

混杂纤维增强应变硬化水泥基复合材料抗弯冲击性能

霍彦霖 孙华阳 刘天安 和怡馨 陈智韬 吕承博 杨英姿

Flexural impact behavior of hybrid fiber-reinforced strain hardening cementitious composites

HUO Yanlin, SUN Huayang, LIU Tian'an, HE Yixin, CHEN Zhitao, LV Chengbo, YANG Yingzi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220623.005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

混杂纤维增强应变硬化水泥基复合材料的压缩本构关系

Compression constitutive relation of hybrid fiber reinforced strain hardening cementitious composites

复合材料学报. 2020, 37(5): 1221–1226 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190823.002>

混杂纤维增强应变硬化水泥基复合材料的拉伸本构关系

Tension constitutive relationship of hybrid fiber reinforced strain hardening cementitious composites

复合材料学报. 2020, 37(7): 1754–1762 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191114.001>

基于数字图像相关的钢纤维增强水泥基复合材料的冲击损伤特性

Impact damage characteristics of steel fiber reinforced cement matrix composites based on digital image correlation

复合材料学报. 2018, 35(5): 1325–1331 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170802.002>

陶瓷/纤维层间混杂复合材料设计制作及抗弹体冲击性能测试

Design and fabrication of ceramic/fiber interlayer hybrid composites and test of projectile impact resistance

复合材料学报. 2021, 38(8): 2684–2693 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210513.008>

混杂配筋钢纤维增强混凝土梁受弯承载力试验及理论计算

Experimental and theoretical calculation on the flexural capacity of steel fiber reinforced concrete beams with hybrid reinforcing bars

复合材料学报. 2020, 37(9): 2348–2357 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200212.003>

单向连续碳纤维-玻璃纤维层间混杂增强环氧树脂基复合材料的力学性能

Mechanical properties of unidirectional carbon fiber-glass fiber hybrid reinforced epoxy composites in interlaminar layer

复合材料学报. 2018, 35(7): 1857–1863 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180402.003>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220623.005

混杂纤维增强应变硬化水泥基复合材料 抗弯冲击性能



分享本文

霍彦霖, 孙华阳, 刘天安, 和怡馨, 陈智韬*, 吕承博, 杨英姿*

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090)

摘 要: 首先研究了在准静态作用下不同纤维掺量及基体强度的混杂纤维增强应变硬化水泥基复合材料 (SHCC) 的抗压和抗弯性能。实验结果表明, 混杂钢纤维可大幅提高 SHCC 材料的强度, 其中抗压强度和抗弯强度分别提高了 10.1% 和 13.9%。其次, 采用落锤式冲击系统开展了混杂纤维增强 SHCC 在不同冲击高度下的动态抗弯性能试验。研究发现, 混杂钢纤维的动态抗弯强度比单一纤维 SHCC 提高了 10%~36%, 具有明显的应变率效应。混杂纤维增强 SHCC 能量耗散与弯曲变形之间存在线性关系。最后, 提出利用多维表征雷达图综合评估混杂纤维增强 SHCC 的成本和力学性能, 并建议了最佳配合比。

关键词: 应变硬化水泥基复合材料; 混杂; 钢纤维; 冲击; 抗弯性能; 成本

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)11-5086-12

Flexural impact behavior of hybrid fiber-reinforced strain hardening cementitious composites

HUO Yanlin, SUN Huayang, LIU Tian'an, HE Yixin, CHEN Zhitao*, LV Chengbo, YANG Yingzi*
(Civil Engineering College, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The compressive and flexural properties of hybrid fiber-reinforced strain hardening cementitious composites (SHCC) with different fiber volume fractions and matrix strengths under quasi-static effects were firstly studied. The experimental results show that the hybrid steel fibers can significantly improve the strength of SHCC materials, in which the compressive strength and flexural strength are increased by 10.1% and 13.9%, respectively. Subsequently, dynamic flexural performance tests of hybrid fiber-reinforced SHCC at different impact heights were carried out using a drop hammer impact system. It is found that the dynamic flexural strength of hybrid steel fibers increases by 10%-36% compared with single-fiber SHCC, with a significant strain rate effect. A linear relationship exists between energy dissipation and bending deformation of hybrid fiber-reinforced SHCC. Finally, this paper proposes a comprehensive evaluation of the cost and mechanical properties of hybrid fiber-reinforced SHCC using a five-dimensional characterization radar plots, and suggests the optimal mix ratio.

Keywords: strain hardening cementitious composites; hybrid; steel fiber; impact; flexural properties; cost

应变硬化水泥基复合材料 (Strain hardening cementitious composites, SHCC) 是一种具有伪应变硬化行为的高延性纤维增强水泥基复合材料, 以其独特的多缝开裂性能引发了众多研究者的广泛关注^[1-6]。传统的 SHCC 通常采用聚乙烯醇 (Polyvinyl alcohol, PVA) 纤维和聚乙烯 (Polyethy-

lene, PE) 纤维等柔性纤维作为增强材料, 极限拉伸应变可达 3%~8%, 且具有良好的裂缝自控制能力 (裂缝宽度小于 200 μm)^[3, 7-10]。但是目前 SHCC 材料仍未大范围推广应用, 其原因主要有两个: 一是其成本较高。SHCC 每立方米成本约 5 000 元, 是普通商品混凝土材料的 6~10 倍。其中纤维的价

收稿日期: 2022-05-09; 修回日期: 2022-05-28; 录用日期: 2022-06-09; 网络首发时间: 2022-06-24 14:52:16
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220623.005>
基金项目: 国家自然科学基金 (52178797)
通信作者: 陈智韬, 博士, 研究方向为高性能纤维增强复合材料 E-mail: rainczt@hotmail.com;
杨英姿, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为高性能纤维增强复合材料 E-mail: zyyang@hit.edu.cn
引用格式: 霍彦霖, 孙华阳, 刘天安, 等. 混杂纤维增强应变硬化水泥基复合材料抗弯冲击性能 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5086-5097.
HUO Yanlin, SUN Huayang, LIU Tian'an, et al. Flexural impact behavior of hybrid fiber-reinforced strain hardening cementitious composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(11): 5086-5097(in Chinese).

格尤为昂贵，约占总成本 60%~80%^[11-12]；二是其强度较低。由于 PVA、PE 等柔性纤维对 SHCC 的提高主要在断裂能和韧性方面，其对材料的强度提升并不显著^[13-14]。

基于此，许多学者推荐采用纤维混杂化的手段来解决这两个问题^[3, 15-16]。纤维混杂化是使用两种及两种以上不同类型纤维，使其在不同层次和不同受荷载阶段发挥协同增强效应，达到 1+1>2 的效果。根据机制不同，Banthia 等^[17]将协同作用分为以下三类：(1) 基于纤维本构的混杂化：使用两种不同本构属性的纤维，其中一种纤维的强度和弹性模量较高，可提高复合材料的承载能力，而另一种纤维的延性较大，便于为复合材料在开裂阶段提供韧性；(2) 基于纤维尺寸的混杂化：使用两种不同长度、直径的纤维，其中一种纤维的尺寸较小，可在加载的早期阶段起到控制微裂纹的作用，另一种纤维尺寸较大，便于材料在产生宏观裂缝后起到桥联作用，提高材料的韧性；(3) 基于纤维功能的混杂化：使用两种不同功能的纤维，其中一种是原始纤维，为材料提供强度或韧性，而另一种则是对原始纤维进行改性、加工，便于提供所需的功能特性。

钢纤维 (Steel fiber, SF) 与 PVA 或 PE 纤维的混杂正是基于本构和尺寸效应。SF 的强度和弹性模量相对较高，长度和直径较大，PVA 和 PE 纤维伸长率较大，韧性良好，长度和直径较小。二者之间性能互补，发挥“正混杂效应”。近年来，国内外学者对 SF 和 PVA 或 PE 纤维混杂增强 SHCC (SF-PVA/SHCC、SF-PE/SHCC) 的设计方法和理论研究已取得丰富的成果^[18-19]。张聪课题组^[20-21]通过开展 SF-PVA/SHCC 单轴压缩和拉伸性能试验研究，提出了准静态下混杂纤维增强 SHCC 的压缩和拉伸本构关系。Fan 等^[22]研究发现 SHCC 中辅掺 SF 有助于提高初裂强度并降低裂缝宽度，且 SF 适合在低水胶比材料中应用。Liu 等^[19]通过对 SF-PE/SHCC 的试验研究，结合裂纹饱和指数和

伪应变硬化 (PSH) 性能指标，提出了一种实用的混杂纤维设计理论。目前关于混杂纤维增强 SHCC 的研究主要是针对耐久性能和静态荷载作用下的基本力学性能。在冲击性能方面，现有的文献中，对于抗压冲击已有一些较系统的研究。Lu 等^[23]通过改进的夏比摆锤试验对混杂纤维 SHCC 进行冲击试验，发现混杂纤维 SHCC 较普通 SHCC 成本低且抗压冲击性能良好。Ali 等^[24]通过将形状记忆合金 (Shape memory alloys, SMA) 与 PVA 纤维混杂掺入，发现 SMA 显著提高了 SHCC 的抗压冲击性能等。然而，对于抗弯冲击的研究目前仅有普通混凝土^[25]和超高韧性混凝土^[26]的相关文献，对于混杂纤维增强 SHCC 的研究极少。同时，SHCC 在用于桥面连接板和连接梁等结构构件时，通常会承受很大的弯曲载荷和冲击作用，因此其抗弯性能的研究至关重要。

鉴于此，本文拟开展在准静态和落锤冲击下，不同纤维掺量和不同基体强度的混杂增强 SHCC 抗弯性能的试验研究，并进一步通过对荷载-挠度曲线及能量的分析，探索混杂纤维的协同效应，分析 SHCC 力学性能与抗弯冲击性能，以期对混杂纤维增强 SHCC 的研究和应用提供基础数据。

1 试验材料及方法

1.1 原材料

本试验制备的水泥砂浆基体所需材料包括普通硅酸盐水泥、粉煤灰、硅灰和精细石英砂。水泥为天鹅牌 P·O 42.5 水泥，产自哈尔滨亚泰集团；粉煤灰和硅灰分别由哈尔滨双达电力厂和挪威埃肯公司提供，主要化学成分如表 1 所示；石英砂由哈尔滨李想水处理公司提供，粒径为 200~380 μm，平均粒径为 300 μm，密度为 2.4 kg/m³。

选用 3 种纤维，其中两种为柔性高分子纤维，分别是日本 Kuraray (可乐丽) 生产的 K-II 型 PVA 纤维和扬州阳泰化工公司生产的 PE 纤维；另一种 SF 由河北致泰公司提供，如图 1 所示。各纤维的基本物理参数如表 2 所示。

表 1 水泥砂浆基体中水泥、粉煤灰和硅灰的基本参数

Table 1 Basic parameters of cement, fly ash and silica fume in cement mortar matrix

Ingredient	SiO ₂ /wt%	Al ₂ O ₃ /wt%	CaO/wt%	Fe ₂ O ₃ /wt%	MgO/wt%	SO ₃ /wt%	Alkali metal oxides/wt%	Loss on ignition/wt%
Cement	21.01	5.48	62.32	3.98	1.73	2.63	0.50	1.60
Fly ash	66.57	18.95	3.09	4.40	1.22	0.31	1.99	2.58
Silica fume	90.57	0.77	0.33	1.74	1.68	0.40	–	1.70

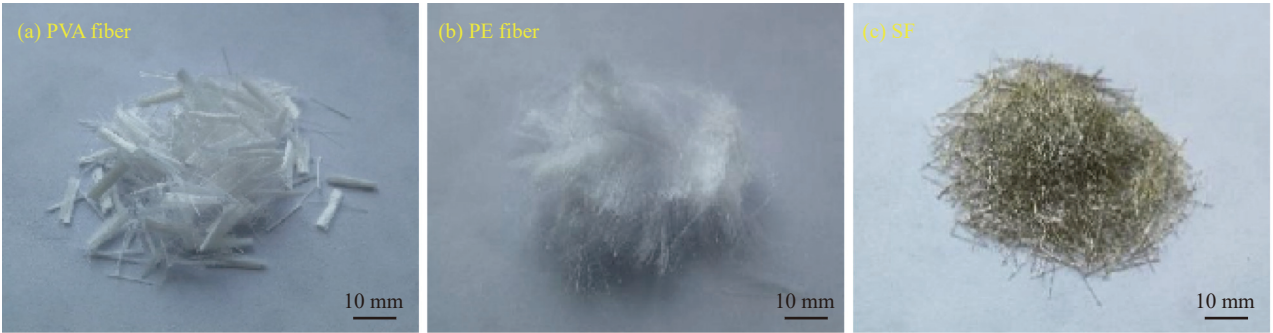


图1 聚乙烯醇纤维 (PVA) (a)、聚乙烯纤维 (PE) (b) 和钢纤维 (SF) (c) 的形貌对比

Fig. 1 Comparison of morphology for polyvinyl alcohol fiber (PVA) (a), polyethylene fiber (PE) (b) and steel fiber (SF) (c)

表 2 PVA、PE 和 SF 的物理性能参数
Table 2 Physical properties of PVA, PE and SF

Fiber	Diameter/ μm	Length/mm	Tensile strength/MPa	Young's modulus/GPa	Elongation/%	Density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
PVA	39	12	1 600	42	6.00	1.30
PE	24	18	3 000	110	2.42	0.97
SF	150	13	2 850	220	4.00	7.80

1.2 试验配合比及试件制作

为满足不同工况的需求，设计了 C50 和 C100 两种强度等级的 SHCC。文献研究指出 [7, 27-28]，SHCC 实现应变硬化性能的纤维临界体积掺量为 2vol%。因此，本试验纤维的基准掺量定为 2vol%，

并对纤维的混杂效应进行进一步研究。具体的试验配合比和编号如表 3 所示。值得一提的是，配合比中无 2%HPE-0.25%SF/SHCC，是由于在制备过程中发现，水灰比较低且纤维掺量较大时，SHCC 无法正常搅拌，出现明显的纤维结团现象。

表 3 混杂纤维增强应变硬化水泥基复合材料 (SHCC) 试件编号及配合比设计

Table 3 Specimen codes and mix design of hybrid fiber reinforced strain-hardening cementitious composites (SHCC)

Number	Cement/ wt%	Fly ash/ wt%	Silica fume/ wt%	Sand/ wt%	Water/ wt%	Fiber content/vol%			Superplasticizer/ wt%
						PVA	PE	SF	
1.5%PVA-0.5%SF/SHCC	0.3	0.6	0.1	0.2	0.25	1.5	-	0.50	0.010
2%PVA/SHCC	0.3	0.6	0.1	0.2	0.25	2.0	-	-	0.010
2%PVA-0.25%SF/SHCC	0.3	0.6	0.1	0.2	0.25	2.0	-	0.25	0.010
1.5%PE-0.5%SF/SHCC	0.3	0.6	0.1	0.2	0.25	-	1.5	0.50	0.010
2%PE/SHCC	0.3	0.6	0.1	0.2	0.25	-	2.0	-	0.010
2%PE-0.25%SF/SHCC	0.3	0.6	0.1	0.2	0.25	-	2.0	0.25	0.010
1.5%HPE-0.5%SF/SHCC	0.4	0.5	0.1	0.2	0.20	-	1.5	0.50	0.012
2%HPE/SHCC	0.4	0.5	0.1	0.2	0.20	-	2.0	-	0.012

Note: H in the number (HPE) indicates high strength (C100).

试件制备分为以下几步：(1) 搅拌：首先将石英砂和胶凝材料干拌 2 min，加入减水剂和水，并将浆体搅拌均匀；(2) 缓慢加入纤维，其顺序为先加 PVA 或 PE 纤维，最后加 SF，整体搅拌过程在 30 min 内完成；(3) 浇筑：将新拌 SHCC 浇筑到不同试模中，室温条件下养护 24 h 后脱模；(4) 养护：强度等级为 C50 的 SHCC 在 60℃ 下蒸养 1 天后放入温度为 (20±2)℃、湿度为 95% 的养护室中继续养护 27 天，强度等级为 C100 的 SHCC 在 90℃ 下

蒸养 7 天后放入温度为 (20±2)℃、湿度为 95% 养护室中继续养护 21 天。

1.3 试验方法

根据日本土木工程学会规范 [29]，SHCC 抗压强度试验采用 50 mm×50 mm×50 mm 的立方体试件。每组配合比有 6 个试件。试验设备采用上海华龙 1 000 kN 微机控制电液伺服万能试验机，抗压加载速率为 2.4 kN·min⁻¹。

三点弯曲试验中试件的尺寸如图 2 所示。试

验采用 100 kN 微机控制电子万能试验机 (WDW-100 L, 济南恒瑞金试验机有限公司), 利用试验机自带的荷载和位移传感器采集试验力和试件跨中挠度。

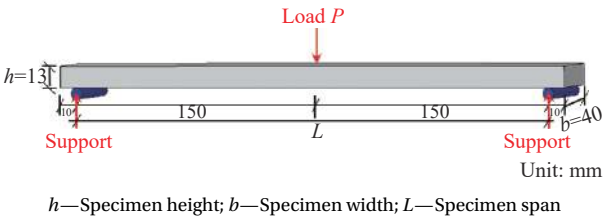


图 2 混杂纤维增强 SHCC 准静态三点弯曲试验示意图

Fig. 2 Quasi-static three-point bending test diagram of hybrid fiber reinforced SHCC

落锤冲击试验的试件尺寸和准静态三点弯曲相同。试验方法参考文献 [25-26]。加载装置采用济南众标仪器设备有限公司 JLW-100 落锤试验机, 落锤最大下落高度为 1.0 m, 落锤质量为 4.8 kg。力传感器安装于落锤锤头上, 量程为 60 kN。所有试件均采用了简支撑, 这与准静态弯曲试验中使用的支撑条件相同。在试件的跨中位置粘有一个加速传感器, 量程为 50 000 m·s⁻²。对加速度数据进行二次积分可以得到试件跨中的挠度, 如以下两式所示:

$$\dot{u}(t) = \int \ddot{u}(t) dt \tag{1}$$

$$u(t) = \int \dot{u}(t) dt \tag{2}$$

式中: $\ddot{u}(t)$ 、 $\dot{u}(t)$ 和 $u(t)$ 分别是加速度、速度和跨中挠度; t 为冲击时间。

动态数据采集系统为 DEWESoft, 采样频率为 20 kHz。试验装置示意图如图 3 所示。

为了研究冲击速度对 SHCC 冲击弯曲性能的

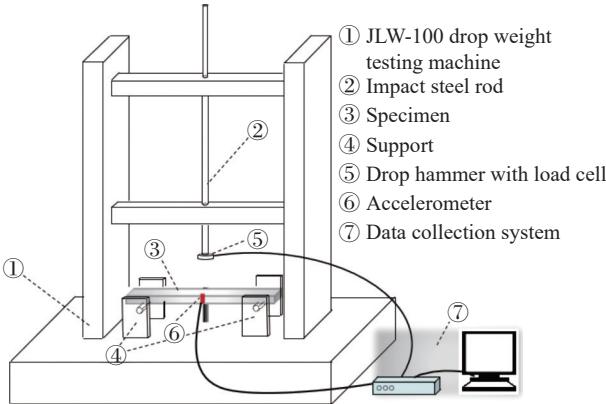


图 3 混杂纤维增强 SHCC 落锤式抗弯冲击试验装置

Fig. 3 Drop hammer bending impact test machine of hybrid fiber reinforced SHCC

影响, 采用 50 mm、100 mm 和 200 mm 三个冲击高度对 C50 强度等级的 SHCC 进行冲击弯曲试验, 采用 100 mm、200 mm 和 300 mm 三个冲击高度对 C100 强度等级的 SHCC 进行冲击弯曲试验。

2 结果与讨论

2.1 混杂纤维增强 SHCC 抗压强度

图 4 为混杂纤维增强 SHCC 的抗压强度。从整体上来看, 除 2%PE-0.25%SF/SHCC 外, 纤维的掺入对基体的抗压强度略有提高。当纤维总量为 2vol% 时, 混杂 SF 有助于提高 SHCC 抗压强度。但同时发现, 在 PVA 或 PE 纤维 2vol% 掺量的基础上, 辅掺 0.25vol% 的 SF 并没有进一步提高材料的抗压强度。这是由于当适量的纤维掺入, 在纤维的桥联作用下, 材料的变形受到约束, 抗压强度得到提高。但纤维掺量过多时, 纤维的分散受到阻碍, 桥联作用不能完全发挥。而且纤维掺量过多还会引发工作性的降低, 从而导致基体中缺陷增多, 进而降低材料的抗压强度。

对比 C50 和 C100 两个强度等级发现, 2vol%PE 纤维掺量下, HPE/SHCC 的抗压强度较基体提高了 9.67%, 这个幅度明显高于 C50 强度等级的 SHCC。同时, 对比 1.5%HPE-0.5%SF/SHCC 和 1.5%PE-0.5%SF/SHCC 也可以发现, 在 C100 强度等级中混杂 0.5vol%SF 对强度的提高更显著, 提高幅度较 C50 强度等级的 SHCC 大 10.1%。这可能是由于在高强基体中, 材料更致密, 对纤维的包裹也更加

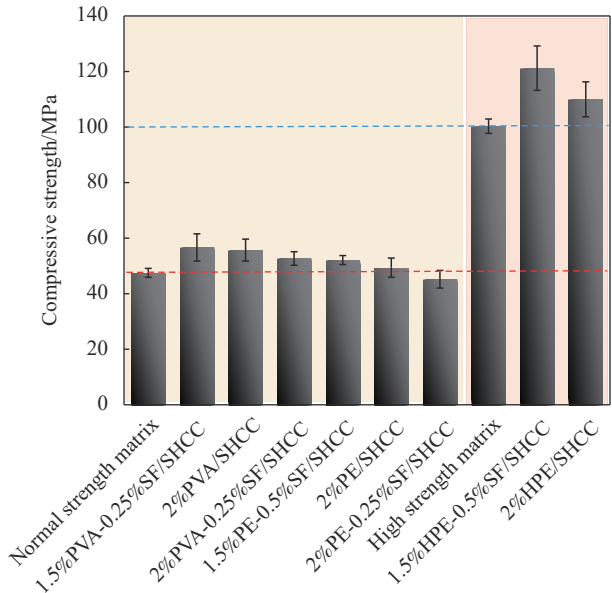


图 4 混杂纤维增强 SHCC 的抗压强度

Fig. 4 Compressive strength of hybrid fiber reinforced SHCC

充分，导致纤维与基体之间的摩擦粘结作用力进一步提高。

2.2 混杂纤维增强 SHCC 准静态弯曲性能

与抗压性能相比，弯曲荷载-挠度曲线变化较大。这是由于试件在开裂后的弯曲性能(硬化和软化区域)与纤维桥联能力密切相关，荷载-挠度曲线受到纤维分散、取向影响较大。虽然采用了相同的制备方法，但由于一些不确定性，例如纤维相互作用，纤维在基体中的分布可能会有变化。为了更好地研究混杂纤维的作用，本文对同一配合比的 3 个试件的荷载-挠度曲线进行了平均化处理^[30-31]，以 2%PVA/SHCC 为例，如图 5 所示。

图 6 为准静态三点弯曲试验中的荷载-挠度曲线，其中弯曲强度根据下式计算得到：

$$f_{MOR} = 3P_{MOR}L/2bh^2$$
 (3)

式中： f_{MOR} 为弯曲强度 (MPa)； P_{MOR} 为弯曲荷载的峰值 (N)； L 、 b 和 h 分别为试件的跨距、宽和高 (mm)。

韧性指数 T 通过荷载-挠度曲线中峰值荷载和

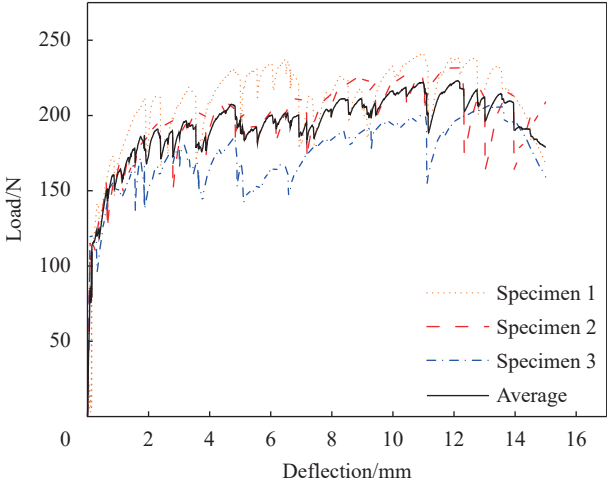


图 5 2%PVA/SHCC 的平均荷载-挠度曲线

Fig. 5 Average load-deflection curves of 2%PVA/SHCC

初裂荷载下覆盖的面积之比得到。在相同纤维掺量下，PE/SHCC 的挠度明显优于 PVA/SHCC，大约是其 2~3 倍。这得益于 PE 纤维较高的强度和弹性模量，在受弯过程中不会发生断裂，纤维的桥联作用可以完全发挥出来。

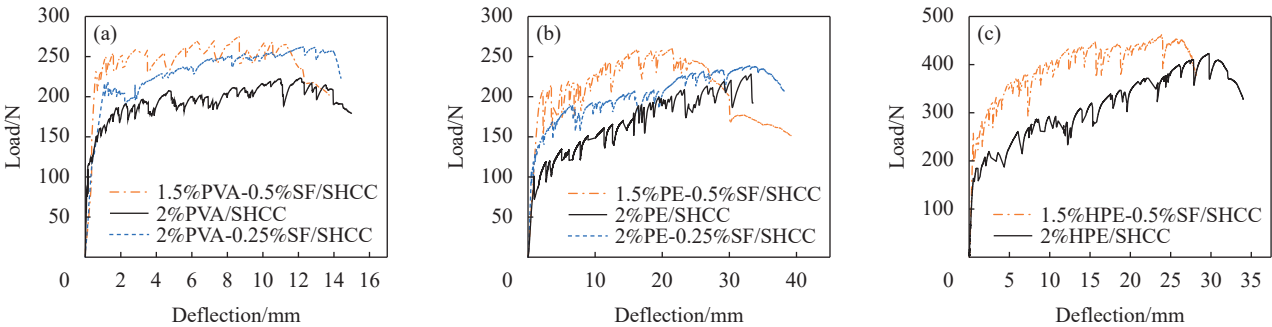


图 6 准静态下混杂纤维增强 SHCC 弯曲荷载-挠度曲线

Fig. 6 Bending load-deflection curve of hybrid fiber-reinforced SHCC under quasi-static condition

结合表 4 中的数据可以看出，当纤维总体积掺量为 2vol% 时，SF 对于 PVA 或者 PE 纤维的部分取代均大幅提高了试件的初裂荷载和抗弯强度。尤其是 1.5%PE-0.5%SF/SHCC，相较于 2%PE/SHCC，其初裂荷载提高了 89.6%，其峰值荷载提高了 13.9%。但对比二者的韧性指数，混杂 SF 的 SHCC 有所降低。在 PVA 或 PE 纤维 2vol% 的基础上，掺入 0.25vol%SF 可以显著提高初裂和弯曲强度。由于相较于 PVA 和 PE 纤维，SF 属于刚性纤维，自身强度较高，弹性模量较大，因此不论基体是否发生开裂，在受弯作用时 SF 可以承受一定的弯矩，同时根据 Ahmed 等^[32]的理论发现，SF 可以增加

材料的应力强度因子，从而提高初裂荷载和抗弯承载力。而 PVA 和 PE 纤维弹性模量较低，只有在基体开裂后通过桥联能力发挥作用，对开裂前的强度贡献极少。同时发现，辅掺 0.25vol%SF 后，SHCC 的韧性指数有所降低，这是由于韧性指数是通过断裂能和初裂能的比值得到，SF 的加入对初裂能的提升更高，因此韧性指数出现了下降。但整体的断裂能是提升的，说明辅掺 SF 可以吸收更多的能量，提高韧性。

综上，在混杂纤维体系中，PVA 和 PE 纤维起到了增加韧性的作用，SF 起到了提高强度的作用，二者性能互补，混杂纤维可实现 SHCC 同时具备

表 4 混杂纤维增强 SHCC 准静态弯曲试验结果

Number	P_{LOP}/N	P_{MOR}/N	f_{MOR}/MPa	δ_{MOR}/mm	T	$E_{LOP}/(10^{-3}J)$	$E_{MOR}/(10^{-3}J)$
1.5%PVA-0.5%SF/SHCC	208.4	274.7	18.3	8.7	42.8	48.5	2 075.7
2%PVA/SHCC	123.3	223.2	14.9	12.1	61.7	37.7	2 325.1
2%PVA-0.25%SF/SHCC	205.1	262.3	17.5	12.3	47.7	58.3	2 781.9
1.5%PE-0.5%SF/SHCC	189.0	260.2	17.3	21.5	76.1	61.1	4 649.1
2%PE/SHCC	99.7	228.4	15.2	33.2	92.5	58.3	5 392.8
2%PE-0.25%SF/SHCC	138.6	238.5	15.9	33.0	81.6	79.7	6 503.4
1.5%HPE-0.5%SF/SHCC	252.9	462.2	30.8	23.9	155.6	97.9	15 233.2
2%HPE/SHCC	166.4	422.8	28.1	30.5	193.3	78.7	15 212.7

Notes: P —Applied load; f —Flexural stress; δ —Deflection; T —Toughness; E —Energy; LOP—Limit of proportionality (first-cracking point); MOR—Modulus of rupture (peak point).

高强高韧的特性。

2.3 混杂纤维增强 SHCC 抗弯冲击性能

2.3.1 稳定性分析

落锤试验冲击过程复杂，冲击力极值和加载时间会受多种因素影响。为了保证试验的稳定性，需要对整个体系做重复性检测和稳定性评估。由于落锤试验属于碰撞试验，数据的采集需要通过传感器获取，可利用动量守恒定律对传感器做稳定性评估。动量-冲量的转换关系可以用来推测加载过程中的反弹程度。其中，动量可以通过能量守恒计算得到，而冲量则可以通过荷载-时程曲线的积分 $\int P(t)dt$ 得到。图 7(a)为落锤从 250 mm 高度下落的冲击荷载-时程曲线，3 次试验中冲击荷载随时间的变化有很好的重复性。图 7(b)为冲量-时程曲线，冲量略高于理论冲量值(即初始动量)，这是由于撞击过程中有一定的反弹，但整体上系统的重复性和稳定性得到了保证。

2.3.2 加速度信号处理

落锤试验中 SHCC 试件跨中的挠度由传感器测量的加速度时程经过二次积分得到。通常情况下，测量得到的原始信号受测试环境、条件影响，表现出明显的震荡和随机性。以其中一组试验为例，为了消除干扰信号的影响，通过对原始信号的频谱分析，选择 4 000 Hz 为截断频率的低通滤波，如图 8(a)和图 8(b)所示。同时，为了验证滤波的可靠度和有效性，对滤波后的加速度信号进行积分，并和原始信号的积分结果进行对比，如图 8(c)和图 8(d)所示。可以明显地看出滤波后的信号具有良好的重复性，且保留了主要的变形信息。这表明更高频率的信号可以被视为噪声。在后面的分析中，加速度信号均进行 4 000 Hz 的低通滤波。

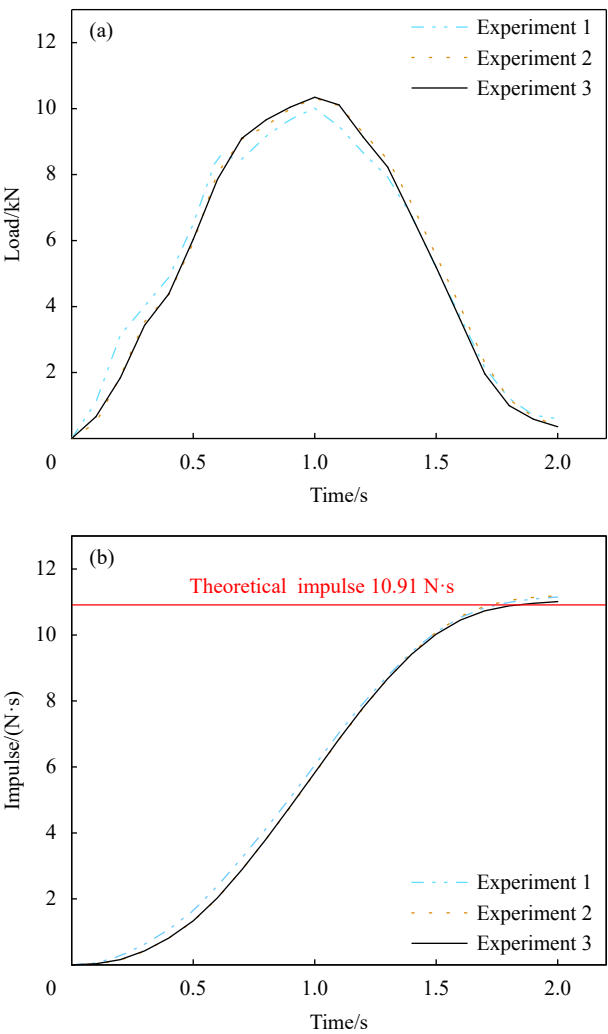


图 7 混杂纤维增强 SHCC 预实验冲击-时程曲线：(a) 荷载-时程曲线；(b) 冲量-时程曲线

Fig. 7 Pre-experimental impact time curves of hybrid fiber-reinforced SHCC: (a) Load-time curve; (b) Impulse-time curve

2.3.3 混杂纤维增强 SHCC 动态荷载-位移曲线

图 9 为落锤冲击作用下各配合比的弯曲荷载-挠度曲线。整体上看，动态荷载-位移曲线虽然有

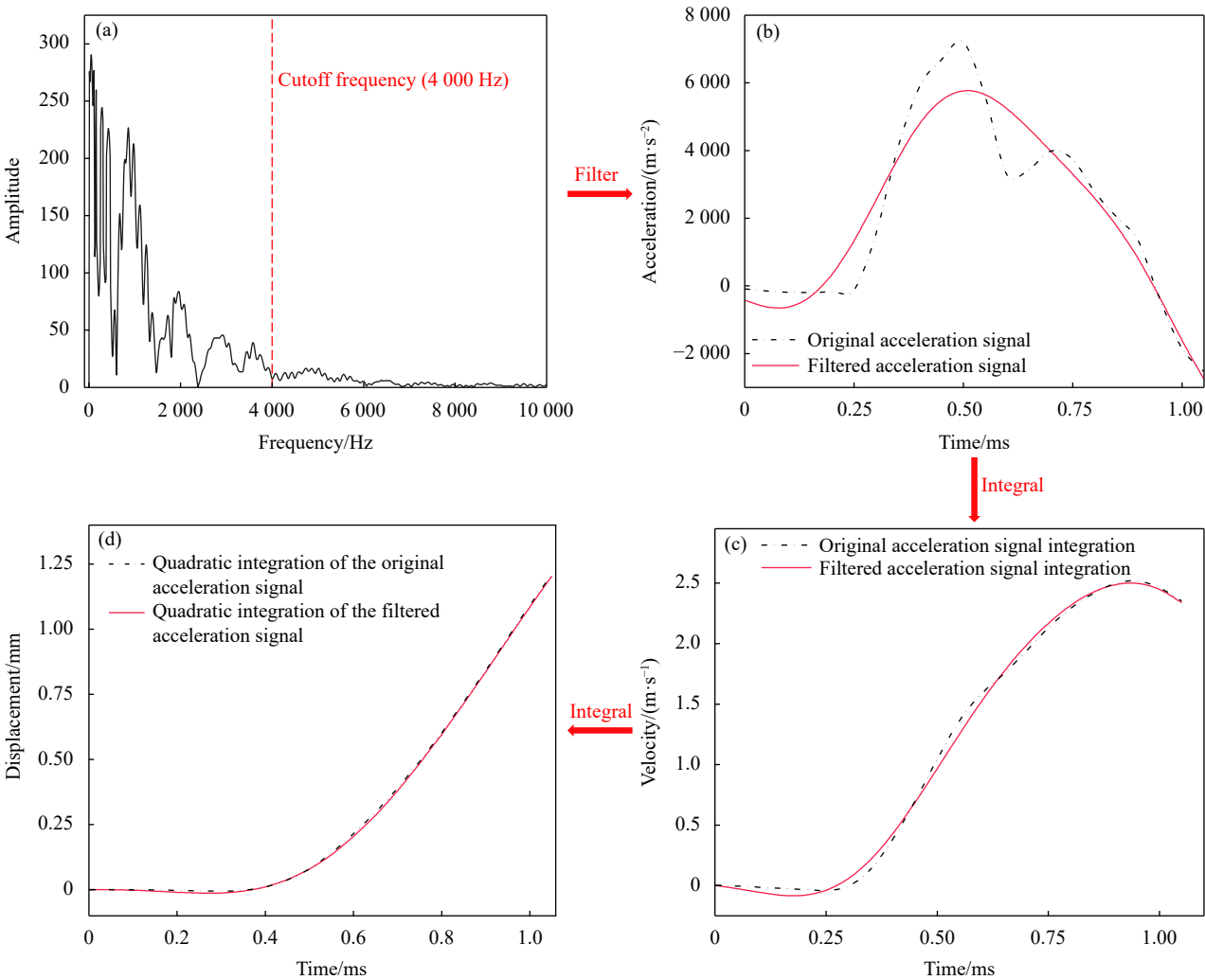


图8 混杂纤维增强 SHCC 加速度时程频率分析和低通滤波: (a) 频谱分析; (b) 加速度信号和滤波结果; (c) 竖向速度-时程结果; (d) 竖向位移-时程结果

Fig. 8 Acceleration-time frequency analysis and low-pass filtering of hybrid fiber-reinforced SHCC: (a) Spectrum analysis; (b) Acceleration signal and filtering results; (c) Vertical velocity-time results; (d) Vertical displacement-time results

较大的震荡，但在初始峰值荷载过后，动态曲线均是在静态曲线附近上下波动。这可能是由于落锤与试件接触的瞬间，会产生一个较大的冲击力值即初始峰值荷载。之后，落锤与试件共同向下移动，此时试件的受力形式与准静态相仿。由于应变率效应，此时试件发生变形所承受的荷载略高于准静态试验。值得一提的是，落锤与试件接触之后会发生反弹现象，这也是曲线出现剧烈波动的原因之一。而 SHCC 在荷载作用下特有的多缝开裂性能则是另一原因。

首先，相同纤维掺量下，PVA/SHCC 的峰值荷载明显大于 PE/SHCC，且延性较低，这与静态试验结果相同。这是由于在冲击荷载作用下，PE/SHCC 利用自身较大的变形能力将外力功吸收，而 PVA/SHCC 由于延性较差，冲击力作用时间短，

根据动量守恒定理，承受的力会更大。表 5 为动态抗弯试验的结果，可以发现，当掺入 SF 后，相同体积掺量下，混杂纤维增强 SHCC 的动态抗弯强度较单掺 PVA 或 PE 更高。1.5%PVA-0.5%SF/SHCC、1.5%PE-0.5%SF/SHCC 和 1.5%HPE-0.5%SF/SHCC 较相应的单纤维组高 10%~36%。同样，在 2vol%PVA 或 PE 纤维掺量的基础上辅掺 0.25vol%SF，动态抗弯强度也明显提高。通过 SF 与 PVA、PE 混杂，SF 可以为水泥基体提供微加筋作用，PVA 或 PE 在承受冲击荷载作用过程中产生弹性变形，发挥类似弹簧的缓冲效果，二者之间发挥协同效应，有利于耗散冲击动能，从而提高 SHCC 的抗冲击性能。

从表 5 给出的动态增强因子 (Dynamic increasing factor, DIF) 值可以看出，在相同的冲

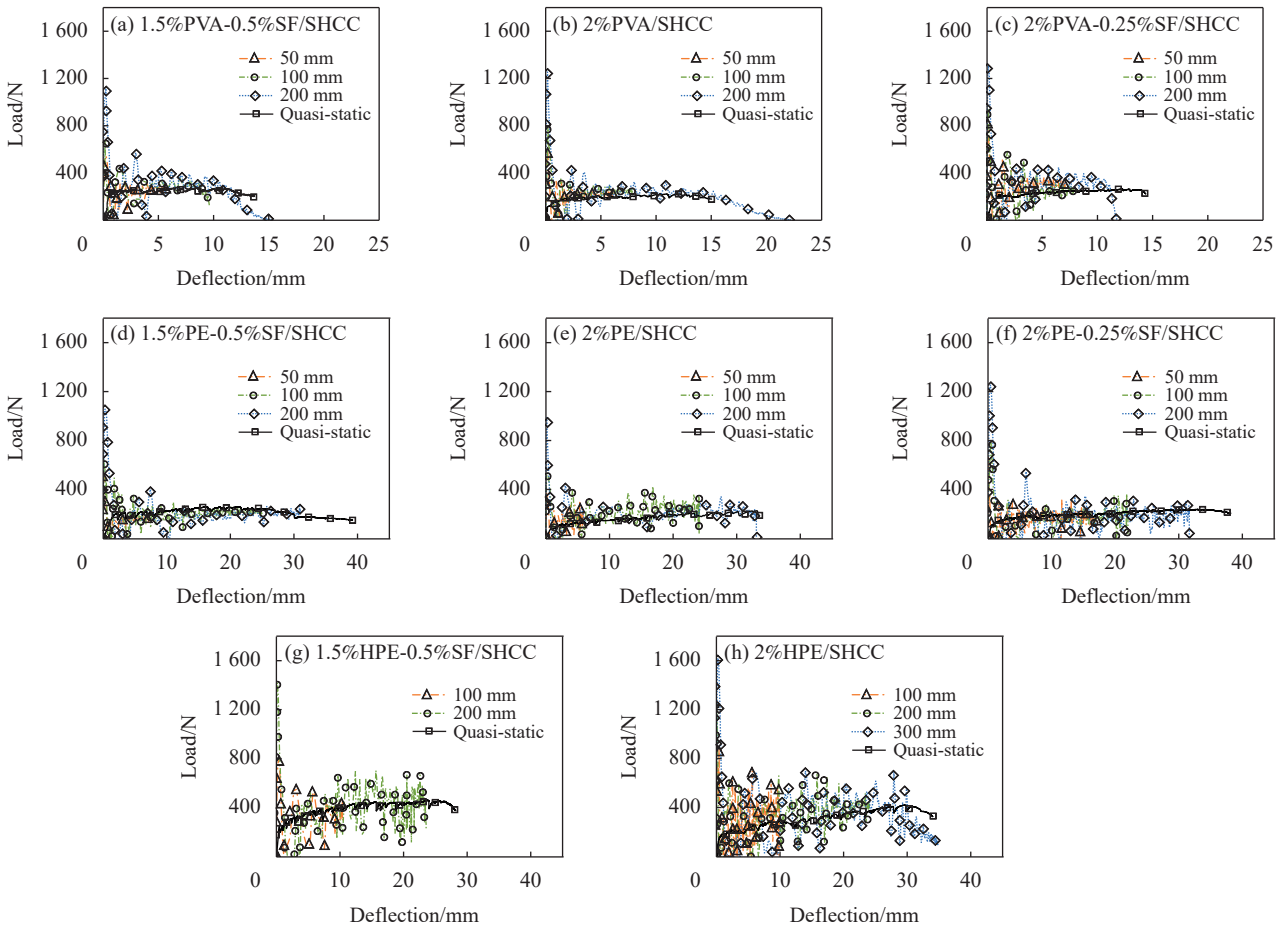


图9 动态冲击作用下混杂纤维增强 SHCC 弯曲荷载-挠度曲线

Fig.9 Bending load-deflection curves of hybrid fiber-reinforced SHCC under dynamic impact

击高度下，高强基体的 DIF 值更小，可能是由于孔隙结构和自由水含量影响了应变率敏感性。这可用 Stefan 效应^[33]进行分析。Stefan 效应表示为在两个半径为 R 的平行板之间存在一层薄的粘性薄膜（例如水或油），间隔一定距离 h ，当试图以 dh/dt 的速度分离两个板时，会产生相反的作用力 F 。速度越大，反作用力越大，如下式所示：

$$F = \frac{3\pi\eta R^4}{2h^3} \frac{dh}{dt} \tag{4}$$

式中： R 为平行板的半径； h 为平行板间的间距； η 为流体的黏性系数。

在冲击荷载作用下，孔隙内的自由水由于 Stefan 效应的影响，会提高 SHCC 的强度，且提高的程度随着应变率的增加而增加。高强 SHCC 具有更低的孔隙率和更少的自由水含量，因此 Stefan 效应较普通强度 SHCC 更弱。同时，根据惯性理论，冲击荷载作用时，在惯性效应的影响下，SHCC 处于多轴应力状态。这种围压的作用

会使 SHCC 中原生的孔隙和微裂纹对强度的影响减少。而在高强 SHCC 中这种原生的缺陷较少，因此惯性效应对高强 SHCC 的提升相对于普通强度 SHCC 来说更低。

2.3.4 混杂纤维增强 SHCC 能量分析

动态冲击作用下，水泥基材料的吸能性能尤为重要。与准静态试验不同，冲击荷载作用下 SHCC 试件内部会产生惯性力和阻尼力。根据动力学中力的平衡关系，内力和外力时刻保持平衡，因此可以利用合外力分析 SHCC 的吸能性能，如下式所示：

$$W = \int P d\delta \tag{5}$$

式中： W 为冲击耗能 (J)； P 为冲击荷载 (N)； δ 为跨中挠度 (m)。

图 10 为动态冲击作用下的外力功-挠度曲线，整体上看，无论是混杂还是单掺纤维，SHCC 的能量吸收和位移均有良好的相关性。拟合曲线的斜率反映了不同试件耗能的效率，可以看出，PE

表 5 混杂纤维增强 SHCC 动态弯曲试验结果

Table 5 Summary of dynamic bending test results of hybrid fiber-reinforced SHCC

Number	Drop height/mm	$P_{MOR,D}/N$	DIF
1.5%PVA-0.5%SF/SHCC	50	592.4	2.16
	100	783.4	3.51
	200	1 252.5	4.56
2%PVA/SHCC	50	543.6	2.44
	100	678.4	3.04
	200	1 116.0	5.00
2%PVA-0.25%SF/SHCC	50	812.0	3.10
	100	982.9	3.75
	200	1 307.3	4.98
1.5%PE-0.5%SF/SHCC	50	519.5	2.00
	100	645.0	2.48
	200	1 057.9	4.07
2%PE/SHCC	50	382.5	1.67
	100	539.1	2.36
	200	989.2	4.33
2%PE-0.25%SF/SHCC	50	688.5	2.89
	100	791.1	3.32
	200	1 054.5	4.42
1.5%HPE-0.5%SF/SHCC	100	809.2	1.75
	200	1 418.9	3.07
	300	-	-
2%HPE/SHCC	100	775.8	1.83
	200	1 252.7	2.96
	300	1 621.5	3.84

Notes: DIF= $P_{MOR,D}/P_{MOR}$; $P_{MOR,D}$ —Dynamic post-cracking load; "-"—Data is not available because accelerometer overrange.

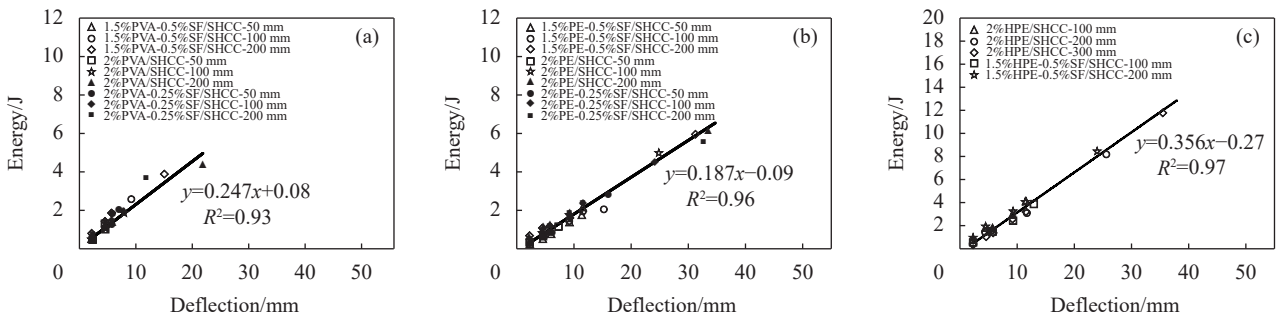


图 10 动态冲击作用下混杂纤维增强 SHCC 的外力功-挠度曲线

Fig. 10 External force work-deflection curves of hybrid fiber-reinforced SHCC under dynamic impact

纤维对应变率的敏感度低于 PVA/SHCC，可能是由于 PE/SHCC 的延性较高，通过多缝开裂的形式实现了对冲击荷载的缓冲，延长了落锤和试件共同作用的时间，根据动量守恒定律，试件所承受的荷载会有所降低。同时，混杂 SF 并没有明显提高 SHCC 的吸能性能，但由于 SF 的应变率敏感性，使 SHCC 在动态变形的早期可以承受更高的荷载，吸收大量的能量。因此，在相同的冲击能作用下，混杂纤维 SHCC 会产生更小的变形，这对于工程应用十分重要。

如图 10(c) 所示，HPE/SHCC 的拟合曲线斜率

更大，表明高强材料的能量吸收效率更高。相同的变形程度下，HPE/SHCC 较 PE/SHCC 的能量吸收量增长约 50.4%。这是由于高强基体的弹性模量大，纤维桥联能力更显著，使 HPE/SHCC 具有更高的能量吸收能力。

2.4 混杂纤维增强 SHCC 基于成本和力学性能的综合评估

SHCC 材料准静态作用下的抗压强度和抗弯强度及动态冲击作用下的峰值荷载和吸能性能是其力学性能的关键指标，成本是 SHCC 材料实际工程应用必须考虑的关键要素。只有当成本和力

学性能相互协调匹配时，SHCC 材料才可能得到大范围的推广应用。

为了综合评估混杂纤维增强 SHCC 的成本和力学性能，本文提出成本、抗压强度、准静态抗弯强度、动态冲击峰值荷载和动态吸能性能的五维表征，如图 11 所示。

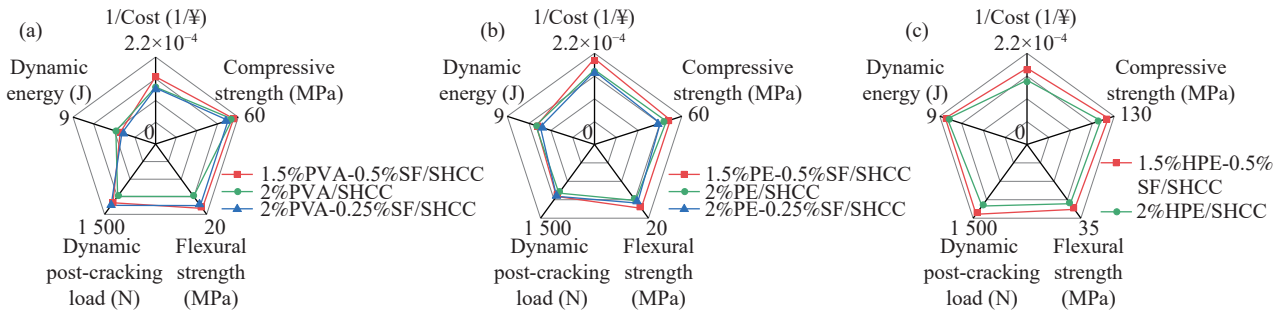


图 11 考虑力学性能和成本的混杂纤维增强 SHCC 五维表征雷达图

Fig. 11 Radar map for five-dimensional evaluation of hybrid fiber-reinforced SHCC considering mechanical properties and cost

表 6 混杂纤维增强 SHCC 各原材料的成本价格

Table 6 Cost of each raw material of hybrid fiber-reinforced SHCC

Ingredients	Cement	Fly ash	Silica fume	Quartz sand	PVA	PE	SF	Superplasticizer
Cost/(¥·kg ⁻¹)	0.5	0.2	1.2	3	200	200	8	40

PVA/SHCC 组、PE/SHCC 组和 HPE/SHCC 组分别如图 11(a)~11(c) 所示。在 PVA/SHCC 组中，虽然动态冲击作用下，混杂纤维增强 SHCC 的吸能性能略低于 2%PVA/SHCC，减小幅度约为 10.87%。但强度指标均大于普通 SHCC。尤其是成本方面，1.5%PVA-0.5%SF/SHCC 较 2%PVA/SHCC 低 15.43%，每立方米价格少 1 072 元，这是一个相当可观的数字。同样，在 PE/SHCC 组中也有相同的规律，混杂纤维增强 SHCC 的成本和强度指标均显著高于普通 SHCC，而冲击下吸能性能有所降低。由于 PE 纤维的密度 0.97 kg·m⁻³ 远低于 PVA 纤维的密度 1.3 kg·m⁻³，相同体积掺量下 PE 纤维的用量小于 PVA 纤维，因此 PE/SHCC 的成本低于 PVA/SHCC。综合考虑成本和力学性能，对 5 个指标进行归一化处理并计算了五维表征图的包络面积，如图 12 所示。C50 强度等级中，1.5%PE-0.5%SF/SHCC 的包络面积最大，综合性能最好，因此在本文中 C50 强度等级 SHCC 中建议使用 1.5%PE-0.5%SF/SHCC。

从图 11(c) 明显看出，1.5%HPE-0.5%SF/SHCC 各项性能指标均高于 2%HPE/SHCC，因此在本文

表 6 给出了 SHCC 各原材料的成本价格。图 11 中，根据原材料的价格 C_i 和各组分每立方米质量占比 M_i ，可由下式计算出各个配合比的成本 C ：

$$C = \sum C_i M_i \tag{6}$$

为了获得各评价指标与成本之间的正相关关系，使用成本的倒数 $1/C$ 进行评估。

中 C100 强度等级 SHCC 中建议使用 1.5%HPE-0.5%SF/SHCC。

综合考虑 5 项指标，建议普通强度和高强度等级的 SHCC 中使用混杂纤维，尽可能地降低成

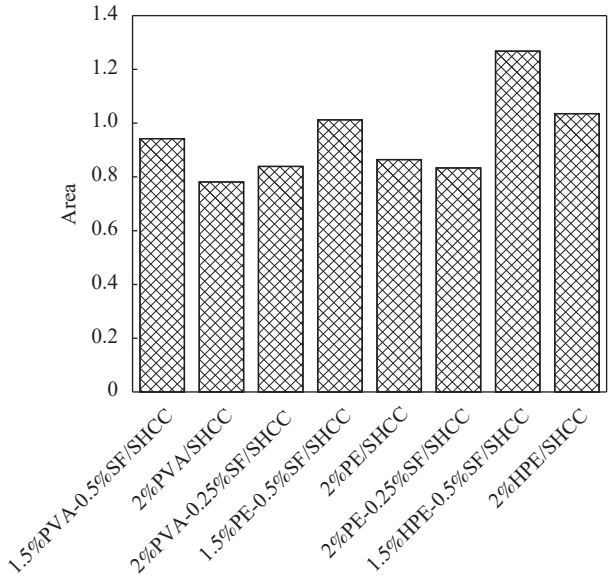


图 12 混杂纤维增强 SHCC 五维表征雷达图归一化后的包络面积

Fig. 12 Normalized envelope area of hybrid fiber-reinforced SHCC five-dimensional characterization radar map

本, 提高性能。SF 的掺量应控制在总体积掺量的 1/4, 同时为了满足高强高韧性, 相较于 PVA 纤维, 建议在混杂纤维体系中使用弹性模量和强度更高的 PE 纤维。

3 结论

(1) 纤维的掺入对水泥基材料的抗压强度略有提高。当纤维总体积掺量 2vol% 时, 混杂钢纤维 (SF) 有助于提高抗压强度, 但当总体积掺量大于 2vol% 时, 辅掺 SF 会使抗压强度有所降低。高强基体中混杂 SF 对强度的提升更显著, 较普通强度基体高 10.1%。

(2) 准静态三点弯曲作用下, 混杂 SF 大幅提高了应变硬化水泥基复合材料 (SHCC) 的强度, 混掺 1.5vol% 聚乙烯 (PE) 纤维和 0.5vol%SF 的 SHCC (1.5%PE-0.5%SF/SHCC) 较 2%PE/SHCC 初裂荷载提高了 89.6%, 峰值荷载提高了 13.9%。但混杂 SF 对韧性略有降低。在混杂纤维体系中, 聚乙烯醇 (PVA) 纤维和 PE 纤维增加韧性的作用与 SF 提高强度的作用互补, 可实现 SHCC 高强高韧的设计。

(3) 动态冲击荷载作用下, 混杂 SF 的 SHCC 的抗弯强度较单掺纤维 SHCC 提高 10%~36%。由于 Stefan 效应和惯性效应, 高强 SHCC 的应变率敏感性低于普通强度 SHCC。

(4) 无论是混杂还是单掺纤维, SHCC 的能量吸收和跨中挠度均有良好的相关性。混杂 SF 使 SHCC 在动态冲击变形的早期可以承受更高的荷载, 吸收大量的能量。混杂纤维发挥协同效应, 有利于耗散冲击动能。高强 SHCC 的能量吸收效率更高, 相同的跨中挠度下, HPE/SHCC(高强) 较 PE/SHCC(普通强度) 的能量吸收量增长约 50.4%。

(5) 综合考虑成本和力学性能各项评价指标, 利用多维表征雷达图提出 C50 强度等级 SHCC 中建议使用 1.5%PE-0.5%SF/SHCC, C100 强度等级 SHCC 中建议使用 1.5%HPE-0.5%SF/SHCC。

参考文献:

[1] CUROSU I, MUJA E, ISMAILOV M, et al. An experimental-analytical scale-linking study on the crack-bridging mechanisms in different types of SHCC in dependence on fiber orientation[J]. *Cement and Concrete Research*, 2022, 152: 106650.

[2] LU D, ZHONG J. Carbon-based nanomaterials engineered cement composites: A review[J]. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 2022, 3(1):1-20.

[3] LIU T, BAI R, CHEN Z, et al. Tailoring of polyethylene fiber surface by coating silane coupling agent for strain hardening cementitious composite[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 278: 122263.

[4] YANG E, LI V C. Strain-rate effects on the tensile behavior of strain-hardening cementitious composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 52: 96-104.

[5] YAO J, LEUNG C K Y. Scaling up modeling of strain-hardening cementitious composites based on beam theory: From single fiber to composite[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 108: 103534.

[6] CUROSU I, LIEBSCHER M, BURK S, et al. Influence of fiber type on the tensile behavior of high-strength strain-hardening cement-based composites (SHCC) at elevated temperatures[J]. *Materials & Design*, 2021, 198: 109397.

[7] MA H, YI C, WU C. Review and outlook on durability of engineered cementitious composite (ECC)[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 287: 122719.

[8] YOO D, BANTHIA N. High-performance strain-hardening cementitious composites with tensile strain capacity exceeding 4%: A review[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 125: 104325.

[9] LI V C, BOS F P, YU K, et al. On the emergence of 3D printable engineered, strain hardening cementitious composites (ECC/SHCC)[J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 132: 106038.

[10] ZHANG S, LI V C, YE G. Micromechanics-guided development of a slag/fly ash-based strain-hardening geopolymer composite[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 109: 103510.

[11] ZHANG D, YU J, WU H, et al. Discontinuous micro-fibers as intrinsic reinforcement for ductile engineered cementitious composites (ECC)[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 184: 107741.

[12] GUAN X, LI Y, LIU T, et al. An economical ultra-high ductile engineered cementitious composite with large amount of coarse river sand[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 201: 461-472.

[13] CUROSU I, LIEBSCHER M, ALSOUS G, et al. Tailoring the crack-bridging behavior of strain-hardening cement-based composites (SHCC) by chemical surface modification of poly(vinyl alcohol) (PVA) fibers[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 114: 103722.

[14] YU K, DING Y, LIU J, et al. Energy dissipation characteristics of all-grade polyethylene fiber-reinforced engineered cementitious composites (PE-ECC)[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 106: 103459.

[15] TINOCO M P, DE ANDRADE SILVA F. On the mechanical

- behavior of hybrid fiber reinforced strain hardening cementitious composites subjected to monotonic and cyclic loading[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 11: 754-768.
- [16] DESHPANDE A A, KUMAR D, RANADE R. Temperature effects on the bond behavior between deformed steel reinforcing bars and hybrid fiber-reinforced strain-hardening cementitious composite[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 233: 117337.
- [17] BANTHIA N, GUPTA R. Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): Fiber synergy in high strength matrices[J]. *Materials and Structures*, 2004, 37(10): 707-716.
- [18] SUGANRAJ K P. To study the behavior of high strength concrete beam reinforced with hybrid fiber subjected to cyclic loading[J]. *International Journal for Scientific Research & Development*, 2016, 4(2): 1277-1280.
- [19] LIU T, YANG Y, CHEN Z, et al. Optimization of fiber volume fraction to enhance reinforcing efficiency in hybrid fiber reinforced strain hardening cementitious composite[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 113: 103704.
- [20] 张聪, 余志辉, 韩世诚, 等. 混杂纤维增强应变硬化水泥基复合材料的压缩本构关系[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(5): 1221-1226.
- ZHANG Cong, YU Zhihui, HAN Shicheng, et al. Compressive constitutive relationship of hybrid fiber reinforced strain hardening cementitious composites[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2020, 37(5): 1221-1226(in Chinese).
- [21] 张聪, 夏超凡, 袁振, 等. 混杂纤维增强应变硬化水泥基复合材料的拉伸本构关系[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(7): 1754-1762.
- ZHANG Cong, XIA Chaofan, YUAN Zhen, et al. Tension constitutive relationship of hybrid fiber reinforced strain hardening cementitious composites[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2020, 37(7): 1754-1762(in Chinese).
- [22] FAN J, GOU S, DING R, et al. Experimental and analytical research on the flexural behaviour of steel-ECC composite beams under negative bending moments[J]. *Engineering Structures*, 2020, 210(5): 110301-110309.
- [23] LU C, YU J, CHRISTOPHER K Y, et al. Tensile performance and impact resistance of strain hardening cementitious composites (SHCC) with recycled fibers[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 171: 566-576.
- [24] ALI M A E M, SOLIMAN A M, NEHDI M L. Hybrid-fiber reinforced engineered cementitious composite under tensile and impact loading[J]. *Materials & Design*, 2017, 117: 139-149.
- [25] WU M, CHEN Z, ZHANG C. Determining the impact behavior of concrete beams through experimental testing and meso-scale simulation: I—Drop-weight tests[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, 135: 94-112.
- [26] YOO D, BANTHIA N, LEE J, et al. Effect of fiber geometric property on rate dependent flexural behavior of ultra-high-performance cementitious composite[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018, 86: 57-71.
- [27] ZHANG Z, YANG F, LIU J, et al. Eco-friendly high strength, high ductility engineered cementitious composites (ECC) with substitution of fly ash by rice husk ash[J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 137: 106200.
- [28] LIU B, YUE F, CHEN B, et al. Study on bond performance, flexural and crack extension behavior of base concrete prisms strengthen with strain-hardening cementitious composites (SHCC) using DIC technology[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 251: 119035.
- [29] Japan Society of Civil Engineers. Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks[S]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 2008.
- [30] HUANG B, WU J, YU J, et al. Seawater sea-sand engineered/strain-hardening cementitious composites (ECC/SHCC): Assessment and modeling of crack characteristics[J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 140: 106292.
- [31] YU K, DING Y, ZHANG Y X. Size effects on tensile properties and compressive strength of engineered cementitious composites[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 113: 103691.
- [32] 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.
- [33] ROSSI P. A physical phenomenon which can explain the mechanical behaviour of concrete under high strain rates[J]. *Materials and Structures*, 1991, 24(144): 422-424.