

# 静动组合加载下钢-PE混杂纤维水泥基复合材料动态压缩性能试验研究

王东海<sup>1</sup>, 李亮<sup>1</sup>, 王满<sup>1</sup>, 吴俊<sup>2</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>上海师范大学土木工程学院, 上海

收稿日期: 2024年4月25日; 录用日期: 2024年5月15日; 发布日期: 2024年5月24日

## 摘要

本文将钢纤维和聚乙烯(PE)纤维进行混杂, 制备了钢-PE混杂纤维水泥基复合材料(S/PE-HFRECC, Steel-PE Hybrid Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composites), 控制纤维体积总掺量为2%, 通过改变两种纤维配比制作了六类水泥基试件(SOE0、SOE2、S0.5E1.5、S1E1、S1.5E0.5和S2E0), 并利用可施加预加静态荷载的直径为50 mm的分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)装置开展了静动组合加载条件下S/PE-HFRECC的动态压缩试验, 预加静荷载级别分别取试件静态抗压强度的0%、15%、30%和45%四个级别。试验结果表明: 1) 预加静态荷载对水泥基复合材料的力学性能有着弱化和强化的双面性。2) S/PE-HFRECC的动态抗压强度、动态峰值应变和应力峰值前韧度随着预加静荷载级别的提高呈现先升高后降低的趋势。3) 相较于单一纤维的掺入, 钢-PE混杂纤维在对强度、变形能力和韧度的改善方面有着更好的优越性。

## 关键词

钢-PE混杂纤维水泥基复合材料(S/PE-HFRECC), 静动组合加载, 动态抗压强度, 应力峰值前韧度

## Experimental Study on Dynamic Compression Properties of Steel-PE Hybrid Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composites under Static and Dynamic Combined Loading

Donghai Wang<sup>1</sup>, Liang Li<sup>1</sup>, Man Wang<sup>1</sup>, Jun Wu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing

文章引用: 王东海, 李亮, 王满, 吴俊. 静动组合加载下钢-PE 混杂纤维水泥基复合材料动态压缩性能试验研究[J]. 土木工程, 2024, 13(5): 626-637. DOI: 10.12677/hjce.2024.135068

<sup>2</sup>School of Civil Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai

Received: Apr. 25<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 15<sup>th</sup>, 2024; published: May 24<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In this paper, the Steel-PE Hybrid Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composites (S/PE-HFRECC) were prepared by blending steel fiber and PE fiber, with a controlled total fiber volume content of 2%. Six types of cement-based specimens (S0E0, S0E2, S0.5E1.5, S1E1, S1.5E0.5 and S2E0) were fabricated by varying the ratio of the two types of fibers. A Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) device with a diameter of 50 mm was utilized to conduct dynamic compression tests on the S/PE-HFRECC under static and dynamic combined loading conditions, allowing for pre-static load application at levels corresponding to 0%, 15%, 30% and 45% of the static compressive strength. The test results show that: 1) The mechanical properties of cement-based composites are influenced by pre-loading static load, resulting in both weakening and strengthening effects. 2) The dynamic compressive strength, dynamic peak strain, and pre-peak stress toughness of S/PE-HFRECC initially increase and then decrease with increasing levels of pre-static load. 3) Compared to single fiber inclusion, steel-PE hybrid fiber exhibits superior advantages in enhancing strength, deformation ability, and toughness.

## Keywords

Steel-PE Hybrid Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composites (S/PE-HFRECC), Static and Dynamic Combined Loading, Dynamic Compressive Strength, Pre-Peak Stress Toughness

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

混凝土是土木工程领域使用最为广泛的建筑材料，但其作为一种脆性材料存在着抗拉强度低、易开裂、延性差等缺点。为了改善材料的力学性能，美国学者 Li 等[1]基于材料复合化思想成功研制出具有应变硬化和多条细密裂缝开裂特性的水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composites, ECC)。ECC 材料作为一种新型的高性能材料，具有较高的延性和微裂缝控制能力，可在一定程度上阻止外界物质侵入，减少内部钢筋锈蚀[2]。同时，ECC 材料的多裂缝开裂特性使其具有较高的能量吸收能力，其在工程结构抗爆炸和抗冲击领域得到了广泛的应用。

通过在水泥基复合材料中加入各种纤维可以进一步改善材料的物理与力学性能并提高其耐久性[3]，应用于 ECC 的纤维类型主要有金属纤维(钢纤维等)、有机合成纤维(聚丙烯纤维、聚乙烯纤维等)、无机纤维(碳纤维、玻璃纤维等)。针对掺有不同纤维的水泥基复合材料的力学性能已经开展了较为系统的研究。ECC 材料静态压缩、拉伸和弯曲试验显示，PE 纤维在粘结和破坏机制上具有优越性能。随着 PE 纤维含量的增加，拉伸应变、弯曲变形和纤维桥接互补能力提高，初裂应力、峰值应力、抗弯强度和纤维桥接强度先增大后减小[4] [5]。

罗银剑等[6]对 PVA-ECC 试件进行了 4 个应变率范围内的动态冲击压缩试验。研究发现，PVA-ECC 的动态抗压强度和峰值应力具有明显的应变率增强效应。在低应变率下，试件的峰值强度和应变随纤维

掺量的增加而提高。在高应变率下,纤维对应力-应变曲线的形态影响减弱,且纤维掺量能降低 DIF 值,减弱应变率的强化效应。李亮等[7]研究了钢网片-聚乙烯(PE)纤维增强水泥基复合材料的动态拉伸性能。结果显示,PE 纤维和钢网片提高了水泥基复合材料的抗拉强度、变形能力和耗能能力。钢网片主要提高抗拉强度,而 PE 纤维主要提高变形和耗能能力。随着 PE 纤维掺量的增加,抗拉强度和耗能能力提高。随着拉伸速率的增大,材料抗拉强度提高,表现出应变率效应。

实际工程结构的服役环境较为复杂,往往需要材料性能满足多方面的要求(强度、延性、抗冲击性能等)。例如,机场跑道要求材料既有较高的强度,还要有良好的抗冲击性。然而,单一纤维的掺入对材料性能的提升较为有限。可以采用多种纤维混杂的方式,将各种纤维的优势充分结合起来,以实现水泥基材料性能的提升。国内外学者针对混杂纤维水泥基复合材料的静动态力学性能开展了较为系统的研究。张品乐等[8]研究了钢-PVA 混杂纤维水泥基复合材料的立方体轴心抗压性能。结果表明,PVA 纤维的增加使抗压强度先减后增,抗压韧性指数先增后减,但峰值应变提升显著,材料完整性和延性更好,钢纤维在提升抗压韧性方面有优势。Zhou 等[9]对不同纤维配比的钢-PE 混杂纤维水泥基复合材料进行了压缩、拉伸和弯曲试验。结果显示,PE 纤维的增加提高了材料的拉伸强度、延性和抗弯强度,但抗压强度降低。钢纤维对抗压强度有正向影响,并能改善材料的流动性。Liu 等[10]研究了高强度钢-PE 混杂纤维水泥基材料(HF-ECC)的压缩和单轴拉伸性能。结果表明,钢纤维替代部分 PE 纤维可提高 ECC 材料的抗压强度和拉伸模量。当钢纤维掺量大于 1%时,应变能力大幅下降。钢-PE 混杂纤维增强 ECC 在抗压强度、抗拉模量和经济成本上表现良好。Huo 等[11]以落锤为动力源对钢-PE 混杂纤维水泥基复合材料进行了动态拉伸试验。研究发现,钢纤维的掺入提高了材料的动态冲击开裂强度、抗拉强度、应变性能及多次开裂能力。拉伸强度、开裂性能和冲击耗能能力表现出明显的应变率增强效应,且拉伸强度的应变率敏感性随钢纤维掺入量的增加而增加。

实际的工程结构在承受外部作用的动荷载之前已经受到自重等原因产生的静力荷载作用。例如,大坝的坝体在受到地震荷载作用之前,便已经承受到了坝体自重、周围水压、淤泥等初始静荷载;高层建筑在承受风荷载之前,便已经处于自重及室内设施的静荷载作用之下。结构在动荷载作用后实际处于静动荷载组合的加载条件下。静荷载对工程结构材料动态力学性能的影响须加以考虑。如果忽视静态荷载对材料动态性能的影响,则会过高地计算材料的动态强度,从而使结构设计偏于危险,因此研究 ECC 材料在静动组合加载下的动态力学性能是有必要的。目前,针对静动组合加载条件下工程材料动态力学性能的研究主要集中于混凝土。闫东明等[12][13]使用大型液压伺服机进行了混凝土动态压缩试验,发现随着初始静态荷载的增加,混凝土动态抗压强度呈下降趋势,且随着荷载值的增加,这种趋势愈发明显。郑丹等[14][15]对有初始静荷载作用下的混凝土动态强度特性进行了研究,发现混凝土的动力抗拉强度随初始静荷载的增加先增大后减小,而动力抗压强度则随之减小。马怀发等[16][17][18]通过数值模拟方法,研究了预静载作用下混凝土梁的动态弯拉和立方体试块的动态轴拉、轴压特性,提出了预静载对混凝土材料的刚度弱化和应变率强化的双面特性,并发现不同初始预静载下的动态弯拉强度都高于纯动载强度。宋玉普等[19]使用大型静-动三轴电液伺服试验系统进行了动态劈拉试验,发现侧压力存在时,随着加载速率的提高,平均极限劈拉强度增加,而随着侧压力水平的提高,劈拉强度降低。Jin 等[20]通过三维数值模拟研究了初始静载和动载对混凝土动压破坏的影响,结果显示,随着初始静载的增加,混凝土动态抗压强度逐渐降低,而应变速率的增加可减弱这种影响。在低应变速率下,峰值强度略有下降,而在高应变速率下,峰值强度随初始动载的增加先减小后略有增加。

目前,针对 ECC 材料在静动组合加载下的动态力学性能方面的研究开展得尚不够充分。本文将开展静动组合加载下钢-PE 混杂纤维水泥基复合材料动态压缩性能试验研究。针对不同纤维体积含量配比的 S/PE-FRECC 材料,在不同级别预加静态荷载下分别开展动态压缩试验,探究纤维组合配比和预加静态荷载对材料动态压缩性能的影响。

## 2. 试验概况

### 2.1. 试验材料

试验原材料包括：P.O 42.5 水泥、硅灰、水、聚羧酸高性能减水剂、钢纤维和 PE 纤维。钢纤维采用保定盛泰源金属制品有限公司生产的镀铜钢纤维，PE 纤维采用 Honeywell 中国有限公司提供的 S-900 型 PE 纤维，两种纤维的物理力学参数如表 1 和表 2 所示。

**Table 1.** Physical and mechanical parameters of steel fiber

**表 1.** 钢纤维物理力学参数

直径 (mm)	标准长度 (mm)	拉伸强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
0.175~0.35	12	3000	210	7.8

**Table 2.** Physical and mechanical parameters of PE fiber

**表 2.** PE 纤维物理力学参数

型号	直径	极限拉伸强度	弹性模量	伸长率	断裂强度	密度
	(mm)	(GPa)	(GPa)	(%)	(lbs)	(g/cm <sup>3</sup> )
S-900	0.039	2.18	210	3.5	315	0.97

本试验在纤维总体积含量为 2% 的前提下，根据钢纤维和 PE 纤维的不同组合配比制备了不同类型的试件。包括不含纤维的基体试件共有 6 种类型，试件的配合比如表 3 所示。试件类型代号中的字母“S”代表钢纤维，“E”代表 PE 纤维。字母后面的数字代表对应纤维的纤维体积含量，单位为“%”。S0E0 为不含纤维的基体试件。

**Table 3.** Mixture ratios of S/PE-HFRECC specimens (kg/m<sup>3</sup>)

**表 3.** S/PE-HFRECC 试件配合比(kg/m<sup>3</sup>)

试件类型	水泥	硅灰	水	减水剂	钢纤维体积掺量	PE 纤维体积掺量
					(%)	(%)
S0E0	1	0.11	0.28	0.013	0	0
S0E2	1	0.11	0.28	0.013	0	2
S0.5E1.5	1	0.11	0.28	0.013	0.5	1.5
S1E1	1	0.11	0.28	0.013	1	1
S1.5E0.5	1	0.11	0.28	0.013	1.5	0.5
S2E0	1	0.11	0.28	0.013	2	0

### 2.2. 试件制备

考虑本次试验设备采用的压杆直径，为减小试件的轴向和横向惯性效应的影响，采用直径 50 mm、高 25 mm 的扁平圆柱体试件。试件制作步骤如下：

1) 准确称量各种试验所需的材料。2) 将称量好的水泥和硅灰倒入铁桶中用小铁铲进行搅拌，实现干料间的均匀混合。3) 将称量好的水和减水剂混合，搅拌均匀后倒入铁桶中。4) 使用手动搅拌机对铁桶中



的4种材料进行搅拌,确保浆体的流动性满足要求。5)而后向初次搅拌后的浆体中缓慢加入钢纤维和PE纤维,进行二次搅拌,使纤维在浆体中分布均匀。将拌合物倒入模具中并进行振捣,振捣完成后将试件磨平并盖上保鲜膜。6)试件在室温下养护24h后进行脱模并编号,然后放入养护箱内标准养护28d。养护完成后对试件进行打磨,以确保试件两个端面的不平度和不平行度均小于0.02mm。

### 2.3. 试验设备及加载方案

采用辽宁阜新艾凡动态力学实验室的AVTS-50型三轴霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)测试系统(图1)进行S/PE-HFRECC材料的静动组合动态压缩试验。该设备的入射杆和透射杆的直径为50mm,长度均为2.50m。杆由60Si<sub>2</sub>MnA钢制成,弹性模量为206GPa,密度为7850kg/m<sup>3</sup>,纵波波速为5100m/s。该设备可以在冲击荷载作用前预先对试件施加轴向静态压缩荷载,从而实现轴向的静动组合加载。通过电动液压泵装置(图2)驱使液压油缸(图3)加压,实现静态压缩荷载的施加,静压荷载的大小由电动液压泵装置上的仪表盘进行测量显示。

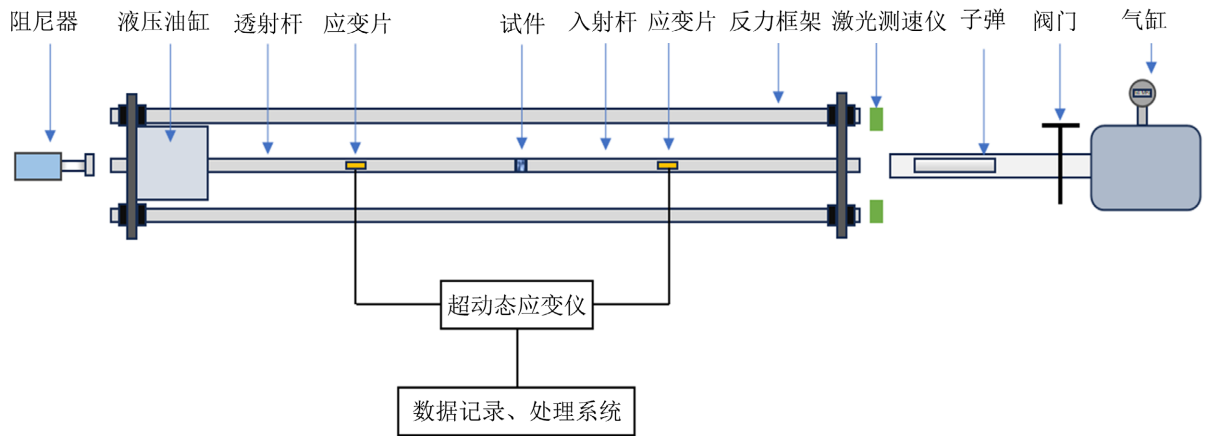


Figure 1. Schematic diagram of AVTS-50 three-axis SHPB test system

图1. AVTS-50型三轴SHPB试验系统示意图



Figure 2. Electric hydraulic pump

图2. 电动液压泵



Figure 3. Hydraulic cylinder  
图 3. 液压油缸

本次静动组合加载试验的动态压缩加载速度为 10.5 m/s。预加静态荷载值分别取材料单轴抗压强度的 0%、15%、30%、45% 四个级别。试件类型和预加静压荷载的组合工况共有 24 种，每一种工况下均进行 5 次重复试验，共进行 30 次动态冲击试验和 90 次静动组合加载试验。

在满足霍普金森压杆试验的两个假定，即“一维应力波假定”和“试件应力/应变均匀化假定”的情况下，采用三波法对试验结果采集到的数据进行处理。三波法的公式如下：

$$\varepsilon(t) = \frac{c_0}{l} \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] d\tau \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{c_0}{l} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{A_0 E_0}{2A} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \quad (3)$$

式中， $E_0$ 、 $A_0$  和  $c_0$  分别为杆件的弹性模量、截面面积和波速； $l$  和  $A$  为试件的初试长度和初始截面面积， $\varepsilon(t)$ 、 $\dot{\varepsilon}(t)$  和  $\sigma(t)$  分别为平均应变、平均应变率和平均应力； $\varepsilon_i(t)$ 、 $\varepsilon_r(t)$  和  $\varepsilon_t(t)$  分别对应入射应力波、反射应力波和透射应力波。

### 3. 试验结果与分析

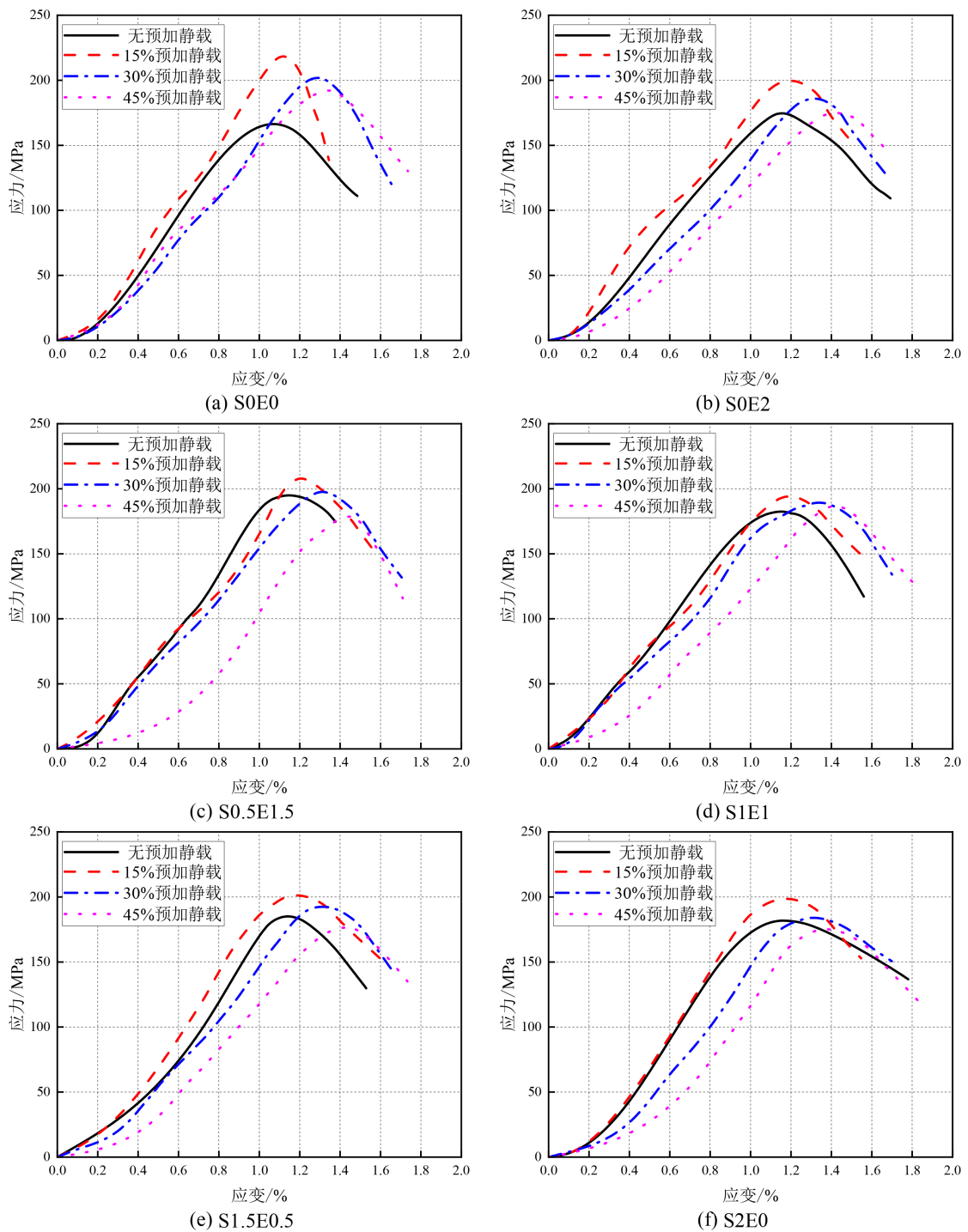
#### 3.1. 试验结果与应力 - 应变曲线

当加载速率为 10.5 m/s 时，静动组合加载条件下各类试件的动态压缩试验结果见表 4。由表中结果可知，当没有预加静荷载作用时，掺有两种纤维的混杂纤维试件的动态峰值应力和动态峰值应变较基体试件和只掺有单种纤维的试件有不同程度的提高，即采用混杂纤维的方式更有助于动态抗压强度和变形能力的提升。钢-PE 混杂纤维桥接裂缝的能力优于单掺钢纤维或 PE 纤维，两种纤维的混合掺入可更多地减少试件内部裂缝的扩展，提高材料的强度和变形能力。

**Table 4.** Results of dynamic compression test of S/PE-HFRECC under static and dynamic combined loading  
**表 4.** 静动组合加载 S/PE-HFRECC 动态压缩试验结果

试件类型	预加静态荷载级别	应变率 (s <sup>-1</sup> )	动态峰值应力 (MPa)	动态峰值应变 (%)	动态应力峰值前韧度 (MJ/m <sup>3</sup> )
S0E0	0	92.3	168.8	1.08	0.88
	15%	95.0	222.0	1.09	1.12
	30%	87.6	203.7	1.25	1.16
	45%	99.7	200.1	1.33	1.25
S0E2	0	97.8	170.2	1.11	0.96
	15%	100.4	202.7	1.13	1.16
	30%	105.1	178.8	1.26	1.12
	45%	111.0	170.0	1.39	1.06
S0.5E1.5	0	106.4	191.4	1.24	1.06
	15%	112.2	208.8	1.27	1.18
	30%	116.6	193.9	1.36	1.23
	45%	109.9	183.4	1.50	1.15
S1E1	0	105.2	179.4	1.20	1.04
	15%	108.2	196.4	1.22	1.16
	30%	108.7	190.2	1.34	1.27
	45%	111.9	179.3	1.48	1.09
S1.5E0.5	0	111.1	185.0	1.14	0.93
	15%	119.7	201.3	1.18	1.14
	30%	116.1	188.6	1.28	1.15
	45%	115.4	176.9	1.44	1.04
S2E0	0	92.1	177.6	1.09	0.91
	15%	104.8	200.1	1.11	1.10
	30%	105.6	188.0	1.25	1.09
	45%	107.8	173.6	1.33	1.00

当加载速率为 10.5 m/s 时，静动组合加载条件下各类试件动态压缩应力 - 应变曲线的对比如图 4 所示。由图可知，各类试件的动态峰值应力随着预加静态荷载级别的提升呈现先增大后减小的趋势，该现象说明较小级别的预加静载对 ECC 材料具有一定的强化作用，而较大级别的预加静载对 ECC 材料的强度呈现弱化作用。试件承受高速率的动态压缩荷载的动力响应过程主要分为三个阶段：1) 弹性阶段：对应试件承受动力荷载的初期，此时应力随应变呈线性增加，试件的损伤程度较小。荷载由水泥基体和纤维共同承担。2) 裂缝扩展阶段：弹性阶段产生的微裂缝随着应力的增大而逐渐扩展，试件内部裂缝数量不断增多，此时应力 - 应变曲线的斜率开始逐渐减小，应力逐渐达到峰值。在该阶段，纤维发挥桥接作用。3) 破坏阶段：当达到峰值应力后，试件内部的裂缝持续扩展并相互贯通，裂缝宽度进一步扩大直至形成主裂缝，试件应力迅速下降，最后试件发生破坏失去承载能力。



**Figure 4.** Comparison of dynamic compressive stress-strain curves of S/PE-HFRECC under static and dynamic combined loading

**图 4.** 静动组合加载 S/PE-HFRECC 动态压缩应力 - 应变曲线对比

另一方面, 随着预加静态荷载级别的提升, 动态峰值应变逐渐增大。该现象主要是由于静态荷载的施加有效限制了动态荷载作用下裂缝的张开程度, 降低了裂缝扩展过程中对应力的卸载程度, 从而提高了试件的变形能力。



### 3.2. 动态抗压强度

当加载速率为 10.5 m/s 时,不同级别预加静荷载作用下各类试件动态抗压强度的变化如图 5 所示。由图可知,各类试件的动态抗压强度随着预加静荷载级别的提高先增大后减小。在预加静荷载级别为 15% 时,动态抗压强度最高。此后,预加静荷载增大,动态抗压强度降低。ECC 试件内部会不可避免地存在一些孔隙,因此静荷载的施加会破坏试件内部的原始结构,带来初始损伤,从而在一定程度上弱化试件的抗冲击能力,产生强度弱化效应。由于冲击荷载的作用时间很短,试件发生破坏需要在短时间内积聚能量来实现内部裂纹萌生和扩展。预加静荷载带来初始损伤的同时会限制试件在承受高速冲击荷载作用时内部裂纹的萌生和张开程度,产生强化效应。15% 级别的预加静荷载产生的强化效应大于其产生初始损伤造成的弱化效应,因此该级别预加静载下动态抗压强度得到提升。此后,随着静荷载级别的不断提高,试件内部的损伤程度不断加重,材料的动态抗压强度便会逐渐降低。

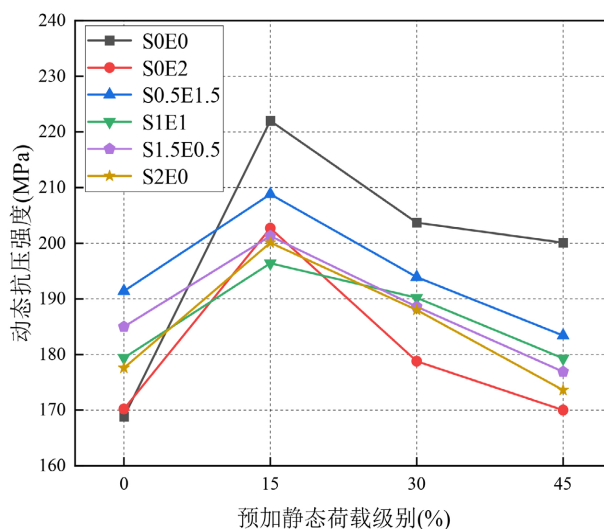


Figure 5. Changes of dynamic compressive strength of S/PE-HFRECC with the level of pre-static load

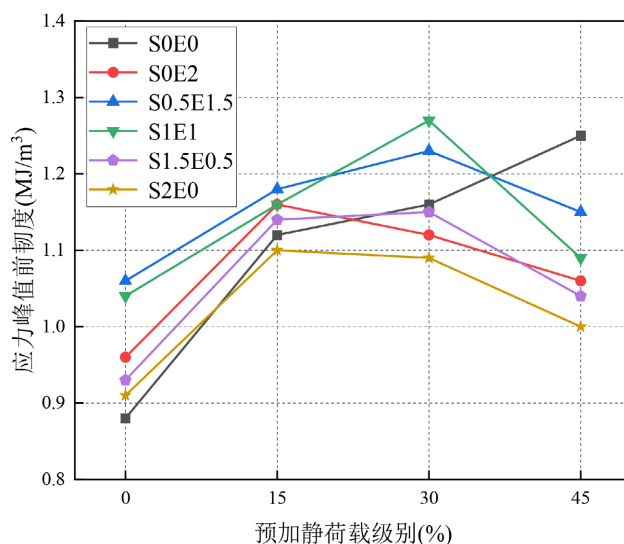
图 5. S/PE-HFRECC 动态抗压强度随预加静荷载级别的变化

在各级别预加静荷载作用下,SOE0 试件的动态抗压强度高于五种有纤维掺入的试件。该现象的原因可解释为纤维的掺入使试件内部产生空隙,造成试件内部结构的不均匀,当静荷载作用时,试件内部产生的损伤相比 SOE0 试件会更为严重,因此静动组合加载下 SOE0 试件的动态抗压强度高于其他类型试件。随着钢纤维体积掺量的增加和 PE 纤维体积掺量的减少,动态抗压强度整体呈现减小的趋势。30% 级别的预加静荷载作用下,S1E1、S1.5E0.5 和 S2E0 的动态抗压强度相比 S0.5E1.5 分别降低了 1.6%、2.4% 和 2.7%; 45% 级别的预加静荷载作用下,S1E1、S1.5E0.5 和 S2E0 的动态抗压强度相比 S0.5E1.5 分别降低了 2.3%、3.6% 和 5.4%。由于钢纤维的弹性模量远大于基体材料,当静荷载作用时,部分钢纤维与基体的粘结发生破坏,钢纤维会挤破基体材料,从而在试件内部造成初始损伤。随着钢纤维含量的增加,损伤程度加重,试件的动态抗压强度呈现逐渐减小的趋势。另一方面,掺有两种纤维的 S0.5E1.5、S1E1 和 S1.5E0.5 试件的动态抗压强度均高于掺有单种纤维的 S2E0 和 SOE2 试件,即相较于单种纤维的掺入,钢-PE 混杂纤维对材料产生的动态抗压强度劣化效应更弱。

### 3.3. 动态应力峰值前韧度

在材料的高速动载试验中,材料的韧性与耗能能力也需要关注,该项性能可用韧度表征。韧度代表

了材料在冲击荷载作用下到失效为止吸收能量的能力，通常用于表征材料在失效前的韧性和耗能能力。本文中采用动态应力峰值前韧度，即材料应力-应变曲线在峰值应力点前所围成的面积来衡量 ECC 在静动组合加载下的能量吸收能力。当加载速率为 10.5 m/s 时，不同级别预加静荷载作用下各类试件动态应力峰值前韧度的变化如图 6 所示。由图可知，掺有纤维的各类试件的应力峰值前韧度均随预加静荷载级别的提升呈现先增大后减小的趋势，但是变化趋势的转折点对应的静荷载级别不同，预加静荷载对 ECC 力学性能有着弱化和强化的两方面作用。较小级别静态荷载的施加虽然会对材料产生少量初始损伤，但更多的是压密材料，从而限制裂缝发展，提高材料的强度和延性，使材料的韧度提高。随着预加静荷载级别的提高，初始损伤程度逐渐加重，静荷载对材料的弱化作用逐渐大于强化作用，使材料韧性降低，应力峰值前韧度相应减小。



**Figure 6.** Changes of pre-peak stress toughness of S/PE-HFRECC with the level of pre-static load  
**图 6.** S/PE-HFRECC 应力峰值前韧度随预加静荷载级别的变化

掺有单一纤维的 S0E2 和 S2E0 试件在 15% 级别的预加静荷载时应力峰值前韧度最高，掺有钢-PE 混杂纤维的 S0.5E1.5、S1E1 和 S1.5E0.5 试件在 30% 级别的预加静荷载时的应力峰值前韧度最高。该现象表明在静动组合加载下，钢-PE 混杂纤维相比单一纤维对 ECC 韧性的提升更有利。相较于有纤维掺入的试件，S0E0 试件内部孔隙更少，预加静荷载对其带来的损伤相对较小，因此 S0E0 试件的应力峰值前韧度随着预加静态荷载级别的提升而逐级增大。PE 纤维相较于钢纤维在对 ECC 韧度提升方面更具优势，15% 级别预加静荷载下 S0.5E1.5、S1E1、S1.5E0.5 和 S0E2 的应力峰值前韧度相较于 S2E0 分别提高了 7.3%、5.5%、3.6% 和 5.5%，30% 与 45% 级别预加静荷载下这几类试件的应力峰值前韧度也大于 S2E0 试件。一方面是因为 PE 纤维的桥接作用能有效抑制微裂纹的发展，增强了材料的韧性，另一方面是因为单掺钢纤维试件在承受静态荷载作用时会产生更多的初始损伤，进而降低试件的抗冲击能力。

#### 4. 结论

本文应用可预先施加静荷载的分离式霍普金森压杆装置，开展了静动组合加载条件下钢-PE 混杂纤维水泥基复合材料的动态压缩试验，预加静荷载级别分别取试件静态抗压强度的 0%、15%、30% 和 45% 四个级别。研究了预加静荷载级别对材料的动态抗压强度、应力峰值前韧度和动力增长因子的影响，基于试验结果，得到以下主要结论：

1) 随着预加静荷载级别的提升,材料的动态抗压强度表现出先增大后减小的规律,较小级别的预加静荷载会为试件强度带来一定的强化作用。静动组合加载下,基体试件的动态抗压强度最大,试件的动态抗压强度随着钢纤维体积掺量的增加而降低。相较于单一纤维的掺入,钢-PE 混杂纤维的掺入会产生更弱的材料强度劣化。

2) 材料的动态峰值应变随预加静荷载级别的提高而增大,静态荷载的施加有效限制了试件的扩张,控制裂缝的张开程度,从而在一定程度上改善了试件的动态脆性破坏性能,提高了变形能力。

3) 随着预加静荷载级别的提升,水泥基体试件的应力峰值前韧度逐级提高,掺有纤维的各类试件应力峰值前韧度先增大后减小。钢-PE 混杂纤维相比单一纤维对材料韧性的提升更有利,PE 纤维的掺入可有效抑制微裂纹的扩展,增加材料延性,进而提高韧性。

## 致 谢

感谢北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室开放基金重点项目对本次试验研究的支持,感谢北京工业大学李亮教授对本人的悉心指导,感谢上海师范大学吴俊老师对此次试验提供的帮助,感谢王满师兄对本人论文的修改和完善。最后对本文所引用文献的所有作者表示感谢,感谢你们对本次试验研究提供的理论基础和研究思路。

## 基金项目

国家自然科学基金面上项目(52278474, 52078288);北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室开发基金重点项目。

## 参考文献

- [1] Li, V.C. and Leung, C.K.Y. (1992) Steady-State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **118**, 2246-2264. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1992\)118:11\(2246\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1992)118:11(2246))
- [2] 李亮, 吴文杰, 吴俊, 刘文丽. 水泥基复合材料的研究现状及其在动态冲击领域的应用[J]. 建筑结构, 2018, 48(s1): 545-554.
- [3] 马俊. 纤维增强水泥基复合材料的新发展[J]. 高科技纤维与应用, 2002, 27(6): 14-17.
- [4] Said, S.H., Razak, H.A. and Othman, I. (2015) Strength and Deformation Characteristics of Engineered Cementitious Composite Slabs with Different Polymer Fibres. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **34**, 1950-1962. <https://doi.org/10.1177/0731684415607393>
- [5] Wang, Y.C., Liu, F.C., Yu, J.T., Dong, F.Y. and Ye, J.H. (2020) Effect of Polyethylene Fiber Content on Physical and Mechanical Properties of Engineered Cementitious Composites. *Construction and Building Materials*, **251**, Article ID: 118917. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118917>
- [6] 罗银剑, 李秀地, 蔡涛, 杨谨鸿. ECC 冲击压缩力学特性及耗能机制的试验研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(4): 19-27+64.
- [7] 李亮, 栾贻恒, 吴俊, 杜修力, 吴文杰. 钢网片-聚乙烯纤维增强水泥基复合材料中低速动态拉伸性能试验研究[J]. 材料导报, 2022, 36(5): 53-58.
- [8] 张品乐, 曾靖渊, 胡静, 朱昊天, 陶忠. 钢-PVA 混杂纤维水泥基复合材料抗压力学性能及经济性研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(11): 3827-3835.
- [9] Zhou, Y.W., Xi, B., Yu, Q., Sui, L.L. and Xing, F. (2018) Mechanical Properties of Hybrid Ultra-High Performance Engineered Cementitious Composites Incorporating Steel and Polyethylene Fibers. *Materials*, **11**, Article 1448. <https://doi.org/10.3390/ma11081448>
- [10] Liu, D.W., Yu, J.Q., Qin, F.J., Zhang, K.S. and Zhang, Z.G. (2023) Mechanical Performance of High-Strength Engineering Cementitious Composites (ECC) with Hybridizing PE and Steel Fibers. *Case Studies in Construction Materials*, **18**, e01961. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01961>
- [11] Huo, Y.L., Liu, T.N., Lu, D., Han, X.Y., Sun, H.Y., Huang, J.G., Ye, X.B., Zhang, C.C., Chen, Z.T. and Yang, Y.Z. (2023) Dynamic Tensile Properties of Steel Fiber Reinforced Polyethylene Fiber-Engineered/Strain-Hardening Cementitious

- 
- Composites (PE-ECC/SHCC) at High Strain Rate. *Cement and Concrete Composites*, **143**, Article ID: 105234. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105234>
- [12] 闫东明, 林皋. 不同初始静态荷载下混凝土动态抗压特性试验研究[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 360-364.
- [13] 闫东明, 林皋, 王哲. 变幅循环荷载作用下混凝土的单轴拉伸特性[J]. 水利学报, 2005, 36(5): 593-597.
- [14] 郑丹, 李庆斌. 初始静荷载下的混凝土动力强度研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2009, 7(3): 23-26.
- [15] Zheng, D., Li, Q.B. and Wang, L.B. (2007) Rate Effect of Concrete Strength under Initial Static Loading. *Engineering Fracture Mechanics*, **74**, 2311-2319. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.11.012>
- [16] 马怀发, 陈厚群, 黎保琨. 应变率效应对混凝土动弯拉强度的影响[J]. 水利学报, 2005, 36(1): 69-76.
- [17] 马怀发, 陈厚群, 徐树峰. 预静载作用下混凝土动态强度数值分析[J]. 水利学报, 2012, 43(z1): 37-45.
- [18] 马怀发, 陈厚群, 黎保琨. 预静载作用下混凝土梁的动弯拉强度[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(3): 168-172+178.
- [19] 宋玉普, 吕培印, 侯景鹏. 有侧压混凝土的变速率劈拉强度试验及其破坏准则研究[J]. 水利学报, 2002(3): 1-5.
- [20] Jin, L., Yu, W.X. and Du, X.L. (2020) Effect of Initial Static Load and Dynamic Load on Concrete Dynamic Compressive Failure. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **32**, Article ID: 04020351. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003439](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003439)