
Wang D R, Hu S S. Influence of aggregate on the compression properties of concrete under impact [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2002(1): 23-27. (in Chinese)
- [29] 杜修力, 窦国钦, 李亮, 等. 纤维高强混凝土的动态力学性能试验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(4): 138-144, 150.
Du X L, Dou G Q, Li L, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of fiber reinforced high strength concrete[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(4): 138-144, 150. (in Chinese)
- [30] Standard Test Method for compressive strength of cylindrical concrete specimens: ASTM C39/C39M-12a [S]. American: The American Society for Testing and Materials, 2012.

(本文编辑: 苏泽云)