

# 钢-聚甲醛混杂纤维混凝土的动态力学性能 及细观模拟研究\*

曹益彬<sup>1</sup>, 陈瑞浩<sup>2</sup>, 郎志军<sup>3</sup>, 张力丹<sup>2</sup>, 张文字<sup>2</sup>, 刘磊<sup>1,2</sup>

- (1. 昆明理工大学公共安全与应急管理学院, 云南 昆明 650093;
2. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;
3. 中国建筑第七工程局有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 为揭示钢-聚甲醛混杂纤维混凝土 (hybrid fiber reinforced concrete, HFRC) 的动态力学特性及细观损伤特征, 通过分离式霍普金森压杆试验研究了素混凝土、钢纤维混凝土及 HFRC 的动态力学性能, 结合扫描电镜观测纤维与基体界面的微观形貌及断裂特征; 基于 LS-DYNA 软件, 建立了包含多面体骨料、砂浆、界面过渡区及 2 种纤维的三维细观数值模型, 从细观角度揭示 HFRC 的损伤演化、能量耗散及应力特征。结果表明: 聚甲醛纤维可与钢纤维产生协同增强效应, 大幅提升材料的动态抗冲击性能。其中, 钢纤维与基体黏结较强, 靠界面滑移耗能; 聚甲醛纤维界面黏结较弱, 以拔出、拉断及变形耗能。二者在裂缝不同阶段协同作用, 有效提升基体阻裂与耗能能力。细观模拟显示: 砂浆为主要耗能组分, 界面过渡区是冲击下最早失效的薄弱区域; 随着冲击气压升高, 各组分的能量吸收与峰值应力均显著提升, 其中混杂纤维可减少能量反射与动能损耗, 促进更多冲击能量被吸收耗散; 界面过渡区的峰值应力对加载速率最敏感, 骨料敏感性最低。所建细观模型能较好地再现 HFRC 的动态力学行为与损伤特征, 可为 HFRC 在抗冲击工程中的应用提供理论与数值参考。

**关键词:** 混杂纤维混凝土; 动态力学性能; 细观模拟; 能量耗散; 应力特征

**中图分类号:** O347.3; O521.9

**文献标识码:** A

混杂纤维混凝土通过在水泥基体中引入两种或多种具有不同物理化学特性的纤维, 有效改善了传统混凝土固有的脆性大、抗拉强度低及抗冲击能力差等缺陷<sup>[1]</sup>, 已广泛应用于桥梁、隧道、机场跑道及大跨度结构等重大工程中。SF 凭借其高弹性模量和桥接阻裂作用, 可显著增强混凝土的强度与能量吸收能力<sup>[2][3]</sup>。POMF 是一种新型聚合物纤维, 综合性能优良、抗拉强度高、耐疲劳、耐腐蚀性强, 具有优异的分散性, 与基体结合紧密<sup>[4][6]</sup>, 可弥补 SFRC 在韧性、抗裂性方面的不足, 二者协同作用能使混杂纤维混凝土表现出优于单掺纤维混凝土的综合性能, 为新型混杂纤维混凝土的工程应用提供新方向。相关研究表明<sup>[7][8]</sup>: POMF 对混凝土材料的力学性能增强效果超过目前广泛使用的聚丙烯、聚乙烯醇等纤维, 有望成为混凝土纤维增强材料中的新成员。

混凝土结构服役期间, 除常规静载以外, 无法避免地会承受冲击或爆炸等动荷载作用<sup>[9]</sup>。SHPB 装置作为研究材料动态力学性能的标准设备, 已被广泛应用于纤维混凝土动态冲击性能的试验研究。现有研究表明, 混杂纤维混凝土具有较高的动态强度和韧性, 且材料的动态强度和韧性都随着应变率的增加而增加<sup>[10][13]</sup>。这种优异的抗冲击性, 主要得益于纤维的桥接效应和材料的高延展性<sup>[14][16]</sup>。

目前, 众多学者已对不同类型混杂纤维混凝土的动态力学性能开展了大量研究。研究发现, 钢

\*收稿日期: 2026-05-11; 修回日期: 2026-06-24

基金项目: 国家自然科学基金 (11862010, 51964023); 云南省重大科技专项项目 (202202AG050014); 云南省“兴滇英才支持计划” (KKXX202521089)

作者简介: 曹益彬 (2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事混杂纤维混凝土力学性能研究. E-mail: 1578475078@qq.com

通讯作者: 刘磊 (1981—), 男, 博士, 教授, 主要从事工程爆破、岩土工程、火灾安全研究. E-mail: kgliulei@kust.edu.cn

-聚丙烯混杂纤维可显著提升混凝土的冲击韧性，其增强效果优于单一纤维<sup>[17]</sup>。钢-玄武岩混杂纤维可同时提升混凝土的强度和韧性，改善其抗冲击性能<sup>[18]</sup>。钢-聚乙烯混杂纤维表现出更优越的抗冲击性能<sup>[19]</sup>。但是，目前研究主要集中于 SF 与聚丙烯、玄武岩以及聚乙烯等传统纤维的混掺研究，目前针对 POMF 这种新型纤维的研究相对较少，且主要集中于静载条件下的基本力学性能测试，缺乏对其动态力学性能的系统研究。在数值模拟方面，ANSYS/LS-DYNA 软件模拟 SHPB 试验的可靠性已得到验证<sup>[20]</sup>。然而现有研究仍存在一定的局限性：一方面，在以往大多数研究中<sup>[21][23]</sup>，混凝土通常被假设为只含有砂浆的均匀介质，从而忽略了其由粗骨料、水泥砂浆基体和 ITZ 组成的非均质复合材料特征<sup>[24]</sup>。另一方面，目前的研究中，骨料主要是球形，为使骨料更接近真实形态，需选用不规则多边形及多面体来近似代替骨料。Liu 等建立了包含多面体骨料、砂浆、ITZ 和纤维的数值模型，对其进行了动态压缩模拟，模拟结果在峰值应力、峰值应变和失效特性方面与实验数据高度一致<sup>[25]</sup>。张湘茹等<sup>[26]</sup>建立包含随机多面体粗骨料、砂浆和 ITZ 混凝土 3D 细观模型，可靠地再现了混凝土的动态压缩力学行为。义扬<sup>[27]</sup>把二维多边形骨料随机细观建模方法拓展至三维场景，构建出任意形态的多面体骨料模型，验证了模型的可靠性与适应性。更为关键的是，关于 SFRC 的细观数值模拟已有较多成果，但针对多纤维协同作用的混杂纤维混凝土细观建模研究仍显不足；现有能量分析多集中于宏观整体层面，缺乏对各细观组分的能量耗散分析。同时，ITZ 作为连接骨料和砂浆的薄弱环节，其力学参数难以通过试验直接测得，现有研究对其在动态冲击下的损伤演化规律关注不足。

鉴于此，本文对 PC、SFRC 和 HFRC 开展静态压缩与动态冲击压缩试验。同时结合 SEM 电镜扫描分析，观察纤维与基体界面的微观形貌及断裂特征。在数值模拟方面，构建包含多面体骨料、砂浆、ITZ 和混杂纤维的细观数值模型，分析其能量耗散与应力特征。通过试验与模拟相结合，可更好地揭示其裂纹扩展机理与破坏模式，明确各细观结构对宏观动态性能的影响，为工程应用提供理论支撑。

## 1 试验概况

### 1.1 原材料

水泥为 P.O42.5 硅酸盐水泥；试验选取坚硬致密、级配优良的 II 区人工中砂作为细骨料，细度模数 2.6~3.0，含泥量 1.3%；粗骨料选用天然碎石，采用 5~20 mm 连续级配形式，表观密度为 2710 kg/m<sup>3</sup>，压碎指标 6.3%；采用河南铂润新材料有限公司所生产的 I 级粉煤灰与 S95 级矿粉作为矿物掺合料；减水剂使用的是复合型聚羧酸高效减水剂；SF 选用的是松泰路桥有限公司生产的镀铜钢纤维；POMF 是由重庆云天化天聚新材料有限公司生产。SF 和 POMF 如图 1 所示，几何与物理参数如 **Error! Reference source not found.**所示。

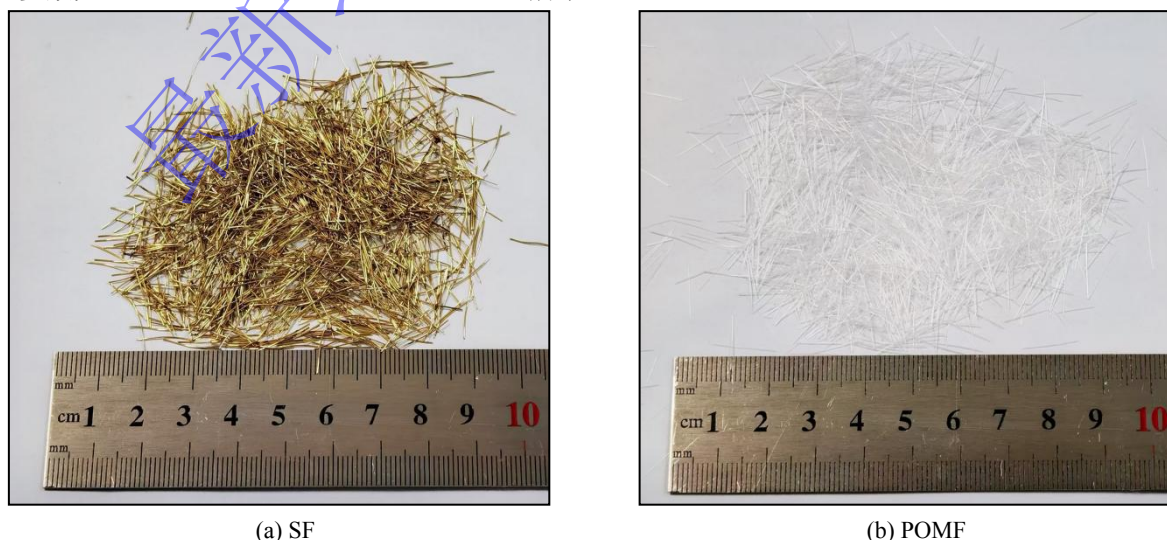


图 1 纤维形态

Fig. 1 Fiber morphology

表 1 纤维的几何与物理参数

Table 1 Geometric and physical parameters of fibers

Types of Fibers	Diameter (mm)	Length (mm)	Density (g·cm <sup>-3</sup> )	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
SF	0.18	13	7.85	3000	2100	200
POMF	0.2	12	1.41	1000	700	10

### 1.2 配合比设计及试件制备

通过预实验确定了相同制备环境下，单掺 SF、POMF 的最优体积掺量均为 1%，故按 1:1 的比例进行混掺配制 HFRC。根据《高性能混凝土应用技术规程》（CECS207: 2006）和《钢纤维混凝土试验方法》（CECS13:89）来配制 PC、SFRC 和 HFRC。参照《普通混凝土配合比设计规程》

（JGJ55-2011）规范要求，对 C60 混凝土进行配合比设计。为保证混凝土拌合物工作性能稳定，消除无关变量对试验结果的影响，试验统一采用固定配合比。矿物掺合料掺量控制为 20%，坍落度设定为 210 mm，水胶比 0.29，砂率 0.4，依据体积法完成各组 C60 混凝土配合比计算，具体配比参数如表 2 所示。

通过对养护完成的混凝土进行取芯、切割、打磨工作，制备得到准静态压缩试验用的试件尺寸为  $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  圆柱体，SHPB 动态压缩试验中的试件尺寸为  $\Phi 50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  圆柱体。

表 2 不同 C60 混凝土配合比

Table 2 Mix proportions of C60 concrete

Specimen	Cement (Kg/m <sup>3</sup> )	Water (Kg/m <sup>3</sup> )	Coarse aggregate (Kg/m <sup>3</sup> )	Fine aggregate (Kg/m <sup>3</sup> )	Fly ash (Kg/m <sup>3</sup> )	Slag powder (Kg/m <sup>3</sup> )	Water reducer (Kg/m <sup>3</sup> )	SF content (Kg/m <sup>3</sup> )	POMF content (Kg/m <sup>3</sup> )
PC	370	176	960	641	119	119	5.93	0	0
SFRC	370	176	960	641	119	119	5.93	78.5	0
HFRC	370	176	960	641	119	119	5.93	78.5	14.1

### 1.3 试验方法

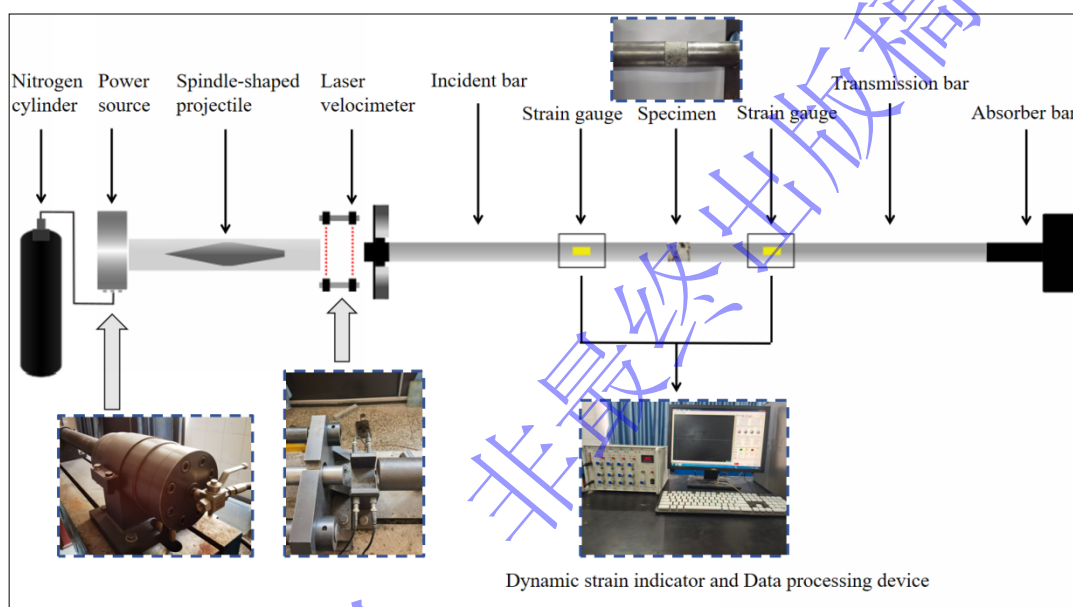
采用 YAW-600 压力试验机对试件开展静态压缩试验，如图 2(a)所示。微观形貌观测所采用的试验设备为 VEGA3 TESCAN 型钨灯丝扫描电子显微镜，用于开展 SEM 电镜扫描测试，如图 2(b)所示。采用直径为 50 mm 的 SHPB 装置对试件开展动态冲击压缩试验，图 2(c)为 SHPB 装置示意图。设备所用冲击子弹及压杆均选用高强度钢材质，密度为 7850 kg/m<sup>3</sup>、弹性模量为 210 GPa、泊松比为 0.3、纵波传播速度为 5173 m/s。入射杆与透射杆长度一致，均为 2000 mm，子弹长度 265 mm，撞击面直径 15 mm，中部直径 50 mm。通过铜制波形整形器对入射波形进行整形，为减小端面摩擦效应对试件径向膨胀的约束，在试件两端与压杆接触面均匀涂抹二硫化钼润滑剂。本文设置了三个冲击气压（0.3 MPa、0.4 MPa、0.5 MPa），研究的应变率范围在 50 s<sup>-1</sup>~170 s<sup>-1</sup>。为确保试验结果的准确度，每组试验做 3 组平行试验，取其有效数据的平均值为最终试验结果。



(a) Static pressure testing



(b) Scanning electron microscope



(c) Schematic diagram of SHPB apparatus

图 2 试验设备

Fig. 2 Test equipment

为确保 SHPB 动态冲击试验结果的有效性与可靠性，对原始波形、应力平衡状态、应变率恒定性及端面摩擦效应进行了控制与验证。以 PC 为例，其在不同冲击气压下的原始波形如图 3 所示，从图中可以看出透射波幅值低于入射波，表明大部分冲击能量被试件吸收或耗散；反射波呈现拉伸相，符合混凝土类脆性材料在高应变率下的典型响应特征。选取典型冲击气压下应变时程曲线进行平衡验证如图 4 所示，入射波与反射波叠加后的应力曲线与透射波应力曲线在全过程中基本重合，表明试件在动态加载过程中满足应力均匀性假设，试验数据有效。

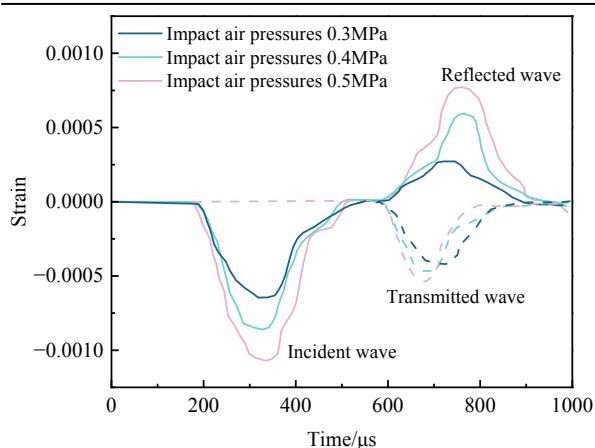


图 3 不同冲击气压下原始波形

Fig. 3 Original waveforms at various impact pressures

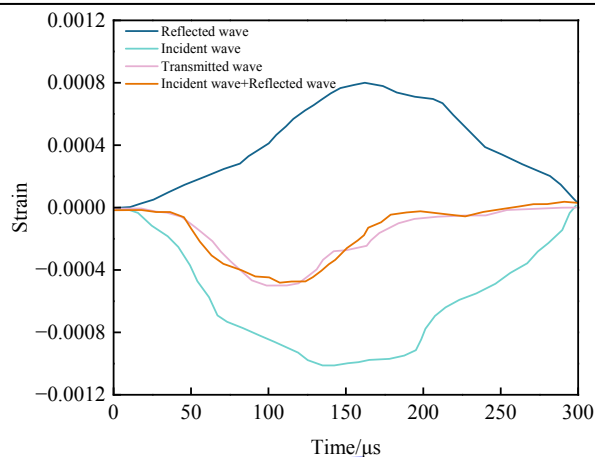


图 4 应变时程曲线平衡验证

Fig. 4 Strain time-history curve equilibrium verification

## 2 试验结果分析

### 2.1 破坏形态

图 5 为不同试件不同冲击气压下的破坏形态。冲击气压为 0.3 MPa 时, PC 表现为留芯破坏, 碎块以大尺寸块体为主; 随着冲击气压的增大, 试样破坏程度加剧, 碎块尺寸减小, 同时伴随大量砂浆基体粉碎与骨料剥离产生的细碎屑。SF 的引入改善了混凝土的抗冲击性能, 在低气压下, 试样表面出现多条纵向与斜向贯通性主裂纹, 裂纹宽度较小; 随着冲击气压的提升, 主裂纹数量增多、宽度扩大, 多条裂纹交叉形成局部破碎区; 冲击气压为 0.5 MPa 时, 虽然 SF 发生拉断、拔出, 但是碎块间仍能通过纤维桥接形成相对松散的整体, 无明显粉末状碎屑堆积。HFRC 结合了 SF 和 POMF, 利用其协同效应进一步提升力学性能, 在低冲击气压下, 试样仅产生少量细而密的纵向主裂纹, 裂纹宽度极小, 主体结构保持完整, 无明显块体分离。随着冲击气压的增加, 主裂纹数量增多、宽度增大, 端面出现明显的压碎、崩落, 但仍通过纤维保持一定的联结性, 未完全散架, 试样整体性最优。

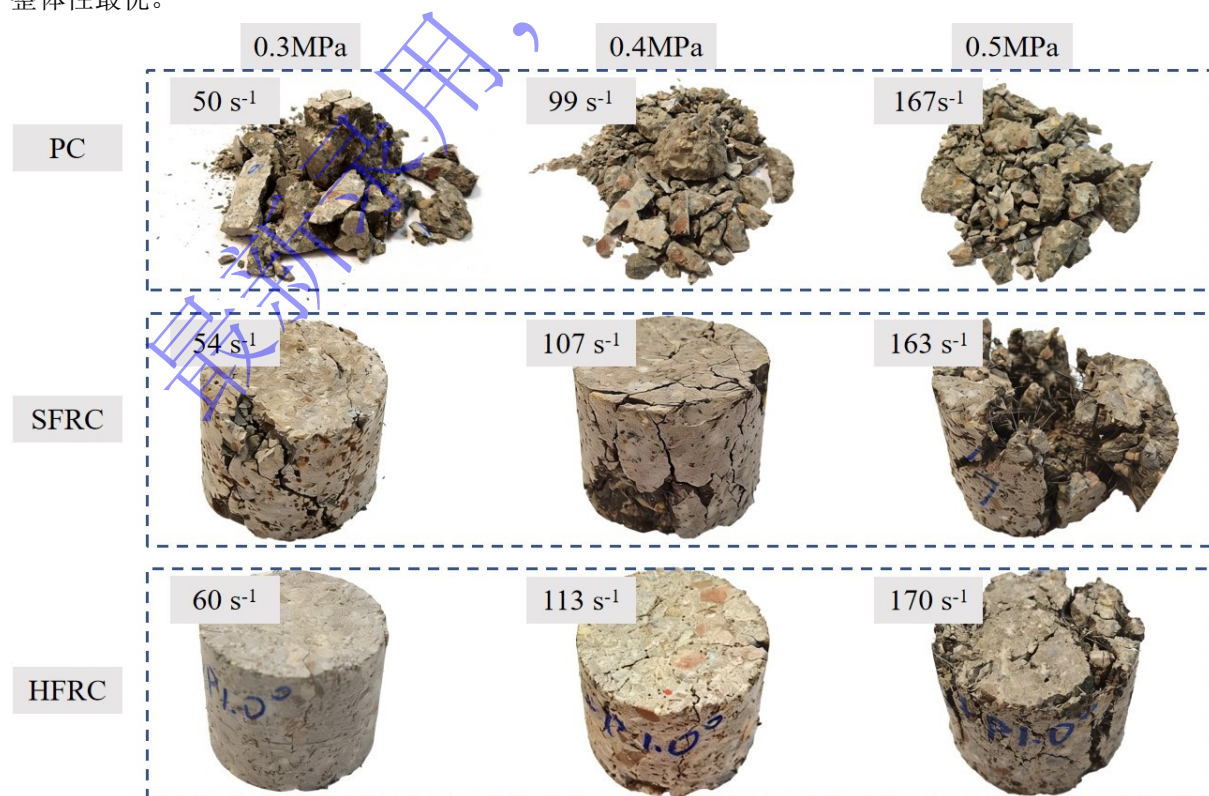


图 5 动态冲击压缩破坏形态

Fig. 5 Failure modes under dynamic impact compression

## 2.2 应力应变曲线

图 6 为不同试验组静态应力-应变曲线。加载初期，PC 试件应力随应变呈线性增长趋势。当应力达到峰值强度后，曲线迅速下降，表现出典型的线弹性力学特征与脆性软化破坏形式。SFRC 其应力-应变曲线较 PC 表现出更高的峰值强度以及更长的下降段，HFRC 通过纤维的协同效应进一步优化了力学性能，与 SFRC 相比，HFRC 的下降段更长且更平缓，峰值强度最大，表明混杂纤维能进一步提升试件延性与承载能力。

图 7 为各试验组静态抗压强度值。可以看出，不同纤维类型均能不同程度的提高混凝土的静态抗压强度。HFRC 静态抗压强度提升最为显著，与 PC 相比，其抗压强度提高了 27.12%。其次是 SFRC，其抗压强度提高了 13.15%。

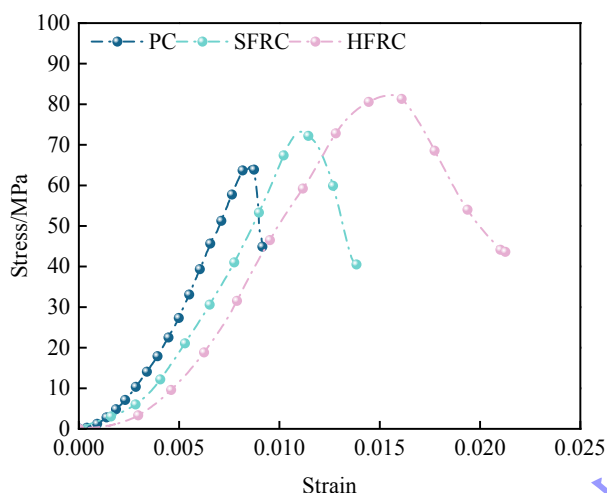


图 6 不同试验组应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of different test groups

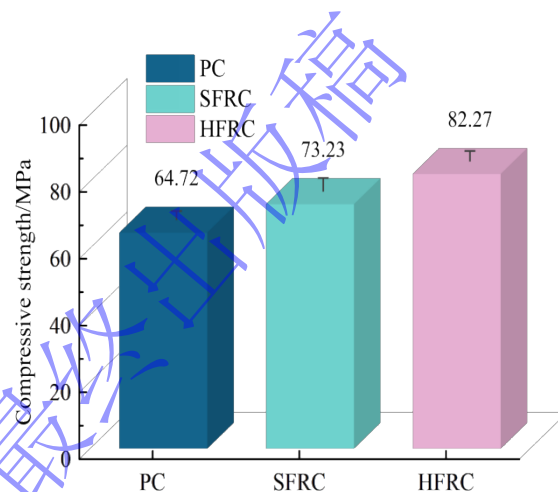


图 7 不同试验组抗压强度

Fig. 7 Compressive strength of different test

图 8(a-c)为不同试验组动态应力-应变曲线，曲线可分为弹性阶段、塑性阶段和应力卸载阶段<sup>[28]</sup>。在弹性阶段，应力与应变近似呈线性增长关系，材料内部结构未产生明显损伤；进入塑性阶段后，应力增长速率逐渐减缓并达到峰值，试件内部微裂纹不断萌生、扩展并逐步贯通；到达峰值应力后进入应力卸载阶段，试件发生整体破坏，应力随应变增加而降低。PC 的峰值应力和应变均最低，破坏后曲线迅速下降。SFRC 由于 SF 的阻裂与增韧作用，在相同冲击气压下峰值应力显著高于 PC，峰后下降段变缓，具备一定的延性；HFRC 通过不同纤维的协同作用，实现了强度与韧性的同步提升，峰值应力最高，峰后应力下降最为平缓，体现出混杂纤维在动态冲击荷载下的优异增强增韧效果。

由图 8(d)可见，相同冲击气压条件下，试样的动态抗压强度排序为：HFRC>SFRC>PC。说明 POMF 的引入可与 SF 产生协同增强效应，大幅提升材料的动态抗冲击承载能力。通过分析误差棒长度可知，PC 在各冲击气压下的误差棒长度均为三者中最长，HFRC 的误差棒长度整体为三者中最短，体现了混杂纤维协同作用能够提升冲击试验数据稳定性。

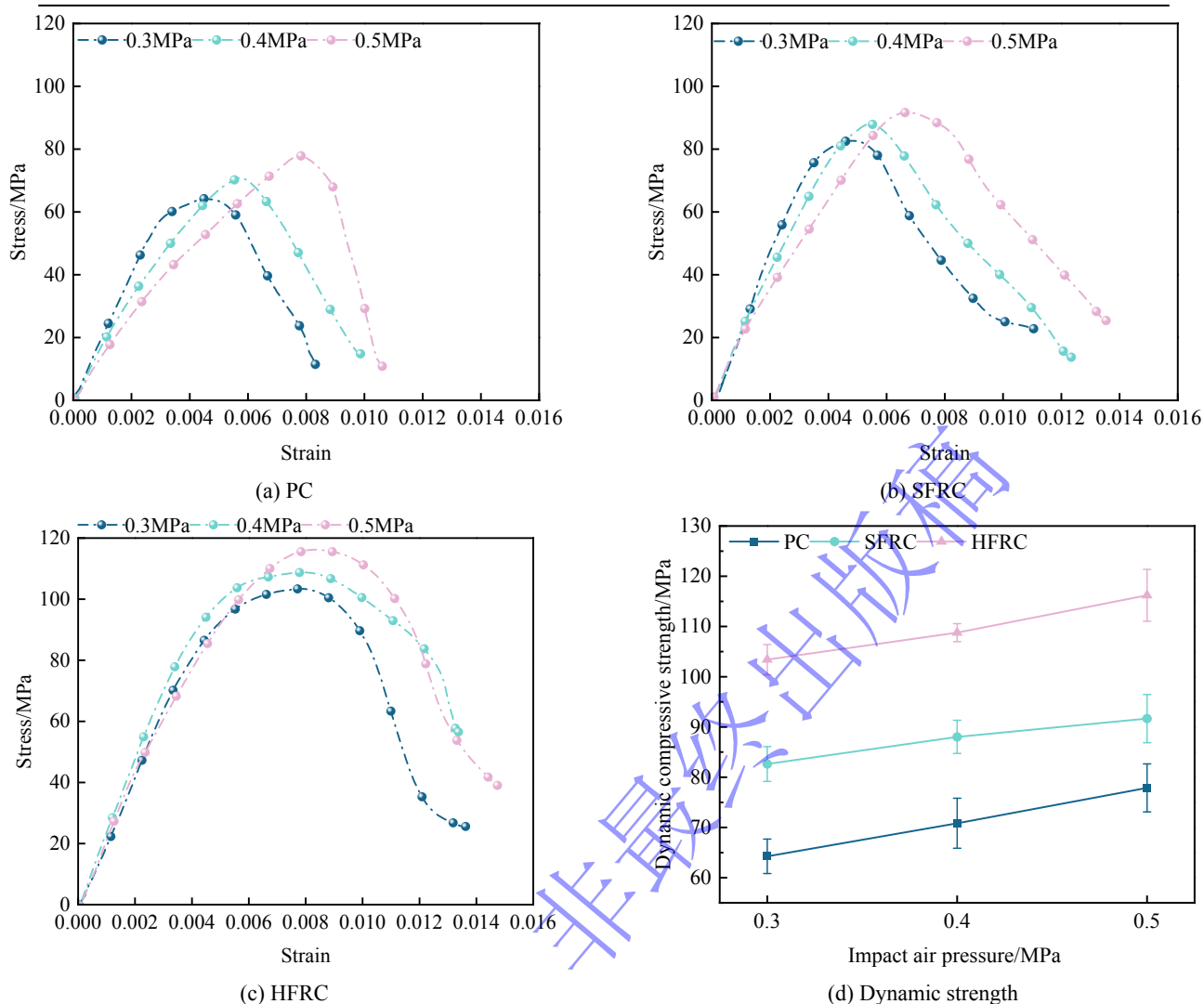


图 8 不同试验组动态应力-应变曲线及动态抗压强度对比

Fig. 8 Dynamic stress-strain curves and comparison of dynamic compressive strength for different test groups

### 2.3 应变率增强效应

动态增长因子(dynamic increase factor,DIF)表示试件的动、静抗压强度之比,它是量化材料应变率增强效应的核心指标,定义为:

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

式中:  $f_d$  为动态抗压强度;  $f_s$  为静态抗压强度。

为了量化应变率与 DIF 之间的相关性,对每种试样类型的实验数据进行了线性回归分析。其关系由以下方程描述:

$$DIF = A \lg \varepsilon + B \quad (2)$$

式中:  $A$  是回归斜率,  $\varepsilon$  表示应变率,  $B$  是  $y$  截距。

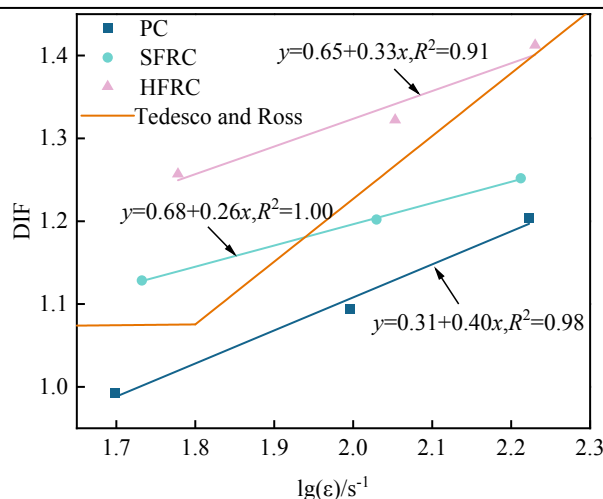


图 9 不同试件动态增长因子

Fig. 9 Dynamic increase factors of different specimens

从图 9 可以看出, 随着应变率的增加, 不同试件的 DIF 都有明显的增加, 展现出显著的应变率强化响应特征。这是因为高应变率加载时荷载作用历时较短, 材料难以通过瞬时变形完成能量积累, 仅依靠提高应力响应耗散能量, 进而使试件宏观动态强度得到提升<sup>[29]</sup>。图中的线性拟合仅用于描述本文试验应变率范围  $50 \text{ s}^{-1} \sim 170 \text{ s}^{-1}$  内 DIF 的近似变化趋势, 所有拟合得到的  $R^2$  均大于 0.90, 表明拟合结果与试验数据吻合较好可靠性较高。拟合方程的斜率反映了材料对应变率的敏感程度, 而非强度水平。PC 的斜率最大, HFRC 次之, SFRC 最小, 说明纤维的掺入降低了混凝土的应变率敏感性。HFRC 的 DIF 值最高, SFRC 次之, PC 最低, 表明 SF 和 POMF 的协同作用增强了动态承载能力。值得注意的是, SFRC 的斜率比 HFRC 小, 这是因为与 SF 不同, POMF 作为聚合物纤维, 具有明显的粘弹性特征, 随着应变率提高, 纤维拉伸模量和拔出阻力也随之增加, 因此掺入 POMF 后会使得 HFRC 的整体敏感性较 SFRC 回升。经对比, PC 的 DIF 增长幅值为 21.2%, SFRC 为 10.9%, HFRC 的为 12.4%。HFRC 的 DIF 值最高但增幅并非最大, 这是因为纤维协同作用已显著提升了静态强度, 而 PC 静态强度低, 动态强度的相对增长比例更为突出。同时, HFRC 的 DIF 增长幅值高于 SFRC, 说明 POMF 的掺入能使动态强度继续获得提升。

将其与 Tedesco and Ross 提出的混凝土动态抗压强度 DIF 模型进行趋势对比, 该模型由以下方程描述<sup>[30]</sup>:

$$DIF = \begin{cases} 0.00965 \log \varepsilon + 1.058 & \varepsilon \leq 63.1 \text{ s}^{-1} \\ 0.758 \log \varepsilon - 0.289 & \varepsilon > 63.1 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

由图可知, Tedesco and Ross 模型的曲线斜率在中高应变率下显著高于本研究的三组混凝土, 且整体位于 PC 和 HFRC 之间, 该差异主要源于经典模型基于普通混凝土试验数据建立, 而本文混凝土强度较高, 并且该模型未考虑纤维增强效应, 纤维掺入可有效降低混凝土的应变率敏感性, 使动态强度增长更稳定。经典模型对于纤维增强混凝土的适用性有限, 后续研究可以增加应变率数据点加以修正与验证。

## 2.4 能量特征分析

能量以应力波为载体, 经历入射、反射、透射与耗散四个阶段, 反映了材料对动荷载的吸收与抵抗能力。根据能量守恒定理, 试件吸收的能量  $W_S(t)$  为式(4):

$$W_S(t) = W_I(t) - W_R(t) - W_T(t) \quad (4)$$

式中:  $W_S(t)$  为试件吸收的能量;  $W_I(t)$  为入射波能量;  $W_R(t)$  为反射波能量,  $W_T(t)$  为透射波能量。

三种能量的表达式为式(5)-(7):

$$W_I(t) = CAE \int_0^t \varepsilon_I^2(t) dt \quad (5)$$

$$W_R(t) = CAE \int_0^t \varepsilon_R^2(t) dt \quad (6)$$

$$W_T(t) = CAE \int_0^t \varepsilon_T^2(t) dt \quad (7)$$

式中： $C$ 为应力波的波速； $A$ 为杆的横截面积； $E$ 为杆的弹性模量； $t$ 为任意时刻； $\varepsilon_I$ 、 $\varepsilon_R$ 和 $\varepsilon_T$ 分别为入射波、反射波和透射波的应变。

能量吸收率 $\eta$ 为式(8):

$$\eta = \frac{W_S}{W_I} \quad (8)$$

基于上述公式计算出不同冲击气压下不同试件的能量结果，见图 10。

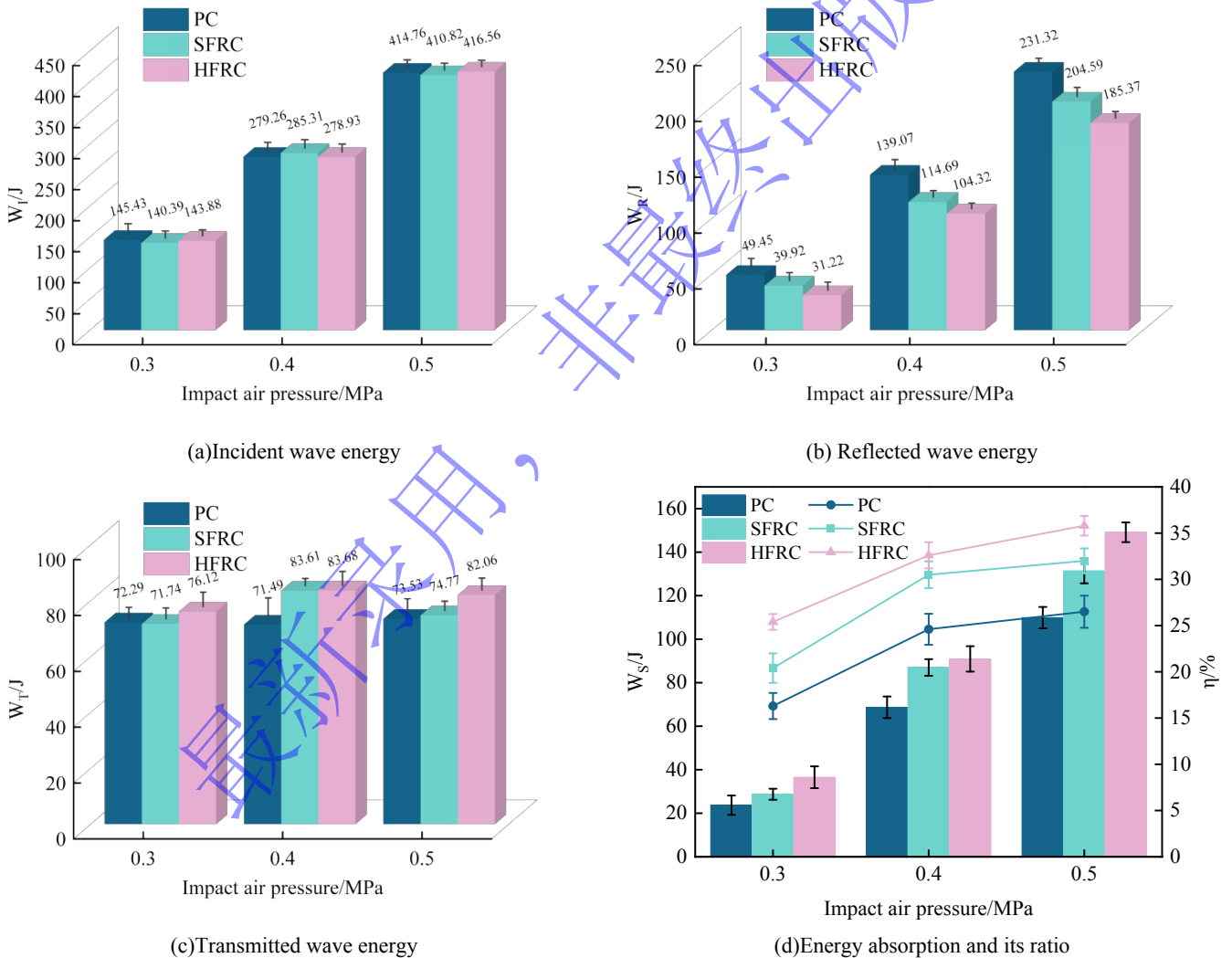


图 10 不同试件能量结果

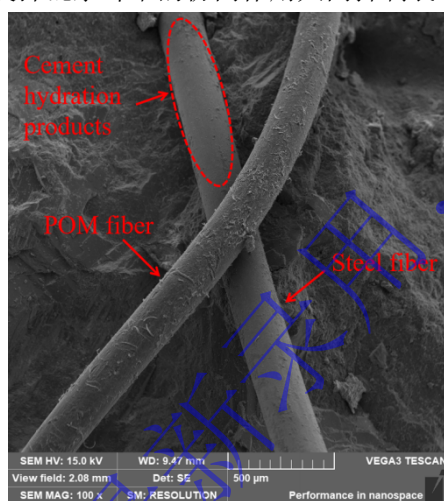
Fig. 10 Energy results of different specimens

由图 10 可见，同一个试件，反射能以及试件吸收的能量均随着入射能的增大而增大。由于气压升高使入射能增大后，试件迅速进入应力饱和状态，后续增加的能量主要以反射能形式存在或被试件塑性变形、裂纹扩展等耗散，仅有极少部分能量能够继续通过试件传递至透射杆，因此透射能

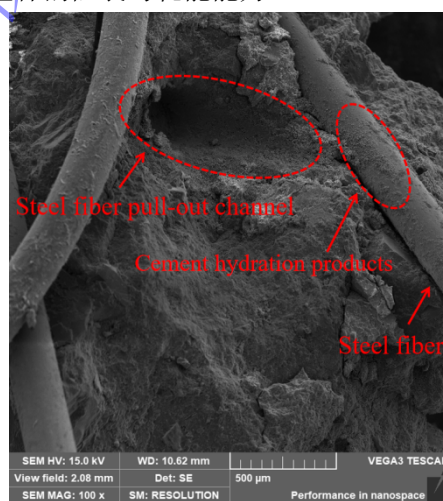
整体增长缓慢, 呈现出随冲击气压变化不大的特征。纤维的掺入可以提升混凝土在动态冲击下的能量耗散能力与能量吸收率, 其中 HFRC 的耗能性能最优。由图 10(d)可以看出, PC 和 SFRC 的能量吸收率在 0.3-0.4 MPa 内增长最为显著, 这是因为冲击气压的提升充分激发了基体损伤与纤维作用, 能量吸收率快速增长, 而在 0.4-0.5 MPa 内由于基体与纤维的耗能潜力已达上限, 导致能量吸收率增长显著放缓。HFRC 能量吸收率稳定提升, 这是因为 SF 桥接宏观裂缝, POMF 通过拉伸变形、拔出摩擦持续耗散能量, 使试件在高冲击气压下仍能维持稳定的能量耗散能力。基于图 10 (d) 中误差棒的长度, 对三种混凝土动态冲击下能量吸收率进行离散性分析。PC 能量吸收率的误差棒长度在各工况下均为三者中最长, 反映出素混凝土在冲击荷载下裂纹扩展路径的随机性, 导致损伤耗能波动较大。SFRC 的误差棒长度整体短于 PC, 离散性随冲击气压变化的增幅较小, 说明 SF 的桥接作用可有效约束裂纹扩展路径, 削弱冲击荷载对耗能过程的随机影响。相比之下, HFRC 的误差棒长度在各工况下均为三者中最短, 即使在 0.5 MPa 高冲击气压下, 离散性仍保持较低水平, 体现了 SF 与 POMF 的协同增韧作用, 对不同冲击荷载下的损伤耗能过程均具有稳定作用。

## 2.5 微观形貌

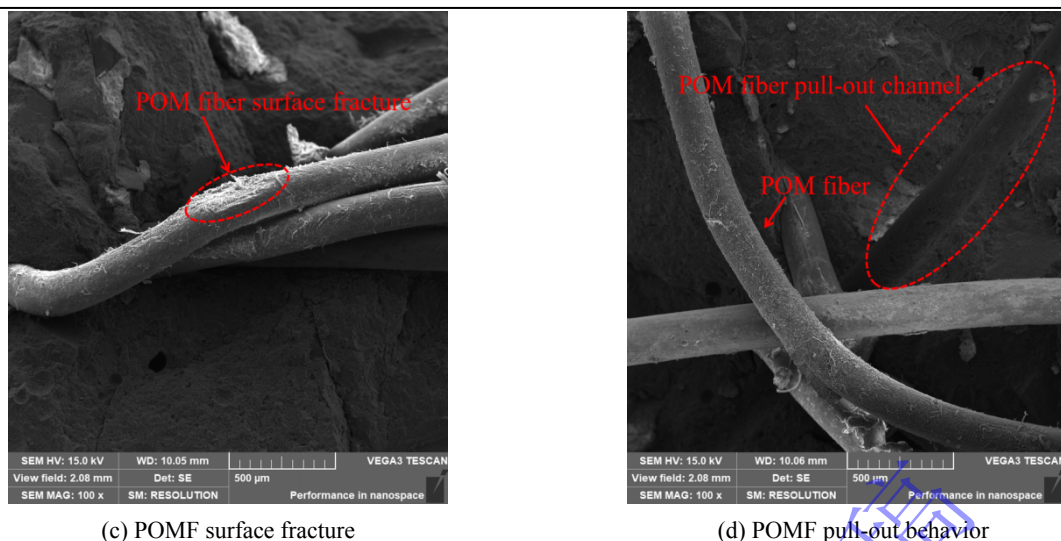
使用 SEM 扫描电镜对纤维-基体进行分析, 本次微观观测试样均取自试件主裂纹扩展区域。由图 11 可看出, SF 表面附着一层水泥水化产物, 同时拔出通道内壁较为粗糙, 表明其与基体间存在较强的黏结作用, 在动态冲击荷载作用下, 其主要通过黏结滑移和拔出过程耗散能量。而 POMF 表面无明显水化产物附着, 且对应的纤维拔出通道内壁光滑, 无明显基体材料撕裂痕迹, 表明其与基体界面黏结强度较低, 破坏形态以纤维拔出与拉断为主, 但在拉伸变形和拔出摩擦作用下其表面会发生拉丝损伤。二者界面行为的差异反映出了不同的桥接与耗能作用: SF 凭借与基体间的强黏结作用和高弹性模量, 在裂缝扩展初期即可形成刚性桥接, 通过界面黏结滑移传递应力、抑制裂缝张开以及耗散能量; 而 POMF 则在裂缝扩展中后期通过自身拉伸变形、拔出摩擦耗散能量。二者充分发挥混杂纤维的协同作用共同抑制裂缝扩展、提升基体的阻裂与耗能能力。



(a) POMF and SF in HFRC matrix



(b) SF in SFRC matrix



(c) POMF surface fracture

(d) POMF pull-out behavior

图 11 纤维-基体微观形貌

Fig. 11 Micro-morphology of fiber-matrix interface

### 3 细观数值模拟研究

#### 3.1 细观模型的建立

##### (1) 多面体骨料生成及投放

为满足有限元计算收敛要求，需完成模型网格无关性验证分析。Wu<sup>[31]</sup>分别采用 0.5 mm、1 mm、1.5 mm 三种网格尺寸进行对比计算，结果表明不同网格下模拟结果差异较小，满足计算收敛要求。综合考虑网格投影精度与裂缝扩展模拟效果，本研究最终采用 0.5 mm 作为网格单元尺寸。通过采用自主编写的 Python 程序构建多面体骨料几何模型，利用背景网格投影技术，将混凝土细观几何结构导入并映射至均质化有限元计算模型内部，如图 12 所示。本文不探讨骨料面数对计算结果的影响，所生成粗骨料统一采用二十四面体模型，并设置三级连续级配，粒径区间分别为 5 mm~6 mm、6 mm~8 mm、8 mm~10 mm，各级配所占比例依次为 0.4、0.3、0.3，多面体粗骨料总体积分数为 30%。

##### (2) 网格识别

细观模型中骨料、ITZ 及砂浆的识别基于背景网格的单元、节点信息实现。若网格单元所有节点均位于骨料内部，则判定该单元为骨料单元；若骨料仅覆盖单元的部分节点，则进行二次判定：若该单元的中心点位于骨料内部，则该单元仍归属为骨料单元。在已识别的骨料单元边缘，向外扩展一个单元网格宽度的区域，将其定义为 ITZ 单元。模型中未被识别骨料和 ITZ 单元的区域，则为砂浆单元，识别过程如图 13 所示。

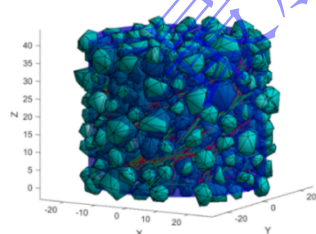


图 12 HFRC 3D 细观示意图

Fig. 12 3D meso-scale schematic diagram of HFRC

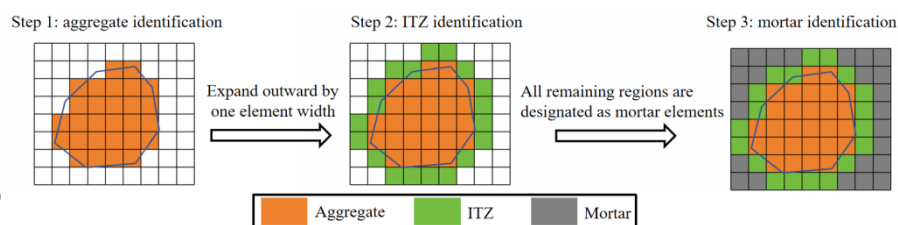


图 13 网格识别简图

Fig. 13 Schematic diagram of mesh identification

##### (3) 纤维生成

借鉴已有研究方法<sup>[32]</sup>，在砂浆基体中布设随机分布的纤维，并严格保证纤维与骨料、纤维与纤维之间均无相互干涉。纤维起止坐标以 dat 文件格式导出，利用 LS-DYNA 完成纤维有限元建模，并定义截面特征与材料本构。通过黏结滑移本构关系描述 SF 拉拔力学行为，拉拔曲线可分为四个

阶段：弹性阶段、局部脱黏阶段、完全脱黏和滑动拔出阶段<sup>[33]</sup>。采用 DEFINE\_FUNCTION 定义纤维的黏结滑移函数，并选用四段式纤维黏结滑移公式表征其界面行为，在 CONSTRAINED\_BEAM\_IN\_SOLID 选项卡中导入该函数，实现纤维与砂浆之间的黏结滑移设置。相应的黏结滑移公式见式(9)-(12)。而 POMF 因表面光滑导致界面黏结强度较低，破坏形态以纤维拔出与拉断为主，而非传统的黏结滑移机制<sup>[34][35]</sup>。POMF 采用 MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC (MAT\_003) 双线性弹塑性本构模型，与基体的连接通过 CONSTRAINED\_BEAM\_IN\_SOLID 实现完全耦合，失效通过材料卡片中的 FS 参数定义，当单元等效塑性应变达到该阈值时单元被删除，以模拟纤维拉断。纤维与基体之间定义 CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE，以表征拔出过程中的摩擦耗能。最终建立的包含多面体骨料、砂浆及 ITZ 的 HFRC 有限元模型如图 14 所示。

$$F = k_1 s \quad 0 \leq s \leq s_a \quad (9)$$

$$F = F_b + k_2 (s - s_a) \quad s_a \leq s \leq s_b \quad (10)$$

$$F = F_d + k_3 (s - s_b) \quad s_b \leq s \leq s_c \quad (11)$$

$$F = F_c + k_4 (s - s_c) \quad s_c \leq s \leq s_d \quad (12)$$

式中： $F$  为混凝土与 SF 之间的拔出荷载； $s$  为混凝土与 SF 之间的相对滑移； $k_1$  为弹性阶段斜率， $k_1 = F_b / S_a$ ； $k_2$  为部分脱黏阶段斜率， $k_2 = F_d - F_b / S_b - S_a$ ； $k_3$  为完全脱黏阶段斜率， $k_3 = F_c - F_d / S_c - S_b$ ； $k_4$  为纤维拔出阶段斜率， $k_4 = F_a - F_c / S_d - S_c$ ； $F_d$  为峰值拔出荷载； $s_d$  为峰值拔出荷载的相对滑移。

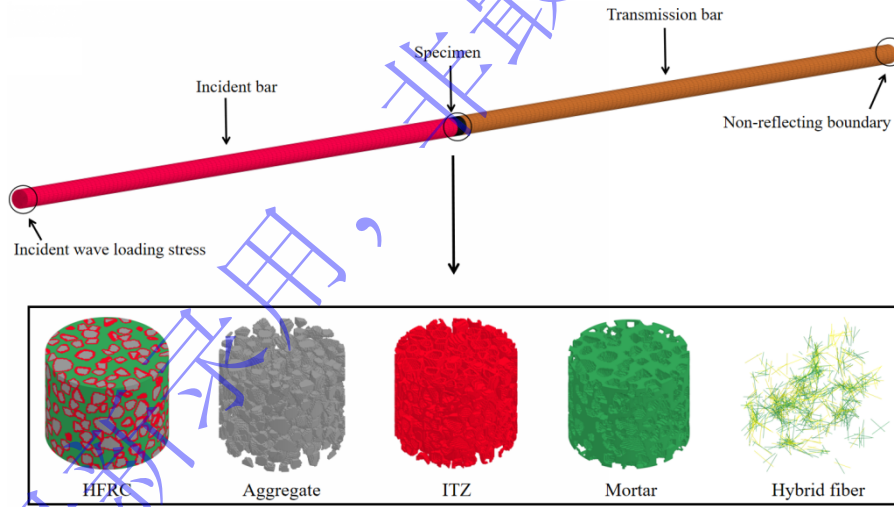


图 14 HFRC 细观有限元模型

Fig. 14 Meso-scale finite element model of HFRC

#### (4) 材料参数的确定

采用 RHT 模型、K&C 模型分别模拟骨料、砂浆材料的弹塑性损伤行为，所有参数均采用统一的 cm- $\mu$ s-g 单位制。参考 Ren<sup>[36]</sup>的方法，ITZ 的抗压强度和弹性模量均按照砂浆的 75%~80%进行取值。砂浆的材料参数通过试验实测获得为： $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$ ， $f_c = 58.5 \text{ MPa}$ ， $E = 33 \text{ GPa}$ ，ITZ 的材料参数为： $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$ ， $f_c = 45.0 \text{ MPa}$ ， $E = 25 \text{ GPa}$ 。SF 的材料参数根据表 3 进行取值，POMF 的材料参数根据表 4 进行取值。根据文献<sup>[37]</sup>的方法，通过基本力学参数，再结合 DYNA 材料手册对主要敏感性参数进行适当修改，多次试算直至实验与模拟结果基本一致。初步确定骨料的

RHT 模型部分参数见表 5。

表 3 SF 材料参数

Table 3 Material parameters of SF

Parameters	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	E(GPa)	PR	A(MPa)	B(MPa)	N	C
Parameter values	7.85	200	0.30	790	510	0.23	0.46

表 4 POMF 材料参数

Table 4 Material parameters of POMF

Parameters	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	E(GPa)	PR	SIGY(MPa)	ETAN(MPa)	SRC	SRP	FS
Parameter values	1.41	10	0.32	700	450	0.6	3.33	0.10

表 5 骨料的 RHT 模型部分参数

Table 5 Partial parameters of the RHT model for aggregate

Parameters	Values	Parameters	Values
Density( $\rho_0$ )	2.32 g/cm <sup>3</sup>	Break compressive strain rate(EC)	3.000e+19 s <sup>-1</sup>
Elastic shear modulus(SHEAR)	16.7 GPa	Break tensile strain rate(ET)	3.000e+19 s <sup>-1</sup>
Eroding plastic strain(EPSF)	2	Compressive yield surface parameter(GC*)	0.53
Failure surface parameter A	1.6	Tensile yield surface parameter(GT*)	0.7
Failure surface parameter N	0.61	Shear modulus reduction factor(XI)	0.5
Compressive strength(FC)	60 MPa	Minimum damaged residual strain(EPM)	0.01
Relative shear strength(FS*)	0.18	Residual surface parameter(AF)	1.6
Relative shear strength(FT*)	0.058	Crush pressure(PEL)	24 MPa

续表 5 骨料的 RHT 模型部分参数

Table 5(Continued) Partial parameters of the RHT model for aggregate

Parameters	Values	Parameters	Values
Reference compressive strain rate(E0C)	3.000e-11 s <sup>-1</sup>	Compaction pressure(PCO)	6 MPa
Reference tensile strain rate(E0T)	3.000e-12 s <sup>-1</sup>	Porosity exponent(NP)	3

### 3.2 模型有效性验证

依据试验中应变片实际粘贴位置，确定数值模型中应力输出单元的对应点位，提取入射杆与透射杆指定位置处的应力时程曲线，并采用三波法开展应力平衡验证（见图 15）。由图可知，入射波应力与反射波应力之和同透射波应力曲线拟合程度较高，试件加载过程满足应力平衡要求，验证了该数值模型的可靠性与准确性。

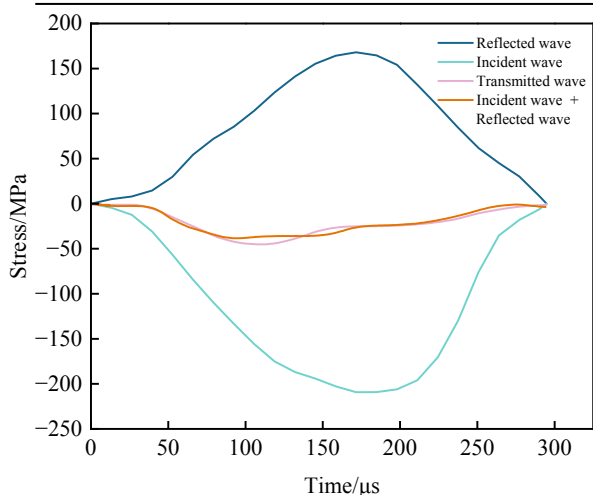


图 15 应力平衡验证

Fig. 15 Verification of stress equilibrium

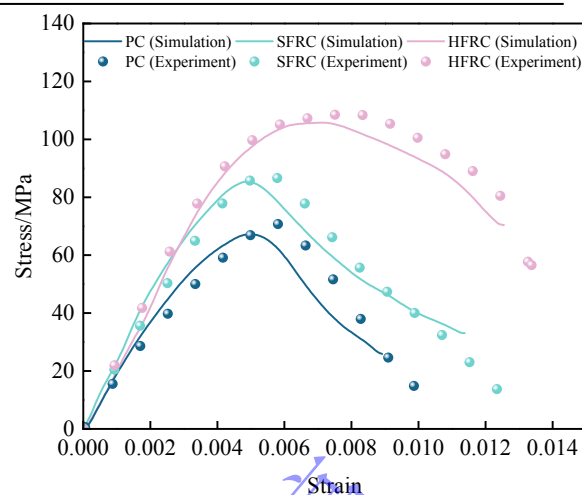


图 16 不同试件的试验曲线和模拟曲线对比

Fig. 16 Comparison of experimental and simulated curves

图 16 为不同试件在 0.4 MPa 冲击气压下的试验和模拟曲线，可见模拟的峰值应力和峰值应变均低于试验值，且软化段下降速率更快，原因在于在实际试验下，试件在荷载作用下其内部的初始缺陷、孔隙会被压实紧密，而在模拟中则未充分考虑这一点。并且对于 HFRC 与 SFRC，试验中纤维的桥接阻裂、拔出耗能等增韧机制充分发挥作用，而在模拟中则未能较好模拟出纤维-基体界面的真实力学行为。整体而言，模拟结果与试验结果仍表现出较好的一致性，三组试件的峰值应力相对误差均小于 5%，验证了所建细观模型与本构参数选取的合理性。

### 3.3 损伤破坏分析

图 17 为 HFRC 在 0.5 MPa 冲击气压下的破坏过程，冲击加载初期，应力波主要作用在试件加载端面与约束端面，存在较小的塑性变形区域。随着应力波的加载，微裂纹沿骨料-砂浆界面萌生。在 0.78 ms 时，裂纹持续扩展，骨料仍保持较好的完整性。当冲击能量达到峰值时，宏观裂纹贯通，砂浆基体大范围破碎，骨料与砂浆的黏结失效，骨料出现破碎，但整体仍保持刚性骨架结构，避免了试件整体崩落。混杂纤维通过拔出、断裂及界面摩擦耗散能量，桥接破碎区域，使试件保持一定残余整体性。

图 18 为 HFRC 应力-应变曲线对应状态下的有效塑性应变云图，在塑性阶段混凝土内部微裂纹萌生、扩展，塑性应变持续累积。达到峰值后，微裂纹大量贯通并集中发展，试件达到极限承载能力。进入应力卸载阶段后，由于混凝土内部微裂纹已大量贯通并形成宏观破碎带，材料损伤程度显著加剧，单元有效塑性应变持续累积，当单元的有效塑性应变达到临界阈值时，会被标记为失效单元并从计算模型中移除，导致低应变区域显著增多。

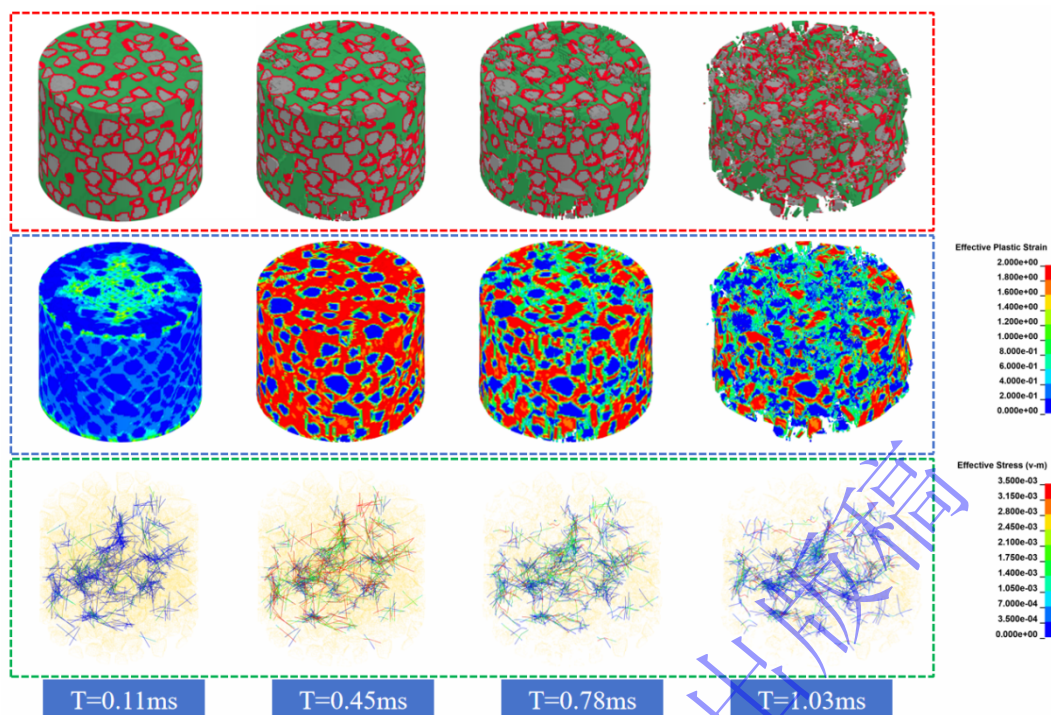


图 17 典型破坏过程云图

Fig. 17 Cloud diagrams of typical failure process

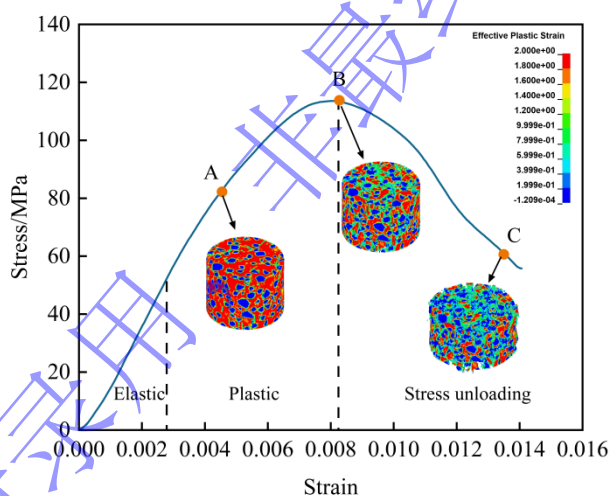


图 18 应力-应变曲线对应状态下的有效塑性应变云图

Fig. 18 Effective plastic strain nephograms at corresponding states of stress-strain curves

图 19 为 HFRC 在不同冲击气压下的最终破坏图。在 0.3 MPa 下，骨料基本保持完整，砂浆基体变形较小，ITZ 未出现大面积脱黏开裂。此时混杂纤维的桥接作用能够有效限制微裂纹的萌生与扩展，试件整体结构完整，仅表现为局部轻微损伤，未产生明显宏观破碎现象。在 0.4 MPa 下，砂浆基体出现大范围损伤破碎，ITZ 因强度较低发生脱黏与开裂，成为裂纹扩展的主要通道。随着破坏程度的加剧，砂浆基体和 ITZ 有效塑性应变不断累计并超过失效阈值，最终导致单元被删除。与此同时，部分骨料因应力集中出现局部损伤。但由于骨料整体仍保持连续的刚性骨架结构，混杂纤维充分发挥阻裂、增韧与耗能作用，使试件最终呈现破碎程度较大但整体不散的延性破坏特征。在 0.5 MPa 下，砂浆基体发生严重破碎与解体，ITZ 大范围失效并形成多条贯通裂纹，部分骨料出现贯穿性损伤甚至断裂。尽管混杂纤维仍能发挥一定的桥接与耗能作用，但在高压冲击作用下，纤维对裂纹扩展的抑制作用显著减弱。试件最终表现为整体破碎严重、结构完整性大幅降低的破坏形态。

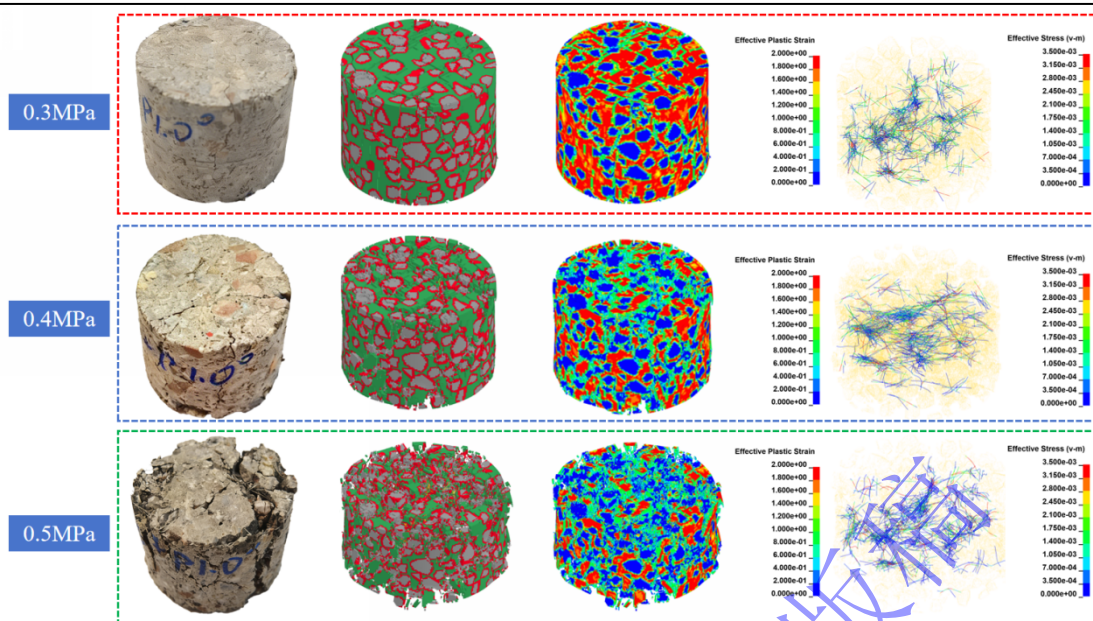


图 19 不同冲击气压下 HFRC 最终破坏图

Fig. 19 Final failure patterns of HFRC under various impact pressures

图 20 为不同试件在 0.4 MPa 冲击气压下的最终破坏图，由图可知，PC 内部产生多条贯通主裂纹，试件整体破碎程度最大，由于无纤维的约束作用，骨料、砂浆基体和 ITZ 有效塑性应变快速累积并达到临界阈值，对应单元被标记为失效并移除，低应变区域占比增加。SFRC 因 SF 的桥接与阻裂效应，宏观裂纹扩展受到明显抑制，试件整体完整性优于 PC。失效单元移除后，剩余基体与纤维仍能维持较好的承载能力，低应变区域占比虽有增加但幅度有限。HFRC 在不同纤维的协同作用下，体现出最优的抗冲击韧性，试件整体完整性保持最好。通过纤维有效应力云图可知，SF 通过桥接裂缝、分担应力，降低了单元塑性应变累积速率，推迟了失效阈值的触发。混杂纤维则通过协同作用，使单元失效更分散、更滞后。

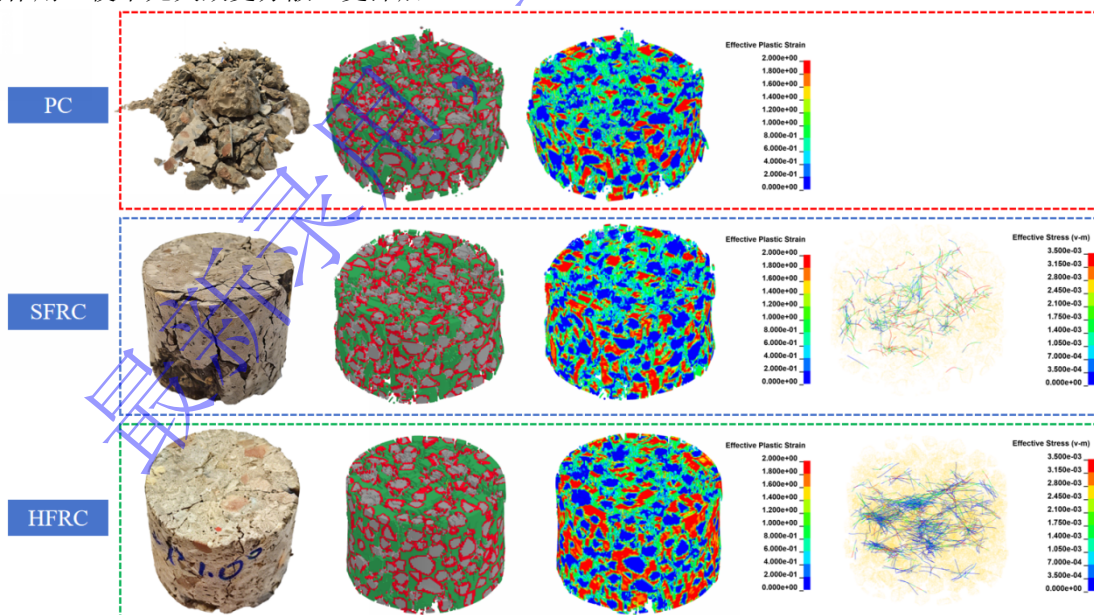


图 20 不同试件在同一冲击气压下的最终破坏图

Fig. 20 Final failure patterns of different specimens under the same impact pressure

### 3.4 能量特征分析

图 21(a-c)为不同冲击气压下，HFRC 各组分能量时程曲线。结果表明，随着冲击气压的升高，砂浆基体、ITZ、骨料及纤维的能量吸收均明显增大。其中，砂浆基体、ITZ 与骨料的能量时

程曲线均呈现先上升后下降的趋势，砂浆作为主要承载与耗能组分，其能量上升速率最快、峰值能量最大，随后因内部损伤加剧、承载能力下降，能量逐步下降；ITZ 作为混凝土内部薄弱环节，能量耗散量小于砂浆，后期因界面脱黏、开裂导致能量耗散能力下降，并且衰减速率最快，表明 ITZ 是冲击过程中最早发生损伤失效的薄弱区域。骨料因自身刚度较大，能量耗散量相对较小，主要承担荷载传递作用；SF 能量时程曲线整体平缓；POMF 能量时程曲线更为平缓，峰值时刻滞后于 SF，表明 POMF 主要在基体损伤进一步发展后参与耗能，并且其峰值耗能虽低于 SF，但可辅助提升材料的韧性与能量吸收能力。随着冲击气压从 0.3 MPa 提升至 0.5 MPa，砂浆基体、骨料及 ITZ 的内能峰值分别由 10.97 J、8.87 J、8.92 J 提升至 44.73 J、35.35 J、39.07 J，体现了冲击气压的提升对基体能量承载与耗散能力的强化作用；同时，SF 与 POMF 的内能峰值由 0.09 J、0.02 J 分别增至 0.53 J、0.17 J，表明高冲击气压下混杂纤维的耗能贡献增强，延缓了基体裂纹的扩展，使整体抗冲击性能得到了提升。

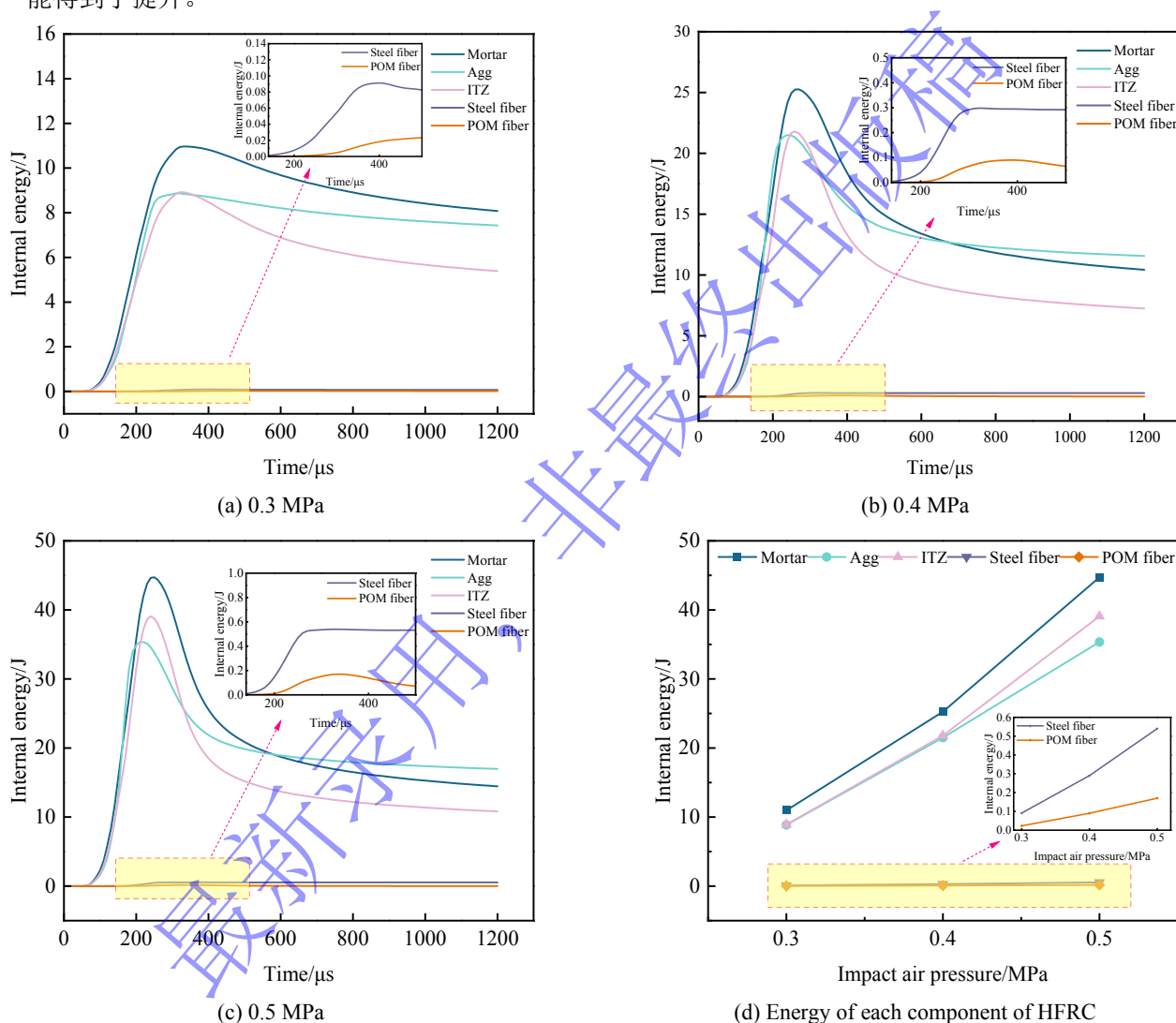


图 21 不同冲击气压下 HFRC 各细观组分能量时程曲线及各组分能量对比

Fig. 21 Energy time-history curves and energy comparison of each meso-component in HFRC under various impact pressures

图 22 为 0.5 MPa 下不同试件能量比，图 23 为各能量组分值，从中可看出，HFRC 内能占比和能量值最高，表明纤维的加入增强了试件的能量吸收能力；PC 动能占比和能量值最高，SFRC 和 HFRC 动能占比和能量值依次降低，这是因为纤维可有效抑制破碎的试件飞溅，减少动能损耗；反射能方面，HFRC 占比和能量值最低，表明纤维的加入可降低冲击能量的反射，使更多能量被试件吸收和耗散，其中混杂纤维的协同阻裂作用更显著，反射能损耗更少；HFRC 透射能占比和能量

值最高, 说明纤维增强后的试件可更有效地传递部分冲击能量; 在纤维能量方面, SFRC 中 SF 纤维的拔出、断裂及与基体的黏结滑移所耗散的能量为 18.97 J, HFRC 中 SF 和 POMF 发挥协同作用, 总纤维耗能达 24.89 J, 其中 POMF 通过拉伸变形与拔出摩擦耗散的能量为 6.2 J, 说明混杂纤维在能量耗散上更具优势。

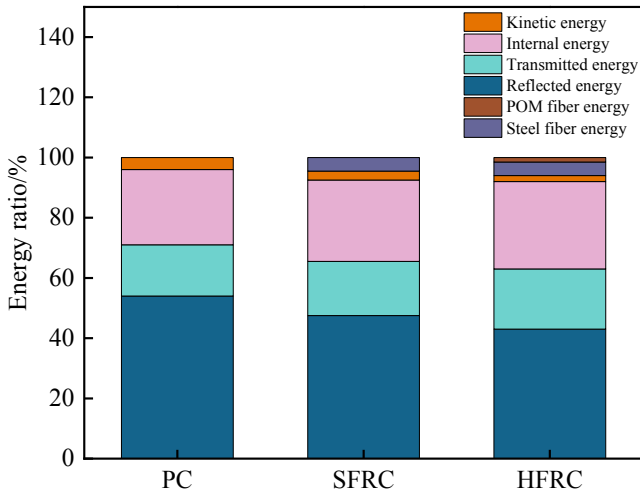


图 22 不同试件能量组分占比

Fig. 22 Proportion of energy components in different specimens

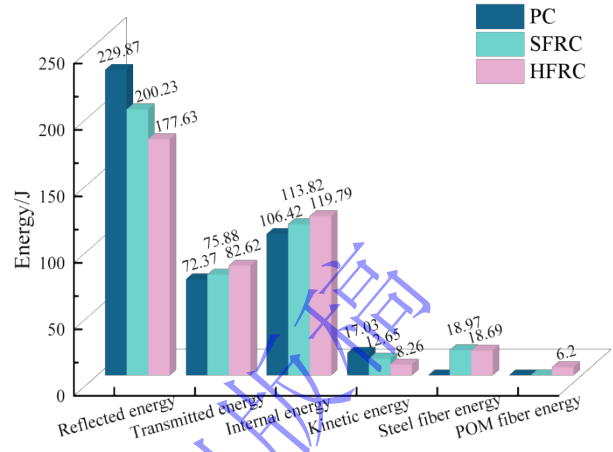


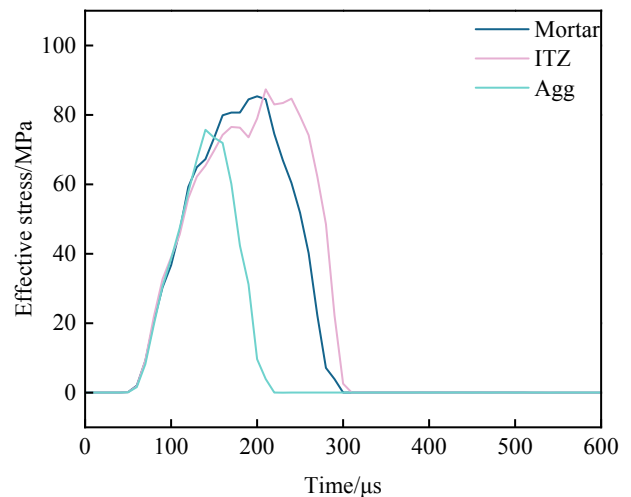
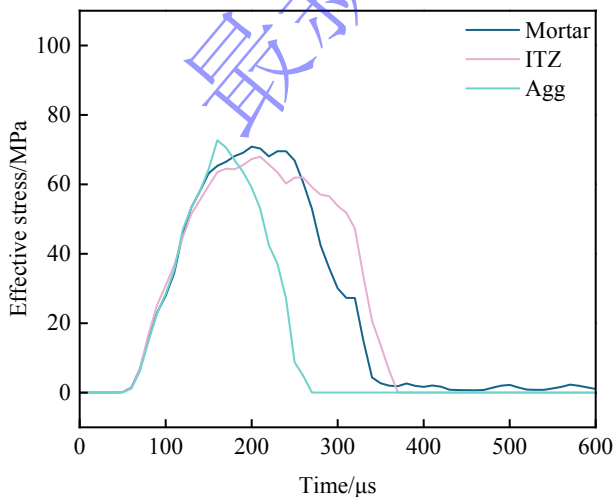
图 23 不同试件能量组分值

Fig. 23 Values of energy components for different specimens

### 3.5 应力特征分析

在骨料端部位置处选取不同细观结构上的单元, 绘制出有效应力时程曲线。由图 24(a-c)可以看出, 骨料有效应力达到峰值时间最早、下降速率最快, 这是因为在冲击荷载作用下, 应力波首先传入刚度最大的骨料, 使其更早进入应力快速累积阶段, 因此峰值出现时间早于 ITZ 与砂浆。当骨料应力累积至与 ITZ 黏结强度阈值时, 骨料与 ITZ 脱黏, 导致骨料承载能力骤降, 因此应力下降速率快于 ITZ 和砂浆。砂浆和 ITZ 有效应力时程曲线相似, 冲击气压为 0.3 MPa 时, ITZ 峰值有效应力低于砂浆, 这是因为在低冲击气压下, 由于 ITZ 孔隙多、强度较低, 微裂纹扩展并提前损伤软化, 峰值应力被限制; 而砂浆结构致密、强度高, 可持续累积应力至更高水平。当冲击气压为 0.4、0.5 MPa 时, ITZ 作为骨料和砂浆之间的过渡区, 产生显著的动态应力集中, 而砂浆作为连续均匀基体, 内部应力分布平缓, 导致 ITZ 峰值高于砂浆。

从图 24(d)中可以看出, 冲击气压从 0.3 MPa 提升至 0.5 MPa 时, 砂浆、ITZ 和骨料的峰值应力分别提升 32%、41%和 9.5%。其中, ITZ 的峰值应力提升幅度最大, 骨料的峰值应力提升幅度最小, 造成的原因可能是, ITZ 是砂浆与骨料之间的薄弱相, 初始强度低于砂浆与骨料, 再加上孔隙率高、微裂纹多, 在动态加载下更易产生应力集中。而骨料内部缺陷少、自身强度较高, 导致其峰值应力随冲击气压的提升增幅有限, 对加载速率变化的敏感性远低于 ITZ。



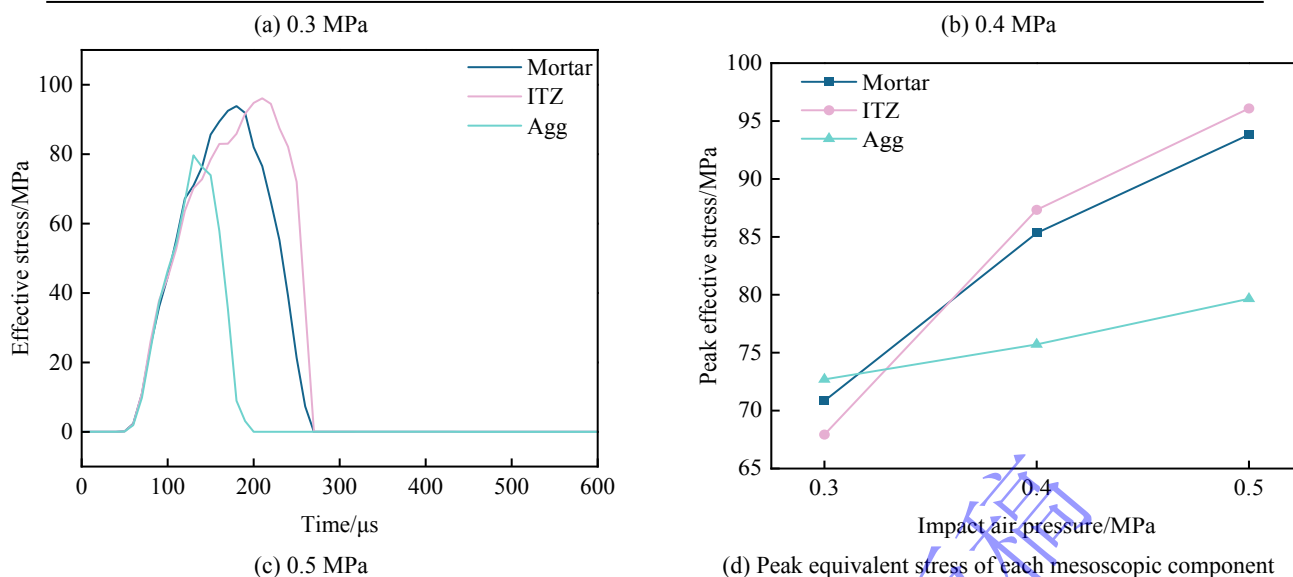


图 24 不同冲击气压下不同细观结构应力特征及各细观组分峰值有效应力对比

Fig. 24 Stress characteristics of different meso-structures and comparison of peak effective stress for each meso-component under various impact pressures

## 4 结 论

本研究对 PC、SFRC 及 HFRC 开展了静态压缩与动态冲击压缩试验，分析了不同冲击气压下试件的破坏形态、应力-应变曲线、应变率增强效应及能量特征；并采用 SEM 对纤维-基体界面结合行为进行了微观观测分析；建立了包含多面体骨料、砂浆基体、ITZ 与纤维的三维细观数值模型，从细观层面揭示了 HFRC 的损伤演化规律、能量耗散机制及应力分布特征。主要研究结论如下：

1. 在本文所采用的掺量组合下（SF 体积掺量 1%、POMF 体积掺量 1%，总纤维体积掺量 2%），POMF 可与 SF 产生协同增强效应，显著提升材料的抗压强度。HFRC 较 PC 静态抗压强度提升幅度为 27.12%，而 SFRC 提升幅度为 13.15%。在动态冲击压缩试验中，HFRC 表现出最优的动态抗冲击性能。

2. 冲击气压升高可显著增强 HFRC 各组分能量吸收能力；砂浆为主要耗能组分；ITZ 界面薄弱最早出现损伤失效，骨料以荷载传递为主、耗能贡献有限；SF 以拔出、断裂与黏结滑移耗能为主，耗能幅值更高；POMF 依靠拉伸变形与拔出摩擦耗能，耗能幅值较低，二者协同发挥作用，有效抑制试件破碎飞溅、减少能量反射与动能损耗，促进更多冲击能量被吸收耗散。

3. 骨料应力峰值最早出现但因界面脱黏快速下降；ITZ 与砂浆的应力演化规律相近，但其峰值应力受冲击气压影响显著：低气压下峰值应力低于砂浆；高压下峰值应力反超砂浆；随着冲击气压提升，各组分峰值应力均有提高，其中 ITZ 对加载速率最为敏感，增幅最大，而骨料因自身强度较高，敏感性与增幅均最小。

## 参考文献

- [1] DABHADE P, AMBADKAR S. Reinforcing resilience: A review of hybrid fibre effects on concrete's mechanical and impact characteristics [J]. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 2026, 11 (2). DOI:10.1007/s41024-025-00760-z.
- [2] SENAPATHI A, PEIRIS A. A comprehensive study of steel fiber alternatives on mechanical properties, long-term performance, and durability of ultra-high-performance concrete: A review [J]. Journal of Building Engineering, 2025, 108. DOI:10.1016/j.job.2025.112900.
- [3] 杨荣周, 王林兵, 陈佩圆, 等. SHPB 高低能冲击劈裂下钢纤维混凝土圆盘动态力学特征及损伤

- 断裂机理[J]. 振动与冲击, 2025, 44(20): 231-243+294. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2025.20.024.  
YANG R Z, WANG L B, CHEN P Y, et al. Dynamic mechanical characteristics and damage fracture mechanism of steel fiber reinforced concrete disks under high and low energy impact splitting of SHPB[J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(20): 231-243+294. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2025.20.024.
- [4] 李知尚. 共聚甲醛纤维混凝土力学性能及弯曲韧性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024: 4-5. DOI:10.27671/d.cnki.gcjtc.2024.001207.
- [5] 周至阳, 梅军鹏, 李海南, 等. 聚甲醛纤维增强砂浆的力学性能和干燥收缩试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(10): 3386-3393. DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2022.10.018.  
ZHOU Z Y, MEI J P, LI H N, et al. Experimental Study on Mechanical Properties and Drying Shrinkage of Polyoxymethylene Fiber Reinforced Mortar[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(10): 3386-3393. DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2022.10.018.
- [6] 王春生, 张洋, 段兰. 共聚甲醛纤维超高性能水泥基复合材料抗弯性能试验[J]. 复合材料学报, 2024, 41(01): 373-382. DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20230524.003.  
WANG C S, ZHANG Y, DUAN L. Bending Performance Test of Polyoxymethylene Fiber Ultra-high Performance Cement-based Composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(01): 373-382. DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20230524.003.
- [7] 张丽辉, 刘建忠, 周华新, 等. 聚甲醛纤维对混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2018 (1):58-62. DOI:10.19761/j.1000-4637.2018.01.013.  
ZHANG L H, LIU J Z, ZHOU H X, et al. Effect of Polyoxymethylene Fiber on Concrete Properties[J]. China Concrete and Cement Products, 2018(1):58-62. DOI:10.19761/j.1000-4637.2018.01.013.
- [8] TAN L, YANG J, LI C, et al. Effect of Polyoxymethylene Fiber on the Mechanical Properties and Abrasion Resistance of Ultra-High-Performance Concrete[J]. Materials, 2023, 16(21):16. DOI:10.3390/ma16217014.
- [9] 毛志坚, 朱志武. 低温下混凝土冲击动态力学性能的细观模拟[J]. 四川轻化工大学学报 (自然科学版), 2025, 38 (3):1-10.  
MAO Z J, ZHU Z W. Mesoscopic Simulation on Impact Dynamic Mechanical Properties of Concrete at Low Temperature[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering(Natural Science Edition), 2025, 38(3):1-10.
- [10] 陈猛, 李艺, 卢哲安, 等. 混杂纤维混凝土动态压缩性能试验及数值模拟研究[J]. 混凝土, 2015(08): 91-94.  
CHEN M, LI Y, LU Z A, et al. Experimental and Numerical Simulation Study on Dynamic Compression Properties of Hybrid Fiber Concrete[J]. Concrete, 2015(08): 91-94.
- [11] SOE T K, ZHANG Y, ZHANG L. Material Properties of a New Hybrid Fibre-reinforced Engineered Cementitious Composite[J]. Construction and Building Materials, 2013, 43: 399-407. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2013.02.021.
- [12] 龙广成, 李承洋, 张占森, 等. 混杂纤维增韧水泥基复合材料的静动态弯拉性能[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(02): 592-602. DOI:10.14062/j.issn.0454-5648.20230459.  
LONG G C, LI C Y, ZHANG Z S, et al. Static and Dynamic Flexural Tensile Properties of Hybrid Fiber Toughened Cement-based Composites[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2024, 52(02): 592-602. DOI:10.14062/j.issn.0454-5648.20230459.
- [13] WANG M, LI L, MA J, et al. Dynamic Compression Behaviors and Damage Mechanism of Hybrid Fiber Reinforced Cementitious Composites: Experimental and 3D Peridynamic Study[J]. Construction and Building Materials, 2025, 493: 143137. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2025.14313

- 7.
- [14] JIAN W L, DAO H L, LIU M, et al. Damping Characteristics of PVA Fiber-reinforced Cementitious Composite Containing High-volume Fly Ash Under Frequency-temperature Coupling Effects[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020(prepublish): 103911. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2020.103911.
- [15] L Q H, XIAO J, TIAN Z, et al. Experimental Investigation on Strain Rate Effect of High-performance Fiber Reinforced Cementitious Composites Subject to Dynamic Direct Tensile Loading[J]. *Cement and Concrete Research*, 2022, 157: 106825. DOI:10.1016/j.cemconres.2022.106825.
- [16] REN G M, H, et al. Effects of Steel Fiber Content and Type on Dynamic Compressive Mechanical Properties of UHPCC[J]. *Construction and Building Materials*, 2018.
- [17] ZHANG X, LI M, NIU J, et al. Dynamic Mechanical Properties of Steel-polypropylene Hybrid Fiber Reinforced Concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 485: 141927. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141927.
- [18] 冉秋硕, 徐泽辉, 齐文超, 等. 高温后钢-玄武岩混杂纤维混凝土动态力学性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2025, 44(01): 69-80. DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2024.0731.
- RAN Q S, XU Z H, QI W C, et al. Study on Dynamic Mechanical Properties of Steel-basalt Hybrid Fiber Concrete After High Temperature[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2025, 44(01): 69-80. DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2024.0731.
- [19] LI L, ZONG M, LI F, et al. Experimental Study on the Dynamic Compression Behaviors of Steel-polyethylene Hybrid Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composites Under Combined Static-dynamic Loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 477: 141234. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2025.141234.
- [20] XU Z, WU C, YU M, et al. Dynamic Compressive Behavior and Energy Absorption of SFR C[J]. *Journal of Building Engineering*, 2025, 106: 112554. DOI:10.1016/j.job.2025.112554.
- [21] HUANG F, WU H, JIN Q, et al. A Numerical Simulation on the Perforation of Reinforced Concrete Targets[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 32(1-4): 173-187. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2005.05.009.
- [22] HAO Y, HAO H, ZHANG X. Numerical Analysis of Concrete Material Properties at High Strain Rate Under Direct Tension[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 39(1): 51-62. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2011.08.006.
- [23] COTSOVOS D, PAVLOVIC M. Numerical Investigation of Concrete Subjected to High Rates of Uniaxial Tensile Loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 35(5): 319-335. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2007.03.006.
- [24] AI S, TANG L, MAO Y, et al. Numerical Analysis on Failure Behaviour of Polyurethane Polymer Concrete at High Strain Rates in Compression[J]. *Computational Materials Science*, 2013, 69: 389-395. DOI:10.1016/j.commat.2012.12.018.
- [25] LIU S, DU Z, WANG Y, et al. Study on the Dynamic Mechanical Properties of Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete Based on a 3D Microscopic Model[J]. *Buildings*, 2025, 15(24): 4427. DOI:10.3390/buildings15244427.
- [26] 张湘茹, 程月华, 吴昊. 基于 3D 细观模型的混凝土动态压缩行为分析[J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(02): 55-71.
- ZHANG X R, CHENG Y H, WU H. Analysis on Dynamic Compression Behavior of Concrete Based on 3D Mesoscopic Model[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(02): 55-71.
- [27] 义扬, 肖映雄, 余科. 任意多边形骨料混凝土细观模型的建立与数值模拟[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2025, 55(01): 97-107.

- YI Y, XIAO Y X, YU K. Establishment and Numerical Simulation of Mesoscopic Model of Concrete with Arbitrary Polygonal Aggregates[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2025, 55(01): 97-107.
- [28] ZHUO S, LI R Q, LI J, et al. Comparative Study on the Effect of Steel and Plastic Synthetic Fibers on the Dynamic Compression Properties and Microstructure of Ultra-high-performance Concrete (UHPC)[J]. Composite Structures, 2023, 324: 117570. DOI:10.1016/j.compstruct.2023.117570.
- [29] 李堂军, 李亮, 王子晨, 等. 钢-PE混杂纤维水泥基复合材料动态压缩性能试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(05): 1140-1148. DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230309004.
- LI T J, LI L, WANG Z C, et al. Experimental Study on Dynamic Compression Properties of Steel-PE Hybrid Fiber Cement-based Composites[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(05): 1140-1148. DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230309004.
- [30] TEDESCO J W, ROSS C A. Strain-rate-dependent constitutive equations for concrete[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1998, 120(4): 398-405. DOI:10.1115/1.2842350.
- [31] 吴彰钰, 张锦华, 余红发, 等. 基于三维随机细观模型的珊瑚混凝土力学性能模拟[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(11): 2518-2528. DOI:10.14062/j.issn.0454-5648.20210124.
- WU Z Y, ZHANG J H, YU H F, et al. Mechanical Property Simulation of Coral Concrete Based on Three-dimensional Random Mesoscopic Model[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(11): 2518-2528. DOI:10.14062/j.issn.0454-5648.20210124.
- [32] LIU J, LIKUN J, RENBO Z, et al. Mechanical Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete at Cryogenic Temperatures: Characterization with 3D Meso-scale Modelling[J]. Cold Regions Science and Technology, 2024, 219: 104110. DOI:10.1016/j.coldregions.2023.104110.
- [33] HE B, ONUAGULUCHI O, BANTHIA N, et al. Failure Mechanism of Steel Fiber Pullout in UHPC Affected by Alternating Cryogenic and Elevated Variation[J]. Cement and Concrete Composites, 2024, 149: 105518. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2024.105518.
- [34] ZHANG W, XU X, WANG H, et al. Experimental and Numerical Analysis of Interfacial Bonding Strength of Polyoxymethylene Reinforced Cement Composites[J]. Construction and Building Materials, 2019, 207: 1-9. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.02.122.
- [35] LUXIN G, RONGXIN G, YONG Y, et al. Dynamic Compression Mechanical Properties of Polyoxymethylene-Fiber-Reinforced Concrete[J]. Materials, 2022, 15(21): 7784. DOI:10.3390/ma15217784.
- [36] REN Q, PACHECO J, BRITO J D. 3D Mesoscale Modelling of Recycled Aggregate Concrete [J]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 21. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.134430.
- [37] ABDEL-KADER M. Modified Settings of Concrete Parameters in RHT Model for Predicting the Response of Concrete Panels to Impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 132: 103312. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2019.06.001.

## Dynamic Mechanical Properties and Mesoscopic

## Simulation of Steel-Polyoxymethylene Hybrid Fiber Reinforced Concrete

CAO Yibin<sup>1</sup>, CHEN Ruihao<sup>2</sup>, LANG Zhijun<sup>3</sup>, ZHANG Lidan<sup>2</sup>, ZHANG Wenyu<sup>2</sup>, LIU Lei<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Public Security and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

2. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

3. China Construction Seventh Engineering Division Corp., Ltd., Zhengzhou 450000, Henan, China)

**Abstract:** Aiming to reveal the dynamic mechanical properties and meso-damage characteristics of steel-polyoxymethylene hybrid fiber reinforced concrete (HFRC), split Hopkinson pressure bar (SHPB) tests were conducted to investigate the dynamic mechanical properties of plain concrete (PC), steel fiber reinforced concrete (SFRC), and HFRC. Scanning electron microscopy (SEM) was employed to observe the micromorphology and fracture characteristics of the fiber-matrix interface. A three-dimensional mesoscopic numerical model was established using LS-DYNA software, which incorporated polyhedral aggregates, mortar, interfacial transition zone (ITZ), and two types of fibers. The damage evolution, energy dissipation, and stress characteristics of HFRC were revealed from a mesoscopic perspective. The results show that polyoxymethylene (POM) fiber and steel fiber (SF) synergistically reinforce each other, significantly improving the dynamic impact resistance of the material. Specifically, SF exhibits strong bonding with the matrix and dissipates energy via interfacial slip, whereas POM fiber presents weak interfacial bonding and dissipates energy mainly through pull-out, fracture, and deformation. The crack resistance and energy dissipation capacity of the matrix are effectively enhanced when these two fibers function synergistically at different stages of crack propagation. Meso-simulations indicate that mortar serves as the primary energy-dissipating component, and ITZ is the weakest region that fails first under impact loading. With increasing impact air pressure, the energy absorption and peak stress of each component increase significantly. Hybrid fibers can reduce energy reflection and kinetic energy loss, facilitating more impact energy to be absorbed and dissipated. The peak stress of ITZ is the most sensitive to loading rate, while aggregate shows the lowest sensitivity. The established mesoscopic model well-reproduces the dynamic mechanical behavior and damage characteristics of HFRC, and thus providing theoretical and numerical references for the application of HFRC in impact-resistant engineering.

**Keywords:** hybrid fiber reinforced concrete; dynamic mechanical properties; mesoscopic simulation; energy dissipation; stress characteristics