

混杂纤维增韧水泥基复合材料的静动态弯拉性能

龙广成^{1,2}, 李承洋¹, 张占森², 杨 恺¹, 赵 洪¹, 朱德举³, 谢友均¹, 曾晓辉¹

(1. 中南大学土木工程学院, 长沙 410075; 2. 高速铁路工程技术研发中心, 山东铁路投资控股集团有限公司, 济南 250102; 3. 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082)

摘 要: 为了掌握钢纤维-聚乙烯纤维(PE 纤维)混杂对水泥基材料静动态弯拉性能的影响规律, 通过三点弯拉试验和落锤冲击试验方法, 研究了钢-PE 纤维混杂(掺量保持体积分数 2.0%不变)增韧水泥基复合材料(HFTCC)的静动态弯拉性能, 分析了钢纤维与 PE 纤维的混杂效应以及相应的增韧机理。结果表明: HFTCC 静态弯拉性能与钢-PE 纤维中 PE 纤维掺量正相关, 而动态弯拉性能与钢纤维掺量表现出较强的正相关。1.5% (体积分数) PE 纤维与 0.5%钢纤维混杂表现出最佳的静态弯拉峰值应力; 1.5%钢纤维 0.5%PE 纤维表现出最佳的动态弯拉能量吸收。在静态弯拉下, 钢-PE 混杂纤维相较于 2.0%钢纤维对 HFTCC 峰值强度及能量吸收提升幅度分别为 26.5%~31.7%与 14.8%~56.8%; HFTCC 的动态强度增长因子(DIF)与能量吸收表现出明显的应变率效应。钢纤维和 PE 纤维适当混杂可对 HFTCC 发挥较好的协同增强增韧效应, 从而有效提升 HFTCC 的静动态弯拉性能。

关键词: 水泥基复合材料; 混杂纤维增韧; 静动态弯拉性能; 弯曲韧性

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2024)02-0592-11

网络出版时间: 2023-12-02



水泥基材料因其原料来源广泛和施工简便等特点被广泛应用于建筑工程中, 但同时存在脆性大且易开裂的特点, 限制了其在韧性结构中应用^[1]。为了增强水泥基材料的韧性, 常通过改善水化产物进行基体增韧与纤维复合增韧^[2]。超高延性水泥基复合材料(ECC)是基于微观力学设计, 在基体内掺入大量聚合物纤维的一种纤维增强水泥基复合材料^[3]。相比于普通混凝土的脆性破坏模式, ECC 具有极限拉应变大、吸能多和韧性强等特点^[4]。水泥基材料的破坏是一个渐进的、多尺度发生的过程。在荷载的作用下, 首先产生微米级裂纹, 继续加载, 裂纹逐渐扩展变大, 形成细观裂缝; 接着汇聚、发展成为宏观裂缝, 最终导致材料破坏失效^[5-6]。故单一尺度纤维难以契合多尺度开裂过程, 对水泥基复合材料的增韧阻裂效果提升有限^[7]。

为了对应这种不同层次的开裂过程, 采用不同尺度纤维混掺不失为一种良好的手段, 且不同类型的纤维间存在混杂效应可达到“1+1>2”的效果^[8-9]。Kim 等^[10-11]发现纤维增强超高性能水泥基复合材料

(UHPFRCC)的抗压强度与抗折强度随聚乙烯(PE)纤维掺量的增加而降低, 钢-聚乙烯混杂纤维(钢-PE 纤维)呈现出正混杂效应, 明显提高了 UHPFRCC 的变形能力与耗能能力。张聪等^[12-14]对钢-聚乙烯醇混杂纤维增强应变硬化水泥基复合材料(SF-PVA/SHCC)的单轴压缩、拉伸性能进行试验研究, 提出了混杂纤维 SHCC 单轴压缩和拉伸性能的本构关系, 并通过对四点弯曲试验分析建立了对混杂纤维 SHCC 的弯拉性能预测模型。Cui 等^[15]对钢-聚丙烯混杂纤维混凝土(HFRC)进行疲劳试验, 发现 2 种纤维在混合体系中产生正混杂效应, HFRC 的疲劳性能优于聚丙烯(PP)纤维混凝土与钢纤维混凝土, 并建立了 HFRC 疲劳预测模型。

鉴于上述, 本工作探究了总掺量 2.0%的不同比例组合钢-PE 纤维对水泥基材料静态及动态弯拉性能的影响。通过落锤冲击试验表征低速冲击下混杂纤维增韧水泥基复合材料(HFTCC)的动态弯拉性能, 分析了 HFTCC 破坏形貌、荷载-位移曲线、DIF 及能量吸收。最后, 讨论了钢-PE 纤维在 HFTCC 中

收稿日期: 2023-07-02。 修订日期: 2023-09-12。

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(A020204); 山东铁投集团开放基金(TTKF2022-05)。

第一作者: 龙广成(1973—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2023-07-02. Revised date: 2023-09-12.

First author: LONG Guangcheng (1973—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: longguangcheng@csu.edu.cn

的增韧机理。

1 实验

1.1 原材料

所用水泥为 P.I 42.5 基准水泥(PC); 矿物掺合料选用硅灰(SF)、矿粉(GGBS); 骨料由 26~40 目、40~70 目、70~120 目 3 种级配的石英砂(S)按质量比 0.50:0.22:0.28 混合而成; 减水剂选用聚羧酸类减水剂(SP); 采用的钢纤维(STF)、PE 纤维基本参数如表 1 所示, 拌合水为自来水(W)。

表 1 纤维基本参数
Table 1 Basic properties of fibers

Fiber type	Density/(g·cm ⁻³)	L/mm	D/μm	L/D
STF	7.80	13	200	65
PE	0.97	18	24	750

STF is steel fiber. PE is polyethylene fiber.

1.2 配合比设计

所用 HFTCC 的原材料组成配合比如表 2 所示, 试件水胶比为 0.3, 主要考虑了钢纤维与 PE 纤维混杂掺量以及纤维混杂比例的影响。

表 2 HFTCC 配合比
Table 2 Mix proportions of HFTCC kg/m³

Groups	PC	GGBS	SF	S	W	STF	PE	SP
M	890	180	120	600	357	0	0	12
PE2.0	890	180	120	600	357	0	19.40	12
STF0.5PE1.5	890	180	120	600	357	39	14.55	12
STF1.0PE1.0	890	180	120	600	357	78	9.70	12
STF1.5PE0.5	890	180	120	600	357	117	4.85	12
STF2.0	890	180	120	600	357	156	0	12

HFTCC is hybrid fiber-toughening cementitious composites. PC is portland cement. GGBS is ground granulated blast slag. SF is silicon fume. S is sand. W is water. SP is superplasticizer.

1.3 成型与养护方式

首先将胶凝材料和石英砂在砂浆搅拌锅中搅拌 1 min, 然后加入水和减水剂搅拌 1 min, 之后先掺入 PE 纤维搅拌 2 min, 再加入钢纤维搅拌 2 min, 最后快速搅拌 1.5 min, 保证新拌物混合均匀。搅拌完成后, 将具有良好工作性的拌合物浇筑在尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 的三联模内, 并经振捣密实成型, 置于(20±1)℃室温下 1 d 后脱模, 随后进行 60℃蒸汽养护 3 d, 养护制度为升温时间 2 h, 恒温时间 68 h, 降温时间 2 h, 最后标准养护[(20±1)℃, 相对湿度>95%]至 28 d。

1.4 测试方法

三点弯拉试验参考 GB/T 17671—2021《水泥胶

砂强度检验方法(ISO 法)》及文献[16–20]的试验方法实施, 采用伺服万能试验机(INSTRON 1342)进行三点弯拉试验, 加载速率控制为 0.2 mm/min。采用荷载传感器和位移计记录试验过程中荷载和跨中挠度(δ)变化, 其中预加载 50 N(远低于试件峰值荷载)让压头紧贴试件上表面, 使得位移引伸计记录结果为试件真实位移变化, 当 δ 值达到约 5 mm 时停止加载。

落锤动态冲击试验参考文献[21]的试验方法实施, 采用 INSTRON-CEAST 9340 落锤冲击系统进行落锤冲击试验, 该系统冲击高度 0.03~1.10 m, 速度范围 0.77~4.65 m/s, 最大落锤质量为 37.5 kg, 最大冲击能量 405 J。冲击速度可由落锤控制系统换算为相应的锤头下落高度。本次试验所用冲击锤头质量 4.08 kg, 设定冲击速度为 3 m/s 与 4 m/s, 冲击过程中冲击力由压电式荷载传感器(量程为 22 kN)采集, 数据采集频率为 0.5 MHz。

2 结果与讨论

2.1 试件破坏形态

图 1 为落锤冲击后试件的破坏形态。由图 1 可见: 无纤维组试件在受到冲击荷载后直接发生脆性破坏; 掺入纤维后, 由于纤维的桥接阻裂作用, 试件发生开裂但未断开, 表明抵抗冲击动荷载作用下的弯拉性能得到提升。STF2.0 组试件冲击破坏后主要沿着一条主裂缝开裂, 在钢纤维被 PE 纤维不同掺量取代后, 试件表现出多缝开裂特征, 主裂缝附近有微裂缝分布, 且微裂缝的数量随着 PE 纤维体积分数的增加而增多。随着冲击速率的增大, 荷载在基体内部传递速率加快, 试件纵向变形增大, 主裂缝的开口程度加剧, 裂缝附近更多纤维发挥阻裂作用。钢纤维相较于 PE 纤维刚度大、延展性好, 能更好地抵抗试件的纵向变形, 限制主裂缝的开口程度, 从而使得试件的弯拉性能得到显著提升。

2.2 静态弯拉与落锤冲击作用下试件的荷载-位移曲线

图 2 为各组试件在静态弯拉荷载作用下的荷载-位移曲线结果。由图 2 可见, 在静态加载下, 曲线可分为弹性变形阶段、塑性上升阶段与软化下降阶段。弹性变形阶段, 荷载与位移呈线弹性相关, HFTCC 试件表面无明显变化, 随着位移增加, 试件出现初始裂纹, 曲线偏离线弹性后, 进入下一阶段; 在塑性上升阶段, 荷载随着位移增加而增大, 由于钢-PE 纤维的桥联阻裂作用, 裂纹扩展受阻而发生偏转, 不断形成新裂缝, 表现出明显的多缝开裂过

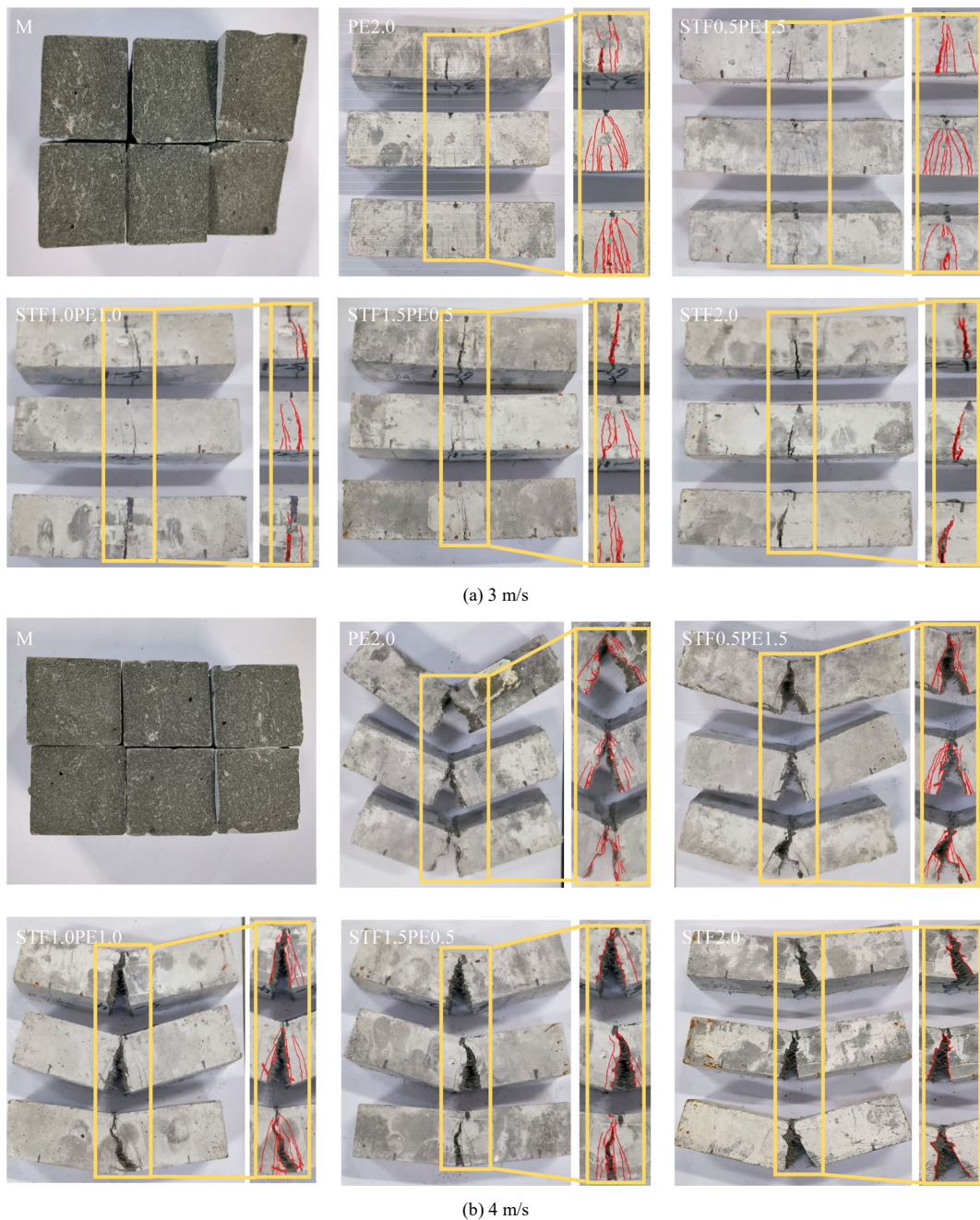


图1 试件破坏形态
Fig. 1 Failure patterns of specimens

程；在软化下降阶段，荷载表现出较为平缓的下降趋势，开口裂缝持续增大，纤维不断从基体中拔出或断裂。

表3给出了HFTCC静态弯拉下初裂强度、峰值强度及能量吸收值。当PE纤维掺量为2.0%时，试件的初裂强度有所降低，可能是PE纤维掺量过高，在基体内部分布不均匀，发生团聚形成缺陷；STF1.5PE0.5和STF2.0组试件初裂强度有所降低，这是由于掺入钢纤维可能会在基体中引入孔隙^[22]，钢纤维掺量较高时，会影响钢-PE纤维的分散，使

得纤维团聚并引入缺陷^[23]，对试件的初裂强度产生不利影响；STF0.5PE1.5和STF1.0PE1.0组试件初裂强度有所提升，这主要因为钢纤维、PE纤维在不同尺度抑制裂缝产生与扩展，钢纤维在较大裂缝尺度下发挥增强阻裂作用，PE纤维在较小裂缝尺度下能很好发挥自身阻裂作用^[24]，钢-PE纤维协同作用，共同提升基体强度。

此外，掺入纤维后试件的峰值强度 f_p 显著增长，纤维组的峰值强度 f_p 相较于M组增长幅度为21.6%~60.2%，钢-PE纤维试件峰值强度随着钢-PE

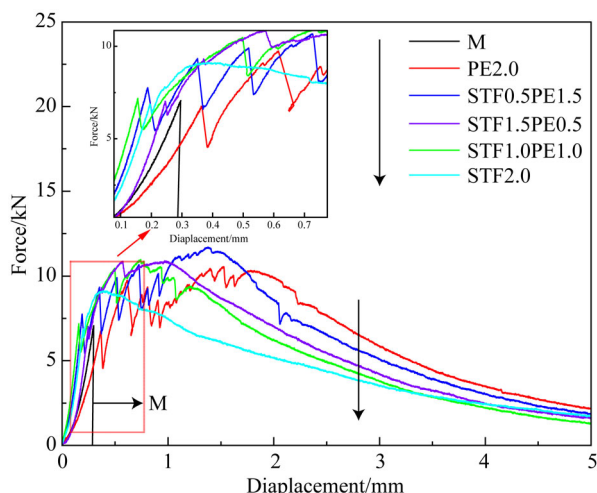


图 2 静态弯拉下 HFTCC 试件荷载-位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curves of HFTCC specimens under static flexure

表 3 各组 HFTCC 静态弯拉强度及能量吸收值

Table 3 Static flexural peak strength and energy absorption of HFTCC

Groups	f_1 /MPa	f_p /MPa	S_T /(N·m)
M	16.58±0.05	16.58±0.05	0.73
PE2.0	15.85±0.11	24.73±0.06	30.74
STF0.5PE1.5	16.66±0.11	26.56±0.59	35.60
STF1.0PE1.0	16.81±0.76	25.66±0.96	26.08
STF1.5PE0.5	16.45±0.56	25.50±0.07	27.67
STF2.0	16.11±0.10	20.16±0.86	22.71

f_1 is first peak strength. f_p is peak strength. S_T is area of the load-deflection curves.

纤维中钢纤维取代 PE 纤维取代率的增加先增大后减小。HFTCC (即 STF0.5PE1.5、STF1.0PE1.0 与 STF1.5PE0.5 组) 的峰值强度高于单一纤维组, 且相较于 STF2.0 组提升 26.5%~31.7%, 其中 STF0.5PE1.5 组的 f_p 高达 26.56MPa, 表明钢-PE 纤维相较于单一纤维对水泥基材料的强度有明显提升效果。这是由于钢-PE 纤维间存在正向协同作用, 钢纤维与 PE 纤维在基体内相互搭接, 形成三维网状结构, 提高了钢-PE 纤维间的机械咬合力^[24], 此外, 由于钢纤维密度较大, 在成型过程中会发生沉降, 使得分布不均匀, 阻裂效果发挥不充分^[25], 采用钢纤维取代部分 PE 纤维, 可以使得两种纤维分布更加均匀, 提升了纤维的增强效果, 改善了 HFTCC 的静态弯拉性能。

以试件荷载-位移曲线的面积作为试件受到荷载后所吸收的能量, 采用能量吸收值表征试件的弯曲韧性。相较于 M 组, 掺入 2.0% 钢-PE 纤维后, 在静态弯拉下 HFTCC 的能量吸收能力显著提升,

HFTCC 的能量吸收值随着钢-PE 纤维中钢纤维取代 PE 纤维取代率的增加先增大后减小。HFTCC 相较于 STF2.0 组, S_T 增长幅度为 14.8%~56.8%, STF0.5PE1.5 表现出最佳的能量吸收, 表明 PE 纤维相较于钢纤维对 HFTCC 静态弯拉能量吸收能力改善效果更好。这是因为 PE 纤维长径比大于钢纤维, 与基体接触的比表面积更大, 发生摩擦滑移时会吸收更多能量。此外, PE 纤维弹性模量较低在试件开裂过程中产生较大变形, PE 纤维从基体中脱粘、拔出时需要吸收更多能量。因此, 在静态弯拉下, 采用钢纤维取代部分 PE 纤维进行适当混杂能有效提升 HFTCC 的能量吸收能力。

图 3 为静态弯拉与动态冲击下 HFTCC 试件得荷载-位移曲线。在冲击荷载下, 由于锤头惯性力较大, 与试件作用后, 试件会发生局部变形, 故曲线的峰值荷载相较于静态加载有所滞后。在动态冲击作用下, HFTCC 曲线可分为线性上升、应变硬化及软化衰减 3 个阶段, 线性上升阶段, 试件荷载呈线性增长到初裂荷载后, 快速达到第 1 峰值; 在应变硬化阶段, 荷载在第 1 峰值后, 先下降随后波动增长至第 2 峰值; 在软化衰减阶段, 达到第 2 峰值后, 荷载持续上下波动并逐渐降低。随着冲击速率增大, HFTCC 峰值荷载与位移均呈现增大趋势。

由图 3 可见, 试件受到冲击荷载后, 在初裂点处存在 2 个十分相近的峰值, 造成这种结果的主要原因是进行冲击加载时, 在试件与锤头的接触面处粘贴了弹性模量较小的橡胶片进行波形整形。HFTCC 表现出明显的应变率效应^[26-27], 峰值荷载随着冲击速率的增大而增长, 从而产生更大的变形, 吸收更多的冲击能量。对于未掺入纤维的 M 组试件受到冲击后, 由于试件发生脆性断裂, 曲线的峰值荷载与位移均较小, 且仅有单一荷载峰值; 纤维组试件的曲线存在多个荷载峰值且峰值荷载与位移较大, 这是由于钢-PE 纤维桥联了 HFTCC 的基体裂缝, 限制其扩展, 延缓了宏观裂缝的产生与发展, 提升了基体的弯拉性能^[28]。

2.3 试件动态增长因子(DIF)

以静态三点弯拉试验所得峰值强度 f_p 为参照计算材料动态增长因子 DIF, 如式(1)所示, 能明显地反映出动态荷载下材料峰值强度的增长幅度。

$$DIF = \frac{f_d}{f_p} \quad (1)$$

式中: f_d 代表试件落锤动态冲击试验峰值强度; f_p 代表 HFTCC 试件三点弯拉试验峰值强度。

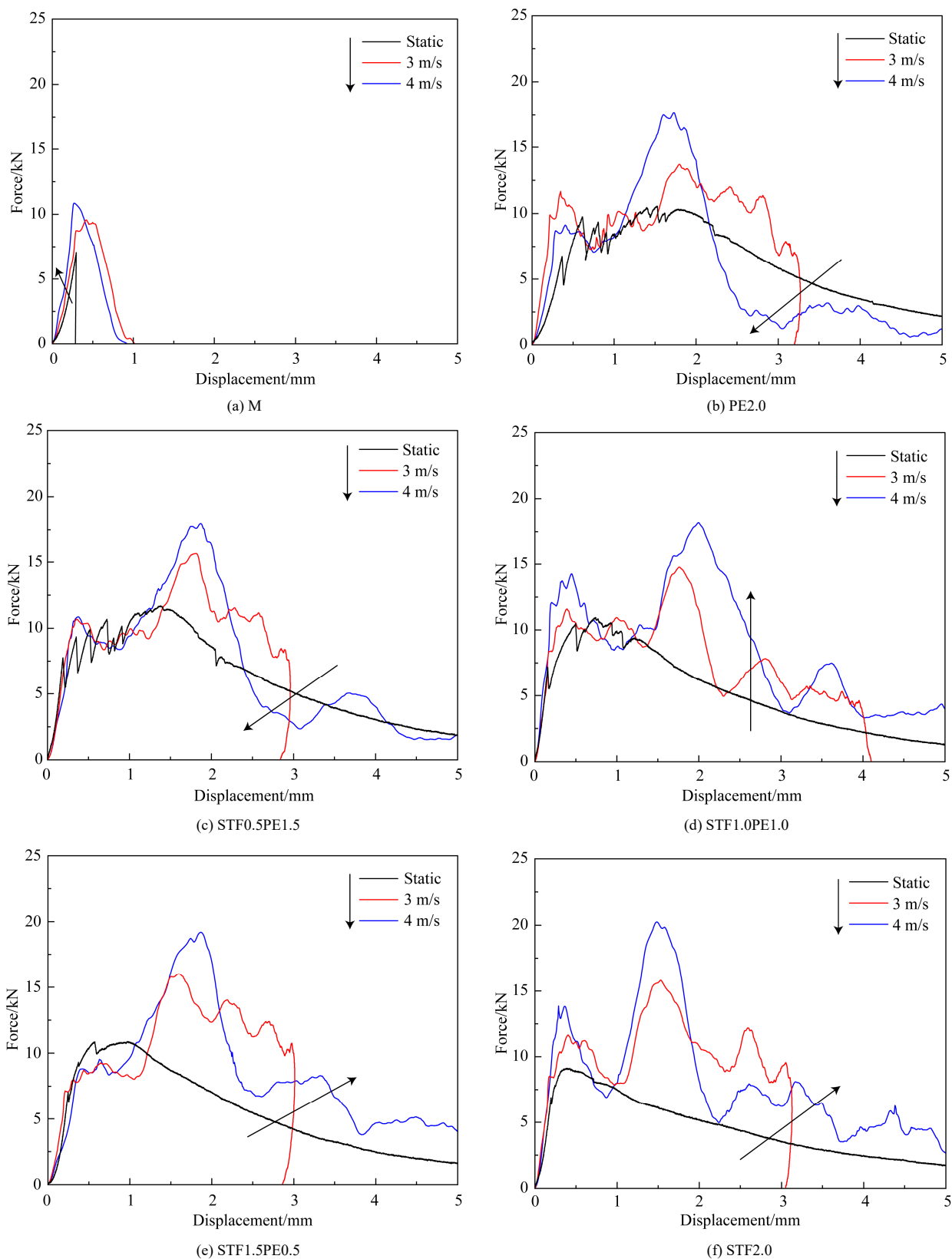


图3 静态弯拉与落锤冲击作用下 HFTCC 试件荷载-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curve of HFTCC specimens under static flexure and dynamic impact

由图 4 可见, HFTCC 的 DIF 随着冲击速率的增加而增大, 当冲击速率从 3 m/s 增加到 4 m/s 时,

纤维组试件的 DIF 增长幅度 14.4%~29.5%, 表现出明显的应变率效应, 这是由于冲击荷载作用时间短,

试件没有足够时间吸收冲击能量, 只能通过提升自身强度来耗散部分能量^[29]。同一冲击速率下, 随着钢-PE 纤维体系中钢纤维体积分数的增加, 试件的 DIF 增大, 动态峰值强度提高, 其中 STF2.0 组试件的动态峰值荷载提升效果最优, DIF 值最大。钢-PE 纤维中 PE 纤维在动态荷载下的增强效果相较于静态加载有所减弱, 可能是在动态加载下, PE 纤维的失效模式从脱粘、拔出变为断裂, 纤维对宏观裂缝的限制效果降低^[30], 故钢纤维对 HFTCC 的 DIF 的影响较大。

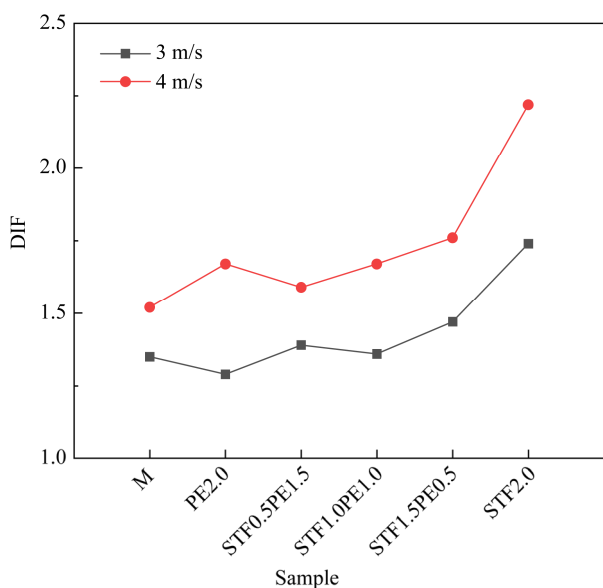


图 4 HFTCC 动态增长因子

Fig. 4 Dynamic increase factor (DIF) of HFTCC

2.4 不同试件的能量吸收

冲击荷载破坏混凝土主要包含 2 个过程, 水泥基体的破坏与纤维增强体的拔出^[31]。由图 5 可见, 试件能量吸收值随冲击速率增大而提升。当冲击速度为 3 m/s 时, HFTCC 能量吸收提升幅度较小; 当冲击速度达到 4 m/s 时, HFTCC 的能量吸收提升幅度为 41.7%~76.4%。相比之下, 含有钢纤维的试件的能量吸收较多, 应变率效应更加显著。此外, 在 3 m/s 冲击速率下, 随着钢-PE 纤维体系中钢纤维的体积分数的增加, 能量吸收结果基本持平, 不同比例下纤维的混杂对于试件的能量吸收影响较小; 在 4 m/s 冲击速率下, 试件的能量吸收的变化趋势随 PE 纤维体积分数的增加先增大后减小, 其中 STF1.5PE0.5 组试件能量吸收效果最好。结果表明, 在动态荷载下, PE 纤维的增韧效果不如钢纤维, 掺入大量 PE 纤维不利于提升试件的动态能量吸收能力, 这与 PE 纤维的失效模式转变有关, 少量 PE 纤

维取代钢纤维起到了显著的增韧效果, 对试件动态能量吸收能力有明显提升。

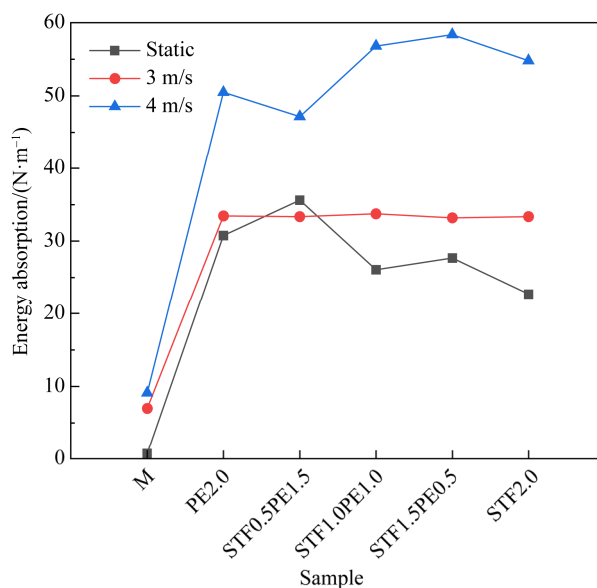


图 5 HFTCC 能量吸收值

Fig. 5 Energy absorption of HFTCC

2.5 讨论

2.5.1 混杂效应 钢-PE 纤维间混杂效应采用混杂系数 S 进行表征, 混杂系数 S 可通过式(2)~(4)计算, 其定义为 HFTCC 实际性能与复合材料理论性能计算值的比值。假定以 M、PE2.0、STF2.0 各组试验结果为基准, 对 HFTCC 性能理论值进行计算。若 HFTCC 实际性能较优, 则混杂系数 $S > 1$, 反之则 $S < 1$, 式(2)~(4)如下:

$$S = \frac{P_{a,b}}{R_m V_m + R_a V_a + R_b V_b} \quad (2)$$

$$P_a = R_m V_m + R_a V_a \quad (3)$$

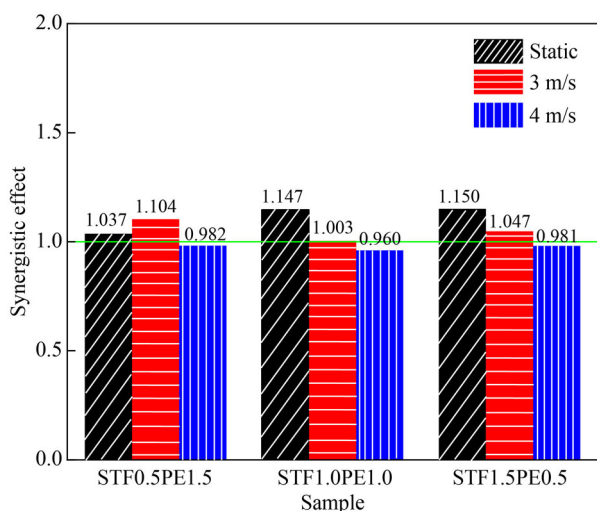
$$P_b = R_m V_m + R_b V_b \quad (4)$$

式中: S 代表钢-PE 纤维的混杂系数; $P_{a,b}$ 、 P_a 、 P_b 分别表示钢-PE 纤维组、PE2.0 组和 STF2.0 组的实际性能参数; R_m 表示基体实际性能参数, R_a 、 R_b 分别表示在 PE 纤维、钢纤维对试件实际性能的贡献参数; V_m 、 V_a 、 V_b 分别表示基体、PE 纤维与钢纤维在试件中所占体积分数。

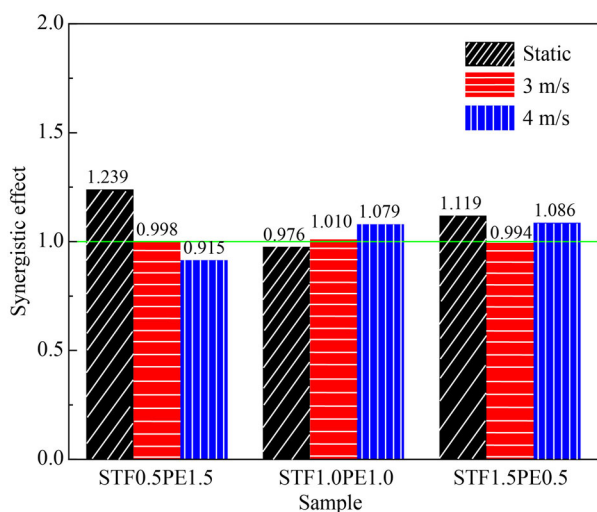
由图 6a 可见, 对于 HFTCC 峰值荷载, 在静态弯拉下, 钢-PE 纤维表现出明显正混杂效应, HFTCC 峰值荷载提升效果显著, STF1.5PE0.5 组试件纤维间协同增强效果较好, 这是因为钢纤维变形能力较弱对 HFTCC 峰值荷载影响较大, 较高掺量的钢纤维与 PE 纤维混杂后表现出较好混杂效果。在动态荷载下, 3 m/s 冲击速率下 HFTCC 表现为正混杂效

应；4 m/s 冲击速率下，HFTCC 表现出负混杂效应。主要原因是钢纤维相较于 PE 纤维刚度大，承载能力强，对于 HFTCC 的动态弯拉强度的贡献更大。

由图 6b 可见，对于 HFTCC 能量吸收，在静态弯拉下，STF0.5PE1.5 组表现出最好的混杂效果，PE 纤维对 HFTCC 能量吸收的提升效果优于钢纤维，这是因为 PE 纤维长度较长能够更好的抑制裂缝扩展^[27]，在脱粘、滑移过程中能吸收较多能量。在动态弯拉下，3 m/s 冲击速率时，钢-PE 纤维的混杂增韧效果不显著；而在 4 m/s 冲击速率时，STF1.0PE1.0 和 STF1.5PE0.5 组试件表现为显著正混杂效应。故在较高速率的动态弯拉下，钢纤维发挥的增强增韧双重效果占主导因素，即当钢-PE 纤维体系中钢纤维掺量较高时，由于钢纤维自身抗拉强度高、刚度大、延性好，在较大变形下对 HFTCC 的能量吸收能力提升效果好。



(a) Peak stress



(b) Energy absorption

图 6 HFTCC 弯拉性能混杂效应

Fig. 6 Synergistic effect for flexural properties of HFTCC

2.5.2 微观机理分析 对于水泥基材料，在水泥基体中常存在孔隙与微裂纹等薄弱区，裂缝的扩展首先从这些薄弱区开始，受到外来荷载时，在这些区域易于形成应力集中^[31]，随之产生微裂缝并不断扩展，相互连接贯通，最终形成宏观裂缝。钢-PE 纤维在此期间能有效发挥增韧阻裂作用，提升 HFTCC 的韧性。在微裂缝产生阶段，主要由 PE 纤维缓解裂缝集中应力，抑制裂缝产生；在微裂缝扩展阶段，PE 纤维开始发生脱粘、滑移，阻碍裂缝进一步扩展；在微裂缝贯通阶段，微裂缝逐渐汇聚成宏观裂缝，部分 PE 纤维被拔出失效，钢纤维主要发挥阻裂作用，钢-PE 纤维协同抑制裂缝扩展；在宏观裂缝扩展阶段，钢-PE 纤维因与基体粘结力不足而拔出，试件破坏失效。

在静态加载下，HFTCC 内部裂缝发展缓慢，钢纤维和 PE 纤维均以滑移、拔出的方式为主，钢-PE 纤维能够有效抑制内部裂缝扩展，从而改善静态力学性能；在动态加载下，HFTCC 内部裂缝迅速扩展，钢纤维由于弹性模量高，变形能力较弱，发挥微加筋作用^[32]，PE 纤维变形能力强，提供缓冲作用，钢-PE 纤维间协同作用，提升试件冲击过程中的能量耗散，从而改善 HFTCC 的抗冲击性能。

为进一步探究钢-PE 纤维间的协同作用机理，对 HFTCC 的微观形貌进行观察，如图 7 所示。由图 7a 可见，钢纤维和 PE 纤维搭接在一起，形成三维网状结构，提升纤维的增强增韧效果，钢-PE 纤维在水泥基体内部发挥相互促进、优势互补的协同作用，限制基体中裂缝的产生与扩展。图 7b 显示钢纤维有效发挥桥接阻裂作用，阻止内部裂缝的扩展。结合图 7c 和图 7d 可见，在裂缝扩展过程中，钢纤维和 PE 纤维随着基体脱粘、拔出，钢纤维和 PE 纤维表面附着水化产物，说明基体与纤维间形成了稳定的粘结，保证了纤维对基体裂缝的有效约束^[33]。由图 7e 所见，PE 纤维发生断裂，说明 PE 纤维通过自身拉伸变形和断裂吸收能量并抑制裂缝扩展，但当较大宏观裂缝形成时，断裂的 PE 纤维难以继续发挥桥接阻裂作用。

基于上述分析，建立了钢-PE 纤维协同增韧 HFTCC 的物理模型，如图 8 所示。钢-PE 纤维有效阻止微裂缝的发展和宏观裂缝的形成，在静态加载过程中，钢-PE 纤维对水泥基材料的力学性能、抗冲击性能的提升效果最好。同时，对 HFTCC 的微观形貌分析发现，钢-PE 纤维形成三维网状结构更好地发挥纤维对基体的增韧阻裂作用。

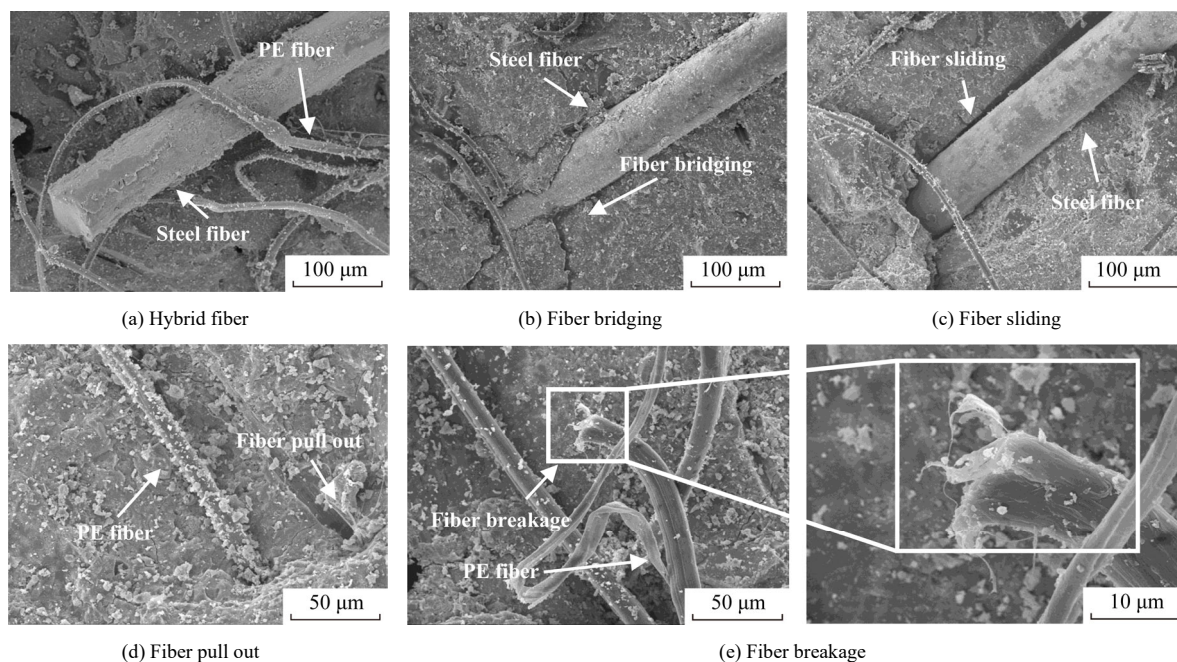


图 7 HFTCC 微观形貌
Fig. 7 Microstructure of HFTCC

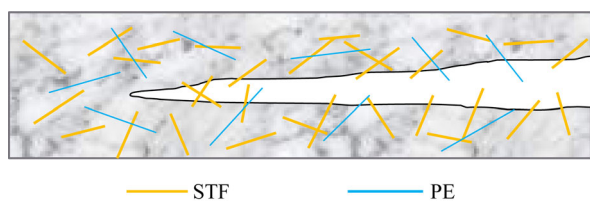


图 8 HFTCC 物理模型示意图
Fig. 8 Schematic diagram of HFTCC physical model

3 结论

1) 钢-PE 混杂纤维能有效提升 HFTCC 的静态与动态弯拉性能, 其中 0.5% (体积分数) 钢-1.5%PE 混杂纤维 HFTCC 表现出最佳的静态弯拉峰值应力, 而 1.5%钢-0.5%PE 混杂纤维 HFTCC 表现出最佳的落锤冲击动荷载作用下的弯拉能量吸收。HFTCC 的 DIF 与能量吸收表现出明显的应变率效应。

2) 钢-PE 纤维在 HFTCC 中表现出明显的混杂效应。对于峰值荷载, 静态弯拉主要表现为纤维正混杂效应, 落锤冲击动荷载作用下 PE 纤维相较于钢纤维对 HFTCC 峰值应力的贡献较弱; 静态弯拉下 0.5%钢-1.5%PE 混杂纤维体系有效提升 HFTCC 的能量吸收, 混杂系数 S 最大达到 1.239, 而冲击动荷载作用下 1.5%钢-0.5%PE 混杂纤维 HFTCC 的弯拉能量吸收能力强, S 最大达到 1.086。

3) HFTCC 增韧机理主要源于钢-PE 纤维间的协同阻裂增韧作用, 尤其是微细钢纤维、PE 纤维在合适的掺量混杂组合下, 能充分发挥各自的力学特性,

从而最优提升水泥基材料的静态和冲击动荷载作用下的弯拉力学性能。

参考文献:

- [1] WANG Q S, YI Y, MA G W, et al. Hybrid effects of steel fibers, basalt fibers and calcium sulfate on mechanical performance of PVA-ECC containing high-volume fly ash[J]. *Cem Concr Compos*, 2019, 97: 357-368.
- [2] 刘加平, 汤金辉, 韩方玉. 现代混凝土增韧防裂原理及应用[J]. *土木工程学报*, 2021, 54(10): 47-54.
LIU Jiaping, TANG Jinhui, HAN Fangyu. *China Civ Eng J*, 2021, 54(10): 47-54.
- [3] 李艳, 张文彬, 刘泽军. PVA-ECC 动态压缩性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(3): 513-520.
LI Yan, ZHANG Wenbin, LIU Zejun. *J Build Mater*, 2020, 23(3): 513-520.
- [4] 李艳, 刘泽军, 梁兴文. 高性能 PVA 纤维增强水泥基复合材料单轴受拉特性[J]. *工程力学*, 2013, 30(1): 322-330.
LI Y, LIU Z J, LIANG X. *Eng Mech*, 2013, 30(1): 322-330.
- [5] 曹明莉, 李黎, 李志文, 等. CaCO_3 晶须对钢-聚乙烯醇混杂纤维增强水泥基复合材料板弯曲性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(11): 2614-2623.
CAO Mingli, LI Li, LI Zhiwen, et al. *Acta Mater Compos Sin*, 2017, 34(11): 2614-2623.
- [6] 张聪, 曹明莉. 多尺度纤维增强水泥基复合材料力学性能试验[J]. *复合材料学报*, 2014, 31(3): 661-668.
ZHANG Cong, CAO Mingli. *Acta Mater Compos Sin*, 2014, 31(3): 661-668.
- [7] 赵焕起, 李国忠. 混杂纤维增强水泥基复合材料的力学性能[J]. *复合材料学报*, 2014, 31(1): 140-145.
ZHAO Huanqi, LI Guozhong. *Acta Mater Compos Sin*, 2014, 31(1): 140-145.

- [8] 王振波. 聚乙烯醇—钢纤维混杂增强水泥基复合材料力学性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
WANG Zhenbo. Study on mechanical properties of cement-based composite reinforced by polyvinyl alcohol and steel fiber hybrid. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [9] 李黎, 李宗利, 高丹盈, 等. 高温对钢纤维-聚乙烯醇纤维- CaCO_3 晶须多尺度纤维/水泥复合材料弯曲性能和微观结构的影响[J]. 复合材料学报, 2021, 38(7): 2326–2335.
LI Li, LI Zongli, GAO Danying, et al. Acta Mater Compos Sin, 2021, 38(7): 2326–2335.
- [10] KIM M J, YOO D Y, YOON Y S. Effects of geometry and hybrid ratio of steel and polyethylene fibers on the mechanical performance of ultra-high-performance fiber-reinforced cementitious composites[J]. J Mater Res Technol, 2019, 8(2): 1835–1848.
- [11] YOO D Y, KIM M J. High energy absorbent ultra-high-performance concrete with hybrid steel and polyethylene fibers[J]. Constr Build Mater, 2019, 209: 354–363.
- [12] 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弯曲性能预测[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(1): 14–21.
ZHANG Cong, XIA Chaofan, YUAN Zhen, et al. J Build Mater, 2021, 24(1): 14–21.
- [13] 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. Acta Mater Compos Sin, 2020, 37(7): 1754–1762.
- [14] 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. Acta Mater Compos Sin, 2020, 37(5): 1221–1226.
- [15] CUI K, XU L H, LI L J, et al. Mechanical performance of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete subject to uniaxial constant-amplitude cyclic compression: Fatigue behavior and unified fatigue equation[J]. Compos Struct, 2023, 311: 116795.
- [16] YANG K, LONG G C, TANG Z, et al. Enhancement in strength and toughness of ultra-high performance concrete (UHPC) from micron- and nano-scale[J]. J Build Eng, 2023, 69: 106308.
- [17] LIU Y W, ZHANG Z H, SHI C J, et al. Development of ultra-high performance geopolymer concrete (UHPGC): Influence of steel fiber on mechanical properties[J]. Cem Concr Compos, 2020, 112: 103670.
- [18] WU Z M, SHI C J, KHAYAT K H. Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete: Influence of steel fiber content and shape[J]. Compos B Eng, 2019, 174: 107021.
- [19] LIU T J, WEI H N, ZHOU A, et al. Multiscale investigation on tensile properties of ultra-high performance concrete with silane coupling agent modified steel fibers[J]. Cem Concr Compos, 2020, 111: 103638.
- [20] YANG K, TANG Z, CHENG Z Q, et al. Mechanical properties of ultra-high strength cement-based materials (UHSC) incorporating metal powders and steel fibers[J]. Constr Build Mater, 2022, 318: 125926.
- [21] WU Z M, SHI C J, KHAYAT K H, et al. Effect of SCM and nano-particles on static and dynamic mechanical properties of UHPC[J]. Constr Build Mater, 2018, 182: 118–125.
- [22] LI L, XIE C P, CAO M L, et al. Synergistic effect between CaCO_3 whisker and steel-PVA fiber cocktail in cement-based material at elevated temperature[J]. J Mater Civ Eng, 2022, 34(2): 04021415.
- [23] HUO Y L, LIU T A, LU D, et al. Dynamic tensile properties of steel fiber reinforced polyethylene fiber-engineered/strain-hardening cementitious composites (PE-ECC/SHCC) at high strain rate[J]. Cem Concr Compos, 2023, 143: 105234.
- [24] 谢超鹏, 曹明莉, 司雯, 等. CaCO_3 晶须对钢—PVA 纤维增强水泥砂浆断裂性能的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(4): 1032–1043.
XIE Chaopeng, CAO Mingli, SI Wen, et al. J Basic Sci Eng, 2021, 29(4): 1032–1043.
- [25] 于婧, 翟天文, 梁兴文, 等. 钢-PVA 纤维混凝土流动性及力学性能研究[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(3): 402–407.
YU Jing, ZHAI Tianwen, LIANG Xingwen, et al. J Build Mater, 2018, 21(3): 402–407.
- [26] TRAN N T, KIM D J. Synergistic response of blending fibers in ultra-high-performance concrete under high rate tensile loads[J]. Cem Concr Compos, 2017, 78: 132–145.
- [27] ZHONG H, CHEN M, ZHANG M Z. Effect of hybrid industrial and recycled steel fibres on static and dynamic mechanical properties of ultra-high performance concrete[J]. Constr Build Mater, 2023, 370: 130691.
- [28] MEHRABI P, SHARIATI M, KABIRIFAR K, et al. Effect of pumice powder and nano-clay on the strength and permeability of fiber-reinforced pervious concrete incorporating recycled concrete aggregate[J]. Constr Build Mater, 2021, 287: 122652.
- [29] ŞANAL İ, ÖZYURT N, HOSSEINI A. Characterization of hardened state behavior of self compacting fiber-reinforced cementitious composites (SC-FRCC's) with different beam sizes and fiber types[J]. Compos B Eng, 2016, 105: 30–45.
- [30] 王振波, 李鹏飞, 韩宇栋, 等. 混杂纤维珊瑚骨料混凝土冲击压缩性能的试验与模拟[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(11): 2897–2908.
WANG Zhenbo, LI Pengfei, HAN Yudong, et al. J Chin Ceram Soc, 2022, 50(11): 2897–2908.
- [31] WU Z M, SHI C J, HE W, et al. Static and dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements[J]. Cem Concr Compos, 2017, 79: 148–157.
- [32] 潘慧敏, 马云朝. 钢纤维混凝土抗冲击性能及其阻裂增韧机理[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(6): 956–961.
PAN Huimin, MA Yunzhao. J Build Mater, 2017, 20(6): 956–961.
- [33] 池寅, 尹从儒, 徐礼华, 等. 钢-聚丙烯混杂纤维增强超高性能混凝土单轴循环受压力学性能[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(11): 2331–2345.
CHI Yin, YIN Congru, XU Lihua, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(11): 2331–2345.

Static and Dynamic Flexural Properties of Hybrid Fiber-Toughening Cementitious Composites

LONG Guangcheng^{1,2}, LI Chengyang¹, ZHANG Zhansen², YANG Kai¹, ZHAO Hong¹, ZHU Deju³, XIE Youjun¹, ZENG Xiaohui¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. High-speed Railway Engineering Technology Research and Development Center, Shandong Railway Investment Holding Group Co., LTD., Jinan 250102, China; 3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Extended Abstract

Introduction Cementitious materials are widely used in construction due to their wide range of raw material sources and easy construction. However, the characteristics of brittleness and easy cracking restrict their application in ductile structures. Fiber toughening is an effective approach to enhance the toughness of cementitious materials. The damage of cementitious materials is a gradual, multi-scale occurrence of the process. The first micrometer-scale cracks emerge, gradually expand and become larger with the increase of the load, forming the microscopic cracks, following convergence, developing macroscopic cracks, and ultimately leading to the material failure. Therefore, the toughening and crack-resisting effect of single-scale fibers are difficult to meet the multi-scale cracking process of cementitious composites. To correspond to this process, the hybrid fiber is an effective method, and the synergistic effect between different types of fibers can achieve the effect of “1+1>2”. There exist a few studies on the static flexural performance of hybrid fiber-toughening cementitious composites (HFTCC), but there is paucity of studies on the dynamic flexural behavior of HFTCC. To understand the hybrid effect of steel fiber and polyethylene fiber (PE fiber) on the static and dynamic flexural properties of cementitious composites, the static and dynamic flexural performances of HFTCC were investigated *via* three point bending test and drop weight impact test. In addition, the hybrid effect of steel fiber/PE fiber and the corresponding toughening mechanism were also analyzed.

Methods The three-point bending tests were carried out based on a reference (GB/T 17671—2021). An electro-hydraulic servo universal testing machine (INSTRON 1342) was used to carry out the three-point bending test, at a loading rate of 0.2 mm/min. Load transducers and displacement sensor were used to record the load and mid-span deflection (δ) changes during the test, and the loading was stopped when the δ value reached 5 mm.

The impact flexural properties were determined by a model INSTRON-CEAST 9340 drop weight impact testing machine. The required velocities were obtained by releasing the impactor from a predetermined height. The mass of the impact hammer head used in this test was 4.08 kg, the set impact speeds were 3 m/s and 4 m/s, and the impact force was collected by a high-speed data acquisition system (within 22 kN) at a data acquisition frequency of 0.5 MHz.

Results and discussion The failure pattern of specimens indicates that fibers can effectively improve the dynamic flexural properties of specimens due to the fiber bridging and crack-blocking effect. Compared with PE fibers, steel fibers have a higher stiffness and a better ductility, which can resist the deformation of the specimen and limit the degree of opening of the main crack, thus improving the flexural properties of the specimen.

Comprehensive analysis of load-displacement curve of HFTCC specimens shows that the static flexural performance of HFTCC is positively correlated to the PE fiber content, and the dynamic flexural performance demonstrates a positive correlation with the steel fiber content. The specimen with 1.5% (in volume fraction) PE fiber and 0.5% steel fiber exhibits the optimal static flexural peak stress, while the specimen with 1.5% steel fiber and 0.5% PE fiber presents the optimal dynamic flexural energy absorption. Under static flexure, the peak strength and energy absorption of HFTCC are increased by 26.5%–31.7% and 14.8%–56.8%, respectively, compared to the specimen with 2.0% steel fiber content.

The dynamic increase factor (DIF) and energy absorption of HFTCC exhibit a significant strain rate effect. Under dynamic loading, the toughening effect of PE fibers is weaker than that of steel fibers, and the incorporation of a large number of PE fibers is not conducive to the enhancement of the dynamic energy absorption capacity of the specimen, which is related to the change in the failure mode of PE fibers. A small amount of PE fibers instead of steel fibers plays a toughening effect, which can exert the enhancement of the specimen dynamic energy absorption capacity.

Synergistic effect analysis reveals that the steel fiber plays the dual effect of enhancement and toughening on the higher rate of dynamic flexure when the steel-PE fiber system with a high dosage of steel fiber due to the high tensile strength, stiffness, and ductility of the steel fiber, effectively enhancing the energy absorption capacity of the HFTCC under the larger deformation.

The schematic diagram of HFTCC physical model was established *via* the analysis of SEM images. The steel-PE fibers effectively prevent the development of micro-cracks and the formation of macro-cracks, and the steel-PE fibers have a positive effect on the improvement of the mechanical properties and impact resistance of the cementitious materials during the static and dynamic loading process. Also, the micro-morphological analysis of HFTCC indicates that the steel-PE fibers form a three-dimensional mesh

structure to have the effect of fiber toughening and crack-resisting on the matrix.

Conclusions 1) The steel-PE hybrid fibers improved the static and dynamic flexural properties of HFTCC, in which the 0.5% (in volume fraction) steel-1.5% PE hybrid fiber HFTCC exhibited the optimal static peak bending and tensile stresses, while the 1.5% steel-0.5% PE hybrid fiber HFTCC had the optimal energy absorption under the dynamic loads. The DIF and energy absorption of HFTCC had significant strain rate effects.

2) The steel-PE fibers in HFTCC showed a synergistic effect. For the peak load, static flexure mainly showed a positive synergistic effect, and the contribution of PE fibers to the peak stress of HFTCC was weaker than that of steel fibers under the dynamic impact loads. The specimen with 0.5% steel-1.5% PE hybrid fiber under the static flexure effectively improved the energy absorption of HFTCC, with the maximum hybrid coefficient S of 1.239, while the impact dynamic loading under the impact dynamic loading of the specimen with 1.5% steel-0.5% PE hybrid fiber effectively enhanced the energy absorption of HFTCC, with the maximum S of 1.086.

3) The toughening mechanism of HFTCC mainly originated from the synergistic crack-blocking and toughening effect between steel and PE fibers. Especially, the micro-fine steel fibers and PE fibers could fully utilized their respective mechanical properties at their appropriate dosages, thus effectively improving the static and dynamic flexural performances of HFTCC.

Keywords cementitious composites; hybrid fiber toughing; static and dynamic flexural properties; flexural toughness