

高应变率加载下应变硬化水泥基复合材料动态压缩行为及损伤特性

郭伟娜¹, 冯庆悦¹, 王彦懿¹, 金佳怡¹, 高立堂¹, 王鹏刚^{1,2}, 鲍玫文^{1,2}, 田玉鹏¹, 雷东移^{1,2}

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266520;

2. 青岛理工大学, 山东省蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛 266033)

摘 要: 为了解纤维增强水泥基复合材料在动态荷载下的抗冲击性能, 本工作通过霍普金森压杆试验研究高应变率下应变硬化水泥基复合材料(SHCC)的力学行为及损伤形式, 并利用高速数字相关图像(DIC)技术对冲击过程中 SHCC 表面全场应变演化形式进行分析; 同时, 采用 X-CT 对加载后 SHCC 的内部损伤进行扫描分析。结果表明: 高应变率加载下, 随着应变率的增加 SHCC 的动态峰值应力和吸能能力逐渐增加, 表明其具有应变率敏感性, 并发现动态峰值应力对应变率的敏感性要明显大于吸能能力; DIC 分析得到试样的竖向膨胀明显大于侧向压缩。据 X-CT 扫描结果可知, 试样边缘位置处裂缝数目要明显多于试样中心, 且裂缝分布较密, 同时同一起裂点位置处出现多条裂缝, 这是 SHCC 具有优异的动力学性能的重要原因。

关键词: 高应变率; 数字图像相关技术; 全场应变演化; 动态力学性能; 应变率效应

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)11-3250-08

网络出版时间: 2025-10-11



应变硬化水泥基复合材料(SHCC)是由 Li 等^[1]基于细观和断裂力学理论设计研发的新型工程材料。该材料在准静态拉伸荷载作用下展现出 3%~8% 的极限拉伸应变能力, 其变形性能约为普通混凝土的 300~800 倍^[1-4]。基于其卓越的力学特性, 该材料在日本已成功用于修复大坝和桥面板等, 而此类结构在服役期间不仅会承受静力荷载还可能受到动态冲击荷载的作用^[5-6]。研究表明, SHCC 在高应变率加载条件下仍保持多裂纹稳态扩展行为, 这种特有的裂纹演化机制是其具有优异抗冲击性能的重要表征, 且动态抗压强度与能量吸收能力均呈现显著的应变率强化效应^[7-11]。值得注意的是, Zhang 等^[12]、Wang 等^[13]、Huo 等^[14]、Trindade 等^[15]和 Khan 等^[16]通过数字图像相关技术(DIC)验证了不同应变率下 SHCC 仍具有稳定的多裂纹扩展特征, 同时结合声发射检测数据发现, 材料表面的损伤指标与应变率密切相关, 证实应变率参数对材料损伤演化过程存在显著调控作用。

为研究高应变率下 SHCC 的力学性能及损伤形式演变规律, 本文采用直径为 50 mm 的分离式

霍普金森杆试验系统(SHPB), 针对 SHCC 在高应变率作用下的动态压缩响应展开系统研究。通过高速 DIC 实时捕捉试件表面全场应变演化特征。结合 X 射线计算机断层扫描(X-CT)技术对动态失效试件进行三维断层扫描, 基于 Avizo 软件对试件内部细观损伤进行表征; 进一步借助扫描电子显微镜(SEM)对动态破坏试件结构形貌特征进行表征, 从细-微观尺度揭示高应变率加载下 SHCC 的损伤失效机理。

1 实验

1.1 试样制备

采用山东山水水泥集团有限公司生产的 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥(GB175-2023^[17])和平均粒径为 6~7 μm 的粉煤灰作为胶凝材料, 其中水泥平均粒径约为 27 μm , 而 3~30 μm 的颗粒占比约为 70%。试验中所用粉煤灰(一级粉煤灰, GB1596-2017^[18])的烧失量为 0.96%(质量分数, 具体组分见表 1), 其中粒径小于 10 μm 的颗粒占 80%以上; 利用石英砂(GB/T 32649-2016^[19])作为细骨料, 其最大粒径为

收稿日期: 2025-04-30。 修订日期: 2025-06-04。

基金项目: 国家自然科学基金(U23A20673, 52478261, 52508281)。

第一作者: 郭伟娜(1992—), 女, 博士, 讲师。

通信作者: 田玉鹏(1991—), 男, 博士, 副教授。

Received date: 2025-04-30. Revised date: 2025-06-04.

First author: GUO Weina (1992—), female, Ph.D., Lecturer.

E-mail: guoweina@qut.edu.cn

Correspondent author: TIAN Yupeng (1991—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: tianyupeng@qut.edu.cn

0.3 mm；试验用水为青岛市自来水；减水剂为聚羧酸减水剂，其减水率高达 30%；纤维选用日产 PVA 纤维，其具体性能参数见表 2，材料配合比详见表 3。

表 1 粉煤灰的化学成分
Table 1 Chemical composition of fly ash

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
52.46	32.12	5.23	4.27	0.63	1.14	1.54	0.51	1.65	0.45

w is mass fraction.

表 2 PVA 纤维的性能参数
Table 2 Performance parameters of PVA fibers

Diameter/ μm	Length/mm	Tensile strength/MPa	Elongation/%	Elastic modulus/GPa	Density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Melting point/ $^{\circ}\text{C}$
40	12	1560	6.5	41	1300	230

表 3 SHCC 的配合比
Table 3 Mix proportion of SHCC

Cement	Fly ash	Silica sand	Water	PVA fiber	Superplasticizer
550	650	550	301	26	7

将拌合物在砂浆搅拌机中拌合完成后，将浆体分别浇筑在 $\phi 48\text{ mm}$ ，厚度为 25 mm 的圆柱体和边长为 70.7 mm 的立方体模具中，并对其进行振捣，振捣完成后，将其静置在试验室 24 h 后拆模，然后将拆模后的样品放置于标准养护室内，养护到期后进行相关力学试验。

1.2 SHPB 试验

利用 $\phi 50\text{ mm}$ SHPB 对 $\phi 48\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 圆柱体进行高应变率冲击加载试验。

在试验前，首先对装置进行空撞以得到波形较好的冲击波。冲击试验过程中，冲击波遵从一维应力波和均匀性假定，然后利用应变片测得波形变化，通过计算得到高应变率加载过程中试样的应力 $[\sigma_s(t)]$ 、应变 $[(\varepsilon_s(t))]$ 和应变率 $[\dot{\varepsilon}_s(t)]$ 的计算公式为式(1)~式(3)^[20-21]。

$$\sigma_s(t)=\frac{E_0A_0}{A_s}\varepsilon_t(t) \tag{1}$$

$$\varepsilon_s(t)=\frac{2C_0}{l_s}\int_0^t\varepsilon_t(t)dt \tag{2}$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t)=\frac{2C_0}{l_s}\dot{\varepsilon}_t(t) \tag{3}$$

式中： E_0 、 A_0 和 C_0 分别为入射杆的弹性模量，横截面面积和冲击波速度； l_s 和 A_s 分别为试样的厚度和横截面面积； ε_t 和 ε_r 分别表示透射应变和入射应变。

1.3 DIC

在 SHPB 冲击加载过程中，利用高速工业相机(帧率为 60 000 fps)对整个加载过程进行拍照并记

录，同时采用 DIC 实时分析试样表面全场应变的演变过程。为了增加试样表面对比度，故采用哑光漆喷洒在测试样品的表面，进而在样品表面产生随机分布的黑白散斑^[22]，并采用商业软件 VIC-2D 对相机所拍的数字图片进行分析，最终得到冲击加载过程中试样的全场应变变化。

1.4 冲击损伤测试

当前水泥基复合材料的损伤评价体系多聚焦于表面裂纹的形态分析，缺乏对材料内部裂纹分布形式的分析。为系统解析动态冲击作用下材料内部损伤演化机制，采用实验室级 X-CT 对高应变率加载失效试件进行亚微米级三维扫描。基于 Avizo 图像处理软件，对动态冲击失效试样内部裂缝形貌、走向、数目等关键形态参数进行测定；进一步结合 SEM 对动态断裂界面进行微观形貌观测，重点观测纤维失效形貌、基体断裂形式等区域，揭示高应变率下纤维失效行为及基体损伤行为的跨尺度关联机制。

2 结果与讨论

2.1 动态压缩应力-应变曲线

图 1 表示在动态加载条件下 SHCC 的动态应力-应变曲线，该曲线系统揭示了材料在不同应变率(100~200 s^{-1})作用下的应力-应变演化规律。试验结果表明，SHCC 的动态力学行为呈现典型的三阶段特征：线弹性变形阶段、非线性应变硬化阶段及损伤软化阶段。其中，应变硬化阶段的形成与动态荷载作用下材料内部微裂纹的闭合效应密切相关，裂缝面的摩擦作用导致有效承载面积增加，致使试样的动态应力出现一定程度的提高。另外，从图中可以看出 SHCC 在不同应变率的荷载加载下的弹性阶段也表现出一定程度的差异性。

由图 1 可见，应变率越高，SHCC 的动态压缩

应力-应变曲线的上升段越长, 峰值应力也相应提高, 同时其所对应的峰值应变也有一定程度的改变, 表明 SHCC 动态应力-应变曲线具有明显的应变率依赖性; 同时, 在不同应变率加载下, 试样的动态压缩应力-应变曲线具有明显差异, 在应变率分别为 $118, 130, 143, 150 \text{ s}^{-1}$ 和 157 s^{-1} 时, 随着试样动态应变的增加, 应力的增加幅度相对较小, 表现出轻微的应变硬化行为, 这与微孔洞/微裂纹体系的渐进性压密过程相关^[23]; 而当应变率为 180 s^{-1} 和 188 s^{-1} 时, 试样并未出现应变硬化行为, 表明在高应变率加载下, 试样的应变硬化行为与所施加的应变率有关, 这种力学响应转变可归因于动态加载时间效应; 在低应变率条件下, 基体黏弹性响应与纤维桥接作用协同促进裂纹稳定扩展; 而高应变率加载导致应力波传播速率远超材料损伤演化速度, 易引发应力局域化效应, 致使裂纹分叉抑制和能量耗散机制失效。

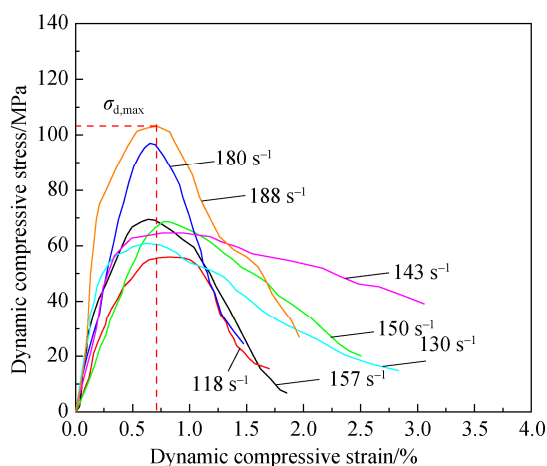


图1 不同应变率加载下 SHCC 的应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of SHCC under different strain rate loading

2.2 高应变率加载下 SHCC 动态压缩性能参数

2.2.1 高应变率加载下 SHCC 的动态峰值应力 ($\sigma_{d, \max}$) 在高应变率荷载作用下, SHCC 的 $\sigma_{d, \max}$ 为动态压缩应力-应变曲线上应力最大值。图 2 表示在不同应变率加载下 SHCC 的 $\sigma_{d, \max}$ 的变化形式。试验结果表明, SHCC 的 $\sigma_{d, \max}$ 随着应变率的增加而增加, 表现出明显的应变率强化效应。当应变率从 118 s^{-1} 增加至 157 s^{-1} 时, $\sigma_{d, \max}$ 从 55.92 MPa 增加至 69.48 MPa , 相对增幅达 24.2% ; 当应变率增加至 188 s^{-1} 时, 动态峰值应力快速上升至 103.2 MPa , 相对增幅达 84.54% , 呈现出显著的应变率强化效应, 同时表明施加的应变率较高时, SHCC 的 $\sigma_{d, \max}$

增加幅度越大, 这是由于在高应变率加载下, 应力波传播时间远小于材料内部缺陷演化特征时间, 导致应力波优先通过基体晶粒、纤维增强等高强度区域传播, 造成局域化应力集中效应。同时, 试样自身的惯性效应引起的横向约束增强使得微裂纹扩展受到三维压应力的抑制, 最终导致材料的 $\sigma_{d, \max}$ 明显增加。

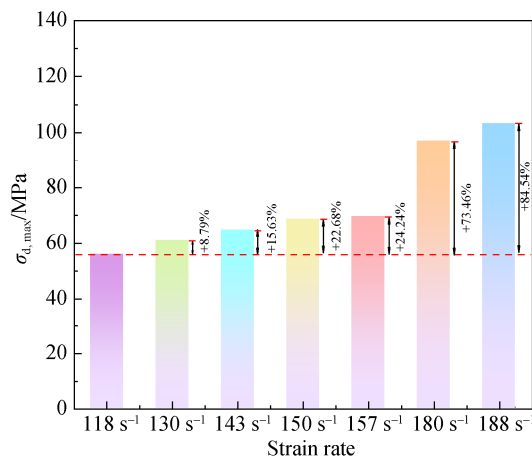
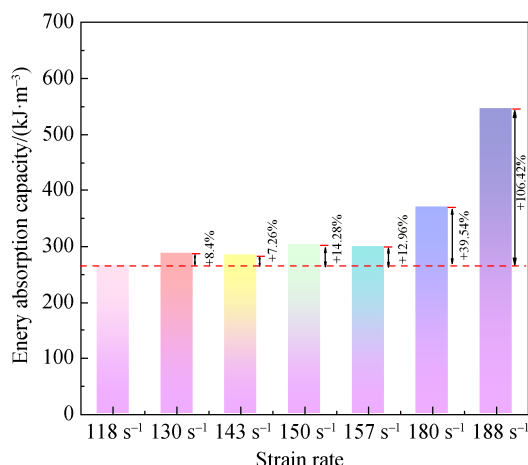


图2 不同应变率下 SHCC 的 $\sigma_{d, \max}$ 变化形式

Fig. 2 Evolution of $\sigma_{d, \max}$ of SHCC under different strain rate

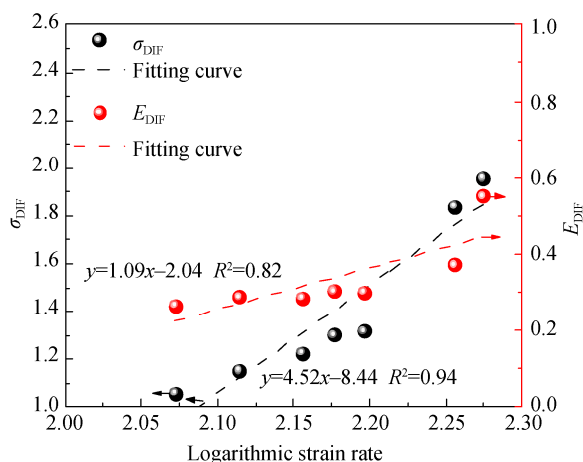
2.2.2 高应变率加载下 SHCC 的动态吸能能力 (E_d)

E_d 是材料在动态荷载作用下的强度和变形的综合性能, 动态峰值应力-应变曲线下的面积代表动态荷载在试样变形上所作的功, 能够明显的反映材料在高应变率加载下的韧性^[24], 其物理意义是表征材料在单位体积内通过损伤演化耗散冲击动能的能力。图 3 表示 SHCC 在高应变率加载下的 E_d 变化情况。从图 3 可以得到, SHCC 的 E_d 随着应变率的增加而逐渐增加, 表现出明显的应变率强化效应。试验结果表明, 当应变率从 118 s^{-1} 增加至 157 s^{-1} 时, 材料的 E_d 从 264.5 kJ/m^3 增加至 298.78 kJ/m^3 , 增加幅度约为 12.96% ; 而当应变率突破 180 s^{-1} 后, E_d 呈现近似指数型增长趋势, 在 188 s^{-1} 时达到 546.12 kJ/m^3 , 其相对增幅约为 106.42% , 表现出显著的应变率强化效应, 这种吸能能力的跃升大多是由于多尺度损伤机制的协同作用, 微观表征证实, 超高应变率下材料内部裂纹密度较常规应变率条件有所提升, 且纤维桥接作用导致 PVA 纤维呈现多段式断裂形貌, 形成分级能量吸收体系; 而在宏观力学方面, 惯性效应引起横向约束增强抑制了主裂纹的产生和扩展, 迫使裂纹分叉形成三维网状结构, 有效提升裂纹表面能密度, 以上均是造成高应变率加载下 SHCC 吸能能力增加的重要原因。

图 3 高应变率加载下 SHCC 的 E_d 变化情况Fig. 3 Variation E_d of SHCC under high strain rate loading

2.2.3 高应变率加载下 SHCC 的动态增长因子 经试验测得 SHCC 的静态抗压强度和吸能能力分别为 52.67 MPa 和 989.4 kJ/m³, 本工作利用动态应力增长因子(σ_{DIF} , 动态与静态峰值应力之比)和动态能量增长因子(E_{DIF} , 动态与静态吸能能力之比)表征应变率对材料的 $\sigma_{d,max}$ 和 E_d 的影响^[25], 并建立应变率对数与 DIF 之间的关系, 具体形式如图 4 所示。

图 4 建立了 σ_{DIF} 、 E_{DIF} 随应变率对数演化的本构关系模型, 基于 CEB-FIP 规范推荐的动态效应关系模型, 构建了适用于 SHCC 的动态增长因子模型, 如式(4)~式(5)所示。试验结果表明, 在加载应变率内 σ_{DIF} 、 E_{DIF} 随着应变率对数的增加而呈线性增加趋势, 这与相关文献的结果变化形式相近^[5, 8-9]。当应变率为 188 s⁻¹ 时, σ_{DIF} 数值最大时可以达到 1.9, 表明动态峰值应力较准静态条件提升近 93%。对比分析 σ_{DIF} 和 E_{DIF} 得到, 在同一应变率加载下, 动态

图 4 高应变率加载下 SHCC 的 σ_{DIF} 及 E_{DIF} 变化形式Fig. 4 Evolution of σ_{DIF} and E_{DIF} of SHCC under high strain rate

应力增长因子明显大于动态能量增长因子, 且动态应力增长因子的变化幅度也明显大于动态能量增长因子, 这表明动态峰值应力的应变率敏感性要大于吸能能力, 即动态峰值应力更易受应变率的影响。导致这种差异的原因是由于材料损伤机制的应变率依赖性, 动态应力的提升主要受惯性约束效应主导, 吸能能力变化则与裂纹分形扩展及纤维桥接耗能等黏塑性耗散机制密切相关。

$$\sigma_{DIF} = 4.52 \log \dot{\epsilon} - 8.44 \quad R^2 = 0.94 \quad (4)$$

$$E_{DIF} = 1.09 \log \dot{\epsilon} - 2.04 \quad R^2 = 0.82 \quad (5)$$

2.3 全场动态应变场分析

采用高速 DIC 技术对动态加载全过程进行实时图像采集与定量分析, 通过位移场微分计算获得试样表面动态应变场的时空演化特征。图 5 表示在应变率为 157 s⁻¹ 条件下 SHCC 的全场动态应变分布规律: 加载初期(图 5a), 材料表面呈现均匀分布的横向应变场; 随着加载时间增加, 表面逐渐形成交替分布的正负应变区域, 此现象源于材料内部微孔洞及微裂纹等细观缺陷引发应力局部化应变分布; 加载中期, 试样端部出现动态迁移的局部化应变区, 而其余区域仍保持相对均匀的应变分布; 加载后期, 虽然局部化应变呈现扩展趋势, 但得益于 PVA 纤维的桥联作用, 表面裂纹扩展速率降低, 而是在短时间内表现为稳定的裂纹发展特征。

图 5b 表示在应变率为 157 s⁻¹ 条件下, SHCC 试样表面纵向动态应变的演变机制: 在初始加载阶段, 纵向应变场呈现均匀分布特征, 应变最大值主要集中在试样上、下端部区域; 随着荷载持续作用, 表面负应变区呈现渐进扩展趋势, 并伴随应变集中带的形成, 此时试件下部仍维持全场的最大应变水平; 在后续加载过程中, 负应变区进入缓变发展阶段, 其空间分布趋于稳定; 当应力波传播至临界区域时, 表面应变达到峰值并引发宏观裂纹萌生, 裂纹持续扩展直至加载终止。对于纵向应变的全过程观测表明, 纵向动态应变场呈现先增后减的双阶段演变特征, 反映出 SHCC 在动态荷载作用下能量积累与耗散的竞争机制。

通过对比 SHCC 在高应变率(157 s⁻¹)动态加载过程中的多轴应变响应特征发现: 横向与纵向动态应变虽具有相似的时空演化规律, 但纵向主应变幅值显著高于横向应变, 此力学响应差异表征了 SHCC 在冲击荷载作用下的体积膨胀效应。

对比高应变率加载下 SHCC 的横向和纵向动态

应变可知,随着加载时间的增加,试样表面横向动态应变变化形式与纵向动态应变变化形式一致,但

试样纵向动态应变明显大于其横向动态应变,表明在动态加载过程中试样出现膨胀。

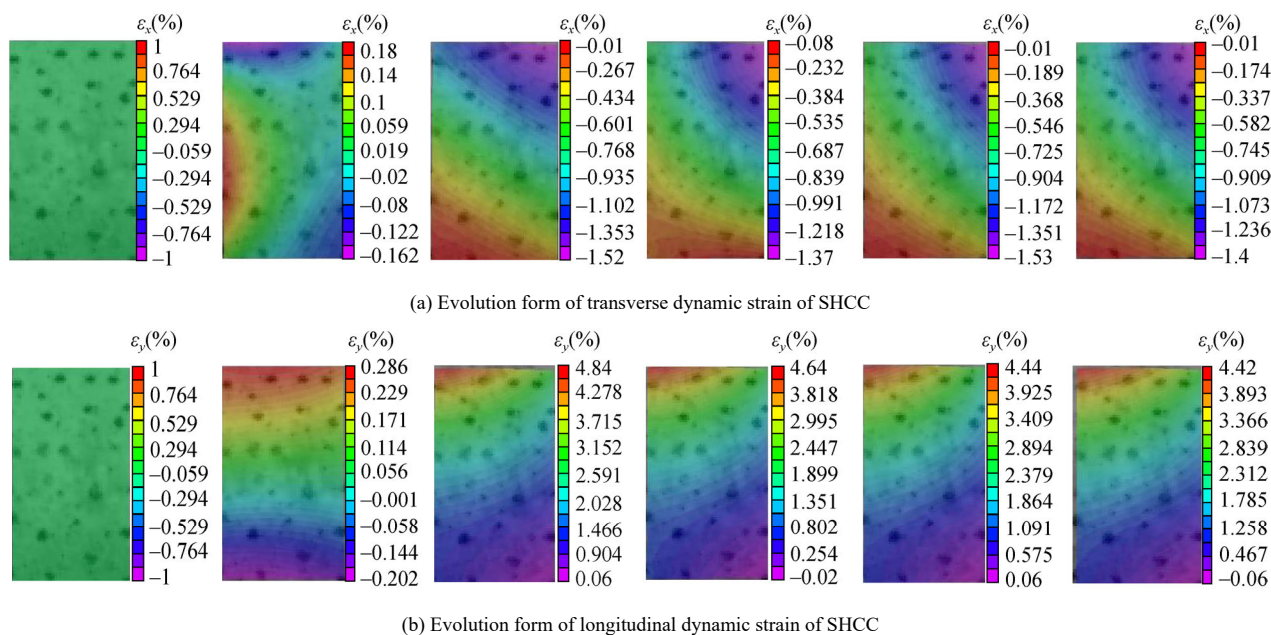


图 5 高应变率加载下 SHCC 全场动态应变演化形式(157 s^{-1})

Fig. 5 Evolution form of full-field dynamic strain of SHCC under high strain rate loading (157 s^{-1})

2.4 高应变率加载后 SHCC 的内部损伤形式及微观结构分析

2.4.1 高应变率加载后 SHCC 的内部损伤形式 X-CT 是一种有效监测物体内部结构和损伤形式的无损测试技术^[26],为了得到 SHCC 试样内部在高应变率加载下的内部损伤形式,利用 X-CT 技术对应变率为 157 s^{-1} 的试样进行扫描。图 6 表示了应变率为 157 s^{-1} 时试样的损伤演化特征。通过断层扫描数据发现,试样内部裂缝呈现显著的空间梯度分布特征,表面裂缝密度要明显高于试样中部区域,这种分布差异主要是由于试样中部多重约束条件形成的三维应力屏障效应;裂缝扩展形式分析表明,大多裂缝呈现由表及里的放射状分叉扩展,同一起裂点衍生多条次生裂纹,此现象表明了基体开裂所需能量显著高于裂纹扩展

所需能量的阈值。同时从图 6 可以看出,试样边缘出现剥落,但由于试样内部纤维的桥联作用,有效抑制了基体的脱离。从 CT 切片可知,试样内部裂缝曲折度不同,部分裂缝走向近似直线,这主要是由于在动态荷载作用下,动态能量吸收较快,在极短时间内裂缝会沿着能量吸收最快的方向扩展,进而使试样内部裂缝呈直线扩展,穿过强度较大的区域,这也是试样动态峰值应力高于静态峰值应力的重要原因。在动态荷载作用下,SHCC 内部出现多个起裂点,同时其内部破坏面积也较大。根据试样的破坏模式分析表明,SHCC 的动态增韧效应源自其特有的多裂纹协同耗能机制,试样失效时,其内部形成三维贯通的能量耗散网络,这也是 SHCC 具有优异的动力学性能的重要原因。

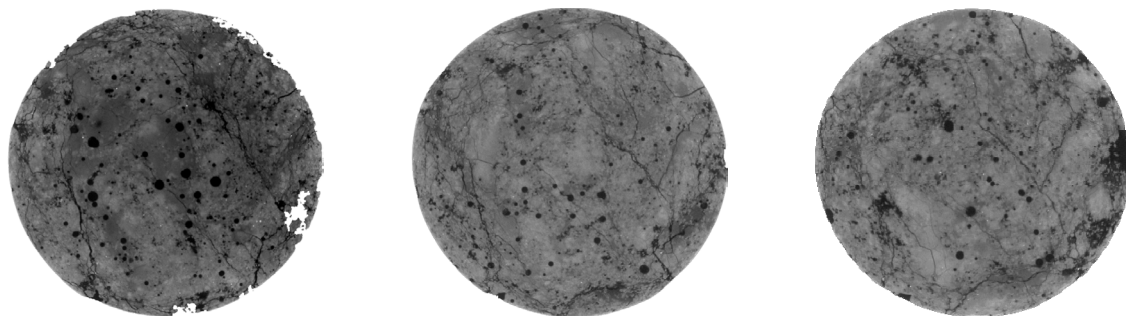


图 6 高应变率加载下 SHCC 的内部损伤形式(157 s^{-1})

Fig. 6 Internal damage form of SHCC under high strain rate loading (157 s^{-1})

2.4.2 高应变率加载后 SHCC 内部微观结构分析 利用 SEM 对动态加载(150 s^{-1})后 SHCC 断裂界面进行微观结构观测。微观形貌分析表明: PVA 纤维主要呈现典型拔出失效模式, 且未出现明显的颈缩现象, 证实动态荷载作用下纤维主要发挥桥联作用而非拉伸断裂形式; 纤维表面呈现轴向条纹, 表明纤维出现塑性变形, 纤维拔出过程会吸收部分冲击能量, 这是 SHCC 具有优异的动态力学性能的原因之一^[27]。同时, 纤维表面粗糙度较原始状态显著增加, 这种界面摩擦增加了材料的吸能能力。由图 7 可见, 纤维表层附有部分水化产物(C-S-H 凝胶和氢氧化钙等)且出现轻微划痕, 这主要是因为纤维具有亲水性, 因此其与浆体之间的粘结力较大。高应变率加载下, 纤维被快速拔出, 表面出现划痕, 这增加了材料的吸能能力, 同时也增加了纤维被拔断的可能, 这是 SHCC 具有优异的动态力学性能的重要原因。

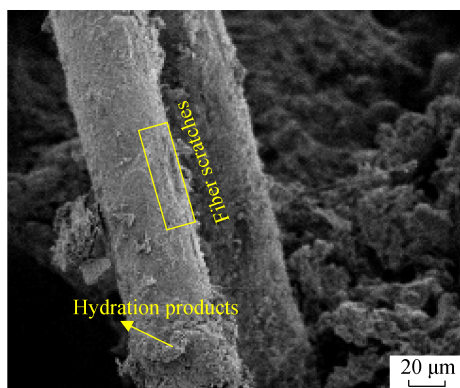


图 7 冲击加载后 SHCC 的微观形貌(150 s^{-1})

Fig. 7 Microstructure of SHCC under high strain rate (150 s^{-1})

3 结论

1) 在高应变率加载下, 随着应变率的增加, SHCC 的 $\sigma_{d,max}$ 和 E_d 逐渐增加, 表明材料具有显著的应变率效应, 同时 SHCC 的 $\sigma_{d,max}$ 和 E_d 与应变率之间近似呈线性关系。

2) 构建了 SHCC 的动态峰值应力、吸能能力的 DIF 与应变率对数的本构模型, 定量表征了 SHCC 的应变率效应, 且动态峰值应力、吸能能力的 DIF 均随着应变率对数呈线性增加趋势, 但动态峰值应力的 DIF 值明显大于吸能能力的 DIF 值, 表明 SHCC 的动态峰值应力对应变率变化更为敏感。

3) 通过高速 DIC 揭示了 SHCC 在高应变率加载下的表面应变场演化机制: 初始加载阶段, 试样表面应变呈现均匀分布; 随着应力波传播进入发展阶段, 表面最大主应变逐渐增加, 并形成应变集中

带; 加载后期, 局部化区内萌生主裂纹, 裂纹尖端三向应力状态引发二次应变集中, 最终导致材料失稳破坏。该演化过程证实动态破坏本质是应力波传播与材料损伤累计协同作用下的渐进失效过程。

4) 基于 X-CT 扫描结果可知, 高应变率(157 s^{-1})加载后试样边缘区域裂纹密度较内部显著增加, 这主要是由于试样内部三维约束应力作用; SHCC 内部呈现多重裂纹分叉特征, 同一起裂点产生多条裂缝, 这也是 SHCC 在冲击荷载作用下具有高吸能能力的重要原因。

参考文献:

- [1] LI Victor C., Wang Shuxin, Wu Cynthia. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineering cementitious composite (PVA-ECC) [J]. ACI Materials, 2001, 98(6): 483–493.
- [2] LI Z Y, LU B, FENG J H, et al. Development of engineered cementitious composites/strain-hardening cementitious composites (ECC/SHCC) with waste granite fine powders[J]. Constr Build Mater, 2023, 409: 133883.
- [3] YU K Q, WANG Y C, YU J T, et al. A strain-hardening cementitious composites with the tensile capacity up to 8%[J]. Constr Build Mater, 2017, 137: 410–419.
- [4] LI Z H, ZHOU J J, LEUNG C K Y. Fiber orientation distribution in strain hardening cementitious composites (SHCC): Experimental investigation and consideration of processing effect[J]. Cem Concr Res, 2023, 170: 107190.
- [5] LI V C. On engineered cementitious composites (ECC)[J]. J Adv Concr Technol, 2003, 1(3): 215–230.
- [6] LI Q H, JIANG X, ZENG T, et al. Experimental investigation on strain rate effect of high-performance fiber reinforced cementitious composites subject to dynamic direct tensile loading[J]. Cem Concr Res, 2022, 157: 106825.
- [7] SNOECK D, DE SCHRYVER T, DE BELIE N. Enhanced impact energy absorption in self-healing strain-hardening cementitious materials with superabsorbent polymers[J]. Constr Build Mater, 2018, 191: 13–22.
- [8] CHEN Z T, YANG Y Z, YAO Y. Impact properties of engineered cementitious composites with high volume fly ash using SHPB test[J]. J Wuhan Univ Technol Mater Sci Ed, 2012, 27(3): 590–596.
- [9] GUO W N, WANG W T, CUI Y F, et al. Dynamic mechanical behavior and damage properties of SHCC under high strain rate loading[J]. J Mater Res Technol, 2023, 26: 6304–6315.
- [10] GUO W N, TIAN Y P, BAO J W, et al. Experimental investigation on dynamic compressive properties of SHCC after freeze-thaw cycles[J]. J Mater Res Technol, 2023, 24: 8357–8372.
- [11] YANG Enhua, LI Victor C. Rate dependence in engineered cementitious composites[J]. Mater Struct, 2005, 83–92.
- [12] ZHANG N, XU M F, SONG S, et al. Impact resistance of basalt fiber strain-hardening cementitious composites exposed to elevated temperatures[J]. Constr Build Mater, 2020, 262: 120081.
- [13] WANG S S, LE H T N, POH L H, et al. Effect of high strain rate on compressive behavior of strain-hardening cement composite in comparison to that of ordinary fiber-reinforced concrete[J]. Constr Build Mater, 2017, 136: 31–43.

- [14] 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.
- [15] TRINDADE A C C, HERAVI A A, CUROSU I, et al. Tensile behavior of strain-hardening geopolymer composites (SHGC) under impact loading[J]. *Cem Concr Compos*, 2020, 113: 103703.
- [16] KHAN M Z N, HAO Y F, HAO H, et al. Experimental evaluation of quasi-static and dynamic compressive properties of ambient-cured high-strength plain and fiber reinforced geopolymer composites[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 166: 482–499.
- [17] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB 175—2023 通用硅酸盐水泥[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [18] 中国建筑材料科学研究总院、长江水利委员会长江科学院、上海市建筑科学研究院、中国长江三峡集团公司、株洲宏信特种建材有限公司、厦门艾思欧标准砂有限公司. GB/T 1596—2017 用于水泥和混凝土中的粉煤灰[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [19] 国家硅材料深加工产品质量监督检验中心、东海县产品质量监督检验所、中国建材检验认证集团股份有限公司、连云港福东正佑照明电器有限公司、江苏太平洋石英股份有限公司、中国电子技术标准化研究院. GB/T 32649—2016 光伏用高纯石英砂[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [20] KOLSKY H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[J]. *Proc Phys Soc Sect B*, 1949, 62(11): 676.
- [21] LI Q H, ZHAO X, XU S L, et al. Influence of steel fiber on dynamic compressive behavior of hybrid fiber ultra high toughness cementitious composites at different strain rates[J]. *Constr Build Mater*, 2016, 125: 490–500.
- [22] HUANG B T, LI Q H, XU S L, et al. Development of reinforced ultra-high toughness cementitious composite permanent formwork: Experimental study and Digital Image Correlation analysis[J]. *Compos Struct*, 2017, 180: 892–903.
- [23] LAO J C, HUANG B T, FANG Y, et al. Strain-hardening alkali-activated fly ash/slag composites with ultra-high compressive strength and ultra-high tensile ductility[J]. *Cem Concr Res*, 2023, 165: 107075.
- [24] KIM M J, CHOI H J, SHIN W, et al. Development of impact resistant high-strength strain-hardening cementitious composites (HS-SHCC) superior to reactive powder concrete (RPC) under flexure[J]. *J Build Eng*, 2021, 44: 102652.
- [25] CHEN Z T, YANG Y Z, YAO Y. Quasi-static and dynamic compressive mechanical properties of engineered cementitious composite incorporating ground granulated blast furnace slag[J]. *Mater Des*, 2013, 44: 500–508.
- [26] ZHU L, DANG F N, XUE Y, et al. Meso-scale damage detection and assessment of concrete under dynamic compression loading using X-ray computed tomography[J]. *Mater Charact*, 2021, 176: 111149.
- [27] PARK J W, CHOO B, BOLANDER J E, et al. Investigation of high strain rate effects on strain-hardening cementitious composites using Voronoi-cell lattice models[J]. *Cem Concr Compos*, 2024, 147: 105408.

Dynamic Compressive Behavior and Damage Characteristics of Strain-Hardening Cementitious Composite under High Strain Rate Loading

GUO Weina¹, FENG Qingyue¹, WANG Yanyi¹, JIN Jiayi¹, GAO Litang¹, WANG Penggang^{1,2}, BAO Jiuwen^{1,2},
TIAN Yupeng¹, LEI Dongyi^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, Shandong, China; 2. Cooperative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, Shandong, China)

Extended Abstract

Introduction Strain Hardening Cementitious Composite (SHCC) is one kind of engineered materials designed based on the principles of mesoscale and fracture mechanics. It exhibits a tensile strain capacity of up to 3%–8%, which are approximately 300–800 times greater than ordinary concrete. SHCC has been successfully used in the rehabilitation of dams and bridge decks in Japan owing to its excellent mechanical properties. These structures withstand not only static loads but also potential dynamic impact loads during service. To accelerate the application of SHCC in seismic-resistant structures, blast-resistant structures and other critical infrastructure, it is essential to have knowledge of its dynamic mechanical properties and failure mechanisms. Therefore, this study characterized the mechanical behavior and failure modes of SHCC under high strain rate loading using Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) testing, with high-speed digital image correlation (DIC) capturing full-field strain evolution on specimen surfaces during impact tests. X-ray computed tomography (X-CT) technology was used to observe the internal damage of SHCC after high strain rate loading. The influences of strain rate on the dynamic peak stress, energy absorption capacity, dynamic growth factor, full-field dynamic strain distribution, internal damage form and microstructure of SHCC were investigated.

Methods This study adopted Ordinary Portland cement 42.5 (GB175—2023, with an average particle size of 27 μm and the particles of 3–30 μm account for about 70%) and Class I fly ash (GB1596—2017, with a particle size less than 10 μm account for more than 80%) as cementitious materials. The quartz sands with a maximum particle size of 0.3 mm were used as fine aggregates. SHCC samples were prepared using PVA fiber produced by Kuraray, Japan. Meanwhile, the polycarboxylate superplasticizer (provided by Nanjing Subote New Materials Co., Ltd.) was added to enhance the workability, ensuring uniform fiber dispersion of the slurry.

After mixing, the slurry was cast into molds, followed by vibration, and demolded after a 24 h curing period under standard laboratory conditions. Specimens were then cured under standard conditions until testing age. Static compression tests were employed using 70.7 mm cube specimens. Moreover, dynamic properties were evaluated using a SHPB system with $\phi 48 \times 25$ mm cylindrical specimens. During impact loading, high-speed industrial camera was used to capture specimen deformation for subsequent VIC-2D digital image correlation analysis. The damaged SHCC samples after high strain rate loading were scanned using X-ray computed tomography and observed with scanning electron microscope (SEM).

Results and discussion The dynamic compressive stress-strain curve of SHCC presents typical three-stage characteristics under high strain rate loading: linear elastic deformation stage, nonlinear strain hardening stage and damage softening stage. Dynamic compressive stress-strain curves of SHCC exhibit strong dependence on strain rate. At higher strain rates, the dynamic compressive response of SHCC exhibits significant strain hardening, primarily governed by fiber bridging effects and secondarily enhanced by compaction of micro-defects. The dynamic peak stress of SHCC increases significantly with strain rate, demonstrating a pronounced strain rate sensitivity. Simultaneously, the dynamic peak stress of SHCC increases substantially at high strain rates. This enhancement primarily arises from the significantly shorter stress wave propagation time compared to the characteristic relaxation time of internal defects under high strain rate loading. Consequently, stress waves preferentially propagate through high-strength regions (*e.g.*, matrix grains and fiber reinforcements), inducing localized stress concentrations. The energy absorption capacity of SHCC increases with the increase of strain rate. When the strain rate exceeds 180 s^{-1} , E_d shows an approximate exponential growth trend, reaching 546.12 kJ/m^3 at 188 s^{-1} , with a relative increase of about 106.42%, demonstrating exponential growth behavior and significant strain rate strengthening. This energy absorption surge primarily stems from synergistic multi-scale damage mechanisms. At identical strain rates, the dynamic increase factor for stress demonstrates both a higher mean value and greater variability than that for energy, reflecting its stronger dependence on strain rate effects. This indicates greater strain rate sensitivity in dynamic peak stress than energy absorption capacity, confirming the dynamic peak stress is more susceptible to strain rate.

Conclusions The main conclusions of this paper are summarized as following. SHCC exhibits strain rate sensitivity of dynamic mechanical properties, with both peak stress and energy absorption capacity increasing significantly under high strain rate loading. The sensitivity of dynamic stress to strain rate is significantly greater than that energy absorption capacity. DIC analysis shows that the vertical expansion of the specimen is substantially more significant than the lateral compression. X-CT analysis reveals significantly denser crack distribution near specimen edges compared to the central region. Moreover, multiple cracks appear at the same crack point, which is an essential reason for the excellent dynamic mechanical properties of SHCC.

Keywords high strain rate; digital image correlation; full-field strain evolution; dynamic mechanical properties; strain rate effect